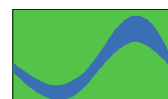
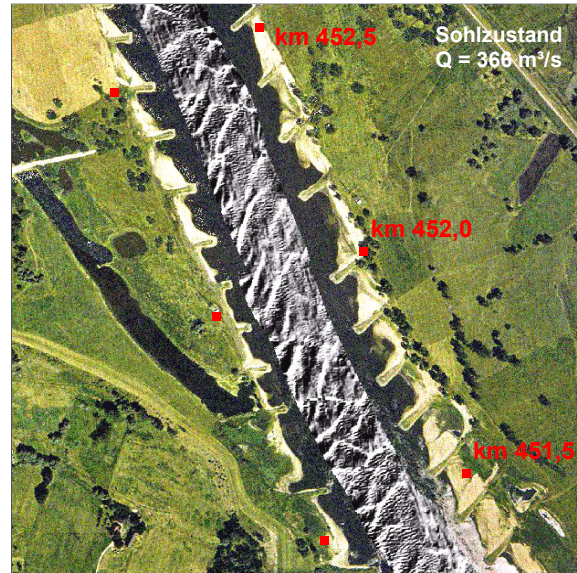
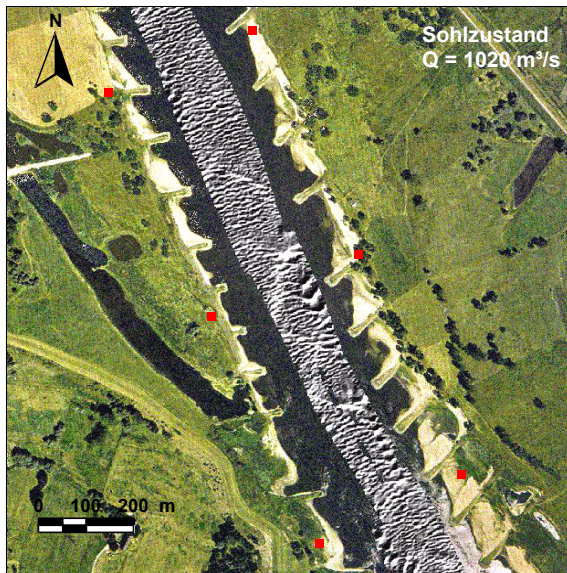


## „MORPHODYNAMIK DER ELBE“

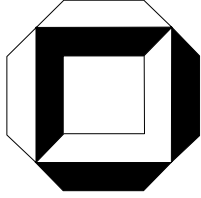
Schlussbericht des BMBF-Verbundprojektes  
mit Einzelbeiträgen der Partner und Anlagen-CD

Franz Nestmann, Bruno Büchele (Hrsg.)



---

ISBN 3-00-008977-2



**Institut für  
Wasserwirtschaft und Kulturtechnik  
Universität Karlsruhe (TH)**

---

**„MORPHODYNAMIK DER ELBE“**

**Schlussbericht des BMBF-Verbundprojektes  
mit Einzelbeiträgen der Partner und Anlagen-CD**

Franz Nestmann, Bruno Büchele (Hrsg.)

**Verbundprojektpartner**

- Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (Federführung),  
Universität Karlsruhe (TH)
- Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz-Berlin
- Fachbereich Technischer Umweltschutz,  
Universität-Gesamthochschule Paderborn/ Abteilung Höxter
- Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik,  
Universität Karlsruhe (TH)
- Institut für Geographische Wissenschaften, Freie Universität Berlin  
/ Institut für Hochfrequenztechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und  
Raumfahrt, Weßling
- Institut für Hydromechanik,  
Universität Karlsruhe (TH)

**Kooperation / Beiträge zum Projektergebnis**

- DFG-Graduiertenkolleg „Ökologische Wasserwirtschaft“ (GRK 147)  
am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik  
der Universität Karlsruhe (TH)
- Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Die Deutsche Bibliothek – CIP Einheitsaufnahme

**„Morphodynamik der Elbe“**

**Schlussbericht des BMBF-Verbundprojektes mit Einzelbeiträgen der Partner und Anlagen-CD**

Hrsg. von Franz Nestmann und Bruno Büchele

Eigenverlag: Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH)

mit 468 Seiten, 357 Abbildungen, 61 Tabellen und CD-ROM

ISBN 3-00-008977-2, Karlsruhe, Januar 2002

**Federführung des Verbundprojekts:**

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann

Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH)

**Projektkoordination, Schriftleitung, Redaktion:**

Dipl.-Ing. Bruno Büchele

**Projektlaufzeit:**

01.08.1996 bis 31.03.2001

**Projektbetreuung von Seiten des Förderprogramms:**

Forschungszentrum Jülich GmbH, Außenstelle Berlin

Projekträger Biologie, Energie, Umwelt

des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie

Projektgruppe „Elbe-Ökologie“

in der Bundesanstalt für Gewässerkunde

Außenstelle Berlin

**Titelbild (Einband):**

Reliefbilder der Elbesohle (Schummerung, siehe Streifen in Flussmitte), lagerichtig dargestellt in einer Luftbildaufnahme der Elbe bei Niedrigwasserführung; *linkes Bild*: Sohlaufnahme nach Hochwasser (April 1997) - kleine Riffel laufen „waschbrettartig“ über Großformen/Dünen hinweg; *rechtes Bild*: Sohlaufnahme bei Niedrigwasser (September 1997) - unregelmäßigere dreidimensionale Formen. (Quelle Sohlpeilungen: WSA Magdeburg/BAW Karlsruhe, 1997; Quelle Luftbild bei Niedrigwasser: WSD Ost, 1992; Bearbeitung: Universität Karlsruhe).

---

**Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 0339566 gefördert.**

**Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.**

---

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Der Publikation liegen ergänzende Informationen auf einem digitalen Datenträger (CD-Rom) bei, die einen festen Bestandteil des Berichts darstellen. Ihre Weitergabe erfolgt unter der Beschränkung ihrer Nutzung für ausschließlich öffentliche und wissenschaftliche Zwecke. Eine kommerzielle Nutzung ist untersagt. Die Weiterverwertung der Daten durch Dritte für die genannten Zwecke setzt eine den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis entsprechende Form des Quellennachweises bzw. Nennung der Urheber gemäß der Darstellungen im Bericht voraus. Alle Rechte des Urheberschutzes, insbesondere der Vervielfältigung, der Übersetzung, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwertung – vorbehalten. Trotz sorgfältiger Überprüfung kann für etwaige fehlerhafte Angaben und deren Folgen keine Haftung übernommen werden.

---

## AUTOREN / BETEILIGTE PERSONEN

### Projektbeteiligte

*Adam, Kerstin*, Dipl.-Ing. (FH), bis 1999: Universität-GH Paderborn, Abteilung Höxter, Fachbereich Technischer Umweltschutz (FBTU)

*Becker, Rolf*, Dipl.-Phys., Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), Abteilung Hydrologie, email: rolf.becker@bau-verm.uni-karlsruhe.de

*Belz, Stefan*, Dr.-Ing., bis 1999: Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK)

*Brauns, Josef*, Prof. Dr.-Ing., Universität Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF), Abteilung Erddamm- und Deponiebau, email: josef.brauns@bau-verm.uni-karlsruhe.de

*Bücheler, Bruno*, Dipl.-Ing., Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), email: bruno.buecheler@bau-verm.uni-karlsruhe.de

*Dröge, Benno*, BDir., im Projekt bis 1998: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz, email: droege@bafg.de

*Ergenzinger, Peter*, Prof. Dr., Freie Universität Berlin, Institut für Geographische Wissenschaften (IGW), Fachrichtung Physische Geographie, email: perg@gauss.geog.fu-berlin.de

*Evdakov, Oleg*, M.Sc., Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), email: evdakov@iwk.uni-karlsruhe.de

*Gölz, Emil*, Prof. Dr., im Projekt ab 1999: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz, email: goelz@bafg.de

*Harms, Oliver*, Dipl.-Geoökol., bis 1999: Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK)

*Hajnsek, Irena*, Dipl.-Geogr., Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Hochfrequenztechnik, Weßling, email: irena.hajnsek@dlr.de

*Helms, Martin*, Dipl.-Hydrol., Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), Abteilung Hydrologie, email: helms@iwk.uni-karlsruhe.de

*Ihringer, Jürgen*, Dr.-Ing., Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), Abteilung Hydrologie, email: ihringer@iwk.uni-karlsruhe.de

*Jirka, Gerhard H.*, Prof. Ph.D., Universität Karlsruhe, Institut für Hydromechanik (IfH), email: jirka@bau-verm.uni-karlsruhe.de

*Kiene, Susanne*, Dr.-Ing. Dipl.-Biol., bis 2000: Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), Universität Karlsruhe

*Meon, Günter*, Prof. Dr.-Ing., Universität-GH Paderborn, Abteilung Höxter, Fachbereich Technischer Umweltschutz (FBTU), email: hmeon@cip.hx.uni-paderborn.de

*Merkel, Ute*, Dipl.-Ing., bis 2000: Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), Abteilung Hydrologie

*Mohrlok, Ulf*, Dr.rer.nat., Universität Karlsruhe, Institut für Hydromechanik (IfH), email: ulf.mohrlok@ifh.uni-karlsruhe.de

*Nestmann, Franz*, Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. mult., Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), email: franz.nestmann@bau-verm.uni-karlsruhe.de

- Otte-Witte, Kai*, Dipl.-Ing. (FH), Universität-GH Paderborn, Abteilung Höxter, Fachbereich Technischer Umweltschutz, (FBTU) email: k\_o-w@moellinger.hx.uni-paderborn.de
- Plate, Erich*, em. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h., Universität Karlsruhe, bis 1997: Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IHW), Universität Karlsruhe
- Preuß, Patrick*, cand. Ing., Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), email: Patrick.Preuss@stud.uni-karlsruhe.de
- Rathke, Klaas*, Prof. Dr.-Ing., Universität-GH Paderborn, Abteilung Höxter, Fachbereich Technischer Umweltschutz (FBTU), email: hmeon@cip.hx.uni-paderborn.de
- Ritzert, Frank*, Dipl.-Ing., Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), email: ritzert@iwk.uni-karlsruhe.de
- Saucke, Ulrich*, Dipl.-Ing., Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF), Abteilung Erddamm- und Deponiebau, Universität Karlsruhe, email: ulrich.saucke@bau-verm.uni-karlsruhe.de
- Sauer, Werner*, Dipl.-Phys., Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Außenstelle Berlin
- Schmidt, Andreas*, Dr.-Ing., bis 1999: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Außenstelle Berlin
- Schmullius, Christiane*, Dr., Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Hochfrequenztechnik, 82230 Weßling, email: chris.schmullius@dlr.de
- Träbing, Klaus*, Dr.-Ing., Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), email: traebing@iwk.uni-karlsruhe.de
- Wang, Yinan*, Dr.-Ing., bis 1999: Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK)

### **Kooperation / Beiträge zum Projektergebnis**

- Alexy, Matthias*, Dipl.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe
- Bui, Minh Duc*, Dr.-Ing. Dipl.-Math., Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK)/ Institut für Hydromechanik (IfH)  
im Rahmen des DfG-Graduiertenkollegs „Ökologische Wasserwirtschaft“
- Burek, Peter*, Dipl.-Geogr., Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK),  
Abteilung Hydrologie, email: burek@iwk.uni-karlsruhe.de  
im Rahmen des DfG-Graduiertenkollegs „Ökologische Wasserwirtschaft“
- Busch, Norbert*, Dipl.-Ing., Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz
- Faulhaber, Petra*, Dipl.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe
- Helms, Martin*, Dipl.-Hydrol., Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK),  
Abteilung Hydrologie, email: helms@iwk.uni-karlsruhe.de  
im Rahmen des DfG-Graduiertenkollegs „Ökologische Wasserwirtschaft“
- Hentschel, Bernd*, Dipl.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe
- Rommel, Jochen*, Dipl.-Geol., Karlsruhe/Aachen, email: jo.rommel@gmx.de

## VORWORT

Der Schutz und die Wiederherstellung ökologisch funktionsfähiger und naturnaher Gewässer ist eine wesentliche Aufgabe insbesondere der Wasserwirtschaft, die eine gesamtheitliche Betrachtungsweise erfordert. Der auf den Naturraum „Flussgebiet“ bzw. „Gewässer“ statt auf Verwaltungsgrenzen bezogene Aspekt wird auch von der EU-Wasserrahmenrichtlinie (23.10.2000) in den Vordergrund gestellt.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) rief 1995 mit der „Forschungskonzeption Ökologische Forschung in der Stromlandschaft Elbe (Elbe-Ökologie)“ ein umfangreiches Forschungsprogramm ins Leben, das seit 1996 zur Förderung von 28 interdisziplinären Forschungsvorhaben, darunter des vorliegenden Verbundprojektes, führte. Ziel der Forschungen ist die Aufklärung ökologischer Zusammenhänge und die Erarbeitung von Grundlagen in den Teilbereichen „Fließgewässer“, „Auen“ sowie „Landnutzung im Einzugsgebiet“ im Hinblick auf eine dauerhafte umwelt-, sozial- und wirtschaftsverträgliche Entwicklung der Elbelandschaft. Unter anderem stellt sich die Frage, wie Eingriffe in die relativ naturnahen Strukturen der Stromlandschaft Elbe, die für die wirtschaftliche Entwicklung des Elberaumes notwendig sind, so gestaltet werden können, dass die noch intakte Dynamik und die natürliche Entwicklungsfähigkeit erhalten bleiben.

Im Mittelpunkt der Forschungsfragen zum Teilbereich Fließgewässer, der sich im wesentlichen auf die freifließende Elbe im deutschen Bereich bezieht, steht die Beschreibung der bestimmenden Einflussgrößen und Vorgänge der ökologischen Entwicklung im Fluss, in den Ufer- und Gewässerrandbereichen sowie in der Aue. Grundvoraussetzung hierfür ist die Quantifizierung der abiotischen (physikalischen) Randbedingungen, vor allem der Morpho- und Hydrodynamik. Genau hierin lag auch der Grundgedanke und inhaltliche Schwerpunkt des hiesigen Verbundvorhabens: die großräumig und langfristig orientierte Erfassung und Analyse der heutigen abiotischen Verhältnisse im Längsschnitt der Elbe, wie z.B. Dynamik der Abflüsse, Wasserstände, Sedimente, Grundwasserstände etc..

Im Hinblick auf die Nutzbarkeit der Ergebnisse für biotische Fragen, insbesondere die Bewertung des aktuellen Gewässerzustands aus ökologischer Sicht,

waren die Zusammenhänge anhand von geeigneten Parametern zu quantifizieren. Auch eine allgemein anerkannte Definition, *welche* Parameter als die prägenden Größen der ökologischen Entwicklung anzusehen sind, wie sie quantitativ zu erfassen und darzustellen sind und wie ihre Bedeutung zu werten ist, liegt bisher nicht vor.

Während zur Bewertung der ökologischen Funktionsfähigkeit kleiner bis mittelgroßer Fließgewässer in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt und standardisierte Verfahren erarbeitet werden konnten (Stichwort: Gewässerstrukturgütekartierung), ist die Bewertung *großer* Fließgewässer, beginnend ab ca. 10 m Gewässerbreite, mit zusätzlichen Schwierigkeiten verbunden. Dies betrifft sowohl die Erfassung von Einzelparametern (z.B. Sohle nicht sichtbar), das Bewertungssystem selbst (skalenbedingt veränderte Bedeutung/Gewichtung von Einzelparametern) als auch den Umstand, dass große Fließgewässer aufgrund der Nutzungen Schifffahrt, Landeskultur, Besiedlung etc. seit vielen Generationen stark verändert wurden und auch in Zukunft nur relativ wenig in Richtung potentieller Naturzustand veränderbar sind. Gleichzeitig haben viele Flussbaumaßnahmen zu sekundären Gewässerstrukturen (wie z.B. Flachwasserzonen und Verlandungen in Bühnenfeldern) geführt, die bezüglich ihrer ökologischen Wirksamkeit Ersatzbiotope darstellen und daher zusätzlich (oft positiv) zu bewerten sind. Aus diesen Gründen und mangels differenzierter Referenzangaben über anthropogen unbeeinflusste Zustände größerer Gewässerabschnitte fällt auch die differenzierte Beschreibung des heutigen potentiell natürlichen Gewässerzustandes (Leitbild) als Maßstab der ökologischen Bewertung schwer.

Die in diesem Kontext bestehenden Wissenslücken und fehlenden Grundlagen, sowohl bezüglich der konkreten Situation an der Elbe, als auch für große Fließgewässer im allgemeinen, stellen den erweiterten Hintergrund der Projektarbeiten dar.

Führt man sich vor Augen, dass es sich hier insbesondere auch um die Erarbeitung eines (in dieser Form bisher nicht verfügbaren) Gesamtüberblicks von Grundlageninformationen wie Abflusskennwerten, Wasserspiegellagen, Sedimentfrachten etc. entlang der deutschen Binnenelbe handelt, so lässt

sich die Breite des Spektrums tangierter Interessensbereiche (von Ökologie bis Ökonomie) und damit möglicher Nachnutzungen der Projektergebnisse erkennen. Eine sinnvolle Verwertung der Daten in der Zukunft setzt wiederum eine zuverlässige Dokumentation der Bearbeitungsgrundlagen und -methoden voraus. Betrachtet man also den großen Umfang des hier vorliegenden Schlussberichts des Projekts, so lässt sich leicht erahnen, dass die Ergebnisse in der notwendigen Ausführlichkeit festgehalten sind, die ihre quantitative Verwertbarkeit sicherstellen.

Das Hauptinteresse des Schlussberichts liegt daher auf der differenzierten Darstellung von untersuchten Teilaspekten, die bei künftigen Fragestellungen von Interesse sein werden. Demnach sind also die Teiluntersuchungen einzeln in Kapiteln dokumentiert, die in sich geschlossene wissenschaftliche Beiträge der Beteiligten zum Gesamtergebnis darstellen. Der Sache entsprechend wird vielfach auf fachübergreifende Aspekte und die interne und externe Zusammenarbeit eingegangen, wodurch auch weitere mögliche Anknüpfungspunkte für künftige Untersuchungen deutlich werden. Insgesamt gesehen stehen die verschiedenen Teildarstellungen in einem übergeordneten natürlichen Zusammenhang, der sich auch in der Gliederung durchschlägt, und ergeben in ihrer Summe ein Gesamtbild.

Die vorigen Ausführungen gewinnen eine besondere Bedeutung angesichts der Tatsache, dass mit der Anlagen-CD und den darin enthaltenen digitalen Informationen die Forderung der Projektförderung in die Tat umgesetzt wird, nach der die Ergebnisse dem interessierten Fachpublikum in Behörden und Wissenschaft frei zugänglich zur Verfügung zu stellen sind.

Das Stichwort Behörden führt auch zu der – von der Machbarkeit und dem Ergebnis des Vorhabens nicht wegzudenkenden – engen Zusammenarbeit und der Verfügbarmachung von umfangreichen Datenbeständen von Seiten der fachlich zuständigen Stellen, vor allem der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes sowie den Landesämtern verschiedener Bundesländer an der Elbe. Der freundlichen und vielfachen Unterstützung durch die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Behörden gilt der aufrichtige Dank aller Beteiligten.

Mein besonderer Dank im Namen des gesamten Verbundprojektes richtet sich an das Bundes-

forschungsministerium (BMBF) für die Förderung des Vorhabens, an den Projektträger BEO des BMBF im Forschungszentrum Jülich für die projektbegleitende Betreuung und die im Rahmen der Förderung entgegengebrachte Unterstützung, an die Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirats „Elbe-Ökologie“ des BMBF für die vielfältigen inhaltlichen und zur erfolgreichen Durchführung hilfreichen Hinweise, sowie an die Projektgruppe „Elbe-Ökologie“ in der Bundesanstalt für Gewässerkunde, stellvertretend für die vielen weiteren Projekte im Forschungsprogramm und für die sehr wertvolle und interessante Zusammenarbeit über das eigene Vorhaben hinaus.

Ich bedanke mich hiermit herzlichst bei allen Kollegen und Mitwirkenden im Verbundprojekt für die vorbildlichen Beiträge und wertvollen wissenschaftlichen Leistungen sowie für die langjährige, stets gute und inhaltlich fruchtbare Zusammenarbeit.

Karlsruhe, im November 2001      Franz Nestmann



## KURZFASSUNG

Die quantitative Beschreibung der abiotischen Randbedingungen im Naturhaushalt der Stromlandschaft Elbe, insbesondere der Morpho- und Hydrodynamik mit ihren variablen Ausprägungen im Gewässerlängsschnitt, bildet die Grundvoraussetzung für das Verständnis und die Bewertung der ökologischen Funktionen im System (Fluss-Ufer-Aue) und dessen wirtschaftliche Nutzung (Schifffahrt, Besiedlung, Landwirtschaft etc.). Als Grundlage für Entscheidungen über künftige Entwicklungen im Naturraum sind Werkzeuge erforderlich, die es ermöglichen, die Auswirkungen möglicher Eingriffe aufzuzeigen.

In diesem Kontext wurden im Verbundprojekt umfangreiche Grundlagen (Daten, Simulationsmodelle etc.) erarbeitet, die den gegenwärtigen Zustand der Elbe im Sinne einer Gesamtbetrachtung des Systems (568 km deutsche Fließstrecke) beschreiben. Im Ergebnis beinhaltet dies die großräumig und langfristige orientierte Erfassung und Analyse der maßgeblichen Einflussgrößen, Prozesse und Wechselwirkungen der Morphologie, der Abflussdynamik, der Strömung und des Feststofftransports im Fließgewässer sowie des Grundwassers in der Aue. Durch die Definition der abiotischen Parameter im Ist-Zustand und die Quantifizierung der potentiell natürlichen Querschnittsform in naturräumlich unterschiedlichen Gewässerabschnitten wird die Grundlage für die Beschreibung ökologischer Leitbilder für große Fließgewässer gelegt. Anhand des im Projekt erarbeiteten Gesamt-Instrumentariums (bestehend aus verschiedenen hydrologischen, hydraulischen und morphologischen Modellen, Geoinformationssystem (GIS), Datenbank etc. einschließlich der Sachdaten, basierend auf den Projektarbeiten sowie den von Behörden zur Verfügung gestellten Datenbeständen) lassen sich die natürlichen Zusammenhänge sowie mögliche Szenarien (Maßnahmenwirkungen, z.B. bei Deichrückverlegung) quantifizieren, darstellen und bewerten. Wichtige Ergebnisdatensätze des Projekts sind dem Bericht in digitaler Form auf einer CD-Rom beigelegt, das ein eigenständiges Informationssystem (Software) mit Datenbank- und GIS-Funktionen enthält. Die Projektarbeiten liefern damit grundlegende Beiträge für künftige Untersuchungen an der Elbe im Aufgabenbereich der Behörden sowie der Wissenschaft (speziell im Rahmen der „Elbe-Ökologie“-Forschung).

## ABSTRACT

The major objective of the joint research project "Morphodynamics of the river Elbe" is the quantitative description of the main abiotic parameters and processes in the river along its course of 568 km on German territory, including the floodplain areas. The assessment and analysis of the status quo situation of the river conditions in an overall view - focussing on the areas of morphology, hydrology, hydraulics and groundwater dynamics - is a fundamental precondition for understanding and evaluating the ecological and economical functions of the river (shipping, settlements, agriculture etc.). To support decisions on a sustainable regional development, instruments are needed to quantify long-term effects and/or scenarios (e.g. bed erosion, diking measures).

In this context, the different activities in sub-projects concentrated on the assessment and systematic analysis of extensive data sets (e.g. hydrological time series, hydraulic conditions, measures of sediment transport etc. - using existing data material provided by authorities) and the (further) development and interdisciplinary application of numerical models. Examples are among others: a) calculation of hydraulic parameters along 507 km for longitudinal sections of hydrological flow parameters, b) flood routing along the Elbe course with simulation of historical and/or potential retention areas, c) analyses of sediment transport data at 28 measurements points, d) numerical modeling of groundwater dynamics in areas of planned dike shifting measures. The results of all activities were integrated in a central information system, which consists of a relational database and geographical information system (GIS). By the definition of the present abiotic conditions along the river and the determination of its natural profile shape at the scale of river reaches with different morphological situations (based on the historical width-depth-ratio before river regulation), it is possible to contribute the base for a quantitative description of the potential natural state of the ecosystem. The elaborated instruments (simulation models, database, GIS etc.) can be used in further investigations by the authorities and research projects. The annexe of the report is consisting of a CD-Rom, providing the most important digital data sets and graphics, which were integrated in an own software tool with GIS- and database-functionalities.



# INHALTSVERZEICHNIS

Autoren / Beteiligte Personen .....	iii
Vorwort .....	v
Kurzfassung / Abstract .....	vii
Inhaltsverzeichnis .....	ix

## KAPITEL I: PROJEKTÜBERBLICK

*F. Nestmann, B. Büchele (Hrsg.)*

<b>I-1</b>	<b>Aufgabenstellung und Rahmenbedingungen .....</b>	<b>1</b>
I-1.1	Problemstellung .....	1
I-1.2	Zielstellung im Gesamtvorhaben .....	2
I-1.3	Inhaltliche Projektkonzeption .....	2
I-1.4	Hauptuntersuchungsgebiet(e) .....	3
I-1.5	Wissenschaftlich-technischer Stand .....	4
I-1.6	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens .....	4
I-1.7	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
I-1.8	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	5
<b>I-2</b>	<b>Zusammenfassender Überblick der Untersuchungen und Ergebnisse .....</b>	<b>6</b>
I-2.1	Ökologischer Bezug .....	6
I-2.2	Informationstechnik (Kapitel V) .....	6
I-2.3	Geologie und Morphologie der Elbe und ihrer Auen (Kapitel II) .....	6
I-2.4	Hydrologische Analyse (Kapitel III-1) .....	8
I-2.5	Hydraulisch-morphologische Berechnungen (Kapitel III-2) .....	11
I-2.6	Wirksamkeit von Deichrückverlegungen auf die Hochwasserabflussverhältnisse (Kapitel III-3) .....	12
I-2.7	Geschiebe- und Feststofftransporthaushalt der Elbe (Kapitel III-4) .....	12
I-2.8	Simulation von Transportprozessen in einer Laborrinne (Kapitel III-5) .....	13
I-2.9	Erfassung von Parametern in Auen mittels Radarbefliegung (Kapitel IV-1) .....	15
I-2.10	Strömungs- und Erosionsprozesse in fluviatilen Sedimenten (Kapitel IV-2) .....	16
I-2.11	Grundwasserdynamik Fluss – Aue in Bereichen möglicher Deichrückverlegungen (Kapitel IV-3 und IV-4) .....	16
<b>I-3</b>	<b>Zur Synthese und Bewertung .....</b>	<b>18</b>
I-3.1	Verknüpfung von Ergebnissen / Schnittstellen zu anderen Disziplinen .....	18
I-3.2	Grundlagen zur Bewertung großer Fließgewässer anhand der naturraumspezifischen Querprofilform .....	19
<b>I-4</b>	<b>Zur Verwertung der Ergebnisse (Ausblick) .....</b>	<b>21</b>
I-4.1	Digitale Grundlagen, Informationssysteme .....	21
I-4.2	Forschungsverbund Elbe-Ökologie .....	22

## KAPITEL II: GEWÄSSERMORPHOLOGIE

<b>II-1</b>	<b>Flussgeschichtliche Entwicklung im Überblick .....</b>	<b>23</b>
<b>II-1.1</b>	<b>Stromtalgeschichte und Flussgeologie im deutschen Elbegebiet .....</b>	<b>23</b>
	<i>U. Saucke, J. Brauns</i>	
II-1.1.1	Allgemeines .....	23
II-1.1.2	Frühe Flussgeschichte .....	23
II-1.1.3	Einflüsse des Quartärs auf die Geologie .....	23
II-1.1.4	Geologische Schnitte .....	24
II-1.1.5	Flussgeologie .....	27
II-1.1.6	Kartierung der holozänen Sedimentation und alter Flussläufe im Mündungsbereich der Ohre bei Magdeburg .....	29

<b>II-1.2</b>	<b>Morphologische Entwicklung der Elbe vor dem Hintergrund anthropogener Einflüsse: eine Zusammenstellung von Angaben aus der Literatur</b> .....	<b>31</b>
	<i>S. Kiene, O. Harms, B. Büchele, F. Nestmann</i>	
II-1.2.1	Chronik von Nutzung und Ausbau .....	31
II-1.2.2	Laufentwicklung der Elbe zwischen 1600 und 1900 (nach Rommel) .....	34
II-1.2.3	Wasserspiegel- und Sohlentwicklung seit etwa 1900 (nach Faulhaber) .....	36
II-1.2.4	Diskussion .....	38
<b>II-2</b>	<b>Nutzung historischer Daten als Grundlage für die Entwicklung ökomorphologischer Leitbilder und Entwicklungsziele</b> .....	<b>41</b>
<b>II-2.1</b>	<b>Erfassung ökomorphologischer Strukturen der Elbe aus Karten von 1770 und Vergleich dem heutigen Zustand</b> .....	<b>41</b>
	<i>O. Harms, S. Kiene, F. Nestmann</i>	
<b>II-2.2</b>	<b>Quantifizierung von Gewässerbett- und Strömungsparametern der Elbe vor 1800 im Hinblick auf die Beschreibung naturnaher hydraulisch-morphologischer Zustände</b> .....	<b>45</b>
	<i>B. Büchele, K. Träbing, F. Nestmann</i>	
II-2.2.1	Einführung .....	45
II-2.2.2	Vorgehensweise .....	45
II-2.2.3	Datengrundlagen .....	45
II-2.2.4	Randbedingungen der Auswertung .....	46
II-2.2.5	Erfassung und Analyse der historischen Breiten- und Tiefenverhältnisse .....	49
II-2.2.6	Hydraulische Analyse .....	53
II-2.2.7	Ansätze zur Übertragbarkeit und Verallgemeinerung der Ergebnisse .....	56
II-2.2.8	Fazit der Betrachtungen .....	62
<b>II-2.3</b>	<b>Historische Artenlisten und Analyse von Ansprüchen an Substrat und Strömung</b> .....	<b>64</b>
	<i>S. Kiene, F. Nestmann</i>	
<b>II-3</b>	<b>Geometrie und Morphologie der Elbe (Ist-Zustandserfassung von Einzelparametern in Längs- und Querprofil)</b> .....	<b>66</b>
	<i>B. Büchele, O. Evdakov, S. Kiene, K. Otte-Witte, F. Ritzert, U. Saucke, F. Nestmann</i>	
II-3.1	Einführung und Grundlagen .....	66
II-3.1.1	Einführung .....	66
II-3.1.2	Gliederung der Parameter .....	66
II-3.1.3	Ableitung einer morphometrisch begründeten Längsgliederung der Elbe .....	67
II-3.2	Sohle .....	69
II-3.2.1	Linienführung .....	69
II-3.2.2	Sohlsubstrate .....	71
II-3.2.3	Sohlhöhen, Tiefenvariabilität .....	72
II-3.3	Querprofil und Uferstrukturen .....	73
II-3.3.1	Breiten/Tiefen-Verhältnis (Profilform) .....	73
II-3.3.2	Breitenvarianz .....	73
II-3.3.3	Breite und Neigung der Ufer zwischen Niedrig- und Mittelwasser .....	75
II-3.3.4	Uferbeschaffenheit im Hinblick auf vegetationsfreie Flächen .....	75
II-3.4	Vorland, Überflutungsbereiche .....	85
II-3.4.1	Gegenstand der Darstellung .....	85
II-3.4.2	Topographische Datengrundlagen .....	85
II-3.4.3	Überflutungsflächen .....	86
II-3.4.4	Ausuferungshäufigkeit .....	88
II-3.5	Fazit und Ausblick .....	89

**KAPITEL III: ABFLUSSDYNAMIK, STRÖMUNG UND FESTSTOFFTRANSPORT**

<b>III-1</b>	<b>Analyse und Simulation des Abflussprozesses der Elbe</b> .....	<b>91</b>
	<i>M. Helms, J. Ihringer, F. Nestmann</i>	
III-1.1	Einleitung und Zielsetzung .....	91
III-1.2	Hydrologische Verhältnisse im Elbe-Einzugsgebiet .....	92
III-1.2.1	Natürliche hydrologische Verhältnisse im Elbe-Einzugsgebiet .....	92
III-1.2.2	Anthropogene Einflüsse auf die Abflussverhältnisse im Elbe-Einzugsgebiet .....	94
III-1.3	Datengrundlage .....	96
III-1.3.1	Verfügbare Zeitreihen des Abflusses (Q) und des Wasserstands (W) .....	96
III-1.3.2	Weitere Datensätze .....	98
III-1.4	Vorgehensweise bei der Untersuchung des Abflussprozesses der Elbe .....	99
III-1.5	Konsistenzprüfung der Abflusszeitreihen der Elbe-Pegel .....	101
III-1.6	Analyse und Simulation von Abflusszeitreihen .....	114
III-1.6.1	Parametrisierung der täglichen Abflusszeitreihen .....	115
III-1.6.2	Stationaritätsanalyse .....	116
III-1.6.3	Pegelweise statistische Analysen des Abflussprozesses für die Reihen 1964-1995 .....	132
III-1.6.4	Regionalisierung der statistischen Abflusskennwerte - Erstellung hydrologischer Längsschnitte .....	144
III-1.6.5	Entwicklung von Simulationswerkzeugen für den täglichen Abflussprozess anhand der Reihe 1964-1995 ..	150
III-1.6.6	Erweiterte Stationaritätsanalysen durch Anwendung hydrologischer Simulationen .....	165
III-1.6.7	Rekonstruktion historischer Abflussreihen im Bereich zwischen den Pegeln Barby und Wittenberge .....	176
III-1.6.8	Ermittlung von Hochwasserstatistiken für den Zeitraum 1936-1995 .....	185
III-1.7	Verwertbarkeit der hydrologischen Untersuchungsergebnisse und Schnittstellen zu anderen Disziplinen.....	193
III-1.8	Zusammenfassung und Ausblick .....	194
<b>III-2</b>	<b>Hydraulisch-morphologische Charakteristika entlang der Elbe</b> .....	<b>203</b>
	<i>K. Otte-Witte, K. Adam, G. Meon, K. Rathke, et al.</i>	
III-2.1	Einführung und Zusammenfassung .....	203
III-2.2	Grundlagen der HN-Berechnungen .....	204
III-2.2.1	Methodik .....	204
III-2.2.2	Datengrundlagen und -aufbereitung .....	205
III-2.3	Modellerstellung (Beispielstrecke) .....	208
III-2.3.1	Hydraulisches Modell .....	208
III-2.3.2	Sedimentologisches Modell .....	212
III-2.4	Modellstrecken im Überblick .....	215
III-2.5	Ergebnisparameter im Überblick .....	217
III-2.5.1	Ansatz für die Gesamtbetrachtung .....	217
III-2.5.2	Parameterauswahl und Datenumfang .....	218
III-2.5.3	Erläuterungen zu den Ergebnissen anhand von Beispielen .....	219
III-2.6	Verallgemeinernde Darstellungen von Einzelparametern .....	226
III-2.7	Fazit der Projektbearbeitung .....	228
<b>III-3</b>	<b>Wirksamkeit von Deichrückverlegungsmaßnahmen auf die Abflussverhältnisse entlang der Elbe</b> .....	<b>231</b>
	<i>U. Merkel, M. Helms, B. Büchele, J. Ihringer, F. Nestmann</i>	
III-3.1	Einführung .....	231
III-3.2	Zielstellung .....	231
III-3.3	Datengrundlagen und Methodik .....	231
III-3.4	Modellbeschreibung .....	233
III-3.5	Modellanpassung .....	234
III-3.6	Ausgewählte Standorte potentieller Deichrückverlegungsmaßnahmen .....	236
III-3.7	Modellierungsergebnisse .....	238
III-3.7.1	Wirksamkeit bei historischen Hochwasserereignissen .....	238
III-3.7.2	Zusatzwirkung der Havelmündung .....	240
III-3.7.3	Wirksamkeit bei einem 100-jährlichen Ereignis (HQ100) .....	241
III-3.7.4	Wirksamkeit ausgewählter Kombinationen von Maßnahmen .....	241
III-3.8	Fazit .....	243

<b>III-4</b>	<b>Quantifizierung sohlhöhenrelevanter Feststofftransportprozesse</b> .....	<b>245</b>
	<i>W. Sauer, A. Schmidt, B. Dröge, E. Götz</i>	
III-4.1	Veranlassung und Zielsetzung .....	245
III-4.2	Untersuchungsprogramm .....	245
III-4.2.1	Konzeptionelle Überlegungen .....	245
III-4.2.2	Parameter .....	246
III-4.2.3	Datenbasis .....	246
III-4.2.4	Untersuchungsraum .....	247
III-4.3	Untersuchungsmethoden für die Naturmessungen .....	247
III-4.4	Ergebnisse .....	250
III-4.4.1	Hydraulische Parameter .....	250
III-4.4.2	Schwebstoffverteilung .....	256
III-4.4.3	Suspendierter Sand ( $d > 63 \mu\text{m}$ ) .....	258
III-4.4.4	Kornverteilung des suspendierten Sandes .....	259
III-4.4.5	Schwebstoffzahl $z$ .....	261
III-4.4.6	Suspensionsbeginn und kritische Sohl Schubspannung .....	263
III-4.5	Quantifizierung des bettbildenden Anteils des suspendierten Sandes .....	266
III-4.6	Transport-Abfluss-Beziehungen für Geschiebe und suspendierten Sand .....	270
III-4.7	Das Hydrologische-Feststoff-Bilanz-Modell (HFBM) - Aufbau und Nutzungsmöglichkeiten .....	272
III-4.8	Zusammenfassung .....	276
<b>III-5</b>	<b>Wirkung instationären Abflussverhaltens und von Buhnen auf den Dünentransport in der Elbe (in wasserbaulichen Laborversuchen)</b> .....	<b>279</b>
	<i>Y. Wang, B. Büchele, F. Nestmann</i>	
III-5.1	Einführung .....	279
III-5.1.1	Veranlassung .....	279
III-5.1.2	Untersuchungsschwerpunkte .....	279
III-5.1.3	Zur Gliederung des Beitrags .....	280
III-5.2	Wissenschaftliche Grundlagen und Fragestellungen .....	280
III-5.2.1	Bewegungsmechanismus der Transportkörper .....	280
III-5.2.2	Kenngrößen der Transportkörper .....	281
III-5.2.3	Einfluss der Gerinnebreite .....	285
III-5.2.4	Einfluss der Instationarität .....	286
III-5.2.5	Einfluss von Buhnen .....	286
III-5.3	Morphologie und Hydrologie im betrachteten Elbeabschnitt .....	287
III-5.3.1	Auswahl des Referenzabschnitts .....	287
III-5.3.2	Morphologische Gegebenheiten .....	287
III-5.3.3	Kenngrößen der Abflussdynamik .....	287
III-5.3.4	Auswertung von Flächenpeilungen der Elbesohle unter instationären Aspekten .....	289
III-5.4	Untersuchungsprogramm und Methodik der Laborexperimente .....	294
III-5.4.1	Schwerpunkte der Voruntersuchungen (kleine Laborrinne) .....	294
III-5.4.2	Schwerpunkte der Hauptuntersuchungen (große Laborrinne) .....	294
III-5.4.3	Versuchsmaterial (Laborsedimente) .....	295
III-5.4.4	Versuchsaufbau und Messmethoden der Voruntersuchungen .....	296
III-5.4.5	Versuchsaufbau und Messmethoden (große Laborrinne) .....	298
III-5.5	Ergebnisse der Voruntersuchungen (Grundlagen) .....	301
III-5.5.1	Beobachtungen bei der Untersuchung stationärer Strömungen .....	301
III-5.5.2	Messergebnisse bei stationärer Strömung .....	302
III-5.5.3	Berechnungsansätze für Transportkörper unter Berücksichtigung der Wassertiefe und Sedimentdichte .....	305
III-5.5.4	Ergebnisse bei instationärer Strömung .....	307
III-5.6	Untersuchungen bei stationären Verhältnissen .....	309
III-5.6.1	Modellähnlichkeit .....	309
III-5.6.2	Vorbereitung und Durchführung der Versuche und Sohlaufnahmen .....	310
III-5.6.3	Grundsätzliches zur Datenauswertung .....	310
III-5.6.4	Entstehung und zeitliche Entwicklung der Transportkörpergeometrien nach Versuchsbeginn .....	312
III-5.6.5	Messergebnisse bei stationären Verhältnissen .....	313
III-5.6.6	Interpretation der bisher beschriebenen Versuchsbeobachtungen .....	317

III-5.7	Ergebnisse bei instationären Strömungen .....	321
III-5.7.1	Instationärer Versuchsbetrieb .....	321
III-5.7.2	Wassertiefen (Hysterese-Effekt) .....	321
III-5.7.3	Vergleich der gemessenen Dünenhöhen und -längen der Modellversuche mit den Naturpeilungen 1997 .....	322
III-5.7.4	Transportkörperhöhe H .....	323
III-5.7.5	Transportkörperlänge L .....	326
III-5.7.6	Steilheit $\delta$ .....	327
III-5.7.7	Geschiebetransportrate $q_s$ .....	327
III-5.7.8	Hinweis zum Arbeitsprogramm .....	329
III-5.8	Untersuchungen mit Bühnen .....	329
III-5.8.1	Geometrie der Modellbühnen .....	329
III-5.8.2	Versuchsbetrieb .....	329
III-5.8.3	Beobachtungen nach Bühneneinbau .....	329
III-5.8.4	Bühnenüberströmung nach Einbau .....	330
III-5.8.5	Wasserspiegelentwicklung .....	331
III-5.8.6	Dünenhöhenentwicklung .....	331
III-5.8.7	Geschiebetransport .....	333
III-5.8.8	Sohlhöhenentwicklung .....	333
III-5.8.9	Resultierende Wassertiefen .....	334
III-5.9	Zusammenfassung und Ausblick .....	335
III-5.9.1	Veranlassung und Zielstellung .....	335
III-5.9.2	Naturdatenauswertung (Elbebezug) .....	335
III-5.9.3	Vorphase der Laboruntersuchungen .....	335
III-5.9.4	Stationäre Hauptuntersuchungen .....	336
III-5.9.5	Vergleich der Ergebnisse mit Ansätzen in der Literatur .....	336
III-5.9.6	Instationäre Hauptuntersuchungen .....	337
III-5.9.7	Untersuchungen mit Bühnen .....	337
III-5.9.8	Fazit und Ausblick .....	338
<b>III-6</b>	<b>Numerische Simulation der Sohlformen in einer Laborrinne .....</b>	<b>340</b>
	<i>M.D. Bui, F. Nestmann</i>	
III-6.1	Einleitung .....	340
III-6.2	Modellsystem .....	340
III-6.3	Modellanwendung .....	342
III-6.4	Erstellung des numerischen Modells .....	343
III-6.5	Eichung des Modells .....	344
III-6.6	Ergebnisse und Diskussion .....	344
III-6.6.1	Stationäre Strömung .....	344
III-6.7	Instationäre Strömung .....	346
III-6.8	Fazit .....	348
 <b>KAPITEL IV: VORLAND UND AUE</b>		
<b>IV-1</b>	<b>Erfassung der Elbaue bei Lenzen mittels Radarbefliegung .....</b>	<b>349</b>
	<i>I. Hajnsek, C. Schmullius, P. Ergenzinger</i>	
IV-1.1	Einleitung .....	349
IV-1.2	Ziel der Studie .....	349
IV-1.3	Mögliche Anwendungen/Bedeutung .....	349
IV-1.4	Auswahl des Untersuchungsgebietes .....	350
IV-1.5	Methodik .....	350
IV-1.6	Untersuchungsschwerpunkte .....	355
IV-1.7	Vergleich der SAR-Interferometrie mit anderen Erfassungsmethoden .....	356
IV-1.8	Zusammenfassende Beurteilung der Pilotstudie .....	360
<b>IV-2</b>	<b>Strömungs- und Erosionsvorgänge in fluviatilen Sedimenten .....</b>	<b>363</b>
	<i>U. Saucke, J. Brauns</i>	

IV-2.1	Allgemeines .....	363
IV-2.2	Problemstellung .....	363
IV-2.3	Schichtungsverhältnisse .....	364
IV-2.4	Dipol-Tracer-Methode .....	365
IV-2.5	Ausblick .....	368
<b>IV-3</b>	<b>Grundwasserdynamik in Vorland- und Auenbereichen am Beispiel des geplanten Deichrückverlegungsgebietes „Rogätz“ .....</b>	<b>369</b>
	<i>U. Mohrlök, G.H. Jirka</i>	
IV-3.1	Einführung .....	369
IV-3.2	Untersuchungsgebiet .....	369
IV-3.2.1	Topographie .....	369
IV-3.2.2	Hydrologie .....	370
IV-3.2.3	Hydrogeologie .....	370
IV-3.2.4	Deckschichten der Auen und Vorländer .....	372
IV-3.3	Numerisches Grundwasserströmungsmodell .....	373
IV-3.3.1	Modellansätze .....	373
IV-3.3.2	Modellerstellung .....	375
IV-3.4	Simulationsergebnisse .....	380
IV-3.4.1	Kalibrierung .....	380
IV-3.4.2	Ist-Zustand der Grundwasserdynamik .....	381
IV-3.4.3	Grundwasserdynamik bei Deichrückverlegung .....	382
IV-3.5	Statistische Auswertungen .....	383
IV-3.5.1	Statistische Größen .....	383
IV-3.5.2	Statistik der Grundwasserdynamik .....	383
IV-3.5.3	Ökologische Auswirkungen .....	385
IV-3.6	Zusammenfassung und Ausblick .....	386
<b>IV-4</b>	<b>Auswirkungen von Deichrückverlegungen auf die langfristige Grundwasserdynamik in Auen (Untersuchungsgebiet „Sandau/Elbe“) .....</b>	<b>389</b>
	<i>P. Burek, F. Nestmann</i>	
IV-4.1	Einleitung .....	389
IV-4.2	Zielsetzung .....	389
IV-4.3	Modellkonzeption .....	390
IV-4.3.1	Statistische Modellierung .....	390
IV-4.3.2	Modellierung mit mathematisch- numerischen Grundwassermodellen .....	390
IV-4.3.3	Vereinfachte physikalische Modellierung .....	390
IV-4.4	Modellaufbau .....	391
IV-4.5	Untersuchungsgebiet .....	392
IV-4.5.1	Gebietsbeschreibung .....	392
IV-4.5.2	Hydrologie, Fließgewässerhydraulik und Klimatologie .....	393
IV-4.5.3	Hydrogeologie .....	394
IV-4.5.4	Grundwasserdaten und Bestimmung der Randbedingungen .....	395
IV-4.6	Analytisches Grundwassermodell .....	395
IV-4.6.1	Anordnung der Berechnungsknoten und Transekten .....	395
IV-4.6.2	Parameterermittlung aus den Transekten .....	397
IV-4.6.3	Grundwasserhydraulik .....	397
IV-4.6.4	Grundwasserneubildung .....	398
IV-4.6.5	Kopplung von Grundwasser- und Bodenwassermodell .....	399
IV-4.7	Modellanpassung und Validierung .....	399
IV-4.7.1	Modellierung von 19 Grundwassermessstellen .....	399
IV-4.7.2	Modellierung von drei Grundwasserzeitreihen im Zeitraum 1970 - 1999 .....	401
IV-4.7.3	Räumliche Modellierung .....	404
IV-4.8	Langfristige Grundwasserdynamik des Ist-Zustandes .....	404
IV-4.9	Modellierung der Grundwasserdynamik bei geplanter Deichrückverlegung .....	406
IV-4.9.1	Räumliche Betrachtung .....	407
IV-4.9.2	Betrachtung von drei Querschnitten .....	407
IV-4.10	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	412



**KAPITEL V: INFORMATIONSTECHNIK**

<b>V-1</b>	<b>Datenbank und Informationssystem des Verbundprojektes</b> .....	<b>415</b>
	<i>R. Becker, F. Nestmann</i>	
V-1.1	Einleitung .....	415
V-1.2	Die Datenbank .....	416
V-1.2.1	Datenbanken und Dateisysteme .....	416
V-1.2.2	Klassen von Datenbanken .....	416
V-1.2.3	Auswahl für das Projekt .....	417
V-1.2.4	Die 3-Ebenen-Architektur .....	418
V-1.2.5	Client-Server-Architektur .....	418
V-1.2.6	SER-Modell .....	420
V-1.2.7	Normalformen .....	421
V-1.2.8	Einblick in den Datenbestand .....	422
V-1.2.9	Metadaten .....	422
V-1.3	Anwendungsbeispiel .....	423
V-1.4	GIS-Datenbank-Kopplungen .....	426
V-1.4.1	Geographische Informationssysteme .....	426
V-1.4.2	Dateibasierte geographische Informationssysteme .....	426
V-1.4.3	Geographische Informationssysteme mit externer Attributdatenbank .....	427
V-1.4.4	Geodatenbanken .....	427
V-1.5	Informationssystem .....	429
V-1.6	Zusammenfassung .....	429
<b>V-2</b>	<b>Das Informationssystem zum Schlussbericht (Anlagen-CD)</b> .....	<b>431</b>
	<i>P. Preuß, R. Becker, B. Büchele, F. Nestmann</i>	
V-2.1	Veranlassung und Zielstellung .....	431
V-2.2	Systemarchitektur .....	431
V-2.3	Erläuterung der Programmoberfläche und -funktionen .....	433
V-2.3.1	Das Navigationsfenster .....	433
V-2.3.2	Das Datenansichtsfenster .....	436
V-2.3.3	Die beiden weiteren Fenster .....	438
V-2.4	Themenübersicht .....	438
V-2.5	Hinweise zu Start und Nutzung des Informationssystems .....	438

**„ÖKOLOGISCHE EINSCHÜBE“***S. Kiene*

Themenkomplex Ufer .....	85
Themenkomplex Hydrologie / Auen / Hochwasser .....	90
Themenkomplex Strömung .....	230
Themenkomplex Kornzusammensetzung / Geschiebe- und Feststofftransport .....	278
Themenkomplex Grundwasserhaushalt .....	388

**ANHANG**

Teilprojekte und Partner des Verbundprojektes .....	A1
Berichte des Verbundprojektes .....	A2
Veröffentlichungen/Tagungsbeiträge .....	A3
Diplom- und Studienarbeiten (unveröff.) .....	A6
Externe Kooperation / Elbe-Ökologie-Forschung .....	A8
Wichtige Abkürzungen .....	A10
BMBF-Berichtsblatt (Document Control Sheet)	



# KAPITEL I PROJEKTÜBERBLICK

F. Nestmann, B. Büchele

## I-1 Aufgabenstellung und Rahmenbedingungen

### I-1.1 Problemstellung

Generell befindet sich ein Fluss weder im naturbelassenen noch in einem technisch ausgebauten Zustand langfristig morphologisch im Gleichgewicht. Besonders die Elbe unterliegt ständig zeitlich und räumlich variierenden morphologischen Veränderungen wie Eintiefung oder Auflandung der Stromsohle oder Dünenbildung. Der Transport von Feststoffen (Kies, Sand etc.) wird durch die Feinkörnigkeit der Elbesohle begünstigt. Er kann als die natürliche Reaktion des Flusssystems auf die Abfluss- und Strömungsbelastung in Wechselwirkung mit den flussmorphologischen Gegebenheiten aufgefasst werden. Deren heutige Gestalt ist maßgeblich geprägt durch die im Interesse der Besiedlung, Landeskultur, Schifffahrt, Energieerzeugung und des Hochwasserschutzes seit vielen Generationen durchgeführten wasserbaulichen Maßnahmen wie Deichbau, Stromregulierung, Stauanlagen etc.

Zugleich stellen die Abfluss- und Transportprozesse, aufgrund ihrer natürlichen Dynamik, *den* Ausgangsimpuls ökologischer Entwicklung und Vielfalt in der Stromlandschaft dar. Das hohe Maß wasserhaushaltlicher Variabilität prägt Auen in einzigartiger Weise. Dagegen wirken sich langfristige hydraulisch-morphologische Veränderungen, wie Sohlerosion mit daraus folgenden sinkenden Oberflächenwasser- und Grundwasserständen, auf die Lebensgemeinschaften in Vorland und Aue einschneidend aus. Auen-

typische Tier- und Pflanzengesellschaften wandeln sich allmählich um oder verschwinden vollständig.

Eine wirtschaftlich, sozial und ökologisch sinnvolle Entwicklung des Elberaumes verlangt nach gesamtgesellschaftlichen Konzepten und Lösungen, die sowohl dem natürlichen System (Flussgebiet) als auch den verschiedenen Nutzungsansprüchen gerecht werden. (zum Vergleich siehe auch DEUTSCHER RAT FÜR LANDESPFLEGE 1994, BMBF 1995, DVWK 1996, EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT 2000).

Gegebenenfalls sind Maßnahmen erforderlich, z.B. um einen großräumigen Verlust von funktionellen Auen zu verhindern; integrierter Hochwasserschutz fordert den Erhalt und nach Möglichkeit die Wiedergewinnung von Retentionsräumen, mit Folgen für den Deichbau, den Grundwasserhaushalt und die Flächennutzung in der Aue; technisch notwendige Eingriffe zur Stabilisierung der Gewässersohle oder zur Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der Binnenschifffahrt müssen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf andere Bereiche untersucht werden; etc.

Die unter diesen Aspekten bestehenden Wissensdefizite und fehlenden Analysen bzw. Planungs- und Entscheidungsgrundlagen für Eingriffe in das Flusssystem mit großräumiger Wirkung stellen die generellen Vorzeichen für das Vorhaben dar.

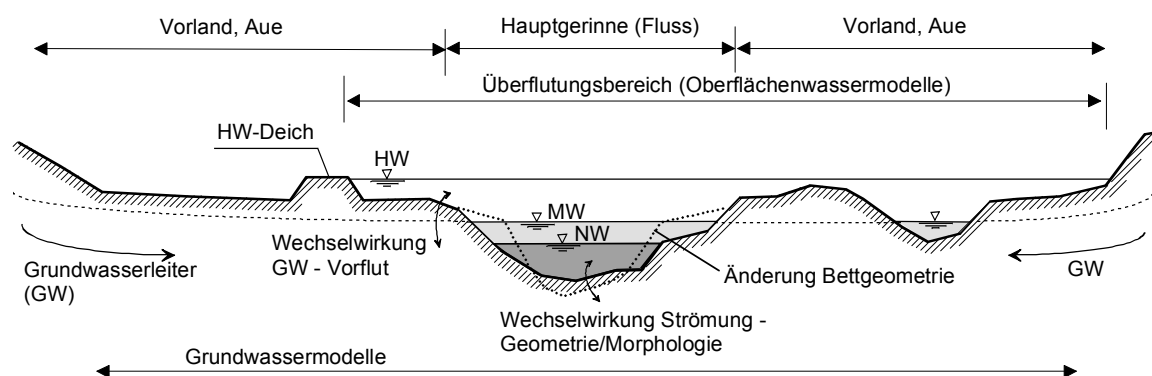


Abb. I-1.1 Schematischer Flussquerschnitt: Wechselwirkungen Geometrie, Morphologie, Grund- und Oberflächenwasser.

## I-1.2 Zielstellung im Verbundprojekt

Zur Erfassung, Analyse und Bewertung der Fließgewässer- und Auenökologie an der Elbe sowie der Auswirkungen menschlicher Eingriffe sind zunächst die *abiotischen Parameter und Prozesse* zu quantifizieren, die die natürlichen Funktionen des Gewässers und seiner angrenzenden Flächen maßgeblich prägen. In dieser Hinsicht ist es das Ziel dieses interdisziplinären Vorhabens, *großräumig den Gewässerlauf der Elbe in seinem Ist-Zustand* zu beschreiben.

In einer Gesamtbetrachtung der Elbe werden Kenngrößen und Vorgänge der Gewässermorphologie, der Abflussdynamik, der Strömung, des Feststofftransports, des Grundwasserhaushalts etc. mit ihren Wechselwirkungen und räumlichen und zeitlichen Entwicklungen untersucht. Die inhaltlichen Arbeiten werden umrahmt von Informationstechniken wie Datenbank und Geoinformationssystem (GIS) sowie koordinativen Aktivitäten. Abb. I-1.2 zeigt schematisch die Gesamtkonzeption des Verbundprojekts.

Hauptergebnis ist ein ausbaufähiges Instrumentarium bestehend aus Grundlagendaten und Modellen, das es ermöglicht, Auswirkungen einzelner Maßnahmen im und am Gewässer auf andere Interessensbereiche (z.B. Hochwasserschutz, Ökologie, Schifffahrt) quantitativ aufzuzeigen, und somit künftige Entscheidungen zu unterstützen. Die erarbeiteten Daten zum Gewässerlauf (Ist-Zustand) sollen für weitergehende Fragestellungen in den zuständigen Behörden sowie den Partnerprojekten der Elbe-Ökologie-Forschung zur Verfügung stehen.

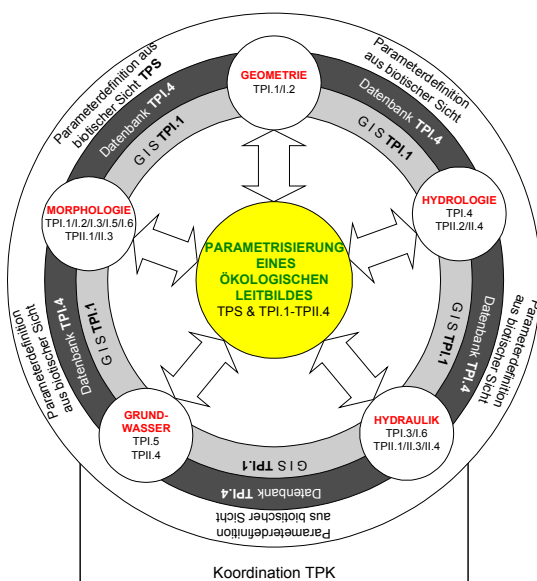


Abb. I-1.2 Gesamtkonzeption des Verbundprojekts (Liste der TP = Teilprojekte im Anhang A1).

## I-1.3 Inhaltliche Projektkonzeption

Die genannten Ziele wurden im Vorhaben durch zwei Projektteile (I und II) und die Untergliederung der Aufgaben in 12 Teilprojekte umgesetzt. Im Anhang (A1) des Gesamtberichts sind die Teilprojekte und Partnerinstitutionen genauer aufgeführt.

### Projektteil I:

*Analyse und Bewertung des Ist-Zustandes*

- Gesamtbetrachtung des Gewässerlaufes
- Fachbereiche Hydrologie, Hydraulik, Morphologie, Geologie, Ökologie

### Projektteil II

*Grundlagen für die Untersuchung zukünftiger Zustände und möglicher Entwicklungen*

- Detailanalysen (Teilgebiete)
- Hydrologie – Morphologie – Grundwasser

### Projektübergreifende Aktivitäten:

*Projektkoordination*

- fachliche und organisatorische Koordination

*Schnittstelle Abiotik-Biotik*

- Parameterdefinition aus biotischer Sicht

*Informationstechnik*

- Geoinformationssystem/GIS
- Datenbank (Zusammenführung/Verknüpfung)

Abb. I-1.2 veranschaulicht die interdisziplinäre Gesamtkonzeption des Vorhabens: Einzelaufgaben wurden in Teilprojekten bearbeitet, die Daten und Ergebnisse zusammengeführt und interdisziplinär genutzt. Den Schwerpunkt der Arbeiten bildete die großräumige Erfassung des Ist-Zustandes (Projektteil I), wobei Datengrundlagen entlang der gesamten Fließstrecke zusammengestellt und analysiert wurden. Ergänzt wird dies durch den Projektteil II, in dem Grundlagen für die Untersuchung zukünftiger Zustände und Entwicklungen anhand von Natur- und Laboruntersuchungen sowie Detailanalysen in Teilgebieten erarbeitet wurden. Mehrere Teilprojekte übernahmen zentrale bzw. projektübergreifende Aufgaben, um die interdisziplinäre Zusammenarbeit und Zusammenführung der Ergebnisse zu gewährleisten (Koordination, Schnittstelle Abiotik-Biotik, Datenmanagement, GIS-Bearbeitung). Das Teilprojekt „Schnittstelle“ hatte die besondere Aufgabe, alle (abiotischen) Teiluntersuchungen aus ökologischer Sicht zu begleiten und die erhobenen Parameter im Hinblick auf ihre Bedeutung (als eine Grundlage) zur Beschreibung ökomorphologischer Leitbilder und Entwicklungsziele zu prüfen.

### I-1.4 Hauptuntersuchungsgebiet(e)

Im Vordergrund der Projektuntersuchungen steht die *Gesamtbetrachtung der freifließenden Elbe entlang ihres Stromverlaufes* zwischen der tschechisch-deutschen Grenze und der Stauanlage Geesthacht nahe Hamburg. Die Länge des gewählten Abschnitts beträgt 568 km freie Fließstrecke. Während die Elbe oberhalb dieser Strecke bis Usti nad Labem nahe der Staatsgrenze überwiegend durch Staustufen geregelt ist, stellt das Wehr Geesthacht am unteren Ende der Strecke die Trennung der Binnenelbe von der tidebeeinflussten Unteren Elbe dar. (Abb. I-1.3).

Die Betrachtung im Gewässerlängsschnitt wird ergänzt durch Detailuntersuchungen in ausgewählten Teilgebieten, in denen durch Verlegung der Deichlinie eine Reaktivierung von Überflutungsräumen und Verbesserung der Auenökologie geplant ist (u.a. Erfassung von morphologischen Feinstrukturen sowie der Grundwasserdynamik in Vorland und Aue). Die drei wichtigsten untersuchten Teilgebiete bzw. Standorte für mögliche Deichrückverlegungen (siehe Abb. I-1.3) sind zugleich auch Hauptgegenstand weiterer Untersuchungen (Projekte) im Forschungsprogramm ‚Elbe-Ökologie‘.

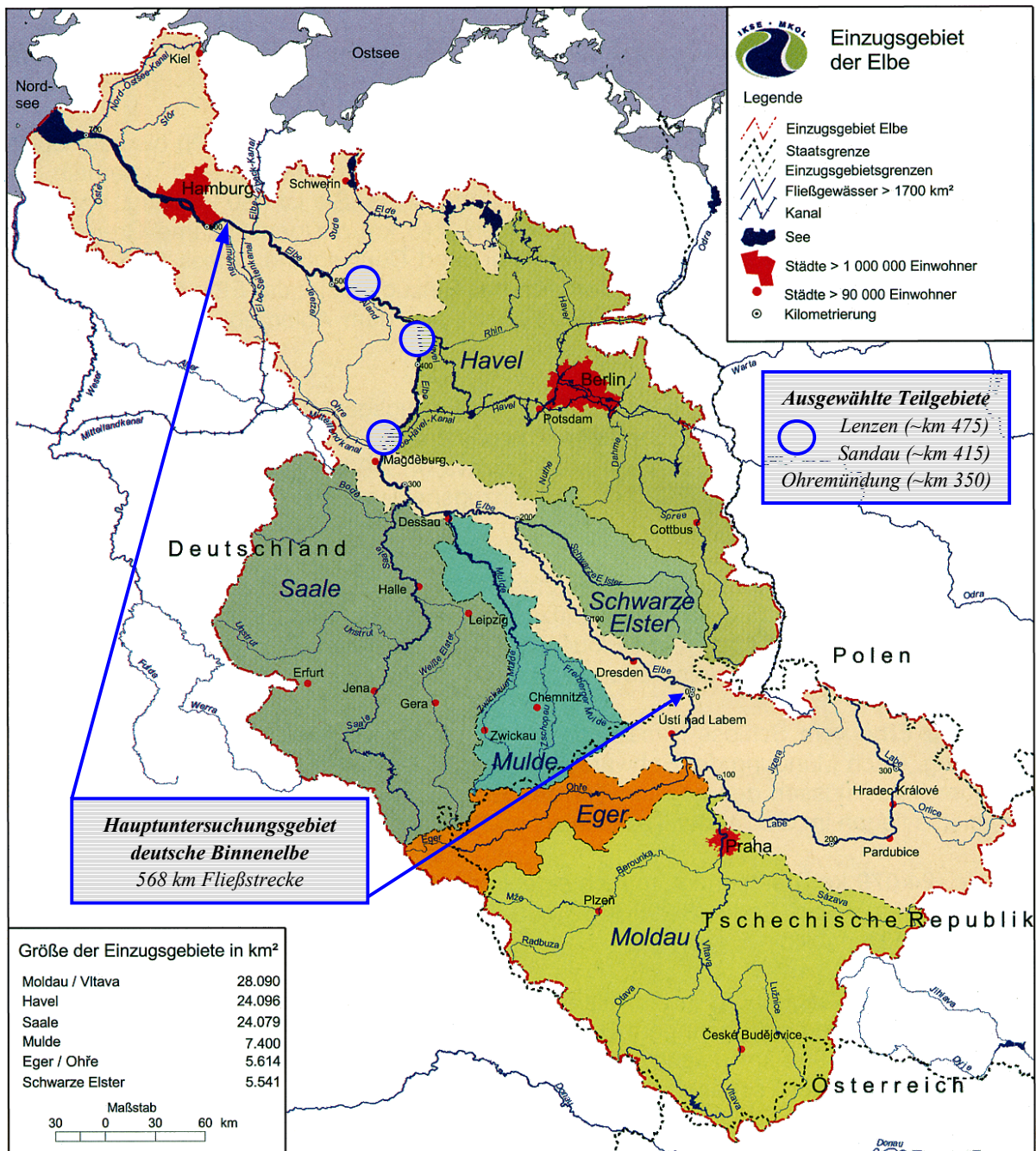


Abb. I-1.3 Lage der Hauptuntersuchungsgebiete des Verbundprojektes, dargestellt in der Karte des Elbe-Einzugsgebiets mit Teileinzugsgebieten der sechs größten Nebenflüsse (Quelle: IKSE 2001, verändert).

### I-1.5 Wissenschaftlich-technischer Stand

Erkenntnisstand und Wissensdefizite stehen in direktem Zusammenhang mit der Datenerhebung und Auswertung in Flüssen einschließlich der Vorländer. Der Stand, an dem mit dem Vorhaben angeknüpft wurde, entsprach einer Situation, in der (noch) kein fachlich homogener und datenmäßig vollständiger Gesamtüberblick umweltrelevanter abiotischer Parameter im Elbe-Längsschnitt verfügbar war und Detailinformationen zu spezifischen Fragen fehlten.

Im Vorhaben wurde versucht, in den folgenden Bereichen eine *Erweiterung des Verständnisses* der großräumigen und langfristigen Zusammenhänge und die *Schaffung von erforderlichen Grundlagen* (Daten, Werkzeuge etc.) für weitergehende Untersuchungen zu erreichen:

- Beschreibung der *geologischen und morphologischen Beschaffenheit des Flusses* und der Vorländer anhand charakteristischer Parameter im gegenwärtigen Zustand, einschließlich der relevanten flussgeschichtlichen Entwicklung,
- Beschreibung der *Geometrie/Topographie von Flussbett und Vorländern* über Quer- und Längsprofile sowie raumbezogene Daten im GIS (vor allem digitale Höhenmodelle),
- Beschreibung des *Abflussgeschehens* der Elbe in dessen zeitlicher und räumlicher Entwicklung und dessen Variabilität anhand hydrologischer Analysen einschließlich Regionalisierung statistischer Kenngrößen entlang des Gewässerlaufes (Arbeitsschwerpunkt: Identifizierung des hydrologischen *Ist-Zustands*, insbesondere für Hochwasser, vor dem Hintergrund langfristiger klimatischer und anthropogener Einflüsse),
- Beschreibung der *Strömungs- und Feststofftransportverhältnisse im Ist-Zustand* mit Hilfe hydraulisch-numerischer Modelle im Sinne einer durchgängigen Erfassung im Längsschnitt, speziell angesichts der bei Projektbeginn nur streckenweise verfügbaren Berechnungsmodelle und der fehlenden oder für großräumig plausible Darstellungen nicht einheitlichen Daten,
- Erfassung der *Wirksamkeit von potentiellen Maßnahmen der Deichrückverlegung* auf die Abflussverhältnisse im Längsverlauf der Elbe (auf der Grundlage der zuvor genannten hydrologischen und hydraulischen Informationen),

- Bilanzierung des *Feststofftransporthaushaltes* auf Basis von Naturmessungen des Geschiebe- und Feststofftransports, insbesondere unter Berücksichtigung der in der Elbe erheblichen, in Suspension transportierten und in Interaktion mit der Sohle befindlichen Sandfrachten,
- *Wirkung instationären Abflussverhaltens* und von Ausbaumaßnahmen auf das Feststofftransportgeschehen und die Entwicklung der Sohlformen der Elbe (Dünentransport),
- Flächenhafte *Erfassung von Parametern der Geländeoberfläche in Auengebieten* (Relief, Landnutzungsart, Rauheit, Bodenfeuchte etc.) mit Hilfe flugzeuggestützter multiparametrischer Radaraufnahmen (Pilotstudie),
- Erfassung *hydraulischer Prozesse* in heterogen strukturierten Auensedimenten im Hinblick auf die *Stabilität und Erosionsvorgänge im natürlichen Untergrund* von Deichen bei Hochwasser,
- Erfassung der Interaktion Fluss-Aquifer bzw. der *Dynamik des Grundwassers in Vorland und Aue* sowie Untersuchung der Auswirkungen von Deichrückverlegungsmaßnahmen.

Auf der Grundlage der Quantifizierung der natürlichen Prozesse und der anthropogen bedingten Änderungen ist es letztlich möglich, den Zustand des Gewässers und die Wirkung künftiger Maßnahmen abiotisch zu beurteilen und im weiteren ihre Wirkung auf die biotischen Verhältnisse aufzuzeigen. Erst auf dieser Basis lassen sich Leitbild und mögliche künftige Zustände beschreiben.

### I-1.6 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Die wichtigsten Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens waren:

- Generelle und rechtzeitige Datenverfügbarkeit: Laut Planung und Vorabstimmungen war vorgesehen, dass sich das Vorhaben nahezu vollständig auf bestehende Datenkollektive stützt (wie Gewässerprofile, Pegelmessreihen etc.), wogegen nur sehr geringe eigene Messungen geplant waren. Dies entsprach zum Teil nicht der Realität der Projektbearbeitung (s.u.).
- Zusammenarbeit mit anderen Stellen (s.u.),

- Projektkoordination und Datenmanagement,
- Interdisziplinäre, interne Zusammenarbeit und „Begleitung“ der abiotischen Untersuchungen aus biologisch-ökologischer Sicht.

### I-1.7 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Grundbewilligung sah eine **Projektlaufzeit** von drei Jahren vor (01.08.1996 bis 31.07.1999). Später wurde das Projekt dreimal verlängert (jeweils bis 31.12.1999, bis 31.12.2000 und bis 31.03.2001), wobei das Jahr 2000 einer finanziellen Aufstockung in reduziertem Umfang entsprach (Fortführung und Vervollständigung der Bearbeitung in 5 von 12 Teilprojekten). Währenddessen konnten die Verlängerungen in 1999 und 2001 durch Einsparungen an anderer Stelle kostenneutral bewältigt werden.

Inhaltlich verlief das Projekt weitgehend ungestört bzw. ohne Vorkommnisse, die das Gesamtergebnis an sich gefährdeten. Wie aber die Verlängerungen erahnen lassen, waren wesentliche Teile der Bearbeitung – vor allem aufgrund der zu bewältigenden großen Datenmengen über große räumliche und zeitliche Bereiche (Beispiele: > 500 km hydraulische Berechnungen mit vorheriger Aufbereitung von Geländeinformationen, systematische hydrologische Analyse langjähriger Pegelmessreihen etc.) – in den veranschlagten drei Jahren der Grundbewilligung nicht (vollständig) machbar. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass die kritische Prüfung und Aufarbeitung von Daten unterschiedlicher Herkunft, und die dabei nicht selten erforderliche, aufwendige Schließung von Datenlücken oder Verbesserung von unplausiblen Teilen einen breiten Raum einnahm. Auch mussten – insbesondere zur Frage der Grundwasserdynamik an der Ohremündung sowie des suspendierten Sandtransports an verschiedenen Punkten im Längsverlauf – weit mehr als geplant eigene Messungen durchgeführt werden.

Der Verlauf und damit das Ergebnis des Vorhabens stehen in engem Zusammenhang mit der fachlichen **Koordination** der Aktivitäten einerseits sowie der **Kooperation** unter den Beteiligten und mit externen Stellen andererseits (s.u.).

Die projektinterne Kooperation wurde durch regelmäßige Arbeitstreffen der Beteiligten und durch die frühe Realisierung einer engen Vernetzung über das Internet umgesetzt (v.a. zentrale Datenbank mit

Anbindung der Projektbearbeiter, FTP-Server für Datentransfers, Email-Verteiler etc.). Die interne Zusammenarbeit wurde durch die Aktivitäten der Koordinationsstelle (Kontakte nach außen, Informationsfluss etc.) entscheidend unterstützt und geführt.

Im Grunde zeigte sich, dass eine funktionsfähige Koordinationsstelle nicht nur aufgrund des großen Umfangs des Projekts während der eigentlichen Laufzeit dringend erforderlich war, sondern auch die Sicherstellung ihrer Aktivität über mehr als 12 Monate im Rahmen der **Vor- und Nachbereitung** (ohne BMBF-Finanzierung). Ohne eine derartige Koordination erscheint ein Vorhaben dieses Umfangs kaum zielführend realisierbar (und auch mit ihr sind der wissenschaftlichen Effizienz im Gesamtergebnis letztlich praktische und organisatorische Grenzen gesetzt). Wie der Umfang des vorliegenden Gesamtberichts zeigt, liegt die Größe des hiesigen Verbundprojekts in einem Bereich, der die Übersicht über alle Details und das Verständnis ihrer Verbundwirkung sowie die praktische Zusammenführung der Forschungsergebnisse rein mengenmäßig schwierig macht, auch wenn die bezweckte „Gesamtschau Elbe“ den Umfang inhaltlich rechtfertigt.

Das bedeutet, dass das Zustandekommen des hier erzielten **Ergebnisses** sowohl im inhaltlichen Detail als auch als Gesamtwerk nicht ohne weiteres als Selbstverständlichkeit gelten kann. Vielmehr ist dies das Resultat eines **erfolgreichen Zusammenspiels** aus einer durchdachten Projektkonzeption, einer effektiven Koordination und Kooperation in der Durchführung und einer am Gesamtziel orientierten Ergebniszusammenführung.

### I-1.8 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wichtigste externe Partner des Projekts waren die zuständigen öffentlichen Dienststellen, die neben der Bereitstellung von Daten das Vorhaben auch fachlich beratend unterstützten und die als künftige Nutzer der Ergebnisse vorrangig in Frage kommen. Dies sind in erster Linie die Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (**IKSE**), die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (**BAW, BfG, WSD-Ost, WSÄ**) und die **Umweltämter** der Bundesländer entlang der Elbe. Zudem fand über die gesamte Laufzeit eine intensive Zusammenarbeit mit den Partnerprojekten und Institutionen der **BMBF-Elbe-Ökologie-Forschung** statt (vgl. Anhang A8).

## I-2 Zusammenfassender Überblick der Untersuchungen und Ergebnisse

### I-2.1 Ökologischer Bezug

Um sicherzustellen, dass die i.a. von Nicht-Biologen bearbeiteten, abiotischen Projektuntersuchungen im Ergebnis auch als Grundlage für biotische Fragestellungen verwertet werden können, wurden alle Teilprojekte vom Teilprojekt „Schnittstelle Abiotik-Biotik“ fachlich begleitet. Ergebnisse dieser Arbeit sind die Zusammenstellung und kritische Analyse aller in den Teiluntersuchungen erhobenen Parameter, ihre Strukturierung (z.B. nach betroffenen Funktions- und Raumeinheiten), ihre ökologische Einordnung und schließlich die weitergehende Rückabstimmung mit den Bearbeitern. Parallel wurden umfassende Recherchen in der Literatur zur Relevanz und den Möglichkeiten der Verknüpfung von abiotischen und biotischen Größen angestellt. Beispielsweise wurden Angaben zur Überflutungstoleranz von auenspezifischen Arten recherchiert und dem Teilprojekt „Hydrologische Analyse“ eine entsprechende Detaillierung der Statistik (Häufigkeit und Dauer von Hochwasserabflüssen, Auftreten in der Vegetationszeit etc.) vorgeschlagen.

Die Notwendigkeit und die erfolgreiche Umsetzung des interdisziplinären Ansatzes im (Teil-)Projekt äußert sich im Schlussbericht auf vielfältige Weise; sowohl die Einzelergebnisse der Teilprojekte als auch der Gesamtbericht zeugen davon. Kurzgefasste sogenannte „ökologische Einschübe“ im Bericht erläutern exemplarisch ökologische Aspekte zu den Themenbereichen „Hydrologie/Auen/Hochwasser“, „Strömung“, „Geschiebe- und Feststofftransport“, „Ufer“ sowie „Grundwasserhaushalt“ und zeigen die Bedeutung der abiotischen Parameter auf.

### I-2.2 Informationstechnik (Kapitel V)

In dem vorliegenden Bericht wird an vielen Stellen auf die *Anlagen-CD* verwiesen. Diese CD enthält umfangreiche digitale Daten (wie z.B. hydrologische Kennwerte an Elbe-Pegeln, Wasserstände entlang 507 km Elbe, Längsschnitte von Uferparametern, geographische Daten wie Überflutungsflächen oder die Stromachse mit amtlicher Kilometrierung, thematische Karten zu Grundwasserhältnissen in Teilgebieten u.v.m.), die in ein Informationssystem mit räumlichen und thematischen Navigations- und Visualisierungsfunktionen integriert wurden.

Dieses Informationssystem verwirklicht anschaulich das Konzept des Datenmanagements, das im Projekt von vornherein verfolgt wurde: die logische und effektive Verknüpfung und Verwaltung der umfangreichen Sachdaten in relationaler Datenbank und geographischem Informationssystem. Die Konzepte der Datenmodellierung und die Erfahrungen in der Anwendung und Administration verschiedener vernetzter Systeme sind – *last but not least* – am Ende des Gesamtberichts dargestellt (Kapitel V-1). Sie werden ergänzt durch Erläuterungen zum Informationssystem der Anlagen-CD (Systemarchitektur, Funktionalität, Hinweise zur Nutzung etc.), die im Kapitel V-2 gegeben werden.

Das Informationssystem der CD stellt hinsichtlich der enthaltenen Informationen eine Auskopplung der wichtigsten (umfangreicheren) Ergebnisdatensätze, und aus informationstechnischer Sicht eine vereinfachte, gekoppelte Form der im Projekt eingesetzten Informationssysteme (Datenbank, GIS) dar.

### I-2.3 Geologie und Morphologie der Elbe und ihrer Auen (Kapitel II)

#### *Geologische Schnitte*

Zur Beschreibung der im Quartär und den wechselnden Kalt- und Warmzeiten des Tertiär entstandenen Untergrundschichten wurde 18 geologische Längs- und Querschnitte des Elbetals erarbeitet. Die Schnitte, die in der *Anlagen-CD* verfügbar sind, orientieren sich gezielt am heutigen Grundrissverlauf der Elbe und liefern wichtige Hinweise zur morphologischen Struktur der Elbesohle.

#### *Flussgeologische Kartierung*

Zum Verständnis der flussmorphologischen Vorgänge in den letzten 10.000 Jahren und des daraus resultierenden Feinaufbaus des Untergrundes wurde mittels Sondierungen eine geologische Kartierung im Gebiet der Ohremündung nahe Magdeburg durchgeführt. Sie dokumentiert die frühe Morphodynamik des Flusses (Gerinne- und Auensedimentation im Holozän infolge häufiger Laufverlagerungen zwischen eiszeitlich geprägten Talrändern). Im Detail erfasst wurden dabei die Entstehung und der Aufbau der heterogen geschichteten Kies- und Sandkomplexe im heutigen flussnahen Untergrund,



einschließlich der später entstandenen, vielerorts sehr mächtigen Auelehmdeckschicht. Die Ergebnisse dieser Kartierung bilden eine wesentliche Grundlage für weitere Teiluntersuchungen in diesem Gebiet: a) zur Grundwasserdynamik in der Aue (z.B. Infiltrationsleistung der Auelehmdeckschicht, Kap. IV-3), sowie b) zu Strömungs- und Erosionsvorgängen in den fluvialen Sedimenten, die für die Stabilität des Untergrundes von Deichen bei Hochwasser von Bedeutung sind (Kap. IV-2).

### ***Morphologische Entwicklung vor dem Hintergrund anthropogener Eingriffe***

Um die morphologische Entwicklung der Elbe in den letzten Jahrhunderten – insbesondere unter dem Aspekt menschlicher Einflussnahme – aufzuzeigen, wurden im Projekt eine Vielzahl relevanter Angaben in der einschlägigen Fachliteratur recherchiert und zusammengestellt (Kap. II-1.2). Die gefundenen Angaben und Ergebnisse früherer Arbeiten zeigen in ihrer Summe die vielfältigen Eingriffe, vor allem die des 18. und 19. Jahrhunderts mit ihren nachhaltigen Auswirkungen auf den heutigen Zustand, auf. Zu ihnen gehören Laufverkürzungen wie z.B. Durchstiche von Flussschlingen, Behinderung der Seitenerosion durch Uferbefestigung, Verschmälerung des Querschnitts durch Regulierungsmaßnahmen, Reduzierung der Vielfalt der Gewässerstrukturen durch Beseitigen von Totholz, Inseln etc. Daraus lassen sich verschiedene Aussagen zu räumlich-zeitlichen Aspekten der morphologischen Entwicklung ableiten. Besonders sind hier die (zwar allgemein bekannten, jedoch sorgfältig zu differenzierenden) Ursachen der streckenweise gravierenden und bis heute anhaltenden Tiefenerosion der Gewässersohle zu nennen. So ergeben sich aus der gemeinsamen Betrachtung der Ergebnisse der Untersuchungen von *Rommel* (zur Laufentwicklung zwischen 1600 und 1900) und von *Faulhaber* (zur morphologischen Entwicklung seit 1900) eindeutige Indizien für die Aussage, dass gerade jene Strecken von einer großräumigen und langfristigen Tiefenerosion betroffen sind, die eine deutliche Verkürzung erfahren haben, die der Fluss binnen der Jahrzehnte bis zur Festlegung seiner Ufer durch Ausbau nicht mehr eigen-dynamisch ausgleichen konnte. Das bedeutet, dass die Kombination von Verkürzung und Uferfixierung als eigentliche Ursache für die Tiefenerosion anzusetzen ist. Der Zeithorizont, der für die Elbe für eine vollständige morphologische Ausgleichsreaktion zu identifizieren ist, liegt je nach Eingriff zumindest bei

mehreren Dekaden.

Betrachtet man die Regulierung des Strombettes nicht in ihrer Eigenschaft als Uferfixierung, sondern im Sinne der Verengung des Flussquerschnittes, so ging mit dem Ausbau eine weitere Modifizierung der Sohl- und Uferstrukturen der Elbe einher. Neben der gezielten Beseitigung von hinderlichen Bänken in der Fahrwasserrinne durch menschlichen Eingriff, lässt sich diese morphologische Veränderung mit einem hydraulisch bedingten „Ausräumen“ bzw. einer Anpassung der Sohle zwischen den Regulierungsbauwerken beschreiben. Aus ihr resultiert eine Vertiefung um streckenweise mehrere Dezimeter und seitliche Umlagerungen in die Strömungsrandbereiche (Buhnen). Der Effekt der seitlichen Umlagerung lässt sich physikalisch aus den Sekundärströmungseffekten erklären, die in einem natürlichen Gerinne i.a. verstärkt werden, wenn das Verhältnis der Breite zur Tiefe verkleinert wurde.

### ***Historische/natürliche Gewässermorphologie***

Erfasst man gezielt Informationen über historische Zustände des Gewässers vor Ausbau, so lassen sich Hinweise gewinnen, die die Grundlage für die Entwicklung von ökomorphologischen Leitbildern und Entwicklungszielen bilden können. Dies gilt umso mehr, da sie real beobachtete Merkmale eines vom Menschen noch relativ wenig beeinflussten Systemzustands dokumentieren und damit ein prinzipiell naheliegendes Szenario einer potentiell natürlichen künftigen Entwicklung darstellen.

Besonders hilfreich sind historische Karten. Zwei unterschiedliche Auswertungen von Karten aus dem 18. Jahrhundert zeigen, jeweils im Vergleich zum Ist-Zustand, die Möglichkeiten der quantitativen Erfassung von naturnahen Gewässerstrukturen (wie Inseln, Seitengewässer etc.) und von Gerinne- und Strömungsparametern (Breiten-/Tiefenverhältnisse, Fließwiderstand, Fließgeschwindigkeit etc.) im unregulierten Zustand auf. Auf dieser Basis wird die Beschreibung einer naturraumtypischen Profilform ermöglicht, und es lassen sich ggf. über vereinfachende Ansätze konkretisierende Betrachtungen zu Leitbildgrößen anstellen (z.B. Wasserstände).

### ***Einzelparameter der Geometrie und Morphologie der Elbe im Ist-Zustand***

Die verschiedenen Teilarbeiten und -ergebnisse im Verbundprojekt zur Beschreibung von morphologischen Parametern im Ist-Zustand in Längs- und Querprofil sind im Kapitel II-3 zusammengefasst.

Hierbei wird zunächst eine *Grobgliederung* der Stromes in homogene Teilstrecken vorgenommen, die auf den hydraulisch-morphologischen Ergebnissen des Projekts basiert (d.h. Querschnittsflächen, Wasserspiegelnbreiten und –gefälle bei Niedrig- und Mittelwasser aus numerischen Berechnungen im Längsverlauf, zum Vergleich s.u.: Kap. III-2).

Zur Erfassung und Bewertung der natürlichen Gewässerfunktionen fanden in jüngerer Zeit verschiedene, z.T. standardisierte Verfahren Verbreitung, in denen einzelne Merkmale der Gewässerstruktur als Indikatoren für die ökologische Funktionsfähigkeit betrachtet werden („Gewässerstrukturgüte“). Die bisherigen Erfahrungen mit diesen Verfahren betreffen vor allem Fließgewässer kleiner bis mittlerer Größe. Für große Fließgewässer und Wasserstraßen existieren erste Bewertungsansätze bzw. Vorschläge für Kartierverfahren seit dem Jahr 2000, und es mangelt noch an praktischen Erfahrungen. Die im Projekt erarbeiteten Einzelparameter sind in Anlehnung an die Parametersysteme und räumlichen Gliederungen dieser Ansätze in Kap. II-3.2 ff., gegliedert nach den Bereichen Sohle, Ufer und Umfeld (Vorland), dargestellt. Viele der im Bericht beschriebenen Parameter sind als digitale Datensätze mit räumlichem Bezug (GIS) bzw. als Grafiken in der *Anlagen-CD* verfügbar. Die Parameterdichte beträgt im allgemeinen 100-1000 m.

Beispiele für die zusammengestellten Parameter, die den deutschen Elbe-Längsverlauf soweit wie möglich einheitlich und durchgängig beschreiben, sind a.) geographische Daten (wie Stromachse mit amtlicher Kilometrierung in 100 m-Schritten, Uferlinien), b.) die Kornzusammensetzung der Sohlsubstrate in 1 km-Schritten, c.) mittlere/maximale Sohlhöhen im Strommittelnbereich (bezogen auf 70% der Streifenlinienbreite) sowie Talwegshöhe, d.) Breite und mittlere Neigung der Ufer/Wasserwechselzone zwischen Niedrig- und Mittelwasser (abgeleitet aus Querprofilen und Wasserständen), e.) Angaben zur Uferbeschaffenheit (Verbau, Bühnenabstände, sowie Verlandungsformen abgeleitet aus Luftbildern bei Niedrigwasser), f.) Angaben zur Ausuferungshäufigkeit im Längsverlauf, g.) geographische Daten zu vorhandenen Überflutungsflächen der Elbe mit Flächenangaben in 1 km-Schritten (Polygone mit Unterteilung nach Fluss und Vorland, bezogen auf die Deichführung bzw. auf berechnete Wasser-Land-Grenzlinien bei  $HQ_{100}$ ).

## I-2.4 Hydrologische Analyse (Kapitel III-1)

Die *Abflussverhältnisse* stellen in Flusslandschaften ein wesentliches Element dar, das am Beginn vieler Wirkungsketten steht und auf das sich die ökologischen und anthropogenen Nutzungen im Naturraum mehr oder weniger anpassen müssen. Um Grundlagen für Forschung und Entscheidungsfindungen für die Flusslandschaft zu liefern, wurden *hydrologische Untersuchungen* zur besseren Beschreibung und zum Verständnis des Abflussprozesses in seinem mittleren Verhalten, seiner Variabilität und seiner zeitlichen Entwicklung durchgeführt. Der Schwerpunkt wurde dabei auf die – den Raum entlang der Elbe besonders prägenden – *Hochwasserverhältnisse* gelegt. (Kapitel III-1.1).

Zur Untersuchung der langfristigen Abflussentwicklung sind einerseits die *natürlichen hydrologischen Randbedingungen* (Geomorphologie im Einzugsgebiet, Klima etc.), andererseits die *anthropogenen Veränderungen* im Einzugsgebiet und entlang des Gewässers zu berücksichtigen. Im Elbegebiet sind besonders die Inbetriebnahme *großer Talsperren* seit den 1930er Jahren zunächst in Deutschland sowie seit den 1950er Jahren auf tschechischem Gebiet relevant, die eine ausgleichende Wirkung auf die Abflussdynamik, insbesondere auf die Extreme (Hoch- und Niedrigwasser) haben. Auf der anderen Seite fanden an der Elbe noch in den 1950er bis 1980er Jahren verschiedene *Deichbaumaßnahmen* mit Entzug von Retentionsflächen statt, die auf Hochwasserereignisse eine Wirkung der Beschleunigung des Ablaufs und Erhöhung der Abflussscheitel haben. Die angesprochenen Einflüsse wurden in den Analysen im Projekt berücksichtigt, wobei zur Absicherung der weiteren Aussagen (v.a. der Statistik über längere Zeiträume und ihrer Regionalisierung im Längsverlauf) vertiefende Untersuchungen (z.B. vergleichende Simulationen mit hydrologischen Modellen) angestellt wurden. (Kapitel III-1.2 u.a.).

Für die Analyse wurde eine umfangreiche *Datenbasis* aufgebaut, insbesondere mit täglichen Wasserstands- und Abflusszeitreihen an Elbe- und wichtigen deutschen Nebenflusspegeln. Die verfügbaren Reihelängen unterscheiden sich an den verschiedenen Pegeln beträchtlich. Die ältesten Reihen (am Pegel Dresden) reichen bis 1853 zurück, die jüngsten beginnen in den 1960/70er Jahren. (Kapitel III-1.3).

Zur Analyse und Simulation des Abflussprozesses wurde eine *methodische Vorgehensweise* entwickelt,

die aus Elementen der Datenerhebung, der Konsistenzanalyse, der statistischen Analysen, der Simulationsmodelle und der theoretischen hydrologischen Überlegungen besteht. Vor dem Hintergrund unsicherer oder gar fehlender Abflussmessdaten und nichtstationärer, komplexer Prozesse erlaubt es diese Vorgehensweise, in schrittweisem Fortschritt und in wechselseitiger Abstimmung und Ergänzung der genannten Einzeluntersuchungen *den Abflussprozess zunehmend verlässlich, repräsentativ, umfassend, fundiert, weiter in die Vergangenheit zurückreichend und gezielter auf besonders problematische Räume und Ereignisse zu beschreiben* (Kapitel III-1.4). Da die Ergebnisse dieser hydrologischen Beschreibung von weitreichender Bedeutung für viele Belange sind, erscheint es auch im Rahmen dieser Zusammenfassung angebracht, in wenigen Absätzen auf deren Hindergründe einzugehen.

Um also Aussagen auf der Basis verlässlicher Daten erarbeiten zu können, wurde das Datenmaterial einer kritischen **Prüfung auf Konsistenz** unterzogen. Als älteste und verlässlichste und damit „**Leitpegel**“ *im langfristigen und großräumigen hydrologischen Bild* wurden die Pegelstellen Dresden (Elbe-km 55,6), Barby (Elbe-km 295,5) und Neu Darchau (Elbe-km 536,5) angesehen. Eine *Inkonsistenz* liegt beispielsweise vor, wenn die an zwei benachbarten Pegeln vorliegenden Abflüsse eines Hochwasserereignisses infolge der (bei Hochwasser meist unsicheren) Umrechnung des gemessenen Wasserstandes in Abflusswerte größere (unplausible) Abweichungen voneinander aufweisen. In dieser Hinsicht konnte teilweise ein erheblicher Korrekturbedarf für Reihen vor 1981 aufgezeigt und – vor allem für die mit mehr Messdaten belegte Zeit ab den 1960er Jahren – plausible Verbesserungsvorschläge erarbeitet und mit den zuständigen Stellen erörtert werden. Kapitel III-1.5 geht auf diese Konsistenzprüfung ausführlich ein. Trotz intensiver Vertiefung der Problematik (Kapitel III-1.6.7f) verblieben jedoch Inkonsistenzen für einige Hochwasserereignisse der 1940er Jahre, besonders im Bereich unterhalb der Saalemündung.

Im Sinne der oben beschriebenen Vorgehensweise und Plausibilisierung der Abflussreihen wurde eine **Stationaritätsanalyse** mit statistischen Verfahren durchgeführt, da angesichts einer klimatologischen Variabilität und anthropogen bedingter Einflüsse auf die Abflussdynamik von *Instationaritäten* auszugehen war. Dies war – neben dem Interesse für Abflussveränderungen – an sich erforderlich, um die

geeignete Behandlung einer Instationarität in weiteren Analyseschritten zu gewährleisten bzw. mögliche Verzerrungen in den Analyseergebnissen zu vermeiden. Die wichtigsten *festgestellten Instationaritätseffekte* waren ein komplexes Schwingungsverhalten im Mittel- und Hochwasserbereich mit Gruppierungseffekten (Phasen) nasser und trockener bzw. hochwasserreicher und –armer Perioden im 20. Jahrhundert, sowie bei Einbeziehung des 19. Jahrhunderts - zumindest am Pegel Dresden - ein *signifikanter langfristig abnehmender Trend jährlicher Hochwasserscheitelwerte* mit einer Konzentration dieser Entwicklung auf die Zeiträume um die Jahrhundertwende des 19. und 20. Jahrhunderts (*klimatisch* bedingt) und der 1950er/60er Jahre (*klimatisch und anthropogen* bedingt). (Kapitel III-1.6.1 ff.)

Die Berücksichtigung dieser instationären Entwicklung ist für die Bewertung der Ergebnisse von Untersuchungen anderer Disziplinen in der Flusslandschaft (z.B. Auenökologie) von großer Bedeutung. Im Hinblick auf die weiteren hydrologischen Untersuchungen war die Schlussfolgerung zu ziehen, dass *statistisch zu analysierende Abflussreihen eine ausreichende Länge* haben mussten, um nicht zu stark von hochwasserreichen oder –armen Phasen geprägt zu werden. Zudem sollte die untersuchte Reihenlänge *an verschiedenen Pegeln einheitlich* sein, um vergleichbare und regionalisierbare Ergebnisse zu erhalten. Dies galt umso mehr, da die genannten (klimatisch und anthropogen bedingten) längerfristigen Veränderungen berücksichtigt werden mussten. Aufgrund dessen waren die weiteren Untersuchungen auf - für verschiedene Bedingungen - repräsentative (Teil-)Zeiträume zu beziehen. Die Abgrenzung und Einordnung von *repräsentativen Zeiträumen* war durch die Stationaritätsanalyse möglich und durch die genannten Veränderungen auch erklärbar. Insbesondere konnte ein *jüngerer Zeitraum 1964-1995 abgegrenzt* werden, der bei ausreichender Länge für statistisch bereits verlässliche Aussagen die *gegenwärtigen hydrologischen Bedingungen (Ist-Zustand) am besten und weitgehend homogen* repräsentiert. Zudem zeigten die Analysen, dass es gerechtfertigt ist, innerhalb des 20. Jahrhunderts auch *längere Kennwertreihen* (z.B. 1904-1995 bzw. 1936-1995, zum Vergleich siehe unten) statistisch zu analysieren. Nicht ohne weiteres zu rechtfertigen waren demgegenüber Abflussstatistiken über den Zeitraum ab 1853, d.h. die Einbeziehung der Daten des 19. Jahrhunderts. (Kapitel III-1.6.6)

Insgesamt konnten zur Beschreibung der langfristigen Abflussentwicklung folglich mehrere Zeiträume unterschieden und näher verglichen werden, wie beispielsweise 1853-1903, 1904-1954, 1904-1995, 1936-1995 sowie 1964-1995. Hierbei wurde der Zeitraum 1964-1995 nicht nur als der *hydrologische Ist-Zustand* betrachtet und näher analysiert (s.u.), sondern aufgrund seiner räumlich durch mehr Pegelstellen und qualitativ besser abgesicherten Datenbasis sowie der im Ergebnis identifizierten Muster (z.B. im Längsschnitt) auch als Referenz für die Plausibilisierung und Analyse weiter zurückreichender Zeiträume verwendet. In diesem Sinne konnte der **Zeitraum 1936-1995 als erweiterter hydrologischer Ist-Zustand** und repräsentativer Zeitraum für das – klimatisch und anthropogen bedingt – *variablere 20. Jahrhundert* betrachtet und analysiert werden. (Kapitel III-1.6.2.2.6).

Nach diesen Ausführungen zu den grundsätzlichen Voraussetzungen und ersten (vertiefenden) Schritten sowie notwendigen Differenzierungen im Hinblick auf möglichst plausible und präzise Aussagen können die *weiteren hydrologischen Analysen* wie folgt zusammengefasst werden.

An den Einzelpegeln wurden **umfangreiche statistische Analysen des Abflussgeschehens** durchgeführt, zu deren Ergebnisse u.a. die Ermittlung grundlegender statistischer Kennwerte (wie Gewässerkundliche Hauptwerte), die Ermittlung von Dauerlinien und des mittleren Abflussregimes (Jahresgang), sowie die extremwertstatistische Analyse der Jahresreihen verschiedener Abflusskennwerte, insbesondere im Hochwasserbereich (HQ-T der Jährlichkeit  $T = 2$  bis 100 Jahre sowie von 1 bis 50 Tagen Dauer der Überschreitung) gehörten. Die in botanischer Hinsicht interessierende Vegetationszeit wurde gesondert untersucht. (Kapitel III-1.6.3 und **Anlagen-CD**).

Zur **Regionalisierung** der Abflussparameter entlang der gesamten Fließstrecke – und damit für Aussagen an beliebigen, nicht bemessenen Gewässerstellen – wurden die pegelweisen Statistiken gegeneinander abgeglichen und mittels geeigneter Regressionsansätze in **hydrologische Längsschnitte** überführt. Es wurden Längsschnitte für verschiedene statistische Kenngrößen und Bezugszeiträume (s.o.) erstellt. Sie beschreiben räumliche und zeitliche Ausprägungen des Abflussgeschehens im Sinne eines plausiblen Gesamtbildes (Kapitel III-1.6.4 und **Anlagen-CD**).

Anhand des gleichen Zeitraums 1964-1995 wurden **Simulationsmodelle des täglichen Abflussprozesses und seiner Teilprozesse** angewandt bzw. entwickelt. Dabei handelte es sich einerseits um das *Translations-Diffusions-Modell ELBA* zur Simulation des Fließprozesses in verschiedenen Gewässerabschnitten der Elbe und der unteren Nebenflussbereiche, dessen Modellparameter von der BfG zur Verfügung gestellt wurden. Andererseits kam das *stochastische Modell zur Generierung täglicher Abflusswerte nach Treiber* zur Anwendung auf die Abflussreihen der Elbe bzw. auf Reihen großer Teilgebiete. Beide Modelle waren in der Lage die gemessenen Abflussreihen in *guter Näherung* anzupassen bzw. statistisch äquivalent zu simulieren (Kapitel III-1.6.5) und wurden für die spezifischen Fragestellungen weiterentwickelt.

Dies erlaubte es, die hydrologische Gesamtsituation detaillierter zu erforschen und nachzubilden und damit eine verbesserte Begründung der Ergebnisse (Konsistenz- und Stationaritäts-/Homogenitätsanalyse, Abflussstatistik) bei gegenseitiger Absicherung aller dieser Untersuchungsteile zu erreichen. Ferner konnten die Simulationsinstrumente zur Bewertung des Abflussprozesses unter veränderten historisch aufgetretenen oder veränderten fiktiven Bedingungen (Szenarien) genutzt werden.

Bezogen auf das ELBA-Modell gehören hierzu die Simulation bzw. Rekonstruktion der Abläufe historischer Hochwasserwellen (u.a. im Bereich Magdeburg bei Öffnung des Pretziener Wehrs sowie an der Unteren Mittelelbe vor und nach Eindeichungen, einschließlich der Ableitung zugehöriger fiktiver statistischer Kennwerte für den Zeitraum 1936-1995) sowie die Untersuchung der Wirksamkeit potentieller Deichrückverlegungen auf die Abflussverhältnisse entlang der Elbe (hierzu: ausführliche Darstellung in Kapitel III-3). Auf der anderen Seite wurde das Treiber-Modell zur stochastischen Simulation des Abflussprozesses in Teileinzugsgebieten eingesetzt, v.a. zur Differenzierung von Abflusskomponenten sowie zur Erzeugung einer beliebigen Anzahl von Reihen bestimmter statistischer Eigenschaften bzw. Längen im Hinblick auf detailliertere Diagnosen. So konnte u.a. das Abflussgeschehen am Pegel Dresden im Zeitraum 1853-1903 spezifisch untersucht werden, und dabei veränderte Verhältnisse (bezogen auf die heutige Hochwassersituation) sowie weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt werden.

### I-2.5 Hydraulisch-morphologische Berechnungen (Kapitel III-2)

Ein zentrales Ziel der Projektbearbeitung bestand in der *Erstellung und Anwendung von hydraulisch-numerischen bzw. sedimentologischen Modellen*, um wesentliche Größen der Strömung und des Feststofftransports (wie Wasserspiegel, Fließgeschwindigkeiten etc.) entlang der deutschen Binnenelbe beschreiben zu können. Die Bearbeitung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Bundesanstalten für Wasserbau (BAW) und Gewässerkunde (BfG), wobei letztendlich die Einbeziehung und Ergänzung bereits verfügbarer Teilstreckenmodelle und im Ergebnis eine in sich konsistente Gesamtübersicht der (Parameter der) Elbe angestrebt wurde.

Angesichts der Zielstellung (Längsbetrachtung), der verfügbaren Datenbasis (v.a. Querprofile) sowie des großen Bearbeitungsumfangs (568 km Fließstrecke) erschien es von vornherein als am sinnvollsten, numerische Berechnungen der Wasserspiegellagen und des Feststofftransportes eindimensional zu realisieren. Zur einfacheren Nachnutzung der Modelle nach Projektabschluss wurden die Software und Datenstandards mit den Systemen der Bundeswasserstraßenverwaltung (WSV), insbesondere der BAW, kompatibel gehalten.

Im Projekt konnte das von der WSV verfügbar gemachte Datenmaterial weitestgehend genutzt bzw. ergänzt werden und hydraulisch-numerische bzw. sedimentologische Modelle in größtmöglicher Genauigkeit erstellt werden. Neben der hydraulischen Aufbereitung der Geometrien und Festlegung der Modellrandbedingungen stand dabei die Eichung mittels in der Natur aufgenommener Wasserspiegel-Fixierungen im Vordergrund. Dabei ist festzuhalten, dass Fixierungen des Wasserspiegels nicht in allen Abschnitten der Elbe über das gesamte Abflussspektrum vorhanden sind (i.d.R. fehlen Hochwasserfixierungen). In wenigen kurzen Teilabschnitten erwies sich eine Modellierung aufgrund fehlender Daten oder besonderer Problemstellungen als zu aufwendig. In Verbindung mit den hydraulischen Modellen wurden Sedimenttransportmodelle aufgebaut und geeicht. Die Eichung der quasistationären Modelle erfolgte u.a. anhand von Naturdaten der Geschiebe- und Schwebstoffmessungen der BfG aus den 1990-er Jahren sowie durch Nachbildung der bekannten Sohlveränderungen infolge der hydrologischen Belastung (Abflusszeitreihen) der letzten

Jahrzehnte. Für die künftige problemspezifische Nutzung und Weiterentwicklung der Modelle sind weitere Naturmessungen zu empfehlen.

Im Ergebnis liefern die im Vorhaben neu erstellten Berechnungsmodelle (über insgesamt ca. 212 km) querschnittsbezogene hydraulische und sedimentologische Parameter wie Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten, Sohlschubspannungen, Feststofffrachten etc. in Funktion des Abflusses. Die Modelle können im Hinblick auf wasserbauliche und ökologische Fragestellungen (Szenarien, mögliche Planungsvarianten) weiter aufbereitet werden und wurden der BAW zur Verfügung gestellt. Über die Variation von Rauheitsbeiwerten kann z.B. die Entwicklung von Auwald simuliert oder über eine veränderte Geometrie die Auswirkungen von wasserbaulichen Maßnahmen im Fluss oder Vorland erfasst werden. Mit den Sedimenttransportmodellen lassen sich darüber hinaus die möglichen Auswirkungen auf den Sedimenttransport prognostizieren und Erosions- und Akkumulationsstrecken ausweisen. Durch Anwendung der Modelle können auch jene Elbeabschnitte eingegrenzt werden, in denen sich gegebenenfalls ein Untersuchungsbedarf mit erhöhtem Aufwand erwarten lässt.

Durch systematische *Umsetzung der Kennwerte der hydrologischen Analyse im Längsschnitt (MNQ, MQ, MHQ ... HQ<sub>100</sub> des Zeitraums 1964-1995) in hydraulische Berechnungen*, d.h. durch einheitliche Anwendung der insgesamt 12 Teilstreckenmodelle des Vorhabens und der Bundesanstalten, kann im Ergebnis ein bisher nicht vorhandenes, konsistentes **Gesamtbild hydraulisch-morphologischer Parameter** entlang der deutschen Binnenelbe gezeichnet werden. Die hydraulischen Berechnungen decken dabei eine **Gesamtstrecke von 507 km** zwischen Elbe-km 0 und 568 ab. Diese Beschreibung des Ist-Zustands bietet die Grundlage zur Klassifizierung der Parameter und ihrer Variabilitäten im Längsverlauf, bis hin zu einem differenzierten Vergleich von Teilstrecken.

Die Nutzung des erarbeiteten Ergebnisdatensatzes für weiterführende Fragestellungen der Fachverwaltung und Forschung (d.h. zur Verwertung über das Vorhaben hinaus) wird unterstützt durch die digitalen Datensätze bzw. räumlich hoch aufgelöste Längs- und Querschnittsdarstellungen, die durch einfache Recherche- und Druckmöglichkeiten der **Anlagen-CD** zu entnehmen sind.

### I-2.6 Wirksamkeit von Deichrückverlegungen auf die Hochwasserabflussverhältnisse (Kapitel III-3)

Zur Verbesserung der Verhältnisse der Auenökologie und des Hochwasserschutzes entlang der Mittleren Elbe sind zahlreiche Standorte in der Diskussion, an denen durch eine *Rückverlegung der Deichlinie* zusätzliches Überschwemmungsgebiet geschaffen werden könnte. Bezüglich der Wirksamkeit von Rückhaltmaßnahmen auf die Abflüsse entlang der Elbe gibt es bisher wenig Informationen. Deshalb wurde über eine hydrologische Modellierung des Gewässerlaufs der deutschen Elbe eine systematische Untersuchung der Retentionswirkung von Einzelstandorten und ausgewählten Kombinationen von Standorten durchgeführt, wobei deren großräumige Gesamtwirkung im Vordergrund steht. Im Hinblick auf den Hochwasserschutz ist hierbei der Betriebsweise der Maßnahmen (ungesteuerte/gesteuerte Flutung) eine entscheidende Bedeutung beizumessen. Die Untersuchung ist Bestandteil der hydrologischen Arbeiten im Verbundprojekt (s.o.) und wurde, aufbauend auf dessen erarbeiteten Daten- und Modellgrundlagen, im Rahmen der Projektverlängerung (Jahr 2000) durchgeführt.

Kernziel dieser Teiluntersuchung war es demnach, mit Hilfe weiterentwickelter *hydrologischer Modellansätze* bzw. der Integration vorliegender Daten und Modellkomponenten zu einem Gesamtmodell „Wellenablauf entlang der deutschen Binnenelbe mit optionalen Retentionswirkungen“ die **Wirksamkeit von Deichrückverlegungen auf das überörtliche Abflussgeschehen**, d.h. im Längsschnitt der Elbe, zu erfassen. Im Vordergrund des Interesses stand die *Gesamtbetrachtung* der erreichbaren Retentionswirkung durch potentielle Maßnahmen im Flusssystem, einschließlich Aussagen zur Wirkung mit gesteuertem Betrieb, z.B. einiger größerer Standorte als sogenannte Flutpolder zur gezielten Kappung des Hochwasserscheitelabflusses. Das bedeutet auf der anderen Seite, dass *lokale Effekte* (wie z.B. das aus einer Rückdeichung sich ergebende hydraulische Strömungsbild zwischen Flussbett und Vorland mit Einfluss auf die Geschwindigkeiten, Wasserspiegel etc.) *hier nicht* betrachtet wurden. Vielmehr wurde nach dem Prinzip der Seeretention eine Volumenbilanzierung im zeitlichen und räumlichen Ablauf von Hochwasserwellen vorgenommen. Hierbei wurden sowohl 11 historische Ereignisse als auch ein synthetisches 100-jährliches Ereignis betrachtet.

Insgesamt wurden 17 potentielle Retentionsflächen mit einer Summe von ca. 105 km<sup>2</sup> für die Simulationen ausgewählt und erfasst, ergänzt um die flutbaren Polder im Bereich der Havelmündung, die insgesamt ca. 90 Prozent der Gesamtfläche aller potentiellen Maßnahmen abdecken und damit relevante Aussagen ermöglichen. Die unter Annahme verschiedener Varianten errechneten *erzielbaren Retentionswirkungen* sind im Ergebnis anhand von *Längsschnitten der Hochwasserkennwerte (Scheitelabflüsse) im Vergleich zum Ist-Zustand* dargestellt.

Auf Grundlage der Simulationsergebnisse können grundsätzliche Erkenntnisse zur Wirksamkeit von Retentionsmaßnahmen entlang der Elbe festgehalten werden, wie z.B. dass

- großräumige und länderübergreifende Wirkungen von Deichrückverlegungsmaßnahmen zur Verbesserung des *Hochwasserschutzes* entlang der Elbe nur durch *gesteuerte Flutung* der (zusätzlichen) Retentionsflächen erzielt werden,
- selbst *wenige größere, gesteuerte* Maßnahmen nicht unerheblich zu einer gezielten Minderung von Hochwasserscheitelabflüssen beitragen können, auch auf hohem Abflussniveau bzw. im Bereich eines 100-jährlichen Ereignisses,
- Deichrückverlegungsflächen, die aus unterschiedlichen Gründen *ungesteuert*, d.h. während des natürlichen Wasserspiegelanstiegs vor Eintreffen des Wellenscheitels, geflutet werden sollen, großräumig einen verzögernden Effekt im Ablauf der Wellen, jedoch keine relevante Minderung der Scheitelabflüsse erwarten lassen,
- im Hinblick auf einen wirksamen Beitrag zukünftiger Deichrückverlegungen zur großräumigen Hochwasservorsorge an der Elbe weitere vertiefende Untersuchungen, insbesondere zur ereignisabhängigen Steuerung von (größeren) Einzelmaßnahmen, notwendig sind.

### I-2.7 Geschiebe- und Feststofftransporthaushalt der Elbe (Kapitel III-4)

Die großräumigen und langfristigen Entwicklungen im Feststoffhaushalt der Elbe stehen in direktem Zusammenhang mit der Sohlhöhenentwicklung im Längsverlauf (Erosions- und Anlandungstendenzen). Diese Entwicklung muss daher ständig überwacht und ggf. durch Maßnahmen gesteuert werden.

Zur operationellen Unterstützung dieser Aufgabe hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ein Bilanzmodell entwickelt, welches durch Simulation der zeitlichen und räumlichen Entwicklung des Geschiebetransports sowie des für die Bettbildung bedeutsamen Anteils der suspendiert transportierten Sandfracht entsprechende Frachtlängsschnitte und daraus ableitbare morphologische Größen berechnet.

Grundlage für diese Berechnungen sind die seit den 1990-er Jahren durchgeführten Geschiebe- und Schwebstoffmessungen an 28 Messstellen entlang der Elbe bzw. daraus ableitbarer Transport-Abfluss-Beziehungen. Die Bilanzierung der Frachten in Teilabschnitten (Überschüsse, Defizite) ermöglicht die Abgrenzung von Erosions- und Akkumulationsstrecken sowie die Volumenvorgabe für eine Geschiebepflichtung (insbesondere eine verbesserte Dosierung der im Aufbau befindlichen Geschiebezugabe in der Erosionsstrecke der Elbe).

Vertrauenswürdige Aussagen hinsichtlich der Beurteilung des aktuellen morphologischen Zustands der Elbe wie auch der Prognose zukünftiger Erosions- bzw. Anlandungstendenzen setzen die zuverlässige Quantifizierung nicht nur des Geschiebetransports, sondern auch des Feststoffanteils voraus, der nur zeitweise mit der Sohle im Austausch steht, jedoch zu einem erheblichen Maße zur Sohlbildung beiträgt. Der Ermittlung dieses Anteils kommt gerade an der Elbe besondere Bedeutung zu, da im gesamten Verlauf der deutschen Elbe Sandfraktionen einerseits in erheblichem Umfang Bestandteil des Sohlenmaterials sind, andererseits die Frachten des suspendierten Sandes diejenigen des Geschiebes teilweise deutlich übersteigen.

Bisher konnte dieser Anteil allenfalls nur grob abgeschätzt werden, da über die komplexen Zusammenhänge noch zu wenig bekannt ist. Ziel des Teilprojektes ‚*Suspendierte Feststofffracht*‘ war es, auf der Grundlage umfangreicher Naturuntersuchungen Aufschluss über Bedingungen und Wirkungsweisen der in diesem Übergangsbereich sich abspielenden Prozesse zu erlangen und Ansätze zu entwickeln, die es erlauben, alle sohlhöhenrelevanten Feststoffkomponenten zuverlässig quantifizieren zu können. Diesen Zielen entsprechend wurden im Vorhaben umfangreiche Analysen von Naturmessungen durchgeführt und daraus die sedimentologischen und hydraulischen Parameter ermittelt, die den Transport von suspendiertem Sand bestimmen.

Für 28 Elbe-Messstellen, die von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zum Großteil regelmäßig beprobt werden, konnten zahlreiche Regressionsbeziehungen dieser Parameter abgeleitet werden, insbesondere auch für solche, die den bettbildenden Anteil des suspendierten Sandes beschreiben. Die Ergebnisse der einzelnen Messstellen sind wiederum als Grafiken in der *Anlagen-CD* verfügbar.

## I-2.8 Simulation von Transportprozessen in einer Laborrinne (Kapitel III-5)

Die morphodynamische Entwicklung eines Flusses wird hauptsächlich durch das Stabilitätsverhalten der Gewässersohle und den Feststoffhaushalt bestimmt. Dabei verläuft der Geschiebetransport an Sohlen feinsandiger Flachlandflüsse unter bestimmten hydraulischen Bedingungen nicht in Form von Einzelkornbewegungen, sondern es bilden sich aus der Sohle heraus dünenartige Großformen, welche völlig andere *Bewegungsmechanismen* aufweisen. Das Vorhandensein solcher Formationen, allgemein als *Transportkörper* (*Riffel, Dünen*) bezeichnet, beeinflusst das gesamte hydraulische Verhalten des Fließgewässers und wirkt sich auch direkt auf den Sedimenttransportbeginn und die Transportrate aus.

Diese Verhältnisse sind gerade auch an der Elbe vorzufinden, deren geologisch-morphologische Gegebenheiten eine große Beweglichkeit der Sedimente im Strombett begünstigen. Zugleich variieren diese Prozesse stark mit schwankender Wasserführung; oft müssen z.B. nach Hochwasser Bänke in der Fahrrinne der Schifffahrt gebaggert werden. Trotz der großen Bedeutung dieser Transportformen an der Unteren Mittel-Elbe kann mit dem derzeitigen Kenntnisstand i.a. noch keine zufriedenstellende Beurteilung bei Fragen der Sohlstabilität und des Sedimenttransports erfolgen. Dies gilt gerade auch hinsichtlich der Schwierigkeiten in der quantitativen Erfassung und Beschreibung der (sehr variablen) Transportprozesse, die sich durch die *Instationarität der Abflüsse* ergeben. So basieren die gängigen Geschiebetransportformeln auf der Annahme einer stationären Strömung, was in der Natur im Normalfall nicht zutrifft. Am ehesten kommt eine langsam steigende / fallende Ganglinie dieser Annahme nahe.

Vor diesem Hintergrund wurden innerhalb des Teilprojektes ‚*Physikalische Modelle*‘ grundlagenorientierte Untersuchungen (wasserbauliche Modellver-

suche im Labor) durchgeführt, die sich mit dem Einfluss der Instationarität des Abflussgeschehens auf die Transportformen und die Transportrate bei Dünentransport sowie darauf aufbauend mit der Auswirkung von Ausbaumaßnahmen (Buhnen) auf die Sohlstabilität befassen.

Die zentralen Fragestellungen der experimentellen Untersuchungen waren:

- Wie entwickeln sich die Sohlformen (z.B. Höhe der Dünen) und die Geschiebetransportrate unter instationären Strömungsbedingungen?
- Wie verhält sich der Geschiebetransport an Sohlen feinsandiger Flachlandflüsse bei großen Breite-Tiefen-Verhältnissen (insbesondere im Vergleich zu schmalen Laborrinnen)?
- Wie verändern sich die Sohlformen und die Transportrate infolge Ausbau des Gerinnes mit Buhnen?
- Wie verändern sich die Sohlstabilität, die mittlere Sohlhöhe und die Wassertiefe infolge Ausbau mit Buhnen?

Um eine Übertragbarkeit der Labordaten auf Naturverhältnisse (an der Elbe) zu erreichen, sind einerseits komplexe hydraulische und sedimentologische Gesetzmäßigkeiten zu beachten. In dieser Hinsicht konnten im Rahmen der Untersuchung weiterführende Berechnungsansätze zur Berücksichtigung der (geringeren) Dichte des Laborsediments entwickelt werden. Andererseits sind die im Modell gemessenen Größen (z.B. Dünenhöhe) mit den – gerade für instationäre Betrachtungen – sehr seltenen Angaben aus der Natur zu vergleichen. Hierzu lagen Referenzdaten aus dem Abschnitt um Elbe-km 450 vor.

Es wurden Experimente bei stationären und instationären Strömungen sowohl in einer kleinen als auch in einer großen Laborrinne (Länge x Breite: 13 x 0,3 m bzw. 60 x 2,5 m) durchgeführt, wobei es sich in der kleinen Rinne um Vorversuche für die Hauptuntersuchungen in der großen Rinne handelte. Das Untersuchungsprogramm sowie die Ergebnisse sind ausführlich in Kapitel III-5.4 ff. dargestellt. Hervorzuheben ist, dass die Versuchstechnik soweit automatisiert wurde, dass kontinuierliche Messungen zur Strömung und zum Transport – u.a. im zeitlichen Verlauf von drei simulierten Abflussganglinien (Hochwasserwellen) der Elbe der 1980/90-er Jahre – erfolgen konnten.

Einige wesentliche (quantitative) Erkenntnisse aus der Untersuchung sollen hier zusammenfassend angesprochen werden:

- Es konnte nachgewiesen werden, dass die heute üblichen Berechnungsansätze für Geschiebetransport, die i.a. für stationäre Strömungen ermittelt wurden, bei instationären Abflussbedingungen zu erheblichen Fehleinschätzungen führen können.
- Es konnte aufgezeigt werden, dass das Breite-Wassertiefe-Verhältnis des Gerinnes einen maßgebenden Einfluss auf den Transport und die Sohlformen hat, was auf Sekundäreinflüsse im Strömungsbild (quer zur Hauptströmungsrichtung) zurückzuführen ist. Dieser Umstand hat eine besondere Relevanz in Bezug auf die Übertragung von Labordaten aus (oft) schmalen Rinnen auf natürliche (größere) Fließgewässer.
- Am Beispiel der Elbe konnte gezeigt werden, dass die Sohle eines durch Dünenbildung geprägten Strombetts mehrere Monate benötigt, um nach einem Hochwasserereignis mittlerer Größe wieder einen dynamisch stabilen Zustand (stationäre Dünenhöhen etc.) zu erreichen. Zugleich erweist sich während der instationären Belastung (Hochwasser) das Vorhandensein von Dünen als stabilisierend. Die Höhe der Dünen wächst auch nach Überschreitung des Wellenscheitels solange an, bis der Strömungszustand auf das Niveau zurückgefallen ist, dass der momentanen Höhe der Dünen für stationär angepasste Verhältnisse entspricht. Hieraus erklärt sich eine relative Trägheit der Reaktion der Sohle gegenüber den schneller ablaufenden Abflussänderungen, wie das nur langsame „Abschleifen“ der Sohlformen bei abnehmendem Abfluss. Eine entscheidende Rolle im Prozess spielen die Geschwindigkeit der Abflussänderung (Steilheit der Ganglinie) sowie die hydrologische Vorgeschichte bzw. die Vorbelastung der Sohle zum Zeitpunkt der Beobachtung.
- Während die Dünenhöhe deutlich auf einen veränderten Strömungszustand reagiert, zeigt die Länge der Dünen nur geringfügige bzw. relativ langsame Änderungen.
- Wird ein Gerinne durch Buhnen ausgebaut, d.h. das Bett künstlich verengt, so ergeben sich nachhaltige Auswirkungen auf die Transport-



prozesse, die teilweise in den ersten Jahren nach dem Gerinneausbau wieder abklingen bzw. sich nach einer Umformung des Strombetts, sowohl im Hauptgerinne als auch in den Randbereichen der Strömung (Buhnen), teilweise relativieren. Es ist demnach erwartungsgemäß eine Zunahme der Wassertiefen und Dünenhöhen sowie der Geschiebetransportrate infolge Buhnenausbau festzuhalten, wobei der erhöhte Transport eine Eintiefungstendenz der Sohle bewirkt, bei der nach mehreren Jahren wiederum Effekte der Stabilisierung beobachtet werden können. Es liegt nahe, dass sowohl durch die Buhnen selbst als auch durch die instationär variablen bzw. durch Gerinneverengung tendenziell erhöhten Dünen einen erheblichen Einfluss auf das gesamte Widerstandsverhalten des Gerinnes haben, vor allem bei erhöhten Wasserführungen und in der Zeit danach.

Die Ergebnisse dieser Laborexperimente liefern somit – neben den experimentellen Erfahrungen, gerade zum instationären Versuchsbetrieb – wesentliche Grundlagen und verschiedene Ansatzpunkte für künftige Untersuchungen nicht nur im Labor, sondern insbesondere auch bezogen auf das Verständnis und die Quantifizierung der Transportprozesse in der Natur.

Die Daten der Laboruntersuchung wurden zudem zur numerischen Simulation der Transportprozesse und Entwicklung von Sohlformen bzw. für die Weiterentwicklung vorhandener Modelltechnik in dieser Hinsicht genutzt (Kapitel III-6).

### **I-2.9 Erfassung von Parametern in Auen mittels Radarbefliegung (Kapitel IV-1)**

Im Vordergrund des Teilprojekts „Pilotstudie Radarbefliegung“ stand die Frage nach den Möglichkeiten und Grenzen der Radarfernerkundung zur multiparametrischen Erfassung von Auengebieten. Die flugzeuggestützte Radarfernerkundung ist ein relativ neues und noch in der Entwicklung befindliches Werkzeug zur Beschreibung des Geländereiefs, zur Vegetations- und Landnutzungskartierung und zur Erfassung von geophysikalischen Oberflächenparametern. Interessant an dieser Erfassungstechnik erscheint somit einerseits, dass die polarimetrischen Daten der Radarsensoren bezüglich unterschiedlicher Zielgrößen analysiert werden können. Auf der

anderen Seite ist aufgrund hoher Flughöhen und einer demzufolge großen Flächenabdeckung am Boden (im Vergleich zu anderen Befliegungstechniken wie Photogrammetrie und Laser-Scanner) mit relativ geringen Kosten pro Fläche zu rechnen.

Das Untersuchungsgebiet liegt bei Lenzen an der Unteren Mittelbe und entspricht im Kernbereich der Fläche einer möglichen Deichrückverlegung, mit weitergehenden Untersuchungen zweier weiterer Forschungsvorhaben im Forschungsprogramm Elbe-Ökologie (Vorhaben der Landesanstalt für Großschutzgebiete Brandenburg sowie der Bundesanstalt für Wasserbau). Der Flugstreifen hat eine Grundfläche von 15 x 5,4 km. Ergänzt durch Bodenkampagnen wurden zwei Befliegungen zu unterschiedlichen jahreszeitlichen Verhältnissen (Vegetationsbedeckungen) durchgeführt. Die Flughöhe betrug dabei 3100 m, die Streifenbreite am Boden 2000 m und die horizontale Auflösung 2 x 2 m.

Für die Pilotstudie wurde das flugzeuggetragene experimentelle Radarsystem E-SAR (= *Experimental Synthetic Aperture Radar*) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) ausgewählt und eingesetzt. Die SAR-Interferometrie wurde als Verfahren zur Evaluierung der Mikroreliefferfassung vor allem im Hinblick verlandeter rezenter Altarme und Rinnen, die als Leitbahnen für Qualmwasserströme bei Hochwasser der Elbe dienen, auf ihre Genauigkeit hin erprobt.

Als Ergebnisse der Datenauswertung ergaben sich eine Vegetations- und Landnutzungsklassifizierung sowie die flächendetaillierte Bestimmung verschiedener Oberflächenparameter, Oberflächenrauigkeit und Bodenfeuchte, die anhand thematischer Karten dargestellt wurden.

Aufgrund neuerlicher Verbesserungen bei dieser Radartechnik, nicht zuletzt in der Datenauswertung durch leistungsfähigere Soft- und Hardware, ergeben sich im Vergleich zu den in der Praxis etablierten Erfassungstechniken interessante Entwicklungsmöglichkeiten in der Zukunft.

### **I-2.10 Strömungs- und Erosionsprozesse in fluviatilen Sedimenten (Kapitel IV-2)**

Der Untergrund entlang von Flüssen und deren Auen besteht überwiegend aus glazialen Sedimenten und fluviatilen Ablagerungen, die der zurückliegenden Morphodynamik des Flusses zuzuordnen sind. Die durch Erosion und Sedimentation entstandenen Untergrundzonen erscheinen bei oberflächlicher Betrachtung zunächst als einheitliche, mit einer mehr oder weniger durchgängigen Lehmmauflage versehene Sand/Kies-Komplexe, die sich jedoch bei detaillierter Untersuchung bereichsweise als stark heterogen darstellen. Ein solcher Untergrund bildet fast ausnahmslos die Gründungsverhältnisse in Auen für Bauwerke wie Deiche. Bei anstehendem Hochwasser am Deich wird der Untergrund einer hydraulischen Belastung, d.h. einer möglichen Durchströmung und Auswaschung, ausgesetzt und kann ggf. aufgrund seiner Feinstruktur entscheidend zu einer Gefährdung der Standsicherheit der Bauwerke beitragen. Diese Problematik führt u.a. zu Fragen in Bezug auf die innere Stabilität der Sedimentkörper.

Im Teilprojekt „Untergrundverhältnisse“ wurde hierzu in situ ein Tracerversuch zur Erkundung der Strömungsvorgänge in kleinräumig strukturierten Sedimenten durchgeführt. Das gewählte Untersuchungsgebiet liegt an der Ohremündung nördlich von Magdeburg. Die Untersuchung wurde ergänzt durch eine flussgeologische Kartierung (s.o.) und stellt ihrerseits eine Ergänzung zu weiteren Untersuchungen in diesem Gebiet im Hinblick auf eine mögliche Deichrückverlegung dar (s.u.).

Die Ergebnisse des Tracerversuches zeigen deutliche Zusammenhänge zwischen der ermittelten geologischen Feinstruktur des Untergrunds (Sedimentkörper verschiedener Körnung und Durchlässigkeit) und der Ausbildung präferenzierter Fließwege und unterschiedlicher Durchströmungsgeschwindigkeiten. In weitergehenden (laufenden) Untersuchungen können die Daten anhand von numerischen Simulationen in räumliche Verteilungen der Durchströmung überführt und mit den Resultaten geostatistischer Auswertungen von Bohrprofilen zur Kornstruktur verglichen werden, um auf dieser Grundlage letztlich ein Werkzeug zur Beurteilung fluviatiler Untergrundverhältnisse im Hinblick auf die oben beschriebenen Vorgänge zur Verfügung zu stellen.

### **I-2.11 Grundwasserdynamik Fluss – Aue in Bereichen möglicher Deichrückverlegungen (Kapitel IV-3 und IV-4)**

Die Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Oberflächengewässer (Elbe) und Grundwasser der Vorland- und Auenbereiche konzentrieren sich auf *zwei Gebiete möglicher Deichrückverlegungen* und wurden auf die Untersuchungen bzw. Szenarien im Verbundvorhaben „Rückgewinnung von Retentionsflächen und Altauenreaktivierung an der Mittleren Elbe in Sachsen-Anhalt“ (Koordination: Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt Halle) im BMBF-Forschungsprogramm Elbe-Ökologie abgestimmt. Zu beiden Gebieten finden sich Ergebnisdaten (wie Grundwasserkarten im GIS) auf der *Anlagen-CD*.

#### ***Gebiet Ohremündung/Rogätz (Kap. IV-3)***

Das im Teilprojekt „Grundwasserdynamik“ untersuchte Gebiet ist das Elbetal nördlich von Magdeburg im Bereich der Ohremündung (~ Elbe-km 350). Zur Ermittlung des Einflusses einer Deichrückverlegung auf die Grundwasserdynamik wurde auf Basis der lokalen hydrogeologischen Gegebenheiten ein numerisches Grundwasserströmungsmodell erstellt. Die instationären Berechnungen wurden mit einem Finite-Elemente-Programm durchgeführt.

Die hydraulische Anbindung der bei Hochwasser überstauten Vorland- und Auenbereiche wurde mittels eines physikalisch basierten Leakageansatzes im Modell realisiert. Dieser Ansatz ermöglicht die Erfassung der Infiltrationsraten durch die Auedeckschichten bei Hochwasser auf Basis deren hydraulischer Eigenschaften und Mächtigkeiten und damit eine verlässliche Prognose der Grundwasserdynamik bei Deichrückverlegung. Die für diesen Ansatz erforderlichen Leakageparameter wurden räumlich differenziert und zeitabhängig definiert.

Die Kalibrierung des numerischen Grundwasserströmungsmodells erfolgte anhand der Ganglinien von mehreren Grundwasserpegeln, wobei eine gute Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Ganglinien erzielt werden konnte.

Mit dem Modell wurde durch eine mehrjährige Simulation (1985-1999) der Ist-Zustand definiert und mittels statistischer Parameter charakterisiert. Die Auswertung der Mittelwerte, Schwankungsbreiten, Extremwerte und Dauerlinien an allen Berechnungsknoten des Finite-Elemente-Netzes er-

möglichte eine flächige Darstellung der instationären Grundwasserdynamik. Anhand dieser statistischen Parameter wurde auch der Einfluss einer Deichrückverlegung auf die Grundwasserdynamik quantifiziert, wobei derselbe Modellzeitraum unter veränderten Bedingungen simuliert wurde. Der Einfluss einer Deichrückverlegung zeigte sich an einer generellen Zunahme der Wasserstandsdynamik bei Hochwasser, d.h. bei hohen Wasserständen. Daraus resultiert eine starke Veränderung der minimalen Flurabstände sowie eine Verlängerung der Unterschreitungsperioden geringer Flurabstände. Eine bedeutsame Beeinflussung der Grundwasserdynamik konnte sowohl im Bereich der erweiterten Vorländer als auch landseitig der neuen Deichlinie beobachtet werden, wobei Gebiete mit geringen Flurabständen betroffen sind. Diese Ergebnisse ermöglichen weitergehende ökologische Aussagen (insbesondere zur Flora und Fauna) in Bereichen, in denen sich kritische Flurabstände verändern.

Neben einer direkten Anwendung zur Ermittlung des Einflusses von Deichrückverlegungen bietet das numerische Modell die Möglichkeit, andere Veränderungen der hydraulischen Bedingungen, wie z.B. Wasserstandsänderungen der Elbe durch Sohleintiefungen, im Untersuchungsgebiet in ihrer Auswirkung auf die Grundwasserdynamik zu untersuchen. Da das kalibrierte numerische Modell auf physikalischen Ansätzen beruht, d.h. dass die zugrunde liegenden hydraulischen Parameter direkt die Aquifereigenschaften charakterisieren, sind auch Prognoserechnungen mit veränderten Randbedingungen durchführbar. Somit kann auch der Einfluss eines veränderten Abflussgeschehens in der Elbe, z.B. aufgrund von Ausbaumaßnahmen oder hydrologischen Entwicklungen, auf die Grundwasserdynamik prognostiziert werden.

#### **Sandauer Gebiete (Kap. IV-4)**

In Kooperation mit dem Verbundprojekt wurde an der Universität Karlsruhe im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs „Ökologische Wasserwirtschaft“ ein analytisches Grundwassermodell entwickelt, das mittels vereinfachter physikalischer Ansätze die Prozesse des Wasseraustausches zwischen Fluss und Aquifer (horizontal), sowie der Infiltration infolge Niederschlag/Überflutung und der Verdunstung (vertikal) beschreibt. Die analytische Lösung erfolgt eindimensional entlang von Transekten, die im

allgemeinen die kürzeste Entfernung eines Punktes im Gebiet zum nächstgelegenen Fließgewässer (bis zu mehreren Kilometern hinter der Deichlinie) beschreiben. Ziel dieser Modellentwicklung ist die Schaffung eines Werkzeugs zur Beschreibung der langfristigen (> 30 Jahre) Wasserhaushaltsdynamik in Auengebieten über mesoskalige Raumbereiche (ca. 10–100 km<sup>2</sup>), wobei letztlich die *statistische Repräsentativität der Aussagen* im Vordergrund steht (v.a. langfristige Kennwerte der Grundwasserdynamik in ihrer räumlichen Ausprägung). Der Modellansatz beruht demzufolge zwar auf wenigen Prozessen, diese können jedoch den Hauptanteil der Grundwasserdynamik erklären (insbesondere die über die Einflussgröße Elbewasserstand auftretenden Schwankungen) und werden physikalisch basiert modelliert. Ein großer Vorteil dieses Modellansatzes liegt in der schnellen Bearbeitungs-/Rechenzeit.

Die Anwendung dieses Modells erfolgte im Bereich möglicher Deichrückverlegungen nahe der Ortschaft Sandau (ca. Elbe-km 415). Die Fläche des Modellgebiets beträgt 55,6 km<sup>2</sup>. Das Grundwassermodell wurde anhand von 19 Grundwassermessstellen des Staatlichen Amt für Umwelt Magdeburg im Zeitraum 1970 bis 1999 kalibriert und validiert. Es konnte eine gute Übereinstimmung der modellierten Zeitreihen mit den gemessenen erzielt werden.

Für die Charakterisierung des Ist-Zustandes wurden zunächst statistische Maßzahlen der Grundwasserhöhen aus der Analyse der modellierten Zeitreihen im Zeitraum 1964 bis 1995 berechnet.

Durch eine Deichrückverlegungsmaßnahme wird bei Hochwasser zunächst die Strömungscharakteristik der Elbe lokal verändert. Für zwei mögliche Deichvarianten wurden die im genannten LAU-Projekt hydronumerisch berechneten Elbewasserstände als Randbedingung in die Modellierung übernommen.

Die Grundwasserdynamik verändert sich im Untersuchungsgebiet in zwei Aspekten. In den Bereichen, in denen die alte Deichlinie belassen werden soll (z.B. um die Ortschaft Sandau) führt eine lokale Wasserspiegelabsenkung der Elbe bei Hochwasser auch zu einer Absenkung des Grundwassers. In den Bereichen mit rückverlegtem Deich reagiert der nun bei Hochwasser deichnahe Aquifer schneller und mit höheren Spitzenwerten auf den Elbewasserstand als im Ist-Zustand. Dieser Effekt nimmt mit zunehmender Entfernung von der Elbe ab.

## I-3 Zur Synthese und Bewertung

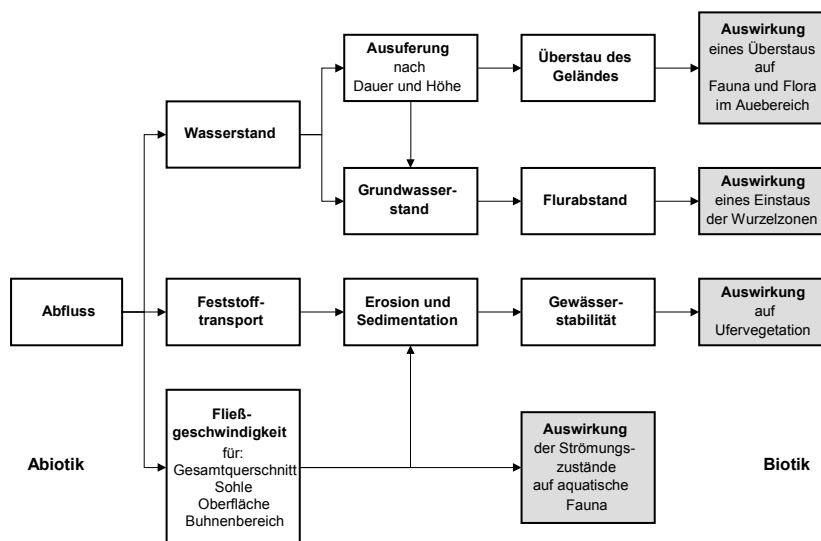
### I-3.1 Verknüpfung von Ergebnissen / Schnittstellen zu anderen Disziplinen

Die Kenntnis der abiotischen Parameter und ihrer Zusammenhänge bildet die Grundvoraussetzung für das Verständnis der natürlichen Funktionen im Ökosystem Fließgewässer. In diesem Sinne stellen die Ergebnisse der verschiedenen Teiluntersuchungen im Verbundprojekt wesentliche Grundlagen (Daten, Werkzeuge) zur quantitativen Beschreibung der abiotischen Verhältnisse im gegenwärtigen Zustand und der Wechselwirkungen von Teilprozessen im Längs- und Querschnitt der Elbe dar. Aus diesen Grundlagen können die Schnittstellen (Parameter) zu anderen Disziplinen, insbesondere physikalisch steuernde Größen verschiedener Wirkungsketten im System, abgeleitet werden und deren Verknüpfung mit den Parametern der Biotik verfolgt werden.

Abb. I-3.1 zeigt schematisch mögliche Transformationen von Variablen, die sich aus den im Projekt erarbeiteten Grundlagen ergeben. Beispiele für im Projekt realisierte Transformationen sind die hydraulische Berechnung von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten aus Abflüssen, die räumliche Verschneidung von Höhendaten des Geländes und Wasserspiegeln zur Ermittlung von Ausuferungshäufigkeiten und Überflutungsflächen, die Erarbeitung von Abfluss-Transport-Funktionen, die Grundwassermodellierung usw. Weitere Beziehungen über die Projektergebnisse hinaus sind in Abhängigkeit der Fragestellung zu definieren.

Neben den ökologischen Funktionen des Gewässers stehen seine wirtschaftlichen Funktionen, die anhand der Projektergebnisse näher spezifiziert werden können, wie die Schiffbarkeit (z.B. Dauer nutzbarer Wassertiefen) oder der Hochwasserschutz (z.B. Ermittlung von Schadenspotentialen, Schutzgrad von Deichen). Auch hier sind entsprechende Transformationen möglich. Die Thematik wird an dieser Stelle – angesichts der Spannweite der möglichen Interessen und Nutzungen – nicht weiter vertieft. Anhand der Ausführungen wird jedoch klar, dass aus der Kombination unterschiedlicher Größen (des Projekts) im Rahmen integrierter Betrachtungen grundlegende Beiträge zur Lösung von Nutzungskonflikten und als Entscheidungshilfe in Bezug auf künftige Maßnahmen und deren Auswirkungen in der Flusslandschaft zu erwarten sind.

Eine mögliche konkrete Anwendung einer solchen kombinierten Betrachtung liegt im Aufbau eines computergestützten *Decision Support Systems (DSS)* für die Elbe (zum Vergleich: BFG 2001). In dem geplanten Elbe-DSS ist die Integration erheblicher Anteile der Projektergebnisse vorgesehen. Hierzu gehören neben Grundlagendaten des Gewässerlaufes verschiedene Modellkomponenten aus dem Bereich der hydrologischen Simulation von Abflüssen und Retentionswirkungen, der Hydraulik, des Feststofftransports sowie der Grundwasser.



**Abb. I-3.1** Schematische Darstellung von Wirkungsketten im Flusssystem: Beispiele der Transformation von Parametern der Abiotik und Biotik über definierte Schnittstellen (z.B. numerische Modelle).

### I-3.2 Grundlagen zur Bewertung großer Fließgewässer anhand der naturraumspezifischen Querprofilform

Die natürliche oder vom Menschen veränderte Form eines Flussquerschnitts lässt sich anhand des Breiten/Tiefen-Verhältnisses  $B/h$  beschreiben, wobei  $B$  die Wasserspiegelbreite und  $h$  die mittlere Fließtiefe  $h$  als Quotient der durchflossenen Querschnittsfläche  $A$  zu  $B$  ( $\approx$  benetzter Umfang bei sehr breiten Verhältnissen) darstellt. Trägt man  $B/h$  in Abhängigkeit der variablen Höhe des Wasserstands und damit als Funktion der Abflusses  $Q$  auf, so lässt sich – wie Abb. I-3.2 schematisch zeigt – die veränderliche strömungswirksame Querschnittsform über das gesamte Abflussspektrum darstellen.

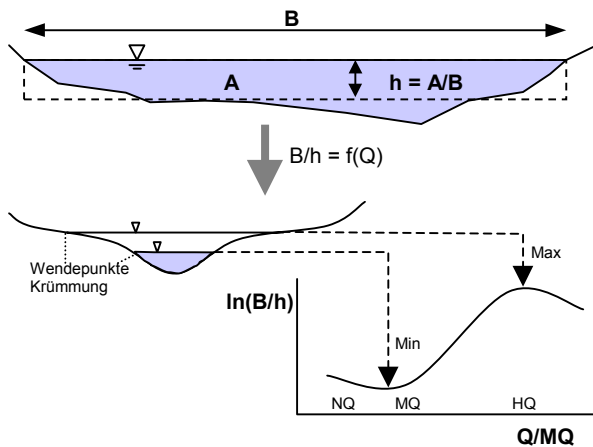


Abb. I-3.2 Schemadarstellung zur Ermittlung des Breiten-Tiefen-Verhältnisses (Profilform).

Im Rahmen der Projektarbeit konnten nach diesem Schema Querprofilgeometrien entlang des Elbelaufs im heutigen Zustand ausgewertet und als mittlere Profilform des Gerinnes in Teilstrecken dargestellt werden. Abb. I-3.3 zeigt fünf ausgewählte Beispiele für Breiten/Tiefen-Verhältnisse in Teilstrecken der Elbe, wobei im Hinblick auf ihre Vergleichbarkeit die Abflusswerte als Relativgrößen bezogen auf das Mittelwasser der einzelnen Teilstrecke betrachtet werden (Anm.: die Logarithmierung der Darstellung dient dem verbesserten visuellen Verständnis). Aus der Darstellung lassen sich exemplarisch folgende grundsätzliche Erkenntnisse (quantitativ) ableiten:

Wie Abb. I-3.3 im Vergleich von Teilstrecken vom Oberlauf bis zum Unterlauf (Nr. 1-5) zeigt, sind verschiedene großräumige, morphologisch begründete Entwicklungsmuster zu erkennen. Während im sächsischen Mittelgebirgsbereich (Strecken Nr. 1 und 2) bei schmaler Talsohle fast geradlinige  $B/h$ -Verläufe auftreten, ergibt sich mit zunehmender Ausdehnung von Überflutungsaue eine stärkere Krümmung und Verschiebung/Zunahme der  $B/h$ -Verläufe (Maximalwerte bei Strecke Nr. 4 im Bereich der Mittleren Elbe). Strecke Nr. 3 entspricht einem Schwerpunkt der „Erosionsstrecke“ und verläuft aufgrund der eingetieften Querschnitte auf niedrigerem  $B/h$ -Niveau. Bis zur Unteren Mittelelbe (hier: Nr. 5) zeigt sich eine seitliche Verschiebung der Kurvenverläufe hin zu niedrigeren Abflüssen, die z.B. als tendenzielle Zunahme der Häufigkeit von Wasserwechseln in der Uferzone und von Überflutungen interpretierbar ist.

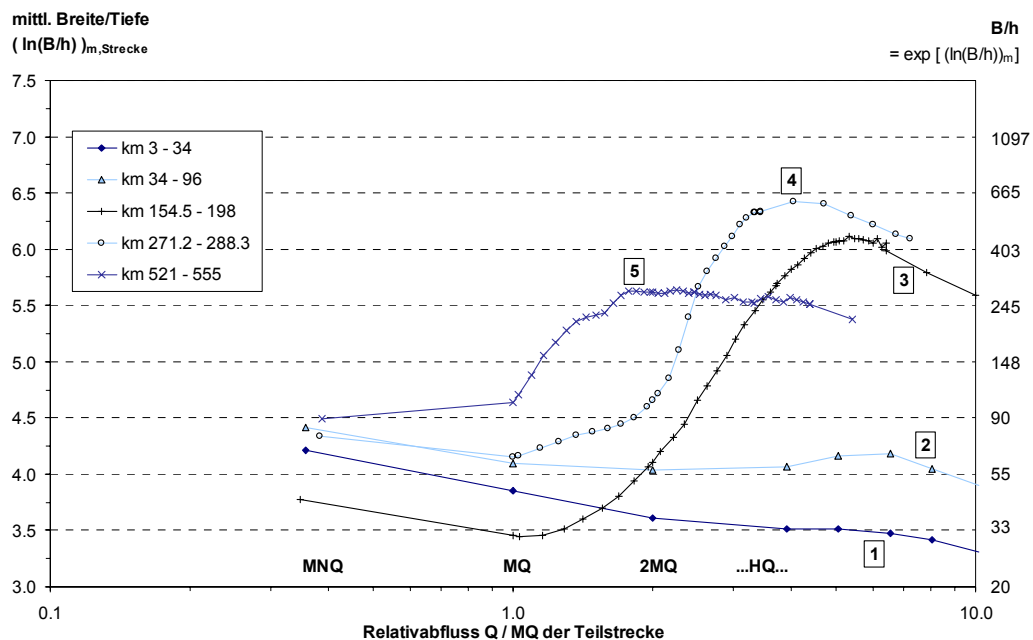


Abb. I-3.3 Breiten/Tiefen-Verhältnisse der Elbe für verschiedene Teilstrecken im Ist-Zustand (basierend auf Kap. II-3 und III-2).

In idealisierter Form ergibt sich somit – abgeleitet aus den Ist-Zustandsdaten – das folgende Bild für die Änderung der Querschnittsform im Längsverlauf in Abhängigkeit der naturräumlichen Randbedingungen, wobei die Breite des Gewässers tendenziell stärker zunimmt als die Tiefe (Abb. I-3.4).

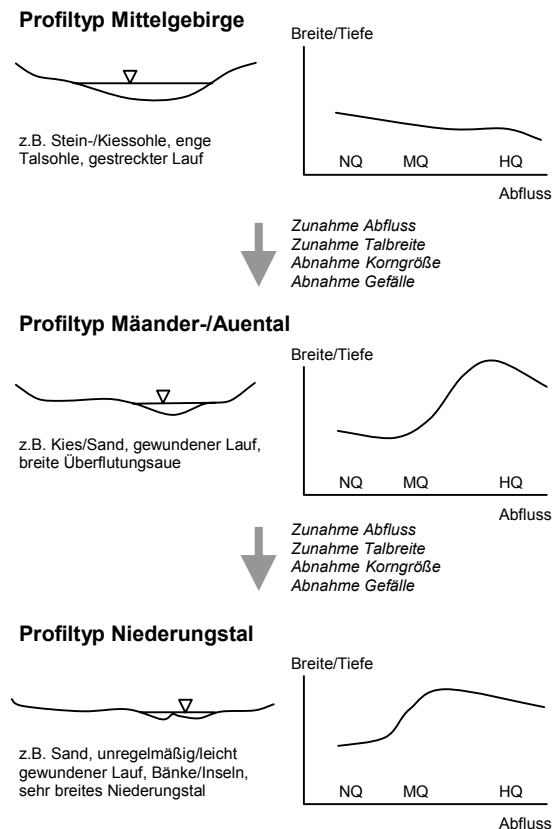


Abb. I-3.4 Idealisierte naturraumtypische Profilform.

Aufgrund der eingangs beschriebenen abiotischen Zusammenhänge (vgl. Kap. I-1.1: Problemstellung) ist klar, dass mit dieser Beschreibung der Profilform auch die Grundlage für eine naturraumspezifische Charakterisierung einer Vielzahl weiterer umweltrelevanter Kenngrößen (z.B. des Feststofftransports, der Grundwasserdynamik usw.) gelegt wird.

Auf der anderen Seite muss man sich in diesem Zusammenhang vor Augen führen, dass die *Eingriffe des Menschen* in die Flusslandschaft – vom Deichbau seit dem 12. Jahrhundert bis zu den Strombaumaßnahmen im 19. und 20. Jahrhundert – sowie die *natürliche flussmorphologische Entwicklung* in Kombination mit den anthropogenen Eingriffen – wie Sohlerosion und Bühnenfeldverlandungen – den *Charakter erheblicher Querschnittsänderungen von Fluss und Aue* tragen, insbesondere im Sinne von

- Verengung des Hochwasserprofils bzw. der rezenten Aue,

- Verengung des Flussbetts,
- Veränderung der Gewässer- und Rauheitsstrukturen (Entfernen von Inseln, Vegetation) etc.

mit *entsprechenden Wirkungen* auf die Strömungsverhältnisse und deren Folgegrößen. Hieraus folgt eine *qualitativ grundlegende und zentrale Bedeutung dieser Betrachtung* im Hinblick auf ökomorphologische Bewertungen großer Fließgewässer, bzw. die hierfür erforderliche Beschreibung naturraumspezifischer Leitbilder und Entwicklungsziele.

Für die *quantitative, parametrisierte* Beschreibung potentiell natürlicher Gewässerzustände aus heutiger Sicht (Leitbilder) liegen – vor allem bezogen auf große Fließgewässer – wenig Informationen vor.

Neben den obigen Betrachtungen zum Ist-Zustand bzw. zu qualitativen Aspekten der natürlichen Form der Querschnitte konnten im Projekt auch historische Profile im Bereich der Unteren Mittelelbe (auf Basis einer Karte aus dem Jahr 1724) erfasst und analysiert werden. Sie dokumentieren einen *naturnahen morphologischen Zustand* vor der überregionalen Stromregulierung, die ab der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts durchgeführt wurde (zum Vergleich siehe Kap. II-1.2 und Kap. II-2.2). Abb. I-3.5 stellt das Resultat des Vergleichs der historischen Querschnitte mit den heutigen Daten dar, woraus sich sowohl Erkenntnisse über das Ausmaß der Veränderung der mittleren Breiten/Tiefen-Verhältnisse als auch ihrer Schwankungsbreite erkennen lassen, wobei insbesondere die Abnahme der Breitenvarianz für die Unterschiede verantwortlich ist. Das für das Flussbett erzielte Ergebnis lässt sich auch, unter Annahme der potentiell überflutbaren Breite der Talsohle, auf den Auebereich übertragen.

*Da das naturraumspezifische Leitbild als die Vereinigungsmenge der möglichen Ausprägungen (Vielfalt) der Zustandsmerkmale eines natürlichen Fließgewässers anzusehen ist (zum Vergleich: LAWA 2000, Anhang 3), kann dieses Ergebnis insgesamt als berechtigter, qualitativ und quantitativ konkretisierender Ansatz zur Beschreibung der natürlichen Profilform des Leitbildzustandes großer Fließgewässer begriffen werden.* Die quantitative, differenzierte Beschreibung weiterer – an diesen Ansatz koppelbarer – Merkmale bzw. leitbildrelevanter Parameter erscheint hiermit machbar. Zugleich ist die Methode übertragbar und für den Vergleich verschiedener Flüsse (oder Flussabschnitte) geeignet.

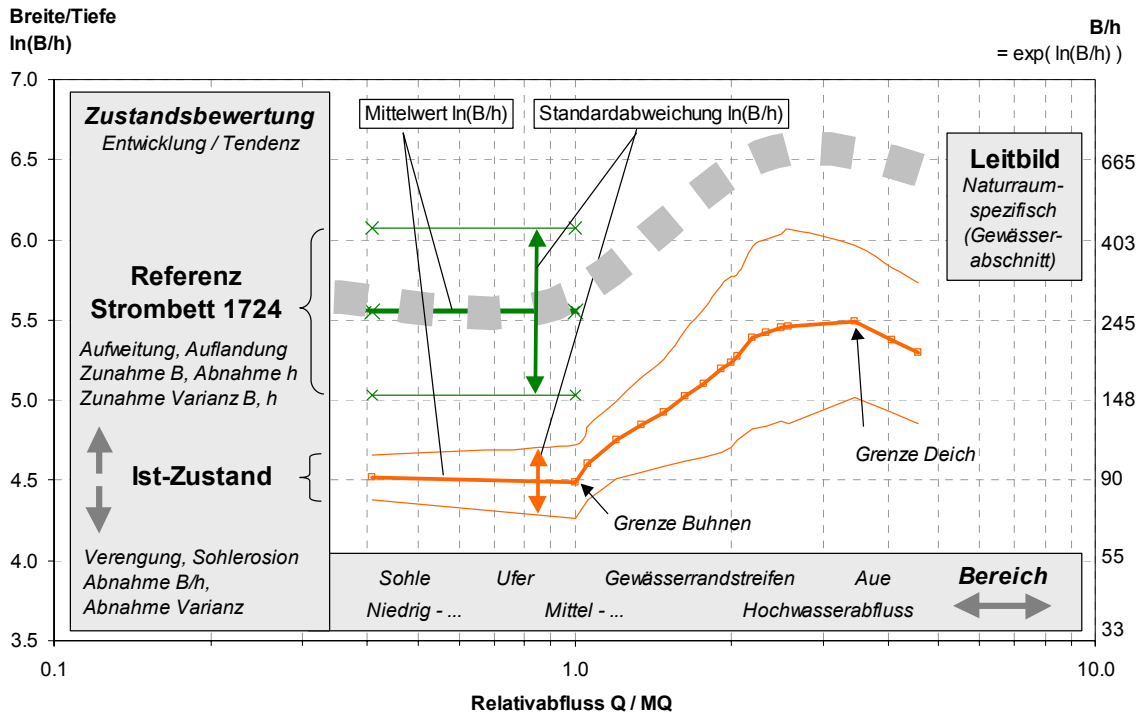


Abb. I-3.5 Vergleich der historischen und heutigen Breiten/Tiefen-Verhältnisse der Unteren Mittelelbe (Bereich Schnackenburg-Lenzen, Daten der Teilstrecke ca. km 475–485) im Hinblick auf die Quantifizierung der naturraumtypischen Querprofilform (spezifisches Leitbild); zum Vergleich siehe auch Kapitel II-2.2 und III-3.3.

## I-4 Zur Verwertung der Ergebnisse (Ausblick)

### I-4.1 Digitale Grundlagen, Informationssysteme

Die als unmittelbares Ergebnis aus dem Projekt hervorgehenden digitalen Datensätze und Werkzeuge werden in den folgenden Formen verfügbar bzw. weiter verwertbar sein.

- **Digitale Datengrundlagen und Werkzeuge:** Die im zentralen Datenpool (relationale Datenbank, GIS, etc.) an der Universität Karlsruhe zusammengestellten Daten und Werkzeuge (wie Simulationsmodelle) werden über mindestens zwei Jahre nach Projektabschluss für mögliche Anfragen und Interessenten aus Forschung und öffentlicher Verwaltung vorgehalten. In dieser Zeit ist die Übergabe relevanter Teile dieser Bestände – soweit keine datenrechtlichen Beschränkungen bestehen, wie z.B. bei digitalen Geländemodellen der Vorlandbereiche – an die zuständigen Behörden geplant, um einen dauerhaften Nutzen zu gewährleisten (wie teilweise schon während bzw. seit Ablauf der Projektlaufzeit erfolgt ist). Zu diesen Stellen zählen – stellvertretend für die Wasser- und Schifffahrts-

verwaltung – die Bundesanstalten für Gewässerkunde (BfG) und für Wasserbau (BAW), sowie im Einzelfall die Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE) sowie die Partnerprojekte der Elbe-Ökologie-Forschung. Ebenso zählen hierzu – soweit während des Projektes konkrete Anlässe bestanden, zum Teil in Überschneidung mit den Untersuchungen der Elbe-Ökologie-Forschung zu Deichrückverlegungen – die Behörden der Länder (z.B. LAU Halle, StAU Magdeburg, MURL Brandenburg).

- **Informationssystem „Anlagen-CD“:** Die dem Schlussbericht beiliegende CD-Rom enthält ein programmtechnisch unabhängiges Informationssystem, das eine Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisdaten beinhaltet. Die integrierten Programmfunktionen (wie räumliche und/oder thematische Navigation, graphische Visualisierung, Druckmöglichkeit etc.) ermöglichen die wissenschaftlich freie Verwertung der Daten in Originalauflösung.

## I-4.2 Forschungsverbund Elbe-Ökologie

Im Rahmen der Zusammenführung der Ergebnisse im Forschungsprogramm des BMBF sind folgende Möglichkeiten der Verwertung gegeben bzw. in der näheren Zukunft fest eingeplant:

- **Meta-Informationssystem ELISE:**  
Alle Abschlussberichte des Vorhabens (Schlussbericht des Gesamtprojektes sowie Teilberichte der drei Unterauftragnehmer Universität Paderborn, BfG und FU Berlin) werden im Meta-Informationssystem ELISE des Forschungsprogramms „Elbe-Ökologie“ zum Herunterladen bereitgestellt (<http://elise.bafg.de/?175>).
- **Decision Support System (DSS) – Pilotsystem für die Elbe:**  
Wie aus der Machbarkeitsstudie für das seit 2001 laufende BMBF-Vorhaben zur Erstellung eines computergestützten Pilotsystems „Elbe-DSS“ (zum Vergleich: BfG 2001, in ELISE unter <http://elise.bafg.de/?3473>) hervorgeht, ist dort die Integration erheblicher Teile der Projektergebnisse eingeplant. Dies trifft sowohl auf die Hydro- und Morphodynamik entlang des Gewässers (Kernfunktionen im Flusslaufmodul des DSS), als auch auf die Grundwasserdynamik in der Aue auf der kleineren Skala (Flussabschnittsmodul) zu.
- **Elbe-Ökologie-Kompodium:**  
In 2001/2002 laufen die Vorbereitungen für eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse des Forschungsprogramms (Arbeitstitel „Elbe-Ökologie-Kompodium“ in fünf Bänden mit unterschiedlichen Themenschwerpunkten, siehe hierzu ELISE unter <http://elise.bafg.de/?3289>). Die Ergebnisse des vorliegenden Vorhabens sind im Band „Struktur und Dynamik des Flusslaufs und deren Beeinflussung durch wasserbauliche Maßnahmen“ (Arbeitstitel) eingeplant, in inhaltlicher Abstimmung und Ergänzung mit den Ergebnissen aus weiteren Projekten im Themenkomplex (ohne Stoffdynamik).

## Literatur

- BfG (2001): Machbarkeitsstudie zum Aufbau eines Decision Support Systems (DSS) – Zusammenfassung des im Auftrag der BfG erstellten Berichts „Towards a Generic Tool for River Basin Management – Feasibility Study –“. Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Projektgruppe Elbe-Ökologie Mitteilung Nr. 8, Koblenz-Berlin.
- BMBF (1995): Forschungskonzeption Ökologische Forschung in der Stromlandschaft Elbe (Elbe-Ökologie). Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF), Bonn
- DEUTSCHER RAT FÜR LANDESPFLEGE (Hrsg.) (1994): Konflikte beim Ausbau von Elbe, Saale und Havel; Die Auswirkungen des Projekts 17 Deutsche Einheit und des Bundesverkehrswegeplans auf die Flüsse Elbe, Saale, Havel und die Notwendigkeit einer Gesamt-Umweltverträglichkeitsprüfung. Gutachterliche Stellungnahme und Ergebnisse einer Expertendiskussion vom 7. März 1994 in Berlin. Schriftenreihe des Deutschen Rates für Landespflege, Heft 64, Bonn
- DVWK (1996): Elbaue und ländlicher Raum – Konfliktfelder unserer Landschaft – Beiträge zur DVWK-Fachveranstaltung im September 1996 in Lüneburg. Hrsg. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), DVWK-Schriften Nr. 113, Bonn.
- EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (2000): Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.
- IKSE (2001): Bestandsaufnahme des vorhandenen Hochwasserschutzniveaus im Einzugsgebiet der Elbe. Hrsg. Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE), Magdeburg.
- LAWA (2000): Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland: Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer - Empfehlung. Hrsg. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Kulturbuch-Verlag, Berlin.



# KAPITEL II GEWÄSSERMORPHOLOGIE

## II-1 Flussgeschichtliche Entwicklung im Überblick

### II-1.1 Stromtalgeschichte und Flussgeologie im deutschen Elbegebiet

U. Saucke, J. Brauns

#### II-1.1.1 Allgemeines

Die Morphodynamik eines natürlichen Flusses ist neben den Abflussprozessen stark von den geologischen Voraussetzungen bzw. deren Veränderungen über die zurückliegenden Zeiträume hinweg abhängig. Für die deutsche Binneneibe sind in diesem Zusammenhang die geologischen Prozesse des Quartärs und Holozäns von zentraler Bedeutung. Die mehrmalige Abfolge von Kalt- und nachfolgenden Warmzeiten mit jeweils umfangreichen Gletscherbewegungen und Schmelzwasserabflüssen haben die Grundlage für den gegenwärtigen Verlauf der Elbe und die angrenzenden Auenregionen geschaffen.

#### II-1.1.2 Frühe Flussgeschichte

Konkrete Hinweise auf eine „Urelbe“ sind - z.B. anhand von Gerölluntersuchungen im sächsisch-niedersächsischen Sedimentationsraum - erst für das Tertiär vorhanden, so dass hieraus ein Mindestalter von 25 Millionen Jahren gefolgert wird (WOLF & SCHUBERT 1992).

Im Zusammenhang mit der Eintiefung der Flussbettsohle sind neben dem hohen Anteil an Feinmaterial auch die als natürliche Abflussschwellen anzusehenden lokalen Festgesteinskomplexe in Torgau und Magdeburg von maßgebender Bedeutung. Der Torgauer Rhyolith ist der variszischen Gebirgsbildungsphase zuzuordnen, die im Zuge einer tektonisch aktiven Zeit durch tensionale Beanspruchung der Erdkruste den Aufstieg von Gesteinslaven begünstigte und sich zusammen mit weiteren Festgesteinsauftragungen der Abtragung widersetzt hat. In Magdeburg sind der Dom- und Herrenkrugfelsen - Konglomerate des Rotliegenden und karbonische Grauwacken - zu der ausstreichenden Grundgebirgsschwelle der Flechtingen-Roßlauer-Scholle zu zählen. Diese paläozoischen Formationen gehören zu dem mitteldeutschen Schollengebiet, das mit dem „Abbruch von Haldensleben“ an das Norddeutsche Becken grenzt.

#### II-1.1.3 Einflüsse des Quartärs auf die Geologie

Eiszeitliche Sedimente und Landformen prägen nahezu den gesamten Lauf der deutschen Elbe. Die Geologie der Talstrecke erschließt sich somit aus dem Verlauf der klimatischen Schwankungen des quartären Zeitalters in Norddeutschland - bezeichnet durch die drei Kaltzeiten Elster, Saale und Weichsel sowie die Warmzeiten Holstein und Eem (Tab. II-1.1) -, die den nordgerichteten Flusslauf der Elbe sowohl blockiert als auch bevorzugt orientiert haben.

Tab. II-1.1 Vereinfachte Gliederung des Quartärs (GÖLZ 1991).

Jahre vor heute	Bezeichnung
10 000 - heute	Holozän
115 000 - 10 000	Weichsel-Eiszeit
130 000 - 115 000	Eem-Warmzeit
230 000 - 130 000	Saale-Eiszeit
250 000 - 230 000	Holstein-Warmzeit
350 000 - 250 000	Elster-Eiszeit
vor 350 000	Altquartär

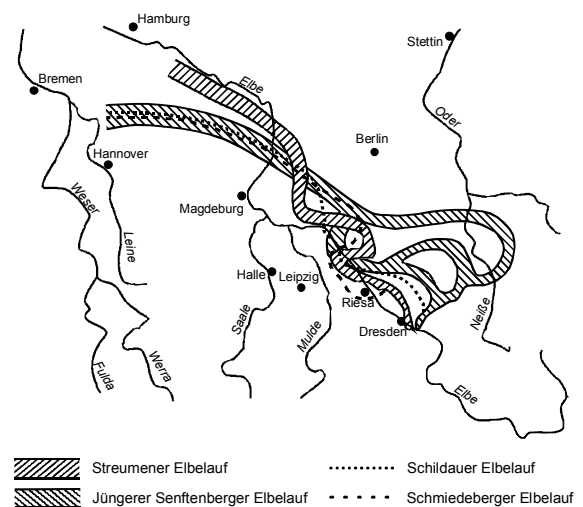


Abb. II-1.1 Frühpleistozäne und Elster-kaltzeitliche Elbeläufe (WOLF & SCHUBERT 1992, verändert).

Die imposante Durchbruchsstrecke des Flusses durch das Elbsandsteingebirge (Oberkreide) entwickelte sich im Verlauf des älteren Quartärs, indem die Erosions- und Sedimentationseffekte der einsetzenden Klimaschwankungen eine immer tiefer reichende Terrassentreppe erzeugten. Die Elbe floss in dieser Zeit durch das heutige Sachsen und Brandenburg nordwärts, um dann quer durch Norddeutschland die Niederlande zu erreichen (EHLERS 1994).

Von den ehemaligen Verläufen (vgl. Abb. II-1.1) sind infolge der landschaftsprägenden Kraft der anschließenden Gletscherbewegungen lediglich die beschriebene Durchbruchsstrecke und die nördlich bei Meißen anschließende Querung eines magmatitischen Grundgebirgsrückens erhalten geblieben. Im Zuge der nachfolgenden Kaltzeiten (insbesondere in der Elster- und Saalekaltzeit), in deren Abfolge sich das skandinavische Inlandeis in immer geringerer Erstreckung nach Südwesten ausdehnte (vgl. Abb. II-1.2), ist es aufgrund ausgeprägter Gletscherbewegungen und umfangreicher Schmelzwasserabflüsse unter dem Eis bereichsweise zu starker Tiefenerosion gekommen (z.B. Elbtal-Glazialwanne).



Abb. II-1.2 Ausbreitungsgrenzen der Kaltzeiten Elster, Saale und Weichsel (WOLDSTEDT 1956, verändert).

Als Ergebnis des späteren Sedimentationsgeschehens sind derartige Untergrundstrukturen in den ausgehenden Kalt- bzw. nachfolgenden Warmzeiten mit tiefliegenden Schotterkomplexen heterogen verfüllt worden (vgl. Abb. II-1.3 und Abb. II-1.4). Der heutige Elbelauf ab Wittenberg entstand während des Rückzuges der Saalevergletscherung, indem die

Sander und Endmoränenrücken des Fläming eine Laufumlenkung nach Westen erzwingen. Erst nördlich von Magdeburg überwindet der Fluss diese Barriere und nutzt für den weiteren Verlauf vorhandene Urstromtäler.

#### II-1.1.4 Geologische Schnitte

Ein Teilergebnis des Teilprojektes I.5 „Untergrundverhältnisse“ stellen die am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe erarbeiteten geologischen Schnitte des Elbetals dar. Grundlage hierfür waren Lithofazies-Karten der Geologischen Landesämter (GLA) im Maßstab 1:50.000 sowie bestehende Schnittdarstellungen, die von den betreffenden Ämtern freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden.

Tab. II-1.2 Übersicht der erarbeiteten geologischen Längs- und Querschnitte (= LS, QS) des Elbetals (zugehörige Grafiken siehe *Anlagen-CD*).

Bereich Elbe-km	Beschreibung – geologischer Schnitt
0 bis 85	LS Grenze CR – Meißen
80 bis 165	LS Meißen – Torgau/Mockritz
160 bis 245	LS Mockritz – Coswig/Vockerode
240 bis 325	LS Vockerode – Magdeburg
320 bis 390	LS Magdeburg – Tangermünde
470 bis 590	LS Schnackenburg - Geesthacht
40	QS Dresden/Heidenau
46	QS Dresden/Hosterwitz
79,2	QS Meißen/Siebeneichen
137	QS Strehla/Belgern
154,6	QS Torgau (Rhyolit-Felsriegel)
162,5	QS Döbern
171,6	QS Belgern-Dommitzsch
218 bis 229	QS Coswig (glaziale Elbtalwanne)
345,1	QS Heinrichsberg
345,1	QS Heinrichsberg (Detaildarstellung)
549,7	QS Bleckede
569,2	QS Lauenburg

Beispielhaft zeigen Abb. II-1.3 und Abb. II-1.4 geologische Querschnitte des Tales bzw. des Flussuntergrundes. Abb. II-1.5 und Abb. II-1.6 zeigen geologische Längsschnitte, die die unterschiedliche Mächtigkeit des Sedimentuntergrundes im Bereich der Elbe aufzeigen. Es ist hervorzuheben, dass der

Schwerpunkt bei der Erstellung der geologischen Schnitte auf die Erfassung des quartären Schichtkomplexes einschließlich des Verlaufes der Tertiärbasis, dem heutigen Elbelauf im Grundriss folgend,

gelegt wurde. Einen Überblick über die erarbeiteten Schnitte liefert Tab. II-1.2, wobei die zugehörigen Ergebnisgrafiken der Bearbeitung der *Anlagen-CD* dieses Bandes zu entnehmen sind.

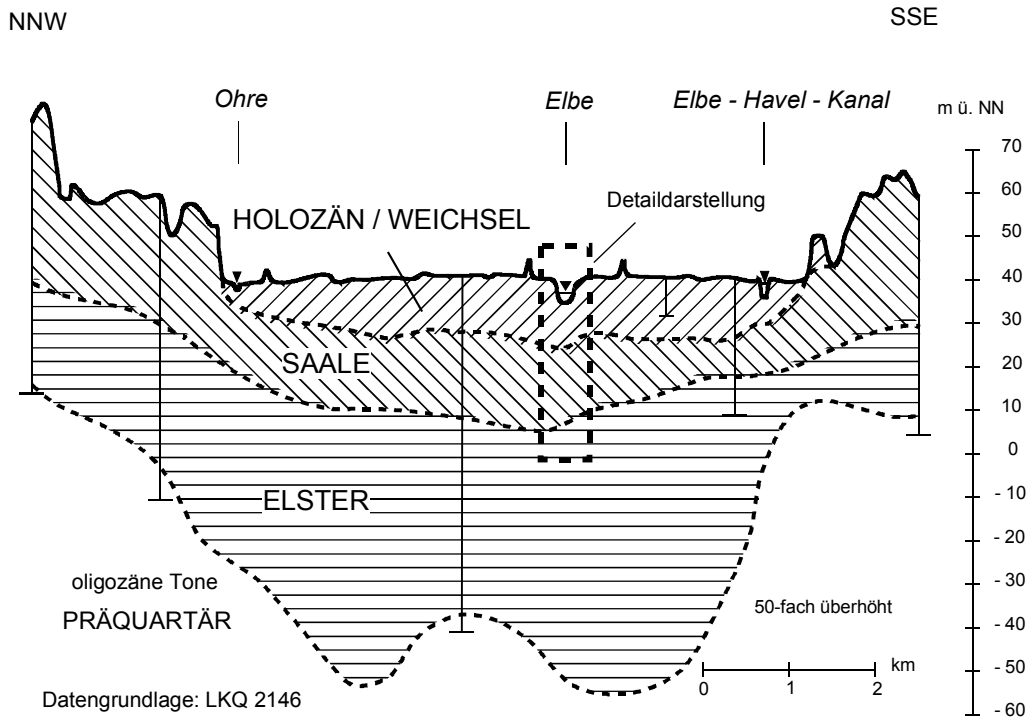


Abb. II-1.3 Beispiel: Geologischer Übersichtsquerschnitt Heinrichsberg bei Magdeburg (Elbe-km 345).

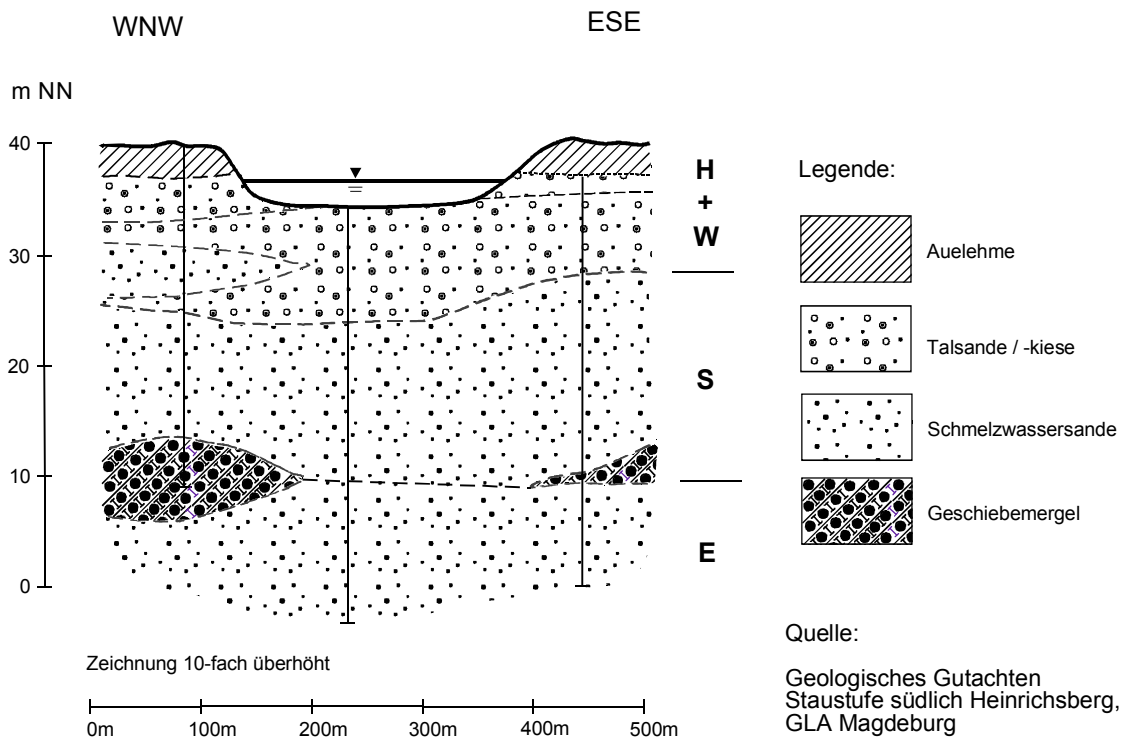


Abb. II-1.4 Beispiel: Geologischer Detailquerschnitt Heinrichsberg (Elbe-km 345).

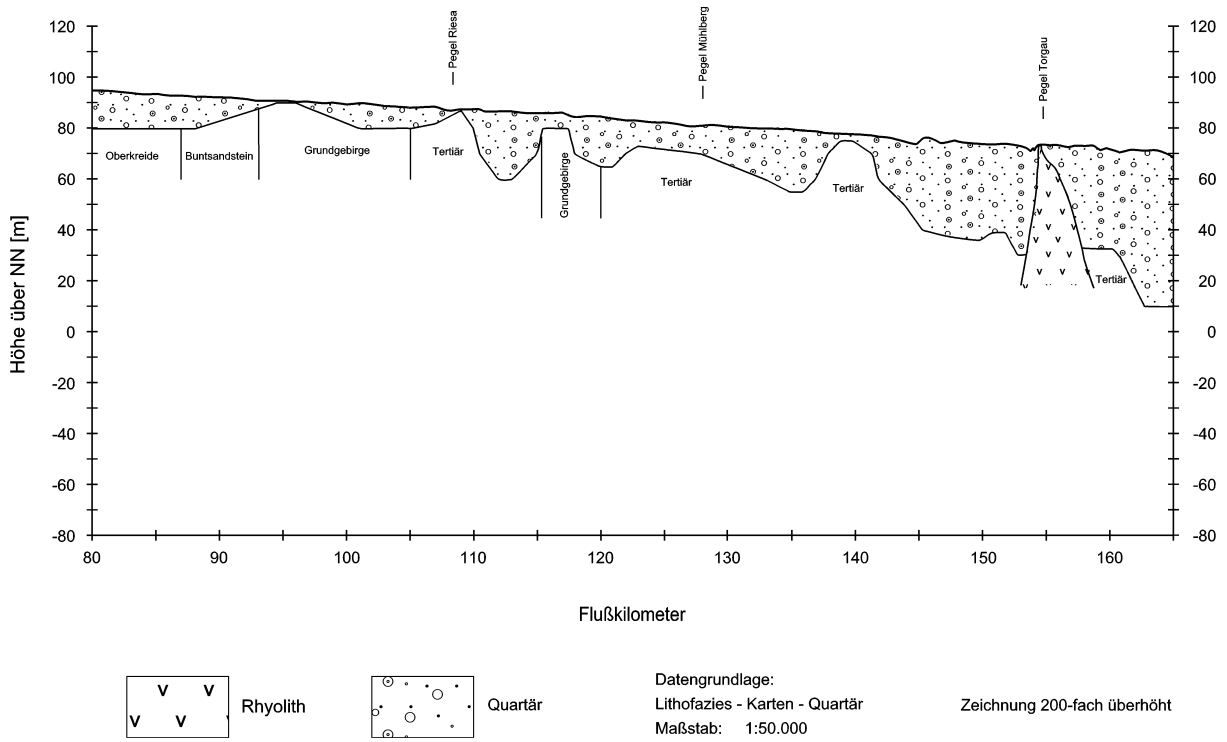


Abb. II-1.5 Beispiel: Geologischer Längsschnitt (Elbe-km 85 - 165).

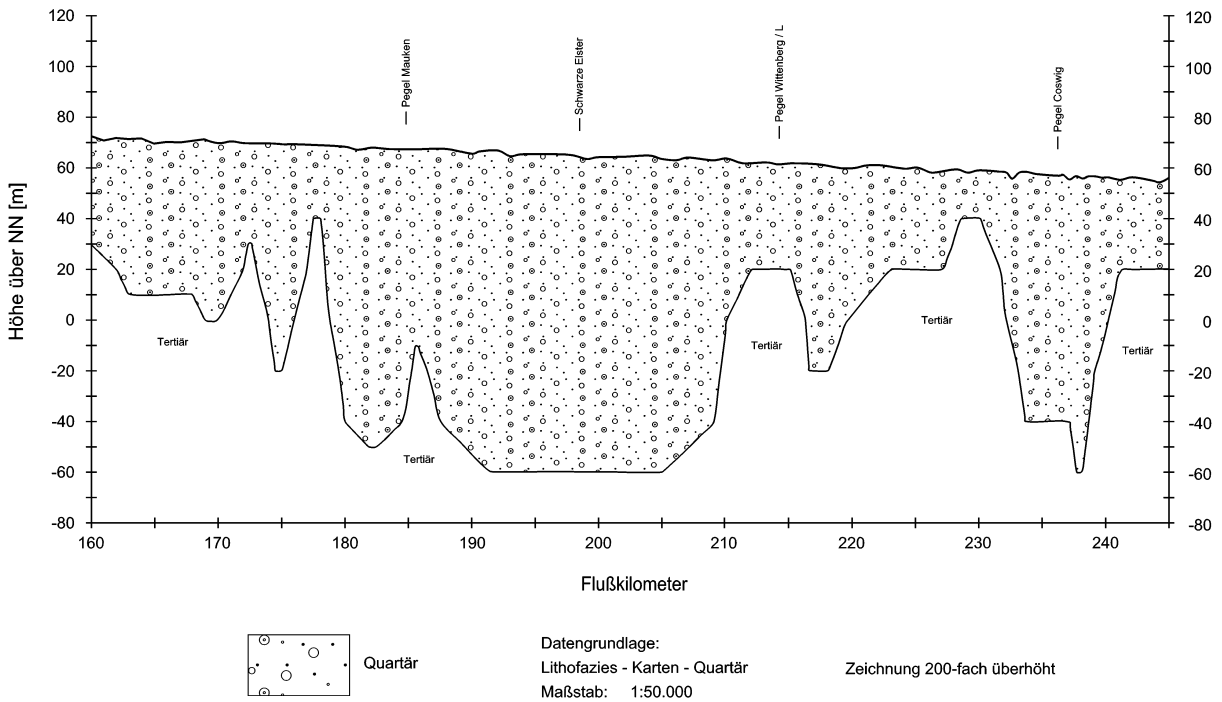


Abb. II-1.6 Beispiel: Geologischer Längsschnitt (Elbe-km 160 - 245).

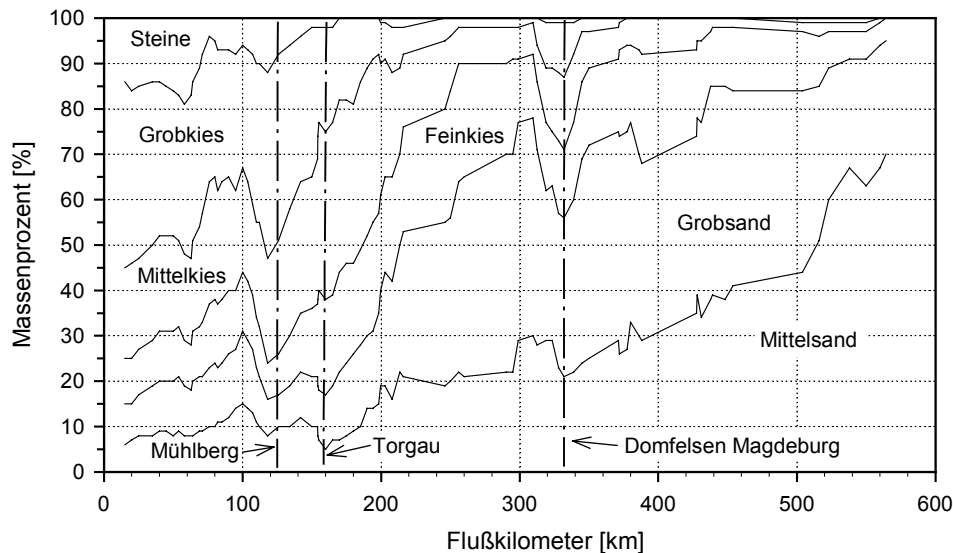


Abb. II-1.7 Kornverteilungsband der Elbe - Darstellung eines lfd. Mittelwertes (BFG 1994, verändert).

Für die gegenwärtige Erosionsproblematik der Elbe ist der hohe Sandanteil in der Flusssohle von großer Relevanz. Hierfür ist von Bedeutung, dass (untersucht auf Basis eines geodätischen Abgleichs mit der Niederterrasse) im Laufe des Holozäns das Talgefälle zunehmend ausgeglichen wurde (MÜLLER 1988). Die daher mit abnehmendem Gefälle sinkende Transportkraft kommt im Anteil der Kiesfraktion des weichsel-zeitlich/holozänen Schotterkomplexes zum Ausdruck: von nahezu 50% bei Torgau (MÜLLER 1988) verringert sich der Kiesanteil über gut 30% bei Magdeburg (KARPE 1969) auf weniger als 5% an der Unteren Elbe für die Niederterrasse (SCHRÖDER 1988). Dieser Sachverhalt spiegelt sich auch im Kornverteilungsband der Flusssohle, (vgl. Abb. II-1.7, s. auch Kapitel II-3). Generell erklärt sich die Feinkörnigkeit der Sedimente im Elbuntergrund dadurch, dass in die umgelagerten Niederterrassenschotter selbst wiederum ein hoher Anteil sandiger Schmelzwasserablagerungen der umliegenden Hochflächen einging. Geht man in der Umlagerungsgeschichte noch einen Schritt weiter, so ist festzustellen, dass die quartären Gletscher bereits über zumeist feinkörnige tertiäre Sedimente vordrangen und diese teilweise aufgriffen.

### II-1.1.5 Flussgeologie

Neben den glazialen Bildungen des Quartärs, die wie dargelegt die allgemeine Geologie entlang der Elbe makroskopisch geprägt haben, stehen im nach-

folgenden Holozän<sup>1</sup> die *fluviatilen* Vorgänge im Vordergrund, so dass direkt von einer Flussgeologie gesprochen werden kann. Diese Vorgänge haben zu einem stark heterogenen Untergroundaufbau von Fluss und Auenfläche geführt, der im Zusammenhang mit Standortbetrachtungen für Flora und Fauna, zum anderen auch mit Strömungsvorgängen im (wasser-)gesättigten Untergrundbereich im Hinblick auf Ausbreitungsvorgänge oder hydraulische Stabilitätsbetrachtungen von Bedeutung ist (vgl. auch Kapitel IV-2).

Die flussgeologischen Prozesse an der Elbe lassen sich sowohl im großräumigen wie auch im kleinräumigen Maßstab anhand der folgenden Beispiele anschaulich erklären.

Basierend auf historischen Quellentexten und Karten berichtet u.a. SCHMIDT (2000) von Hochwässern der Elbe und daraus folgender Laufverlegungsdynamik aus der Zeit ab etwa 1000 n.Chr. bis zum systematischen Stromausbau ab dem 19. Jahrhundert (z.B. „große Flussverlegung 1020“). Die Weiträumigkeit solcher Verlagerungen (in den eiszeitlich vorgeprägten Talräumen) wird beispielhaft in Abb. II-1.8 veranschaulicht. Nach SIMON (1996) schlug die Elbe ab Magdeburg noch bis Anfang des 18. Jahrhunderts wiederholt bei Hochwasser die älteren, nordöstlich zur Havel führenden Läufe über Rathenow und Havelberg ein, so z.B. auch 1566 infolge eines Deichbruchs bei Burg.

<sup>1</sup> Das Holozän trägt den Charakter einer Warmzeit. Im fluviatilen Sedimentationsraum äußert sich dies u.a. durch den organogenen Anteil im Lockergestein.

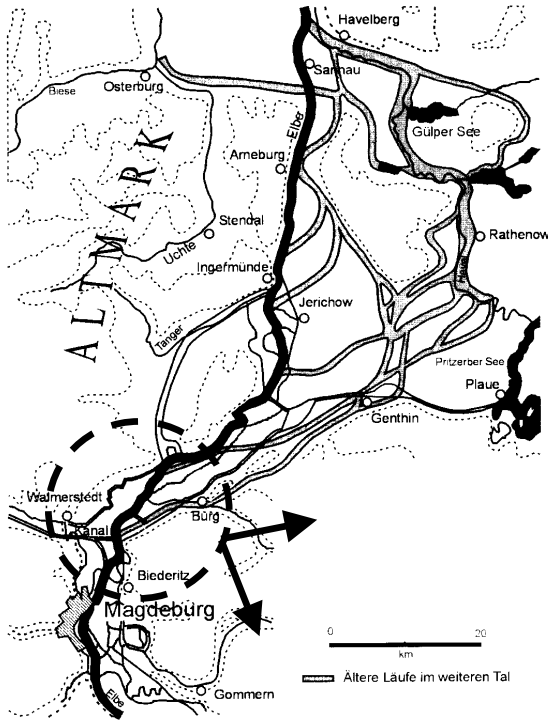


Abb. II-1.8 Alte Elbeläufe zwischen Magdeburg und Havelberg (KALL 1957, in: SCHMIDT 2000, verändert).

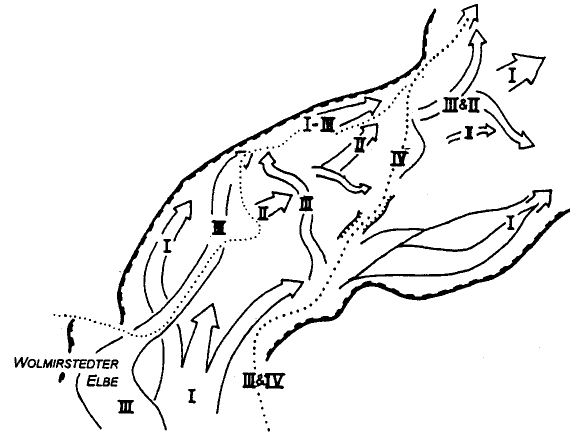


Abb. II-1.9 Elblaufverlegungen nördlich von Magdeburg (aus ROMMEL 1998): Fluviale Prägungsbereiche in angenommener zeitlicher Reihenfolge (Römische Ziffern: Phase I = über 5000 Jahre v.h., Phase II = 5000 bis 2500 v.h.?, Phase III seit mind. 2000 Jahren, Phase IV = mind. seit ca. 1200-1400 n.Chr.) als Deutung von Auenstrukturen in Abb. II-1.10.

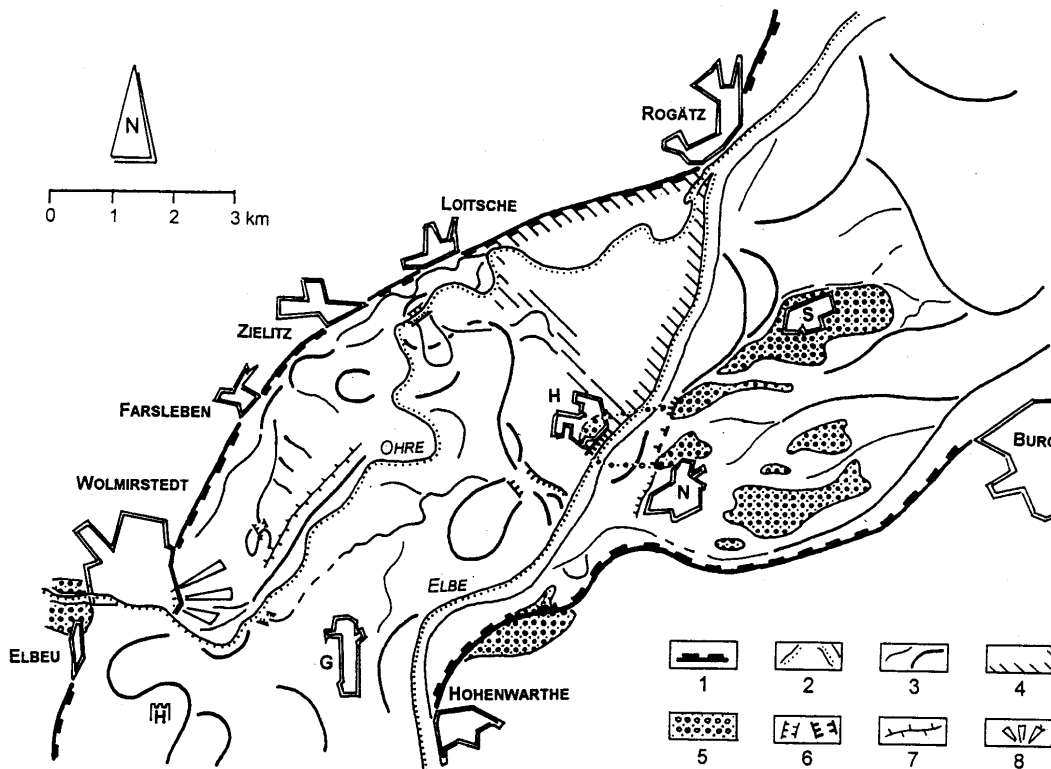


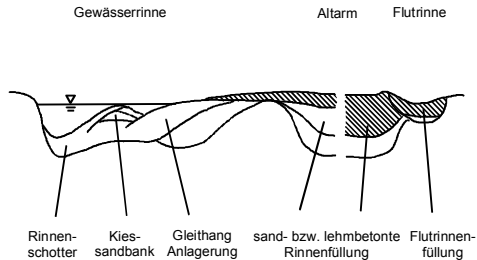
Abb. II-1.10 Geomorphologische Strukturen der Aue nördlich von Magdeburg (ca. km 340-350, aus ROMMEL 1998).  
 1 – Auenrand, 2 – rezente Ohre bzw. Elbe, 3 – Gewässerstrukturen, 4 – Kartierungsgebiet (dortige Strukturen s. Abb. II-1.12),  
 5 – Weichselkaltzeitliche Niederterrasse mit angenommener Erstreckung bis Heinrichsberg, 6 – Flussdurchbruchsrinnen,  
 7 – Talwasserscheide, 8 – Schwemmfächer  
 Orte: G – Glindenberg, H – Heinrichsberg, N – Niegripp, S – Schartau, H mit Burgsymbol links – Historische Hildagesburg

Um die heutige geologische Situation nördlich von Magdeburg im Detail erfassen und interpretieren zu können, zeichnete ROMMEL ein Bild der vermutlichen zeitlich-räumlichen Entwicklung der Flussgeologie bzw. Laufverlegungen der Elbe im regionalen Maßstab (vgl. Abb. II-1.9 und Abb. II-1.10).

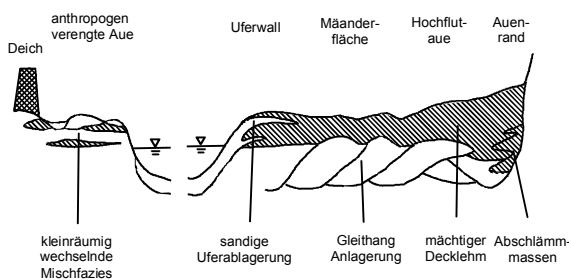
Für einen kleinräumigeren Betrachtungsmaßstab lassen sich die fluviatilen Erosions- und Akkumulationsvorgänge wie folgt beschreiben:

Fluviatile Sedimente bezeugen Fließgewässer, deren Aktivität zurückliegt oder noch andauert. Der Aufbau derartiger Sedimente ist aufgrund der zeitlichen und räumlichen Änderung der Transportfaktoren sowohl von Sedimentations- als auch von Erosionsvorgängen gekennzeichnet. Eine großmaßstäbliche Betrachtungsweise lässt zunächst als charakteristisches Element Terrassensysteme erkennen, die bei einem Randbedingungenwechsel infolge verstärkter Tiefenerosion entstehen und deren Abstufungen als Nieder-, Mittel- und Hochterrasse bezeichnet werden.

#### Gerinne



#### Aue



**Abb. II-1.11** Faziesschema für Gerinne- und Auensedimentation (ROMMEL 1998, verändert).

Dabei setzt sich die Elbaue aus einem Mosaik von Sedimentationskörpern zusammen, die zu verschiedenen alten Elbeläufen des zwischen den Talrändern pendelnden Flusses gehören und als erosive Terrassenreste aneinandergrenzen. Klein-

räumigere Gestaltungselemente der Flussgeologie lassen sich bevorzugt anhand eines mäandrierenden Flusses aufzeigen. Derartige Elemente können mit Hilfe eines Ablagerungs- bzw. Fazieschemas in architektonische Elemente eingeteilt werden (MIALL 1996).

Hierbei lässt sich zunächst eine generelle Einteilung in die Ablagerungsräume *Rinne* und *Aue* vornehmen, die u.a. wiederum in Rinnenfüllung, Kies- und Sandbänke, Gleithang-Anlagerung und Kolkfüllung bzw. in Uferwall, Auenlehm und Altarmfüllung unterschieden werden. Ein derartiger Aufbau lässt sich, wie in Abb. II-1.11 dargestellt, schematisch aufzeigen. Sowohl die zuletzt geschilderte Sedimentationsdifferenzierung während einer Flusskonstellation als auch die über geologische Zeiträume hinweg geprägten Unstetigkeiten des Taluntergrundes bedingen Körnungsunterschiede, die - vermittelt Einflussnahme auf die Wasserbewegung jeder Art - die gegenwärtige Hydrologie und Ökologie der Flusslandschaft entsprechend stark beeinflusst haben bzw. beeinflussen.

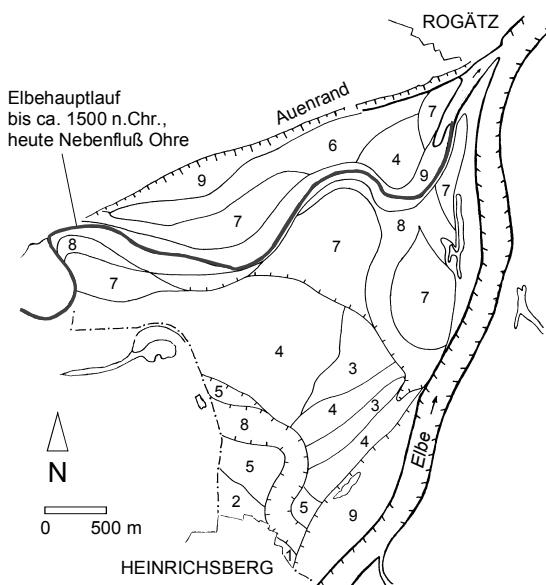
#### II-1.1.6 Kartierung der holozänen Sedimentation und alter Flussläufe im Mündungsbereich der Ohre bei Magdeburg

Zur Präzisierung der Randbedingungen eines numerischen Grundwassermodells an der Ohremündung (ca. Elbe-km 350) konnten im Rahmen von Untersuchungen die vorstehend aufgeführten Ablagerungsstrukturen beispielhaft detektiert bzw. durch umfangreiche Geländeerkundungen vor Ort kartiert werden (ROMMEL 1998). Ebenso wurde für die Festlegung des ca. 8 km<sup>2</sup> großen Untersuchungsgebietes berücksichtigt, dass die Ergebnisse später für weitergehende Untersuchungen einer erwogenen Deichrückverlegung an der Ohremündung verwertbar sein sollten. (vgl. Kapitel IV-2).

Den Kern der Geländeerkundung bilden 145 Sondierungen bis in durchschnittlich 3 m Tiefe, die anhand der Farbkontraste von CIR-Luftbildern (close-infra-red) positioniert wurden. Der flusssedimentologischen Interpretation der Geländebefunde diene der oben erläuterte 12-gliedrige Faziescode nach MIALL (1996). Die Alterseinstufung der Ablagerungen fußte auf Strukturabschnidungen im Luftbild, regionalen Sedimentationstrends sowie historischen und archäologischen Hinweisen. Durch Einbezug

benachbarter Altläufe konnte auf diese Weise ein geologisches Bild der jüngeren Flussdynamik der Elbe gezeichnet werden (Abb. II-1.12).

Der nördliche Teil der Auenfläche zeigt typische Ablagerungsmuster eines mäandrierenden Flusses: Die Migration des gewundenen Flussbettes in Talrichtung erzeugte einander schräg durchschneidende Sedimentationskörper innerhalb der Einheiten 7 bis 9. Die Einheit 9 ging aus einem Mäanderhalsdurchbruch infolge Expansion einer Flussschleife der Einheit 8 nahe der heutigen Elbe hervor. Ein auf über 2.500 Jahre v.h. geschätzter mittlerer Ablagerungskomplex (Einheiten 3 und 4) liegt als Erosionsrest zwischen jüngeren Sedimenten im nördlichen und südlichen Teil. Im Südabschnitt bei Heinrichsberg sind Sedimente verschiedenen Alters eng verzahnt: Hier wird Einheit 8 als Reaktivierung älterer Flussstrukturen der Ablagerung 5 interpretiert. Den Südrand der Fläche bilden deutlich ältere pleistozäne bis frühholozäne Sedimente (Einheiten 1 und 2).



**Abb. II-1.12** Holozäne Sedimentkomplexe der Elbaue südwestlich der Ohremündung. Die Ziffer 1 steht für die älteste, Ziffer 9 für die jüngste Ablagerung.

Der morphologische Kontrast der südlich gelegenen Einheiten zum regelhaft geformten Nordabschnitt des Gebietes wird dadurch verständlich, dass die im Süden ermittelten Strukturen im Verlauf einer durch kräftige Hochwässer induzierten Flussverlegung während des 14. Jahrhunderts geprägt wurden. Im Gegensatz hierzu wurden zwischen den heutigen Deichlinien in jüngster Vergangenheit die vordem lateral aufgefächerten Sedimentationsbereiche von

Grob- und Feinfracht vertikal überlagert. In Verbindung mit Fluterosion entstanden so in Einheit 9 ausgeprägt heterogene Ablagerungen.

Die aus der Untersuchung resultierende, verfeinerte geologische Karte des Gebietes ist in georeferenzierter Form einsehbar in der *Anlagen-CD*, einschließlich der zu den Einzelflächen zugehörigen Faziesklassifikation sowie einer Karte der Auelehm-Deckschichtmächtigkeiten.

## Literatur

- BFG (1994): Kornzusammensetzung der Elbesohle von der tschechisch-deutschen Grenze bis zur Staustufe Geesthacht. Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-Bericht 0834, Koblenz-Berlin
- EHLERS, J., (1994), Allgemeine und historische Quartärgeologie. Enke, Stuttgart.
- GÖLZ, E. (1991): Geologisch-morphologische Übersicht der Elbe zwischen Schnackenburg und Geesthacht. In: NESTMANN, F. (Hrsg., 1991): Elbeausprachetag in der BAW-Außenstelle Berlin, 10. Dezember 1991, Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe, unveröffentlicht.
- KARPE, W. (1969) Studie über Kiessandhöflichkeit der Elbaue im Raum Magdeburg. Anl. VEB Geol. Forschung und Erkundung, Halle.
- MIALL, A.D., (1996), The Geology of Fluvial Deposits. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- MÜLLER, A. (1988) Das Quartär im mittleren Elbegebiet zwischen Riesa und Dessau. Diss., Univ. Halle, Fakultät f. Naturwissenschaften, Halle.
- ROMMEL, J., (1998), Geologie des Elbetales nördlich von Magdeburg. Diplomarbeit, Geologisches Institut der Universität Karlsruhe, unveröffentlicht.
- ROMMEL, J., (2000), Studie zur Laufentwicklung der deutschen Elbe bis Geesthacht seit ca. 1600. Gutachten im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- SCHRÖDER, P., (1988), Aufbau und Untergliederung des Niederterrassenkörpers der Untereibe. Mitteilungen Geolog. Institut Universität Hannover.
- SCHMIDT, M. (2000): Hochwasser und Hochwasserschutz in Deutschland vor 1850 – Eine Auswertung alter Quellen und Karten. Oldenbourg-Industrieverlag, München.
- SIMON, M. (1996): Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Elbe. Bericht der Internationalen Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE), Magdeburg, unveröffentlicht.
- WOLDSTEDT, P., (1956), Die Geschichte des Flussnetzes in Norddeutschland und angrenzenden Gebieten. Eiszeitalter und Gegenwart 7, Bonn.
- WOLF, L., SCHUBERT, G., (1992), Die spätertären bis elsterzeitlichen Terrassen der Elbe und ihrer Nebenflüsse und die Gliederung der Elster-Kaltzeit in Sachsen. Geoprofil 4, Freiberg.



## II-1.2 Morphologische Entwicklung der Elbe vor dem Hintergrund anthropogener Einflüsse - eine Zusammenstellung von Angaben aus der Literatur

S. Kiene, O. Harms, B. Büchele, F. Nestmann

### II-1.2.1 Chronik von Nutzung und Ausbau

Die Beschreibung möglichst naturnaher Verhältnisse und natürlicher Entwicklungsprozesse ist eine Grundvoraussetzung für die Entwicklung von Leitbildern (bezüglich des aus heutiger Sicht potenziell natürlichen Gewässerzustandes) und Entwicklungszielen. Da menschliche Eingriffe in das Flusssystem schon sehr früh stattfanden und verfügbare Karten und schriftliche Aufzeichnungen (aus historischer Zeit) i.A. bereits anthropogen veränderte Zustände dokumentieren, wird den weiteren Ausführungen an dieser Stelle eine zusammenfassende Darstellung der Eingriffe von Urzeit bis Neuzeit vorangestellt, als Hintergrundwissen bei der Definition naturnaher Verhältnisse bzw. bei der Abschätzung von Art und Umfang menschlicher Beeinflussung.

Die Elbe diente vermutlich bereits vor Beginn unserer Zeitrechnung als Handelsweg für Bernstein und wurde spätestens im Mittelalter, zur Zeit der Stadtgründungen im Elberegion, ein wichtiger Verbindungsweg (ROHDE 1971). Bis in die Neuzeit wurde die Elbe mehr oder weniger in ihrem ursprünglichen Zustand als Schifffahrtstraße genutzt, d.h. Baumstämme, wandernde Sandbänke, Verlagerungen, Stromspaltungen usw. mussten toleriert werden. Im 15. und 16. Jahrhundert wurden am Strom nur wenige Maßnahmen durchgeführt, die in der Regel nicht der Verbesserung der Schifffahrt, sondern dem Schutz der Siedlungen vor Eisgang und Hochwasser dienten (ROHDE 1971). Erst im 17. und 18. Jahrhundert wurden größere, die Schifffahrt verbessernde Strombaumaßnahmen durchgeführt, so z. B. Durchstiche und erste Bühnenbauarbeiten. Dies führte bereits früh zu verstärkten morphologischen Reaktionen des Systems.

Eine Strombesichtigung 1841 hatte die Einberufung von Wasserbausachverständigen zur Folge. Dabei wurden zur Verbesserung der Schiffbarkeit folgende Maßnahmen vorgeschlagen: Beseitigung von Abbruchufern, Einschränkung zu breiter Stromstrecken, Baggerung, Beseitigung von Inseln, Festlegung von Anlandungen (ROHDE 1971). In der Zeit um 1900 erfolgten weitere, einheitliche und in großem Umfang geplante Baumaßnahmen. Es handelte sich dabei um den Bau von Bühnen, die Durchführung

von Baggerungen, Durchstichen und die Entfernung von Baumstämmen, Felsen und Sandbänken. Die letzte größere Ausbauphase wurde in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts durchgeführt. Zu den oben erwähnten Maßnahmen traten hierbei noch umfangreiche Kolkverbauungen, die Anlage von Kopfschwellen und Sohlverbreiterungen hinzu. Eine ausführliche Beschreibung der Entwicklung der Schifffahrt findet sich in WSD OST (1997).

Die folgende Tabelle (Tab. II-1.3) enthält eine chronologische Übersicht der verschiedenen anthropogenen Einflüsse, Nutzungen bzw. Veränderungen an der Elbe, wie sie im Rahmen der Arbeit des Teilprojektes „Schnittstelle Abiotik-Biotik“ aus der Literatur erhoben wurden. Hervorzuheben ist, dass im Rahmen der Möglichkeiten vor allem solche Informationen recherchiert und zusammengestellt wurden, die als relevant im Zusammenhang mit der ökomorphologischen Entwicklung der Elbe und ihrer Auenflächen bis zu ihrem gegenwärtigen Zustand anzusehen sind.

So ergibt sich aus den verschiedenen Literaturdarstellungen der historischen Entwicklung das Bild einer relativ naturbelassenen Elbe bis in die Mitte bzw. bis an das Ende des 18. Jahrhunderts. Zwar wurden zuvor schon mehrere Durchstiche von Mäanderschlingen durchgeführt (mindestens 5) und auch schon seit dem 12. Jahrhundert verschiedene Deiche angelegt (u.a. SCHMIDT 2000), sämtliche Einflüsse blieben aber bis zu dieser Zeit punktuell und ohne großräumigen Einfluss auf den Flusslauf. Im Gegensatz dazu scheinen die Veränderungen im Einzugsgebiet und in den Elbeauen schon früher spürbare und großräumigere Folgen gehabt zu haben. Nach BFG (1994) wurden schon in den ersten Jahrhunderten des ersten Jahrtausends so intensiv Flächen im Bereich des Ober- und Mittellaufes der Elbe gerodet, dass es zu einer deutlichen Vergrößerung der Schwemmstoffmengen kam, die sich vor allem im Unterlauf ablagerten.

Im Mittelalter wurden verstärkt Auenwälder für Weideland gerodet, so dass sich das Aussehen der Auen stark veränderte.

**Tab. II-1.3** Zeittafel der Veränderungen und anthropogenen Einflüsse, insbesondere die Morphologie der Elbe betreffend.

<b>Zeitpunkt</b>	<b>Geschehen</b>
vor 70.000 Jahren	<b>rezipienter Stromverlauf entsteht</b> , vorher Entwässerung über Ohre-Aller-Weser-Urstromtal [BFG 1994]
Weichsel-Kaltzeit (70.000 - 10.000 Jahre vor heute)	<b>verzweigter Fluss</b> , ständige Umlagerung von Kiesbänken und hohe Transport- und Erosionskraft im Sommer (braided river) [BFG 1994]
Früh- und Mittelholozän	<b>Elbe-Saale-Gebiet</b> : Kiefernzeit (Vorwärmezeit/Präboreal: 10.000 bis 9.000 Jahre vor heute), Kiefern-Hasel-Zeit (Boreal: bis 7.500), Eichenmischwald-Kiefern-Zeit (mittlere Wärmezeit/Atlantikum: bis 6.000), Eichenmischwaldzeit (Atlantikum bis 5.000), Eichenmischwald-Buchen-Zeit (späte Wärmezeit Subboreal: bis 2.800) [LITT 1994]
seit Holozän (10.000 Jahre vor heute) bis ungefähr zum Beginn des 19. Jahrhunderts	breites, z. T. <b>versumpftes Stromtal mit bewaldeten Auen</b> ; Fluss: Uferabbrüche, Auskolkungen, wandernde Sandbänke, Verlagerung des Flussbettes, Stromteilungen durch Mittelsander, Felsblöcke, Baumstämme, litoraler Pflanzensaum, flussbegleitende Altwässer; Aue: regelmäßige Überschwemmungen, schilfbewachsene Sümpfe, Weiden-/Pappelwälder in der Weichholzaue und Ulmen-/Eichenwälder in der Hartholzaue; Gesamtbild heute noch vergleichbar mit den unregelmäßigen Sandflüssen Loire und Weichsel [BFG 1994]
erste Jahrhunderte unserer Zeitrechnung	<b>anthropogene Veränderungen</b> durch intensive Abholzungen im Ober- und Mittellauf (Holz für Eisenproduktion) führen zu vergrößerten Schwemmstoffmengen; die Sedimentation dieser Schwemmstoffe im Unterlauf führt innerhalb von 200 Jahren zur Verlandung der Schilf-Sümpfe und zur Auenwaldentwicklung [BFG 1994]
Mittelalter	<b>dichte Auenwälder</b> werden für Weideland gerodet [BFG 1994]
1180	die ersten <b>Ringdeiche</b> werden zum Schutz von Siedlungen angelegt [BFG 1994]
die Jahrhunderte nach 1180	die <b>Ringpolder</b> werden zu kleinen Deichen verbunden, bleiben jedoch ohne großräumige Wirkung [BFG 1994]
14. und 15. Jahrhundert	zum Schutz der Gehöfte an der Elbe wurden <b>Strombaumaßnahmen</b> durchgeführt, die eine Verlandung d. Uferzonen bewirken u. den Flusslauf regeln sollten [WILKEN & POBKE 1987]
1684	erster Elbschlingen- <b>Durchstich</b> (km 355) z. Verbesserung der Fahrverhältnisse [BFG 1994]
1740	<b>Durchstich</b> bei Lostau km 336 [ROHDE 1971]
1740 bis 1746	Bau des <b>Plauer Kanals</b> , der Elbe und Havel verbindet [ROHDE 1971]
Mitte des 18. Jh.	bedeutende Eingriffe setzen <b>erst jetzt</b> in der tidefreien Elbe ein [ROHDE 1971]
1773/74	<b>Durchstiche</b> bei Klöden km 190, Döbern km 160, unterhalb Wittenberg [ROHDE 1971]
1785	<b>Durchstich</b> bei Nieder- und Obergohlis km 66 [ROHDE 1971]
1786/87	<b>Durchstich</b> bei Rothensee km 333 [ROHDE 1971]
Ende des 18. Jahrhunderts	der erste weitreichende <b>Buhnenausbau</b> zwischen Lauenburg km 570 und Bunthaus km 609, auch Kaven genannt, wohl als Ufersicherung gebaut [Rohde 1971] [BFG 1994]
1810	<b>Durchstich</b> bei Loswig km 152 [ROHDE 1971]
vor 1815	„ <b>der Elbstrom war völlig verwildert</b> “: Abbrüche von Ufern, Auskolkungen, wandernde Sandbänke, Verlagerungen des Talweges, Stromschleifen mit zu geringem Halbmesser, Stromspaltungen, Baumstämme, Felsblöcke, Schiffsmühlen; es wurden bereits folgende Maßnahmen durchgeführt: Räumungen von Bäumen u. Felsen, Uferbefestigungen, Absperrungen von Nebenarmen, Durchstiche bei: Döbern, Clöden, unterhalb Wittenberg, bei und unterhalb Magdeburg, bei Loßwig. [METSCHIES 1939]
1815 bis 1892	Weitg. abgeschlossene <b>Mittelwasserregulierung</b> der Ober- und Mittel-elbe auf 94 cm NW; 1815 Wiener Kongreßakte, 1821 Elbschiffahrtakte, 1844 Elbschiffahrt-Additional-Akte (94 cm NW), ab 1866 preußische Elbstromverwaltung in Magdeburg und umfangreicher Buhnenausbau, in Sachsen werden 58 km Parallelwerke errichtet [BFG 1994]
1821	<b>Elbschiffahrtakte</b> : die Elbuferstaaten verpflichten sich in baulicher Hinsicht, Zitat: „alle Hindernisse der Schiffahrt im Fahrwasser ohne Verzug auf ihre Kosten zu räumen, keine die Sicherheit der Schiffahrt gefährdende Strom- und Uferbauten zu gestatten und den Leinpfad überall in einen guten Zustand zu setzen.“ [VOLK 1934]

Fortsetzung Tab. II-1.3

1842 (z.B. in Preußen)	<b>Stromzustand:</b> 55570 m Uferabbrüche, 15230 m Deckwerke, 1712 Buhnen [JÜNGEL 1993]
1844	<b>Elbschiffahrt-Additional-Akte §53:</b> - Befestigung der im Abbruch befindlichen und Erhaltung der restlichen Ufer; Einschränkung zu breiter Stromstrecken und erforderlichenfalls Aufräumung seichter Stellen; Anschließung oder Wegschaffung von Inseln, soweit deren Beibehaltung der Herstellung und Erhaltung eines geregelten Fahrwassers hinderlich ist und nicht durch andere wichtige Rücksichten erforderlich wird; Anzucht und Erhaltung von Buschwerk auf Sandfeldern und Anlandungen, welche ohne Nachteil für das Fahrwasser bestehen können [KINDT 1990] - nähere Anweisungen zum Tauchtiefenziel (3 rheinl. Fuß) bei NW siehe [VOLK 1934]
bis 1858	eine Statistik der <b>Stromschaukommission</b> von 1858 ergibt: 4298 gebaute Buhnen, 113,4 km Deckwerke und 27,8 km Parallelwerke [KINDT 1990, METSCHIES 1939]
1860	die <b>Deichverbände</b> werden im preußischen Deichamtsgesetz verankert und der zusammenhängende Hochwasserschutz an der Elbe beginnt [BFG 1994]
1868	großer <b>Durchstich</b> bei Gallin, oberhalb Wittenberg [WSD OST 1997]
1873	großer <b>Durchstich</b> bei Döbeltitz, unterhalb Belgern [WSD OST 1997]
1880 bis 1910	<b>koordinierte Ausbaurbeiten</b> , z. B.: Durchstiche, Bau von Buhnen und Deckwerken zur Einschränkung des Mittelwasserbettes, Uferbefestigung an allen Abbruchstellen, Verbau von Kolken, Räumung des Stromes von Baumstämmen, Felsen und Sandbänke; lediglich unterhalb der Havelmündung noch wandernde Sandbänke [KINDT 1990, METSCHIES 1939]
1904, 1911, 1921, 1929, 1934	katastrophale <b>Trockenjahre</b> : Schiffsverkehr ruht jeweils für mehrere Monate [KLAUS 1949]
1911 und später	<b>Reichsgesetz zur Niedrigwasserregulierung</b> mit Mindestwassertiefe von 1,10 m oberhalb und 1,25 m unterhalb der Saalemündung - auf sächsischem Gebiet durch Längswerke, Vorlandverfüllung, Entfernung von Hindernissen (Baumstämme, Felsen, Sandbänke) aus der Fahrinne - erst ab 1930er Jahre weiter stromab - nach 1945 nur noch Unterhaltung der Anlagen zw. Schmilka und Boizenburg [BFG 1994]
1902 bis 1948	Bau von <b>29 Staustufen</b> am böhmischen Abschnitt der Elbe und der Moldau [BFG 1994]
1929	<b>extremes Trockenjahr</b> , aber die Abflüsse noch größer als 1904, deshalb wurde der Regelungswasserstand RW 1929 <b>berechnet</b> aus beiden. [WSD OST 1997]
1929	<b>Regelungswasserstand von 1929</b> = RW29 ist der Wasserstand der den bis dahin kleinsten beobachteten Abflussmengen entspricht und auf den Stromzustand von 1929 bezogen wird [MÜLLER 1942]
bis 1930	Bau von 12 <b>Staustufen</b> an Elbe und Moldau [WSD OST 1997]
1935	<i>die Denkschrift über die Niedrigwasserregelung</i> geht von 700 t-Schiffen aus, mit einer Fahrwassertiefe von 1,40 m oberhalb und 1,70 unterhalb Saalemündung [KINDT 1990]
1936 bis 1938	auf der Ausbaustrecke Dornburg (km 297,0 bis 301,0) werden rund <b>450 Wassereichen (!)</b> mit Längen bis zu 20 m gehoben und an Land gebracht [GAHRS 1939]
1893 bis 1964	<b>Sohlenerosion</b> zw. 16 cm bei Schöna und 142 cm bei Magdeburg Rothensee [BFG 1994]
1950er bis 1960er	Fortsetzung der <b>Regelungsarbeiten</b> und Abschluss bis auf die sogenannte Reststrecke - Elbe-km 508 bis 521 - bei Hitzacker [KINDT 1990]
1957 bis 1960	Bau der <b>Staufufe Geesthacht</b> [KINDT 1990]
1960	wegen der morphologischen Veränderungen des Flussbettes wurde der <b>Regelungswasserstand 1959</b> berechnet [WSD Ost 1997]
seit 1976	<b>Elbe-Seitenkanal</b> (115 km, 61 m Höhendifferenz) [KINDT 1990]
seit 1830 bis heute	durch den Ausbau der Unterelbe <b>sank der Mittelwasserstand</b> bei Geesthacht um ca. 100 cm ab [KINDT 1990]
20. Jahrhundert	<b>Talsperrenbau</b> , größere Speichermaßnahmen mit Bedeutung für die Elbeabflüsse ab den 30-er/40-er-Jahren auf deutschem, ab 50-er/60-er auf tschechischem Gebiet [SIMON 1996]
bis heute	<b>Flächenverminderung der Überflutungsau</b> - Gesamt von 6172 km <sup>2</sup> auf 809 km <sup>2</sup> (um 87% reduziert auf 13 %) - Regierungsbezirk Magdeburg von 2200 km <sup>2</sup> auf 350 km <sup>2</sup> (um 84% auf 16%) [BFG 1994] - diverse Zahlenangaben und Übersichten liefern [SIMON 1996] und [IKSE 2001]

### II-1.2.2 Laufentwicklung der Elbe zwischen 1600 und 1900 (nach ROMMEL)<sup>2</sup>

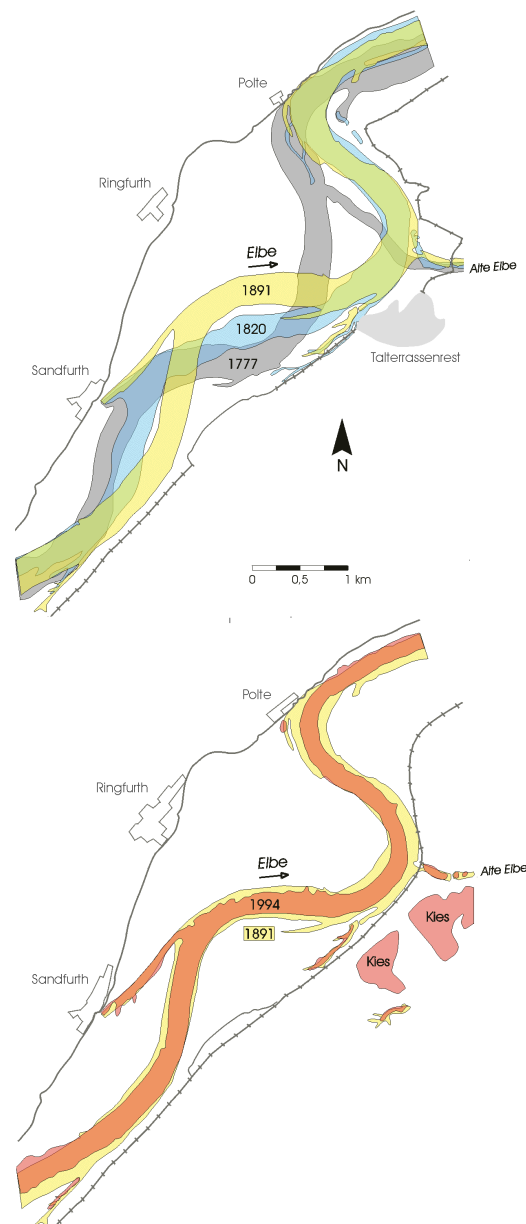
Im Rahmen einer Studie im Auftrag der BfG zur ‚*Laufentwicklung der Deutschen Elbe bis Geesthacht seit ca. 1600*‘ führte ROMMEL (2000) umfassende Auswertungen historischer Karten durch. Der Schwerpunkt dieser Untersuchungen liegt in der systematisch nach Strecken- und Zeitabschnitten gegliederten Analyse der Grundrissänderungen und der Laufentwicklung. Die untersuchte Elbestrecke entspricht derjenigen des BMBF-Verbundprojekts.

Die Studie beinhaltet einerseits die Analyse natürlicher Veränderungen, andererseits die Beschreibung der anthropogenen Eingriffe. Dazu wurde historisches Kartenmaterial ab ca. 1730, lokal auch ab etwa 1600 bis um 1890 im Hinblick auf die Laufentwicklung ausgewertet und vergleichende Grundrissdarstellungen der Elbe in 50-Jahres-Scheiben im Arbeitsmaßstab 1:100.000 vorgelegt.

Natürliche Grundrissänderungen werden v.a. durch Mäanderexpansion (quer zur Hauptfließrichtung) und Laufmigration (Verlagerung in Längsrichtung) verursacht. Ein in der Studie gezeigtes Beispiel (vgl. Abb. II-1.13) beschreibt eine Krümmungsmigration um ca. 1,25 km in 100 Jahren (1777 bis 1891). An anderen Strecken betrug die erfasste Laufverlagerung bis zu 2 km in 100 Jahren. Interessant an dem Beispiel ist, dass abgesehen von einer Anpassung des Bettverlaufes an die verengte Deichführung bei Polte keine natürliche Expansion im Sinne einer seitlichen Ausdehnung der Mäander zu erkennen ist, die einem Streben des Flusses nach Laufverlängerung und Gefälleausgleich gleichkommen würde. Keine bedeutende (seitliche) Expansion hieße, der Stromverlauf entwickelte sich in quasi dynamisch stabilen Bahnen bezüglich seiner morphologischen Gesamtcharakteristik (vor allem Streckengefälle). Dass die schon früh entstandenen Deichlinien den Hochwasserabfluss und damit die Belastung konzentrierten und *lokal* eine Rolle bei Laufänderungen spielten bzw. die Expansion begrenzten, kann sicher angenommen werden; andererseits erscheint es aber sehr unwahrscheinlich, dass die Laufentwicklung

größerer Strecken (Parameter Windungsgrad, Gefälle etc.) maßgeblich durch Deiche geprägt wurde.

Nach ROMMEL (2000) hatte während des Mittelalters zunächst die Bündelung des Hochwasserabflusses zwischen den neuerrichteten Deichlinien die uferverlagernde Seitenerosion und die Inselbildungen verstärkt. Durch den Bühnenausbau gegen Ende des 19. Jahrhunderts kam die natürliche Laufverlegung praktisch vollständig zum Erliegen. In der Gewässermitte kam es zu verstärkter Dünenbildung und Sohlenerosion, am Gewässerrand zu Sedimentation.



**Abb. II-1.13** Entwicklung der Elbe im Grundriss auf Basis historischer Karten (aus: ROMMEL 2000, verändert).

**oben:** 1777-1891: Laufmigration und –expansion um 250 bis 1250 m

**unten:** 1891-1994: Lagekonstanz und Flussbettverengung um 75 bis max. 225 m

<sup>2</sup> Die in diesem Abschnitt behandelten Inhalte sind nicht Teil der Arbeiten im Verbundprojekt, ergänzen diese aber thematisch gut und dienen dabei besonders dem Grundverständnis der (früheren) Morphodynamik der Elbe. Die Darstellung erfolgt mit freundlicher Genehmigung des Autors und der BfG.

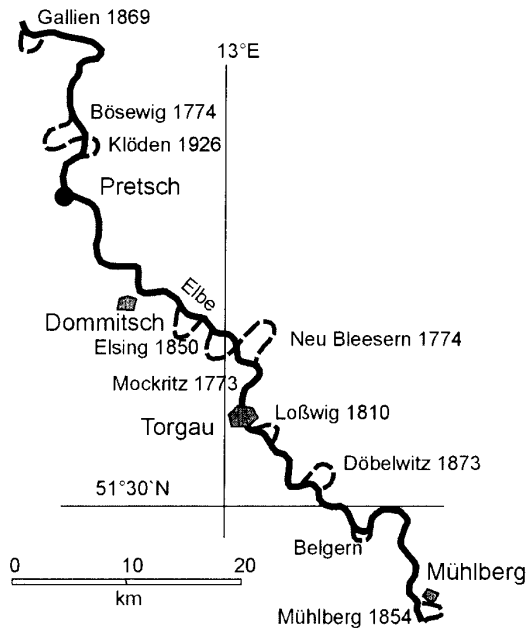


Abb. II-1.14 Elbe-Durchstiche zwischen Mühlberg und Gallien (heute ca. Elbe-km 126-206, aus: SCHMIDT 2000).

ROMMEL (2000) zufolge wurde durch den Ausbau bis 1890 das Mittelwasserbett um etwa die Hälfte verschmälert. Damit einhergehend wurden seit dem ausgehenden 18. Jahrhundert fast alle Elbinseln beseitigt. Somit trat im Fall des o.a. Sandfurter Beispiels (Abb. II-1.13) durch den Bühnenausbau nahezu keine horizontale Laufänderung mehr auf, abgesehen von der zwischen 1891 und 1994 erkennbaren Verengung des Flussbetts. Die großräumig praktisch durchgängige Breitenreduktion konnte auch anhand

der von ROMMEL rekonstruierten Elbezustände von ca. 1730 bis 1900 in weiterführenden Projektarbeiten (Auswertung der Karten der Studie im Maßstab 1:100.000) gut nachvollzogen werden. Hierauf wird im Kapitel II-2.2 noch weiter eingegangen.

Ab Mitte des 18. Jahrhunderts wurden zunehmend mittels Durchstichen, Krümmungsabflachungen etc. künstliche Änderungen im Grundriss herbeigeführt, wobei ein Schwerpunkt im Bereich der Oberen Mittelelbe lag, wie Abb. II-1.14 illustriert. Ein interessantes Ergebnis der o.a. Studie ist in diesem Zusammenhang, dass die Elbe morphologisch über lange Zeit auf verkürzende Maßnahmen lokal bis regional mit Laufverlängerungen reagierte, so dass die tatsächliche Verkürzung des Laufs nur etwa ein Drittel der Summe der Einzelverkürzungen beträgt. Hierzu wird in der Literatur mehrfach „über 60 km“ als Wert für die Summe der Laufverkürzungen der Elbe angegeben, z.B. in SIMON (1996).

Diese bis in das 19. Jahrhundert hinein ersichtlichen ausgleichenden Reaktionen erfolgten durch die o.a. Mechanismen Laufmigration und -expansion, teilweise über geringe Uferverschiebungen innerhalb eines größeren Laufabschnittes. Diese Mechanismen des Flusses waren ab der Festlegung der Ufer und damit der Lauffixierung, vor allem nach Bühnenausbau, nicht mehr möglich. Durch die Vereinbarung von Sollbreiten nahm auch die Breitenvarianz stark ab. (vgl. auch Kap. II-2.2)

Tab. II-1.4 Windungsgrad und Längenänderung der freiließenden deutschen Elbe seit 1730 (aus: ROMMEL 2000).

Laufabschnitt	Elbe-km	Windungsgrad (s)		Lauf­längen­änderung (1730/1890)
		Um 1730 (1765*)	Um 2000	
(1) Tal im Elbsandsteingebirge	0-34	1,00*	1,00	±0,0 km
(2) Dresdener Elbtalweitung	34-77	1,16*	1,20	+1,4 km
(3) Meissener Mittelgebirgstal	77-96	1,00*	1,00	±0,0 km
(4) Mäanderlauf bis zur Schwarzen-Elster-Mündung	96-199	1,44*	1,33	-8,4 km°
(5) Elblauf am Fläming	199-291	1,32*	1,31	+0,5 km°
(6) Stromteilungsstrecke bei Magdeburg	291-350	1,34	1,21	-6,4 km
(7) Verzweigungslauf im Elbe-Havel-Gebiet	350-431	1,13	1,13	-0,1 km
(8) Mäanderlauf zwischen Priegnitz und Wische	431-475	1,29	1,28	-0,5 km
(9) Elbe von Schnackenburg bis Hitzacker	475-523	1,32	1,30	-0,8 km
(10) Elblauf am Hochufer der Geest	523-585	1,14	1,09	-2,8 km
<b>Gewichtetes Mittel: (ohne Gebirgsstrecken)</b>		<b>1,28</b>	<b>1,24</b>	<b>Summe: -17,1 km -18,9 km bis 2000°</b>

°Seit 1890 Verkürzung um insgesamt 1,8 km in den gekennzeichneten Abschnitten

Die wesentlichen Ergebnisse der Auswertungen von ROMMEL bezüglich Laufentwicklung sind in Tab. II-1.4 zusammengestellt. Die Angaben zur Veränderung des Windungsgrads (Verhältnis von Lauflänge zu Tallänge) sowie der absoluten Lauflänge sind als wertvolle Anhaltswerte für die Gesamtbewertung der morphologischen Entwicklung bis zum heutigen Zustand sowie der Frage nach dem (theoretischen) natürlichen Gleichgewichtszustand anzusehen. Demzufolge ist seit 1730 gewöhnlich eine Laufverkürzung erfolgt (bezogen auf die Gesamtstrecke knapp 20 km bzw. 3,2 %), im Abschnitt (2) um Dresden jedoch auch eine Verlängerung.

### II-1.2.3 Wasserspiegel- und Sohlentwicklung seit etwa 1900 (nach FAULHABER)

Für das Verständnis und die Beurteilung des aktuellen Gewässerzustandes und -verhaltens ist freilich auch die Kenntnis der in der morphologisch gesehen jüngsten Phase (d.h. hier seit ca. 1900) beobachteten Entwicklung erforderlich. Die in diesem Abschnitt zusammengestellten Erkenntnisse basieren auf den Arbeiten von FAULHABER (1998 und 2000), d.h. entstammen nicht dem Vorhaben. Da sie für die differenzierte (quantitative) Bewertung der Projektergeb-

nisse von grundlegender Bedeutung sind, werden sie an dieser Stelle in einigen Punkten behandelt.

Demzufolge bestand ein wohl nicht beabsichtigter Folgeeffekt der angesprochenen Laufkorrekturen und gezielten Bündelung des Abflusses im Mittel- bzw. Niedrigwasserbett in der verstärkten Tiefenerosion der Sohle, die zugleich eine Veränderung der von den Flusswasserständen - durch Überflutung und Interaktion mit dem Grundwasser - geprägten Wasserhaushaltsdynamik der Aue bewirkt(e).

Durch Auswertung des sog. ‚Elbstromwerks‘ (ELBSTROMWERK 1898) und weiterer Daten durch FAULHABER (1998 und 2000) liegen umfassende (quantitative) Aussagen zu diesen in den letzten 100 Jahren stattgefundenen morphologischen Veränderungen vor. Zum Zeitpunkt der Herausgabe des umfangreichen Elbestromwerks war die von der damaligen Elbestromverwaltung eingeleitete Mittelwasserregelung durch Buhnen und Längswerke bereits abgeschlossen.

Die Veränderungen stellen sich im Überblick wie folgt dar. In Abb. II-1.15 sind die Wasserspiegelentwicklungen seit 1888 aufgetragen. Durch Bezug auf Niedrigwasserzustände sind sie ein Maß für die großräumige Sohlhöhenentwicklung.

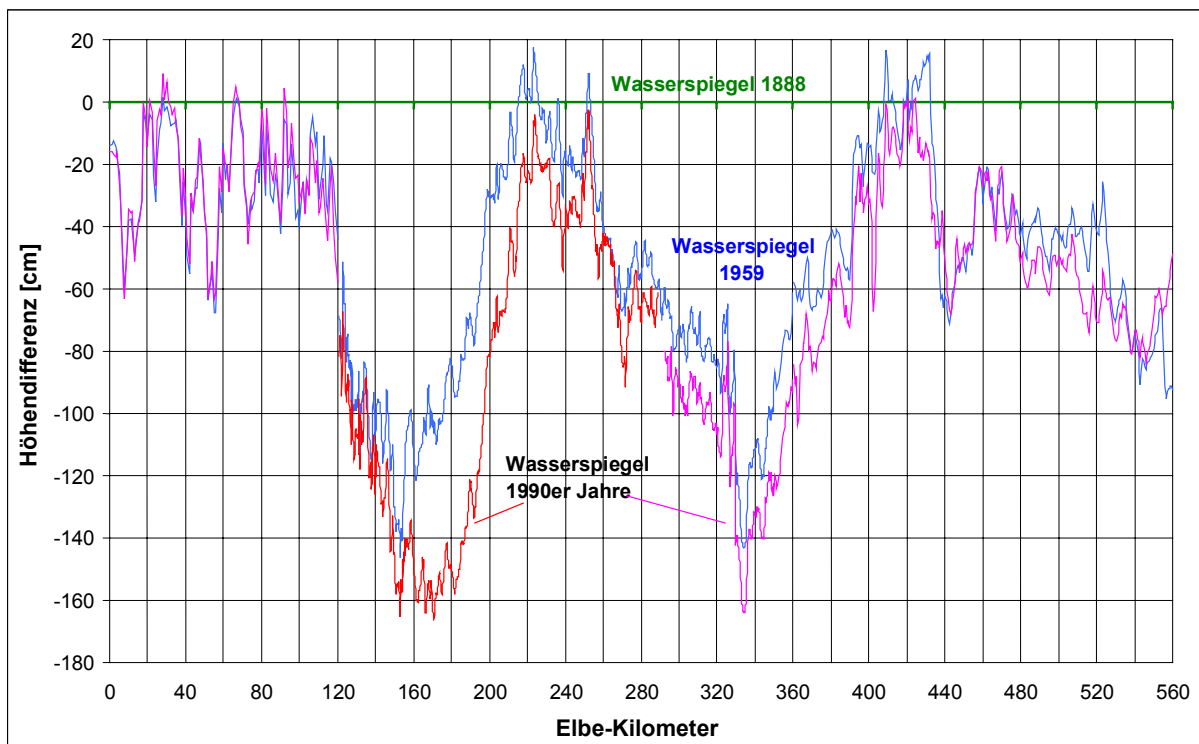


Abb. II-1.15 Entwicklung normierter Wasserspiegel im Bereich des MNW bezogen auf eine Fixierung von 1888 (aus: FAULHABER 2000)  
Darstellung mit freundlicher Genehmigung der Autorin.

Erhebliche Tiefenerosion findet sich vor allem im Abschnitt Elbe-km 120 bis 220, der sogenannten Erosionsstrecke. So kam es nach den Ergebnissen von FAULHABER (1998) zwischen km 150 und 180 zu einem Wasserspiegelverfall von bis zu 1,7 m bei vergleichbaren Durchflüssen. Aktuell tritt in der Strecke km 150 bis 220 eine mittlere Erosionsrate von 1 bis 2 cm/Jahr auf. Die Erosionsschwerpunkte haben sich z.T. räumlich im Laufe der Zeit verlagert.

In anderen Abschnitten kommt FAULHABER zu folgenden Aussagen. Demnach kann bis km 130 sowie zwischen Wittenberg und Geesthacht aktuell von keiner ausgeprägten Erosionstendenz mehr gesprochen werden, nachdem der Wasserstandsverfall infolge Mittel- und Niedrigwasserausbau (Ende 19./Anfang 20. Jahrhundert bzw. 30er Jahre dieses Jahrhunderts) offenbar abgeklungen ist. Dagegen wird der Abschnitt unterhalb von Magdeburg wegen der sogenannten „verschärft regulierten Strecke“ weiterhin zur sorgfältigen Beobachtung empfohlen.

Insgesamt liegen die Eintiefungsgrößen zwischen Wittenberg (km 214) und Tangermünde (km 388) in den letzten 35 Jahren bei etwa 0,5 cm/a, abschnittsweise sind sie deutlich geringer. Zwischen Tangermünde und Schnackenburg (km 474) ist in den letzten 35 Jahren keine Erosion zu verzeichnen, sondern teilweise eine leichte Wasserstandsanh-

hebung. Zwischen Schnackenburg und Neu Darchau (km 536) ist abschnittsweise infolge Fortführung des kriegsbedingt unterbrochenen Niedrigwasserausbaus in den 50er/60er Jahren leichte Erosion festzustellen. Unterhalb von Neu Darchau kam es seit der Fixierung von 1959 zur Wasserspiegelstützung durch das Wehr Geesthacht (Elbe-km 581).

Bezogen auf die Gefälleentwicklung (hier: des Wasserspiegels) stellt FAULHABER (2000) fest, dass nicht generell von einer Vergrößerung des Gefälles innerhalb der letzten 100 Jahre gesprochen werden kann. In einigen Bereichen, z.B. zwischen km 0 und 100, ist eine Vergleichmäßigung des Gefälles, d.h. die Beseitigung von lokal auftretenden Unstetigkeiten und Schwankungen zu verzeichnen, was Ziel der wasserbaulichen Maßnahmen im 19. und 20. Jahrhundert war (zum Vgl.: Abb. II-1.16). Bezogen auf die Erosionsstrecke ist insgesamt oberhalb von Torgau (km 154) eine Gefälleerhöhung aufgetreten, unterhalb eine Gefälleverminderung. Um Magdeburg ist die Situation ähnlich, wobei in beiden Fällen die örtlichen Felsrücken im Fluss als Fixpunkte eine herausragende Rolle für die Sohlentwicklung der Strecke bzw. die wasserbaulichen Eingriffe spielen. Die deutliche Abnahme des heutigen Gefälles am Ende der Fließstrecke (ab km 550) ist dem Stauinfluss des Wehres in Geesthacht zuzuordnen.

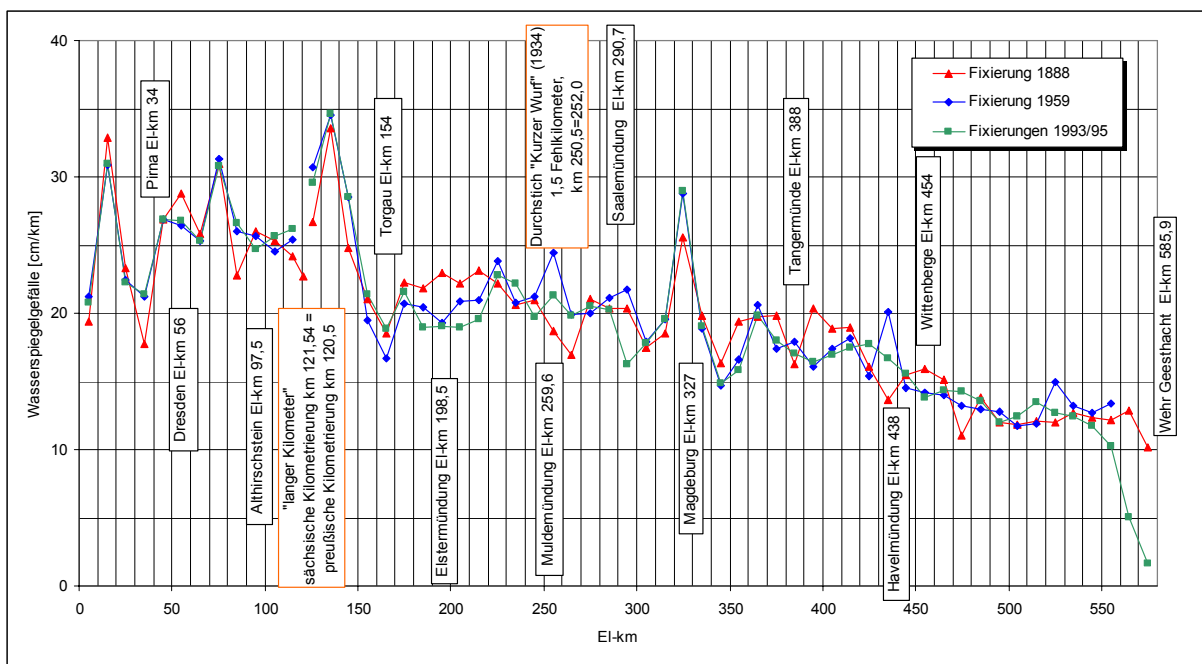


Abb. II-1.16 Gefälleentwicklung seit 1888 (für 10 km –Abschnitte berechnete Werte im MNW-Bereich), aus: FAULHABER (2000). Darstellung mit freundlicher Genehmigung der Autorin.

## II-1.2.4 Diskussion

### Allgemeine Aspekte

Die hier gesammelten Angaben zu natürlichen und anthropogenen Entwicklungsschritten an der Elbe sind bezüglich ihrer Bedeutung für den heutigen Gewässerzustand sorgfältig zu differenzieren, um Fehlinterpretationen (wie Negativbewertungen von Einzelmaßnahmen) zu vermeiden. Wie Abb. II-1.17 schematisch aufzeigt, betrifft dies an erster Stelle die räumliche und zeitliche Einordnung der Geschehnisse im morphologischen Gesamtsystem.

Darauf aufbauend stellen sich grundsätzliche Fragen nach

- der Dauerhaftigkeit der Beeinflussung des Systems durch Maßnahmen des Menschen,
- der Möglichkeit der natürlichen Regeneration bzw. des Strebens des Systems hin zu einem neuen, vom Urzustand abweichenden dynamischen Gleichgewicht,
- der Größenordnung natürlicher Entwicklungspotentiale und hierfür anzusetzender Zeiträume, unter Beachtung der Reversibilität von Veränderungen bzw. der Entwicklung unter veränderten Systembedingungen,

- dem Leitbild als dem Systemzustand unter der (rein theoretischen und idealisierten) Annahme eines vollständigen Rückzugs des Menschen aus dem Flussgebiet,
- möglichen Ansatzpunkten für die gewässerökologische Bewertung und Planung, ausgehend von historischen Referenzzuständen.

Gleichzeitig ist festzuhalten, dass einzelne Eingriffe bezüglich ihrer (Teil-)Wirkung im Gesamtgefüge oft nicht scharf voneinander getrennt werden können, zumal sie von natürlichen Variabilitäten (Klima etc.) überlagert werden; insofern gilt das Gebot einer gesamtheitlichen Betrachtung (Summenwirkung auf einen bestimmten Parameter, z.B. Sohlhöhe).

### Zur Elbe

Vor diesem Hintergrund lassen die obigen Angaben zur Elbe folgende weiterführende Aussagen zu.

Zu den anthropogenen Eingriffen mit langfristig und großräumig übergeordneter Bedeutung (da von indirekter Wirkung auf die Morphologie des Gewässerbettes, z.B. in Form einer Abflussänderung) gehören vor allem

- Entwaldungen im Einzugsgebiet und in der Aue,

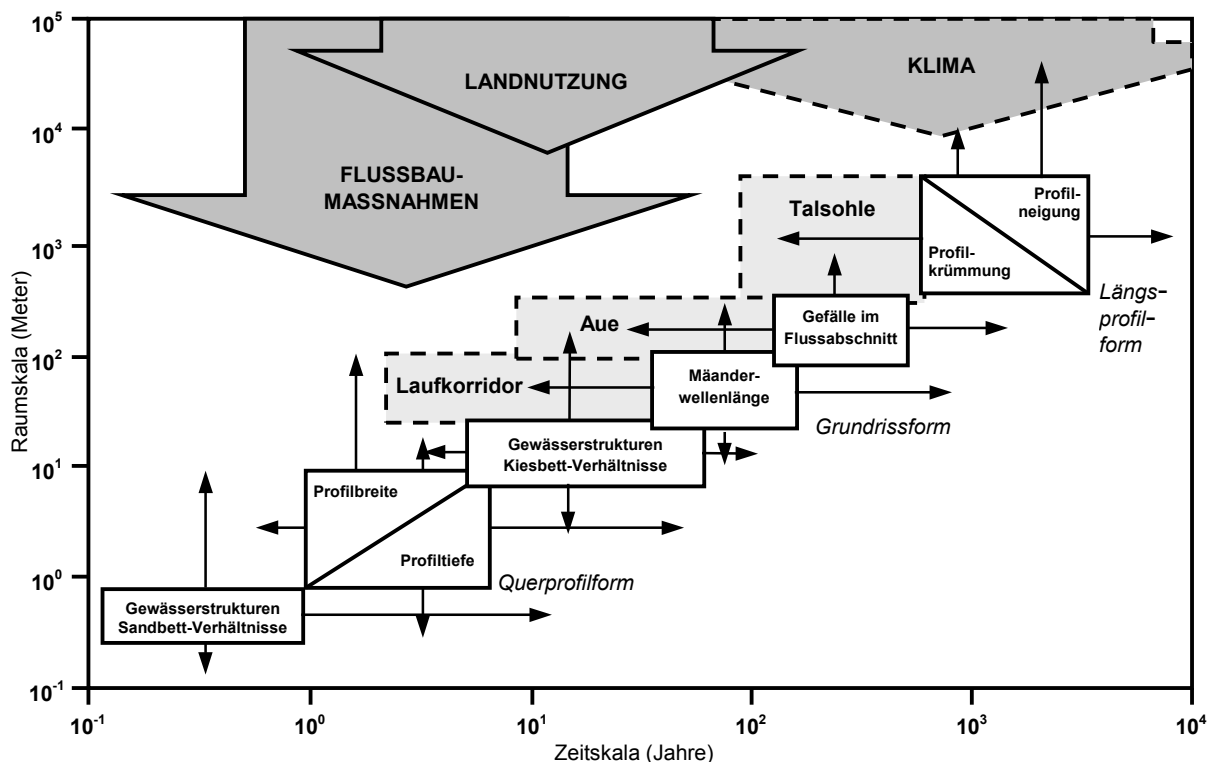


Abb. II-1.17 Raum-Zeit-Bezug von Gewässerstrukturen, nach KNIGHTON und NEWSON & SEAR in: KERN (1994).



- Deichbau für durchgängigen Hochwasserschutz (einschließlich zunehmende Landnutzung und Besiedlung in der Aue), sowie
- Speicherbau,

wobei deren Auswirkung auf die flussmorphologische Entwicklung, zumindest die Vergangenheit vor Beginn spezifischer Messungen betreffend, im Detail schwer quantifizierbar erscheint.

Von unmittelbarer Bedeutung für die morphologische Entwicklung des Stromes bis heute sind

- Maßnahmen zur Flussregulierung,
- Änderungen im Vorland (z.B. der Deichlinie) mit hydraulischer Wirkung auf den Fluss,
- Staustufen sowie
- Eingriffe in die Gewässerstrukturen und den Feststoffhaushalt (Beseitigung von Vegetation, Totholz, Sandbänken etc.).

Geht man zum Thema *Tiefenerosion* über, so lässt die Zusammenstellung folgende Schlüsse zu.

Ein direkter Vergleich der zentralen Ergebnisse von ROMMEL und FAULHABER (vgl. Tab. II-1.4 und Abb. II-1.15) zeigt eindringlich, dass die Strecken mit den größten Laufverkürzungen im 18. und 19. Jahrhundert auch den gravierenden Schwerpunkten der Erosionsentwicklung im Längsverlauf entsprechen.

Wie angedeutet schließt ROMMEL (2000), dass der Strom bis zu seiner systematischen Fixierung im Grundriss durch Uferstabilisierung auf Laufverkürzungen kompensierend reagieren konnte. Dies war mit der großräumigen Umsetzung der Regulierung praktisch nicht mehr der Fall, wobei z.B. allein im Bereich km 125-206 fünf Durchstiche in die Zeit nach Ausbaubeginn fallen (1821 Elbschiffahrtakte, 1844 Elbschiffahrt-Additional-Akte, zum Vergleich: Abb. II-1.14). Beachtenswert ist hierbei auch die zügige Umsetzung der Ausbaubeschlüsse, so dass bereits wenige Jahrzehnte u.a. etwa 4300 Bühnen, d.h. etwa 2/3 der heutigen Anzahl, eingebaut waren (1858; vgl. Tab. II-1.3).

Betrachtet man die Entwicklung der Niedrigwasserspiegel (als Indiz für das Sohlniveau) über etwa 100 Jahre nach Abschluss der Mittelwasserregelung um 1890 bzw. Niedrigwasser um 1930, repräsentiert durch die Verläufe in Abb. II-1.15, so lässt sich schließen, dass im gesamten Längsverlauf eine (anthropogene und natürliche) Umstrukturierung des Gewässerbettes und Anpassung an die Verschmälerung des Gerinnes über den verbleibenden Freiheits-

grad Sohle stattgefunden hat<sup>3</sup>. Die Sohleintiefungen bis 1959, soweit sie diese Anpassung betreffen, liegen in der Größenordnung weniger Dezimeter<sup>4</sup>, am Übergang zu breiteren Vorland- oder flacheren Gefälleverhältnissen (um km 220 bzw. 420) auch mit lokalen Auflandungen um 10 cm. Diese Anpassung an die flussbauliche Regulierung ist danach, d.h. im Vergleich der Verläufe der 60-er und 90-er Jahre, nicht mehr klar ablesbar, d.h. hier ist von einer Stagnation auszugehen.

Im ihrem übergreifenden qualitativen und quantitativen Zusammenhang sprechen die Daten somit - bei allen Vorbehalten einer detaillierteren Betrachtung - für die empirischen Erkenntnisse und aufbauenden Hypothesen zum deutschen Elbelauf, dass

- seitliche Verlagerungen des Strombettes (über die Migration von Krümmungen etc., begrenzt durch Talränder und damals bestehende Deiche) zwischen ca. 1600 und 1830 in Zeitintervallen von etwa 50 Jahren die Größenordnung von ein bis zwei Gewässerbreiten erreichten,
- die morphologische Reaktionszeit auf die Regulierung des Strombettes (als Ganzes) schätzungsweise auf 30 bis 70 Jahre (maximal 100) eingegrenzt werden kann<sup>5</sup>, wobei die zugehörigen Eintiefungen (Wasserspiegelabsenkungen im NW-Bereich) lokal bis ca. 60 cm betragen,
- über diese Anpassung an die Stromregulierung hinaus eine langfristige (hier: über 70 bis über

<sup>3</sup> So beschreiben z.B. SCHULTZE & MEYER (1916): „Durch das Zusammenfassen in einem Bett von festen, der Wasserführung angemessenen Abmessungen wurde der Strom gezwungen bei Wasserständen in Mittelwasserhöhe und darunter seine Kraft, die bisher vielfach in Uferabbrüchen sich geäußert hatte, im wesentlichen auf die Ausbildung und Freihaltung des Flußbettes zu verwenden. Der Erfolg zeigte sich bald im Verschwinden der Mittelsänder, der schlankeren Ausstattung des Talweges und in der besseren Fahrtiefe im Strom. Aber mit den erzielten Verbesserungen wuchsen auch die Ansprüche [...]“

<sup>4</sup> ARP & HIRSCH (1936) halten bezogen auf die Fahrwassertiefe (beachte: nicht Sohleintiefung) fest: „Noch als Folgewirkung der Mittelwasserregulierung und in Auswirkung weiterer örtlicher Verbesserungen ist die durchschnittliche Fahrwassertiefe von 1883 bis 1933, also in einem Zeitraum von 50 Jahren, oberhalb der Saalemündung um rund 40 cm, zwischen der Saalemündung und Magdeburg um rund 50 cm und unterhalb Magdeburg um rund 60 cm vergrößert worden.“

<sup>5</sup> Grundgedanke dieser Aussage ist, dass die Zeit zwischen Vollendung der „Grobregulierung“ für Mittelwasserhältnisse (Zustand 1888 in Abb. II-1.15) bis zur angenommenen Stagnation (Zustand 1959) 70 Jahre beträgt, von denen knapp 30 Jahre der „Feinregulierung“ für Niedrigwasser zuzuordnen sind. Hierbei unbekannt bleiben die Entwicklung vor 1888 sowie der präzisere Zeitpunkt der Stagnation nach Erreichen des Ausbaustands von ca. 1930. Demgegenüber erscheint unwahrscheinlich, dass sich die Reaktionen nur innerhalb weniger Jahre nach einzelnen Ausbauphasen vollzogen.

100 Jahre andauernde) Tiefenerosion in jenen Teilstrecken stattfand bzw. -findet, in denen der Lauf eine erhebliche Verkürzung erfuhr bzw. die Möglichkeit eines Längenausgleichs über Uferverlagerung nicht mehr gegeben war (v.a. drei Abschnitte mit Verkürzungen zwischen 2,8 und 8,4 km bzw. 4,5 und 10,8 %, bezogen auf die jeweilige Streckenlänge, s. Tab. II-1.4), so dass insgesamt Eintiefungen von deutlich mehr als 60 cm zu verzeichnen sind,

- Aussagen zum Zeitpunkt des Erreichens eines (auf Strecken bezogenen) dynamischen Gleichgewichts hiermit ansatzweise denkbar sind, prinzipiell aber unscharf bleiben.

Bei diesen Aussagen zur Erosionsentwicklung darf nicht außer Acht gelassen werden, dass andere (Rand-)Einflüsse und Prozesse im Flusssystem hier unberücksichtigt oder zumindest für Teile der Vergangenheit weitgehend unbekannt sind, wie z.B.

- Staustufenbau im Oberlauf und an einigen Nebenflüssen im 20. Jahrhundert mit Sediment rückhaltender Wirkung,
- die weiteren Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen im 20. Jahrhundert wie Baggerungen etc.; auch z.T. veränderte Bühnenwirkungen infolge Verlandung und Sohlerosion
- die natürliche Variabilität der Abflüsse und deren Entwicklung (hydrologisch signifikante Veränderung) seit dem 19. Jahrhundert (Kleine Eiszeit, Talsperrenbau, etc.; siehe Kapitel III-1),
- die natürlich bedingte, anteilige Tiefenerosion im Zustand vor Grobausbau, während einzelner Ausbauphasen sowie seit dem Ausbau.

## Literatur

ARP & HIRSCH (1936): Die Verbesserung der Elbewasserstraße. Zentralblatt der Bauverwaltung Bd. 56, Heft 5, Berlin, S. 97-107.

BfG [Hrsg. BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE] (1994): Historische Entwicklung der aquatischen Lebensgemeinschaft (Zoobenthos und Fischfauna) im deutschen Abschnitt der Elbe. BfG Koblenz, im Auftrag des Bundesumweltministeriums, 173 S.

ELBSTROMWERK (1898): Der Elbstrom, sein Stromgebiet und seine wichtigsten Nebenflüsse. Eine hydrographische, wasserwirtschaftliche und wasserrechtliche Darstellung. Im Auftrage der deutschen Elbuferstaaten und unter Beteiligung des preußischen Wasser-Ausschusses, Hrsg. Königliche Elbstrombauverwaltung zu Magdeburg, Verlag von Dietrich Reimer, Berlin

FAULHABER, P. (1998): Entwicklung der Wasserspiegel- und Sohlenhöhen in der deutschen Binneneibe innerhalb der letzten 100 Jahre – einhundert Jahre "Elbestromwerk". In: Geller et al. (Hrsg.) (1998): Gewässerschutz im Einzugsgebiet der Elbe, 8. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Teubner, Stuttgart/Leipzig.

FAULHABER, P. (2000): Veränderung von hydraulischen Parametern der Elbe in den letzten 100 Jahren. In: BAW [Hrsg.] (2000): Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 82, Karlsruhe, S. 97-118

GÄHRS, C. (1939): Die Arbeiten der Reichswasserstraßenverwaltung im Jahre 1938. - Die Bautechnik 17, S. 152-155.

IKSE [Hrsg.] (2001): Bestandsaufnahme des vorhandenen Hochwasserschutzniveaus im Einzugsgebiet der Elbe. IKSE Magdeburg

JÜNGEL, K. (1993): Die Elbe: Geschichte um einen Fluß. Anita Tykve Verlag, Böblingen.

KERN, K. (1994): Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung – Geomorphologische Entwicklung von Fließgewässern. Springer-Verlag Berlin Heidelberg

KINDT, H. (1990): Die Entwicklung der Elbe als mitteleuropäische Binnenschiffahrtsstraße. - 119 S; Hrsg.: Wasser- u. Schifffahrtndirektion Nord.

KLAUS, O. (1949): Die Niedrigwasserregelung der Elbe. - Die Bautechnik 26, S. 236-241 und S. 338-341.

LITT, T. (1994): Paläoökologie, Paläobotanik und Stratigraphie des Jungquartärs im nordmitteleuropäischen Tiefland, Unter besonderer Berücksichtigung des Elbe-Saale-Gebietes. Dissertationes Botanicae Bd. 227, Cramer in der Gebrüder-Borntraeger-Verl.-Buchhandlung, Berlin/Stuttgart

METSCHIES, W. (1939): Der Ausbau der Elbe zum schiffbaren Strom. - Die Bautechnik 17, S. 577-582.

MÜLLER, K. (1942): Der Bühnenbau nach Erfahrungen an der Elbe (Teil 1). - Die Bautechnik 20, S. 208-213.

ROHDE, H. (1971) Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schifffahrtsstraße. - Mitt. d. Franzius-Inst. f. Grund- u. Wasserbau d. Techn. Univ. Hannover; H. 36.

ROMMEL, J. (2000), Studie zur Laufentwicklung der deutschen Elbe bis Geesthacht seit ca. 1600. Gutachten im Auftrag der BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. im Internet verfügbar unter: <http://elise.bafg.server.de/>

SCHMIDT, M. (2000): Hochwasser und Hochwasserschutz in Deutschland vor 1850 – Eine Auswertung alter Quellen und Karten. Oldenbourg-Industrieverlag, München

SCHULTZE, F., MEYER, G. (1916): Fünfzig Jahre Elbstrombauverwaltung. In: Zentralblatt der Bauverwaltung, Bd. 36, Heft 27, S. 190-194

SIMON, M. (1996): Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Elbe. Bericht der Internationalen Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE), Magdeburg, unveröffentlicht

WILKEN, R.-D., POBKE, G. (1987): Ergebnisse der Kartierung eines Bühnenfeldes in der Elbe bei Schnakenburg. - Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 31, 77-81

WSD OST [Hrsg. Wasser- u. Schifffahrtndirektion Ost] (1997): Wasserstraßen zwischen Elbe und Oder. Unveröffentlichter Bericht, 56 S.

VOLK, J. (1934): Die Entwicklung der Elbschifffahrtsstraße. Zentralblatt der Bauverwaltung Bd. 54, Heft 26, Berlin.

## II-2 Nutzung historischer Daten als Grundlage für die Entwicklung ökomorphologischer Leitbilder und Entwicklungsziele

### II-2.1 Erfassung ökomorphologischer Strukturen der Elbe aus Karten von 1770 und Vergleich dem heutigen Zustand

*O. Harms, S. Kiene, F. Nestmann*

Die Beschreibung möglichst naturnaher Verhältnisse und natürlicher Entwicklungsprozesse ist eine Grundvoraussetzung für die Entwicklung von Leitbildern und Entwicklungszielen. Eine naheliegende Möglichkeit, Anhaltspunkte für die Definition eines möglichst unbeeinflussten (als ‚natürlich‘ zu definierenden) Zustands zu gewinnen, ist der Blick in die Vergangenheit des Gewässers. Soweit historische Karten und Beschreibungen vorliegen, können sie gezielt als Grundlage für die Beschreibung des potentiell natürlichen Zustand des Gewässers ausgehend vom gegenwärtigen Zustand (Leitbild) bzw. seiner einzelnen Funktionskomplexe und Parameter genutzt werden, unter Berücksichtigung irreversibler Veränderungen. Vor diesem Hintergrund erfolgten folgende Auswertungen historischer Informationen.

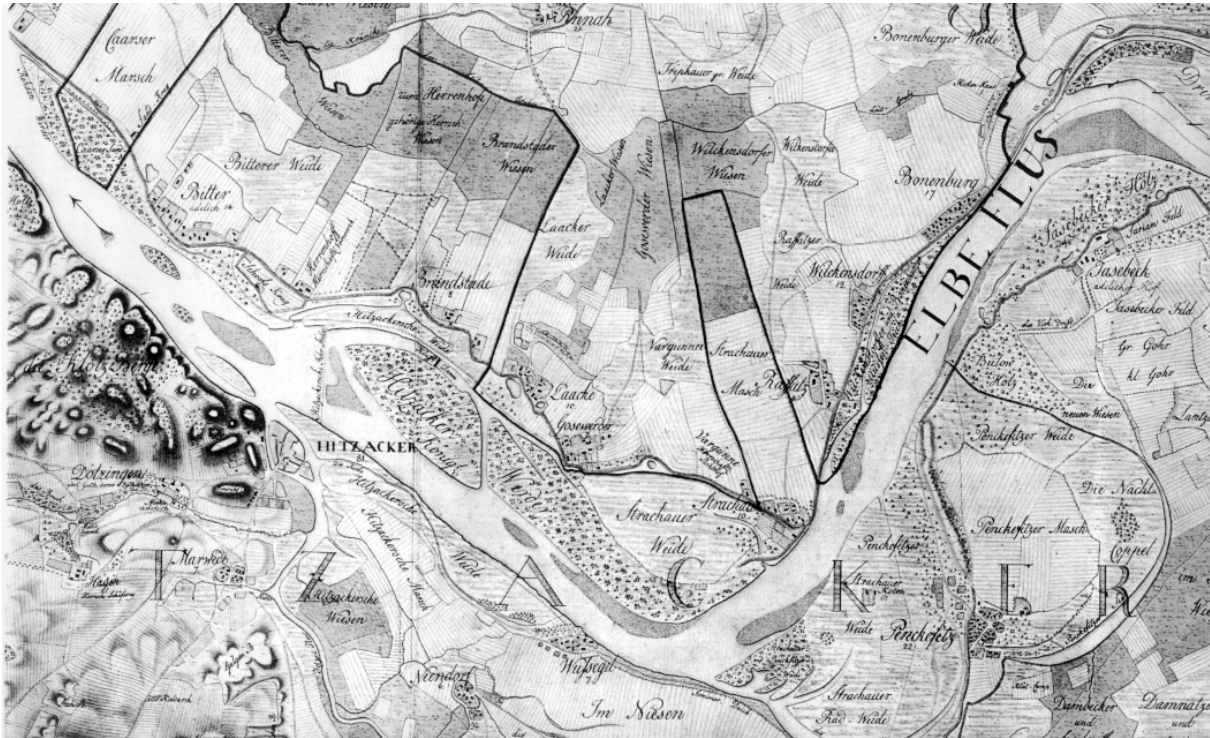
Aufbauend auf den im Kapitel II-1.2 dargestellten Geschehnissen kann die Zeit von Mitte des 18ten bis Ende des 19ten Jahrhunderts als jene Übergangszeit angegeben werden, in der die Einflüsse des Menschen auch auf den Flusslauf so zunahmen, dass sich das morphologische Bild der Elbe, wie es bis dahin bestand, entscheidend veränderte (s. auch BFG 1994, METSCHIES 1939, ROHDE 1971). Während die Elbe vorher als ‚verwilderter Elbstrom‘ geschildert wird (METSCHIES 1939), der von Abbrüchen der Ufer, Auskolkungen, wandernden Sandbänken, Verlagerungen des Talweges, Stromschleifen mit zu geringem Halbmesser, Stromspaltungen, Baumstämmen und Felsblöcken geprägt wird und nur durch örtlich begrenzte Maßnahmen verändert war, beginnen zu dieser Zeit die Regulierungen, die die Morphologie des Elbelaufes einschneidend verändern, obwohl die Veränderungen nicht so weit gingen wie an anderen deutschen Flüssen.

Die älteste im Kartenhandel erhältliche Karte der Elbestrecke in Nordrhein-Westfalen ist ein Nachdruck der Kurhannoverschen Landesaufnahme aus dem Jahre 1776 (NIEDERSÄCHSISCHES LANDESVER-

WALTUNGSAMT 1961). Es ist davon auszugehen, dass die Karten vor 1800 einen Zustand zeigen, der noch relativ natürlich bzw. in den wesentlichen Strukturen wie Uferlinien zumindest noch nicht planerisch koordiniert vom Menschen beeinflusst war. Ein Vergleich mit aktuellen topographischen Karten ermöglicht eine Abschätzung der Veränderungen hinsichtlich Wasserflächen, Nebengewässeranbindung, Insel- und Bankstrukturen etc.

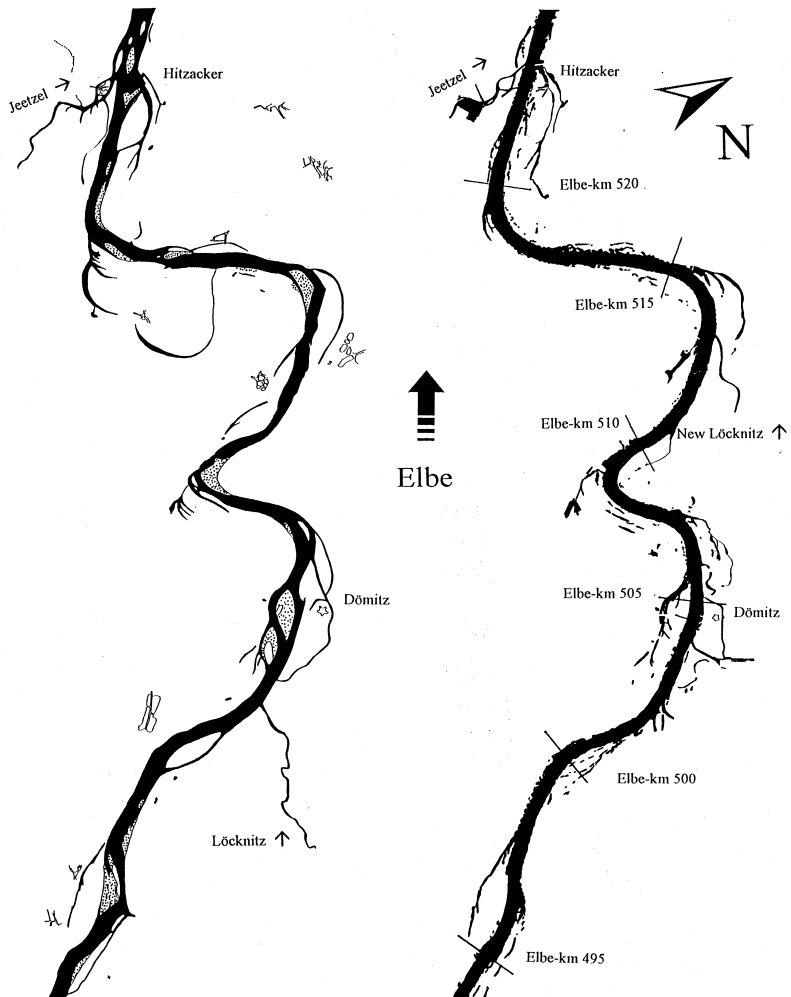
Im Rahmen der Projektarbeit wurde diese Karte von 1770 für einen 108 km langen Abschnitt (von km 475, Schnackenburg bis km 583, Geesthacht) mit den topographischen Karten von 1992 verglichen und alle morphologischen Strukturen, die erkennbar sind, gezählt bzw. gemessen. Beide für diese Auswertung verwendeten Kartengrundlagen liegen im Maßstab 1:25 000 vor. Die Abbildungen Abb. II-2.1 und Abb. II-2.2 zeigen ausschnittsweise die Karten sowie die daraus entnommenen Wasserflächen eines Elbeabschnittes im Vergleich.

Aus den zahlenmäßigen Ergebnissen der Auswertung (vgl. Tab. II-2.1) wird ersichtlich, dass sich in den letzten 200 Jahren die Gewässerstrukturen im besagten Elbe-Abschnitt deutlich verändert haben: Einige Strukturen sind vollkommen verschwunden (Inseln und Uferbänke), andere wurden stark eingeschränkt oder verändert (Seitengewässer), so dass eine Verarmung und Vereinheitlichung der Strukturen erfolgte. Dabei gilt zu beachten, dass vorhandene Strukturen (z. B. Insel) durch ihre hydraulische Wirksamkeit (z. B. Ändern der Fließgeschwindigkeiten, Umlenken der Strömung) weitere Strukturen und Dynamik erzeugen (z. B. Steilufer, Kolke, Sedimentdifferenzierung). Zugenommen haben die Regelungsbauwerke. Buhnen scheinen als Bauwerke noch relativ strukturreich zu sein, da ihre hydraulische Wirkung (z. B. Variation der Fließgeschwindigkeit und der Sedimente) und ihr (Hart-)Substrat natürliche Strukturen nachahmen.



**Abb. II-2.1** Elbeabschnitt km 513-525 im Jahre 1776 (Kartenquelle: Niedersächsisches Landesverwaltungsamt) und heute  
 oben: Ausschnitt der Kurhannoverschen Landesaufnahme von 1776, Blatt Hitzacker, Originalmaßstab 1:25 000 (verkleinert)  
 unten: Ausschnitt der topographischen Karte 1:25 000 (verkleinert); Blatt 2832 Dannenberg Nord, LGN Niedersachsen.

**Abb. II-2.2** Wasserflächen des Elbe-Laufes und der Auengewässer zwischen km 494 und 524.  
**Links:** Nachgezeichnet aus der Kurhannoverschen Landesaufnahme 1776. Die Inseln und Uferbänke ohne Bewuchssignatur wurden gepunktet.  
**Rechts:** Nachgezeichnet aus der Topographischen Karte 1:25.000 von 1992.



**Tab. II-2.1** Vergleich morphologischer Strukturen im Kartenbild von 1776 und 1992.

Struktur / Charakteristik	1776	1992
Länge des Elbe-Abschnittes	ca. 106 km	108 km
Breite der Elbe (Inselbreite inklusive, falls im Querschnitt), 1992 zwischen den Ufern	max. 850m Durchschnitt 420m min. 130m	max. 550m Durchschnitt 340m min. 230m
Breite der Elbe (ohne Inseln), 1992 zwischen den Bühnenköpfen	max. 750m Durchschnitt 380m min. 130m	max. 430m Durchschnitt 220m min. 150m
Länge des Elbelaufes mit Inseln	32 km	0
Inseln (mit Vegetation / ohne)	55 (30 / 25)	0
Insel-Fläche (mit Vegetation / ohne)	ca. 5,74 km <sup>2</sup> (4,13 km <sup>2</sup> / 1,70 km <sup>2</sup> )	0
Länge der amphibischen Zone um die Inseln	ca. 70 km	0
Uferbänke - ohne Vegetation - (Fläche)	26 (2,19 km <sup>2</sup> )	0
Regelungsbauwerke	27 Bühnen	ca. 1680 Bühnen
Länge des rechten und linken Ufers mit Bauwerken (Anteil in % des gesamten Ufers)	5,4 km (2,5%)	198,3 km (91,8 %)
Seitengewässer ohne Elbe-Verbindung	62	142
Seitengewässer mit Elbe-Verbindung (Gesamtlänge / Durchschnitt)	40 (52,9 km / 1,3 km)	28 (23,7 km / 0,8 km)

Auf Basis der Karten- und Literaturlauswertungen (s. auch Kap. II-1.2) können somit folgende Eigenschaften des historischen Elbestroms beschrieben werden:

- Strombreite: extreme (variable) Strombreiten, große Flachwasserbereiche
- Mäanderform und -stabilität: Form und Lage der Mäander haben sich in den etwa 200 Jahren kaum verändert. (vgl. auch ROMMEL 2000). Die Ursache hierfür ist zumindest teilweise in der auch gegen Ende des 18.ten Jahrhunderts schon vorhandenen Festlegung der Ufer durch Dämme, Treidelpfade u.ä. zu suchen, ergänzt durch den Einfluss stabilisierender Vegetation sowie das Nichteintreten extremer (im morphologischen Sinne: Ufererosion und Laufverlagerung erzeugender) Hochwasser. Der Oberheinverlauf nördlich von Karlsruhe änderte sich dagegen im Laufe einiger Jahrhunderte vergleichsweise deutlich (MUSALL 1986).
- Inseln und Bänke: Erst der Verkehrswasserbau der letzten 150 Jahre mit seiner Niedrigwasserbündelung durch den Buhnenbau (vor allem um 1850) verursachte das Verschwinden der elbetypischen Inseln und Stromteilungen. Die heute in den Buhnenfeldern auftretenden Inseln und Bänke sind i.a. bezüglich ihrer Größe und ökologischen Bedeutung nicht mit den ehemals vorhandenen Strukturen gleichzusetzen!
- Stromspaltungen: Stromteilungen durch Mittelsänder und weidenbestandene Sandbänke waren vormals typische Elemente im Elbestrom. Im betrachteten Abschnitt erfolgten nach ROHDE (1971) in der Mitte des letzten Jahrhunderts im Rahmen umfassender Strombaumaßnahmen auch die Beseitigungen von Stromspaltungen.
- Buhnen: Die auf den Karten bereits sichtbaren Buhnen dienten nach ROHDE (1971) hauptsächlich der örtlichen Ufersicherung. Umfangreiche Buhnenbauten wurden auf der betrachteten Strecke erst nach 1842 durchgeführt.
- Überschwemmungsgebiete: Nach IKSE (1994) betragen noch 1898 die größten Breiten der natürlichen Überschwemmungsgebiete zwischen Alandmündung und Löcknitzmündung 20,5 km, zwischen Löcknitzmündung und Jeetzelmündung 21,0 km und zwischen Jeetzelmündung und Sudemündung 14,1 km.

- Die Deichbauten vor dem großräumigen Deichbaukonzept Preußens schränkten die Auendynamik des Elbestromes nur regional ein. Durch die umfassenden Deichbauten wurde die Seitenerosion bei Hochwasser eingeschränkt, jedoch verblieb innerhalb der Deiche eine relative Eigendynamik (IKSE 1994).
- Durchstiche: Im Rahmen der einzelnen Elbeausbaustufen wurden zahlreiche Durchstiche angelegt, die die Fließstrecke zum Teil erheblich verkürzen. Im betrachteten Elbeabschnitt erfolgte seit 1870 kein Durchstich, die Windungen blieben im wesentlichen erhalten.
- Erosions-/Sedimentationstendenz: IKSE (1994): Das Problem der verstärkten Erosion wurde großteils erst im 20. Jahrhundert geschaffen. Der Bau von Talsperren, Rückhaltebecken und Staustufen an Elbe und Nebenflüssen führte zu Geschiebedefiziten, die in Verbindung mit der durch die Buhnen geschaffenen Niedrigwasserbündelung zur verstärkten Tiefenerosion führte.
- Häufig waren rechtwinklige Übergänge des Stromstrichs zum anderen Ufer und Engstellen mit Kolken und Abbrüchen vorhanden.
- Seitengewässer: angebundene, vielfältig strukturierte Seitengewässer waren vorhanden.

## Literatur

- BFG (1994): Historische Entwicklung der aquatischen Lebensgemeinschaft (Zoobenthos und Fischfauna) im deutschen Abschnitt der Elbe. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BFG), im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, BFG-Bericht 0832, Koblenz, 173 S.
- IKSE [INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DER ELBE] (1994): Ökologische Studie zum Schutz und zur Gestaltung der Gewässerstrukturen und der Uferandregionen der Elbe. IKSE Magdeburg.
- METSCHIES, W. (1939): Der Ausbau der Elbe zum schiffbaren Strom. - Die Bautechnik 17, S. 577-582.
- MUSALL, H. (1986): Landkarten aus vier Jahrhunderten. Karlsruher geowissenschaftliche Schriften, Reihe A, 264 S.
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESVERWALTUNGSSAMT (Hrsg.) (1961): Kurhannoversche Landesaufnahme des 18. Jahrh. (Nachdruck): Blatt 75 Hitzacker, Blatt 81 Gartow.
- ROHDE, H. (1971): Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schifffahrtsstraße. - Mitt. d. Franzius-Inst. f. Grund- u. Wasserbau d. Techn. Univ. Hannover; H. 36.
- ROMMEL, J., (2000): Studie zur Laufentwicklung der deutschen Elbe bis Geesthacht seit ca. 1600. Bericht im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BFG), Koblenz.

## II-2.2 Quantifizierung von Gewässerbett- und Strömungsparametern der Elbe vor 1800 im Hinblick auf die Beschreibung naturnaher hydraulisch-morphologischer Zustände

*B. Büchele, K. Träbing, F. Nestmann*

### II-2.2.1 Einführung

Zur ökologischen und ökonomischen Bewertung von Maßnahmen an Fließgewässern ist die Kenntnis der natürlichen morphologischen Verhältnisse bzw. ihrer Beeinflussung durch die Eingriffe des Menschen erforderlich. Viele Untersuchungen der letzten Jahre beschäftigten sich diesbezüglich mit Fließgewässern kleinerer und mittlerer Größe. Im Hinblick auf die Definition naturnaher Gewässerzustände, sowohl der Abiotik (Hydrologie, Morphologie, etc.) als auch darauf aufbauend der Biologie, konnten hierbei viele wertvolle Erkenntnisse hinzugewonnen werden. Als namhaftes Beispiel sei hier genannt: DVWK (1996).

Für große Fließgewässer und schiffbare Ströme mit einer Breite > 80 - 100 m liegen in Mitteleuropa nur wenige quantitative Informationen über (potentiell) natürliche Zustände des Gewässerbetts (Geometrie) und der Strömung vor. Historische Unterlagen aus Archiven wie Karten des 17. und 18. Jahrhunderts dokumentieren eine Vielzahl von Informationen zu Gewässern vor deren systematischer Regulierung (an Rhein und Elbe beginnend ab etwa 1820) und repräsentieren bezogen auf die Morphologie des Bettes Zustände, die nicht oder nur unerheblich anthropogen beeinflusst (unreguliert) waren.

Soweit historische Daten vorliegen, besteht durch eine quantifizierende Auswertung die Chance, die wesentlichen Veränderungen wichtiger Parameter bis zum heutigen Zustand zu erfassen. Stellt sich auch die Frage nach den potentiellen Entwicklungsmöglichkeiten des Gewässers in der Zukunft, bis hin zur (hypothetischen) Beschreibung eines natürlichen Zustands nach einer langfristig vollständig eigen-dynamischen Entwicklung ohne weitere Einflussnahme des Menschen (Leitbildzustand als Maßstab der Bewertung), so können die historischen Daten hierfür als plausibles, weil real dokumentiertes Szenario genutzt werden. Als qualitativ und quantitativ konkrete und gewässerbezogen oft einmalige Daten liefern sie wertvolle Hinweise über mögliche natürliche Änderungen des heutigen Gewässerzustands (Entwicklungspotentiale) und können bei Fehlen besserer Informationen prinzipiell als solche interpretiert werden, wobei eine Reversibilität der historischen Entwicklung im Detail fraglich ist.

### II-2.2.2 Vorgehensweise

Die hier beschriebenen Untersuchungen bauen im Kern auf einer historischen Karte von 1724 (vgl. Abb. II-2.3) auf, die in hervorragender Auflösung und Qualität die morphologischen Strukturen der Unteren Mittelbe auf ca. 34 km Länge zeigt und als Besonderheit zahlreiche eingezeichnete Wassertiefen beinhaltet. Die Auswertung der Karte ermöglicht damit, neben der Erfassung der damaligen Breitenvarianz (und weiteren hier nicht behandelten Strukturparametern wie Bänken), auch die Analyse der Tiefenverhältnisse im Strom, d.h. der Gerinnegeometrie. Der Vergleich des historischen Zustands mit aktuellen Daten der Gerinnehydraulik führt zur näherungsweise Rekonstruktion von Kenngrößen der historischen Strömungsverhältnisse wie Fließwiderstand, mittlere Fließgeschwindigkeit etc. Die angewandte *Methodik* basiert auf Untersuchungen von TRÄBING (1995) an kleinen Fließgewässern und ist *übertragbar* auf andere Gewässer. Zur regionalen Übertragung und Verallgemeinerung der gewonnenen Erkenntnisse auf Strecken ohne vorhandene Informationen über naturnahe Zustände (wie historische Wassertiefen und Querprofile) kann vereinfacht auf großräumig rekonstruierte historische Gewässerbreiten zurückgegriffen werden. Die Ergebnisse bilden eine (bisher nicht vorhandene) Grundlage um künftig, ggf. ergänzt mit Berechnungsansätzen zur Abschätzung der natürlichen Bettform, zur (quantitativen) Beschreibung spezifischer Leitbilder für einzelne Naturräume (hier: Tieflandstrom) bzw. der potentiellen Ausprägung wichtiger abiotischer Parameter im Fluss(öko-)system zu kommen.

### II-2.2.3 Datengrundlagen

Die historische Datenlage ist sehr heterogen. In den Landes- und Staatsarchiven existieren Kartenwerke der Elbe ab etwa 1600, von denen ROMMEL (2000, nach einem Kartenverzeichnis von STAMS & STAMS 1993) zur Laufrekonstruktion vor 1900 eine Anzahl von 214 im Maßstab bis 1:100.000 in einer Datenbank näher erfasste. Die kartographische Qualität variiert i.A. stark mit den jeweiligen Hintergründen, d.h. mit der verfügbaren instrumentellen Technik,

Zweck und Umständen der Entstehung und nicht zuletzt mit dem Anspruch der Kartenzeichner. Das bedeutet, dass zwar umfangreiche Materialien zur Verfügung stehen, nicht immer aber die fachlichen Ansprüche aus heutiger Sicht erfüllt werden können.

Die wesentliche Grundlage der vorliegenden Arbeit bilden folgende Daten zu den historischen bzw. den gegenwärtigen Verhältnissen:

**(i) „General Carte von dem Elbe-Strohm“ (1724)**

Quelle: Niedersächs. Hauptstaatsarchiv Hannover

- Entstehungsjahr: 1724
- kartierter Flussabschnitt: ~ Elbe-km 471-505
- Maßstab (eigene Ermittlung): ~ 1:6250
- Originalabmessungen der Karte: 444 x 133 cm

**(ii) Ist-Zustand: Querprofile und Hydraulik**

Quelle: Datensätze der 1990er Jahre, vgl. Kap. III-2

- Querprofile und hydraulische Berechnungen im zugehörigen Elbeabschnitt

**(iii) Rekonstruierte Elbeläufe vor 1900**

Quelle: ROMMEL (2000) mit Kartenanhang (digital) der Elbeläufe auf deutscher Strecke bis Geesthacht

- Laufzustände: um 1730/1780/1830/1890
- Arbeitsmaßstab: 1:100.000

Die Daten (i) und (ii) prägen den Hauptbestandteil der Analyse und repräsentieren dabei die im Detail beste verfügbare (lokale) Information. Die Kombination der Analyseergebnisse mit (iii) steht für den Ansatz ihrer vereinfachten Übertragung auf größere Strecken bzw. andere Gewässerabschnitte.

## II-2.2.4 Randbedingungen der Auswertung

### Gewässermorphologie

Wie Abb. II-2.3 veranschaulicht, stellt die „General Carte von dem Elbe-Strohm“ von 1724 (s.o.) nicht nur morphologisch eine wertvolle Dokumentation der historischen Situation dar. Neben Informationen zur Morphologie des Strombetts wie Breitenvarianz und Inseln, sowie zu bestehenden Deichstrukturen und Landnutzungsformen in Vorland und Auen usw. sind an vielen Stellen auch Hauptströmungsverläufe und Wassertiefen in der Karte eingetragen, wobei letztere in preußischen Fuß gemessen wurden.

Die Wassertiefen wurden u.a. in 17 Querschnitten erfasst, deren Lage in Abb. II-2.4 ersichtlich ist. Drei dieser Schnitte nahe Lenzen liegen im Bereich einer baulichen Verengung und gezielten Abtrennung von Nebengerinnen, so dass diese als „eindeutig anthropogen beeinflusst“ gesondert behandelt wurden. Über die Querschnitte hinaus sind auch Tiefen in der Hauptströmung bzw. an Einzelstellen eingetragen; sie sind jedoch teilweise nicht aussagekräftig genug, da ihre nähere Umgebung morphologisch unerfasst blieb (z.B. Talweg).

### Geometrie

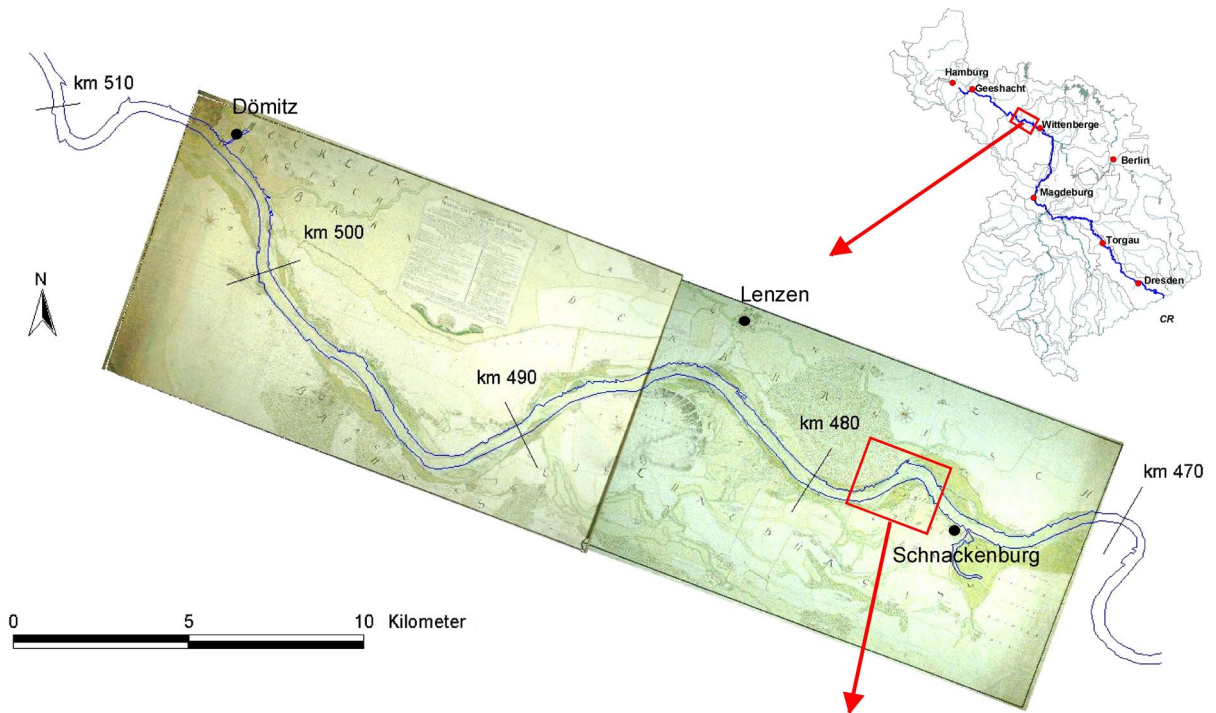
Die Umrechnung der alten Maßeinheiten (Längen, Höhen/Tiefen) erfolgte nach den analogen Angaben von KAHNT & KNORR (1987), KLIMPERT (1898) und VERDENHALVEN (1968) für Preußen vor ca. 1800:

- 1 ‚gemeine‘ deutsche Meile: 7420 m (7500 m)
- Preußen: 1 Meile = 2000 Ruten = 24000 Fuß
- 1 rheinländische Rute: 3,766 m
- 1 Fuß: 0,31385 m (Preußen, rheinl. Fuß)

Die geometrische Qualität der Karte konnte mittels Integration von fotografierten Kartenausschnitten in ein Geoinformationssystem (GIS), deren Entzerrung und lagemäßiger Ausrichtung anhand markanter Referenzpunkte in Elbnähe (wie historische Kirchen, Ortskern, Festung, Deichknicke, etc.) und digitaler Überlagerung mit heutigen topographischen Karten im Maßstab 1:50.000 überprüft und in erstaunlicher Güte nachgewiesen werden (Abb. II-2.4). Es wird deutlich, dass die historische Karte die meisten der heutigen Grobstrukturen wie Deichverläufe, Altarme etc. nahezu deckungsgleich abbildet; lokale Abweichungen im Grundriss (seitliche Verschiebung von Strukturen, verzerrte Längenverhältnisse) sind nicht nur auf die historische Kartierungstechnik, sondern auch auf die Güte der verfügbaren historischen Passpunkte (12 bzw. 16) in der Georeferenzierung zurückzuführen: die größten Längenabweichungen liegen im Nahbereich der Elbe in der Größenordnung um 2 %; teilweise sind die Deichlinien auf beiden Seiten um 50-80 m parallel verschoben. Für die Analyse der Gewässermorphologie ist diese Verschiebung in der Lage praktisch unbedeutend.

Auf diese Weise konnte auch der Maßstab der Karte digital näher bestimmt (~1:6250) und die in der weiteren Analyse gefragten Entfernungen (vor allem Gewässerbreiten) verlässlich erfasst werden.





**Abb. II-2.3** „General Carte von dem Elbe-Strohm“ 1724 (Kartenquelle: Niedersächs. Hauptstaatsarchiv Hannover), siehe auch *Anlagen-CD*  
 oben: Gesamtübersicht der Karte, zusammengesetzt aus zwei Teilansichten (entzerrte und georeferenzierte Fotos im GIS)  
 unten: Detailansicht mit Deichen, morphologischen Strukturen (Inseln, Bänke, Rinnen etc.), Wassertiefen (in preuß. Fuß), Ufersicherungen (vereinzelte Einbauten), Nutzungen („Feldt, Holtz“), Gemarkungen („Gräntze der Stadt Lentzen“), etc.

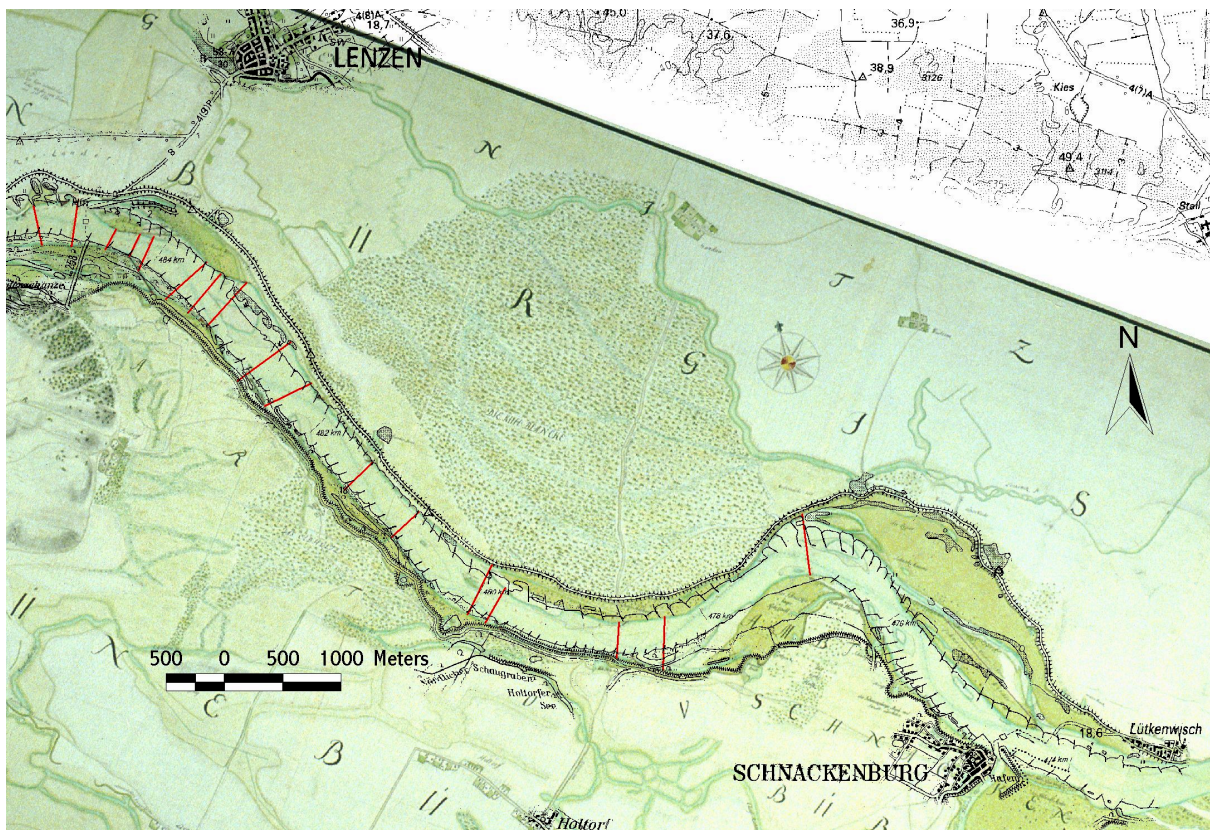


Abb. II-2.4 Kartenausschnitt 1724: Striche im Fluss kennzeichnen die Lage der 17 historischen Querprofile; im Nahbereich der Elbe überlagert mit Strukturen gemäß der Topographischen Karte 1:50000 (LGN Niedersachsen, Blatt L 2934 Lenz, Stand 1995).

### Klima und Hydrologie

Da die für hydraulische Betrachtungen notwendigen Angaben fehlen, welche Wasserführung der Elbe der Kartierung von 1724 zugrunde liegt, wurde versucht, Hinweise in der Literatur zu recherchieren.

Nach der Kartenlegende<sup>1</sup> ist zunächst davon auszugehen, dass die Kartierungsarbeiten in erster Linie im Sommer 1724 stattfanden und sich, bei einer Gesamtfläche von ca. 28 x 8 km, über Monate erstreckten. Das bedeutet, dass die Elbe mit einer mehr oder weniger variablen Wasserführung einer längeren Phase abgebildet ist. Da auch Wassertiefenprofile aufgenommen wurden, liegt zudem nahe, dass über weite Strecken eine sichere Begehung der Ufer und Inseln, eine leichte Befahrung mit

Booten bzw. ein Durchwaten zu Fuße möglich war. Dies begründet die erste Annahme, dass die erfassten Uferlinien, Wassertiefen etc. etwa Niedrig- bis Mittelwasserbedingungen widerspiegeln (was auch die weiteren Analysen plausibel ergeben).

Die Annahme niederer bis mittlerer Abflüsse im Verlauf des Jahres 1724 lässt sich indirekt stützen, u.a. durch die Aussagen von GLASER (1991) zu den Klimaverhältnissen in Mitteleuropa seit 1500. Demzufolge lag das mittlere Temperaturniveau der Sommer des 18. Jahrhunderts über dem langfristigen Durchschnitt der Phase 1500-1800. Die Sommer der Jahre 1718, 1719 sowie 1726 bis 1728 (u.a.) werden als ausgesprochen heiß erwähnt, wobei sich einige dieser Jahre zudem durch ihre Trockenheit auszeichneten. Dagegen waren ausgesprochen nasse Sommer wie 1720 und 1725 ebenso selten wie kalte Sommer. Langfristig beschreibt GLASER die Klimaentwicklung zwischen 570 bis 1870 als (variable) Phase, die mit der Phase der „Kleinen Eiszeit“ gleichgesetzt werden kann, und im Vergleich zum 20. Jahrhundert durch höhere Niederschläge und kühlere Temperaturen im Winter bzw. im Frühjahr sowie durch überdurchschnittliche Sommertemperaturen geprägt war. GLASER deutet dies insgesamt als Indiz für eine

<sup>1</sup> Kartenunterschrift im Original: „Diese Carte ist mit dem Königlichen Preussischen Major Feris gemeinsahm aufgenommen, eingetragen von mir ins reine gebracht und ausgearbeitet. (gez.) Georg Christian von Wallmaden. Das gegenwärtige mit dem Königlichen Gros-Britannischen Major von Wallmaden gemeinsahm aufgenommene und aufgetragene Carte, von Ihm ins reine gebracht, nachher mit der diesjährigen gemeinsahm aufgenommenen Carte revidiret, und in allem gleichförmig befunden, solches bescheiniget diese meine Unterschrift. Schnackenburg, den 30. November 1724. (gez.) Frid. Arn. Feris.“

*kontinentalere Prägung des Klimas*, was folglich auch überregional, d.h. hier für die Elbe, gilt. Dass zum Jahr 1724 keine Angaben gemacht werden, kann dahingehend interpretiert werden, dass die Witterung 1724 im Quellenmaterial GLASERS nicht als auffällig nass oder trocken beschrieben wurde. Nach einer Darstellung in KNIGHTON (1984, S. 170, nach ZAGWIJN 1975 und LAMB 1977) entsprach das vorangegangene 17. Jahrhundert der kältesten Phase der Kleinen Eiszeit in Nordwest-Europa (Differenz zum 20. Jahrhundert: im Mittel ca.  $-1^{\circ}\text{C}$ ), mit denkbaren längerfristigen Einflüssen auf die Bettbildung.

Nach LAMB (1995) kann der *Winter 1723/24*, sowie weitere acht Winter der 1730-er Jahre, mit den *mildesten Wintern des (wärmeren) 20. Jahrhunderts* verglichen werden, nach Daten aus London. Da an der Elbe, neben großräumig ausgiebigen Überregungen, vor allem *Schneeschnmelze im Frühjahr* zu erhöhten Abflussereignissen führt, kann davon ausgegangen werden, dass das Abflussregime im Jahr 1724, nach (kontinental, s.o.) sehr mildem Winter, wenig von Schneeschmelzprozessen geprägt war.

Bekannte Chroniken historischer Hochwasser der Elbe und ihrer Nebenflüsse erwähnen das Jahr 1724 nicht (nach Zusammenstellungen von FÜGNER (1995) und SCHMIDT (2000)). Nach PÖRTGE & DEUTSCH (1999) war die Phase ca. 1710-1730 an den Nebenflüssen Gera, Werra und Pegnitz durch geringe Hochwasserhäufigkeit geprägt.

Auf weitere Nachforschungen zur Einschätzung der Wasserführung der Karte wurde verzichtet, auch wenn diese z.B. aus Sicht der Umweltgeschichte interessant wären. Für die wasserbauliche Analyse sind die gefundenen Angaben qualitativ wertvoll und absichernd; quantitativ ist aus weiteren Recherchen, angesichts der historischen Kenntnislücken und Unschärfen, keine oder nur eine unwesentliche Verbesserung der gesuchten Ergebnisse zu erwarten.

Vor diesem Hintergrund wird die *Wasserführung im Bereich Niedrigwasser bis Mittelwasser* eingeordnet. Die zugehörigen gewässerkundlichen Hauptwerte im Zeitraum 1936-1995 sind:  $\text{MNQ} = 290 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $\text{MQ} = 701 \text{ m}^3/\text{s}$  (HELMS & IHRINGER in BÜCHELE & NESTMANN 2000). Hydraulische Parameter liegen für die Zustände  $Q = 288 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $706 \text{ m}^3/\text{s}$  vor (Kap. III-2), die hier vereinfachend als ‚ $\text{MNQ}$ ‘ und ‚ $\text{MQ}$ ‘ bezeichnet werden. Die Abflüsse in diesem Bereich herrschen über nahezu 2/3 Drittel des Jahres (19-234 d/a Unterschreitungsdauer) vor.

## II-2.2.5 Erfassung und Analyse der historischen Breiten- und Tiefenverhältnisse

### Querprofilgeometrie

Die 17 Wassertiefen-Querprofile der Karte wurden erfasst, alte Maßangaben umgerechnet und dann bezüglich ihrer Breiten, Querschnittsflächen etc. ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Tab. II-2.2 zusammengestellt. Wie angedeutet wurden drei der Profile (Nr. 13-15) im Bereich einer Verengung bei Lenzen als „deutlich anthropogen verändert“ bewertet und gesondert behandelt.

**Tab. II-2.2** Parameter der Querprofile von 1724: B = Breite des Querprofils, A = Querschnittsfläche des Profils,  $h_m$  = mittl. Fließtiefe,  $B/h_m$  = Breiten/Tiefen-Verhältnis.

Profil-Nr.	Elbe-km	B [m]	A [m <sup>2</sup> ]	$h_m = A/B$ [m]	$B/h_m$ [-]	$\ln(B/h_m)$ [-]
1	476,9	526	955	1,82	290	5,7
2	478,3	459	628	1,37	335	5,8
3	478,7	312	650	2,08	150	5,0
4	479,8	348	467	1,34	259	5,6
5	480,0	472	478	1,01	466	6,1
6	480,8	321	622	1,94	166	5,1
7	481,4	338	992	2,94	115	4,7
8	482,3	446	833	1,87	239	5,5
9	482,7	562	620	1,10	509	6,2
10	483,2	489	515	1,05	464	6,1
11	483,4	435	777	1,79	244	5,5
12	483,6	471	519	1,10	428	6,1
13 <sup>*)</sup>	484,0	313	562	1,79	174	5,2
14 <sup>*)</sup>	484,2	210	674	3,21	65	4,2
15 <sup>*)</sup>	484,4	196	552	2,82	70	4,2
16	484,7	398	992	2,49	160	5,1
17	485,0	338	998	2,95	114	4,7
Auswertung 14 Profile ohne *): Nr. 13-15 wegen künstlicher Verengung						
Mittelwert (aus $A_m, B_m$ )		423	718	1,78 (1,70)	281 (249)	5,55 (5,51)
Standardabw.		81	203	0,66	138	0,52

Beispielhaft sind in Abb. II-2.5 einige Querprofile für den historischen Zustand (1724) und den Ist-Zustand (Peilung 1995, hydraulisch aufbereitet mit Buhnengeometrien) dargestellt. Im Vergleich zeigt sich eine deutlich unterschiedliche Variabilität der Querschnittsform sowie die durch Regulierung erreichte Konzentration der Querschnittsfläche.

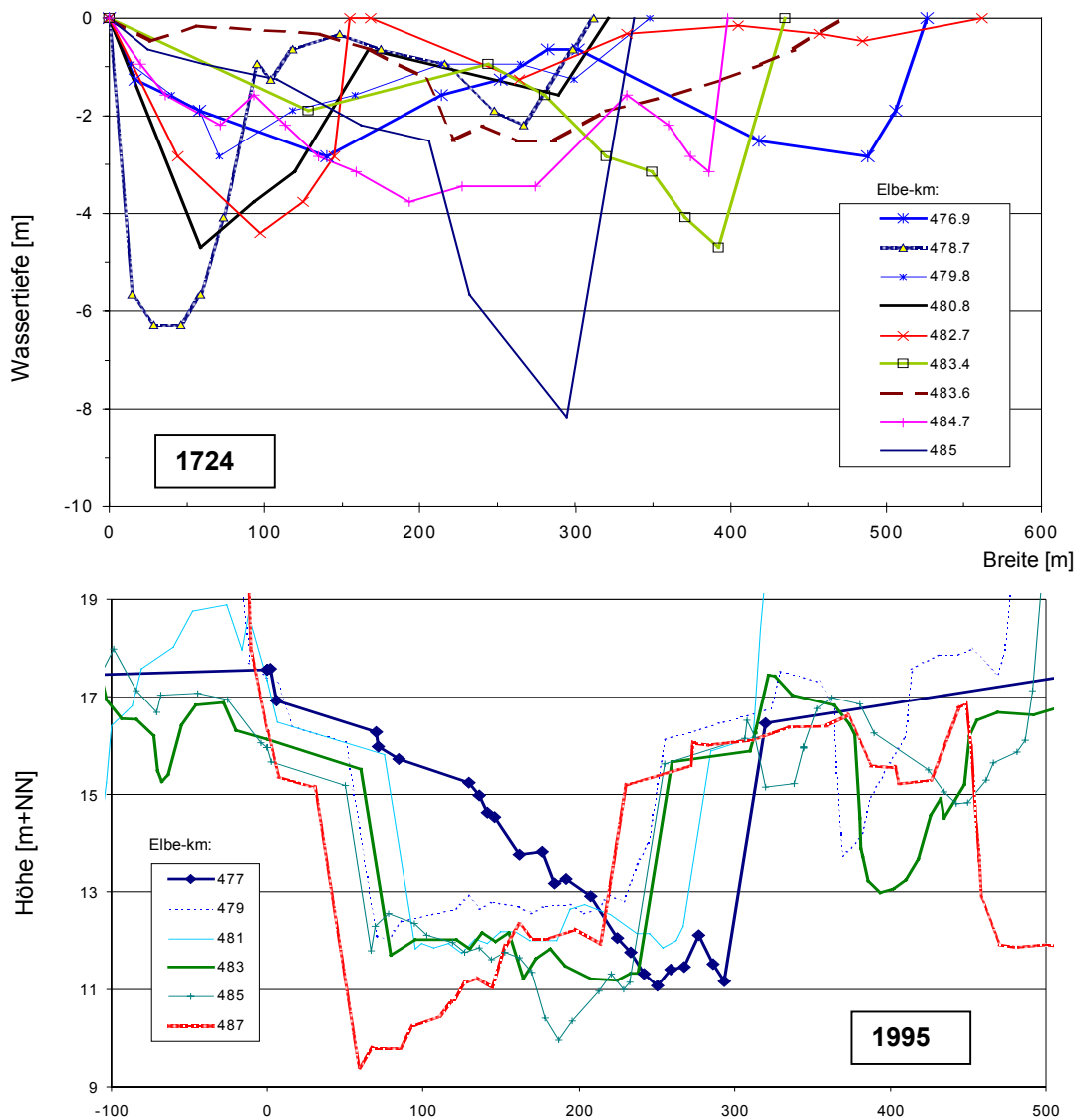


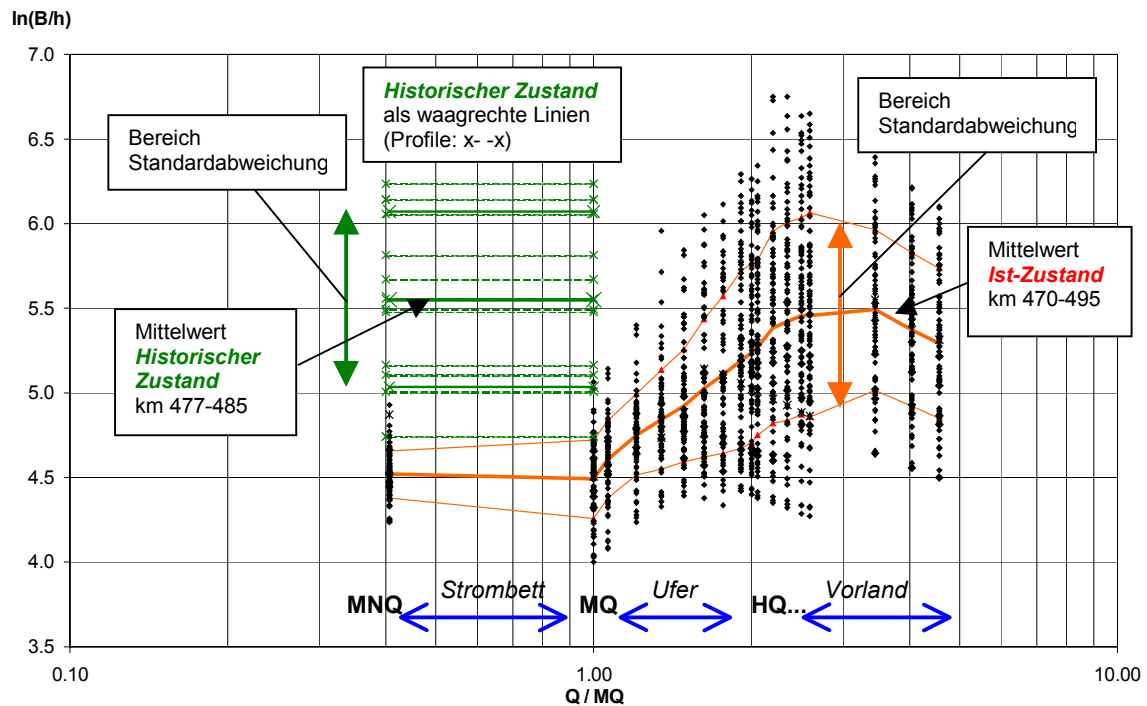
Abb. II-2.5 Ausgewählte historische Wassertiefenprofile (oben, siehe auch *Anlagen-CD*) und aktuelle Querprofilpeilungen (unten; Quelle: WSA Magdeburg, 1995; hydraulisch aufbereitet mit Buhnengeometrien, vgl. OTTE-WITTE ET AL. in Kap. III-2 in diesem Band).

Aus den Querprofildaten lässt sich das Breiten/Tiefen-Verhältnis  $B/h$  ermitteln, wobei die mittlere Tiefe  $h_m$  als der Quotient von Querschnittsfläche  $A$  zur Breite  $B$  definiert ist (vgl. Tab. II-2.2). Wertet man die aktuellen Querprofile für eine Vielzahl von Wasserständen bzw. Abflüssen zwischen Niedrig- und Hochwasser aus, so ergeben sich pro Abfluss und Querprofil ein individuelles  $B/h$ .

In Abb. II-2.6 sind die für den historischen und den aktuellen Zustand ermittelten  $B/h$ -Werte eingetragen, wobei Einzelwerte als Punkte dargestellt sind. Die Charakteristika können wie folgt interpretiert werden. Ordnet man die historischen  $B/h$ -Werte (s. Tab. II-2.2) im Bereich zwischen MNQ und MQ ein, so ergibt sich, dass diese deutlich über dem Ist-Zustand liegen. Der tatsächliche historische Abflusswert ist hierbei relativ unerheblich, da der Mittelwert von  $B/h$  in diesem Abflussbereich i.A. nur gering

variiert. Interessant erscheint hier einerseits, dass die kleinsten  $(B/h)_{\text{hist}}$  in etwa den größten  $(B/h)_{\text{aktuell}}$  entsprechen, was bedeutet, dass die kompaktesten historischen Querschnitte bezüglich ihrer Form den heute ausgebauten Querschnitten nahe kommen. Andererseits ist die Variabilität bzw. die Standardabweichung von  $(B/h)_{\text{hist}}$  etwa mit heutigen Bedingungen bei bordvollem Abfluss und Überflutung vergleichbar ( $> \text{ca. } 2 \text{ MQ}$ ), d.h. mit einem Bereich, in dem der Einfluss der Regulierung für Niedrig- bzw. Mittelwasserstände entsprechend geringer ist.

Auf Grundlage dieser Daten und Überlegungen ist mit hoher Wahrscheinlichkeit anzunehmen, dass die Breiten/Tiefen-Verhältnisse des ursprünglichen (nicht regulierten) Strombetts über das gesamte Abflussspektrum von solcher Variabilität geprägt waren.



**Abb. II-2.6** Breiten/Tiefen-Verhältnis für den historischen Zustand und den Ist-Zustand im Vergleich (einschließlich Punkte der Stichproben). Anm.: Zur besseren Visualisierung der Charakteristika ist die Grafik logarithmiert; zur Vergleichbarkeit mit anderen Strecken erfolgt die Auftragung des Abflusses  $Q$  normiert über  $MQ$ , z.B.  $MNQ/MQ = 0,4$  (zum Vergleich: Kap. II-3 und Kap. III-2).

### Breitenverhältnisse

In nächsten Schritt der Auswertung wurden aus den oben genannten Datenquellen (siehe Kap. II-2.2.3) die Breiten der Elbe, bezogen auf die Wasserspiegeloberfläche, erfasst:

- (1) Strombreiten 1724, Quelle: (i)
- (2) Querprofilbreiten 1724, Quelle: (i)
- (3) Strombreiten 1730/1780/1830/1890, Quelle: (iii)
- (4) Wasserspiegelbreiten für ‚MNQ‘, Quelle: (ii)
- (5) Wasserspiegelbreiten für ‚MQ‘, Quelle: (ii)

Die erfassten Breiten sind in Abb. II-2.7 dargestellt. In der Abbildung zu erkennen sind die Verteilungen der relativen Häufigkeiten für die historischen und heutigen Zustände im Vergleich, woraus Aussagen zu folgenden Punkten abgeleitet werden können.

- Natürliche Variabilität der Breiten in Abhängigkeit des betrachteten Bett- und Abflusszustands
- Statistische Charakterisierung der Strombreiten und ihrer Veränderung (früher-heute)
- Repräsentativität der historischen Querprofile (kleiner Stichprobenumfang) und der großmaßstäblich rekonstruierten Elbeläufe (M 1:10000) im Vergleich zur Detailerfassung (Karte 1724)
- Breiten(anteile) der heutigen Uferzonen

Ergänzend hierzu sind in Tab. II-2.3 einige Zahlenangaben zusammengestellt. Vergleicht man z.B. die

statischen Kenngrößen der Datenkollektive (1) und (5), so ergibt sich eine Abnahme der mittleren Breite um etwa 100 m bzw. um ein Viertel (-24 %), und bezüglich der Variabilität der Breiten, wiederum ausgedrückt durch die Standardabweichung, deren Halbierung (-54 %) (vgl. Tab. II-2.3). Zu beachten ist die Relativität dieser Aussagen in Bezug auf die verglichenen Zustände; dennoch beschreibt dieses Beispiel die Größenordnung der Breitenänderungen vom früheren zum heutigen Gerinne.

Dieser Abnahme der Breiten heute gegenüber früher steht eine erhebliche Variabilität der Breiten (noch heute) mit schwankender Wasserführung gegenüber. Dies lässt sich u.a. an der Differenz der Breite zwischen den Uferlinien, d.h. der Wasserwechselzone von ‚MNQ‘ bis ‚MQ‘, ablesen: sie beträgt im angeführten Beispiel im Mittel ca. 70 m (vgl. Tab. II-2.3: 326 m – 257 m). Gleichzeitig kann für den Ist-Zustand ein deutlich homogeneres Bild mit geradlinigeren Verteilungen konstatiert werden.

Die drei Datenkollektive (1)-(3) des Zustands von 1724/1730 zeigen in Abb. II-2.7 ähnliche Verteilungen. Dies bedeutet für die Analysen einerseits, dass die (relativ wenigen) Querprofile das Gesamtbild der Strecke über ca. 35 km, detailliert gegeben durch (2), im Mittel sehr gut repräsentieren, und andererseits, dass die (relativ grobe) Ablesung der historischen Breiten im Maßstab 1:100000 gut für

eine Betrachtung über längere Strecken geeignet ist (vgl. Tab. II-2.3: Abweichungen von  $B_{Mittel} < 2\%$ ).

Die Zustände 1780/1830/1890 in Abb. II-2.7 zeigen Strombreiten, die zwischen den zuvor beschriebenen Verhältnissen (1724/1995) liegen. Auch hier ist die Frage nach der Wasserführung zu stellen, die jeder Kartierung zugrunde liegt. So ist z.B. für den Zustand 1780 Niedrigwasser klar zu vermuten,

wobei eine ähnliche Wasserspiegelbreitenverteilung auftrat wie heute bei Mittelwasserverhältnissen. Interessant erscheint nicht zuletzt auch der Vergleich des Zustands 1890 (nach Abschluss der Mittelwasserregulierung) mit dem Ist-Zustand, der an dieser Stelle jedoch zu weit führen würde, da umfassendere Datengrundlagen einbezogen sind (vgl. ELBSTROMWERK 1898 und FAULHABER 2000).

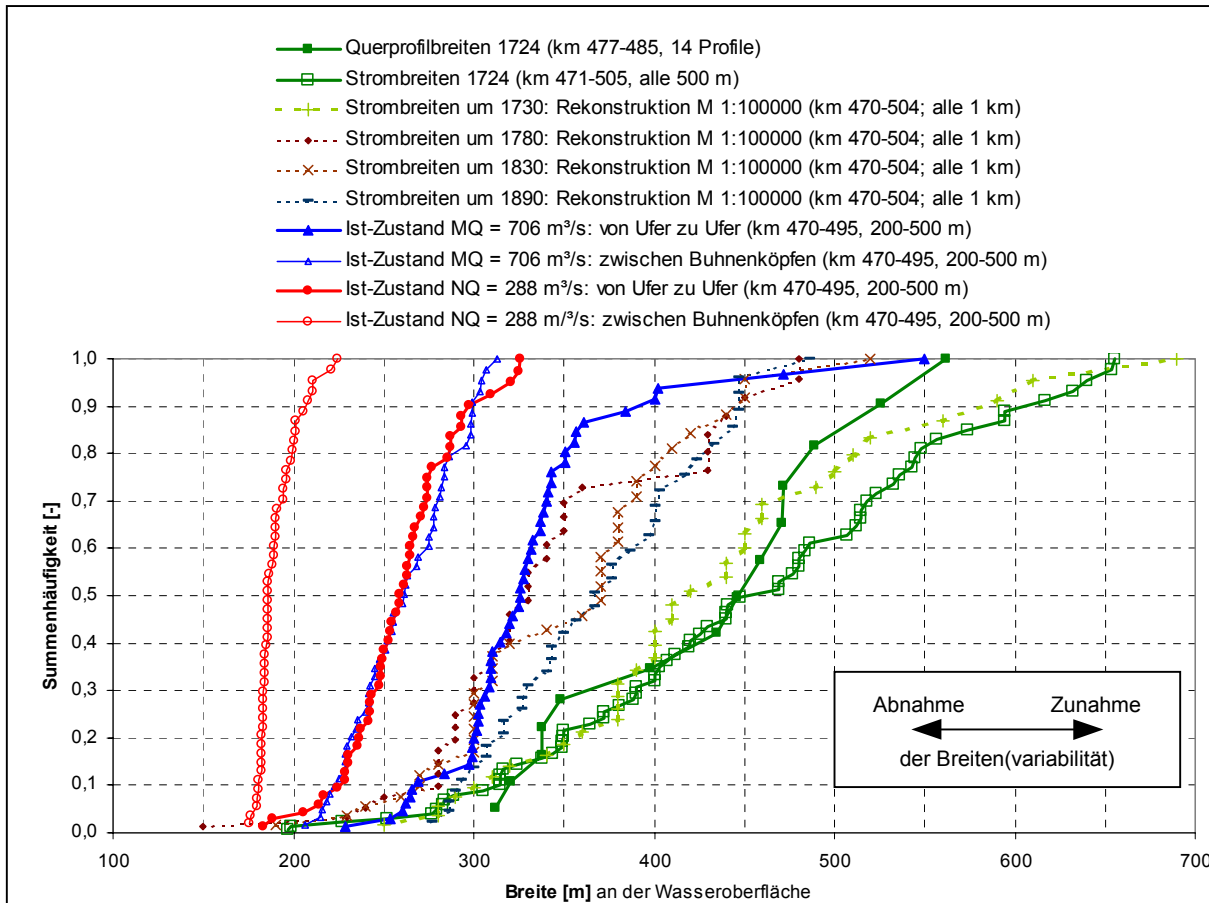


Abb. II-2.7 Relative Summenhäufigkeitsverteilungen der erfassten Strombreiten

Tab. II-2.3 Statistische Kenngrößen der erfassten Breiten und Vergleich mit der Karte von 1724

Breite B [m] (an der Wasseroberfläche)	Ist-Zustand Hydraulisch-numerisches Modell km 470-495				Historische Karte 1724 km 470-504		Rekonstruktion 1730 [ROMMEL 2000] km 470-504	
	MNQ (288m³/s)		MQ (706 m³/s)		14 Querprofile	alle 500 m	alle 1 km	
	zwischen den Bühnen	zwischen den Ufern	zwischen den Bühnen	zwischen den Ufern				
Mittelwert (B)	190	257	259	326	423	427	417	
Standardabw. (B)	11	31	29	52	81	114	100	
Differenz [m], ([%]) gg. Mittelwert(1724)	-237 (-55%)	-170 (-40%)	-168 (-39%)	-101 (-24%)	-4 (-1%)	0 (-)	-10 (-2%)	
Differenz [m], ([%]) gg. St.abw.(1724)	103 (-90%)	-83 (-73%)	-85 (-75%)	-62 (-54%)	-33 (-29%)	0 (-)	-14 (-12%)	

**II-2.2.6 Hydraulische Analyse**

**Methodik**

Da Messdaten bzw. Zustandsgrößen wie Abfluss, Wasserstände, Geschwindigkeiten etc. historisch fehlen, ist eine Charakterisierung der ehemaligen Strömungsverhältnisse nicht über übliche Ansätze zu erreichen. Eine sinnvolle Abhilfe besteht, wie unten gezeigt wird, im analytischen Vergleich der historischen und aktuellen Parameter, mit dem Ziel, unbekannte (hydraulische) Randbedingungen mathematisch so weit wie möglich zu eliminieren.

Grundlage hierfür sind das Fließgesetz nach *Darcy-Weisbach*

$$v_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{8gr_{hy}I} \tag{Gl. 1}$$

- mit:  $v_m$  [m/s] mittlere Fließgeschwindigkeit
- $\lambda$  [-] Widerstandsbeiwert
- $g$  [m<sup>2</sup>/s] Erdbeschleunigung
- $r_{hy}$  [m] =  $A/l_U$ : hydraulischer Radius
- $l_U$  [m] benetzter Umfang
- $I$  [-] Gefälle

und die Kontinuitätsbedingung ( $Q = v_m A$ ), wobei dem dimensionslosen Widerstandsbeiwert  $\lambda$  das Gesetz von *Colebrook / White*

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \lg \left( \frac{k_S / r_{hy}}{14,84} \right) \right) \tag{Gl. 2}$$

- mit:  $k_S$  [m] äquivalente Rauheit

zugrunde gelegt wird (vgl.: DVWK 1991).

Im vorliegenden Fall können der Ansatz  $l_U = B$  für sehr breite Fließgewässer ( $B \gg h$ ) sowie der Ansatz  $I_{hist} = I_{aktuell}$ , demzufolge das heutige mittlere Gefälle gegenüber früher nicht verändert bzw. die Strecke nicht verkürzt ist, auf Gl. 1 angewendet werden. Der Gefällevergleich führt bei gleichem Abfluss zu der Beziehung für den historischen Widerstandsbeiwert:

$$\lambda_{hist} = \lambda_{akt} \frac{A_{hist}^3 B_{akt}}{A_{akt}^3 B_{hist}} \tag{Gl. 3}$$

Wie aus Gl. 3 ersichtlich wird, kann  $\lambda_{hist}$  somit durch einfachen Vergleich der historischen und aktuellen Parameter A und B sowie  $\lambda_{akt}$  ermittelt werden; das Ergebnis ist abhängig vom betrachteten aktuellen (Vergleichs-)Zustand der Strömung.

**Vergleichsgrößen im Ist-Zustand**

Für den Vergleich nach Gl. 3 wurden historisch, wie erläutert, Strömungsverhältnisse im Bereich Niedrig- bis Mittelwasser als plausibel erachtet. Die hydraulischen Größen im Ist-Zustand (berechnet für ‚MNQ‘ und ‚MQ‘), insbesondere die Gesamt-Fließwiderstandsbeiwerte  $\lambda_{ges}$  sind in Tab. II-2.4 aufgeführt. Hierzu wurden auch die unterschiedlichen Rauheitsinflüsse der Sohle und der Uferbereiche für nicht überströmte Buhnen ermittelt, basierend auf der von *Einstein und Horton* (in DVWK 1991) vorgeschlagenen Unterteilung des Fließquerschnitts, wobei gilt:

$$l_U \lambda_{ges} = \sum (l_{U,i} \lambda_i) \tag{Gl. 4}$$

Aus den Ergebnissen in Tab. II-2.4 ist ablesbar, dass das Gesamtwiderstandsverhalten der Strecke überwiegend durch die vorhandene Sohllrauheit bestimmt wird. Das lässt ferner darauf schließen, dass der Einfluss der nicht überströmten Buhnen *hier* vor allem in einer Querschnittseinschnürung, weniger in einer Rauheitswirkung besteht. Dies bestätigen auch die Untersuchungen von RITZERT (2001).

**Tab. II-2.4** Hydraulische Kenngrößen im Ist-Zustand, Strecke Elbe-km 470 bis 495, nach hydraulisch-numerischer Berechnung, vgl. OTTE-WITTE ET AL.: Kap. III-2.

Hydraulische Parameter			‚MNQ‘	‚MQ‘
<b>Q</b>	[m <sup>3</sup> /s]	Abfluss	288	706
<b>A</b>	[m <sup>2</sup> ]	Durchflussfläche, Mittelwert (Standardabweichung)	403 (39)	776 (45)
<b>B</b>	[m]	hydr. wirks. Breite, Mittelwert (Standardabweichung)	190 (11)	259 (29)
<b>v<sub>m</sub></b>	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit	0,71	0,91
<b>h<sub>m</sub></b>	[m]	mittlere Fließtiefe (= A/B)	2,12	3,00
<b>B/h<sub>m</sub></b>	[-]	Breiten/Tiefen-Verhältnis	90	87
<b>λ<sub>gesamt</sub></b>	[-]	Widerstandsbeiwert, gesamt	0,046	0,037
<i>Ermittlung von Wandungsrauheiten (Querschnittsaufteilung):</i>				
<i>Index 1: Einfluss der Sohle</i>				
<i>Index 2: Einfluss der Trennflächen bzw. Uferbereiche</i>				
<b>A<sub>1</sub></b>	[m <sup>2</sup> ]	Teilfläche von A	368	716
<b>A<sub>2</sub></b>	[m <sup>2</sup> ]	Teilfläche von A	35	60
<b>l<sub>U,1</sub></b>	[m]	benetzter Umfang von A <sub>1</sub>	186	253
<b>l<sub>U,2</sub></b>	[m]	benetzter Umfang von A <sub>2</sub>	4,2	6,0
<b>r<sub>hy,1</sub></b>	[m]	hydraulischer Radius = A <sub>1</sub> /l <sub>U,1</sub>	1,98	2,83
<b>r<sub>hy,2</sub></b>	[m]	hydraulischer Radius = A <sub>2</sub> /l <sub>U,2</sub>	8,3	10,0
<b>k<sub>S,1</sub></b>	[m]	äquivalente Einzelrauheit	0,11	0,09
<b>k<sub>S,2</sub></b>	[m]	äquivalente Einzelrauheit	8,0	5,5
<b>λ<sub>1</sub></b>	[-]	Teil-Widerstandsbeiwert	0,043	0,035
<b>λ<sub>2</sub></b>	[-]	Teil-Widerstandsbeiwert	0,180	0,124

Zur oben beschriebenen Ermittlung der Teilrauheits-einflüsse kann ergänzend angemerkt werden, dass eine alternative hydraulische Annahme, bei der die fiktiven Trennflächen vertikal über den Bühnenfüßen angesetzt werden und folglich von einer wirksamen Sohlbreite von ca. 166 m ( $= l_{U,1} = \text{const.}$ , entsprechend einer Sollstreichlinienbreite von 196 m und Bühnenkopfeigungen von 1:5) auszugehen ist, mit den dazugehörigen Teilflächen und -umfängen, praktisch zu gleichen Ergebnissen für  $\lambda_i$  und  $k_{S,i}$  führt (wie rechnerisch überprüft wurde).

**Vergleich des Fließwiderstandes**

Unter Verwendung von Gl. 3 sowie den Kenngrößen A, B und  $\lambda_{\text{ges}}$  ( $= \lambda_{\text{akt}}$ ) aus Tab. II-2.2 und Tab. II-2.4 lässt sich der Widerstandsbeiwert der historischen Gerinneströmung wie folgt eingrenzen:

Vergleich mit ‚MNQ‘:  $\lambda_{\text{hist}} = 0,12$  ( $k_S = 0,85$  m)

Vergleich mit ‚MQ‘:  $\lambda_{\text{hist}} = 0,02$  ( $k_S = 0,005$  m)

Die Ergebnisse sind in Abb. II-2.8 eingetragen. Bei ihrer Betrachtung fällt auf, dass der Vergleich mit ‚MQ‘ deutlich geringere  $\lambda$ -Werte ergibt, d.h. ein *sehr glattes Widerstandsverhalten* des historischen Strombetts bedeuten würde (was sich auch in dem kleinen  $k_S$ -Wert von 5 mm, vergleichbar dem Rauheitseinfluss einer Betonoberfläche, manifestiert).

Dies kann aus hydraulischer Sicht ausgeschlossen werden, da die zweifelsfrei größere Strukturvielfalt der historischen Gerinnegeometrie mit einem größeren Widerstandseinfluss auf die Strömung gleichzusetzen ist. Dagegen erscheinen die Ergebnisse des zweiten Vergleichs mit ‚MNQ‘ mit  $\lambda_{\text{hist}}$  bis ca. 0,12, d.h. einem beträchtlichen Gesamt-Fließwiderstand des Gewässers, hydraulisch durchaus im Bereich des Möglichen. Dies bestätigt auch die zugehörige Fließgewässerrauheit  $k_S$  von 850 mm (zum Vergleich: in DVWK (1991) wird bei *starker Unregelmäßigkeit des Gerinnes* – abgeleitet aus Messungen an naturnahen Fließgewässern *ohne Gehölz- und Vorland-einfluss (!)* – zur Orientierung für  $k_S$  der Wertebereich 350-500 mm angegeben). Interessant erscheint dieses Ergebnis ferner im Zusammenhang mit der Frage nach den an der Unteren Mittelbe zu beobachtenden Transportkörpern (d.h. unter Wasser wandernden Sanddünen), die mit variablen Formen und Höhen von bis zu 1 m und mehr das Strömungsverhalten (Rauheit!) erheblich beeinflussen können.

Durch Variation der Parameter A und B des Ist-Zustands um +/- deren Standardabweichung ergeben sich weitere Anhaltspunkte zur möglichen Größe von  $\lambda_{\text{hist}}$ , so dass im Ergebnis ein mehr oder weniger enger Wertebereich plausibel eingegrenzt bzw. angenommen werden kann (siehe Abb. II-2.8).

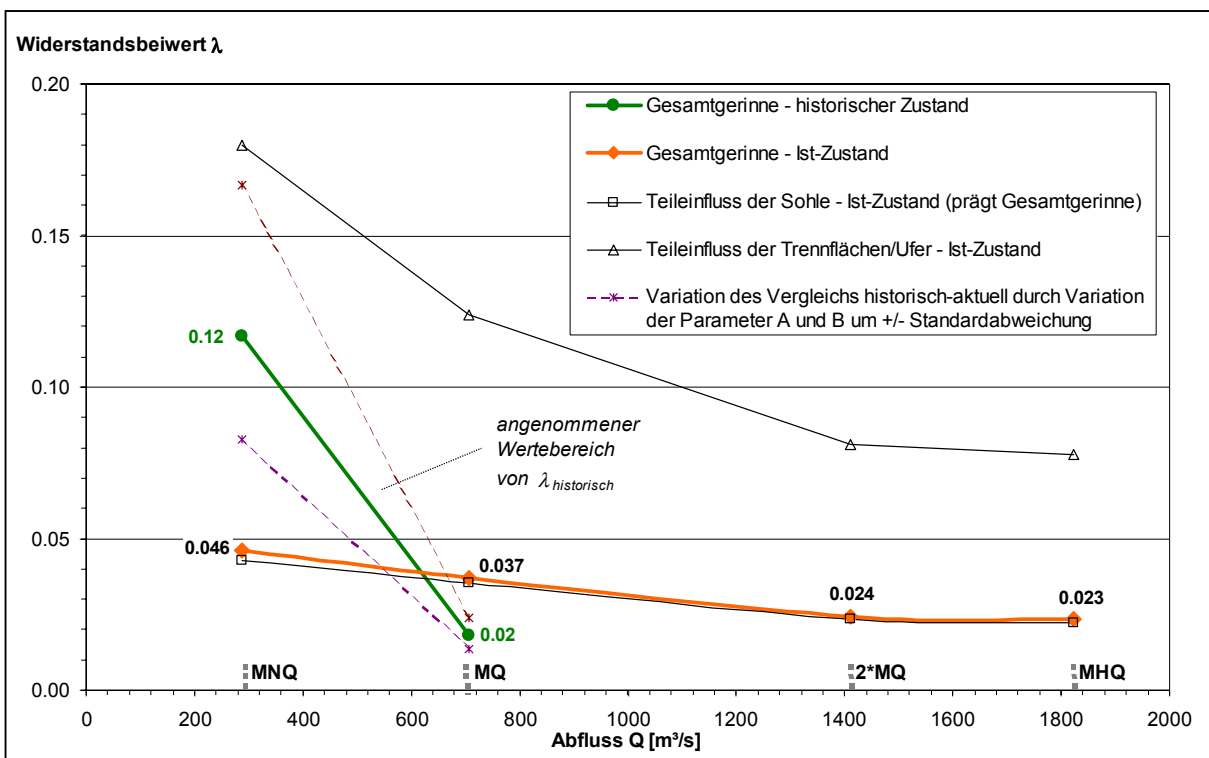


Abb. II-2.8 Vergleich der historischen und aktuellen Widerstandsbeiwerte der Gerinneströmung.



Es ist folglich davon auszugehen, dass der Gesamt-Fließwiderstand des nicht regulierten historischen Elbebettes über den heutigen Bedingungen lag. Für ausufernde Abflüsse gilt diese Aussage qualitativ ebenso, da die Bewuchs- und Reliefstrukturen im Vorland (z.B. Rinnen) zweifelsohne von größerer Unregelmäßigkeit waren und somit, zusätzlich zum Einfluss aus dem Strombett, bei Hochwasser eine erhöhte Rauheit bedeuteten.

Interpretiert man die vorstehenden Ausführungen im Sinne eines ökomorphologischen Leitbilds, d.h. im Hinblick auf ein theoretisch (!) eigendynamisch entwickeltes Gewässerbett, so ist klar, dass mit einem deutlich erhöhtem Widerstandsbeiwert gerechnet werden muss. Welche Bedeutung dies prinzipiell für weitere Strömungsparameter hat, soll hier nachfolgend weiter aufgezeigt werden.

**Vergleich der mittleren Fließgeschwindigkeit**

Gemäß der obigen Voraussetzung  $Q_{hist} = Q_{akt}$  sowie der Konituitätsbedingung kann die historische mittlere Fließgeschwindigkeit wie folgt ermittelt werden (hier: mit  $v_{akt}$  und  $A_{akt}$  aus Tab. II-2.4):

$$v_{hist} = v_{akt} \frac{A_{akt}}{A_{hist}} \tag{Gl. 5}$$

Abb. II-2.9 zeigt das Ergebnis dieses Vergleichs nach Gl. 5. Dargestellt sind einerseits der Verlauf der mittleren Fließgeschwindigkeiten  $v_m (= v_{akt})$  im Ist-Zustand als Funktion des Abflusses, ergänzt um den Bereich der Standardabweichung. Andererseits ist die historische Fließgeschwindigkeit  $v_{hist}$  für die Vergleichszustände ‚MNQ‘ und ‚MQ‘ eingetragen, wobei auch  $v_{hist}$  gemäß der Standardabweichung von  $A_{hist}$  als variabler Bereich angegeben ist.

Analog zur obigen Betrachtung des Fließwiderstands können beide Zustände (Vergleich mit ‚MNQ‘ bzw. ‚MQ‘) wiederum als wahrscheinliche Grenzen des Wertebereichs der Parameter aufgefasst werden, wobei die mittlere historische Fließgeschwindigkeit bei gleichem Abfluss folgerichtig unter der heutigen gelegen haben muss. Das bedeutet unter Annahme gleichen Abflüsse ‚MNQ‘, dass eine - als maximal anzusehende - Veränderung der mittleren Fließgeschwindigkeit von ca. 0,4 m/s (historisch) auf ca. 0,7 m/s (aktuell) ableitbar ist (Abb. II-2.9). Darüber hinaus ist beim historisch-morphologischen (bzw. naturnahen) Bettzustand eine größere Variabilität im Strömungsbild zu erwarten, mit langsam und schnell fließenden Bereichen, die in einer dementsprechend größeren Standardabweichung von  $v_{hist}$  zum Ausdruck kommt (Abb. II-2.9).

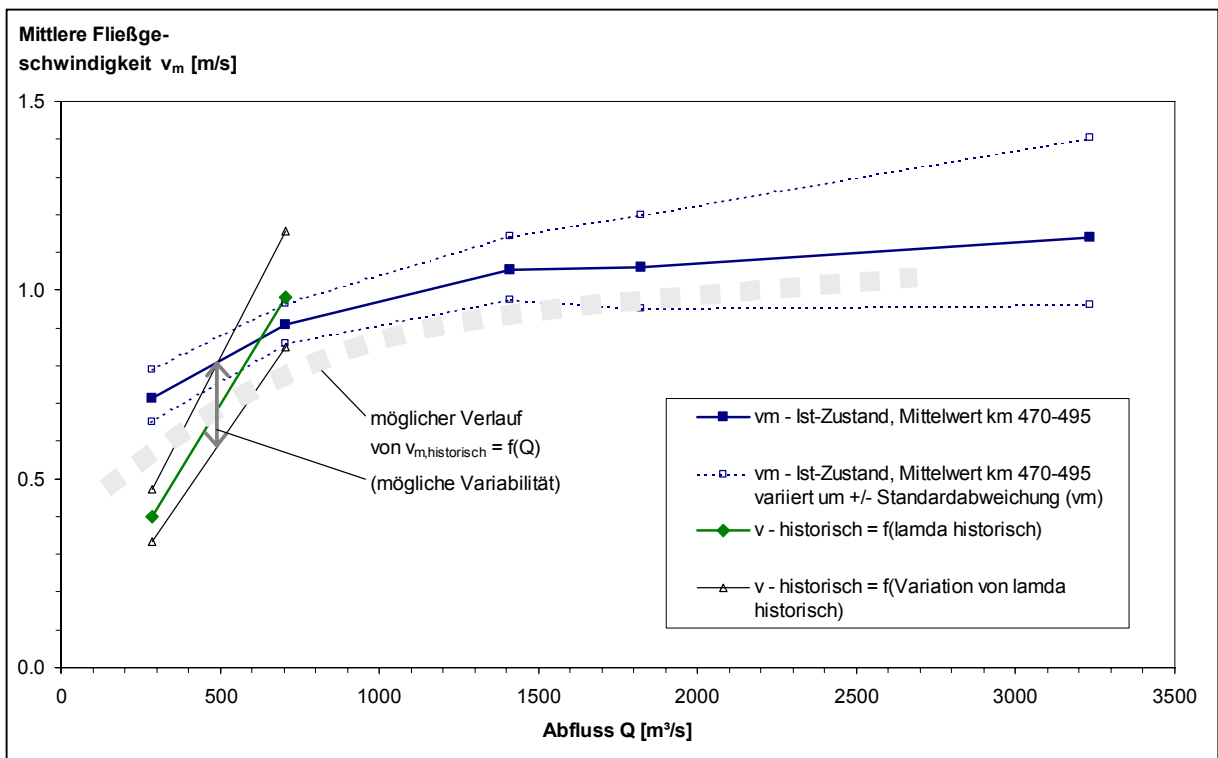


Abb. II-2.9 Vergleich der historischen und aktuellen mittleren Fließgeschwindigkeiten.

Führt man die vorigen Überlegungen qualitativ fort, so ist plausibel, dass der Verlauf von  $v_{\text{hist}} = f(Q)$  auch bei Abflüssen mit Ausuferung ins Vorland – aufgrund des erhöhten Fließwiderstands von Bett und Vorland – im Mittel deutlich unter dem heutigen Niveau gelegen haben muss. Dies schließt natürlich mit ein, dass lokal (an schmalen Stellen im Strom) auch höhere (vom niedrigeren Mittelwert abweichende) Strömungsgeschwindigkeiten bzw. insgesamt eine größere Variabilität aufgetreten sein müssen. Ein möglicher Verlauf der mittleren historischen Geschwindigkeiten und deren Variabilität ist in Abb. II-2.9 qualitativ eingezeichnet; er orientiert sich quantitativ am obigen Ergebnis.

### Weitere Strömungsparameter

Mit Erfassung der Breiten- und Tiefenverhältnisse, des Fließwiderstandsbeiwertes sowie der mittleren Fließgeschwindigkeit für den historischen Zustand der Elbe sind die wesentliche Randbedingungen zur Beschreibung des damaligen (oder generell: eines naturnahen) Strömungsbildes innerhalb plausibler Wertebereiche definiert. Wird die hydraulische Betrachtung weiter geführt, so lassen sich weitere charakteristische Strömungsparameter auf relativ einfache Weise bestimmen und somit die Größenordnung von (potentiellen) Veränderungen infolge künstlicher oder natürlicher Umstrukturierungen des Gewässerbetts quantitativ eingrenzen. Als wichtigste Strömungsparameter zu nennen sind z.B. die Sohl Schubspannung ( $\tau_0 = \rho g h$ , auch ohne Kenntnis von  $v$  und  $\lambda$ ), die Froudezahl ( $Fr = v^2/(gh)$ ) sowie die (hier in jedem Fall erhöhten) Wasserstände über bekannte Verfahren der Spiegellinienberechnung<sup>2</sup>.

Liegen also erst einmal Angaben zur (natürlichen) Querprofilform, repräsentiert durch das Breite-Fließtiefe-Verhältnis ( $B/h$ ), sowie zum morphologischen Gesamtbild (einschließlich Inseln, Vegetation etc.) bzw. zum resultierenden Widerstandsverhalten vor, so lassen sich weitreichende qualitative und quantitative Aussagen über mögliche Veränderungen bis hin zum natürlichen Zustand (Leitbild) treffen.

### II-2.2.7 Ansätze zur Übertragbarkeit und Verallgemeinerung der Ergebnisse

Es ist klar, dass die hier behandelte historische Karte mit umfangreichen Informationen zu naturnahen Gewässerstrukturen (> 30 km Elbelauf), vor allem auch Wassertiefen etc., einen eher seltenen Ausnahmefall darstellt. Auf der anderen Seite mangelt es für Fließgewässer des Typs und der Größe der Elbe in Mitteleuropa an aktuellen (Referenz-)Daten über natürliche Gewässerzustände.

Daher stellt sich die Frage, wie in anderen Strecken der Elbe oder an anderen (großen) Fließgewässern, wo solche Informationen nicht oder nur sehr eingeschränkt vorliegen, vorgegangen werden kann, um zu einer Beschreibung von morphologisch-hydraulischen Merkmalen naturnaher Zustände (im Sinne der Leitbilddefinition) zu gelangen.

Es bieten sich prinzipiell zwei Möglichkeiten an, die beide mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind:

1. Erfassung von *historischen* Referenzgrößen der Gewässerstruktur wie Laufform, Breitenvarianz etc. *aus Karten* für den Naturraum (Elbe) *soweit möglich*; Beschreibung des Leitbildes anhand der Erfahrungswerte dieser oder morphologisch ähnlicher Gewässerabschnitte und im weiteren von qualitativen Überlegungen.
2. Weitergehende, physikalisch orientierte (verallgemeinernde) *Formulierung des Problems* „*natürlicher Zustand*“, soweit aus heutiger Sicht wissenschaftlich möglich, ggf. numerisch oder unter Zuhilfenahme konzeptioneller bzw. vereinfachter semi-empirischer Ansätze.

In diesem Kontext ergeben sich folgende Aspekte.

### Zur Verwertung historischer Informationen als Referenz für natürliche Gewässerzustände

Die Kenntnis von historischen Strukturparametern wie der Breitenvarianz eines Gewässerabschnittes (*eines* kartierten Zustands) reicht im strengen Sinne nicht aus, um den heutigen potentiell natürlichen Gewässerzustand aus morphologischer Sicht umfassend (quantitativ) zu beschreiben. Da es sich bei einer Kartierung um eine Momentaufnahme handelt, ist es schwer zu beurteilen und bleibt oft *ungeklärt*, inwieweit der erfasste historische Zustand faktisch einem *natürlichen Gleichgewichtszustand ohne Ein-*

<sup>2</sup> Für das Verfahren nach Gauckler-Manning-Strickler ergibt sich für „MNQ“ ( $\lambda = 0,12$ ) und den Ansatz  $k_{st} = (8 g / \lambda)^{1/2} R_{hy}^{-1/6}$  nach Chezy (vgl. NAUDASCHER 1992) eine maximale Reduzierung des Rauheitsbeiwerts von  $k_{st} = 36,5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  auf  $24 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , was etwa dem Wert eines stark verkrauteten Gewässerbetts (kleinerer Größe) entspricht.

wirkungen des Menschen entspricht. Vielmehr stellen die meisten (erst ab etwa 1600 entstandenen) Karten Zustände mit bereits einer Vielzahl menschlicher Nutzungen und Eingriffe in der Stromaue dar (wie Abb. II-2.3 aufzeigt). Schwierig und strittig ist zudem die Frage, ob eine natürliche Regeneration und (unbeeinflusste) Entwicklung des Gewässers – ausgehend vom heutigen (*abiotisch und biotisch veränderten*) Zustand – wieder zum historischen Bild zurückführen würde (Stichwort: Reversibilität). Dies leitet sich bereits aus dem Aspekt ab, dass sich einer der steuernden Prozesse der Entwicklung - die Dynamik der Abflüsse - exakt niemals wiederholt. Auch zeugen beispielsweise wasserbauliche Modellversuche mit beweglicher Sohle im Labor davon, dass eine beobachtete Sohlform (als Resultat einer morphodynamischen Entwicklung) selbst bei ansonsten gleichen Versuchsrandbedingungen als solche kaum exakt reproduzierbar ist (wie dies z.B. eine numerische Berechnung mit deterministischem Ansatz als „einzige“ Lösung ergeben kann). Das heißt, dass die am Ende einer dynamischen Entwicklung stehende Sohlform – vorausgesetzt, die Konstellationen und Abläufe der prägenden Einflussgrößen seien bekannt – zwar erwartet werden bzw. „ähnlich sein“ kann, eine Prognose jedoch nur über *charakteristische Größen mit Spannbreiten wahrscheinlicher Ausprägungen* Sinn macht, die zufallsbedingten Prozessen (bzw. natürlichen Variabilitäten) Rechnung tragen.

Trotzdem liefern gerade historische Karten, wie im vorangegangenen Kap. II-2.1 und diesem Beitrag gezeigt, wichtige (oft einmalige) Anhaltspunkte über typische zu erwartende Gewässerstrukturen im Sinne des Leitbildes. Insbesondere können sie als *real dokumentiertes Szenario eines naturnahen Zustands* aufgefasst werden. Dies gilt umso mehr, da jede Leitbilddefinition in erster Linie einer abstrakten (theoretischen) Beschreibung der Realwelt entspricht, die dem geistigen Vorstellungsvermögen bei der Bewertung ausgewählter Parameter als Indikatoren der aktuellen Verhältnisse dient. Das heißt, aufgrund der Unsicherheit über die Vielzahl der (variablen) Einflüsse bis zum (theoretischen) Erreichen eines natürlichen Gewässerzustands genügen zu dessen Beschreibung qualitative, nur näherungsweise quantifizierende Aussagen. Hier bieten historische Daten gegenüber rein theoretischen Überlegungen neben ihrem Bezug zum betroffenen Naturraum weitere praktische Vorteile.

Durch die vorangehenden Ausführungen soll nochmals explizit die *Vielfalt möglicher Ausprägungen* hervorgehoben werden, wobei es jedoch darauf ankommt, diese Variabilität gerade auch quantitativ (weiterführend) zu beschreiben. Demnach sind die Ergebnisse der vorliegenden Auswertung (bzw. die aus historischen Karten im allgemeinen) im Hinblick auf die Ableitung eines ökomorphologischen Leitbildes nicht (nur) als „mittlere“ Werte zu verstehen. Vielmehr beschreiben sie eine Realisation naturgegeben variabler Größen und sind daher als Richtwerte im Sinne einer charakteristischen Spannbreite zu interpretieren. Das daraus ableitbare „spezifische Leitbild“ entspricht somit der „Vereinigungsmenge“ einer Vielfalt möglicher Ausprägungen (zum Vergleich siehe auch LAWA 2000, Anhang 3: Grundlagen für die Erarbeitung spezifischer Leitbilder).

### **Zur Übertragbarkeit im Längsverlauf der Elbe**

Über die hier beschriebene Karte hinaus existieren umfangreiche weitere historische Kartenwerke und Unterlagen zur Elbe. Wie schon benannt, wertete ROMMEL (2000) diese aus und rekonstruierte so die Laufzustände der deutschen Elbe bis Geesthacht um 1735-80, um 1830 und um 1890 (zum Vergleich: siehe Kap. II-1.2.2). Aus den Ergebniskarten von ROMMEL im Arbeitsmaßstab 1:100000 wurden in der vorliegenden Arbeit im Abstand von 1 km und gerundet auf 10 m die historischen Gewässerbreiten der Elbe abgegriffen. Ziel dieser Erfassung ist die Übertragung der lokal gewonnenen Ergebnisse bzw. der Vergleich mit anderen Elbestrecken. Wie bereits in Abb. II-2.7 und Tab. II-2.3 gezeigt wurde, entsprechen diese relativ grob erfassten Breiten in guter Näherung den Ablesungen aus der Originalkarte der hier behandelten Teilstrecke (km 470-495).

Die Ergebnisse dieser Breitenerfassung im Längsverlauf sind in Abb. II-2.10 und Tab. II-2.5 dargestellt. Hierbei wurden Elbe-Abschnitte von 100 km Länge zusammengefasst, die in etwa den flussmorphologischen Laufabschnitten entsprechen (Austritt der Elbe aus dem Mittelgebirgstal bei km 96, Obere Mittelelbe bis zur Mündung der Schwarzen Elster bei km 198, Saalemündung bei km 298, Eintritt in die Elbe-Havel-Niederung bei km 410 etc.). Die Abschnitte km 0-100, 100-200, etc. stellen somit weitgehend „homogene“ Stichproben der erfassten Breiten dar. Die Ergebnisse zeigen die Zunahme der Breiten im Längsverlauf, die Variabilität der Breiten

einzelner Zustände und Abschnitt und die tendenzielle Abnahme der Breiten infolge der umfassenden Regulierungsmaßnahmen im 19. Jahrhundert. Sie zeigen aber auch die Abhängigkeit der Aussagen vom Zustand der Erfassung (z.B. ist beim Zustand um 1830 im Abschnitt km 500-580 eine deutlich höhere Wasserführung zu vermuten, da die Breiten durchweg um 50 m größer als bei der früheren Kartierung um 1780 ausfallen, vgl. Tab. II-2.5).

Es liegt nahe, diese großräumig erfassten Breiten als Grundlage zur Übertragung der obigen Erkenntnisse zur natürlichen Profilform (B/h) zu verwenden. Voraussetzung hierfür ist ein Ansatz zur Abschätzung

von B/h für die unterschiedlichen flussmorphologisch typischen Laufabschnitte („gestreckt – gewunden– verzweigt“). Es kann flussmorphologisch plausibel angenommen werden, dass sich das mittlere Breiten/Tiefen-Verhältnis in einem spezifischen Naturraum über längere Flussstrecken nicht gravierend ändert ( $B/h \approx \text{const.}$ ). Somit reduziert sich das Problem – bei bekannten historischen (naturnahen) Breitenverhältnissen – auf die Ableitung einer naturnahen Profilform (B/h).

An dieser Stelle wird weiterführend auf das Kapitel II-3 (B/h-Verhältnisse entlang der Elbe im aktuellen Zustand) sowie auf Kapitel I verwiesen.

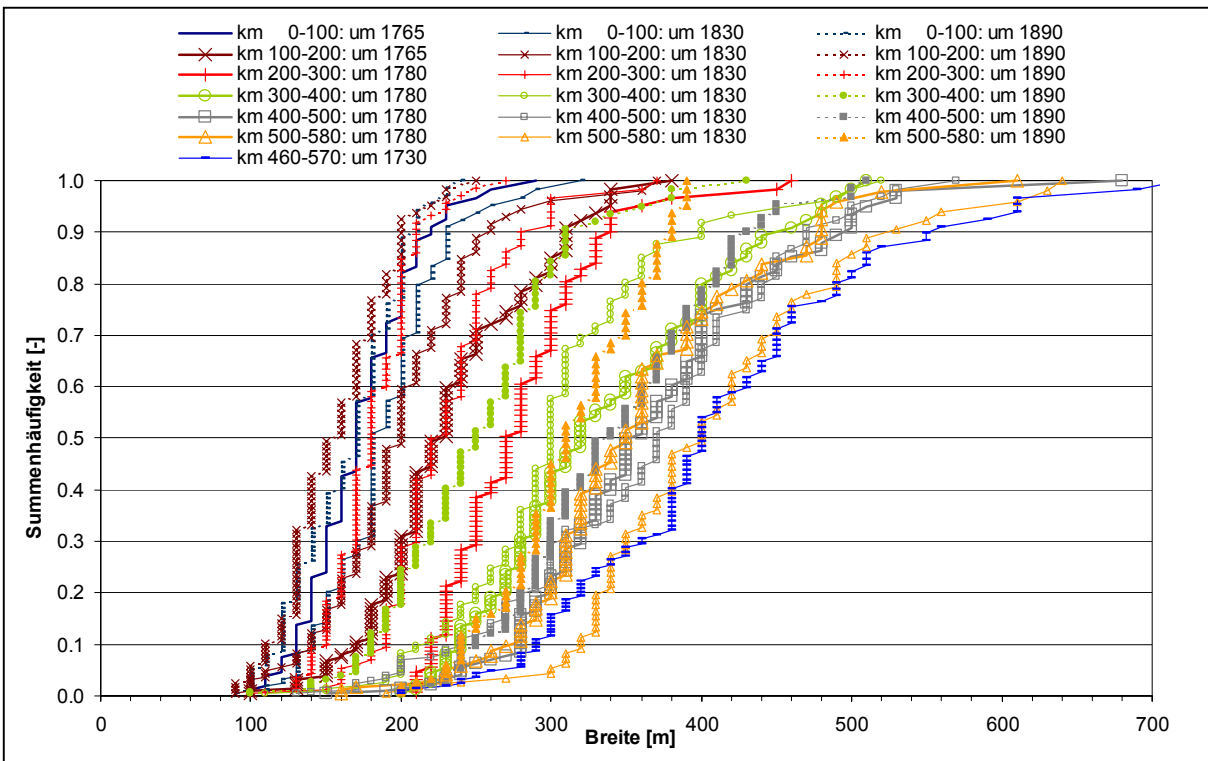


Abb. II-2.10 Historische Breitenverhältnisse der deutschen Binneneibe auf Basis rekonstruierter Zustände (nach Karten von ROMMEL 2000).

Tab. II-2.5 Statistische Kenngrößen der erfassten Breiten (in [m]) nach ROMMEL (2000): zum Vergleich siehe Abb. II-2.10.

Zustand	Kennwert (Breite)	km 0-100	km 100-200	km 200-300	km 300-400	km 400-500	km 500-580
um 1765/80	B <sub>90%</sub>	220	310	340	440	490	480
	B <sub>50%</sub> (= B <sub>m</sub> )	170	230	270	320	360	350
	B <sub>10%</sub>	130	170	230	230	280	270
um 1830	B <sub>90%</sub>	230	250	280	400	470	530
	B <sub>50%</sub> (= B <sub>m</sub> )	190	200	220	300	370	400
	B <sub>10%</sub>	130	140	190	210	240	320
um 1890	B <sub>90%</sub>	210	200	210	310	430	380
	B <sub>50%</sub> (= B <sub>m</sub> )	170	160	180	250	330	310
	B <sub>10%</sub>	120	110	150	180	250	240

### Zur verallgemeinerten Beschreibung des natürlichen morphologischen Gewässerzustandes

In den letzten Jahren können große Fortschritte im Bereich der (mehrdimensionalen) numerischen Strömungssimulation beobachtet werden, die auch die Berechnung komplexer morphologischer Situationen einschließen (z.B. die aus Flussbaumaßnahmen oder einer Hochwasserwelle resultierenden Sohländerungen in einer Gewässerstrecke). Mit den verbesserten Rechnerkapazitäten geht eine Bestrebung nach zunehmender physikalischer Fundierung der Prognosewerkzeuge (Modelle) einher. Diese Fortschritte können jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass man derzeit noch weit von der Formulierung eines allgemeingültigen (physikalischen) Ansatzes zur Beschreibung der langfristigen morphologischen Entwicklung eines Gewässers entfernt ist, einmal abgesehen von dem oben beschriebenen (statistisch zu erfassenden) Zufallsanteil im Prozessgeschehen.

Ein bekannter und international verbreiteter Ansatz zur Beschreibung eines natürlichen Gewässerbetts im morphodynamischen Gleichgewichtszustand ist die Regimetheorie (sog. Regimegleichungen). Hinter diesen i.a. empirischen und physikalisch nicht hinreichend erklärten Gleichungen steht der Grundgedanke, dass sich die Breite, die Tiefe und das Gefälle eines Gewässers, das „im Regime“ mit den unabhängigen Randbedingungen des Naturraums (Geomorphologie etc.) ist, in Abhängigkeit eines charakteristischen Abflusses beschreiben lässt. Bekannte Ansätze zur Regimetheorie bzw. zu Gleichgewichtskonzepten der fluvialen geomorphologischen Entwicklung, die seit den 1940er und v.a. seit den 1960er Jahren in vielerlei Untersuchungen erarbeitet wurden, behandeln u.a. MANGELSDORF & SCHEURMANN (1980), KNIGHTON (1984), YALIN (1992), KERN (1994) und SCHERLE (1999). Die überwiegende Mehrheit der Ansätze sind empirische Regressionsformeln und nicht dimensionstreu.

Ziel einer – diesen Beitrag abschließenden – Überprüfung der Regimetheorie für die vorliegenden Daten zur Elbe ist es somit, über einzelne Zustände hinaus (z.B. aus historischen Karten) zur Abschätzung maßgeblicher (unbekannter) Strukturparameter wie Breite, Windungsgrad, Fließtiefe, Profilform (B/h), Gefälle etc. im anzunehmenden Leitbildzustand (morphologisches Gleichgewicht) zu gelangen.

Ein erster durchgeführter Anwendungstest mit verschiedenen Regimegleichungen der o.a. Literatur

ergab sehr breit gestreute Ergebnisse und große Abweichungen im Vergleich zu den hier erfassten historischen Verhältnissen an der Elbe. Von einer weiteren Anwendung wurde daher abgesehen.

Auf Basis der Analyse der Regimeansätze und der Datengrundlagen zahlreicher Arbeiten sowie theoretischer Überlegungen entwickelte YALIN (1992) *dimensionsreine* Berechnungsansätze und stellt ein Verfahren zur Beschreibung des Gleichgewichts- bzw. Regimezustands vor. Demnach lässt sich die Gewässerbreite „im Regime“  $B_R$  proportional zur Quadratwurzel des Abflusses  $Q$  unter Berücksichtigung der Korngröße  $d$  und des Laufgefälles  $I$  (im Gleichgewicht) wie folgt beschreiben.

$$B_R = \alpha \cdot \frac{Q^{1/2}}{(d \cdot g \cdot I)^{1/4}} \quad (\text{Gl. 6})$$

Während demnach also die wesentlichen Faktoren ( $B$ ,  $Q$ ,  $d$ ,  $I$  sowie die Erdbeschleunigung  $g$ ) in dieser Formel dimensionstreu behandelt werden, verbleibt ein Faktor  $\alpha$  [-], der nach YALIN (1992) als nahezu konstant behandelt werden kann.  $B_R$  kann im Prinzip nicht direkt berechnet, sondern nur unter Beachtung von Gleichgewichtsbedingungen (Regimezustand) durch geschachtelte Iteration mehrerer Variablen ermittelt werden. Ist  $B_R$  bekannt, so lässt sich anschließend die Fließtiefe  $h_R$ , die sich nach YALIN (1992) proportional zu  $Q^{1/3}$  verhält, ermitteln.

Die Grundidee bestand im vorliegenden Fall darin, die historischen Breiten  $B_{\text{hist}}$  der Regimebreite  $B_R$  gleichzusetzen (Hypothese: die historische Elbe befand sich morphologisch im Gleichgewicht), um unter Verwendung elbetypischer Werte für  $I$  und  $d$  eine empirische Anpassung von Gl. 6 für verschiedene Laufabschnitte der Elbe zu erreichen. Setzt man also für  $Q$  einen (heutzutage) etwa 1-jährlichen Hochwasserabfluss ein (vergleiche hydrologische Längsschnitte in Kap. III-1, z.B. Abb. III-1.29), für  $d$  einen laufenden Mittelwert der Kornzusammensetzung der Elbesohle (nach BFG 1994) sowie für  $I$  das mittlere Gefälle größerer Strecken, so ergibt sich der Faktor  $\alpha$  im Längsverlauf der Elbe – hypothetisch, über die historischen Breiten rückgerechnet – wie in Abb. II-2.11 dargestellt. Tatsächlich variiert  $\alpha$  stark mit den erfassten einzelnen Breiten, zeigt aber im Mittel (hier: gleitender Durchschnitt) eine streckenweise annähernd konstante, im Längsverlauf dagegen eine abnehmende Tendenz, wobei letztere dem sich ändernden Laufcharakter zuzuordnen ist.

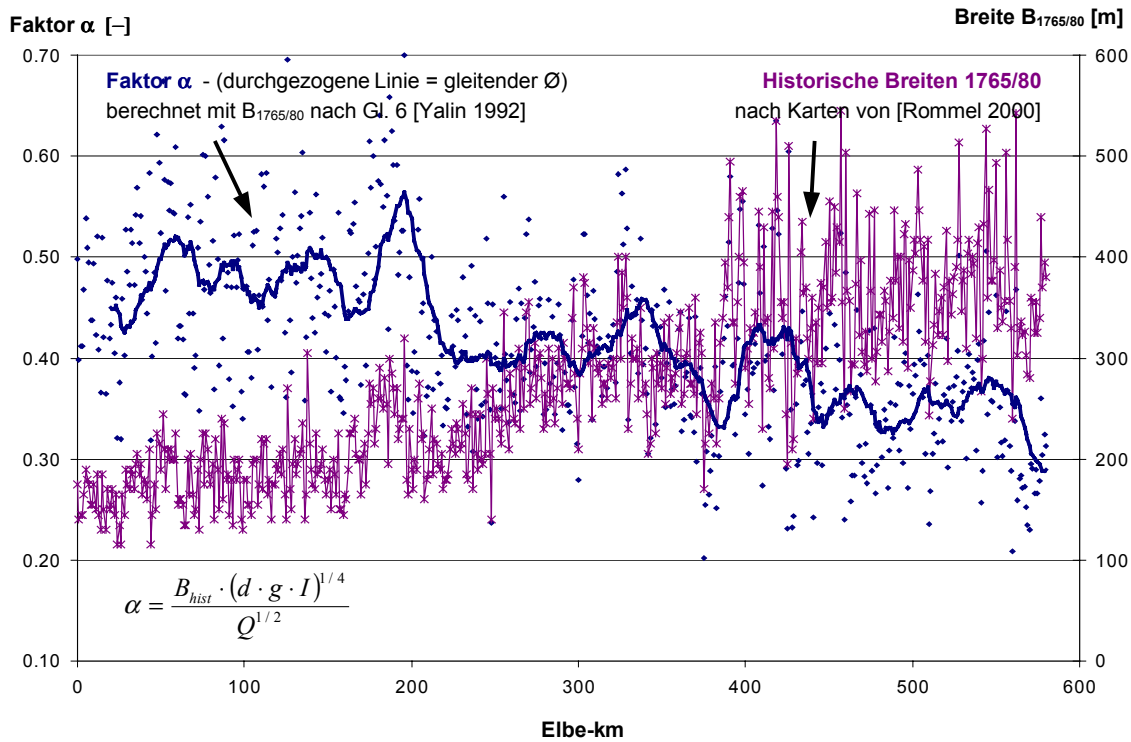


Abb. II-2.11 Anwendung der Regimeformeln nach YALIN (1992) auf die Elbe.

YALIN & SILVA (2001) entwickelten das oben beschriebene Konzept zur Berechnung der Parameter B, h und I im Regimezustand (Index R) weiter, vor allem im Hinblick auf die verbesserte Berücksichtigung der Widerstandseinflüsse im Gerinne. In dem neuen Ansatz gehen YALIN & SILVA demnach davon aus, dass für das Erreichen eines dynamisch stabilen Gleichgewichtszustandes (Definition  $B_R$ ,  $h_R$ ,  $I_R$ ) – in Abhängigkeit von Abfluss und Kornmaterial des Gewässers (repräsentiert durch die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_{*cr}$ ) – die Froudezahl  $Fr$  der Strömung, die eine Funktion der Widerstandseinflüsse ist (zusammengefasst im Chezy-Faktor  $c$ , vergleiche u.a. NAUDASCHER 1992:  $c = (8g/\lambda)^{0,5}$ ), einem Minimum entgegenstreben muss. In die Breite geht ein dimensionloser Faktor  $\alpha_B$  ein, der empirisch in Abhängigkeit des Kornmaterials bestimmbar ist. Zur Beschreibung des Regimezustands eines mäandrierenden, nicht verzweigten Gerinnes müssen nach YALIN & SILVA (2001) folgende drei Gleichungen (Gl. 7–9) in iterativer Prozedur gelöst werden:

$$(Fr)_R = Q^2 / (g \cdot B_R^2 \cdot h_R^3) \tag{Gl. 7}$$

$$B_R = \alpha_B \cdot \sqrt{Q / v_{*cr}} \tag{Gl. 8}$$

$$(Fr)_R = c_R^2 \cdot I_R \rightarrow \min \tag{Gl. 9}$$

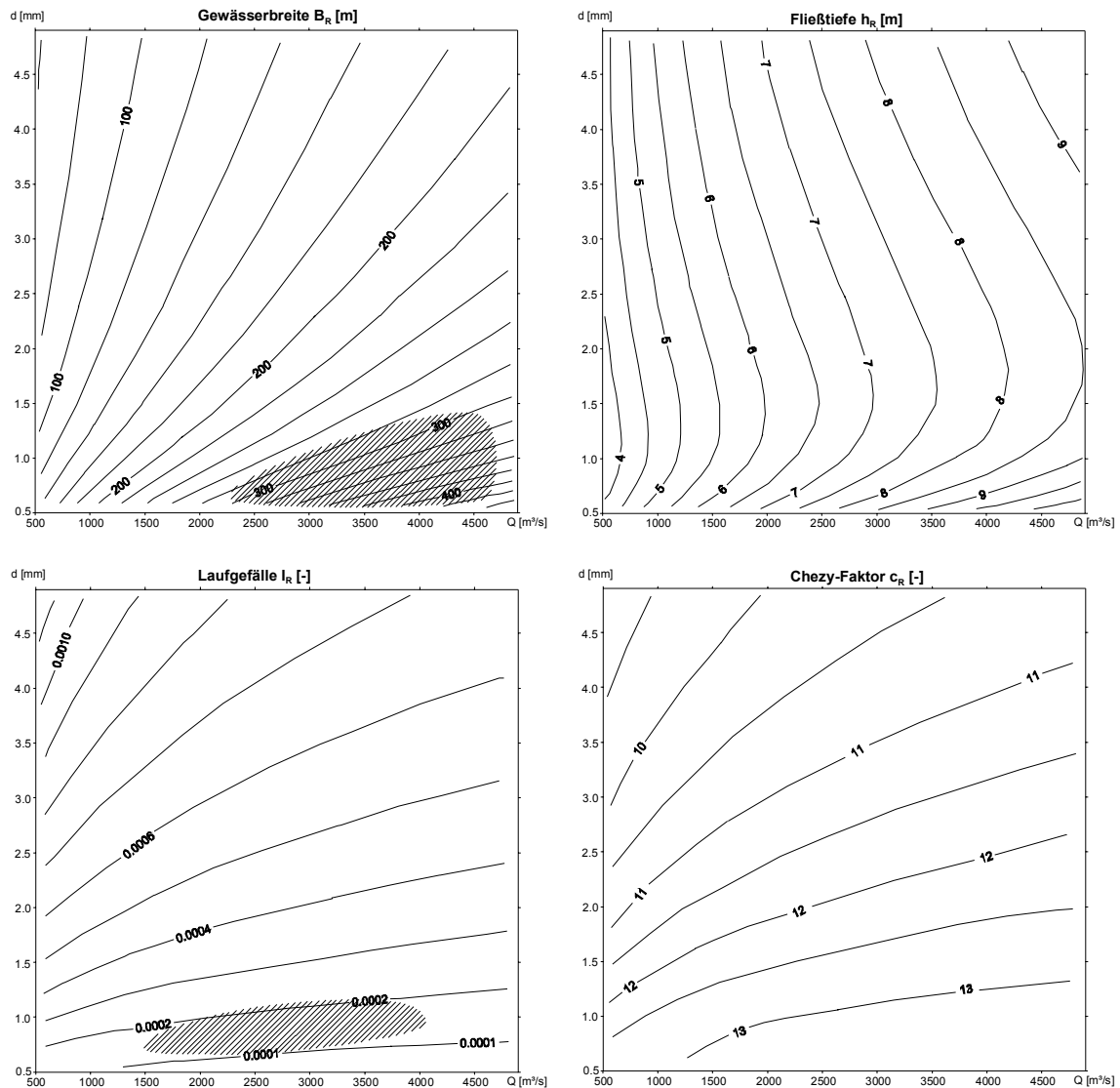
Zur einfacheren Anwendung des Berechnungsverfahrens stellen die Autoren auf einer CD-Rom zum Buch die Software BHS-STABLE zur Verfügung.

Exemplarisch sind in Tab. II-2.6 einige Lösungen der Anwendung dieses Verfahrens für die Größenordnungen der Unteren Mittelelbe (vor allem für d und I) wiedergegeben.

Tab. II-2.6 Berechnungsbeispiele der Breite B, der mittleren Fließtiefe h, des Laufgefälles I sowie der Froudezahl  $Fr$  und des Chezy-Widerstandsbeiwertes  $c$  im Regimezustand (Index R) nach YALIN & SILVA (2001) in Funktion von Abfluss Q und Korngröße d für Größenordnungen der Unteren Mittelelbe, vgl. Text.

Nr.	Annahme		Parameter im Regimezustand berechnet nach YALIN & SILVA (2001)				
	Q [m³/s]	d [mm]	$B_R$ [m]	$h_R$ [m]	$I_R$ [-]	$(Fr)_R$ [-]	$c_R$ [-]
1	1500	1,0	193	5,5	0,00022	0,037	12,9
2	3000	1,0	281	7,3	0,00018	0,030	13,0
3	4500	1,0	349	8,7	0,00015	0,026	13,2
4	3000	0,8	307	7,7	0,00013	0,022	13,1
5	3000	0,6	343	8,2	0,00008	0,014	13,2
...							

Die Beispiele in Tab. II-2.6 zeigen generell plausible Berechnungsergebnisse, gerade auch im Vergleich zur Bandbreite früherer Ansätze der Regimetheorie, und ergeben bei geschickter Wahl der Parameter – mit Einschränkungen (siehe unten) – realitätsnahe Konstellationen bezogen auf die Breite, Korngröße und Laufgefälle der historischen Unteren Mittelelbe.



**Abb. II-2.12** Graphische Lösung des Regimekonzepts von YALIN & SILVA (2001) für die Größen Breite  $B_R$ , mittlere Fließtiefe  $h_R$ , Gefälle  $I_R$  und Widerstandsbeiwert  $c_R$  des Gerinnes sowie Einordnung der relevanten Bereiche der Unteren Mittelelbe (schraffiert).

Wie die Beispiele jedoch auch zeigen, fällt die Wahl der vermeintlich richtigen Kombination von Werten schwer, sodass letztlich kein eindeutiges Ergebnis im Sinne einer einzigen zutreffenden Lösung erwartet werden kann. Aufgrund dieser Problematik, d.h. um Grundtendenzen der Parameter klarer erkennen und die Elbedaten einordnen zu können, wurden in der vorliegenden Arbeit eine Vielzahl von Varianten systematisch durchgespielt, wobei das Programm BHS-STABLE modifiziert (automatisiert) wurde. Abb. II-2.12 stellt die aus dieser Anwendung des Regimekonzepts von YALIN & SILVA resultierende graphische Lösung der Gleichungen (Gl. 7-9) für Wertebereiche ( $d$ ,  $Q$ ) der Unteren Mittelelbe dar.

Die vier Bilder in Abb. II-2.12 zeigen die so für den Regimezustand ermittelten Ausprägungen der Gewässerbreite, des Laufgefälles, der mittleren

Fließtiefe und des Rauheitsbeiwertes nach Chezy in Funktion von Abflusses und der Korngröße. Der Darstellung zufolge ist von einer stärkeren Abhängigkeit (z.B. des sich einstellenden Laufgefälles) vom Bettmaterial als vom Abfluss auszugehen. Dies gilt in besonderem Maß für grob- bis feinsandige Verhältnisse mit  $d < \text{ca. } 2 \text{ mm}$ . Das bedeutet, dass selbst bei einem nur aus Sandanteilen bestehenden, sehr engen natürlichen Kornspektrum der Bestimmung der maßgeblichen Korngröße eine entscheidende Bedeutung beizumessen ist. Demgegenüber kann die Einflussgröße Abfluss vergleichsweise unscharf behandelt werden.

Vergleicht man die zuvor behandelten historischen Elbedaten mit den theoretisch-empirisch ermittelten Regimegrößen in Abb. II-2.12, so sind auf jeden Fall Fragezeichen zu setzen hinsichtlich der Größe der

bettbildenden Abflüsse, der resultierenden Breiten und Tiefen sowie auch der Rauheitsbeiwerte.

So fällt z.B. auf, dass die Abflussannahmen, die zu den den historischen Daten am besten entsprechenden Werten  $B$  und  $I$  führen, in Bereiche eines heutzutage etwa 10- bis 20-jährlichen Hochwassers führen (z.B. nach Zeile 4 in Tab. II-2.6:  $B_R = 307$  m und  $I_R = 0,00013$  für  $d = 0,8$  mm und  $Q = 3000$  m<sup>3</sup>/s; zum Vergleich  $B_{\text{hist,m}} \approx 425$  m bei ähnlichen  $d$  und  $I$  sowie nach Kap. III-1.6:  $HQ_{10,1936-95} = 2933$  m<sup>3</sup>/s am Pegel Wittenberge). Dies erscheint angesichts der verbreiteten Auffassung, dass häufigere Abflusssituationen für die Bettbildung verantwortlich bzw. charakteristisch sind (z.B. bordvolle Abflüsse bis etwa zweijährliche Hochwasser), relativ hoch, auch wenn diese Abflussjährlichkeiten keineswegs vom 20. auf das 18. Jahrhundert übertragbar sind. Die Größen  $B_R$  und  $h_R$  stellen einen kompakteren Gerinnequerschnitt dar (vor allem  $h_R > h_{\text{hist}}$ ). Zudem errechnet sich eine viel größere Gerinnerauheit als für den historischen Fall ermittelt (z.B.  $c_R = 13,2$  ergibt umgerechnet  $\lambda = 0,45$ ).

Der Grund für die Unterschiede mag einerseits im Ansatz begründet liegen (unverzweigtes Gerinne im Regimefall, Neigung der Unteren Mittelbe zu Bank- und Inselbildung, wenn auch kein *braiding* im engeren Sinne, d.h. Anwendung des Konzeptes im Randbereich seiner Gültigkeit). Dies erscheint aber bei der natürlichen Bandbreite der dem Ansatz zugrunde liegenden Messdaten nicht entscheidend. Vielmehr ist in diesem Zusammenhang auch eine spezifisch auf die Elbe abzielende Verbesserung des Ansatzes denkbar (über den Faktor  $\alpha_B$ , siehe Gl. 8).

Andererseits ist hier auch nochmals die Frage nach der Qualität der historischen Daten (z.B. wie wurden die Tiefen gemessen) und ihrer vermeintlichen „Gleichsetzbarkeit“ mit dem Gleichgewichtszustand anzuführen. Es gilt hier jedoch aus morphologischer Sicht das Argument, wie GLASER (2001) über die Verfügbarkeit und Qualität historischer Klimadaten bemerkt, dass man „nicht das aus heutiger Sicht hydrologisch und klimatologisch Wünschenswerte, sondern das aus den historischen Daten Mögliche“ zum Prinzip erklären muss.

Das mit dem Regimekonzept „im Mittel kompakter“ errechnete Bett lässt sich aber auch als quantitativer Hinweis auf die „untere Grenze“ der Vielzahl der vorstellbaren Leitbildzustände interpretieren.

## II-2.2.8 Fazit der Betrachtungen

Auf Basis der erfassten historischen Strukturen und der Ergebnisse der durchgeführten quantitativen Analysen lassen sich weitreichende Aussagen über ehemalige und potentielle heutige Gewässerzustände ableiten. Diese betreffen im ersten Schritt die natürliche Form des Strombettes (Variabilität der Breiten- und Tiefenverhältnisse), sowie im direkten Zusammenhang damit die das Strömungsbild betreffenden Eigenschaften (Widerstandsverhalten des Gerinnes, Fließgeschwindigkeiten etc.). Die Quantifizierung einer Vielzahl weiterer Merkmale von abiotischer und biotischer Bedeutung (wie die resultierenden Wasserstandsverhältnisse, die Ausprägungsvielfalt von Sohlstrukturen wie Bänken infolge Sekundärströmungseffekten, Wasserwechselzonen etc.) lässt sich daran anknüpfen.

Die im Vergleich zum Ist-Zustand quantifizierbaren Veränderungen von abiotischen Einzelparametern können als „*Bandbreite natürlicher, morphologisch begründeter Potentiale*“ verstanden werden und sind gegebenenfalls biotisch zu bewerten. So stellt sich zum Beispiel die Frage, ob heutige, durch Ausbau sekundär entstandene Strukturen wie Bühnenfelder ökologisch gleichwertige Funktionen erfüllen wie ehemalige oder potentiell natürliche Bettstrukturen.

Die potentiellen morphologischen und hydraulischen Änderungen im Vergleich zum Ist-Zustand lassen sich in ihrer Grundtendenz wie folgt beschreiben:

- Zunahme des Mittelwertes und der Variabilität der Gewässerbreite, in Kombination mit einer Reduzierung der Wassertiefe, und somit einer im Mittel flacher ausgebildeten Profilform,
- Zunahme der räumlichen Ausbildung von Sohlstrukturen und der Veränderungen des Talwegs, Zunahme der Ufererosion,
- Zunahme der Widerstandswirkung des Strombettes, dadurch bei Hochwasser mögliche Verlagerung von Abflussanteilen auf das Vorland,
- Abnahme der mittleren Fließgeschwindigkeit im Strombett bei Zunahme der lokalen Variabilität der Strömung (schnell-tief, langsam-flach etc.),
- Anhebung der Wasserstände im Gewässerbett infolge des veränderten Widerstandsverhaltens bei niederen und mittleren Abflüssen, ab Ausuferung in Abhängigkeit der Strömungssituation in der Aue (Relief, Vegetation etc.),



- morphodynamische Änderungen im Auebereich (hier nicht betrachtet), sowie
- korrespondierende Reaktion der Grundwasserdynamik bzw. Flurabstände in den flussnahen Auenbereichen (tendenziell höheres Niveau vor allem zu Trockenzeiten).

Es erscheint erstrebenswert, weiterführend auf Basis der Ergebnisse einen natürlichen Gewässerzustand (exemplarisch, quantitativ) abzuleiten und als Referenz für ökomorphologische Bewertungen großer (ausgebauter) Fließgewässer zu verwenden.

## Literatur

- BFG (1994): Kornzusammensetzung der Elbesohle von der tschechisch-deutschen Grenze bis zur Staustufe Geesthacht. Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-0834, Berlin.
- BÜCHELE, B., NESTMANN, F. (2000): Ergebnisse des Verbundvorhabens „Morphodynamik der Elbe“. In: GELLER ET AL. [Hrsg. ATV-DVWK] (2000): Gewässerlandschaften – Aquatic Landscapes. ATV-DVWK-Schriftenreihe 21, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, S. 203-228.
- DVWK (1991): Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. Hrsg. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Merkblätter zur Wasserwirtschaft Nr. 220, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- DVWK (1996): Fluß und Landschaft – Ökologische Entwicklungskonzepte. Ergebnisse des BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Modellhafte Erarbeitung ökologisch begründeter Sanierungskonzepte für kleine Fließgewässer“. Hrsg. DVWK, Merkblätter zur Wasserwirtschaft Nr. 240, Bonn.
- FAULHABER, P. (2000): Veränderung von hydraulischen Parametern der Elbe in den letzten 100 Jahren. In: BAW [Hrsg.] (2000): Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 82, Karlsruhe, S. 97-118
- FÜGNER, D. (1995): Hochwasserkatastrophen in Sachsen. Tauchaer Verlag, 1. Aufl., Leipzig
- GLASER, R. (1991): Klimarekonstruktion für Mainfranken, Bauland und Odenwald anhand direkter und indirekter Witterungsdaten seit 1500. Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz, Paläoklimaforschung Bd. 5 (Hrsg. B. Frenzel), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart- NewYork
- GLASER, R. (2001): Klimageschichte Mitteleuropas : 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Primus-Verlag, Darmstadt
- KAHNT, H., KNORR, B. (1987): Lexikon alte Maße, Münzen und Gewichte. Bibliographisches Inst., Mannheim/Wien/Zürich
- KERN, K. (1994): Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung – geomorphologische Entwicklung von Fließgewässern. Springer, Berlin-Heidelberg-New-York.
- KLIMPERT, R. (1896): Lexikon der Münzen, Maße, Gewichte – Zählarten und Zeitgrößen aller Länder der Erde. 2. Auflage, Verlag von C. Regenerhardt, Berlin
- KNIGHTON, D. (1984): Fluvial forms and processes. Reprint, by E. Arnold (Publishers), London.
- ELBSTROMWERK (1898): Der Elbstrom, sein Stromgebiet und seine wichtigsten Nebenflüsse. Eine hydrographische, wasserwirtschaftliche und wasserrechtliche Darstellung. Hrsg. Königliche Elbstrombauverwaltung zu Magdeburg, Verlag von Dietrich Reimer, Berlin
- LAMB, H.H. (1977): Climate: Present, Past and Future. Volume 2 Climate History and the Future. Methuen, London.
- LAMB, H.H. (1995): Climate, History and the Modern World. Routledge, 2. Edition, London/New York
- LAWA (2000): Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland: Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer - Empfehlung. Hrsg. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Kulturbuch-Verlag, Berlin.
- MANGELSDORF, J., SCHEURMANN, K. (1980): Flußmorphologie: Ein Leitfaden für Naturwissenschaftler und Ingenieure. Oldenbourg-Verlag, München-Wien.
- NAUDASCHER, E. (1992): Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke. 2. verb. Auflage. Springer, Wien-New York.
- OTTE-WITTE, K., ADAM, K., RATHKE, K., MEON, G. (2001): Hydraulisch-morphologische Charakteristika entlang der Elbe. Kap. III-2 in diesem Band.
- PÖRTGE, K.-H., DEUTSCH, M. (1999): Hochwasser in Vergangenheit und Gegenwart. In: Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Bd. 18 „Entwicklung der Umwelt seit der letzten Eiszeit“ (2000), Hrsg.: Bayerische Akademie der Wissenschaften, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München
- RITZERT, F. (2001): Einfluß von Regelungsbauwerken auf die Wasserspiegelentwicklung. Dissertation am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (in Vorbereitung).
- ROMMEL, J. (2000): Studie zur Laufentwicklung der deutschen Elbe bis Geesthacht seit ca. 1600. Bericht, im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- SCHERLE, J. (1999): Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen: Grundlagen, Leitbilder, Planung. Mitt. Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Heft 199, Universität Karlsruhe.
- SCHMIDT, M. (2000): Hochwasser und Hochwasserschutz in Deutschland vor 1850 – Eine Auswertung alter Quellen und Karten. Oldenbourg-Industrieverlag, München
- STAMS, M., STAMS, W. (1993): Verzeichnis von Karten und Ansichten der Elbe und des Einzugsgebietes. In: TU Dresden, Inst. f. Kartographie (Hrsg.) (1994): Die Elbe im Kartenbild. Vermessung und Kartierung eines Stromes. Dresden
- TRÄBING, K. (1995): Ökomorphologische Kenngrößen für die Strukturvielfalt von Fließgewässern. Mitteilung Nr. 96, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 146 S.
- VERDENHALVEN, F. (1968): Alte Maße, Münzen und Gewichte aus dem deutschen Sprachgebiet. Verlag Degener & Co., Neustadt/Aisch
- YALIN, M.S. (1992): River mechanics. Pergamon P. New York
- YALIN, M.S., SILVA, A.M.F. (2001): Fluvial processes. IAHR Monograph (ISBN 90-805649-2-3), Delft.
- ZAGWIJN, W.H. (1975): Variations in climate as shown by pollen analysis, especially in the Lower Pleistocene of Europe. In: Wright, A.E. and Moseley, F. (eds.): Ice Ages: Ancient and Modern (Liverpool: Seel House Press), 137-52.

### II-2.3 Historische Artenlisten und Analyse von Ansprüchen an Substrat und Strömung

*S. Kiene, F. Nestmann*

Eine weitere Möglichkeit, Einblicke in vom Menschen möglichst gering beeinflusste Zustände zu gewinnen, ist die Auswertung historischer Artenlisten hinsichtlich autökologischer Ansprüche der Arten. Dies lässt Rückschlüsse auf die ehemals vorhandenen abiotischen Bedingungen im Habitat zu. Nachfolgend wird eine Zusammenstellung früher häufiger Makrozoobenthosarten (nach PETERMEIER ET AL. 1994), d.h. den Gewässergrund besiedelnder tierischer Organismen, bezüglich ihrer Ansprüche an Substrat und Strömung analysiert.

Eine mögliche Wiederansiedlung dieser verschwundenen oder in ihrer Verbreitung stark zurückgegangenen Arten könnte als ein Erfolg ökologischer Sanierungsmaßnahmen angesehen werden. Die Angaben zur Autökologie sind den INFORMATIONSBERICHTEN DES BAYERISCHEN LANDESAMTES FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1996) entnommen.

Abb. II-2.13 zeigt die Präferenzen hinsichtlich der Substratverhältnisse von 10 Schnecken-/Muschel- (Mollusken), 10 Eintagsfliegen- (Ephemeropteren), 1 Steinfliegen- (Plecopteren), 2 Libellen- (Odonaten) sowie 9 Köcherfliegen-Arten (Trichopteren).

Eine Art kann bei mehreren Substratarten gezählt werden. Als erforderliche Substrattypen dominierend sind Schlamm- und Sandsubstrate, jedoch werden von vielen Arten diverse Hartsubstrate (Totholz, Geröll usw.) oder Vegetationsbestände benötigt. Das Vorhandensein des gesamten Spektrums ist eine wichtige Voraussetzung für die Wiederansiedlung aller dieser Zielarten.

Die entsprechende Verteilung der Ansprüche an die Strömungsverhältnisse zeigt Abb. II-2.14. Es dominieren die Arten, die langsam bis mäßig strömendes Wasser bevorzugen, jedoch gibt es auch rheophile bzw. rheobionte und limnophile bzw. limnobionte Species. Die Darstellung unterstreicht die früher im (morphologisch vielfältig) strukturierten Strom und den Nebengewässern vorhandene und heute anzustrebende Strömungsdiversität.

Es liegen Angaben von 9 Mollusken-, 11 Ephemeropteren-, 3 Plecopteren-, 2 Odonaten- und 7 Trichopteren-Arten zugrunde. Eine Art kann mehreren Strömungstypen zugeordnet werden.

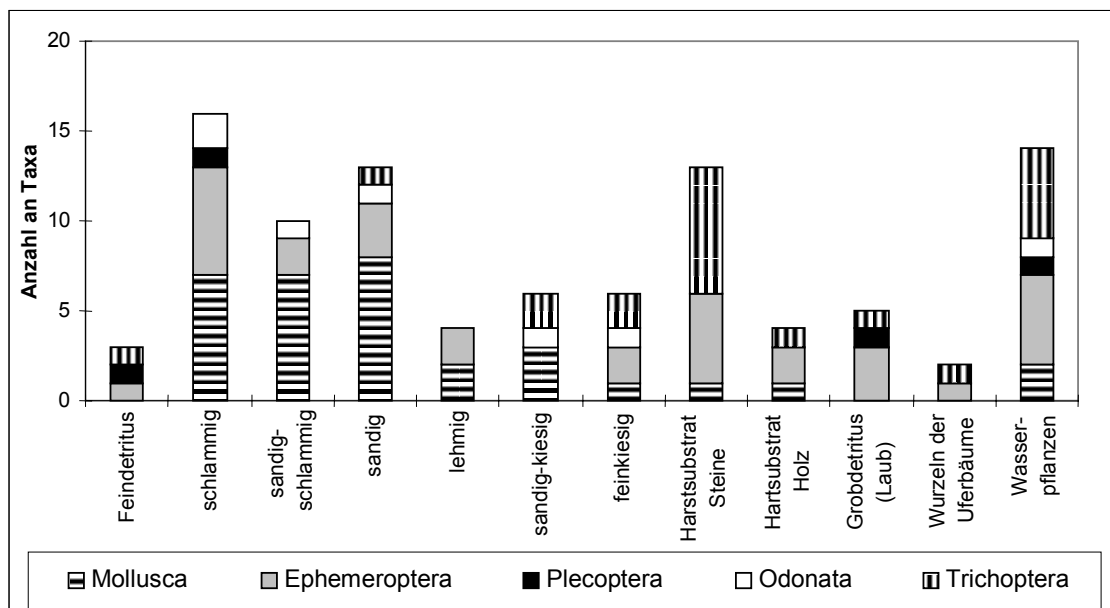


Abb. II-2.13 Ansprüche an die Substratverhältnisse.

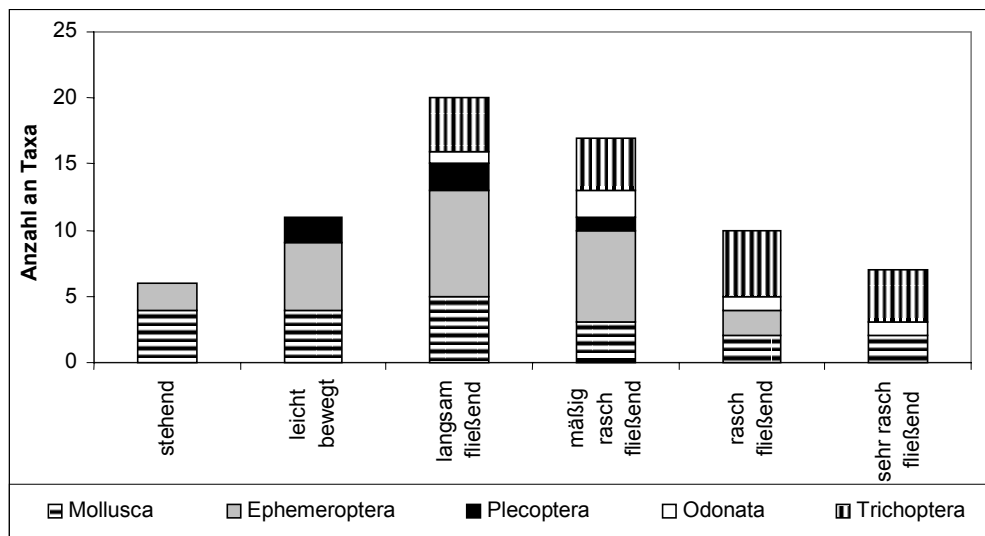


Abb. II-2.14 Ansprüche an die Strömungsverhältnisse.

Obwohl die Angaben zu den autökologischen Ansprüchen der Organismen an die unbelebte Umwelt oft noch recht lückenhaft sind, zeigen die hier dargestellten Auswertungen, dass das Vorkommen dieser Zielarten an das Vorhandensein einer hohen Substrat- und Strömungsdiversität gekoppelt ist. Entsprechende Analysen ließen sich für sämtliche Organismengruppen, für die es historische Nachweise gibt, durchführen.

## Literatur

- INFORMATIONSBERICHTE DES BAYERISCHEN LANDESAMTES FÜR  
WASSERWIRTSCHAFT HEFT 4/96 (1996): Ökologische  
Typisierung der aquatischen Makrofauna. München 1996.
- PETERMEIER, A., SCHÖLL, F., TITTIZER, T. (1994): Historische  
Entwicklung der aquatischen Lebensgemeinschaft  
(Zoobenthos und Fischfauna) im deutschen Abschnitt der  
Elbe. Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im  
Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit, BfG Bericht 0832, Koblenz, 173 S.

## II-3 Geometrie und Morphologie der Elbe (Ist-Zustandserfassung von Einzelparametern in Längs- und Querprofil)

B. Büchele<sup>1</sup>, O. Evdakov<sup>2</sup>, S. Kiene<sup>1</sup>, K. Otte-Witte<sup>3</sup>, F. Ritzert<sup>2</sup>, U. Saucke<sup>4</sup>, F. Nestmann<sup>1</sup>

1) Gliederung und Zusammenfassung der Ergebnisse

2) Datengrundlagen im GIS (Digitale Geländemodelle, Grundrissdaten des Gewässerbettes, Überflutungsflächen etc.)

3) Datengrundlagen der Gewässergeometrie und Hydraulik (Sohl- und Wasserspiegelhöhen, Uferneigungen etc.)

4) Uferbeschaffenheit im Hinblick auf vegetationsfreie Flächen (Abschn. II-3.3.4)

### II-3.1 Einführung und Grundlagen

#### II-3.1.1 Einführung

Die EU-Wasserrahmenrichtlinie fordert von den Mitgliedstaaten in den nächsten Jahren einen nachhaltig guten ökologischen Zustand der Gewässer anzustreben bzw. diesen nachzuweisen. Ein wichtiges Instrument zur Bewertung der ökologischen Funktionsfähigkeit eines Gewässers liegt dabei in der Erfassung ausgewählter Strukturparameter und ihrer Bewertung als Indikatoren für den ökomorphologischen Gewässerzustand (Gewässerstrukturgüte).

Vor diesem Hintergrund und im Hinblick auf das Kernziel des Verbundprojekts (die großräumige Erfassung und Analyse von abiotischen Parametern entlang des freifließenden deutschen Elbelaufes im Ist-Zustand) werden in diesem Kapitel wesentliche Grundlagendaten dargestellt. Im Vordergrund stehen ausgewählte *geometrische und morphologische Kenngrößen im Längsschnitt*, denen neben ihrer Rolle im abiotischen Wirkungsgefüge auch eine besondere biotische Bedeutung beizumessen ist.

Die Informationen sind aus verschiedenen Projektaktivitäten zusammengestellt (teilweise wird dabei auf weitere Kapitel im Bericht verwiesen) und vereinzelt thematisch ergänzt um Ergebnisse anderer Untersuchungen. Die angewandten Methoden sind bisweilen neuartig bzw. im Bereich der Gewässermorphologie nicht näher bekannt und hier wissenschaftlich getestet worden.

Die Ergebnisse können als Grundlage für weiterführende Untersuchungen, z.B. Bewertungen des ökomorphologischen Zustandes und wasserbauliche Aufgaben, genutzt werden. Ausdrücklich wird auf die bereitgestellten digitalen Daten und Detaildarstellungen (z.B. Längsschnittgrafiken von Einzelparametern) in der *Anlagen-CD* verwiesen.

#### II-3.1.2 Gliederung der Parameter

Im Hinblick auf die Funktion einzelner Strukturparameter im natürlichen System erfolgt i.a. eine räumliche Gliederung und Zuordnung bzw. Gruppierung zu funktionalen Einheiten (Hauptparameter). Räumlich und funktional werden drei Hauptbereiche unterschieden (mit z.T. unterschiedlichen Begriffsdefinitionen und Abgrenzungen in der Literatur), an denen sich die folgenden Abschnitte orientieren:

- **Sohle**
  - **Ufer**
  - **Umfeld**
- } Gewässerbett,
- Gewässerrandstreifen, Vorland.

Während in den letzten Jahren für kleine bis mittelgroße (< 10 m Breite) Fließgewässer weitgehend standardisierte Verfahren für die Erhebung und Bewertung von Parametern der Gewässerstruktur erarbeitet wurden (LAWA 2000), mangelt es für *große* Fließgewässer, insbesondere für Wasserstraßen, derzeit noch an praktischen Erfahrungen und einheitlichen Verfahren. Arbeiten neueren Datums zeugen von den Fortschritten auf diesem Gebiet (KERN ET AL. 2000, LUA-NRW 2001).

In Abhängigkeit der Größe (Breite) des Gewässers stellt sich die Frage der räumlichen Gliederung der Parameter bzw. der Länge der bewertungsrelevanten Teilabschnitte. Für Flüsse mit einer *Breite* > 40 m empfehlen KERN ET AL. (2000, im Auftrag der BfG) in dieser Hinsicht, basierend auf Erfahrungen in Pilotprojekten, die *Abschnittslänge 1000 m*.

Darüber hinaus empfehlen KERN ET AL. im Hinblick auf die Linienführung, Strukturelemente wie Bänke (zu denen bei Wasserstraßen ggf. auch sekundäre Strukturen wie Anlandungen in Bühnenfeldern zu zählen sind) sowie Breitenvarianz die *Bildung von Abschnittsblöcken* bezogen auf die potentiell natürliche Gewässerbreite B:

B = 80-160 m:	2 Abschnitte (2000 m),
B > 160 m:	4 Abschnitte (4000 m).

Die entsprechende Abschnittsgliederung nach LUA-NRW (2001) sieht identische Werte vor, innerhalb einer erweiterten Staffelung von  $B > 5-10$  m bis  $> 160$  m (mit  $B =$  real vorhandene Gewässerbreite).

Hiermit kann eingangs festgehalten werden, dass die im Projekt erarbeiteten Parameter mit einer *Datendichte von i.a. 100 – 1000 m im Längsschnitt* als räumlich hoch aufgelöst anzusehen sind.

### II-3.1.3 Ableitung einer morphometrisch begründeten Längsgliederung der Elbe

Für die Elbe existieren verschiedene Ansätze der großräumigen Gebietsgliederung. Je nach Blickwinkel orientieren sie sich an politischen, geomorphologischen, hydrographischen, flussbaulichen, ökologischen etc. Teilräumen und -aspekten. Naturräumliche Gliederungen für das (deutsche) Elbegebiet bzw. für den Strom vom Ober- bis zum Unterlauf sind z.B. enthalten in: ELBSTROMWERK (1898), BFG (1994a), DGJ (1993), GLAZIK (1993), IKSE (1995 und 1999), ROMMEL (2000). Einen typischen Einteilungspunkt stellt z.B. der Übergang der Elbe vom Mittelgebirgsbereich ins norddeutsche Tiefland dar.

Um bestehende Längsgliederungen für die Elbe unter morphometrischen Gesichtspunkten zu prüfen und ggf. eine Verfeinerung vorzunehmen, wurden die im Verbundprojekt erarbeiteten Daten dazu verwendet, *Laufabschnitte* abzugrenzen, die diesbezüglich *als großräumig in sich homogen* anzusehen sind. Die Datengrundlage hierfür bilden die Querprofilgeometrien und Parameter der hydraulischen Berechnungen (vgl. hierzu Kap. III-2).

Um also wesentliche Änderungen im Längsprofil zu identifizieren, wurde das im Bereich der Hydrologie bekannte Verfahren der Doppelsummenanalyse angewendet. Hierbei wurden das Wasserspiegelgefälle I und das Breite-Tiefe-Verhältnis  $B/h$  (s.u.) gegeneinander aufgetragen, jeweils als kumulative Summe aufeinanderfolgender Werte entlang des Fließweges. Die Methode ermöglicht es, mögliche *Knicke oder Krümmungen in der Darstellung* als Ausdruck für Inhomogenitäten, d.h. als Indiz für abrupte oder allmähliche Änderungen der strömungswirksamen Gewässergeometrie im Längsschnitt zu interpretieren. Kleinräumige Variabilitäten der Größen treten

in den Hintergrund; entscheidend ist vielmehr der Verlauf der Steigung der Doppelsummenlinie. Eine Zunahme der Steigung bedeutet ein abnehmendes Gefälle oder eine flachere Profilform (größeres  $B/h$ ) oder deren Kombination. Da die Parameter (I, B, h) mit dem Abfluss variieren, muss die Analyse für einzelne Abflusszustände erfolgen. Mit Blick auf das Gewässerbett wurden im vorliegenden Fall die Parameter bei Niedrig- und Mittelwasser (MNQ, MQ; hydrologische und hydraulische Längsschnitte vgl. Kap. III-1 und III-2) für den Bereich Elbe-km 0-568 zugrunde gelegt. Es ist anzumerken, dass erstens die Größen in variablen Profilständen (100–500 m) eingegangen sind, sowie zweitens drei Teilstrecken im Gesamtbild fehlen (bzw. als solche gekennzeichnet sind), was jedoch für die Methode und die abgeleiteten Aussagen praktisch ohne Bedeutung ist.

Das Ergebnis für MNQ ist in Abb. II-3.1 dargestellt, das entsprechende für MQ in Abb. II-3.2. Aus den beiden Abbildungen ergeben sich folgende Aspekte im Längsverlauf (zum Vergleich siehe auch Gefälleverlauf in Kap. III-2: Abb. III-2.10):

- *km 0 bis 34:* Dem Elbelauf ab der Staatsgrenze folgend ist eine erste (eher schwach erkennbare) Änderung der Bettcharakteristik um Pirna festzustellen, die mit dem Austritt des Stromes aus dem Elbsandsteingebirge zusammenfällt.
- *km 34 bis ca. 108:* Den Daten zufolge ergibt sich eine deutliche (knickartige) Änderung im Erscheinungsbild des Strombettes erst einige Kilometer nach Verlassen des Mittelgebirgstals, dessen Rand geographisch durch das Schloss Hirschstein markiert ist (km 96 = Ende der Oberen Elbe, nach IKSE 1999). Auch wenn der *Knickpunkt* im Längsverlauf sowohl für MNQ als auch für MQ klar erkennbar ist, ist er kilometermäßig nicht eindeutig identifizierbar, da die Daten in diesem Bereich nicht durchgängig vorliegen (Lücke km 108-121).
- *ab km 121 bei MNQ:* Wie Abb. II-3.1 durch die langgezogene *Krümmung* verdeutlicht, ändert sich bezogen auf das Niedrigwasserbett die Binnenelbe ab km ca. 121 im gesamten Verlauf allmählich und gleichförmig. Dies ist insofern erklärbar, als dass ein praktisch durchgängig mit Bühnen etc. reguliertes Strombett vorliegt, das auch bezüglich Gefälle im Laufe der Zeit weitgehend homogenisiert wurde.

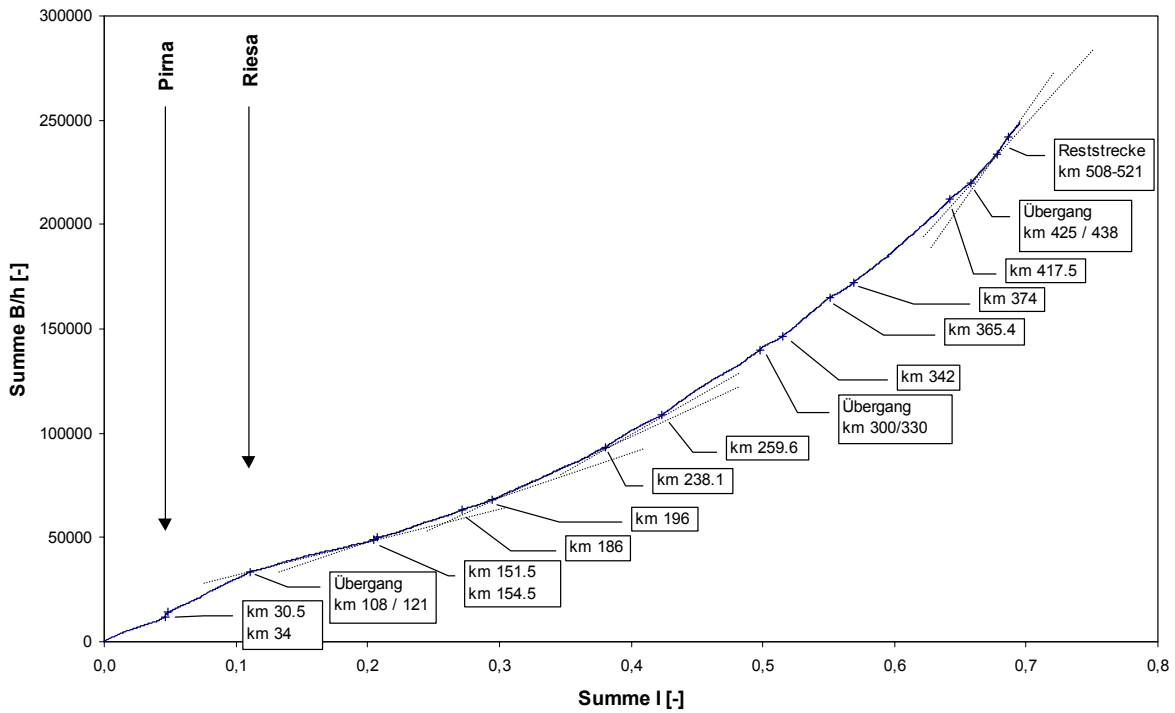


Abb. II-3.1 Doppelsummenlinie bei Niedrigwasserabfluss (MNQ) für hydraulische Parameter nach Kap. III-2: I = Wasserspiegelgefälle, B/h = Verhältnis Breite B zu mittlere Fließtiefe h (mit h = Quotient Querschnittsfläche A zu B).

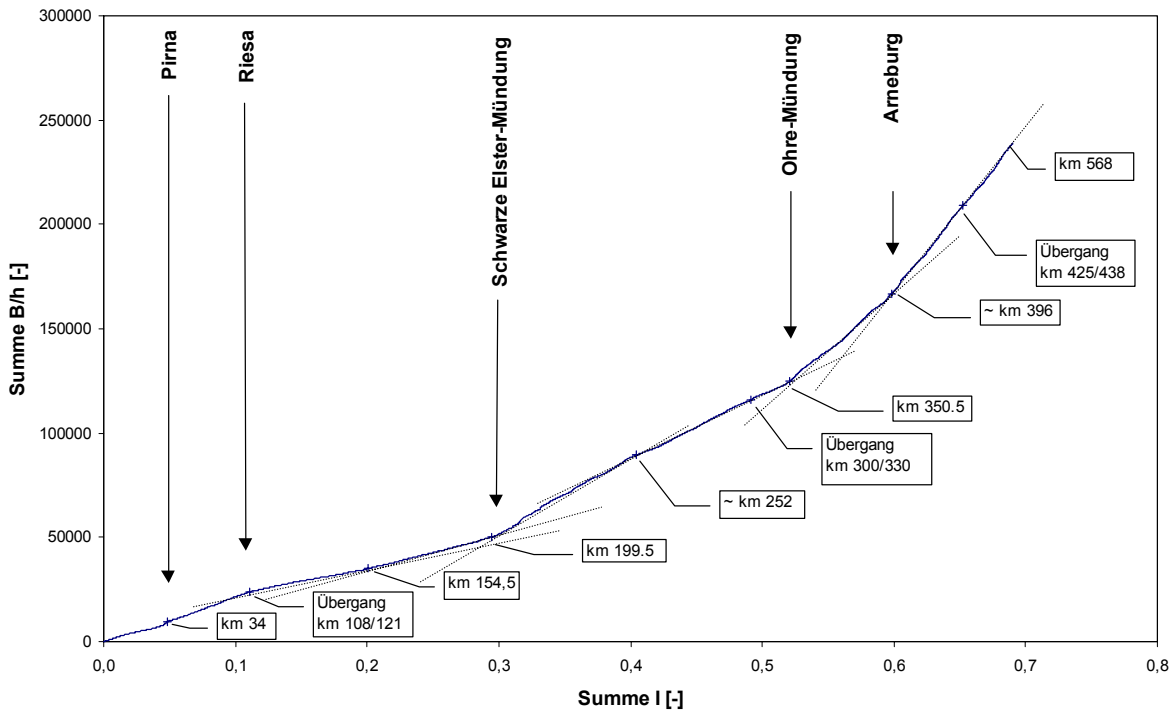


Abb. II-3.2 Doppelsummenlinie bei Mittelwasserabfluss (MQ) für hydraulische Parameter nach Kap. III-2: I = Wasserspiegelgefälle, B/h = Verhältnis Breite B zu mittlere Fließtiefe h (mit h = Quotient Querschnittsfläche A zu B).

- ca. km 121-199 bei MQ: Im Vergleich zu den Verhältnissen bei MNQ ergibt sich im Bereich bis zur Mündung der Schwarzen Elster bei MQ eine veränderte Situation. Die flachere Neigung in Abb. II-3.2 deutet auf ein größeres Gefälle

und/oder kompaktere, infolge Sohlerosion tiefer eingeschnittene Querschnitte hin. Die Strecke entspricht nach der flussmorphologisch geprägten Einteilung von GLAZIK (1993) einem Übergangsbereich zwischen Oberlauf und Oberer

Mittelbe. Ein leichter Knick ist im Bereich des Torgauer Felsens (km 154,5) festzustellen, was plausibel dem Gefälleknick im Längsschnitt und regionalen Erosionsschwerpunkt zuzuordnen ist (vgl. auch Abb. III-2.10 und Abb. II-1.15).

- *km 199-350 bei MQ*: Ab der Einmündung der Schwarzen Elster, d.h. im Bereich des Biosphärenreservates Mittlere Elbe ergeben sich (mit auslaufender Erosionsstrecke) deutlich flachere Profil- bzw. Gefälleverhältnisse, bis etwa zur Mündung der Saale. Zum Stadtbereich Magdeburg (km 300-330) sind keine Aussagen möglich. Die Neigung der Doppelsummenlinie in Abb. II-3.2 setzt sich nach Magdeburg über die „verschärft regulierte Strecke“ (km 333 bis 344) hinaus bis zur Ohremündung (km 350) fort.
- *ca. km 350-400*: Im weiteren Verlauf ergibt sich für MQ eine Änderung der Steigung ab etwa km 390, d.h. im Bereich Tangermünde bis Arneburg. Nach ROMMEL (2000) endet bei Tangermünde (km 388) eine (ehemalige) Mäanderstrecke, die zwei eiszeitliche Urstromtäler verbindet (vgl. auch Abb. II-1.1 und Abb. II-1.8 in Kap. II-1.1).
- *ab km 400 bzw. 438*: Während sich bei Niedrigwasser erst unterhalb des Mündungsbereichs der Havel (hier: Daten ab km 438) der Flachlandcharakter der Unteren Mittelbe bemerkbar macht, ist dies bei MQ den Daten nach bereits ab ca. km 390 bis 410 der Fall: geomorphologisch tritt die Elbe bei km 410 mit Erreichen der Elbwische in das Urstromtal des Elbe-Havel-Gebiets ein.
- *bis km 568*: Die gesamte Untere Mittelbe ab der Havelmündung bis zum Wehr Geesthacht zeigt einen homogenen Verlauf. Das Bild wird lediglich bei Niedrigwasser durch den Bereich der „Reststrecke“ (km 508-521) unterbrochen, deren Ausbau bekanntlich zu Kriegszeiten unvollendet blieb. Das dort größere Breite-Tiefe-Verhältnis ist auch in Abb. II-3.1 erkennbar.

Aus diesen Betrachtungen lässt sich die Empfehlung ableiten, großräumige Betrachtungen des Gewässerbetts ggf. nicht über die beschriebenen Grenzen der Laufabschnitte (Knickpunkte) hinweg vorzunehmen. Dies gilt auch für weiterführende Aussagen, die auf den zugehörigen Parametern aufbauen.

## II-3.2 Sohle

### II-3.2.1 Linienführung

Die heutige Linienführung des Stromes ist vor dem in Kap. II-1.2 beschriebenen flussgeschichtlichen Hintergrund und menschlichen Eingriffen wie Durchstichen von Flussschlingen, Anpassungen von Krümmungen und der Fixierung der Ufer zu sehen.

### Digitale Grundrissdaten

Zum Grundrissverlauf der Elbe im Ist-Zustand sind verschiedene digitale Daten in der *Anlagen-CD* verfügbar, die nach Bedarf für weitergehende Analysen und regionalspezifische Betrachtungen genutzt werden können. Es handelt sich insbesondere um georeferenzierte und attributierte Daten aus einem Geoinformationssystem (GIS ArcView-Format), die im Verbundprojekt erarbeitet wurden. Sie können durch das eigens entwickelte und auf der CD verfügbare Informationssystem visualisiert und ausgewertet werden (z.B. Ausmessen von Entfernungen).

Als Datengrundlagen zum Grundriss der Elbe liegen vor (vgl. Abb. II-3.3 und *Anlagen-CD*):

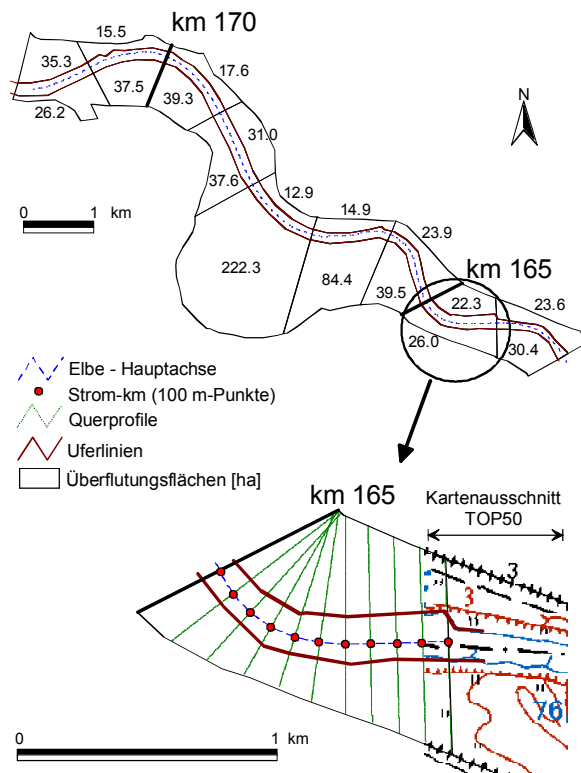
- *Elbe-Hauptachse (km 0 – 585)*  
= Gewässereinteilungslinie mit amtlicher Kilometrierung in Polygonsegmenten bzw. als Punktkoordinaten im Abstand von 100 m,
- *Uferlinien, Deichverläufe, Vorlandflächen etc.*  
erarbeitet u.a. auf Basis topographischer Karten M 1:50.000 (siehe auch Abschn. II-3.4).

Hinsichtlich der Kilometrierung ist zu beachten, dass die heutige Stationierung historisch bedingt nicht überall der tatsächlichen Flusslaufänge entspricht (Differenzen bei km 120, 140 und 250).

### Windungsgrad

Der Windungsgrad ist als der Quotient aus Flusslaufänge und Tallänge definiert.

Zur Ermittlung dieses Parameters schlagen KERN ET AL. (2000), wie eingangs angedeutet, die Bildung von Abschnittsblöcken à 4 km (für  $B > 160$  m) bzw. 2 km (für  $B = 80-120$  m) Länge vor, wobei die Nachbarblöcke ober- und unterstrom (Gesamtlänge: 12 km bzw. 6 km) für den aktuellen, d.h. mittleren,



**Abb. II-3.3** Beispieldarstellung der digitalen Datengrundlagen der Elbe im Grundriss: Gewässerachse, Uferlinien, Kilometrierung (Hektometer), Deichverläufe, Überflutungsgrenzen und -flächen ([ha]) = attributierte und georeferenzierte Daten in der *Anlagen-CD*.

Block berücksichtigt werden. Somit muss bei bekannter Flusslauflänge lediglich die entsprechende Tallänge entlang einer Auen-Mittelnachse ermittelt werden. Der resultierende Windungsgrad des Blocks wird einheitlich den (4 bzw. 2) Abschnitten auf der 1-km-Ebene zugewiesen. Die Bewertung des Parameters erfolgt auf Basis des Vergleichs mit dem Leitbild (ersatzweise auch historische Zustände).

Für *großräumige* und insbesondere für *historische* Verhältnisse wurde der Windungsgrad der deutschen Elbe von ROMMEL (2000) untersucht; als Ergebnis ist in Tab. II-1.4 (in Kap. II-1.2) der Vergleich der Zustände um 1765 und 2000 aufgeführt. Es ergeben sich je nach Abschnitt gestreckte (Windungsgrad  $> 1,0$ ) bis gewundene ( $< 1,5$ ) Verhältnisse.

Eine weitergehende Detaillierung dieser Ergebnisse erscheint hier nicht notwendig. Vielmehr kann für *künftige regionalspezifische Untersuchungen* (z.B. der Strukturgüte in Teilstrecken) der Windungsgrad anhand der hier zur Verfügung gestellten Grundrissdaten und Werkzeuge (s.o. und in der *Anlagen-CD*), beispielsweise nach der beschriebenen Methode von KERN ET AL., ermittelt werden.

### Mäandergürtelbreite und -wellenlänge

Die Breite des Mäandergürtels ist definiert als die größte durch die Windungen in einem Flussabschnitt in Anspruch genommene Breite der Talsohle (vgl. DIN 4049). Diese Größe variiert i.a. stark mit der geomorphologischen Situation der Talsohle und ist daher nur abschnittsweise leicht bestimmbar. Innerhalb einer längeren Strecke ist von sehr unterschiedlichen Mäanderschwingungsbreiten auszugehen. Als Wellenlänge der Mäander ist der Abstand zweier aufeinanderfolgender Bögen definiert. Die gewässermorphologische Bedeutung dieser Parameter liegt in der Verlagerungsdynamik (Mindestareal einer natürlichen Laufentwicklung bzw. zur Ausbildung des Windungsgrades) und damit in der naturräumlichen Entwicklung des Auenreliefs und -untergrundes. Die quantitative Bedeutung dieser Größen für die Biotik scheint nicht näher geklärt zu sein.

Nach dieser einführenden Definition können für die Elbe auf Basis der historischen Laufrekonstruktionen für den Zustand um 1730/1765 (ROMMEL 2000) folgende *Richtwerte* für Mäandergürtelbreiten (in Klammer: -wellenlängen) angegeben werden<sup>1</sup>:

- ~km 96-140: ~2000-4000 m (3000-6000 m)
- ~km 140-300: ~2500-3500 m (2500-3500 m)
- ~km 330-340: ~3500 m (2500 m)
- ~km 420-480: ~3500 m (5000-6000 m)
- ~km 540-570: ~3500 m ( $> 6000$  m)

Die Angaben können als elbespezifische Bestätigung der von KERN ET AL. vorgeschlagenen Abschnittsbildung (s.o.) aufgefasst werden. Ferner kann hierzu festzuhalten werden, dass die Faustregel, nach der die Wellenlänge in etwa der sechsfachen (YALIN & SILVA 2001) bis zehnfachen (SCHERLE 1999, unter Berufung auf verschiedene Quellen) natürlichen Bettbreite entspricht, hier in guter Näherung zutrifft (vgl. historische Bettbreiten in Kap. II-2.2). Ähnliches gilt für die Mäandergürtelbreite.

### Lauftyp, Laufverkürzung

Hierzu wird auf die historischen Laufbeschreibungen und Ergebnisse von ROMMEL (2000) verwiesen.

<sup>1</sup> Hier nicht aufgeführte Strecken sind in besonderem Maße durch die Form der Talsohle (z.B. Engtal) geprägt und zeigen daher keine entsprechende Laufform.



### Krümmungsradien

Zum Krümmungsverlauf existieren mehrere Quellen und Informationsmöglichkeiten. An erster Stelle steht wiederum die Option, für spezifische Fragen die o.g. Grundrissdaten zu verwenden. Ferner wurden im Projekt im Hinblick auf die Erfassung von vegetationsfreien Uferflächen unter anderem Krümmungsradien aus Schifffahrtskarten erfasst und hier im Ergebnis mit dargestellt (vgl. Kap. II-3.3.4). Darüber hinaus erfolgte auch die Auswertung eines schematischen Krümmungsbandes aus Längsschnittdarstellungen der WSV (Quelle: Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, Stand 1995), deren Ergebnisse in Tab. II-3.1 im Sinne eines Gesamtüberblicks über die Elbe dargestellt sind.

### II-3.2.2 Sohlsubstrate

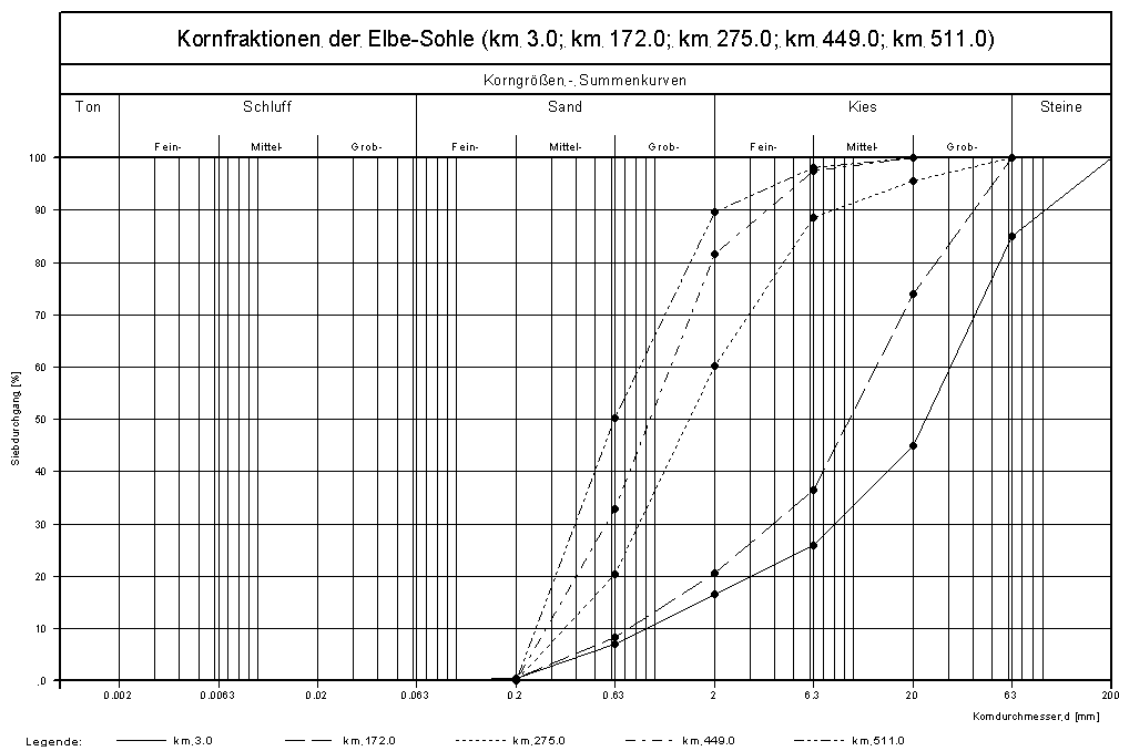
Die Kornzusammensetzung der Elbesohle wurde in einer Untersuchung der BfG (1994b) erfasst. Einen vereinfachten Längsschnitt der hierbei ermittelten Korngruppenanteile von Steine bis Mittelsand zeigt Abb. II-1.7 (vgl. SAUCKE & BRAUNS, Kap. II-1.1).

Das detaillierte Kornverteilungsband ist, gemäß dem Originalergebnis der BfG-Untersuchung, d.h. interpoliert aus den Beprobungen, in der *Anlagen-CD*

**Tab. II-3.1** Auswertung des schematischen Krümmungsbandes (Quelle: WSV): Bögen mit Radien  $\leq 1000$  m bei einer Mindestlänge der Bögen von 1000 m

Abschnitt	Bögen	Kleinste/r Bogen	Größte/r Bogen
Elbe-km	Anzahl	Radius von/bis in [m]	
0 – 50	13	500	800/ > 1000
50 – 100	13	300	900/ > 1000
100 – 150	18	450	900/ > 1000
150 – 200	16	400	750/ > 1000
200 – 250	17	400/ > 1000	500/ > 1000
250 – 300	11	450	650/ > 1000
300 – 350	5	500	900
350 – 400	4	500	800
400 – 450	6	500	1000
450 – 500	6	700	> 1000
500 – 550	5	600	> 1000
550 – 587	2	700	> 1000

zu finden. Die zugehörigen Kornverteilungen des Sohlmaterials können, wie in Abb. II-3.4 dargestellt, an jedem vollen Stromkilometer von Elbe-km 0 - 580 graphisch von der *Anlagen-CD* abgerufen werden. Für die Bereitstellung der Daten und die Erlaubnis zur Darstellung wird hiermit der Bundesanstalt für Gewässerkunde ausdrücklich gedankt.



**Abb. II-3.4** Beispieldarstellung der Kornverteilung der Sohle an verschiedenen Elbe-km (Quelle: BfG 1994b), vgl. *Anlagen-CD*.

### II-3.2.3 Sohlhöhen, Tiefenvariabilität

Die Diversität der Strömung aquatischer Habitate hängt entscheidend von der Gestalt der Gewässer- sohle ab. Die Ausbildung unterschiedlicher Bereiche (flach/tief, schnell/langsam fließend) bzw. variable Sohlstrukturen sind bestimmende Faktoren für die Lebensmöglichkeiten der Organismen.

Nach den Erfahrungen im Verbundprojekt ist die Nutzung Längsschnitt-orientierter Kenngrößen der Abiotik (wie mittlere Sohlhöhen, Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten) im Hinblick auf ihre quantitative Verknüpfung mit biotischen Größen (wie präferenziellen Ansprüchen aquatischer Organismen an die Strömung) i.a. noch mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, da aus biotischer Sicht oft kleinräumige Strukturen interessieren. Im Sinne möglichst einfacher und überschaubarer Datenerhebungen stellt sich somit die Frage, ob dieses gängige Datenmaterial (Querprofile, 1D-Hydraulik) geeignet ist, bei entsprechender Auswertung die Verhältnisse der Sohle und Strömung für biotische Betrachtungen hinreichend detailliert – aufgrund der räumlichen und zeitlichen Variabilität gerade auch statistisch auf Strecken und Zustände bezogen – zu beschreiben. Aus diesem Grund wurde im Projekt wo möglich eine weitere Verfeinerung der Längsschnittgrößen (hier: Sohlhöhen- und Tiefenvariabilität) angestrebt.

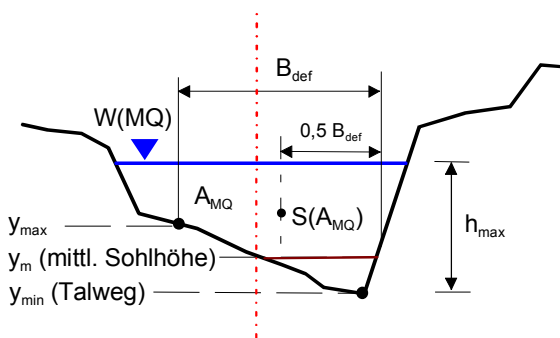


Abb. II-3.5 Schemaskizze zur Sohlhöhenermittlung ( $y_i$  [m+NN]) sowie zu resultierenden Fließtiefen (Bsp:  $h_{\max}$  [m])

Wie Abb. II-3.5 schematisch darstellt, wurde zur Auswertung der Sohlhöhen wie folgt vorgegangen. Ausgehend von der berechneten Wasserspiegellage bei Mittelwasser  $W(MQ)$  wurde an jedem Profil die Lage des Schwerpunkts  $S$  der durchflusswirksamen Querschnittsfläche  $A$  ermittelt.  $S$  definiert dabei die Mitte des Auswertebereiches der Sohle (Breite  $B_{\text{def}}$ ),

wodurch die Asymmetrie des Profils berücksichtigt wird. Um die Zunahme der Breite im Längsverlauf adäquat einzubeziehen, wurde als auszuwertende Sohlbreite „ $B_{\text{def}} = 70\%$  der Sollstreichlinienbreite“ festgelegt<sup>2</sup>, was Breiten von 100-215 m in den analysierten Teilstrecken (km 120 bis 568) entspricht. Als Ergebnis dieser Sohlhöhenauswertung ergeben sich im Querprofil der *tiefste Punkt*  $y_{\min}$  (*Talweg*) und – bezogen auf den definierten Breitenbereich – die *mittlere Sohlhöhe*  $y_m$  und der *höchste Punkt*  $y_{\max}$  in diesem Bereich der Sohle (vgl. Abb. II-3.5).

Im Längsschnitt lässt sich hiermit ein Band der Variabilität dieser Sohlhöhen darstellen, wie exemplarisch Abb. III-2.11 (in Kap. III-2 im Zusammenhang mit der Darstellung der Wasserspiegel) für eine Teilstrecke zeigt. Über mehrere hundert Meter bis Kilometer lassen sich Makrostrukturen der Sohle wie Kolke im Außenbereich und flachere Zonen im Innenbereich von Krümmungen oder Übergangsstrecken mit relativ ebener Sohle erkennen. Analog zu dieser Beispielstrecke sind weitere 20 Teilstrecken à ca. 25 km Länge in der *Anlagen-CD* verfügbar (gesamt: ca. 507 km der deutschen Binneneibe). Einen Überblick über die aus den Sohlhöhen resultierende Variabilität der mittleren und maximalen Fließtiefen bei unterschiedlichen Abflusszuständen gibt darüber hinaus Abb. III-2.17 (in Kap. III-2).

Basierend auf diesen Daten lässt sich somit ein quasi zweidimensional detailliertes Gesamtbild der Sohlhöhen- und Tiefenvariabilität im Längsschnitt zeichnen. Um zu Aussagen über die ökologische Funktion dieser Parameter (im Hinblick auf Habitatqualität, z.B. zu Strömungsdiversität, Bänke, Flachwasserzonen etc.) zu gelangen, sind sie in Kombination mit weiteren Informationen zu Uferstrukturen (s.u.) und Strömung (Kap. III-2 und Kap. III-4) zu betrachten. Denkbar ist z.B. bei gegebener Variabilität der Sohl- und Uferstrukturen einen entsprechenden Korrekturfaktor für mittlere Strömungskenngrößen (wie Wassertiefe, Fließgeschwindigkeiten) einzuführen.

<sup>2</sup> Als Sollstreichlinienbreite wird an der Elbe die planmäßige Normalbreite des Wasserspiegels zwischen den Regelbauwerken bei Mittelwasser verstanden. Die Wert 70 % stellt sicher, dass ein wesentlicher Teil der Sohlhöheninformation in die Analyse eingeht, diese aber bei starker Asymmetrie des Profils nicht durch Höhen oberhalb des Mittelwasserspiegels, d.h. unbenutzte Uferbereiche, beeinflusst wird.

## II-3.3 Querprofil und Uferstrukturen

### II-3.3.1 Breiten/Tiefen-Verhältnis (Profilform)

Das Verhältnis der Bettbreite zur mittleren Fließtiefe  $B/h$  (kurz: Breiten/Tiefen-Verhältnis) beschreibt die Querprofilform und ist als solches sehr wesentlich durch Regulierungsmaßnahmen am Fließgewässer beeinflusst. Die mittlere Fließtiefe  $h$  ergibt sich aus dem Quotient der Querschnittsfläche  $A$  zur Breite  $B$  in Funktion des Abflusses:  $B/h = B^2/A = f(Q)$ . Diese Kenngröße ist an den einzelnen Querprofilen der Fließstrecken nicht monoton steigend oder fallend, sondern es ergeben sich sowohl im Längsverlauf der Elbe als auch im Vergleich mit anderen Gewässern sehr heterogene Werte. An verschiedenen Querprofilen kann es im Einzelfall bei steigendem Abfluss und damit steigender Querschnittsfläche zu einem sehr uneinheitlichen  $B/h$ -Verlauf kommen.

Auf Basis der geometrischen und hydraulischen Projektdaten (Kap. III-2) wurde  $B/h$  abschnittsweise im Längsverlauf bestimmt und in Abhängigkeit des Abflusses aufgetragen. Zur Berücksichtigung der Zunahme der Abflussmenge im Längsverlauf, und damit zur Vergleichbarkeit verschiedener Abschnitte bei gleichen Zuständen, bietet sich die dimensionslose Darstellung durch Normierung über den hydrologischen Längsschnitt für Mittelwasser (MQ, vgl. Kap. III-1) an. Abb. II-3.6 stellt die entsprechenden Mittelwerte, Abb. II-3.7 die zugehörige Standardabweichung für verschiedene Teilstrecken dar. Hierzu können folgende Einzelheiten aufgezeigt werden.

Auffällig ist – dem Längsverlauf folgend – zunächst der relativ geradlinige Verlauf im Bereich bis km 96 (Mittelgebirgsbereich bis Ende der Oberen Elbe), der u.a. auf die enge Talform und damit geringe bzw. weniger variable Änderungen der Profilform mit zunehmendem Abfluss hinweist. Für die weiteren Verläufe, d.h. für die gesamte Mittlere Elbe, ergibt sich demgegenüber ein deutlich anderes Bild.

Im Bereich km 121 bis 199 ist als Folge der dortigen Tiefenerosion eine Verschmälerung der Profilform zu erkennen. Bis km 235 ergeben sich geringere  $B/h$ -Werte vor allem im Niedrigwasserbereich, wogegen sich bei höheren Abflüssen ( $> 2MQ$ ) deutlich veränderte Ausuferungscharakteristiken und größere Ausdehnungen der Überflutungsflächen anzeigen und zu großen  $B/h$ -Werten führen. Dies zeigt sich auch im Verlauf der Standardabweichung der Kenngröße (Abb. II-3.7).

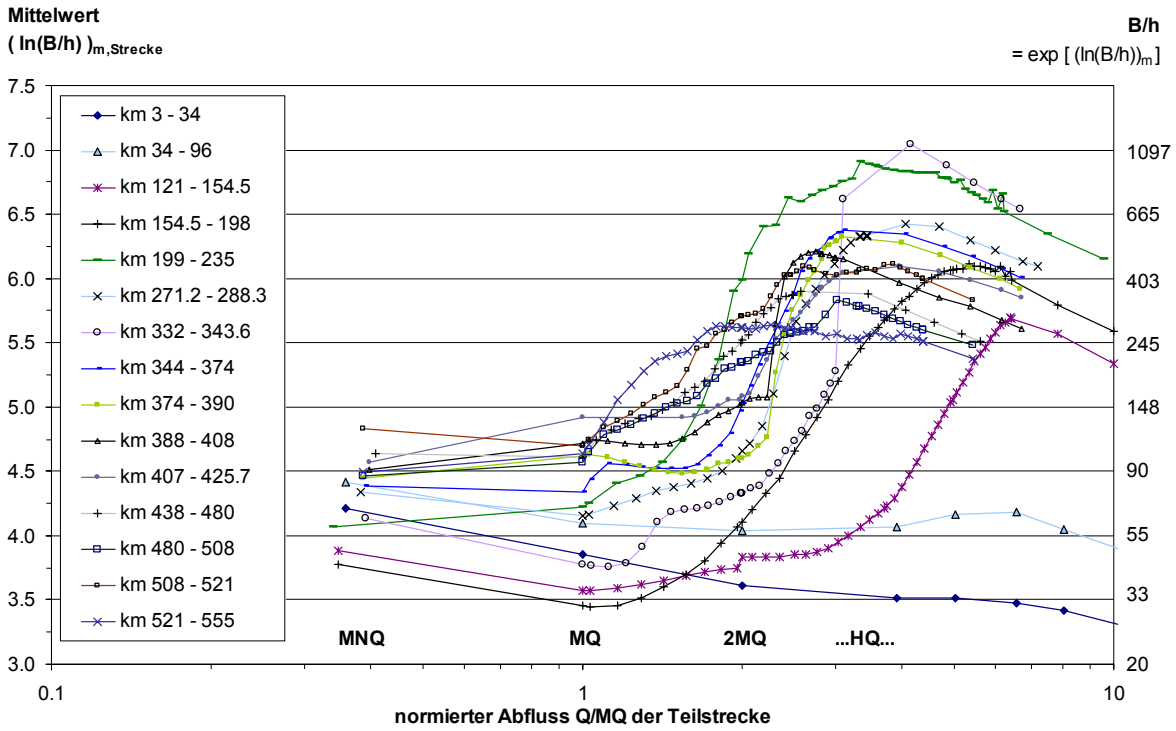
Eine infolge Sohlerosion verschmälerte Profilform ist auch unterhalb Magdeburg um km 330-340 festzustellen, wo andererseits eine rechtselbisch breite Überflutungsaue für hohe Abflüsse erkennbar ist. Die weiteren Teilstrecken der Mittleren Elbe bis um km 400/410 zeigen mehr oder weniger ähnliche Verläufe in einer variablen Bandbreite.

Flachere Profilformen, insbesondere bezogen auf die Abflussbereiche ca. MQ bis 2MQ und im Bereich der Reststrecke (km 508-521) auch darunter, sind für die gesamte Untere Mittelbe zu konstatieren. Die  $B/h$ -Verläufe in Abb. II-3.6 sind nicht mehr so stark gekrümmt (konkav-konvex) und weisen so indirekt auf typische morphologische Charakteristika eines Niederungsstromes hin, wie z.B. flachere Übergänge ins Vorland sowie die Tendenz des Strombettes zur Bank- und Inselbildung und zur Verzweigung (im Gegensatz zu einer tiefer eingeschnittenen Profilform eines gewundenen oder mäandrierenden Einbettgerinnes). Im Hochwasserbereich ist die Profilform – gerade auch an der Unteren Mittelbe – vor allem durch die Deichverläufe geprägt (und zeigt daher nicht so große  $B/h$ -Werte an anderer Stelle).

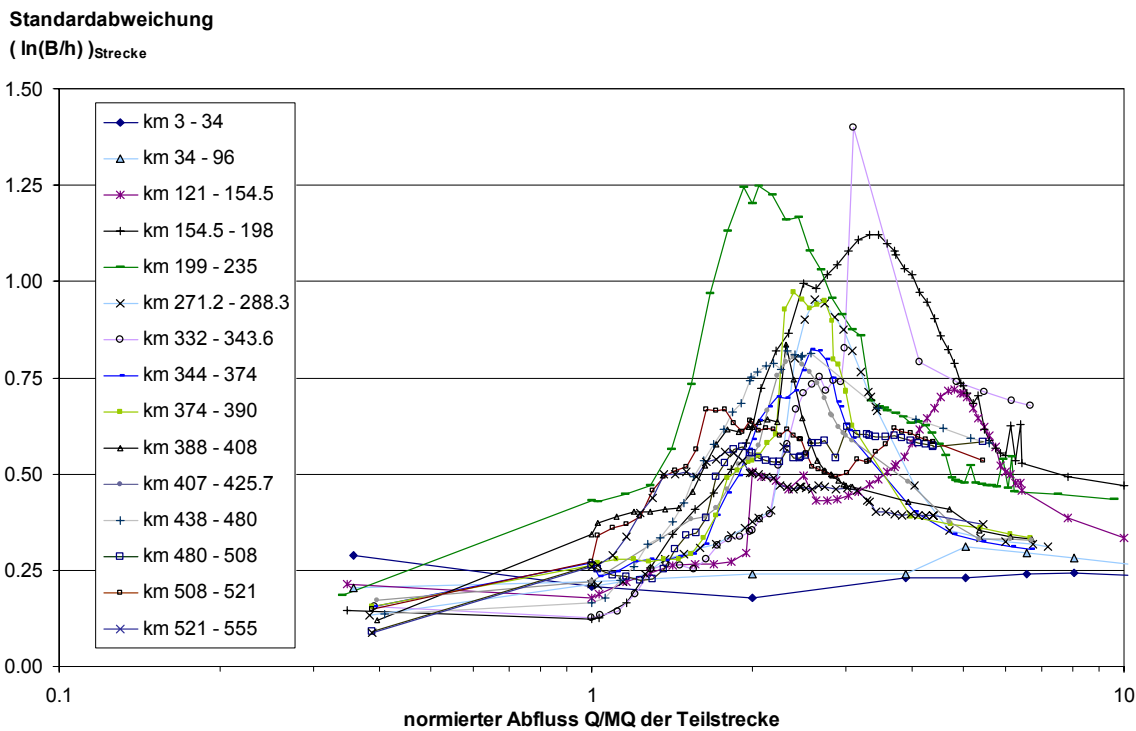
Optisch ist in Abb. II-3.6 eine *räumliche Tendenz* im Längsverlauf in Form einer allmählichen Verschiebung des *Hochpunktes der einzelnen  $B/h$ -Verläufe* in Richtung Unterlauf hin zu kleineren Relativabflüssen ( $Q/MQ$ ) bzw. hin zum Mittelwasser (MQ) zu sehen, die eine zunehmende Ausuferungsneigung bedingt. Dies kann aber nicht als eine räumliche Zunahme der *Häufigkeit* bestimmter Abflusszustände interpretiert werden (vielmehr ist eine Dämpfung der Abflussdynamik infolge Retention entlang des Gewässerlaufs zu berücksichtigen), sondern ist den *zum Unterlauf hin flacher werdenden Reliefbedingungen*, gerade auch im Uferbereich, zuzurechnen.

### II-3.3.2 Breitenvarianz

Bezüglich Häufigkeit und Ausmaß des räumlichen Wechsels der Gewässerbettbreite stellt sich i.a. die Frage nach der relevanten Wasserspiegelhöhe (i.d.R. Breite bei Mittelwasser oder bordvollem Abfluss). Breitendarstellungen zur Elbe finden sich in diesem Band in Kap. II-2.2 und Kap. III-2: hieraus gehen historische und aktuelle Breiten im Längsschnitt bzw. als statistische Verteilungen in Teilstrecken der Elbe hervor. Bei Bühnenausbau ergibt sich eine quasi sekundäre Breitenvarianz (vgl. Abb. II-2.7).



**Abb. II-3.6** Mittelwerte der Breiten/Tiefen-Verhältnisse (B/h) in Funktion des Abflusses für verschiedene Teilstrecken entlang der Elbe. Anm.: zur besseren Vergleichbarkeit Darstellung mit Normierung auf MQ (der Teilstrecke) und Logarithmierung.



**Abb. II-3.7** Standardabweichung der Breiten/Tiefen-Verhältnisse (B/h) in Funktion des Abflusses für verschiedene Teilstrecken entlang der Elbe. Anm.: zur besseren Vergleichbarkeit Darstellung mit Normierung auf MQ (der Teilstrecke) und Logarithmierung.

### II-3.3.3 Breite und Neigung der Ufer zwischen Niedrig- und Mittelwasser

Auch im Hinblick auf die Ufer bieten die o.g. Querprofile und Wasserspiegellagen eine Datengrundlage mit i.d.R. großer Informationsdichte (Längsabstände  $100\text{-}500\text{m} \leq 1\text{-}2$  Gewässerbreiten) und gestatten eine relativ einfache Beschreibung der Ufergeometrie.

Als ökologisch besonders interessant ist dabei die Wasserwechselzone zwischen Niedrig- und Mittelwasser einzustufen, z.B. im Hinblick auf Flachwasserbereiche und strömungsberuhigte Zonen.

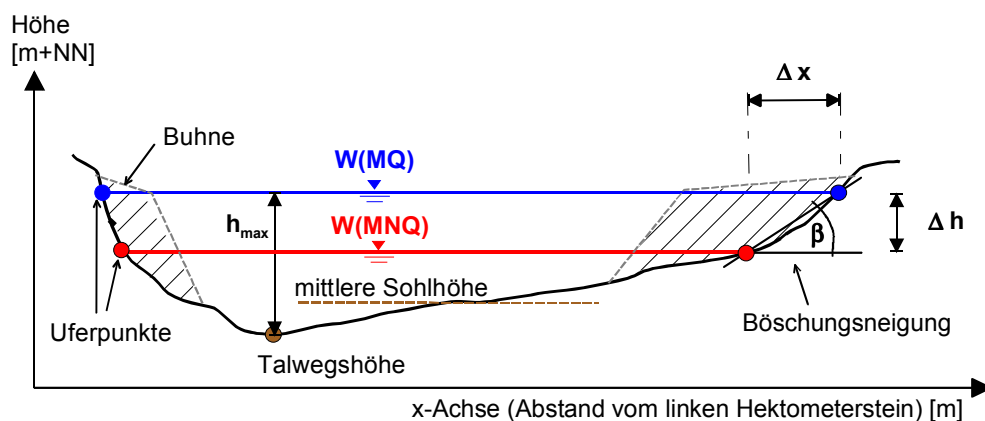
Die Erfassung der Neigung und Breite dieser Uferzone (und damit ihrer flächenmäßigen Ausdehnung) wurde im Projekt nach dem in Abb. II-3.8 gezeigten Schema durchgeführt. Die Parameter ergeben sich durch die querschnittsbezogene Bestimmung der Uferpunktkoordinaten für die Wasserstandsverhältnisse bei MQ (Mittelwasser) und MNQ (Niedrigwasser, vgl. Kap. III-2) und den daraus resultierenden Differenzen  $\Delta x$  in der Horizontale und  $\Delta h$  in der Vertikale für die linke und die rechte Uferseite.

Das Ergebnis dieser Auswertung ist exemplarisch in Abb. II-3.9 für die Strecke Elbe-km 275-285 und in Abb. II-3.10 als Überblick über die Mittlere Elbe (linkes Ufer) dargestellt; weitere Teilstrecken sind in der *Anlagen-CD* zu finden. Aus den Abbildungen lassen sich gut Längsstrukturen wie Prall- und Gleit-

ufer erkennen (vergleiche Abb. II-3.9: Breiten der Wasserwechselzone von ca. 5 - 100 m und mittlere Neigungen von ca. 1:5 - 1:60 bezogen auf Niedrig- und Mittelwasserspiegel). Im Längsverlauf der Mittleren Elbe ist eine zunehmende Variabilität der Böschungsneigungen mit flacheren Bereichen und größeren Uferbreiten sichtbar (ergleiche Abb. II-3.10: Neigungen bis zu 1:50 – 1:100, woraus Breiten von bis zu > 150 m bezogen auf die zugehörigen Wasserspiegeldifferenzen resultieren). Interessant und denkbar erscheint es, solche Längsschnittdaten zu verwenden um lokal gewonnene Daten und Erkenntnisse mit hoher räumlicher Dichte (z.B. Untersuchungen in einzelnen Bühnenfeldern) vereinfacht auf größere Strecken zu übertragen.

### II-3.3.4 Uferbeschaffenheit im Hinblick auf vegetationsfreie Flächen

Der gegenwärtige Zustand des Gewässerausbaus beschränkt sich im wesentlichen auf Maßnahmen an der Gewässersohle, einen ausgeprägten Bühnenausbau und einen geringen Uferlängsverbau. Dieser Sachverhalt hat dazu geführt, dass heute im Bereich der Bühnenfelder und am Ufer in unterschiedlichen Ausdehnungen Flächen ohne Vegetationsbewuchs, im folgenden mit vegetationsfreien Flächen bezeichnet, angetroffen werden.



**Abb. II-3.8** Schemaskizze zur Ermittlung des Abstandes der Uferpunkte (bzw. der Uferbreite  $\Delta x$ ) und der mittleren Böschungsneigung ( $\tan \beta = \Delta h / \Delta x$ ) bezogen auf Wasserstände bei Niedrig- und Mittelwasserabfluss (MNQ, MQ).

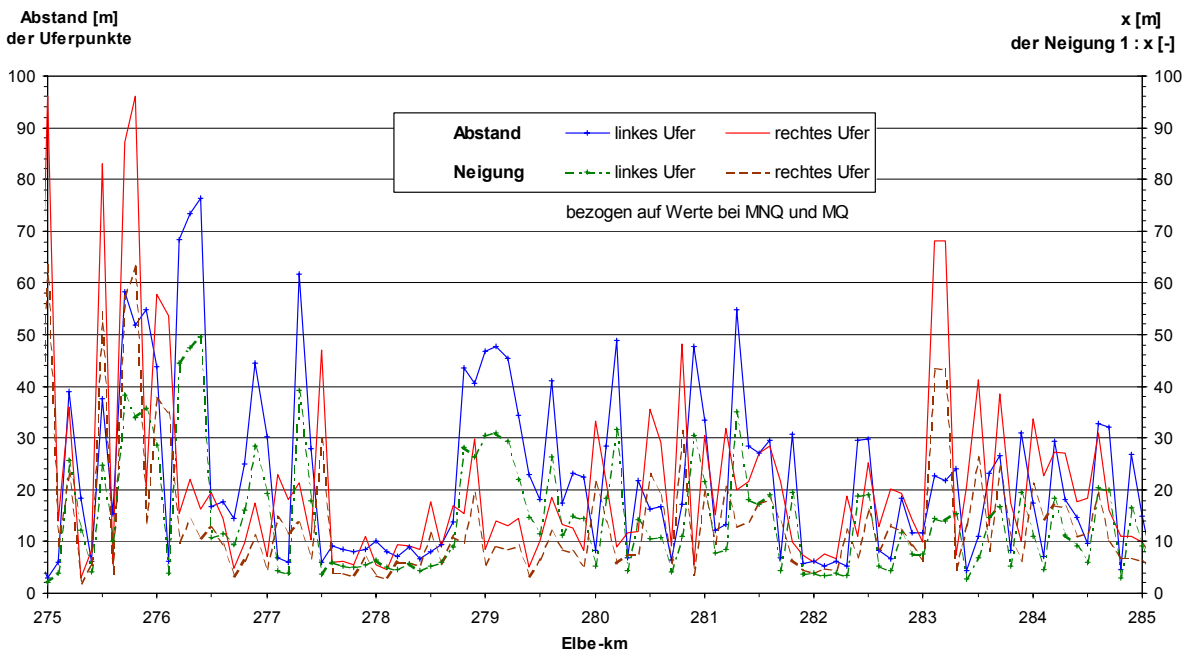


Abb. II-3.9 Beispieldarstellung (Strecke km 275-285) zum Abstand der Uferpunkte bzw. zur Uferbreite  $\Delta x$  und Böschungsneigungen  $1 : x$  (mit  $x = \Delta x/\Delta h$ , vgl. Abb. II-3.8) bezogen auf Wasserstände bei Niedrig- und Mittelwasserabfluss (MNQ, MQ).

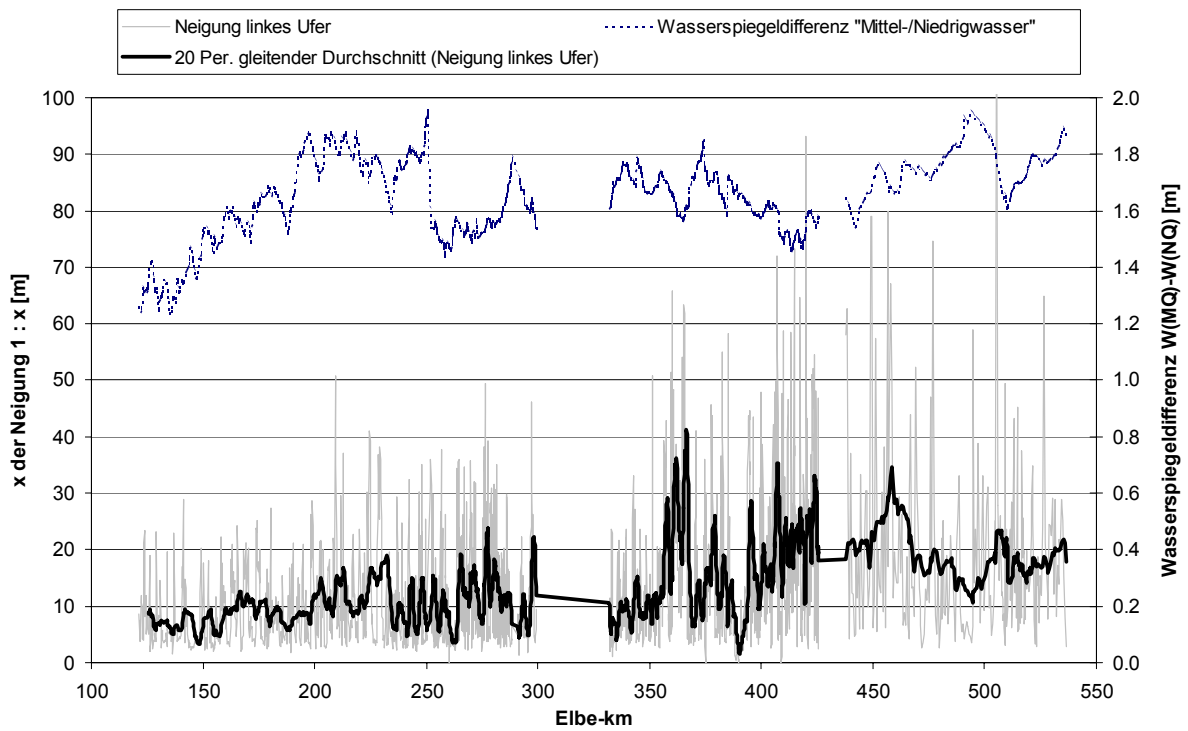


Abb. II-3.10 Längsschnitt (Übersicht Mittlere Elbe) zur Variabilität der mittleren Böschungsneigungen  $1 : x$  einschließlich Darstellung eines gleitenden Durchschnitts sowie Wasserspiegeldifferenzen zwischen Niedrig- und Mittelwasserabfluss (MNQ, MQ).

Derartige Zonen, hervorgerufen durch Erosions- und Akkumulationsvorgänge infolge der Wasserstandsdynamik, stellen gegenwärtig für die Ökologie des Fließgewässers Flächen von großer Bedeutung dar. Die großen, noch vor 200 Jahren vorhandenen Umlagerungsflächen entlang der Elbe fungierten je nach Wasserstand als wertvolle Flachwasserzonen, amphibische Übergangsbereiche oder trockenfallende Pionierstandorte mit Sukzessionsbeginn. Im Zuge des zunehmenden Gewässerausbaus und der Unterhaltung ging die morphologische Vielfalt der natürlichen Uferbereiche in erheblichem Maße zurück, so dass die oben beschriebenen Flächen zum Teil als Ersatzlebensräume für viele hochspezialisierte Tier- und Pflanzenarten angesehen werden.

Über die Ausdehnung und Verbreitung der vegetationsfreien Flächen liegen nur in äußerst geringem Umfang Daten vor (HANNAPPEL & PIEPHO 1996). Ihr Vorkommen hängt mit einer Reihe von Parametern zusammen, zu denen neben der Wasserstands-

dynamik und der komplexen Strömungssituation im Uferbereich auch Parameter wie Art der Uferbefestigung, Abstand der Buhnen, Flusskrümmung und Böschungsneigung im Uferbereich zu zählen sind.

Für die zukünftige Bewertung der einzelnen Flussabschnitte im Hinblick auf ihre ökologische Bedeutung ist es von Interesse, Kenntnisse über die flächenmäßige Ausdehnung dieser Zonen im Verlauf des Flussschlauches und - nach Möglichkeit - die sich ergebenden Korrelationen zu einfachen flussgeometrischen Parametern zu erlangen. Zielstellung ist hierbei, gegebenenfalls ein Werkzeug (Methode) zur einfachen Abschätzung der Ausdehnung von vegetationsfreien Flächen in Abhängigkeit des gegebenen Ausbauzustandes des Flusses bzw. flussgeometrischer Parameter bereitstellen zu können. Im übrigen kann eine entsprechende quantitative Zustandsbewertung die Basis für die Bewertung zukünftiger Entwicklungen bieten.

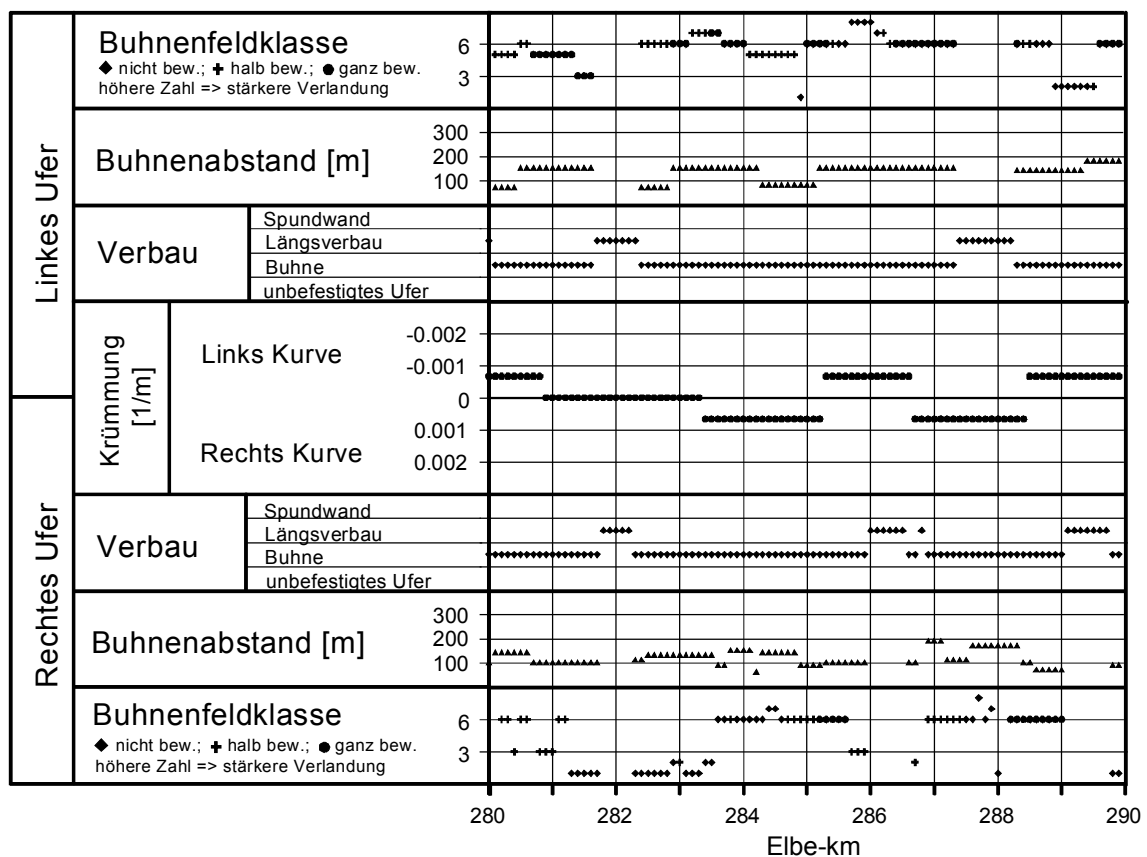


Abb. II-3.11 Übersichtsdarstellung der Uferverhältnisse in Bezug auf Flusskrümmung, Verbauverhältnisse, Buhnenabstand und Buhnenfeldklasse für den Flussabschnitt Elbe-km 280 – 290; weitere Daten für den Bereich Elbe-km 170-350 in der *Anlagen-CD*.

Tab. II-3.2 Klassifizierungsschema zur Einteilung in Bühnenfeldklassen.

Verfüllungsform		Bewuchs der verlandeten Fläche		
		nicht bewachsen	halb bewachsen	ganz bewachsen
0	nicht verlandet		nicht vorkommend	nicht vorkommend
1	kaum verlandet		nicht vorkommend	nicht vorkommend
2	dreieckig abnehmend			
3	dreieckig zunehmend			
4	geschwungen abnehmend			
5	geschwungen zunehmend			
6	halbkreisförmig, mittel verlandet			
7	unregelmäßig aber stark verlandet			
8	voll verlandet			nicht vorkommend
9	wie 6, mit Insel			nicht vorkommend
Legende		vegetationsfreie Fläche	Fließrichtung →	
		bewachsene Fläche		

**Datengrundlage und Parameter**

Für die Bestimmung der flächenmäßigen Ausdehnung der vegetationsfreien Flächen entlang eines Fließgewässers wie der Elbe stellen Luftbilder bei Niedrigwasserführung eine geeignete Datengrundlage dar. Hierbei wurde zweigeteilt vorgegangen.

In einem ersten Schritt ist zunächst für einen 180 km langen Flussabschnitt (km 170-350) eine Übersichtsdarstellung über die vorliegenden Uferverhältnisse auf Basis von Ortho-Luftbildern und Schifffahrtskarten erarbeitet worden. Wie in Abb. II-3.11 für den Flussabschnitt km 280-290 exemplarisch dargestellt, sind für das rechte und linke Ufer hierfür Krümmung, Verbauverhältnisse, Bühnenabstand und Bühnenfeldklasse aufgeführt. Die Einteilung in

Bühnenfeldklassen erfolgte auf dem in Tab. II-3.2 dargestellten Klassifizierungsschema rein optisch.

In einem zweiten Schritt wurde für detailliertere Untersuchungen der Flussabschnitt Elbe-km 271,8 bis 290,2 im Bereich des Biosphärenreservats Mittlere Elbe gewählt. Die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse und Zusammenhänge (HINKEL 1999) beruhen auf einer Farbluftbildserie (vgl. Abb. II-3.12) im Maßstab 1 : 4.500 aus dem Jahre 1992 (Abfluss am Pegel Aken:  $Q = 145 \text{ m}^3/\text{s}$ ), Querprofilaten, Wasserspiegellagen und Schifffahrtskarten der Elbe im Maßstab 1 : 10.000 aus dem Jahre 1985.



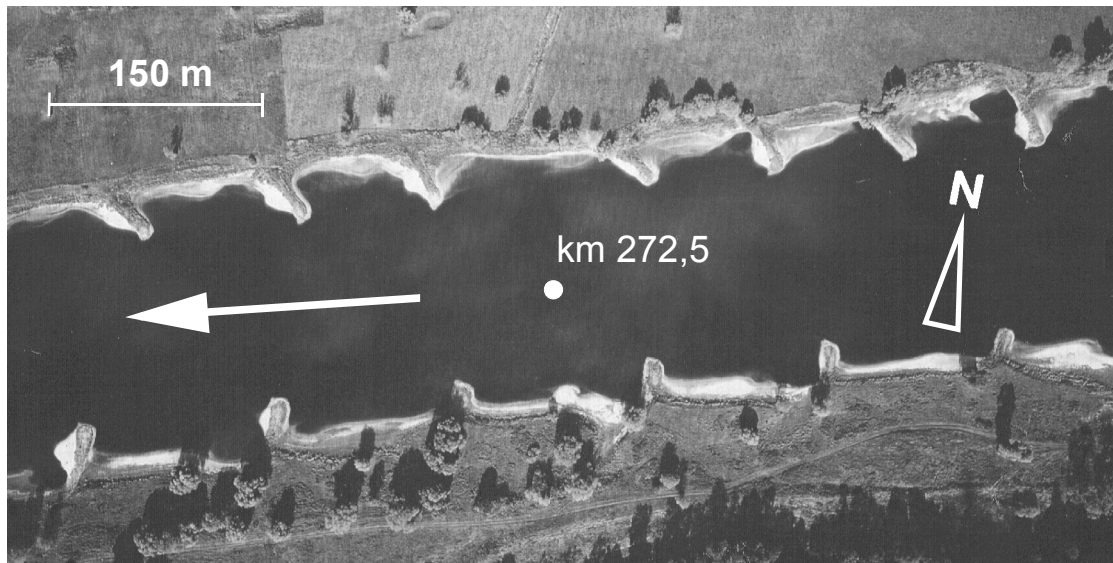


Abb. II-3.12 Exemplarische Darstellung eines Farbluftbildes in Schwarz-Weiß-Darstellung, Elbe-km 272,5 (Quelle: WSD Ost 1992).

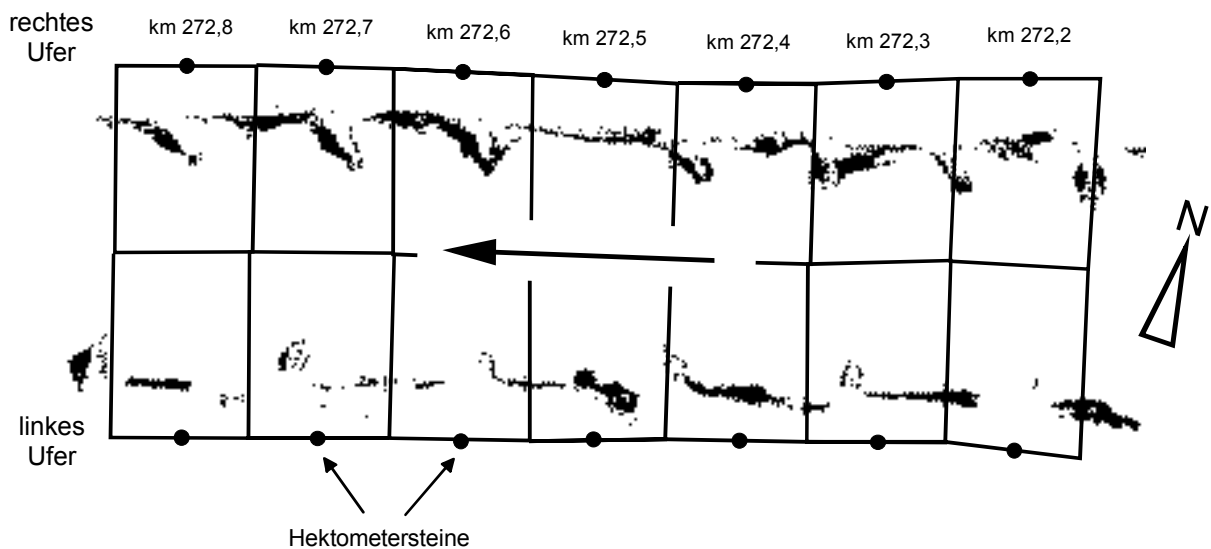


Abb. II-3.13 Ergebnis der digitalen Bildbearbeitung für den Flussabschnitt Elbe-km 272,2 - 272,8 mit Darstellung der vegetationsfreien Flächen je Hektometerabschnitt.

Die Auswertung der aufgeführten Datensätze wurde mittels eines Geographischen Informationssystems (GIS) durchgeführt. Die Luftbilder wurden hierzu mit einer Auflösung von 300 dpi und 256 Graustufen digitalisiert, mit Hilfe von topographischen Karten georeferenziert und im Hinblick auf eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung in den Randbereichen digital bearbeitet. Die Reduzierung auf eine Graustufenauflösung ist möglich, da die vegetationsfreien Flächen in allen Spektralbereichen durch niedrige Grauwerte gekennzeichnet sind und somit der Informationsverlust als äußerst gering eingestuft wird. Die Klassifizierung in vegetationsfreie bzw. nicht-vegetationsfreie Flächen erfolgt mit

dem Schwellenwertverfahren (HILDEBRANDT 1996), bei dem ab einem definierten Grauwert die Fläche als vegetationsfrei bezeichnet wird, so dass als Resultat ein Binärbild vorliegt. Der optimale Schwellenwert wurde mittels optischen Vergleichs zwischen Binärbild und Luftbild festgelegt. Nachfolgend werden die ermittelten vegetationsfreien Flächen den jeweiligen Hektometerabschnitten gemäß der in Abb. II-3.13 dargestellten Einteilung dem rechten bzw. linken Ufer zugeordnet.

Zu Betrachtungen in Bezug auf Korrelationen zwischen den vegetationsfreien Flächen und des Ausbauzustandes des Flusses bzw. flussgeometrischen Parametern wurden die Parameter Flusskrümmung,

Buhnenabstand und Böschungsneigung in der Wasserwechselzone herangezogen. Die Flusskrümmung wurde auf Basis der Querprofil Datensätze und des Mittelwasserspiegels gemäß der in Abb. II-3.14 aufgezeigte Vorgehensweise bestimmt. Der Buhnenabstand wurde aus den Schifffahrtskarten ermittelt und mit Hilfe einer Schablone den einzelnen

Hektometerabschnitten für das rechte und linke Ufer zugeordnet (vgl. Abb. II-3.15). Die Böschungsneigung wurde aus den Querprofil Datensätzen und den Wasserspiegeln für Mittelwasser (MW) und Mittleres Niedrigwasser (MNW), ebenfalls für das rechte und linke Ufer, errechnet (vgl. Abb. II-3.8).

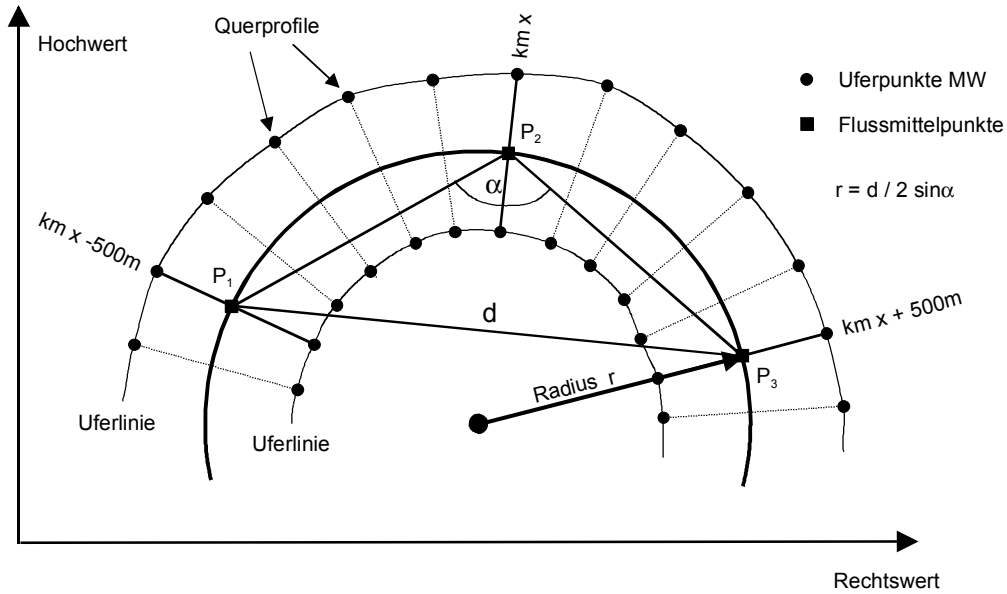


Abb. II-3.14 Ermittlung des Krümmungsradius, (hier für P2).

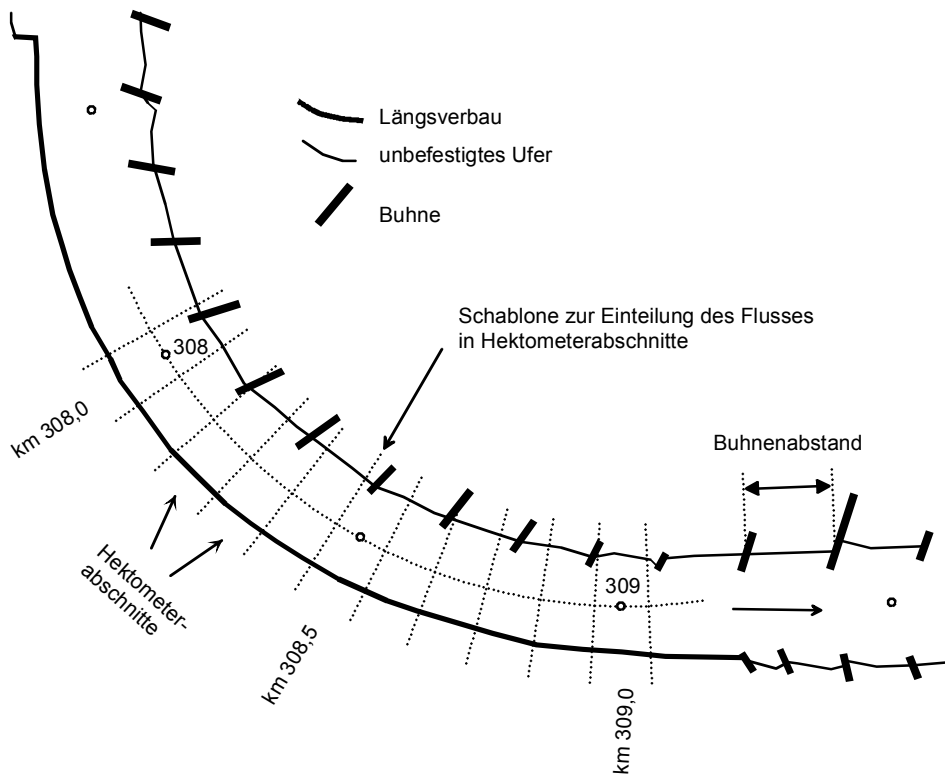


Abb. II-3.15 Ausschnitt aus der Schifffahrtskarte (verändert) mit Darstellung der Schablone zur Einteilung des Flusses in Hektometerabschnitte und der Definition des Buhnenabstandes.

Die Verteilung der erläuterten Parameter über den betrachteten Abschnitt kann Abb. II-3.16 entnommen werden. Hierbei sind folgende Gegebenheiten augenfällig:

- In Flusskrümmungen sind im Innenkurvenbereich die Böschungsneigungen kleiner als im Außenkurvenbereich (Streich- bzw. Prallhang).
- In Flusskrümmungen sind im Innenkurvenbereich die vegetationsfreien Flächen größer als im Außenkurvenbereich.
- In starken Flusskrümmungen sind im Innenkurvenbereich die Buhnenabstände groß und im Außenkurvenbereich klein bzw. ein Buhnenverbau ist hier nicht vorhanden (Buhnenabstand = 0 m).

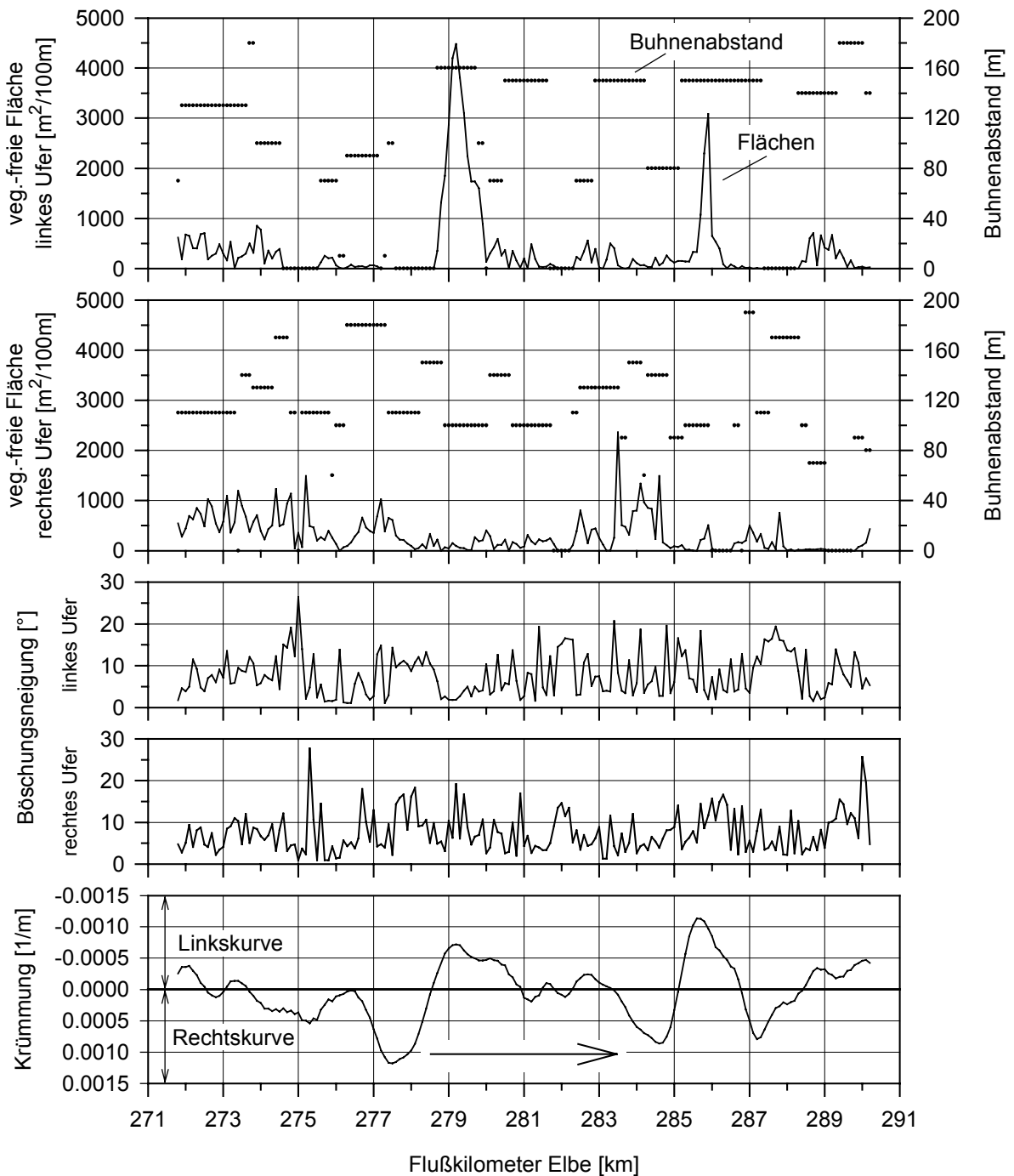


Abb. II-3.16 Darstellung der Flusskrümmung, der Böschungeneigungen, der vegetationsfreien Flächen und der Buhnenabstände für das rechte und linke Ufer, aufgeteilt nach Hektometerabschnitten für den Betrachtungsbereich zwischen Elbe-km 271,8 und 290,2.

### Korrelationsbetrachtungen und Schlussfolgerungen zu vegetationsfreien Flächen

Wie vorstehend erläutert, war neben der Bereitstellung einer fundierten Datenbasis zu der Verbreitung der vegetationsfreien Flächen entlang eines Streckenabschnittes der Elbe auch Zielstellung der Arbeiten, Korrelationen zwischen den Flächen und den aufgeführten Parametern aufzuzeigen. Hierfür wird, wie in Abb. II-3.17 dargestellt, einer vegetationsfreien Fläche eine positive Flusskrümmung zugeordnet, wenn diese im Bereich der Außenkurve liegt, bzw. eine negative Flusskrümmung, wenn die Fläche im Bereich der Innenkurve angetroffen wird.

Sinnfällig ist zunächst ein Zusammenhang zwischen Flusskrümmung und Größe der zugehörigen vegetationsfreien Fläche auf der Innen- bzw. Außenkurve. Dieser Zusammenhang ist, unterteilt nach unterschiedlichen Bühnenabstandsklassen, in Abb. II-3.18 dargestellt. Ersichtlich ist, dass bei geringen Bühnenabständen nur kleine vegetationsfreie Flächen angetroffen werden und diese insbesondere im Bereich der Außenkurve liegen. Die größten vege-

tationsfreien Flächen befinden sich im Bereich der Innenkurve bei großen Bühnenabständen. Jedoch ist ebenso augenfällig, dass Korrelationsanalysen auf dieser Datenbasis infolge der erheblichen Variationsbreite nicht zu akzeptablen Abhängigkeiten führen, die mit Zahlenwerten untermauert werden könnten. Gleicher Sachverhalt gilt, wenn, wie in Abb. II-3.19 abgebildet, der in Abb. II-3.18 aufgeführte Zusammenhang im Hinblick auf unterschiedliche Böschungsneigungen aufgetrennt wird. Gleichfalls nimmt hier mit abnehmender Böschungsneigung die Variationsbreite der vegetationsfreien Fläche in Abhängigkeit der Flusskrümmung zu.

Aufgrund dieser Datenbasis muss hierzu abschließend festgestellt werden, dass mit diesen einfachen Parametern die Verbreitung der vegetationsfreien Flächen alleine nicht erklärt werden kann. Der Datenbestand müsste vielmehr in Richtung auf Parameter wie dreidimensionale Strömungssituation und Sedimentzusammensetzung ergänzt werden, um in Richtung auf die oben aufgeführte Zielstellung weitergehende Aussagen machen zu können.

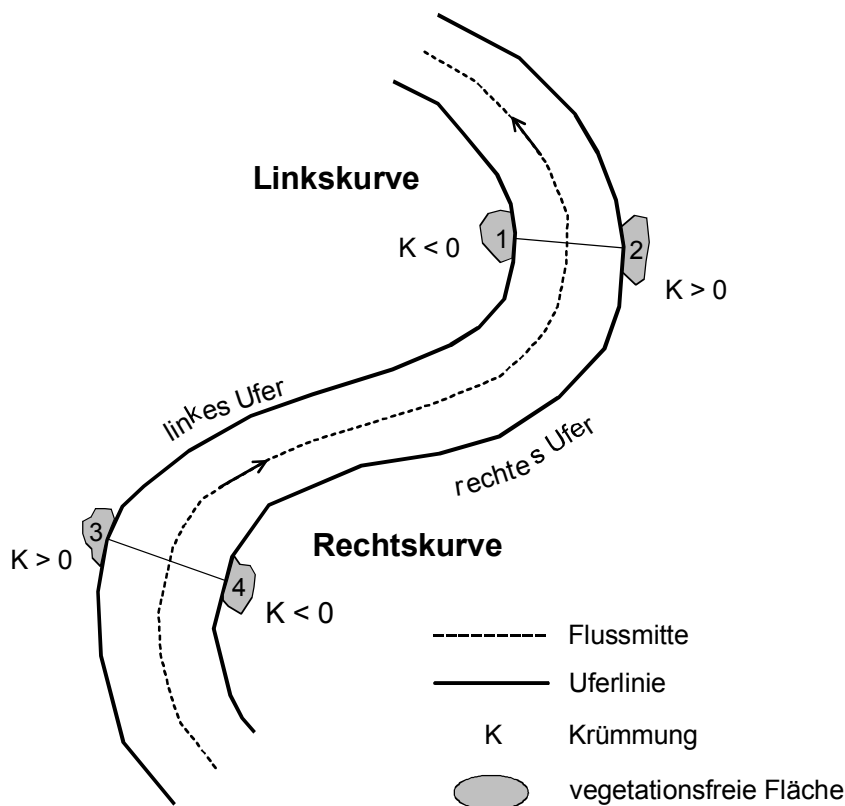


Abb. II-3.17 Prinzipische Skizze zur festgelegten Zuordnung von vegetationsfreien Flächen zur Flusskrümmung für die Korrelationsbetrachtungen.

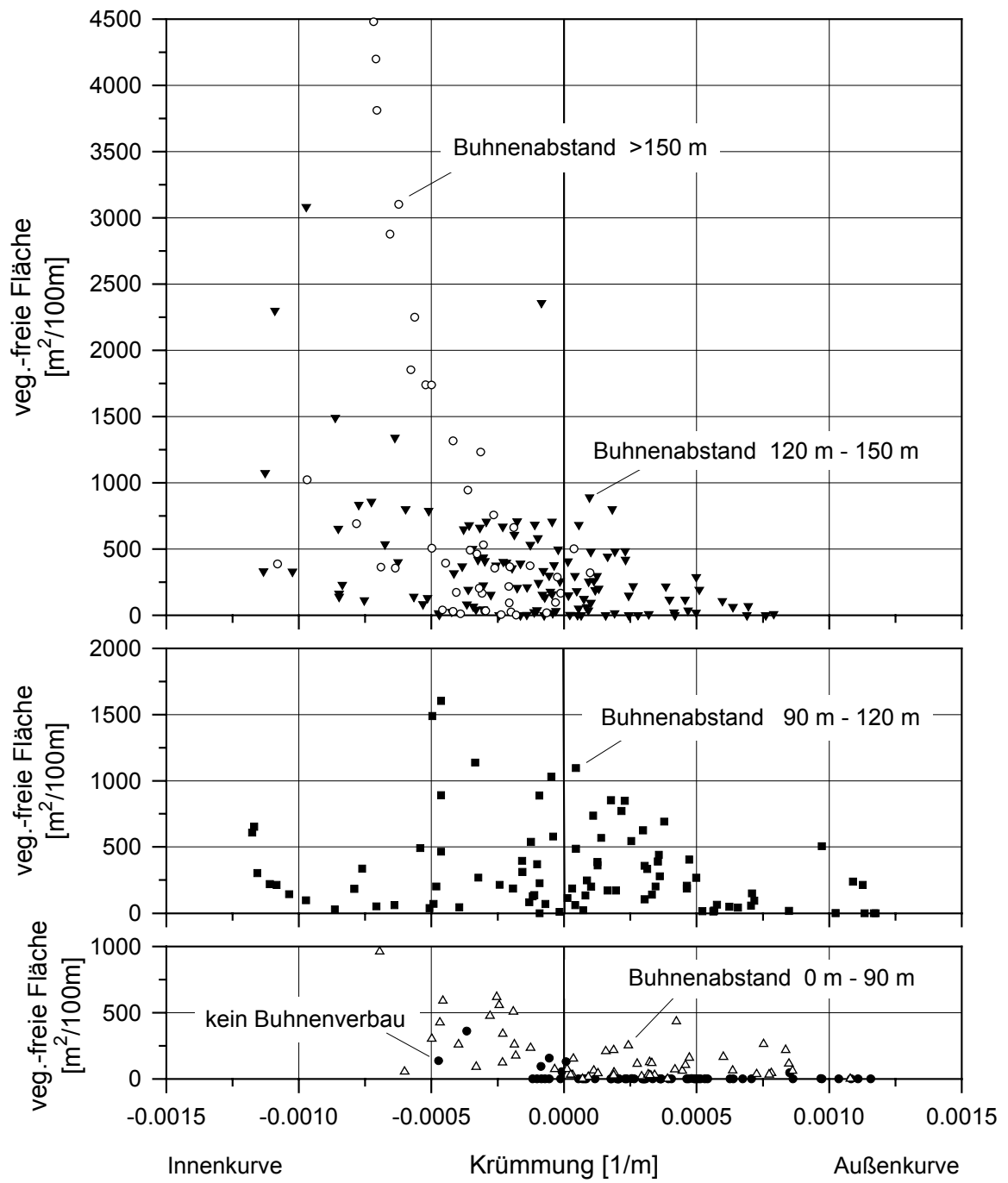


Abb. II-3.18 Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flusskrümmung und vegetationsfreier Fläche, aufgeteilt nach zugehörigem Bühnenabstand.

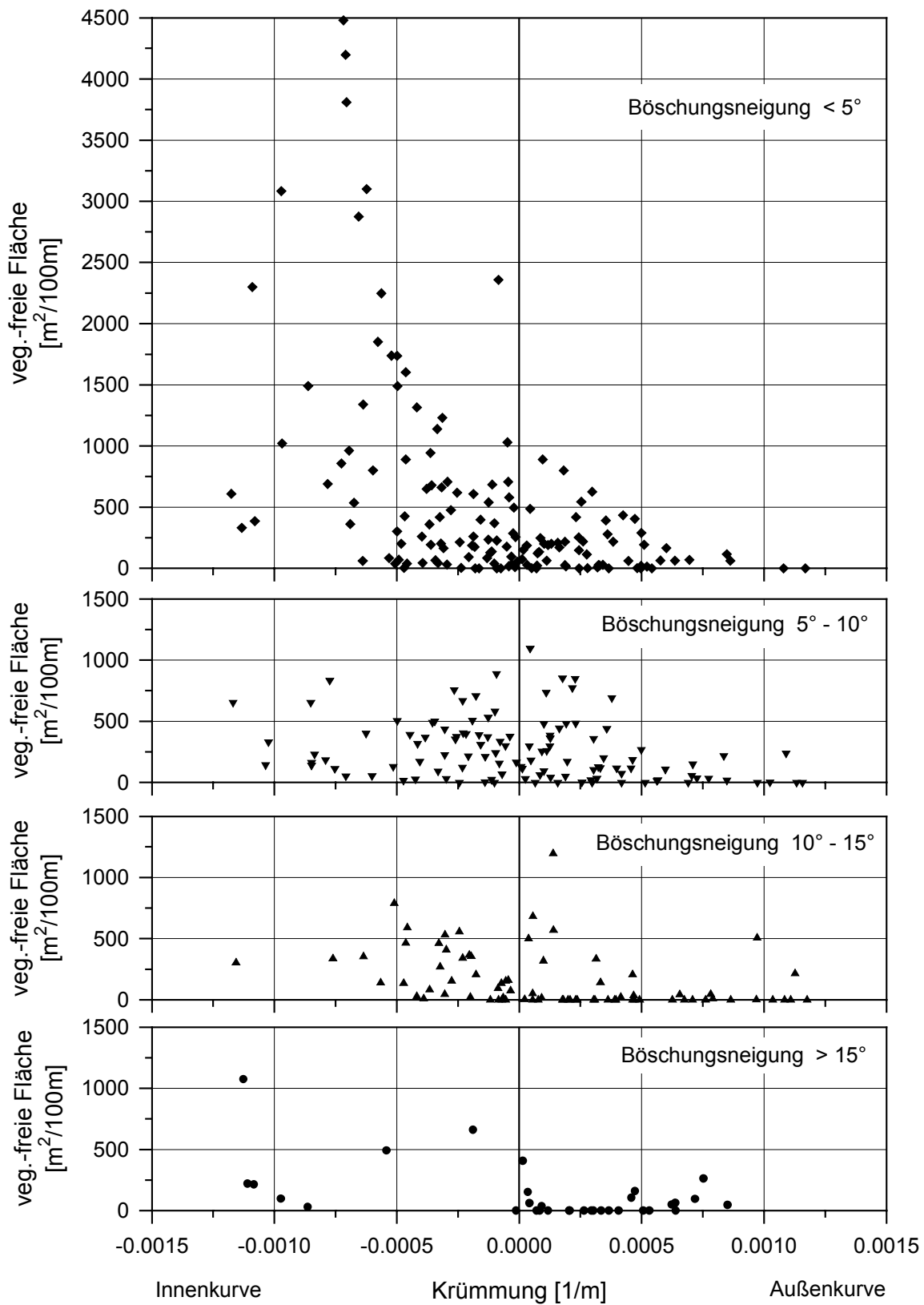


Abb. II-3.19 Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flusskrümmung und vegetationsfreier Fläche, aufgeteilt nach zugehöriger Böschungsneigung.

**Ökologischer Einschub – Ufer**

S. Kiene

Der Uferbereich größerer Ströme ist im unverbauten Zustand ein dynamischer Grenzlebensraum, der zahlreichen speziell angepassten Organismen Lebensraum bietet.

Aus ökologischer Sicht bildet ein relativ instabiles und somit dynamisches Ufer ebenso einen Lebensraum, wie ein stabiles. Die Stabilität der Ufer bestimmt dabei die Eignung und potentielle Nutzung als Lebensraum für Tier- und Pflanzenarten. An relativ stabilen Ufern kommt es zur Ausbildung einer charakteristischen Uferzonierung, die nicht nur die Vegetation, sondern auch die Fauna umfasst. Instabile Ufer bieten durch ihre Dynamik ständig neue Lebensräume, es entstehen immer wieder offene Sand- bzw. Kiesflächen, die z. B. von diversen Libellenarten als Laichplätze benötigt werden oder von ausbreitungsaktiven, jedoch konkurrenzschwachen Pionierarten besiedelt werden. Als Maß für die Uferdynamik kann beispielsweise der Anteil an vegetationsfreien Flächen an der gesamten Fläche herangezogen werden.

Viele Insekten z. B. benötigen für die Eiablage Kiesbänke und Schotterfluren, deren ständige Neubildung nur durch die Dynamik des Abflusses gewährleistet wird. Diese Populationen sind in der Regel nicht an eine Örtlichkeit gebunden, für die Sicherung ihrer Bestände ist jedoch der Erhalt der Flusssdynamik erforderlich.

Die Breite und Gestalt des Uferstreifens ist für den Sauerstoffhaushalt, die Biomasseproduktion und die Selbstreinigungskraft des Gewässers bedeutsam und damit insgesamt für seine ökologische Stabilität (IKSE 1994).

*Literatur:*

IKSE (1994): Ökologische Studie zum Schutz und zur Gestaltung der Gewässerstrukturen und der Uferandregionen der Elbe. Magdeburg.

GALLUSER W.A., SCHENKER, A. (1992): Die Auen am Oberrhein. Birkhäuser Verlag, Basel.

**II-3.4 Vorland, Überflutungsbereiche****II-3.4.1 Gegenstand der Darstellung**

Überschwemmungsgebiete sind nach §32 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG von 1986) fachtechnisch abzugrenzen und amtlich festzusetzen. Der aktuelle Stand der Ausweisung der Überschwemmungsgebiete an der Elbe im Rahmen der Hochwasservorsorge ist in IKSE (2001) auf Landesebene zusammenfassend dargestellt.

Die nach EU-Wasserrahmenrichtlinie geforderte Bewertung des ökologischen Zustands konzentriert sich - bezogen auf das Umfeld des Gewässers - in erster Linie auf die Habitatqualität infolge Flächennutzung (z.B. Anteil naturnaher Geländestreifen und Auenstrukturen) sowie die Abflusssdynamik (Retentionsfunktion der Überflutungsgebiete, Ausuferungshäufigkeit); vgl. LAWA (2000), KERN ET AL. (2000).

Beide vorgenannten öffentlichen Aufgaben und Interessenschwerpunkte (Hochwasserschutz und Auenökologie) können im Projektergebnis mit den hier nachfolgenden Grundlagendaten unterstützt werden. Sie betreffen die Parameter, die im Zusammenhang mit der Topographie und der Hydrodynamik stehen.

**II-3.4.2 Topographische Datengrundlagen**

Die digitale Erfassung der Vorlandbereiche bis zu den heutigen Überflutungsgrenzen im Projekt basiert im wesentlichen auf den o.g. Querprofilen und auf topographischen Karten der Landesvermessungsverwaltung im Maßstab 1:10.000 (TK10) bis 1:50.000.

Die Verarbeitung von *Höhen- und Strukturinformationen der Vorländer* wie Höhenlinien, Bruchkanten etc. aus topographischen Karten (TK10) und ihre Kombination mit Querprofilpeilungen im Fluss zu digitalen Geländemodellen (DGM) ist in Kap. III-2 beispielhaft für eine Strecke beschrieben (Abschnitt III-2.2.2) und bildete im Projekt die Grundlage zur Erstellung hydraulisch-numerischer Strömungsrechnungen, zur Ermittlung von Speichervolumina potentieller Deichrückverlegungen und zur Abgrenzung von Überflutungsflächen entlang der natürlichen Hochufer (ohne Deich). Die DGM-Erstellung im Projekt beschränkte sich dabei in der Hauptsache auf die hydraulisch zu modellierenden Abschnitte im Land Sachsen-Anhalt (vgl. Abb. II-3.20), wozu eine spezifische Digitalisiergenehmigung eingeholt wurde (siehe hierzu Kap. III-2). Digitale Höhendaten für den hochwasserrelevanten Bereich der Elbe waren

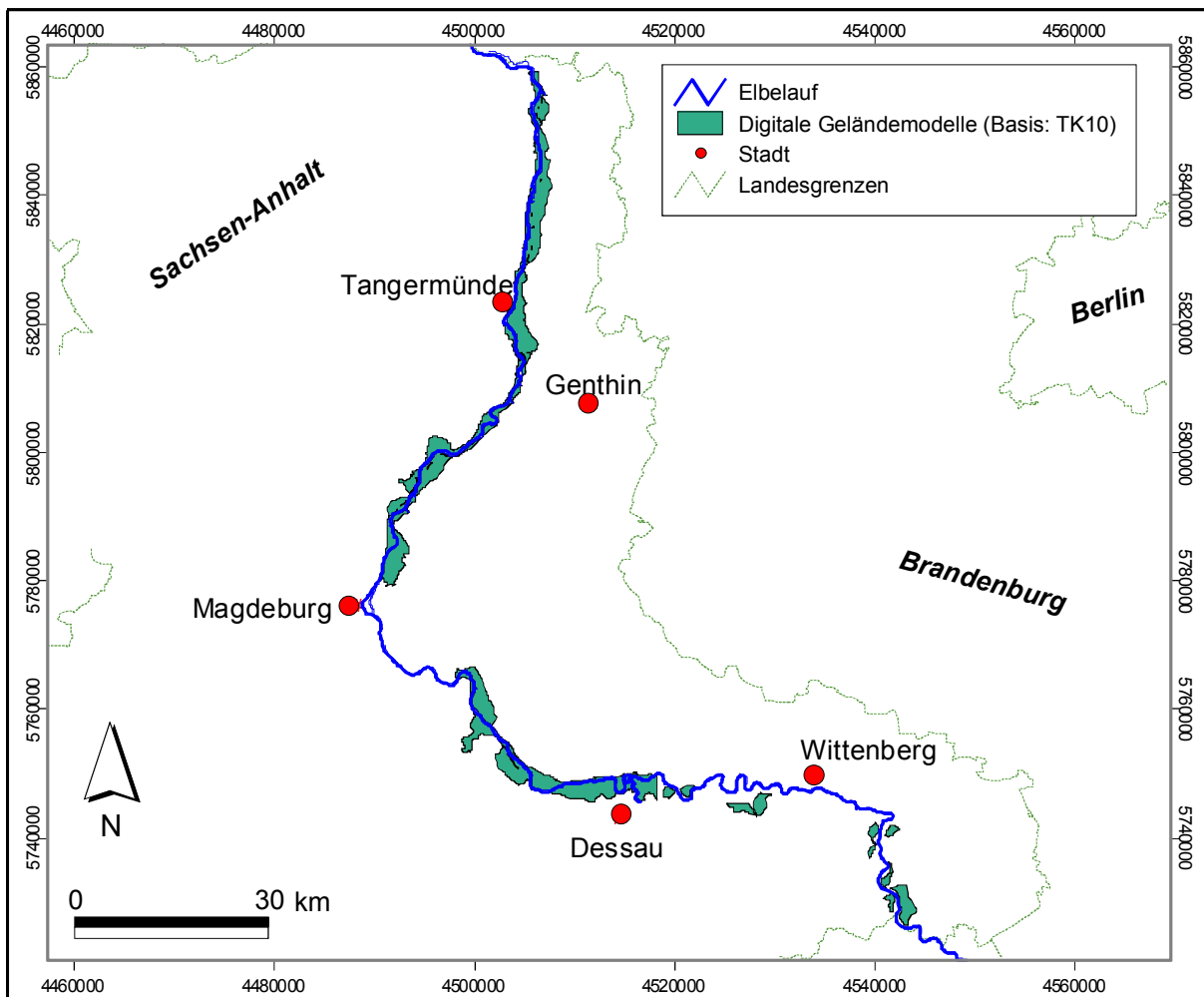


Abb. II-3.20 Übersicht erstellter digitaler Geländemodelle (DGM) im Verbundprojekt (Gesamtfläche: ca. 305 km<sup>2</sup>); Zweck: Erstellung hydraulisch-numerischer Modelle (Kap. III-2) und Simulation der Retentionswirkung von Deichrückverlegungen (Kap. III-3).

zum Zeitpunkt der Bearbeitung nicht oder nur lokal für einzelne Elbeabschnitte und bei entsprechendem Kostenaufwand verfügbar. In absehbarer Zukunft sind hochauflösende Höhendaten der deutschen Binnenelbe auf Basis aktueller Befliegungen zu erwarten, die in Abstimmung zwischen der Bundesanstalt für Gewässerkunde und der Landesvermessungsverwaltung länderübergreifend erstellt werden (siehe im Internet unter: <http://elise.bafg.de/?3738>). Die im Projekt erfassten Höhendaten (Querprofile der Bundeswasserstraßenverwaltung sowie Vorlandtopographie auf Basis topographischer Karten der Landesvermessung) unterliegen den auf den Forschungszweck beschränkten Nutzungsbedingungen.

### II-3.4.3 Überflutungsflächen

Auf Grundlage der o.g. Daten (vgl. Abschn. II-3.2.1 und II-3.4.2) wurden mittels Geoinformationssystem die Überflutungsflächen durchgängig entlang der

deutschen Binnenelbe abgeleitet (digital abgegrenzt). In den Bereichen ohne Deiche (natürlicher Geländeanstieg) wurde zur Ermittlung der Wasser-Land-Grenzlinie ein Hochwasserscheitelabfluss der Jährlichkeit  $T_n = 100$  a (HQ100, vgl. Kap. III-1 und III-2) zugrunde gelegt. Entlang der sächsischen Elbe bis km 100 konnten aufgrund fehlender Höhendaten und Deichlinien keine Abgrenzungen im Vorland vorgenommen werden. Die im Projekt erfassten Überflutungsflächen beginnen somit am Rand des Mittelgebirgsbereichs zwischen Meißen und Riesa.

Wie eingangs in Abschnitt II-3.2.1 (vgl. Abb. II-3.3) dargestellt, liegen im Ergebnis die Überflutungsflächen als georeferenzierte GIS-Daten (Flächenpolygone des Vorlandes mit zugehörigen Attributen wie Flächengröße [ha] und Kilometrierung) dem Bericht in der *Anlagen-CD* bei und stehen damit für weitere Fragestellungen zur Verfügung. Insgesamt stellen sich die erfassten Überflutungsflächen im Längsverlauf wie folgt dar.



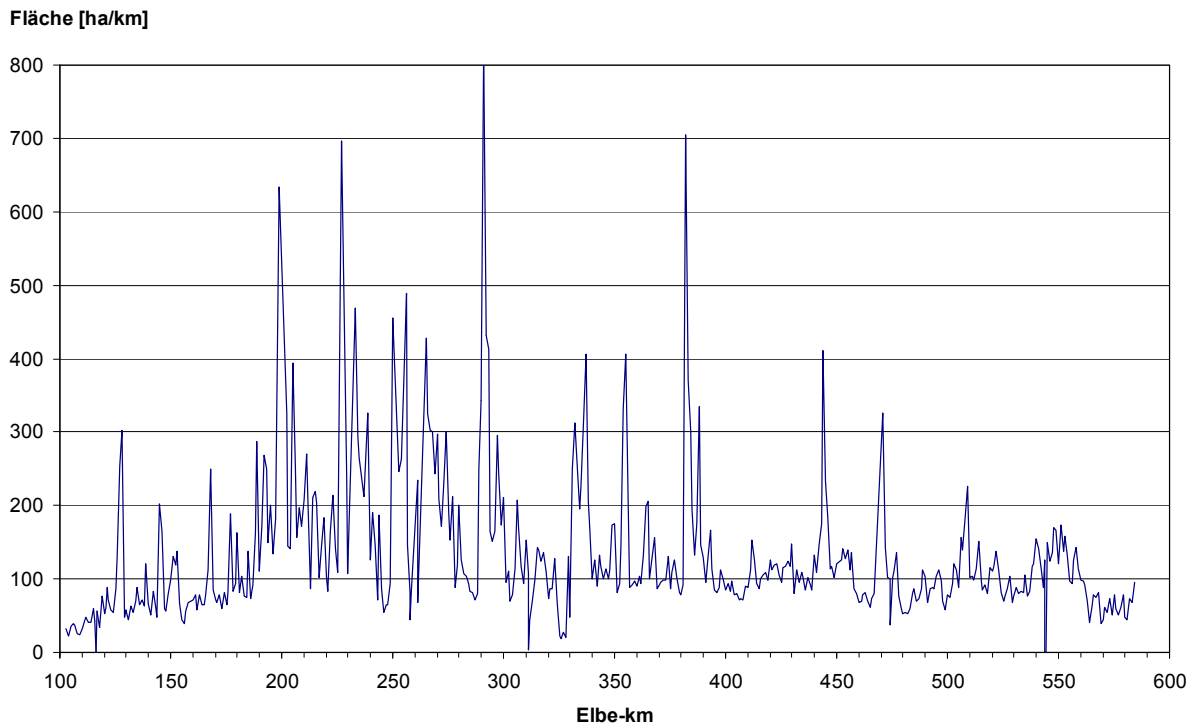


Abb. II-3.21 Erfasste Überflutungsflächen (Summe rechtes+linkes Vorland in [ha / lfd. km]) entlang der Mittleren Elbe im GIS.

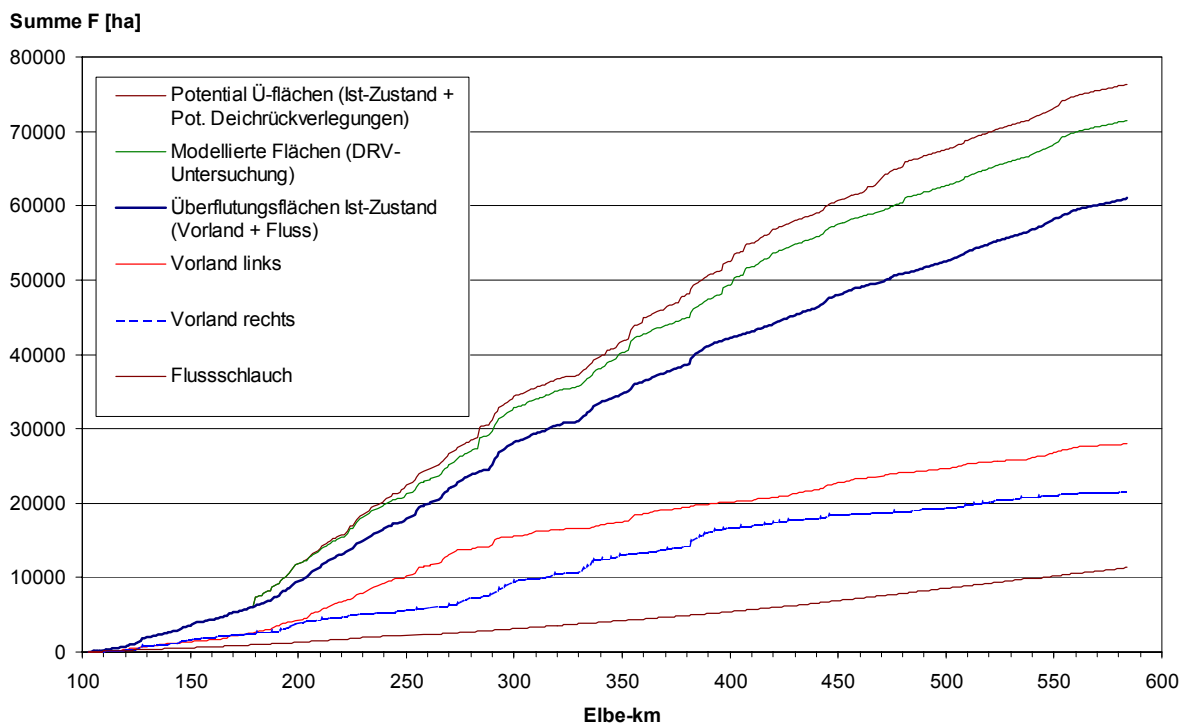


Abb. II-3.22 Flächensumme (ha) der Überflutungsflächen im Ist-Zustand entlang der Mittleren Elbe sowie deren Anteile im Vorland und Flussschlauch (ohne Mündungsbereiche der Nebenflüsse), ergänzt um die Summe potentieller Deichrückverlegungsflächen sowie der im Projekt bezüglich Wirkung auf die Abflussverhältnisse untersuchten Deichrückverlegungsflächen (s. Kap. III-3); Anm.: Ablesung in der Legende von unten nach oben wie im Bild.

Abb. II-3.21 und Abb. II-3.22 zeigen die Überflutungsflächen mit Vorlandanteilen entlang der Elbe (km 102 bis 584), wobei die größten Flächenanteile im Ist-Zustand (ca. 22.000 ha = 35% der Streckensumme) auf den Bereich km 180 bis entfallen. Er-

gänzend hierzu sind die durch Deichrückverlegung potentiell reaktivierbaren Flächen abgebildet, sowie der Anteil dieser Flächenpotentiale (ausgewählte Standorte), die im Projekt hinsichtlich Retentionswirkung untersucht wurde (vgl. Kap. III-3).

### II-3.4.4 Ausuferungshäufigkeit

Zur Einschätzung der Ausuferungshäufigkeit für größere Streckenabschnitte wurden erneut die o.g. Querprofilvermessungen herangezogen. Im Abstand von 500 m wurden aus den Profilen getrennt für jede Uferseite der Höhenpunkt abgegriffen, ab welchem nach fachlicher Einschätzung von einer *deutlichen* Ausuferung aus dem Bett und Überflutung der Vorländer ausgegangen werden kann. Dieser Punkt liegt ggf. über dem bordvollen Abfluss des Gewässerbetts im flussnahen Vorland (z.B. auf einer Uferrehne). In einem weiteren Schritt wurden diese Höhenpunkte in Bezug zu charakteristischen Wasserspiegellagen gesetzt (z.B. relative Höhe des Ausuferungspunktes über Mittelwasserniveau). Die Auswertung erfolgte in einem Projektstadium, in dem noch einzelne Strecken der hydraulischen Modellierung (vgl. Kap. III-2) ausstanden, so dass die Ergebnisse bei Bedarf zu erweitern bzw. zu verfeinern sind (s.u.).

Abb. II-3.23 zeigt das Ergebnis dieser Erfassung als Differenzhöhen der linken und rechten Ausuferungspunkte bezogen auf die drei Abflusszustände: MQ (Mittelwasser), MHQ (mittlerer Jahresscheitelabfluss; Jährlichkeit  $T = 2-3$  a, vgl. Kap. III-1) sowie HQ5 (Hochwasserscheitelabfluss der Jährlichkeit  $T = 5$  a), bezogen auf die Abflussreihen 1964-1995.

Im Gesamteindruck der Abb. II-3.23 fällt zunächst die Variabilität der Einzelpunkte gleicher Zustände auf, die sich aus dem variablen Relief der ufernahen Vorlandbereiche erklärt. Das heißt, dass eine starke Abhängigkeit von der örtlichen Situation besteht, die aber selbst bei relativ grober Erfassung (alle 500 m) die Bandbreite der Variabilität (lokal ca. 1 bis  $> 2$  m) und eine großräumige Tendenz beschreibt.

Als tendenzielle Grundaussage lässt sich aus Abb. II-3.23 ablesen, dass im Bereich der Erosionsstrecke (hier: ca. km 120-170) eine deutliche Ausuferung ins Vorland auf dem Niveau eines etwa 5-jährlichen Hochwassers, teilweise erst bis zu ca. 1 m darüber, stattfindet (linke Seite der Abbildung, Punkte um 0). Diese Tendenz verläuft sich ab ca. km 180: im Bereich des Biosphärenreservats Mittlere Elbe bis über die Mündung der Saale hinaus finden deutliche Ausuferungen ab etwa mittlerem Hochwasser (MHQ bzw. 2- bis 3-jährlich) statt. Die Aussagen zu dieser Strecke lassen stützen durch die weiteren Daten zur Profilform (s.o.) sowie zur Hydraulik (Kap. III-2). Im Verlauf der Mittleren Elbe ab der Ohremündung (km 350) bis etwa zur Havelmündung liegen die Ausuferungspunkte schwerpunktmäßig ca. 0-1 m unter dem MHQ-Wasserspiegel bzw. ca. 1-2 m über Mittelwasser. Entlang der Unteren Mittelbe setzen sich diese Bedingungen bei variablen Werten fort.

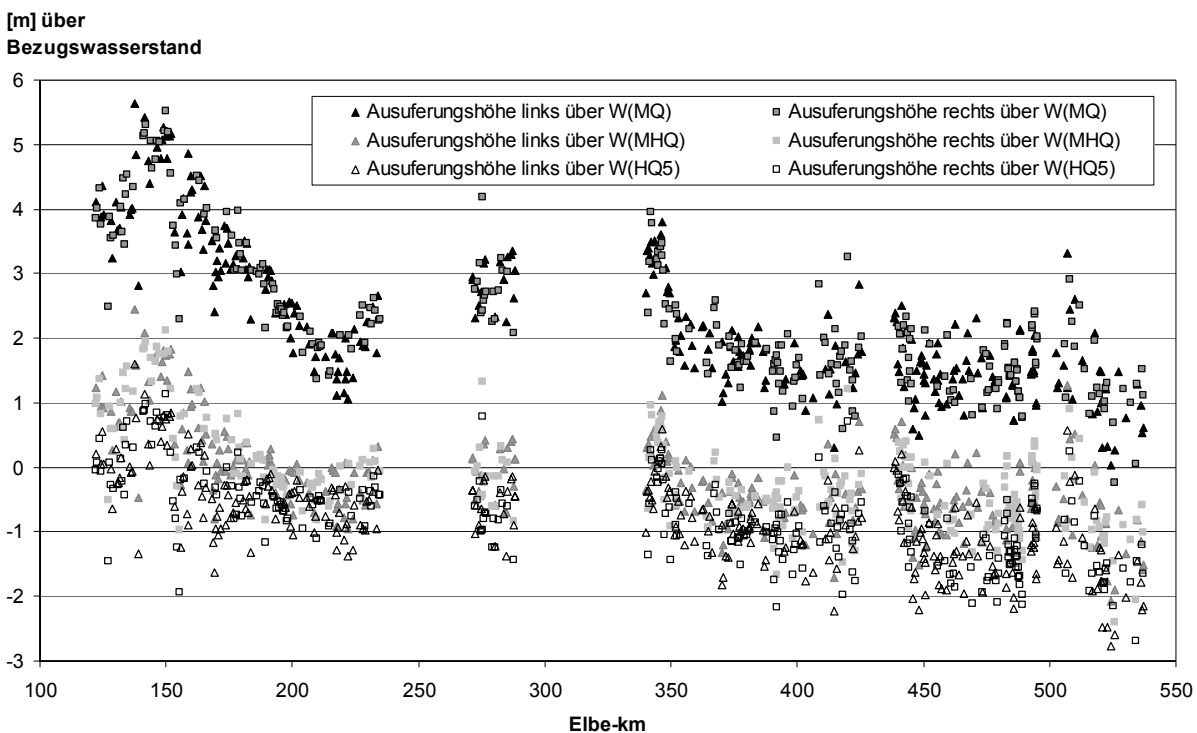


Abb. II-3.23 Ausuferungshöhen entlang der Mittleren Elbe (Differenzhöhen) über den Wasserspiegellagen der Abflusszustände MQ, MHQ und HQ5; Legende: „links“ = linke Uferseite in Fließrichtung; „W(MQ)“ = für MQ berechnete Wasserspiegellage.

Um detailliertere Aussagen treffen zu können, sind in der *Anlagen-CD* Wasserstand-Abfluss-Funktionen im Abstand von 500 m zwischen Elbe-km 0 und 568 abrufbar (vgl. Kap. III-2: i.a. bezogen auf MNQ, MQ, 2MQ, MHQ, HQ5, HQ20 und HQ100). Für lokale Betrachtungen der Ausuferungs- und Überflutungshöhen können die Wasserspiegel/Abflüsse mit bekannten Höhen im Ufer- und Vorlandbereich in Verbindung gebracht werden. Darüber hinaus können weitere Rückschlüsse über die Häufigkeit und Dauer von Hochwasserabflüssen (z.B. bezogen auf die Vegetationsperiode 01.04.-30.09.) anhand der Ergebnisse der hydrologischen Analysen in Kap. III-1 gezogen werden.

### II-3.5 Fazit und Ausblick

Künftige Untersuchungen von öffentlichem und wissenschaftlichem Interesse zur Ökologie im Fließgewässer und in der Aue, zu Fragen des Flussbaus und des Hochwasserschutzes, der Landnutzung etc. können von den in diesem Beitrag zusammengestellten Projektergebnissen erheblich profitieren.

So werden – neben den Darstellungen im Bericht – hier einerseits umfangreiche digitale Datensätze in GIS- und Datenbank-Formaten verfügbar gemacht, die im Hinblick auf die Zielstellung des Projektes („Gesamtschau“ abiotischer Parameter entlang der Elbe als Grundlage künftiger Untersuchungen) erarbeitet wurden. Mit dieser umfassenden *Nutzbarmachung der Daten für nichtkommerzielle Zwecke*, insbesondere für die Fachbehörden von Bund und Ländern sowie die Forschung, wird eine wesentliche *Forderung der Projektförderung* durch öffentliche Mittel im Rahmen des BMBF-Forschungsprogramm Elbe-Ökologie *in die Tat umgesetzt*.

Andererseits werden hier verschiedene Methoden aufgezeigt, die in künftigen Untersuchungen angewandt und weiterentwickelt werden können. Von wissenschaftlich innovativem Charakter sind dabei z.B. die Ableitung einer morphometrisch begründeten Längsgliederung mittels Doppelsummenanalyse (Abschnitt II-3.1.3), die umfassende Betrachtung der Profilformen als Grundlage für den Vergleich mit dem potentiell natürlichen Gewässerzustand (Abschnitt II-3.3.1, vgl. auch Kap. I), die großräumige Erfassung von Breite und Neigung der Wasserwechselzone und bewuchsfreier Uferflächen aus Luftbildern in Korrelation mit der Flussgeometrie etc.

### Literatur

- BfG (1994a): Informationsblatt 4/1994: Die Elbe ein Strom mitten in Deutschland (Eine Betrachtung aus Gewässerkundlicher Sicht). Bundesanstalt f. Gewässerkunde Koblenz.
- BfG (1994b): Kornzusammensetzung der Elbesohle von der tschechisch-deutschen Grenze bis zur Staustufe Geesthacht. BfG-Bericht 0834, Koblenz-Berlin.
- DGJ (1993): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch: Elbegebiet, Teil 1, Von der Grenze bis zur Havelmündung, 1993. Hrsg. Landesamt f. Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle.
- DIN 4049 (1994): Deutsche Normen, DIN 4049 Teil 3 (Begriffe zur quantitativen Hydrologie). Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin
- ELBSTROMWERK (1898): Der Elbstrom, sein Stromgebiet und seine wichtigsten Nebenflüsse - Eine hydrographische, wasserwirtschaftliche und wasserrechtliche Darstellung. Hrsg. Königliche Elbstrombauverwaltung zu Magdeburg, Verlag von Dietrich Reimer, Berlin
- IKSE (1995): Die Elbe und ihr Einzugsgebiet. Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, IKSE Magdeburg.
- IKSE (1999): Die Elbe – Erhaltenswertes Kleinod in Europa. Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, IKSE, Magdeburg, 2. überarb. Aufl., 64 S.
- IKSE (2001): Bestandsaufnahme des vorhandenen Hochwasserschutzniveaus im Einzugsgebiet der Elbe. Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, IKSE, Magdeburg.
- GLAZIK (1993): Zur Abschätzung der Sedimenttransportverhältnisse in der Elbe als Grundlage wasserbaulicher Maßnahmen. Wustrow, unveröff.
- HANNAPPEL, S., PIEPHO, B. (1996): Cluster analysis of environmental data which is not interval scaled but categorical. Chemosphere, Vol. 33, No. 2
- HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- HINKEL, J. (1999): Die Ermittlung vegetationsfreier Flächen entlang der Elbeufer aus Luftbildern und ihre Korrelation mit der Flußgeometrie und dem Uferverbau. Diplomarbeit Institut f. Wasserwirtsch. u. Kulturtechn., Univ. Karlsruhe, unveröff.
- KERN, K., FLEISCHHACKER, T., SOMMER, M. (2000): Struktur-güte-Kartierverfahren für Wasserstraßen (Stand August 2000). im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Karlsruhe (download: <http://elise.bafg.server.de>).
- LAWA (2000): Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland: Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer - Empfehlung. Hrsg. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Kulturbuch-Verlag, Berlin.
- LUA-NRW (2001): Gewässerstrukturgüte in Nordrhein-Westfalen: Anleitung für die Kartierung mittelgroßer bis großer Fließgewässer. Hrsg. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Merkblätter Nr. 26: Wasser, 1. Aufl., Essen
- ROMMEL, J. (2000): Studie zur Laufentwicklung der deutschen Elbe bis Geesthacht seit ca. 1600. Bericht, im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- SCHERLE, J. (1999): Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen: Grundlagen, Leitbilder, Planung. Mitteilungen Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik Heft 199, Karlsruhe.
- YALIN, M.S., SILVA, A.M.F. (2001): Fluvial Processes. published by IAHR, ISBN 90-805649-2-3, Delft.

**Ökologischer Einschub – Hydrologie / Auen / Hochwasser***S. Kiene*

Der stete Wechsel der Wasserstände in der Flussaue zwischen Trockenfallen und Überfluten ist ein entscheidender Ökosystemfaktor für die auetypischen Lebensgemeinschaften (JÄHRLING 1994). Überflutungsdauern, -höhen und -häufigkeiten sind wichtige Faktoren für die Verbreitung von Arten, vor allem auch für die charakteristischen Baumarten des Auwaldes (z. B. SPÄTH 1988). Die hydrologischen Faktoren bedingen auch die Zonierung in Weichholz- und Hartholzau (z. B. GERKEN 1988). Manche Organismen können periodische Trockenzeiten überdauern, andere zeichnen sich durch ein hohes Entwicklungspotential, d.h. durch zahlreiche Nachkommenschaft und kurze Entwicklungszyklen aus.

Die Verhaltensstrategien der an den natürlichen, dynamischen Auenlebensraum angepassten Organismen, wie Flucht oder Rückzug, sind an den zeitlichen Verlauf eines natürlichen Hochwassers angepasst. Bei einer nachhaltigen Änderung dieser Charakteristik, wie z. B. dem plötzlichen Auflaufen eines Hochwassers durch die Flutung eines künstlich gesteuerten Polders o. ä., greifen diese Verhaltensmechanismen nicht. Durch Störungen von Überflutungsfrequenz und -rhythmus sind so ganze Populationen dauerhaft in ihrem Bestand gefährdet. Auch die Organismen im Flussschlauch haben ihre Strategien, wie Eingraben, Flucht in Seitenarme o. ä., an das allmähliche Auf- und Abfließen der Hochwässer angepasst. Darüber hinaus spielen natürliche Hochwässer eine entscheidende Rolle bei der Ausbreitung von Samen oder Organismen.

Bei Niedrigwasser spielen isolierte Gewässerteile eine wichtige Rolle als Aufwuchsraum für Jungfische, bei ansteigenden Hochwässern werden die Gewässerteile (z. B. Altarme, Tümpel) verbunden und so Wege in andere Bereiche geöffnet (JÄHRLING 1994). Jeder Eingriff verändert und stört diese Prozesse.

Von maßgeblicher Bedeutung für die Vegetation und somit für die gesamte Auenbiologie sind die saisonalen Schwankungen der Wasserstandsdynamik. So haben z.B. Überschwemmungen während der Vegetationsruhe völlig andere Auswirkungen als während der Vegetationsperiode. An der Elbe treten neben den Hochwässern in der kalten Jahreszeit auch während der Vegetationsperiode Überschwemmungen ein, die vor allem durch Regenfälle im Quellgebiet ausgelöst werden (WILKENS 1983). Demnach sind Flora und Fauna des mittleren Elbetals in ihrer Zusammensetzung vom Eintreten der Sommerhochwässer geprägt und biologisch abhängig.

Durch die Hochwasserdynamik kommt es zu einem regelmäßigen Eintrag von Schwebstoffen in die Aue. Der dadurch bedingte Nährstoffeintrag führt zu hoher Produktivität dieser Standorte, was sich wiederum auf die gesamte Besiedlung auswirkt. Durch den Deichbau im Laufe der letzten Jahrhunderte wurde das oft viele Kilometer breite Überschwemmungsgebiet auf durchschnittlich ca. 1 km Breite eingeschränkt, so dass weite Bereiche der morphologischen Aue nicht mehr überflutet werden. Fehlen zeitweise Überflutungen und kommt nur „gefiltertes“ Drängewasser in die Aue, so bilden sich aufgrund des veränderten Wasser- und Nährstoffhaushalts andere Pflanzengesellschaften aus (JÄHRLING 1994). Im Hochwasserfall werden innerhalb der Deichlinien große Schlickmengen im Vorland abgesetzt, wodurch sich der Abflussquerschnitt verringert. Dies führt langfristig zu veränderten Strömungsgeschwindigkeiten und weiteren Auskolkungen und Auflandungen.

Die Hochwasserdynamik hat nach GALLUSER & SCHENKER (1992) auch tiefgreifenden Einfluss auf die Bodenbildung in der Aue. Dabei sind vor allem zwei Faktoren von Bedeutung. Zum einen erfolgt mit jeder Überschwemmung ein Sedimente- und ein Oberbodenaustrag. Zum anderen ergibt sich bei Überschwemmung ein periodischer Luftabschluss, der für die Lebewesen des Bodens für phasenweise anaerobe Verhältnisse sorgt.

*Literatur*

GALLUSER W.A., SCHENKER, A. (1992): Die Auen am Oberrhein. Birkhäuser Verlag, Basel.

GERKEN, B. (1988): Auen – verborgene Lebensadern der Natur, Verlag Rombach, Freiburg.

JÄHRLING, K.-H. (1994): Bereiche möglicher Deichrückverlegungen in der Elbaue im Bereich der Mittel- und Unterelbe - Vorschläge aus ökologischer Sicht als Beitrag zu einer interdisziplinären Diskussion. 6. Magdeburger Gewässerschutzseminar.

SPÄTH, V. (1988): Zur Hochwassertoleranz von Auenwaldbäumen. Natur und Landschaft 63 (7/8), S. 312-315.

WILKENS, H. (1983): Faunistisch-ökologische Analyse einer Flußmarsch der Mittleren Elbe. Abh. naturwiss. Ver. Hamburg. (NF) 25. 151-167, Hamburg.

# KAPITEL III ABFLUSSDYNAMIK, STRÖMUNG UND FESTSTOFF-TRANSPORT

## III-1 Analyse und Simulation des Abflussprozesses der Elbe

M. Helms, J. Ihringer, F. Nestmann

### III-1.1 Einleitung und Zielsetzung

Zahlreiche Aspekte entlang des Gewässerlaufs der Elbe werden entscheidend durch die Abflussverhältnisse der Elbe beeinflusst. So stehen der *Abflussprozess* und die daraus resultierende Dynamik der Wasserstände *am Beginn verschiedener Wirkungsketten im landschaftsökologischen Gefüge des Flusssystemes*. Als wesentliche Elemente dieses Gefüges sind der Feststoffhaushalt der Elbe und die Morphodynamik ihres Gerinnebetts, der Wasser- und Stoffhaushalt im Auenbereich und die Auenökologie zu nennen. Hinzu kommen *sozioökonomische Belange*, da die anthropogene Nutzung und Gestaltung der Flusslandschaft auf die Abflussverhältnisse abzustimmen sind. Dies gilt insbesondere im Sinne des Hochwasserschutzes für anliegende landwirtschaftliche Nutzflächen, Siedlungen, Produktionsstätten und Verkehrswege, sowie im Sinne der Schifffahrt. Die Erforschung dieses Raums unter verschiedenen Gesichtspunkten – beispielsweise im Rahmen des BMBF-Forschungsprogrammes ‚Elbe-Ökologie‘ – setzt somit die Untersuchung der hydrologischen Verhältnisse entlang der Elbe voraus. Nach ihrer Kopplung mit den Untersuchungen weiterer Disziplinen können die hydrologischen Untersuchungen zudem politisch-administrative Entscheidungen unterstützen, die bei Konflikten in bezug auf die Nutzung und Gestaltung der Flusslandschaft, sowie auch des Flusseinzugsgebiets zu treffen sind. Mit dieser *gesamtheitlichen Betrachtung* wird wesentlichen Inhalten der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft entsprochen (zum Vergleich EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT 2000).

In diesem Sinne erfolgten in den hydrologischen Teilprojekten des *Verbundprojekts ‘Morphodynamik der Elbe‘* (TP I.4: ‚Hydrologische Analyse und Datenmanagement‘ und TP II.2: ‚Hydrologisch-morphologische Prognose‘) Untersuchungen zur geeigneten Beschreibung und zum Verständnis des Abflussgeschehens in der Elbe und in ihrem Einzugsgebiet. Dabei wurde der Abflussprozess in seinem mittleren Verhalten, seiner Variabilität und

seiner zeitlichen Entwicklung betrachtet. Der Schwerpunkt wurde dabei auf die Hochwasserverhältnisse gelegt, die den Raum entlang der Elbe besonders prägen. Der tidebeeinflusste Bereich der Unteren Elbe wurde von der Betrachtung ausgeschlossen. *Konkret ergaben sich folgende hydrologische Aufgabenkomplexe*. Ihre Bearbeitung wurde in gegenseitiger Ergänzung durchgeführt (siehe Kapitel III-1.4: Vorgehensweise).

### Hydrologische Aufgabenkomplexe

- *Aufbau einer verlässlichen hydrologischen Datenbasis*, insbesondere die Zusammenstellung von Wasserstands- und Abflusszeitreihen, sowie deren Aufbereitung durch Plausibilitätsprüfung und Ergänzung durch synthetische Abflusszeitreihen.
- *Statistische Analyse des Abflussprozesses* durch zeitreihenanalytische Verfahren zur Ableitung von statistischen Kennwerten der Abflussdynamik an den deutschen Elbe-Pegeln und deren *Regionalisierung* entlang des Gewässerlaufs in Form von hydrologischen Längsschnitten, um Informationen über die Abflussdynamik auch an Stellen ohne Abflussmessungen zu gewinnen und um die großräumige Situation zu erfassen. Im Vordergrund stand dabei der *hydrologische Ist-Zustand*.
- *Entwicklung eines Instrumentariums zur Simulation des Abflussprozesses* bzw. seiner Teilprozesse im Rahmen des (vor allem deutschen) Gesamtgebiets. Skalenbedingt ergab sich dabei die Notwendigkeit, mehr oder weniger konzeptionelle Ansätze zu verwenden. In Fällen, in denen die Instrumente eine realitätsnahe Simulation der hydrologischen Prozesse erlaubten, konnten sie auch zur Simulation und Bewertung des Abflussprozesses unter *veränderten – historisch aufgetretenen oder fiktiven – Bedingungen* weiterentwickelt werden.

- *Interdisziplinäre und politisch-administrative Abstimmungen* bei der Durchführung der vorgenannten Punkte mit Vertretern der Elbe-Forschung aus anderen Disziplinen, insbesondere im Rahmen des eigenen Verbundprojekts und des BMBF-Forschungsprogrammes ‚Elbe-Ökologie‘, sowie der wasserwirtschaftlichen Verwaltung (Behörden des Bundes und der Länder). Diese Abstimmung erfolgte, um neben den Ergebnissen hydrologischer Routine-Auswertungen die Relevanz und Verwertbarkeit der hydrologischen Untersuchungsergebnisse durch entsprechende Vorüberlegungen von vornherein zu gewährleisten. Dies schloss Überlegungen zur Definition und Entwicklung von *Schnittstellen* zur Kopplung mit Instrumenten anderer Disziplinen mit ein.
- *Theoretische Überlegungen* auf der Basis des allgemeinen und elbebezogenen Stands der Forschung, sowie der hydrologischen Verhältnisse im Elbe-Einzugsgebiet. Dies erlaubte es, die hydrologischen Untersuchungsergebnisse in ihrer *Plausibilität* auch bei einer gegebenen Datenunsicherheit zu *überprüfen*, zu *interpretieren* und zu *bewerten*.

### III-1.2 Hydrologische Verhältnisse im Elbe-Einzugsgebiet

Da die hydrologischen Verhältnisse des Elbe-Einzugsgebiets den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit darstellen, wird in diesem Kapitel auf eine detailliertere Erörterung verzichtet. Es werden einleitend nur einige *Grundzüge der Abflussverhältnisse*, die das *Charakteristische des Elbe-Einzugsgebiets* ausmachen, genannt. Zudem wird die anthropogene Einflussnahme diskutiert. Die dabei gemachten Angaben stammen z. T. aus folgenden Quellen: IKSE (1996 a, b), BFG (2000, S. 5-26).

#### III-1.2.1 Natürliche hydrologische Verhältnisse im Elbe-Einzugsgebiet

**Die Elbe** entspringt an ihrer Quelle in Krkonose im Riesengebirge in Tschechien auf einer Höhe von 1383,6 m über NN. Auf ihrem Lauf durchfließt sie zunächst das Böhmisches Becken. Nach der Durchquerung des Elbsandsteingebirges und des nördlich anschließenden Mittelgebirgsvorlandes tritt die Elbe

in die Norddeutsche Tiefebene ein, um schließlich nach 1091,5 km Fließlänge als Ästuar in die Nordsee zu münden. Im Bereich zwischen Elbequelle und Übergang in die Norddeutsche Tiefebene wird von der Oberen Elbe gesprochen, bis zum Wehr Geesthacht von der Mittleren Elbe und unterhalb dieses Wehrs von der Unteren Elbe (IKSE 1998, S. 3), in dem sich bereits ein Tideeinfluss aus der Nordsee bemerkbar macht. Die wichtigsten Nebenflüsse der Elbe sind im tschechischen Bereich die Moldau (28090 km<sup>2</sup> Einzugsgebietsfläche) und die Eger (5614 km<sup>2</sup>), im deutschen Bereich die Schwarze Elster (5541 km<sup>2</sup>), die Mulde (7400 km<sup>2</sup>), die Saale (24079 km<sup>2</sup>) und die Havel (24096 km<sup>2</sup>).

Die Größe des *Gesamteinzugsgebiets* beträgt 148268 km<sup>2</sup>, wovon 96932 km<sup>2</sup> (etwa zwei Drittel) deutsches Gebiet sind und 50176 km<sup>2</sup> (etwa ein Drittel) tschechisches. Im Einzugsgebiet lassen sich verschiedene Landschaftseinheiten unterscheiden: im oberen Bereich wird das Böhmisches Becken im Norden, Westen und Osten durch Mittelgebirgszüge flankiert. Letztere sind vorwiegend durch Tiefengesteine bzw. Metamorphite und durch Bruchtektonik gekennzeichnet. Das Becken ist durch feinkörnige kreidezeitliche bis tertiäre Sedimente gefüllt und durch quartäres Material bedeckt (Löss und fluvioglaziales Material). Auch im deutschen Gebiet findet man an der westlichen Flanke Mittelgebirgszüge. Ansonsten schließen sich nördlich der Mittelgebirgszone durch Lössbedeckung gekennzeichnete Platten- und Hügelländer und Börden an. Weiter nördlich befindet sich das pleistozäne Tiefland mit ausgedehnten, durch Schmelzwassersande geprägten Urstromtälern und hügeligen, glazial geprägten Moränenlandschaften, bei denen der Untergrund aus Geschiebemergeln und -lehm besteht. Im jungglazialen Aufschüttungsgebiet (v.a. im Havel-Einzugsgebiet) ist dabei das Gewässernetz nur zu einem geringen Grad entwickelt. Insgesamt steht einem geringeren Flächenanteil (30 %) der Mittelgebirge, der wegen stärkerer Geländeneigung und geringerer Speicherkapazität des Untergrundes zu hohen Abflussspenden neigt, ein größerer Anteil der Flach- und Hügelländer gegenüber, der aufgrund geringerer Geländeneigung, hoher Aufnahme- und Speicherkapazität des Untergrundes (v.a. Löss, Schmelzwassersande) und der teilweise geringen Entwicklung des Gewässernetzes zu geringeren Abflussspenden neigt.

Das **Klima** besitzt – im Vergleich zum westlicheren Mitteleuropa – kontinentale Anklänge. Weitere Modifikationen werden durch das Relief bewirkt. In den das Elbe-Einzugsgebiet flächenmäßig prägenden Beckenlagen wird die Kontinentalität verstärkt. Wichtige Ausprägungen von Klimatelementen sind somit:

- relativ scharfe Gegensätze im Jahresgang der Temperatur (und damit der Verdunstung).
- heterogene räumliche Ausprägungen der Jahresniederschlagsmengen von unter 500 mm/Jahr in den flächenmäßig ausgedehnten Leelagen des Thüringer und des Böhmisches Becken bis über 1600 mm/Jahr in den Mittelgebirgslagen (zum Vergleich z.B. BFG & INSTITUT FÜR HYDROLOGIE 2000, Abschnitt 2.2. bzw. 2.5.)
- vor allem reliefabhängig ist von unterschiedlichen Niederschlagsjahresgängen auszugehen. Außerhalb des Mittelgebirgsbereichs ist vom Vorherrschen des Sommerregentyps auszugehen.
- abhängig vom Relief und vom Kontinentalitätsgrad spielen Schneeniederschläge eine bedeutende Rolle. Es ist von Anteilen zwischen 7,5-10 % (Norddeutsche Tiefebene) und 30-40 % (bestimmte Harzlagen) am Jahresniederschlag auszugehen (zum Vergleich KELLER & DEHAAR 1978, S. 20).

Die genannten geomorphologischen und klimatologischen Voraussetzungen führen zu folgenden **hydrologischen Charakteristika**.

Die *mittleren jährlichen Abflussspenden* und die *Spenden der mittleren Jahresscheitelabflüsse* sind im Elbe-Einzugsgebiet Dresdens oder weiter stromabwärts, sowie in den o.g. genannten größeren deutschen Teileinzugsgebieten mit etwa 5-6,5 bzw. unter  $25 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$  insgesamt als gering einzustufen. Eine Ausnahme unter den genannten Teileinzugsgebieten bildet die Mulde mit  $10,8$  bzw.  $64,8 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ . Die geringen Abflussspenden beruhen insbesondere auf den bereits angesprochenen, im Elbe-Einzugsgebiet mit großen Flächenanteilen herrschenden Ausprägungen geomorphologischer Art (geringe Reliefenergie, hohe Speicherwirkung des Untergrunds, gering entwickeltes Gewässernetz) und klimatologischer Art (Leelagen, Sommerregen). Hinzu kommen teilweise reduzierende Effekte

anthropogener Speicheranlagen auf Hochwasserspenden (zum Vergleich: Kapitel III-1.2.2).

Das *Regime* lässt einen deutlichen Einfluss der frühjährlichen Schneeschmelze (Maximum der mittleren monatlichen Abflüsse im März oder April) erkennen. Es handelt sich – v.a. abhängig von Flächenanteilen verschiedener topographischer Höhenlagen – um komplexe, pluvio-nivale bis nivo-pluviale Regimes.

Von Bedeutung für die Untersuchung des Abflussprozesses ist die Kenntnis der *Mechanismen der Hochwasserentstehung*. In dem makroskaligen Einzugsgebiet ist eine solche Abflussreaktion v.a. von Prozessen mit großräumiger Ausdehnung zu erwarten, wie z.B. durch zyklonale Niederschläge oder durch Schneeschmelze, die sich in dem durch kontinentale Anklänge und Mittelgebirge geprägten Gebiet zeitlich konzentriert ergibt und nicht – wie im Hochgebirge aufgrund vertikaler Zonierung – zeitlich verteilt. Nach IKSE (1996 b, S. 5), kann folgendes festgestellt werden. Die überwiegende Zahl bedeutender Hochwasserereignisse in der Elbe und den o.g. Nebenflüsse entstehen im Winter und Frühjahr infolge von intensiver Schneeschmelze, in Verbindung mit großflächigen Niederschlägen, die durch atlantische Tiefausläufer ausgelöst werden. Hochwasserereignisse aus der Schneeschmelze allein entstehen nur in Einzelfällen und nicht in bedeutendem Ausmaß. Auch ohne Schneeschmelze können infolge von mehrtägigem Dauerregen Hochwasserereignisse an der Elbe entstehen, auch im Sommer (z.B. das Ereignis 1954). Sommerliche (konvektive) Starkniederschläge führen häufig zu extremen Hochwasserereignissen in eher kleineren Teileinzugsgebieten. Wegen ihrer räumlichen Begrenztheit verursachen sie jedoch nur unbedeutende Elbe-Hochwässer.

Im Rahmen der in diesem Projekt beabsichtigten hydrologischen Untersuchungen auf Basis von Abflussreihen, die bis in das 19. Jahrhundert zurückreichen, interessieren nicht nur die gegenwärtigen klimatologischen Verhältnisse, sondern auch diejenigen der Vergangenheit (zum Vgl. Kapitel III-1.6.2 und III-1.6.6.2). Die *Klimageschichte Mitteleuropas* bzw. des Elbe-Einzugsgebiets wurde durch wechselnde Phasen mit maritimeren und kontinentaleren Eigenschaften geprägt. Eine Phase kontinentalerer Prägung war dabei die *Kleine Eiszeit*, die der Mittelalterlichen Warmzeit folgte, seit Mitte des 16. Jahr-

hunderts voll entfaltet war und bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts reichte. Ein ‚Tiefpunkt‘ der Kleinen Eiszeit war dabei noch die Zeit um 1850 (zum Vgl. SCHÖNWIESE 1992, S. 66, und HUPFER, KUTTLER & HEYER 1998, S. 268). Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Wechsel zwischen kontinentaleren und maritimeren Klimaausprägungen insbesondere für den Abflussprozess der Elbe besondere Bedeutung hatte. Das Elbe-Einzugsgebiet liegt in einem Übergangsbereich zwischen maritimeren und kontinentaleren Klimaten, der von einem Klimawechsel in Mitteleuropa besonders betroffen wird. Hinzu kommt, dass das Elbe-Einzugsgebiet in großen Teilen durch Beckenlandschaften geprägt wird (Thüringer Becken, sowie besonders Böhmisches Becken), die allgemein gegenüber ihrer Umgebung eher zur Kontinentalität neigen. Da sich diese im Elbe-Einzugsgebiet durch Mittelgebirgszüge gegenüber den Zugrichtungen (West bis Nordwest) der im makroskaligen Einzugsgebiet abflusswirksamsten Großwetterlagen in Leelagen befinden, ist bei stärkerer Kontinentalität bzw. einer Abschwächung der zyklonalen Westdrift ein deutlicher Effekt zu erwarten. Schließlich schwanken die Wintertemperaturen im Einzugsgebiet häufig um den Nullpunkt. Eine leichte Temperaturverschiebung kann daher bereits einen deutlichen Effekt auf die im Elbe-Einzugsgebiet besonders wirksame nivale Komponente im Niederschlag-Abfluss-Geschehen haben (zum Vergleich s.o.).

Im Vergleich zum Klima des 20. Jahrhunderts kann nach Angaben in der unten genannten Literatur das noch *von der Kleinen Eiszeit geprägte 19. Jahrhundert* durch folgende, wichtigste Punkte charakterisiert werden:

- Größere Häufigkeit meridional geprägter Zirkulationsformen und damit ein kontinentaler geprägter Klimacharakter
- Geringere mittlere Temperaturen
- Der bedeutendste Unterschied ist für den Winter festzustellen, wobei für das 19. Jahrhundert der März in der Literatur dem Winter zugeordnet wird. Die strengeren Winter des 19. Jahrhunderts waren stärker antizyklonal geprägt. Geringere Temperaturen und Niederschlagshöhen, sowie höhere Schneeanteile wurden festgestellt.
- Für die anderen Jahreszeiten wurden häufigere Zirkulationsformen mit nördlichen bis nord-

westlichen Komponenten und vergleichsweise kühle Verhältnisse erkannt, für den Sommer und das Frühjahr auch vergleichsweise trockene Verhältnisse.

- Höhere Klimavariabilität von Jahr zu Jahr. Einzelne Jahre wichen von der allgemeinen Tendenz ab.

Zum 20. Jahrhundert hin kam es zu einer Intensivierung der Zonalzirkulation, die eine Erwärmungstendenz und insbesondere mildere Winter zur Folge hatte. Diese Entwicklung kulminierte um 1940. Auch innerhalb des 20. Jahrhunderts kam es zu Schwankungen in den Häufigkeiten der für die Klimaausprägungen besonders bedeutenden Zirkulationsformen. Herauszuheben ist die von CASPARY (2000) festgestellte, vor allem ab den frühen 1970er Jahren eingetretene Zunahme der Häufigkeit zonaler Zirkulationsformen in den Wintermonaten (Dezember-Februar).

Detailliertere Angaben zu den klimatischen Ausprägungen des 19. Jahrhunderts, sowie zum Übergang zum 20. Jahrhundert finden sich beispielsweise in GLASER (1991, S. 106-110; 2001), PFISTER (1985, S. 48-50), LAMB (1995, S. 242 ff), SCHÖNWIESE (1992, S. 67 ff) sowie HUPFER, KUTTLER & HEYER (1998, S. 268 ff).

### III-1.2.2 Anthropogene Einflüsse auf die Abflussverhältnisse im Elbe-Einzugsgebiet

*Anthropogene Einflussnahmen* mit besonders großer Bedeutung für die Abflussverhältnisse der Elbe sind in jüngerer Zeit (20. Jahrhundert) die der *Deichbauten* und der *Anlage von Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken*. Sie sollen in diesem Abschnitt näher betrachtet werden. Bezüglich weiterer anthropogener Aktivitäten mit Relevanz für den Abflussprozess wird auf BFG (2000, S. 13-26) und IKSE (1996 a, S. 13-30) verwiesen. Dort werden Ausbaumaßnahmen für die Schifffahrt, Landnutzungsänderungen und Braunkohleabbau behandelt und teilweise in ihrer Wirksamkeit auf die Abflussverhältnisse diskutiert. Ferner sind Flusslaufbegradigungen und –verkürzungen um mehr als 126 km (BfG 2000, S. 19) zu nennen, die zur Beschleunigung des Hochwasserablaufs führten (Anm.: auf die tschechische Elbe fallen 55 km, auf die deutsche 71 km; die aber nach neueren Untersuchungen zu relativieren sind, zum Vgl. siehe Kapitel II-1.2).



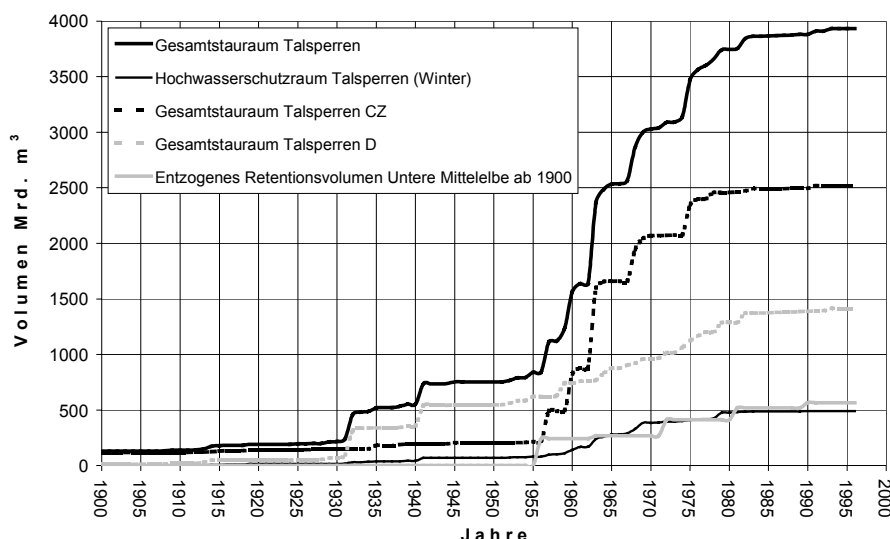


Abb. III-1.1 Zeitliche Entwicklung der Volumina der Stauräume der Talsperren in verschiedenen Bereichen des Elbe-Einzugsgebiets, sowie der – auf ein 100-jährliches Hochwasser bezogenen – Retentionsraumverluste an der Unteren Mittelelbe (nach IKSE 1996 a, S. 14, 21-25, Anlagen 1 und 4).

**Hochwasserrückhaltebecken** und **Talsperren** haben eine ausgleichende Wirkung auf die Abflussdynamik, insbesondere hinsichtlich der Abflussextrême. So können im Sinne des Hochwasserschutzes Hochwasserscheitel gedämpft werden und z.B. im Sinne einer Niedrigwasseraufhöhung für die Schifffahrt niedrige natürliche Wasserdargebote kompensiert werden.

Im Elbe-Einzugsgebiet finden sich eine Vielzahl solcher Anlagen, z.T. mit bedeutenden Rückhaltevolumina. Mit 116 Talsperren mit jeweils mehr als 0,3 Mio. m<sup>3</sup> Gesamtstauraum im tschechischen Teil des Elbe-Einzugsgebiets und mit 149 solcher Talsperren auf deutschem Gebiet sind heute 3,94 Mrd. m<sup>3</sup> Gesamtstauraum vorhanden, davon 2,53 Mrd. m<sup>3</sup> in Tschechien und 1,41 Mrd. m<sup>3</sup> in Deutschland. Der beherrschbare Hochwasserschutzraum beträgt dabei im Winter 491,8 Mio. m<sup>3</sup>, im Sommer 407,3 Mio. m<sup>3</sup>. In Tschechien betragen diese Räume im Winter 238 Mio. m<sup>3</sup> und im Sommer 196,3 Mio. m<sup>3</sup>, in Deutschland im Winter 253,8 Mio. m<sup>3</sup> und im Sommer 211 Mio. m<sup>3</sup>. Diese Anlagen dienen verschiedenen Zwecken: Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung, Energieerzeugung, Trink- und Brauchwasserversorgung, Fischerei und Naherholung.

Bis in die 1920er Jahre war das Ausmaß der durch die bereits vorhandenen Anlagen zurückhaltbaren Wasservolumina unbedeutend. Ab den 1930er Jahren wurden große Talsperren zunächst im Saale-Einzugsgebiet in Betrieb genommen (Bleiloch-

Talsperre 1932 und Hohenwarthe-Talsperre 1941). Im tschechischen Gebiet wurden v.a. in den 1950er/60er Jahren, jedoch auch noch später, Stauräume bedeutend größeren Ausmaßes geschaffen. In Deutschland stiegen die rückhaltbaren Volumina zwischen den 1950er und den 1980er Jahren ebenfalls weiter an, wobei als wichtigste Maßnahme die 1959 in Betrieb genommene Talsperre Rappbode zu nennen ist.

Eine detaillierte Übersicht über die verschiedenen Anlagen und ihrer rückhaltbaren Volumina, ihrer Jahre der Inbetriebnahme und ihrer Hauptnutzungszwecke ist in IKSE (1996 a, Anlage 4) und in BFG (2000, Tab. 3.3.1) gegeben. Die daraus berechenbare Entwicklung der über die Zeit aufsummierten Gesamtstauräume und Hochwasserschutzräume (im Winter) im Elbe-Einzugsgebiet sowie im deutschen und im tschechischen Teilgebiet zeigt Abb. III-1.1.

Im Jahr 1963 wurde die Talsperre von Orlik im Moldau-Einzugsgebiet mit bedeutender Rückhaltekapazität in Betrieb genommen. Damit waren etwa zwei Drittel der anthropogen geschaffenen Rückhaltekapazität eingerichtet, sowohl im tschechischen als auch im deutschen Teilgebiet (ohne Havel-Einzugsgebiet). Diese Tatsache wird in Kapitel III-1.6.2.2.2 wieder aufgegriffen.

Nach IKSE (1996 a, S. 25) können ggf. über die angegebenen Hochwasserschutzräume hinaus auch weitere Räume zum Rückhalt von Hochwasser genutzt werden, wenn der Betriebsstauraum nicht

gefüllt oder in Erwartung eines Hochwassers eine gezielte Vorentlastung erfolgt ist. Andererseits wird betont, dass die Wirksamkeit der Rückhaltung bei großen Hochwasserereignissen kleiner Wahrscheinlichkeit abnimmt (zum Vgl. KUBAT 2000, S. 182). Es ist nach IKSE (1996 a, S. 25) ökonomisch nicht vertretbar, die Hochwasserschutzräume für eine schadhlose Beherrschung von extremen Hochwässern freizuhalten.

Als weiterer bedeutender anthropogener Eingriff in die Abflussverhältnisse, v.a. bei selteneren, größeren Hochwässern, an der Elbe sind **Deichungen** und die damit einhergehenden **Entzüge von Retentionsflächen** zu nennen. Dies führt zu einer Beschleunigung im Ablauf der Hochwasserereignisse und zur Erhöhung der Abflussscheitel. Auf Grund der geographischen Gegebenheiten entlang des tschechischen Teils des Wasserlaufs der Elbe und ihrer dortigen Hauptnebenflüsse spielt der Bau von Hochwasserschutzdeichen in diesem Bereich nur eine vernachlässigbare Rolle (IKSE 1996 a, S. 14). Im deutschen Teil ist die Elbe heute ab Flusskilometer 97,7 stromabwärts abgesehen von einigen Hochuferabschnitten und einigen Ortslagen mit Ufermauern vollständig eingedeicht (IKSE 1996 a, S. 14). Diese Deichungsmaßnahmen begannen bereits im 12. Jahrhundert. Die ursprünglich vorhandene Überflutungsfläche wurde bis heute (1990) von 617200 ha auf 83654 ha reduziert, also auf 13,6 % (IKSE 1996 a, S. 14). Die Reduzierung des entsprechenden Retentionsvolumens wurde bisher noch nicht ermittelt. Bei Annahme einer Überflutungshöhe von 30 cm dürfte der verlorene Speicherraum etwa 1,4 Mrd. m<sup>3</sup> betragen (IKSE 1996 a, S. 15). Diese Angaben sind jedoch nach BFG (2000, S. 23) bei der Betrachtung historischer Hochwasserwerte zu relativieren, da auf Grund der damaligen Form und Unterdimensionierung der Deiche noch zahlreiche Deichbrüche auftraten sind. Erst im 20. Jahrhundert wurde die nicht ausreichende Standsicherheit der Deiche beseitigt. Weiterhin fand ein bedeutender Anteil der Retentionsflächenverluste erst während der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts statt. An der Havelmündung und an den weiter stromabwärts gelegenen Nebenflussumündungen (im Bereich der neuen Bundesländer) verringerte sich bezogen auf ein Hochwasser mit 100-jährigem Wiederkehrintervall die Retentionsfläche um insgesamt 42491 ha bzw. der Speicherraum um 566,9 Mio. m<sup>3</sup>. Die

zeitliche Entwicklung dieser Retentionsraumentzüge ist in Abb. III-1.1 dargestellt. Allein im Bereich der Havelmündung sind ab 1956 23800 ha bzw. 243,4 Mio. m<sup>3</sup> verlorengegangen (zum Vergleich: IKSE 1996 a, S. 14 und Anlage 1).

Heute werden an der Elbe die Durchführungen zahlreicher Deichrückverlegungsmaßnahmen diskutiert, um damit die auenökologischen Bedingungen und u.U. den Hochwasserschutz entlang der Elbe zu verbessern. Auf diese Fragestellung wird auch in MERKEL ET AL. (2001: Kapitel III-3) eingegangen.

### III-1.3 Datengrundlage

Im Rahmen des Projekts wurde aus verschiedenen Quellen ein umfangreicher Datenbestand zusammengestellt. Dieser umfasst neben den im folgenden Abschnitt näher behandelten Wasserstands- und Abflusszeitreihen die Reihen verschiedener klimatologischer Parameter und verschiedene thematische, raumbezogene Datensätze.

#### III-1.3.1 Verfügbare Zeitreihen des Abflusses (Q) und des Wasserstands (W)

Es wurden für verschiedene Pegel der Elbe und ihrer wichtigsten Nebenflüsse im deutschen Bereich, sowie für den grenznahen Pegel Decin im tschechischen Bereich von verschiedenen Ämtern, insbesondere der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Abfluss- (Q) und Wasserstandsreihen (W) mit mittleren Tageswerten und Monatsextrima (Terminwerte) beschafft. Letztere sind insbesondere für Hochwasserstatistiken von Bedeutung, da bei den Abflussscheiteln erhebliche Differenzen zwischen den maximalen Terminwerten und den maximalen Tagesmitteln auftreten können, besonders im Bereich oberhalb vom Pegel Barby (siehe Kapitel III-1-6.5.1).

Die verfügbaren Reihen sind in der Tab. III-1.1 zusammengestellt für die verschiedenen Gewässer und Pegel mit unterschiedlichen Reihenlängen (Tagesreihen und Terminwertreihen jeweils entsprechend), mit der Herkunft der Daten und mit den Einzugsgebieten der Pegel.

Einen Überblick über die Lage der Pegel an der Elbe bzw. an ihren Nebenflüssen gibt die Karte 1.

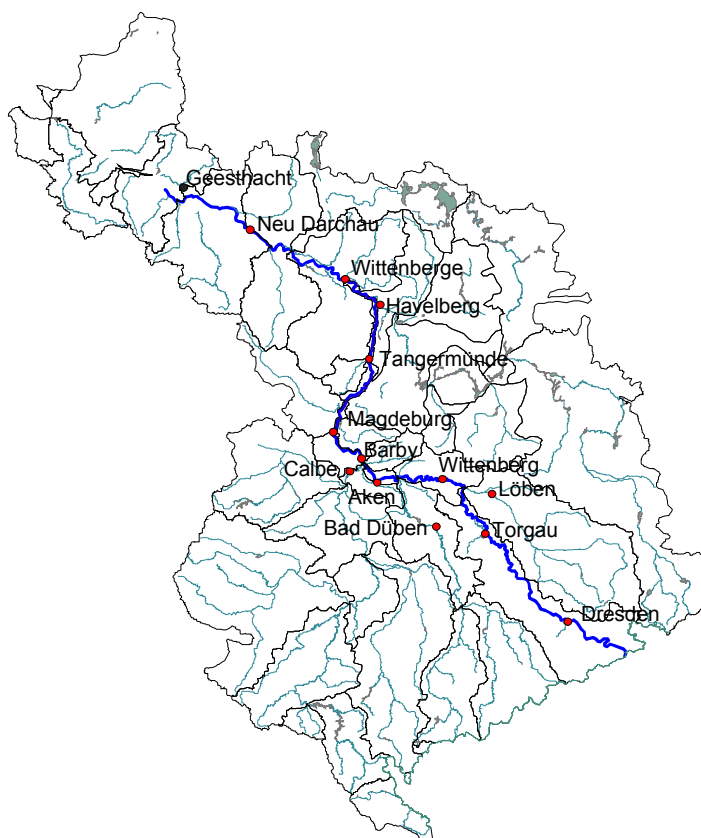
**Tab. III-1.1** Zusammenstellung der Pegel mit verfügbaren Abfluss- und Wasserstandszeitreihen (Tagesmittel, Monatsextrema) im Elbe-Einzugsgebiet. Die Angabe der Reihen erfolgt in Abflussjahren.

Pegel	Gewässer	EZG [km <sup>2</sup> ]	Wasserstandsreihe (W)	Abflussreihe (Q)	Herkunft
Decin	Elbe	51104	---	1888-1996	Hydromet. Inst., Prag
Dresden	Elbe	53096	1853-1996/---	1931-1997/1851-1990	BfG Berlin / SLfUG Dresden
Torgau	Elbe	55211	1936-1996	1936-1997	BfG Berlin
Wittenberg	Elbe	61879	1937-1996	1951-1997	BfG Berlin
Aken	Elbe	69849	1926-1996	1936-1997	BfG Berlin
Barby	Elbe	94060	1900-1995/---	1900-1997/1900-1991	BfG Berlin / StAU Magdebg
Magdeburg S.	Elbe	94942	1931-1995/---	1931-1997/1931-1991	BfG Berlin / StAU Magdebg
Tangermünde	Elbe	97780	1964-1995/---	1961-1997/1966-1991	BfG Berlin / StAU Magdebg
Wittenberge	Elbe	123532	1896-1995	1900-1997	BfG Berlin
Neu Darchau	Elbe	131950	1971-1996	1875-1997	BfG Berlin
Löben	Schw. Elster	4327	---/1974-1997	1974-1990/1974-1997	BfG Berlin/StAU Halle
Bad Düben	Mulde	6171	---/1961-1996	1961-1992/1961-1996	BfG Berlin/SLfUG Dresden
Calbe Gr.	Saale	23687	1961-1995	1932-1997*	BfG, Berlin
Naumburg	Saale	11449	1971-1997	1932-1997	StAU Halle
Laucha	Unstrut	6218	1971-1996	1946-1996	StAU Halle
Zeitz	W. Elster	2504	1971-1996	1941-1996	StAU Halle
Oberthau	W. Elster	4939	1982-1997	1973-1997	StAU Halle
Hadmersleben	Bode	2758	1931-1997	1931-1997	StAU Magdeburg
Havelberg St.	Havel ***	24038	1853-1999	1946-1996	BfG, Berlin
Rathenow, HS UP	Havel	19288	1/1900-12/1999	**	LUA Brandenburg

\* Am Pegel Calbe ist ein Fehljahr (1945) zu verzeichnen.

\*\* Über verfügbare Abflusskurve aus Wasserständen ermittelbar, jedoch bei Elbe-Hochwasser nur mit Einschränkungen (vgl. Kap. III-1.6.7).

\*\*\* Havel bzw. Untere Havel-Wasserstraße



**Karte 1:** Überblick über das Elbe-Einzugsgebiet im deutschen Bereich mit den Gewässerläufen und Einzugsgebieten wichtiger Fließgewässer, sowie Pegeln mit im Projekt verfügbaren Abfluss- und Wasserstandsreihen.

Es fällt auf, dass die längste verfügbare Abflussreihe der Elbe am obersten deutschen Pegel in Dresden (ab 1853) vorliegt. Weitere lange Reihen mit Beginn im Jahr 1900 liegen am Pegel Barby, knapp unterhalb der Saale-Mündung, sowie am Pegel Wittenberge unterhalb der Havel-Mündung vor, sowie mit Beginn im Jahr 1875 am Pegel Neu Darchau, noch unterhalb von Wittenberge. Die kürzeste Reihe unter denen der Elbe-Pegel liegt am Pegel Tangermünde vor, sie beginnt erst im Jahr 1961. Die Zeitreihen der Nebenflusspegel sind i.d.R. kürzer als die der Elbe-Pegel.

Im Hinblick auf die behördlichen Umstrukturierungen im Zuge der deutschen Wiedervereinigung war zu gewährleisten, dass die *Daten aus verschiedenen Quellen äquivalent* sind. Es wurden daher die Abflusszeitreihen der Pegel Dresden, Barby, Magdeburg und Tangermünde gegeneinander abgeglichen. (Geringfügige) Abweichungen wurden nur in seltenen Fällen festgestellt und sind für die statistischen Untersuchungen im Projekt ohne Bedeutung. Die Behörden wurden von den Abweichungen informiert.

### III-1.3.2 Weitere Datensätze

Neben den Abfluss- und Wasserstandsreihen wurden im Projekt weitere Datensätze zusammengestellt. Da der Schwerpunkt dieses Berichts nicht auf der Nutzung dieser Daten beruht, werden sie hier nur in Kürze angesprochen.

#### III-1.3.2.1 Reihen klimatologischer Parameter

Es wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) die *Reihen täglicher Niederschlagshöhen* 1961-1997 an 1425 Messstationen im deutschen Bereich des Elbe-Einzugsgebiets zur Verfügung gestellt.

Zu diesen Reihen ist anzumerken, dass sie erhebliche systematische Messfehler (Defizite) beinhalten (zum Vgl. RICHTER 1995). RICHTER beschreibt weiterhin ein Korrekturverfahren. Diese Aufbereitung benötigt Hintergrundinformationen, die während der Projektlaufzeit nicht zur Verfügung gestellt werden konnten, so dass die Korrektur – auch durch den DWD – noch nicht durchgeführt werden konnte. Diese Problematik schränkte die Nutzbarkeit des Datensatzes im Projekt ein, da eine nicht zutreffend

korrigierte Zwischenversion, etwa mit der Annahme einer mäßig geschützten Lage an jeder Station, zu vermeiden war.

Im tschechischen Bereich liegen zudem für 23 Stationen tägliche Niederschlagsmessreihen vor, die vom Hydrometeorologischen Institut Tschechiens zur Verfügung gestellt wurden.

Um trotz dieser Schwierigkeiten bereits Betrachtungen mit Gebietsniederschlagsreihen durchführen zu können, wurden ferner vom DWD zwei *tägliche Gebietsniederschlagsreihen* 1961-1995 ermittelt und dem Projekt zur Verfügung gestellt: für das deutsche Elbe-Einzugsgebiet oberhalb der Saalemündung (inklusive Saale-Einzugsgebiet), sowie für das deutsche Elbe-Einzugsgebiet unterhalb der Saale-Mündung.

Im Niederschlag-Abflussgeschehen des Elbe-Einzugsgebiets spielt die nivale Komponente eine bedeutende Rolle (siehe Kapitel III-1.2). Um auch hierzu im Projekt die relevanten täglichen Zeitreihen zusammenzustellen, wurden vom DWD die Reihen der – im Vergleich zum Niederschlag im Raum schwächer variierenden – mittleren täglichen Temperaturwerte von 63 deutschen Messstationen ab 1961, sowie tägliche Angaben zur Niederschlagsart (ab 1979) beschafft. Aus dem tschechischen Teilgebiet wurden Reihen mittlerer täglicher Temperaturwerte von 23 Messstationen vom Hydrometeorologischen Institut zur Verfügung gestellt. Diese Reihen können nach Ableitung einer Grenztemperatur genutzt werden, um Niederschlagskorrekturen durchzuführen und um den Eingang in einen Schneespeicher zu ermitteln. Zudem können die Temperaturwerte zur Modellierung der Schneeschmelze genutzt werden.

Als weitere wichtige klimatologische Information steht die *tägliche Reihe 1881-1998 der Großwetterlagen Mitteleuropas zur Verfügung* (Quelle: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung/DWD; zum Vgl. auch GERSTENGARBE & WERNER 1993).

#### III-1.3.2.2 Raumbezogene Datensätze

Für eine geeignete räumliche Zuordnung und Strukturierung, sowie zur Regionalisierung hydrologischer Prozesse oder ihrer Kennwerte werden verschiedene *raumbezogene, thematische Datensätze* benötigt. In diesem Sinne wurden im Projekt

folgende Datensätze zusammengestellt:

Als topographische Datengrundlage dient eine *Digitale Grundkarte* im Maßstab 1:500000 (Quelle: BfG). Sie enthält insbesondere die Einzugsgebietsgrenzen der Teileinzugsgebiete ab einer Größe von 500 km<sup>2</sup>, sowie das aus dem Deutschen Landschaftsmodell 1:1 Mio. übernommene feine Gewässernetz. Ferner wurden im Projekt zusammengestellt:

- die *Digitale Bodenübersichtskarte* der BRD 1:1 Mio. mit 54 Leitbodentypen im Elbe-Einzugsgebiet und entsprechenden Angaben zur Bodenart und zu bodenwasserhaushaltlichen Grundparametern (Feldkapazität, Permanenter Welkepunkt) (Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe),
- die *CD ROM 'CORINE'* mit Daten zur Bodenbedeckung für Deutschland (Quelle: Statistisches Bundesamt),
- die *Digitale Karte mit klassifizierten hydrogeologischen Teilflächen* mit  $k_f$ -Angaben (Quelle: FZ Jülich/STE),
- sowie das *Digitale Geländemodell GTOPO30*, Kachel Mitteleuropa, mit einer Raumauflösung von 30''\*30'', in Mitteleuropa entsprechend etwa 600m\*900m (Quelle: US Geological Survey).

Schließlich wurden die *Parameter des Translations-Diffusionsmodells ELBA* von der BfG zur Verfügung gestellt.

### III-1.4 Vorgehensweise bei der Untersuchung des Abflussprozesses der Elbe

Entscheidende Probleme bei der Untersuchung der Abflussreihen der Elbe ergaben sich durch die *Unsicherheit in den verfügbaren Abflussdaten*, die v.a. aus Schwierigkeiten oder Mängeln bei der messtechnischen Erfassung des Abflusses in der Vergangenheit resultierte und mit erheblichen Inkonsistenzen in der Datenbasis verbunden war (siehe Kapitel III-1.5). Hinzu kam, dass in verschiedenen Gewässerabschnitten bzw. Zeiträumen keine gemessenen Reihen vorliegen, jedoch zur Erfassung der Prozessabläufe unverzichtbar sind. Desweiteren sind die Fragestellungen, die im Rahmen der Untersuchung der Flusslandschaft besonders interessieren und daher im hydrologischen Teilprojekt vorrangig

bearbeitet wurden, besonders mit seltenen, extremen Ereignissen (im Projekt v.a. Hochwasserereignisse) verknüpft. Gerade hier ist die (selten mögliche) messtechnische Erfassung des Abflusses schwierig und in der Vergangenheit nicht hinreichend bzw. gar nicht erfolgt – an einigen Pegeln liegen für die größten aufgetretenen Hochwasserereignisse selbst keine Wasserstandsdaten vor. *Diese Datenunsicherheit überlagert sich schwer trennbar mit der Variabilität des eigentlichen Abflussprozesses, dessen zutreffende Analyse und Simulation folglich erschwert wird.*

Aufgrund der naturgegebenen (klimatologischen) Variabilität und anthropogen induzierten Effekten ergeben sich – insbesondere im Hinblick auf die Annahme eines repräsentativen Zeitraums – weitere Unsicherheitsfaktoren, deren Analyse durch fehlerhafte, unsichere oder strittige Messdaten gestört wird. Dies gilt umso mehr, je weiter die Betrachtung des Ist-Zustands im Sinne der Einbeziehung einer Langfristvariabilität der hydrologischen Prozessabläufe bzw. auch zur statistischen Absicherung der Analyseergebnisse in die Vergangenheit ausgedehnt wird.

Das Problem ergibt sich als das *Dilemma*, dass eine zutreffende Analyse und Simulation des Abflussprozesses eine konsistente Messreihe voraussetzt, die Analyse und Beseitigung von Inkonsistenzen jedoch durch Analysen mit plausiblen Ergebnissen, sowie durch die Anwendung von Simulationswerkzeugen zu unterstützen ist.

Bei der gegebenen Ausgangssituation war die Trennung der Inkonsistenzeffekte von der Variabilität des Abflussprozesses nicht ohne weiteres möglich und erforderte ein *sehr sorgfältiges Vorgehen*, bei dem *verschiedene Untersuchungen* zur Konsistenz der vorliegenden Abflussreihen einerseits und zur Analyse und Simulation des Abflussprozesses andererseits *schrittweise, wechselseitig aufeinander abgestimmt und in gegenseitiger Ergänzung erfolgen mussten*. Die Darstellung der Untersuchungsergebnisse in diesem Bericht erfordert daher eine entsprechende Gliederung, zu der in diesem Abschnitt Erläuterungen gegeben werden. An einzelnen Stellen bzw. bei einzelnen Abflussereignissen war – nach ähnlichem Prinzip – ein feiner differenzierteres Vorgehen erforderlich, jedoch kann eine entsprechende Detailschilderung nicht im Rahmen dieses Berichts erfolgen.

- Im ersten Schritt wurde eine *Konsistenzanalyse* durch vergleichsweise einfache, geeignete Verfahren durchgeführt (siehe Kapitel III-1.5).
- Dies ermöglichte bereits einige begründbare Veränderungen in den Abflussreihen zu deren *Plausibilisierung*. Allerdings beziehen sich diese Veränderungen vor allem auf die jüngere Zeit ab den 1960er Jahren, in der in höherer räumlicher Dichte Pegelreihen vorliegen und die Abflusskurven häufiger an die veränderlichen Verhältnisse adaptiert wurden, so dass diese Referenzinformationen für begründbare Veränderungen in kritischen Zeitreihenabschnitten genutzt werden konnte. In der Zeit davor waren solche Modifikationen der Abflussreihen mit zunehmend mehr Schwierigkeiten verbunden, so dass die Datengrundlage, auch in modifizierter Form, zunehmend größeren Unsicherheiten unterlag.
- *Analysen längerfristiger Zeiträume* (auch vor 1960) wurden wegen dieser Datenunsicherheiten zunächst auf *ausgewählte Pegel* beschränkt, bei denen von relativ verlässlichen Daten auch in früheren Zeiträumen auszugehen war (z.B. Pegel Dresden) bzw. Überarbeitungen der Abflusszeitreihen bereits erfolgt waren (z.B. Barby). Die Verfahren wurden auf solche beschränkt, die mit einer weitgehenden statistischen Absicherung das Gesamtverhalten und *zeitliche Grundtendenzen* wiedergeben (siehe Kapitel III-1.6.2.) und nicht – z. B. im Rahmen einer Extremwertstatistik – auf eine genaue Quantifizierung einzelner Ereignisse abzielen. Diese Analysen längerer Zeiträume erlaubten die *Einordnung verschiedener Zeitabschnitte* und insbesondere die sinnvolle *Abgrenzung eines jüngeren Zeitraums (1964-1995)*, der gegenüber dem langfristigen Gesamtgeschehen den heutigen Bedingungen am nächsten kommt.
- In diesem *jüngeren Zeitraum* mit relativ verlässlicher Datenlage und für den gegenwärtigen Zustand weitgehend repräsentativen Bedingungen konnten dann *statistische Analysen und Entwicklungen von Simulationswerkzeugen* durchgeführt werden. Um gleichzeitig auch die statistische Absicherung der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde dieser Zeitraum nicht zu stark, etwa auf die Zeit ab 1981, dem Jahr in dem für verschiedene Pegel umfangreichere Überarbeitungen der Abflusskurven stattfanden, begrenzt. Der Zeitraum wurde auf die Jahre 1964-1995 (32 Jahre) ausgedehnt, wie es sich nach dem vorangehenden Punkt begründen ließ. Bei der Analyse und der Simulation der Abflusszeitreihen dieses Zeitraums wurde versucht, die gemessenen Reihen durch die verschiedenen Modelle möglichst gut und umfassend anzunähern, um die Ergebnisse bzw. Modellparameter im Sinne einer plausiblen hydrologischen Gesamtsituation gegenseitig abzusichern, und damit u.a. die Voraussetzung für eine Erweiterung der Anwendung der Verfahren auf frühere Zeiträume mit schlechterer Datenlage zu ermöglichen.
- Wie bereits angesprochen, konnten die *anhand des jüngeren Zeitraums erzielten Analyseergebnisse und entwickelten Simulationsmodelle genutzt werden, um frühere Zeiträume fundierter zu untersuchen*, als es ohne diese möglich war. In diesem Sinne konnten die Ergebnisse der statistischen Analysen des jüngeren Zeitraums als *Referenz eines plausiblen hydrologischen Gesamtbildes* genutzt werden, anhand dessen (abgesicherten) Musters die Ergebnisse der Analysen längerer Zeiträume (1936-1995, siehe Kapitel III-1.6.8.) bewertet werden mussten. Hinzu kam die Möglichkeit einer *erweiterten Stationaritätsanalyse* durch Anwendung der in diesem Untersuchungsstadium bereits entwickelten *Simulationsinstrumente*, zusammen mit einer entsprechenden Diagnostik (siehe Kapitel III-1.6.6.). Dies ermöglichte die Identifizierung und Einordnung von Räumen und Ereignissen, für die im Hinblick auf die angesprochenen Unsicherheiten und im Sinne plausibler Ergebnisse eine besonders detaillierte Untersuchung angebracht erschien. So konnten beispielsweise einige Hochwasserereignisse der 1940er Jahre im Bereich des Pegels Barby und unterhalb davon als besonders problematisch erkannt und bezüglich ihres Einflusses auf die statistischen Analyseergebnisse bewertet werden (siehe Kapitel III-1.6.8.). Inkonsistenzen sind dann ggf. soweit wie möglich auch aus den längeren Reihen zu entfernen. Weiterhin konnten die anhand des jüngeren Zeitraums entwickelten und – bei veränderten Bedingungen – ggf. um Zusatzmodule erweiterten Simulationsinstrumente genutzt werden, um in

Simulationen von Prozessabläufen *Daten des früheren Zeitraums zu verifizieren, begründet zu modifizieren oder – bei fehlenden Daten – zu rekonstruieren* (siehe Kapitel III-1.6.7.).

- Auf Grundlage der so verbesserten Datengrundlage eines nun längeren Zeitraums (1936-1995), konnten *längerfristige Abflussstatistiken* erstellt werden. Sofern gegenüber den Statistiken der jüngeren Zeitreihe – auch nach Versuchen der Beseitigung von Inkonsistenzen – Abweichungen im Muster der Ergebnisse bestehen blieben, erlaubte die Nutzung des Ergebnismusters der jüngeren Zeitreihe eine Einordnung der Abweichung und die *Ermittlung eines approximativen Abbildes der Abflussdynamik*. Der Zustand des jüngeren Zeitraums konnte dann vor dem Hintergrund der längerfristigen Variabilität eingeordnet und bewertet werden. Die Weiterentwicklung von Simulationswerkzeugen durch die Einbeziehung von Zusatzmodulen zur Berücksichtigung von veränderten Bedingungen (z.B. veränderte Retentionsbedingungen entlang der Elbe beim Ablauf von Hochwasserwellen) ermöglichte die Modellanwendung auf ein größeres Spektrum an Zuständen und Prozessen. Dies kann als wertvoller Schritt der *Modellverallgemeinerung* aufgefasst werden, die erforderlich ist, um das Modell unter verschiedenen Bedingungen anwenden zu können und damit die Folgen verschiedener *Szenarien* auf den Abflussprozess und davon abhängige Größen simulieren und prognostizieren zu können.
- Die geschilderte Vorgehensweise erlaubt die *gleichzeitige Erfüllung der Projektziele*: die abgesicherte und umfassende Erfassung des Ist-Zustands der Abflussdynamik und dessen Einordnung gegenüber einer längerfristigen Variabilität, sowie die Entwicklung eines Instrumentariums für die umfassend realistische Simulierbarkeit des Abflussprozesses auch unter veränderlichen Bedingungen.
- Die bis hierhin dargestellte Vorgehensweise war v.a. auf den Übergang von der Reihe 1964-1995 auf die Reihe 1936-1995 bezogen. Denkbar ist in ähnlicher Weise auch eine *Erweiterung auf weiter zurückliegende Zeiträume*. Dies ist jedoch noch nicht Stand der Forschung bzw. der Datenerhebung. Teilweise war auf der anderen

Seite auch eine differenziertere Vorgehensweise nötig als der Gliederung dieses Berichts entsprechend, beispielsweise von dem Zeitraum 1981-1995, mit besser abgesicherter Datenebene, auf den Zeitraum 1964-1995.

- *Die Gliederung dieses Berichts orientiert sich an der Logik dieser Vorgehensweise*. Teilweise sind in der Darstellung Vorgriffe auf noch folgende Kapitel nicht vermeidbar. Zudem werden bereits angesprochene Punkte zu späteren Zeitpunkten erneut aufgegriffen.

### III-1.5 Konsistenzprüfung der Abflusszeitreihen der Elbe-Pegel

Die Konsistenz der vorliegenden gemessenen Abflussreihen ist eine entscheidende Voraussetzung für verlässliche Ergebnisse bei der Untersuchung des Abflussprozesses. Inkonsistenzen überlagern sich schwer trennbar mit der Variabilität des eigentlich zu analysierenden bzw. durch Simulationen nachzubildenden Abflussprozesses und können zu falschen Rückschlüssen führen.

Dies gilt insbesondere an der Elbe mit einer geringen Stabilität des aus feinkörnigen Sedimenten gebildeten Gerinnebetts, dessen Morphologie demzufolge im Verlauf der Zeit häufigen Änderungen unterworfen war. Die Anzahl der Abflussmessungen zur Ableitung bzw. Aktualisierung von Abflusskurven war demgegenüber in der Vergangenheit nicht hinreichend. Desweiteren sind die Fragestellungen, die im Rahmen der Untersuchung der Flusslandschaft der Elbe besonders interessieren und daher im Projekt vorrangig bearbeitet wurden, besonders mit seltenen, extremen Ereignissen (im Projekt v.a. Hochwasserereignisse) verknüpft. Gerade hier ist die (selten mögliche) messtechnische Erfassung des Abflusses schwierig und in der Vergangenheit nicht hinreichend erfolgt.

Hinzu kam ferner, dass in verschiedenen Gewässerabschnitten bzw. Zeiträumen keine gemessenen Reihen vorliegen, so dass die Konsistenz benachbarter Pegel mit längeren Messreihen schwer eingeschätzt werden konnte.

Das Problem ergab sich als das Dilemma, dass eine zutreffende Analyse und Simulation des Abflussprozesses eine konsistente Messreihe voraussetzt, die Analyse und Beseitigung von Inkonsistenzen

jedoch durch plausible Analyseergebnisse, sowie durch die Anwendung von Simulationswerkzeugen zu unterstützen ist.

Bei der gegebenen Ausgangssituation war die Trennung der Inkonsistenzeffekte von der Variabilität des Abflussprozesses nicht ohne weiteres möglich und erforderte ein sehr sorgfältiges Vorgehen (siehe auch Kapitel III-1.4).

Um im ersten Schritt Effekte von Inkonsistenzen so weit wie möglich zu vermeiden, wurden die Reihen einer kritischen Prüfung unterzogen. Dabei wurden die Untersuchungen zur Konsistenz der Abflussreihen der Elbe, die bereits vor Beginn des Projekts bzw. parallel dazu an verschiedenen wasserwirtschaftlichen Ämtern durchgeführt wurden, berücksichtigt. Zu nennen sind insbesondere die BfG-Berichte 0806 (BfG 1994), 1041 (BfG 1996) und 1228 (BfG 2000). In diesen Berichten werden alle in Kapitel III-1.3 genannten deutschen Elbe-Pegel außer Neu Darchau angesprochen. Es werden Informationen zu den Pegeln, zu Gültigkeitszeiträumen von Abflusskurven und zu durchgeführten Abflussmessungen gegeben. Insbesondere werden die Werte durchgeführter Abflussmessungen systematisch mit den Abflusswerten verglichen, die sich aus der jeweils gültigen Abflusskurve ergaben und entsprechende Rückschlüsse gezogen. Für den Pegel Torgau wurden Abflusskurven in Jahresscheiben 1971-1993 hergeleitet, um den rasch veränderlichen Verhältnissen zu entsprechen. Bei Beratungsgesprächen mit Vertretern der BfG, der IKSE und der Landesämter im StAU Magdeburg im Dezember 1997, in der BfG-Berlin im Februar 1998 und im Dezember 1999 wurde die Problematik im Sinne eines gegenseitigen Informationsaustauschs pegelweise erörtert.

Die Untersuchungen zur Konsistenz der Abflussreihen an den Elbe-Pegeln im eigenen Projekt hatten das **Ziel, Aufschluss über folgende Effekte zu gewinnen:**

- *Fehlerhafte Abflusskurven:* Die W-Q-Beziehungen der Elbe haben sich entsprechend der Morphologie des Gerinnebetts und des Vorlandes im Verlauf der Zeit deutlich geändert. Häufig ist dies nicht rechtzeitig durch aktualisierte Abflusskurven berücksichtigt worden, so dass die Verwendung einer Abflusskurve über ihren Gültigkeitsbereich hinaus zu Bilanzunstimmigkeiten geführt hat. Hinzu kommen in

einigen Fällen offenbar fehlerhafte Abflusskurven. Auch wenn die Fehler nicht restlos beseitigt werden konnten, ist die Kenntnis der resultierenden Unsicherheiten wichtig.

- *Fehlerhafte Einzelpunkte:* Sie beruhen auf Ablesefehlern, Schreibfehlern etc.
- *Durch Eis bewirkte Rückstaueffekte:* Bei Eisstand wird der Fließprozess behindert und dadurch der Abfluss reduziert. Stromaufwärts kann zudem der Wasserstand ohne entsprechenden Anstieg des Abflusses ansteigen. Betroffene Ganglinienabschnitte sind für nachfolgende Untersuchungen auszusondern, da sie nicht die Prozesse im Einzugsgebiet repräsentieren.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen bezog sich dabei *zunächst auf den Zeitraum ab 1960*, da in diesem Abflussreihen an verhältnismäßig vielen Stellen verfügbar sind und Abflusskurven vergleichsweise häufig an die veränderlichen Verhältnisse angepasst wurden. Dies begünstigte die Anwendung der nachfolgend beschriebenen Verfahren zur Plausibilisierung der Abflussreihen. Zudem bestand gerade im Zeitraum zwischen Ende der 1960er Jahre und Anfang der 1980er Jahre erheblicher Plausibilisierungsbedarf. In der Zeit vor 1960 hingegen war die Anzahl der verfügbaren Reihen (Tangermünde ab 1961, Wittenberg ab 1951, Bad Dübener See ab 1961, Löben ab 1974) deutlich geringer und die Zeiträume der Anwendung von unveränderten Abflusskurven deutlich länger. Dies erschwerte Aussagen zur Konsistenz der Abflussreihen. Sie sind nur in besonders eindeutigen Fällen möglich. Dementsprechend konnten zunächst nur in wenigen Fällen Inkonsistenzen festgestellt werden, die auch plausibel modifizierbar waren.

Als zuverlässigste Pegel (*Leitpegel*) wurden - wie beim o.g. Beratungsgespräch in Magdeburg einhellig festgestellt - die in Dresden, Barby und Neu Darchau betrachtet. Bei ihnen lagen nur bei einzelnen Ereignissen Unstimmigkeiten vor, die sich meist erklären und beseitigen ließen. Diesen Pegeln wurde bei den Konsistenzuntersuchungen folglich i.d.R. das größte Gewicht verliehen.

Zur Identifizierung dieser Effekte wurden im Projekt **folgende Untersuchungen** durchgeführt:



- *Untersuchung von Diagrammen mit gegeneinander aufgetragenen Wertepaaren sich entsprechender Wasserstands- ( $W$ ) und Abflusswerte ( $Q$ ):* Die meisten Punkte liegen jeweils auf verschiedenen definierten Kurven. Entsprechend konnten Zeitabschnitte der Verwendung der verschiedenen Abflusskurven identifiziert und die  $W$ - $Q$ -Beziehungen über intervallweise Polynomannpassung rekonstruiert werden. Dabei wichen die Gültigkeitszeiträume teilweise von denen, die in den BfG-Berichten angegeben wurden, ab. Eine Vielzahl von Punkten liegt zudem verstreut außerhalb der Kurvenverläufe. Mit ihnen konnten Zeitpunkte fehlerhafter Eisstaueffekte identifiziert werden. Letztere zeichnen sich typischerweise durch zeitlich benachbarte Punktegruppen mit kaum variierendem Abfluss, aber deutlich variierendem Wasserstand ab. Zur Demonstration dieser Effekte in einem  $W$ - $Q$ -Diagramm dient die Abb. III-1.2, die alle angesprochenen Effekte enthält. In der Abbildung ist die Variabilität der mit der Zeit veränderten Abflusskurven zu erkennen, sowie die als fehlerhaft identifizierten  $W$ - $Q$ -Beziehungen zweier Zeitabschnitte. Eine Korrektur erwies sich hier als plausibel. Der Effekt ist in Abb. III-1.3 erkennbar. Die streuenden Einzelpunkte (Abb. III-1.2) entsprechen fehlerhaften Einzelpunkten oder Eisstaueffekten. Letztere zeigen die typischen Gruppierungen, jeweils bei ähnlichem Abflussniveau.
- *Längsschnittbetrachtungen für benachbarte Pegelgruppen:* Entsprechende Ganglinien wurden visuell untersucht und über verschiedene Zeitabschnitte (mittlere jährliche Abflüsse, Füllen von Abflussereignissen) bilanziert. Die Bilanzierung von Abflussereignissen erfolgte anhand von 44 Ereignissen vor 1960 und anhand von 96 Ereignissen nach 1960. Bilanzunstimmigkeiten deuten v.a. auf fehlerhafte bzw. nicht rechtzeitig aktualisierte Abflusskurven bzw. Eisrückstau hin. Fehlerhafte Einzelpunkte zeichnen sich in den Bilanzen weniger deutlich ab, sind aber mit Hilfe der visuellen Ganglinienprüfung zu entdecken.
- *Informationsaustausch mit zuständigen Behörden* (zum Vergleich: s.o.).

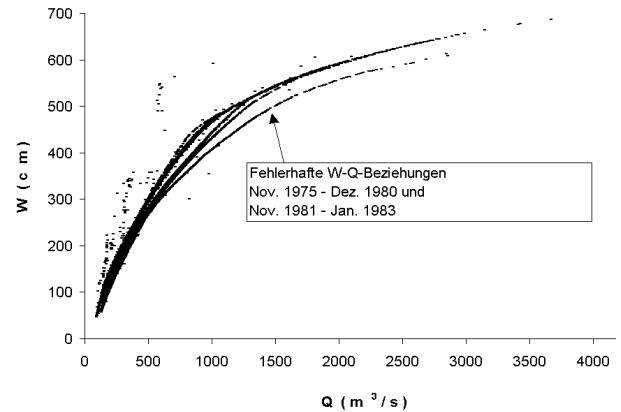


Abb. III-1.2 Wasserstand-Abfluss-Wertepaare (mittlere Tageswerte) des Pegels Aken 1936-1995.

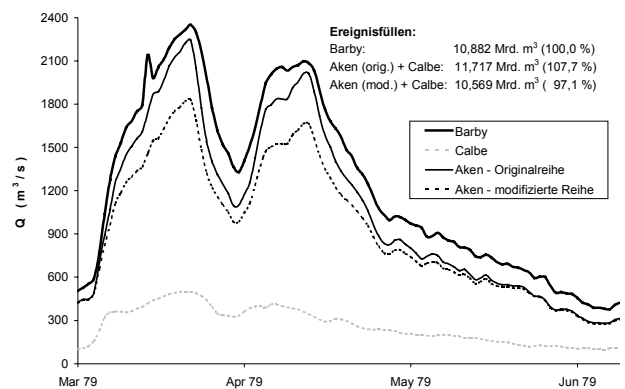


Abb. III-1.3 Ganglinienauschnitte der Pegel Barby, Aken (original, sowie mit der im Zeitraum 1957-1975 gültige Abflusskurve modifiziert) und Calbe Gr. Die Ereignisfülle der modifizierten Ganglinie Akens ist angesichts der summierten Einzugsgebietsfläche Akens und Calbes von 99,5 % des Einzugsgebiets von Barby deutlich plausibler.

In Zeitabschnitten, in denen nach diesen ersten Konsistenzuntersuchungen die Abflusskurve als vermutlich fehlerhaft eingeschätzt wurde, wurden zunächst ab dem Jahr 1961 mit Hilfe der Wasserstandsreihen und der jeweils zeitlich benachbarten  $W$ - $Q$ -Beziehung bzw. eines Segments der zeitlich benachbarten  $W$ - $Q$ -Beziehung *neue Abflussganglinien generiert*, die dann einer *erneuten Längsschnittbetrachtung* unterzogen wurden. Teilweise war es möglich, plausible Abflussganglinien zu erzeugen. Sie wurden dann für nachfolgende Untersuchungen verwendet. Diese konzentrierten sich zunächst auf den Zeitraum 1964-1995 und beinhalteten statistische Analysen, sowie die Entwicklung von geeigneten Instrumenten zur Simulation der Abflussprozesse, insbesondere zum Ganglinien-Routing (zum Vgl. Kapitel III-1.4, III-1.6.5.1 und III-1.6.3/III-1.6.4). Nach deren Durchführung, sowie auch bereits parallel dazu konnten diese Verfahren

zu einer weiteren Plausibilitätskontrolle genutzt werden. Zu nennen sind v.a.:

- *Ganglinien-Routing unter Verwendung des Translations-Diffusions-Modell ELBA* (siehe Kapitel III-1.6.5.1, III-1.6.6.1 und III-1.6.8). In Gewässerabschnitten und Zeiträumen, in denen bezüglich des Ablaufs von Hochwasserwellen die heutigen Verhältnisse, auf die die ELBA-Parameter abgestimmt sind, vorliegen, konnte dieses Modell genutzt und gemessene Abflusswerte gegenüber simulierten auf Plausibilität überprüft werden. In Gewässerabschnitten und Zeiträumen mit veränderten Bedingungen, etwa infolge Eindeichungen, konnten die veränderten Bedingungen durch Zusatzmodule nachvollzogen werden (zum Vergleich Kapitel III-1.6.7).
- *Längsschnittentwicklung für Hochwasserkennwerte* (zum Vergleich Kapitel III-1.6.4 und III-1.6.8). In diesem messtechnisch besonders kritischen Bereich des Abflusses konnte der räumliche Abgleich der pegelweisen Ergebnisse von Hochwasserstatistiken wertvolle Informationen über die Plausibilität der zugrundeliegenden Zeitreihen liefern und ggf. deren notwendige weitere Plausibilisierung indizieren.

*In dem beschriebenen Verbund an Verfahren wurde ein Abgleich der Ergebnisse im Sinne eines plausiblen Gesamtbildes angestrebt.*

*An den einzelnen Pegeln stellten sich problemorientiert die **Ergebnisse der Konsistenzuntersuchung** wie folgt dar.* Dabei werden zunächst die drei Pegel Dresden, Barby und Neu Darchau behandelt, da bei ihnen die Datengrundlage am zuverlässigsten ist, und sie bei der Konsistenzanalyse als Leitpegel eine besondere Rolle spielen. Bei den anderen Pegeln werden zunächst die zu den Leitpegeln benachbarten Pegel betrachtet.

#### **Pegel Dresden (Elbe-km 55,6)**

Bereits in den *BfG-Berichten 0806 und 1228*, sowie auch beim o.g. *Beratungsgespräch 1997* in Magdeburg wurde die gute Datenqualität der Reihen dieses Pegels betont. Die Abflussmessstellen sind im Niedrigwasser-, Mittelwasser- und Hochwasserbereich gut geeignet. Im Mittelwasserbereich wurde

empfohlen, die Abflussreihe nicht zu ändern. Im Hochwasserbereich zeigt der Pegel Dresden noch die ausgeglichensten Abflusskurven-Verläufe, auch wenn die Anzahl der Messungen nicht hinreichend war. Als unsicher auf Grund seltener Messungen wurde nur der Niedrigwasserbereich eingestuft. Die Verwendung als Ausgangspegel für Längsschnittbilanzen wurde empfohlen.

In den *eigenen Untersuchungen* ergab sich eine mit der Zeit mehr oder weniger kontinuierliche Zunahme des Verhältnisses  $Q/W$ , wobei die Änderungen in den letzten Jahrzehnten nur gering waren. Es konnte keine  $W$ - $Q$ -Beziehung als fehlerhaft identifiziert werden. Dementsprechend wurden keine längerfristigen Modifizierungen vorgenommen. Unstimmigkeiten ergaben sich nur bei Einzelwerten bzw. einzelnen Ereignissen. Vorschläge zur Plausibilisierung sind vorhanden und wurden den zuständigen Behörden mitgeteilt. Eine Prüfung der größten Abflussscheitelwerte des 20. Jahrhunderts (Abflussscheitelwert des Ereignisses im März 1981 und größere Ereignisse) gegenüber denen des oberliegenden, tschechischen Pegels Decin mit nur geringfügig kleinerem Einzugsgebiet und einer täglichen Abflussreihe ab 1887 ergab i.d.R. weitgehend ähnliche Werte mit nur wenigen Prozent Abweichung. Dies gilt für alle Ereignisse ab 1936, bei denen die maximale Abweichung der Scheitel der Tagesmittel 7,7 % betrug (Hochwasserereignis im März 1940). Größere Abweichungen waren bei den Hochwasserereignissen im Januar 1920 (12,2 %), im April 1900 (18,7 %) und im März 1915 (10,6 %) festzustellen. Bei allen bis hierhin genannten Abweichungen waren die Werte in Decin größer als die in Dresden. Kleiner waren in Decin allerdings die Werte vor 1900 (bis zu 7,4 % Abweichung). Die Messungen in diesem Extrembereich am Pegel Decin bestätigten also i.d.R. diejenigen am Pegel Dresden, v.a. im Zeitraum nach 1936.

Insgesamt konnte durch die Untersuchungen im Projekt die gute Datenqualität an diesem Pegel bestätigt werden. Der Pegel konnte als einer der Leitpegel für die Konsistenzuntersuchung gelten.

#### **Pegel Barby (Elbe-km 295,5)**

In den *BfG-Berichten 0806 und 1228*, sowie auch beim o.g. *Beratungsgespräch 1997* in Magdeburg wurde die relativ gute Datenqualität der Reihen auch dieses Pegels betont. Die Abflussmessstelle ist in

allen Abflussbereichen gut geeignet, auch bei Hochwasser, da das Profil von einer Brücke überspannt wird. Zudem waren die Abflussmessungen relativ gut über die Zeit verteilt, in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts auch im Bereich des mittleren jährlichen Scheitelabflusses. Dennoch kann die Anzahl der Messungen im Extrembereich nicht als hinreichend angesehen werden, und es traten in diesem Bereich stärkere Abweichungen der Messungen von Kurvenwerten auch bei aktuelleren Kurven auf (etwa +/- 15% bei der zwischen 1977 und 1989 gültigen Abflusskurve). Die Gültigkeitszeiträume der Abflusskurven wurden als kritisch beurteilt, jedoch eine Änderung nur mit Begründung anhand von Längsschnittuntersuchungen empfohlen. Eine sehr günstige Tatsache an diesem Pegel ist die Überarbeitung der Abflusskurven und der Abflussreihen durch die Wasserwirtschaftsdirektion Magdeburg in den 1980er Jahren. Die Datenqualität wurde demnach insgesamt wie folgt beurteilt: die Abflusskurvenverläufe im Hochwasserbereich gehören an diesem Pegel noch zu den ausgeglichtesten; im Mittelwasserbereich ergab sich keine Notwendigkeit weiterer Abflusskurvenverbesserungen; im Niedrigwasserbereich wurden keine konkreten Angaben gemacht, die Werte unterliegen wie an anderen Pegeln Unsicherheiten. Damit wurde insgesamt eine Überarbeitung der Abflusskurven im Gegensatz zu anderen Pegeln nicht empfohlen (BFG 2000, S. 1).

In den *eigenen Untersuchungen* ergab sich eine leichte Erhöhung des Verhältnisses Q/W im Laufe der Zeit, als deren Ursache sich eine Sohlerosion annehmen lässt. Hierfür sprechen auch die in weiteren Untersuchungen festgestellten Absenkungen von Bezugswasserständen an diesem Pegel bzw. in diesem Bereich (zum Vgl. FAULHABER 1998, S. 219, sowie GLAZIK, 1994, S. 35). Aus den Untersuchungen ergab sich zunächst kein Hinweis auf eine fehlerhafte W-Q-Beziehung, so dass an diesem Pegel keine längerfristigen Modifizierungen in der Abflussreihe vorgenommen werden mussten. Unstimmigkeiten zeigten sich nur bei Einzelwerten bzw. einzelnen Ereignissen. Sie wurden den zuständigen Ämtern mitgeteilt. Unter ihnen ist das Hochwasserereignis im Frühjahr 1965 hervorzuheben, bei dem sich Unstimmigkeiten in einer Längsschnittbilanzierung zwischen den Pegeln Wittenberg und Tangermünde unter Einbeziehung der Saale- und Muldeabflussreihen nur am Pegel Barby

ergaben, sowohl gegenüber dem Pegel Tangermünde, als auch gegenüber den Pegeln Aken und Calbe/Gr. Auch hätte diese Unstimmigkeit zu einem nichtplausiblen Längsschnitt der jährlichen Scheitelabflüsse 1964-1995 beigetragen (zum Vgl. Kapitel III-1.6.4). In diesem gut begründbaren Fall wurde daher eine Plausibilisierung der Abflussreihe von Barby vorgenommen, indem mit Hilfe des Modells ELBA (siehe Kapitel III-1.6.5.1) die Ganglinien von Calbe Gr. und Aken zum Pegel Barby geroutet wurden und die sich dort ergebende Ganglinie angenommen wurde. Der maximale Scheitelabfluss dieses Ganglinienabschnitts reduzierte sich dadurch von 2707 m<sup>3</sup>/s auf 2605 m<sup>3</sup>/s.

Abgesehen von diesen korrigierbaren Einzelwerten ist von einer relativ hohen Zuverlässigkeit der Abflussreihe des Pegels Barby auszugehen, insbesondere in den letzten Jahrzehnten. Probleme ergaben sich in einem späteren Stadium der Untersuchungen für Hochwasserereignisse vor 1964 (siehe Kapitel III-1-6.8). Abgesehen davon war es jedoch sinnvoll den Pegel – entsprechend der Abstimmung beim o.g. Beratungsgespräch in Magdeburg im Dezember 1997 – zumindest für den Zeitraum ab 1964 als Leitpegel für die Konsistenzanalyse der anderen Pegel zu verwenden.

#### ***Pegel Neu Darchau (Elbe-km 536,5)***

In den *BfG-Berichten 0806 und 1228* wurde dieser Pegel nicht bzw. nicht detailliert berücksichtigt. Andererseits lagen für diesen Pegel aus früheren Untersuchungen bereits umfangreichere Erfahrungen vor. Der Pegel kann demnach als zuverlässig eingestuft werden. Dies zeigt auch die Tatsache, dass in den letzten Jahrzehnten – im Gegensatz zum nahegelegenen Pegel Wittenberge mit konstanter Abflusskurve zwischen 1947 und 1981 - die Abflusskurve relativ häufig aktualisiert wurde (mündliche Mitteilung beim Beratungsgespräch in Berlin im Februar 1998), so dass davon auszugehen ist, dass die (sich ändernden) Verhältnisse in den Abflusskurven gut erfasst wurden. So wurde auch in BFG (2000, S. 29) der Pegel – gemeinsam mit dem von Barby - als Referenzpegel zur Erklärung unstimmiger Bilanzgrößen am Pegel Wittenberge herangezogen. Dementsprechend wurde der Pegel beim o.g. *Beratungsgespräch 1997* als einer der Leitpegel für die Konsistenzanalyse bestätigt.

In den *eigenen Untersuchungen* konnte wegen der erst ab 1971 verfügbaren Wasserstandreihe nur dieser Zeitraum genauer untersucht werden. Wasserstandsdaten in der Zeit davor lagen am Wasser- und Schifffahrtsamt Lauenburg ebenfalls vor, wurden jedoch bis zum Ende der Projektlaufzeit noch nicht in eine EDV-geeignete Form überführt. Im Zeitraum ab 1971 änderte sich die W-Q-Beziehung kaum. Im Zeitraum davor wurde – wie oben angesprochen – die Abflusskurve offenbar mehrfach aktualisiert und damit den veränderlichen Verhältnissen offenbar relativ regelmäßig entsprochen. Dies entspricht den Ergebnissen anderer Untersuchungen (FAULHABER 1998, S. 219/220, GLAZIK 1994, S. 35).

Entsprechend zu diesen Ausführungen kann von einer guten Datenqualität der Abflussreihen an diesem Pegel ausgegangen werden. W-Q-Beziehungen konnten nicht als fehlerhaft identifiziert werden. Somit wurden keine längerfristigen Modifizierungen in der Abflussreihe vorgenommen. Probleme ergaben sich lediglich bei einzelnen Abflusswerten bzw. Ganglinienabschnitten. Herauszuheben sind einige Ganglinienabschnitte im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts (Jahre 1900, 1901, 1903, 1905, 1907, 1912, 1917, 1918, 1921, 1922, 1924). Hier trat offenbar Eistrückstau auf mit erhöhtem Wasserstand, der dann nach der sonst gültigen Abflusskurve in nicht plausible Abflüsse umgerechnet wurde. In den Jahren 1903 und 1907 resultierten hieraus sogar die Jahresmaxima der Abflussreihen. Dies war bei Analysen der Ganglinie zu berücksichtigen: die fehlerhaften Werte wurden geeignet ersetzt.

Abgesehen von diesen Problemen konnte durch die Untersuchungen im Projekt, sowie durch die Erfahrungen aus anderen Untersuchungen die Verwendung des Pegels als Leitpegel für die weitere Konsistenzanalyse als geeignet angesehen werden. Dies gilt umso mehr, da für den möglichen alternativen Pegel Wittenberge entscheidende Mängel festgestellt werden konnten (konstante Abflusskurve im langen Zeitraum 1947-1980; Hochwasserabflussmessung von Brücken erst ab 1954; Streuung der Messwerte bei Hochwasser; zum Vgl. s.u.).

*Somit standen mit den **Pegeln Dresden, Barby und Neu Darchau** an geeigneten Standorten drei Pegel zur Verfügung, für die v.a. in jüngerer Zeit – mit nur relativ geringen Einschränkungen – von einer relativ zuverlässigen Datengrundlage der Abfluss-*

*messreihen ausgegangen werden konnte. Die Abflussreihen dieser Pegel konnten für die Konsistenzanalyse an den anderen Pegeln entlang der deutschen Teilstrecke der Elbe als Referenz (**Leitpegel** bzw. ‚Rückgrat der Konsistenzanalyse‘) genutzt werden.*

#### **Pegel Torgau (Elbe-km 154,6)**

Nach den Angaben in den *BfG-Berichten 0806, 1041 und 1228* konnte von der grundsätzlichen Eignung der Messstelle, auch bei Hochwasser (Vorhandensein einer Brücke), ausgegangen werden. Probleme an diesem Pegel bestanden aus nicht dokumentierten Änderungen des Profils der Eichmessungen. Zudem trat in diesem Bereich starke Sohlenerosion auf, die nicht ausreichend häufig in aktualisierten Abflusskurven berücksichtigt wurde. Vor allem im Zeitraum 1966-1976 liegen so gut wie keine Messungen vor. Ferner liegen insgesamt nur wenige Messungen, v.a. in den Extrembereichen vor. Dies gilt v.a. für den Hochwasserbereich mit nur vier Messungen im Zeitraum 1921-1992. Es ist von Extrapolationsfehlern im Niedrig- und Hochwasserbereich auszugehen. Zudem überschneiden sich Abflusskurven verschiedener Gültigkeitsbereiche und Bilanzunstimmigkeiten in monatlichen Mitteln des Abflusses gegenüber dem Pegel Dresden sind feststellbar, v.a. etwa ab Ende der 60er Jahre. Damit wurde eine Überarbeitung in allen Abflussbereichen erforderlich und ist in Form des BfG-Berichts 1041 auch erfolgt. Hierbei wurden die Abflusskurven für die Jahre 1971-1993 neu erstellt. Dazu wurde der Abfluss in Torgau aus der Summe des Abflusses Dresden und dem Zwischengebietsabfluss, der aus Wasserhaushaltsrechnungen hergeleitet wurde, bei stationären Abflusssituationen ermittelt. Mit diesen Abflusswerten und entsprechenden gemessenen Wasserständen ließen sich Abflusskurven in Jahresscheiben 1971-1993 ermitteln.

Die *eigenen Untersuchungen* bestätigten die starken Veränderungen der Abflusskurven aufgrund der Sohlenerosion mit zeitlich zunehmendem Verhältnis Q/W. Die Bilanzunstimmigkeiten der unkorrigierten Reihen (Defizite im Vgl. zu Dresden) v.a. ab etwa Ende 60er Jahre wurden ebenfalls durch die im Projekt durchgeführten Längsschnittbetrachtungen bestätigt. Nach Korrektur unter Verwendung der im BfG-Bericht 1041 angegebenen Abflusskurven konnten jedoch Abflussreihen des Pegels Torgau

erzeugt werden, die nach den in diesem Projekt verwendeten Verfahren, sowie nach monatlichen Bilanzrechnungen der BfG vor und nach 1971 stark verbessert bzw. plausibel sind. Die von der BfG berechneten Abflusskurven konnten durch die Untersuchungen dieses Projekts also bestätigt werden. Ab 1993 konnte allerdings lediglich die Abflusskurve für 1993 verwendet werden. Dies dürfte sich jedoch auf die in diesem Bericht schwerpunktmäßig untersuchten Hochwasserverhältnisse nur marginal ausgewirkt haben. In den Untersuchungen wurden ferner fehlerhafte Einzelwerte identifiziert, zusammengestellt und den zuständigen Ämtern mitgeteilt.

#### ***Pegel Aken (Elbe-km 274,7)***

In den *BfG-Berichten 0806 und 1228* wurden keine Angaben zur grundsätzlichen Eignung des Standorts für Abflussmessungen gemacht. Probleme ergaben sich dadurch, dass zwischen 1963 und 1990 fast nur Zweipunktmessungen durchgeführt wurden und dass insgesamt kaum Messungen im Extrembereich vorliegen, v.a. im Hochwasserbereich mit nur zwei Messungen oberhalb  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ , jedoch deutlich unterhalb des mittleren jährlichen Scheitelabflusses. Bei der vergleichenden Untersuchung zwischen gemessenen und nach der Abflusskurve ermittelten Abflüssen traten starke Abweichungen auf, zwischen - 16 % (gemessene Werte größer) und + 28 %, bei der aktuellsten Abflusskurve zwischen - 5 % und + 20 %. Dabei lagen die Messungen oberhalb  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  recht gut (nur bis zu 5 % Abweichung), wobei die in den 1970er Jahren durchgeführte Messung aber nur eine Zweipunktmessung war. Die Gültigkeitszeiträume der Abflusskurven wurden kritisch beurteilt. Nach dem Vergleich von gemessenen Abflusswerten mit entsprechenden Abflusskurvenwerten wurde festgestellt, dass im Mittelwasserbereich eine Überarbeitung der Abflusskurven erforderlich war. Dies wurde auch durch die Längsschnittbilanzierung mittlerer Monatsabflüsse gegenüber den Pegeln Wittenberg und Bad Dübren (Mulde) einerseits und den Pegeln Barby und Calbe Gr. (Saale) andererseits bestätigt. Im Niedrig- und Hochwasserbereich war mangels nutzbarer Information keine Einschätzung anhand des Vergleichs gemessener Abflusswerte mit entsprechenden Werten aus der Abflusskurve möglich. Insgesamt kann die Notwendigkeit der Überarbeitung der

Abflusskurven in allen Abflussbereichen festgehalten werden.

Die *eigenen Untersuchungen* ergaben bei den als plausibel angenommenen W-Q-Beziehungen eine leichte Erhöhung des Verhältnisses Q/W mit der Zeit in allen Wasserstandsbereichen. Dies entspricht den Ergebnissen anderer Untersuchungen, in denen im Bereich dieses Pegels ein Absinken des Gleichwertigen Wasserstandes zwischen 1888 und 1959 und weiter bis 1996 festgestellt wurde (FAULHABER 1998, S. 219). Auch die Ergebnisse von GLAZIK (1994, S. 35) bestätigen diese Tendenz. Die in den Zeitabschnitten November 1975 – Dezember 1980 und November 1981 – Januar 1983 verwendeten Abflusskurven sind deutlich nicht plausibel. Für Wasserstände oberhalb  $300 \text{ cm}$  ( $Q > 560 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ist das Verhältnis Q/W mit zunehmendem Wasserstand zunehmend zu groß. So erkennt man in der Abb. III-1.2 für diese Zeitbereiche stark von den sonstigen W-Q-Beziehungen abweichende W-Q-Beziehungen. Im Beispiel eines Hochwasserereignisses des Jahres 1979 in der Abb. III-1.3, sowie bei den anderen untersuchten Ereignissen und auch bei den bilanzierten mittleren jährlichen Abflüssen waren entsprechende Bilanzunstimmigkeiten deutlich zu erkennen. Die Korrektur mit Hilfe der Wasserstände und den zeitlich benachbarter Abflusskurve führte zu einer Plausibilisierung der Bilanzgrößen, v.a. gegenüber dem Pegeln Calbe Gr. und dem Leitpegel Barby.

Überdies ergaben die Untersuchungen Probleme in den Füllbilanzen verschiedener Ereignisse der 1990er Jahre (ab dem Ereignis Ende 1993/Anfang 1994 alle Ereignisse). Bei Annahme korrekter Abflusswerte am Bezugspegel Barby waren entweder die Werte am Pegel Calbe Gr. oder die am Pegel Aken zu klein. Dieser Sachverhalt konnte mit den verfügbaren Informationen – auch nach o.g. Abstimmungen mit Vertretern zuständiger Ämter – nicht geklärt werden. Es wurden daher keine Modifizierungen in den Abflussreihen vorgenommen.

Die für diesen Pegel identifizierten fehlerhaften Einzelwerte wurden zusammengestellt und den zuständigen Ämtern übergeben.

### ***Pegel Wittenberg (Elbe-km 214,1)***

In den *BfG-Berichten 0806 und 1228* wurden keine Angaben zur grundsätzlichen Eignung des Standorts für Abflussmessungen gemacht. Probleme ergaben sich dadurch, dass bis 1990 fast nur Zweipunktmessungen durchgeführt wurden und dass kaum Messungen im Extrembereich vorlagen, im Hochwasserbereich nur drei Messungen oberhalb  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  während der 1960er Jahre. Bei der vergleichenden Untersuchung zwischen gemessenen und nach der Abflusskurve ermittelten Abflüssen traten starke Abweichungen auf, insbesondere auch bei der aktuellsten Abflusskurve (ab 1982) zwischen  $-15\%$  im Hochwasserbereich (gemessene Werte größer) und  $+30\%$ . Von diesen Abweichungen waren alle Abflussbereiche betroffen. Zudem wurden die Gültigkeitszeiträume der Abflusskurven kritisch beurteilt. Überschneidungen von Abflusskurven zwischen MQ und MHQ wurden für die Abflusskurven der verschiedenen Gültigkeitszeiträume festgestellt. Desweiteren wurde festgestellt, dass im Mittelwasserbereich eine Überarbeitung der Abflusskurven erforderlich ist, auch wenn eine Längsschnittbilanzierung der mittleren Monatsabflüsse 1974-1991 gegenüber dem Pegel Dresden und dem Pegel Löben der Schwarzen Elster keine auffälligen Unstimmigkeiten zeigte. Im Niedrig- und Hochwasserbereich war mangels nutzbarer Information keine Einschätzung anhand des Vergleichs gemessener Abflusswerte mit entsprechenden Werten aus der Abflusskurve möglich. Insgesamt konnte die Notwendigkeit der Überarbeitung der Abflusskurven in allen Abflussbereichen festgehalten werden.

Die *eigenen Untersuchungen* ergaben gleich für den ersten Gültigkeitsbereich (1951-1959) eine offensichtlich fehlerhafte Abflusskurve. So kann man bei Betrachtung der Abb. III-1.4 ab einem Wasserstand von etwa  $W = 200 \text{ cm}$  (entsprechend  $Q = 163 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ein deutlich geringeres Verhältnis  $Q/W$  als in folgende Kurven feststellen. Dementsprechend ergaben sich Bilanzunstimmigkeiten, sowohl in den Ereignisfüllen als auch in den mittleren Jahresabflüssen MQ. Berechnet man beispielsweise die MQ-Differenzen zum Pegel Torgau (zwischen 1971 und 1993 korrigiert), so sind deutliche und ungewöhnliche MQ-Defizite am Pegel Wittenberg in den 1950er Jahren erkennbar. Die Bilanzunstimmigkeiten sprechen für die Notwendigkeit einer Plausibili-

sierung. Allerdings ist diese problematisch, da die in den 1950er Jahren auftretenden Extrembereiche nicht in den rekonstruierten Abflusskurven ab 1960 enthalten sind. Da der Reihenabschnitt 1951-1959 zunächst keinen weiteren Untersuchungsgegenstand bei der Berechnung von Statistiken für den Zeitraum 1964-1995 darstellte und da für die Berechnung längerfristiger Statistiken die Reihe ab 1951 ohnehin zu kurz ist und daher ein anderer Weg eingeschlagen wurde (siehe Kapitel III-1.6.8), wurde von der Plausibilisierung dieses Reihenabschnitts abgesehen.

Der folgende Gültigkeitszeitraum einer Abflusskurve 1960-1970 zeigte im Segment oberhalb  $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$  gegenüber allen danach folgenden W-Q-Beziehungen bei gegebenen Wasserständen eine deutliche Abweichung zu höheren Abflüssen hin (siehe z. B. Abb. III-1.4). Für eine Modifizierung zur Plausibilisierung der Abflussreihe in diesem Zeitabschnitt spräche ferner eine Abflussmessung im Jahr 1966 (allerdings nur eine Zweipunktmessung), die deutlich unter dem entsprechenden Abflusskurvenwert lag.

Die Bilanzprüfung zur Bewertung einer möglichen Modifizierung mit Hilfe der rekonstruierten W-Q-Beziehung 1970-1975 war nur anhand eines Ereignisses (1966) möglich, das mit einem Spitzenabfluss von  $2320 \text{ m}^3/\text{s}$  deutlich im interessierenden Bereich lag. Hier lässt sich aber weder gegenüber Torgau, noch gegenüber Aken und Bad Döben eine eindeutige Aussage treffen. Zudem gab es umgekehrt zwischen 1971 und 1975 ein (einziges) relevantes Ereignis, bei dem eine Modifizierung mit der W-Q-Beziehung der 1960er Jahre gegenüber Torgau und Löben Vorteile bringt, die Bilanzierung gegenüber Aken und Bad Döben aber wiederum ohne eindeutige Aussage ist. Angesichts der Unsicherheiten und der geringen Anzahl relevanter bilanzierbarer Ereignisse wurde von Modifizierungen abgesehen.

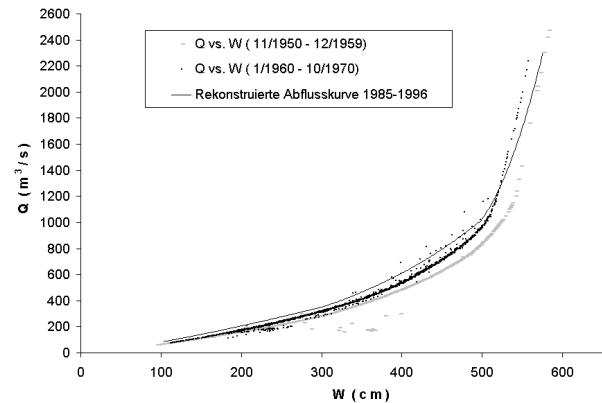
Die rekonstruierte aktuelle W-Q-Beziehung (1985-1996) zeichnet sich gegenüber den W-Q-Beziehungen der 1960er und bis Mitte der 1970er Jahre durch ein höheres  $Q/W$ -Verhältnis im Niedrig- und Mittelwasserbereich aus. Diese Beobachtung entspricht den Ergebnissen anderer Untersuchungen, in denen im Bereich dieses Pegels ein Absinken des Gleichwertigen Wasserstandes zwischen 1959 und 1996 festgestellt wurde (FAULHABER 1998, S. 219).

Im Zwischenzeitraum, in den 1970er und Anfang der 1980er Jahre, fanden sich häufig wechselnde W-Q-Beziehungen. Dabei fiel v.a. auf, dass in den Gültigkeitsbereichen November 1975 – Dezember 1980 und November 1981 – Februar 1985 im Vergleich zu vorangegangenen W-Q-Beziehungen die Q/W-Verhältnissen im Mittel- und Niedrigwasserbereich stark erhöht waren. Der Effekt dieser Änderungen, sowie möglicher Modifizierungen auf die Längsschnittbilanzen war je nach Bilanzgröße (Ereignisfülle oder Jahres-MQ) und je nach Vergleichspegel (Aken/Bad Döben oder Torgau (korrigiert)/Löben) günstig oder ungünstig. Dabei kommt man bei diesen Bilanzierungen auch gegenüber Torgau/Löben in Schwierigkeiten, da von Zehrstreckenverlusten im Gebiet um die Mündung der Schwarzen Elster auszugehen ist. Wegen dieser schwierigen Begründbarkeit wurden Modifizierungen nicht durchgeführt, zumal auch festzustellen war, dass diese nur einen geringen Effekt auf Hochwasserkennwerte haben, die im Rahmen dieses Projekts besonders interessierten.

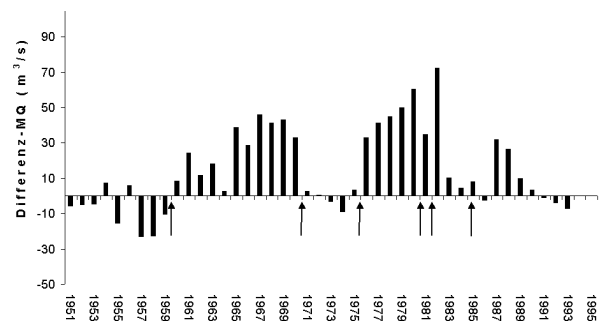
Über die dargestellten Veränderlichkeiten und Unsicherheiten bezüglich der Abflusskurven hinaus fanden sich auch an diesem Pegel fehlerhafte Einzelwerte. Sie wurden zusammengestellt und den zuständigen Ämtern übergeben.

#### **Pegel Wittenberge (Elbe-km 454,6)**

Nach den *BfG-Berichten 0806 und 1228* wurden im Laufe der Zeit an verschiedenen Stellen Abflussmessungen zur Erstellung oder Aktualisierung der Abflusskurve vorgenommen. Geeignete Messungen bei Hochwasser von zwei Brücken aus erfolgten erst für die Zeit ab 1954. Zudem treten an diesem Pegel bei Hochwasser schnell großflächige Ausuferungen auf, so dass wegen der unterschiedlichen Rauheiten zu verschiedenen Zeitpunkten eine Streuung der Messwerte festzustellen ist. Dies schränkt die Qualität der Hochwasserabflussdaten ein. Vorteilhaft ist jedoch, dass ab 1945 fast ausnahmslos durch Vielpunktmessungen gemessen wurde. Die Anzahl der Abflussmessungen ab den 1960er Jahren war relativ gering, wobei aber Hochwasser-Abflussmessungen bis deutlich über dem mittleren jährlichen Abflussscheitel vertreten und zeitlich relativ gut verteilt waren. Dennoch ist im Niedrig- und Hochwasserbereich eine zu geringe Anzahl an Messungen erfolgt, v.a. in der ersten



**Abb. III-1.4** Paare sich entsprechender Abfluss- und Wasserstandswerte (Q vs. W) und rekonstruierte Abflusskurve für verschiedene Zeitabschnitte am Pegel Wittenberg.



**Abb. III-1.5** Differenzen zwischen den mittleren jährlichen Abflüssen MQ des Pegels Wittenberg und des Pegels Torgau (1971-1993 nach BfG korrigiert). Die Pfeile an der Abzisse kennzeichnen die Gültigkeitsbereiche der identifizierten W-Q-Beziehungen am Pegel Wittenberg.

Hälfte des Jahrhunderts. Die Gültigkeitszeiträume der Abflusskurven wurden kritisch beurteilt, sie sind jedoch nur mit Begründung anhand von Längsschnittuntersuchungen zu ändern.

Im Mittelwasserbereich wurde eine Überschneidung der Abflusskurven festgestellt. Am Ende des Reihenabschnitts 1947-1980 ergaben sich zudem *einseitige* Abweichungen der gemessenen Abflusswerte gegenüber entsprechenden Kurvenwerten nach unten, sowie Bilanzunstimmigkeit mittlerer monatlicher Abflüsse gegenüber dem Pegel Neu Darchau und gegenüber denen von Barby und Havelberg (Untere Havel-Wasserstraße). Eine Überarbeitung der Abflusskurven im Mittelwasserbereich war erforderlich. Die Abweichung der gemessenen Abflusswerte von den entsprechenden Abflusskurvenwerten bei den maximalen Abflusswerten ab 1947 war relativ gering. Für den Niedrigwasserbereich war von einer Unsicherheit wie an den anderen Pegeln auch auszugehen.

Insgesamt bedurften die Abflusskurven einer Überarbeitung, insbesondere für den Zeitraum 1947–1980.

Die *eigenen Untersuchungen* ergaben bis zur W-Q-Beziehung 1947-1980 ein mit der Zeit zunehmendes Verhältnis  $Q/W$  in allen Abflussbereichen. Dies entspricht den Ergebnissen anderer Untersuchungen, in denen im Bereich dieses Pegels ein Absinken von Bezugswasserständen im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts festgestellt wurde (FAULHABER 1998, S. 220, GLAZIK, 1994, S. 35). Ebenfalls entsprechend zu den Ergebnissen dieser Untersuchungen konnte dies für die W-Q-Beziehung ab November 1980 nicht mehr festgestellt werden. Im Gegenteil, sie änderte sich im Vergleich zu der W-Q-Beziehung 1947-1980 dahingehend, dass die Abflusswerte zwischen etwa 500 und 1600  $m^3/s$  bei gleichem Wasserstand bis zu etwa 150  $m^3/s$  kleiner waren (siehe Abb. III-1.6).

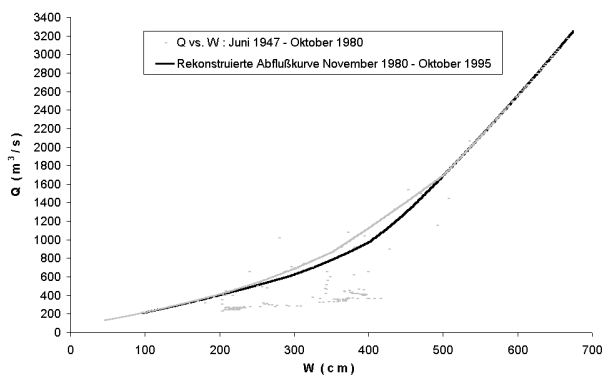


Abb. III-1.6 Wertepaare der Wasserstands- und Abflusswerte, sowie rekonstruierte Abflusskurve für verschiedene Zeitabschnitte am Pegel Wittenberge.

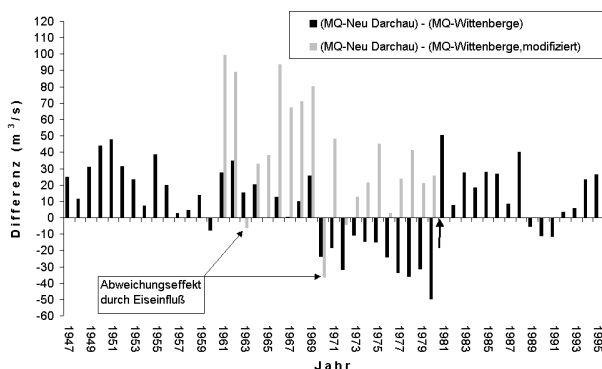


Abb. III-1.7 Vergleich von Differenzen mittlerer jährlicher Abflüsse ab 1947 zwischen den Pegeln Neu Darchau und Wittenberge (1961-1980: Originalwerte und modifizierte Werte). Der Pfeil an der Abzisse kennzeichnet den Übergang der Gültigkeitsbereiche der identifizierten W-Q-Beziehungen.

Die W-Q-Beziehung 1947-1980 ist offenbar gegen Ende dieses Zeitraums nicht mehr als gültig zu betrachten. Hierfür sprechen neben den o.g. einseitigen Abweichungen von Abflussmesswerten von entsprechenden Abflusskurvenwerten und dem ungewöhnlich langen Gültigkeitszeitraum die in den Untersuchungen gefundenen zu großen Bilanzgrößen dieses Pegels (Ereignisfüllen und mittlere Jahresabflüsse) gegenüber dem Bezugspiegel Neu Darchau. Entsprechendes ergab sich auch in den Untersuchungen der BfG (Bericht 1228, S. 29) mit Bilanzen mittlerer Monatsabflüsse (siehe oben). Ferner ist die von GLAZIK (1994, S. 35) festgestellte Zunahme der Bezugswasserstände zu berücksichtigen. Es konnte vermutet werden, dass die nach Abflussmessungen Ende der 1970er Jahre bzw. 1980 aktualisierte Abflusskurve ab November 1980 wahrscheinlich weiter zurückreichen sollte. Dementsprechend wurde eine Plausibilisierung der Abflusswerte vorgenommen, indem für den Zeitraum vor November 1980 mit Hilfe der Wasserstandsreihe des Pegels und der ab 1980 gültigen (rekonstruierten) W-Q-Beziehung eine modifizierte Abflussreihe erzeugt wurde. Wie die in Abb. III-1.7 dargestellte Reihe der Differenzen der mittleren Jahresabflüsse zwischen Wittenberge und dem Leitpegel Neu Darchau (ebenso wie die Bilanzierungen der Abflussereignisse) zeigt, bestätigte sich diese Vermutung. Man erkennt, dass die Werte am Anfang des Zeitabschnitts 1947-1980 und die Werte ab 1981, bei denen nach den Vergleichen der gemessenen Werte mit den Abflusskurvenwerten die Abflusswerte vergleichsweise zuverlässig sind, meist leicht positiv sind. Demgegenüber sind die Werte gegen Ende des Zeitabschnitts 1947-1980 negativ. Diese Unstimmigkeit resultiert also offenbar aus einem Überschuss am Pegel Wittenberge gegenüber dem Pegel Neu Darchau. Die Abbildung zeigt ferner, dass die Modifizierung mit Hilfe der rekonstruierten Abflusskurve ab November 1980 plausible Bilanzwerte zurückreichend bis etwa 1972 ergibt, davor jedoch nicht. Entsprechendes ließ sich auch bei der Bilanzierung der Füllen der betrachteten Abflussereignisse erkennen. Offenbar hätte also die Abflusskurve bereits einige Jahre vor 1980 korrigiert werden müssen. Vor der Durchführung weiterer Analysen wurde daher eine entsprechende Plausibilisierung durchgeführt.

Als kritisch stellte sich in späteren Untersuchungen gegen Ende ihres Verwendungszeitraums auch die



bis 1947 gültige W-Q-Beziehung heraus. Siehe hierzu Kapitel III-1.6.8.

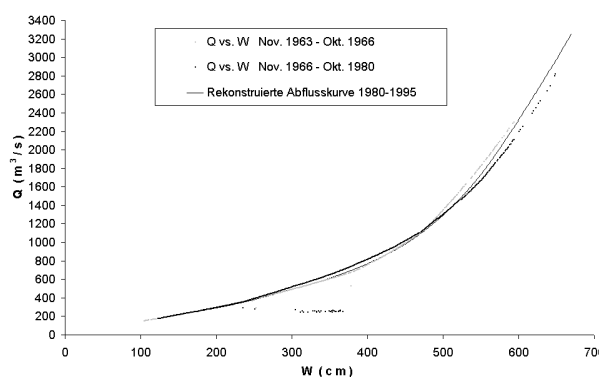
Weiterhin konnten an diesem Pegel fehlerhafte Einzelwerte, sowie eine Vielzahl eisbeeinflusster Werte identifiziert werden. Sie wurden zusammengestellt und den zuständigen Ämtern übergeben.

#### **Pegel Tangermünde (Elbe-km 388,2)**

Nach den BfG-Berichten 0806 und 1228 wurde dieser Pegel erst 1964 eingerichtet. Vorher wurden in der Nähe am Pegel Hämerten bereits seit 1902 Abflussmessungen vorgenommen. Allerdings sind die Abflussreihen am Pegel Hämerten nach den Auskünften in den *Beratungsgesprächen* nicht verlässlich. Auf ihre Einbeziehung wurde deswegen verzichtet. Die Abflussmessstellen für den Pegel Tangermünde waren für alle Wasserstandsgebiete gut geeignet, da Hochwassermessungen an einer Brücke durchgeführt werden konnten. Diese Abflussmessungen waren relativ gut über die Zeit verteilt, einschließlich Werten oberhalb des mittleren jährlichen Scheitelabflusses, z. T. auch deutlich darüber. Dennoch war auch hier in den Extrembereichen die Anzahl an Messungen nicht hinreichend. Die Gültigkeitszeiträume der Abflusskurven wurden kritisch beurteilt, sie sollten jedoch nur nach Begründung anhand von Längsschnittuntersuchungen geändert werden. Die Datenqualität wurde nach den durchgeführten Vergleichen von gemessenen Abflüssen mit aus Abflusskurven berechneten Abflüssen wie folgt beurteilt: im Hochwasserbereich traten z. T. deutliche Abweichungen der Messwerte von Kurvenwerten auf, wobei v.a. bei den größten Werten der 1970er Jahre einseitige Abweichungen mit größeren Mess- als Kurvenwerten festgestellt wurden. Dies deutet auf die Notwendigkeit einer Überarbeitung der Abflusskurven hin. Im Mittelwasserbereich findet sich eine sehr gute Übereinstimmung der Kurven- und Messwerte, so dass im BfG-Bericht 1228 – im Gegensatz zu den Angaben, die noch im BfG-Bericht 0806 gemacht wurden – keine Notwendigkeit der Überarbeitung festgestellt wurde. Im Niedrigwasserbereich werden keine konkreten Angaben gemacht, es war von den allgemein vorhandenen Unsicherheiten auszugehen. Insgesamt wurde im BfG-Bericht 1228, im Gegensatz zum BfG-Bericht 0806, nicht mehr empfohlen, die Abflusskurven zu überarbeiten.

Die *eigenen Untersuchungen* ergaben, dass die aktuell gültige W-Q-Beziehung einen ähnlichen Verlauf besitzt, wie schon die anfangs und bis Oktober 1966 gültige Kurve, im Hochwasserbereich jedoch mit etwas geringeren Verhältnissen Q/W. Die geringe Veränderung zwischen den beiden W-Q-Beziehungen entspricht den geringen Änderungen im Gleichwertigen Wasserstand zwischen 1959 und 1996 nach FAULHABER (1998, S. 219). Die aktuelle Kurve dürfte nach den intensiven Messungen 1981, auch im Hochwasserbereich, am ehesten verlässlich sein.

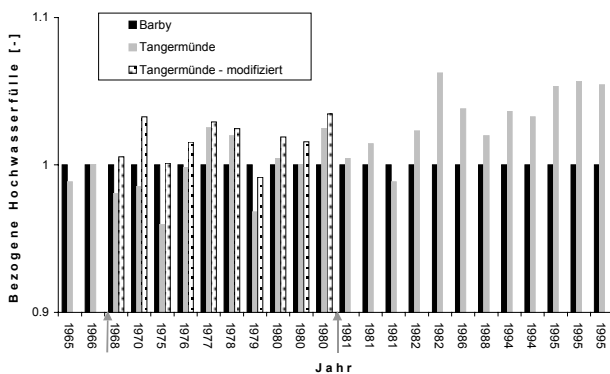
Wie Abb. III-1.8 zeigt, weicht die im Zeitabschnitt 1967-1980 verwendete W-Q-Beziehung deutlich von denen der benachbarten Zeitabschnitten ab, die unter sich sehr ähnliche W-Q-Beziehungen haben. Im mittleren Bereich (Wasserstände zwischen etwa 300 und 450 cm bzw. Abflüsse zwischen 500 bis 1000 m<sup>3</sup>/s) ist die Abweichung bei gegebenem Wasserstand zu größeren Abflüssen hin gerichtet, im oberen Bereich (ab Wasserständen von etwa 500 cm bzw. Abflüssen von etwa 1300 m<sup>3</sup>/s) zu kleineren Abflüssen. Da durch die BfG-Untersuchungen zudem festgestellt wurde, dass die Abflussmesswerte im Hochwasserbereich gegenüber den entsprechenden Kurvenwerten in diesem Zeitabschnitt deutlich überwiegend größer waren, lag die Vermutung nahe, dass im Hochwassersegment der Abflusskurve 1967-1980 die Abflüsse zu gering sind.



**Abb. III-1.8** Wertepaare der Wasserstands- und Abflusswerte, sowie rekonstruierte Abflusskurve für verschiedene Zeitabschnitte am Pegel Tangermünde.

Um diese Vermutung zu belegen, wurden Abflussereignisse untersucht, die Abflüsse bzw. Wasserstände im interessierenden Bereich aufweisen (Wasserstand oberhalb von 540 cm). Die Ereignisfüllen wurden gegenüber den entsprechenden Ereignisfüllen am Bezugspegel Barby bilanziert (Abb. III-1.9). Für den Bereich ab 1981, der nach der intensiven

Messkampagne 1981 am zuverlässigsten sein sollte, ist typischerweise eine deutliche Füllenzunahme von Barby nach Tangermünde zu erkennen. Untypisch sind also die häufigen Füllendefizite der nicht modifizierten Reihe zwischen 1967 und 1980. Eine Modifizierung der Abflussreihe dieses Zeitabschnitts mit den Wasserstandswerten und der vollständigen, zeitlich benachbarten (ab 1981 gültigen) W-Q-Beziehung ergab, von zwei Ausnahmen abgesehen, noch kleinere Füllenwerte für Tangermünde, so dass diese Art der Modifizierung verworfen wurde. In einem weiteren Versuch wurde die Modifizierung mit Hilfe von ersetzten Hochwassersegmenten der W-Q-Beziehung durchgeführt. Verwendet wurden hierzu die Segmente beider zeitlich benachbarten W-Q-Beziehungen. Diese Vorgehensweise lässt sich auch nach den Ergebnissen der systematischen Vergleiche von gemessenen Abflusswerten und Abflusskurvenwerten (siehe oben) am besten begründen. In Abb. III-1.9 ist zu erkennen, dass diese Modifizierung eine Plausibilisierung der Füllbilanzen erbringt. Die Bilanzen der mittleren jährlichen Abflüsse der modifizierten Ganglinie des Pegels Tangermünde sind gegenüber Pegel Barby ebenfalls plausibel. Die Modifizierung wurde auf Grund der Ergebnisse der Füllbilanzierung als notwendig angenommen und vor den weiteren Analysen durchgeführt.



**Abb. III-1.9** Bezogene Füllen (Füllen Barby =1) von Abflussereignissen mit maximalem Wasserstand oberhalb 540 cm am Pegel Tangermünde für die Pegel Barby und Tangermünde. Die Pfeile an der Abzisse kennzeichnen die Gültigkeitsbereiche der identifizierten W-Q-Beziehungen. Das Ereignis 1974/75 wurde gesondert modifiziert (siehe Text).

Nach Durchführung dieser Modifizierung verblieb v.a. ein Ereignis Ende 1974/Anfang 1975 mit nicht plausibler (negativer) Füllbilanz gegenüber Barby. Die Fülle der von Barby nach Tangermünde gerouteten Ganglinie unter Nutzung des Modells

ELBA (siehe Kapitel III-1.6.5.1.) ist dagegen plausibel. Die Ereignisspitze wurde dadurch von 2860 auf 3115 m<sup>3</sup>/s verändert. Diese Modifizierung ist in Abb. III-1.9 berücksichtigt.

Die genannten Modifizierungen trugen insgesamt zu einer Plausibilisierung des räumlichen Musters der Hochwasserkennwerte bei der Entwicklung hydrologischer Längsschnitte 1964-1995 im Bereich unterhalb des Pegels Barby bei.

Weiterhin konnten an diesem Pegel fehlerhafte Einzelwerte, sowie eisbeeinflusste Werte identifiziert werden. Sie wurden zusammengestellt und den zuständigen Ämtern übergeben.

#### **Pegel Magdeburg-Strombrücke (Elbe-km 326,6)**

Nach den *BfG-Berichten 0806 und 1228* ist die Situation an diesem Pegel besonders problematisch. Der Grund ist die Aufteilung der Elbe im Magdeburger Stadtgebiet in verschiedene Stromarme, sowie bei Öffnung des Pretziener Wehrs im Hochwasserfall (bei einem Abfluss am Pegel Barby > 2500 m<sup>3</sup>/s) in die Umflut.

Die Anzahl der vorgenommenen Abflussmessungen war durchschnittlich, wobei sich diese zeitlich relativ gut verteilten. Dabei waren auch Messungen deutlich oberhalb des mittleren jährlichen Scheitelabflusses vertreten. Dennoch kann die Anzahl der Messungen in den Extrembereichen nicht als hinreichend bezeichnet werden.

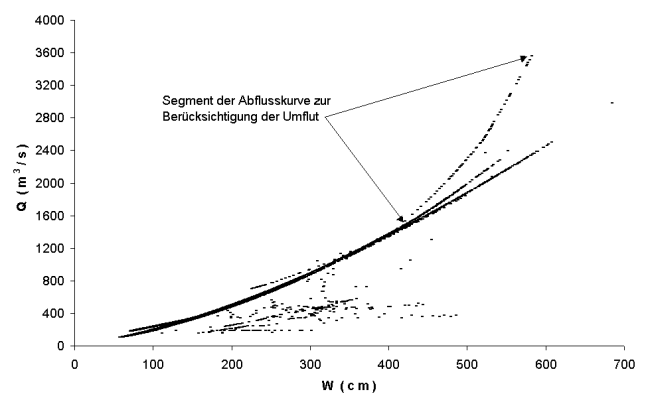
Die Gültigkeitszeiträume der Abflusskurven wurden nicht kritisch beurteilt, da diese nur wenig veränderlich waren und zudem in 1980er Jahren überarbeitet wurden, jedoch nicht für Bereiche mit Abflüssen oberhalb 1400 m<sup>3</sup>/s. Bei einem Vergleich von Messwerten des Abflusses mit aus den Abflusskurven ermittelten Abflusswerten fanden sich nur geringe Abweichungen, so dass im Mittelwasserbereich die Abflusskurven nicht mehr verbessert werden brauchen. Sofern - bei Abflüssen deutlich kleiner als 2500 m<sup>3</sup>/s, sowie fehlender Dokumentation in einem Öffnungskalender des Pretziener Wehrs - nicht von Umflutnutzung auszugehen ist, stimmen auch die gemessenen Hochwasserabflüsse mit den entsprechenden Abflusskurvenwerten gut überein. Dagegen sind die Hochwasserabflusswerte bei Öffnung des Pretziener Wehrs ausgesprochen kritisch zu betrachten, da bei Umflutnutzung nur zwei Eichmessungen (1923 und 1980) überhaupt

erfolgten. Im Niedrigwasserbereich ist von den allgemein vorhanden Unsicherheiten auszugehen.

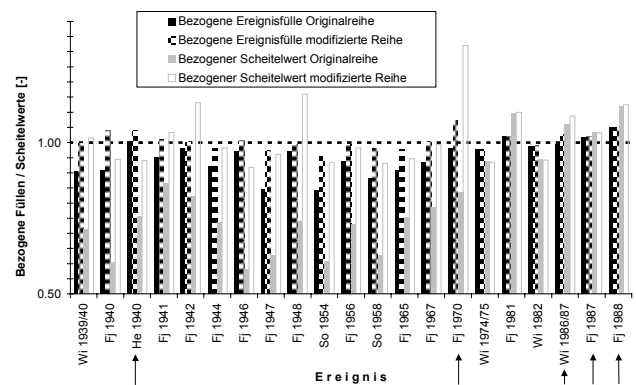
Insgesamt konnte also an diesem Pegel von einer guten Datenqualität der Abflussreihen im Mittelwasserbereich ausgegangen werden, während der Hochwasserbereich (oberhalb von 1400 m<sup>3</sup>/s) besonders problematisch ist.

Die *eigenen Untersuchungen* ergaben, dass sich die bis in den November 1974 verwendeten Abflusskurven kaum veränderten. Diese langanhaltende geringe Veränderlichkeit in der W-Q-Beziehung entspricht den Ergebnissen von GLAZIK (1994, S. 35) nach denen bis zu den 1970er Jahren eine weitgehende Konstanz des verwendeten Bezugswasserstandes festgestellt werden konnte. Ab November 1974 erhöhte sich das Verhältnis Q/W der W-Q-Beziehung im Bereich oberhalb eines Wasserstands von 400 cm (entsprechender Abfluss ca. 1400 m<sup>3</sup>/s) generell, d.h. bei allen Hochwasserereignissen. Zudem wurde ab diesem Zeitpunkt die Umflut in der Anwendung der Abflusskurven berücksichtigt (zum Vgl. Abb. III-1.10). Vorher war dies nicht der Fall. Dementsprechend weisen insbesondere in der Zeit vor 1974 eine Vielzahl von Hochwasserereignissen der verfügbaren Abflussreihe am Pegel Magdeburg hohe Füllendefizite in einer Bilanzierung gegenüber den entsprechenden Füllen am Pegel Barby mit nur unwesentlich kleinerer Einzugsgebietsgröße auf. Der auf Grund der Umflutnutzung reduzierte Wasserstand wurde offenbar fehlerhaft unter Nutzung der sonst gültigen Abflusskurve in Abflüsse umgerechnet. Um eine annähernde Plausibilisierbarkeit der Abflussreihe zu überprüfen, wurde wie folgt vorgegangen. In Zeiträumen, in denen nach dem Öffnungskalender des Preziener Wehrs (JUNG 2000), sowie – teilweise abweichend von den im Öffnungskalender angegebenen Zeiten - nach der Betriebsregel der Öffnung ab einem Abfluss in Barby von 2500 m<sup>3</sup>/s, die Wehröffnung angenommen werden konnte, wurden mit Hilfe einer modifizierten W-Q-Beziehung neue Abflussreihen errechnet. Dazu wurden bis zu einem Wasserstand von 400 cm die für den entsprechenden Zeitraum rekonstruierten Abflusskurven verwandt, darüber jedoch die für die Umflutnutzung rekonstruierte, ab 1974 genutzte W-Q-Beziehung. Da die maximalen vorkommenden Wasserstände vor 1974 größer waren, als diejenigen, für die die Umflut-W-Q-Beziehung aus verfügbaren W-Q-Wertepaaren rekonstruiert werden konnte,

wurde entsprechend dem Verlauf im obersten Bereich der durch Wertepaare belegten W-Q-Beziehung linear extrapoliert. Für die so modifizierten Ganglinien der größten Hochwasserereignisse vor 1974 (ab Überschreitung eines Abflusses entsprechend dem 5-jährlichen Scheitelabfluss am Pegel Barby in bezug auf die Reihe 1964-1995, siehe Kapitel III-1.6.3.4) wurde dann eine Bilanzierung der Ereignisfüllen gegenüber denen am Pegel Barby durchgeführt. Abb. III-1.11 zeigt die ermittelten Füllendifferenzen und Scheiteldifferenzen dieser Ereignisse, die wegen des geringen Unterschieds in den Einzugsgebietsgrößen bei den Pegeln klein ausfallen sollten.



**Abb. III-1.10** Wertepaare der mittleren täglichen Wasserstände und Abflüsse im Zeitraum 1931-1995 für den Pegel Magdeburg-Strombrücke. Erkennbar ist die deutliche Abweichung der unter Verwendung der Abflusskurve für Umflutnutzung errechneten Abflusswerte ab 1974 von den sonstigen Abflusswerten.



**Abb. III-1.11** Füllen und Scheitelwerte von Hochwasserereignissen der originalen und der modifizierten Abflussreihe des Pegels Magdeburg-Strombrücke, bezogen auf die Füllen bzw. Scheitelwerte des Pegels Barby. Zu den per Pfeil gekennzeichneten Ereignissen sind die Bemerkungen im Text zu beachten.

Man erkennt in Abb. III-1.11, dass für die Ereignisse vor 1974 durch die Nutzung der Umflut-Abflusskurve eine eindeutige Plausibilisierung der Abflussreihe

am Pegel Magdeburg erreicht wird. Eine Ausnahme stellt nur das (in die Betrachtung miteinbezogene) Ereignis 1970 dar, bei dem aber auch keine Öffnung des Pretziener Wehrs im Öffnungskalender vermerkt ist und der Scheitelabfluss des Pegels Barby knapp unterhalb dem kritischen Werts von  $2500 \text{ m}^3/\text{s}$  bleibt. Beim Ereignis im Herbst 1940 verschlechtert sich zwar die Füllenbilanz, jedoch spricht der Scheitelwertvergleich für die Modifizierung.

Ab 1974 kann davon ausgegangen werden, dass die Umflut-Abflusskurve in allen betrachteten Fällen der Originalreihe angewandt wurde. Bei dem Ereignis 1986/87 sind die Fülle und der Abflussscheitel der modifizierten Reihe etwas höher, was durch die Berücksichtigung einer nur teilweise Öffnung des Pretziener Wehrs in der Originalreihe erklärt werden könnte. Bei dem Ereignis im Frühjahr 1987 wurden die ersten beiden Tage der Wehröffnung nach dem Öffnungskalender nicht modifiziert, um eine plausible Ganglinie zu erhalten. Bei dem Hochwasserereignis 1988 ergab sich bei der Bilanzierung der nicht modifizierten und der über die Umflut-Abflusskurve modifizierten Reihe des Pegels Magdeburg ein hoher Füllenüberschuss sowie ein wesentlich höherer Abflussscheitelwert gegenüber dem Pegel Barby. Die Vermutung der Nutzung der Umflut-Abflusskurve trotz geschlossenem Pretziener Wehr konnte jedoch – durch die Modifizierung Abflussreihe mit Hilfe der Wasserstände und Abflusskurve für das geschlossene Pretziener Wehr – nicht bestätigt werden, da sich hierbei für Magdeburg ein Scheitelwert von nur  $2347 \text{ m}^3/\text{s}$  (Barby:  $3179 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und eine Fülle von nur  $9,012 \text{ Mrd. m}^3$  (Barby:  $9,804 \text{ Mrd. m}^3$ ) ergab. Beide Werte sind weniger plausibel als die Werte der Originalreihe. Letztere wurde daher beibehalten.

Trotz der verbesserten Einschätzung der Hochwasserhältnisse am Pegel Magdeburg durch die beschriebenen Plausibilisierungsversuche verbleibt eine große Unsicherheit. Beispielsweise sind verschiedene Wehröffnungsgrade beim Pretziener Wehr denkbar. Bei der statistischen Hochwasseranalyse (siehe Kapitel III-1.6.3.4, III-1.6.4 und III-1.6.8) wurde daher die gemessene und modifizierte Reihe für den Pegel Magdeburg nicht ausgewertet, sondern es wurde einer Regionalisierung der statistischen Hochwasserkennwerte bzw. der Simulation der Reihe durch ein Ganglinien-Routing ausgehend vom Pegel Barby der Vorzug gegeben, zumal der Pegel

Magdeburg zwischen den beiden Pegeln Barby und Tangermünde liegt, die sich in ihrer Einzugsgebietsgröße und ihren Hochwasserhältnissen ähneln. Die modifizierte Reihe des Pegels Magdeburg kann jedoch zur Verifizierung der Ergebnisse beitragen (siehe auch Kapitel III-1.6.7, III-1.6.8 und III-1.6.4). Details zu diesen Untersuchungen für den Pegel Magdeburg-Strombrücke finden sich in HEILIG (2000).

### III-1.6 Analyse und Simulation von Abflusszeitreihen

Nach der Durchführung der Konsistenzanalyse und nach den angesprochenen Modifizierungen der Abflussreihen *konnte von einer weitgehend verlässlichen Datengrundlage zur Durchführung statistischer Analysen und zur Entwicklung von Simulationsinstrumenten des Abflussprozesses ausgegangen werden*. Dies galt vor allem für den Zeitraum der letzten Jahrzehnte (ab den 1960er Jahren), der – unter der Bedingung einer ausreichenden Länge für eine statistische Verlässlichkeit – auch den heutigen hydrologischen Verhältnisse am nächsten kommen sollte (zum Vgl. Kapitel III-1.2).

Zur Untersuchung der Abflussreihen in diesem Kapitel wurden die täglichen Abflusszeitreihen zunächst geeignet parametrisiert, d.h. es wurden neben den Tageswerten Reihen geeigneter jährlicher und monatlicher Kennwerte ermittelt (Kapitel III-1.6.1). Anschließend erfolgte eine Stationaritätsprüfung durch die Anwendung bewährter hydrologischer Standardverfahren, um die längerfristige Variabilität und Grundtendenzen des Abflussprozesses einschätzen zu können und um für verschiedene Bedingungen repräsentative Zeiträume, insbesondere einen repräsentativen Zeitraum des hydrologischen Ist-Zustands, abgrenzen zu können (Kapitel III-1.6.2). Die Abflussreihen der Elbe-Pegel im Zeitraum des Ist-Zustands wurden daraufhin einer detaillierten hydrologischen Zeitreihenanalyse unterzogen (Kapitel III-1.6.3), deren Ergebnisse (statistische Kennwerte) als hydrologische Längsschnitte der Elbe im deutschen Bereich regionalisiert wurden. Dadurch wurde das räumliche Muster der Dynamik des Abflussprozesses deutlich (Kapitel III-1.6.4). Zudem wurden auf Grundlage der Abflussreihen dieses Zeitraums Instrumente zur Simulation des täglichen Abflussprozesses und wichtiger Teilpro-

zesse entwickelt bzw. für die Elbe angepasst und in ihrer Eignung überprüft (Kapitel III-1.6.5). Anhand der Referenz des räumlichen Musters der Abflussstatistik für den Ist-Zustand und mit Hilfe der erprobten – und ggf. um Zusatzmodule ergänzten – Simulationsinstrumente konnten weitere Schritte zur detaillierteren, umfassenderen und zeitlich weiter zurückreichenden Untersuchung des Abflussprozesses vorgenommen werden. Hierzu gehörte eine erweiterte Konsistenzanalyse der Abflussreihen, die einerseits bereits parallel zur Entwicklung der Abflussstatistik des Ist-Zustands erfolgte, andererseits nun aber vor allem auch früher zurückliegende Zeiträume besser einbeziehen konnte (zum Vergleich: Kapitel III-1.6.8).

Auch ermöglichte die Anwendung der Simulationsinstrumente die Rekonstruktion historischer Abflussereignisse an Stellen ohne entsprechende Abflussmessreihen (siehe Kapitel III-1.6.7).

Schließlich erlaubte der Vergleich von gemessenen täglichen Abflussreihen mit unter den Bedingungen eines anderen Zeitraums simulierten Reihen anhand einer umfassenden Diagnostik eine erweiterte Analyse der Stationarität des Abflussprozesses mit entsprechenden Rückschlüssen auf steuernde Faktoren der Abflussdynamik. Dies trug zu einer besser begründeten Abgrenzung des Zeitraums des Ist-Zustands und weiterer Zeiträume bei (Kapitel III-1.6.6.). Die genannten Schritte erlaubten damit die Ermittlung und Bewertung längerfristiger, verlässlicher Statistiken als zuvor möglich, die – je nach Interpretation der Langzeitvariabilität – auch als Ausprägung eines erweiterten Ist-Zustands aufgefasst werden können (Kapitel III-1.6.8).

Gleichzeitig wurde eine Weiterentwicklung von Simulationswerkzeugen um Zusatzmodule vorangetrieben. Die dadurch mögliche Berücksichtigung veränderlicher Bedingungen stellte eine Erweiterung möglicher Modellanwendungen auf ein größeres Spektrum an Zuständen und Prozessabläufen dar. Dies kann als wertvoller Schritt der Modellverallgemeinerung angesehen werden, die erforderlich ist, um Simulationen in verschiedenen Szenarien durchführen zu können.

### III-1.6.1 Parametrisierung der täglichen Abflusszeitreihen

Um für die beabsichtigten statistischen Analysen neben Tagesreihen weitere geeignete Zeitreihen zu erhalten, waren die bereits verfügbaren Tagesreihen in Form von Reihen jahres- und monatsbezogener Kennwerte zu *parametrisieren*. Der Schwerpunkt wurde dabei auf die Abflüsse im Bereich des mittleren jährlichen Abflusses und oberhalb davon gelegt, da diese für das Wirkungsgefüge im Flusssystem, sowie unter sozioökonomischem Gesichtspunkt (Hochwasserschutz) besondere Bedeutung haben. Desweiteren wurde die Parametrisierung mit dem Teilprojekt ‚Schnittstelle‘ abgestimmt, um neben hydrologischen Standardanalysen von vornherein auch eine *auenökologische Relevanz* der auf den Kennwertreihen basierenden statistischen Analyseergebnisse zu gewährleisten. Besondere Bedeutung für Auenökosysteme haben die bei Hochwasser auftretenden Überschwemmungen. Ihre Dynamik hat im Hinblick auf unterschiedliche Toleranzen der verschiedenen Arten bzw. Biozönosen in bezug auf den Zeitpunkt (innerhalb oder außerhalb der Vegetationszeit), die Häufigkeit und die Dauer der Überschwemmungen einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der Aue. Die Einbeziehung der Dauer hat ferner für den Hochwasserschutz große Bedeutung, da bei längeranhaltenden Hochwasserereignissen die Standsicherheit von Deichen und die Wirksamkeit von Retentionsräumen von der Ereignisdauer abhängt.

In diesem Sinne wurden die *Reihen der folgenden monatlichen und jährlichen Abflusskennwerte ermittelt*.

- *Mittlere monatliche Abflüsse (MoMQ) und mittlere jährliche Abflüsse (MQ)* der Abflussjahre (1.11. bis 31.10)
- *Maximale Hochwasserscheitelwerte (HQ) der Abflussjahre und der Vegetationszeiten (VHQ)*. Die Vegetationszeit wurde für die Zeit vom 1.4. bis 30.9. angenommen. Soweit möglich, wurde die Unabhängigkeit von Ereignissen aufeinanderfolgender Jahre (HQ) dadurch gewährleistet, dass Jahresmaxima, deren zugehöriger Hochwasserscheitel im zeitlich benachbarten Jahr lag, von den Analysen ausgeschlossen wurden. Bei den Vegetationszeitmaxima war es, wie in Abb. III-1.12 ersichtlich, in einigen Fällen erforderlich, anstatt

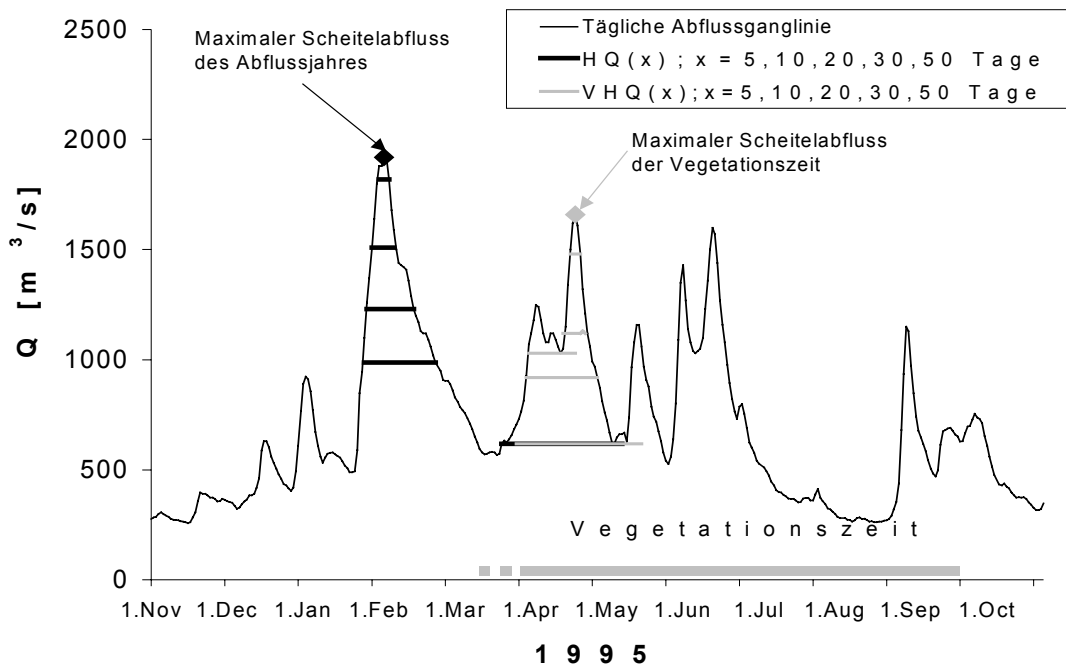


Abb. III-1.12 Ermittlung von Hochwasserkennwerten am Beispiel des Jahres 1995 am Pegel Barby.

von Werten des Aprils zugehörige Scheitelwerte am Ende des März zu verwenden, um für verschiedene Pegel vergleichbare Datenkollektive zu erzeugen und Verzerrungen in hydrologischen Längsschnitten zu vermeiden.

- Im Hinblick auf die auenökologisch relevanten Überflutungsdauern können in ähnlicher Weise Reihen *maximaler Abflusswerte* ermittelt werden, die im *Abflussjahr* oder in der *Vegetationszeit über  $x$  Tage zusammenhängend überschritten* wurden ( $HQ(x)$  bzw.  $VHQ(x)$ ;  $x = 5, 10, 20, 30, 50$  Tage - zum Vgl. siehe Abb. III-1.12). Dies wurde im Rahmen der Untersuchungen für den Gewässerabschnitt zwischen den Pegeln Dresden und Barby zum Teil durchgeführt, um die Verfahrensweise grundsätzlich zu demonstrieren.

### III-1.6.2 Stationaritätsanalyse

Nach den Ausführungen im Kapitel III-1.2 ist in der Abflussdynamik mit einer *langfristigen natürlichen Variabilität* zu rechnen, sowie – v.a. im Hochwasser- und Niedrigwasserbereich – mit einem *anthropogenen Einfluss (Inhomogenität)*. Vor der Durchführung weiterer statistischer Analysen war es erforderlich, diese Vermutung durch eine Stationaritätsprüfung genauer zu untersuchen. Neben dem *Interesse für eine Veränderung der Abflussverhältnisse an sich* war die *Vermeidung einer Inhomoge-*

*nität* in zu analysierenden Abflussreihen wichtig, um verzerrte und nicht den vollen Informationsgehalt einer Abflussganglinie ausschöpfende Analyseergebnisse zu vermeiden (zum Vergleich: YEVJEVICH 1969).

Aus diesem Grund wurde die Frage der Instationarität der Abflusszeitreihen näher untersucht. Dabei wurden die *drei Pegel Dresden, Barby und Neu Darchau analysiert*, da für diese die längsten und verlässlichsten Abflusszeitreihen vorliegen. Untersucht wurden die *Reihen der jährlichen Scheitelwerte  $HQ$  und der mittleren jährlichen Abflüsse  $MQ$* , da dieser Bereich für die weiteren beabsichtigten Analysen im Mittelpunkt stand. Als Verfahren der Stationaritätsanalyse wurden verschiedene hydrologische Routineverfahren herangezogen, die mit einer weitgehenden statistischen Absicherung *das Gesamtverhalten und die zeitliche Grundtendenzen* wiedergeben und nicht auf eine genaue Quantifizierung einzelner Ereignisse abzielen. Diese Analysen längerer Zeiträume erlaubten die *sinnvolle Abgrenzung und Einordnung verschiedener Zeitabschnitte*. Insbesondere konnte ein jüngerer Zeitraum der letzten Jahrzehnte mit einer bestmöglichen Repräsentation der aktuellen hydrologischen Verhältnisse und mit den verlässlichsten Abflussdaten gegenüber dem langfristigen Gesamtgeschehen abgegrenzt werden.

### III-1.6.2.1 Stationaritätsanalyse für Reihen mittlerer jährlicher Abflüsse (MQ)

Bei der Stationaritätsanalyse des Abflussprozesses war es sinnvoll, *zunächst dessen langfristige natürliche Variabilität* zu analysieren, um danach vor diesem Hintergrund die anthropogen bedingten Effekte (Inhomogenitäten) analysieren und bewerten zu können. Dabei stellt sich jedoch das Problem der Trennbarkeit der verschiedenen Ursachen und Effekte.

Der MQ war daher für den Einstieg in die Stationaritätsanalyse ein geeigneter Abflusskennwert, da er das Gesamtgeschehen wiedergibt und v.a. von den für den Abflussprozess wichtigsten anthropogenen Maßnahmen (Einrichtung von Rückhaltebecken und Deichbau) kaum beeinflusst wird. Reihen dieses Kennwerts wurden daher zunächst auf längerfristige Entwicklungen hin untersucht.

#### III-1.6.2.1.1 Glättung der MQ-Reihen durch einen linearen Filter (gleitender Durchschnitt)

*Gleitende Durchschnitte* stellen eine Möglichkeit zur Glättung von Zeitreihen dar. Damit können längerfristige Entwicklungen erkannt werden, wie z. B. Gruppierungen in Nass- und Trockenjahre bzw. abflussreiche und abflussarme Jahre (zum Vgl. DYCK & PESCHKE 1995, S. 229).

Nach HARTUNG ET AL. (1991, S. 660 ff.) versteht man unter einem gleitenden Durchschnitt  $y_t^*$  der ungeraden Ordnung  $2k + 1$  für den Wert  $y_t$  ( $t = 1, \dots, n$ ) einer Zeitreihe das arithmetische Mittel aus  $y_{t-k}, \dots, y_t, \dots, y_{t+k}$ , d.h.

$$y_t^* = \frac{1}{2k + 1} \sum_{j=-k}^k y_{t+j} \quad (1)$$

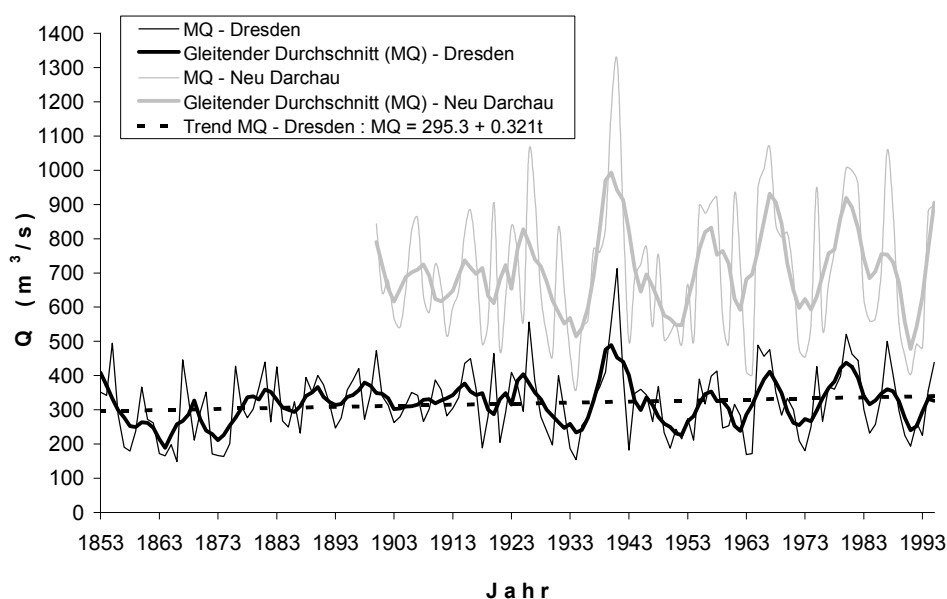
Der gleitende Durchschnitt kann hiermit für die Zeitindizes  $t = k+1, k+2, \dots, n-k$  berechnet werden. Somit hat die zu einer Zeitreihe der Länge  $n$  gehörige Reihe der gleitenden Durchschnitte zunächst die Länge  $n-2k$ . Die letzten Werte der Reihe können dann aufgefüllt werden durch die Bestimmung von  $y_{n-k+1}^*, \dots, y_n^*$  nach

$$y_{n-k+r}^* = \sum_{j=-k}^k \left( \frac{1}{2k+1} + \frac{12 \cdot r \cdot j}{2 \cdot k \cdot (2 \cdot k + 1) \cdot (2 \cdot k + 2)} \right) \cdot y_{n-k+j}$$

für  $r = 1, \dots, k$  (2)

Die ersten Werte der Reihe der gleitenden Durchschnitte werden analog aufgefüllt.

Abb. III-1.13 zeigt die Anwendung dieses Filters (5-jähriger gleitender Durchschnitt) auf die MQ-Reihen 1853-1995 am Pegel Dresden und 1900-1995 am Pegel Neu Darchau. Der Verlauf der gleitenden Durchschnitte zeigt dabei - auf unterschiedlichem Niveau - sehr ähnliche Strukturen. Dies gilt auch für



**Abb. III-1.13** Reihen mittlerer jährlicher Abflusswerte an den Pegeln Dresden (1853-1995) und Neu Darchau (1900-1995) mit entsprechenden 5-jährigen gleitenden Durchschnitten. Für den Pegel Dresden ist zudem der in der Gesamtreihe enthaltene signifikante lineare Trend eingezeichnet.

den in der Abbildung nicht berücksichtigten Pegel Barby. Auffällig sind insbesondere *Gruppierungen in Nassjahre und Trockenjahre*. Der Verlauf der gleitenden Durchschnitte ließ eine in den Reihen verborgene *Periodizität* vermuten (zum Vgl. Kapitel III-1.6.2.1.3). Bevor jedoch diese Erscheinung näher untersucht wurde, war es notwendig, eventuell vorhandene Trends über die gesamten Reihenlängen zu identifizieren und ggf. nachzuweisen.

### III-1.6.2.1.2 Trendanalyse der MQ-Reihen

Mit der Trendanalyse wurden die Reihen auf das Vorliegen eines instationären Mittels untersucht. Zur *Ermittlung der Trends* wurde die übliche Kleinste-Quadrate-Methode (KQ-Methode) verwandt. Bei äquidistanten Reihen entspricht dieser Ansatz dem der Regressionsanalyse. Lineare und nichtlineare Ansätze stehen zur Verfügung, jedoch wurde die Analyse auf eine lineare Regression beschränkt, insbesondere wegen der schwierigen physikalischen Interpretation nichtlinearer Trends.

Bei der linearen Regression werden die Realisationen  $t_1, \dots, t_n$  (Zeitpunkte) und  $y_1, \dots, y_n$  (Abflusskennwerte) zur Untersuchung der folgenden linearen Beziehung verwandt

$$y_i = \beta_1 + \beta_2 t_i + e_i \quad \text{für } i = 1, \dots, n \quad (3)$$

mit:

- $\beta_1$ : Absolutglied (Regressionskoeffizient)
- $\beta_2$ : Steigungsparameter (Regressionskoeffizient)
- $e_i$ : Zufälliger Fehler

Durch die KQ-Methode werden die Punktschätzungen  $b_1$  und  $b_2$  für die Parameter  $\beta_1$  und  $\beta_2$  eines linearen Regressionsproblems so bestimmt, dass durch die Regressionsgerade

$$\hat{y} = b_1 + b_2 \cdot t \quad (4)$$

nach dem Kriterium der Summe der vertikalen Abweichungsquadrate der Ausprägungen von der Regressionsgerade möglichst gute Schätzungen  $\hat{y}$  für die Ausprägungen  $y$  des Merkmals  $Y$  eines Objektes, das die Ausprägungen  $t$  des Merkmals  $T$  trägt, erreicht wird. Details zur Methodik finden sich beispielsweise in HOLDER (1985, S. 1-14) und HARTUNG ET AL. (1991, 573 ff.).

Die Schätzer der Regressionskoeffizienten  $b_1$  und  $b_2$  lassen sich wie folgt berechnen. Dabei bezeichnen  $\bar{t}$

und  $\bar{y}$  die arithmetischen Mittelwerte der  $t_i$  und der  $y_i$ ,  $s_{ty}$  deren Kovarianz und  $s_t^2$  die Varianz der  $t_i$ .

$$b_1 = \bar{y} - b_2 \cdot \bar{t} \quad (5)$$

$$b_2 = s_{ty} / s_t^2 \quad (6)$$

Sind die Fehlerterme  $e_i$  unabhängig mit Erwartungswert 0 und mit über die Zeit nicht veränderlicher Varianz  $\sigma^2$  (Homoskedastizität), so sind die Annahmen für das Modell der Regression gültig. Gilt zusätzlich, dass die Fehlerterme  $e_i$  normalverteilt sind, so ist auf der Grundlage dieses Modells u.a. der häufig herangezogene t-Test zur Überprüfung von Hypothesen über den Steigungsparameter  $\beta_2$  anwendbar, z.B. über die Hypothese seiner signifikanten Abweichung von Null, womit ein signifikanter Trend annehmbar wäre.

Im Hinblick auf die obigen Ergebnisse der Analyse mit gleitenden Durchschnitten war jedoch diese Vorgehensweise abzulehnen. Insbesondere zeigte die Gruppierung in Nass- und Trockenjahre, dass aufeinanderfolgende Reihenwerte nicht unabhängig voneinander waren und damit die Annahmen des Modells der Regression verletzt wurden.

Eine Alternative, die nicht an diese Annahmen gebunden ist, stellt der *nichtparametrische Trendtest nach Mann und Kendall* dar (zum Vergleich siehe HARTUNG ET AL. 1991, S. 249–251 und SALAS 1993, S. 19.17/19.18). Bei diesem wird auf Grund des fortlaufenden Vergleichs jeweils aufeinanderfolgender Reihenwerte  $y_1, \dots, y_n$  und mit Hilfe der Vorzeichenfunktion *Signum* eine Testgröße abgeleitet. Es werden – bei zweiseitiger Fragestellung – die folgenden Hypothesen gegeneinander getestet:  $H_0$ : kein Trend vorhanden;  $H_1$ : Trend vorhanden. Hierzu wird eine Teststatistik  $C$  berechnet:

$$C = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(y_j - y_i) \quad (7)$$

$\text{sgn}$  steht dabei für die Vorzeichenfunktion *signum*:

$$\text{sgn}(y_j - y_i) = \begin{cases} 1, & \text{falls } y_j - y_i > 0 \\ 0, & \text{falls } y_j - y_i = 0 \\ -1, & \text{falls } y_j - y_i < 0 \end{cases}$$

Für ein Signifikanzniveau  $\alpha$  (z.B.  $\alpha = 0,05$ ) kann nach der Kendallschen  $K$ -Statistik (siehe z. B. HARTUNG ET AL. 1991, S. 249) ein kritischer Wert dieses Signifikanzniveaus ermittelt werden. Ist der Stichprobenumfang 'groß', so folgt eine transformierte Teststatistik  $C^*$  approximativ der Standardnormal-



verteilung, aus der ebenfalls ein kritischer Wert bestimmt werden kann. Ist der Betrag von  $C$  größer als der kritische Wert der  $K$ -Statistik bzw. ist  $C^*$  größer als der kritische Wert der Standardnormalverteilung, kann  $H_0$  verworfen und ein signifikanter Trend angenommen werden.

Bei der Anwendung dieser Methodik auf die MQ-Gesamtzeihen der Pegel Dresden (1853-1995), Barby (1900-1995) und Neu Darchau (1875-1995) fanden sich in allen Fällen steigende Trends. Es ließen sich folgende transformierte Teststatistiken  $C^*$  berechnen: 1.465 (Dresden), 0.323 (Barby) und 0.242 (Neu Darchau). Gegenüber dem bei einseitiger Fragestellung aus der Standardnormalverteilung ermittelbaren kritischen Wert des Signifikanzniveaus  $\alpha = 0.05$  von 1.645 waren alle drei Trends nicht signifikant. Gegenüber dem entsprechenden kritischen Wert des Signifikanzniveaus  $\alpha = 0.1$  von 1.282 war der Trend am Pegel Dresden signifikant steigend (zum Vgl. auch Abb. III-1.13). Die Trendanalyse für die MQ-Reihen 1900-1995 zeigte an den drei Pegeln in keinem Fall einen signifikanten Trend.

Somit konnte insgesamt festgestellt werden, dass *beim Kennwert MQ innerhalb des 20. Jahrhunderts keine signifikante, längerfristige Tendenz nachweisbar ist. Dies war jedoch mit zusätzlicher Einbeziehung der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zumindest am Pegel Dresden zu berücksichtigen.*

### III-1.6.2.1.3 Untersuchung der MQ-Reihen auf periodische Strukturen

Geeignete Instrumente zur Überprüfung der bereits geäußerten Hypothese der in den MQ-Reihen enthaltenen Periodizität sind die Periodogramm- und die Spektralanalyse. Die Methoden setzen trend- und sprunghfreie Reihen voraus (zum Vgl.: YEVEVICH, 1972, S. 8 und YEVEVICH, 1977, S. 6). Hiervon konnte nach den Analysen im vorigen Kapitel mit lediglich einem schwach signifikanten Trend am Pegel Dresden weitgehend ausgegangen werden.

Das *Periodogramm*  $P(f_j)$  ist nach SCHLITGEN & STREITBERG (1995, S. 54, 80, 353) eine Funktion der Frequenz. Es stellt die Zerlegung der (normierten) Gesamtvarianz einer Zeitreihe in Varianzbeträge von Schwingungskomponenten verschiedener Fourierfrequenzen  $f$  ( $0 \leq f \leq 0.5$ ) dar und gibt somit ein Maß

dafür an, mit welcher Stärke harmonische Wellen dieser Frequenz in der Ausgangsreihe auftauchen. Damit kann das Periodogramm als Hilfsmittel zur Aufdeckung verborgener Periodizitäten dienen. Der Wert  $P(f_j)$  ist an hinreichend vielen Frequenzpunkten  $f_j$  zu berechnen und dann in einem Diagramm  $P(f_j)$  vs.  $f_j$  darzustellen (zum Vergleich SCHLITGEN & STREITBERG 1995, S. 59). Durch Peaks lassen sich die Schwingungen identifizieren. Die Berechnung von  $P(f_j)$  für die Zeitreihe  $y_n$  ( $n = 1, \dots, N$ ) erfolgt nach Schlittgen und Streitberg mit der Formel:

$$P(f_j) = N \cdot \left[ \left( \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y}) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_j \cdot n) \right)^2 + \left( \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y}) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_j \cdot n) \right)^2 \right] \quad \text{für } j = 1, \dots, N/2 \quad (8)$$

Diese Größe wurde in dieser Arbeit auf die Gesamtvarianz der Zeitreihe bezogen.

Das Periodogramm ist asymptotisch unverzerrt. Es ist jedoch im Sinne des quadratischen Mittels nicht konsistent: die Streuung des Periodogramms ist von der Größenordnung des Periodogramms selbst und lässt sich auch durch die Vergrößerung des Stichprobenumfangs nicht reduzieren. An den Fourierfrequenzen  $f_j$  sind die Periodogrammordinaten eines stationären Prozesses unabhängig und asymptotisch exponentialverteilt. Für den Spezialfall eines Prozess des Weißen Rauschens sind die Periodogrammordinaten standardexponentialverteilt (zum Vergleich SCHLITGEN & STREITBERG 1995, S. 362-364). Letzteres lässt sich nutzen für Signifikanzaussagen: überschreitet eine Periodogrammordinate einen aus der Standardexponentialverteilung ermittelbaren kritischen Wert eines Signifikanzniveaus, so lässt sich die Hypothese eines Weißen Rauschens ablehnen und eine signifikante Schwingung mit der zugehörigen Fourierfrequenz annehmen.

Wegen der asymptotischen Unabhängigkeit und der Varianz der Periodogrammordinaten ergeben sich Schwierigkeiten bei der Interpretation des Periodogramms, da durch den entsprechend unruhigen Verlauf Scheinperiodizitäten vorgetäuscht werden können (zum Vergleich SCHLITGEN & STREITBERG 1995, S. 357).

Um zu konsistenteren Schätzern des theoretischen Spektrums zu gelangen, ist das Periodogramm zu glätten. Bei der Glättung kann eine Verzerrung (Bias) verursacht werden. Es entsteht ein Zielkon-

flikt zwischen dem Wunsch nach geringer Varianz und dem Wunsch nach geringem Bias des Spektralschätzers (Unschärfepinzipp der Spektralschätzung - zum Vgl. SCHLITGEN & STREITBERG 1995, S. 377). Zur Lösung dieser Problematik existieren direkte und indirekte Spektralschätzer, wobei letztere im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden. Bei den *indirekten Spektralschätzern* wird der Zusammenhang zwischen der Spektraldichte und der Kovarianzfunktion der Reihen über die Fouriertransformation genutzt. Die theoretische Spektraldichte wird aus der mit einer Gewichtungsfolge eines geeigneten Lag-Fensters multiplizierten Autokovarianzfolge (bei Bezug auf die Varianz: Autokorrelationsfolge  $r(t)$ ) geschätzt (vgl. SCHLITGEN & STREITBERG 1995, S. 400). Als Lag-Fenster wird einer Empfehlung von YEVJEVICH (1977, S. 6-7) folgend das Parzen-Fenster PF herangezogen (zum Vgl. SCHLITGEN & STREITBERG 1995, S. 408/409). Durch das bis zu einem zu wählenden Stützpunkt (truncation point T) reichenden Lag-Fenster mit den Punkten  $t = 1, \dots, T$  werden die instabilen Autokovarianzen höheren Lags ausgeblendet, womit eine geringere Varianz des Schätzers erreicht wird. Dabei ist der Stützpunkt so zu wählen, dass ein Bias vermieden wird (zum Vergleich: SCHLITGEN & STREITBERG 1995, S. 413). Entsprechend zu der Empfehlung und zu den Anwendungen von YEVJEVICH (1977) wurden mit einem Stützpunkt bei einem Viertel der jeweils untersuchten Reihenlänge solche Ergebnisse erzielt.

Es ist - bei Bezug auf die Varianz - folgende Formel für den indirekten Spektralschätzer  $IS(f_j)$  zu verwenden (zum Vergleich SCHLITGEN & STREITBERG 1995, S. 353 und 400):

$$IS(f_j) = 1 + 2 \cdot \sum_{t=1}^T (PF(t) \cdot r(t) \cdot \cos(2 \cdot \Pi \cdot f_j \cdot t))$$

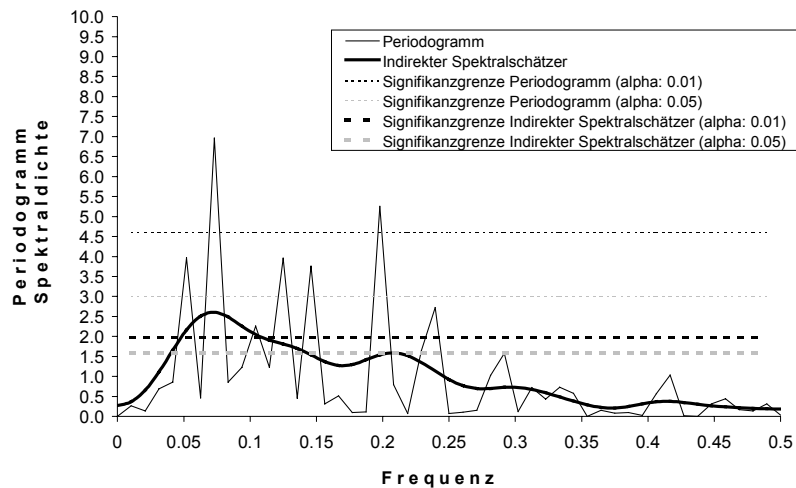
für  $j = 1, \dots, N/2$  (9)

Aussagen zur Erwartungstreue, zur Varianz und zur Verteilung des indirekten Spektralschätzers lassen sich mit Hilfe von Integralen des Periodogrammfensters ableiten. Das Periodogrammfenster ist hierfür durch Fouriertransformation des Lag-Fensters zu berechnen. Die Verteilung ergibt sich als  $s$ -faches einer  $\chi^2$ -Verteilung mit  $c$  Freiheitsgraden ( $s \cdot \chi^2(c)$ ).  $s$  und  $c$  werden mit Hilfe o.g. Integrale

ermittelt. Ein Prozess des Weißen Rauschens hat nach Gleichung 9 eine theoretische Spektraldichte von 1. Mit Hilfe der  $\chi^2$ -Verteilung können Signifikanzgrenzen ermittelt werden, bei deren Überschreitung durch den indirekten Spektralschätzer die Hypothese des Weißen Rauschens abgelehnt werden kann. Es ist dann eine signifikante Schwingung mit der entsprechenden Fourier-Frequenz anzunehmen (zum Vgl. SCHLITGEN & STREITBERG 1995, S. 400, 401 und 411).

Schließlich ist die Erscheinung der Oberschwingungen anzusprechen, die die Interpretation von Periodogrammen bzw. Spektralschätzungen erschweren. Als Oberschwingung einer Schwingung mit der (Fundamental-)Frequenz  $f$  werden Schwingungen mit den Frequenzen  $2f, 3f$  etc. bezeichnet. Sie können in Periodogrammen bzw. Spektralschätzungen auftauchen und sind auf den nicht-sinusförmigen Charakter der Schwingung mit der Fundamental-Frequenz zurückzuführen.

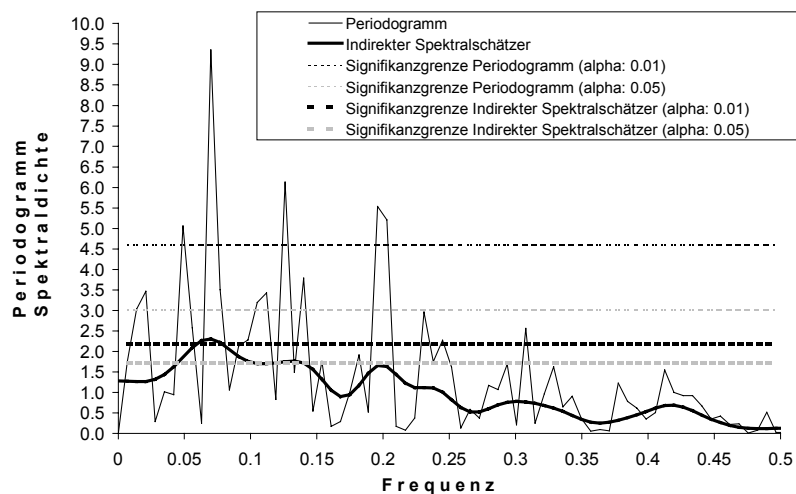
Bei der Anwendung der beschriebenen Methodik auf die MQ-Reihen des Pegels Dresden (1853-1995 und 1900-1995), Barby (1900-1995) und Neu Darchau (1900-1995) ergaben sich u.a. die in den Abbildungen III-1.14 und III-1.15 exemplarisch dargestellten Ergebnisse. Die maximalen Peaks der Periodogramme und der indirekten Spektralschätzer für die jeweiligen Reihen 1900-1995 liegen bei allen drei Pegeln bei einer Fourierfrequenz von 0,073 (=7/96) entsprechend einer *Periode von 13,7, d.h. etwa 14 Jahren oder einem Wechsel von 7 Nass- und 7 Trockenjahren. Diese Schwingungsstrukturen sind nachweisbar*, denn sie weichen jeweils bei einem Signifikanzniveau von 0.01 (einseitige Fragestellung) deutlich signifikant von einem Prozess des Weißen Rauschens ab. Bei kleineren Maxima bei Frequenzen um 0.2-0.22 (annähernd Vielfaches der Fundamentalfrequenz 0.073) lag der Verdacht einer Oberschwingung nahe, da die Periodogrammordinaten die Signifikanzgrenze des Signifikanzniveaus 0,01 (Pegel Dresden und Barby) bzw. 0,05 (Pegel Neu Darchau) überschreiten. Andererseits ist dieser Effekt begrenzt, da die indirekten Spektralschätzer die Signifikanzgrenze des Signifikanzniveaus 0,05 nicht überschreiten.



**Abb. III-1.14** Periodogramm und indirekte Spektralschätzer für die Reihe MQ 1900-1995 des Pegels Barby mit eingezeichneten kritischen Werten zweier Signifikanzniveaus für die Hypothese des Weißen Rauschens.

Die Periodogramme bzw. Spektralschätzer für die Reihen 1900-1995 an den Pegeln Dresden und Neu Darchau sind sehr ähnlich zu den in Abb. III-1.14 für den Pegel Barby dargestellten. Geringfügige Unterschiede treten demgegenüber bei dem Periodogramm und dem Spektralschätzer der MQ-Reihe 1853-1995 des Pegels Dresden auf (siehe Abb. III-1.15). Die maximalen Peaks des Periodogramms und des indirekten Spektralschätzers liegen hier bei einer Fourierfrequenz von 0,070 ( $=10/143$ ), ebenfalls entsprechend einer Periode von etwa 14 Jahren. Auch diese Schwingungsstruktur ist bei einem Signifikanzniveau von 0.01 als signifikant nachweisbar. Bei kleineren Maxima bei einer Frequenz um 0.20 war wiederum eine Oberschwingung zu vermuten. Dieses Ergebnis ist allerdings aufgrund des (schwach) signifikanten MQ-Trends nur eingeschränkt gültig.

Für eine Reihe der jährlichen Höhen der Zeitreihe der Gebietsniederschläge des deutschen Elbe-Einzugsgebiets oberhalb der Saalemündung von 1964 bis 1995 und für die MQ-Reihe des Zwischengebiets zwischen den Pegeln Dresden und Barby mit annähernd gleichem Einzugsgebiet (zur Ableitung dieser MQ-Reihe siehe Kapitel III-1.6.5.2.) wurden Periodogramme verglichen (siehe Abb. III-1.16). Es zeigt sich insbesondere im Frequenzbereich bis 0,25 eine deutliche Ähnlichkeit. Auch wenn die Struktur dieser Periodogramme von den auf die längeren Zeitreihen bezogenen abweicht und kaum eine signifikante Schwingungsstruktur zeigt, war somit davon auszugehen, dass *das langfristige Niederschlagsgeschehen zum großen Teil verantwortlich für die angesprochene Entwicklung des Abflussprozesses war.*



**Abb. III-1.15** Periodogramm und indirekte Spektralschätzer für die Reihe MQ 1853-1995 des Pegels Dresden. Dieses Ergebnis ist aufgrund des (schwach) signifikanten MQ-Trends nur eingeschränkt gültig.

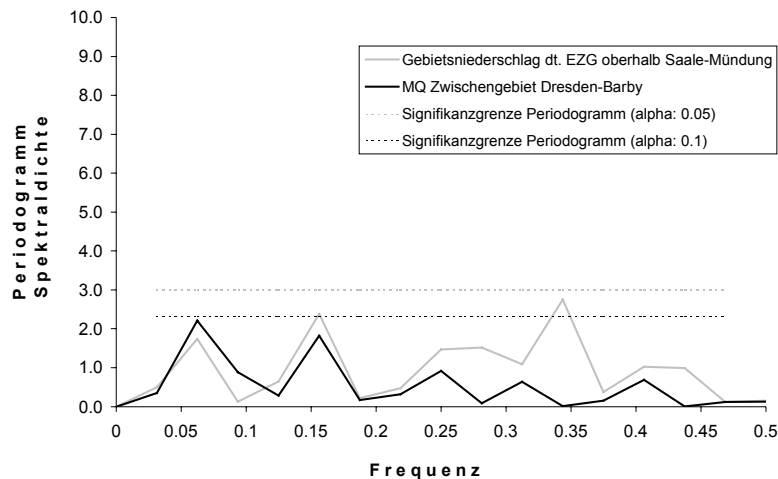


Abb. III-1.16 Periodogramme für die Reihen MQ 1964-1995 des Gebietes zwischen den Pegeln Dresden und Barby, sowie der jährlichen Gebietsniederschlagssummen des deutschen Elbe-Einzugsgebietes oberhalb der Saalemündung.

#### III-1.6.2.1.4 Zusammenfassung der Stationaritätsuntersuchung der MQ-Reihen

Als wichtigste Ergebnisse der Untersuchung der maßgeblich durch die natürliche Variabilität gesteuerten mittleren jährlichen Abflüsse lassen sich folgende Punkte zusammenfassen:

- Es ist eine *Gruppierung in Nass- und Trockenjahre* bzw. abflussreiche und abflussarme Jahre deutlich erkennbar.
- Diese Entwicklung ist statistisch nachweisbar *periodisch* mit einem Wechsel von sieben Nass- und sieben Trockenjahren.
- Die Entwicklung wurde offenbar durch das *Niederschlagsgeschehen maßgeblich gesteuert*.
- Für den Pegel Dresden konnte ein *aufsteigender linearer Trend von Mitte des 19. Jahrhunderts bis heute* festgestellt werden. Seine *statistische Signifikanz ist jedoch nur schwach*. Innerhalb des 20. Jahrhunderts war bei allen drei untersuchten Elbe-Pegeln kein signifikanter Trend nachweisbar.
- Für erst im folgenden Kapitel abgeleitete Teilreihen zeigte die Anwendung statistischer Testverfahren lediglich *einen schwach signifikanten Unterschied in den Medianen der Teilreihen 1853-1903 und 1964-1995 des Pegels Dresden*.

#### III-1.6.2.2 Stationaritätsanalyse für Reihen jährlicher Scheitelabflüsse (HQ) – ergänzende Stationaritätsanalysen für die MQ-Reihen.

Nachdem nun ein Bild über die natürliche Variabilität des Abflussprozesses in seinem (mittleren) Gesamtgeschehen vorlag, konnte auch der schwierigere und neben der naturgegebenen Variabilität auch von anthropogenen Einflüssen betroffene Hochwasserbereich (Kennwert: jährlicher Scheitelabfluss HQ) einer Stationaritätsanalyse unterworfen werden.

Die Entwicklung der *anthropogenen Einflüsse* fand – wie in Kapitel III-1.2 dargestellt – *schwerpunktmäßig in einem relativ kurzen Zeitraum* statt. Insbesondere ist der Zeitraum zwischen Mitte der 1950er und Mitte der 1960er Jahre zu nennen, da hier ein Großteil der volumenmäßig bedeutendsten Rückhaltmaßnahmen in Betrieb genommen wurden und die Eindeichungen an der Havelmündung fertiggestellt wurden.

Damit stand zu vermuten, dass sich die Abflussverhältnisse in diesen Zeiträumen relativ sprunghaft geändert haben. Dieser Umstand erforderte ein zwischen den Untersuchungen nach verschiedenen Verfahren *sorgfältig abgestimmtes Vorgehen*, da die Ergebnisse eines Verfahrens (z.B. Sprunganalyse) für die Anwendbarkeit oder die Interpretation der Ergebnisse eines anderen Verfahrens (z.B. Trend- oder Spektralanalyse) die Voraussetzung darstellten.

Um ein erstes Bild vom zeitlichen Verlauf des Hochwassergeschehens zu erhalten wurde zunächst, wie beim MQ, als erste Diagnostik eine Glättung der HQ-Reihen vorgenommen. Zudem wurden die

Reihen mit geeigneten Referenzwerten hinsichtlich deren Überschreitung verglichen.

Ein geeignetes Instrument zur Identifizierung der angesprochenen relativ ‚sprunghaften‘ – und anderen – Entwicklungen ist die Doppelsummenanalyse, die zwischen den HQ-Reihen und den nach Kapitel III-1.6.2.1 weitgehend die Voraussetzung der Homogenität erfüllenden MQ-Reihen durchgeführt wurde. Hieraus wurde die Untergliederung in geeignete Teilreihen abgeleitet bzw. unterstützt, die die Grundlage für weitere, detailliertere Stationaritätsanalysen bildeten.

Zum Nachweis von Veränderungen zwischen verschiedenen Zeitabschnitten konnten statistische Tests durchgeführt werden: in bezug auf das Mittel (Median) der Mann-Whitney-Test, in bezug auf die Varianz der F-Test und in bezug auf die Verteilungsfunktion der Anpassungstest nach Kolmogoroff und Smirnow. Sollten ‚sprunghafte‘ Veränderungen tatsächlich vorliegen, konnte nach der genannten Teilreihengliederung die schärfst mögliche Aussage durch die Testverfahren erwartet werden.

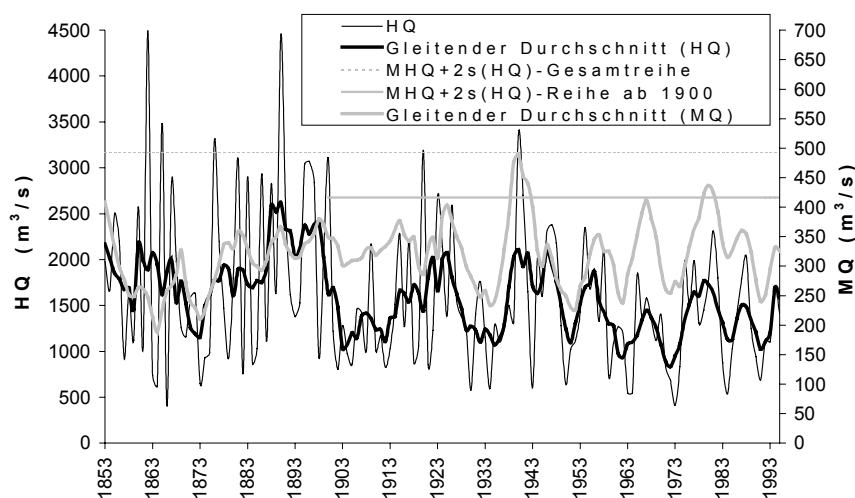
Nach dieser Einordnung von stärkeren Veränderungen in kürzeren Zeiträumen waren die Voraussetzungen für eine längerfristige Trendanalyse und die richtige Interpretation ihrer Ergebnisse gegeben.

Trend- und sprungfreie Reihen sind die Voraussetzung für die Durchführung einer Spektralanalyse, die somit erst nach der Trend- und der Sprunganalyse durchgeführt werden konnte.

### III-1.6.2.2.1 Diagnostik der HQ-Reihen durch die Glättung mit einem linearen Filter und durch die Ermittlung von Überschreitungshäufigkeiten von Referenzwerten

Um entsprechend zum Vorgehen beim Kennwert MQ die HQ-Reihen zu glätten und damit ggf. ähnliche Phasen von Jahren mit hohen und geringen Spitzenwerten zu identifizieren, wurden auch die HQ-Reihen durch einen 5-jährigen gleitenden Durchschnitt geglättet (siehe Abb. III-1.17 für den Pegel Dresden mit der HQ-Reihe 1853-1995). Für die Pegel Barby und Neu Darchau verlaufen die geglätteten Werte in etwa parallel. Erwartungsgemäß fallen die *Phasen höherer bzw. niedrigerer geglätteter HQ-Werte* häufig mit den entsprechenden Phasen beim MQ zusammen. Allerdings zeigen sich auch Unterschiede in den Intensitäten, sowie im 20. Jahrhundert offenbar ein *anderes mittleres Größenverhältnis zwischen den beiden Kennwerten als noch im 19. Jahrhundert*. Auf diese Beobachtungen wird in den folgenden Kapiteln (III-1.6.2.2.2 bis III-1.6.2.2.5) näher eingegangen.

Der Vergleich der HQ-Reihe 1853-1903 mit der *Referenzlinie* der doppelten Standardabweichung der HQ von dem Mittelwert der HQ (MHQ) nach oben in Abb. III-1.17 zeigt, dass die Referenzlinie im 19. Jahrhundert mehrfach, z. T. sehr deutlich, überschritten wurde, während dies im 20. Jahrhundert nur zweimal vergleichsweise knapp der Fall war. Dies konnte als erstes *Indiz einer veränderten Situation* angesehen werden. In bezug auf die ent-



**Abb. III-1.17** Reihen jährlicher Scheitelabflusswerte am Pegel Dresden (1853-1995) mit entsprechenden 5-jährigen gleitendem Durchschnitt, sowie den Referenzlinien der doppelten Standardabweichung der HQ über den mittleren HQ (MHQ) der Reihen 1853-1995 und 1900-1995. Zum Vgl.: gleitender Durchschnitt mittlerer jährlicher Abflusswerte MQ, siehe auch Abb. III-1.13

sprechende Reihe und Referenzlinie ab 1900 konnte als weiteres Indiz einer Veränderung festgestellt werden, dass die Referenzlinie bis 1963, dem Zeitpunkt ab dem ein Großteil der heutigen Rückhaltemaßnahmen in Betrieb waren, fünfmal überschritten wurde, sie danach aber nicht mal annähernd erreicht wurde. Dies gilt auch für die HQ-Reihe 1900-1995 am Pegel Barby, jedoch nicht für die des Pegels Neu Darchau, bei dem die Verhältnisse – aufgrund der kompensierenden Wirkung der Deichungsmaßnahmen (siehe Kapitel III-1.6.6.1) – ausgeglichener waren.

### III-1.6.2.2.2 Untersuchung der HQ-Reihen durch die Doppelsummenanalyse

Die Beobachtung eines veränderten Verhältnisses zwischen den Kennwerten MQ und HQ des vorangegangenen Kapitels sprach für systematische Veränderungen in der Abflussdynamik und sollte daher näher untersucht werden. Ein geeignetes Instrument hierfür ist die *Doppelsummenanalyse*, ein hydrologisches Verfahren zur Ermittlung von Veränderungen bzw. Inhomogenitäten (Trends, Sprünge) in Beobachtungsreihen. Die fortlaufend aufsummierten Werte der Beobachtungsreihe werden hierbei gegen die im gleichen Zeitrhythmus aufsummierten Werte einer analogen (anderer Abflusskennwert) oder kausalen (Niederschlagswerte) Bezugsreihe aufgetragen. Dabei sollte die Bezugsreihe homogen und konsistent sein. Es ergibt sich die Doppelsummenkurve.

In der Beobachtungsreihe ist dabei zu unterscheiden zwischen einer Periode vor dem Einsetzen der vermeintlichen Veränderung und einer Periode danach. Bei ausreichend hoher Korrelation zwischen der zu prüfenden Beobachtungsreihe und der Bezugsreihe während der vorangehenden Periode lässt sich eine Regressionsgerade durch die aufgetragenen Punkte legen. Abweichungen des weiteren Verlaufs der Doppelsummenkurve von dieser Geraden deuten auf eine Veränderung in der Beobachtungsreihe hin. Abweichungen sollten über eine Mindestdauer von 5 Beobachtungspunkten wirksam sein.

Neben der Existenz einer Störung an sich kann auch die Dauer der Störung erkannt werden. Ferner lassen sich aus dem Verlauf der Doppelsummenkurve Rückschlüsse über den Typ der Inhomogenität ziehen: Sprünge (bzw. mehr oder weniger

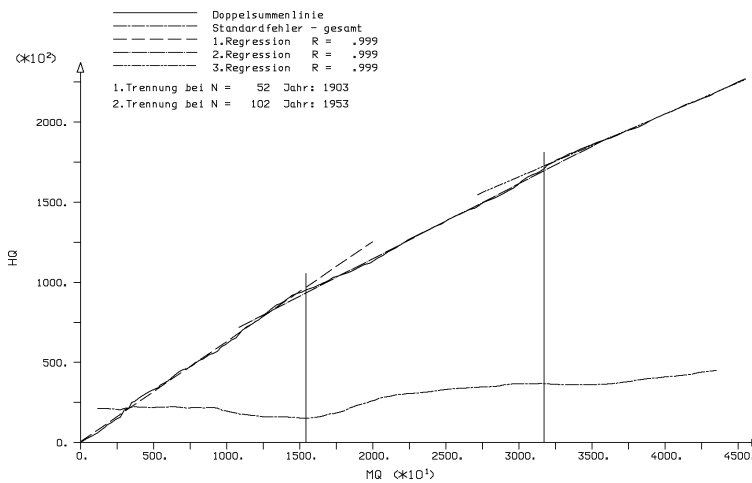
sprunghafte, in kürzeren Zeiträumen stattfindende raschere Entwicklungen) lassen sich durch Knicks, Trends durch zunehmende Krümmung im Verlauf der Doppelsummenkurve erkennen. Dabei ist in jedem Fall eine Erklärung für die festgestellte Inhomogenität zu finden. Detailliertere Angaben zum Verfahren der Doppelsummenanalyse finden sich beispielsweise in DYCK (1980, S. 44 ff).

Die zeitlichen Lagen von Knicks können durch die *Knickpunktanalyse* gefunden werden. Dazu werden für jeden Punkt einer Doppelsummenkurve jeweils lineare Regressionen bis zum betreffenden Punkt und ab dem betreffenden Punkt durchgeführt. Die jeweiligen Standardfehlersummen aus beiden linearen Regressionsrechnungen werden für die verschiedenen Punkte verglichen. Ein Sprung ist dann jeweils an demjenigen Punkt mit der minimalen Standardfehlersumme zu diskutieren.

Die Doppelsummenanalyse wurde auf die HQ-Reihen mit den analogen Bezugsreihen der entsprechenden MQ angewandt. Innerhalb des 20. Jahrhunderts konnte dieser Kennwert nach den Ergebnissen in den Kapiteln III-1.6.2.1.2 und III-1.6.2.2.3 als stationär bzw. homogen angenommen werden. Dies galt jedoch bei der Einbeziehung der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts am Pegel Dresden wegen der – allerdings nur bei geringerer Signifikanz – nachgewiesenen Instationaritäten nicht bzw. nur näherungsweise. Damit war in diesem Fall die Nachweisbarkeit von Inhomogenitäten für den Kennwert HQ eingeschränkt, jedoch konnte die Doppelsummenanalyse auch hier als diagnostisches Hilfsmittel zur Erkennung von Veränderungen in der Abflussdynamik dienen. In diesem Fall wurde – im Gegensatz zu den beiden anderen Pegeln – nicht nur der MQ als Bezugsreihe für den HQ, sondern auch der HQ als Bezugsreihe für den MQ betrachtet.

In der Knickpunktanalyse wurden jeweils zwei Regressionsgeraden bei Annahme eines Knicks und drei Regressionsgeraden bei Annahme von zwei Knicks ermittelt. Abb. III-1.18 zeigt exemplarisch die Doppelsummenkurve der Summenreihen HQ und MQ 1853-1995 für den Pegel Dresden, bei der Annahme von zwei Knicks. Die Knicks ließen sich bei Bezug der Standardfehlersumme auf die HQ-Summenreihe für die Zeitpunkte 1902/03 und

## Doppelsummenanalyse HQ vs. MQ , Pegel Dresden



**Abb. III-1.18** Doppelsummenanalyse der Reihen HQ vs. MQ 1853-1995 für den Pegel Dresden mit doppelter Knickpunktanalyse mit für Teilabschnitte angepassten Regressionsgeraden und auf den die HQ-Reihe bezogenen Standardfehlersummen der Knickpunktanalyse.

1952/53 ermitteln, bei Bezug auf die MQ-Summenreihe für die Zeitpunkte 1903/04 und 1965/66. Bei Annahme von einem Knick wurde der Zeitpunkt 1896 sowohl bei Bezug der Standardfehlersumme auf die MQ- als auch auf die HQ-Summenreihe ermittelt.

Für den Pegel Barby mit den Reihen 1900-1995 (HQ mit Bezugsreihe MQ) lagen bei Annahme von zwei Knicks beide in den 1960er Jahren, bei Annahme eines Knicks beim Zeitpunkt 1965/66. Für den Pegel Neu Darchau lagen bei Annahme von zwei Knicks die Zeitpunkte im Bereich der 1950er bis Anfang der 1970er Jahre, bei Annahme eines Knicks beim Zeitpunkt 1966/67.

Insgesamt ließ sich somit feststellen, dass sich nach der Doppelsummenanalyse *zwei Zeitbereiche einengen lassen, in denen sich die Hochwasserverhältnisse gegenüber den Mittelwasserverhältnissen offenbar relativ rasch geändert haben*. Neben dem Zeitbereich *um die Jahrhundertwende*, der für den Pegel Dresden identifizierbar war, ist – für alle drei betrachteten Pegel - der *Zeitbereich von Mitte der 1950er bis in die 1960er Jahre hinein* zu nennen. Für die Änderung um die Jahrhundertwende ist der Übergang von der kleinen Eiszeit zu den klimatischen Verhältnissen des 20. Jahrhunderts als mögliche Ursache zu nennen (siehe auch Kapitel III-1.2.1 und III-1.6.6.2). Für die Änderung zwischen Mitte der 1950er und den 1960er Jahren sind die massiven anthropogenen Eingriffe (Eindeichungen an der Havelmündung 1956 und Einrichtung von

Rückhalteräumen v.a. zwischen 1957 und 1963) zu nennen. Die Tatsache, dass die gefundenen Zeitpunkte der Knicks nicht genau mit den Zeitpunkten der vermutlich ursächlichen anthropogenen Maßnahmen zusammenfallen, lässt sich durch die natürliche Variabilität im Verhältnis zwischen den Phasen der beiden Kennwerte MQ und HQ erklären, die die anthropogen bedingten Effekte überlagert. Somit kann die Tatsache, dass die gefundenen Knickpunkte etwa im gleichen Zeitraum wie die anthropogenen Maßnahmen liegen als Indiz für deren Einfluss gesehen werden.

Um die Veränderungen im Abflussgeschehen genauer und auf ihre Signifikanz zu untersuchen und um Teilreihen mit möglichst homogenen Abflussbedingungen für weitere Analysen zu ermitteln, war nach den bekannten Zeitpunkten der anthropogenen Eingriffe und mit Unterstützung der Ergebnisse der Doppelsummenanalyse eine **geeignete Unterteilung der Gesamtreihen in Teilreihen** zu finden.

Die Einteilung in folgende Teilreihen schien demnach sinnvoll:

- **1853-1903:** Zeitraum, für den im Vergleich zum 20. Jahrhundert klimatologisch veränderte Verhältnisse in Betracht gezogen werden müssen. Der Zeitraum wurde anhand der Ergebnisse der Doppelsummenanalyse abgegrenzt.
- **1904-1954:** Zeitraum mit gegenüber dem 19. Jahrhundert veränderten Klimabedingungen und

entsprechendem Einfluss auf die Abflussdynamik, jedoch nur vernachlässigbarem Talsperreneinfluss (bis 1956) und noch nicht erfolgter Eindeichung an der Havelmündung (bis 1955). Gegenüber dem Jahr 1955 wurde die Reihe um ein Jahr verkürzt, um (methodisch bedingt – siehe Kapitel III-1.6.6.2) mit 51 Jahren Beobachtungslänge die gleiche Teilreihenlänge wie bei der Teilreihe 1853-1903 zu erzeugen. Da das Jahr 1955 kein herausragendes Ereignis enthielt, ging hierdurch kaum Information verloren.

- **1964-1995:** Zeitraum mit ausreichender Länge für statisch verlässliche Aussagen, in dem mit den Eindeichungen an der Havelmündung und mit – zu Beginn - etwa zwei Dritteln des heutigen, anthropogen eingerichteten Stauraums die anthropogen bedingten Effekte über den gesamten Zeitbereich weitgehend wirksam waren. Die heutigen Klimabedingungen dürften durch diesen Zeitraum ebenfalls am ehesten repräsentiert werden (zum Vergleich hierzu siehe auch Kapitel III-1.2.1 und III-1.6.6.2).

### III-1.6.2.2.3 Untersuchung von MQ- und HQ-Reihen auf statistisch signifikante Veränderungen zwischen ausgegliederten Teilreihen

Nach der Erkennung und Interpretation der Veränderungen in der Abflussdynamik, sowie der entsprechenden Gliederung der Gesamtreihen in geeignete Teilreihen, waren die Veränderungen auf ihre statistische Signifikanz zu untersuchen. Hierzu wurden die Teilreihen mit Hilfe geeigneter statistischer Tests auf signifikante Veränderungen in ihrem Mittel, in ihrer Varianz (Heteroskedastizität) und in ihrer Verteilungsfunktion untersucht. Da die Annahme der Normalverteilung für verschiedene Testverfahren eine wichtige Voraussetzung ist, wurde mit Hilfe von aus den jeweiligen Reihen ermittelbaren Konfidenzintervallen die Hypothese der Normalverteilung untersucht. Insbesondere bei den HQ-Reihen 1853-1903 und 1904-1954 zeigte sich, dass die Annahme einer Normalverteilung zu verwerfen ist. Logarithmierte Reihen entsprachen bei den HQ-Reihen eher dieser Annahme.

### *Mann-Whitney-Test für Unterschiede (Sprünge) im Median*

Nach SALAS (1993, S. 19.19) und HIRSCH ET AL. (1993, S. 17.21/17.22) wird mit diesem rangbasierten Test überprüft, ob die Reihenwerte (Stichprobenelemente) eines Teilabschnitts zu höheren Werten tendieren als die des anderen Teilabschnitts. Gegenüber dem t-Test auf Unterschiede im arithmetischen Mittel wurde dieser Test vorgezogen, da er nicht durch falsche Annahmen zu den beiden gegeneinander getesteten Teilreihen (Normalverteilung, Unabhängigkeit und Homoskedastizität, die z.B. beim HQ nicht gegeben sind) bzw. durch Datenmanipulation zur Erzwingung dieser Annahmen an Aussagekraft verliert.

Bei der Durchführung des Tests wird die Nullhypothese  $H_0$  der Gleichheit der Mediane zweier Teilreihen der Längen  $n_1$  bzw.  $n_2$  getestet. Es wird eine neue Serie generiert ( $z_i$  mit  $i = 1, \dots, n$ ), in dem die Ausgangsserie  $y_i$  der Größe nach aufsteigend sortiert wird. Hieraus wird eine Teststatistik berechnet zu:

$$N = \frac{\left( \sum_{i=1}^{n_1} R(y_i) \right) - n_1 \cdot (n_1 + n_2 + 1)/2}{(n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 + 1)/12)^{1/2}} \quad (10)$$

mit:

$R(y_i)$  = Rang des Beobachtungswertes  $y_i$  in der sortierten Reihe  $z_i$ .

$N$  kann als standardnormalverteilt angenommen werden. Anhand dieser Verteilungsfunktion ist ein kritischer Wert zu einem Signifikanzniveau  $\alpha$  zu bestimmen.  $H_0$  wird beibehalten, wenn der Betrag von  $N$  kleiner als dieser kritische Wert bleibt, ansonsten muss  $H_0$  abgelehnt und ein Unterschied zwischen den Medianen der gegeneinander getesteten Teilreihen angenommen werden..

Die Anwendung des Tests auf die MQ-Reihen der Pegel Dresden (1853-1903 vs. 1904-1954, 1853-1903 vs. 1964-1995 und 1904-1954 vs. 1964-1995), Barby (1904-1954 vs. 1964-1995) und Neu Darchau (1904-1954 vs. 1964-1995) erbrachte bei  $\alpha = 0.1$  (einseitige Fragestellung) nur für den Vergleich der Teilreihen 1853- 1903 vs. 1964-1995 am Pegel Dresden einen signifikanten Unterschied, für  $\alpha = 0.05$  jedoch nicht. Dies bestätigte noch einmal das Ergebnis des (schwach) signifikanten linearen Trends der MQ-Reihe 1853-1995. Alle anderen



vergleichenen Teilreihen zeigten keine signifikanten Unterschiede. Insbesondere waren unter diesem Aspekt homogene Verhältnisse während des 20. Jahrhunderts entlang der deutschen Verlaufs der Elbe anzunehmen.

Die Anwendung auf die entsprechenden HQ-Teilreihen ergab bei  $\alpha = 0.1$  (einseitige Fragestellung) für den Vergleich der Teilreihen 1853-1903 vs. 1964-1995 und 1904-1954 vs. 1964-1995 am Pegel Dresden signifikante Unterschiede. Beim Vergleich 1853-1903 vs. 1964-1995 war der Unterschied auch bei  $\alpha = 0.05$  (einseitige Fragestellung) signifikant, beim Vergleich 1904-1954 vs. 1964-1995 jedoch nicht. Für die Vergleiche an den anderen Pegeln ergaben sich keine signifikanten Unterschiede ( $\alpha = 0.1$ , einseitige Fragestellung). Somit war unter diesem Aspekt eine deutliche Instationarität der HQ-Reihe am Pegel Dresden festzustellen, wenn das 19. Jahrhundert in die Betrachtung einbezogen wurde. Eine schwächere Instationarität fand sich an diesem Pegel auch noch im 20. Jahrhundert, jedoch nicht an den anderen, weiter stromabwärts gelegenen Pegeln.

#### ***F-Test für Unterschiede in der Varianz***

Dieser Test ist auf unabhängige und normalverteilte Reihen anwendbar. Damit kann der Test für die hier betrachteten Teilreihen insbesondere wegen der in diesen enthaltenen stärkeren Autokorrelation nur mit stärkeren Einschränkungen herangezogen werden.

Nach HAUSER (1992, S. 36) wird die Nullhypothese der gleichen Varianz  $s^2$  zweier Stichproben bzw. Reihen der Längen  $n_1$  bzw.  $n_2$  getestet. Hierzu wird die Teststatistik  $F = s_1^2 / s_2^2$  berechnet. Diese Teststatistik ist F-verteilt mit  $\nu_1 = n_1 - 1$  und  $\nu_2 = n_2 - 1$  Freiheitsgraden, so dass anhand der zugehörigen Verteilungsfunktion für ein zu wählendes Signifikanzniveau  $\alpha$  kritische Werte zu bestimmen sind. Liegt die berechnete Teststatistik innerhalb dieser Werte, so ist die Nullhypothese beizubehalten, bei Über- bzw. Unterschreitung dieser Werte ist die Nullhypothese abzulehnen und von unterschiedlichen Varianzen in den verglichenen Reihen auszugehen.

Von der Anwendung des Tests auf die MQ-Reihen war streng genommen abzusehen, v.a. wegen der in den Reihen enthaltenen Autokorrelation. Bei Nichtbeachtung dieser Annahmen hätten sich bei den Vergleichen der gleichen Teilreihen wie beim

Mann-Whitney-Test in keinem der Fälle signifikant unterschiedliche Varianzen ergeben ( $\alpha = 0,1$  – einseitige Fragestellung).

Vor der Anwendung des Tests auf die HQ-Reihen wurden diese logarithmiert, um der Voraussetzung der Normalverteilung besser zu entsprechen. Eine Autokorrelationsanalyse zeigte, dass die Teilreihen 1964-1995 bei allen drei Pegeln und die Teilreihe 1904-1954 beim Pegel Neu Darchau signifikante Autokorrelationskoeffizienten ( $\text{lag} = 1$ ) enthalten. Damit war der F-Test streng genommen nur für den Vergleich der Teilreihen 1853-1903 und 1904-1954 am Pegel Dresden anwendbar. In diesem Fall ließ sich auch bei  $\alpha = 0.05$  (einseitige Fragestellung) ein signifikanter Unterschied in den Varianzen (1853-1903 mit größerer Varianz) nachweisen.

Bei Nichtbeachtung obiger Annahmen hätte sich zwischen den anderen Teilreihen nur im Vergleich der Teilreihen 1853-1903 und 1964-1995 ein signifikanter Unterschied ( $\alpha = 0.05$  - einseitige Fragestellung) ergeben. Bei den restlichen Reihen wäre kein signifikanter Unterschied feststellbar gewesen ( $\alpha = 0.1$  – einseitige Fragestellung).

#### ***Test nach Kolmogoroff und Smirnow für Unterschiede in der Verteilungsfunktion***

Möchte man überprüfen, ob zwei Verteilungen miteinander übereinstimmen oder sich signifikant unterscheiden, so sind Anpassungstests heranzuziehen. Der in der Hydrologie übliche und geeignete Test ist dabei der Anpassungstest nach Kolmogoroff und Smirnow (zum Vgl. DYCK 1980, S. 132). Dabei wird in der Literatur oft das Einstichprobenproblem angesprochen. Es handelt sich um einen nicht-parametrischen Test, mit dem überprüft wird, ob eine unbekanntes Verteilungsfunktion  $F(y)$  der betrachteten Grundgesamtheit der Zufallsvariable  $Y$  mit einer hypothetischen Verteilungsfunktion  $F_0(Y)$  übereinstimmt (zum Vgl. HARTUNG ET AL. 1991, S. 183). Nach HARTUNG ET AL. (1991, S. 183, 522) muss für die exakte Durchführung des Tests vorausgesetzt werden, dass die hypothetische Verteilungsfunktion stetig ist. Erfüllt sie diese Bedingung nicht, so bleibt der Test – bei Zweistichprobenproblemen – zwar gültig, ist jedoch konservativ und hält länger an der Hypothese der Gleichheit fest als geboten.

Bei Zweistichprobenproblemen mit Stichproben der Umfänge  $n_1$  und  $n_2$  und mit den empirischen

Verteilungsfunktionen  $EVF_1$  und  $EVF_2$  wird die Nullhypothese der Gleichheit der Verteilungsfunktionen  $VF$  ( $VF_1(y) = VF_2(y)$  für alle  $y$ ) gegen die Alternativhypothese der Ungleichheit bei einem zu wählenden Signifikanzniveau  $\alpha$  getestet. Eine Teststatistik KST ist zu berechnen zu:

$$KST = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}} \cdot D_{n_1, n_2} \quad (11)$$

mit:

$$D_{n_1, n_2} = \max |EVF_1(y) - EVF_2(y)|$$

Die Größe  $D_{n_1, n_2}$  gibt also den größten vertikalen Abstand zwischen den beiden empirischen Verteilungsfunktionen an. Die Nullhypothese wird verworfen, wenn KST größer als oder gleich einem kritischen Wert des Signifikanzniveaus ( $k_{n_1, n_2, 1-\alpha}$ ) wird, der aus Tabellenwerken der Literatur zu entnehmen ist (zum Vergleich z.B. HARTUNG ET AL. 1991, S. 520 ff, sowie BRADLEY 1968).

Die Anwendung dieses Tests auf die genannten Teilreihen ergab bei den MQ-Reihen selbst bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,2$  in keinem der Fälle einen signifikanten Unterschied zwischen den Verteilungsfunktionen.

Dies gilt auch für die Vergleiche der HQ-Reihen 1904-1954 und 1964-1995 an allen drei Pegeln. Bei dem Vergleich der Teilreihen 1853-1903 und 1904-1954 für den Pegel Dresden fiel die Entscheidung der Beibehaltung der Nullhypothese bei  $\alpha=0,2$  nur sehr knapp aus, beim Vergleich der Teilreihen 1853-1903 und 1964-1995 war die Nullhypothese bei  $\alpha = 0,05$  abzulehnen. Berücksichtigte man die Konservativität des Tests im Zweistichprobenfall, so war auch für den Vergleich der Reihen 1853-1903 und 1904-1954 ein signifikanter Unterschied in Erwägung zu ziehen. Somit konnte insgesamt unter dem Gesichtspunkt der Verteilungsfunktion festgestellt werden, dass sich die Hochwasserverhältnisse im 19. Jahrhundert – zumindest oberhalb des Pegels Dresden – offenbar deutlich von denen des 20. Jahrhunderts unterschieden haben, während sich innerhalb des 20. Jahrhunderts bei allen drei Pegeln keine solchen Unterschiede feststellen ließen.

### **Gesamtbewertung der Ergebnisse der statistischen Tests**

Durch die Anwendung der Testverfahren auf die MQ-Teilreihen ließ sich lediglich bei dem Vergleich der Teilreihen 1853-1903 und 1964-1995 am Pegel Dresden ein schwach signifikanter Unterschied im Mittel (Median) feststellen. Dies entspricht dem Ergebnis des (schwach) signifikanten linearen Trends der MQ-Reihe 1853-1995 (siehe Kapitel III-1.6.2.1.2).

Durch die Anwendung auf die HQ-Teilreihen zeigten sich zwischen den Teilreihen 1853-1903 und 1964-1995 signifikante Unterschiede im Mittel (Median), in der Varianz und in der Verteilungsfunktion. Zwischen zeitlich benachbarten Teilreihen konnten jedoch – zwischen 1853-1903 und 1904-1954 – nur schwach oder annähernd signifikante Unterschiede in den genannten statistischen Eigenschaften bzw. – zwischen 1904-1954 und 1964-1995 – keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Hiermit fielen die zu Beginn des Kapitels III-1.6.2.2 angesprochenen sprunghaften Entwicklungen nicht so stark aus, dass sie die Veränderungen in der Gesamtreihe bereits erklären können. Es war zusätzlich eine längerfristige, kontinuierliche Entwicklungen berücksichtigende Trendanalyse durchzuführen.

#### **III-1.6.2.2.4 Trendanalyse der HQ-Reihen**

Die lineare Trendanalyse diente einerseits der Feststellung und des Nachweises längerfristiger, kontinuierlicher Tendenzen, sowie der Überprüfung und Gewährleistung der Stationarität innerhalb der ausgliederten Teilreihen, um in späteren Analysen verzerrte Ergebnisse zu vermeiden.

Für die Anpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate und den Signifikanztest nach Mann und Kendall wurde die gleiche Methodik genutzt, wie in Kapitel III-1.6.2.1.2 für die MQ-Reihen, da auch für die HQ-Reihen nicht die Voraussetzungen für die Durchführung eines t-Tests gegeben sind (Autokorrelation, Heteroskedastizität, keine Normalverteilung).

Für die *HQ-Gesamtreihe des Pegels Dresden (1853-1995)* konnte auf diesem Weg ein *signifikant fallender linearer Trend (Signifikanzniveau 0,05 – einseitige Fragestellung)* festgestellt werden (siehe Abb. III-1.19). Berücksichtigte man nur Reihen ab 1900,

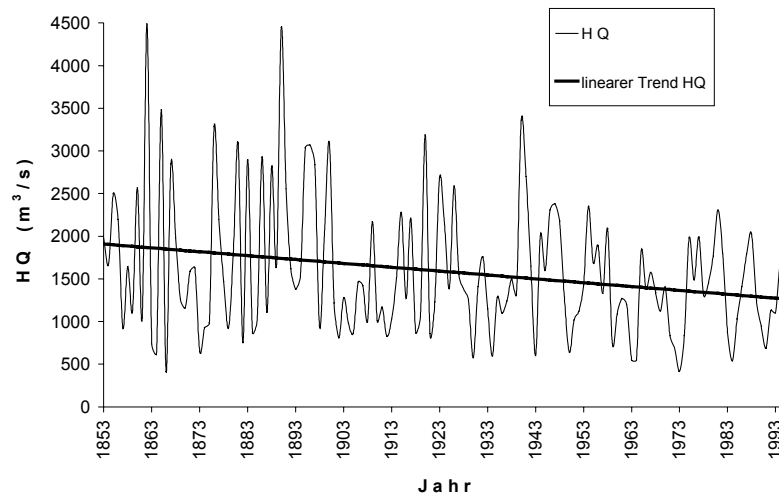


Abb. III-1.19 HQ-Reihe 1853-1995 des Pegels Dresden mit eingezeichnetem signifikanten ( $\alpha = 0,05$  – einseitige Fragestellung) linearen Trend.

so entsprachen die ermittelten Trends den Erwartungen: für die Pegel Dresden und Barby waren die Trends fallend, wobei vermutet werden konnte, dass die errichteten Stauräume einen Einfluss hatten. Am Pegel Neu Darchau war der Trend leicht steigend, wobei vermutet werden konnte, dass die fallende Entwicklung oberhalb durch die Eindeichungen ab der Havelmündung stromabwärts kompensiert wurden. Allerdings waren für alle drei analysierten Pegel bei einem Signifikanzniveau von 0,1 (einseitige Fragestellung) keine signifikanten Trends feststellbar.

Von besonderem Interesse im Hinblick auf spätere (unverzerrte) Analyseergebnisse war die Frage, ob in den in Kapitel III-1.6.2.2.2 genannten Teilreihen (1904-1954, 1964-1995 an allen drei Pegeln, sowie 1853-1903 am Pegel Dresden) signifikante Trends enthalten waren. Dies konnte lediglich für die HQ-Reihen 1904-1954 am Pegel Dresden mit steigendem Trend festgestellt werden, jedoch nur bei vergleichsweise schwacher Signifikanz ( $\alpha = 0,1$  – einseitige Fragestellung). Insbesondere waren die *HQ-Reihen 1964-1995*, auf deren Basis in Kapitel III-1.6.3 umfangreiche Abflussstatistiken entwickelt werden *trendfrei*.

Im Vorausblick auf Kapitel III-1.6.8 wurden auch die *HQ-Teilreihen 1936-1995* auf signifikante lineare Trends getestet. Für die Pegel Dresden und Barby konnten signifikante linear fallende Trends festgestellt werden, jedoch nur bei vergleichsweise schwacher Signifikanz ( $\alpha = 0,1$  – einseitige Fragestellung). Diese relativieren sich, wenn man berücksichtigt, dass für die entsprechenden Reihen 1900-1995 keine signifikanten linearen Trends gefunden

wurden. Damit erschienen unter diesem Aspekt *statistische Analysen der Teilreihen auch ohne vorherige Trendbereinigung gerechtfertigt*.

#### III-1.6.2.2.5 Untersuchung der HQ-Reihen auf periodische Strukturen

Ähnlich wie bei den MQ-Reihen ließen sich in Kapitel III-1.6.2.2.1 durch eine Glättung auch Phasenbildungen in hochwasserreiche und –arme Jahre erkennen. Wie die MQ-Reihen wurden daher auch die HQ-Reihen einer Periodogramm- und einer Spektralanalyse unterzogen, um eventuelle Periodizitäten aufzudecken und ihre Signifikanz nachzuweisen.

Wegen des deutlich signifikanten Trends der HQ-Reihe 1853-1995 waren diese Analysen jedoch nicht auf diese Reihe anzuwenden. Analysiert wurden die HQ-Reihen 1900-1995 der drei Pegel Dresden, Barby und Neu Darchau. Die Abbildungen III-1.20 a.-c. zeigen die Ergebnisse.

Es zeigten sich Unterschiede zu den Periodogrammen und Spektralschätzern der entsprechenden MQ-Reihen. Bei allen drei Pegeln zeigten sich Maxima der Periodogrammordinaten bei den Frequenzen 0,125 (=12/96) und 0,1458 (=14/96), die alle bei einem Signifikanzniveau von 0,05 signifikant sind, d.h. vom Prozess des Weißen Rauschens abweichen. Die Ordinaten der Frequenzen 0,1458 sind darüber hinaus bei den Pegeln Barby und Neu Darchau auch bei einem Signifikanzniveau von 0,01 signifikant. Während die Ordinate der Frequenz 0,125 bei Pegel Dresden größer ist, ist beim Pegel Barby und noch stärker beim Pegel Neu Darchau die Ordinate der

Frequenz 0,1458 größer. Für den indirekten Spektralschätzer fand sich beim Pegel Dresden das Maximum für die Frequenz 0,1354 (=13/96), während dies bei den Pegeln Barby und Neu Darchau für die Frequenz 0,1458 der Fall ist. Dies entspricht einer *Periode von 7,4 bzw. 6,9 Jahren*. Es war also *elbeabwärts eine leichte Verschiebung dieser Frequenz bzw. Periode zu beobachten*. Deutlicher ist jedoch der *Effekt der Zunahme der Intensität der Periodizität*. Während am Pegel Dresden die beiden maximalen Periodogrammordinaten und das Maximum des Spektralschätzers nur bei einem Signifikanzniveau von 0,05 signifikant sind, ist dies

für die Periodogrammwerte und die Werte des Spektralschätzers bei der Frequenz 0,1458 für den Pegel Barby knapp und für den Pegel Neu Darchau deutlich auch bei einem Signifikanzniveau von 0,01 der Fall.

Der Effekt von Oberschwingungen ist offenbar kaum ausgeprägt, da die nächstgrößeren Maxima bei einem Signifikanzniveau von 0,3438 bei einem Signifikanzniveau von 0,05 mit Ausnahme der Periodogrammordinate des Pegels Barby nicht signifikant sind und die Frequenz von dem Vielfachen der Fundamentalfrequenz deutlich abweicht.

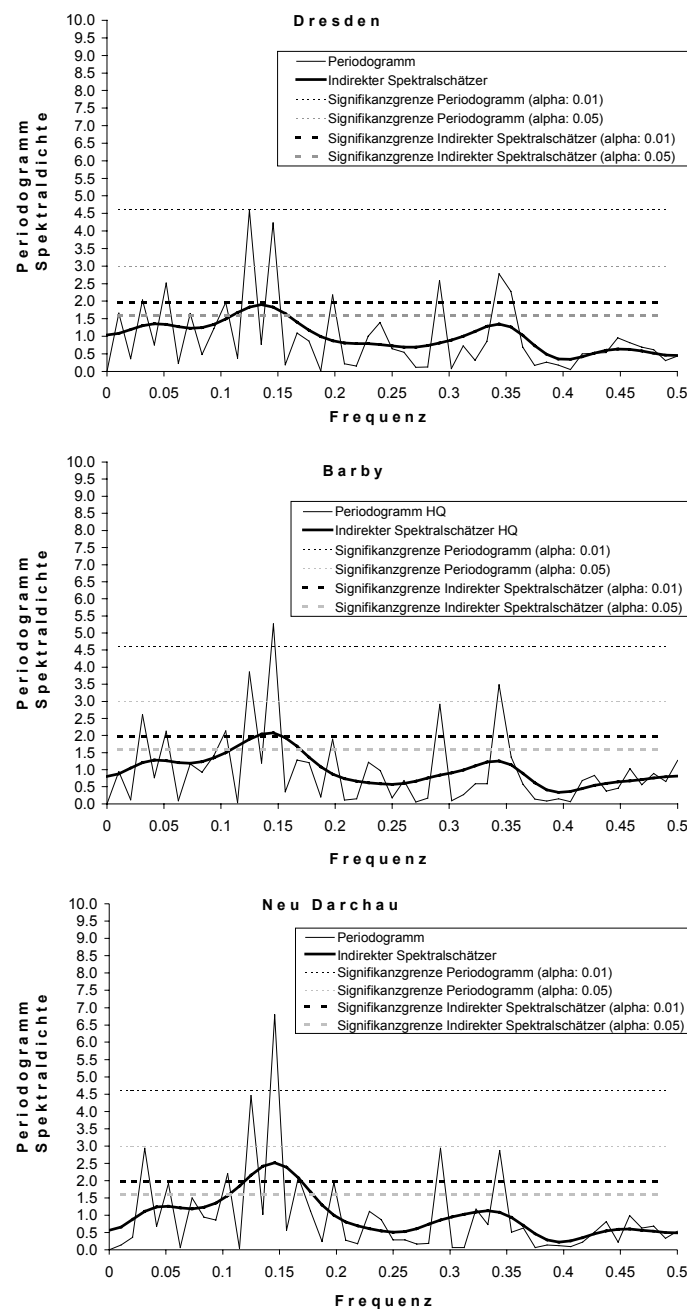


Abb. III-1.20 Periodogramm und indirekte Spektralschätzer für die Reihen HQ 1900-1995 der Pegel Dresden (a.), Barby (b.) und Neu Darchau (c.).

### III-1.6.2.2.6 Zusammenfassung der Stationaritätsuntersuchung der HQ-Reihen

Als wichtigste Ergebnisse für die Untersuchung der offenbar durch die natürliche Variabilität, sowie durch anthropogene Eingriffe beeinflussten HQ-Reihen lassen sich folgende zusammenfassen.

- Ähnlich wie bei den MQ-Reihen war ein *Gruppierungseffekt in hochwasserreichere und –ärmere Phasen* feststellbar. Häufig stimmen diese Phasen mit den für die MQ-Reihen festgestellten Phasen abflussreicher und –armer Jahre überein, jedoch ergeben sich auch Unterschiede in den Ausprägungen dieser Strukturen. So konnte für die HQ-Reihen ab 1900 wie für die MQ-Reihen eine Periodizität nachgewiesen werden, deren Intensität stromabwärts zunimmt. Im Vergleich zu den MQ-Reihen hat diese Periodizität jedoch eine andere Periode von etwa 7 Jahren. *Es ist somit im Hochwasserbereich (zwischen MQ und HQ) von einem komplexen Schwingungsverhalten auszugehen.*
- In den HQ-Reihen waren *langfristige Veränderungen* durch verschiedene Verfahren nachweisbar, insbesondere *wenn die Verhältnisse des 19. Jahrhunderts in die Betrachtungen einbezogen wurden.* So ließ sich ein signifikant fallender linearer Trend der HQ-Reihe 1853-1995 für den Pegel Dresden nachweisen, sowie in statistischen Tests signifikante Unterschiede im Median und in der Verteilungsfunktion zwischen den Teilreihen 1853-1903 und 1964-1995.
- Aus der Kenntnis der Zeitpunkte der anthropogenen Einflüsse, sowie aus der Doppelsummenanalyse (HQ vs. MQ) mit mehr oder weniger ausgeprägten Knicks in den Doppelsummenkurven konnte geschlossen werden, dass sich die *Veränderungen v.a. auf relativ kurze Zeiträume zu Beginn des 20. Jahrhunderts (nur Klimateffekt) und in den 1950er/60er Jahren konzentrierten.* Die statistischen Tests zwischen verschiedenen Teilreihen zeigten aber nur in den Varianzen (1853-1903 vs. 1904-1954 am Pegel Dresden) bzw. keine (1904-1954 vs. 1964-1995) signifikanten Unterschiede in den statistischen Eigenschaften (Median, Varianz, Verteilungsfunktion) der zeitlich benachbarten Teilreihen. Zusammen mit den Aussagen des vorangegangenen Punktes ließ sich folgern, dass sich die *insgesamt signifikanten Veränderungen nicht allein aus*

*Entwicklungen in den angesprochenen kürzeren Zeiträumen erklären lassen, sondern sich längerfristig durch die Summe verschiedener Wirkungen ergeben haben.*

- Mit der zentralen Tendenz der HQ-Werte 1853-1995 ging eine *verminderte Überschreitungshäufigkeit vorgegebener Referenzwerte höheren Abflusses* einher.
- Die Beobachtungen haben entscheidende *Bedeutung für weitere hydrologische und sonstige (z.B. ökologische) Untersuchungen* im Bereich des Flusssystem. Aufgrund der beobachteten Periodizität sollten Abflussreihen für statistische Analysen eine ausreichende Länge haben, um nicht zu stark von hochwasserreichen oder –armen Phasen geprägt zu werden. Zudem sollte die untersuchte Reihenlänge an verschiedenen Pegeln einheitlich sein, um vergleichbare und regionalisierbare Ergebnisse zu erhalten. Dies gilt natürlich umso mehr, da längerfristige Veränderungen, die offenbar v.a. auf Klimaveränderungen seit dem 19. Jahrhundert, aber auch auf anthropogene Eingriffe zurückgehen, berücksichtigt werden müssen. Untersuchungen im Flusssystem, wie z.B. im Rahmen des BMBF-Forschungsprogramms ‚Elbe-Ökologie‘, haben oft eine Dauer von wenigen Jahren. Die Bewertung der Ergebnisse sollte nicht ohne Berücksichtigung der genannten Beobachtungen erfolgen.
- Durch theoretische Überlegungen und mit Hilfe der Doppelsummenanalyse gelang es, die Gesamtreihen des Abflusses so in *Teilreihen* zu zerlegen, dass diese als ausreichend homogen angesehen werden können. Dies gilt insbesondere für die Teilreihen 1964-1995, die bei ausreichender Länge für statistisch verlässliche Aussagen den gegenwärtigen hydrologischen Verhältnissen am nächsten kommen. Für Reihen 1936-1995 kann dies im Kontext mit den Reihen ab 1900 angenommen werden. Die Ermittlung von Abflussstatistiken auf Basis dieser Reihen ist rechtfertigbar. Nicht ohne weiteres zu rechtfertigen sind demgegenüber Abflussstatistiken über den Gesamtzeitraum ab 1853.

In einem weiteren Kapitel (III-1.6.6) wird eine erweiterte Stationaritätsanalyse unter Verwendung von Simulationen täglicher Abflussreihen durchgeführt. Da jedoch die Entwicklung der Simulations-

instrumente dem voranging, werden die Ergebnisse der erweiterten Stationaritätsanalyse weiter unten dargestellt.

### III-1.6.3 Pegelweise statistische Analysen des Abflussprozesses für die Reihen 1964-1995

Nach der Durchführung der Konsistenzanalyse mit der Plausibilisierung der Abflussreihen insbesondere für den Zeitraum ab den 1960er Jahren (siehe Kapitel III-1.5), nach der Homogenitäts- bzw. Stationaritätsanalyse mit der begründeten Einteilung der Gesamtreihen in geeignete, weitgehend homogene Teilreihen (siehe Kapitel III-1.6.2) und nach der Parametrisierung der vorliegenden Tagesreihen in Reihen monatlicher und jährlicher Abflusskennwerte (siehe Kapitel III-1.6.1) lagen die Voraussetzungen für statistische Analysen auf der Basis dieser Reihen in der Zeitspanne 1964-1995 vor. Dabei konnte davon ausgegangen werden, dass die Reihen dieser Zeitspanne mit mehr als 30 Jahren bei Erfüllung einer Mindestdauer für statistisch bereits verlässliche Aussagen zumindest eine Annäherung an den Ist-Zustand in bezug auf das Schwankungsverhalten des Abflusses in den letzten Jahrzehnten beschreiben.

#### III-1.6.3.1 Ermittlung der Gewässerkundliche Hauptwerte und weiterer statistischer Kennwerte

Einen *Überblick über die Größenverhältnisse der Mittel und Extreme* in den Abflussreihen vermitteln die in Tab. III-1.2 zusammengestellten *Gewässerkundlichen Hauptwerte*. Der MQ 1964-1995 gibt das arithmetische Mittel aller Tageswerte der Zeitspanne 1964-1995 an, der MHQ das der Jahreshöchstwerte HQ dieses Zeitabschnitts, und der MNQ analog das der Jahresniedrigstwerte. HHQ bezeichnet den höchsten bisher bekannt gewordenen Abflusswert an dem jeweiligen Pegel in bezug auf die vorliegenden Gesamtreihen. Diese Gewässerkundlichen Hauptwerte wurden um *weitere statistische Kennwerte* der jährlichen Abflusskennwerte HQ ergänzt: minHQ 1964-1995 gibt den minimalen, maxHQ 1964-1995 den maximalen Jahreshöchstwert HQ des Zeitabschnitts 1964-1995 an.

#### III-1.6.3.2 Dauerlinien

Dauerlinien geben Aufschluss über die Variabilität des Abflussgeschehens und der damit verbundenen Prozesse. So können die *Über- bzw. Unterschreitungshäufigkeiten* kritischer Abflusswerte ermittelt werden, oder umgekehrt die zu bestimmten Über-/Unterschreitungshäufigkeiten gehörigen *Abflusswerte (Quantile)*.

Bei der Erstellung der Dauerlinien wurden die mittleren täglichen Abflusswerte eines Pegels der Größe nach sortiert und dann gegen ihre Unterschreitungshäufigkeit aufgetragen. Einerseits wurden dabei die *mittleren Dauerlinien* aus den jeweiligen gesamten Reihen ermittelt und, bezogen auf die auf ein Jahr normierten Unterschreitungshäufigkeiten, aufgetragen. Somit besteht auch die Möglichkeit des Vergleichs verschieden langer Reihen. Andererseits werden die Dauerlinien aller einzelnen Abflussjahre errechnet und hieraus die *obere und untere Hüllkurve* für diese Dauerlinien bestimmt. Hiermit kann ein Eindruck vom Schwankungsverhalten der Dauerlinien gewonnen werden. Eine exemplarische Darstellung dieser Dauerlinien gibt die Abb. III-1.21 für die Reihe 1964-1995 des Pegels Barby.

Im Projekt wurden aus den Dauerlinien Abflusswerte vorgegebener Überschreitungshäufigkeiten bestimmt.

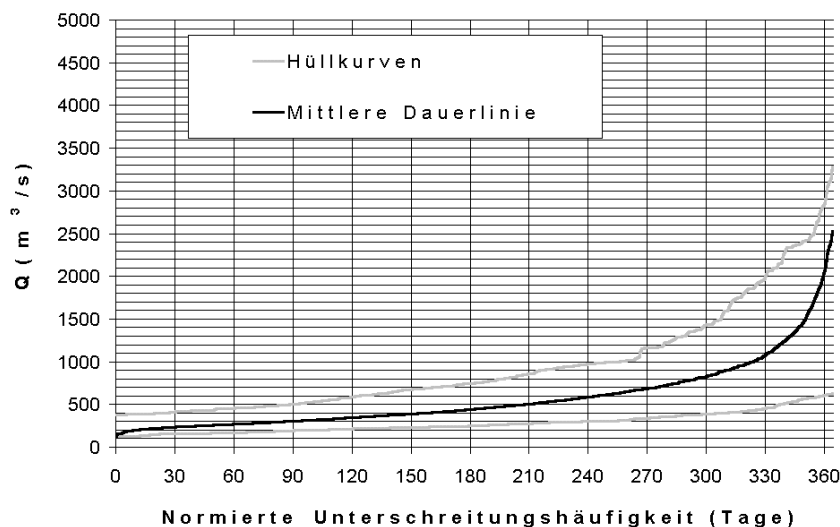
Solche aus der Dauerlinie ermittelbaren Quantile stellen – ggf. nach ihrer Umrechnung in Wasserstände – eine wichtige und in weitergehenden Untersuchungen häufig gebrauchte Information dar. Diese finden insbesondere auch bei auenökologischen Untersuchungen mit der Bewertung von Biozönosen und Arten des von Überschwemmungsereignissen bestimmter Dauern, Häufigkeiten und Zeitpunkte geprägten Auenbiotopen Anwendung. Im Rahmen des Projekts und des Forschungsverbundes 'Elbe-Ökologie' war es wünschenswert, eine *auenökologische Relevanz der Analyseergebnisse* als Grundlage für sich anschließende Forschungsaktivitäten bzw. Entscheidungsfindungen von vornherein zu gewährleisten. Daher wurden unter diesem Gesichtspunkt nach interdisziplinärer Absprache *geeignete Quantile der Dauerlinie ausgewählt*. Um den Zeitpunkt der Ereignisse zu berücksichtigen wurden die Dauerlinien neben dem Abflussjahr auch auf die ökologisch besonders bedeutsame Vegetationszeit

**Tab. III-1.2** Zusammenstellung Gewässerkundlicher Hauptwerte verschiedener Pegel und Reihen (1964-1995 bzw. beim HHQ die verfügbaren Gesamtreihen), ergänzt um den kleinsten und den größten jährlichen Hochwasserscheitelabfluss minHQ bzw. maxHQ des Zeitabschnitts 1964-1995 (zum Vergleich siehe auch *Anlagen-CD*).

Pegel	HHQ		maxHQ 1964-1995 [m <sup>3</sup> /s]	MHQ 1964-1995 [m <sup>3</sup> /s]	minHQ 1964-1995 [m <sup>3</sup> /s]	MQ 1964-1995 [m <sup>3</sup> /s]	MNQ 1964-1995 [m <sup>3</sup> /s]
	[m <sup>3</sup> /s]	Zeitpunkt					
Dresden	4490	3.2.1862	2310	1311	415	336	121
Torgau	3400	17./18.3.1940	2169	1290	451	351	130
Wittenberg	2560	11.1.1982	2560	1360	414	371	140
Aken	3690	19.3.1940	2720	1528	564	449	171
Barby	4650	19.1.1920	3282	1845	643	576	224
Tangermünde	3259	19.3.1981	3259	1770	574	587	243
Wittenberge	3590	23.1.1920	3280	1887	744	715	305
Neu Darchau	4400	25.3.1888	3574	1856	788	730	288

bezogen. Um den gesamten Bereich der Dauerlinie geeignet durch Quantile zu belegen, wurden für die auf das Abflussjahr und auf die Vegetationszeit bezogenen Dauerlinien die Dezile ermittelt (siehe Tab. III-1.3 und III-1.5). Daneben wurden für den auenökologisch besonders relevanten Bereich höherer Abflüsse die Quantile mit den Überschreitungshäufigkeiten von 5, 10, 20, 30, ... , 110 Tagen ermittelt (siehe Tab. III-1.4 und III-1.6). Diese Quantile und ihre regionalisierten Größen (bezüglich Dezilen des Abflussjahres siehe Kapitel III-1.6.4) können als Rahmeninformationen über die Häufigkeitsverhältnisse im Abflussprozess angesehen werden. Eine Informationsverfeinerung für konkrete Fragestellungen ist möglich. Sie wurde in diesem Projekt jedoch noch nicht durchgeführt, da von Seite geobotanischer Forschung die je nach sonstigen Randbedingungen variablen und je nach

Art und Biozönose vielfältigen Ansprüche innerhalb des sehr komplexen Wirkungsgefüge der Aue häufig nicht allgemein und eindeutig festlegbar sind. Die Relevanz der ermittelten Quantile als Parameter für die Bewertung eines auenökologischen Standorts ist allerdings kritisch zu diskutieren, insbesondere da die Quantile keine eindeutige Aussage über den zeitlichen Verlauf der Überschreitung machen; so ist beispielsweise - bei identischer Gesamtdauer - eine mehrmalige kurzzeitige Überschreitung anders zu bewerten als eine einmalige, zusammenhängende und länger andauernde Überschreitung. Auf diese Frage der auenökologischen Relevanz verschiedener statistischer Abflusskennwerte wird detaillierter am Ende des Kapitels III-1.6.3.4 eingegangen. Die Regionalisierung der ermittelten Dauerlinien-Quantile als Längsschnitte der Elbe enthält Kapitel III-1.6.4.



**Abb. III-1.21** Mittlere Dauerlinie des Pegels Barby für die Reihe mittlerer täglicher Abflüsse 1964-1995, sowie Hüllkurven der jahresbezogenen Dauerlinien (Dauerlinien der weiteren Pegel: siehe *Anlagen-CD*).

**Tab. III-1.3** Zusammenstellung der aus den mittleren Dauerlinien (mDL) und aus den oberen bzw. unteren Hüllkurven (OH bzw. UH) der täglichen Abflussreihen 1964-1995 der Elbe-Pegel ermittelbaren Dezile (x %), bezogen auf das Abflussjahr. (Werte in [m³/s]).

Pegel	Art DL	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Dresden	UH	278	227	189	165	148	134	122	110	94
	mDL	656	459	360	301	256	217	188	161	138
	OH	1220	771	607	533	448	371	307	270	225
Torgau	UH	288	240	201	178	159	140	127	120	100
	mDL	676	483	378	312	268	229	198	170	145
	OH	1210	827	636	541	470	397	320	275	237
Wittenberg	UH	282	238	204	181	165	149	133	120	108
	mDL	706	502	396	333	287	245	210	177	149
	OH	1310	878	700	608	510	448	381	323	280
Aken	UH	350	300	253	226	210	185	168	154	137
	mDL	837	611	496	413	355	300	259	218	185
	OH	1590	1040	793	702	591	503	421	366	320
Barby	UH	454	376	311	288	250	230	205	178	158
	mDL	1069	785	634	527	447	382	330	282	243
	OH	1959	1353	1001	912	752	669	558	473	424
Tangermünde	UH	423	368	311	288	265	249	227	204	189
	mDL	1108	796	632	535	457	391	339	294	257
	OH	1810	1387	1027	889	764	662	567	490	430
Wittenberge	UH	570	505	425	396	341	322	295	243	214
	mDL	1339	952	777	657	573	505	442	386	330
	OH	2002	1601	1371	1157	998	837	736	627	564
Neu Darchau	UH	561	507	451	422	321	302	275	224	195
	mDL	1372	1021	834	691	590	513	442	379	315
	OH	1980	1580	1370	1210	1020	878	778	666	593

**Tab. III-1.4** Zusammenstellung der aus den mittleren Dauerlinien (mDL) und aus den oberen bzw. unteren Hüllkurven (OH bzw. UH) der täglichen Abflussreihen 1964-1995 der Elbe-Pegel ermittelbaren Überschreitungshäufigkeiten von x Tagen (x d), bezogen auf das Abflussjahr. (Werte in [m³/s]).

Pegel	Art DL	5 d	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d	60 d	70 d	80 d	90 d	100 d	110 d
Dresden	UH	394	366	317	291	274	260	240	229	222	208	197	188
	mDL	1230	1017	818	707	626	567	513	471	436	407	381	357
	OH	2050	1592	1390	1240	1100	1010	900	781	741	708	653	604
Torgau	UH	417	381	326	295	282	268	250	240	232	220	211	201
	mDL	1264	1052	838	721	646	586	538	495	459	430	403	376
	OH	1937	1638	1354	1260	1170	1070	941	836	799	761	714	626
Wittenberg	UH	383	361	321	288	276	262	254	243	236	219	209	203
	mDL	1351	1150	902	765	677	609	554	513	479	448	416	393
	OH	2120	1920	1540	1390	1260	1090	992	902	829	752	736	700
Aken	UH	506	463	424	376	337	320	316	305	292	277	270	253
	mDL	1609	1274	1034	901	807	738	674	626	581	547	518	494
	OH	2430	2310	1920	1780	1510	1280	1150	1060	1010	923	845	793
Barby	UH	603	581	539	483	434	407	395	376	365	349	334	306
	mDL	2059	1729	1353	1160	1018	935	859	802	748	700	667	631
	OH	2839	2527	2356	2099	1902	1742	1479	1370	1294	1168	1044	1001
Tangermünde	UH	544	533	488	440	417	407	395	374	355	338	322	311
	mDL	1925	1717	1438	1229	1052	950	878	815	751	700	660	629
	OH	2876	2560	2090	1914	1759	1689	1516	1441	1307	1194	1083	1027
Wittenberge	UH	711	701	636	575	555	537	523	513	490	457	437	425
	mDL	2190	1950	1629	1462	1276	1170	1066	973	919	856	808	772
	OH	3040	2780	2364	2095	1965	1868	1708	1625	1555	1497	1439	1365
Neu Darchau	UH	757	743	667	569	551	537	525	508	498	491	470	451
	mDL	2101	1909	1611	1462	1303	1201	1113	1042	981	918	871	830
	OH	3203	2862	2291	2078	1910	1790	1710	1590	1540	1510	1440	1360



**Tab. III-1.5** Zusammenstellung der aus den mittleren Dauerlinien (mDL) und aus den oberen bzw. unteren Hüllkurven (OH bzw. UH) der täglichen Abflussreihen 1964-1995 der Elbe-Pegel ermittelbaren Dezile (x %), bezogen auf die Vegetationszeit. (in [m<sup>3</sup>/s]).

Pegel	Art DL	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Dresden	UH	259	206	179	145	131	120	107	94.1	73
	mDL	624	423	335	284	237	202	176	154	130
	OH	1410	1030	793	719	630	386	319	282	253
Torgau	UH	264	215	193	167	140	125	113	100	76.7
	mDL	641	448	354	300	251	215	188	163	139
	OH	1410	1080	845	775	685	433	355	306	281
Wittenberg	UH	262	218	195	161	147	131	122	110	92
	mDL	670	464	371	314	268	227	197	168	140
	OH	1790	1180	930	814	710	430	361	321	299
Aken	UH	311	275	238	214	181	157	144	137	131
	mDL	803	559	458	386	330	281	242	208	175
	OH	1920	1450	1100	971	807	521	464	378	358
Barby	UH	368	346	304	263	203	178	166	158	144
	mDL	1000	719	592	493	418	359	312	273	233
	OH	2290	1802	1421	1227	976	660	571	507	480
Tangermünde	UH	378	348	311	268	240	212	195	189	171
	mDL	1032	724	589	509	433	364	321	284	247
	OH	1999	1739	1497	1272	907	614	543	512	481
Wittenberge	UH	489	446	407	343	283	243	228	214	198
	mDL	1254	891	722	612	532	462	413	360	302
	OH	2276	1952	1708	1538	1276	871	765	650	616
Neu Darchau	UH	481	430	401	325	276	224	202	195	190
	mDL	1294	961	777	647	547	469	415	355	288
	OH	2250	1930	1710	1540	1390	913	810	712	658

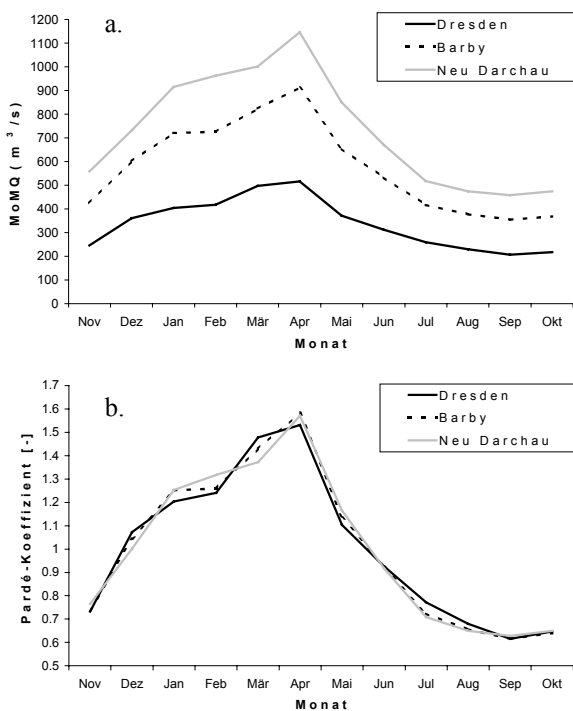
**Tab. III-1.6** Zusammenstellung der aus den mittleren Dauerlinien (mDL) und aus den oberen bzw. unteren Hüllkurven (OH bzw. UH) der täglichen Abflussreihen 1964-1995 der Elbe-Pegel ermittelbaren Überschreitungshäufigkeiten von x Tagen (x d), bezogen auf die Vegetationszeit. (1.4.-31.9., Werte in [m<sup>3</sup>/s]).

Pegel	Art DL	5 d	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d	60 d	70 d	80 d	90 d	100 d	110 d
Dresden	UH	351	285	253	225	201	188	172	158	137	131	124	120
	mDL	955	760	600	484	404	358	319	292	265	239	219	202
	OH	1740	1570	1280	1080	992	876	771	735	679	630	422	386
Torgau	UH	382	306	261	234	209	199	189	175	153	140	132	125
	mDL	1005	781	618	510	430	378	336	308	279	254	235	215
	OH	1676	1520	1290	1170	1060	938	830	797	744	701	512	433
Wittenberg	UH	359	286	255	240	215	201	191	170	157	147	138	131
	mDL	1090	826	645	522	446	392	351	322	294	271	250	227
	OH	2120	1920	1540	1310	1090	979	876	824	752	710	518	430
Aken	UH	448	354	305	284	265	246	230	219	201	183	166	157
	mDL	1221	971	776	640	538	487	435	397	366	333	305	281
	OH	2330	2050	1910	1540	1330	1150	1060	1000	902	814	629	521
Barby	UH	547	410	366	356	340	315	292	273	246	210	189	178
	mDL	1668	1256	965	810	691	620	561	504	466	424	386	359
	OH	2820	2441	2161	1940	1750	1479	1359	1273	1168	997	765	660
Tangermünde	UH	529	404	374	359	340	319	304	273	257	242	220	212
	mDL	1689	1352	987	827	690	619	567	522	477	437	396	364
	OH	2984	2406	1967	1810	1709	1573	1441	1307	1170	972	709	614
Wittenberge	UH	539	504	482	463	440	413	390	349	331	297	254	243
	mDL	1906	1573	1208	993	853	757	691	628	579	535	495	462
	OH	3110	2780	2138	2011	1910	1750	1665	1555	1474	1332	1024	871
Neu Darchau	UH	544	498	474	450	422	406	382	331	308	276	237	224
	mDL	1886	1561	1244	1053	920	820	736	665	603	551	505	469
	OH	3250	2942	2120	2000	1880	1750	1670	1560	1490	1430	1080	913

### III-1.6.3.3 Jahresgang mittlerer monatlicher Abflüsse (Abflussregime)

Besonders in bezug auf den Wasserhaushalt und auf die Ökologie der Auen kommt der jahreszeitlichen Entwicklung der Abflussverhältnisse große Bedeutung zu. Um diesbezüglich die grundlegende jahreszeitliche Entwicklung zu untersuchen, wurden aus den Reihen mittlerer monatlicher Abflusswerte MoMQ *mittlere Jahresgänge der MoMQ* für die Reihen 1964-1995 ermittelt (siehe Abb. III-1.22.a).

Um weiterhin die Charakteristiken der Regimes an den verschiedenen Pegeln untereinander, sowie gegenüber anderen Flussgebieten und gegenüber anderen Zeitabschnitten besser vergleichbar bzw. klassifizierbar zu machen, werden zudem die entsprechenden *Pardé-Koeffizienten* (= Mittel der MoMQ/ Mittel der MQ) dargestellt (siehe Abb. III-1.22.b).



**Abb. III-1.22** Mittlerer Jahresgang mittlerer monatlicher Abflüsse MoMQ (a.), sowie Jahresgang der Pardé-Koeffizienten (b.) für die Reihen 1964-1995 der Pegel Dresden, Barby und Neu Darchau.

Es handelt sich um *komplexe, pluvio-nivale Regimes*, deren typisches Kennzeichen das durch die nivale Komponente bedingte und in den Abbildungen deutlich erkennbare Maximum in den Monaten März/April ist. Dies ist in Abb. III-1.22 besonders deutlich für den Pegel Dresden zu erkennen. Bei den Pegeln Barby und Neu Darchau verschiebt sich das

Maximum mehr zum April. Insgesamt unterscheiden sich die Regimeverläufe der drei Pegel v.a. im Winter und Frühjahr. Im Januar/Februar sind die Pardé-Koeffizienten am Pegel Dresden deutlich geringer als am Pegel Neu Darchau, im März deutlich höher. Der Pegel Barby nimmt eine Übergangstellung ein. Neben Fließzeitunterschieden ist eine unterschiedliche nivale Dynamik als Ursache zu vermuten. Offenbar kam es in den kontinentalen und vor allem stärker durch Mittelgebirge geprägten südlichen Bereichen des Einzugsgebiets zu einer stärkeren winterlichen nivalen Retention. Gleichzeitig ist in diesem Gebiet insgesamt aber auch ein früher einsetzender Schneeschmelzeffekt annehmbar.

### III-1.6.3.4 Extremwertanalyse

Als Grundlage für eine Vielzahl weiterführender Untersuchungen und politischen oder ökonomischen Entscheidungsfindungen werden Angaben über maßgebende Abflussereignisse – vor allem Hochwasserereignisse – bzw. die dazugehörigen Wasserstände benötigt. Dies gilt einerseits für die Erforschung des Flusssystem, in dessen Wirkungsgefüge zahlreiche Prozesse gerade durch Hochwasser geprägt werden. Andererseits gilt dies für wasserwirtschaftliche Planungs- und Bemessungsaufgaben, besonders im Sinne des Hochwasserschutzes, da hierdurch die Wirtschaftlichkeit geplanter Maßnahmen bzw. das Risiko bei ihrem Versagen stark beeinflusst werden. Eine detailliertere Erörterung der Bedeutung der extremwertstatistischen Analyse ergibt sich analog zu der Ausführung am Anfang des Kapitels III-1.1.

Nach einer statistischen Analyse solcher Ereignisse (*Extremwertanalyse*) können für gegebene Wiederholungszeitspannen  $T$  oder Überschreitungswahrscheinlichkeiten  $(1/T)$  die zugehörigen Abflusswerte ermittelt werden bzw. umgekehrt können für interessierende Abflusswerte Wiederholungszeitspannen oder Überwahrscheinlichkeiten des Auftretens ermittelt werden.

Die Extremwertanalyse für Hochwasserkennwerte erfolgte hier anhand von *Jahresreihen 1964-1995*, d.h. es wurden - wie in Kapitel III-1.6.1 beschrieben - die Reihen der in Abständen von einem Jahr aufeinanderfolgenden Zeitabschnitte (Abflussjahr bzw. Vegetationszeit) mit jeweils nur einem Element pro Zeitabschnitt untersucht. Partiiellen Reihen wurden einer Empfehlung des DVWK (1999, S. 3) folgend nicht untersucht.

Da bei den Jahresreihen die Konsistenz der Stichprobenelemente eingehend untersucht wurde, bei der Parametrisierung die Unabhängigkeit der aufeinanderfolgenden Reihenwerte beachtet wurde und da die gewählten Reihen mit über 30 Jahren Länge eine ausreichende Länge haben und unter dieser Bedingung eine geeignete Repräsentativität für den Ist-Zustand besitzen, waren maßgebliche *Voraussetzungen* für die Erstellung einer Extremwertstatistik erfüllt (zum Vgl. DVWK 1999, S. 2-5). Legt man gemäß DVWK (1999, S. 12) einen Extrapolationszeitraum von bis zum etwa dreifachen der Länge der gemessenen 32-jährigen Reihe zugrunde, so war eine Extrapolation bis zum 100-jährlichen Ereignis möglich. Dabei muss allerdings vorausgesetzt werden, dass die Repräsentanz der Stichprobe auch im Wertebereich der extrapolierten Abflüsse gilt. Das ist z.B. nicht gewährleistet, wenn es oberhalb eines bestimmten Hochwasserabflusses zur Überströmung eines Deiches oder zur Öffnung der Wehre an der Havelmündung käme, die die Hochwasserspitze dämpfen würden.

Bei den *Jahresserien* ist zu beachten, dass sich das Ergebnis der statistischen Analyse ausschließlich auf Jahresmaxima bezieht. *Kleinere Hochwasser mit Wiederholungszeitspannen bis zu 5 Jahren sind häufiger zu erwarten.* In DVWK (1999, S. 3, 13) wird daher für die häufiger auftretenden Hochwasserscheitel ein Verfahren zur Korrektur der berechneten in die tatsächlich zu erwartenden Wiederholungszeitspannen beschrieben. So lässt sich die Wiederholungszeitspanne der Scheitelabflüsse von 2 Jahren zu einer von 1,45 Jahren korrigieren, die von 3 Jahren zu einer von 2,46 Jahren und die von 5 Jahren zu einer von 4,48 Jahren. Dies wird in Tab. III-1.7 berücksichtigt.

Nach der *Parametrisierung* (Kapitel III-1.6.2) lagen am Ende des Projekts folgende Jahresreihen an den Pegeln als Grundlage für die Erstellung von Extremwertstatistiken vor: HQ und VHQ, beide an allen deutschen Elbe-Pegeln, sowie HQ(x) an ausgewählten deutschen Elbe-Pegeln. VHQ(x) wurde bisher noch nicht ermittelt. Es stellte sich die *Aufgabe, aus diesen jährlichen Hochwasserkennwerten, die statistischen Hochwasserkennwerte HQ-T, VHQ-T und HQ(x)-T mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten bzw. statistischen Wiederkehrintervallen (Jährlichkeiten T, T = 2, 3, 5, 10, 20, 50, 100 Jahre) ihrer Überschreitung in einer statistischen Analyse zu*

*errechnen.* Wären die vorliegenden Reihen ausreichend lang, so könnte eine *Häufigkeitsverteilung* erstellt werden und interessierenden Abflusskennwerten eine Auftretenshäufigkeit bzw. ein statistisches Wiederkehrintervall zugeordnet werden. Im vorliegenden Fall mit den Reihen 1964-1995 sind – wie meist – jedoch die verfügbaren Reihenlängen kürzer als es zur Bestimmung von Abflusswerten interessierender (kleiner) Wahrscheinlichkeiten bzw. von Wahrscheinlichkeiten sehr großer Hochwasserabflüsse notwendig wäre. Die interessierenden Abflusswerte bzw. Wahrscheinlichkeiten sind daher – ggf. durch eine *Extrapolation* über die Beobachtungszeitspanne hinaus – aus der vorliegenden Stichprobe erwartungstreu, effizient und robust zu schätzen (zum Vgl. DVWK 1999, S. 6). Zu diesem Zweck sind *theoretische Verteilungsfunktionen an die Stichprobenelemente anzupassen.* Mit diesen können dann *Quantile* berechnet werden, die als diejenigen Ausprägungen der Zufallsvariablen (Abflusswert) definiert sind, die zu bestimmten Häufigkeits- bzw. Wahrscheinlichkeitsanteilen überschritten werden und damit das *statistische Wiederkehrintervall T* besitzen. Umgekehrt können aus den theoretischen Verteilungsfunktionen auch für vorgegebene Abflüsse die zugehörigen Überschreitungswahrscheinlichkeiten oder statistischen Wiederkehrintervalle ermittelt werden.

*Es ergeben sich v.a. die beiden Fragen (1.) der Wahl des Typs der theoretischen Verteilungsfunktion, sowie (2.) der optimalen Parameterbestimmung bei der Anpassung der angenommenen theoretischen Verteilungsfunktion an die Stichprobenelemente.* Hierzu ist anzumerken, dass es nicht möglich ist, eine hydrologische Zufallsvariable (mit unbekannter Grundgesamtheit) eindeutig einem Typ einer theoretischen Verteilungsfunktion zuzuordnen (STEDINGER ET AL. 1993, S. 18.2, DVWK 1999, S. 6, PLATE 1993, S. 125, 360). Daher ist die Frage der Wahl des Typs der theoretischen Verteilungsfunktion unter verschiedenen plausiblen Verteilungsfunktionen zu untersuchen. Anpassungstests, wie der – hier im Gegensatz zum Kapitel III-1.6.2.2.3 – als Einstichprobenproblem angewandte Test nach Kolmogoroff und Smirnov, sind nicht besonders trennscharf (DVWK 1999, S. 10). Zur Orientierung kann daher zunächst eine *graphische Auswertung* mit Hilfe von empirischen Wahrscheinlichkeiten entsprechenden ‚plotting positions‘ in einem geeigneten Wahrscheinlichkeitsnetz dienen (zum Vergleich s.u.).

Neben der Wahl der theoretischen Verteilungsfunktion ist die Art der Parameterbestimmung entscheidend für das Ergebnis der Analyse. Auch hier gibt es mehrere Methoden, von denen keine grundsätzlich vorgezogen werden kann. Es empfiehlt sich, die Parameter verschiedener annehmbarer Verteilungsfunktionen nach verschiedenen Schätzverfahren zu ermitteln und im Rahmen o.g. graphischer Auswertung zu vergleichen, wie gut die mit den Verteilungsfunktionen geschätzten Werte den gemessenen Daten bzw. empirischen Wahrscheinlichkeiten der plotting positions entsprechen. Besonders interessieren hierbei – z.B. im Sinne des Hochwasserschutzes – die Schätzungen im Bereich der kleinsten Wahrscheinlichkeiten bzw. größten Abflüsse, wo die Anpassungen der verschiedenen Verteilungsfunktionen wegen der geringen Zahl der Beobachtungswerte jedoch am stärksten differieren. Aufgrund der Messunsicherheiten und der starken Variabilität zwischen den Hochwasserereignissen in diesem Bereich ergeben sich oft Schwierigkeiten. Hier kann ein räumlicher Abgleich zwischen benachbarten Pegeln oder Pegelgruppen unter Berücksichtigung der Bewertungen nach der Konsistenzanalyse, sowie räumlicher Tendenzen in der Hochwassercharakteristik zu einer verbesserten Absicherung der – dann auch regionalisierbaren – Analyseergebnisse insgesamt führen. Die nach diesen Untersuchungen geeignetsten Verteilungsfunktionen und Parameterschätzverfahren sind zu wählen.

Für die Analysen der Reihen an den Elbe-Pegeln mit Hilfe des am ehemaligen Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IHW) der Universität Karlsruhe entwickelten Programmpakets zur ‚Analyse von hydrologischen/geophysikalischen Zeitreihen‘ (zum Vgl. IHRINGER 1999) wurden zunächst die plotting positions ermittelt, um die Wahl der geeigneten Verteilungsfunktionen zu unterstützen. Bei Annahme einer Beta-Verteilung für die Überschreitungswahrscheinlichkeit des Rangs  $i$  der der Größe nach sortierten unabhängigen Elemente der Stichprobe des Umfangs  $n=32$  lassen sich die *plotting positions nach Weibull* erwartungstreu für die Überschreitungswahrscheinlichkeit mit der Beziehung 12 schätzen.

$$q_i = i / (n+1) \quad (12)$$

Dieses Konzept wurde kritisiert, und es wurde alternativ vorgeschlagen plotting positions so zu

berechnen, dass mit ihnen annähernd erwartungstreu Schätzer der Quantile ermittelt werden (zum Vgl. STEDINGER 1993, S. 18.24 ff). Solche Berechnungsansätze hängen jedoch in ihrer Eignung von der anzunehmenden Verteilungsfunktion ab. Da davon auszugehen war, dass diese sich an den verschiedenen Elbe-Pegeln entsprechend räumlicher Tendenzen der Hochwassercharakteristik unterscheiden und damit die Vergleichbarkeit von Pegeln bei der o.g. graphischen Auswertung mit einem räumlichen Abgleich erschwert wird, wurde einheitlich an den objektiveren plotting positions nach Weibull festgehalten. Auch im Sinne der Objektivität wurden die plotting positions – zusammen mit den angepassten theoretischen Verteilungsfunktionen – in einem Wahrscheinlichkeitsnetz nach Gauß eingezeichnet, dessen Ordinate gemäß der Normalverteilung verzerrt ist.

*Folgende theoretische Verteilungen standen zur Verfügung:* Normalverteilung (N2), Exponential-Verteilung (E2), zwei- und dreiparametrische Log-Normalverteilung (LN2 bzw. LN3), (Log-) Gumbelverteilung (Gb bzw. LGb), (Log-) zweiparametrische Gammaverteilung (G2 bzw. LG2), (Log-) Pearson-3-Verteilung (P3 bzw. LP3), (Log-) zwei- und dreiparametrische Weibull-Verteilung (W2, LW2, W3 bzw. LW3). Auf höherparametrische Verteilungen (z.B. Wakeby-Verteilung) wurde verzichtet, um robuste Schätzungen zu gewährleisten.

Nachdem die Reihen im Rahmen des für die Analysen genutzten Programmpakets ‚Analyse von hydrologischen/geophysikalischen Zeitreihen‘ so linear transformiert wurden, dass der kleinste Wert zwischen 1 und 10 liegt, wurden bei der Anpassung von analytischen Verteilungsfunktionen, d.h. bei der Bestimmung ihrer Parameter, zwei Verfahren genutzt. Nach der (herkömmlichen) *Momentenmethode* wurden die statistischen Parameter des arithmetischen Mittels, der Varianz, der Schiefe und des Variationskoeffizienten errechnet und hieraus über theoretische Beziehungen die Parameter der anzupassenden theoretischen Verteilung hergeleitet. Bei der Parameterschätzung über die *Maximum-Likelihood-Methode* wurde angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der voneinander unabhängigen Stichprobenelemente  $x_i$  die größte der für eine gegebene Dichtefunktion  $f_x(x, a_j)$  möglichen ist. Die unbekannt Parameter  $a_j$  der Verteilungsfunktion wurden über Bestimmungsges-

gleichungen ermittelt, die aus den partiellen Ableitungen einer logarithmierten Likelihood-Funktion für die jeweilige Verteilungen hergeleitet werden können. Einen detaillierteren Überblick über die Eigenschaften der genannten Verteilungen und zu den Verfahren der Parameterschätzung geben beispielsweise DVWK (1999), PLATE (1993, S. 20, 125 ff, 266 ff und 360 ff) und STEDINGER (1993, S. 18.1 ff).

Bei der Auswertung der **HQ-Reihen 1964-1995** aller Elbe-Pegel wurden entsprechend der oben beschriebenen Methodik alle genannten theoretischen Verteilungsfunktionen sowohl nach der Momentenmethode als auch nach der Maximum-Likelihood-Methode angepasst und in einem Gauß'schen Wahrscheinlichkeitsnetz zusammen mit den plotting positions nach Weibull eingezeichnet. Die Auswahl der geeigneten Verteilungsfunktion im Rahmen dieser graphischen Auswertung gestaltete sich bei der pegelweisen Betrachtung als schwierig, da gerade im besonders interessierenden Extrembereich stärkere *Streuereffekte* der plotting positions festzustellen waren und da – auch nach der durchgeführten Konsistenzanalyse – von einer verbleibenden Messunsicherheit ausgegangen werden musste. Wie oben angesprochen, wurde daher ein *räumlicher Abgleich* unter Einbeziehung der Bewertung nach der Konsistenzanalyse und der (plausiblen) räumlichen Tendenzen der Hochwassercharakteristik durchgeführt. Der räumliche Abgleich erfolgte dabei wechselseitig mit der Entwicklung der hydrologischen Längsschnitte in Kapitel III-1.6.4. Teilweise konnten diese Analysen zum räumlichen Abgleich der Hochwasserstatistiken umgekehrt auch zur Konsistenzanalyse und Plausibilisierung der Abflusszeitreihen beitragen (zum Vgl. Kapitel III-1.4 und III-1.5).

Abb. III-1.23 zeigt die nach diesen Untersuchungen ausgewählten und angepassten theoretischen Verteilungsfunktionen zusammen mit den plotting positions im Wahrscheinlichkeitsnetz.

Bei den Pegeln Torgau und Neu Darchau treffen die angepassten theoretischen Verteilungsfunktionen den Verlauf der plotting positions im Bereich der größten Ereignisse weniger gut. Beim Pegel Torgau ist festzustellen, dass sein Einzugsgebiet gegenüber dem des verlässlicheren Leitpegels Dresden, bei dem die angepasste Verteilungsfunktion die plotting positions gut trifft, kaum größer ist und die Hochwasserscheitel dementsprechend ähnliche Werte

– wie in der ausgewählten Verteilungsfunktion – aufweisen sollten. Beim Leitpegel Neu Darchau werden die größten Werte durch die angepasste Verteilungsfunktion im Vergleich zu den Werten der plotting positions geringer eingeschätzt. Hierzu ist anzumerken, dass die gewählte zweiparametrische Gamma-Verteilungsfunktion in diesem extremen Bereich eine bessere Annäherung an die plotting positions erzielt als die nach der Teststatistik eines Kolmogoroff-Smirnov-Tests vorzuziehenden Verteilungsfunktionen und nahezu der Annäherung entspricht, die mit der weitaus flexibleren - aber weniger robusten - vierparametrischen Wakeby-Verteilungsfunktion erreicht werden kann. Mit verschiedenen Verteilungsfunktionen können bessere Annäherungen an die plotting positions im extremen Bereich erzielt werden, jedoch liegen die ermittelbaren Quantile der geringsten Überschreitungswahrscheinlichkeiten bei diesen bereits so hoch, dass sie im Hinblick auf die Einzugsgebietsdifferenzen und im Hinblick auf die besonderen Verhältnisse an der Havelmündung (Eindeichungen bzw. Rückstau in die Havel hinein) kaum gegenüber den oberliegenden Pegeln erklärt werden können.

Aus den ausgewählten und angepassten Verteilungsfunktionen ließen sich schließlich für alle untersuchten Elbe-Pegel *jährliche Scheitelabflusswerte der verschiedenen Jährlichkeiten als Quantile (HQ-T) berechnen*. Sie sind als Übersicht in der Tab. III-1.7 zusammengestellt. Eine Regionalisierung dieser statistischen Hochwasserkennwerte als hydrologische Längsschnitte der Elbe findet sich in Kapitel III-1.6.4.

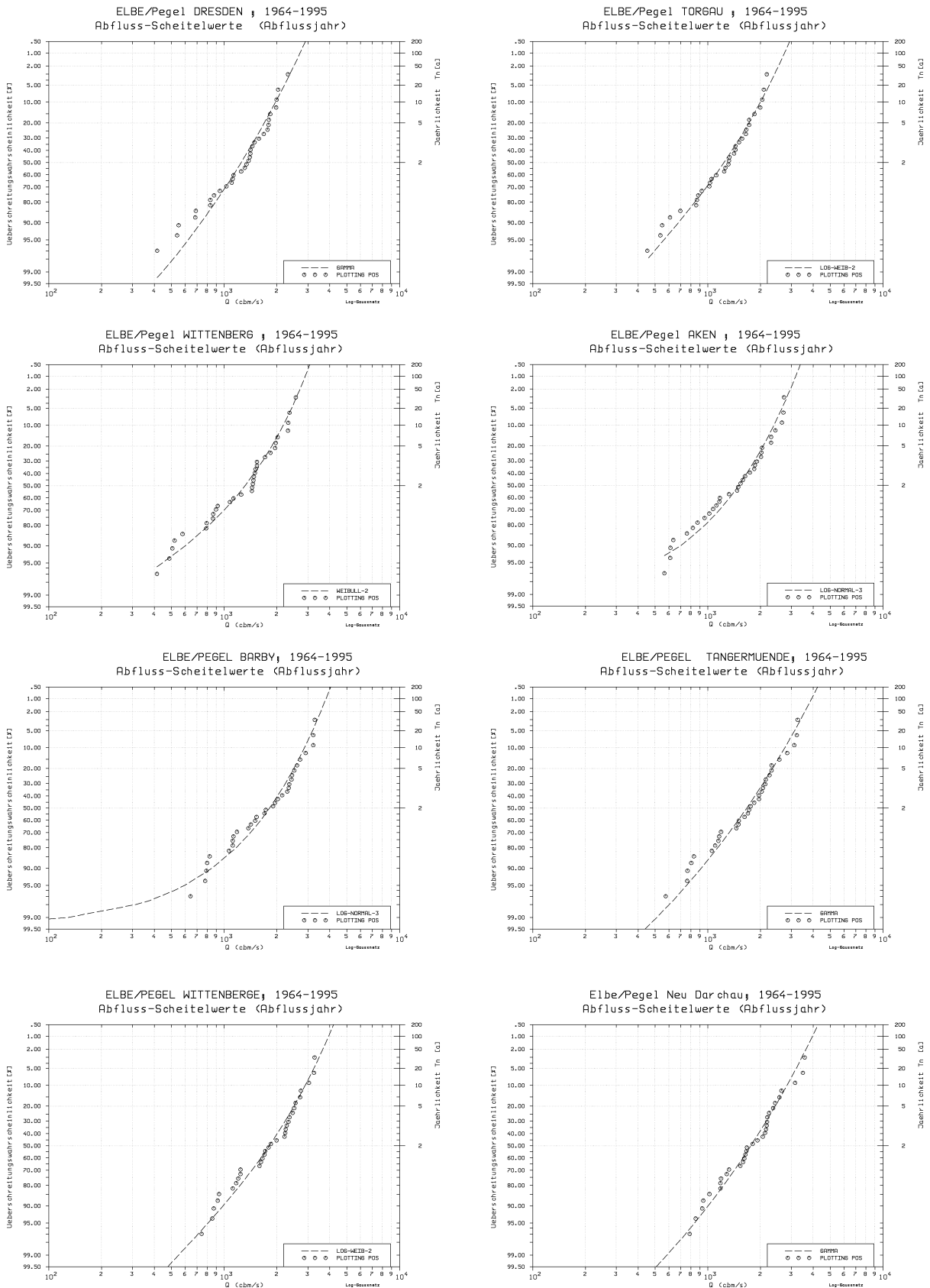


Abb. III-1.23 Plotting positions (nach Weibull) und ausgewählte angepasste theoretische Verteilungsfunktionen der Reihen HQ 1964-1995 der analysierten Elbe-Pegel (siehe auch *Anlagen-CD*).

**Tab. III-1.7** Mittlere Jahresscheitelabflüsse MHQ und Jahresscheitelabflüsse der Jährlichkeiten T (HQT), ermittelt für die HQ-Reihen 1964-1995 für verschiedene Elbe-Pegel. VF steht für die gewählte Verteilungsfunktion, AV für das Verfahren der Anpassung (-M: Momentenmethode, -ML: Maximum-Likelihood-Methode). Kürzel für die Verteilungsfunktionen: siehe Text.

Pegel	MHQ	VF-AV	HQ-2 *	HQ-3 *	HQ-5 *	HQ-10	HQ-20	HQ-50	HQ-100
Dresden	1311	G2-M	1251	1470	1695	1963	2204	2497	2706
Torgau	1290	LW2-M	1236	1471	1715	1995	2242	2534	2738
Wittenberg	1360	W2-M	1316	1595	1871	2172	2424	2710	2900
Aken	1528	LN3-M	1502	1789	2072	2386	2653	2964	3176
Barby	1845	LN3-M	1816	2160	2499	2873	3191	3558	3810
Tangermünde	1770	G2-M	1668	1998	2341	2754	3128	3586	3914
Wittenberge	1887	LW2-M	1812	2152	2502	2901	3248	3656	3939
Neu Darchau	1856	G2-M	1761	2088	2426	2830	3196	3641	3959

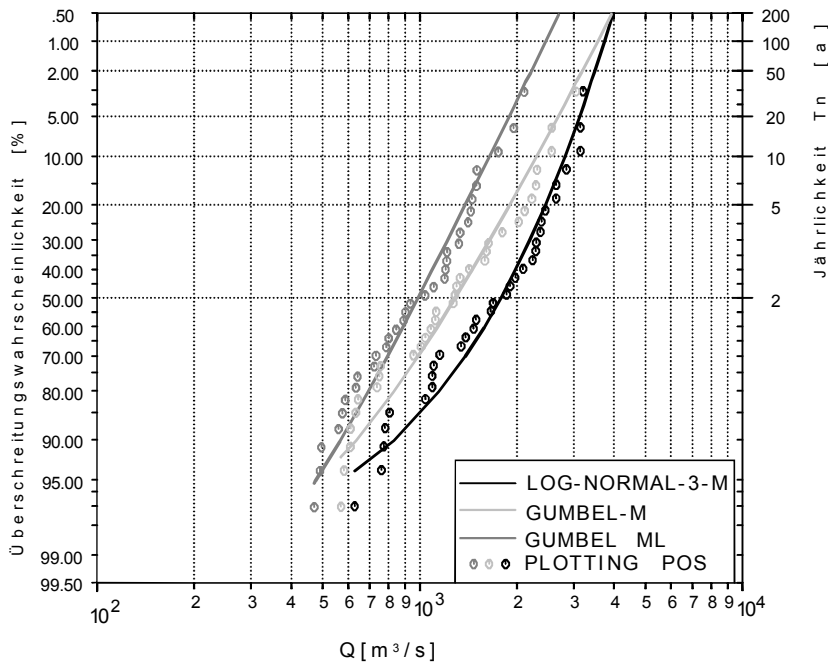
\* Die tatsächlichen Wiederholungszeitspannen ergeben sich bei den markierten Quantilen gemäß DVWK (1999, S. 3 und 13) nach den im Text beschriebenen Umrechnungen.

Die Darstellung bis hierhin bezog sich lediglich auf *Punktschätzungen* für die Quantile der jeweils ausgewählten und angepassten Verteilungsfunktionen. Darüber hinaus sind auch Vertrauensbereiche einer Quantilschätzung aus einer Verteilungsfunktion ermittelbar, wenn neben den obigen Schätzungen des Mittelwerts des Quantils HQ-T auch dessen Standardabweichung  $s(\text{HQ-T})$  geschätzt wird (zum Vgl. PLATE 1993, S. 371, 382 ff, 405, 417ff, sowie STEDINGER ET AL. 1993, S. 18.29-18.33).  $s(\text{HQ-T})$  kann gleichzeitig als Maß für die Genauigkeit der Quantilschätzung dienen. Es kann die Annahme getroffen werden, dass die Abweichungen vom Quantil-Mittel annähernd normalverteilt sind (zum Vergleich STEDINGER ET AL. 1993, S. 18.28). Damit können *Konfidenzintervalle* mit vorgebbaren Vertrauenswahrscheinlichkeiten (hier 95%) ermittelt werden.

Wie auch bei den anderen Pegeln ist dieses Konfidenzintervall z.B. beim Pegel Dresden sehr groß und beträgt beim HQ-2 etwa  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ , sowie beim HQ-100 etwa  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Beim Pegel Neu Darchau lassen sich entsprechend Konfidenzintervalle der Breite  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  für HQ-2 und mehr als  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  für den HQ-50 ermitteln. Diese Bereiche überschreiten deutlich den Bereich, der sich aus der Unsicherheit bei der Wahl der anzupassenden Verteilungsfunktion und des Anpassungsverfahrens ergibt. Da durch den räumlichen Abgleich der Ergebnisse eine Bestätigung der Punktschätzungen erfolgt, die Werte der Konfidenzintervallgrenze jedoch nicht plausibel sind, wurden die Angaben dieses Berichts auf die Ergebnisse der Punktschätzungen für die Quantile beschränkt.

In entsprechender Weise wurden die *VHQ-Reihen 1964-1995* ausgewertet.

Abb. III-1.24 enthält exemplarisch die ausgewählte und angepasste theoretische Verteilungsfunktion für den Pegel Barby. Es fällt auf, dass – wie auch an den anderen Elbe-Pegeln – die Unterschiede zu den jährlichen Scheitelwerten besonders bei den kleineren, häufigeren Scheitelwerten deutlicher ausgeprägt sind, bei den größeren, selteneren Scheitelwerten jedoch mit zunehmendem Niveau kleiner werden und beim 100-jährlichen Ereignissen schließlich kaum mehr erkennbar sind. Der Grund hierfür ist, dass insbesondere wegen der unterschiedlichen Gebietszustände im Winter und Sommer bzw. in der Ruhezeit und in der Vegetationszeit die jährlichen Scheitelabflüsse meistens deutlich größer als die der Vegetationszeit sind, jedoch die seltenen, größten Ereignisse vorzugsweise während der Schneeschmelze auftreten. Hiervon ist im April bzw. Ende März auch die Vegetationszeit betroffen, so dass ihre Werte in diesen Fällen denen der jährlichen Maxima entsprechen oder zumindest nahekommen. Durch den unterschiedlichen Verlauf der Verteilungsfunktionen des Abflussjahres und der Vegetationszeit in diesem durch Messwerte belegten Bereich nimmt ihr Unterschied im Extrapolationsbereich weiter ab (zum Vgl. siehe Abb. III-1.24). Aus diesem Grund wurden für den VHQ-100 keine Werte ermittelt. Näherungsweise kann stattdessen der HQ-100 angesetzt werden.



**Abb. III-1.24** Plotting positions (nach Weibull) und ausgewählte angepasste theoretische Verteilungsfunktionen der Reihen HQ 1964-1995 (schwarz), VHQ 1964 – 1995 (hellgrau) und HQ(20) 1964-1995 (dunkelgrau) des Pegels Barby; Verteilungsfunktionen weiterer Parameter und Pegel: siehe *Anlagen-CD*.

Tab. III-1.8 enthält als Übersicht für alle VHQ-Reihen 1964-1995 der Elbe Pegel die aus den jeweils ausgewählten und angepassten Verteilungsfunktionen als Quantile (VHQ-T) berechneten Scheitelabflusswerte der verschiedenen Jährlichkeiten. Eine Regionalisierung dieser statistischen Hochwasserkennwerte als hydrologische Längsschnitte der Elbe findet sich in Kapitel III-1.6.4.

Für den **Kennwert HQ(x)** wurden im Laufe des Projekts weiterhin die Reihen HQ(x), x = 10 , 20 , 30 , 50 Tage der Pegel Dresden, Torgau, Wittenberg, Aken und Barby Analysen nach oben beschriebener Methodik unterzogen. Der räumliche Abgleich bei den Analysen dieser Kennwerte berücksichtigte dabei nicht nur die räumlichen Tendenzen der einzelnen statistischen Kennwerte HQ(x)-T mit bestimmter Dauer x, sondern auch die räumlichen Tendenzen der Hochwassercharakteristiken der Pe-

gel, d.h. die räumlichen Tendenzen der pegelweisen Verhältnisse zwischen den HQ(x)-T mit unterschiedlichen Dauern x.

Abb. III-1.24 enthält exemplarisch die ausgewählte und an die Reihenelemente des Abflusskennwerts HQ(20) angepasste theoretische Verteilungsfunktion für den Pegel Barby. Die Tabellen III-1.9.a.-d. enthalten als Übersichten für alle HQ(x)-Reihen 1964-1995 der genannten Elbe-Pegel die aus den jeweils ausgewählten und angepassten Verteilungsfunktionen als Quantile (HQ(x)-T) berechneten Werte der verschiedener Jährlichkeiten T.

Eine Regionalisierung dieser statistischen Hochwasserkennwerte als hydrologische Längsschnitte der Elbe zwischen Dresden und Barby findet sich in Kapitel III-1.6.4.

**Tab. III-1.8** Mittlere Scheitelabflüsse MVHQ und Scheitelabflüsse der Jährlichkeiten T (VHQT) der Vegetationszeiten, ermittelt für die VHQ-Reihen 1964-1995 für verschiedene Elbe-Pegel. VF steht für die gewählte Verteilungsfunktion, AV für das Verfahren der Anpassung (-M: Momentenmethode, -ML: Maximum-Likelihood-Methode). Kürzel für die Verteilungsfunktionen: siehe Text.

Pegel	MVHQ	VF-AV	VHQ-2	VHQ-3	VHQ-5	VHQ-10	VHQ-20	VHQ-50
Dresden	1080	W3 – ML	966	1205	1473	1801	2100	2468
Torgau	1074	W3 – ML	964	1195	1455	1771	2061	2416
Wittenberg	1110	Gb – ML	1003	1243	1511	1848	2171	2590
Aken	1215	LW2 – ML	1098	1376	1686	2069	2427	2879
Barby	1469	Gb – M	1350	1653	1990	2413	2819	3344
Tangermünde	1434	W3 – ML	1284	1595	1942	2366	2755	3232
Wittenberge	1543	LW2 – M	1445	1760	2095	2492	2848	3280
Neu Darchau	1525	LW3 – ML	1389	1684	2018	2438	2839	3356



**Tab. III-1.9** Mittelwerte  $MHQ(x)$  und Werte der Jährlichkeiten  $T$  ( $HQ(x)-T$ ) der maximalen  $x$ -tägig kontinuierlich überschrittenen Abflusswerte der Abflussjahre, ermittelt für die 1964-1995 für verschiedene Elbe-Pegel. VF steht für die gewählte Verteilungsfunktion, AV für das Verfahren der Anpassung (-M: Momentenmethode, -ML: Maximum-Likelihood-Methode). Kürzel für die Verteilungsfunktionen: siehe Text. **a.**  $x = 10$  Tage ; **b.**  $x = 20$  Tage ; **c.**  $x = 30$  Tage ; **d.**  $x = 50$  Tage.

**a. ( $x = 10$  Tage)**

Pegel	MHQ(10)	VF-AV	HQ(10)-2	HQ(10)-3	HQ(10)-5	HQ(10)-10	HQ(10)-20	HQ(10)-50	HQ(10)-100
Dresden	779	P3-ML	701	855	1024	1236	1437	1689	1873
Torgau	797	LW3-M	730	888	1064	1285	1493	1760	1957
Wittenberg	858	LW2-M	789	970	1168	1410	1634	1913	2116
Aken	1026	LN2-M	944	1126	1332	1594	1850	2187	2444
Barby	1357	Gb-M	1264	1501	1764	2095	2412	2823	3131

**b. ( $x = 20$  Tage)**

Pegel	MHQ(20)	VF-AV	HQ(20)-2	HQ(20)-3	HQ(20)-5	HQ(20)-10	HQ(20)-20	HQ(20)-50	HQ(20)-100
Dresden	608	LW2-M	560	679	810	970	1118	1303	1437
Torgau	634	LN2-M	583	694	821	982	1138	1344	1501
Wittenberg	669	LW2-M	617	754	905	1091	1263	1480	1639
Aken	813	Gb-M	759	895	1046	1236	1418	1653	1830
Barby	1071	Gb-ML	994	1183	1393	1656	1909	2237	2482

**c. ( $x = 30$  Tage)**

Pegel	MHQ(30)	VF-AV	HQ(30)-2	HQ(30)-3	HQ(30)-5	HQ(30)-10	HQ(30)-20	HQ(30)-50	HQ(30)-100
Dresden	490	LN3-M	477	556	634	720	793	877	934
Torgau	508	LN3-M	501	582	662	751	826	913	973
Wittenberg	542	LN3-M	533	626	718	820	907	1008	1077
Aken	665	N2-M	665	771	873	981	1071	1172	1239
Barby	861	LW2-ML	824	972	1126	1304	1460	1646	1776

**d. ( $x = 50$  Tage)**

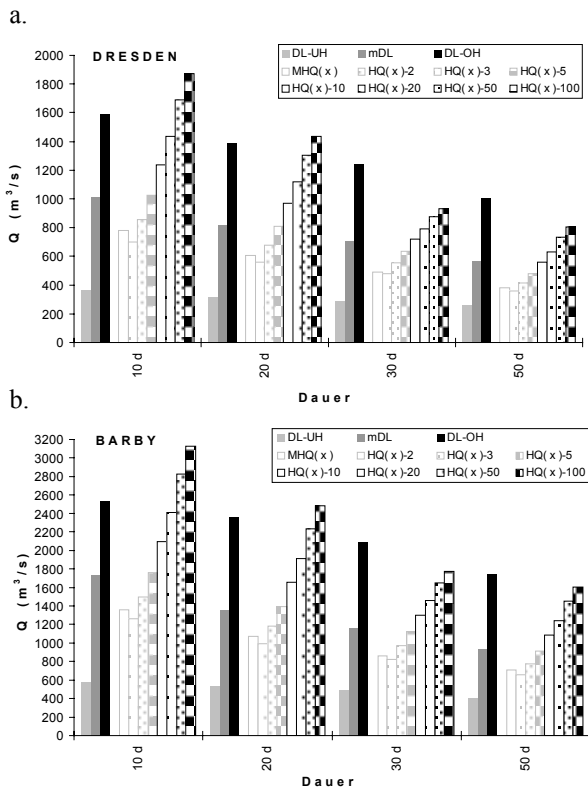
Pegel	MHQ(50)	VF-AV	HQ(50)-2	HQ(50)-3	HQ(50)-5	HQ(50)-10	HQ(50)-20	HQ(50)-50	HQ(50)-100
Dresden	382	Gb-ML	361	417	479	558	633	731	804
Torgau	408	Gb-ML	385	445	512	596	676	780	858
Wittenberg	442	LW3-M	410	483	566	670	769	897	992
Aken	547	LW3-M	513	600	697	816	928	1070	1174
Barby	710	LW3-ML	658	777	912	1081	1242	1450	1605

### Diskussion der Relevanz verschiedener statistischer Abflusskennwerte aus hydrologischer Sicht

In Kapitel III-1.6.3.2 wurde bereits kritisch bemerkt, dass die für weitergehende – v.a. geobotanische – Untersuchungen häufig genutzten Dauerlinien-Quantile mit ihrer mittelnden Aussage bei zwischen-jährlichen Unterschieden der Überschreitungshäufigkeiten und bei innerjährlichen Unterschieden im zeitlichen Verlauf der Überschreitungen einer bestimmten Gesamtdauer wichtige Eigenschaften der Abflussdynamik nicht berücksichtigen. Durch den Kennwert  $HQ(x)-T$  (bzw. auch  $VHQ(x)-T$ ) wird dies bezüglich (besonders relevanter) *kontinuierlicher* Überschreitungen differenzierter erfasst. Anhand der auf das Abflussjahr bezogenen  $x$ -tägigen Überschreitung von Abflusswerten werden in den Abbildungen III-1.25.a und III-1.25.b Ausprägungen

der verschiedenen Kennwerte exemplarisch für die Pegel Dresden und Barby verdeutlicht.

Beim Pegel Barby ist erkennbar, dass in den meisten Jahren die Abflusswerte mit  $x$ -tägiger kontinuierlicher Überschreitung deutlich kleiner sind als die Quantile der mittleren Dauerlinie mit  $x$ -tägiger jährlicher Gesamtüberschreitungsdauer. Erst bei etwa dem 5-jährlichen Ereignis  $HQ(x)-5$  entsprechen sich diese statistischen Kennwerte, und nur bei noch selteneren Ereignissen  $HQ(x)-T$  werden diese größer als die Quantile der mittleren Dauerlinie. Die Quantile  $x$ -tägiger Überschreitung pro Jahr der oberen Hüllkurve der jährlichen Dauerlinien entsprechen sehr seltenen Ereignissen der  $HQ(x)-T$ : bei  $x = 10$  Tagen dem 20-50-jährlichen, bei  $x = 20$  Tagen dem 50-100-jährlichen, bei  $x = 30$  und 50 Tagen dem >100-jährlichen Ereignis.



**Abb. III-1.25** Zusammenstellung der Quantile (10-, 20-, 30- und 50-tägige Überschreitung) der mittleren Dauerlinien (mDL) und der oberen und unteren Hüllkurven (DL-UH, DL-OH) der jahresweisen Dauerlinien der Reihen 1964-1995 der Pegel Dresden und Barby gegenüber den statistischen Hochwasserkennwerten  $HQ(x)-T$  mit verschiedenen kontinuierlichen Überschreitungsdauern  $x$  ( $x=10, 20, 30, 50$  Tage) und verschiedenen statistischen Wiederkehrintervallen  $T$  ( $T=2, 3, 5, 10, 20, 50, 100$  Jahre).

Beim Pegel Dresden entsprechen bei 10- und 20-tägiger Überschreitungsdauer ebenfalls die Quantile der jährlichen Gesamtüberschreitungsdauer der mittleren Dauerlinie etwa dem 5-jährlichen Ereignis  $HQ(x)-5$ , bei 30- und 50-tägiger Überschreitungsdauer etwa dem 10-jährlichen Ereignis  $HQ(x)-10$ .

Aus hydrologischer ist für weitergehende – z. B. auenökologische – Untersuchungen auf Basis der angesprochenen statistischen Abflusskennwerte über die Verwendung der Dauerlinien-Quantile hinaus die zeitlich differenziertere Berücksichtigung der besonders relevanten kontinuierlichen Überschreitungen in Form der Kennwerte  $HQ(x)-T$  (bzw. auch  $VHQ(x)-T$ ) anzuraten.

### III-1.6.4 Regionalisierung der statistischen Abflusskennwerte - Erstellung hydrologischer Längsschnitte

Um Aussagen zur Abflussdynamik nicht nur für die Bereiche der einzelnen Pegel machen zu können, sondern auch für beliebige Stellen entlang der Elbe, wurden verschiedene statistische Abflusskennwerte als hydrologische Längsschnitte entlang der deutschen Gewässerstrecke der Elbe regionalisiert. Zudem wurden dadurch räumliche Entwicklungstendenzen des Abflussgeschehens deutlich, sowie die Auswirkungen von veränderten Abflusssituationen entlang der Elbe. Ferner wurde im Laufe der Entwicklung der (plausiblen) Längsschnitte der statistischen Hochwasserkennwerte – wie bereits in den Kapiteln III-1.4, III-1.5 und III-1.6.3 angesprochen – die Konsistenzanalyse und begründete Plausibilisierung der Abflussreihen, sowie die Auswahl geeigneter Verteilungsfunktionen für die pegelweisen Hochwasserstatistiken unterstützt.

Die Längsschnitte wurden auf Grundlage von linearen Regressionsbeziehungen ermittelt. Der zu erklärende Regressand war dabei jeweils der logarithmierte statistische Abflusskennwert  $\log(QPAR)$  an den Pegeln. Als erklärende Regressoren war es ausreichend, die zu den jeweiligen Pegeln gehörigen logarithmierten Einzugsgebietsflächen  $\log(EZGF)$  und logarithmierten Fließlängen der Elbe  $\log(FL)$  in Betracht zu ziehen. Dabei wurde die Fließlänge nicht auf den Ausgangspunkt der deutsch-tschechischen Grenze, sondern auf deutlich oberhalb liegende Punkte bezogen. Zum Beispiel konnte die Quelle der Elbe gewählt werden. Die Einbeziehung der Fließlänge ist für Hochwasserkennwerte erforderlich, um Abflachungseffekte ablaufender Hochwasserwellen zu berücksichtigen. Optional wurde zwischen hinreichender Einfachregression und signifikant notwendiger Zweifachregression gewählt. Diese sind mit den Residuen  $e_i$  und der Anzahl  $k$  der Regressionskoeffizienten wie folgt zu formulieren:

Zweifachregression ( $k = 3$ ):

$$\log(QPAR_i) = \beta_1 + \beta_2 \cdot \log(EZGF_i) + \beta_3 \cdot \log(FL_i) + e_i \quad (13)$$

Einfachregression ( $k = 2$ ):

$$\log(QPAR_i) = \beta_1 + \beta_2 \cdot \log(EZGF_i) + e_i \quad (14)$$

oder

$$\log(QPAR_i) = \beta_1 + \beta_2 \cdot \log(FL_i) + e_i \quad (15)$$

Die Anpassung der Regressionsgleichung, d.h. die Ermittlung der Schätzwerte für die Regressionskoeffizienten  $b_1$ ,  $b_2$  und  $b_3$  wurde analog zu der linearen Trendanalyse (siehe Kapitel III-1.6.2.1.2) durch Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Detailliertere Schilderungen der Methodik der multiplen Regression finden sich beispielsweise in HOLDER (1985, S. 32 ff.) und HARTUNG ET AL. (1991, S. 595 ff). Für die zu treffende Auswahl zwischen den Ansätzen der (ausreichenden) Einfach- und der (signifikant notwendigen) Zweifachregression wurde ein *objektives Konzept* entwickelt. Dieses geht davon aus, dass die Annahmen des Modells der Normal-Regression, insbesondere bezüglich der Residuen (Erwartungswert null, Homoskedastizität, Unabhängigkeit, Normalverteilung), zumindest annähernd erfüllt sind. Entsprechende Residuenanalysen zur Überprüfung während der Längsschnittentwicklung wurden durchgeführt. Durch Anwendung des Modells der Normal-Regression lassen sich die Schätzer  $b_1$ ,  $b_2$  und  $b_3$  der obigen Regressionsgleichungen, sowie Schätzer für deren Varianz  $s_{b_1}$ ,  $s_{b_2}$  und  $s_{b_3}$  bestimmen. Mit diesen Größen konnte dann im Rahmen des Modells der Regression u.a. ein *Signifikanztest für die Regressionskoeffizienten  $b_2$  und  $b_3$  (Steigungsparameter)* durchgeführt werden: wiewich der Steigungsparameter (hier exemplarisch  $b_2$ , bei einem Stichprobenumfang  $n$ ) signifikant von null ab, so war von einer signifikanten Abhängigkeit vom entsprechenden Regressor auszugehen.  $\beta_0$  bezeichne dabei einen durch eine Nullhypothese vorgegebenen Wert,  $\alpha$  das Signifikanzniveau und  $t_{v,\alpha}$  Quantile der  $t_v$ -Verteilung mit  $v$  Freiheitsgraden. Bei zweiseitiger Fragestellung lauten die Hypothesen (Null- und Alternativhypothese):

$$H_0: \beta_2 = \beta_0 \quad H_1: \beta_2 \neq \beta_0$$

$H_0$  ist beim Signifikanzniveau  $\alpha$  zu verwerfen, wenn für die  $t$ -verteilte Größe  $t_{b_2}$  gilt:

$$t_{b_2} = \frac{|b_2 - \beta_0|}{s_{b_2}} > t_{n-k,1-\alpha} \quad (16)$$

Insbesondere interessierte hier die Hypothese  $H_0: \beta_2 = 0$ . War sie zu verwerfen, so war von einer signifikanten (Signifikanzniveau  $\alpha=0.2$ ; zweiseitige Fragestellung) Abhängigkeit vom Regressor auszugehen. Galt dies bei der Zweifachregression für beide Regressoren, so war sie als signifikant notwendig anzusehen.

Desweiteren konnte eine Aussage über das *korrigierte Bestimmtheitsmaß* erzielt werden. Dieses ist herleitbar aus dem Bestimmtheitsmaß, das den Anteil der durch das Modell erklärten Varianz an der Gesamtvarianz angibt, dabei aber bei einer multiplen Regression den Nachteil hat, dass es durch Hinzufügung weiterer Regressoren nicht kleiner werden kann. Damit ist es auch ohne Modellverbesserung durch die Einbeziehung weiterer Regressoren erhöhbar. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß gleicht diesen Einfluss des zusätzlichen Regressors aus. Es lässt sich aus dem Bestimmtheitsmaß nach folgender Formel berechnen:

$$R_k^2 = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{n}{n - k} \quad (17)$$

Man erkennt, dass ein einfacherer Ansatz (z.B. Einfachregression) ein höheres korrigiertes Bestimmtheitsmaß erreichen kann als ein komplexerer (z.B. Zweifachregression), besonders bei kleineren Stichprobenumfängen  $n$ , wie im vorliegenden Fall. Der einfache Ansatz ist dann dem komplexeren vorzuziehen.

Für die *objektive Auswahl* zwischen ausreichender Einfachregressionen und signifikant notwendiger Zweifachregression wurde als Kriterium festgesetzt, dass eine Zweifachregression dann angenommen wurde, wenn entweder ihr korrigiertes Bestimmtheitsmaß größer als die der Einfachregressionen war oder beide Regressionskoeffizienten (Steigungsparameter) der Zweifachregression bei o.g. Signifikanzniveau signifikant von null abwichen. War dies nicht der Fall, so wurde die geeignete Einfachregressionsbeziehung anhand des höheren korrigierten Bestimmtheitsmaßes und der deutlicher signifikanten Abweichung des Steigungsparameters von null ausgewählt. In den meisten Fällen konnten durch Anwendung dieses objektiven Konzepts Regressionsgleichungen mit sehr guten Anpassungen erreicht werden.

Allerdings war hierzu die *Einteilung der Elbe-Pegel in zwei Gruppen* erforderlich, auf die jeweils separat oben beschriebene Regressionsanalysen anzuwenden waren. Bei ihrer Anwendung auf die Gesamtheit der Elbe-Pegel ergaben sich bei den verschiedenen Kennwerten mehr oder weniger starke unerwünschte Streuungen. Diese resultierten aus den unterschiedlichen hydrologisch relevanten landschaftlichen und

klimatologischen Eigenschaften der Teileinzugsgebiete zwischen Mittelgebirgsregionen und pleistozänem Tiefland, sowie aus den besonderen Verhältnissen an der Havelmündung bei Hochwasser (Rückstau nach Wehrabschluss). Diese Streuungen ließen sich erheblich reduzieren durch die Einteilung der Elbe-Pegel in die Pegelgruppen Dresden bis Barby einerseits und Barby bis Neu Darchau andererseits.

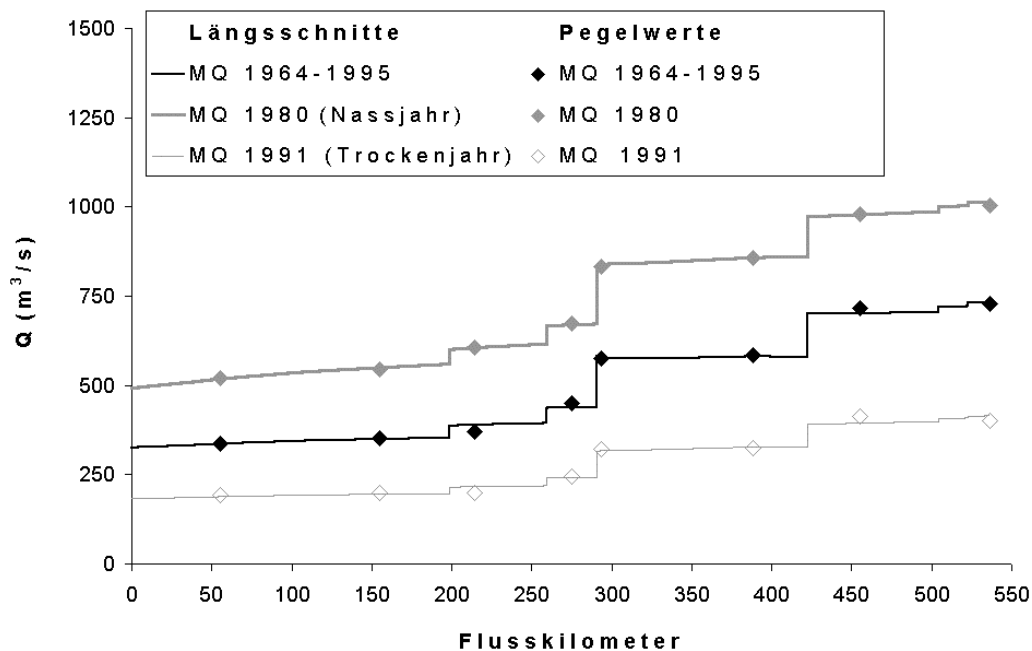
Die hiernach erreichbaren Anpassungen waren bereits so gut, dass durch die *Hinzuziehung weiterer Regressorvariablen* (z.B. Indizes der Gefällsverhältnisse oder der Flächennutzung) *keine weitere Verbesserung zu erwarten ist*.

Nach der Auswahl und der Anpassung der Regressionsgleichungen konnten mit diesen, sowie mit einer Flächenfunktion der Einzugsgebietsgröße in Abhängigkeit von der Fließlänge und mit der Fließlänge selbst nun die *statistischen Abflusskennwerte der Pegel auf den gesamten deutschen Gewässerlauf (bis zum Pegel Neu Darchau) übertragen* werden. Die Flächenfunktion wurde dabei aus Literaturangaben zu Pegel- und Nebenfluss-Einzugsgebieten (siehe LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG 1996 und LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT 1997 mit den Gewässerkundliche Jahr-

büchern 1993 Elbegebiet Teile I und II, IKSE 1996a, BFG 1993) und linearen Interpolationen konstruiert.

Nach der beschriebenen Vorgehensweise wurden **Längsschnitte für die folgenden statistischen Abflusskennwerte** erstellt, die aus den Reihen 1964-1995 ermittelt wurden.

- MQ der Reihe 1964-1995 und MQ-Werte aus einem Nassjahr und einem Trockenjahr für die gesamte Elbe im deutschen Bereich (deutsche-tschechische Grenze bis Neu Darchau) (siehe Abb. III-1.26).
- Dezile der mittleren Dauerlinien der Abflussjahre und Vegetationszeiten 1964-1995 für die gesamte Elbe im deutschen Bereich (siehe Abb. III-1.27 und Abb. III-1.28).
- MHQ, HQT, MVHQ, VHQT (T = 2, 3, 5, 10, 20, 50, 100 Jahre) der Reihen 1964-1995 für die gesamte Elbe im deutschen Bereich (siehe Abb. III-1.29 und Abb. III-1.30).
- MHQ(x) und HQ(x)-T (T = 2, 3, 5, 10, 20, 50, 100 Jahre / x = 10, 20, 30, 50 Tage) der Reihen 1964-1995 für den Bereich zwischen der deutsch-tschechischen Grenze und dem Pegel Barby (siehe Abb. III-1.31, exemplarisch für den Kennwert HQ(20)).



**Abb. III-1.26** Hydrologische Längsschnitte der Elbe mit Ergebnissen pegelweiser Analysen für die MQ der Reihe 1964-1995, sowie für die MQ eines Nass- und eines Trockenjahres.

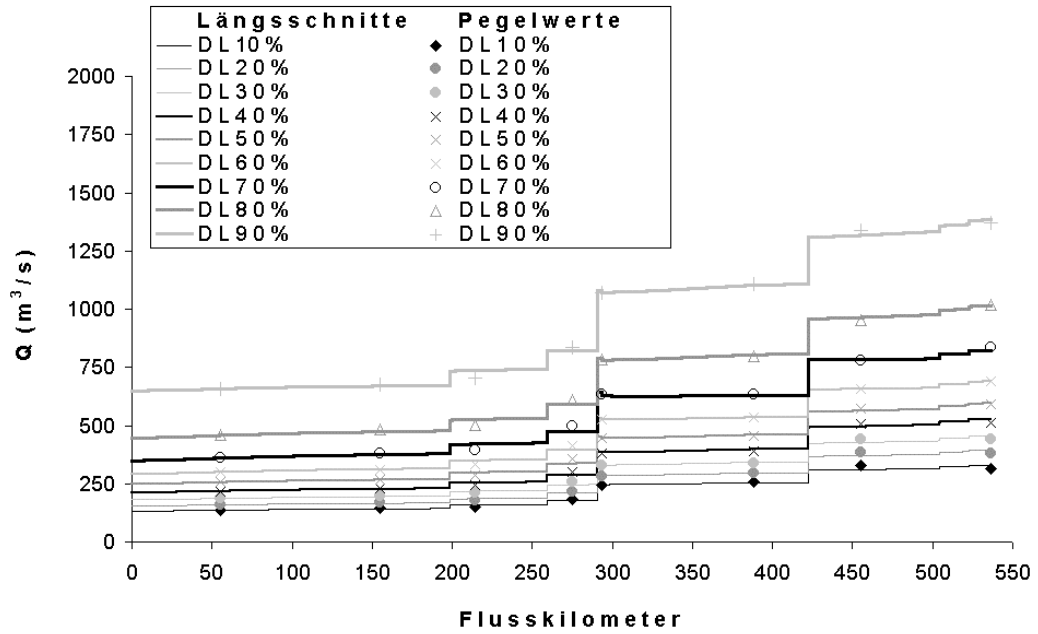


Abb. III-1.27 Hydrologische Längsschnitte der Elbe mit Ergebnissen pegelweiser Analysen für die Dezile der auf das Abflussjahr bezogenen mittleren Dauerlinie der Reihen 1964-1995 (siehe auch *Anlagen-CD*).

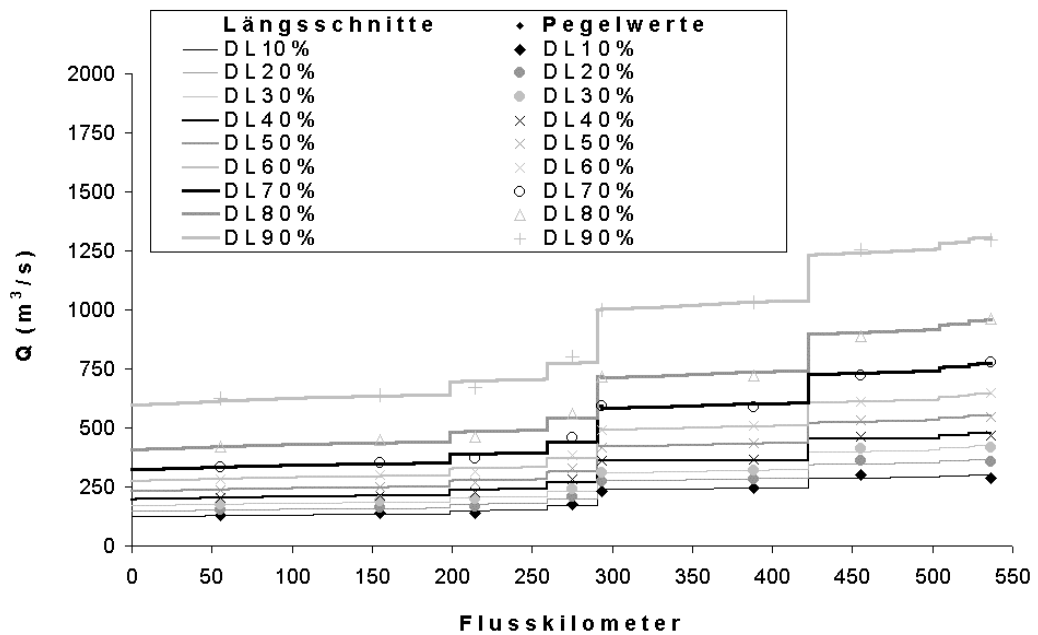


Abb. III-1.28 Hydrologische Längsschnitte der Elbe mit Ergebnissen pegelweiser Analysen für die Dezile der auf die Vegetationszeit bezogenen mittleren Dauerlinie der Reihen 1964-1995.

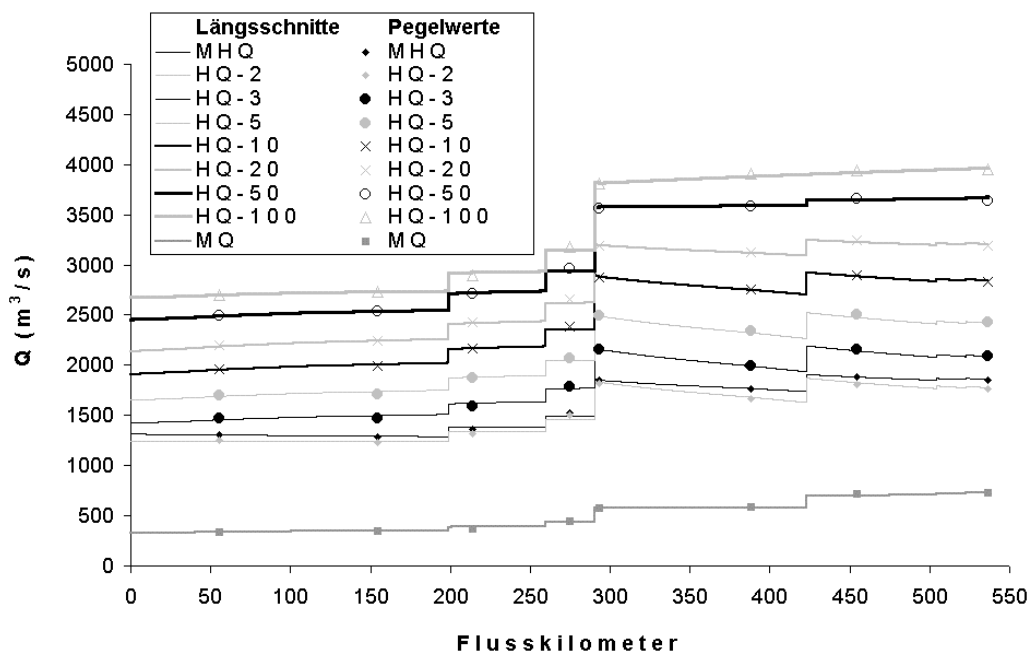


Abb. III-1.29 Hydrologische Längsschnitte der Elbe mit Ergebnissen pegelweiser Analysen für die statistischen Hochwasserkennwerte MHQ und HQ-T ( $T = 2, 3, 5, 10, 20, 50, 100$  Jahre) der Reihe 1964-1995. Als Referenz: Längsschnitt und Pegelstatistiken der MQ 1964-1995 (siehe auch *Anlagen-CD*).

zu Abb. III-1.30:

Beim VHQ-50 bereitete die Längsschnittentwicklung im Bereich zwischen Barby und Neu Darchau nach dem beschriebenen objektiven Konzept Schwierigkeiten: es ergab sich bei der nach dem höchsten korrigierten Bestimmtheitsmaß ausgewählten Ansatz der Einfachregression mit der Einzugsgebietsfläche als Regressor im Vergleich zum HQ-20-Längsschnitt, der etwa auf dem gleichen Niveau liegt, kein plausibler Verlauf mit einem negativen Sprung am Pegel Barby und einem nahezu fehlenden Sprung an der Havelmündung. Andererseits war festzustellen, dass bei dem genannten Einfachregressionsansatz das korrigierte Bestimmtheitsmaß mit  $-0,81$  sehr gering ist und dass der Steigungsparameter nicht signifikant von null abweicht. Ferner konnte beim Zweifachregressionsansatz ein wesentlich höheres (unkorrigiertes) Bestimmtheitsmaß festgestellt werden, sowie ein ermittelbarer Längsschnittverlauf, der dem des HQ-20-Längsschnitts ähnelt. Es wurde daher aus Plausibilitätsgründen in diesem Ausnahmefall von dem objektiven Konzept abgewichen und aus den genannten Gründen der Zweifachregressionsansatz gewählt.

zu Abb. III-1.31:

Für die MHQ(x) und HQ(x)-T ( $T = 2, 3, 5, 10, 20, 50, 100$  Jahre /  $x = 10, 20, 30, 50$  Tage) der Reihen 1964-1995 wurden Längsschnitte nur für den Bereich Dresden-Barby entwickelt (siehe Abb. III-1.31, exemplarisch für den Kennwert HQ(20)-T). Die entwickelten Längsschnitte zeigen, dass auch dieser Kennwert - wie auch die anderen statistischen Abflusskennwerte - für eine Regionalisierung geeignet sind.

### Fazit zur Längsschnittentwicklung

Anhand dieser Längsschnitte lässt sich die *räumliche Entwicklung der Gesamtsituation des Abflusses bzw. der Hochwasserverhältnisse entlang des deutschen Teils des Gewässerlaufs der Elbe* wie in den folgenden Punkten charakterisieren.

Dieses Gesamtbild kann für den *Ist-Zustand* als plausibel gelten.

- Bei den MQ und den Dezilen der Dauerlinie nehmen die Abflüsse mit zunehmendem Einzugsgebiet zu, so dass sich an den Nebenfluss-einmündungen sprunghafte Anstiege ergeben. Diese Zunahme steigt mit zunehmendem Abflussniveau.

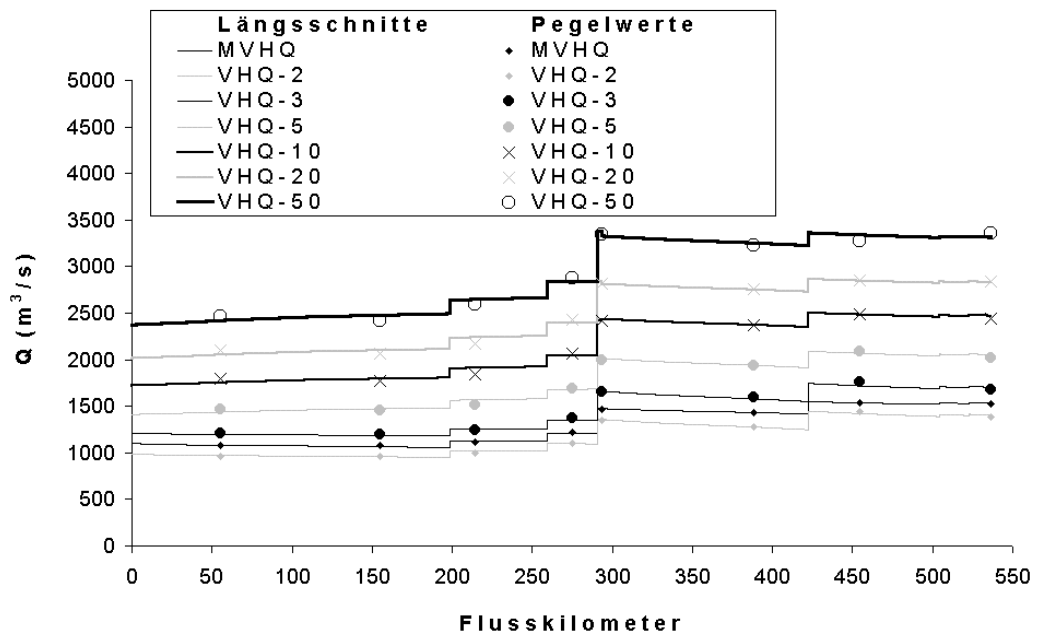


Abb. III-1.30 Hydrologische Längsschnitte der Elbe mit Ergebnissen pegelweiser Analysen für die statistischen Hochwasserkennwerte bezogen auf die Vegetationszeit MVHQ und VHQ-T (T = 2, 3, 5, 10, 20, 50, 100 Jahre) der Reihe 1964-1995.

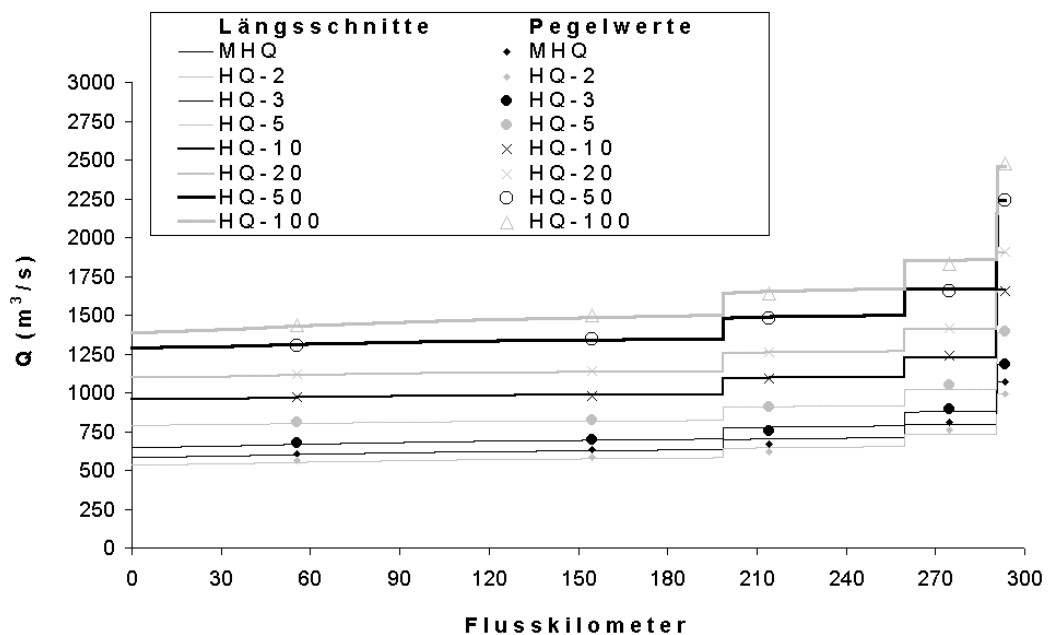


Abb. III-1.31 Hydrologische Längsschnitte der Elbe mit Ergebnissen pegelweiser Analysen für die statistischen Hochwasserkennwerte MHQ(20) und HQ(20)-T (T = 2, 3, 5, 10, 20, 50, 100 Jahre) der Reihen 1964-1995 im Bereich zwischen der tschechisch-deutschen Grenze und dem Pegel Barby.

- Beim MHQ und den HQ-T dominiert im oberen Abschnitt (Staatsgrenze-Barby) ebenfalls der Anstieg der Abflusswerte mit zunehmendem Einzugsgebiet. Es kommt zu sprunghaften und mit zunehmendem Abflussniveau zunehmenden Anstiegen an den Einmündungsstellen der

Nebenflüsse. Die Scheitelabflachung durch den Wellenablauf im Gerinne ist offenbar relativ schwach ausgeprägt. So führt diese zwischen Dresden und Torgau mit geringer Einzugsgebietsdifferenz und langer Fließstrecke (etwa 100 km) nur bei kleineren HQ-T zu gering-

fügigen Verminderungen. Die Verhältnisse im unteren Abschnitt unterscheiden sich davon grundlegend. Bei kleineren und häufigeren Ereignissen ergibt sich offensichtlich ein deutlicher Abflachungseffekt beim Wellenablauf im Gerinne, dem eine deutliche Zunahme durch den (bei diesem Abflussniveau der Elbe offenbar noch nicht rückgestauten) Zufluss aus dem (großen) Havel-Einzugsgebiet gegenübersteht. Beide Effekte nehmen bei größeren und selteren Hochwasserereignissen ab, so dass sich die Abflusswerte der 100-jährlichen Ereignisse zwischen den Pegeln kaum noch unterscheiden.

- Die räumlichen Tendenzen der VHQ-T verlaufen - auf geringerem Niveau - ähnlich. Für VHQ-100 kann kein Unterschied zu HQ-100 festgestellt werden.
- Bei den HQ(x)-T dominiert im oberen Abschnitt (Staatsgrenze bis Barby) in ähnlicher Weise wie bei den anderen Kennwerten der Anstieg der Abflusswerte mit zunehmendem Einzugsgebiet. Abflachungseffekte sind hier jedoch nicht erkennbar.

Mit den regionalisierten Ergebnissen der statistischen Analysen der Reihen 1964-1995, die den jüngeren Ist-Zustand bestmöglich repräsentieren, ist es somit *gelingen, die räumliche Gesamtsituation der Hochwasserverhältnisse statistisch zu erfassen*. Neben diesem schon an sich interessierenden und für Folgeuntersuchungen anderer Disziplinen weiter verwertbaren Ergebnissen konnte das *identifizierte Muster nun auch als Referenz zur Plausibilitätsprüfung und Bewertung der Analyseergebnisse weiter zurückreichender Reihen dienen*, sowie – beispielsweise für die detailliertere Untersuchung mit Hilfe von Simulationsinstrumenten die *Einordnung von Ereignissen und Räumen besonderer Relevanz oder Problematik unterstützen* (zum Vergleich auch Kapitel III-1.4, III-1.6.8, III-1.6.6.1 und III-1.6.7).

### III-1.6.5 Entwicklung von Simulationswerkzeugen für den täglichen Abflussprozess anhand der Reihe 1964-1995

Nach durchgeführter Konsistenzprüfung und Plausibilisierung der Abflussreihen, nach der Stationaritäts- bzw. Homogenitätsanalyse mit der bestmöglichen Abgrenzung homogener Zeiträume, sowie nach der Entwicklung einer plausiblen Abflussstatistik für den repräsentativen Zeitraum der jüngeren hydrologischen Verhältnisse (1964-1995) waren die *Voraussetzungen für eine detailliertere Erforschung des Abflussprozesses gegeben*.

Geeignet hierfür sind die *modellhafte Erfassung und Simulation des täglichen Abflussprozesses bzw. seiner Teilprozesse* durch zu entwickelnde Simulationsinstrumente. Letztere besitzen bei der vorliegenden *Skale* geeigneterweise *konzeptionellen Charakter*, müssen aber ähnliche (realitätsnahe) Eigenschaften aufweisen wie das – sehr komplexe – natürliche hydrologische Geschehen. Es waren *Kompromisse* zu finden zwischen einer begründbaren Prozessrepräsentation und einer die Unsicherheiten der Simulationsausgänge begrenzenden, parametersparenden Modellformulierung. Dabei sollten die Simulationsmodelle eine gute Anpassung an den zu modellierenden Prozess zeigen, möglichst unter verschiedenen Aspekten (v.a. jedoch unter dem Aspekt des Hochwassers) und möglichst auch unter verschiedenen Bedingungen.

*Dies diente verschiedenen Zielen:*

Durch die Entwicklung und Anwendung der Simulationsmodelle erfolgte eine *erweiterte Beschreibung der Dynamik der Abflussverhältnisse des Ist-Zustands* im Sinne einer plausiblen hydrologischen Gesamtsituation und ein Beitrag zu ihrem besseren Verständnis. Damit wurde eine weiter *verbesserte Begründung der Ergebnisse der vorangegangenen Analysen* (Konsistenzanalyse, Stationaritäts- und Homogenitätsanalyse, Abflussstatistik) bei gegenseitiger Absicherung aller dieser Untersuchungssteile erreicht.

In Fällen, in denen die Instrumente realitätsnahe Simulationen der hydrologischen Prozesse erlaubten, konnten diese *zur Bewertung des Abflussprozesses unter - ggf. veränderten - historisch aufgetretenen oder veränderten fiktiven Bedingungen (Szenarien)* genutzt werden. Dabei konnten veränderte



Abflussbedingungen durch Modifikation der Modellparameter bzw. durch einen veränderten modularen Aufbau der Modelle (z.B. Zusatzmodule) berücksichtigt werden, womit gleichzeitig eine *Verallgemeinerung der Simulationsmodelle* vorangetrieben wurde (siehe v.a. Kapitel III-1.6.7).

Ein Vergleich der nach heutigen Bedingungen simulierten Abflussreihen mit historischen, unter anderen Bedingungen beobachteten Reihen unterstützte mit diesem verbesserten Verständnis der Abflussprozesse die *Identifizierung, Trennung und Bewertung aufgetretener Inkonsistenzeffekte und Abflussveränderungen* (siehe Kapitel III-1.6.6 und III-1.6.8). Inkonsistente Daten dieser weiter zurückliegenden Zeiträume konnten u.U. begründet modifiziert und fehlende Reihen rekonstruiert werden (siehe Kapitel III-1.6.7).

### III-1.6.5.1 Simulation des Fließvorgangs in der Elbe und in den unteren Bereichen der Nebenflüsse durch Ganglinien-Routing

Zur Simulation des Fließvorgangs in einem Gerinne existieren eine Vielzahl möglicher Modelle des *Ganglinien-Routings*, mit denen nach ihrer Anpassung bei gegebener Zuflussganglinie oberstrom Abflussganglinien unterstrom berechnet werden können.

Das hierfür gültige hydrodynamisch begründbare Modell entspricht den *Saint-Venant-Gleichungen*, die jedoch nur numerisch lösbar sind und insbesondere bei größeren Flusssystemen einen sehr hohen Aufwand bei der Parameterermittlung und bei Simulationsläufen erfordern. Daher existieren unter verschiedenen Annahmen *vereinfachte hydraulische Modellansätze* (z.B. *Diffusionswellenansatz*), sowie *konzeptionelle hydrologische Modelle*. Details zu den verschiedenen Verfahren finden sich bspw. in DYCK & PESCHKE (1995, S. 414 ff.), PLATE (1977) und in FREAD (1993, S. 10.1 ff.).

Vom ehemaligen Institut für Wasserwirtschaft und verschiedenen Partnern wurde das *Zentralmodell Elbe* für ein Ganglinien-Routing an der Elbe erarbeitet (siehe GÜTHLEIN ET AL. 1980). Dieses Modell ist die Grundlage für das heute von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) genutzte *Programmsystem ELBA* zur Abflussvorhersage (siehe BfG 1996). Dem Modell liegt der Diffusionswellenansatz

zugrunde, der aus den Saint-Venant-Gleichungen unter Vernachlässigung der Trägheitsglieder abgeleitet werden kann. Für den Diffusionswellenansatz kann eine Systemfunktion (Impulsantwort) ermittelt werden (Formel 18). Man erhält das *Verfahren der Diffusionsanalogie* bzw. das *Translations-Diffusions-Modell*.

$$h(t) = \frac{x}{2 \cdot t \cdot \sqrt{\Pi \cdot D \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(u \cdot t - x)^2}{4 \cdot D \cdot t}\right) \quad (18)$$

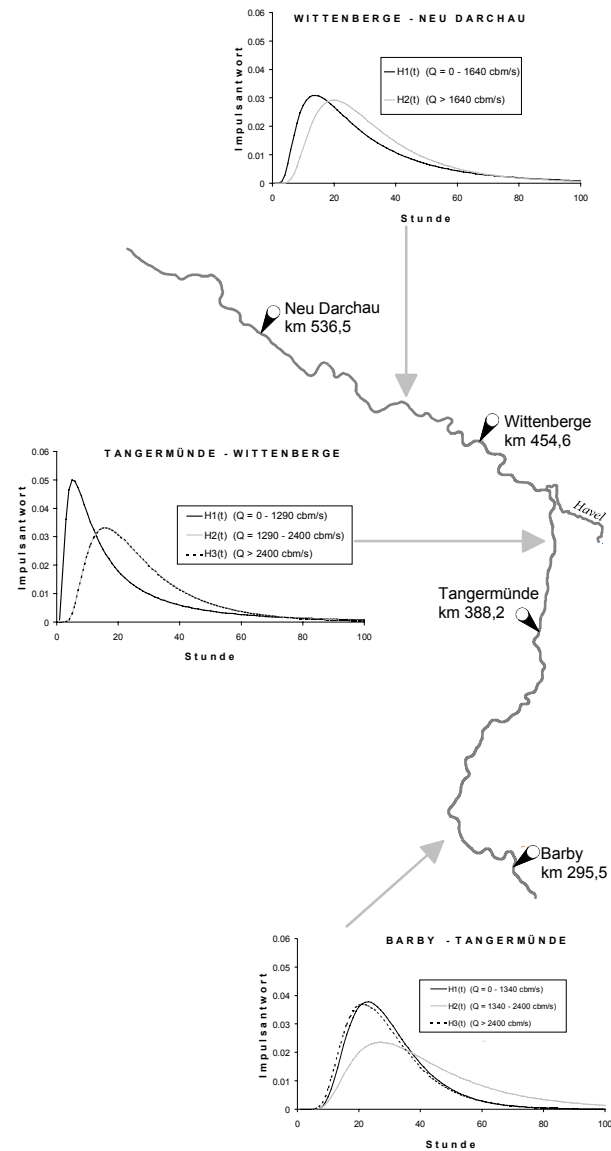
mit: x (km)      modellierte Flusslänge  
 u (km/h)      Translationskoeffizient  
 D (km<sup>2</sup>/h)    Diffusionskoeffizient  
 t (h)          Zeitschritt : in Stunden

Dieses Modell ist in ELBA als *nichtlineares bzw. abschnittsweise lineares Stufenmodell* konzipiert mit (maximal) *drei Abflussstufen* (*Flussbett, Ausuferungsbereich, Hochwasserbereich*). Die Ausgänge dieser Teilmodelle sind durch Superposition überlagerbar. Die nach Abflussstufen differenzierten Parameter u und D wurden anhand von Abflussereignissen kalibriert (siehe GÜTHLEIN ET AL. 1980, S. 330/331), so dass das Modell quasi konzeptionellen Charakter erhält. Von der BfG wurden diese Parameter für die verschiedenen Gewässernetzabschnitte der Elbe und der unteren Nebenflusseinzugsgebiete zur Verfügung gestellt. Im Projekt wurde die Modellstruktur entsprechend dieser Parameter umgesetzt und als Modul in eigene Modellsysteme eingebunden. Abb. III-1.32 zeigt für den Bereich zwischen den Pegeln Barby und Neu Darchau die aus den Parametern für verschiedene Gewässernetzabschnitte und Abflussstufen ermittelbaren Systemfunktionen.

*Die Auswahl des Modells war aus verschiedenen Gründen zweckmäßig.* Seine Anwendung war am Tieflandstrom Elbe und an den unteren Gewässerstrecken der Nebenflusseinzugsgebiete gerechtfertigt, da bei diesen Gewässerstrecken nur allmähliche zeitliche und räumliche Veränderungen der Durchflussschwindigkeiten vorkommen, so dass vereinfachend davon ausgegangen werden konnte, dass die Trägheitsterme im Vergleich zu den Saint-Venant-Gleichungen vernachlässigbar waren. Bei angemessenem Aufwand wurden physikalisch begründbare Parameter verwendet, auch wenn diese nicht theoretisch begründet, sondern durch Kalibrierung ermittelt wurden. Das Modell hat ferner eine für die eigene Projektarbeit günstige Raumstruktur. Hierfür

war es sinnvoll, die bereits vorliegenden und anerkannten Parameterwerte, sowie die für das Modell vorliegenden Erfahrungen der BfG zu nutzen und darauf aufzubauen. Günstig war auch, dass ELBA für alle Abflussbereiche einsetzbar ist. Es handelt sich nicht nur um ein flood-routing-Modell. Somit konnte es zu einer umfassenden Beschreibung und Modellierung des Abflussprozesses beitragen. Schließlich ist anzuführen, dass die Längenangabe variierbar war. Somit war in einfacher Weise eine Interpolation für den Streckenabschnitt zwischen zwei betrachteten Pegeln möglich. Dies war für verschiedene Zwecke vorteilhaft. So konnten Abflussganglinien an beliebigen Standorten, z.B. von früheren Retentionsflächen oder heute diskutierten Maßnahmen der Deichrückverlegung simuliert werden (zum Vergleich siehe MERKEL ET AL. 2001 in Kap. III-3, sowie Kapitel III-1.6.7).

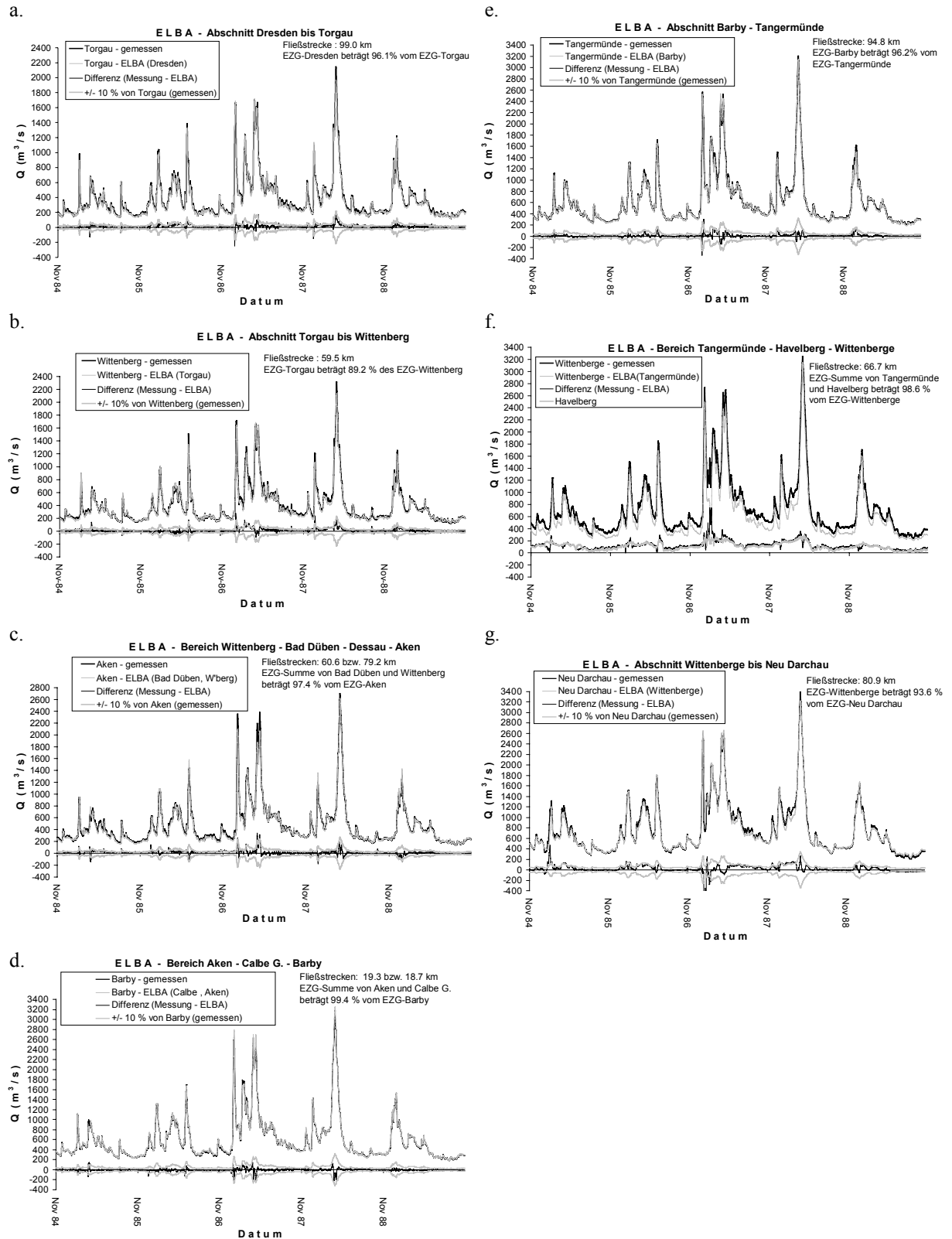
Als Problem ergab sich zunächst die Tatsache, dass ELBA für Reihen mit Stundenwerten definiert ist. Bei den verfügbaren Abflusszeitreihen handelte es sich hingegen um Reihen mittlerer Tageswerte. Es stellte sich somit die Frage, ob dieser Unterschied vernachlässigbar ist. Hierzu wurden für die Jahrescheitelabflüsse, bei denen Differenzen zwischen den maximalen Terminwerten und den entsprechenden Tagesmitteln am deutlichsten sind, Vergleiche angestellt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Abweichungen gering sind. Dies wird i.d.R. umso deutlicher, je weiter stromabwärts der Elbe-Pegel liegt. So betragen in den Reihen der Jahrescheitelabflüsse 1964-1995 die maximalen Abweichungen bis etwa 9% am Pegel Dresden, bis etwa 8% am Pegel Torgau, bis etwa 6% am Pegel Wittenberg, bis etwa 5% am Pegel Aken, bis etwa 3% am Pegel Barby, bis etwa 7% am Pegel Tangermünde und nur bis etwa 1% an den Pegeln Wittenberge und Neu Darchau. Oberhalb des MHQ betragen die maximalen Abweichungen nur bis etwa 6% an den Pegeln Dresden, Torgau und Wittenberg, bis etwa 3% an den Pegeln Aken und Barby, bis etwa 2% am Pegel Tangermünde und bis etwa 1% an den Pegeln Wittenberge und Neu Darchau. Für die Anwendung des Modells ELBA und seiner Parameter schien es somit gerechtfertigt, Reihen mit Stundenwerten zu verwenden, bei denen für einen Tag für jede Stunde immer der gleiche Wert (Tagesmittel) angenommen wurde.



**Abb. III-1.32** Nach Abflussstufen differenzierte Systemfunktionen des Modells ELBA für verschiedene Gewässerabschnitte der Elbe. Modellparameter nach BfG (1998).

Die modellierten Reihen mit Stundenwerten konnten dann wieder zu Tagesmitteln umgerechnet werden. Es ist anzumerken, dass über 24-h-Gleitmittel gebildete Stundenreihen als Modelleingänge kaum unterschiedliche Modellausgänge lieferten.

Die Abbildungen III-1.33.a.-g. zeigen exemplarisch die mit dem Modell für verschiedene Abschnitte der Elbe und der unteren Nebenflüsse simulierten Ganglinien der Abflussjahre 1985-1989 an den unterstromigen Vorhersagepegeln im Vergleich mit den jeweils gemessenen Ganglinien und den Abweichungen zwischen diesen Ganglinien.



**Abb. III-1.33** Gemessene und nach dem Modell ELBA mit jeweils angegebenem Zuflusspegel simulierte Ganglinien des Zeitabschnitts November 1984 - Oktober 1989 im Vergleich. Zur Bewertung des Modellfehlers sind – außer bei f.- ferner die Differenzen dieser beiden Ganglinien gegenüber dem Band des Intervalls von +/- 10% der gemessenen Abflusswerte dargestellt.

Die zu den Eingangsganglinien gehörigen Einzugsgebietsflächen sind meist etwa so groß wie die zu den Ausgangsganglinien gehörigen. Entsprechend geringe Abflussleistungen waren für die nicht berücksichtigten Zwischengebiete zwischen Eingangs- und Vorhersagepegel annehmbar. Die simulierten und gemessenen Ganglinien des Vorhersagepegels sollten sich somit in etwa entsprechen. Anhand eines Vergleichs mit den Bändern von  $\pm 10\%$  der gemessenen Ganglinie am Vorhersagepegel wurde dies – und damit das Modell - i.d.R. bestätigt. Nur in Einzelfällen waren stärkere Abweichungen feststellbar. Eine Ausnahme stellt die Gewässerstrecke zwischen Tangermünde und Wittenberge dar, bei der die Havel mit ihrem großen Einzugsgebiet wegen der komplizierteren Verhältnisse an der Mündung in die Elbe bei Hochwasser nicht ohne weiteres in das Routing-Verfahren einbezogen werden konnte. Der Vergleich der Differenzganglinie zwischen gemessener und simulierter Ganglinie am Pegel Wittenberge zeigte jedoch große Ähnlichkeit mit der Ganglinie des Pegels Havelberg. Wie am Beispiel des Hochwasserereignisses 1988 zu sehen, galt dies auch für größere Hochwasserereignisse. Weitergehende Untersuchungen zeigten, dass es bei den meisten Hochwasserereignissen zulässig ist, das Ganglinien-Routing zunächst von Tangermünde zur Havelmündung durchzuführen, dort die Abflusswerte des Pegels Havelberg zu addieren und die Summenganglinie zum Pegel Wittenberge weiterzurouten. In einigen Fällen war jedoch Vorsicht geboten, wie es sich in der Differenzganglinie der Hochwasserereignisse im Winter 1986/87 andeutet (siehe Abb. III-1.33.f.). Als Ursache für die Abweichungen zwischen den Ganglinien konnten Wehrsteuerungen im Mündungsbereich der Havel angenommen werden, deren Effekte durch das Routing-Modell und die Ganglinienaddition allein nicht erfasst werden konnten. Dies war in einzelnen Fällen auch während Hochwasserereignissen nach der Einrichtung der Wehrgruppe an der Havelmündung der Fall.

*Insgesamt konnte festgestellt werden, dass es mit dem Translations-Diffusions-Modell möglich ist, den Fließprozess in der deutschen Gewässerstrecke der Elbe, sowie in den unteren Bereichen der Nebenflüsse unter den Verhältnissen des Ist-Zustands (Reihe 1964-1995) in guter Näherung zu simulieren. Probleme ergaben sich nur bei einigen Hochwasserereignissen im Gewässerabschnitt um die Havel-*

mündung. Auf die Simulation der Verhältnisse an der Havelmündung, insbesondere auch vor 1956, dem Jahr der Fertigstellung der Wehre, wird in Kapitel III-1.6.7 näher eingegangen.

In der weiteren Verwendung konnte das Modell ELBA somit *als geeignetes Instrument* begriffen werden, um ausgehend von bekannten Abflussganglinien an Pegeln weitere Ganglinien an beliebigen Standorten zu erzeugen, die die Randbedingungen für weitere Untersuchungen, zum Beispiel zur Auenökologie oder zur Grundwasserdynamik in der Aue (s. BUREK & NESTMANN 2001: Kap. IV-4) liefern können. Desweiteren konnte ELBA anhand eines Vergleichs von nach gegenwärtigen Bedingungen simulierten Ganglinien mit historisch gemessenen Ganglinien für eine erweiterte Stationaritätsanalyse des Abflussprozesses genutzt werden. Ferner diente ELBA (s. Kapitel III-1.6.6.1) nach seiner Kopplung mit Modulen zur Simulation von örtlichen Retentionswirkungen als ein zentrales Modul bei der Simulation der Auswirkungen heute diskutierter Deichrückverlegungsmaßnahmen (siehe MERKEL ET AL. 2001: Kap. III-3), sowie bei der Simulation und Rekonstruktion historischer Hochwasserereignisse (vor verschiedenen Eindeichungsmaßnahmen (zum Vergleich siehe Kapitel III-1.2.2 und III-1.6.7)). Schließlich konnte der Abflussprozess der Elbe räumlich – nach seiner Herkunft aus Teilgebieten – getrennt werden. Mit einer Erweiterung des Modells ELBA konnten neben den Teileinzugsgebieten der Nebenflüsse auch größere, weiter aggregierte Teilgebiete betrachtet werden (s. Kapitel III-1.6.5.2). Wegen der Skalenabhängigkeit der dominierenden Prozesse und der entsprechend unterschiedlichen Korrelation zwischen Abflussprozessen aus verschiedenen Teilgebieten wurde hiermit eine wesentliche Vorarbeit zu einer geeigneten Raumgliederung in einem Simulationsmodell für das gesamte Elbe-Einzugsgebiet geleistet.

### **III-1.6.5.2 Ableitung einer Raumgliederung des Elbe-Einzugsgebiets zur Anwendung stochastischer und konzeptioneller Simulationsmodelle des Abflussprozesses**

Aufgrund der besonderen Verhältnisse im glazialen Akkumulationsgebiet des Havel-Einzugsgebiets und im Mündungsbereich der Havel (zum Vergleich Ka-

pitel III-1.2) wurde hierbei nur der Bereich des Elbe-Einzugsgebiets bis zum Pegel Barby betrachtet.

Für die Anwendung von Simulationsmodellen des Abflusses der Elbe oberhalb von Barby war eine geeignete Untergliederung ihres Einzugsgebiets vorzunehmen. Diese sollte nicht zu fein sein, um zu starke Effekte zufallsbedingter und zwischen den Teilgebieten zu schwach korrelierter Reaktionen zu vermeiden. Andererseits würde eine zu grobe Unterteilung zur zu starken Mittelung räumlich variabler Ausprägungen von Gebietseigenschaften und Niederschlagsereignissen führen. Es war hingegen eine möglichst weitgehende Erfassung der regionale Differenzierung von Prozessen anzustreben, um eine Regionalisierbarkeit von Parametern und Ausgängen der Simulationsmodelle, sowie eine Prognosefähigkeit in Szenarien mit veränderten Bedingungen zu gewährleisten.

Die nachfolgende Betrachtung ging dabei von den aus Teileinzugsgebieten stammenden Abflussprozessen aus. Das Ziel war eine bei gegebenem Informationsstand geeignete Gliederung für großräumige und daher stochastisch bzw. konzeptionell orientierte Modellanwendungen mit kontrollierbarem Zufallsanteil und hinreichender Korrelation der Abflussprozesse aus verschiedenen Teileinzugsgebieten. Diese Korrelation war für die Option einer simultanen Simulation verschiedener Teilgebiete vorauszusetzen (zum Vergleich Kapitel III-1.6.5.3–B). Darüber hinaus sollten skalenabhängige Effekte bei unterschiedlichen Raumgliederungen verdeutlicht werden.

Zum Aufschluss über eine unter diesen Gesichtspunkten geeignete Raumgliederung wurden unter Anwendung des ELBA-Modells *Ganglinien zu verschiedenen unterstromigen Standorten geroutet*, beispielsweise die Ganglinie des Pegels Dresden zum Pegel Aken. Bei durch Nebenflüsse hinzutretenden Wassermengen wurde von einer vollständigen Mischung mit den Wassermengen der Elbe ausgegangen, so dass aus den Abflussanteilen der Elbe und der Nebenflüsse am jeweiligen Zusammenfluss die in den verschiedenen Abflussstufen des ELBA-Modells unterstromig abfließenden Anteile dementsprechend ermittelt werden konnten. Damit wurde den nichtlinearen Eigenschaften des Fließprozesses im Gewässerbett der Elbe Rechnung getragen. An den unterliegenden Pegeln (z.B. Aken) wurden dann die (z.B. vom Pegel Dresden stammenden) gerouteten Ganglinienanteile von den dort gemessenen Ganglinien abgezogen. Diese *Differenzganglinien* sind als *Ganglinien der Zwischengebiete der am Routing beteiligten Pegel interpretierbar* und stellen insgesamt eine *Zerlegung des Elbe-Abflussprozesses in die Teilprozesse der aus verschiedenen Teilgebieten stammenden Abflussprozesse* dar (siehe z.B. Abb. III-1.34 für die Ganglinie des Pegels Aken mit einer Zerlegung in die Anteile aus den Teilgebieten oberhalb und unterhalb des Pegels Dresden).

Um festzustellen, ob solche Ganglinien aus verschiedenen, aus den verfügbaren Pegeln ermittelbaren Teilgebieten korrelieren, in welcher Weise also Gebiete im Hinblick auf den Abflussprozess und dessen räumliche Korrelationsstrukturen sinnvoll zu

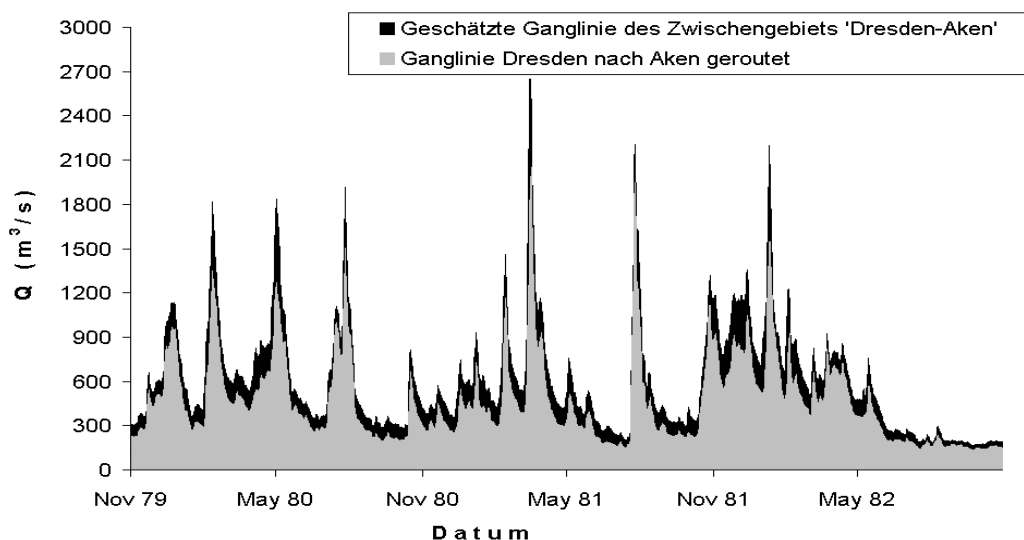


Abb. III-1.34 Ganglinie des Pegels Aken, zerlegt in die Anteile aus dem Gebiet oberhalb Dresdens und aus dem Zwischengebiet 'Dresden-Aken'.

gliedern bzw. aggregieren sind, wurden die den Teilgebieten zuordenbaren Differenzganglinien *Kreuzkorrelationsanalysen* unterworfen. Als Pegel für die Ermittlung der Teilgebiete wurden neben den Elbe-Pegeln der Mulde-Pegel Bad Dübren und die Pegel Naumburg, Zeitz, Hadmersleben und Calbe Gr. im Saale-Einzugsgebiet herangezogen.

Bei diesen Analysen zeigte sich, dass die *Korrelationen mit zunehmender Gebietsgröße zunehmen*. Dies lässt sich mit *gedämpften Reaktionen großer Einzugsgebiete* erklären. Großräumige Niederschlagsereignisse, die v.a. bei zyklonalen Wetterlagen auftreten, liefern ausreichende *Gebietsniederschlagshöhen*, um die Abflussganglinie der Elbe bzw. größerer Teilgebiete prägen zu können. Kleinräumigere (konvektive) Niederschläge gehen – auch bei hohen Intensitäten – im Gegensatz zu kleineren Einzugsgebieten offenbar mehr und mehr in ein zufälliges Rauschen in den Abflussganglinien großer Teilgebiete der Elbe über. Dies konnte auch durch die vergleichende Analyse zwischen dem Auftreten von Großwetterlagen (nach der in Kapitel III-1.3.2.1 genannten täglichen Zeitreihe der Großwetterlagen Mitteleuropas) und den Ganglinienanstiegen verschiedener durchgängiger Mindestanstiegsbeträge (200, 500 und 1000 m<sup>3</sup>/s) der Elbe am Pegel Barby bestätigt werden. Damit wurde die mit der Größe der Teilgebiete zunehmende Korrelation der Teilgebiets-Ganglinien verständlich, denn die *großräumigen, zyklonalen Niederschläge weisen gleichzeitig eine relativ hohe räumliche Homogenität auf. Dementsprechend reagieren Abflussganglinien der verschiedenen großen Teilgebiete ähnlich* und zeigen untereinander relativ hohe Korrelationen. Maximale Kreuzkorrelationskoeffizienten größer als 0.7 fanden sich – trotz der zeitlich dominierenden Abflüsse im Mittel- und Niedrigwasserbereich – erst bei einer Aggregation bis zu den Teilgebieten ‘oberhalb des Pegels Dresden’, ‘Gebiet zwischen Dresden und Aken’, ‘Gebiet zwischen Aken und Barby’ (etwa äquivalent zum Saale-Einzugsgebiet oberhalb des Pegels Calbe Gr.) und ‘Gebiet zwischen Dresden und Barby’. Die Maxima der Kreuzkorrelationskoeffizienten ergaben sich bei einer Zeitverschiebung von null oder einem Tag.

Somit kann diese *Gliederung des Elbe-Einzugsgebiets oberhalb des Pegels Barby in zwei bzw. drei Teilgebiete* für großräumige und daher stochastisch bzw. konzeptionell orientierte Modellanwendungen

mit räumlich differenzierter Simultansimulation für die Teilgebiete im Sinne einer Kontrolle von Unsicherheiten und Zufallseffekten als zweckmäßig angesehen werden. Dabei muss bewusst sein, dass hierbei räumlich heterogene Prozesse und Eigenschaften gemittelt werden und daher mit einer weiteren räumlichen Prozessdisaggregation eine bessere Fundierung der Modelle anzustreben ist. Umgekehrt müssen bei einer von Gebietseigenschaften ausgehenden Gliederung bei einer Aggregation die oben beschriebenen, skalenabhängigen Korrelationseigenschaften des Abflussprozesses im Elbe-Einzugsgebiet berücksichtigt werden.

### III-1.6.5.3 Stochastische Simulation des Abflussprozesses in Teileinzugsgebieten der Elbe

Wesentlich für das Zustandekommen des Abflussprozesses an den verschiedenen Stellen entlang der Elbe sind über den Fließprozess im Gerinne hinaus die *hydrologischen Prozesse im jeweiligen Einzugsgebiet bzw. in den Teileinzugsgebieten*. Diese umfassen u.a. den Gebietsniederschlag, die Abflussbildung und die Abflusskonzentration. Abflussprozesse resultieren dabei in komplexer Weise aus einer Vielzahl von Einzelprozessen im Einzugsgebiet, deren Differenzierung und Quantifizierung bei verschiedenen hydrologischen Situationen schwierig ist. Dies gilt natürlich besonders in großräumigen Betrachtungen, wie für das Elbe-Einzugsgebiet, wobei gerade bei diesem Einzugsgebiet durch die landschaftliche und klimatologische Vielfalt (siehe Kapitel III-1.2.1) weitere Schwierigkeiten hinzukommen. Es ist – wie bereits zu Beginn des Kapitels III-1.6.5 bemerkt – sehr wichtig, einen *Kompromiss zu finden zwischen einer begründbaren Prozessrepräsentation und einer die Unsicherheiten der Simulationsausgänge begrenzenden, parameter-sparenden Modellformulierung*.

Als besondere *Probleme* anzusprechen sind z.B.:

- die schwierige stationsweise Messung des Niederschlags, insbesondere bei Schnee,
- der Korrekturbedarf der Niederschlagsmessreihen (zum Vergleich RICHTER 1995), für den jedoch die Informationsgrundlagen nach Auskunft des Deutschen Wetterdienstes noch nicht hinreichend aufgearbeitet sind,

- die Unsicherheiten bei der Ermittlung von Gebietsniederschlagsreihen aus (korrigierten) stationsweisen Niederschlagsreihen,
- sowie die im Projekt geringe Verfügbarkeit von Zeitreihen meteorologischer Parameter im tschechischen Teilgebiet.
- Hinzu kommt die Komplexität der Abflussbildungsprozesse mit vielfältigen, interagierenden, räumlich verteilten, gleichzeitig oder zeitlich versetzt ablaufenden Einzelprozessen in verschiedenen Skalen eines Einzugsgebiets, die sich je nach hydrologischem Zustand und hydrologischer Situation unterscheiden.

Vor diesem Hintergrund *stellte zunächst das stochastische Modell zur Simulation von Tagesabflüssen nach TREIBER (1975) einen geeigneten Ansatz dar*: bei diesem bilden fiktive Impulse, die allein aus den gemessenen Abflussreihen abgeleitet werden, den Eingang in das System, womit die mit den genannten Punkten verbundenen Unsicherheiten vermieden werden.

Es handelt sich um ein Modell zur Simulation von Zeitreihen mittlerer täglicher Abflusswerte, dessen Grundstruktur in Abb. III-1.35 gezeigt ist. Die gemessenen Abflüsse werden aufgefasst als Ausgänge aus einem linearen, zeitvarianten System. Der Eingang in dieses System besteht aus fiktiven Impulsen von je einem Tag Dauer, die allein aufgrund der gemessenen Abflussreihe abgeleitet werden und danach die grundlegende zu generierende Reihe bei Simulationsläufen bildet. Die Impulse sind mit einer variablen Systemfunktion zum Systemausgang zu falten. Dabei hängt die Systemfunktion von einem Zustandsmaß ab. Für das Zustandsmaß wird der Systemausgang zum Zeitpunkt des Impulses angenommen, der sich aus den vorangegangenen Impulsen ergibt. TREIBER (1975, S. 46/47, 161-163) interpretierte die Eingangsimpulse als abflusswirksame Niederschläge oder Schneeschmelzraten, die variable Systemfunktion als variable

(gedächtnisabhängige) Retentionseigenschaft des Einzugsgebiets, allerdings in bezug auf sehr viel kleinere Einzugsgebiete bis zu einer Größe von etwa 1000 km<sup>2</sup> im Mittelgebirgsbereich.

Der Arbeitsablauf erfolgt in *drei Schritten*:

1. *Modellanpassung für Impulse und variable Systemfunktion* nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate mit iterativen Verfahren.
2. *Erstellung eines Modells zur Simulation der Eingangsimpulse* mit monatsweise variierenden Parametern. Zunächst wird die Reihe trockener und nasser Tage mit Hilfe eines Markov-Ketten-Modells simuliert, anschließend die Höhe der Impulse als Markov-Prozess erster Ordnung mit Weibull-verteiltem unabhängigem Zufalls-glied.
3. *Abflussreihen-Generierung*: Faltung simulierter Impulse mit variabler Systemfunktion.

Für die Abflussreihen 1964-1995 der Elbe-Pegel Dresden, Aken und Barby, sowie für die in Kapitel III-1.6.5.2 abgeleiteten Reihen 1964-1995 von Teil-einzugsgebieten wurde das *Treiber-Modell angepasst*. Nach der Anpassung wurden jeweils *20 Generierungsläufe* der den Beobachtungsreihen entsprechenden Längen von 32 Jahren durchgeführt. Die angepasste Ganglinie und die statistischen Eigenschaften der generierten Ganglinien wurden in einer umfassenden Diagnose mit der Messreihe verglichen.

Die Modellanpassung ergab i.d.R. – mit Abstrichen nur für das Saale-Einzugsgebiet (oberhalb Pegel Calbe Gr.) - sehr hohe Effizienzkriterien (siehe Tab. III-1.10). Die guten Modellanpassungen konnten weiterhin durch einen visuellen Vergleich von gemessenen und angepassten Reihen in Ganglinien-Plots bestätigt werden, wie exemplarisch in Abb. III-1.36 für den Ganglinienausschnitt 1979-1981 des Pegels Dresden dargestellt ist.

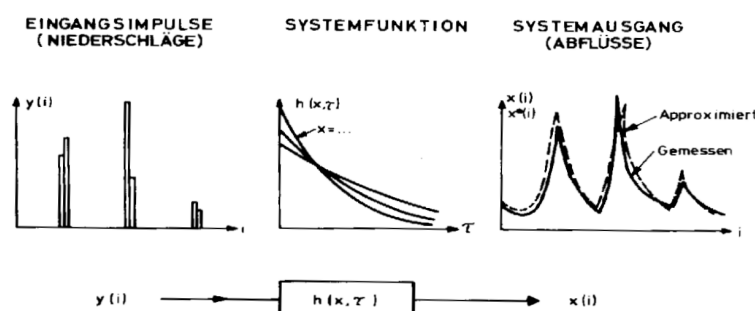
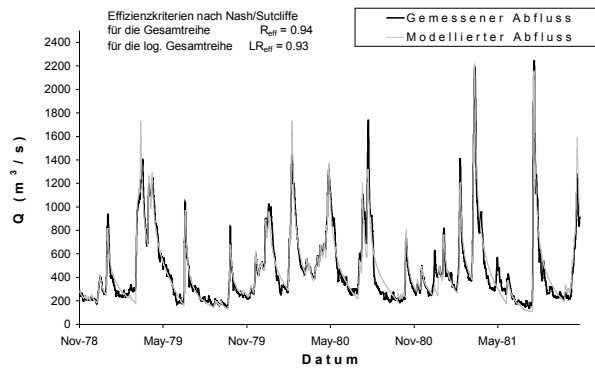


Abb. III-1.35 Struktur des Modells nach Treiber (aus TREIBER 1975).

**Tab. III-1.10** Effizienzkriterien nach Nash und Sutcliffe (R) für die mit dem Treiber-Modell an die 'gemessenen' Ganglinien angepassten Ganglinien. Um die Niedrigwasserabflüsse stärker zu gewichten, wurden die Effizienzkriterien auch für die jeweils logarithmierten Reihen ermittelt (LR).

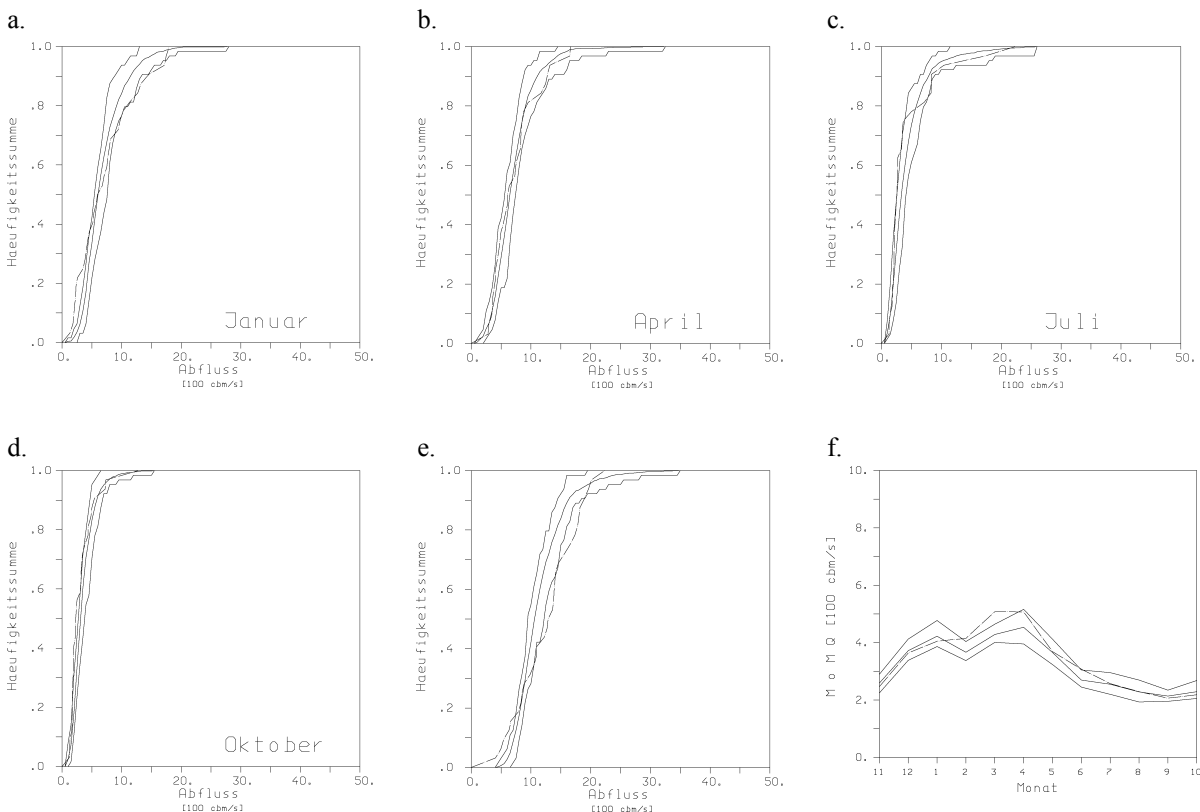
Teilgebiet	R	LR
Oberhalb Dresden	0,94	0,93
Dresden-Aken	0,92	0,91
Oberhalb Calbe	0,89	0,75
Dresden-Barby	0,90	0,92
Oberhalb Aken	0,93	0,93
Oberhalb Barby	0,92	0,93



**Abb. III-1.36** Gemessene und nach dem Treiber-Modell angepasste Abflussganglinien des Pegels Dresden, exemplarisch für die Abflussjahre 1979-1981.

In einer *umfassenderen Diagnose* wurden *Vergleiche monats- und jahresbezogener Verteilungsfunktionen von Abflusskennwerten* für die gemessenen Ganglinien einerseits und für die 20 generierten Ganglinien andererseits angestellt. Die Kennwerte umfassten mittlere tägliche Abflüsse, mittlere monatliche und maximale monatliche Abflusswerte in bezug auf die verschiedenen Monate, sowie mittlere und maximale jährliche Abflüsse in bezug auf das Abflussjahr.

Dabei wurden die Verteilungsfunktionen bzw. Jahrgänge der gemessenen Ganglinien dem Mittel und den Hüllkurven der Verteilungsfunktionen der 20 generierten Ganglinien gegenübergestellt. Die Abbildungen III-1.37.a-e. zeigen dies exemplarisch am Pegel Dresden für die maximalen Tagesabflüsse ausgewählter Monate, sowie der Jahre. Weiterhin wurden die Jahrgänge der Monatsmittel verglichen (siehe Abb. III-1.37.f).



**Abb. III-1.37** Empirische Verteilungsfunktionen gemessener monatlicher bzw. jährlicher Maxima der Abflussreihe 1964-1995 des Pegels Dresden (gestrichelte Linien) gegenüber Mitteln und Hüllkurven der empirischen Verteilungsfunktionen von 20 mit dem Treiber-Modell generierten Abflussreihen (durchgezogene Linien). a. – d.: ausgewählte Monate; e. Jahre - f.: mittlerer Jahrgang der mittleren monatlichen Abflüsse MoMQ (gestrichelt) gegenüber Mitteln und Hüllkurven der mittleren Jahrgänge von 20 mit dem Treiber-Modell generierten Abflussreihen (durchgezogen).



Wie bei den Darstellungen der Verteilungsfunktionen der monatlichen Spitzenabflüsse – sowie den meisten anderen berücksichtigten Verteilungsfunktionen – festgestellt werden konnte, verbleiben die Verteilungsfunktionen der Messreihen in den Bereichen zwischen den Einhüllenden. Dies spricht für eine *gute Eignung des Modellansatzes*. Dabei muss betont werden, dass diese umfassende Diagnose eine vergleichsweise strenge Prüfung der Qualität eines Simulationsmodells darstellte. Sie war damit auch in der Lage, noch vorhandene Modelldefizite zu identifizieren, die Hinweise auf geeignete Schritte zur Modellverbesserung geben. Unter diesem *kritischen Aspekt* lassen sich folgende Punkte zusammenstellen:

- Die Beobachtung einer häufigen Überschätzung kleiner und Unterschätzung größerer Jahrescheitelabflüsse spricht dafür, dass im Hochwasserfall die (*nichtlineare*) *Gebietsreaktion durch die schärfere Erfassung einer schnellen Abflusskomponente verbessert* werden kann.
- *Frühjährliche Abflüsse werden unterschätzt*. Dabei sind Abflussbereiche aller Größen betroffen, wie aus den Verteilungsfunktionen der Tagesabflüsse in bezug auf die Monate März und April hervorgeht. Es ist anzunehmen, dass die Abweichungen auf einem *nachhaltigen Anschwellen langsamer Abflusskomponenten* beruhen, das mit (zeitlich scharfen) Impulsen im Treiber-Modell *nicht geeignet modelliert* wird. Dabei ist eine *nivale Komponente* zu beachten.
- Die *Jahresmittel der gemessenen Reihen besitzen eine größere Variabilität als die der generierten Reihen*. Dies ist als Hinweis auf eine *Persistenz im Abflussgeschehen* zu sehen, für die zwei mögliche Gründe annehmbar sind: die längerfristige Speicherung von Wassermengen im Einzugsgebiet, die in Form einer langfristig variablen, aber persistenten Komponente berücksichtigt werden kann, sowie *mehrfähige periodische Entwicklungen im Niederschlags- und Abflussgeschehen* (siehe Kapitel III-1.6.2.1.3).

Hinzu kommen *theoretische Überlegungen*, die weitere Probleme der Repräsentation der natürlichen, hydrologischen Prozesse in dem stochastisch geprägten Ansatz des Treiber-Modells verdeutlichen:

- *Dem (ursprünglichen) Treiber-Modell fehlt eine Raumgliederung*. Daher werden die Wirkungen

räumlich heterogener Prozesse gemittelt und natürliche Prozesse nicht in physikalisch realistischer Weise repräsentiert. Beispielsweise wird für jeden Teilraum die gleiche Impulshöhe angenommen. Dem wurde bereits in der Arbeit von KRON (1996) mit der Entwicklung eines Modells zur Simultangenerierung von Abflussprozessen in verschiedenen Teileinzugsgebieten auf Basis des Treiber-Modells Rechnung getragen. Die Anwendbarkeit dieses Modells auf die Elbe wird weiter unten (Abschnitt B) in bezug auf o.g. Teilgebietsgliederung angesprochen.

- Vor dem Hintergrund, dass Kreuzkorrelationsanalysen für die Reihe der Gebietsniederschläge des deutschen Elbe-Einzugsgebiets oberhalb der Saale-Mündung gegenüber den Abflussreihen der in diesem Gebiet gelegenen o.g. großen Teilgebieten des Elbe-Einzugsgebiets maximale Koeffizienten erst nach einer Anstiegsphase von vier bis fünf Tage zeigen, ist die Tatsache, dass im *Treiber-Modell eine Transferfunktion ohne Anstiegsphase* genutzt wird, kritisch. Dies gilt hinsichtlich der Interpretation der Impulse als (auch effektive) Gebietsniederschläge. Es wird eine Modifizierung von Modellstrukturen bzw. für eine Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Gebietsniederschlägen und Impulsen eine Aggregation des Zeitschritts erforderlich. Bei einer feineren Gebietsteilung ist eine Minderung dieses Problems zu erwarten, jedoch ist bei einer räumlich differenzierten Modellierung mit dem Korrelationsverlust zwischen den hydrologischen Prozessen der verschiedenen Teileinzugsgebiete zu rechnen und daher mit Schwierigkeiten bei ihrer Simultansimulation (zum Vgl. Kapitel III-1.6.5.2).
- Der *Basisabfluss* wird im Treiber-Modell *konstant* gehalten. Dies ist für große Einzugsgebiete nicht plausibel, im Gegensatz zu einer durch eine längerfristige Gedächtnisstruktur geprägten *Dynamik* dieser Komponente(n). In diesem Sinne ist auch die Eignung des verwendeten Zustandsmaßes und dessen Umsetzung in die zeitvariante Systemfunktion zu hinterfragen. Eine differenziertere Beschreibung als im Treiber-Modell ist zu erwägen.

*Insgesamt zeigten diese Diagnosen und Überlegungen, dass die wichtigsten Aspekte in der an einer besseren physikalischen Fundierung orientierten*

Weiterentwicklung geeigneter Simulationstechniken für das Elbe-Einzugsgebiet eine Modellstruktur mit einer geeigneten Komponentendifferenzierung, die Einbeziehung von Gebietsniederschlägen in die Modellstruktur, sowie eine räumliche Differenzierung der Prozesse sind.

Um die Möglichkeiten auszuloten, dies mit entsprechenden Modifikationen auf Basis des Treiber-Modells zu erreichen, wurden Untersuchungen unter diesen drei Aspekten durchgeführt.

### A. Abflusskomponenten-Differenzierung

Zur Entwicklung einer komponentendifferenzierten Modellstruktur war es zunächst erforderlich, eine oder mehr Basisabflusskomponenten zu separieren und zu modellieren. Die Integration von Basisabflusskomponenten in den Modellansatz ermöglicht nicht nur die verbesserte Simulation ihrer selbst, sondern auch den schärferen Bezug eines weiteren Moduls (hier des Treiber-Modells) auf eine schnelle Abflusskomponente, so dass auch bei dieser Verbesserungen zu erwarten sind. Ein geeigneter Ansatz für Basisabflusskomponenten ist der eines oder mehrerer Speicher, deren Eigenschaften anhand der verfügbaren Informationen in der Abflussganglinie zu formulieren sind. Die Analyse von Rezessionskurven ergab dabei, dass zwei Speicher notwendig sind, um das Verhalten von Abflusskomponenten weitgehend eindeutig zu erfassen. Zunächst wurde eine langfristig persistente Komponente durch einen aus einem linearen Speicherkonzept herleitbaren autoregressiven Ansatz realisiert. Nach der Separation

dieser Komponente konnten anhand der Rezessionskurven der verbleibenden Ganglinie die Parameter des Modellansatzes des Nichtlinearen Speichers nach WITTENBERG (2000) bestimmt werden. Dieses Modell konnte für die Separation einer zweiten Basisabflusskomponente genutzt werden. Schließlich wurde das Treiber-Modell an die verbleibende schnelle Abflusskomponente angepasst (zum Vergleich Abb. III-1.38). Die Anpassung der Summenganglinie dieser drei Komponenten an den gemessenen (Gesamt-)Abfluss wurde gegenüber dem Treiber-Modell in Anwendung auf den Gesamt-abfluss noch einmal deutlich verbessert: es ergaben sich Effizienzkriterien zwischen 0.97 und 0.99, die eine annähernde Identität des angepassten Prozesses mit dem gemessenen Prozess anzeigten. Ferner zeigte die Diagnose von generierten Reihen der schnellen Komponente gegenüber der ‘gemessenen’ schnellen Komponente, dass die statistischen Eigenschaften deutlich besser wiedergegeben wurden als bei der Anwendung des Treiber-Modells auf den Gesamt-abfluss. Auch variierten die Eigenschaften der Simulationsläufen wesentlich schwächer. Die für die Modellierung des Gesamt-abflusses mit dem Treiber-Modell genannten Probleme wurden reduziert oder beseitigt.

Diese Tatsachen verdeutlichten, dass eine Modellstruktur mit den drei genannten Abflusskomponenten, für die nach den beschriebenen Analysen auch bereits Anhaltspunkte für die Modellparameter vorliegen, weitgehend dem Abflussprozess der Elbe entspricht und daher die grundlegende Struktur für ein Simulationsmodell bilden kann.

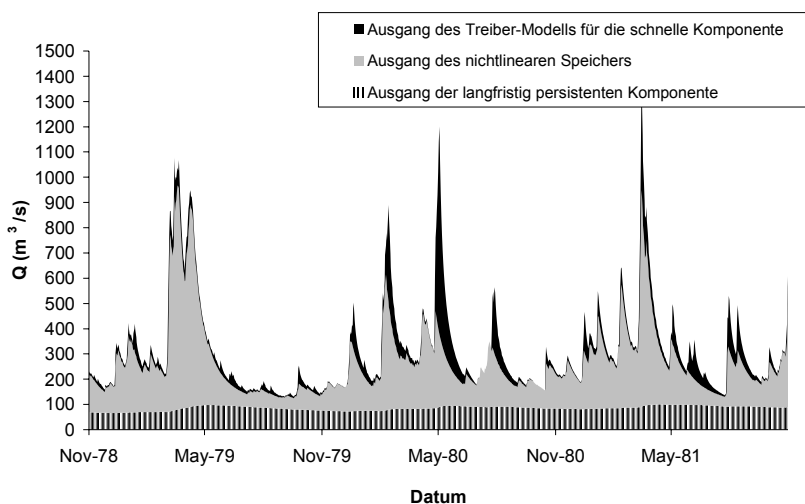


Abb. III-1.38 Simulierte Ausgänge des Treiber-Modells für eine schnelle Abflusskomponente nach Abtrennung zweier Basisabflusskomponenten in einem Ganglinienausschnitt des Zwischengebiets ‘Dresden-Barby’.

Für die Entwicklung einer solchen komponentendifferenzierten Modellstruktur auf Basis des Treiber-Ansatzes wäre es jedoch erforderlich, dass Impulse zur Simulation der schnellen Komponente und der Komponente des Nichtlinearen Speichers einen stärkeren Zusammenhang aufweisen. Dies konnte durch Kreuzkorrelationsanalysen, sowie durch Plots von – auch zeitverschobenen und zeitlich aggregierten – Impulswertepaaren nicht festgestellt werden. Damit sind die Möglichkeiten auf Basis des Treiber-Modells begrenzt.

### **B. Räumliche Differenzierung des Treiber-Modells für das Elbe-Einzugsgebiet nach dem Ansatz von KRON**

In dem bereits erwähnten, auf dem Treiber-Modell basierenden *Ansatz von KRON (1996)* werden die Impulsreihen der Modellanpassung von zwei Gebieten bzw. Pegeln auf ihre gegenseitigen Abhängigkeiten untersucht. Einer der beiden Pegel wird als abhängiger Pegel gewählt, der andere als unabhängiger Pegel. Die Generierung für den unabhängigen Pegel erfolgt mit dem Treiber-Modell. Mit Hilfe der hier erhaltenen Impulsreihe und den ermittelten Abhängigkeitsstrukturen beider Impulsreihen können anschließend Impulsreihen für den abhängigen Pegel generiert werden. Die Vorgehensweise beruht auf einem bedingten Wahrscheinlichkeits-Konzept, bei dem monatsdifferenziert die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Impulses am abhängigen Pegel, abhängig von dem Impulsauftreten am Vortag des gleichen Pegels und vom Impulsauftreten und der Impulshöhe des gleichen Tages am unabhängigen Pegel bestimmt wird. Die Impulshöhen der beiden Pegel werden dann mit einer - für beide Pegel identischen - Serie von Zufallszahlen generiert. Eine detailliertere Schilderung der Vorgehensweise findet sich in KRON (1996, S. 55-73). Für eine *physikalische Begründbarkeit dieses Konzepts* ist eine *hohe und zeitlich scharfe Korrelation von Reihen der Impulse und des Impulsauftretens vorauszusetzen*, d.h. ein möglichst gleichzeitiges Auftreten von Impulsen ähnlicher Höhe oder zumindest ein eindeutiges, zeitlich nicht zu langes Vorlaufen der Impulse des einen (unabhängigen) Pegels.

Daher wurden zunächst die für die o. g. Teilgebiete in den Kalibrierungen des Treiber-Modells ermittelten *Impulsreihen auf ihre gegenseitigen Abhängigkeitsstrukturen hin untersucht*. Hierfür wurden

Kreuzkorrelationsanalysen für die Wertepaare der Impulsreihen von je zwei Teilgebieten erstellt (siehe Abb. III-1.39), sowie – um auch nichtlineare Beziehungen identifizieren zu können – entsprechende Plots der gegeneinander aufgetragenen Wertepaare (mit Berücksichtigung der Zeitverschiebung des jeweils maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten). Neben der pauschalen Betrachtung wurden auch Jahreszeiten, zeitliche Aggregationen der Impulse, sowie verschiedene Steuerungsmodi des Treiber-Modells (mit mehr großen und weniger kleinen Impulsen) differenziert betrachtet. Ferner wurden klassierte Impulswertepaare gegeneinander aufgetragen, und es wurde – in bezug auf die nominalskalierte Zufallsvariable des Impulsauftretens (Auftreten oder Nichtauftreten) - ein Unabhängigkeitstest mit einer  $\chi^2$ -verteilten Teststatistik (zum Vgl. HARTUNG ET AL. 1991, S. 413) durchgeführt.

Bei diesen Analysen ergaben sich jedoch *unscharfe Zusammenhänge*, jeweils über eine *Dauer von mehreren Tagen und nur in begrenzter Stärke*. Auch die differenzierten Betrachtungen konnten kaum Ursachen der auftretenden Streuungen erklären. Meist liegt der maximale Zusammenhang bei Gleichzeitigkeit vor, teilweise auch bei geringen Zeitversätzen. Angesichts der Mehrtägigkeit der Zusammenhänge kann jedoch nicht von eindeutigen Vorläufen der Impulse eines Gebiets gegenüber den Impulsen des jeweils anderen Gebiets gesprochen werden. So zeigt beispielsweise Abb. III-1.39 für die maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten Werte zwischen 0.26 und 0.39. Die Zeitbereiche unscharfer Zusammenhänge erstrecken sich über 6-7 Tage mit Kreuzkorrelationskoeffizienten über 0,1. Somit wurde gezeigt, dass die Voraussetzungen für die begründete Anwendung des Ansatzes von Kron im Elbe-Einzugsgebiet nicht gegeben sind.

So führten auch *Modellanwendungen* für die o.g. Teilgebiete zu *Parameterunsicherheiten*, zu *Korrelationsverlusten* zwischen simultan simulierten Reihenpaaren im Vergleich zu den entsprechenden gemessenen Reihenpaaren, sowie zu einer *höheren Variabilität der statistischen Eigenschaften von simultan und räumlich differenziert simulierten Ganglinien* im Vergleich zu räumlich nicht differenziert simulierten Ganglinien. Diese Probleme stehen einer Eignung des Modells im Elbe-Einzugsgebiet entgegen.

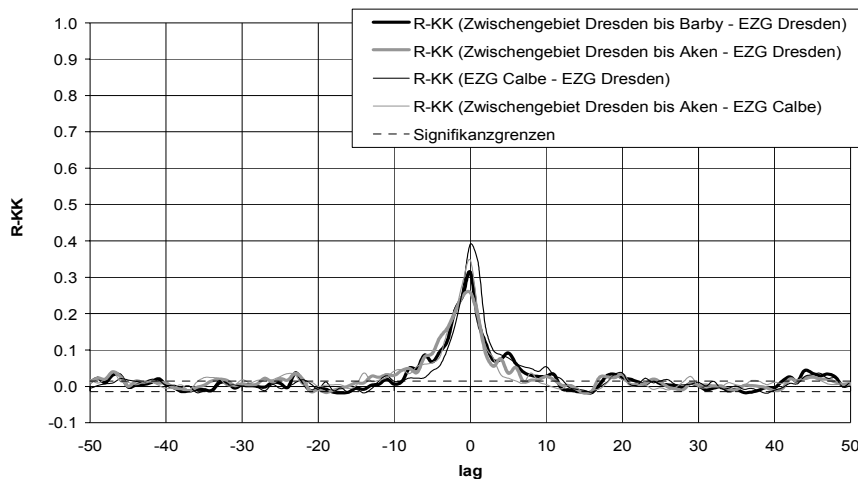


Abb. III-1.39 Kreuzkorrelationsfunktionen (R-KK) der Impulsreihen verschiedener Teilgebiete des Elbe-Einzugsgebiets in verschiedenen Gegenüberstellungen.

Interessant ist die Tatsache, dass die Zusammenhänge zwischen den beiden verfügbaren Gebietsniederschlagsreihen (deutsches Elbe-Einzugsgebiet oberhalb und unterhalb der Saale-Mündung) deutlich höher (maximaler Kreuzkorrelationskoeffizient: 0,67) und zeitlich schärfer ausgeprägt sind (5 Tage mit Kreuzkorrelationskoeffizienten über 0.1), auch wenn bereits hier eine über mehrere Tage verteilte Unschärfe im Zusammenhang festzustellen war. Diese Unschärfe nimmt offenbar beim Übergang der Gebietsniederschläge zu den von unterschiedlichen Gebiets-eigenschaften und Gebietszuständen abhängigen Impulsen zu (zum Vgl. auch Abschnitt C). Ungünstig wirkt das *Problem der Prozessaggregation*: die Reduzierung eines ganzen Prozesskomplexes auf Impulse. Da zwischen den Gebietsniederschlagsreihen – näher am Prozessursprung – deutlich schärfere Beziehungen beobachtet werden konnten, schien eine Erfassung der raumzeitlichen Zusammenhänge über die räumliche Verteilung des Niederschlagsgeschehens geeigneter. Sollte die Simulation von Abflussreihen dabei auf Basis des Treiber-Modells erfolgen, so waren deutliche, d.h. hohe und zeitlich scharfe Zusammenhänge zwischen Gebietsniederschlagsreihen und Impulsreihen vorauszusetzen.

### C. Beziehungen zwischen Gebietsniederschlägen und Impulsen des Treiber-Modells

Wie am Ende des vorangehenden Abschnitts in bezug auf eine räumliche Differenzierung bereits angesprochen, sowie in bezug auf eine physikalische Fundierung der Impulse des Treiber-Modells war die *Untersuchung von Beziehungen zwischen Gebiets-*

*niederschlagsreihen und entsprechenden Reihen von kalibrierten Impulsen von großer Bedeutung.* Diese Untersuchung wurde *anhand des Zwischengebiets der Pegel Dresden und Barby* durchgeführt, für das neben Impulsreihen auch Gebietsniederschlagsreihen für annähernd das gleiche Gebiet vorlagen. Der Zusammenhang zwischen diesen Reihen wurde durch die Anwendung der gleichen Methoden wie im vorangehenden Abschnitt untersucht (Kreuzkorrelationsanalyse, Plots von Wertepaaren, Unabhängigkeitstest für die nominalskalierte Variable). Da es sich bei den Impulsen um abflusswirksame Größen handelt, wurden neben den pauschalen Gebietsniederschlägen auch um konstante Verlustraten reduzierte Gebietsniederschläge in die Analysen einbezogen. Die Analysen wurden auch nach Jahreszeiten (Sommer-Winter), Großwetterlagen (zum Zeitpunkt des Gebietsniederschlagswertes; insbesondere die Großwetterlagen mit den höchsten Gesamtniederschlagsmengen), Abflussniveaus des Vortages des Impulses (fünf Stufen) und Abflusskomponenten (schnelle Komponente - Komponente des Nicht-linearen Speichers) differenziert durchgeführt. Um die fehlende Anstiegsphase in der variablen Systemfunktion des Treiber-Modells, sowie die Beobachtung wesentlich geringerer Anzahlen der Tage mit Impulsaufreten als Anzahlen der Tage mit auftretendem Gebietsniederschlag auszugleichen, wurde der tägliche Zeitschritt zu solchen von 2, 3, 4, 5, 10 und 20 Tagen aggregiert.

Die identifizierbaren *Zusammenhänge sind typischerweise nur von begrenzter Stärke und weisen, ähnlich wie die Impulsreihenpaare im vorangegangenen Abschnitt, eine über mehrere Tage verteilte Unschärfe auf.* So zeigt in Abb. III-1.40.a die Kreuz-

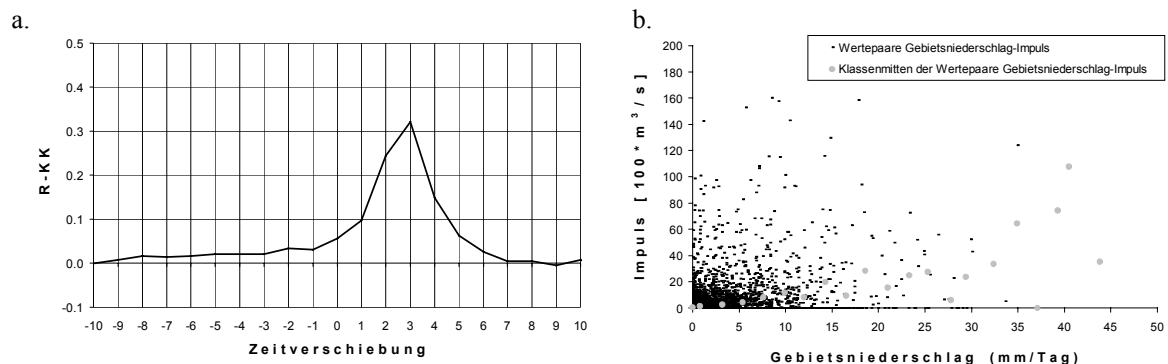
korrelationsfunktion für die Gebietsniederschlagsreihen und die Impulsreihen ohne weitere Differenzierung einen maximalen Koeffizienten von nur 0,32 bei einer Zeitverschiebung von drei Tagen. Auch in den Plots der bei Berücksichtigung dieser Zeitverschiebung gegeneinander aufgetragenen Wertepaare konnte kein deutlicherer (auch kein nichtlinearer) Zusammenhang erkannt werden (siehe Abb. III-1.40.b.). Durch die Aggregation des Zeitschritts konnte eine gewisse Zunahme des Zusammenhangs erreicht werden, jedoch nur bis zu einem maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten von 0,47. Nach den Differenzierungen nach Jahreszeit, nach Abflusskomponenten und nach Abflussniveaus des Vortages konnten keine weiteren wesentlichen Zunahmen in der Stärke der Zusammenhänge festgestellt werden. Stärkere Zusammenhänge konnten lediglich für einzelne der untersuchten Großwetterlagen festgestellt werden, mit einem maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten von 0,75 bei der Großwetterlage ‚Tief Mitteleuropa‘ bei einem 3-Tages-Zeitschritt, sowie mit entsprechenden Streuungen in den Plots der gegeneinander aufgetragenen Wertepaare. Auch in kombinierten Kriterien der Differenzierung (z.B. Großwetterlage und Abflussniveau des Vortages) ergaben sich keine systematisch erhöhten Zusammenhänge.

Lediglich nach einer Klassierung der Wertepaare in 20 Klassen gleicher Intervalllänge der Gebietsniederschlagshöhen und Auftragung der Klassenmittelwerte der Impuls- und der Gebietsniederschlagswerte gegeneinander, wie z.B. in Abb. III-1.40.b., deuteten sich – v.a. in den zeitlich aggregierten Reihen – plausible Zusammenhänge an. Diese sind jedoch kaum in Form eines modifizierten Treiber-Modells nutzbar, da die Mittelung der Varia-

bilität zu Abweichungen der über diese mittlere Beziehung simulierten Abflüsse von den gemessenen Abflüssen führen würde.

Als Gründe für die nur begrenzten und zeitlich unscharfen Zusammenhänge zwischen Gebietsniederschlags- und Impulswerten kann v.a. die beobachtbare und durch die Zunahme der Zusammenhänge infolge zeitlicher Aggregation bestätigte Tatsache angesehen werden, dass die *in den großen Einzugsgebieten zu Abflussereignissen gehörigen mehrtägige Niederschlagsereignisse* bei allen Steuerungsmodi des Modells *auf vergleichsweise wenige Impulse reduziert* werden. Das für Abflussereignisse entscheidende mehrtägige und komplexe Wechselspiel zwischen Gebietszustand und der Eingangsgröße Gebietsniederschlag wird dabei offenbar nicht erfasst. Hinzu kommt hierbei der o.g. Kritikpunkt der fehlenden Anstiegsphase in der variablen Systemfunktion. Die Tatsache, dass das Modell mit relativ wenigen größeren Impulsen eine nahezu gleichwertige Anpassung an gemessene Ganglinien erlaubt wie mit relativ vielen kleineren Impulsen, zeigt den begrenzten Gehalt an begründbarer Information in der zeitlichen Lage und der Höhe der Impulse innerhalb dieser mehrtägigen Phasen.

Hinzu kommen die *nichtlinearen Eigenschaften der vom Niederschlag ausgehenden hydrologischen Prozesse*, insbesondere der Transformationsprozesse bei der Abflussbildung mit Effekten der Raum-, Zeit- und Zustandsvarianz. In diesem Zusammenhang wurde oben bereits das im Treiber-Modell verwandte Zustandsmaß kritisch betrachtet. Es resultiert eine weitere Zunahme der Unschärfe in der Beziehung zwischen Gebietsniederschlagswerten und Treiber-Impulsen.



**Abb. III-1.40** Analyse der Abhängigkeitsstruktur zwischen Reihen der täglichen Gebietsniederschläge und der Impulse des Treiber-Modells für das Zwischengebiet der Pegel Dresden und Barby durch a.: eine Kreuzkorrelationsanalyse (R-KK: Kreuzkorrelationskoeffizient); b.: einen Plot der gegenübergestellten nichtklassifizierten/klassifizierten Wertepaare bei Berücksichtigung der Zeitverschiebung des maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten.

Schließlich ist die im Elbe-Einzugsgebiet bedeutende *nivale Komponente* im Niederschlag-Abfluss-Geschehen zu nennen, die sich auf eindeutige Gebietsniederschlag-Impuls-Zusammenhänge abschwächend auswirkt.

Aus dieser Unschärfe zwischen Gebietsniederschlags- und Impulsreihen wird auch die im vorangegangenen Abschnitt festgestellte Zunahme in den Unschärfen zwischen den Impulsreihen zweier Gebiete gegenüber den Unschärfen zwischen Gebietsniederschlagsreihen deutlich.

### **Bewertung des stochastischen Modells nach Treiber in bezug auf das Elbe-Einzugsgebiet: Möglichkeiten, Grenzen und Perspektiven**

Das stochastische Modell nach Treiber ist ein wertvolles Instrument für Simulationen von Abflussganglinien und für daran knüpfbare Aussagen in großen Teilgebieten des Elbe-Einzugsgebiets, deren modellhafte Erfassung für die Simulation der Abflussreihen des Gesamteinzugsgebiets der Elbe im Hinblick auf den Korrelationsverlust bei Reihen kleinerer Teilgebiete erforderlich ist (zum Vergleich Kapitel III-1.6.5.2). Dabei erhält das Treiber-Modell in diesem Skalenbereich seine Qualität gegenüber anderen Simulationsmodellen v.a. hinsichtlich großer Unsicherheiten bei Prozessen des Niederschlags- und der Abflussbildung, die im Treiber-Modell in Form von fiktiven Impulsen umgangen werden können. In seiner aktuellen Form ist das *Treiber-Modell in der Lage, solche Ganglinien im Gebiet oberhalb des Pegels Barby entsprechend der historischen Situation der Reihe 1964-1995 statistisch weitgehend zu Messreihen äquivalent zu simulieren.*

Damit eröffnet das Treiber-Modell verschiedene *Möglichkeiten*:

Der Vorteil der simulierten Reihen gegenüber den gemessenen Reihen liegt insbesondere in ihrer *beliebigen Verlängerbarkeit* bzw. der *Möglichkeit, eine beliebige Anzahl von Reihen einer bestimmten Länge zu erzeugen*. Dies ermöglicht weiterhin die *bessere Einschätzung der Repräsentativität der vorliegenden Messreihen*. Beispielsweise kann festgestellt werden, ob gemessene Reihen vor 1964 sich in ihren statistischen Eigenschaften nicht nur von der Messreihe 1964-1995, sondern auch von einer Vielzahl von Simulationsläufen des an die Reihe 1964-1995 angepassten Treiber-Modells signifikant

unterscheiden. Somit können auch veränderte Abflusssituationen besser und begründeter eingeschätzt werden (zum Vergleich Kapitel III-1.6.6.2).

Ferner können auf Basis beliebig langer bzw. vieler Reihen *verbesserte Aussagen über die Wahrscheinlichkeit interessierender – auch sehr geringwahrscheinlicher – Abflussereignisse* getroffen werden. Diese Abflussereignisse können *auch komplexerer Natur* sein als z.B. die im Kapitel III-1.6.3.4 analysierten Scheitelwerte. So kann z.B. die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines extremen Hochwasser- und eines extremen Niedrigwasserereignisses innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls eingeschätzt werden, womit der in seltenen Extremsituationen vom Gewässer auf die Aue wirkende Stress unter mehreren Aspekten untersucht werden kann.

Diese Simulationen sind *für einzelne Punkte (Messstellen)* entlang der Elbe möglich. Diesbezüglich sind die *Pegelpositionen günstig*, da sie die verschiedenen Stromabschnitte weitgehend repräsentieren. Um Simulationen jeweils auch an beliebigen Stellen unterhalb dieser Punkte durchführen zu können, ist – bei nicht allzu großer Einzugsgebietsdifferenz – das *Ganglinien-Routing* ein geeignetes weiteres, zu kombinierendes Instrument.

Noch vorhandene *Defizite* – sowie *Hinweise zur Weiterentwicklung einer für die Elbe geeigneten Simulationstechnik* – ließen sich aus der genannten umfassenden Diagnose der generierten Ganglinien identifizieren und aus theoretischen Überlegungen herleiten. Bei den hydrologischen Verhältnissen im Elbe-Einzugsgebiet ergibt sich die *Notwendigkeit einer weiteren, physikalisch fundierteren Modellentwicklung*, insbesondere mit dem Ziel einer verbesserten Repräsentation der natürlichen Prozesse und Zusammenhänge. Anzuvisieren ist damit eine prognostische Modellanwendung in Szenarien unter veränderten (Klima-) Bedingungen. Wichtige *Aspekte* sind dabei die *räumliche Differenzierung des hydrologischen Prozessgeschehens, die Komponentendifferenzierung des Abflusses und die Einführung von Gebietsniederschlägen*.

Unter diesen Aspekten wurde die Machbarkeit einer Weiterentwicklung einer für das Elbe-Einzugsgebiet geeigneten, physikalisch fundierteren Simulationsmethodik auf Basis des Treiber-Modells untersucht. Dabei traten Probleme auf, insbesondere da die Impulse nicht in der Lage sind, das komplexe,

mehrtägige Wechselspiel der Niederschlag-Abflussprozesse zu erfassen. Dies führt in den betrachteten großen Teilgebieten der Elbe zu Unschärfen zwischen den Impulsen verschiedener Abflusskomponenten und den Impulsen verschiedener Teilgebiete, sowie zwischen Impulsen und Gebietsniederschlägen.

Es lässt sich folgern, dass eine *fundiertere Simulationstechnik konzeptionelle Strukturen benötigt, bei deren Umsetzung eine Weiterentwicklung auf Basis des Treiber-Modells ungünstig ist*. Insbesondere ist eine weitere Prozessdisaggregation notwendig. Die Entwicklung eines neuen Simulationsinstruments ist Gegenstand der laufenden Forschung (siehe HELMS & IHRINGER 2000). Gerade im Hinblick auf die im Skalenbereich des Elbe-Einzugsgebiets vorhandenen großen Unsicherheiten bei der Erfassung der hydrologischen Prozesse kann das *Treiber-Modell hilfreich* sein

- durch die Hinweise aus seinen diagnostizierten Defiziten,
- zu Referenzzwecken, beispielsweise können die Impulse im Rahmen der untersuchten Möglichkeiten eine gewisse Information über die Abflusswirksamkeiten in aggregierten Zeitschritten liefern,
- als diagnostisches Hilfsmittel, wie beispielsweise in Abschnitt A, in dem die Eignung und gleichzeitig sinnvolle Parameterbereiche von Abflusskomponenten untersucht wurden.

Bis zum Zeitpunkt der Fertigstellung einer fundierteren Simulationstechnik kann das *Treiber-Modell*, das zur Simulation entsprechend der gemessenen historischen Situation kaum zu übertreffen sein wird, *in den genannten Grenzen eingesetzt werden*, um für die aktuelle Forschung an der Elbe bereits eine *Vielzahl von Aussagen* zu ermöglichen, beispielsweise im Rahmen des Forschungsverbundes 'Elbe-Ökologie'. Trotz der Schwierigkeiten bei der physikalischen Fundierung zeigt sich das *Treiber-Modell zusammen mit einer detaillierten Diagnostik* in der Lage, die statistischen Eigenschaften, sowie deren Variabilität, differenziert nach Monaten, Abflusskennwerten und Abflussniveaus bzw. Auftretenshäufigkeiten zu untersuchen. Hieraus können *nach einer häufig möglichen hydrologischen Interpretation Rückschlüsse gezogen werden*, wie beispielsweise in Kapitel III-1.6.6.2 bezüglich signifikanter

Unterschiede in den Hochwasserverhältnissen verschiedener Teilreihen (zum Vergleich auch obige Ausführungen zur Einschätzung der Repräsentativität von Messreihen).

### III-1.6.6 Erweiterte Stationaritätsanalysen durch Anwendung hydrologischer Simulationen

Nach der Entwicklung von plausiblen Abflussstatistiken und erprobten hydrologischen Simulationsinstrumenten anhand des im Hinblick auf Datenvollständigkeit, Datenverlässlichkeit und Homogenität vergleichsweise abgesicherten jüngeren Zeitraums 1964-1995 konnte dieses *verbesserte Verständnis der Abflussprozesse genutzt* werden. So konnten die räumlichen Muster der Abflussstatistiken für den Ist-Zustand als Referenz und die - ggf. um Zusatzmodule ergänzten - Simulationsinstrumente als Hilfsmittel *für die detailliertere, umfassendere und v.a. zeitlich weiter zurückreichenden Untersuchung des Abflussprozesses genutzt* werden. Dies umfasste eine *erweiterte Konsistenzanalyse*, eine - in diesem Kapitel behandelte - *erweiterte Stationaritätsanalyse*, die Trennung der Effekte von Inkonsistenz und Instationarität bzw. Inhomogenität, die Entwicklung längerfristigerer Abflussstatistiken, sowie die Entwicklung erweiterter, verallgemeinerter Simulationsinstrumente.

Die erweiterte Konsistenzanalyse im Zeitraum vor den 1960er Jahren gestaltete sich schwierig, da die vorliegende Datenbasis zunächst nicht ausreichte, durch einen räumlichen Abgleich oder durch Anwendung der Simulationsinstrumente die nicht systematischen und zu vorab unbekanntem Zeitpunkt auftretenden Inkonsistenzeffekte zu identifizieren und quantifizieren. Zudem konnte nach den Kapiteln III-1.2 und III-1.6.2 davon ausgegangen werden, dass Inkonsistenzeffekte von Instationaritäts- bzw. Inhomogenitätseffekten mit mehr oder weniger bekannten möglichen Ursachen und Zeiträumen überlagert wurden. Von evidenten Fällen der Inkonsistenz abgesehen wurde daher das Problem der erweiterten Inkonsistenzanalyse zunächst zurückgestellt und die *erweiterte Stationaritätsanalyse vorgezogen, um Inkonsistenzen später besser begründen und v.a. von Instationaritätseffekten trennen zu können*.

Die Feststellung von Abflussveränderungen durch eine erweiterte Stationaritätsanalyse war von Interesse, da sie gegenüber der einfacheren Stationaritätsanalyse des Kapitels III-1.6.2 die Effekte detaillierter erfasste und damit besser begründete Rückschlüsse auf ihre Ursachen erlaubte. Somit konnte die erweiterte Stationaritätsanalyse auch zu einer besser begründeten Abgrenzung repräsentativer Zeiträume bzw. Zustände beitragen. Ferner gab sie wertvolle Hinweise zur modellmäßigen Erfassung der Instationaritätseffekte, die eine Rekonstruktion historischer Abflussereignisse erlaubte und somit zur Erfassung und Bereinigung von Inkonsistenzeffekten, zur Ergänzung der Datenbasis, zur Entwicklung längerfristiger, verlässlicher Statistiken und gleichzeitig zur Verallgemeinerung der Simulationsinstrumente notwendig war (siehe Kapitel III-1.6.7 und III-1.6.8).

Bei der erweiterten Stationaritätsanalyse wurde *im Prinzip wie folgt vorgegangen*:

- Zunächst erfolgte nach den einfachen Stationaritätsanalysen des Kapitels III-1.6.2 und den statistischen Analysen des Zeitraums 1964-1995 im Hinblick auf das v.a. interessierende Hochwassergeschehen eine Auswahl und Einordnung von Abflussereignissen bzw. Abflussniveaus, Räumen und Zeiträumen von besonderer Relevanz, auf die in den nachfolgenden Simulationen das Augenmerk zu lenken war.
- Anschließend erfolgte die Anwendung der für einen Zeitraum (z.B. 1964-1995) kalibrierten Simulationsmodelle auf Zeiträume mit veränderten Bedingungen (z.B. vor den Deichbauten und Talsperreanordnungen) und der Vergleich der simulierten Ausgänge mit den historisch gemessenen Abflussreihen im Rahmen einer geeigneten Diagnostik. Die feststellbaren Unterschiede erlaubten häufig eine Interpretation und somit Rückschlüsse auf Ursachen, die u.U. später durch entsprechende Modifikationen in den Modellparametern oder im Modellaufbau berücksichtigt werden konnten (siehe z.B. Kapitel III-1.6.7).

In diesem Sinne wurden *unter zwei Aspekten*, unter denen Abflussveränderungen in der Elbe während des 19. und 20. Jahrhunderts angenommen werden konnten, Simulationen zur erweiterten Stationaritätsanalyse durchgeführt:

- Anwendung des für den Ist-Zustand kalibrierten Modells ELBA zum Ganglinien-Routing im Stromabschnitt zwischen den Pegeln Barby und Wittenberge, für den nach den Eindeichungen an der Karthane 1981 und v.a. an der Havelmündung 1956 veränderte Verhältnisse beim Ablauf von Hochwasserwellen angenommen werden konnten (siehe Kapitel III-1.6.6.1).
- Vergleich der gemessenen Reihen von einer Teilreihe mit einer Vielzahl von Simulationsläufen des Treiber-Modells, das anhand einer anderen Teilreihe unter anderen Bedingungen (Klimaänderung, Talsperreinfluss - zum Vergleich Kapitel III-1.2) kalibriert wurde, nach der in Kapitel III-1.6.5.3 beschriebenen Diagnostik (siehe Kapitel III-1.6.6.2).

### **III-1.6.6.1 Untersuchung von Veränderungen im Hochwasserablauf im Bereich der unteren Mittelelbe in Folge von Eindeichungen im 20. Jahrhundert.**

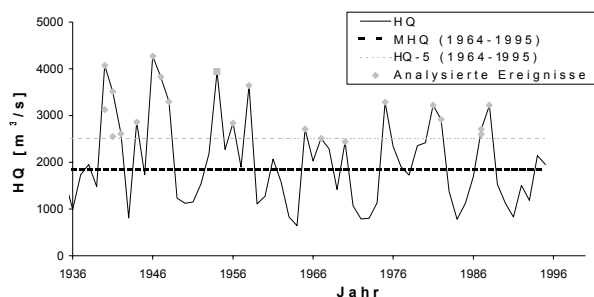
Die in diesem Kapitel dargestellten Untersuchungen wurden im Rahmen einer Studienarbeit am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe durchgeführt (HEILIG 2000).

Im *heutigen Zustand ist die Elbe* in diesem Bereich abgesehen von einigen Hochuferabschnitten und einigen Ortslagen mit Ufermauern *durchgehend eingedeicht* (IKSE 1996a, S. 14). Wie in Kapitel III-1.2.2 dargestellt, fand jedoch mit den Maßnahmen an der Havelmündung und den stromabwärts gelegenen Nebenflussmündungen ein *bedeutender Anteil dieser Eindeichungen erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts* statt. Es konnte davon ausgegangen werden, dass der einhergehende *Retentionsflächenentzug zu einer Beschleunigung im Ablauf der Hochwasserereignisse und unterstrom zur Erhöhung der Abflussscheitel geführt hat*. Hervorzuheben sind die Maßnahmen an der Havelmündung, an der es seit der Fertigstellung des Wehres Neuwerben im Jahr 1956 zum größten Verlust an Retentionspotential kam. Es wurde daher der *Stromabschnitt zwischen den Pegeln Barby und Wittenberge* gewählt, um diesen Effekt, zusammen mit dem Effekt der Eindeichungen im Zuge der Komplexmeliorationsmaßnahme Karthane im Jahr 1981 zu untersuchen. Nach diesem ersten wichtigen Untersuchungsschritt der *Identifikation einheitlicher*



*Zeiträume der historischen Deichungssituation* stellte sich die Frage, wie Hochwasserereignisse vor den Eindeichungen in diesem Stromabschnitt unter heutigen Bedingungen abgelaufen wären, insbesondere die großen Hochwasserereignisse der 1940er/50er Jahre. Für diese Betrachtung wurden für den Zeitraum ab 1936 alle *Hochwasserereignisse ausgewählt*, die den HQ-5 der Reihe 1964-1995 des Pegels Barby überstiegen (zum Vgl. Abb. III-1.41). Das Hochwasserereignis 1970 lag nur knapp unter dem HQ-5 und wurde daher – neben 20 anderen Ereignissen – in die Betrachtung eingeschlossen.

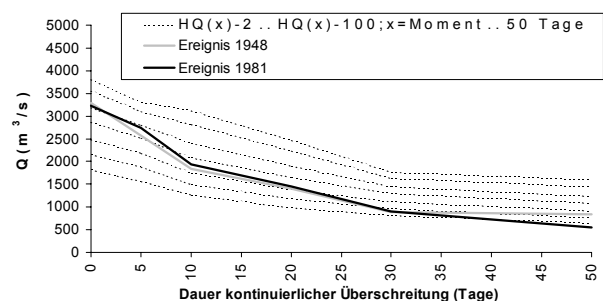
Es ist anzumerken, dass gemäß der Richtlinie für die Steuerung der Wehrgruppe Quitzöbel (STAU 1997) eine Entlastung des Elbe-Hochwasserscheitels in den Havelbereich erst ab einem Wasserstand von 725 cm am Pegel Wittenberge durchgeführt wird. Dies entspricht etwa einem Abfluss von  $3700 \text{ m}^3/\text{s}$ , der nach einem Routing vom Pegel Barby zum Pegel Wittenberge nach heutigen Verhältnissen bei den größten Ereignissen selbst bei der Annahme, dass der gesamte Havelabfluss während des Routings an der Havelmündung zu addieren ist, kaum erreicht wird. Lediglich beim Ereignis 1947 wurde so ein Abfluss von  $3720 \text{ m}^3/\text{s}$  erreicht, bei der Annahme, dass – aufgrund von Rückstau – kein Havelabfluss in die Elbe gelangt jedoch nur einen Abfluss von  $3465 \text{ m}^3/\text{s}$ . Somit konnte für alle betrachteten Ereignisse davon ausgegangen werden, dass die Wehre an der Havelmündung unter Verschluss gehalten worden wären.



**Abb. III-1.41** Scheitelwerte der analysierten Hochwasserereignisse gegenüber den maximalen Scheitelwerten der Jahre 1936-1995 des Pegels Barby und dessen statistischen Kennwerten aus der Reihe 1964-1995.

Die ausgewählten *Hochwasserereignisse* wurden nach verschiedenen Kriterien klassifiziert. Dabei wurden Ereignisse je nach ihrem Auftrittszeitpunkt (vor oder nach den Deichungsmaßnahmen), nach der Höhe ihres Scheitels (Tagesmittel) am Pegel Barby

(kleiner oder größer  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und nach ihrer Ereignischarakteristik am Pegel Barby (länger und kürzer anhaltende Ereignisse) unterteilt. Zur objektiven Einordnung nach der Ereignisform dienen Diagramme wie in Abb. III-1.42, in denen, wie im Kapitel III-1.6.1, die Abflusswerte gegenüber ihrer kontinuierlichen Überschreitungsdauer aufgetragen wurden. Mit solchen Diagrammen wurden – vor dem Hintergrund der Abflussstatistik – die Ereignisse in ihrer Charakteristik vergleichbar. Weitergehend wurden Plots der maximalen Scheitelwerte gegenüber verschiedenen Mehrtageswerten erstellt und die Gruppierung der Wertepaare beobachtet. Neben dem anhand der Verteilung der Ereignisscheitelwerte gewählten Wert von  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$  zur Unterscheidung kleinerer und größerer Ereignisse wurde insbesondere der 20-Tageswert von  $1250 \text{ m}^3/\text{s}$  entsprechend etwa dem Ausuferungsabfluss an der Havelmündung gewählt um kürzer und länger andauernde Ereignisse zu unterscheiden. Die so beobachtete Gruppierung bestätigte sich weitgehend auch bei der Auftragung der Scheitelwerte gegenüber den 30-Tageswerten, sowie – nach einer Verschiebung des Trennwerts von 1250 auf etwa  $1750 \text{ m}^3/\text{s}$  – auch für die Auftragung der Scheitelwerte gegenüber den 10-Tageswerten. Die in Abb. III-1.42 gezeigten Ereignisse 1947 und 1981 stellen in diesem Schema Sonderfälle dar, sie sind als mittelgroß und mittellang andauernd anzusprechen. Wegen ihrer in Abb. III-1.42 erkennbaren großen Ähnlichkeit am Pegel Barby sind sie als *Ereignispaar mit je einem Vertreter vor und nach den Deichbaumaßnahmen* jedoch besonders geeignet, um bereits anhand der entsprechenden am Pegel Wittenberge gemessenen Ganglinien den Effekt des verlorengegangenen Retentionsraums zu indizieren (siehe Abb. III-1.43).



**Abb. III-1.42** Ereignischarakteristiken (Abflusswert vs. Dauer kontinuierlicher Überschreitung) für die Hochwasserereignisse im Frühjahr 1948 und im Frühjahr 1981 am Pegel Barby gegenüber den Statistiken  $HQ(x)-T$  der Reihe 1964-1995 (Kap. III-1.6.3.4)

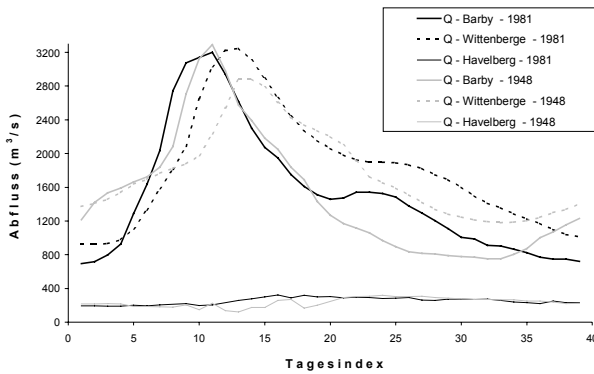


Abb. III-1.43 Abflussganglinien der Hochwasserereignisse im Frühjahr 1948 und im Frühjahr 1981 an den Pegeln Barby und Wittenberge.

Während beim Ereignis 1948 eine 12,5%-ige Scheiteldämpfung vom Pegel Barby zum Pegel Wittenberge erkennbar war, war für das Ereignis 1981 sogar eine leichte Scheitelzunahme um 1,5% festzustellen. Qualitativ entsprechende Beobachtungen konnten bei entsprechenden, nach ihrer Ähnlichkeit am Pegel Barby ausgewählten Ereignispaaren aus den verschiedenen Gruppen (klein und kurz; klein und lang; groß und kurz; groß und lang) gemacht werden. Erwartungsgemäß trat für die Ereignisse vor der Eindeichung ein stärkerer Dämpfungseffekt bei den kürzer andauernden Ereignissen auf (19,3 % beim kleineren Ereignis im Herbst 1940 mit einem Scheitelabfluss von 2553 m<sup>3</sup>/s am Pegel Barby bzw. 19,4 % beim großen Ereignis im Sommer 1954 mit einem Scheitelabfluss von 3939 m<sup>3</sup>/s) als bei den länger andauernden Ereignissen (13,9 % beim kleineren Ereignis im Frühjahr 1942 mit einem Scheitelabfluss von 2609 m<sup>3</sup>/s am Pegel Barby bzw. 14,8 % beim großen Ereignis im Frühjahr 1940 mit einem Scheitelabfluss von 4025 m<sup>3</sup>/s, wobei für letzteren Scheitelwert noch in Kapitel III-1.6.8 ein niedrigerer Wert kritisch zu diskutieren sein wird).

Auch wenn sich für jede der genannten Gruppen der klassifizierten Hochwasserereignisse Ereignispaare vor und nach den Eindeichungsmaßnahmen mit jeweils ähnlicher Charakteristik am Pegel Barby finden ließen, stellte doch *jedes Hochwasserereignis ein Individuum* dar, so dass eine genauere Quantifizierung des Effekts der Eindeichungen, z.B. im Sinne der Erstellung einer fiktiven Hochwasserstatistik unter der Annahme, dass die Eindeichungen bereits 1936 existierten (siehe Kapitel III-1.6.8.1), schwierig blieb. Zu diesem Zweck wurde nun das *Modell ELBA mit den für den heutigen Zustand kalibrierten Parametern*, das - z. B. nach Abb. III-

1.33.a.-g. – für die Hochwasserereignisse nach Fertigstellung der Eindeichungsmaßnahmen eine gute Annäherung an die real abgelaufenen Prozesse ermöglichte, herangezogen. *Die Hochwasserereignisse vor der Fertigstellung der Eindeichungen wurden mit diesem Modell und diesen Parametern zum Pegel Wittenberge geroutet und der Modellausgang mit den dort historisch gemessenen Ganglinien im Hinblick auf Unterschiede im Abflussscheitel und im Laufzeitverhalten verglichen.* Die Laufzeit wurde dabei durch die in bezug auf festgelegte Anfangs- und Endzeitpunkte der Ereignisse ermittelbaren Zeitpunkten (T-10, .., T-90) quantifiziert, zu denen 10, 25, 50, 75 und 90 % der Fülle der gesamten Hochwasserwelle abgeflossen waren, sowie durch den Zeitpunkt des Scheiteldurchlaufs T-Peak. Durch Zeitdifferenzen zwischen den Zeitpunkten (T-Diff-10, .., T-Diff-90, T-Diff-Peak) bei den gerouteten und gemessenen Ganglinien konnten dann Unterschiede im Laufzeitverhalten quantifiziert werden.

Bei dieser Vorgehensweise waren *zwei kritische Aspekte* zu beachten.

Zum einen war - so gut wie möglich - zu überprüfen, ob das Routing mit den heute gültigen Parametern auf der *Teilstrecke Barby-Magdeburg-Tangermünde* auch für die damaligen Zeiträume (vor 1964) angenommen werden konnte. Diese Überprüfung gestaltete sich jedoch wegen der im Kapitel III-1.5 dargestellten Unsicherheiten am Pegel Magdeburg, sowie dem Fehlen gemessener Abflussdaten am Pegel Tangermünde vor 1961 für die 12 vor 1964 gelegenen Ereignisse als schwierig. Es konnten lediglich die in Kapitel III-1.5 am Pegel Magdeburg mit der Abflusskurve der Umflutnutzung modifizierten, 'gemessenen' Abflussganglinien der Ereignisse als grober Anhaltspunkt herangezogen werden. Es zeigte sich jedoch, dass die mittleren Abweichungen der Scheitelwerte der gerouteten Ereignisse von denen der 'gemessenen' Ereignisse im Mittel nur etwa 5,4% (in bezug auf den Scheitel der 'gemessenen' Ganglinie) betrug und nur in 2 Fällen 10% überschritt (13,7% beim Ereignis des Frühjahrs 1942 und 15,7% beim Ereignis des Frühjahrs 1948). In diesen Fällen war die geroutete Ganglinie plausibler als die 'gemessene' Ganglinie. Auch im Gesamtverlauf stellten die gerouteten und 'gemessenen' Ganglinien gute Annäherungen dar. Somit konnten die über die Abflusskurve der Umflutnutzung modifizierten ('gemessenen') Abflussganglinien des Pegels Magde-

burg immerhin als Anhaltspunkt die Anwendbarkeit des Modells ELBA mit den heutigen Parametern in diesem Bereich bestätigen. Umgekehrt wurde durch das Routing die durchgeführte Modifikation der gemessenen Abflussreihen am Pegel Magdeburg bestätigt, auch wenn die modifizierten Reihen aufgrund der verbleibenden Unsicherheit Einschränkungen unterlagen.

Zum anderen hätte die *Havel* bei den damaligen Ereignissen unter heutigen Verhältnissen ein *anderes Abflussverhalten in die Elbe* gezeigt als damals. Diese Situationen waren schwer einschätzbar, da für diese Ereignisse keine Messreihen unter diesen Bedingungen vorlagen. Aus diesem Grund wurden bei den Simulationen dieser Arbeit zwei Situationen betrachtet, die zwar so nicht aufgetreten wären, jedoch die Bandbreite der möglichen Situationen abdecken. Bei der ersten Situation wurde für den Havelzufluss in die Elbe der damals am Pegel Havelberg gemessene Abfluss angenommen. Da dieser vor 1946 nicht verfügbar war, wurde der - gemäß STAU 1997 abgesehen von Elbhochwasserzeiten annehmbare - 1,2-fache Abfluss des weiter havelaufwärts gelegenen Pegels Rathenow verwendet. Diese Havelzuflüsse in die Elbe lagen wegen der aufgrund fehlender Retentionswirkung heute höheren Wasserstände der Elbe im Havelmündungsbereich, insbesondere bei größeren Hochwasserereignissen der Elbe, zu hoch. Bei der zweiten Situation wurde angenommen, dass bei Vollstau kein Havelwasser in die Elbe gelangt, was bei

kleineren Hochwasserereignissen der Elbe eine Unterschätzung darstellte. Durch die Berücksichtigung beider Möglichkeiten während des Routings vom Pegel Barby zum Pegel Wittenberge wurde eine Bandbreite der möglichen Abflussganglinien am Pegel Wittenberge erhalten, die gegenüber den damals gemessenen Ganglinien zu diagnostizieren war.

Abb. III-1.44 zeigt die so gerouteten Ganglinien gegenüber der gemessenen Ganglinie exemplarisch für das am Pegel Barby vergleichsweise große und kurz andauernde Hochwasserereignis des Sommers 1954. Die Scheiteldämpfung der damals gemessenen Ganglinie gegenüber der gerouteten Ganglinie beträgt je nach Annahmen über den Havel-Abfluss zwischen 8,6 und 10,2 % in bezug auf den Scheitel der gemessenen Ganglinie. Abgesehen von den Zeitpunkten der Abflussscheitel ließen sich durch die Parameter T-Diff-10 bis T-Diff-90 ein- bis viertägige Verzögerungen in der damals gemessenen Ganglinie gegenüber der gerouteten Ganglinie feststellen.

Bei den anderen betrachteten Ereignissen vor 1956 waren ebenfalls deutliche Scheiteldämpfungen der damals gemessenen Ganglinien gegenüber den gerouteten Ganglinien zu erkennen. Diese waren bei den vergleichsweise kleineren Ereignissen mit 12,3-19,1% beim kürzer andauernden Ereignis im Herbst 1940, sowie mit 8,9-18,4% bzw. 12,5-21 % bei den länger andauernden Ereignissen im Frühjahr 1942 bzw. im Frühjahr 1944 größer als bei dem in der Abbildung gezeigten Ereignis 1954, zumal hier eher

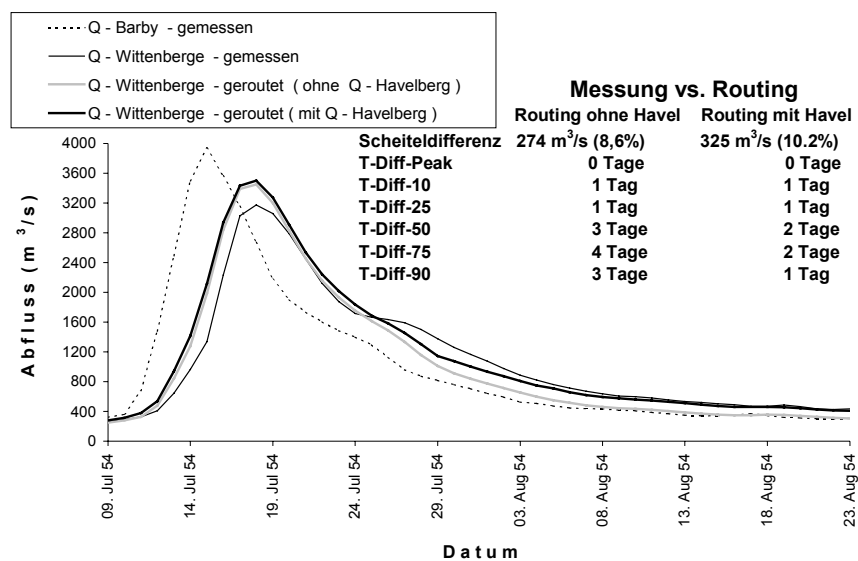


Abb. III-1.44 Vergleich der gemessenen Ganglinie des Hochwasserereignisses im Sommer 1954 am Pegel Wittenberge (sowie am Pegel Barby) mit den bei verschiedenen Annahmen über den Havelzufluss vom Pegel Barby zum Pegel Wittenberge gerouteten Ganglinien.

der jeweils höhere Wert angenommen werden konnte. Bei dem vergleichsweise großen und kürzer andauernden Ereignis im Winter 1939/40 lag die Scheiteldämpfung mit 6,5-14,7% in einem ähnlichen Bereich wie die des ebenfalls vergleichsweise großen und kürzer andauernden Ereignisses im Sommer 1954. Bei drei der vier vergleichsweise großen und länger andauernden Ereignissen im Frühjahr 1940, im Frühjahr 1941 und im Frühjahr 1947 lagen die Scheiteldämpfungen mit 3,8-4,2 %, 0,5-8,0% und 4,8-12,5% eher niedriger als bei dem Ereignis 1954, zumal jeweils eher der geringere Wert anzunehmen war. Eine Ausnahme davon stellte allerdings das ebenfalls vergleichsweise große und länger andauernde Ereignis im Frühjahr 1946 dar mit Scheiteldämpfungen von 20,2 – 26,5 %. Hierbei handelte es sich allerdings um ein Ereignis, das im Hinblick auf seine Konsistenz am Pegel Barby noch kritisch anzusprechen sein wird (siehe Kapitel III-1.6.8).

Desweiteren waren bei den anderen betrachteten Ereignissen vor 1956 durch die Parameter T-Diff, insbesondere T-Diff-50, T-Diff-75 und T-Diff-90 mehrtägige Unterschiede in der Laufzeit zwischen den damals gemessenen und den gerouteten Ereignissen zu verzeichnen.

**Die vor 1956 noch vorhandenen Retentionsräume hatten also im Vergleich zur heutigen Situation offenbar einen deutlichen Effekt der Scheiteldämpfung und Verzögerung im Ablauf der Hochwasserereignisse.** Erwartungsgemäß fiel dabei die Scheiteldämpfung i.d.R. bei vergleichsweise kleineren Elbe-Hochwasserereignissen (>HQ-5, jedoch < 3000 m<sup>3</sup>/s am Pegel Barby) stärker aus als bei den größten, sowie unter den größten Ereignissen bei den vergleichsweise kürzeren Ereignissen stärker als bei den länger andauernden Ereignissen.

Bei den *Ereignissen ab 1956* waren – abgesehen vom vergleichsweise großen und kurz andauernden Ereignis im Sommer 1958 mit 8,8-10,3% Scheiteldämpfung – *deutlich geringere Scheiteldämpfungen* zu verzeichnen. Die *Zeitverzögerungen* T-Diff fielen mit i.d.R. bis zu zwei Tagen *geringer* aus als bei den Ereignissen vor 1956. Diese Beobachtungen sprechen dafür, dass – neben der damals noch verfügbaren Retentionsfläche im Bereich der Karthane-Mündung - die *Havel zumindest nur noch teilweise für eine Entlastung der Elbe-Hochwässer genutzt* wurde.

*Ab dem Hochwasserereignis 1974/75 blieben die Abweichungen zwischen den Scheiteln der gemessenen und gerouteten Ganglinien in allen Fällen kleiner als 5 %, und die Zeitdifferenzen T-Diff betragen nur noch maximal einen Tag.* Somit konnte davon ausgegangen werden, dass in diesem Zeitraum *kaum mehr eine Entlastung der Elbe-Hochwässer in die Havel und in den Karthane-Bereich* erfolgte.

Inwieweit die beobachteten Inhomogenitäten auch quantitativ plausibel sind und nicht auf Inkonsistenzeffekten beruhen wird – anhand eines erweiterten Simulationsmodells und der Entwicklung eines längerfristigen Längsschnittes - in späteren Kapiteln (III-1.6.7, III-1.6.8) erörtert.

Die Entwicklung einer Statistik für den Zeitraum 1936-1995 unter Annahme des Szenarios, dass die Eindeichungen des Ist-Zustands bereits 1936 existierten, und damit die statistische Quantifizierung des Effekts der Eindeichungen im Vergleich zur Statistik der gemessenen Reihen findet sich in Kapitel III-1.6.8.1.

### III-1.6.6.2 **Erweiterte Stationaritätsanalysen durch Anwendung Modells nach Treiber auf Abflussreihen des Pegels Dresden**

Nachdem im Kapitel III-1.6.5.3 die gute Eignung des stochastischen Simulationsmodells nach Treiber zur Generierung von statistisch zu täglichen Abflussmessreihen der Elbe äquivalenten, künstlichen Reihen gezeigt wurde, wurde dieses Modell zusammen mit einer detaillierteren Diagnostik herangezogen, um die *Auswirkungen der in Kapitel III-1.2 beschriebenen, klimatologisch und anthropogen (Talsperreneinfluss) bedingten Entwicklungen auf den Abflussprozess weitergehend und aussagekräftiger zu untersuchen*, als es mit den in Kapitel III-1.2.6.2 beschriebenen Verfahren (z.B. Doppelsummenanalyse, Trendanalyse, statistische Tests) möglich war. Wie bereits in der Einleitung dieses Abschnitts angesprochen, konnten mit diesem Ansatz Veränderungen im Abflussprozess besser erkannt und gegenüber möglichen Ursachen interpretiert und bewertet werden. Dies erlaubte weitergehend eine bessere Begründung der Abgrenzung der für verschiedene Bedingungen repräsentativen Zeiträume bzw. Zustände, sowie künftig ggf. eine rechtzeitige Erkennung problematischer Entwick-

lungen (z.B. Hochwasserverschärfung durch veränderte Schneeschmelzsituationen, zum Vgl. s.u.). Diese Untersuchungen wurden *anhand des Pegels Dresden* durchgeführt, da er die längste verfügbare und verlässlichste Zeitreihe aufweist und sich die Talsperren- und Klimaeffekte an diesem Pegel besonders deutlich abzeichnen sollten (zum Vergleich Kapitel III-1.2.2). Die Betrachtungen konzentrierten sich insbesondere auf die *Hochwasserverhältnisse*.

Der **Grundgedanke** dieser Analyse war folgender:

Nach einer geeigneten Untergliederung der gesamten Abflussreihe in gleichlange Teilreihen (Stichproben gleichen Umfangs) mit unterschiedlichen Eigenschaften (siehe unten) wurde das Treiber-Modell für eine der beiden Teilreihen kalibriert.

Dies erlaubte die Generierung einer Vielzahl synthetischer Abflussreihen mit mehr oder weniger äquivalenten statistischen Eigenschaften zu denen der gemessenen Reihe. In dieser Arbeit wurden jeweils 20 Simulationsläufe mit einer der gemessenen Reihe entsprechenden Länge durchgeführt.

Für die gemessene Reihe, sowie für die generierten Reihen konnten für die Diagnose die (empirischen) Verteilungsfunktionen der maximalen und mittleren jährlichen und monatlichen Abflüsse ermittelt werden. Da besonders die Hochwasserverhältnisse interessierten, wurden vor allem die maximalen Abflüsse betrachtet. Für die Verteilungsfunktionen der 20 Simulationsläufe konnten die Mittel und die Einhüllenden ermittelt werden. Wie in Kapitel III-1.6.5.3 beschrieben, konnten eventuelle Modelldefizite durch den Vergleich der Verteilungsfunktionen der gemessenen Reihe mit den entsprechenden Mitteln bzw. den Bändern der Hüllkurven der 20 simulierten Reihen identifiziert werden. Sie mussten in den folgenden Analyseschritten berücksichtigt werden. Wie für die Reihe 1964-1995 in Kapitel III-1.6.5.3 festgestellt, traten auch für die anderen Teilreihen nur in Einzelfällen deutlichere Modelldefizite auf.

Andererseits konnten die Verteilungsfunktionen dieser einen Teilreihe mit denen der Messwerte einer anderen Teilreihe verglichen werden. Der Vergleich für die beiden Messreihen erlaubte die Identifizierung von Veränderungen, differenziert nach Abflussparameter, Jahreszeit bzw. Monat und Abflussniveau bzw. Auftretenshäufigkeit. Der

Vergleich der Bänder der Hüllkurven mit den Verteilungsfunktionen der Messreihen der jeweils anderen Teilreihe erlaubte - sofern dem nicht deutlichere Modelldefizite entgegenstanden - eine Signifikanzaussage zu den ggf. festgestellten Veränderungen. Im Idealfall einer defizitfreien Simulation der einen Teilreihe konnte eine signifikante Veränderung dann festgestellt werden, wenn die Verteilungsfunktion der gemessenen anderen Teilreihe den Hüllkurvenbereich verließ. Auch bei deutlicheren Modelldefiziten konnte teilweise durch den Vergleich des Abstandes zwischen den Verteilungsfunktionen der Messreihen mit den Abständen der entsprechenden Hüllkurven der für eine Teilreihe simulierten Reihen eine Aussage erzielt werden.

Weiterhin wurden die Abstände zwischen den anhand der je 20 Simulationsläufe für die verschiedenen Teilreihen erhaltenen Hüllkurven der Verteilungsfunktionen verglichen und als Maß für ggf. veränderte Prozessvariabilitäten betrachtet.

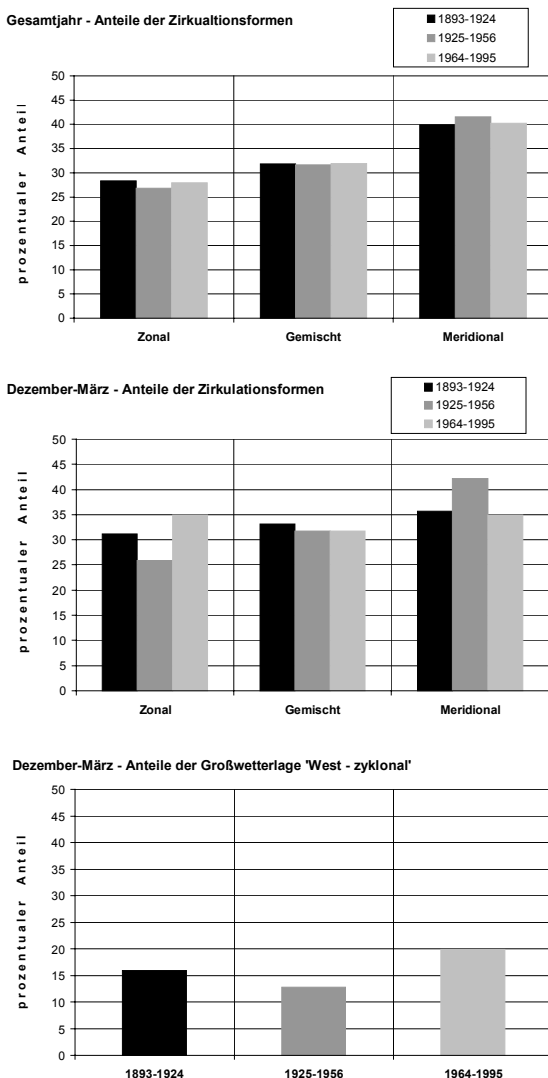
Die bereits oben genannte Gliederung der gesamten Abflussreihe 1853-1995 des Pegels Dresden in Teilreihen (Stichproben) wurde nach Kenntnis maßgeblicher Steuerfaktoren (Klimaveränderung und Talsperreneinfluss, siehe Kapitel III-1.2) und nach den Ergebnissen der Stationaritätsanalyse des Kapitels III-1.6.2 vorgenommen. Dabei wurden die Reihen so gegliedert, dass sie sich bei ausreichender Länge für statistisch verlässliche Aussagen hinsichtlich der Ursachen möglichst eindeutig unterscheiden und nicht aufgrund eines gemischten Effekts verschiedener Ursachen.

Um die **Auswirkungen des Klimawandels** von den noch im 19. Jahrhundert andauernden klimatischen Verhältnissen der **Kleinen Eiszeit** zu den **wärmeren klimatischen Verhältnissen des 20. Jahrhunderts**, jedoch noch ohne Talsperreneinfluss, zu untersuchen, wurde im Hinblick auf den durch die Doppelsumme identifizierten Zeitpunkt 1903/1904 die Teilreihe 1853-1903 mit der gleichlangen Teilreihe 1904-1954 verglichen, die zeitlich noch vor der Errichtung der großen tschechischen Talsperren (ab 1957) lag.

Um die Wirkung der **veränderlichen Verhältnisse (Klima, Talsperren) während des 20. Jahrhunderts** zu analysieren, wurden drei Teilreihen miteinander verglichen. Die jüngste Teilreihe war dabei die bereits in den vorangegangenen Kapiteln abgegrenzte und ausführlich analysierte Reihe 1964-1995. Bei

ausreichender Länge für statistisch verlässliche Ergebnisse waren bei dieser Reihe in bezug auf das Einzugsgebiet des Pegels Dresden die meisten anthropogen eingerichteten Speicherräume bereits seit Beginn der Reihe vorhanden. Zudem konnte davon ausgegangen werden, dass angesichts der in Kapitel III-1.2.1 festgestellten Klimaentwicklung seit den frühen 1970er Jahren die klimatischen Verhältnisse dieser Reihe mit relativ häufigen Großwetterlagen mit zonalen Komponenten (insbesondere ‚West – zyklonal‘ im Winter) den heutigen am ähnlichsten waren (zum Vergleich Abb. III-1.45). Als Reihe der gleichen Länge von 32 Jahren direkt vor der Einrichtung der tschechischen Speicherbecken wurde die von 1925 bis 1956 gewählt. Wie

die Abb. III-1.45 zeigt, unterschied sich diese Teilreihe jedoch von der zwischen 1964 und 1995 offenbar nicht nur in dem Talsperreneinfluss, sondern auch klimatologisch: es ist ein im Hinblick auf den Abflussprozess als wesentlich zu erachtender, deutlich geringerer Anteil zonaler Zirkulationsformen zu erkennen, besonders im Winter. Dies erschwerte die Zuordnung der festgestellten Unterschiede zur Reihe 1964-1995 zu den Ursachen (Talsperrenwirkung oder Klimawirkung ? ). Aus diesem Grunde wurde eine dritte Teilreihe (1893-1924), ebenfalls mit 32 Jahren Länge, in die Betrachtung aufgenommen, die – ebenfalls ohne größeren Talsperreneinfluss - der Reihe 1964-1995 unter den in Abb. III-1.45 dargestellten Gesichtspunkten klimatologisch deutlich ähnlicher war als die Reihe 1925-1956. Bei der Wahl der Reihe 1893-1924 konnte ein Übergreifen über den in Kapitel III-1.6.2.2 durch die Doppelsummen- und Knickpunktanalyse festgestellten günstigsten Trennungspunktes 1903/1904 nicht vermieden werden, jedoch zeigt eine Betrachtung der Abb. III-1.18, dass die bei der Knickpunktanalyse verwendete Standardfehlersumme bereits im Vorfeld dieses Trennungspunktes ähnlich tiefe Werte aufwies, so dass eine frühere Trennung nur wenig ungünstiger war.



**Abb. III-1.45** Prozentuale Häufigkeitsanteile der Zirkulationsformen im Gesamtjahr und im Winter (Dezember bis März), sowie prozentualer Häufigkeitsanteil der Großwetterlage ‚West – zyklonal‘ im Winter in verschiedenen Teilreihen.

**Vergleich der Hochwasserverhältnisse des von der Kleinen Eiszeit geprägten 19. Jahrhunderts mit denen des 20. Jahrhunderts ohne Talsperreneinfluss:**

Dieser Vergleich wurde durch die Anwendung der oben beschriebenen Methodik auf die *Teilreihen* 1853-1903 vs. 1904-1954 durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse werden in den Abb. III-1.46.a.-d. und in den folgenden Punkten dargestellt:

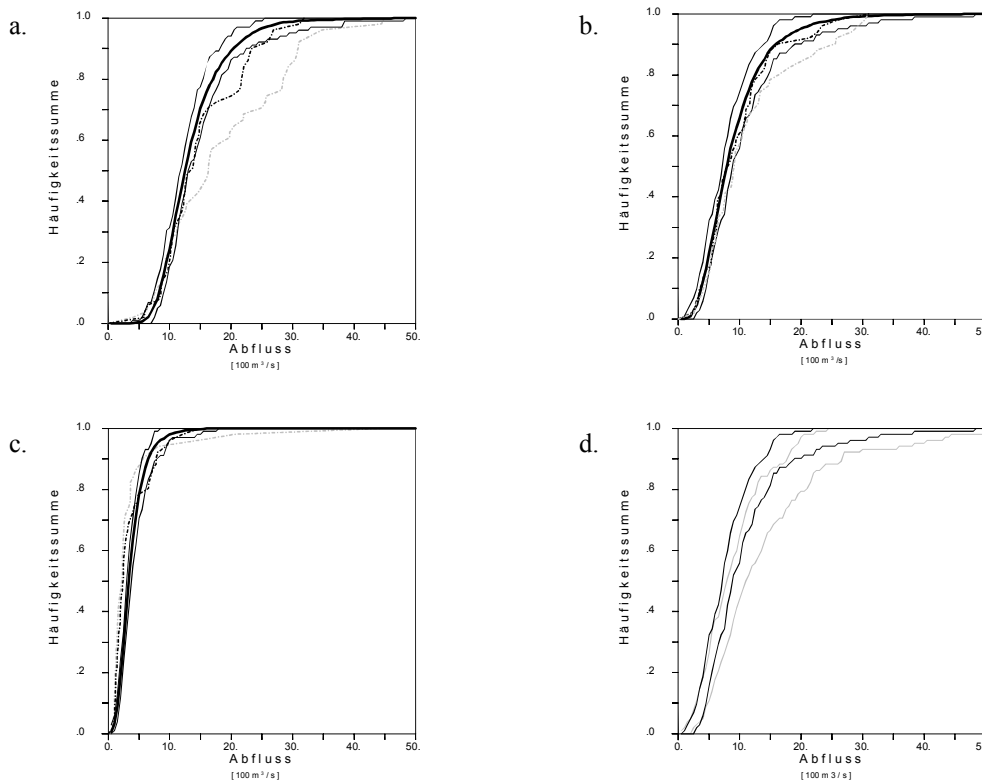
- Abb. III-1.46.a. zeigt, dass bei den Verteilungsfunktionen der Messreihen der *jährlichen Maximalabflüsse* bis zu einer Häufigkeitssumme von 0,3 (entsprechend etwa 1250 m<sup>3</sup>/s) kaum ein Unterschied auszumachen ist. Oberhalb dieser Häufigkeitssumme ist der Unterschied sehr groß. Abgesehen von leichten Defiziten ist das Modell bei diesem Parameter in der Lage, die statistischen Eigenschaften der gemessenen Reihe 1904-1954 in den Simulationsläufen zu reproduzieren: die Verteilungsfunktion der gemessenen Reihe 1904-1954 liegt weitgehend innerhalb des Bandes der Hüllkurven der

Verteilungsfunktionen der simulierten Reihen. Die Verteilungsfunktion der gemessenen Reihe 1853-1903 liegt hingegen sehr deutlich außerhalb dieses Bandes. Trotz des leichten Modelldefizits ist der *Unterschied in großen Bereichen der Häufigkeitssumme als signifikant anzusprechen*, denn die Abweichungen zwischen den Verteilungsfunktionen der beiden gemessenen Reihen sind deutlich größer als die Abweichung der Hüllkurven von dem Mittel der 20 simulierten Reihen, sogar größer als der Abstand der zwei Hüllkurven voneinander.

- Ein bedeutender Anteil dieses signifikanten Unterschieds in den Verteilungsfunktionen der maximalen jährlichen Abflüsse der beiden Teilreihen kann offenbar den *unterschiedlichen hydrologischen Verhältnissen in den Monaten Februar bis Mai* zugeordnet werden. Wie in Abb. III-1.46.b. exemplarisch für die maximalen Abflüsse des März gezeigt, weichen die Verteilungsfunktionen der monatlichen Abflussmaxima im Bereich größerer Häufigkeitssummen (also größerer und seltenerer Abflüsse) deutlich voneinander ab. Der Unterschied kann, abgesehen von den höchsten Abflüssen, anhand der Hüllkurven für die Teilreihe 1904 - 1954 als signifikant angesehen werden. In diesem Bereich treten auch die signifikanten Unterschiede zwischen den Verteilungsfunktionen der Jahresmaxima auf, so dass dieser *signifikante frühjährliche Unterschied relevant für jährliche Hochwasserstatistiken* ist. Die festgestellten Unterschiede dieser Monate konnten plausibel als *unterschiedlich ausgeprägte Schneeschmelzsituationen* oder – in der Konsequenz – als *zeitlich weiter ins Frühjahr verschobene Feuchte-maxima im Einzugsgebiet* interpretiert werden. Zusammen mit zyklonalen Niederschlagsereignissen resultieren aus diesen makroskalig ausgeprägten Zuständen bzw. Prozessen die hochwasserträchtigsten Situationen im Elbe-Einzugsgebiet (zum Vgl. Kapitel III-1.2.1), die sich in den Bereichen der höheren Häufigkeitssummen der Verteilungsfunktionen widerspiegeln. Im Vergleich zum 20. Jahrhundert *traten diese Situationen offenbar aufgrund stärkerer winterlicher Schneeakkumulationen häufiger und intensiver während der spätwinterlichen bzw. frühjährlichen Phasen der Kleinen Eiszeit auf*. Es war demnach für das Elbe-Einzugsge-

biet festzustellen, dass die winterliche Zunahme der Häufigkeiten von Zirkulationsformen mit zonalen Komponenten offenbar zu einer Abnahme in der Hochwassergefährdung beigetragen hat.

- Ein anderer Anteil des signifikanten Unterschieds in den Verteilungsfunktionen der maximalen jährlichen Abflüsse konnte dem *Auftreten extremer Ereignisse im Spätsommer/Herbst* zugeordnet werden. Dies wird exemplarisch in Abb. III-1.46.c. für den Monat September verdeutlicht. Wie auch im August und November konnte hier – ähnlich wie in den Frühjahrsmonaten – im Bereich der höheren Häufigkeitssummen bzw. Abflüsse, in dem auch die Unterschiede zwischen den Verteilungsfunktionen der Jahresmaxima festgestellt wurden, ein *sehr deutlicher und als signifikant anzusprechender Unterschied* erkannt werden. Dieser Unterschied trat auf, obwohl sich in den Verteilungsfunktionen anderer untersuchter Abflussparameter (monatsbezogene Verteilungsfunktionen der täglichen, mittleren monatlichen und kleineren maximalen monatlichen Abflüssen) überwiegend die umgekehrte Tendenz mit (teilweise signifikant) größeren Werten in den Verteilungsfunktionen der Reihe 1904-1954 gegenüber der offenbar trockeneren Reihe 1853-1903 erkennen ließ. Nach Kreuzkorrelationsanalysen für das tschechische Elbe-Einzugsgebiet konnten stärkere Zusammenhänge (Kreuzkorrelationskoeffizienten  $> 0,2$ ) zwischen Gebietsniederschlags- und Abflussreihen bei einer Zeitverschiebung bis zu 10 Tagen festgestellt werden (zum Vergleich BUCHTELE & ZEMLICKA 1987). Für die Ereignisse, die die signifikanten Abweichungen in den Verteilungsfunktionen bewirkten (1855, 1858, 1883, 1890/91, 1897, 1899) wurden daher in einer ersten Analyse ab dem Jahr 1881 die (verfügbaren) täglichen Großwetterlagen (zum Vergleich GERSTENGARBE & WERNER 1993) in den 10 Tagen vor dem Scheitelabfluss untersucht. Besondere Bedeutung scheinen die Großwetterlagen TrM (Trog Mitteleuropa), Wz (West – zyklonal) und NWa (Nordwest – antizyklonal) gehabt zu haben. Die genauere Untersuchung dieser Zusammenhänge ist Gegenstand laufender Untersuchungen.



**Abb. III-1.46** Empirische Verteilungsfunktionen jährlicher und monatlicher Maximalabflüsse des Pegels Dresden.

**a.-c.:** Verteilungsfunktionen der gemessenen Reihe 1904-1954 (schwarz, fett und gestrichelt) und 1853-1903 (grau, fett und gestrichelt), verglichen mit den Mitteln (schwarz, fett und durchgezogen) und den Hüllkurven (schwarz, dünn und durchgezogen) der Verteilungsfunktionen von 20 simulierten Reihen mit statistischen Eigenschaften entsprechend der gemessenen Reihe 1904-1954. a. jährlich maximale Abflüsse. b. maximale Abflüsse des März. c. maximale Abflüsse des Septembers.

**d.:** Hüllkurven der Verteilungsfunktionen der maximalen Abflüsse des März der mit statistischen Eigenschaften der Reihen 1853-1903 und 1904-1954 jeweils durchgeführten 20 Simulationenläufe.

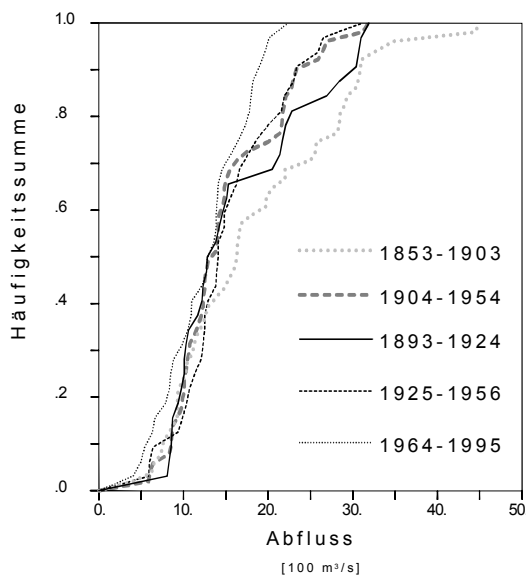
- Anhand des Abstandes der Hüllkurven der Verteilungsfunktionen der entsprechend den statistischen Eigenschaften der Reihen 1904-1954 und 1853-1903 je 20 simulierten Reihen konnte insbesondere für die *monatlichen Maximalabflüsse des März und des April eine größere Schwankungsbreite für die Reihe 1853-1903* festgestellt werden (siehe Abb. III-1.46.d). In schwächerem Maße galt dies auch für die Monate Januar, Februar und Mai. Es resultierte ferner eine *größere Schwankungsbreite in den Verteilungsfunktionen der jährlichen Maximalabflüsse*. Als Grund konnte die *für die Kleine Eiszeit bekannte klimatische Variabilität von Jahr zu Jahr* angenommen werden (zum Vergleich Kapitel III-1.2.1). Offenbar war die Wirksamkeit dieser Variabilität *vor allem in den Frühjahrsmonaten mit von Jahr zu Jahr stärker variablen Schneeschmelzsituationen* gegeben.

Aus diesen Ergebnissen war zu folgern, dass es **mit den zur Zeit verfügbaren Informationen notwendig**

**ist, die Hochwasserstatistiken für einen gegenüber der Reihe 1964-1995 erweiterten Ist-Zustand auf das 20. Jahrhundert (ab 1904) zu begrenzen.** Das 19. Jahrhundert sollte als ein anderer Zustand zunächst getrennt untersucht und bewertet werden. Hydrologische Mechanismen und Anzeichen für einen möglichen erneuten Übergang zu diesem im Hinblick auf das Hochwasser verschärften Zustand konnten identifiziert werden. Um eine längerfristige Variabilität im Rahmen eines über das 20. Jahrhundert hinaus erweiterten Ist-Zustands einzubeziehen, ist der Ausbau der Datengrundlage durch (möglichst verlässliche) Zeitreihen vor 1900 auch an anderen Pegeln vorzunehmen (zum Vergleich Kapitel III-1.8). Angesichts der klimatisch bedingt stark unterschiedlichen Hochwasserhältnisse im 19. und 20. Jahrhundert, sowie der klimatologischen Heterogenität im Elbe-Einzugsgebiet muss eine regionale Differenzierung der veränderten Hochwasserhältnisse in Betracht gezogen werden, so dass die Ergebnisse des Pegels Dresden nicht vorbehaltlos auf andere Standorte übertragen werden können.



Die empirischen Verteilungsfunktionen der *jährlich maximalen Abflüsse der Teilreihen des 20. Jahrhunderts* zeigten ebenfalls *deutliche und teilweise als signifikant anzusprechende Unterschiede im Bereich höherer Häufigkeitssummen (>0,65) bzw. Abflusswerte (> 1500 - 1600 m<sup>3</sup>/s)*. Die höchsten Abflüsse kamen in der Teilreihe 1893-1924 vor, in der Teilreihe 1964-1995 waren die höchsten Abflüsse im Vergleich zu denen der beiden anderen Teilreihen hingegen relativ gering (zum Vergleich siehe Abb. III-1.47).



**Abb. III-1.47** Empirische Verteilungsfunktionen der jährlichen Maximalabflüsse verschiedener gemessener Teilreihen des Pegels Dresden.

### Resultate monatsdifferenzierter Untersuchungen für die Teilreihen des 20. Jahrhunderts:

- Die Relevanz von in den verschiedenen Teilreihen unterschiedlichen Ausprägungen der frühjährlichen Schneeschmelze im Hinblick auf ihren Einfluss auf Unterschiede in den jährlichen Hochwasserstatistiken (bei Abflüssen > 1600 m<sup>3</sup>/s) war im Vergleich zu den Auswirkungen des Übergangs zwischen den Teilreihen 1853-1903 und 1904-1954 gering. Unterschiede, die in diesem Sinne interpretiert werden konnten, traten v.a. im März auf und konnten zwischen den nicht durch Talsperrenwirkungen beeinflussten Teilreihen 1893-1924 und 1925-1956 nicht als signifikant eingestuft werden.
- Die höchsten Maximalabflüsse des Januars in der Reihe 1893-1924 (gemessen) waren als signifikant höher als die der Reihe 1925-1956 (simulierte Reihen) einzustufen. Es konnte ver-

mutet werden, dass dieser Unterschied aufgrund größerer winterlicher Häufigkeiten von Zirkulationsformen mit zonalen Komponenten (mit höheren Niederschlagsmengen und geringerer nivaler Retention) auftrat. Eine Relevanz dieses Unterschieds für die unterschiedlichen Abflussstatistiken jährlicher Maximalabflüsse musste in Betracht gezogen werden.

- Dies gilt gegenüber der Teilreihe 1925-1956 jedoch nicht für die Teilreihe 1964-1995, obwohl sie die größte Häufigkeit zonaler Zirkulationsformen im Januar und auch in den Vormonaten besaß, sowie ferner die deutlich größte Häufigkeit der makroskalig besonders niederschlagsreichen Großwetterlage 'West-zyklonal'. Als Grund war die Dämpfung von Hochwasserspitzen in den tschechischen Talsperren zu vermuten. Im Vergleich der Januarmaxima der klimatisch ähnlicheren Teilreihen 1893-1924 (gemessen) und 1964-1995 (simuliert) ergaben sich auch entsprechende, teilweise als signifikant einzustufende Unterschiede, jedoch nur in bezug auf die wenigen größten Ereignisse. Es konnte angenommen werden, dass die Talsperren in diesem Monat nicht regelmäßig zur Dämpfung von Hochwasserwellen eingesetzt wurden bzw. dass ihr verfügbares Retentionspotential im Hinblick auf das noch folgende frühjährliche Maximum des Abflussregimes nicht ausreichend war.
- In den Monaten Februar bis April konnten die Maximalabflüsse der Reihe 1964-1995 (simuliert) in verschiedenen Bereichen ihrer Verteilungsfunktion als signifikant kleiner als die der beiden anderen Teilreihen (gemessen) eingestuft werden. Diese Unterschiede konnten als Retentionseffekte der Talsperren interpretiert werden, da sich in diesen Monaten des Maximums des Abflussregimes im Hochwasserfall die beabsichtigte Speicherauffüllung geeignet mit dem Hochwasserschutz verbinden ließ. Andererseits können auch klimatologische Ursachen verantwortlich für die genannten Unterschiede gewesen sein, wie die in der Teilreihe 1964-1995 weniger häufigen bzw. intensiven Schneeschmelzsituationen oder - im April - die in der Teilreihe 1964-1995 geringeren Häufigkeiten der besonders abflusswirksamen Großwetterlage Wz.

- Insgesamt wurde deutlich, dass sowohl Talsperren- als auch klimatologische Effekte offenbar einen Einfluss auf die Entwicklung der Hochwassersituation während des 20. Jahrhunderts hatten, v.a. in den entscheidenden Jahreszeiten des Winters und Frühjahrs. Beide Effekte hatten offenbar in etwa die gleiche Größenordnung, teils gleichgerichtet, teils einander kompensierend. Die Situation war komplex und könnte nur durch eine detailliertere Analyse zufriedenstellend bewertet werden. In jedem Fall konnte jedoch festgestellt werden, dass die Effekte in ihrem Einfluss deutlich schwächer ausgeprägt waren als die zwischen den Teilreihen 1853-1903 und 1904-1954. Zufallseffekte konnten oft nur schwer von den beiden genannten Effekten getrennt werden.

Unter Berücksichtigung dieser Diskussion der im 20. Jahrhundert variierenden Hochwassersituation war eine *geeignete Reihe zur Repräsentation des gegenüber der Reihe 1964-1995 erweiterten Ist-Zustands* zu finden. Es wurde deutlich, dass die Reihe 1964-1995 hinsichtlich der heutigen Talsperrensituation am ehesten geeignet ist, jedoch eine längerfristige Klimavariabilität mit im 20. Jahrhundert ähnlich starkem Effekt nicht berücksichtigt. Daher war eine Ausdehnung der Reihenlänge erforderlich. Wie in Kapitel III-1.6.8 noch begründet wird, ist die (an den meisten deutschen Pegeln verfügbare) **Reihe 1936-1995 geeignet, die im 20. Jahrhundert aufgetretene Gesamtvariabilität** zu repräsentieren.

### III-1.6.7 Rekonstruktion historischer Abflussreihen im Bereich zwischen den Pegeln Barby und Wittenberge

Mit der erweiterten Stationaritätsanalyse des Kapitels III-1.6.6.1 wurde gezeigt, dass die Eindeichungen an den Nebenflussmündungen unterhalb des Pegels Barby, v.a. im Bereich zwischen den Pegeln Barby und Wittenberge (Havel- und Karthane-Mündung), einen erheblichen Effekt auf den Ablauf von Hochwasserwellen hatten. Mit den in diesem Kapitel dargestellten Untersuchungen der Erweiterung der bisher aus dem *Ganglinien-Routing des Modells ELBA* bestehenden Simulationsmethodik durch dessen *Kopplung mit örtlich wirkenden Retentionsmodulen* wurde der *Versuch unternommen, die vor den Eindeichungen abgelaufenen*

*(Retentions-)Prozesse quantitativ nachzuvollziehen*. Hiermit sollte einerseits die in Kapitel III-1.6.6.1 festgestellte Inhomogenität besser begründet werden. Andererseits waren auf diesem Wege die historischen Abflussereignisse in diesem aufgrund fehlender oder unsicherer bzw. fehlerhafter Abflussreihen, sowie aufgrund eines gegenüber der Reihe 1964-1995 veränderten Musters in der räumlichen Hochwassersituation schwierigen Bereichs an geeigneten Stützstellen in ihrem Ablauf zu rekonstruieren. Dadurch wurde eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung längerfristiger Längsschnitte (1936-1995; zum Vgl. Kapitel III-1.6.8) von Hochwasserkennwerten der Elbe erfüllt.

Die in diesem Kapitel geschilderten Untersuchungen wurden in ähnlicher Weise parallel zu denen in MERKEL ET AL. (2001: Kap. III-3) durchgeführt. Die Untersuchungen beschränkten sich auf den *Strombereich zwischen den Pegeln Barby und Wittenberge*, da hier mit den Eindeichungen an der Havel- und an der Karthane-Mündung die wirksamsten Maßnahmen stattfanden. Die weiter unten gelegenen Maßnahmen (siehe Kapitel III-1.2.2) ließen sich nach diesen Untersuchungen in ihrer Wirkung auf die Hochwasserereignisse und –statistiken als gering einstufen. Die Analysen beziehen sich im Kapitel III-1.6.7.1 zunächst auf die in Kapitel III-1.6.6.1 ausgewählten, größten Hochwasserereignisse des Pegels Barby. Diese Untersuchungen fanden überwiegend im Rahmen einer Studienarbeit am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe statt (HEILIG 2000). Eine Erweiterung der Betrachtung auf alle Hochwasserereignisse mit *jährlichen* Scheitelwerten findet sich in Kapitel III-1.6.7.2.

#### III-1.6.7.1 Rekonstruktion großer historischer Hochwasserereignisse

*Grundmodul* des erweiterten Simulationsinstrumentariums blieb das *Translations-Diffusions-Modell ELBA* mit seinen *heute gültigen Parametern* zur Beschreibung des Ablaufs der Hochwasserwellen ohne Berücksichtigung der Retentionseffekte der früher noch nicht eingedeichten Retentionsräume (siehe Kapitel III-1.6.5.1 und III-1.6.6.1). Zur Modellierung der örtlichen Prozesse dieser Retentionsräume bei historischen Hochwasserereignissen wurden *konzeptionelle Speichermodelle als Zusatzmodule* mit dem ELBA-Grundmodul gekoppelt. Dieser konzept-

tionelle Ansatz war in Anbetracht der verfügbaren Information, passend zum quasi-konzeptionellen Charakter von ELBA, sowie im Hinblick auf die anvisierte großräumige Betrachtung mit der Simulation mehrerer (hier zweier) Retentionsstandorte gleichzeitig geeignet. Die *Kopplung* bestand aus einem am Standort des historischen Retentionsraums unterbrochenen Routing mit dem Modell ELBA, einer nachfolgenden Ganglinientransformation an diesem Standort durch das konzeptionelle Speichermodell und schließlich einem fortgesetzten Routing der transformierten Ganglinie zu weiteren Retentionsstandorten bzw. zu einem unteren Kontrollpegel, an dem die so simulierte Ganglinie diagnostiziert wurde.

Die entwickelten konzeptionellen Speichermodelle ähneln dem Ansatz zur Simulation der *Seeretention*, wurden jedoch den Bedingungen an der Havel- und an der Karthane-Mündung, sowie den Modellerfordernissen entsprechend modifiziert.

Unter Vernachlässigung der Wasserbilanzglieder Niederschlag, Verdunstung und unterirdischer Zu- und Abflüsse lässt sich die *Wasserbilanz eines durchflossenen Sees* bzw. allgemein *eines Speichers* mit (oberirdischem) Zufluss  $Q_{Zu}$  und Ausfluss  $Q_{Aus}$  und dem Speicherinhalt  $VOL$  über die Zeit  $t$  (kontinuierlich) bzw.  $i$  (diskret mit Zeitschritt  $\Delta t$ ) durch die Formeln 19 bzw. 20 beschreiben.

$$\frac{dVOL}{dt} = Q_{Zu}(t) - Q_{Aus}(t) \quad (19)$$

bzw.

$$\frac{VOL_{i+1} - VOL_i}{\Delta t} = \frac{Q_{Zu,i+1} + Q_{Zu,i}}{2} - \frac{Q_{Aus,i+1} + Q_{Aus,i}}{2} \quad (20)$$

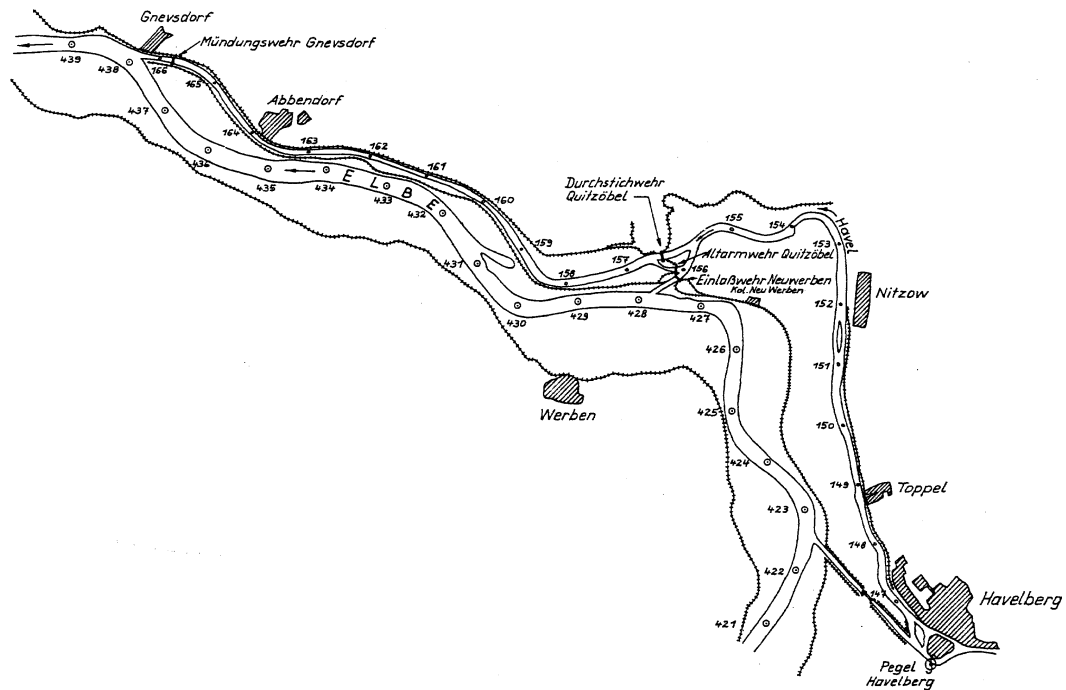
Grundlage für die Anwendung dieses Verfahrens ist die Kenntnis des *Speicherverhaltens*. Dieses kann durch zwei *Kennlinien* beschrieben werden - durch die *Speicherinhaltslinie* die den Speicherinhalt  $VOL$  in funktionaler Abhängigkeit vom Wasserstand  $W$  beschreibt ( $VOL = f(W)$ ), sowie durch die *Abflusskurve am Auslass* des Speichers ( $Q_{Aus} = f(W)$ ).

Die diskrete Speichergleichung kann dann für jeden Berechnungsschritt iterativ gelöst werden, so dass - wie beim Seeretentionsverfahren üblich - mit gegebener Zuflussganglinie und gegebenem Anfangsspeicherinhalt das Verhalten des Speichers und die Ausflussganglinie über die Zeit simuliert werden können.

Wie im folgenden dargestellt, lagen für die Bereiche der Havel- und der Karthane-Mündung *gemessene Wasserstände vor bzw. sie konnten ermittelt werden*. Über die Speicherinhaltslinien waren damit *Zeitreihen des Speicherinhalts berechenbar* und daraus - auch ohne Abflusskurve des Speicherauslasses - *Zeitreihen für die Bilanz von Zu- und Ausfluss des Speichers, die für die Wirkung der Speicher auf die Elbe-Ganglinie entscheidend waren*.

An der **Havel-Mündung** stellte sich die *historische Situation der Eindeichungen* nach PÜTTMER (1990, S. 167) wie folgt dar (zum Vergleich auch siehe Karte 2): Ab 1772 wurde schrittweise die Verlängerung des Trennungsdeichs zwischen Elbe und Havel um 11 km ab Sandau realisiert. Mit den Fertigstellungen der Wehrgruppe Quitzöbel (1936) und des Einlasswehrs Neuwerben (1956) konnte die alte Havel-Mündung von der Elbe abgeschlossen und über den 1956 fertiggestellten Gnevsdorfer Vorfuter elbeabwärts nach Gnevsdorf verlegt werden. In den Folgejahren wurden im Bereich der Havelniederung durch dortige Eindeichungen 13 Polder mit einer Gesamtfläche von ca. 13500 ha geschaffen, wobei nach SIMON (1984, S. 4/5) sechs Polder (Polder 1-6) mit einer Gesamtfläche von ca. 10200 ha vor geringeren Hochwässern (HQ-18) geschützt werden als die restlichen Polder (HQ-100), die folglich weiter havelaufwärts liegen. Insgesamt wurde durch die Maßnahmen das Retentionspotential um 23800 ha (einschließlich Havelflusschlauch) oder um ein auf ein HQ-100 bezogenes Volumen von 243.4 Mio. m<sup>3</sup> vermindert (nach IKSE, 1996-a, Anlage 1).

Für die Simulation der Retentionswirkung dieses Bereichs bei den historischen Hochwasserereignissen standen *folgende Informationen zur Verfügung*: die täglichen Abflussreihe des oberstrom gelegenen Pegels Barby (ab 1900), die tägliche Wasserstandsreihe der Havel am Pegel Havelberg Stadt (ab 1853), die tägliche Abflussreihe der Havel am Pegel Havelberg Stadt (ab 1946), die tägliche Wasserstandsreihe des Havelpegels Rathenow Hauptschleuse UP (ab 1900) und die (feste) Wasserstand-Abfluss-Beziehung dieses Pegels (jedoch ohne Berücksichtigung von Rückstauwirkungen), die in Abb. III-1.48 gezeigten Speicherinhaltslinien des Havel-Flusschlauchs (abhängig vom Wasserstand bei Quitzöbel und vier gegebenen Abflusswerten für den Pegel Rathenow), sowie die Speicherinhaltslinie der o.g. Polder 1-6



Karte 2: Bereich der Havelmündung im heutigen Zustand (aus PÜTTMER 1990, S. 168).

(abhängig vom Wasserstand bei Quitzöbel); Quellen der Zeitreihen: LUA-Brandenburg, BfG-Außenstelle Berlin / Quelle der Kennlinien: STAU (1997). Zur Simulation der Retentionswirkung auf Elbehochwasser in der Zeit vor den Eindeichungen wurden diese Speicherinhaltslinien verwendet, da bekannt war, dass die Havel – sofern nicht durch ihre Wehre abgeschlossen – bei Elbehochwasser bis in den Bereich zwischen Grütz und Rathenow rückgestaut wird, und da angenommen werden kann, dass sich das Speicherverhalten im Bereich des Flussschlauchs der Havel und der o.g. Polder 1-6 dem heutigen ähnelt. Die Polder 7-13 mit ca. 25 % der gesamten Polderfläche wurden aufgrund ihrer Lage weiter oberhalb an der Havel vernachlässigt, da sie kaum zur Retention von Elbewasser beigetragen haben dürften. Weiterhin wurden für die Simulation statt der Wasserstände in Quitzöbel die (verfügbaren) Wasserstände des nur wenige Kilometer entfernt gelegenen Pegels Havelberg Stadt verwendet, da angenommen werden konnte, dass sie sich bei abgeschlossenen Wehren in Neuwerben und Quitzöbel weitgehend entsprechen, so dass ausgehend von den (auch historischen) Wasserständen in Havelberg eine zutreffende Schätzung des entsprechenden, in Anspruch genommenen Volumens in der Havelniederung über die Speicherinhaltslinien nach Abb. III-1.48 ermöglicht wurde.

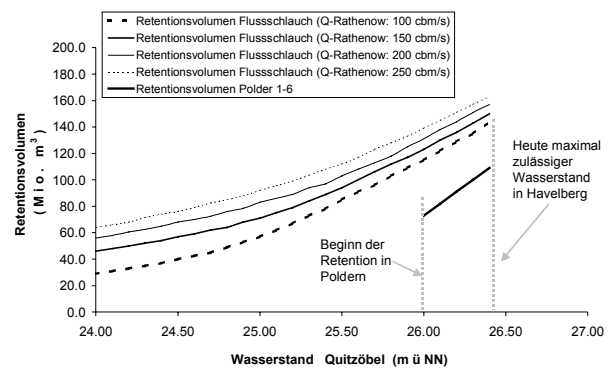


Abb. III-1.48 Retentionsvolumina der Havelniederung in Abhängigkeit vom Wasserstand in Quitzöbel und vom Abfluss am Pegel Rathenow Hauptschleuse UP bei abgeschlossenen Wehren Quitzöbel und Neuwerben. Erstellt nach StAU (1997, Anlage 15).

Im ersten Schritt der Entwicklung eines Simulationsmoduls waren die gegebenen (und punktwise aufgenommenen) *Speicherinhaltslinien in eine einheitliche Berechnungsvorschrift umzusetzen*. Für die Speicherinhaltslinien des Havel-Flussschlauchs wurde dies mittels einer intervallweise (0,5-m-Intervalle des Wasserstands bei Quitzöbel) durchgeführten linearen Zweifachregression realisiert. In den durch die Richtlinie des STAU (1997) gegebenen Bereichen (siehe Abb. III-1.48) zeigten sich Regressionsbeziehungen mit den transformierten Regressoren  $\ln(Q)$  und  $\exp(W) \cdot 10^{-9}$  der unabhängigen Größen  $Q$  (Abfluss bei Rathenow) und  $W$  (Wasserstand bei Quitzöbel) geeignet, um das Speichervolumen VOL

zu berechnen. An den Intervallgrenzen wurde die Zuordnung zum einen oder anderen Intervall je nach der Summe der prozentualen Abweichungen der Regressionsebenen von den vorgegebenen Werten vorgenommen. Für alle Intervalle konnten sehr gute Anpassungen erreicht werden: die Bestimmtheitsmaße betragen in allen Fällen  $>0,98$ , und die maximale prozentuale Abweichung der Regressionsebenen von den vorgegebenen Punkten der Speicherinhaltslinien betrug 4 %. Die Regressionsebenen ließen sich für kleinere bzw. größere Abflüsse in Rathenow (bis 40 bzw. bis 300 m<sup>3</sup>/s) extrapolieren, ohne dass größere Abweichungen an den Intervallgrenzen auftraten. Für die Extrapolation zu Wasserständen in Havelberg oberhalb von 26,5 m üNN (deutlich nur beim Hochwasserereignis im Frühjahr 1940 auftretend, mit einem Maximalwert von 26,70 m üNN) wurde die für das Wasserstandsintervall 26,00-26,50 m üNN angepasste Regressionsbeziehung verwendet. Schwieriger war die Extrapolation zu kleineren Wasserständen hin, die notwendig war, da sich die Speicher bei den historischen Ereignissen nicht schlagartig auf den einem Wasserstand von 24,00 m üNN entsprechenden Anfangswert der gegebenen Speicherinhaltslinien füllten. Aufgrund einer mit abnehmendem Wasserstand nur asymptotischen Annäherung an den Nullwert des Volumens bei der Verwendung des transformierten Regressors  $\exp(W) \cdot 10^{-9}$  in diesen Bereich kleinerer Wasserstände wurde in diesem Fall eine anhand des Wasserstandsintervalls 24-24,5 m üNN – ebenfalls sehr gut – angepasste Regressionsebene mit den Regressoren  $W$  und  $\ln(Q)$  verwendet.

Für die Speicherinhaltslinie der Polder konnte die Berechnungsvorschrift durch eine Einfachregressionsbeziehung erfasst werden, die sich auch problemlos in Bereiche kleinerer bzw. größerer Wasserstände als in Abb. III-1.48 enthalten extrapolieren ließ.

In den weiteren Schritten konnte dann zunächst die *Abflussganglinie des Pegels Barby zum Punkt direkt oberhalb der damaligen Havelmündung geroutet* werden. Die dort erhaltene Abflussganglinie der Elbe zu den Zeitpunkten  $i$  wurde mit  $Q\_ELBE\_OB_i$  bezeichnet. Mit Hilfe der beschriebenen Regressionsansätze konnte dann aus der Wasserstandsreihe am Pegel Havelberg Stadt und der Abflussreihe am Pegel Rathenow Hauptschleuse UP eine *tägliche*

*Speicherinhaltsreihe*  $VOL_i$  berechnet werden. Nach Einführung des um einen gegenüber  $i$  um einen halben Zeitschritt verschobenen Zeitschritts  $j$  ( $j = i-0,5$ ) ließen sich aus den Änderungen des Speicherinhalts zwischen aufeinanderfolgenden Zeitschritten die im Zwischenzeitraum stattfindenden *Ein- und Ausgänge des Speichers*  $SALDO_j$  (*netto*) errechnen:

$$SALDO_j = VOL_i - VOL_{i-1} \quad (21)$$

Diese Größe konnte zur *Transformation der Abflussganglinie*  $Q\_ELBE\_OB_i$  genutzt werden. Allerdings waren einige ergänzende Überlegungen zur Modellgestaltung notwendig, um die komplizierten und ereignisspezifischen Verhältnisse zwischen Abflüssen und Wasserständen in Elbe und Havel, zwischen ihnen ausgetauschten Wassermengen und Speicherfüllungen in der Havelniederung angemessen zu modellieren.

Bei den betrachteten Hochwasserereignissen war jeweils ein starker Wasserspiegelanstieg in Havelberg zu beobachten, der für das sehr träge reagierende Gewässer der Havel untypisch war. Im Hinblick auf die bekannte Tatsache, dass bei Elbehochwasser die Havel bis fast zum Pegel Rathenow zurückgestaut wurde, konnte davon ausgegangen werden, dass der beobachtete Wasserspiegelanstieg, sowie die in diesem Zeitraum über die Speicherinhaltsbeziehungen ermittelten Änderungen der Speicherfüllungen  $VOL$  auf *in die Havelniederung eindringendes Elbewasser* zurückzuführen waren. Die verfügbaren Abflussganglinien des Pegels Havelberg waren in diesen Zeitbereichen anzuzweifeln. Somit konnte die Elbeganglinie  $Q\_ELBE\_OB_i$  für diesen Zeitraum nach folgender Gleichung zur Elbeganglinie  $Q\_ELBE\_UN_i$ , direkt unterhalb der Havelmündung, transformiert werden.

$$Q\_ELBE\_UN_i = Q\_ELBE\_OB_i - (SALDO_j + SALDO_{j+1})/2 \quad (22)$$

Während der Entwicklung des Simulationsmoduls stellte sich heraus, dass der Zeitraum, in dem die Elbe-Ganglinie auf diese Weise zu transformieren war, am plausibelsten durch die Beobachtung der Wasserstandsreihe des Pegels Havelberg und der errechneten Speicherinhaltsreihe  $SALDO_i$  ( $= (SALDO_j + SALDO_{j+1})/2$ ) abzugrenzen war. Der Beginn war bei der ersten signifikanten Wasserstandszunahme des Pegels Havelberg meist deutlich zu erkennen. Das Ende des Zeitraums wurde anhand der Kriterien eines deutlich fallenden Wasser-

spiegels und – als weiteres Indiz - einer Annäherung des Werts von  $SALDO_i$  an den am Pegel Havelberg gemessenen Abflusswert  $Q_{HVBG_i}$  bestimmt. Während des *Abbaus des Rückstaus der Havel* war die Transformation auf diesem Weg nicht möglich. Es erfolgte ein Eingang in den Speicher von oberhalb aus der Havel, womit unter diesen ereignisspezifischen, komplexen Bedingungen von einer zuverlässigen Transformation der Elbe-Ganglinie über die Änderung der Speicherfüllung, jedoch kaum zuverlässig abschätzbarem Speicherdurchfluss mit den gegebenen Informationen abzusehen war. Für die Transformation von  $Q_{ELBE\_OB_i}$  war jedoch lediglich der Ausgang des Speichers von Interesse. Diese Information lag in Form der Abflussreihe  $Q_{HVBG_i}$  vor. Diese Größe wurde - wie auch in der Zeit außerhalb der Hochwasserereignisse – zu  $Q_{ELBE\_OB_i}$  addiert, womit man  $Q_{ELBE\_UN_i}$  erhielt (Formel 23). In der Zeit vor 1946 lag die Abflussreihe des Pegels Havelberg nicht vor. Sie wurde hier durch die aus der Wasserstandsreihe und der Abflusskurve ermittelte Abflussganglinie des Pegels Rathenow nach einer Multiplikation mit dem Faktor 1,2 ersetzt (siehe Formel 24; zum Vgl. siehe STAU 1997, Anlage 15). Unter noch rückgestauten Bedingungen ist hier mit einem Fehler zu rechnen, der sich jedoch nach einem Vergleich der beiden Ganglinien ( $Q_{HVBG_i}$  und  $Q_{RATH_i}$ ) bei allen betrachteten Hochwasserereignissen in bezug auf die zu transformierende Elbeganglinie als quantitativ unbedeutend herausstellte.

$$Q_{ELBE\_UN_i} = Q_{ELBE\_OB_i} + Q_{HVBG_i} \quad (23)$$

bzw.

$$Q_{ELBE\_UN_i} = Q_{ELBE\_OB_i} + 1.2 * Q_{RATH_i} \quad (24)$$

Ein *Übergang* zwischen den beiden beschriebenen Phasen mit vollständig berücksichtigtem Havelabfluss und mit zu null angenommenem Havelabfluss von einem Tag auf den anderen war nur bei sich stark ändernden Wasserständen anzunehmen. In Abhängigkeit vom Ereignis wurde daher optional ein ein- bis dreitägiger Übergangsbereich berücksichtigt. In diesem wurde die transformierte Elbeganglinie nach Formel 23 oder 24 berechnet, jedoch mit einer Multiplikation der Havelabflüsse mit einem gegenüber der Zeit linearen und schrittweise reduzierten bzw. erhöhten Faktor.

Wie exemplarisch in Abb. III-1.49 für das Hochwasserereignis 1954 demonstriert, gelang nach diesem begründeten Ansatz die plausible Transformation der Elbeganglinie, die auch nach der weiteren Transformation an der Karthane-Mündung (siehe unten) bestätigt wurde. Dies gilt auch für die anderen betrachteten Hochwasserereignisse im Zeitraum vor der Eindeichung, auch für mehrgipflige Ereignisse, bei denen ein mehrfacher Übergang zwischen den o.g. Phasen zu berücksichtigen war.

Schließlich war die *transformierte Abflussganglinie*  $Q_{ELBE\_UN_i}$  zum nächsten historischen Retentions-Standort, d.h. zur Karthane-Mündung, weiterzurouten.

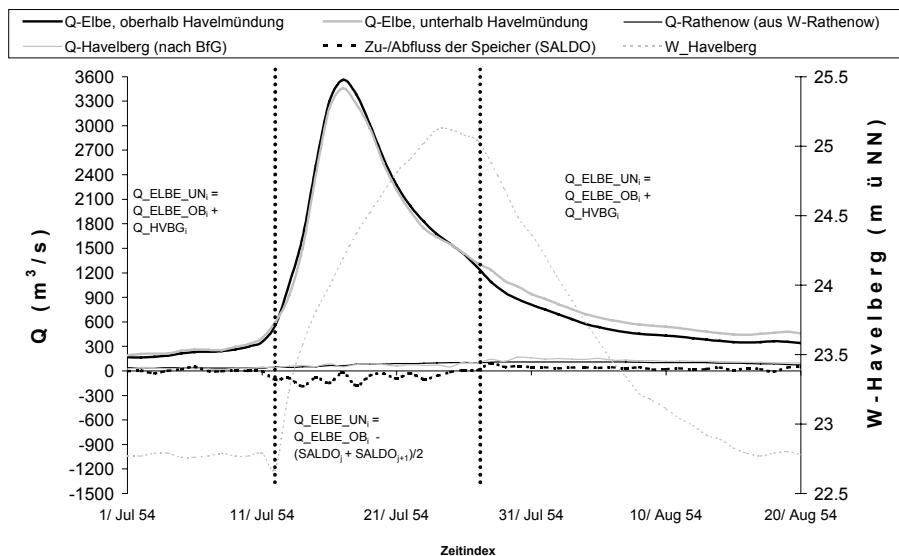
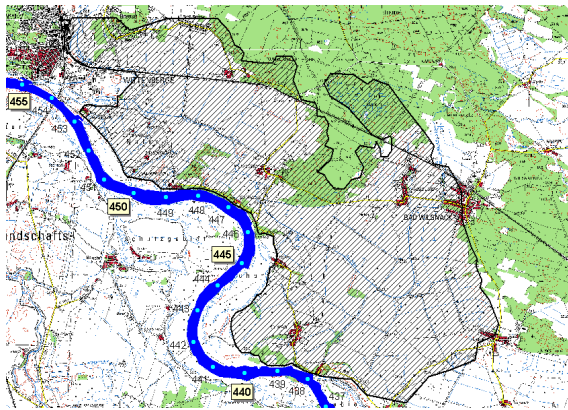


Abb. III-1.49 Simulation der historischen Retentionswirkung der Havel auf die Elbe-Abflussganglinie des Hochwasserereignisses 1954.

An der **Karthane-Mündung** stellte sich die *historische Situation der Eindeichungsmaßnahmen* wie folgt dar: Die Mündung der Karthane fand sich in unmittelbarer Nähe des Pegels Wittenberge beim Stromkilometer 454,9. Der Bereich der stromaufwärts, östlich von der Elbe gelegenen Niederung wurde 1981 im Zuge der Komplexmeliorenmaßnahmen Karthane eingedeicht, womit der Elbe nach IKSE (1996-a, Anlage 1) in bezug auf ein HQ-100 6100 ha Retentionsfläche, entsprechend etwa 106 Mio. m<sup>3</sup> Retentionsvolumen, verloren gingen (zum Vergleich siehe Karte 3).



**Karte 3:** Verlauf der Elbe oberhalb von Wittenberge (etwa Elbe-km 455) mit der durch die Eindeichung betroffenen, anhand von Isohypsen der topographischen Karte 1:25000 abgegrenzten historischen Retentionsfläche in der Niederung bei der Karthane-Mündung.

Für die Simulation der Retentionswirkung dieses Bereichs bei den historischen Hochwasserereignissen standen *folgende Informationen zur Verfügung*: die tägliche Abflussreihe des oberstrom gelegenen Pegels Barby (ab 1900) bzw. für die ausgewählten Hochwasserereignisse ab 1936 die durch die Havel-Retentionswirkung transformierten Abflussganglinien, die tägliche Wasserstandsreihe der Elbe am Pegel Wittenberge (ab 1900), eine Scheitelbeziehung der Wasserstände in Wittenberge und Gnevsdorf bei Elbe-km 438, ein Digitales Geländemodell (DGM) mit der Auflösung 25m\*25m des von der Eindeichungsmaßnahme betroffenen Gebiets, sowie eine topographische Karte des Maßstabs 1:25000 des Gebiets (Quellen der Zeitreihen: BfG-Außenstelle Berlin / Quelle der Kennlinie: StAU 1997 / Quelle des DGM: LVA Brandenburg).

Zur Simulation der Retentionswirkung des betroffenen Gebiets auf Elbehochwasser in der Zeit vor den Eindeichungen war eine *Speicherinhaltslinie zu ermitteln*. Hierzu wurde zunächst ein Polygon des

betroffenen Gebiets anhand der Isohypsen der topographischen Karte abgegrenzt (siehe Karte 3). Dies gelang in plausibler Weise für eine Fläche von etwa 6100 ha. Dieses Polygon wurde in einem GIS mit dem DGM verschnitten, so dass das auf die 6100 ha der betroffenen Fläche bezogene DGM erhalten wurde. Auf dieses wurde eine Programmroutine angewandt, mit der der mögliche Speicherinhalt des Gebiets in 0,1-m-Intervallen ermittelt werden konnte. An die damit verfügbaren Wertepaare Wasserstand bzw. topographische Höhe vs. Speicherinhalt wurden zur Ermittlung einer in das Simulationsmodul integrierbaren Berechnungsvorschrift in 1-m-Intervallen der Höhe polynomiale (zweiten Grades) bzw. lineare Regressionsgleichungen angepasst, mit Bestimmtheitsmaßen > 0,99 und maximalen Abweichungen von knapp 3 %.

Im nächsten Schritt wurden die durch die Retention an der Havelmündung *transformierten Hochwasser-ganglinie zum geeigneten Punkt des Eingangs in den Speicher der Niederung an der Karthane-Mündung geroutet*. Als problematisch erwies sich hierbei die Tatsache, dass die *Überflutung dieses Gebiets* im Gegensatz zur Havelmündung (mit durch den Havel-Flussschlauch definiertem Einströmungspunkt) *ereignisspezifisch von verschiedenen ersten Einströmungspunkten* ausging. Bei rasch ansteigenden Hochwasserereignissen lag der erste Einströmungspunkt des Gebiets offenbar bereits weiter oberhalb, während bei langsamer anlaufenden Hochwasserereignissen der Überflutungsraum offenbar erst vom tiefsten Punkt – der Karthane-Mündung – ausgehend erfolgte. Bei eventuellen späteren Einströmungen weiter stromaufwärts konnte im letzteren Fall davon ausgegangen werden, dass der Speicherraum bereits weitgehend gefüllt war und nur noch eine entsprechend geringere Retentionswirkung erbringen konnte. Dies konnte durch den Vergleich der für verschiedene Einströmungspunkte simulierten Ganglinien mit den in Wittenberge gemessenen Ganglinien (siehe unten) deutlich festgestellt werden. Folglich wurde die durch die Havel-Retention transformierte Ganglinie zunächst zu verschiedenen Punkten im relevanten Bereich (Stromkilometer X = 446 , 448 , 450 , 452 und 455) geroutet, wo sie als Q\_ELBE\_X<sub>i</sub> bezeichnet wurde. Die Punkte X waren als *fiktive Ausuferungspunkte* anzusprechen. Dabei erwies sich der oberste Punkt bei X = 446 km als hinreichend und im Hinblick auf die zeitliche Auflösung des Routings mit Tages-

werten gleichzeitig als nicht zu nah an der Havelmündung gelegen. Für den Elbekilometer 438 (Gnevsdorf) wurden die täglichen Wasserstände über die gegebene Scheitelbeziehung aus denen am Pegel Wittenberge ermittelt. Über lineare Interpolation wurden dann aus diesen beiden Wasserstandsreihen die *Wasserstandsreihen an den Punkten X* ( $W_{X_i}$ ) ermittelt. Für alle X wurden dann über diese Wasserstandsreihen und über die ermittelte Berechnungsvorschrift der Speicherinhaltslinie, ähnlich wie an der Havel-Mündung, die *täglichen Speicherinhaltsreihen* ( $VOL_{X_i} = f(W_{X_i})$ ) berechnet und hieraus die Ein- und Ausgänge aus dem Speicher ( $SALDO_{X_j} = VOL_{X_j} - VOL_{X_{j-1}}$ ;  $j = i - 0.5$ ). Diese konnten wiederum zur *Transformation der Abflussganglinie der Elbe* nach Formel 25 zu  $Q_{ELBE\_UN\_X_i}$  verwandt werden, wobei sich diese transformierte Ganglinie bereits auf den tiefsten Punkt des Speichers bei der Karthane-Mündung bzw. beim Pegel Wittenberge bezog.

$$Q_{ELBE\_UN\_X_i} = \frac{Q_{ELBE\_X_i} - (SALDO_{X_j} + SALDO_{X_{j+1}})/2}{2}$$

Die mit verschiedenen fiktiven Ausuferungspunkten und Speichern transformierten Ganglinien wurden gegenüber den jeweils am Pegel Wittenberge gemessenen Ganglinien *diagnostiziert*. Die *bestgeeignete simulierte Ganglinie wurde ereignisspezifisch ausgewählt*. Bestätigt wurde diese Vorgehensweise durch einen deutlichen Zusammenhang zwischen den ausgewählten fiktiven Ausuferungspunkten und den Dauern des Anstiegs der gemessenen Abfluss-

ganglinien am Pegel Wittenberge von 1000 m<sup>3</sup>/s auf 1500 m<sup>3</sup>/s (im Bereich des Ausuferungsabflusses): während bei angenommenen Ausuferungspunkten bei 446 km eine mittlere Dauer von 2,125 Tagen festgestellt wurde, wurde bei 452 km eine von 4,1 Tagen und bei 455 km in allen Fällen eine Dauer von über 5 Tagen gefunden.

Wie exemplarisch in Abb. III-1.50, wieder für das Hochwasserereignis 1954, gegenüber der gemessenen Ganglinie am Pegel Wittenberge demonstriert, *gelang nach diesem begründeten Ansatz zusammen mit dem Ganglinien-Routing und der Transformation an der Havel-Mündung die plausible Transformation der Elbeganglinie*. Dies gilt auch für die anderen betrachteten Hochwasserereignisse im Zeitraum vor der Eindeichung, bei denen die in Abb. III-1.50 erkennbaren Abweichungen zwischen simulierter und gemessener Ganglinie in der Rezessionsphase nicht festzustellen waren.

Für die Anwendung der gesamten, gekoppelten Modellstruktur mit den drei Modulen des Ganglinien-routings, der Transformation an der Havel-Mündung und der Transformation an der Karthane-Mündung auf die gewählten Hochwasserereignisse zwischen 1936 und 1995 war es wichtig, *drei Zeitabschnitte* zu unterscheiden.

Im *ersten Abschnitt* zwischen 1936 und 1955 waren die Verhältnisse eindeutig. Es wurden beide Transformationsmodule angewendet, da beide Überflutungsräume noch vorhanden waren. Entsprechend waren die Modellausgänge auch nur für diesen Fall zu diagnostizieren und zu bewerten.

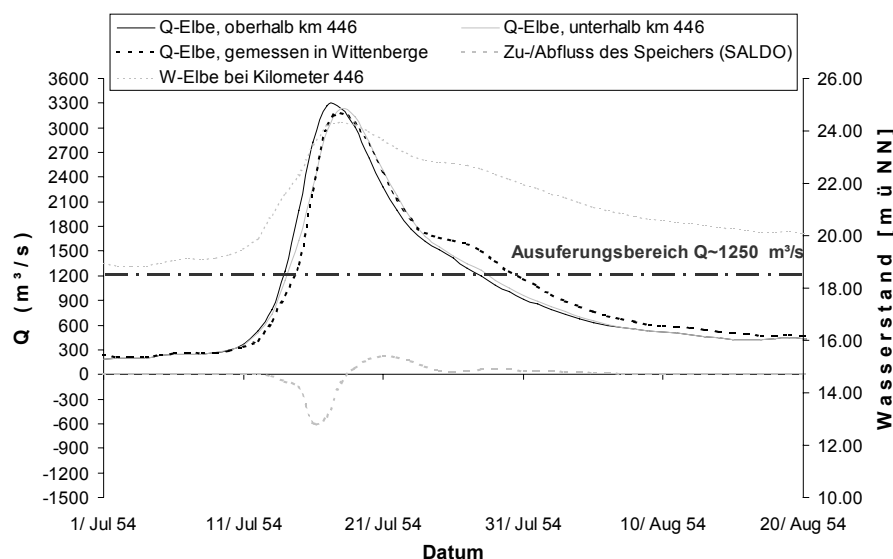


Abb. III-1.50 Simulation der historischen Retentionswirkung bei der Karthane-Mündung auf die Elbe-Abflussganglinie 1954.



Im *zweiten Abschnitt* zwischen 1956 und 1980 wurden sowohl beide Transformationsmodule, als auch das Transformationsmodul der Karthane-Mündung allein angewendet. Dies war notwendig, da nach der Eindeichung an der Havel-Mündung die Flutung dieses Retentionsraums (kontrolliert) erfolgen konnte. Die Diagnosen der über beide Module transformierten Ganglinien, sowie der nur über das Modul der Karthane-Mündung transformierten Ganglinien gegenüber den gemessenen Ganglinien des Pegels Wittenberge zeigten, dass bei verschiedenen Hochwasserereignissen dieses Zeitabschnitts (Sommer 1958, Frühjahr 1965 und 1967) von der Retentionsmöglichkeit in der Havelniederung offenbar in der Weise Gebrauch gemacht wurde, dass die Einbeziehung des Transformationsmoduls der Havelmündung in gleicher Weise wie im ersten Zeitabschnitt die eindeutig besten Simulationsergebnisse erbrachte. Für das Ereignis des Frühjahrs 1956 und insbesondere für das erste (und höhere) Teilereignis des Winters 1974/75 zeigte umgekehrt die alleinige Nutzung des Transformationsmoduls an der Karthane-Mündung die besseren Simulationsergebnisse. Daher war anzunehmen, dass bei diesem Ereignis das Retentionspotential der Havel nicht oder höchstens teilweise genutzt wurde. Beim Ereignis im Frühjahr 1970 lieferten beide Möglichkeiten etwa gleich gute Simulationsergebnisse, so dass angenommen werden konnte, dass das Retentionspotential an der Havelmündung - offenbar kontrolliert - nur teilweise genutzt wurde.

Im *dritten Abschnitt* zwischen 1981 und 1995 schließlich brauchte i.d.R. keines der beiden Transformationsmodule mehr angewandt zu werden, da die Retentionsräume beide durch die Eindeichungen bzw. Wehre von der Elbe getrennt waren. So lieferten auch die Simulationen mit dem allein angewandten Ganglinien-Routing die besten Simulationsergebnisse, während bei Hinzuziehung der Transformationsmodule die Ganglinienscheitel deutlich unterschätzt wurden. Eine Ausnahme stellte nur das Ereignis des Winters 1981/82 dar, bei dem die mit dem Transformationsmodul der Havel simulierte Ganglinie eine bessere Anpassung zeigte. Hier konnte – wie bereits beim Ereignis 1970 – angenommen werden, dass das Retentionspotential an der Havelmündung teilweise genutzt wurde. Abb. III-1.51 zeigt die prozentualen Abweichungen zwischen den Maxima der – unter Berücksichtigung der soeben erfolgten Erörterungen – für den Pegel

Wittenberge simulierten Ganglinien und den dort gemessenen Ganglinien. Bei den Ereignissen, bei denen eine teilweise Flutung der Havel angenommen werden konnte, wird die prozentuale Abweichung sowohl für den Fall einer vollständig simulierten Transformation an der Havelmündung, als auch für den Fall ohne Transformation an der Havel-Mündung dargestellt. Die maximale Abweichung ergab sich für das Ereignis im Frühjahr 1940 mit nur etwa 8,5 %. Hierbei handelte es sich auch um das (einzige) Ereignis, bei dem in der Speicherinhaltsbeziehung für die Havel-Niederung eine zu größeren Wasserständen gerichtete Extrapolation erfolgen musste (zum Vergleich siehe oben). Trotz einer Vielzahl vereinfachender, jedoch auch begründeter Annahmen, v.a. in den Transformationsmodulen, *zeigten die Simulationsergebnisse insgesamt, dass es offenbar möglich war, die abgelaufenen Prozesse realistisch zu erfassen.*

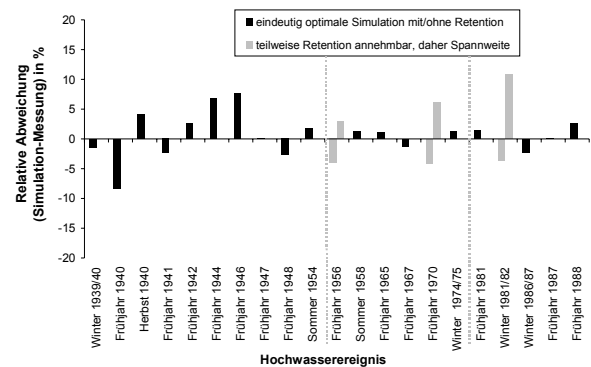


Abb. III-1.51 Prozentuale Abweichungen der Scheitel der simulierten Ganglinien am Pegel Wittenberge von denen der gemessenen Ganglinie.

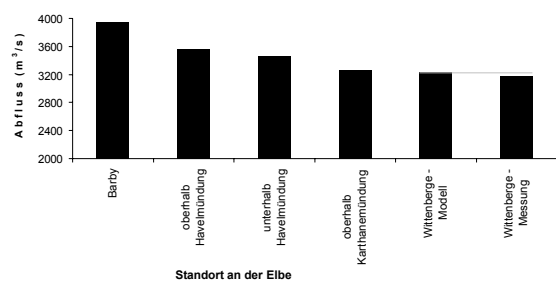


Abb. III-1.52 Rekonstruierte räumliche Entwicklung des Abflussscheitels des Hochwasserereignisses 1954 zwischen den Pegeln Barby und Wittenberge.

Somit konnte davon ausgegangen werden, dass auch die während der Simulation *erzeugten Ganglinien an verschiedenen Stützstellen zwischen den Pegeln Barby und Wittenberge den damals abgelaufenen Ganglinien entsprechen. Der Ablauf der historischen Ereignisse wurde daher rekonstruierbar*, was für die Entwicklung von längerfristigen Längs-

schnitten von statistischen Hochwasserkennwerten von großer Bedeutung war. So zeigt beispielsweise die Abb. III-1.52 den über die Anwendung des gekoppelten Simulationsmodells nachvollzogenen Verlauf des Scheitels des Hochwasserereignisses 1954 an geeigneten Standorten der Elbe.

### III-1.6.7.2 Rekonstruktion von Jahresreihen 1936-1995 der maximalen Hochwasserscheitelabflüsse

Diese Rekonstruktion von Ereignissen und ihrer Scheitelwerte an geeigneten Standorten („Stützstellen“) zwischen den Pegeln Barby und Wittenberge erfolgte zum Teil nach ähnlichen Prinzipien eines mit Transformationsmodulen optional gekoppelten Modells des Ganglinien-Routings, wie im vorangehenden Kapitel beschrieben. Allerdings waren einige Voruntersuchungen notwendig. Zunächst wurden die an allen Pegeln bzw. Standorten zeitlich unabhängigen Ereignisse mit jährlichen Spitzenabflüssen ausgewählt. Die Analysen in Kapitel III-1.6.5.1 zeigten, dass in diesem Strombereich von einer annähernden Gleichheit zwischen den maximalen Momentanwerten und den maximalen Tageswerten ausgegangen werden konnte (zum Vergleich Kapitel III-1.6.5.1). Schließlich waren diejenigen jährlichen Scheitelwerte zu identifizieren, die an den verschiedenen Pegeln/Standorten zu unterschiedlichen zu simulierenden Hochwasserereignissen gehörten. Dies war in einigen Jahren der Fall und bei der Rekonstruktion aller relevanten Ereignisse zu berücksichtigen.

In einem nächsten Schritt wurden die Ereignisse nach folgenden Kriterien eingeteilt:

- Diagnose der ohne eine Transformation vom Pegel Barby zum Pegel Wittenberge gerouteten Ganglinien gegenüber der gemessenen Ganglinie des Pegels Wittenberge.
- Beobachtung des Abflussscheitelwerts am Pegel Barby, vor dem Hintergrund, dass bei etwa  $1250 \text{ m}^3/\text{s}$  der Ausuferungsabfluss im Bereich der Havel-Mündung liegt.
- Zeitpunkt des Auftretens vor oder nach der Durchführung der Deichungsmaßnahmen an der Havel-Mündung (1956) und an der Karthane-Mündung (1981).

*Hieraus ergaben sich drei Gruppen von Ereignissen bzw. Jahren mit unterschiedlichen geeigneten Ansätzen für ihre Simulation.*

In der *ersten Gruppe* handelte es sich um die bezüglich der einzelnen Jahre maximalen Ereignisse des vorangehenden Kapitels, bei denen ein deutlicher Retentionseffekt zu erkennen war. Dies betraf die Jahre 1940, 1941, 1942, 1944, 1946, 1947, 1948, 1954, 1958, 1965, 1967 (jeweils mit Füllung der Retentionsräume an der Havel- und der Karthane-Mündung), 1970 (mit offenbar teilweiser und kontrollierter Nutzung des Havel-Retentionspotentials, sowie der Füllung des Karthane-Retentionsraums), 1956 und 1975 (mit alleiniger Füllung des Karthane-Retentionsraums) und 1982 (mit alleiniger, offenbar teilweiser und kontrollierter Nutzung des Havel-Retentionspotentials), insgesamt also 15 Jahre. Um die Scheitel an den o.g. Stützstellen zu ermitteln, wurde bei Füllung beider Retentionsräume wie im vorangegangenen Abschnitt modelliert, bei Nichtfüllung eines Retentionsraums wurde das Routing der Hochwasserwelle an der entsprechenden Stelle nur für die Addition der Havel-Abflüsse unterbrochen. Bei teilweiser, kontrollierter Nutzung des Havel-Retentionspotentials ergaben sich Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Ganglinien an den Standorten direkt unterhalb der Havel-Mündung und direkt oberhalb der Karthane-Mündung. Da nur die Scheitelwerte interessierten, wurden diese über eine ereignisspezifische, lineare Interpolation zwischen den Werten, die sich bei vollständig simulierter Retentionsraumfüllung durch die Elbe einerseits und Nichtberücksichtigung des Retentionsraums und vollständig addierten Havel-Abflüssen andererseits ergaben, angenähert. Diese Interpolation wurde gemäß der Größenverhältnisse des gemessenen Scheitels zu den entsprechend simulierten Scheiteln am Pegel Wittenberge vorgenommen.

In der *zweiten Gruppe*, die die meisten (33) Jahre umfasste, zeigte die Diagnose am Pegel Wittenberge, dass aufgrund der geringeren Spitzenabflüsse oder aufgrund der Eindeichungen ohne kontrollierte Retentionsmaßnahmen keine bedeutende Retention festzustellen war. Vor 1956 war dies bis zu einem Scheitelabfluss von  $1232 \text{ m}^3/\text{s}$  am Pegel Barby (knapp unterhalb des etwa bei  $1250 \text{ m}^3/\text{s}$  liegenden Ausuferungsabfluss im Bereich der Havelmündung) der Fall, zwischen 1956 und 1980 bis zu einem Scheitelabfluss bei Barby von  $1902 \text{ m}^3/\text{s}$ , danach –

v.a. in den Jahren 1981, 1987 und 1988 – auch bei den höchsten vorkommenden Abflüssen, nur mit Ausnahme des Ereignisses 1982. Es wurde – ohne Retentionsmodul - ein Ganglinien-Routing mit der Addition des Havel-Abflusses vorgenommen, um die Scheitelwerte an den Stützstellen zu ermitteln.

Zwischen diesen beiden Gruppen existierten 12 (Übergangs-)Ereignisse einer *dritten Gruppe*, die alle vor 1981, also vor der Eindeichung der Karthane lagen. Bei diesen Ereignissen zeigte die Diagnose, dass – ähnlich wie bei den offenbar kontrollierten Flutungen der Havel in der ersten Gruppe – der Anstieg des Speicherinhalts an der Havel-Mündung nicht vollständig auf eindringendes Elbewasser zurückgeführt werden konnte. Entsprechend ergaben sich auch hier Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Ganglinien an den Standorten direkt unterhalb der Havel-Mündung und direkt oberhalb der Karthane-Mündung. Zur Ermittlung dieser Scheitelwerte wurden daher – wie bereits für die Ereignisse mit kontrollierten Flutungen der Havel in der ersten Gruppe beschrieben – ereignisspezifische, lineare Interpolationen zwischen den Werten, die sich bei vollständig simulierter Retentionsraumfüllung durch die Elbe einerseits und bei Nichtberücksichtigung des Retentionsraums und vollständig addierten Havel-Abflüssen andererseits ergaben, entsprechend den Beobachtungen am Pegel Wittenberge vorgenommen. Vorab wurde – für beide Fälle – die Simulation der Retention an der Karthane und insbesondere die Wahl des fiktiven Ausuferungspunktes gemäß der analysierten Anstiegsphasen zwischen 1000 und 1500 m<sup>3</sup>/s der gemessenen Ganglinie am Pegel Wittenberge und den hierfür anhand der größeren Ereignisse in Kapitel III-1.6.7.1 gefundenen Zusammenhänge vorgenommen.

Die nach diesen Ansätzen ermittelten Reihen jährlicher Scheitelabflüsse 1936-1995 an den Stützstellen Barby (gemessen), Magdeburg, Tangermünde, oberhalb/unterhalb der Havel-Mündung, oberhalb der Karthane-Mündung (alle simuliert) und Wittenberge (gemessen) werden im Kapitel III-1.6.8 einer statistischen Analyse und dem Versuch einer Längsschnittentwicklung unterzogen.

### III-1.6.8 Ermittlung von Hochwasserstatistiken für den Zeitraum 1936-1995

Nach den Analysen des vornehmlich jüngeren Ist-Zustands in den vorangegangenen Kapiteln (Konsistenzprüfung und Plausibilisierung von Abflussreihen, Identifikation von Abflussveränderungen und begründete Abgrenzung repräsentativer Zeiträume auf Basis einfacher und erweiterter Stationaritäts- bzw. Homogenitätsanalysen, Erkennung räumlicher Entwicklungen statistischer Hochwasserkennwerte als Referenzmuster, Entwicklung von Simulationsinstrumenten und deren Nutzung zur Rekonstruktion historischer Hochwasserereignisse) waren im Sinne des Kapitels III-1-4 auf dieser weitgehend abgesicherten Basis die *Voraussetzungen geschaffen worden, um nun eine statistische Analyse eines hinsichtlich der räumlichen Datendichte, der oft geringeren Konsistenz der Messwerte und der auftretenden Extremereignisse schwieriger zu analysierenden, längerfristigen Zeitraums vorzunehmen*. Dieser Zeitraum, der angesichts einer Langfristvariabilität der Abflussverhältnisse als ein zeitlich erweiterter Ist-Zustand begriffen werden konnte (siehe Kapitel III-1.4 und III-1.6.6), sollte dabei sinnvollerweise *zunächst auf das 20. Jahrhundert beschränkt* werden (zum Vgl. siehe Kapitel III-1.6.2 und III-1.6.6.2) und vor dem Hintergrund der abgesicherten Erkenntnisse anhand der Reihe 1964-1995 begründbar bewertet werden.

Die *methodische Ansatzweise* entsprach weitgehend derjenigen in den Kapiteln III-1.6.3.4 und III-1.6.4, d.h. es wurden die unabhängigen Reihen der jährlichen Scheitelabflüsse analysiert durch die geeignete Anpassung und Extrapolation von – unter Berücksichtigung eines räumlichen Abgleichs – auszuwählenden theoretischen Verteilungsfunktionen, die Ermittlung von Quantilen der jeweiligen Verteilungsfunktion und deren Regionalisierung als hydrologische Längsschnitte. Im Laufe der Analysen (siehe unten ) zeigte sich, dass die statistischen Analysen der Reihen 1936-1995, die an den meisten deutschen Elbe-Pegeln als Messreihen vorlagen und sich daher besonders für eine Regionalisierung statistischer Hochwasserkennwerte als Längsschnitte eigneten, sehr ähnliche statistische Analyseergebnisse erbrachten, wie die Reihen ab 1904. Der *Zeitraum 1936-1995 wurde daher als repräsentativ für die statistischen Hochwasserverhältnisse des 20. Jahrhunderts* (ab 1904, zum Vergleich Kapitel III-

1.6.2 und III-1.6.6.2) *angenommen*. Gemessene Zeitreihen lagen an den Pegeln Dresden, Torgau, Aken, Barby, Wittenberge und Neu Darchau vor. Von der Nutzung gemessener Zeitreihen des Pegels Magdeburg Strombrücke wurde aus den genannten Gründen der Datenunsicherheit gerade im Hochwasserbereich abgesehen (zum Vergleich Kapitel III-1.5 und III-1.6.6.1). Im Bereich zwischen den Pegeln Barby und Wittenberge wurden die nach Kapitel III-1.6.7.2 rekonstruierten Reihen der Stützstellen Magdeburg, Tangermünde, direkt oberhalb/unterhalb der Havel-Mündung und direkt oberhalb der Karthane-Mündung analysiert.

Abb. III-1.53 zeigt exemplarisch die an die Reihen der drei Bezugspegel angepassten theoretischen Verteilungsfunktionen, zusammen mit den plotting positions im Wahrscheinlichkeitsnetz nach Gauß. Als Referenz ist jeweils auch die an die Reihen 1904 – 1995 angepasste Verteilungsfunktion eingezeichnet, um die Ähnlichkeit der Analyseergebnisse zu zeigen und die begründbare Wahl des Zeitraums 1936-1995 zu unterstreichen. In ähnlicher Weise konnten unter Berücksichtigung eines kritischen räumlichen Abgleichs der Statistiken nach plausiblen räumlichen Tendenzen der Hochwassercharakteristik die Analysen der gemessenen Reihen 1936-1995 an den Pegeln Torgau, Aken und Wittenberge vorgenommen werden. Die aus den angepassten Verteilungsfunktionen ermittelten Quantile (statistische Hochwasserkennwerte) sind in der Tab. III-1.11 enthalten.

Im Bereich oberhalb des Pegels Barby musste für den *Pegel Wittenberg* mit einem Reihenbeginn ab 1951 und zudem offenbar inkonsistenten Abflusswerten in den 1950er Jahren (siehe Kapitel III-1.5) eine andere Lösung gefunden werden. Hilfreich war dabei die beobachtbare Tatsache, dass sich im Bereich zwischen den Pegeln Dresden und Barby die räumlichen Muster der Hochwassercharakteristiken zwischen den Reihen 1964-1995 und 1936-1995 ähnelten. So konnten die statistischen Hochwasserkennwerte (MHQ und HQ-T,  $T = 2, \dots, 100$ ) der Reihen 1936-1995 der Pegel Torgau bzw. Aken aus denen der Pegel Dresden und Barby entsprechend den für die Reihen 1964-1995 zwischen den statistischen Hochwasserkennwerten der verschiedenen Pegel ermittelten Verhältnisse (z.B. MHQ(1964-1995)-Dresden/MHQ(1964-1995)-Torgau) bestimmt werden. Die von Barby und Dresden ausgehenden

Schätzungen wichen von den anhand der gemessenen Reihen ermittelten statistischen Hochwasserkennwerten nur um maximal 4 % (Torgau) bzw. 6 % (Aken) ab, bei alleiniger Berücksichtigung des jeweils benachbarten Pegels nur um maximal 3 % (Torgau, aus Dresden ermittelt) bzw. 5 % (Aken, aus Barby ermittelt). Es schien damit gerechtfertigt, die statistischen Hochwasserkennwerte des Pegels Wittenberg für den Zeitraum 1936-1995 entsprechend unter Zuhilfenahme der Werte der Nachbarpegel Torgau und Aken und unter Verwendung der für die Reihe 1964-1995 ermittelten Verhältniszahlen zu berechnen. Ausgehend von den Pegeln Aken einerseits und Torgau andererseits wichen die für den Pegel Wittenberg geschätzten Werte dabei nur um maximal 3 % voneinander ab. Wegen der kleineren Einzugsgebietsdifferenz und den folglich engeren Verhältnissen zwischen den statistischen Hochwasserkennwerten 1964-1995 wurde der vom Pegel Torgau ausgehenden Schätzung größeres Vertrauen gegeben. Die ermittelten Werte sind in der Tab. III-1.11 enthalten.

Im Bereich *unterhalb des Pegels Barby* konnte ein entsprechender Lösungsweg nicht besprochen werden, da nach den Analysen der Kapitel III-1.6.6.1 und III-1.6.7) insbesondere im Bereich der Mündung der Havel nicht von ähnlichen räumlichen Mustern der Hochwassercharakteristiken der Reihen 1964-1995 und 1936-1995 ausgegangen werden konnte. Nach der *Rekonstruktion von Jahresreihen 1936-1995 an den o.g. Stützstellen unter Berücksichtigung der historischen Verhältnisse* (Kapitel III-1.6.7) konnte jedoch auf diese zurückgegriffen werden. Die Tatsache, dass es sich bei diesen Reihen um tägliche Mittelwerte und nicht um momentan gemessene Scheitelwerte handelte, hatte in diesem Bereich einen vernachlässigbaren Effekt auf die Statistiken von maximal 21 m<sup>3</sup>/s (HQ-100 am Pegel Barby) bzw. 15 m<sup>3</sup>/s (HQ-100 am Pegel Wittenberge). Bei der Wahl unter den Verteilungsfunktionen erwies sich die über die Momentenmethode angepasste Log-Normal-3-Verteilungsfunktion (LN3) am Leitpegel Barby als die geeignetste. Beim Pegel Wittenberge fiel die Wahl schwerer, da eine stärkere Streuung der plotting positions im besonders interessierenden Bereich geringer Wahrscheinlichkeiten festzustellen war. Als gegenüber den plotting positions, sowie gegenüber der für den Bezugspegel Neu Darchau gewählten Verteilungsfunktion plausible und bestgeeignetste Verteilungsfunktion wurde

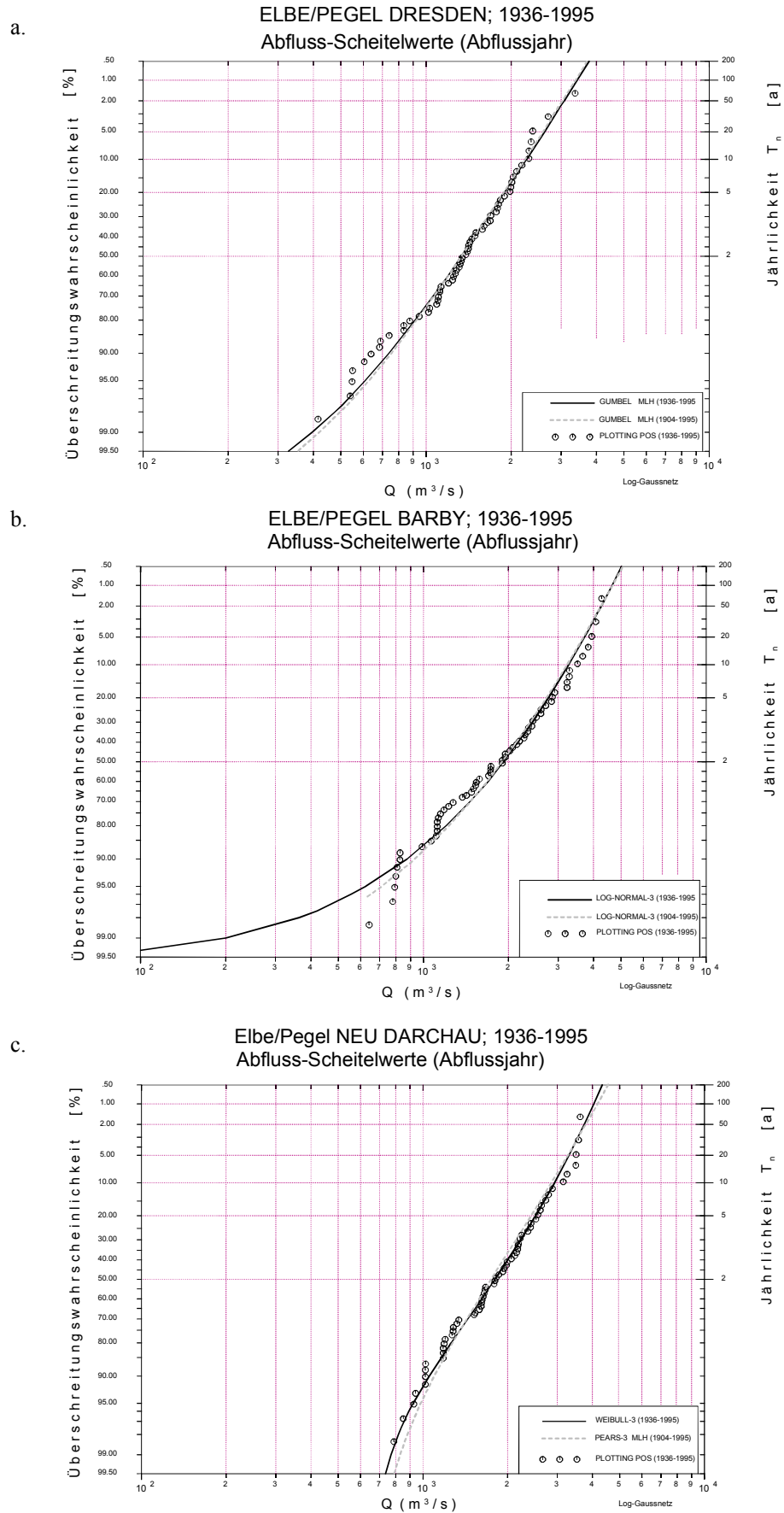
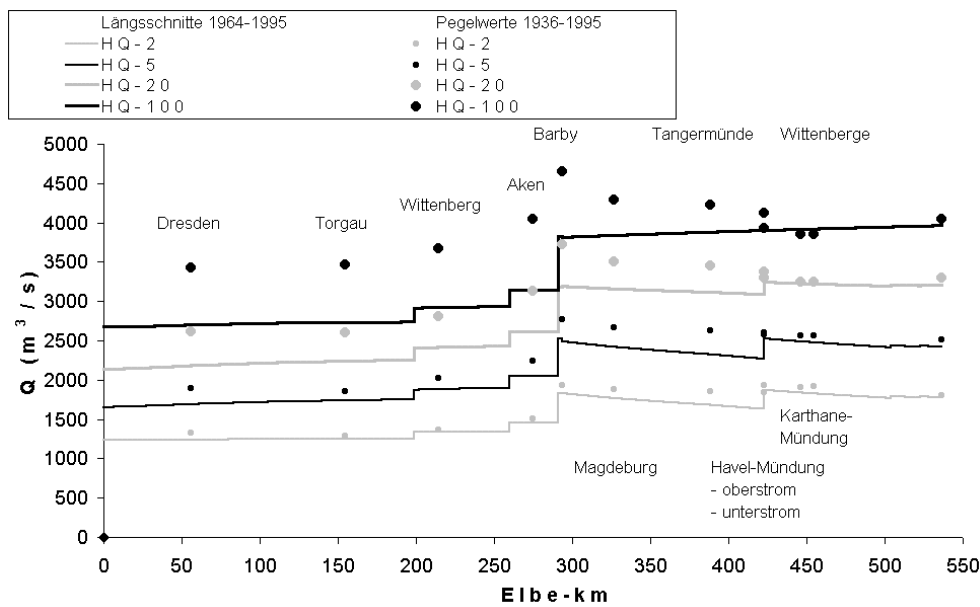


Abb. III-1.53 Plotting positions (nach Weibull) und ausgewählte angepasste theoretische Verteilungsfunktionen (schwarze Linien) der Reihen HQ 1936 - 1995 der Elbe-Pegel Dresden (a.), Barby (b.) und Neu Darchau (c.). Zum Vergleich sind für die Reihen 1904-1995 ausgewählten und angepassten Verteilungsfunktionen (grau gestrichelt) dargestellt.

**Tab. III-1.11** Mittlere Jahresscheitelabflüsse MHQ und Jahresscheitelabflüsse der Jährlichkeiten T (HQ-T), ermittelt für die HQ-Reihen 1936-1995 für verschiedene Elbe-Pegel (gemessene Reihen) bzw. Stützstellen zwischen den Pegeln Barby und Wittenberge (simulierte Reihen). VF steht für die gewählte Verteilungsfunktion, AV für das Verfahren der Anpassung (-M: Momentenmethode, -ML: Maximum-Likelihood-Methode) und RVS für die regionalisierte Verhältnisschätzung. Kürzel für die Verteilungsfunktionen: siehe Kapitel III-1.6.3.4.

Pegel	Zeitbereich	MHQ	VF-AV	HQ-2	HQ-3	HQ-5	HQ-10	HQ-20	HQ-50	HQ-100
Dresden	Moment	1426	Gb-ML	1331	1596	1891	2262	2618	3078	3423
Torgau	Moment	1399	LN3-ML	1285	1553	1855	2237	2607	3092	3461
Wittenberg	Moment	1469	RVS	1362	1677	2021	2438	2815	3308	3668
Aken	Moment	1639	G2-M	1510	1868	2247	2711	3137	3665	4045
Barby	Moment	2014	LN3-M	1922	2336	2767	3269	3717	4261	4649
Barby	Tag	2006	LN3-M	1914	2326	2754	3253	3699	4241	4628
Magdeburg	Tag	1951	LN3-M	1886	2271	2663	3109	3501	3967	4294
Tangermünde	Tag	1925	LN3-M	1860	2238	2623	3063	3448	3909	4232
Oberhalb Havel	Tag	1898	LN3-M	1841	2209	2582	3005	3374	3812	4118
Unteralb Havel	Tag	1970	LN3-M	1931	2267	2601	2975	3296	3673	3932
Oberh. Karthane	Tag	1948	LN3-M	1912	2241	2567	2931	3243	3607	3857
Wittenberge	Tag	1944	LN3-M	1911	2239	2564	2926	3235	3595	3842
Wittenberge	Moment	1950	LN3-M	1916	2244	2570	2933	3245	3608	3857
Neu Darchau	Moment	1917	W3-M	1803	2147	2511	2933	3304	3743	4046



**Abb. III-1.54** Ausgewählte statistische Hochwasserkennwerte der Zeitreihen 1936-1995 an bemessenen Elbe-Pegeln bzw. Stützstellen mit simulierten Reihen gegenüber den in Kapitel III-1.6.4 für die Reihen 1964-1995 ermittelten Längsschnitte der entsprechenden Kennwerte.

auch hier die über die Momentenmethode angepasste LN3 gewählt. Bei den über Simulationen erzeugten Reihen an den Stützstellen zwischen diesen beiden Pegeln zeigten sich ähnliche Streueffekte wie beim Pegel Wittenberge. Bei dem erschwerten räumlichen Abgleich der Hochwasserstatistiken in diesem Bereich mit vor der Eindeichung an der Havel-Mündung räumlich stark veränderlichen Verhältnissen war jeweils die Anpassung mehrerer Verteilungsfunktionen gleich gut möglich. Um hier eine Subjektivität in der Wahl der Verteilungs-

funktionen zu vermeiden, wurden unter den möglichen Verteilungsfunktionen – wie an den Pegeln Barby und Wittenberge – einheitlich die über die Momentenmethode angepassten LN3 gewählt. Die aus den angepassten Verteilungsfunktionen ermittelten Quantile sind in der Tab. III-1.11 enthalten. In Abb. III-1.54 sind von Tab. III-1.11 ausgewählte statistische Hochwasserkennwerte gegenüber der Referenz der für die Reihe 1964-1995 ermittelten Längsschnitte der entsprechenden Kennwerte aufgetragen.

Vor dem Versuch einer Längsschnittentwicklung für den Zeitraum 1936-1995 war es zweckmäßig, die anhand der pegelweisen Statistiken bereits *beobachtbaren räumlichen Tendenzen gegenüber der Referenz der unter abgesicherteren Verhältnissen entwickelten Längsschnitte des Zeitraums 1964-1995 kritisch zu betrachten. Über weite Strecken sind diese Tendenzen demnach plausibel*, d.h. bei ähnlichem Abflussniveau verlaufen die beobachtbaren Tendenzen etwa parallel zu den Längsschnitten des Zeitraums 1964-1995. Dies gilt in erster Linie für den Abschnitt zwischen den Pegeln Dresden und Barby. Ähnlichkeiten (Parallelverläufe) waren, wenn auch bereits mit etwas deutlicheren Einschränkungen, ferner in den Abschnitten zwischen Magdeburg und Havel-Mündung, zwischen Havel- und Karthane-Mündung, sowie zwischen Wittenberge und Neu Darchau zu erkennen.

Erwartungsgemäß *deutliche Abweichungen ergaben sich gegenüber der Situation der Reihe 1964-1995 im Bereich der Havel-Mündung*. Ein bei zunehmendem Abflussniveau kleiner werdender positiver Sprung an der Havel-Mündung war nur bei den Kennwerten HQ-2, HQ-3 und HQ-5 erkennbar. Bereits auf dem Niveau des HQ-2 ist dieser Sprung deutlich kleiner als in bezug auf die Reihe 1964-1995. Diese Beobachtung war darauf zurückzuführen, dass bei diesem Abflussniveau in der Situation vor der Eindeichung bereits eine Retention von Elbe-Wasser in der Havel-Niederung anzunehmen war. Diese Entwicklung nahm bei steigendem Abflussniveau weiter zu, so dass ab etwa einem HQ-10 zunehmend deutlichere negative Sprünge zu beobachten waren.

An der Karthane-Mündung war kaum ein solcher Effekt zu erkennen. Offenbar lief die Niederung an der Karthane-Mündung vor ihrer Eindeichung meistens bereits während der ansteigenden Elbe-Hochwasserwelle voll, so dass sie während des Abfluss-Scheitels kaum weiteres Elbe-Wasser aufnehmen konnte. Dies entspricht den Untersuchungsergebnissen zu potentiellen Wirksamkeiten von gegenwärtig diskutierten Maßnahmen der Deichrückverlegung (siehe Merkel et al. 2001; Kap. III-3).

Im Gegensatz zu den bis hierhin genannten Entwicklungen *nicht plausibel gegenüber den Längsschnitten des Zeitraums 1964-1995 war diejenige direkt unterhalb des Pegels Barby*. Bis Magdeburg kam es ab einem HQ-5 aufwärts in zunehmendem Maße zu einem starken Abfall des betreffenden statistischen Hochwasserkennwerts. Es lag daher nahe, an dem (bemessenen) Pegel Barby den Ursachen für diese Entwicklung nachzugehen. Da der Abfall mit steigendem Abflussniveau zunahm, war seine Ursache bei den höchsten Scheitelwerten zu vermuten. Entsprechend wurden die *Hochwasserereignisse mit einer Jährlichkeit von über 20 am Pegel Barby näher betrachtet*. Dabei handelte es sich um die Ereignisse im Frühjahr 1946 (Scheitel: 4270 m<sup>3</sup>/s), im Frühjahr 1940 (4070 m<sup>3</sup>/s), im Sommer 1954 (3939 m<sup>3</sup>/s) und im Frühjahr 1947 (3830 m<sup>3</sup>/s). Abb. III-1.55 zeigt exemplarisch die Ganglinie des Hochwasserereignisses 1946 für den oberliegenden Leitpegel Dresden, für die direkt oberhalb – jedoch weniger verlässlichen - liegenden Pegel Aken und Calbe Gr. (Saale), für den Pegel Barby selbst, sowie für den unterliegenden Leitpegel Neu Darchau.

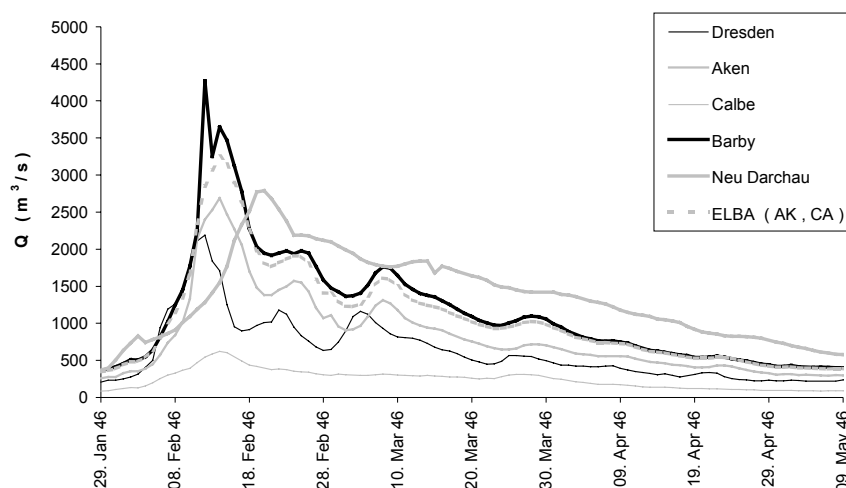


Abb. III-1.55 Gemessene Ganglinie des Hochwasserereignisses 1946 an verschiedenen Elbe-Pegeln und am Pegel Calbe Gr. (Saale), sowie nach dem Modell ELBA aus den Ganglinien der Pegel Aken und Calbe Gr. für den Pegel Barby simulierte Ganglinie.

Zudem ist in Abb. III-1.55 die über das Routing-Modell ELBA aus den Ganglinien der Pegel Aken und Calbe Gr. für den Pegel Barby simulierte Ganglinie eingezeichnet. In dieser Abbildung ließ sich ein *nicht plausibler zeitlicher Verlauf des Hochwasserereignisses am Pegel Barby mit einem kurzen und sehr hohen Scheitelwert identifizieren*, der bei allen anderen Hochwasserereignissen nicht in ähnlicher Form auftauchte.

Hinzu kam, dass die simulierte Vergleichsganglinie einen wesentlich geringeren und zeitlich verschobenen Scheitelwert aufwies. Im unterliegenden Verlauf der Elbe konnte davon ausgegangen werden, dass ein solcher Abfluss-Scheitel stark gedämpft wurde, wie es offenbar auch in der Simulation der Ganglinie für den Pegel Magdeburg durch das Modell ELBA geschah. Hiermit kam der starke Abfall der statistischen Hochwasserkennwerte zwischen diesen beiden Pegeln zustande.

Besonders bei den Ereignissen 1940 und 1947 fanden sich beim Pegel Barby Scheitelformen, die ebenfalls kritisch zu hinterfragen waren, jedoch nicht in der evidenten Weise wie beim Ereignis 1946. Auch ließen sich hier viel bessere Übereinstimmungen zwischen den am Pegel Barby gemessenen und nach ELBA simulierten Ganglinien erkennen.

Eine *kritische Überprüfung der Wasserstands-Abfluss-Wertepaare dieser Abflussscheitel* (zum Vgl. Kapitel III-1.5) ergab keine Auffälligkeiten: die Wertepaare lagen im Bereich der durch die anderen Wertepaare gebildeten Kurvenstrukturen. Somit wären bereits die gemessenen Wasserstände als fehlerhaft anzunehmen. Allerdings war angesichts des geraden Verlauf dieser Kurven in diesem Bereich zu hinterfragen, ob es sich bei den zugrundeliegenden Abflusskurven nicht um zu grobe Abschätzungen handelte. Wegen der kurzen Dauer der untypischen Scheitelformen waren zudem *kaum Argumente aus der Füllenbilanzierung der Hochwasserereignisse* gegenüber den (weniger verlässlichen) Pegeln Aken und Calbe Gr. wie in Kapitel III-1.5 zu erwarten. Zudem ergaben diese für den Pegel Barby eher Defizite als Überschüsse. Ab dem Jahr 1948 wurde zwar am Pegel Barby eine neue Abflusskurve benutzt, jedoch entsprach diese weitgehend der vorher gültigen und war nicht in der Lage die festgestellten Probleme zu erklären.

Verwendete man für das Ereignis 1946 in der Hochwasserstatistik statt dem gemessenen Wert von  $4270 \text{ m}^3/\text{s}$  den *aus dem Ganglinien-Routing ermittelten Scheitelwert* von  $3256 \text{ m}^3/\text{s}$ , so erhielt man bereits einen deutlichen Effekt auf die ermittelten statistischen Kennwerte: während die Veränderungen bis zum HQ-5 mit weniger als  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  vergleichsweise gering ausfielen, waren für den HQ-10 mit  $3207 \text{ m}^3/\text{s}$ , für den HQ-20 mit  $3625 \text{ m}^3/\text{s}$ , für den HQ-50 mit  $4128 \text{ m}^3/\text{s}$  und für den HQ-100 mit  $4482 \text{ m}^3/\text{s}$  zunehmend deutliche Unterschiede festzustellen (zum Vergleich Tab. III-1.11). Dennoch verblieb zum Pegel Magdeburg noch ein deutlicher Abfall der höheren statistischen Hochwasserkennwerte, z.B. beim HQ-100 um knapp  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Andererseits schien die *Hochwasserstatistik des Pegels Barby innerhalb der Pegel zwischen Dresden und Barby mehr oder weniger plausibel*. Aus den HQ-100 der Reihen 1936-1995 ergab sich zwischen den Werten bei Barby ( $4649 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und Dresden ein Verhältnis von 1,37, aus denen der Reihen 1964-1995 ein ähnliches von 1,40. Weiter konnten die höchsten Messwerte Dresdens über die entsprechenden Werte des benachbarten tschechischen Pegels Decin bestätigt werden: die Wertepaare Dresden (Termin- bzw. Tageswerte) : Decin lauteten bei:  
Ereignis 1940  $3360$  bzw.  $3110 \text{ m}^3/\text{s}$  :  $3350 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  
Ereignis 1941  $2700$  bzw.  $2650 \text{ m}^3/\text{s}$  :  $2820 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  
Ereignis 1946  $2310$  bzw.  $2190 \text{ m}^3/\text{s}$  :  $2310 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  
Ereignis 1947  $2380$  bzw.  $2340 \text{ m}^3/\text{s}$  :  $2500 \text{ m}^3/\text{s}$  und  
Ereignis 1954  $2350$  bzw.  $2300 \text{ m}^3/\text{s}$  :  $2360 \text{ m}^3/\text{s}$   
(zum Vergleich siehe auch Kapitel III-1.5).

Somit *entstand die Frage, ob die nicht plausible Entwicklung unterhalb des Pegels Barby durch fehlerhafte Messwerte am unterstromigen Pegel Wittenberge nicht zumindest mitbedingt ist*. Hierfür sprach auch, dass an diesem Pegel bei der Rekonstruktion der Hochwasserereignisse für zwei Ereignisse (Frühjahr 1946 und Frühjahr 1944) deutlich höhere simulierte als gemessene Scheitelwerte festzustellen waren (siehe Abb. III-1.51), dass die Abflusskurve des Pegels im Juni 1947 zu höheren Q/W-Verhältnissen hin verändert wurde und dass sich bei den HQ-20 bis HQ-100 des Pegels Neu Darchau etwas höhere Werte als beim Pegel Wittenberge ergaben. Es konnte vermutet werden, dass die Veränderung der Abflusskurve früher hätte erfolgen müssen, eventuell im Jahr 1941, da für das Ereignis 1940 die (allerdings hinsichtlich der Extrapolation



der Speicherinhaltsbeziehung der Havel-Niederung kritische) Rekonstruktion einen deutlich geringeren simulierten als gemessenen Scheitel ergab (zum Vergleich Kapitel III-1.6.7). Folglich wurden die Scheitel der Jahre 1941-1947 mit Hilfe der ab 1947 gültigen W-Q-Beziehung zu höheren Abflüssen hin modifiziert. Im Vergleich zu den in Tab. III-1.11 angegebenen Werten wurden damit jedoch lediglich um bis zu  $33 \text{ m}^3/\text{s}$  höhere Werte der HQ-T erhalten (HQ-100:  $3890 \text{ m}^3/\text{s}$ ). In einer weitergehenden Argumentation konnte z.B. der Referenz-Längsschnitt HQ-100 der Reihe 1964-1995 im Bereich zwischen Barby und Havel-Mündung (siehe Abb. III-1.29) genutzt werden. Dabei waren z.B. die HQ-100 am Pegel Magdeburg um  $23 \text{ m}^3/\text{s}$  und am Pegel Tangermünde um  $61 \text{ m}^3/\text{s}$  höher als die des Pegels Barby. Ging man für die Reihe 1936-1995 in diesem Bereich von ähnlichen Verhältnissen (d.h. auf ähnlichem Abflussniveau parallel verlaufenden Längsschnitten) wie für die Reihe 1964-1995 aus und nahm man trotz der (geringen) Veränderung am Pegel Wittenberge ähnliche Sprünge der statistischen Kennwerte an der Havel-Mündung wie in Abbildung 54 an, so ließ sich z.B. der HQ-100 des Pegels Barby aus den HQ-100 der Pegel Tangermünde oder Magdeburg zuzüglich  $33 \text{ m}^3/\text{s}$  und abzüglich  $61$  bzw.  $23 \text{ m}^3/\text{s}$  ermitteln. Man erhielt Werte zwischen etwa  $4200$  und  $4300 \text{ m}^3/\text{s}$ , die deutlich unter denen des Pegels Barby ( $4649 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw. nach Modifikation des Ereignisses 1946  $4482 \text{ m}^3/\text{s}$ ) lagen und damit nur zu geringem Teil die nicht plausible Entwicklung der Hochwasserstatistiken 1936-1995 zwischen den Pegeln Barby und Magdeburg erklären konnten. Verwendete man, wiederum mit Hilfe der Referenz des Längsschnitts der HQ-100 (1964-1995), in entsprechender Weise z.B. die Differenz der HQ-100 (1936-1995) zwischen den Reihen Wittenberge und Neu Darchau von  $189 \text{ m}^3/\text{s}$ , so ließen sich für den Pegel Barby Werte zwischen  $4340 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $4440 \text{ m}^3/\text{s}$  abschätzen, die zumindest dem o.g. Wert von  $4482 \text{ m}^3/\text{s}$  nahe kamen. Ohne diese Annahmen für den Pegel Wittenberge, mit einer einfachen, zum Längsschnitt 1964-1995 parallelen und von den Pegeln Magdeburg bzw. Tangermünde ausgehenden Rückwärtsverlängerungen bis zum Pegel Barby ließen sich hingegen z. B. lediglich HQ-100-Werte (1936-1995) des Pegels Barby zwischen  $4170$  und  $4270 \text{ m}^3/\text{s}$  ermitteln.

*Mit den verfügbaren Informationen ist es zur Zeit schwierig einzuschätzen, welche Effekte in welchem*

*Ausmaß zur festgestellten Inkonsistenz beitragen. Weitere Aufschlüsse müssen detailliertere Untersuchungen der identifizierten kritischen Ereignisse bzw. Zeiträume, insbesondere in dem problematischen Bereich um den Pegel Barby, und entsprechende Abstimmungen mit den zuständigen Behörden ergeben. Auch die Einbeziehung weiter zurückliegender Ereignisse könnte wertvolle Informationen zur besseren Einordnung der Beobachtungen liefern (siehe Kapitel III-1.8). Mit gesicherteren Angaben wäre dann ein Längsschnitt wie in Kapitel III-1.6.4 durch Regressionsbeziehungen zu ermitteln. Im unteren Abschnitt wäre dabei jedoch eine feinere Einteilung in Pegel bzw. Standortgruppen sinnvoll, zumindest mit einer Trennung der Gruppen an der Havel-Mündung.*

*Bis zum jetzigen Zeitpunkt und mit den derzeit verfügbaren Informationen konnten lediglich die pegelweisen Hochwasserstatistiken der Reihen 1936-1995 (Tab. III-1.11 bzw. Abb. III-1.54) als Annäherung an die räumliche Ausprägung der Hochwassersituation des 20. Jahrhunderts entlang der deutschen Gewässerstrecke der Elbe dienen. Im kritischen Bereich um den Pegel Barby liegen die wahren Werte wahrscheinlich deutlich niedriger.*

Andererseits liegen die Abweichungen der genannten Werte von dem Wert  $4650 \text{ m}^3/\text{s}$  alle innerhalb eines 10%-Intervalls von diesem. Anhand der nach Kapitel III-1-5 rekonstruierten Wasserstand-Abfluss-Beziehung entsprechen diese 10 % einem Wasserstandsunterschied von etwa 20 cm. Dieser Unsicherheitsbereich verbleibt innerhalb des nach den Hinweisen in Kapitel III-1.6.3.4 ermittelbaren Konfidenzintervalls (Signifikanzniveau 95 %) des Quantil-Schätzers des HQ-100 der Reihe 1936-1995 am Pegel Barby, dessen Untergrenze bei etwa  $4000 \text{ m}^3/\text{s}$  liegt.

Unterstrom des Pegels Barby nimmt die Unsicherheit rasch ab, da die (fragwürdigen) scharf ausgeprägten Abflussscheitel des Pegels Barby bei der stromabwärts laufenden Hochwasserwelle einer starken Dämpfung unterliegen, sowohl in der Realität als auch im Modell.

Trotz der genannten Unsicherheiten waren die pegelweisen statistischen Hochwasserkennwerte der Reihe 1936-1995 gegenüber den entsprechenden Längsschnitten der Reihe 1964-1995 in der Lage, **Veränderungen in der Hochwassersituation** zu erkennen. Oberhalb der Havel-Mündung kam es

demnach zu einem deutlichen Effekt abnehmender Hochwasserscheitel. Als Gründe konnten einerseits die Einrichtungen der tschechischen Talsperren in den 1950/60er Jahren gesehen werden, andererseits jedoch auch klimatologische Entwicklungen (zum Vergleich Kapitel III-1.6.6.2 Im Bereich der Havel-Mündung und weiter stromabwärts kompensierten offenbar insbesondere die Eindeichungsmaßnahmen an der Havel-Mündung weitgehend diesen Effekt, so dass sich die Hochwasserstatistiken der Reihen 1964-1995 und 1936-1995 an den Pegeln Wittenberge und Neu Darchau nur relativ geringfügig unterschieden.

### III-1.6.8.1 Ermittlung einer fiktiven Hochwasserstatistik des Pegels Wittenberge für den Zeitraum 1936-1995 unter der Annahme bereits im Jahr 1936 existierender Eindeichungen an Havel- und Karthane-Mündung

Während des im vorangehenden Abschnitt untersuchten Zeitraums 1936-1995 existierten die Eindeichungen an den Mündungen der Havel und der Karthane nicht von Beginn an. Die Analyseergebnisse entsprachen daher in diesem Bereich nicht dem eigentlichen zeitlich erweiterten, d.h. auf die Verhältnisse des 20. Jahrhunderts bezogenen Ist-Zustand. Insbesondere die *großen Hochwasserspitzen der 1940/50er Jahre* wären unter *heutigen Verhältnissen schwächer gedämpft* worden. Somit waren für ein *Szenario mit seit 1936 dem heutigen Eindeichungszustand entsprechenden Verhältnissen* aufgrund (historisch) fehlender Retentionsräume höhere statistische Hochwasserkennwerte für die Pegel Wittenberge und Neu Darchau zu erwarten. Um diese Wirkung näher zu untersuchen, wurde

nach der bereits in Kapitel III-1.6.1.1 erläuterten Vorgehensweise die *gesamte Abflussreihe ab 1936 mit dem Modell ELBA mit heute gültigen Parametern und ohne Berücksichtigung von Retentionseffekten zum Pegel Wittenberge geroutet*. Für den Zufluss der Havel wurden die beiden in Kapitel III-1.6.6.1 genannten Annahmen berücksichtigt (voller Zufluss, kein Zufluss), so dass zwei Reihen am Pegel Wittenberge resultierten, die die Bandbreite der im Szenario möglichen Verhältnisse abdecken. Aus den gerouteten Reihen wurden – wie in den Kapiteln III-1.6.1 und III-1.6.3.4 beschrieben – die Reihen der unabhängigen jährlichen Scheitelabflüsse ermittelt und einer Extremwertstatistik unterzogen. Die ermittelten statistischen Hochwasserkennwerte wurden mit denen, die aus der gemessenen Reihe des Pegels Wittenberge ermittelt wurden (siehe Tab. III-1.11) verglichen (siehe Abb. III-1.56). Bei den Kennwerten mit kleinerem statistischen Wiederkehrintervall waren dabei eher die größeren simulierten Werte, bei den Kennwerten mit größerem statistischen Wiederkehrintervall eher die kleineren simulierten Werte anzunehmen. Die Abbildung zeigt, dass *mit zunehmendem Abflussniveau eine größere Differenz zwischen den auf Basis simulierter und gemessener Reihen ermittelter Hochwasserkennwerte auftrat*. Beim HQ-100 sind die auf Basis simulierter Reihen ermittelten Werte – abhängig von den Annahmen für die Havel-Zuflüsse – etwa um (eher) 5% bis 10% größer als die auf Basis gemessener Reihen ermittelten Werte. *Bei der Bewertung des Ist-Zustands der Hochwasserhältnisse der Elbe unterhalb der Havel-Mündung sind die Ergebnisse dieses Szenarios zu berücksichtigen*. Insbesondere ist hier für die unter der klimatischen Variabilität des 20. Jahrhunderts vorkommenden größten Hochwasserereignisse von noch deutlich höheren Abflussscheiteln auszugehen!

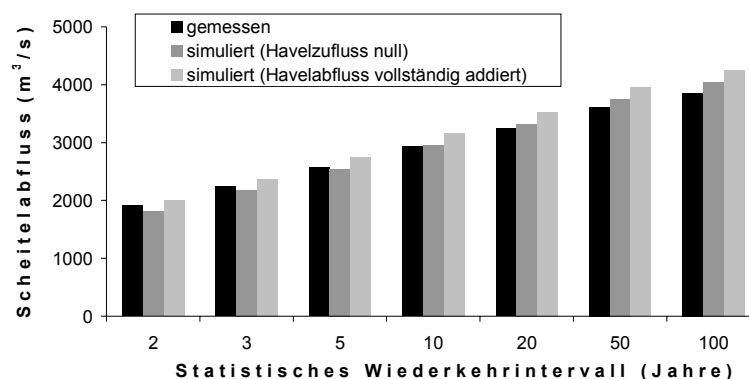


Abb. III-1.56 Vergleich der statistischen Hochwasserkennwerte, ermittelt aus den gemessenen und über das Modell ELBA simulierten Reihen jährlicher Scheitelabflüsse im Zeitraum 1936-1995 des Pegels Wittenberge.

### III-1.7 Verwertbarkeit der hydrologischen Untersuchungsergebnisse und Schnittstellen zu anderen Disziplinen aus hydrologischer Sicht

Wie bereits in der Einleitung (Kapitel III-1.1) angesprochen, wird der Raum entlang des Gewässerlaufs der Elbe unter vielen Gesichtspunkten entscheidend durch den Abflussprozess der Elbe und die daraus resultierende Dynamik der Wasserstände beeinflusst und geprägt

In diesem Abschnitt werden daher aus hydrologischer Sicht *einige Aspekte zur Verwertbarkeit der in diesem Bericht dargestellten Analyseergebnisse* angesprochen. Die Ausführungen hierzu werden bewusst knapp gehalten, da u.a. in Kapitel I dieses Bandes eine Erörterung der Thematik erfolgt.

Der Abflussprozess steht am Beginn verschiedener Wirkungsketten im landschaftsökologischen Gefüge des Flusssystemes und stellt eine wichtige Randbedingung bei der Nutzung und Gestaltung des Raums durch den Mensch dar. Dementsprechend wurden vor der Durchführung der eigentlichen Analyse des Abflussprozesses *Vorüberlegungen* und *Abstimmungen* vorgenommen. Hiermit wurde neben den unter hydrologischem Aspekt allein interessierenden Ergebnissen auch eine *Relevanz der Ergebnisse* für weitergehende Forschungsaktivitäten im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit (z.B. im Forschungsverbund ‚Elbe-Ökologie‘) und für politisch-administrative Entscheidungsprozesse bei Konflikten in Bezug auf die Nutzung und Gestaltung der Flusslandschaft und des Flusseinzugsgebiets (z.B. zu Strategien des Hochwasserschutzes) gewährleistet. Ferner wurden damit die Umsetzung notwendiger *Arbeitsschritte* und *Modellkopplungen* an den jeweiligen *Schnittstellen* (z.B. im Rahmen eines Decision Support Systems) ermöglicht. Mit dieser gesamtheitlichen Betrachtung wird wesentlichen Inhalten der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft entsprochen (zum Vergleich EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT 2000)

Zur weiteren Verwertung werden einerseits *tägliche Abflussganglinien* (z.B. von Hochwasserereignissen) und andererseits *statistische Abflusskennwerte* benötigt.

Eine Möglichkeit zur Ermittlung von Hochwasserkennwerten mit Relevanz für die Auenökologie und den Hochwasserschutz wurde durch die in Kapitel

III-1.6.1 dargestellte *Parametrisierung täglicher Abflussganglinien* vorgenommen.

Durch die bei der Simulation täglicher Abflussreihen *auf den Ist-Zustand bezogene Betrachtung* wurden ferner die heute stattfindenden Prozesse von historischen, jedoch heute nicht mehr wirkenden Einflüssen so gut wie möglich getrennt. Ähnlich wie bei der Einbeziehung von historischen Einflussfaktoren in die Simulationsmodelle (siehe Kapitel III-1.6.7) können auch für künftig geplante Maßnahmen die Wirkungen bei sonst unveränderten Bedingungen des Ist-Zustands durch eine Modifikation in den Simulationsmodellen zutreffend erfasst werden. Ein Beispiel hierfür ist die Untersuchung zur Wirksamkeit gegenwärtig diskutierter Maßnahmen der Deichrückverlegung (siehe MERKEL ET AL. 2001: Kap. III-3 in diesem Band).

Nach der Entwicklung der hydrologischen Längsschnitte mit dem Ganglinien-Routing des Modells ELBA sind die hydrologischen Informationen nicht auf die bemessenen Standorte der Pegel beschränkt, sondern können auch auf *beliebige Stellen* entlang des betrachteten (deutschen) Gewässerlaufs übertragen werden. Gleichzeitig wird hiermit ein *großräumiger Überblick* erreicht, der weitere Untersuchungen bzw. politisch-administrative Entscheidungen im *Kontext der Gesamtsituation der Elbe* erlaubt.

Maßgeblich für die weitere Verwendung der hydrologischen Analyseergebnisse und die Kopplung der hydrologischen Simulationsinstrumente mit Modellen anderer Disziplinen ist die Nutzung *hydraulischer Modelle*, mit denen bei gegebenen Abflussganglinien bzw. gegebenen statistischen Abflusskennwerten wichtige aus diesen *resultierende Größen* ermittelt werden können. Dies wurde im Verbundprojekt durch hydraulische Berechnungen entlang der gesamten freifließenden deutschen Elbe (Summe der Teilstrecken: 507 km) unter Vorgabe der hydrologischen Abflusskennwerte (MNQ, MQ, HQ-2, ..., HQ-100) konsequent umgesetzt (zum Vergleich siehe OTTE-WITTE ET AL 2001 – Kapitel III-2 dieses Bandes).

In erster Linie sind dabei die *Wasserstände* zu nennen. Ihre Dynamik, sowie die ggf. resultierende Überflutungsdynamik hat insbesondere für die Untersuchung und das Management der in den

Vorländern (Auen) stattfindenden Prozesse große Bedeutung. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang v.a. die Abgrenzung von Überflutungsflächen (z.B. bezogen auf HQ-100 entlang der Hochufer, siehe BÜCHELE ET AL. – Kapitel II-3.4), der Wasser- und insbesondere der Grundwasserhaushalt (siehe MOHRLOK & JIRKA 2001 bzw. BUREK & NESTMANN 2001 – Kapitel IV-3 und IV-4), die Ökologie und der Stoffhaushalt (in einer Vielzahl weiterer Forschungsaktivitäten im Rahmen des Forschungsverbundes ‚Elbe-Ökologie‘) und der Hochwasserschutz durch Retentionsmaßnahmen (siehe z.B. MERKEL ET AL. 2001 – Kapitel III-3 dieses Bandes).

Weiterhin sind die *Prozesse des Feststofftransports* und *der morphologischen Entwicklung* der Elbe von Bedeutung. Sie werden maßgeblich hydrologisch gesteuert. Auch die Teiluntersuchungen im Verbundprojekt zu diesem Themenkomplex bauen auf die hier vorgestellten hydrologischen Grundlagen auf (siehe z.B. SAUER ET AL. 2001, WANG ET AL. 2001 – Kapitel III-4 und III-5 dieses Bandes).

### III-1.8 Zusammenfassung und Ausblick

Die wichtigsten Ergebnisse der dargestellten hydrologischen Untersuchungen werden hier mit Verweisen auf die jeweiligen Kapitel zusammengefasst. Aus dem Gesamtergebnis wird die beim aktuellen Forschungsstand sinnvolle weitere Vorgehensweise abgeleitet und als Ausblick formuliert.

*Die Abflussverhältnisse stellen in Flusslandschaften ein wesentliches Element dar.* Um Grundlagen für die Forschung und Entscheidungsfindungen in der Flusslandschaft zu liefern, wurden *hydrologische Untersuchungen* zur besseren Beschreibung und zum Verständnis des Abflussprozesses in seinem mittleren Verhalten, seiner Variabilität und seiner zeitlichen Entwicklung durchgeführt. Der Schwerpunkt wurde dabei auf die - den Raum entlang der Elbe besonders prägenden - *Hochwasserverhältnisse* gelegt (siehe auch Kapitel III-1.1).

Zu diesem Zweck wurde eine umfangreiche **Datenbasis** aufgebaut, insbesondere mit täglichen Wasserstands- und Abflusszeitreihen an Elbe- und wichtigen Nebenflusspegeln in Deutschland. Die verfügbaren Reihenlängen unterscheiden sich an den verschiedenen Pegeln beträchtlich (siehe Kapitel III-1.3).

Mit den Zielen der Analyse und Simulation des Abflussprozesses wurde eine aus Elementen der Datenerhebung, der Konsistenzanalyse, der statistischen Analysen, der Simulationsmodelle und der theoretischen hydrologischen Überlegungen bestehende **methodische Vorgehensweise** entwickelt. Vor dem Hintergrund unsicherer oder gar fehlender Abflussmessdaten und nichtstationärer, komplexer Prozesse erlaubt es diese Vorgehensweise, in schrittweisem Fortschritt und in wechselseitiger Abstimmung und Ergänzung der genannten Einzeluntersuchungen den Abflussprozess zunehmend verlässlich, repräsentativ, umfassend, fundiert, weiter in die Vergangenheit zurückreichend und gezielter auf besonders problematische Räume und Ereignisse zu analysieren bzw. nachzubilden (siehe Kapitel III-1.4, sowie siehe unten – ‚Ausblick‘).

Bei einer *ersten Konsistenzuntersuchung* der Abflusszeitreihen ergaben sich teilweise erhebliche *Inkonsistenzen*, die nachfolgende Untersuchungsschritte erschwerten bzw. in ihrer Verlässlichkeit eingeschränkt hätten. Nach der Untersuchung der zeitlichen Entwicklung der W-Q-Beziehungen und verschiedenen Bilanzbetrachtungen für benachbarte Pegelgruppen waren die betroffenen Pegel und Reihenabschnitte bereits *zum Teil plausibilisierbar*, besonders in der Zeit ab den 1960er Jahren (zum Vgl. siehe Kapitel III-1.5). Teilweise, besonders für weiter zurückliegende Zeiträume, mussten jedoch im Sinne der o.g. Vorgehensweise andere Analyse- bzw. Entwicklungsschritte vorangehen, um Inkonsistenzen zu identifizieren und zu plausibilisieren. Es verblieben jedoch Inkonsistenzen für einige Hochwasserereignisse der 1940er Jahre, besonders im Stromabschnitt unterhalb der Saalemündung (zum Vergleich siehe unten, sowie Kapitel III-1.6.7 und insbesondere Kapitel III-1.6.8).

Zur Untersuchung des Abflussprozesses wurden die täglichen Abflussreihen geeignet in Form von Reihen jahres- und monatsbezogener Kennwerte **parametrisiert**. Dabei wurde von vornherein die Relevanz der anhand der untersuchten Kennwertreihen erzielbaren Ergebnisse für eine weitere Verwertbarkeit bei der weiteren Forschung und Entscheidungsunterstützung berücksichtigt (zum Vergleich Kapitel III-1.6.1 und III-1.7).

Im Sinne der oben beschriebenen Vorgehensweise wurde nach der ersten Plausibilisierung der Abflussreihen anhand der verlässlichsten Pegel eine

**Stationaritätsanalyse mit statistischen Verfahren** durchgeführt, da angesichts einer klimatologischen Variabilität und anthropogen bedingter Einflüsse auf die Abflussdynamik von Instationaritäten auszugehen war. Dies war neben dem Interesse für Abflussveränderungen an sich erforderlich, um die geeignete Behandlung einer Instationarität in weiteren Analyseschritten zu gewährleisten. Dabei waren insbesondere Inhomogenitäten in zu analysierenden Abflussreihen zu vermeiden, da diese zu verzerrten und nicht den vollen Informationsgehalt einer Abflussganglinie ausschöpfenden Analyseergebnissen geführt hätten. Die wichtigsten *festgestellten Instationaritätseffekte* waren ein komplexes Schwingungsverhalten im Mittel- und Hochwasserbereich mit Gruppierungseffekten nasser und trockener bzw. hochwasserreicher und –armer Perioden während des 20. Jahrhunderts, sowie bei Einbeziehung des 19. Jahrhunderts - zumindest am Pegel Dresden - ein signifikanter langfristig abnehmender Trend jährlicher Hochwasserscheitelwerte mit einer Konzentration dieser Entwicklung auf die Zeiträume um die Jahrhundertwende des 19. und 20. Jahrhunderts (klimatisch bedingt) und der 1950er/60er Jahre (klimatisch und durch die anthropogenen Eingriffe bedingt). Die Berücksichtigung dieser instationären Entwicklung ist für die Bewertung der Ergebnisse von Untersuchungen anderer Disziplinen in der Flusslandschaft (z.B. Auenökologie) von großer Bedeutung. Im Hinblick auf die weiteren hydrologischen Untersuchungen war die Schlussfolgerung zu ziehen, dass *statistisch zu analysierende Abflussreihen eine ausreichende Länge* haben mussten, um nicht zu stark von hochwasserreichen oder –armen Phasen geprägt zu werden. Zudem sollte die untersuchte Reihenlänge *an verschiedenen Pegeln einheitlich* sein, um vergleichbare und regionalisierbare Ergebnisse zu erhalten. Dies galt umso mehr, da die genannten längerfristigen Veränderungen berücksichtigt werden mussten. Aufgrund der längerfristigen Entwicklungen waren die weiteren Untersuchungen ferner auf repräsentative Zeiträume zu beziehen. Die Abgrenzung und Einordnung von für verschiedene Bedingungen *repräsentativen Zeiträumen* war durch die statistische Stationaritätsanalyse möglich und gegenüber den klimatischen und anthropogen bedingten Entwicklungen auch erklärbar. Insbesondere konnte ein *jüngerer Zeitraum 1964-1995 abgegrenzt* werden, der bei ausreichender Länge für statistisch bereits verlässliche Aussa-

gen die gegenwärtigen hydrologischen Bedingungen am besten und weitgehend homogen repräsentiert. Zudem zeigten die Stationaritätsanalysen, dass es gerechtfertigt ist, innerhalb des 20. Jahrhunderts auch *längere Kennwertreihen* (z.B. 1904-1995 bzw. 1936-1995, zum Vergleich siehe unten) statistisch zu analysieren. Nicht ohne weiteres zu rechtfertigen waren demgegenüber Abflussstatistiken über den Zeitraum ab 1853. Näheres zur Stationaritätsanalyse und zu den festgestellten Instationaritäten findet sich in den Kapiteln III-1.2, III-1.6.2, sowie auch weiter unten bzw. im Kapitel III-1.6.6.

Der somit abgegrenzte, für den hydrologischen Ist-Zustand weitgehend repräsentative und hinsichtlich der Konsistenz der Abflussreihen verlässlichste **Zeitraum 1964-1995** wurde daraufhin einer *detaillierten zeitreihenanalytischen Untersuchung der pegelweisen Abflussreihen* unterzogen. Hierzu gehörten die Berechnung grundlegender statistischer Kennwerte (u.a. Gewässerkundliche Hauptwerte), die Ermittlung von Dauerlinien und des mittleren Abflussregimes, sowie die extremwertstatistische Analyse der Jahresreihen verschiedener Abflusskennwerte, insbesondere im Hochwasserbereich. Die Ergebnisse dieser pegelweisen Analysen wurden als *hydrologische Längsschnitte der Elbe* zwischen der deutsch-tschechischen Grenze und dem Pegel Neu Darchau, also über eine Stromlänge von 536 km, regionalisiert, um Aussagen zur Abflussdynamik auch an nicht bemessenen Stellen treffen zu können und um die räumliche Gesamtsituation der Abfluss- und v.a. der Hochwasserverhältnisse zu erfassen. Neben diesem schon an sich interessierenden und für Folgeuntersuchungen weiter verwertbaren Ergebnissen kann das identifizierte und plausible Muster nun auch als *Referenz* zur Plausibilitätsprüfung und Bewertung der Analyseergebnisse weiter zurückreichender Reihen dienen und für die detailliertere Untersuchung mit Hilfe von Simulationsinstrumenten die Einordnung von Ereignissen und Räumen besonderer Relevanz oder Problematik unterstützen. Nähere Angaben hierzu finden sich in den Kapiteln III-1.6.1, III-1.6.3 und III-1.6.4.

Anhand des gleichen Zeitraums 1964-1995 wurden **Simulationsmodelle des täglichen Abflussprozesses und seiner Teilprozesse** angewandt bzw. entwickelt. Dabei handelte es sich zunächst um das *Translations-Diffusions-Modell ELBA* zur Simulation des Fließprozesses in verschiedenen Gewässerabschnitt-

ten der Elbe und der unteren Nebenflussbereiche, sowie um das *stochastische Modell zur Generierung täglicher Abflusswerte nach Treiber* in Anwendung auf die Abflussreihen der Elbe bzw. auf Reihen großer Teilgebiete. Beide Modelle waren in der Lage die gemessenen Abflussreihen in *guter Näherung* anzupassen bzw. statistisch äquivalent zu simulieren (siehe Kapitel III-1.6.5.1 und III-1.6.5.3). Dies erlaubte es, die hydrologische Gesamtsituation detaillierter zu erforschen und nachzubilden und damit eine weiter verbesserte Begründung der Ergebnisse der vorangegangenen Analysen (Konsistenzanalyse, Stationaritäts-/Homogenitätsanalyse, Abflussstatistik – siehe oben) bei gegenseitiger Absicherung aller dieser Untersuchungsteile zu erreichen. Zudem konnten die Simulationsinstrumente zur Bewertung des Abflussprozesses unter veränderten historisch aufgetretenen oder veränderten fiktiven Bedingungen (Szenarien) genutzt werden (zum Vergleich siehe unten). Auf Grundlage des Modells ELBA konnte zudem eine Untersuchung zur Skalenabhängigkeit der Korrelationsstrukturen des Abflussprozesses und zur Ableitung einer für großskalige, stochastische und konzeptionelle Simulationen geeigneten *Raumgliederung* des Elbe-Einzugsgebiets in zwei bis drei Teilgebiete oberhalb des Pegels Barby durchgeführt werden (siehe Kapitel III-1.6.5.2).

Ferner wurden **Schritte zur weiteren Entwicklung und Verallgemeinerung der Simulationstechniken** unternommen. Einerseits wurde die Entwicklung *konzeptioneller Speichermodelle zur Simulation örtlicher Wirkungen historischer oder geplanter Retentionsflächen* entlang der Gewässerstrecke vorgenommen. Diese Module wurden mit dem *Translations-Diffusions-Modell ELBA gekoppelt*, um die gegenüber der gegenwärtigen Situation veränderten Abläufe von Hochwasserwellen zu simulieren (zum Vergleich siehe unten und Kapitel III-1.6.7 bzw. MERKEL ET AL. 2001: Kapitel III-3).

Andererseits wurden *Versuche zur physikalischen Fundierung des Treiber-Modells* unternommen, die die Komponententrennung des Abflussprozesses, die Einführung von Gebietsniederschlägen und die räumliche Differenzierung des Abflussprozesses beinhalteten (siehe Kapitel III-1.6.5.3). Dabei traten Probleme auf, insbesondere da die Impulse nicht in der Lage waren, das komplexe, mehrtägige Wechselspiel der Niederschlag-Abflussprozesse zu

erfassen. Es ließ sich folgern, dass eine fundiertere Simulationstechnik konzeptionelle Strukturen benötigt, bei deren Umsetzung eine Weiterentwicklung auf Basis des Treiber-Modells ungünstig ist. Die Entwicklung eines neuen Simulationsinstruments ist Gegenstand der laufenden Forschung (siehe HELMS & IHRINGER 2000). Hierbei kann das Treiber-Modell allerdings hilfreich sein. Darüber hinaus kann das Treiber-Modell, das zur Simulation entsprechend der gemessenen historischen Situation kaum zu übertreffen sein wird, bis zum Zeitpunkt der Fertigstellung einer fundierteren Simulationstechnik in den genannten Grenzen eingesetzt werden, um für die aktuelle Forschung an der Elbe bereits eine Vielzahl von Aussagen zu ermöglichen. Trotz der Schwierigkeiten bei der physikalischen Fundierung zeigte sich das Treiber-Modell zusammen mit einer detaillierten Diagnostik in der Lage, die statistischen Eigenschaften, sowie deren Variabilität, differenziert nach Monaten, Abflusskennwerten und Abflussniveaus bzw. Auftretenshäufigkeiten zu untersuchen. Hieraus konnten nach einer häufig möglichen hydrologischen Interpretation Rückschlüsse gezogen werden, insbesondere im Rahmen einer erweiterten Stationaritätsanalyse bezüglich signifikanter Unterschiede in den Hochwasserverhältnissen verschiedener Teilreihen (siehe folgender Abschnitt).

In einer **erweiterten Stationaritätsanalyse** (Kapitel III-1.6.6) wurden die bis hierhin anhand des Zeitraums 1964-1995 gewonnenen Erkenntnisse genutzt.

Zum einen wurde für den Stromabschnitt zwischen den Pegeln Barby und Wittenberge das *für den Ist-Zustand kalibrierte Modell ELBA auf* – nach der Statistik 1964-1995 ausgewählte – *Hochwasserereignisse im Zeitraum vor Errichtung der Deichungsmaßnahmen im Raum der Havel- (1956) und der Karthanemündung (1981) angewandt* und die für den Pegel Wittenberge simulierten Hochwasserereignisse gegenüber den dort historisch gemessenen Ganglinien diagnostiziert. Dabei konnten für den Pegel Wittenberge im Vergleich zu den Verhältnissen vor den Eindeichungen bei einer Abhängigkeit von der Ereignishöhe und -charakteristik Effekte der Scheitelzunahme und der Beschleunigung der Hochwasserwellen festgestellt werden (zum Vergleich Kapitel III-1.6.6.1).

Zum anderen wurden die nach der oben beschriebenen ersten Stationaritätsanalyse *abgegrenzten repräsentativen Zeiträume mit Hilfe des Treiber-Modells*

am Beispiel des Pegels Dresden *detaillierter untersucht* (zum Vergleich Kapitel III-1.6.6.2). Hierzu wurden die statistischen Eigenschaften (insbesondere Verteilungsfunktionen der jährlichen und monatlichen Spitzenabflüsse) einer gemessenen Teilreihe (Stichprobe) verglichen mit denen einer Vielzahl von Simulationsläufen des Treiber-Modells, das an eine andere Teilreihe unter anderen Bedingungen (Klimaänderung, Talsperreneinfluss) kalibriert wurde. Hiermit gelang eine *bessere Bewertung und deutlichere Zuordnung von Effekten in der Abflussdynamik zu ihren klimatischen oder anthropogen bedingten Ursachen*, wodurch die Abgrenzung der für verschiedene Bedingungen repräsentativen Zeiträume besser begründet wurde und Mechanismen und Anzeichen zur Erkennung möglicher problematischer Entwicklungen (z.B. Hochwasserverschärfung durch veränderte nivale Bedingungen wie in der Kleinen Eiszeit im Vergleich zur gegenwärtigen Situation) gefunden wurden. Ferner konnte aus diesen Untersuchungen gefolgert werden, dass es mit den zur Zeit verfügbaren Informationen notwendig ist, die Hochwasserstatistiken für einen gegenüber der Reihe 1964-1995 *erweiterten Ist-Zustand* auf das 20. Jahrhundert (ab 1904) zu begrenzen. Das 19. Jahrhundert sollte als ein anderer Zustand zunächst getrennt untersucht und bewertet werden. Um eine längerfristige Variabilität im Rahmen eines über das 20. Jahrhundert erweiterten Ist-Zustands einzubeziehen, ist der Ausbau der Datengrundlage durch (möglichst verlässliche) Zeitreihen vor 1900 auch an anderen Pegeln vorzunehmen (zum Vergleich siehe unten). Für die *Hochwassersituation innerhalb des 20. Jahrhunderts* konnte nach diesen Untersuchungen eine Variabilität festgestellt werden, als deren Ursachen sowohl Talsperren- als auch klimatologische Effekte annehmbar waren, vor allem in den entscheidenden Jahreszeiten des Winters und des Frühjahrs. Beiden Effekten wurden etwa gleiche Größenordnungen zugeordnet, teils in gleichsinniger, teils in einander kompensierender Weise. Zufallseffekte konnten oft nur schwer von diesen Effekten getrennt werden. Die Situation war komplex und kann nur durch eine detailliertere Analyse zufriedenstellend bewertet werden. In jedem Fall konnte jedoch festgestellt werden, dass die Effekte in ihrem Einfluss deutlich schwächer ausgeprägt waren als die Unterschiede zum 19. Jahrhundert. Unter Berücksichtigung dieser Untersuchungsergebnisse war der Zeitraum für die

Erstellung einer die Verhältnisse des 20. Jahrhunderts repräsentierenden Hochwasserstatistik auszuweiten, da die Reihe 1964-1995 hinsichtlich der heutigen Talsperrensituation zwar am ehesten geeignet ist, jedoch eine längerfristige Klimavariabilität mit im 20. Jahrhundert ähnlich starkem Effekt nicht berücksichtigt. In diesem Sinne war die *Reihe 1936-1995 geeignet*, da sie etwa die gleichen hochwasserstatistischen Ergebnisse wie die Reihen 1904-1995 erbringt und da sie an den meisten deutschen Elbe-Pegeln verfügbar ist und daher eine noch weitgehende gegenseitige Absicherung der pegelweisen Ergebnisse, sowie deren Regionalisierbarkeit als hydrologische Längsschnitte der Elbe begünstigt (zum Vergleich auch Kapitel III-1.6.8).

Bei der Ermittlung von Längsschnitten der Elbe für statistische Hochwasserparameter dieser Reihe 1936-1995 ergaben sich aufgrund fehlender oder unsicherer bzw. fehlerhafter Abflusszeitreihen, sowie aufgrund eines gegenüber der Reihe 1964-1995 veränderten Musters in der räumlichen Hochwassersituation v.a. für den Bereich zwischen den Pegeln Barby und Wittenberge Schwierigkeiten. Hierzu wurde der bereits oben genannte gekoppelte Ansatz des um örtlich wirkende Retentionsmodule erweiterten Translations-Diffusions-Modells ELBA genutzt, um *an geeigneten Stützstellen den Ablauf historischer Hochwasserereignisse und weitergehend Reihen jährlicher Abflussscheitelwerte zu rekonstruieren* (zum Vergleich Kapitel III-1.6.7).

Mit der Gesamtheit der bis hierhin dargestellten Untersuchungsergebnisse waren die Voraussetzungen für den Versuch der Entwicklung einer als hydrologischer Längsschnitt regionalisierten *Hochwasserstatistik* gegeben, die *basierend auf der Reihe 1936-1995* die variablen Hochwasserhältnisse während des 20. Jahrhunderts repräsentiert (zum Vergleich Kapitel III-1.6.8). In den meisten Bereichen entlang der deutschen Gewässerstrecke der Elbe zeigten sich die aus den pegelweisen Hochwasserstatistiken erkennbaren Raumtendenzen vor dem Hintergrund der abgesicherteren Erkenntnisse anhand der Reihe 1964-1995 als plausibel, wenn auch verändert. Diese Veränderungen bestanden – in bezug auf die Reihe 1964-1995 – oberhalb der Havel-Mündung in einem deutlichen Effekt abnehmender Hochwasserscheitel. Als Gründe können einerseits die Einrichtungen der tschechischen Talsperren in den 1950/60er Jahren gesehen werden,

andererseits jedoch auch klimatologische Entwicklungen. Im Bereich der Havel-Mündung und weiter stromabwärts kompensierten offenbar insbesondere die Eindeichungsmaßnahmen an der Havel-Mündung weitgehend diesen Effekt, so dass sich die Hochwasserstatistiken der Reihen 1964-1995 und 1936-1995 an den Pegeln Wittenberge und Neu Darchau nur relativ geringfügig unterschieden.

Nicht plausibel gegenüber der Referenz der hydrologischen Längsschnitte der Reihe 1964-1995 sind die räumlichen Tendenzen der Hochwasserstatistik der Reihen 1936-1995 im Bereich direkt unterhalb des Pegels Barby, insbesondere hinsichtlich der Ereignisse mit geringer statistischer Wahrscheinlichkeit. Als Ursache für diese Beobachtung konnten insbesondere Inkonsistenzen bei einigen Extremereignissen des Pegels Barby während der 1940er Jahre mit sehr scharfen Abflussscheiteln angenommen werden. Weiterhin war eine vermutlich zu spät erfolgte Veränderung der Abflusskurve am Pegel Wittenberge im Jahr 1947 zu berücksichtigen. Weitere Effekte konnten ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Mit den verfügbaren Informationen ist es zur Zeit schwierig einzuschätzen, welche Effekte in welchem Ausmaß zur festgestellten Inkonsistenz beitragen. Weitere Aufschlüsse müssen detailliertere Untersuchungen der identifizierten kritischen Ereignisse bzw. Zeiträume, insbesondere in dem problematischen Bereich um den Pegel Barby, und entsprechende Abstimmungen mit den zuständigen Ämtern ergeben. Auch die Einbeziehung weiter zurückliegender Ereignisse könnte wertvolle Informationen zur besseren Einordnung der Beobachtungen liefern. Andererseits konnte mit den bis zum jetzigen Zeitpunkt durchgeführten Untersuchungen auch in dem besonders kritischen Bereich beim Pegel Barby und für den besonders kritischen Hochwasserscheitel mit 100-jährlichem statistischen Wiederkehrintervall die Unsicherheit auf etwa 10 % bzw. auf etwa 20 cm Wasserspiegeldifferenz eingegrenzt werden. Unterstrom des Pegels Barby nahm die Unsicherheit rasch ab, da die (fragwürdigen) scharf ausgeprägten Abflussscheitel des Pegels Barby bei der stromabwärts laufenden Hochwasserwelle einer starken Dämpfung unterlagen. Näheres zu dieser Problematik findet sich in Kapitel III-1.6.8.

Unterhalb der Havelmündung entsprechen die anhand der gemessenen Reihen gefundenen Analyseergebnisse der Hochwasserstatistik für die Reihe

1936-1995 nicht dem eigentlichen zeitlich erweiterten, d.h. auf die Verhältnisse des 20. Jahrhunderts bezogenen Ist-Zustand, da die Eindeichungen an den Mündungen der Havel und der Karthane nicht von Beginn der untersuchten Reihe an bestanden. Daher wurde unter der Annahme, dass die Eindeichungen bereits 1936 oder früher existierten, die Reihe des Pegels Wittenberge durch Nutzung des Modells ELBA mit den für die heutigen Verhältnisse gültigen Parametern ausgehend vom Pegel Barby neu ermittelt, d.h. in bezug auf den Ist-Zustand *homogenisiert*. Es resultierten höhere statistische Hochwasserkennwerte. Der 100-jährliche Scheitelabfluss ließ sich beispielsweise mit einem etwa 5 % höheren Wert abschätzen (zum Vergleich Kapitel III-1.6.8.1).

Der beschriebene Stand der Arbeiten verdeutlicht, dass eine *Fortsetzung der Untersuchungen* sinnvoll erscheint. Dabei kann die in Kapitel III-1.4 beschriebene und in den dargestellten Analysen und Entwicklungsarbeiten begonnene *Vorgehensweise fortschreitend genutzt* werden. In diesem Sinne fasst die Abbildung III-1.57 die Vorgehensweise dieser Arbeit zusammen und gibt gleichzeitig einen Ausblick auf ein mögliches weiteres Vorgehen. *Grundlegend* ist dabei zunächst die *Abfolge* der Erhebung von Abflussdaten, der Konsistenzanalyse und Plausibilisierung der Daten und der Stationaritätsanalyse zur Ableitung bzw. besseren Begründung von repräsentativen Teilreihen, insbesondere für den Ist-Zustand. Anhand dieser Reihen sind dann pegelweise statistische Analysen (insbesondere Hochwasserstatistik) und deren Regionalisierung durchzuführen und die Entwicklung und Anwendung von Simulationsinstrumenten vorzunehmen. Die *regionalisierten Analyseergebnisse und die Simulationsinstrumente* können dann – wie in der Abb. III-1.57 durch graue Pfeile gekennzeichnet – *für detailliertere, umfassendere und zeitlich weiter zurückreichende Untersuchungen genutzt werden*. Diese Weiterverwendung vorhandener Ergebnisse und Instrumente für weitere Analysen und Entwicklungen *find in der hier dargestellten Arbeit in bezug auf den Zeitraum 1936-1995 bereits statt*:

einerseits durch die Verwendung des für die verhältnismäßig abgesicherte Reihe 1964-1995 erstellten hydrologischen Längsschnitts als Referenz für die Identifikation von Standorten mit notwendiger weiterer Datenerhebung bzw. –generierung (Bereich der Havelmündung) und für die Identifikation von



Inkonsistenzen und Instationaritäten bzw. Abweichungen vom Ist-Zustand (siehe insbesondere Kapitel III-1.6.8);

andererseits durch die Verwendung der anhand der Reihe 1964-1995 entwickelten bzw. erprobten Simulationsinstrumente für die Erweiterung der Stationaritätsanalyse zur besseren Begründung von festgestellten Instationaritätseffekten und von Abgrenzungen repräsentativer Zeiträume (siehe v.a. Kapitel III-1.6.6), für die Identifikation von Standorten mit notwendiger weiterer Datenerhebung (siehe Kapitel III-1.6.6.1 und III-1.6.8), für die Rekonstruktion historischer Abflusswerte besonders an diesen Standorten (siehe Kapitel III-1.6.7), für die Identifikation und Plausibilisierung inkonsistenter Abflussdaten (siehe Kapitel III-1.6.8, jedoch auch bereits Kapitel III-1.5), sowie für die Homogenisierung historischer Abflussdaten in bezug auf den gegenwärtigen Zustand (z.B. Kapitel III-1.6.8.1).

Im **Ausblick** sind bei einer weiteren Fortsetzung dieser Vorgehensweise folgende **Ziele** anzuzustreben:

*Weitere Reduzierung der Datenunsicherheit:* weiter verbesserte Simulationsinstrumente und erweiterte und abgesichertere Referenzstatistiken erlauben eine deutlichere Erkennung von inkonsistenten Abflussdaten, sowie ihre besser begründete Plausibilisierung.

*Erweiterte und besser begründete Analyseergebnisse:* von Bedeutung sind räumliche und zeitliche Erweiterungen. In einer erweiterten deutsch-tschechischen Zusammenarbeit ist ein vollständiges räumliches Gesamtbild der hydrologischen Situation (insbesondere der Hochwassersituation) anzustreben. Hoffnungen können ferner in die Suche nach noch nicht genutzten historischen Unterlagen mit hydrologischen Daten und sonstigen Informationen aus Archiven und deren Aufbereitung gesetzt

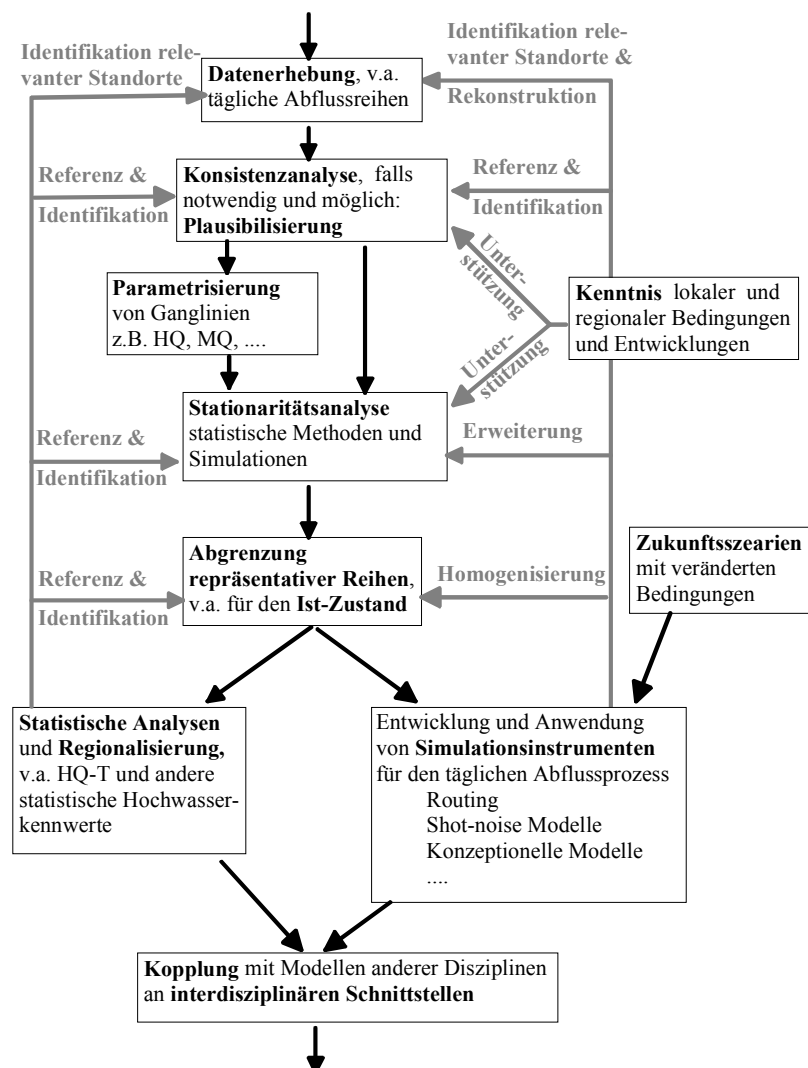


Abb. III-1.57 Schematische Darstellung der Vorgehensweise in dieser Arbeit und in ihrer möglichen Fortsetzung.

werden, welche durch die Rekonstruktion historischer Abflussereignisse oder –reihen durch Simulationsinstrumente zu ergänzen sind. Mit dieser Erweiterung der Datenbasis wird eine zeitlich weiter zurückreichende Untersuchung des Abflussprozesses ermöglicht bzw. ausgebaut. Da in diesem Zeitraum (vor 1900) die Kleine Eiszeit herrschte, können dabei auch deren Extremereignisse in die erweiterte Betrachtung einbezogen werden. Bedeutung bei der Erweiterung der Datenbasis hat ferner die aus der großskaligen Betrachtung ableitbare Konzentration der weiteren Datenerhebung auf besonders relevante oder problematische Räume/Standorte und Zeiträume, vor allem im Hinblick auf die Schließung bisheriger Informationslücken. Ziel dieser erweiterten Analysen ist die besser begründete Abgrenzung und statistische Charakterisierung repräsentativer Zeiträume, insbesondere mit der schrittweisen Erweiterung des Begriffs ‚Ist-Zustand‘ im Sinne der Einbeziehung einer Langzeitvariabilität des Abflussprozesses – auch über das 20. Jahrhundert hinaus. Durch Nutzung adäquater Simulationsinstrumente können Abflussreihen homogenisiert, d.h. so modifiziert werden, dass sie den Bedingungen des Ist-Zustandes entsprechen (zum Vgl. siehe Kapitel III-1.6.8.1). Dies gilt besonders für anthropogene Einflussnahmen. Dieser Ist-Zustand kann in der Folge durch eine längere Zeitreihe mit größerer statistischer Verlässlichkeit und mit Berücksichtigung einer klimatologischen Langfristvariabilität erfasst werden.

Im Zuge der Untersuchungen ist es ferner das Ziel, die *Simulationstechnik weiterzuentwickeln und zu verallgemeinern*, um die ablaufenden Prozesse realistischer zu repräsentieren, Indizien möglicher problematischer Entwicklungen (z.B. Hochwasserverschärfung) zu erkennen und zu verstehen und die Anwendbarkeit auf ein größeres Spektrum an Situationen und Prozessen zu ermöglichen, insbesondere auch in Szenarien mit möglichen zukünftigen Verhältnissen.

Insgesamt ist auf eine *gegenseitige Bestätigung und Absicherung der Ergebnisse dieser Einzelziele hinarbeiten*, im Sinne eines *Gesamtbildes des Abflussprozesses in Raum und Zeit*.

Schließlich sind die Ergebnisse der hydrologischen Untersuchungen an *interdisziplinären Schnittstellen mit Modellen anderer Disziplinen zu koppeln*.

Besondere Bedeutung haben dabei *hydraulische Modelle*, mit denen aus gegebenen Abflussreihen bzw. –kennwerten entsprechende *Folgegrößen* ermittelt werden können, insbesondere zunächst die *Dynamik von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten*. Diese stellen wiederum die Grundlage für die Analyse und Simulation der Dynamik der Überschwemmungsflächen und des Grundwassers, sowie des Stoffhaushalts und der Ökologie in der Aue dar. Ferner wird hierdurch der Feststoffhaushalt und –transport im Gewässer und damit die Morphodynamik des Flussbetts gesteuert. In diesem Sinne können die *Ergebnisse der hydrologischen Untersuchungen*, in die diese weitergehenden Zielstellungen von vornherein einbezogen wurden, *in der interdisziplinären Erforschung des Flusssystems und zur Entscheidungsunterstützung weiterverwertet werden*. Wie weitere Kapitel in diesem Band aufzeigen, wurde dies im Rahmen des Verbundprojekts ‚Morphodynamik der Elbe‘ bereits an verschiedenen Stellen umgesetzt (zum Vergleich Kapitel III-1.7).

## Literatur

- BFG (1993): Wasserwirtschaftliche Grobbilanz des Ist-Zustandes der Bundeswasserstraßen im Bereich der WSD-Ost. Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-Bericht 0733; Berlin.
- BFG (1994): Untersuchung der Abflusskurven an ausgewählten Elbepegeln. Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-Bericht 0806; Berlin.
- BFG (1996): Überarbeitung der Abflusskurven am Pegel Torgau für die Jahre 1971-1993. Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-Bericht 1041; Berlin.
- BFG (1996): Programmsystem ELBA – Programmdokumentation (Version 1.2 – Elbe), Teil II: Anwenderhandbuch – Entwurf. Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG-Bericht 1011; Berlin.
- BFG (2000): Untersuchungen zum Abflussregime der Elbe. Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-Bericht 1228; Berlin.
- BFG & INSTITUT FÜR HYDROLOGIE DER UNIVERSITÄT FREIBURG (2000): Hydrologischer Atlas von Deutschland. Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- BRADLEY, J.V. (1968): Distribution-free statistical tests. Englewood Cliffs; New Jersey.
- BUCHTELE, J., ZEMLIČKA, M. (1987): Evaluation of runoff changes in the Labe River basin by simulating the precipitation-runoff process. IAHS-Publ. 168, S. 63-75.
- BÜCHELE, B., EVDÁKOV, O., KIENE, S., OTTE-WITTE, K., RITZERT, F., SAUCKE, U., NESTMANN, F. (2001): Geometrie und Morphologie der Elbe (Ist-Zustandserfassung von

- Einzelparametern in Längs- und Querprofil). Kap. II-3 in diesem Band.
- BUREK, P., NESTMANN, F. (2001): Auswirkung von Deichrückverlegungen auf die langfristige Grundwasserdynamik in Auen (Untersuchungsgebiet Sandau/Elbe). Kap. IV-4 in diesem Band.
- CASPARY, H.J. (2000): Increased Risk of River Flooding in Southwest Germany Caused by Changes of the Atmospheric Circulation across Europe. In: Proceedings of the 'European Conference on Advances in Flood Research (PIK-Report, No. 65), S. 212 ff., Potsdam Institute for Climate Impact Research; Potsdam.
- DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. In: DVWK-Merkblätter 251, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH; Bonn.
- DYCK, S. (1980): Angewandte Hydrologie – Teil I. Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn; Berlin, München.
- DYCK, S., PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen; Berlin.
- EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (2000): Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.
- FAULHABER, P. (1998): Entwicklung der Wasserspiegel und Sohlenhöhen in der deutschen Binnemelbe innerhalb der letzten 100 Jahre – Einhundert Jahre ‚Elbestromwerk‘. In: UfZ – Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH: Gewässerschutz im Einzugsgebiet der Elbe – Tagungsband des 8. Magdeburger Gewässerschutzseminars; Teubner-Verlag; Stuttgart, Leipzig.
- FREAD, D.L. (1993): Flow Routing. In MAIDMENT, D.R. (1993): Handbook of hydrology; Mc Graw-Hill Inc., New York.
- GERSTENGARBE, F.-W., WERNER, P.C. (1993): Katalog der Großwetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmuth Brezowski 1881-1992. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Heft 113; Offenbach.
- GLASER, R. (1991): Klimarekonstruktion für Mainfranken, Bauland und Odenwald anhand direkter und indirekter Witterungsdaten seit 1500. Gustav Fischer Verlag; Stuttgart, New York.
- GLASER, R. (2001): Klimageschichte Mitteleuropas: 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Primus-Verlag; Darmstadt
- GLAZIK, G. (1994): Die Sohlenerosion der Elbe. In: Wasserwirtschaft – Wassertechnik (7-1994); Verlag für Bauwesen; Berlin.
- GÜTHLEIN, K., BURKHARDT, P., MELCHER, M., PÖLTE, B. (1980): Das Zentralmodell der Elbe – erstes kontinuierlich arbeitendes Wasserstands- und Durchflussvorhersagemodell in der DDR. In: Wasserwirtschaft – Wassertechnik (10-1980); Verlag für Bauwesen; Berlin.
- HARTUNG, J., ELPELT, B., KLÖSENER, K.H. (1991): Statistik. Oldenbourg-Verlag; München, Wien.
- HAUSER, S. (1992): Formelsammlung zur schließenden Statistik. Inst. f. allgemeine Wirtschaftsforschung, Univ. Freiburg.
- HEILIG, J. (2000): Auswirkungen der Eindeichungen im zwanzigsten Jahrhundert auf die Hochwasserkennwerte im Bereich der Unteren Mittelelbe. Unveröff. Vertiefungsarbeit am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH).
- HELMS, M., IHRINGER, J. (2000): Stochastic simulation of daily streamflow series in the Elbe basin; in Proceedings of the 'European Conference on Advances in Flood Research' (PIK-Report, No. 65) – beigelegte CD-ROM; Potsdam Institute for Climate Impact Research; Potsdam.
- HIRSCH, R.M., HELSEL, D.R., COHN, T.A., GILROY, E.J. (1993): Statistical analysis of hydrological data. In MAIDMENT, D.R. (1993): Handbook of hydrology. Mc Graw-Hill Inc., New York.
- HOLDER, R.L. (1985): Multiple Regression in Hydrology. Institute of Hydrology; Wallingford.
- HUPFER, P., KUTTLER, W., HEYER, E. (1998): Witterung und Klima. Teubner-Verlag; Stuttgart und Leipzig.
- IHRINGER, J. (1999): Softwarepaket für Hydrologie und Wasserwirtschaft - Anwenderhandbuch. Band 2: Statistische Analyse geophysikalischer Zeitreihen. Hrsg. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Abteilung Hydrologie, Universität Karlsruhe.
- IKSE (1996a): Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Elbe. Hrsg. Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, IKSE-Bericht, Magdeburg
- IKSE (1996b): Analyse der hydrologischen Aspekte der Entstehung von Hochwasser an der Elbe und deren Vorhersage. Hrsg. Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, IKSE-Bericht; Magdeburg.
- IKSE (1998): Strategie zum Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Elbe. Hrsg. Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, IKSE-Bericht; Magdeburg.
- JUNG, C. (2000): Öffnungskalender des Preziener Wehres bei Magdeburg. Staatliches Amt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt.
- KELLER, R., DE HAAR, U. (Hrsg.) (1978): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland. Harald Boldt Verlag; Boppard.
- KRON, W. (1996): Stochastische Simulation des Geschiebetransports am Zusammenfluß zweier Gewässer. Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TH), Heft 59.
- KUBAT, J. (2000): Änderungen der hydrologischen Verhältnisse der Elbe. Berlin. In: GELLER ET AL. [Hrsg. ATV-DVWK] (2000): Gewässerlandschaften – Aquatic Landscapes. Tagungsband Teil II, 9. Magdeburger Gewässerschutzseminar: Einzugsgebietsmanagement (River Basin Management) – Die IKSE: 10 Jahre intergriertes Management im Einzugsgebiet der Elbe. ATV-DVWK-Schriftenreihe 22, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, S. 181-184;
- LAMB, H.H. (1995): Climate, History and the Modern World. Routledge; London, New York.
- LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG (1996): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet Teil II. LUA-Brandenburg; Potsdam.
- LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT (1997): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet Teil I. LA für Umweltschutz Sachsen-Anhalt; Halle.
- MERKEL, U., HELMS, M., BÜCHELE, B., IHRINGER, J., NESTMANN, F. (2001): Wirksamkeit von Deichrückverle-

- gungsmaßnahmen auf die Abflussverhältnisse entlang der Elbe; Kap. III-3 in diesem Band.
- MOHRLOK, U., JIRKA, G.H. (2001): Grundwasserdynamik in Vorland und Auenbereichen am Beispiel des geplanten Deichrückverlegungsgebietes Rogätz. Kap. IV-3 in diesem Band.
- OTTE-WITTE, K., ADAM, K., RATHKE, K., MEON, G. (2001): Hydraulisch-morphologische Charakteristika entlang der Elbe. Kap. III-2 in diesem Band.
- PFISTER, C. (1985): Klimageschichte. In FRÖHLICH, C.: Das Klima, seine Veränderungen und Störungen; Birkhäuser Verlag; Basel, Boston, Stuttgart.
- PLATE, E. J. (1993): Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure. Verlag Ernst und Sohn; Berlin.
- PÜTTNER, A. (1990): Hochwasserschutz der Elbe unter besonderer Berücksichtigung der Mittleren Elbe. In: DVWK-Schriften 94; Verlag Paul Parey; Hamburg, Berlin
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlag-Messers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Heft 194, Offenbach.
- SALAS, J.D. (1993): Analysis and modeling of hydrological time series. In: MAIDMENT, D.R. (1993): Handbook of hydrology. Mc Graw-Hill Inc., New York.
- SAUER, W., SCHMIDT, A., DRÖGE, B. GÖLZ, E. (2001): Quantifizierung sohlhöhenrelevanter Feststofftransportprozesse. Kap. III-4 in diesem Band.
- SCHLITZGEN, R., STREIBER, B. (1991): Zeitreihenanalyse. Oldenbourg-Verlag; München, Wien.
- SCHÖNWIESE, D. (1992): Klima im Wandel. Deutsche Verlags-Anstalt; Stuttgart.
- SIMON, M. (1984): Erläuterungen der HWS-Funktion der Unteren Elbe und Havel und der hydrologischen Ausgangslage für das Antihavarietraining am 25.10.1984 in Rathenow. Vortragsmanuskript (pers. Mitt.).
- STAU (1997): Richtlinie für die Berechnung der Entlastung des Elbehochwasserscheitels in die Havel und zur Steuerung der Wehrgruppe Quitzöbel (Stand November 1997). Staatliches Amt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt Magdeburg.
- STEDINGER, J.R., VOGEL, R.M., FOUFOULA-GEORGIU, E. (1993): Frequency analysis of extreme events. In MAIDMENT, D.R. (1993): Handbook of hydrology; Mc Graw-Hill Inc., New York.
- TREIBER, B. (1975): Ein stochastisches Modell zur Simulation von Tagesabflüssen. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau III der Universität Karlsruhe (TH), Heft 5.
- WANG, Y., BÜCHELE, B., NESTMANN, F. (2001): Wirkung instationären Abflussverhaltens und von Buhnen auf den Dünenentransport in der Elbe (in wasserbaulichen Laborversuchen). Kap. III-5 in diesem Band.
- WITTENBERG, H., SIVAPALAN, M. (1999): Watershed ground-water balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. In: Journal of Hydrology, Vol. 219, S. 20-33
- YEVJEVICH, V., JENG, R.I. (1969): Properties of Non-Homogeneous Hydrologic Series. Hydrology Papers 32, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- YEVJEVICH, V. (1972): Structural Analysis of Hydrologic Time Series. Hydrology Papers 56, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- YEVJEVICH, V. (1977): Fluctuations of Wet and Dry Years, an Analysis by Variance Spectrum. Hydrology Papers 94, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

## III-2 Hydraulisch-morphologische Charakteristika entlang der Elbe

*K. Otte-Witte, K. Adam, G. Meon, K. Rathke*

*unter Mitarbeit von: M. Alexy\*, B. Büchele\*\*\*, R. Becker\*\*\*, N. Busch\*\*, P. Faulhaber\*, B. Hentschel\*, F. Ritzert\*\*\**

*\*) BAW und \*\*) BfG: Ergänzung der Projektbearbeitung (hydraulisch-numerische Berechnungen in Teilstrecken)*

*\*\*\*) IWK: Digitale Geländemodelle, GIS, Datenbank sowie Zusammenfassung und Analyse der Ergebnisse*

### III-2.1 Einführung und Zusammenfassung

#### Veranlassung, Hintergrund

Die Flusslandschaft der Elbe wurde im Laufe ihrer Geschichte, besonders in den letzten 200 Jahren, in ihrer Eigendynamik und ihrem ursprünglichen Charakter durch Maßnahmen in und am Fluss mit langfristiger und großräumiger Wirkung (z.B. Durchstiche, Mittel- und Niedrigwasserregulierung, Ufersicherung) sowie in der Aue (z.B. Eindeichungen, Landnutzung) stark verändert (vgl. Kapitel II.1).

Die Eingriffe brachten i.a. wichtige Verbesserungen für die Schifffahrt und den Hochwasserschutz und somit Vorteile für den Gütertransport, die Landwirtschaft, die Besiedelbarkeit der Talräume etc., d.h. die wirtschaftliche Entwicklung entlang des Stromes. Gleichzeitig führten sie zu veränderten Abfluss- und Strömungsverhältnissen (Wasserstände, Fließzeiten, Überflutungshäufigkeit und -dauer etc.), die sich ihrerseits direkt auf die morphologischen Randbedingungen der Elbe und hierbei speziell auf die natürlichen Prozesse von Erosion, Transport und Sedimentation im Flussbett auswirken. Wie in Kapitel II-1.2 zusammengefasst, ist hinreichend bekannt, dass seit über 100 Jahren über weite Strecken erhebliche Eintiefungen der Sohle stattgefunden haben, wobei diese Tendenzen auf der einen Seite streckenweise zum Erliegen gekommen sind, in anderen Strecken dagegen auch aktuell weiterhin Erosionsraten von durchschnittlich bis zu 1-2 cm/Jahr zu verzeichnen sind.

Die Frage, inwieweit sich das Flusssystem der Elbe und ihre angrenzenden Auen aus ökologischer Sicht, bezogen auf langfristige Entwicklungen, von einem naturnahen Zustand entfernt hat (z.B. Trockenfallen von Auestandorten infolge fehlender Überflutungsdynamik oder sinkender Grundwasserspiegel), lässt sich derzeit noch nicht umfassend beantworten und zählt zu den Schwerpunkten der Untersuchungen im BMBF-Forschungsprogramm „Elbe-Ökologie“.

#### Zielstellung und Vorgehensweise

Vor diesem Hintergrund ist es das grundlegende Ziel des Teilprojekts „Wasserspiegellagen und Feststofftransport“ im Verbundvorhaben, numerische Berechnungsmodelle für hydraulische und morphologische Parameter zu erstellen, und somit die Erfassung und Analyse der Strömungs- und Sohlstabilitätsverhältnisse entlang der Elbe im gegenwärtigen Zustand ermöglichen, die aus ökologischer Sicht sehr maßgebende Einflussfaktoren der unbelebten Umwelt (Abiotik) im Ökosystem darstellen.

Im Ergebnis sollen dringend erforderliche Sachdaten und Instrumente zur Verfügung gestellt werden, die als Grundlage für die weitergehende Untersuchung und Bewertung künftiger Zustände und Entwicklungen an der Elbe dienen. Durch die Schaffung einer breiten Datenbasis und die bezweckte abiotische (quantitative) Beschreibung des aktuellen Gewässerzustands wird die interdisziplinäre Entscheidungsfindung in den Themenfeldern Wasser und Umwelt im Hinblick auf mögliche Maßnahmen und deren Auswirkungen maßgeblich unterstützt. Die in den Bereichen Hochwasserschutz, Gewässerausbau und -unterhaltung, Naturschutz etc. anstehenden Fragen sind allgemein von öffentlichem, Zuständigkeiten übergreifendem und wissenschaftlichem Interesse, und somit richten sich die Untersuchungen und Ergebnisse an verschiedene Nutzer. Als Zielgruppe (Hauptnutzer) sind die Fachbehörden aus Bund und Ländern (wie BAW, BfG, Umweltämter), länderübergreifende koordinierende Stellen (wie IKSE, ARGE Elbe) sowie die Institutionen und Projekte der aktuellen BMBF-Elbeforschung zu nennen.

Die Erfassung und Analyse des Ist-Zustands der Elbe aus hydraulisch-morphologischer Sicht kann, im Hinblick auf Entwicklungen im räumlich-zeitlich großen Maßstab, nur über eine Gesamtbetrachtung des Systems gelingen und ist daher als Betrachtung im Längsverlauf zu realisieren.

Als Untersuchungsgebiet wurde somit der *Stromverlauf der deutschen Binneneibe auf freifließender Strecke* von der deutsch-tschechischen Grenze<sup>1</sup> bis zum Wehr Geesthacht gewählt, das die Tide-beeinflusste Untere Elbe abgrenzt. Die seitliche Ausdehnung des betrachteten Gebiets begrenzt sich auf die hochwasserrelevanten (überflutbaren) Bereiche.

Ausgangspunkt der Teilarbeiten ist, dass durch anderweitige (projektfremde) Untersuchungen die Elbe zwar in Teilstrecken hydraulisch-numerisch erfasst ist, eine umfassende und konsistente Beschreibung im Sinne eines Gesamtüberblicks der gegenwärtigen Verhältnisse jedoch bis dato nicht vorliegt. Ziel und Ansatz der Bearbeitung ist es daher, verfügbare Ergebnisse bisheriger Arbeiten nach Möglichkeit zu integrieren und unnötige Doppelarbeiten durch eine gezielte gegenseitige Abstimmung und Ergänzung zu vermeiden. Umgesetzt wurde dies im Rahmen der folgenden Konstellation von Beteiligten:

Die inhaltliche Bearbeitung erfolgte im Wesentlichen durch die Universität-GH Paderborn, Abteilung Höxter (FB Technischer Umweltschutz, FBTU), in projektinterner Kooperation mit der Universität Karlsruhe (IWK) und wurde hinsichtlich der Daten und numerischen Berechnungen intensiv unterstützt und ergänzt von den Bundesanstalten für Wasserbau (BAW) und für Gewässerkunde (BfG).

### Gliederung und Inhalte des Berichts

Der vorliegende Bericht beinhaltet nachfolgend die prinzipielle Beschreibung der angewendeten Methoden, der verfügbaren bzw. erarbeiteten Daten- und Modellgrundlagen, der Eichung der Berechnungsmodelle am Beispiel einer Teilstrecke sowie der gleichartigen Anwendung aller verfügbaren Modelle (12 Teilstrecken) im Hinblick auf die angestrebte Gesamtschau. Der Ergebnisdatensatz umfasst in der hier vorgestellten Form etwa 507 km HN-Berechnungen, d.h. Parameterdarstellungen für ca. 90% der deutschen Fließstrecke. Die im Projekt nicht untersuchten Teilstrecken (v.a. drei Abschnitte zwischen 13 und 30 km Länge) bleiben aufgrund spezieller Probleme oder zusätzlich erforderlichen Aufwands Sonderbetrachtungen vorbehalten.

Die wichtigsten Kenngrößen wie Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten, Schubspannungen etc., sind digital und in räumlich hoher Auflösung als *Anlagen* auf der beiliegenden CD-Rom leicht abrufbar (Serien von Längsschnitten à 20-30 km; ausgewählte Parameter in Funktion des Abflusses im Abstand von 500 m). Der vorliegende Bericht und die digitalen Anlagen (Grafiken auf CD) werden darüber hinaus ergänzt durch Kurzbeschreibungen der Modelle, die ebenfalls auf der CD den einzelnen Darstellungen zugeordnet sind.

Ferner wird hiermit auf die ausführlichen Projektberichte (ADAM ET AL. 1999a; OTTE-WITTE ET AL. 2001) und sachbezogene frühere Dokumentationen der Bearbeiter verwiesen (u.a. ADAM ET AL. 1999b; ALEXY 2000; BAW 2000; BÜCHELE & NESTMANN 2000; FAULHABER 2000a).

## III-2.2 Grundlagen der HN-Berechnungen

### III-2.2.1 Methodik

Aufgrund der Größe des Untersuchungsgebiets bzw. der Lauflänge der Elbe von ca. 585 km, der relativ homogenen Stromcharakteristik über weite Strecken, der heterogenen Datenlage (v.a. Querprofile) sowie der primär angestrebten Gesamtschau in Längsrichtung ist eine eindimensionale Betrachtungsweise, d.h. der Einsatz hydronumerischer 1D-Modelle, als fachlich angemessen und im gegebenen Projektkontext als einzig realisierbares Vorhaben einzustufen (VERBUNDPROJEKTANTRAG 1996). Das bedeutet auch, dass die im Folgenden dargestellten Ergebnisse in erster Linie der allgemeinen Zielstellung Rechnung tragen und somit im Fall komplexerer Situationen und spezifischer Fragestellungen, z.B. bei lokal stärkeren Randeinflüssen auf die Strömung (wie Bauwerke, Maßnahmen im Vorland etc.), durch erweiterte Berechnungen und ggf. mehrdimensionale Modelle zu ergänzen bzw. nach Bedarf zu verfeinern sind.

Die im Verbundprojekt verwendeten Berechnungsprogramme, die zum Aufbau von hydronumerischen (HN) Modellen von Teilabschnitten der Elbe dienen, beruhen sowohl für die Hydraulik als auch für den Feststofftransport auf in der Praxis bewährten Berechnungsverfahren. So setzt z.B. die BAW die von der U.S. Army Corps of Engineers entwickelten Programme HEC-2 (Hydraulik) und HEC-6 (Fest-

<sup>1</sup> Vor Grenzübergang nach Deutschland verläuft die Elbe etwa 40 km freifließend auf tschechischem Gebiet, d.h. nach der untersten der tschechischen Staustufen in Usti nad Labem.

stofftransport) bereits seit Jahren erfolgreich für wasserbauliche Fragestellungen ein. Durch die Auswahl und Verwendung gleicher Datenformate und Programme wurde somit ein besserer Datenaustausch zwischen den beteiligten Institutionen sowie eine leichtere Nachnutzung der Ergebnisse gewährleistet. Die Methodik entspricht gängigen Standards und wird hier nicht vertiefend dargestellt (zum Vgl.: (HEC 1982 und 1993)).

Neben den Berechnungen mit den o.a. Programmen, die auf dem Ansatz von *Gaukler-Manning-Strickler* (GMS) beruhen, war auch eine Anpassung bzw. Neuentwicklung der Berechnungsprogramme unter Verwendung aktueller hydraulisch-sedimentologischer Berechnungsansätze vorgesehen. Ziel war es hierbei, über Vergleichsrechnungen an ausgewählten Strecken den Nutzen der aktuelleren Ansätze für die Elbe-Flusslandschaft zu untersuchen. Hierzu wurde von (RATHKE 1998) das Programm HYSEMO32 entwickelt, das die gekoppelte 1D-Berechnung der Wasserspiegellagen und des Feststofftransports bei beweglicher Sohle ermöglicht. Es basiert auf dem Fließgesetz von *Darcy-Weisbach* und verwendet zur Abschätzung des interaktionsbedingten Widerstandsbeiwertes bzw. der Trennflächenrauheit das Verfahren nach *Mertens* (s. (DVWK 1991)). Durch Aufteilung der Rauheiten bietet es folglich gegenüber dem GMS-Ansatz eine differenziertere Betrachtung.

In einem Berechnungsabschnitt (Biosphärenreservat „Mittlere Elbe“) wurden erste Testrechnungen mit dem Programm HYSEMO32 mit sehr zufriedenstellendem Verlauf durchgeführt. Im Vergleich zum GMS-Ansatz zeigten sich weitgehend übereinstimmende Berechnungsergebnisse. Als Ursache hierfür ist in erster Linie die Abflussaufteilung zwischen Flussschlauch und Vorland zu sehen. Selbst bei höchsten Wasserständen wird der deutlich höhere Abflussanteil im Flussschlauch abgeführt; die Durchströmung von Bewuchsbereichen bzw. die Interaktion mit bewuchsfreien Querschnittanteilen tritt in den Hintergrund. In der Anwendung auf ein großes Fließgewässer wie die Elbe brachte somit der physikalisch anspruchsvollere Modellansatz (*Darcy-Weisbach*), der zudem einen erheblichen Mehraufwand in der Datenerhebung erforderte, keinen Zuzugewinn an Aussagekraft.

### III-2.2.2 Datengrundlagen und -aufbereitung

Für die Erstellung von Modellen mit fester Sohle<sup>2</sup> zur Berechnung der Strömungsparameter sind neben der Geometrie des Gewässers (Querprofile) hydrologische Informationen (v.a. Fixierungen = in Natur gemessene Wasserspiegelverläufe unterschiedlicher Abflusszustände sowie Abflusskurven) als Randbedingung zu erfassen.

Für die Berechnungen mit beweglicher Sohle, die der Modellierung der Feststofftransportverhältnisse und somit der Abschätzung der Veränderlichkeit bzw. Entwicklung der Sohlhöhen dienen, sind ferner sedimentologische Daten (wie abflussabhängige Geschiebe- und Schwebstofffrachten sowie Kornverteilung des Sohlmaterials) erforderlich.

#### Gewässergeometrie

Die wichtigste Datengrundlage der Topographie von Hauptstrom und Vorländern der Elbe sind Quer- und Längsprofile der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), die dem Vorhaben umfangreich in enger Abstimmung mit der BAW zur Verfügung gestellt wurden. Die Querprofillichte ist mit Abständen von 50 bis 500 Metern sehr heterogen, vereinzelt bestehen Datenlücken. Die zugrunde liegenden Vermessungen sind je nach morphologischer Entwicklung der Teilabschnitte von unterschiedlicher Aktualität und schließen i.d.R. nur bei gegebener Interessenlage Vorlandbereiche ein. Die Erarbeitung der Geometriedaten zum Modellaufbau stellte sich zusammenfassend wie folgt dar.

Während die Datenerfassung und -vorhaltung für das Strombett der Elbe, in ihrer Funktion als Bundeswasserstraße, der WSV-Zuständigkeit unterliegt, werden die angrenzenden Überflutungs- bzw. Vorlandbereiche, u.a. aus Gründen des Hochwasserschutzes, den Landesbehörden zugeordnet, was hinsichtlich topographischer Daten eine Zuständigkeit der Landesvermessungsämter (LVÄ) bedeutet.

Zur Betrachtung des gesamten "durchflossenen" Hochwasserquerschnittes der Elbe erwies sich somit das verfügbare Datenmaterial aufgrund geringer Vorlandinformation als oft nicht ausreichend. Da für die betroffenen Bereiche im Projektverlauf keine

<sup>2</sup> d.h. die Querprofilgeometrien bzw. Sohlhöhen werden über die Dauer eines Berechnungslaufes als unveränderlich angesetzt.

digitalen Höhendaten der Landesvermessung beschafft werden konnten, wurden die notwendigen Ergänzungen durch Digitalisieren von Höhen- und Strukturinformation aus topographischen Karten im Maßstab M 1:10000 vorgenommen (siehe auch Hinweise unten). Die Querprofilpeilungen wurden nach Bedarf durch Interpolation auf einen Abstand von 100 m verdichtet und im Vorland durch Kombination mit den Karteninformationen verlängert. Insgesamt wurde Wert darauf gelegt, den Modellen die jeweils aktuell verfügbare und hydraulisch erforderliche Geometrieinformation zugrunde zu legen.

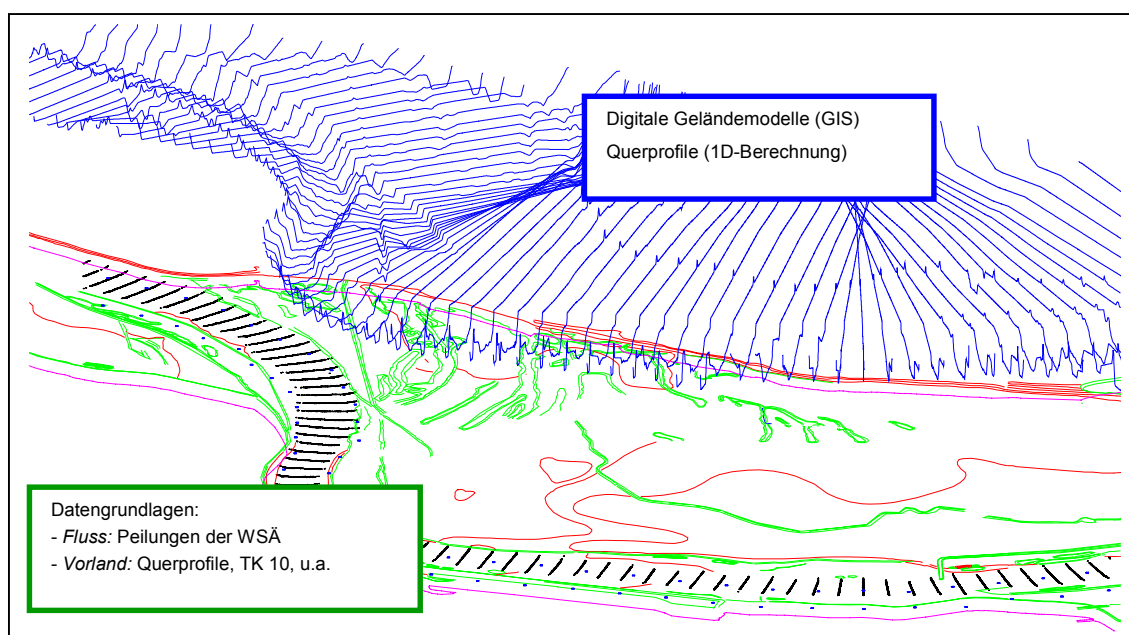
Einzelne Arbeitsschritte und Ergänzungen wurden im Geoinformationssystem (GIS) ArcInfo™ der Firma ESRI am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe durchge-

führt. Sie bestanden z.B. in der Verarbeitung der Fluss- und Vorlanddaten zu digitalen Geländemodellen (DGM) sowie in der Umrechnung unterschiedlicher Raumbezüge und Speicherung aller Ergebnisse mit einheitlichem Koordinatenbezug. Die Höhengenaugigkeit der erzeugten DGM entspricht den Datengrundlagen und ist für die im Vorhaben zu erstellenden hydraulischen Modelle gut geeignet. Zur automatisierten Verarbeitung der insgesamt sehr großen Datenmengen und unterschiedlichen Datenformate bei Konvertierung und Interpolation wurden im Vorhaben spezielle Softwaremodule entwickelt und erfolgreich eingesetzt.

In Tab. III-2.1 sind die im Projekt vorgenommenen Querprofilergänzungen zusammengestellt. Abb. III-2.1 vermittelt einen Eindruck der Ergebnisse.

**Tab. III-2.1** Im Verbundprojekt vorgenommene Vorlandergänzungen der Querprofile (Summe: ca. 160 km).

Elbe-km	Vorlandtopographie
203-220	Querprofilorientiert aus TK 10
252-300	Digitalisierung der Höhenlinien, etc. der TK 10, Erstellung des Digitalen Geländemodells (DGM), Rücklesen der Profile durch vorgegebene Polygone
330-370	Digitalisierung der Höhenlinien, etc. der TK 10, Erstellung des DGM, Rücklesen der Profile durch vorgegebene Polygone
370-400	Querprofilorientiert aus TK 10
400-407	Digitalisierung der Höhenlinien, etc. der TK 10, Erstellung des DGM, Rücklesen der Profile durch vorgegebene Polygone
407-426	Querprofilorientiert aus TK 10



**Abb. III-2.1** Schematische Ansicht der Höhen- und Strukturinformationen (geometrische Datengrundlagen der Modelle).



*Hinweise zur Aufbereitung der Geometriedaten*

- *Im Projekt war keine Neuaufnahme von Vermessungsdaten vorgesehen; vielmehr sollten primär die vorliegenden Datensätze der Wasser- und Schifffahrtsämter (WSÄ) ausgewertet werden. Ferner sollten nur aktuelle Flusspeilungen (aus den 90er Jahren) für die Berechnungen verwendet werden; der Einsatz historischer Peilungen war nicht vorgesehen.*
- *Für die Erstellung digitaler Geländemodelle (hier: der Aue) sind flächenhafte Informationen erforderlich, dagegen sind für die HN-Modelle vor allem Querschnitte des Geländes in einem definierten Abstand von Interesse.*
- *Die Landesvermessung hält topographische Informationen über die Elbe-Auen in Form von Topographischen Karten (TK 10, 25 etc.) bzw. der Deutschen Grundkarte (DGK5) vor. Darüber hinaus werden im Rahmen des ATKIS-Projektes (Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem) Digitale Landschaftsmodelle, Digitale Topographische Karten, Digitale Gelände- bzw. Höhenmodelle und Rasterdaten topographischer Landesdaten erstellt. Für das Verbundprojekt sind dabei nur die Digitalen Höhenmodelle von Interesse. Diese Datensätze sind bzw. waren während und auch zum Ende der Projektlaufzeit nicht flächendeckend und blattschnittfrei für die benötigten Elbebereiche vorhanden und bedürfen i.a. für die hydraulischen Zwecke erheblicher Nachbearbeitungen (z.B. sind Deiche nicht als Höheninformation enthalten). Somit erwies es sich im Projekt als günstigste Variante, die notwendigen Informationen mittels Digitalisierung aus dem verfügbaren Kartenmaterial (TK10) zu entnehmen. Hiervon betroffen waren insbesondere Elbeabschnitte im Land Sachsen-Anhalt. Die Digitalisierung erfolgte mit Erlaubnis des Landesamtes für Vermessung und Datenverarbeitung Sachsen-Anhalt vom 24.11.2000 (Gen-Nr.: LvermD/D527/2000)*
- *Anfangs wurden die Peilungen des Fluss Schlauches durch profilorientierte Aufnahme der Vorländer im 100 m-Abstand ergänzt. Im Hinblick auf die Erstellung digitaler Geländemodelle wurde später dazu übergegangen, die Höhenlinien der TK 10 und weitere Informationen wie Gräben, Seen und Deiche als Polygonzüge bzw. Punkte zu erfassen und im GIS zu rastern. Durch Vorgabe von Polygonen, ausgerichtet an den Hektometersteinen konnten dann Schnitte durch das Geländemodell gelegt und die Querprofile rückgelesen werden.*

**Hydrologische Datengrundlagen**

Als Randbedingung ist für jede Berechnungsstrecke eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung (Abflusskurve) am unterstromigen Modellrand einzugeben. Hierzu wurden im Projekt nach Möglichkeit die vorliegenden Informationen an Pegeln verwendet (vgl. Kap. III-1), teilweise mussten Abflusskurven aus vorliegenden Wasserspiegelfixierungen und weiteren Pegeldaten der Gewässerkundlichen Jahrbücher erstellt werden. Mittels Differenzenbildung und Regression wurden diese in die benötigten Abflusskurven transformiert.

Die Wasserspiegelfixierungen, die eine Momentaufnahme eines Abflusszustands darstellen, dienen zur Eichung der hydronumerischen Modelle. Durch die Festlegung der Rauheitsbeiwerte (in ihnen sind alle auftretenden hydraulischen Energieverluste zusammengefasst) erfolgte die Anpassung der berechneten mit den in der Natur aufgenommenen Wasserspiegellagen. Optimal für die numerischen Berechnungen des Ist-Zustandes sind aktuelle, zu den Querprofilpeilungen passende Abflüsse im Spektrum von MNW bis HW über die gesamte deutsche Elbe. Aber insbesondere im Hochwasserbereich mangelt es an aktuellen Wasserspiegelfixierungen, hier musste auf historische Ereignisse zurückgegriffen werden.

**Sedimentologische Datengrundlagen**

Die Kornzusammensetzung des Sohlenmaterials der Elbe wurde von der BfG in den Jahren 1993/1994 analysiert (BFG 1994). Die Daten dieser Untersuchung bilden die Grundlage für die Feststofftransportmodelle, in denen die Sohle in ihrer Zusammensetzung als Sedimentreservoir eingeht. Zu beachten ist prinzipiell, dass die Kornzusammensetzung über das Querprofil nicht als konstant anzusehen ist. In Krümmungen mit stark ausgeprägtem Prall- und Gleithang ist eine Verteilung von grobem Material auf der Außenseite und von Feinmaterial in der verlandeten Zone auf der Innenseite zu erkennen. Ferner ist anzumerken, dass eine Sohlprobennahme in einem Gewässer (mit Sedimenttransport) i.a. eine Momentaufnahme darstellt und im Zusammenhang mit dem Abflussgeschehen vor und während der Messung zu sehen ist. Die lokale Differenzierung der Sedimente z.B. in Bühnenbereichen, Transportkörpern etc. wurden 1994 nicht gesondert erfasst.

Als weitere Eingangsgröße gehen abflussabhängige Geschiebe- und Schwebstofffrachten in das sedimentologische Modell ein. Diese Daten werden ebenso von der BfG im Rahmen der seit 1990 durchgeführten Vielpunktmessungen für Geschiebe und Schwebstoffe entlang der Elbe erhoben und dem Verbundprojekt zur Verfügung gestellt (vgl. auch Kap. III.4). Die Auswertung der Messdaten zeigte bei vergleichbaren Abflüssen oft eine starke Streuung der Frachten und in der Zusammensetzung des transportierten Materials. Die Untersuchungsschwerpunkte der BfG liegen in den bekannten Problemstrecken der Elbe (z.B. Erosionsstrecke, Reststrecke); Messlücken treten im Bereich des Hochwasserabflusses auf.

Die vorhandenen Geschiebe- und Schwebstoffdaten konnten im Teilprojekt zur Abschätzung von sedimentologischen Parametern herangezogen werden; für die Erstellung von Feststofftransportmodellen mit höherer Genauigkeit sollte ein im Laufe der Zeit verbessertes Prozessverständnis und eine mit weiteren Naturmessungen abgesicherte Datenbasis eingehen. Entsprechende Ergebnisse hierzu sind in Kap. III.4 dargestellt.

Die Einteilung der Korngrößenklassen in den BfG-Daten erfolgt nach DIN 4022 mit Korngruppen von Ton ( $< 0,022$  mm) bis zu Steinen ( $> 63$  mm). Für die sedimentologischen Berechnungen mit dem Programm HEC-6 müssen die Kornverteilungen in das System der American Geophysical Union (AGU) von Lehm (0,002-0,004 mm) bis sehr groben Kies (32-64 mm) umgerechnet werden.

### III-2.3 Modellerstellung (Beispielstrecke)

Im folgenden wird am Beispiel der Modellstrecke bei Sandau die Vorgehensweise bezüglich Aufbau und Kalibrierung eines hydronumerischen Modells erläutert. Für die nachfolgend aufgeführten weiteren Teilstrecken (des Projekts) wurde ähnlich verfahren. Detailbeschreibungen zu Teilstrecken sind in (ADAM ET AL. 1999a, OTTE-WITTE ET AL. 2001) enthalten.

#### Streckenbeschreibung

Die Modellstrecke Sandau beginnt unterhalb von Tangermünde bei Elbe-km 407,0 und endet nach 17,7 km Fließstrecke vor der Haveleinmündung bei

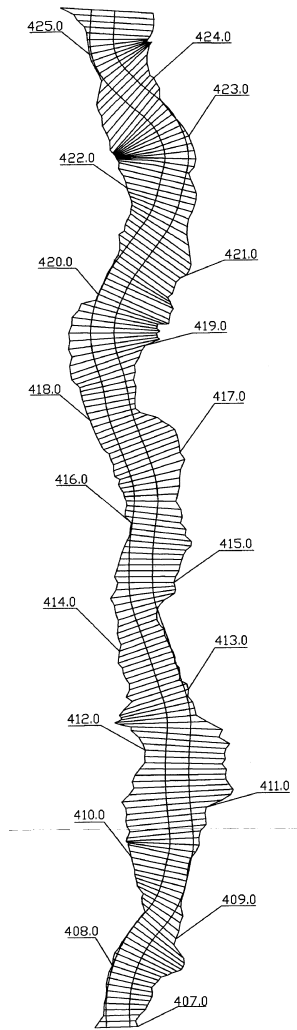
km 425,7. Die Deichführung verläuft in diesem Teilstück relativ nah an der Elbe, so dass bei Hochwasser nur wenig Retentionsraum zur Verfügung steht. Die Vorländer sind nur schwach strukturiert und bestehen hauptsächlich aus Wiesen und Weideflächen. Dichtere Wälder sind erst hinter dem Deich im Landesinnere anzutreffen, die Auen sind nur vereinzelt mit Baumgruppen oder einzeln stehenden Bäumen bewachsen. Ein Blick auf Abb. III-2.2 verdeutlicht die generelle Situation. Die Querprofilabstände (100 m) können im Vergleich zur Breite der Elbe (hier dargestellt: 400 m entlang der Hektometersteinkoordinaten) bzw. der Vorländer als gering eingestuft werden. Der Laufcharakter mit moderaten Windungen favorisiert die gewählte Methodik (1D).

### III-2.3.1 Hydraulisches Modell

#### Geometrie

Als Grundlage für die Querprofile diente eine Peilung der Gewässersohle, die das Ufer bis zur Böschungskante einschließt. Sie wurde vom WSA Magdeburg im Oktober 1995 in einem Abstand von 200 m durchgeführt. Die fehlenden Vorlandinformationen wurden im Verbundprojekt ergänzt (s.o.). Hierzu wurden die strukturbestimmenden Geländepunkte in der Aue (z.B. Höhenlinien, Gräben, Seen) der auf 100 m verdichteten Flussprofile aufgenommen. Die Tiefe der Seen wurde abgeschätzt, ebenso waren Gräben und Bruchkanten in der Karte nicht immer mit einer Höhe belegt und wurden entsprechend dem umliegenden Gelände angepasst.

Um die Abflussflächen im Modell insbesondere bei niedrigen und mittleren Abflussereignissen korrekt abbilden zu können, ist der Einbau von sogenannten Buhenschatten in die Querprofile erforderlich. Sie repräsentieren im eindimensionalen Modellansatz die effektive Einengung des Fließquerschnitts (vgl. Abb. III-2.3). Für den Streckenabschnitt lag keine Bühnenpeilung vor, so dass auf Stromkarten zurückgegriffen wurde, die die Lage der Längs- und Querbauwerke beinhalten. Die Bauwerkssollhöhe wurde in Anlehnung an den RW59 definiert, die Rücken- neigung mit 1:200 und die Kopfneigung der Bühnen mit 1:5 festgelegt. Es erfolgte eine Kontrolle der eingebauten Bühnen mit Hilfe von Luftbildern einer Niedrigwasser-Befliegung aus dem Jahr 1992 (Quelle: WSD Ost) und im Querschnitt (z.B. Kolkbildung am Bühnenfuß).



Für ausufernde Abflüsse wurde das Vorland strömungstechnisch aufbereitet. Die örtlich vorhandenen Wälle am Ufer (Uferreihen) werden nicht bei allen Abflüssen überströmt. Tiefliegende Flächen, die nicht von Oberstrom durchflossen werden können, wurden in der Geometrie abgetrennt. Bei diesen Änderungen galt die Priorität einer korrekten Abbildung der Verhältnisse bis zum MHQ. Diese Abflüsse treten wesentlich häufiger auf als höhere Abflüsse (seltene Hochwasser) und beeinflussen die morphologischen Prozesse der Elbe am stärksten.

**Hydrologie**

Als Bezugspegel für die Strecke wurde der Pegel Tangermünde bei km 388,2 definiert. Der zum unteren Modellende (km 425,7) näher gelegene Wasserstands- und Abflusspegel Wittenberge bei Elbe-km 454,6 wurde nicht für die Untersuchungen herangezogen, da zwischen dem Modellende und diesem Pegel die Havelmündung liegt und durch den seitlichen Zufluss zur Elbe die Abflussdaten zu stark verändert werden. Tab. III-2.2 zeigt den Überblick der für die Eichung des hydronumerischen Modells verwendeten Wasserspiegelfixierungen unter Angabe ihrer Bezugswerte am Pegel Tangermünde.

Abb. III-2.2 Querprofilagen und Modellgrenzen (km 407-425,7).

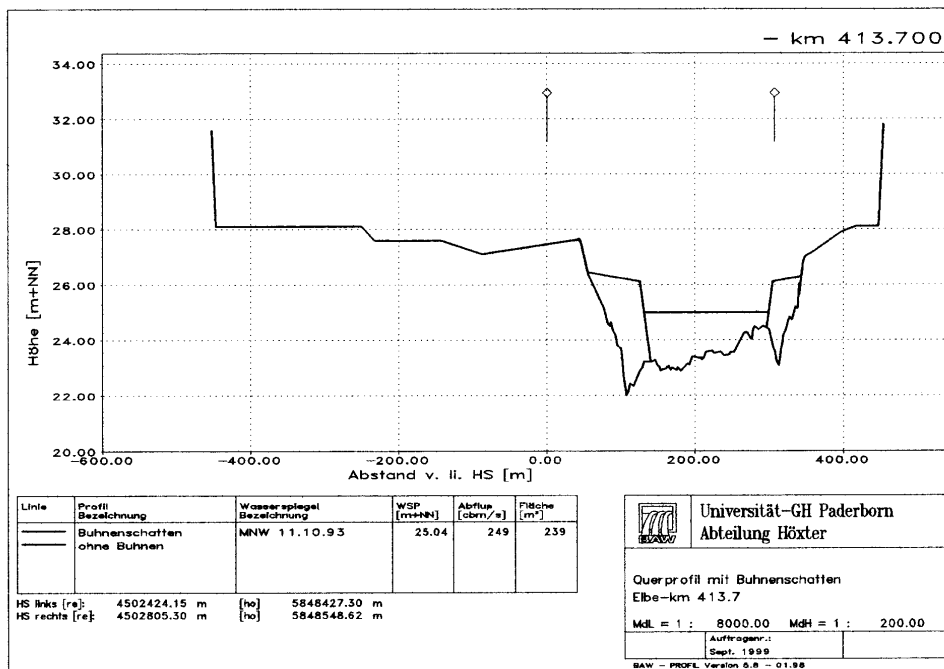


Abb. III-2.3 Querprofil mit eingebauten Bühnenschatten (Beispiel Elbe-km 413,7).

Die Wasserspiegelfixierungen für die Zustände vom 11.10.93 und 10.05.89 lagen in einem Abstand von 500 m vor. Aus den Längsschnitten der Fixierungen von 1969 und 1981 konnte nahezu jedem Elbe-Kilometer ein Wasserspiegel zugeordnet werden. Durch die Punkte der Fixierungen wurde eine spline-Funktion gelegt, um für jedes Querprofil des hydro-numerischen Modells einen interpolierten Wasserspiegel zu erhalten. Abb. III-2.4 stellt den Vergleich dieser Daten dar.

Die erforderlichen Abflusskurven der Modellierung wurden aus den verfügbaren Wasserspiegelfixierungen und Pegeldaten aus Tangermünde und Wittenberge abgeleitet. Das heißt, für den unterstromigen Modellrand bei km 425,7 wurde aus den Abfluss-

kurven der Pegel und den Wasserspiegelfixierungen des Elbe-km 425,7 mittels Differenzenbildung und Regression eine Abflusskurve erstellt (Abb. III-2.5).

### Eichung

Die Kalibrierung des hydro-numerischen Modells erfolgte über das gesamte Abflussspektrum mit den in Tab. III-2.2 aufgeführten Randbedingungen. Die Anpassung der berechneten an die fixierten Wasserspiegel erfolgte mit Hilfe der Rauheitsbeiwerte nach *Manning* bzw. *Strickler*. Sie lagen hierbei in einer Größenordnung, die für die auftretenden Sohl- und Vorlandstrukturen der Elbe typisch sind (vergl. hierzu auch (DVWK 1990)).

Tab. III-2.2 Wasserspiegelfixierungen und Randbedingungen der Eichung in der Modellstrecke Elbe-km 407,0-425,7.

Datum	Pegel Tangermünde (Elbe-km 388,2)			Eichung
	W [m+NN]	Q [m³/s]	Charakterisierung des Abflusszustands (zum Vergleich: Gewässerkundliche Hauptwerte)*	
11.10.1993	29,31	249	Niedrigwasserbereich (MNQ = 243 m³/s)	22,59
10.05.1989	30,78	560	Mittelwasserbereich (MQ = 587 m³/s)	24,21
12.05.1969	32,56	1284	Ausuferungsbereich (z.Vgl. MHQ = 1769 m³/s)	25,89
19.03.1981	34,29	3250	Extremer Hochwasserbereich (hier sogar: HHQ)	27,45

\*) Die angegebenen Gewässerkundlichen Hauptwerte beziehen sich auf die Beobachtungsreihen am Pegel Tangermünde (vorliegend ab 1961) und die durchgeführten hydrologischen Analysen (Teilreihe 1964-1995); Angaben aus (BÜCHELE & NESTMANN 2000); zum Vergleich: siehe Kap. III.1 (HELMES & IHRINGER) in diesem Band

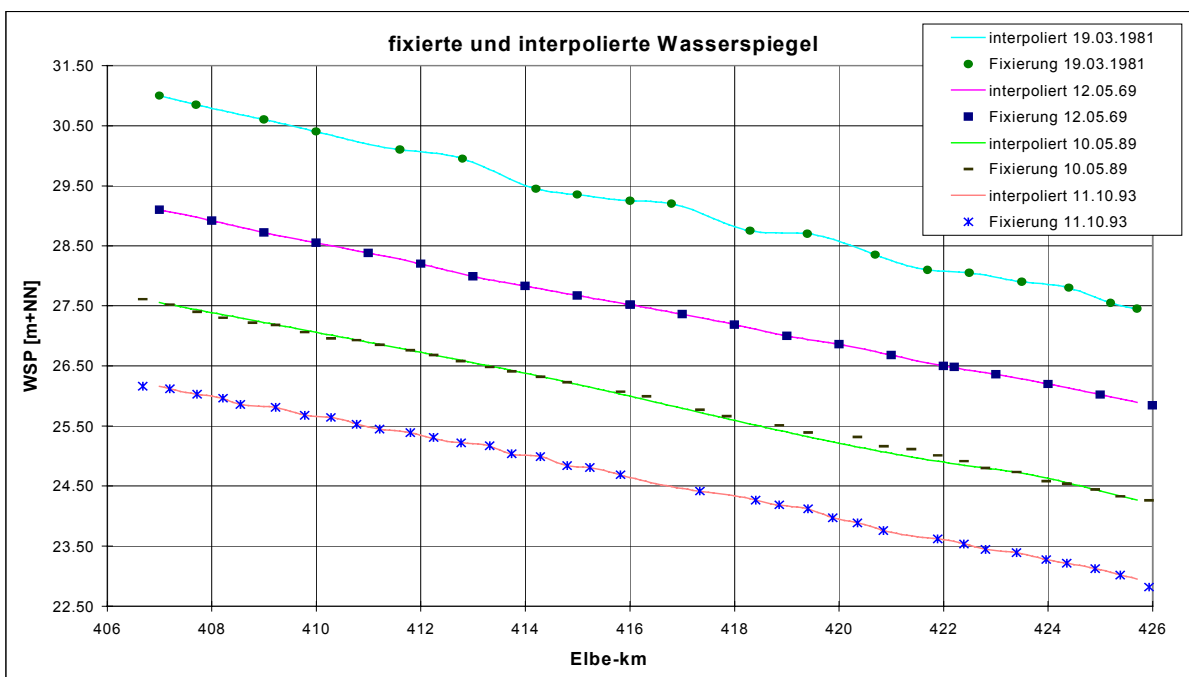


Abb. III-2.4 Vergleich gemessener und interpolierter Wasserspiegel (Fixierungen).

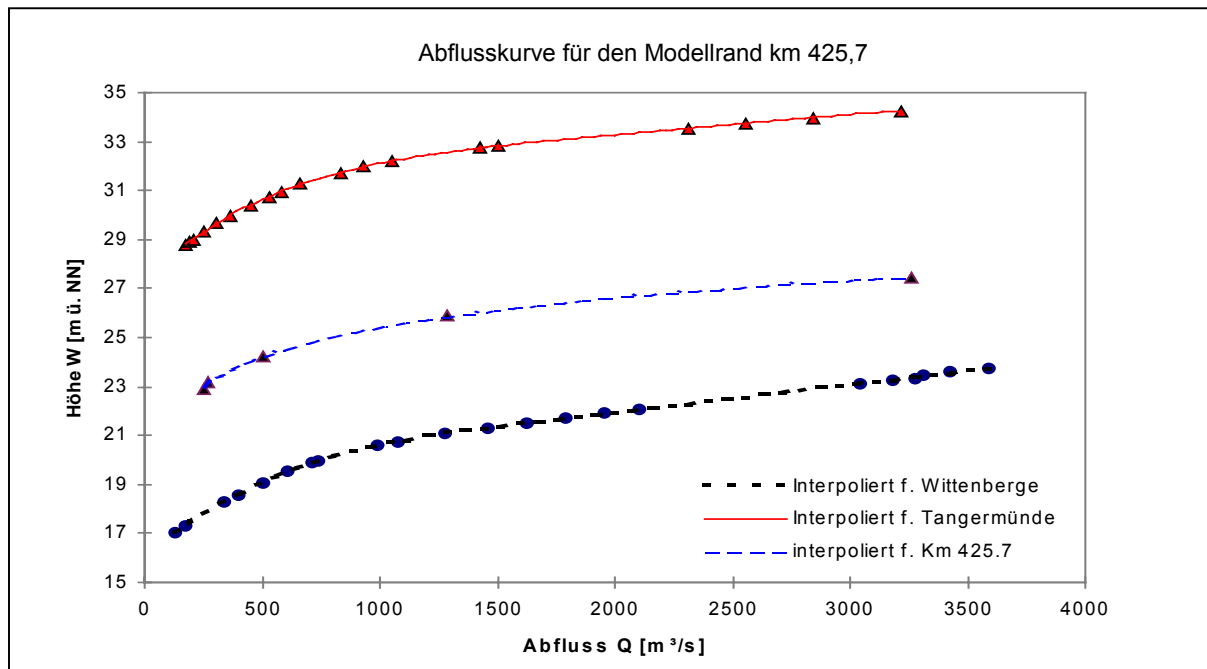


Abb. III-2.5 Abflusskurven Pegel Tangermünde und Wittenberge sowie unterstromiger Modellrand.

### Bewertung und Interpretation der Eichung

Die Güte des Modells bzw. mögliche Fehler tragen i.a. der Verfügbarkeit und Genauigkeit der Naturdaten bei seiner Eichung Rechnung. Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde versucht, die Differenzen zwischen berechneter und fixierter Wasserspiegelhöhe möglichst gering zu halten; als Toleranz wurden hier +/- 10 cm festgelegt.

Die Ergebnisse der Eichung mit fester Sohle für die Teilstrecke und die o.a. Abflüsse sind in (ADAM ET AL. 1999a) ausgeführt. Neben den Wasserspiegelhöhen und -differenzen sind dort auch Strömungsparameter der Eichung (wie Fließquerschnitt, Fließgeschwindigkeit, Sohlschubspannung) sowie die jeweiligen Rauheitsbeiwerte dokumentiert. Für die Beispielstrecke lassen sich aus den Ergebnissen der Eichung folgende Aussagen ableiten (zum Vergleich siehe auch *Anlagen-CD*: Bericht und Grafiken).

Bei einem Abfluss von 249 m³/s zeigen die Fließquerschnitte eine relativ breite Streuung mit Werten zwischen 200 m² und 400 m². Im Krümmungsbereich zwischen km 418 und km 420 treten aufgrund der Verlandung an der Innenseite die kleinsten Abflussflächen auf. Entsprechend sind in diesem Abschnitt die größten Fließgeschwindigkeiten mit Spitzenwerten bis 1,2 m/s zu finden. Im Mittel über die Berechnungstrecke beträgt die Geschwindigkeit bei diesem Abfluss 0,8 m/s. Die Werte der Sohl-

schubspannung schwanken zwischen 2,0 N/m² und 5,0 N/m². Die Spitzenwerte treten in der Krümmung auf, da die Schubspannung über das Energiegefälle mit der Geschwindigkeit verknüpft ist.

Mit steigendem Wasserstand zeigt sich eine insgesamt geringere Schwankungsbreite der Abflussflächen. Sie liegen bei Mittelwasser ( $Q=560$  m³/s) durchschnittlich bei 570 m². Die kleinsten Fließquerschnitte treten auch hier im Krümmungsbereich zwischen km 418 und km 420 auf. Die Werte der Fließgeschwindigkeit liegen bei großen Querschnittsflächen bei 0,8 m/s und erreichen in kompakten Querschnitten Spitzenwerte bis 1,3 m/s; im Mittel werden 1,0 m/s erreicht. Ein Vergleich mit der kritischen Schubspannung nach DIN 19661 zeigt, dass der Wert von 6,0 N/m² für Grobsand (0,63 mm bis 2,0 mm), wie er in diesem Elbe-Abschnitt vorliegt, an einigen Stellen bereits überschritten wird und mit einer beginnenden Bewegung an der Sohle gerechnet werden kann. Die berechneten Sohlschubspannungen liegen für diesen Abfluss zwischen 3,0 N/m² und 7,0 N/m².

Beim „bordvollen Abfluss“ ( $Q=1284$  m³/s) steigen die Abflussflächen gegenüber dem Mittelwasser stark an, da bereits stellenweise eine Ausuferung in die Aue beginnt. Der Abflussanteil über dem Vorland liegt hierbei meist unter 10%, nur im Bereich eines Altarmes auf dem linken Vorland (km 416,5-

418) werden rund 15% des Abflusses durch die Aue fließen. Es werden in Abhängigkeit der Ausuferung bzw. der Querschnittsfläche Geschwindigkeiten im Flussschlauch von durchschnittlich 1,25 m/s erreicht. Über dem Vorland bei nur geringen Wassertiefen liegt die Fließgeschwindigkeit mit rund 0,25 m/s deutlich geringer als im Hauptgerinne. Die Sohlschubspannung bewegt sich hier zwischen 3,0 N/m<sup>2</sup> und 7,0 N/m<sup>2</sup>. In Bereichen, in denen der Abfluss nahezu vollständig im Flussschlauch abgeführt wird, treten entsprechend die größten Schubspannungen auf.

Der wellenförmige Verlauf der Wasserspiegelfixierung vom 19.03.1981 mit einem Abfluss von  $Q = 3250 \text{ m}^3/\text{s}$  liegt in den großen Unterschieden der Abflussflächen begründet. Die Einschnürung der Elbe im Bereich der Ortschaft Sandau (km 413-415) mit kleinen Gesamtabflussflächen von 2500 m<sup>2</sup> zeigt auch in den berechneten Schubspannungen von 12,0 N/m<sup>2</sup> deutlich ihre Auswirkungen. In Abschnitten mit einer elbefernen Deichführung und einem Altarm auf der linken Vorlandseite (km 416-418) steigt die Abflussfläche auf 4000 m<sup>2</sup> an und die Schubspannung liegt nur noch bei rund 6,0 N/m<sup>2</sup>. Die Fließgeschwindigkeit im Flussschlauch liegt bei diesem Abflussereignis durchschnittlich bei 1,6 m/s; im Vorland werden im Mittel 0,5 m/s erreicht.

### III-2.3.2 Sedimentologisches Modell

#### Geometrie

Grundlage der Berechnungen mit beweglicher Sohle ist das geeichte hydronumerische Modell mit fester Sohllage. Als Sedimentreservoir der Sohle wird zudem die geschiebeführende Breite zwischen den Bühnenfüßen mit einer Tiefe von 5 m definiert.

#### Hydrologie

Für die Eichganglinie lag eine Abflusszeitreihe des Pegels Tangermünde für den Zeitraum 01.11.1960 bis 31.10.1995 (Tagesmittelwerte) vor. Diese wurde in eine diskretisierte Ganglinie unter Vorgabe der Abflussdifferenz von  $\Delta Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$  transformiert.

Langanhaltende Abflussperioden, insbesondere bei niedrigem Wasserstand, können programm-intern ohne Ausgabe von Ergebnissen verkürzt werden. Dies ist notwendig, da die hydraulischen Verhält-

nisse nur zu Beginn eines Zeitschrittes berechnet werden. Treten Erosion oder Akkumulation in so großem Umfang auf, dass sich die hydraulischen Bedingungen merklich ändern, so würden die Ergebnisse bei zu langen Zeitschritten verfälscht. Nach umfangreichen Testrechnungen wurde die Dauer eines verkürzten Zeitschrittes auf maximal 36 Tage bei kleinen Abflüssen festgesetzt, Abflüsse größer 1200 m<sup>3</sup>/s haben eine maximale Zeitschrittlänge von einem Tag.

Für den gesamten Zeitraum der Eichganglinie wurde die Abflusskurve verwendet, die bereits für das 1D-Modell mit fester Sohle erstellt worden war.

#### Sedimentologie

Die Daten zum Sohlenmaterial (Kornverteilungen) wurden wie oben beschrieben dem Gutachten der BfG (BfG 1994) entnommen. Da in der Teilstrecke keine Messdaten vorlagen, wurde aus den Sieblinien der nächsten zwei oberstrom (km 386,0 und km 388,0) und unterstrom (km 427,6 und km 428,0) gelegenen Messpunkte eine mittlere Kornverteilung durch graphische Interpolation ermittelt.

Für den Feststoffeintrag am oberstromigen Modellrand wurde auf Messungen der Geschiebe- und Schwebstofffrachten der BfG bei Tangermünde (km 388,8) zurückgegriffen. Zum Zeitpunkt des Modellaufbaus lagen Geschiebe- und Schwebstoffmessungen aus den Jahren 1994-1997 vor.

Während die Geschiebemessungen mit einer Kornverteilung angegeben werden, sind die Schwebstoffmessungen nur prozentual nach Feinschwebstoffen und suspendiertem Sand unterteilt. Für den Feinschwebstoff wurde der Anteil auf die Schluffklassen 0,002-0,063 mm verteilt. Für die Sandfraktion wurde angenommen, dass sich die Kornfraktionen bei Abflüssen unter Mittelwasser auf die Klassen Fein- und Mittelsand (0,063-0,63 mm) und bei höheren Abflüssen zusätzlich auf die Klasse Grobsand (0,63-2,0 mm) verteilt.

#### Modelleichung

Ein direkter Vergleich der Sohllagen zwischen 1960 und 1995 konnte nicht vorgenommen werden, da im Verbundprojekt nur die aktuellen Peilungen aufbereitet worden sind. Zur Abschätzung der Sohl-

entwicklung in den letzten 35 Jahren zu wurde ein Vergleich über normierte Wasserspiegelfixierungen vorgenommen. Es lagen folgende Fixierungen vergleichbarer Abflüsse vor:

14.09.1959	221 m <sup>3</sup> /s a.P. Tangermünde
03.10.1985	272 m <sup>3</sup> /s a.P. Tangermünde
11.10.1993	249 m <sup>3</sup> /s a.P. Tangermünde

Mit Hilfe der Abflusskurve des Pegels Tangermünde konnte die Differenz der älteren Wasserstände zur Wasserspiegelhöhe vom 11.10.1993 ermittelt werden. Um diesen Betrag wurden die Wasserspiegelfixierungen verschoben und miteinander verglichen. Die Differenzen zwischen den normierten Wasserspiegeln sind gering (< 10 cm). Dies deckt sich mit den Untersuchungen der BAW, bei denen zwischen Tangermünde und Schnackenburg in den letzten Jahrzehnten keine nennenswerte Erosionstendenz diagnostiziert werden konnte (FAULHABER 1997).

Nach verschiedenen Literaturangaben wird für große Flüsse mit sandigem Bettmaterial der Transportansatz nach *Tofaletti* von 1969 (vgl. DVWK 1988) empfohlen. An der Elbe wurden mit diesem Ansatz bereits in anderen Modellstrecken sehr gute Erfahrungen gemacht, die sich im Untersuchungsgebiet Sandau bestätigten. Nach Vergleichsrechnungen mit weiteren Transportansätzen wurde für das Modell der Ansatz nach *Tofaletti-Schocklitsch* gewählt, da dieser eine größere Bandbreite abdeckt als der *Tofaletti*-Ansatz allein. Bei kombinierten Ansätzen

werden die Berechnungen der Ansätze verglichen und jeweils der größere Wert verwendet.

Die Sohlveränderung nach 35 Jahren Simulationszeit zeigt bei einem gleitenden Schnitt über 10 Profile Werte von -0,5 m bis +0,2 m (siehe Abb. III-2.7). Abweichungen einzelner Profile im Bereich von Dezimetern müssen hierbei toleriert werden, solange sie nach einer Anlaufphase einen stabilen Zustand erreichen. Wichtiger bei den Feststofftransportberechnungen mit HEC-6 ist die Betrachtung größerer Abschnitte, um unplausible Erosions- oder Akkumulationserscheinungen zu vermeiden.

Ein wichtiges Eichkriterium ist die durchschnittliche jährliche Feststofftransportrate. Nach Schätzungen der BfG lag diese im Zeitraum 1992-1996 im Mittel bei rund 740.000 t/a (SCHMIDT & DRÖGE 1999). Die Schwankungsbreite der Messungen liegt dabei zwischen 575.000 t/a und 1.065.000 t/a. Diese Werte wurden als Orientierung zur Eichung herangezogen. Durch den größeren Eintrag von Schwebstoffen ließ sich die jährliche Transportrate leicht erhöhen, da diese Fraktionen nahezu komplett durch das Modell durchtransportiert werden und das Modell kaum beeinflussen. Der Geschiebeanteil wurde verringert, um Ablagerungen am oberen Modellrand zu vermeiden. Der Mittelwert des Gesamttransports für den oben genannten Zeitraum liegt nach der Eichung bei durchschnittlich 880.000 t/a, der Sand- bzw. Kiesanteil beträgt im Mittel 270.000 t/a.

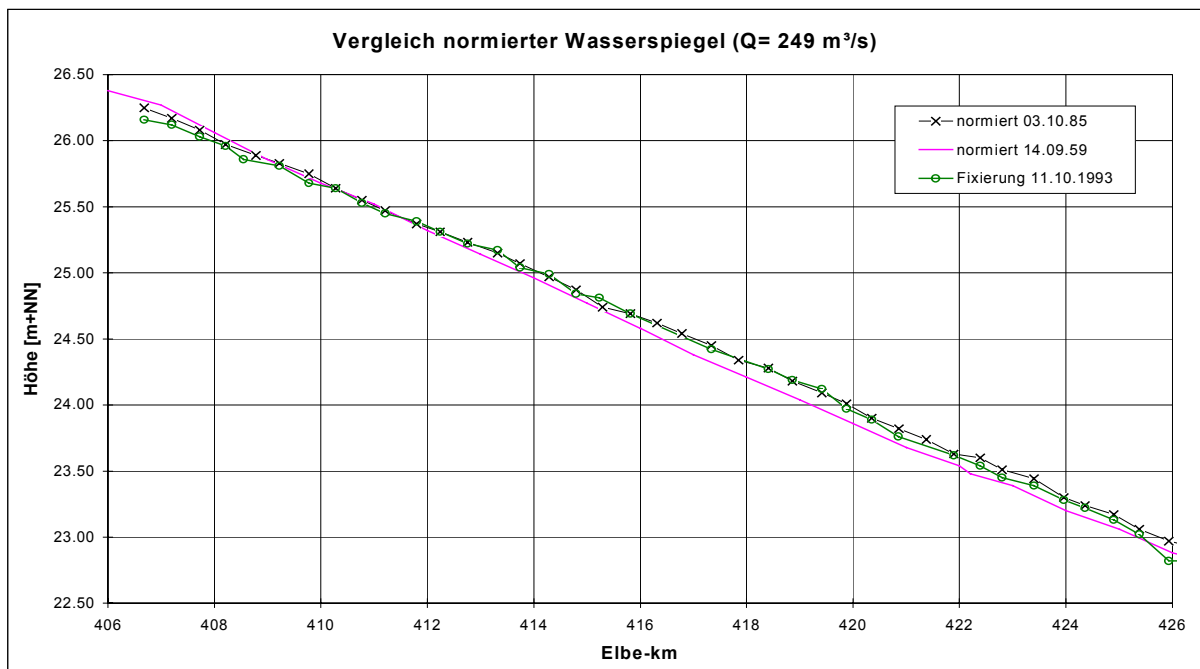


Abb. III-2.6 Vergleich der auf 249 m<sup>3</sup>/s normierten Wasserspiegel.

In Abb. III-2.8 ist ein Vergleich des gepeilten und des berechneten Talweges sowie eines Abflusses in der Größenordnung des mittleren Niedrigwassers dargestellt. In der diskretisierten Ganglinie tritt der Tageswert vom 11.10.93 ( $Q= 249 \text{ m}^3/\text{s}$ ) als Berechnungszeitschritt mit einem Abfluss von  $Q= 294 \text{ m}^3/\text{s}$  auf. Dies erklärt, warum der zugehörige Wasser-

spiegel rund 30 cm über dem fixierten Wasserspiegel vom 11.10.93 liegt. Der Talweg der Berechnung entspricht weitestgehend dem im Jahr 1995 gepeilten Talweg. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass angesichts des vorhandenen Datenmaterials die Eichung als ausreichend genau und zufriedenstellend zu bewerten ist.

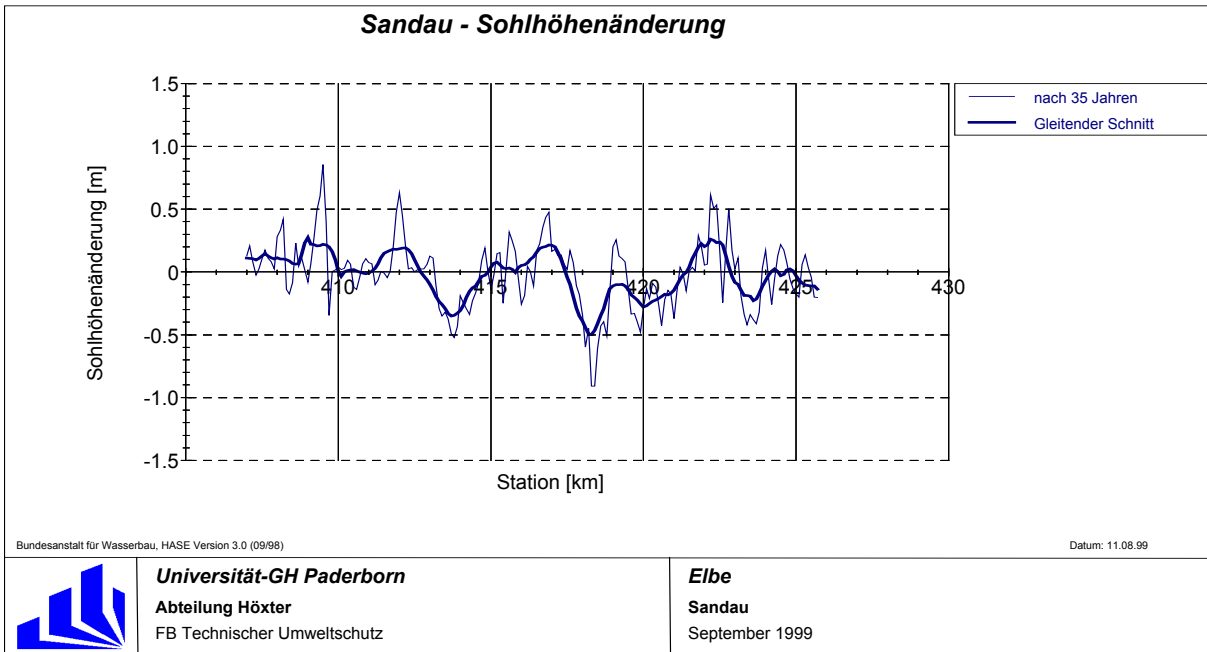


Abb. III-2.7 Sohlhöhenänderung nach 35 Jahren Simulationszeit.

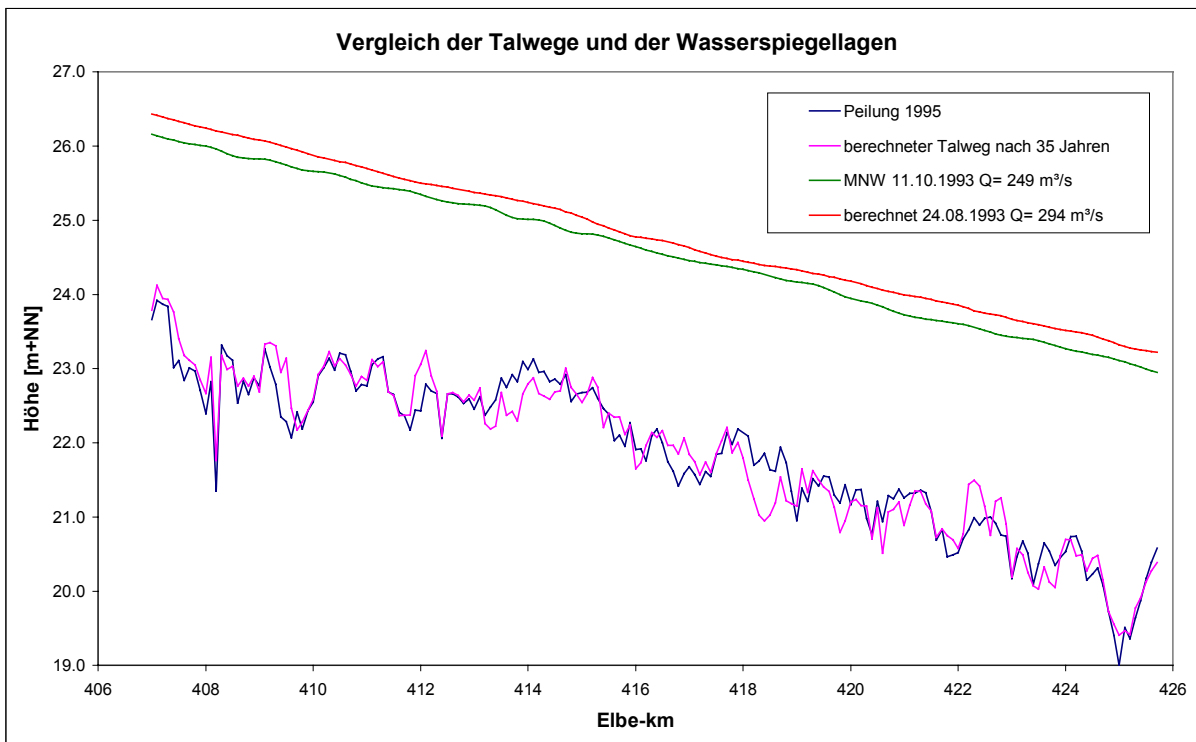


Abb. III-2.8 Vergleich der Talwege und Wasserspiegellagen.



### III-2.4 Modellstrecken im Überblick

Wie beschrieben bestand eine Grundvoraussetzung für die hydraulisch-morphologische Charakterisierung der deutschen Binnelbe in der Erarbeitung von Modellen (Instrumentarien), soweit notwendig und im Rahmen des Vorhabens möglich. Zur Vervollständigung des Gesamtbildes wurden ferner die Streckenabschnitte, die in den letzten Jahren bei der BAW und BfG untersucht wurden, einbezogen. Eine Übersicht über die im Ergebnis berücksichtigten Modelle zeigen Tab. III-2.3 und Abb. III-2.9. Mit Ausnahme der Sächsischen Elbe sind alle Strecken mit fester (hydraulisch) und beweglicher (sedimentologisch) Sohle aufgebaut bzw. berechnet worden.

#### Bemerkungen zu einzelnen Teilstrecken

zu km 0-108:

Die Fließstrecke von der Staatsgrenze bis nach Riesa wurde von der BfG modelliert. Die hydraulischen Berechnungen wurden zur Ermittlung von Fließzeiten für stationäre Abflusszustände veranlasst, die als Eingabedaten für das sogenannte Alarm-Modell der Elbe benötigt werden, das im Auftrag der IKSE von der BfG erstellt wird. Der Abschnitt ist u.a. charakterisiert durch die enge Talform in den Festgesteinsbereichen. Die Überflutungsflächen begleiten den Strom als schmales Band, und sind bis zum Austritt des Stromes aus dem Gebirgsbereich am Schloss Hirschstein (km 96) hauptsächlich durch die natürliche Geländeform bestimmt. Im Unterschied zu den nachfolgenden Strecken sind weder Querbauwerke (Buhnen) noch Deiche in größerem Umfang vorhanden. Die Sohle ist hier grobkörnig und wird in ihrer Lage seit Jahrzehnten als stabil eingestuft. Eine Berechnung der Sohlbelastung war nicht Ziel der Modellerstellung in diesem Bereich. Ab ca. km 100 nehmen die Deichstrukturen wegen des Übergangs in breitere Talniederungen deutlich zu.

zu km 121-250:

Als Erosionsstrecke wird i.a. der Abschnitt km 120 bis 220 bezeichnet. Die näheren Erkenntnisse zu dieser Strecke sind aufgrund der langjährigen Beobachtungen und spezifischen Untersuchungen der Fachbehörden der WSV sehr umfangreich und werden hier nicht ausgeführt (vgl. auch Kap. II-1.3). Insgesamt von Bedeutung sind relativ große Gefälleunstetigkeiten und -änderungen im Längsverlauf. Die Uferbereiche sind infolge der Tiefenerosion stei-

ler als in anderen Strecken, eine Ausuferung findet i.a. erst bei höheren Abflüssen statt. Die Strecke weist in ihrem unteren Teil, v.a. nach Einmündung der Schwarzen Elster bei km 199, breitere Ausuferungsbereiche bzw. Überflutungsflächenanteile auf, was sich in den hydraulischen Verhältnissen bei Hochwasser widerspiegelt bzw. deren modelltechnische Erfassung teilweise erschwert.

zu km 252-299:

Der Bereich des Biosphärenreservats Mittlere Elbe ist gemeinhin bekannt für seine naturnahen Strukturen entlang der Ufer und in der noch weiträumig verfügbaren rezenten Aue. Die Einmündungen der Nebenflüsse Mulde und Saale in diesem Bereich wurden wegen komplexerer Strömungssituationen bei Hochwasser nicht in die eindimensionale Betrachtung aufgenommen. Im Fall der Muldemündung bei Dessau betrifft dies auch die oberstrom angrenzenden Streckenbereiche (km 252-264,5). Für die HN-Modellerstellung im Projekt wurden digitale Geländemodelle erstellt.

zu km 300-332:

Aufgrund der Stromteilung im Hochwasserfall bei Magdeburg (Entlastung der Stadtstrecke durch den Umflutkanal über das Pretziener Wehr) stellt dieser Bereich einen Sonderbereich mit schwieriger Lage bezüglich gesicherter historischer Daten sowie der Strömungsverhältnisse im Fall der Wehröffnung dar. Die vor allem im Niedrigwasserbereich erschwerten Schifffahrtsbedingungen in der Stadtstrecke (Domfelsen) waren in den letzten Jahren Gegenstand umfangreicher Untersuchungen u.a. an durch die BAW. Aufgrund der besonderen Problematik wurde die Strecke im Überblick ausgeklammert.

zu km 332-426:

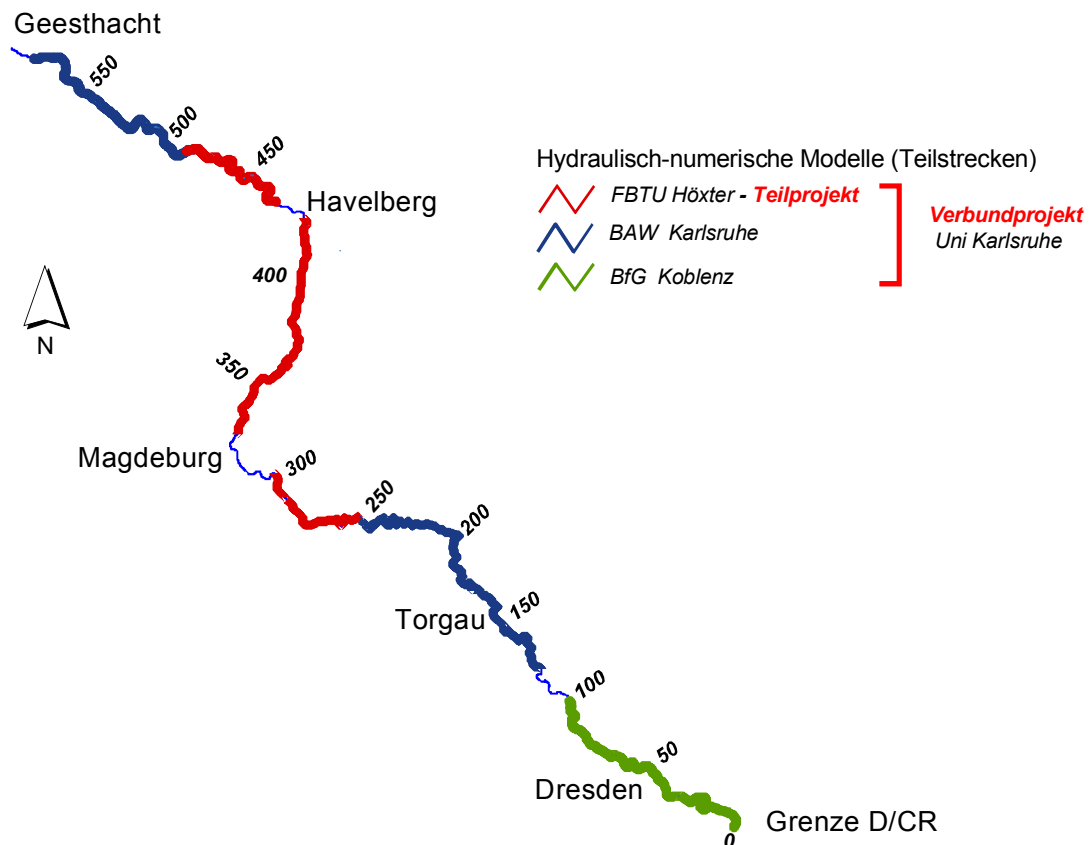
Die Modelle des Abschnitts ab Magdeburg bis um Havelberg wurden schrittweise über die Projektlaufzeit erarbeitet und schließen eine große Lücke im Gesamtbild. Parallel wurden digitale Geländemodelle erstellt und zur fachtechnischen Abgrenzung von Überflutungsflächen eingesetzt.

zu km 438-568:

Die gefällearmen Bereiche der Unteren Mittelbe sind ihrer homogenen Charakteristik entsprechend für den Überblick in längeren Modellstrecken bei größeren Profilstrecken (meist 500 m) gerechnet worden. Spezielle Untersuchungen existieren (anderweitig) für den Lenzener Bereich (um km 480) sowie die sogenannte Reststrecke (km 508.-521).

**Tab. III-2.3** Überblick der HN-Modelle entlang der Elbe im Kontext des Verbundprojekts (Summe Lauflänge: ca. 507 km).

Nr.	Elbe-km	Kurzbezeichnung Streckenabschnitt, Bemerkungen	Bearbeitung
1	0,0 – 108,4	Grenze CR – Sächsische Elbe	BfG
<i>Lücke sowie „langer“ Kilometer km 121,54 (sächsische Kilometrierung) = km 120,5 (preußische Kilometrierung)</i>			
2	121,0 – 250,4	Erosionsstrecke	BAW (203-220 Verbundprojekt)
<i>Kilometrierung km 250,5 = km 252,0: 1,5 km Fehlstrecke (Durchstich 1938)</i>			
3	252,0 – 271,9	Dessau	Verbundprojekt
4	271,2 – 288,3	Aken, Biosphärenreservat „Mittlere Elbe“	Verbundprojekt
<i>Saalemündungsbereich</i>			
5	291,0 – 299,2	Barby	Verbundprojekt
<i>Stadtstrecke Magdeburg: weitergehende BAW-Untersuchungen sowie Problem Stromteilung bei Hochwasser (Umflutkanal)</i>			
6	331,9 – 343,6	Rothensee	Verbundprojekt
7	344,1 – 374,0	Niegripp	Verbundprojekt
8	374,0 – 390,0	NSG „Bucher Brack“	Verbundprojekt
9	388,0 – 408,0	Tangermünde	Verbundprojekt
10	407,0 – 425,7	Sandau	Verbundprojekt
<i>Havelmündungsbereich</i>			
11	438,0 – 495,0	Wittenberge	BAW/Verbundprojekt
12	480,0 – 568,86	Reststrecke	BAW
<i>Staubereich Wehr Geesthacht (km 568 - 585), bei NW: Stauwurzel bis km 550</i>			

**Abb. III-2.9** Überblick der HN-Modelle entlang der deutschen Binnenelbe (Stand: Dezember 2000)

## III-2.5 Ergebnisparameter im Überblick

### III-2.5.1 Ansatz für die Gesamtbetrachtung

Wie aus den vorigen Ausführungen deutlich wird, zeichnete sich im letzten Projektjahr (2000) für den angestrebten Gesamtüberblick der mögliche Einsatz von HN-Modellen in insgesamt 12 Teilstrecken mit einer Summe von ca. 507 Laufkilometern ab. Angesichts dieser abschnittsbezogenen Betrachtung, die den unterschiedlichen Zielen und Hintergründen der Modelle Rechnung trägt, stellt sich freilich die Frage einer sinnvollen Aneinanderkettung der Modelle bzw. ihrer Berechnungsergebnisse.

Eine programmtechnische Kopplung der Modelle kann erfolgen (wie z.B. von der BAW durch sukzessive Verlängerung der Erosionsstreckenmodelle realisiert), ist aber i.d.R. mit nicht unerheblichem Aufwand verbunden und bezüglich der zu erwartenden operationellen Vorteile im Einzelfall abzuwägen. Der Zugewinn an Information aus inhaltlich-fachlicher Sicht ist bei ansonsten gleichen Eingabe- und Ausgabedaten kritisch zu hinterfragen. Generell steht indessen einer weiteren Nutzung und ggf. am Bedarf orientierten Kopplung der Modelle für spezifische Fragestellungen nichts im Wege. Nebenbei kann hierzu erwähnt werden, dass als „durchgängiges instationäres Gesamtmodell Elbe“ ein hydrologisches Wasserlaufmodell (basierend auf konzeptionellen Ansätzen und Flood-Routing-Parametern des ELBA-Modells der BfG) zur Verfügung steht, das im Vorhaben zur Frage der Deichrückverlegungen entwickelt und eingesetzt wurde (vgl. Kap. III-3).

Im Hinblick auf die Umsetzung der Teilprojektziele erschien es somit fachlich vielmehr angebracht, den Schwerpunkt der Bearbeitung in der Endphase auf die Modellanwendung zu legen, um charakteristische, über große räumliche und zeitliche Abschnitte hinweg *vergleichbare* Zustände zu beschreiben. Die Grundlage hierfür bilden die parallel im Vorhaben durchgeführten hydrologischen Analysen (Abflussstatistiken an den Hauptpegeln), die mittels Regionalisierung in *hydrologische Längsschnitte langfristiger Abflusskennwerte entlang der Elbe* überführt wurden (näheres siehe Kapitel III-1).

Demzufolge ist klar hervorzuheben, dass alle hier im Ergebnis dargestellten hydraulisch-morphologischen Parameter gemäß der großräumig und langfristig übergeordneten Charakterisierung des Abfluss-

geschehens ermittelt wurden. Die zugrunde liegenden Abflusszustände beziehen sich auf den hydrologisch eingegrenzten *Ist-Zustand gemäß der Analyse der Pegelzeitreihen 1964-1995*, wobei im Hinblick auf brisante Hochwasserfragen bzw. seltene Extremereignisse (wie  $HQ_T$  für  $T \geq 50-100$  Jahre) auch die Ergebnisse der längerfristigen Betrachtung (1936-1995) berücksichtigt wurden. Als durchgängige bzw. einheitliche Abflussvorgabe wurden folgende Zustände gewählt (vgl. Tab. III-2.4).

**Tab. III-2.4** Abflussvorgaben der HN-Berechnungen gemäß hydrologischer Analyse (vgl. Kap. III-1); darüber hinaus in den Einzelstrecken weitere Abflüsse.

Abflusskennwert	Beschreibung
<b>MNQ</b>	Niedrigwasser: $MNQ \equiv Q_{GIW}^3$
<b>MQ</b>	Mittelwasser
<b>2*MQ</b>	zweifacher MQ-Wert
<b>MHQ</b>	Mittl. jährl. Hochwasserscheitel
<b>HQ<sub>T</sub></b> für T = 5, 20, 100 a	Hochwasserscheitelabfluss der Jährlichkeit T

In allen Teilstrecken wurden primär die Kennwerte der Pegelstellen als Vorgabe in die HN-Berechnung übernommen, wobei sich diese entsprechend der Regionalisierung (Längsschnittentwicklung) in ein konsistentes Gesamtbild entlang der Elbe fügen. In Strecken ohne Pegelstelle wurden die benötigten Abflussvorgaben aus den hydrologischen Längsschnitten abgegriffen. Das heißt für die berechneten Parameter, dass sich die zugehörigen Abflüsse im Längsverlauf ändern, und zwar einerseits allmählich (geringfügig) über längere Teilstrecken hinweg und andererseits stufenartig an den Zuflüssen Schwarze Elster, Mulde, Saale und Havel. Dabei besteht diese Änderung nicht immer in einer Abflusszunahme, sondern kann bedingt durch die Retentionswirkung entlang des Gewässerlaufes oder durch lokale Effekte (z.B. Einströmen von Elbe-Hochwasser in Havelgebiete) in einer Abnahme bestehen.

<sup>3</sup> GIW: Gleichwertiger Wasserstand, definiert als die einander entsprechenden Wasserstände in verschiedenen Durchflussquerschnitten eines Fließgewässers bei gleicher Unterschreitungsdauer. Der GIW1989\*(20d), der gültige Bezugswasserstand der Elbe, ist der Wasserstand, der im Mittel von sieben trockenen und mittleren Jahren zwischen 1973 und 1986 an durchschnittlich 345 eisfreien Tagen überschritten wird. Er liegt in der Größenordnung des mittleren Niedrigwassers (Beispiele: Pegel Dresden:  $Q(GIW) = 120 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $MNQ_{(1964/95)} = 121 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Pegel Neu Darchau: 282/288 resp.). Bei den HN-Berechnungen im Projekt wurden die dem GIW1989\*(20d) zugehörigen Abflusswerte den MNQ-Werten vorgezogen.

### III-2.5.2 Parameterauswahl und Datenumfang

In Tab. III-2.5 sind alle Kenngrößen im Überblick zusammengestellt, die für die Längsschnittbetrachtung ausgewählt und für die o.a. Abflüsse berechnet bzw. aus den verfügbaren Daten abgeleitet wurden. Die Tabelle liefert zugleich Hinweise zur Verfügbarkeit der Daten und Berechnungsergebnisse in

Form von Längsschnittdarstellungen, ergänzt um grafischen Auftragungen der Parameter in Funktion der gerechneten Abflüsse im 500 m - Abstand in der **Anlagen-CD**. Die hydraulisch-morphologischen Parameterdarstellungen (Längsschnitt-Serien) sind in 21 Abschnitte à 20-30 km Länge untergeteilt und weitestgehend aufeinander abgestimmt.

**Tab. III-2.5** Im Projektergebnis (Überblick) erfasste und ableitbare Parameter der Elbe aus 1D-HN-Berechnungen und Querprofildaten.

aus	Parameter / Maßeinheit / Bezeichnung		Kurzbeschreibung	Verfügbarkeit s. Hinweise*	
Hydraulische Berechnung	<b>W</b>	[m+NN]	<b>Wasserspiegellage</b>	querschnittsgemittelt	a), b), c), e)
	<b>B</b>	[m]	<b>Wasserspiegelbreite</b>	hydraulisch wirksame (durchströmte) Breite ggf. hydraulische Ann. zu Bühnen, Deiche etc.	a), b), c), e)
	<b>A</b>	[m <sup>2</sup> ]	<b>Durchflussfläche</b>	hydraulisch wirksamer Fließquerschnitt $A_{ges}$ , bzw. getrennt nach Fluss/Vorland $A_{Mi}$ , $A_{Vli}$ , $A_{Vre}$ ,	a), b), d), e), f)
	<b>v</b>	[m/s]	<b>Fließgeschwindigkeit</b>	querschnittsgemittelt für $A_{ges}$ bzw. getrennt nach Fluss/Vorland $A_i$ ,	a), b), d), e), f)
	<b><math>\tau</math></b>	[N/m <sup>2</sup> ]	<b>Schubspannung</b>	bezogen auf die bewegliche Sohlbreite i.a. zwischen den Bühnenköpfen	a), b), d), e), f), g)
Querprofile	<b>y</b>	[m+NN]	<b>Sohlhöhe (mittl./max.)</b>	hier bezogen auf definierte Breite in Strommitte (Definition siehe Kap. II-3)	a), g)
	<b>y<sub>min</sub></b>	[m+NN]	<b>Talwegshöhe (min.)</b>	i.a. definiert als tiefster Punkt im Querprofil bzw. in dessen strömungswirksamen Bereich	a)
ableitbare Kenngrößen	<b>h</b>	[m]	<b>Fließtiefe (max./mittl.)</b>	Differenzhöhe Wasserspiegellage - Sohlhöhe (max: Talweg / mittl. Sohlhöhe laut Def.)	h)
	<b>B/h<sub>m</sub></b>	[-]	<b>Breite-Tiefe-Verhältnis</b>	B/h als Form des Durchflussquerschnittes wobei mittl. Fließtiefe: $h_m = A/B$	h)
	<b>B/A R<sup>-1</sup></b>	[1/m]	<b>spez. Oberfläche <math>\approx</math> (hydraul. Radius)<sup>-1</sup></b>	$B/A$ [m/m <sup>2</sup> ] $\approx$ Verhältnis Oberfläche/Volumen [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ] des strömenden Wasserkörpers bzw. Hydraulischer Radius (hier Näherung für gr. Breiten $B \gg h$ )	h)
	<b><math>\Delta h</math></b>	[m]	<b>Wasserspiegel-differenzen</b>	Schwankungsbereich der Wasserspiegellagen, z.B. für die Fälle: MW-NW und MHW-NW	h)
	<b><math>\Delta A_{still}</math></b>	[m <sup>2</sup> ]	<b>Querschnittsfläche Stillwasserzone</b>	Differenz zwischen gepeilten Querprofilen und hydraulisch aufbereiteten Profilen (Bühnenschatten)	h), i), j), k)
	<b><math>\Delta x</math></b>	[m]	<b>Breite der Wasserwechselzone</b>	Abstand der Uferpunkte bei NW und MW jeweils linkes/rechtes Ufer, siehe Kap. II-3	a), g), l)
	<b>tan <math>\beta</math></b>	[-]	<b>Uferneigung</b>	$\tan \beta = \Delta h / \Delta x$ bezogen auf NW und MW jeweils linkes/rechtes Ufer	a), g), l)

\* Hinweise:

- Verfügbar für alle Modellstrecken (vgl. Tab. III-2.3), im vorliegenden Bericht als Längsschnitte auf CD in Abschnitten von 20-30 km
- Berechnet für alle angegebenen Abflusszustände (vgl. Tab. III-2.4)
- Parameter verfügbar im Abstand von 500 m in Funktion des Abflusses (abrufbar über Grafikmenü auf CD)
- wie c) jedoch beschränkt auf die Werte des Flusshauptschlauches (z.B.  $A_{Mi}$ ) sowie bezogen auf den Gesamtabfluss (z.B.  $A_{ges}$ )
- Berechnung in Modellstrecke km 252-265 für ausufernde Zustände (Hochwasser) problematisch, daher dort ausgenommen
- Längsschnitte an Modellgrenzen (Übergänge benachbarter Strecken) z.T. mit leichten Sprüngen, auf Grund hydraulischer Annahmen
- Ausnahme: aktueller Bearbeitungsstand ohne Modellstrecke km 0-108
- als ableitbare Größe grundsätzlich verfügbar wie a)-g), hier aber nicht oder nur im Gesamtüberblick dargestellt
- Ausnahme: hier nur für Niedrig- und Mittelwasserzustände als sinnvoll erachtet und ermittelt
- Ausnahme: aktueller Bearbeitungsstand ohne Modellstrecke km 120-250
- Ausnahme: aktueller Bearbeitungsstand ohne Modellstrecke km 536-568
- näheres hierzu siehe Kapitel II.3

### III-2.5.3 Erläuterungen zu den Ergebnissen anhand von Beispielen

#### Wasserspiegellagen

Zu den für viele Belange wohl wichtigsten Größen zählen die Wasserspiegellagen. Abb. III-2.10 liefert eine Gesamteindruck der Wasserstandsverhältnisse für mittlere Zustände (hier: MNQ, MQ, MHQ, s.o. Abflussdefinition). Eine detaillierte Ansicht der Ergebnisse zeigt Abb. III-2.11 exemplarisch für die oben beschriebene Beispielstrecke bei Sandau einschließlich Sohlhöhenangaben. Entsprechende Detailansichten (der Länge ca. 25 km) sind für alle berechneten Strecken in der *Anlagen-CD* verfügbar. Es wird deutlich, dass die Wasserspiegellagen ein insgesamt relativ gleichförmiges Bild zeigen (d.h. Parallelität der Verläufe). Ferner ist klar, dass aus diesen Daten eine Vielzahl weiterer Parameter samt ihrer Variabilitäten im Längsverlauf ableitbar sind (z.B. charakteristische Fließtiefen, Gefälle, Wasserstandsdifferenzen etc.).

Eine wichtige Anwendung der berechneten Wasserspiegellagen besteht in ihrer (digitalen) räumlichen Überlagerung mit Geländeinformationen mittels Einsatz von GIS, insbesondere die Ermittlung von Überflutungsflächen<sup>4</sup> sowie -höhen. Im Vorhaben wurde diese Verschneidung für die Elbebereiche durchgeführt, in denen auch eigene HN-Modelle bzw. zu diesem Zweck digitale Geländemodelle erstellt wurden. Für große Abschnitte der Mittleren Elbe entsprechen die Überflutungsgrenzen zugleich den Deichlinien (siehe hierzu Kapitel II.3).

#### Fließgeschwindigkeiten

Als weitere Größe von übergeordneter Bedeutung sind die mittleren Fließgeschwindigkeiten im Fluss-hauptschlauch herauszustellen, hier dargestellt in Abb. III-2.12 (Gesamtübersicht) und Abb. III-2.13 (Teilstrecke). Weitere Darstellungen sind wiederum in der *Anlagen-CD* verfügbar. Folgende Einzelheiten sind in den Abbildungen erkennbar und liefern wichtige Aufschlüsse zur weiteren Interpretation.

- Ein erster Grobeindruck der mittleren Fließgeschwindigkeiten der Elbe im Längsschnitt lässt

- ausgehend von einem relativ homogenen Bild für Niedrigwasser – mit zunehmendem Abfluss eine größere Schwankungsbreite und Veränderlichkeit in Längsrichtung. Dies beinhaltet z.B. eine allmähliche Verlangsamung der Strömung bei Hochwasser bis in die flachen Abschnitte der Unteren Mittelbe (ab km 400).

- Betrachtet man die Strecke ab km 120, so fällt auf, dass infolge der dortigen Sohleneintiefung insbesondere bei Strömungszuständen im Bereich Mittelwasser und darüber deutlich höhere Geschwindigkeiten zu verzeichnen sind als in anderen Strecken (Beispiel: vergleiche  $v(MQ)$  und Hilfslinie „ $v = 1 \text{ m/s}$ “). Dieser Effekt der fortgeschrittenen Eintiefung der Sohle und Abflusskonzentration im Hauptgerinne verläuft sich danach im Bereich des Biosphärenreservates Mittlere Elbe (ca. km 230-300).
- Im Bereich der sog. Reststrecke (km 508-521) ist eine Senke im Verlauf der Geschwindigkeiten zu erkennen, die sich unschwer mit dem geringeren Ausbaugrad (infolge des nicht vollendeten Niedrigwasserausbau im 2. Weltkrieg) erklären lässt. Die Geschwindigkeitsreduzierung gegenüber den benachbarten Strecken beträgt bei Niedrigwasser etwa 0,2 m/s.
- Für weitergehende Interpretationen sind u.U. auch Einflüsse auf die Ergebnisse auf Grund der Wahl der Modelliermethode (als Artefakte zu bezeichnen) zu beachten. Konkret heißt das, dass insbesondere hinsichtlich der Frage der hydraulischen Zuordnung und Wirkung der Buhnen bei ihrer Überströmung eine nicht einheitliche Festlegung (Modellannahme) in den Strecken bei der Trennung von Fluss- und Vorlandbereichen zu beachten ist. Dies äußert sich z.B. in einem vermeintlich sprunghaften Verlauf der Berechnung für  $v(2MQ)$  in der Strecke etwa km 360-400: die Unterschiede von ca. 0,15 m/s in den benachbarten (Modell-) Strecken sind hierauf zurückzuführen. Gleichzeitig beschränken sich diese Aussagen auf den Bereich „Buhnenüberströmung bis Ausuferung ins Vorland“: während bei MNQ und MQ die Trennung keine Rolle spielt, verlieren sich die Einflüsse bei ausgeprägtem Hochwasser in der großen Schwankungsbreite der Ergebnisse (im vorliegenden Fall: Variabilität der Geschwindigkeiten  $v(HQ20)$  von 1,5 bis 2,5 m/s).

<sup>4</sup> Nach § 32 Wasserhaushaltsgesetz (WHG vom 23.9.86) sind Überschwemmungsgebiete fachtechnisch abzugrenzen und (durch die Behörden der Länder) gesetzlich auszuweisen.

### Durchströmte Breiten und Querschnittsflächen

Die Längsschnitte der hydraulisch wirksamen (laut Berechnungsansatz durchströmten) Wasserspiegeln und Querschnittsflächen, dargestellt in Abb. III-2.14 und Abb. III-2.15, lassen Rückschlüsse auf die hydraulisch-morphologische Gesamtsituation bzw. räumliche Entwicklungstendenzen und Variabilitäten im Längsverlauf zu. So ist auf den ersten Blick die starke Veränderung der Parameter vom Oberlauf (bis km 100) mit schnellem Übergang (bis km 200) in die Strecken der Mittelelbe zu erkennen. Einzelne Verläufe sind mit den verschiedenen Charakteristika der Strecken in Fluss und Vorland (z.B. Strombaumaßnahmen, Erosion, Überflutungsbereiche, Deichverlauf) in Verbindung zu bringen.

Für Niedrig- und vor allem Mittelwasserverhältnisse fällt eine gleichmäßigere und geringere Breite im Bereich ca. km 120-200 auf, die durch die vorhandenen Ausbaubreiten bei gleichzeitig tiefer eingeschnittener Querprofilform erklärbar ist. Interessant in diesem Zusammenhang sind auch die Abschnitte unterhalb Magdeburg (ab km 330) und die Reststrecke (ab km 508).

Die Breitenverläufe (hier) für MQ bis MHQ liefern Hinweise über die Verhältnisse mit zunehmendem Abfluss, insbesondere bezüglich Überströmung der Buhnen und Überflutung im Vorland, wobei für das räumliche Bild auch die gegenseitigen Abstände der Verläufe interessant sind. So ist u.a. festzuhalten, dass der Ort der größten Zunahme der Fließbreiten bzw. -flächen im Längsschnitt abflussabhängig von etwa km 200 (Mündung Schwarze Elster) aus nach oberstrom bis in den Bereich Torgau-Prettin wandert. An der Unteren Mittelelbe kann aus den eng zusammen liegenden Verläufen der Situationen für  $Q \geq 2MQ$  auf eine relativ schnelle Überflutung der vollen verfügbaren Breite (der flachen Vorländer bzw. bis zu den Deichen) geschlossen werden.

### Schubspannungen

Die berechneten Schubspannungen, im Überblick dargestellt in Abb. III-2.16, sind prinzipiell ähnlich zu interpretieren wie die Fließgeschwindigkeiten. Dabei ist zu beachten, dass sich die Größen auf eine rechnerisch bewegliche Sohlbreite (i.a. definiert zwischen den gegenüberliegenden Buhnenköpfen) beziehen, und daher als *wirksame Belastung der Flusssohle* anzusehen sind.

### Ableitbare Parameter (Beispiele)

Exemplarisch werden hier weitere Kenngrößen dargestellt, die aus den erarbeiteten Daten ableitbar sind und bedeutsame Aufschlüsse liefern (können).

#### *Maximale / mittlere Fließtiefen (Abb. III-2.17):*

Bezogen auf mittlere Sohlhöhen im Bereich der Hauptströmung (hier: 70% der Sollstreichlinienbreite<sup>5</sup>; vgl. auch Kapitel II-3) zeigt sich z.B. für MNQ bis MQ ein Band von Wassertiefen von ca. 1,5 bis 4,5 m, mit einigen lokalen Abweichungen. Wird zusätzlich die Differenz zum Talweg (als Maß für die Variabilität der Sohlhöhe, d.h. im Mittel weitere 0,5 bis 1,5 m) betrachtet, so ergeben sich maximale Fließtiefen von ca. zwei bis über fünf Metern bei MNQ und drei bis über sechs Metern bei MQ (Anm.: auf die unmittelbare Darstellung der maximalen Fließtiefen wurde hier verzichtet).

#### *Wasserspiegeldifferenzen (Abb. III-2.18):*

Aus den Höhendifferenzen der Wasserspiegellagen, hier bezogen auf Mittelwasserniveau, ergibt sich ein Gesamtbild der „Bandbreite der Wasserstandsdynamik“ zwischen charakteristischen Zuständen. Z.B. lässt sich ablesen, dass die Differenz zwischen Niedrig- und Mittelwasserständen minimal 1,1 und maximal 2 m beträgt (Ausnahme: Stauwurzel des Wehres Geesthacht ab km 550). Auffällig sind auch hier die Gradienten im Bereich der Erosionsstrecke.

#### *„Spezifische Wasseroberfläche“ (Abb. III-2.19):*

Nach IKSE (1994) ist das Verhältnis der Wasseroberfläche zum Wasservolumen – auch als spezifische Wasseroberfläche bezeichnet – eine maßgebende Größe für die Möglichkeit des Gewässers, einerseits Sauerstoff über die Oberfläche aus der Luft aufzunehmen (atmosphärischer Sauerstoffeintrag) und andererseits durch biochemische Reaktionen (Photosynthese) unter Lichteinwirkung biogenen Sauerstoff zu produzieren. Bezogen auf den abflusswirksamen (strömenden) Wasserkörper kann diese Größe, wie dargestellt, vereinfachend durch den Quotienten von Fließbreite zu –querschnitt beschrieben werden. Bedarfsweise können die nicht durchströmten Bereiche hinzugezogen werden<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Die Sollstreichlinienbreite entspricht den festgelegten Normalbreiten des Stromes im abflusswirksamen Bereich zwischen den Regelungsbauwerken (Buhnen) der beiden Uferseiten

<sup>6</sup> Ein Vergleich mit Daten der *benetzten* Breite und Querschnittsfläche (d.h. einschließlich Buhnenfelder) zeigte, dass die Abweichung der B/A-Werte „benetzt“ vs. „durchströmt“ im Mittel +5,0 % beträgt (Standardabweichung 9,7 %; Datensatz für NQ und MQ entlang km 264 bis 480).

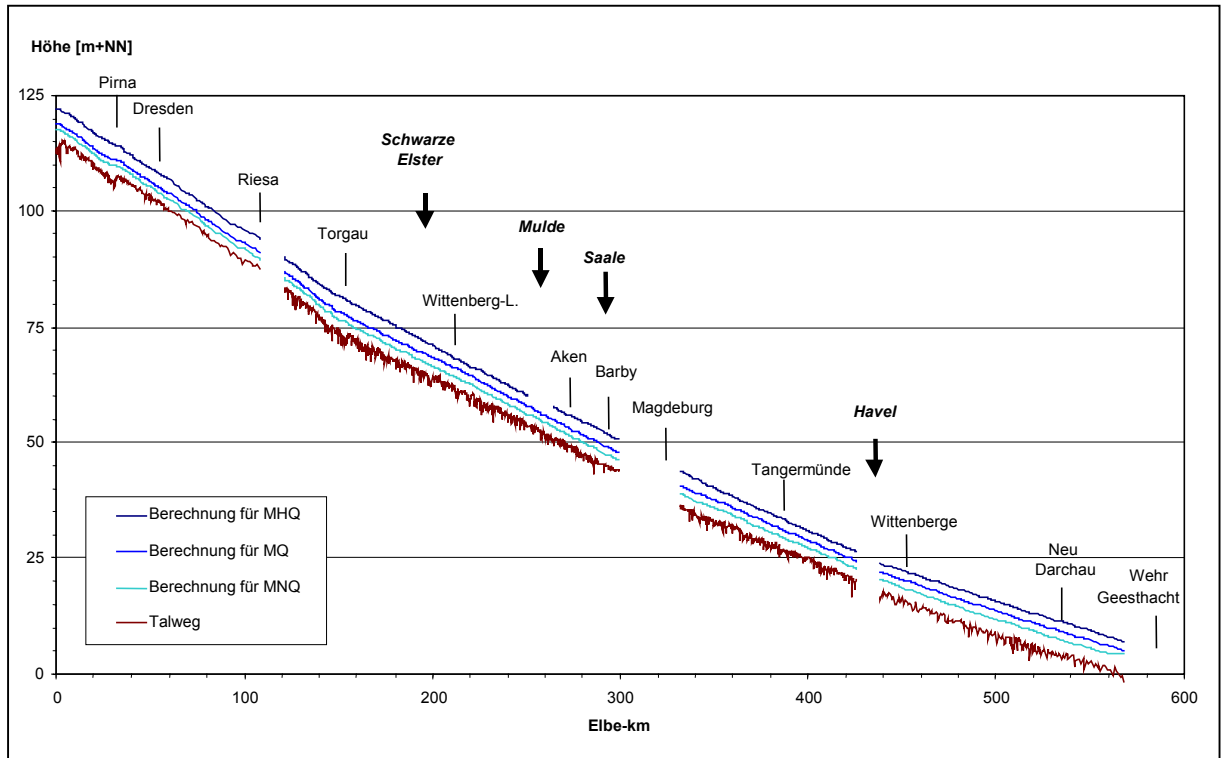


Abb. III-2.10 Die Elbe im Längsschnitt mit Wasserspiegellagen für mittlere Zustände (hier: MNQ, MQ, MHQ) und Talwegshöhe.

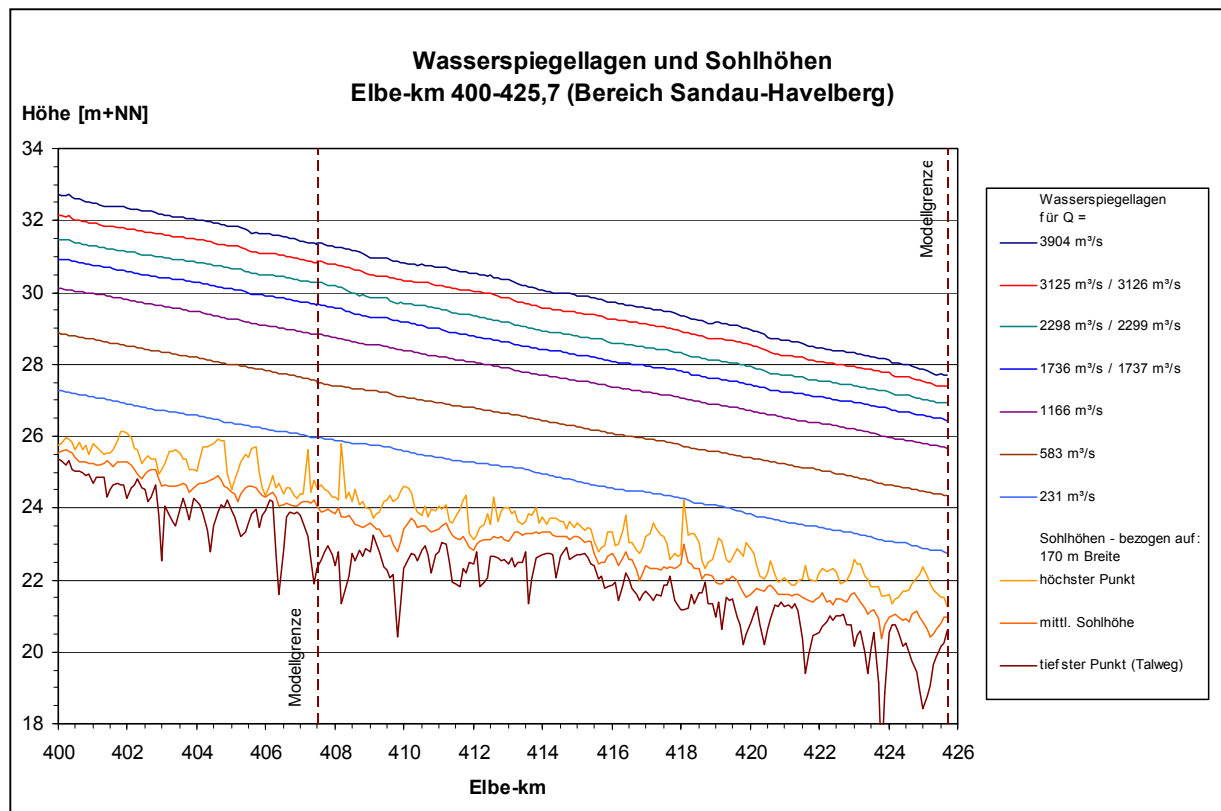


Abb. III-2.11 Wasserspiegellagen und Sohlhöhen im Längsschnitt (Beispiel km 400-425,7) mit Kennzeichnung der Modellgrenzen; analoge Längsschnitte von weiteren (20) Teilstrecken sind der Anlagen-CD zu entnehmen.

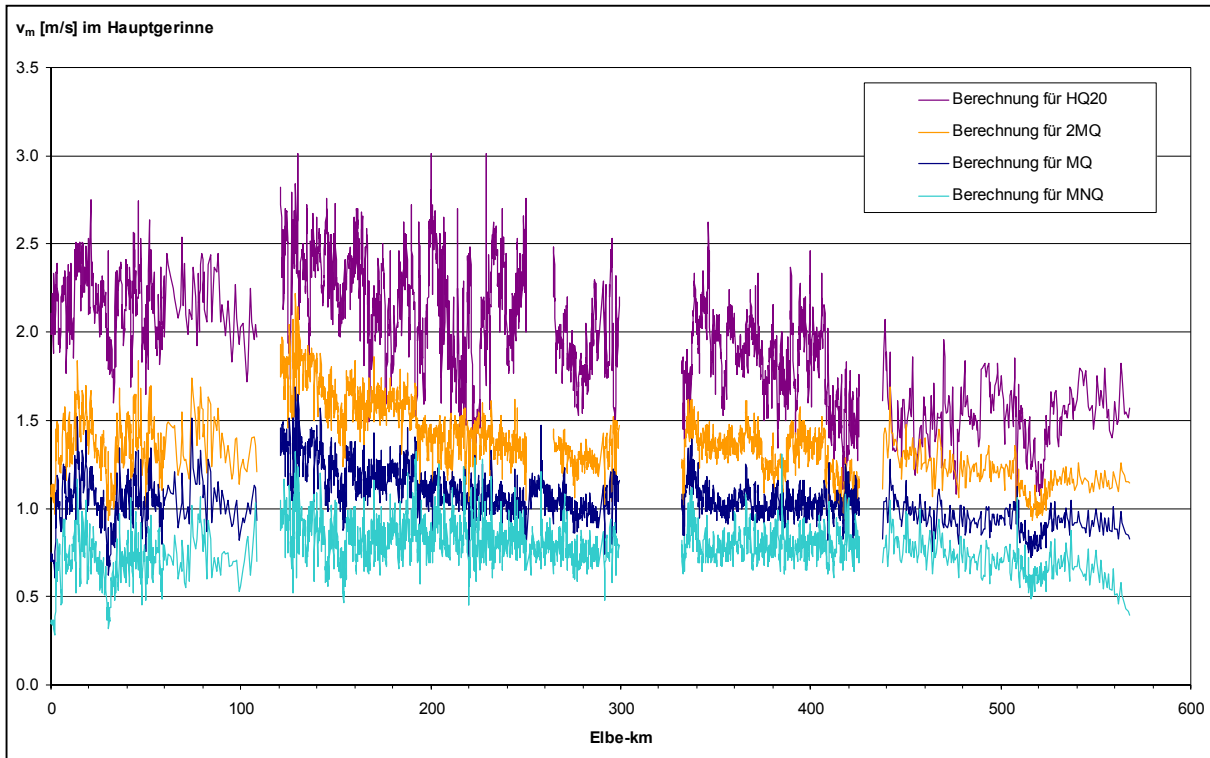


Abb. III-2.12 Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Flusshauptschlauch im Längsschnitt der Elbe.

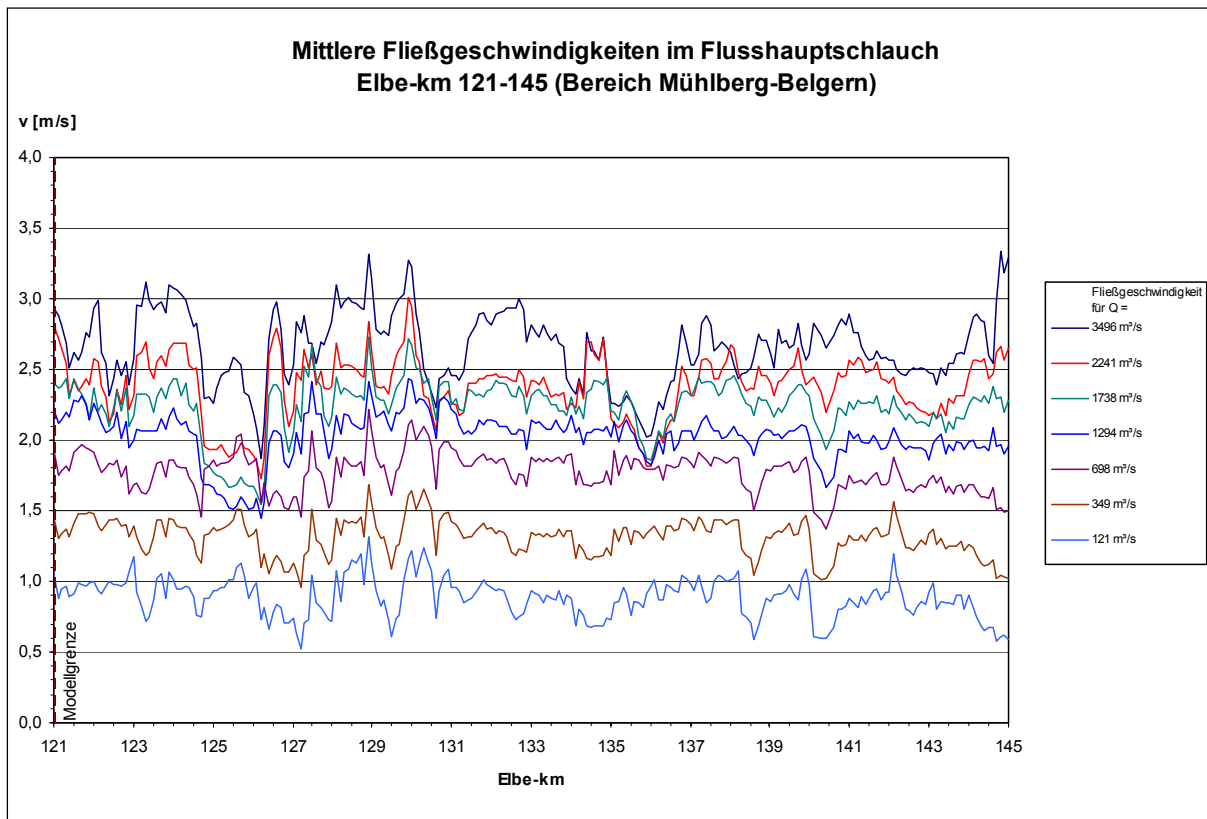


Abb. III-2.13 Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Flusshauptschlauch (Beispiel km 121-145); siehe auch Detaildarstellungen in der *Anlagen-CD*.



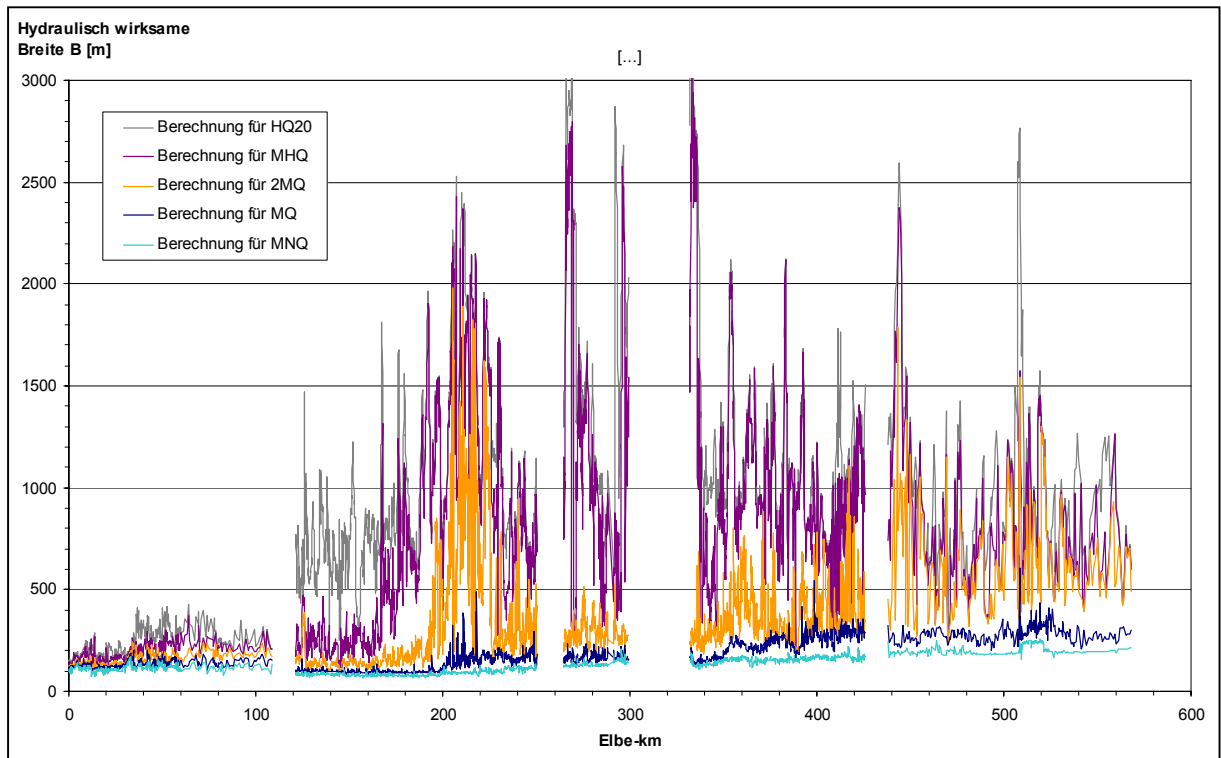


Abb. III-2.14 Hydraulisch wirksame (durchströmte) Breiten im Längsschnitt  
siehe auch Detaildarstellungen in der *Anlagen-CD*.

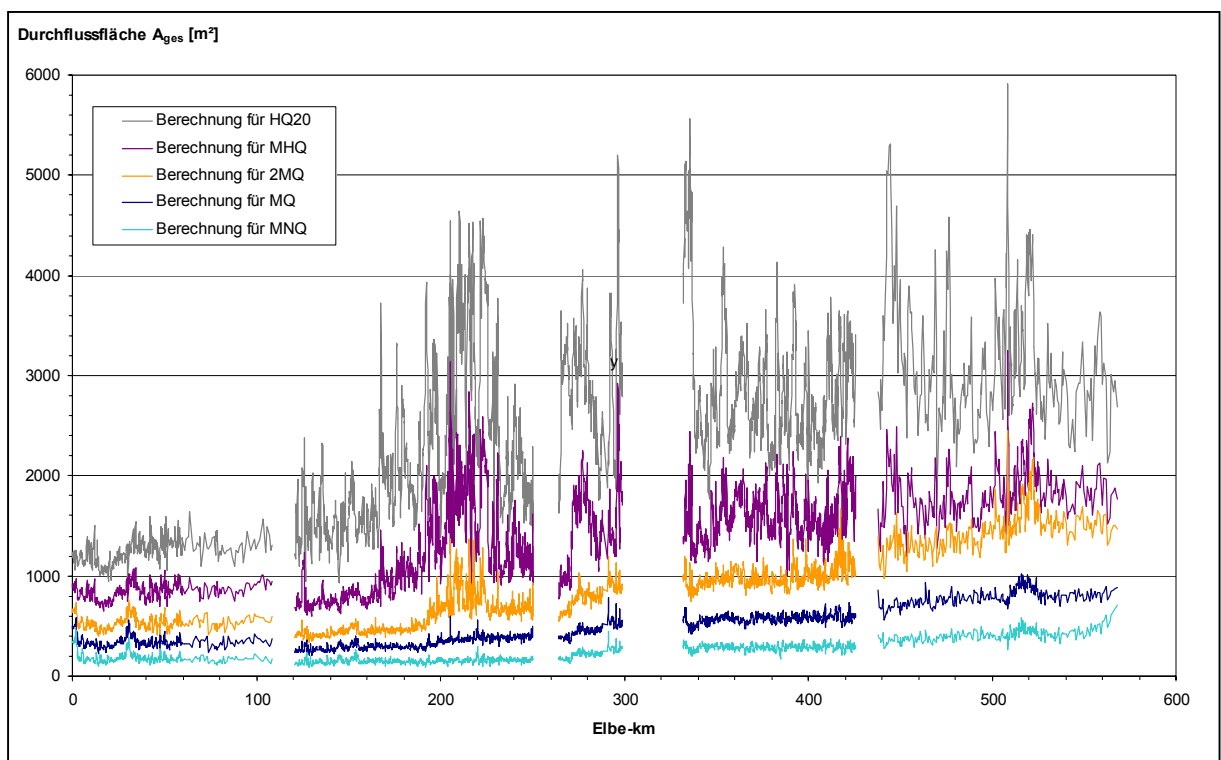


Abb. III-2.15 Wirksame Fließquerschnitte (Summe Fluss/Vorland) im Längsschnitt;  
siehe auch Detaildarstellungen in der *Anlagen-CD*.

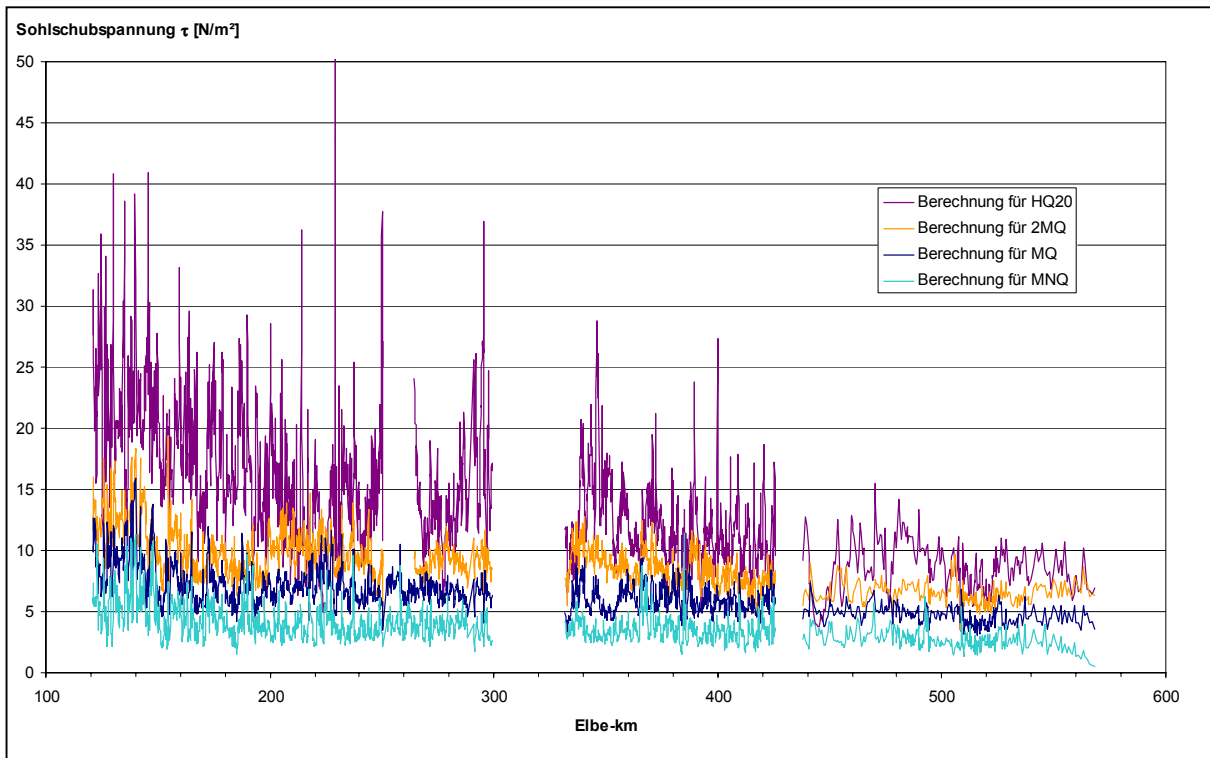


Abb. III-2.16 Wirksame Sohlschubspannungen im Längsschnitt; siehe auch Detaildarstellungen in der *Anlagen-CD*.

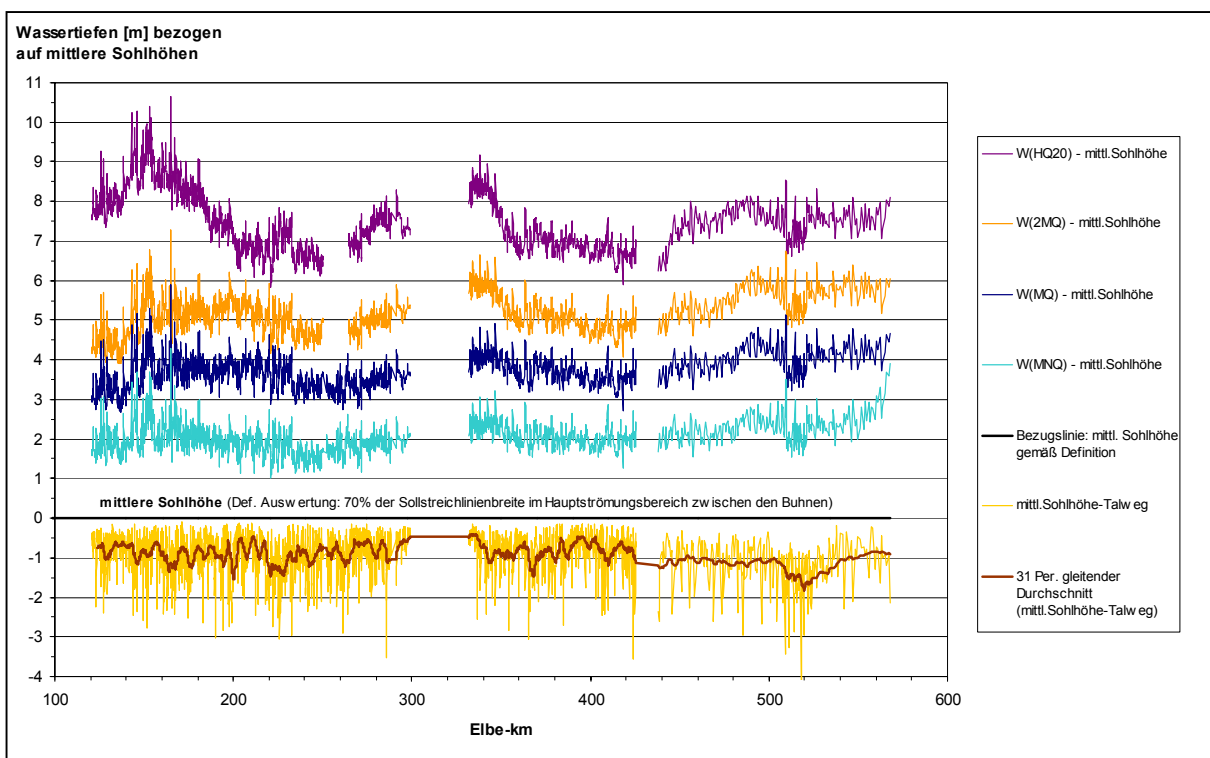


Abb. III-2.17 Mittlere und maximale Fließtiefen im Längsschnitt (Differenz Wasserspiegel – mittlere Sohlhöhe bzw. Talweg).

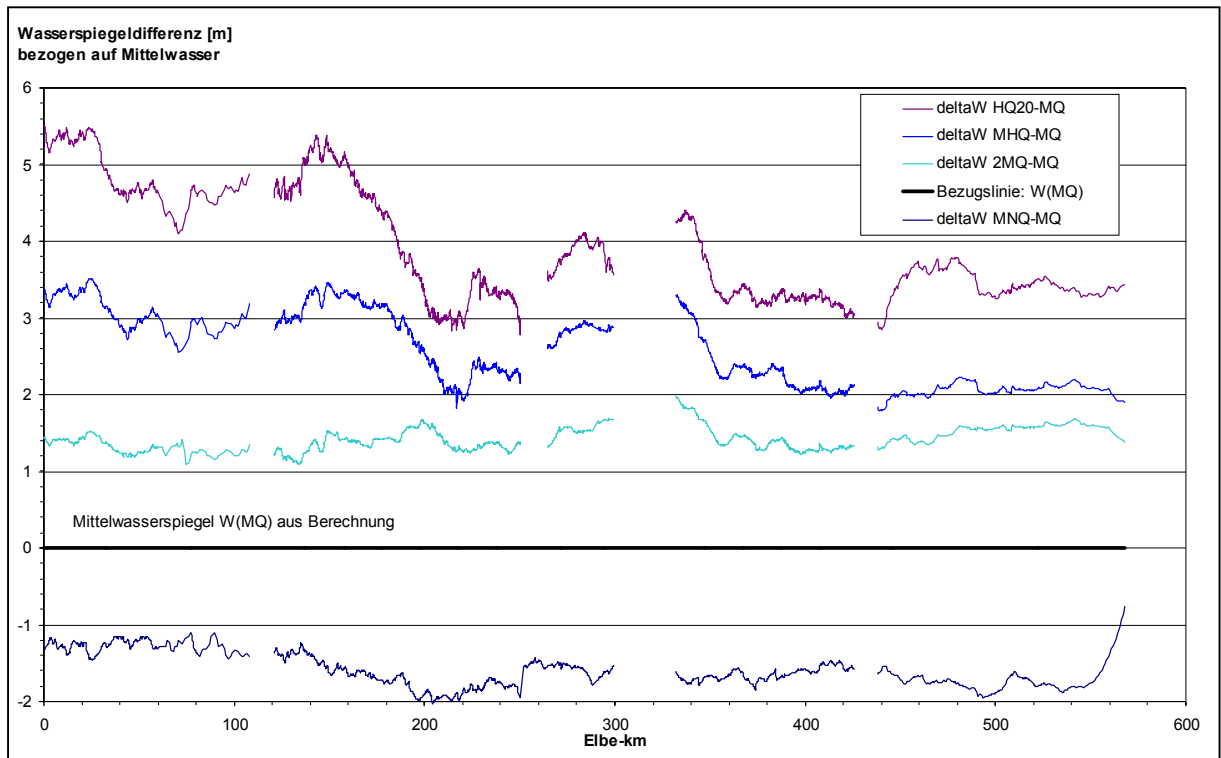


Abb. III-2.18 Wasserstandsunterschiede bezogen auf Mittelwasserniveau im Längsschnitt.

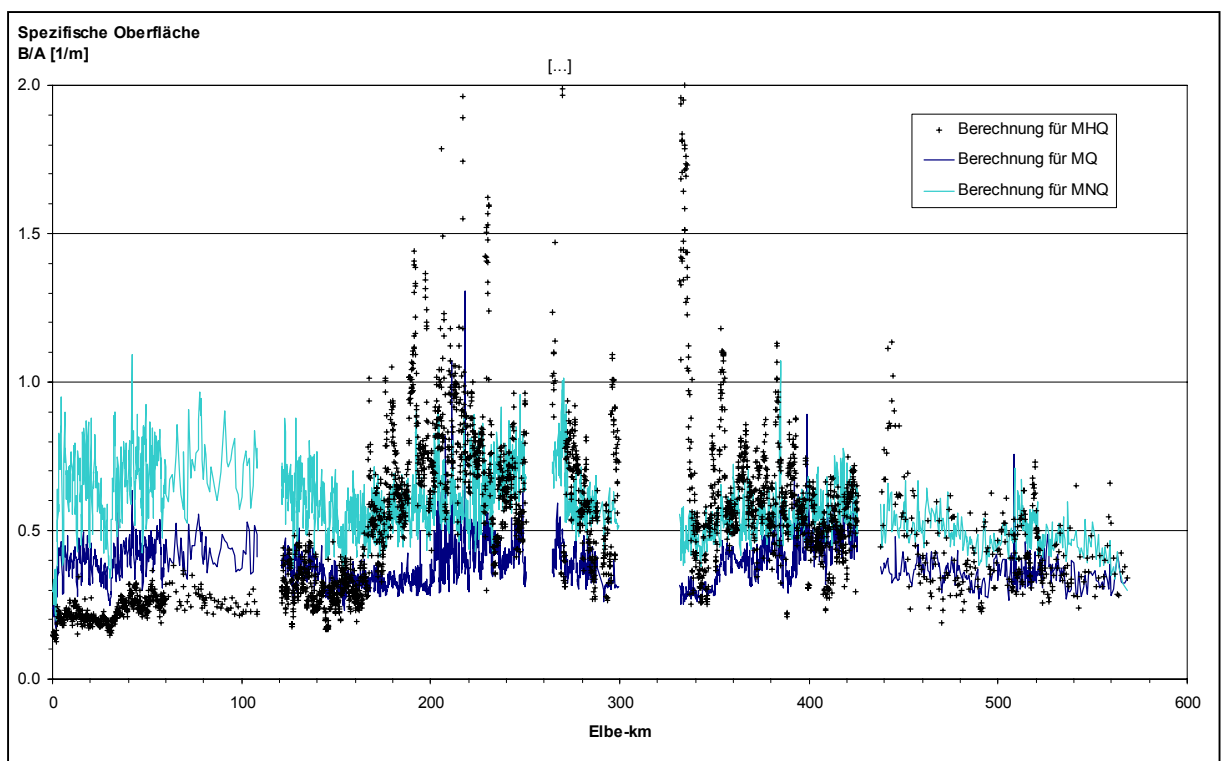


Abb. III-2.19 Spezifische Oberfläche des abflusswirksamen Wasserkörpers (= Verhältnis Oberfläche/Volumen, hier Näherung: Breite/Querschnittsfläche).

### III-2.6 Verallgemeinernde Darstellungen von Einzelparametern

Über die Längsschnitte zur Darstellung der räumlichen Entwicklung der Parameter hinaus erscheint es naheliegend, ihre Variation über die Abflusszustände lokal an einzelnen Gewässerstellen (d.h. am Stromkilometer) oder regional in Teilstrecken aufzuzeigen. Neben dem Vergleich von Teilstrecken ermöglicht dies auch die Ableitung von Zwischengrößen für nicht berechnete Zustände.

#### Darstellungen am Stromkilometer

Mittels der Software der *Anlagen-CD* stehen die wichtigsten Parameter wie Wasserspiegel, Fließgeschwindigkeit, etc. als Funktion des Abflusses im Abstand von 500 m zur Verfügung (vgl. Tab. III-2.5). Beispielhaft zeigt Abb. III-2.20 einige abflussabhängige Geschwindigkeitsverläufe an einzelnen Kilometern. Durch Vergleich der Fließgeschwindigkeiten im Hauptgerinne ( $v_{mi}$ ) sowie des Gesamtabflusses ( $v_{ges} = Q/A_{ges}$ ), d.h. unter Einbezug der Abflussanteile im Vorland bei Hochwasser, lassen sich u.a. Aussagen zur lokalen Ausuferung ableiten.

#### Statistik in Teilstrecken

Unter Beachtung der wesentlichen morphologisch bedingten Änderungen im Längsverlauf wurden für die abflussabhängigen Größen Fließgeschwindigkeit und maximale Fließtiefe ( $h_{max}(Q) = \text{Wasserstand}(Q) - \text{Talwegshöhe}$ ) abschnittsweise statistische Kenngrößen ermittelt. Ziel ist die Beschreibung typischer Werte und ihrer Variabilität im Hinblick auf den Vergleich von Teilabschnitten. Abb. III-2.21 und Abb. III-2.22 zeigen die Ergebnisse der Statistik, wobei zwecks besserer Vergleichbarkeit die zugehörigen Abflüsse der HN-Berechnung in Bezug zum MQ-Wert gesetzt wurden. Die gewählte logarithmische Darstellung trägt ferner zu einer Entzerrung und Linearisierung der Verläufe und somit zu einer verbesserten Visualisierung der Charakteristika bei.

Die Aussagen im vorigen Abschnitt zu einzelnen Strecken lassen sich somit statistisch unterstreichen bzw. differenzieren. So sei z.B. auf die (relativ betrachtet) größten auftretenden Geschwindigkeiten in der Erosionstrecke (hier: km 120-154 und 155-190) und kleinsten in der Reststrecke (km 508-523) verwiesen, bei annähernd gleichbleibender Variabilität (ausgedrückt durch die Standardabweichung).

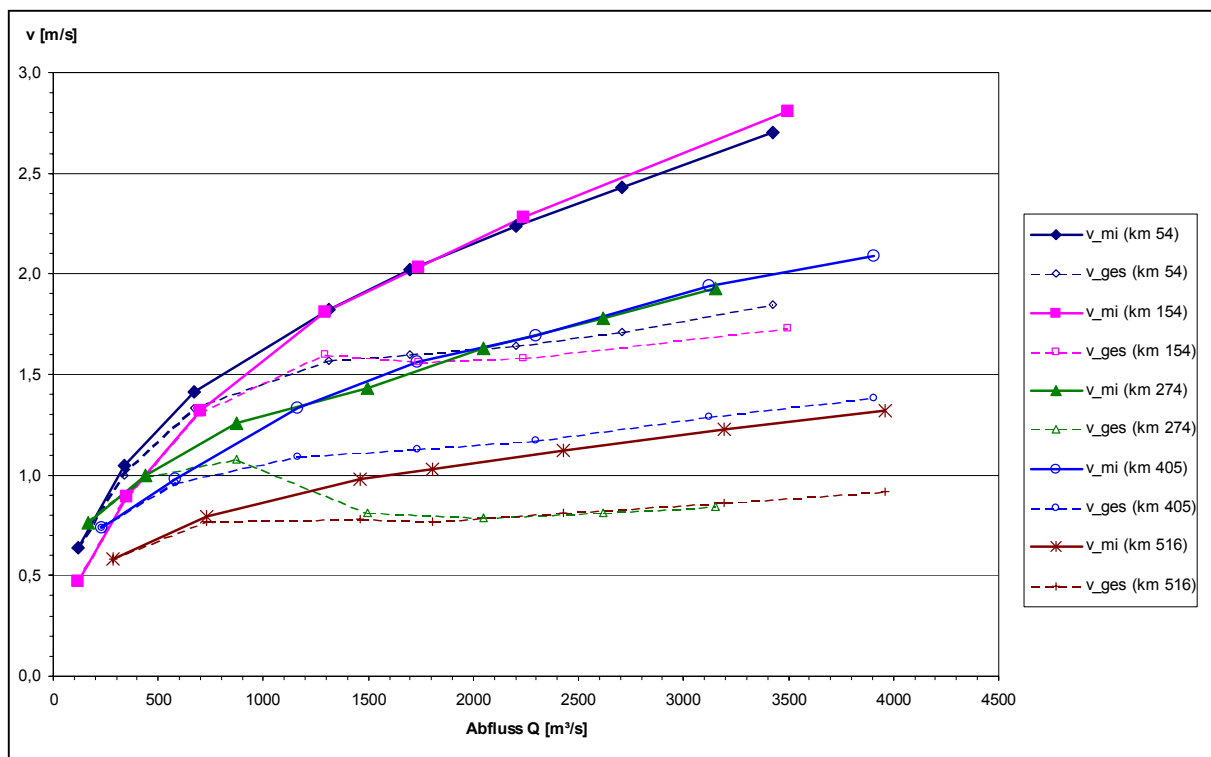
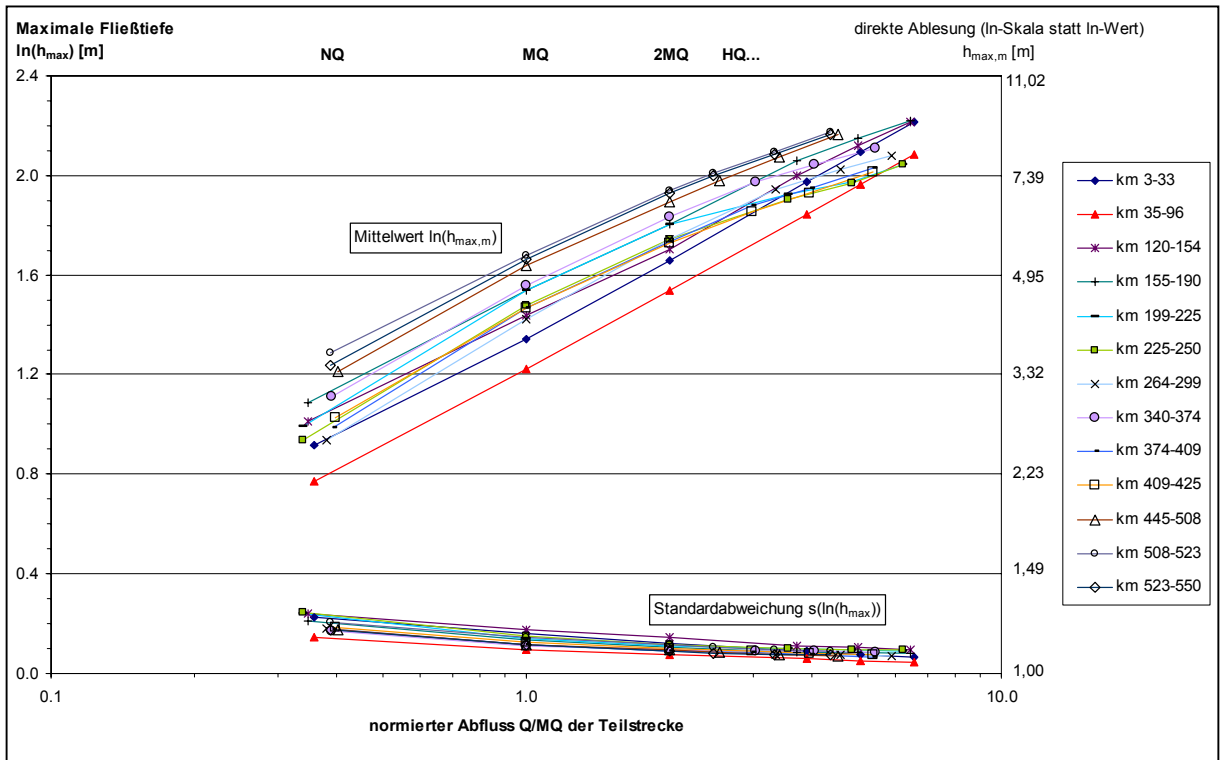
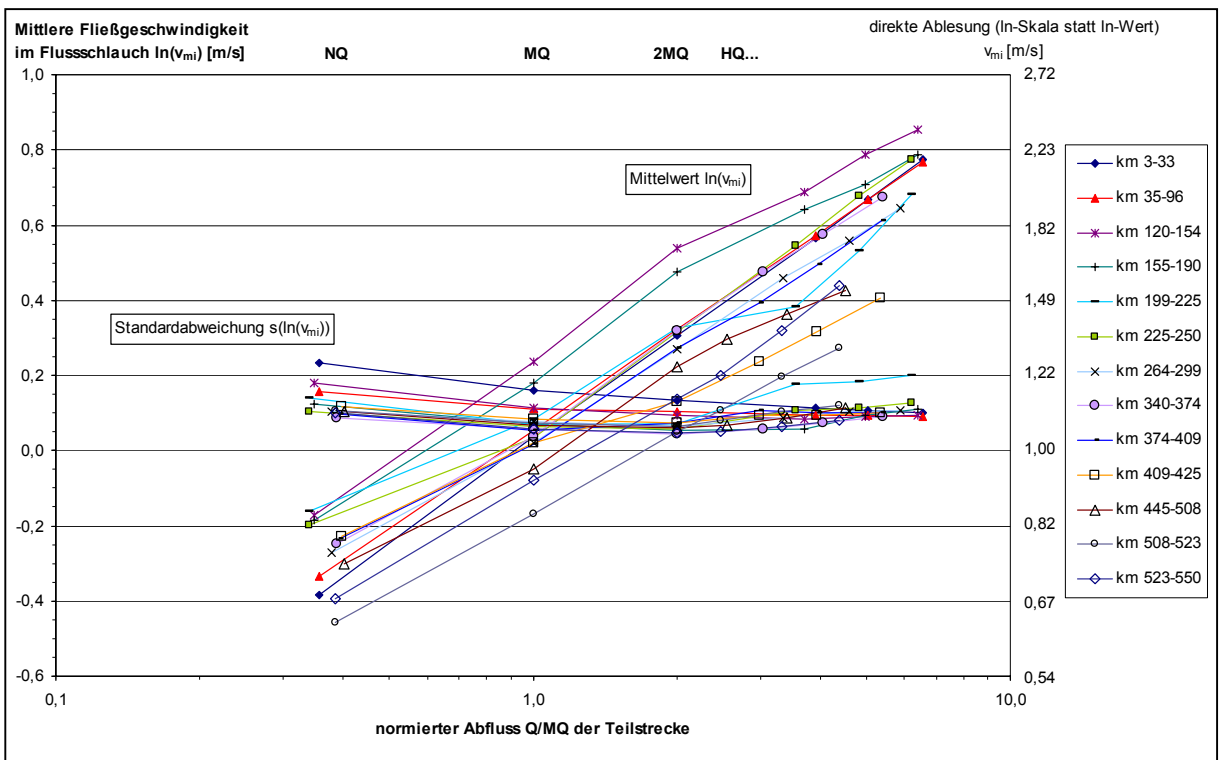


Abb. III-2.20

Beispiel: Fließgeschwindigkeiten als Funktion des Abflusses für einzelne Kilometer; analoge Darstellungen für Einzelparameter ( $W$ ,  $v$ ,  $A$ , etc.) im Abstand von 500 m: siehe *Anlagen-CD*.



**Abb. III-2.21** Mittelwerte und Standardabweichung der maximalen Fließtiefe in Teilstrecken (Differenz Höhen  $W(Q)$ -Talweg), Anm.: zur besseren Vergleichbarkeit Darstellung mit a) Normierung auf MQ (der Teilstrecke) und b) Logarithmierung.



**Abb. III-2.22** Mittelwerte und Standardabweichung der mittleren Fließgeschwindigkeit im Flussschlauch in Teilstrecken Anm.: zur besseren Vergleichbarkeit Darstellung mit a) Normierung auf MQ (der Teilstrecke) und b) Logarithmierung.

### III-2.7 Fazit der Projektbearbeitung

Aufgrund der Größe des Untersuchungsgebietes von ca. 585 km Fließstrecke und der heterogenen Datelage lassen sich aussagekräftige hydraulische, und darauf aufbauend sedimentologische Berechnungen der Wasserspiegellagen im Ist-Zustand sowie des Feststofftransportes nur über eindimensionale (1D) Betrachtungen realisieren.

In enger Zusammenarbeit mit den Bundesanstalten für Wasserbau und Gewässerkunde (BAW, BfG), die seit geraumer Zeit mit detaillierten Untersuchungen der bekannten Problemstrecken (z.B. Erosionsstrecke, Reststrecke) betraut sind, wurden im Vorhaben vorrangig die modelltechnisch bisher nicht näher untersuchten Elbeabschnitte bearbeitet und größere Lücken im hydraulischen Gesamtbild geschlossen. Zur vereinfachten Weiternutzung nach Projektabschluss wurden Software und Datenstandards kompatibel gehalten.

Im vorgegebenen zeitlichen Rahmen konnte das vorhandene Datenmaterial weitestgehend genutzt bzw. ergänzt werden und hydronumerische und sedimentologische Modelle in größtmöglicher Genauigkeit erstellt werden. Neben der hydraulischen Aufbereitung der Geometrie und Festlegung der Modellrandbedingungen stand dabei die Eichung mittels in der Natur aufgenommenen Wasserspiegelfixierungen im Vordergrund. Dabei ist festzuhalten, dass Fixierungen des Wasserspiegels nicht in allen Abschnitten der Elbe über das gesamte Abflussspektrum vorhanden sind (i.d.R. fehlen Hochwasserfixierungen). In wenigen kurzen Teilabschnitten erwies sich eine Modellierung aufgrund fehlender (aktueller) Daten oder besonderer Randprobleme als zu aufwendig. In Verbindung mit den hydraulischen Modellen wurden Sedimenttransportmodelle aufgebaut und geeicht. Die Eichung der quasistationären Modelle erfolgte u.a. anhand von Naturdaten der Geschiebe- und Schwebstoffmessungen der BfG aus den 90-er Jahren sowie durch Nachbildung der bekannten Sohlveränderungen infolge der hydrologischen Belastung (Abflusszeitreihen) der letzten Jahrzehnte. Zur weiteren Optimierung der Rechengenauigkeit der Modelle ist eine größere Anzahl an Naturmessungen erforderlich.

Im Ergebnis liefern die im Vorhaben erstellten Berechnungsmodelle hydraulische und sedimentologische Strömungsparameter wie mittlere Wasserstände, Geschwindigkeiten, Sohl Schubspannungen,

Feststofffrachten etc., und können im Hinblick auf wasserbauliche und ökologische Fragestellungen (Szenarien, mögliche Planungsvarianten) weiter aufbereitet werden. Über die Variation von Rauheitsbeiwerten kann z.B. die Entwicklung von Auwald simuliert oder über eine veränderte Geometrie die Auswirkungen von wasserbaulichen Maßnahmen im Fluss oder Vorland erfasst werden. Mit den Sedimenttransportmodellen lassen sich darüber hinaus die möglichen Auswirkungen auf den Sedimenttransport prognostizieren und Erosions- und Akkumulationsstrecken ausweisen. Durch Anwendung der Modelle können u.a. jene Teilabschnitte der Elbe eingegrenzt werden, in denen sich für Spezialfragen ein Untersuchungsbedarf mit erhöhtem technischen Aufwand erwarten lässt (z.B. komplexere Modelltechniken bei verbesserter Datengrundlage).

Durch systematische Umsetzung hydrologisch vergleichbarer Zustände in hydraulisch-morphologische Parameter in allen Modellstrecken, d.h. durch einheitliche Anwendung der verfügbaren 12 Modelle des Vorhabens und der Bundesanstalten, kann im hier vorgestellten Ergebnis ein (bisher nicht vorhandenes, plausibles) Gesamtbild entlang der deutschen Binnenelbe gezeichnet werden. Diese Beschreibung des Ist-Zustands führt zur Möglichkeit der Klassifizierung einzelner Parameter und ihrer Variabilitäten im Längsverlauf, bis hin zu einem differenzierten (hydraulisch-morphologischen) Vergleich von Teilstrecken.

Die Nutzung des erarbeiteten Ergebnisdatensatzes für weitergehende Zwecke wird ermöglicht durch räumlich hoch aufgelöste Darstellungen, die durch einfache Recherche- und Druckmöglichkeiten der *Anlagen-CD* zu entnehmen sind.

#### Danksagung

Die Autoren danken hiermit den zuständigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Behörden der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung für ihre tatkräftige und vielfache Unterstützung des Vorhabens, insbesondere die Bereitstellung von Datenmaterial und die Bearbeitung diverser Zusatzanfragen, ohne die das Projektergebnis in der vorliegenden Form nicht hätte zustande gekommen können.

**Literatur**

- ADAM, K.; RATHKE, K.; MEON, G. (1999a): Teilprojekt I.3 „1D-Berechnung der Wasserspiegellagen und des Feststofftransports“ – Abschlussbericht der Grundbewilligungsphase (bis September 1999). Verbundprojekt „Morphodynamik der Elbe“ (BMBF-FKZ 0339566), Höxter/Karlsruhe, unveröff.
- ADAM, K., MEON, G., RATHKE, K. (1999b): 1) Eindimensionale Strömungs- und Feststofftransport-Berechnungen der Elbe. / 2) Übersicht der 1D-Berechnungen (Wasserspiegellagen und Feststofftransport) an der Elbe. / 3) Möglichkeiten und Grenzen der 1D-Berechnungen in einem Abschnitt an der mittleren Elbe (Biosphärenreservat). In: [Hrsg. UNIVERSITÄT KARLSRUHE] (1999): Fachtagung Elbe – Dynamik und Interaktion in Fluß und Aue. Wittenberge 4.-7.5.1999, Tagungsband, Universität Karlsruhe, S. 68-75
- ALEXY, M. (2000): Feststofftransportmodell für die gesamte Erosionsstrecke der Elbe (km 121,2-235,6). Teilbericht im Forschungsprojekt „Maßnahmen im Elbevorland“ (BMBF-FKZ 0339575), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, unveröffentlicht
- BAW [BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU] (2000): Untersuchung der Auswirkung von Maßnahmen im Elbevorland auf die Strömungssituation und die Flussmorphologie am Beispiel der Erosionsstrecke und der Rückdeichungsbereiche zwischen Wittenberge und Lenzen - Schlussbericht. BMBF-Forschungsprojekt Förderkennzeichen 0339575, Karlsruhe
- BFG [BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE] (1994): Kornzusammensetzung der Elbesohle von der tschechisch-deutschen Grenze bis zur Staustufe Geesthacht. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Gutachten Bundesanstalt für Gewässerkunde 0834, Berlin, 1994
- BUSCH N. (2000): Kurzbericht zur Modellerstellung. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, vgl. Anlagen-CD.
- BÜCHELE, B.; NESTMANN, F. (2000): Ergebnisse des Verbundvorhabens „Morphodynamik der Elbe“. In: GELLER ET AL. [Hrsg. ATV-DVWK] (2000): Gewässerlandschaften – Aquatic Landscapes. Tagungsband Teil I, BMBF-Symposium Elbeforschung. ATV-DVWK-Schriftenreihe 21, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, S. 203-228
- DVWK (1988): Feststofftransport in Fließgewässern – Berechnungsverfahren für die Ingenieurpraxis. Hrsg. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., DVWK-Schriften 87, Verlag Paul Parey, Hamburg-Berlin
- DVWK (1990): Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten. Hrsg. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., DVWK-Schriften 92, Verlag Paul Parey, Hamburg-Berlin
- DVWK (1991): Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. Hrsg. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., DVWK-Merkblätter 220, Verlag Paul Parey, Hamburg-Berlin
- FAULHABER, P. (1998): Entwicklung der Wasserspiegel- und Sohlhöhen in der deutschen Binnenelbe innerhalb der letzten 100 Jahre – einhundert Jahre „Elbestromwerk“. In: GELLER ET AL. [Hrsg. UFZ] (1998): Gewässerschutz im Einzugsgebiet der Elbe – 8. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Teubner Stuttgart-Leipzig, S. 217-220
- FAULHABER, P. (2000a): Untersuchung der Auswirkung von Maßnahmen im Elbevorland auf die Strömungssituation und die Flussmorphologie. In: GELLER ET AL. [Hrsg. ATV-DVWK] (2000): Gewässerlandschaften – Aquatic Landscapes. Tagungsband Teil I, BMBF-Symposium Elbeforschung. ATV-DVWK-Schriftenreihe 21, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, S. 297-320
- FAULHABER, P. (2000b): Veränderung von hydraulischen Parametern der Elbe in den letzten 100 Jahren. In: BAW [Hrsg.] (2000): Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 82, Karlsruhe, S. 97-118
- HEC (1982): Water Surface Profiles (HEC-2), User's Manuals. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers
- HEC (1993): Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs (HEC-6), User's Manuals. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers
- IKSE [INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DER ELBE] (1994): Ökologische Studie zum Schutz und zur Gestaltung der Gewässerstrukturen und der Uferandregionen der Elbe. Magdeburg
- OTTE-WITTE, K.; RATHKE, K.; MEON, G. (2001): Teilprojekt I.3 „1D-Berechnung der Wasserspiegellagen und des Feststofftransports“ – Abschlussbericht der Verlängerungsphase (bis Dezember 2000). Verbundprojekt „Morphodynamik der Elbe“ (BMBF-FKZ 0339566), Höxter/Karlsruhe, unveröff.
- RATHKE, K. (1998): Entwicklung des Programms HYSEMO32 an der Universität-Gesamthochschule Paderborn, Abteilung Höxter, Fachbereich 8 – Technischer Umweltschutz
- SCHMIDT, A.; DRÖGE, B. (1999): Feststofftransport in der Elbe. In: [Hrsg. UNIVERSITÄT KARLSRUHE] (1999): Fachtagung Elbe – Dynamik und Interaktion in Fluß und Aue. Wittenberge 4.-7.5.1999, Tagungsband, Universität Karlsruhe, S. 57-60
- VERBUNDPROJEKTANTRAG (1996): Forschungsantrag des Verbundvorhabens „Morphodynamik der Elbe“ (BMBF-Förderkennzeichen 0339566), Universität Karlsruhe.

**Ökologischer Einschub – Strömung***S. Kiene*

Strömungskräfte wirken sowohl direkt als auch indirekt über die Struktur und Beweglichkeit der Substrate auf die Besiedlung des Gewässers. Hinsichtlich der Besiedlungsmöglichkeiten der Fließgewässer durch das Makrozoobenthos sind vor allem die Strömungsverhältnisse am Gewässergrund wesentlich. Diese sind durch Turbulenzen, Grenzschichtausbildung und unterschiedliche Rauheiten äußerst komplex und schwer messbar. Die Fließgeschwindigkeit wirkt indirekt auch über die kleinräumige Korngrößenverteilung, den Sauerstoffgehalt des Interstitialwassers, die Summe des abgelagerten Detritus und über das Wachstum des Periphytons (Aufwuchs). Fließgeschwindigkeit und Partikelgröße zusammen sind für die Stabilität des Sediments bedeutend.

Benthosorganismen haben verschiedene Anpassungsmechanismen an die Strömung entwickelt. Intensive Untersuchungen zu Strömungspräferenzen von Makrozoobenthosorganismen wurden von SCHMEDITJE (1995) unter Anwendung der FST-Halbkugelmethode nach STATZNER & MÜLLER (1989) durchgeführt. Die sohlnahe Strömung zeigte sich hierbei als verteilungsbestimmende Größe.

Allerdings setzen sich viele Organismen nicht direkt der Strömung aus. Nach ULFSTRAND (1967) wird der direkte Einfluss der Strömung auf die Organismen oft überschätzt, meist ist die Verteilung auch durch Nahrungspräferenzen und Sauerstoffbedarf bedingt. Trotzdem bleibt die Kenntnis der zeitlichen und räumlichen Variabilitäten der Strömung eine wichtige Voraussetzung für alle biologischen Projekte, die sich mit Organismen im Flussschlauch, besonders mit Fischen oder Makrozoobenthos, auseinandersetzen. Im Projekt erfolgte, aufgrund der verfügbaren Messtechnik, keine Fließgeschwindigkeitsmessung im Bereich kleiner als fünf Zentimeter über der Sohle.

*Literatur*

- SCHMEDITJE, U. (1995): Ökologische Grundlagen für die Beurteilung von Ausleitungsstrecken. Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 25, München.
- STATZNER, B., MÜLLER, R. (1989): Standard hemispheres as indicators of flow characteristics in lotic benthos research – *Freshwater Biology* 21, 445-459.
- ULFSTRAND, S. (1967): Microdistribution of benthic species (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Diptera, Simuliidae) in Lapland streams. *Oikos* 18, S. 293-310.



### III-3 Wirksamkeit von Deichrückverlegungsmaßnahmen auf die Abflussverhältnisse entlang der Elbe

U. Merkel, M. Helms, B. Büchele, J. Ihringer, F. Nestmann

#### III-3.1 Einführung

Zur Verbesserung der Verhältnisse der Auenökologie und des Hochwasserschutzes entlang der Mittleren Elbe sind zahlreiche Standorte in der Diskussion, an denen durch Rückverlegung der Deichlinie zusätzliches Überschwemmungsgebiet geschaffen werden könnte. So liefern z.B. NEUSCHULZ & PURPS (2000) eine Übersicht über 52 mögliche Flächen mit einer Summe von 23 249 ha (davon 11 Sommerpolder). Ähnliche Bestrebungen sind z.B. auch vom Rhein bekannt, wobei die Umsetzung der dortigen Maßnahmen, nicht zuletzt auch aufgrund der Erfahrungen der Hochwasser von 1993 und 1995, in verschiedenen fach- und landerübergreifenden Programmen gebündelt wird.

Bezüglich der Wirksamkeit von Rückhaltemaßnahmen auf die Abflüsse entlang der Elbe gibt es bisher wenig Informationen. Deshalb wurde über eine hydrologische Modellierung des Gewässerlaufs der deutschen Elbe eine systematische Untersuchung der Retentionswirkung von Einzelstandorten und insbesondere auch von ausgewählten Kombinationen von Standorten durchgeführt, wobei deren großräumige Gesamtwirkung im Vordergrund steht. Im Hinblick auf den Hochwasserschutz ist hierbei der Betriebsweise der Maßnahmen (gesteuerte/ungesteuerte Flutung) eine entscheidende Bedeutung beizumessen. Die Wirksamkeit von Deichrückverlegungsmaßnahmen (DRV) kann an den jeweiligen Standorten und entlang des Unterlaufs der Elbe dargestellt werden.

Die Untersuchung ist Bestandteil der hydrologischen Arbeiten (TP I.4) im Verbundprojekt und wurde, aufbauend auf dessen Daten- und Modellgrundlagen, in der Projektverlängerung (Jahr 2000) durchgeführt.

#### III-3.2 Zielstellung

Kernziel der Untersuchungen ist es, mit Hilfe der Weiterentwicklung *hydrologischer* Modellansätze bzw. der Integration vorliegender Daten und Modellkomponenten zu einem Gesamtmodell „Wellenablauf entlang der deutschen Binnenelbe mit optio-

nen Retentionswirkungen“ die *Wirksamkeit* von Einzelstandorten und Maßnahmen-Kombinationen auf das *überörtliche Abflussgeschehen*, d.h. im Längsschnitt der Elbe, zu erfassen.

Im Vordergrund des Interesses steht die *Gesamtbetrachtung* der erreichbaren Retentionswirkung durch potentielle Maßnahmen im Flusssystem, einschließlich Aussagen zur Wirkung mit gesteuertem Betrieb, z.B. einiger größerer Standorte als sogenannte Flutpolder zur gezielten Kappung des Hochwasserscheitelabflusses. Das bedeutet auf der anderen Seite, dass *lokale Effekte* (wie z.B. das aus einer Rückdeichung sich ergebende hydraulische Strömungsbild zwischen Flussbett und Vorland mit Einfluss auf die Geschwindigkeiten, Wasserspiegel etc.) *hier nicht* betrachtet werden. Vielmehr wird nach dem Prinzip der Seeretention eine Volumenbilanzierung im zeitlichen und räumlichen Ablauf von Hochwasserwellen vorgenommen. Im Ergebnis werden die potentiell erzielbaren Retentionswirkungen unter Annahme verschiedener Varianten anhand von Längsschnitten der Hochwasserkennwerte (Scheitelabflüsse) im Vergleich zum Ist-Zustand dargestellt.

#### III-3.3 Datengrundlagen und Methodik

Wie in diesem Band dargestellt, wurden im Rahmen des Verbundprojekts "Morphodynamik der Elbe" die wesentlichen Kenngrößen zur Beschreibung der Abflussdynamik der Elbe entsprechend dem heutigen Zustand der Elbe systematisch aufbereitet. Hierzu gehören vor allem die hydrologische Analyse der Pegeldaten mit statistischer Ermittlung von Abflusskennwerten und ihrer Regionalisierung entlang des Gewässerlaufes (HELMS ET AL. (2001): vgl. Kapitel III-1), die hydraulische Berechnung der Wasserspiegellagen entlang der Elbe für ein weites Spektrum von Abflüssen (OTTE-WITTE ET AL. (2001): Kapitel III-2; in Zusammenarbeit mit der Universität-GH Paderborn/ Abteilung Höxter und den Bundesanstalten für Wasserbau (BAW Karlsruhe) sowie für Gewässerkunde (BfG Koblenz)), die

Erstellung digitaler Geländemodelle des Flusses und der Vorländer und die Verschneidung der Wasserstände mit den Geländedaten zur Ermittlung von Überflutungsflächen (BÜCHELE ET AL. (2001): vgl. Kapitel II-3). Die hieraus resultierenden Daten bilden die Grundlage zur Simulation der Wirksamkeit der Deichrückverlegungsmaßnahmen.

Zur Berücksichtigung der Instationarität des Abflussprozesses kommt dabei folgende Methodik zur Anwendung: An den Gewässerlauf der deutschen Elbe wurde ein hydrologisches Wellenablaufmodell angepasst. Die Parameter des Modells entsprechen dabei denen des Modells ELBA der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), vormals erstellt im Auftrag der Wasserwirtschaftsleitung Magdeburg (DDR). Eingabegrößen in das Modell sind gemessene Abflussganglinien des Pegels Dresden und der Pegel der seitlichen Zuflüsse. Der Einfluss der Teileinzugsgebiete zwischen den Pegelstellen wurde in der Untersuchung - sofern zur Erhaltung der

Abflussbilanzen notwendig - über regionalisierte synthetische Ganglinien berücksichtigt.

Grundlage der Modellierung sind beobachtete Hochwasserereignisse aus dem Zeitraum 1936 bis 1995. Aus den hydraulischen Berechnungen und Geländedaten lassen sich die charakteristischen Kennlinien zur Modellierung des Retentionsverhaltens der Deichrückverlegungsstandorte ableiten. Über eine zeitschrittweise Bilanzierung der Zu- und Abflüsse unter Berücksichtigung der Speicherwirkung der Retentionsfläche (Seeretentionsverfahren) kann der zeitliche Verlauf der Füllung und Entleerung des Retentionsraums und damit die "ungesteuerte" Auswirkung des jeweiligen Standorts auf die Abflussganglinie entlang der Elbe simuliert werden. Bei einem „gesteuerten“ Einsatz der Retentionsräume wird jeder Standort wie ein Hochwasserpolder so geflutet, dass eine optimale Reduzierung des Abflussscheitelwerts erreicht wird. Hierzu sind jedoch geeignete Steuerungseinrichtungen vorzusehen, die ereignisabhängig zu betreiben sind.

Tab. III-3.1 Modellknoten und ihre Bezeichnungen entlang der Elbe.

Nr.	Bezeichnung	Nr.	Bezeichnung	Nr.	Bezeichnung
1	<b>Pegel Dresden</b>	27	Vockerode	53	Sandau Süd/ Sandau Nord
2	Meissen	28	Sarenbruch – Klieken	54	Untere Havel (Fluss/Polder)
3	Zehren	29	Oberluch Roßlau	55	Zufluss Havel
4	Mühlberg	30	Zufluss Mulde	56	Havel Eindeichung
5	Belgern	31	Eindeichungen Mulde	<b>57 Pegel Wittenberge</b>	
<b>6 Pegel Torgau</b>		<b>32 Pegel Aken</b>		58	Karthane Eindeichung
7	Mockritz	33	Breitenhagen – Aken	59	Wahrenberg (rechtselbisch)
8	Prettin-Mauken	34	Breitenhagen – Aken	60	Müggendorf
9	Sachau-Priesitz	35	Zufluss Saale	61	Wahrenberg (linkselbisch)
10	Mauken-Klößen	<b>36 Pegel Barby</b>		62	Schnackenburg
11	Bösewig – Bleddin	37	Monplaisir – Glinde	63	Lütkenwitsch
12	Schützenberg – Gorsdorf	<b>38 Pegel Magdeburg/Strombr.</b>		64	Überleitung Seege/Aland
13	Bleddin – Wartenburg	39	Niegripp	65	Böser Ort/Lenzen
14	Wartenburg – Nord	40	Glindenberg – Heinrichsb.	66	Mödlich
15	Zufluss Schwarze Elster	41	Ohremündung	67	Langendorf
16	Eindeichung Schwarze Elster	42	Zufluss Ohre	68	Löcknitz Eindeichungen
17	Melzig	43	Schartau – Blumenthal	69	Zufluss Elde
18	Dabrun-Boos	44	Havelsche Mark	70	Zufluss Löcknitz
19	Boos	45	Parey	71	Wilkensdorf
<b>20 Pegel Wittenberg</b>		46	Bittkau – Schelldorf	72	Zufluss Jeetzal
21	Seegrehna	47	Klietznick (Bucher Brack)	<b>73 Pegel Neu Darchau</b>	
22	Rehsen – Schönitz	<b>48 Pegel Tangermünde</b>		74	Neu Bleckede
23	Wörlitz – Ost	49	Schönhausen - Schönfeld	75	Boizenburg
24	Wörlitz - West	50	Schönhausen - Schönfeld	76	Lauenburg
25	Buroer Aue	51	Schönhausen - Schönfeld	77	Geesthacht
26	Kliekener Aue	52	Fährkrug Sandau	78	Modellende

### III-3.4 Modellbeschreibung

Zur detaillierten Erfassung des Längsverlaufs der deutschen Elbe wurde das am Institut entwickelte hydrologische Programmsystem *Flussgebietsmodell* (FGM, vgl. IHRINGER 1999) als reines Wellenablaufmodell an das Abflussverhalten der Elbe angepasst. Hierbei wurden wie erwähnt die Parameter des ELBA-Modells der BfG in das FGM integriert, wobei letzteres mit Retentionsmodulen zu koppeln war. Der Elbelauf wurde hierzu mit insgesamt 78 Gewässerknoten vom Pegel Dresden bis zur Wehranlage Geesthacht modelliert. Die Lage der Gewässerknoten orientiert sich im wesentlichen an den Messstellen (v.a. Pegel) entlang der Elbe, an den potentiellen Deichrückverlegungsstandorten, an den Elbezuflüssen sowie an den angrenzenden Städten.

In Tab. III-3.1 sind die Modellknoten mit ihrer Lagebezeichnung aufgelistet. Abb. III-3.1 zeigt einen schematischen Knotenplan.

Die Eingabegrößen des Modells sind beobachtete Abflussganglinien der Elbe am Pegel Dresden (Knoten 1) sowie die dazugehörigen Abflussganglinien der Elbezuflüsse Schwarze Elster am Pegel Löben (Knoten 15), Mulde am Pegel Bad Dübener Heide (Knoten 30) und Saale am Pegel Calbe (Knoten 35).

Der Fließvorgang im Gewässernetz der Elbe wird durch das Translations-Diffusionsmodell ELBA modelliert. ELBA ist als nichtlineares bzw. abschnitts-

weise lineares Stufenmodell mit maximal drei Abflussstufen (Flussbett, Ausuferungsbereich, Hochwasserbereich) konzipiert, deren Teilmodelle durch Superposition überlagerbar sind.

Die Systemfunktion  $h(t)$  des Modells lautet:

$$h(t) = \frac{L}{2 \cdot t \cdot \sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \cdot e^{-\frac{(u \cdot t - x)^2}{4 \cdot D \cdot t}}$$

- mit L: modellierte Fließlänge [km]
- u: Translationskoeffizient [km/h]
- D: Diffusionskoeffizient [km<sup>2</sup>/h]
- t: Zeitschritt [h]

Die Koeffizienten u und D wurden für jeden betrachteten Gewässerabschnitt der Länge L und jede der drei Abflussstufen aus dem Modell ELBA in das FGM übernommen (siehe Tab. III-3.2).

Im Rahmen des FGM konnte das Wellenablaufmodell mit konzeptionellen Speichermodulen zur Simulation der Retentionswirkung gekoppelt werden, wobei die Speichermodule an den Standorten der betrachteten Deichrückverlegungsmaßnahmen positioniert wurden. Der Speicheransatz basiert auf der Lösung einer diskretisierten Kontinuitätsgleichung für Speicherelemente und war bereits im Modellsystem FGM vorhanden (vgl. IHRINGER 1999). Für die Anwendung des Speicheransatzes ist die Kenntnis der Speicherinhaltslinie sowie der Abflusskurve des Auslasses erforderlich.

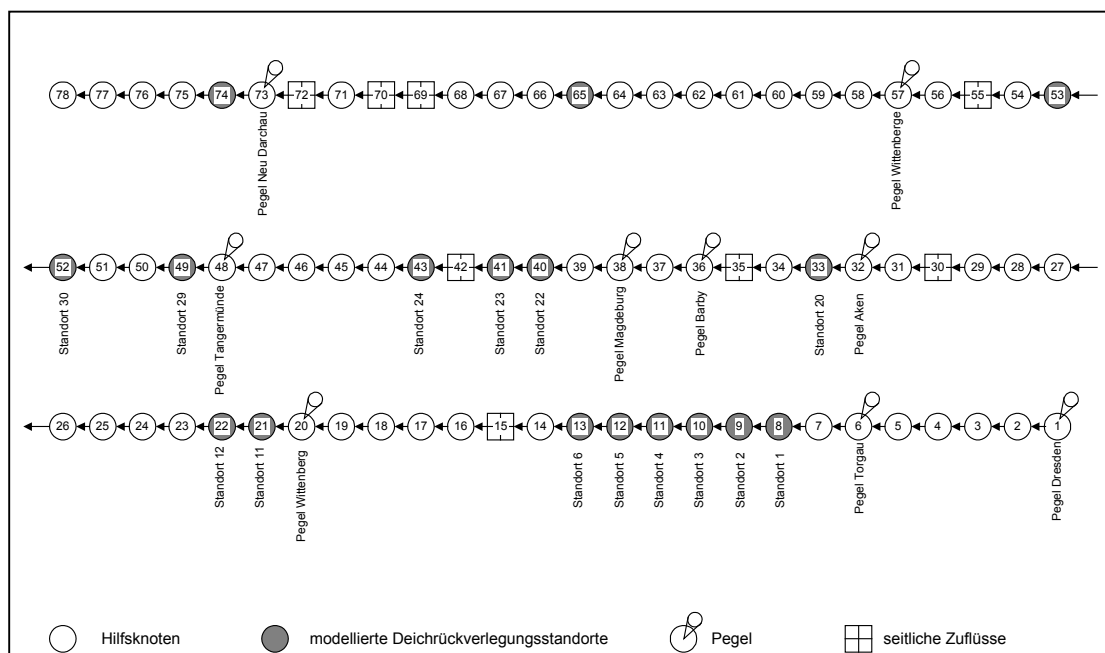


Abb. III-3.1 Schematischer Knotenplan der Elbe.

**Tab. III-3.2** Koeffizienten u und D der Gewässerabschnitte für das ELBA-Modell.

Abschnitt	Länge L [km]	Abflussstufe	Q [m³/s]	D [km²/h]	u [km/h]
Dresden - Torgau	99,0	1	800	67,30	5,56
		2	1600	70,62	5,94
		3	-	82,40	3,27
Torgau - Wittenberg	59,5	1	700	32,11	2,80
		2	1400	14,28	2,19
		3	-	10,30	2,09
Wittenberg - Aken	62,3	1	1000	11,32	3,38
		2	7000	3,50	1,74
		3	-	0,00	0,00
Aken - Barby	18,7	1	1340	8,91	3,34
		2	7000	8,86	2,21
		3	-	0,00	0,00
Barby - Tangermünde	94,8	1	1340	27,90	3,15
		2	2400	33,40	2,22
		3	-	33,10	3,22
Tangermünde - Wittenberge	66,7	1	1290	132,80	2,67
		2	2400	33,20	2,28
		3	-	33,20	2,28
Wittenberge - Geesthacht	80,9	1	1640	64,20	2,56
		2	7000	35,60	2,40
		3	-	0,00	0,00

Zwei Varianten des Retentionsverhaltens des einzelnen Standorts können dann unterschieden werden. Bei der Flutung in der *ungesteuerten Variante* erfolgt die Speicherfüllung mit natürlichem Wasserpegelanstieg nach dem Prinzip der Seerentention. Demgegenüber werden bei der (optimal) *gesteuerten Variante* die Retentionsräume ereignisabhängig zu dem Zeitpunkt geflutet, der die stärkste Dämpfung des Abflussscheitels ermöglicht. Je nach Variante wird die Abflussganglinie des Ereignisses unterschiedlich transformiert und nach unterstrom weiter geroutet (berechnet).

### III-3.5 Modellanpassung

Die Anpassung des Wellenablaufmodells wurde zunächst durch seine Anwendung mit den ELBA-Parametern auf ausgewählte Hochwasserereignisse und ihrem Vergleich mit gemessenen Abflussganglinien an den Elbepegeln so weit wie möglich überprüft und erfolgreich bestätigt. Insgesamt wurden 11 historische Ereignisse (siehe Tab. III-3.3) unterschiedlicher Dauer und Jährlichkeit zur Überprüfung der Modellanpassung verwendet. Die Ereignisse liegen im Zeitraum 1936-1995, der nach den hydrologischen Analysen von HELMS & IHRINGER (2001)

repräsentativ für die (variablen) Abflussverhältnisse des 20. Jahrhunderts ist (vgl. Kap. III-1). Während im oberen Bereich der Mittleren Elbe (bis zur Saale bzw. zum Pegel Barby) alle genannten Ereignisse durch das Modell gut nachvollzogen werden konnten, war dies im Bereich der Unteren Mittelbebe zunächst nur für die jüngeren Ereignisse möglich. Der Grund hierfür liegt in den veränderten Bedingungen an der Unteren Mittelbebe infolge der Eindeichungen ab 1956 an der Havel und weiteren Nebengewässern. Zur Anwendung des Modells auf Ereignisse vor diesen Eindeichungen wurden daher

**Tab. III-3.3** Ausgewählte historische Hochwasserereignisse.

Kurzbezeichnung	Zeitspanne
Nov39	18.11.1939 – 12.01.1940
Jan46	29.01.1946 – 12.06.1946
Mar47	08.03.1947 – 11.06.1947
Jul54	08.07.1954 – 23.08.1954
Mar81	09.03.1981 – 20.09.1981
Jan82	01.01.1982 – 02.03.1982
Dez86	19.01.1987 – 19.01.1987
Mar87	18.03.1987 – 23.05.1987
Mar88	12.03.1988 – 10.06.1988
Dez93	04.12.1993 – 26.01.1994
Mar94	02.03.1994 – 21.05.1994

zusätzliche Berechnungsmodule entwickelt, die die vormals vorhandenen Retentionswirkungen dieser Gebiete weitestgehend berücksichtigen können (vgl. HEILIG 2000, HELMS ET AL. 2000 sowie Kap. III-1).

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen beispielhaft Ergebnisse der Modellanpassung. In Abb. III-3.2 sind gemessene Abflussganglinien verschiedener Hochwasserereignisse am Pegel Barby den Ganglinien gegenübergestellt, die mit dem Wellenablaufmodell berechnet wurden. Es wird deutlich, dass das

Modell sehr gut in der Lage ist, neben den häufigeren und länger anhaltenden Winter- und Frühjahrsereignissen auch nur einige Tage dauernde Sommerereignisse mit hohem Scheitelwert (z.B. Juli 1954) nachzubilden. Abb. III-3.3 bestätigt die sehr gute Modellanpassung im Längsverlauf. Dargestellt ist der Vergleich der gemessenen und berechneten Abflussganglinien am Beispiel des Ereignisses vom März 1988 entlang der Elbe vom Pegel Torgau (km 154,6) bis zum Pegel Neu Darchau (km 536,5).

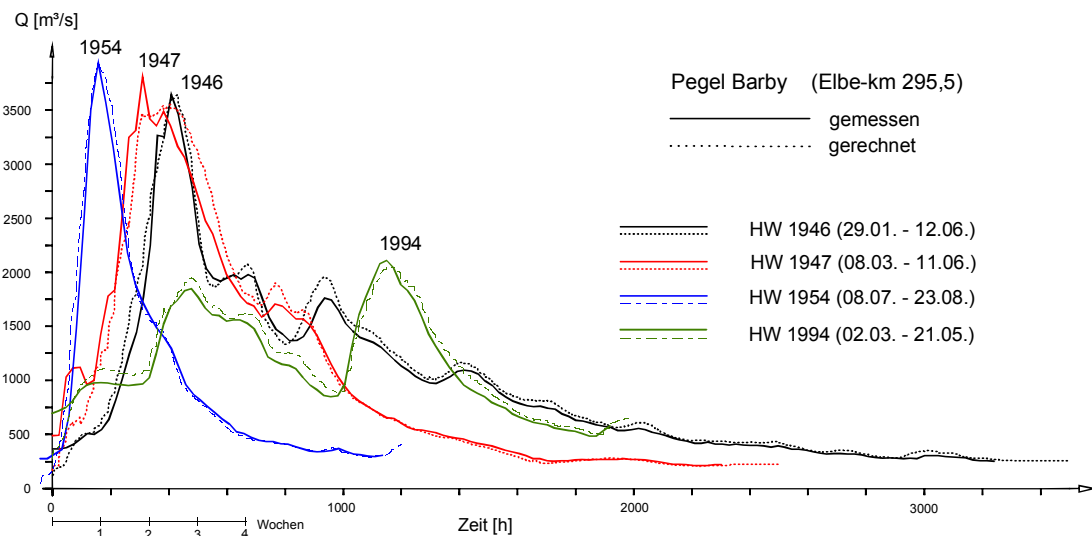


Abb. III-3.2 Vergleich gemessener und berechneter Abflussganglinien am Pegel Barby für verschiedene Ereignisse.

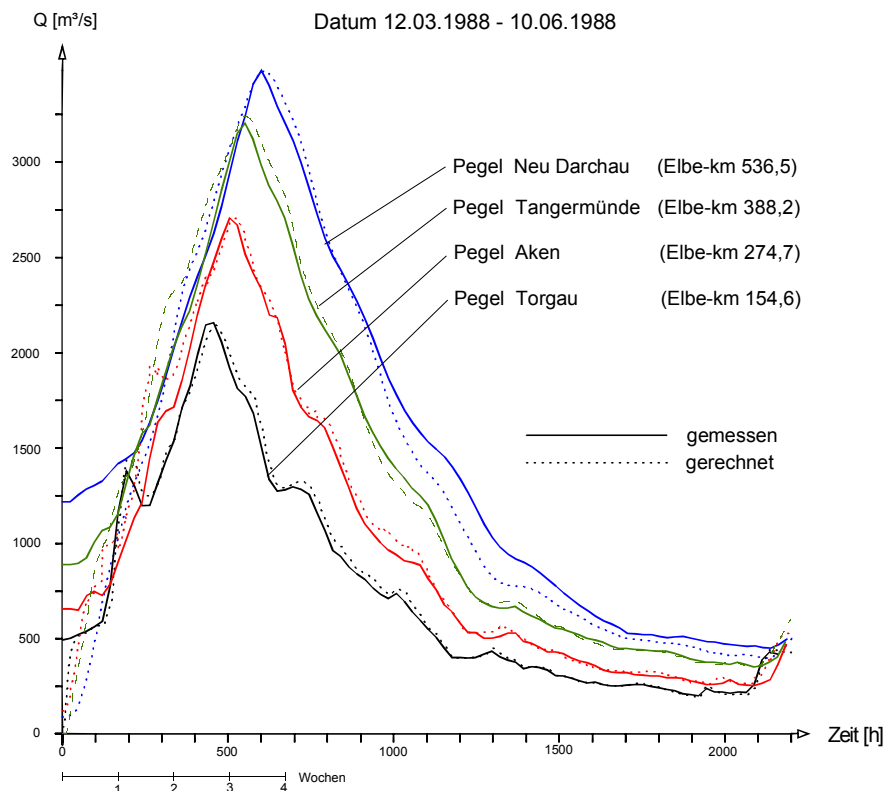


Abb. III-3.3 Vergleich gemessene und berechnete Abflussganglinien des Ereignisses März 1988 an verschiedenen Pegeln entlang der Elbe.

### III-3.6 Ausgewählte Standorte potentieller Deichrückverlegungsmaßnahmen

Um die Wirksamkeit von Deichrückverlegungsmaßnahmen untersuchen zu können, wurden zunächst in Abstimmung mit Behördenvertretern die wichtigsten potentiellen Standorte ausgewählt (ohne Sommerpolder). Für diese wurden die zugehörigen Kennlinien abgeleitet und an das angepasste Wellenablaufmodell gekoppelt. Alle vorgeschlagenen 39 Standorte, aufgelistet in Tab. III-3.4, erstrecken sich über eine maximale Gesamtfläche von etwa 37 000 ha, wovon sich allein im Bereich der Havelmündung ca. 23 800 ha (Flächenangabe nach SIMON (1996)) befinden. Die restlichen Flächen mit Größen zwischen ca. 100 ha und 2 500 ha verteilen sich auf 38 Standorte entlang der Fließstrecke zwischen den Pegeln Torgau (Elbe-km 154,6) und Neu Darchau (Elbe-km 536,5).

Aus den möglichen 39 Standorten wurden für die Berechnung die 17 Maßnahmen, die in Tab. III-3.4 markiert sind, ausgewählt, wobei der Standort 29: Schönhausen-Schönfeld aufgrund seiner Ausdehnung (ca. 16 km Länge) in drei Teilflächen (Knoten 49, 50 und 51) aufgeteilt wurde. Die Möglichkeit der Flutung von (teilweise bereits vorhandenen) Retentionsräumen im Bereich der Havelmündung wurde gesondert betrachtet. Die ausgewählten 17 Standorte plus der Einzelstandort Havelmündung erstrecken sich insgesamt über 34 300 ha, was ca. 90 Prozent der Gesamtfläche aller potentiellen Maßnahmen entspricht. Somit sind mit den durchgeführten Modellrechnungen repräsentative Aussagen über die Veränderung des Elbeabflusses durch Deichrückverlegungen möglich. Abb. III-3.4 zeigt die Lage der 17 Standorte; ihre Summe von knapp 105 km<sup>2</sup> entspricht rund 1/6 der heutigen Überflutungsflächen der Mittleren Elbe (vgl. Kap. II-3.4.3).

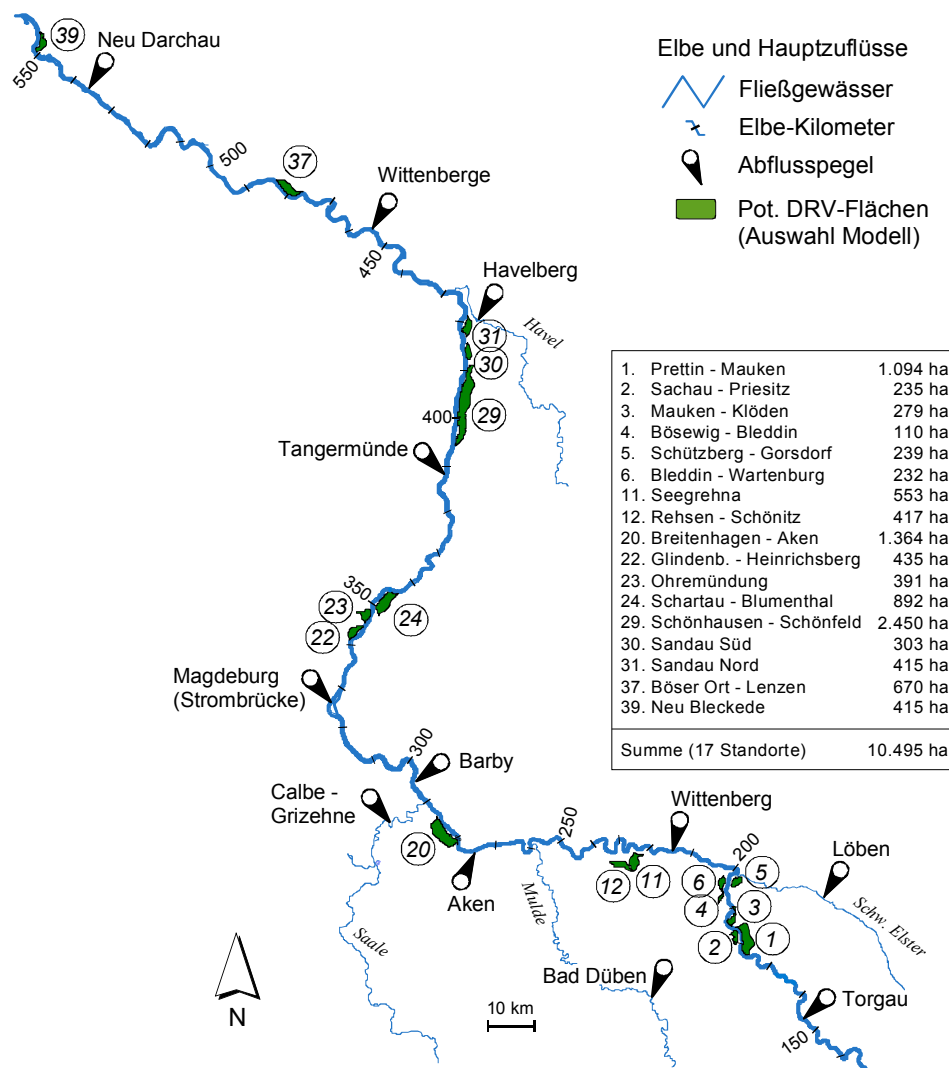


Abb. III-3.4 Lage der untersuchten Deichrückverlegungsstandorte (ohne Havel); vgl. auch *Anlage/CD*.

Tab. III-3.4 Potentielle Deichrückverlegungsstandorte; in der Modellierung berücksichtigte Standorte sind fett markiert.

Nr.	Elbe-km	Standortname	Knoten Nr.	Elbe-km	Lage	Fläche [ha]
		<i>Pegel Dresden</i>	<i>1</i>			
		<i>Pegel Torgau</i>	<i>6</i>			
<b>1</b>	<b>176,4 bis 184,1</b>	<b>Prettin - Mauken</b>	<b>8</b>	<b>180.8</b>	<b>rechts</b>	<b>1094</b>
<b>2</b>	<b>179,8 bis 184,5</b>	<b>Sachau - Priesitz</b>	<b>9</b>	<b>183.8</b>	<b>links</b>	<b>235</b>
<b>3</b>	<b>185,0 bis 190,3</b>	<b>Mauken - Klöden</b>	<b>10</b>	<b>186.5</b>	<b>rechts</b>	<b>279</b>
<b>4</b>	<b>191,5 bis 194,0</b>	<b>Bösewig - Bleddin</b>	<b>11</b>	<b>193.6</b>	<b>links</b>	<b>110</b>
<b>5</b>	<b>195,1 bis 198,7</b>	<b>Schützberg - Gorsdorf</b>	<b>12</b>	<b>195.6</b>	<b>links</b>	<b>239</b>
<b>6</b>	<b>194,0 bis 196,7</b>	<b>Bleddin - Wartenburg</b>	<b>13</b>	<b>195.1</b>	<b>rechts</b>	<b>232</b>
7	196 bis 199	Wartenburg - Nord	14			74
8	206 bis 208	Melzweg	17			113
9	208 bis 211	Dabrun - Boos	18			74
10	211 bis 213	Boos	19			70
		<i>Pegel Wittenberg</i>	<i>20</i>			
<b>11</b>	<b>222,0 bis 226,3</b>	<b>Seegrehna</b>	<b>21</b>	<b>222.8</b>	<b>links</b>	<b>553</b>
<b>12</b>	<b>226,3 bis 233,3</b>	<b>Rehsen - Schönitz</b>	<b>22</b>	<b>233.0</b>	<b>links</b>	<b>417</b>
13	233 bis 234,5	Wörlitz - Ost	23			151
14	240,5 bis 243	Wörlitz - West	24			80
15	241,8 bis 246,5	Buroer Aue	25	242.7	rechts	239
16	246,8 bis 248,5	Kliekener Aue	26			100
17	246,6 bis 248,5	Vockerode	27	247.5	links	215
18	247 bis 249	Sarenbruch - Klieken	28			139
19	253,5 bis 256,6	Oberluch Roßblau	29	256.5	rechts	164
		<i>Pegel Aken</i>	<i>32</i>			
<b>20</b>	<b>278,4 bis 286,0</b>	<b>Breitenhagen - Aken</b>	<b>33 &amp; 34</b>	<b>284.7</b>	<b>links</b>	<b>1364</b>
		<i>Pegel Barby</i>	<i>36</i>			
21	ca. 300	Monplaisir - Glinde	37			180
		<i>Pegel Magdeburg</i>	<i>38</i>			
<b>22</b>	<b>340,9 bis 345,0</b>	<b>Glindenberg – Heinrichsberg</b>	<b>40</b>	<b>344.7</b>	<b>links</b>	<b>435</b>
<b>23</b>	<b>345,8 bis 349,0</b>	<b>Ohremündung</b>	<b>41</b>	<b>347.8</b>	<b>links</b>	<b>391</b>
<b>24</b>	<b>348,3 bis 356,4</b>	<b>Schartau – Blumenthal</b>	<b>43</b>	<b>352.0</b>	<b>rechts</b>	<b>892</b>
25	358,5 bis 365,1	Havelsche Mark	44	361.5	rechts	631
26	ca. 370	Parey	45			270
27	372,3 bis 379,5	Bittkau – Schelldorf	46	376.1	links	531
28	378,3 bis 381,2	Klietznick (Bucher Brack)	47	380.9	rechts	161
		<i>Pegel Tangermünde</i>	<i>48</i>			
<b>29a</b>	<b>395</b>	<b>Schönhausen-Schönfeld a</b>	<b>49</b>	<b>400.0</b>	<b>rechts</b>	
<b>29b</b>	<b>bis</b>	<b>Schönhausen-Schönfeld b</b>	<b>50</b>	<b>405.5</b>	<b>rechts</b>	<b>2450</b>
<b>29c</b>	<b>411.3</b>	<b>Schönhausen-Schönfeld c</b>	<b>51</b>	<b>410.0</b>	<b>rechts</b>	
<b>30</b>	<b>412,6 bis 415,8</b>	<b>Sandau Süd</b>	<b>52</b>	<b>414.2</b>	<b>rechts</b>	<b>303</b>
<b>31</b>	<b>417,1 bis 421,8</b>	<b>Sandau Nord</b>	<b>53</b>	<b>418.0</b>	<b>rechts</b>	<b>415</b>
32	422,5 bis 438,0	Untere Havel (Fluss/Polder)	54	427.1	rechts	23800
		<i>Pegel Wittenberge</i>	<i>57</i>			
33		Wahrenberg (rechtselbisch)	59			355
34		Müggendorf	60			140
35	465,3 bis 473,0	Wahrenberg (linkselbisch)	61	469.8	links	988
36	473,7 bis 476,4	Lütkenwitsch	63	474.3	rechts	140
<b>37</b>	<b>476,8 bis 483,6</b>	<b>Lenzen</b>	<b>65</b>	<b>481.3</b>	<b>rechts</b>	<b>670</b>
38		Mödlich	66			60
		<i>Pegel Neu Darchau</i>	<i>73</i>			
<b>39</b>	<b>550,3 bis 555,5</b>	<b>Neu Bleckede</b>	<b>74</b>	<b>535.7</b>	<b>rechts</b>	<b>415</b>

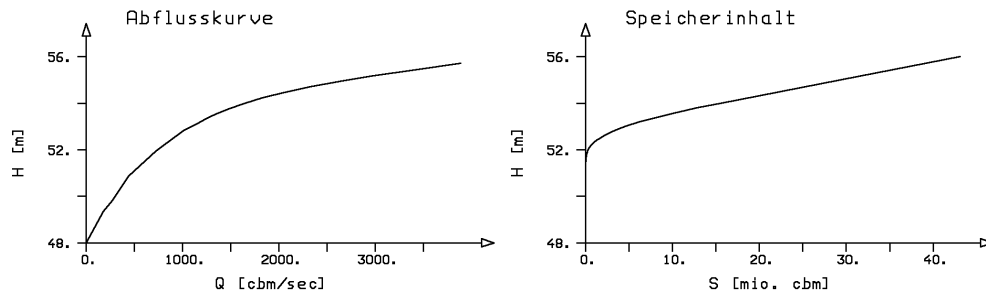


Abb. III-3.5 Beispielkennlinien am Standort 20: Abflusskurve und Speicherinhaltslinie.

Um im Modell das Seeretentionsverfahren anzuwenden wurde für jede Maßnahme die Speicherinhaltslinie, d.h. das wirksame Retentionsvolumen in Abhängigkeit der Füllhöhe, aus dem Digitalen Geländemodell abgeleitet und in das gekoppelte Modell eingefügt. Die Abflusskurven an den einzelnen Standorten wurden aus den Wasserspiegellagenberechnungen im Projekt ermittelt (vgl. Kap. III-2). Abb. III-3.5 zeigt beispielhaft die Speicherinhaltslinie und Abflusskurve des Standorts 20: Breitenhagen - Aken. An diesem Standort wird der Vorlandbereich ab einer Höhenkote von ca. 52,5 m+NN bzw. einem Abfluss der Elbe von ca. 950 m<sup>3</sup>/s eingestaut bzw. überflutet.

### III-3.7 Modellierungsergebnisse

Das verwendete Flussgebietsmodell ermöglicht es, sowohl ungesteuerte als auch gesteuerte Deichrückverlegungsmaßnahmen zu betrachten. Im ersten Schritt wurden alle 17 gewählten Standorte als ungesteuerte Maßnahmen simuliert. Da bei der ungesteuerten Variante die durch Deichrückverlegungen gewonnenen Retentionsräume schon während des Wasserspiegelanstiegs geflutet werden, sind sie beim Eintreffen des Hochwasserscheitelwerts bereits nahezu gefüllt. Die Kappung des Abflussscheitelwerts ist deshalb vernachlässigbar klein. Im zweiten Schritt wurden deshalb alle Maßnahmen als optimal gesteuert modelliert. Das bedeutet, dass jede einzelne Steuerung genau auf den Ablauf des Hochwasserereignisses abgestimmt wurde. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt an Ganglinien an den einzelnen Gewässerstellen (Knoten) und im Längsschnitt. Für die Ereignisse und Gewässerabschnitte, bei denen keine Nebenflussganglinien des Zwischengebiets vorlagen, wurde der betreffende Abflussanteil an den jeweiligen Elbepegeln entsprechend der dort gemessenen Ganglinien aufgeschlagen.

#### III-3.7.1 Wirksamkeit bei historischen Hochwasserereignissen

Abb. III-3.6 zeigt Abflussganglinien des Ereignisses 1954 am Pegel Wittenberge: dargestellt ist ein Vergleich der Ganglinien ohne Deichrückverlegungen (Ist-Zustand), mit ungesteuerten Maßnahmen sowie mit optimal gesteuerten Maßnahmen. Wie oben bereits geschildert, ist die Wirkung der Rückverlegung der Deichlinie ohne gezielte Steuerung vernachlässigbar. Der Abflussscheitelwert wird verzögert, jedoch nur minimal reduziert. Die gesteuerte Variante dagegen ergibt eine deutliche Kappung des Scheitelwerts.

Um die Wirksamkeit aller betrachteter Standorte auf den Gesamtverlauf der Elbe zu verdeutlichen, zeigt Abb. III-3.7 das Ereignis 1954 im Längsschnitt entlang der Elbe. Dargestellt sind die Abflussscheitelwerte entlang der Elbe vom Pegel Dresden bis zur Wehranlage Geesthacht für die drei Varianten ohne DRV, ungesteuerte DRV und gesteuerte DRV. Beispielsweise würde der Abflussscheitelwert des Ereignisses 1954 am Pegel Wittenberge durch die Verwirklichung der 17 untersuchten Deichrückverlegungsstandorte als gesteuerte Maßnahmen von ca.  $Q = 3700 \text{ m}^3/\text{s}$  auf ca.  $Q = 3100 \text{ m}^3/\text{s}$  reduziert, was nach der Abflusskurve des Pegels einer Reduzierung des Wasserstands um ca. 35 cm entspricht. Bei der ungesteuerten Variante reduziert sich der Scheitelabfluss lediglich um ca. 60 m<sup>3</sup>/s (bzw. der zugehörige Wasserstand um ca. 3 cm). Dieser reduzierte Scheitel tritt aufgrund der Retentionswirkung der Maßnahmen um ca. 12 Stunden später auf. In Tab. III-3.5 sind die Berechnungsergebnisse aller untersuchten Hochwasserereignisse beispielhaft am Pegel Wittenberge aufgelistet.

Die darauffolgende Tab. III-3.6 zeigt für ausgewählte Ereignisse und Standorte einen Vergleich der maximal verfügbaren Retentionsvolumina (Speicherinhalt  $S_{HQ100}$  bezogen auf ein 100-jährliches



Ereignis, siehe Kap. III-3.7.3 unten) mit den Füllen verschiedener Hochwasserereignisse oberhalb des Ausuferungswasserstandes. Aus diesem Vergleich wird deutlich erkennbar, dass eine Nutzung dieser

Retentionsräume bezüglich Abflussminderung nur durch einen gezielten (gesteuerten) Einsatz der Retentionsflächen möglich ist.

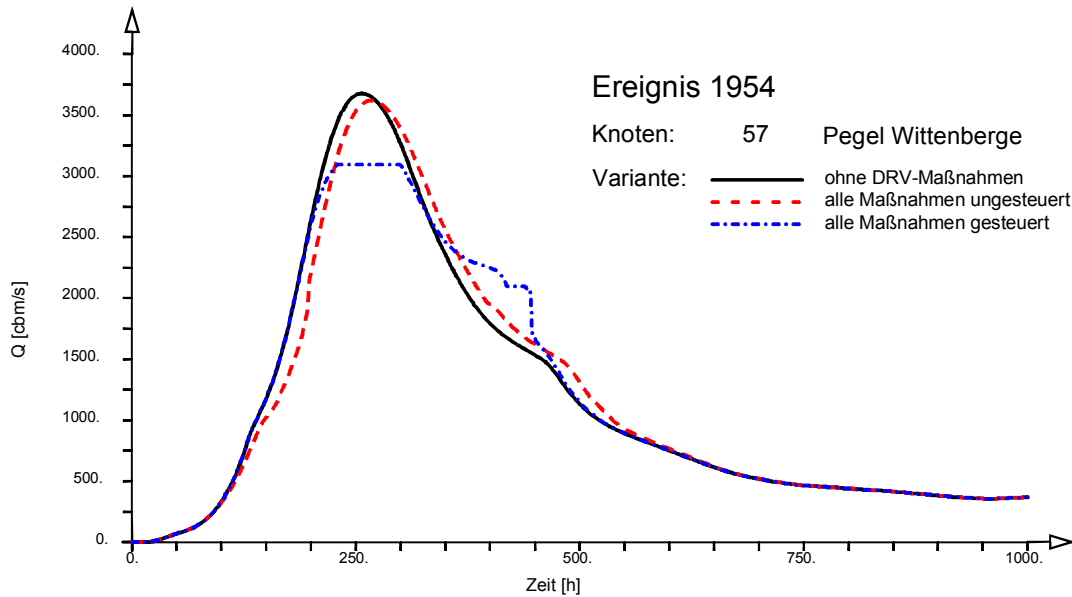


Abb. III-3.6 Vergleich der Abflussganglinien ohne DRV, ungesteuerte DRV und gesteuerte DRV am Pegel Wittenberge, Ereignis 1954.

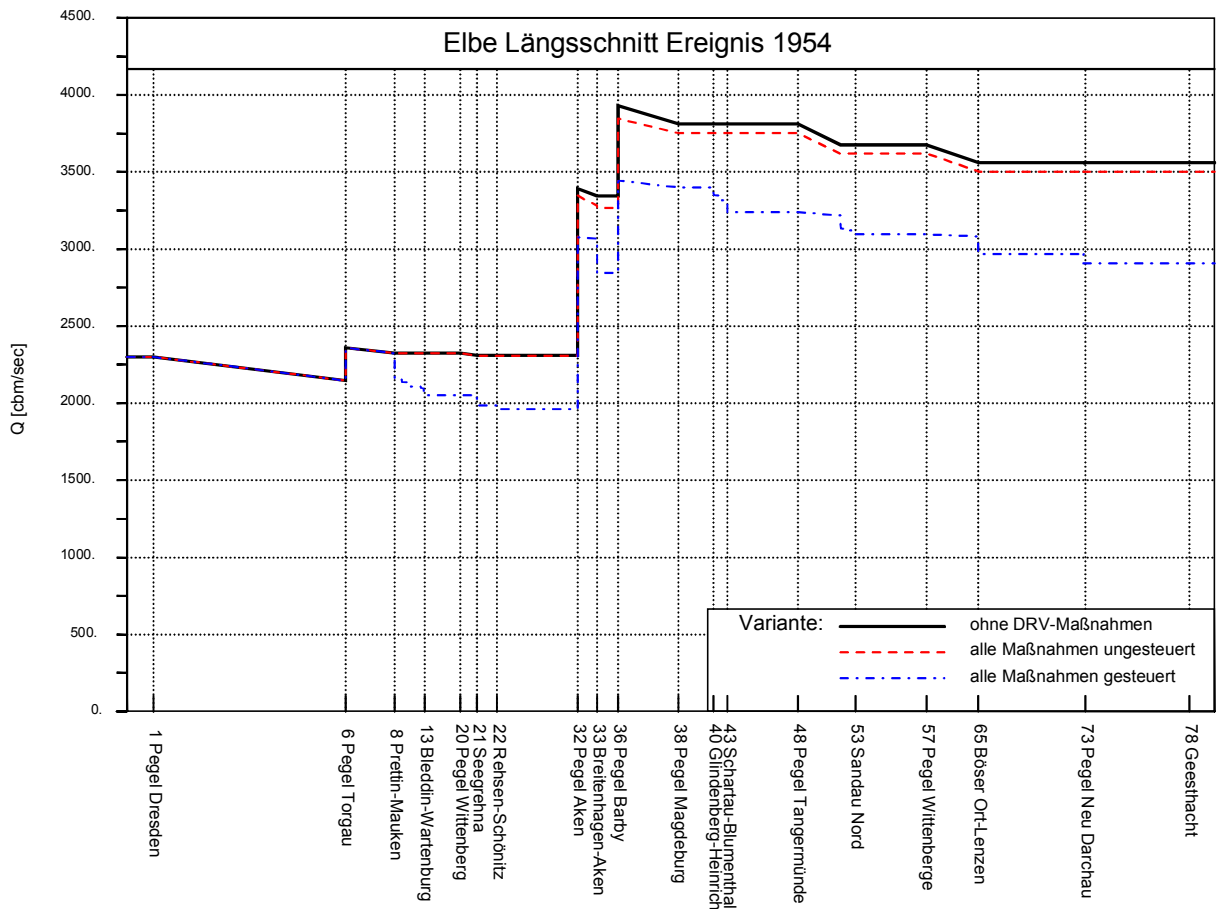


Abb. III-3.7 Längsschnitt entlang der Elbe, Ereignis 1954.

**Tab. III-3.5** Berechnungsergebnisse am Beispiel Pegel Wittenberge; mit: HQ = Abflussscheitelwert, W = Wasserstand(HQ) gemäß Abflusskurve aus hydraulischen Berechnungen und  $\Delta W$  = Wasserstandsänderung aufgrund der Maßnahmen.

Ereignis	ohne Maßnahmen		alle Maßnahmen ungesteuert			alle Maßnahmen gesteuert		
	HQ [m³/s]	W [m+NN]	HQ [m³/s]	W [m+NN]	$\Delta W$ [m]	HQ [m³/s]	W [m+NN]	$\Delta W$ [m]
1939	3026	22.95	2999	22.93	0.02	2645	22.67	0.29
1946	3505	23.26	3461	23.24	0.03	3007	22.94	0.32
1947	3514	23.27	3498	23.26	0.01	3208	23.08	0.19
1954	3677	23.36	3620	23.33	0.03	3096	23.00	0.36
1981	3474	23.24	3429	23.22	0.03	3042	22.96	0.28
1982	3118	23.02	3104	23.01	0.01	2623	22.65	0.37
1986	2735	22.74	2702	22.71	0.03	2373	22.44	0.30
1987	2704	22.71	2701	22.71	0.00	2481	22.53	0.18
1988	3249	23.10	3243	23.10	0.00	2915	22.87	0.23
1993	2167	22.24	2146	22.22	0.02	1859	21.92	0.32
1994	2282	22.35	2273	22.35	0.01	2167	22.24	0.11
Tn = 100a	3931	23.51	3922	23.50	0.01	3551	23.29	0.22

**Tab. III-3.6** Vergleich der maximal verfügbaren Retentionsvolumina (Speicherinhalt S bezogen auf den Wasserstand bei HQ<sub>100</sub>) für ausgewählte Standorte mit den Füllen verschiedener Hochwasserereignisse oberhalb des Ausuferungswasserstandes W<sub>A</sub>.

Standort				Ausuferung ab		Retentionsraum		Ereignisfülle (oberhalb Q <sub>A</sub> )			
Nr.	Name	Lage Elbe-km	HQ <sub>100</sub> [m³/s]	W <sub>A</sub> [m+NN]	Q <sub>A</sub> [m³/s]	W(HQ <sub>100</sub> ) [m+NN]	S(HQ <sub>100</sub> ) [Mio m³]	1954 [Mio m³]	1988 [Mio m³]	1994 [Mio m³]	HQ <sub>100</sub> [Mio m³]
1	Prettin – M.	180.8	2737	75.2	ca. 1250	77.0	ca. 30	400	710	-	1710
20	Breitenhagen	284.7	3150	52.5	ca. 950	55.0	ca. 30	1365	2680	310	3700
31	Sandau Nord	418.0	3910	27.3	ca. 1300	29.4	ca. 11,5	1340	3000	975	4530

### III-3.7.2 Zusatzwirkung der Havelmündung

Wie bereits erwähnt nimmt die Havelmündung eine Sonderstellung ein. Durch Flutungen im Bereich der Havelmündung könnte zusätzlicher Retentionsraum von maximal ca. 23 800 ha (Angabe laut SIMON (1996) mit einem auf HQ<sub>100</sub> bezogenen Retentionsvolumen von 243,4 hm³) genutzt werden. Wie eine nähere Untersuchung der Ereignisse von 1981 und 1988 unter verschiedenen Annahmen bezüglich der Steuerung der Wehrgruppe Quitzöbel, die die Havelgebiete von der Elbe trennt, ergab, muss davon ausgegangen werden, dass zumindest große Teile des Havelflussschlauchs durch Eigenwasser der Havel oder durch den Anlauf der Elbehochwasserwelle gefüllt werden, bevor der eigentliche Elbescheitelwert eintrifft. Insofern muss davon ausgegangen werden, dass abhängig vom Einzelereignis und der Wehrsteuerung nur ein Teil bzw. kein Retentionsvolumen im Havel Schlauch zur Entlastung der Elbe verfügbar ist. Aus diesem Grund wurde für die

Modellierung sicherheitshalber nur das Retentionsvolumen von 6 Poldern berücksichtigt, die im Notfall bis zu dem maximal zulässigen Wasserstand in Havelberg von 26,40 m+NN für zusätzliche Flutungen vorgesehen sind (zum Vgl.: PÜTTMER 1990, STAU MD 2000). Hieraus ergaben sich für die Berechnungen je nach Einstauhöhe durch die Elbe maximal 109 hm³ Retentionsvolumen.

Abb. III-3.8 zeigt die Wirkung der Havelmündung (Polder) im Längsschnitt für das Ereignis 1954. Dargestellt ist der Vergleich der Abflussscheitelwerte ohne Maßnahmen mit den Scheitelwerten nur mit Einbeziehung der gesteuerten Havelpolder als Retentionsraum und mit der Variante aller 17 untersuchten Standorte plus dem Havelstandort. Es wird deutlich, dass durch Einbeziehung der Havelpolder als zusätzlichen Retentionsraum die Reduzierung des Abflussscheitelwerts z.B. an der Wehranlage Geesthacht etwa verdoppelt werden kann.

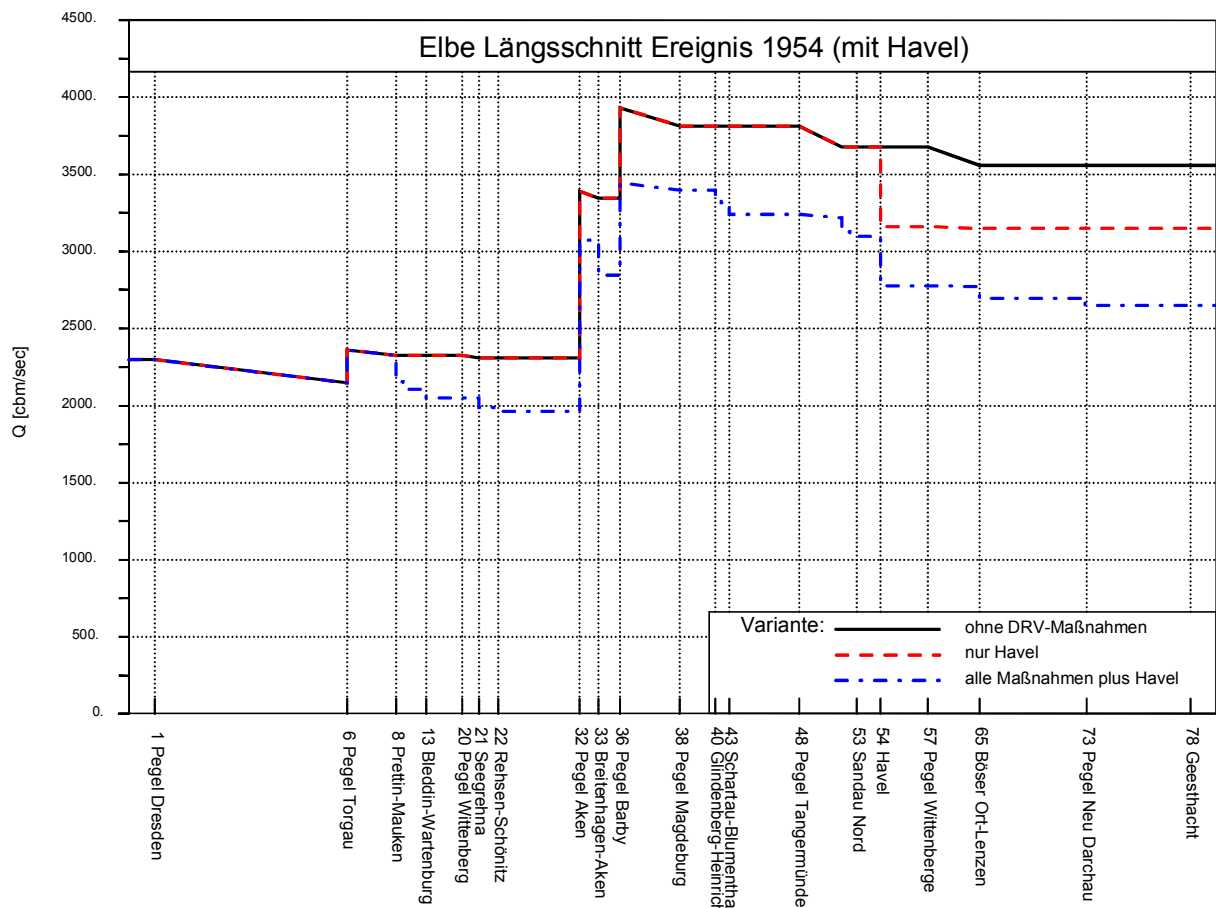


Abb. III-3.8 HQ-Längsschnitt für das Ereignis 1954 mit zusätzlicher Retentionswirkung der Havelmündung (Polder).

### III-3.7.3 Wirksamkeit bei einem 100-jährlichen Ereignis (HQ<sub>100</sub>)

Um die Wirkung von Deichrückverlegungsmaßnahmen statistisch einordnen zu können, wurde mit Hilfe des Ereignisses von 1988 ein synthetisches Hochwasserereignis der Jährlichkeit  $T_n = 100a$  abgeleitet. Die Auswahl des Ereignisses 1988 erfolgte auf Basis der Ergebnisse der umfangreichen statistischen Untersuchungen im Projekt (vgl. Kap. III-1). Die Zeitreihe 1964-1995 stellt dabei eine geeignete Beschreibung der aktuellen Abflussverhältnisse dar.

Abb. III-3.9 zeigt ein Ergebnis dieser Untersuchungen: dargestellt sind die kontinuierlichen  $T_n$ -jährlichen Überschreitungsdauern von Abflussschwellenwerten sowie das aufgrund seiner Charakteristik annähernd parallel einzuordnende Ereignis 1988 bzw. das abgeleitete synthetische Ereignis HQ<sub>100</sub>. Die Berechnungsergebnisse sind als Längsschnitt des Ereignisses in Abb. III-3.10 dargestellt. Der Hochwasserscheitelwert HQ<sub>100</sub> wird bei der gesteuerten Variante (ohne Havel) um ca. 20 cm reduziert.

### III-3.7.4 Wirksamkeit ausgewählter Kombinationen von Maßnahmen

Die bis hierher beschriebenen Ergebnisse stellen die Maximalwirkungen (Potentiale) dar, wie z.B. „alle Deichrückverlegungen mit gesteuerter Flutung“, weshalb diese Varianten als unrealistisch im Sinne einer Umsetzbarkeit anzusehen sind. Daher wurde seitens der konsultierten Behördenvertreter die Betrachtung einer Zwischenvariante im Ergebnis der Studie erwünscht, auch unter dem Gesichtspunkt der Minimierung der Anzahl möglicherweise anfallender Steuerungseinrichtungen (Bauwerkskosten etc.). Um die grundsätzliche Wirkung aufzuzeigen, wurden hierzu aus den 17 untersuchten Standorten die drei größten Standorte ausgewählt. Abb. III-3.11 zeigt die Berechnungsergebnisse für das Ereignis mit  $T_n = 100a$ . Dargestellt ist ein Vergleich der Abflussscheitelwerte ohne Maßnahmen, mit den drei größten gesteuerten Maßnahmen plus Havelmündung und mit allen gesteuerten Maßnahmen plus Havel. Es wird deutlich, dass hauptsächlich die drei größten Maßnahmen plus die Nutzung der Havelmündung als Retentionsraum für die Reduzie-

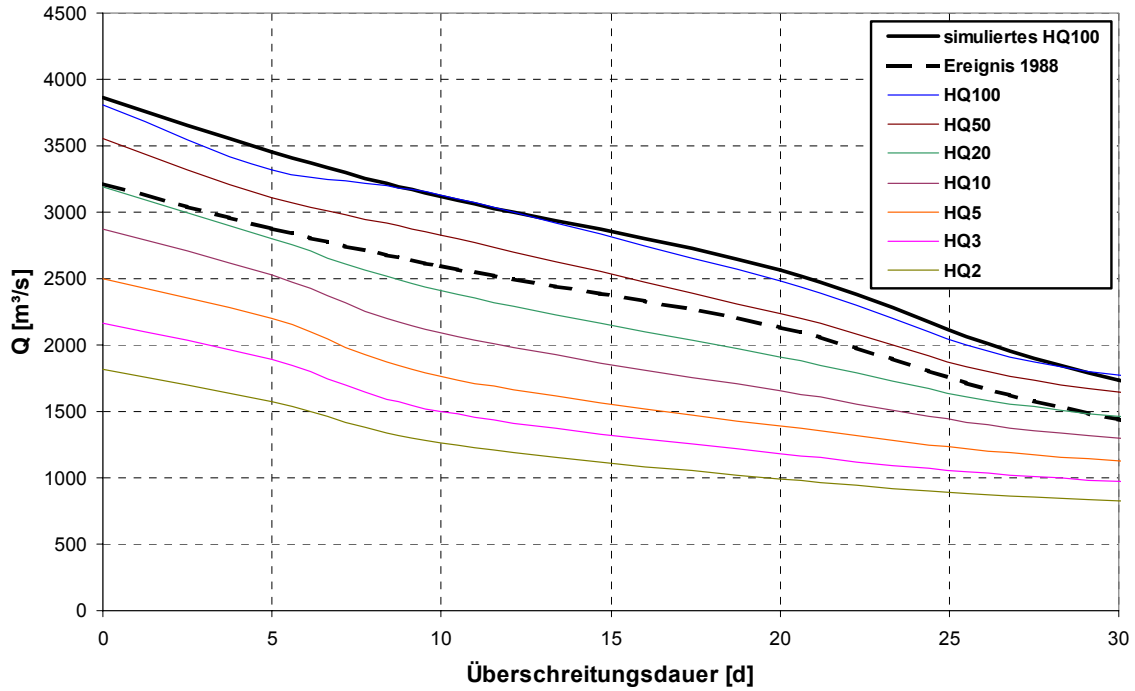


Abb. III-3.9 Einordnung des Ereignisses 1988 und des synthetischen Ereignisses mit  $T_n = 100a$  am Pegel Barby gegenüber der Abflussstatistik der Zeitreihe 1964-1995 ( $T_n$ -jährliche kontinuierliche Überschreitungsdauern von Abflussschwellenwerten).

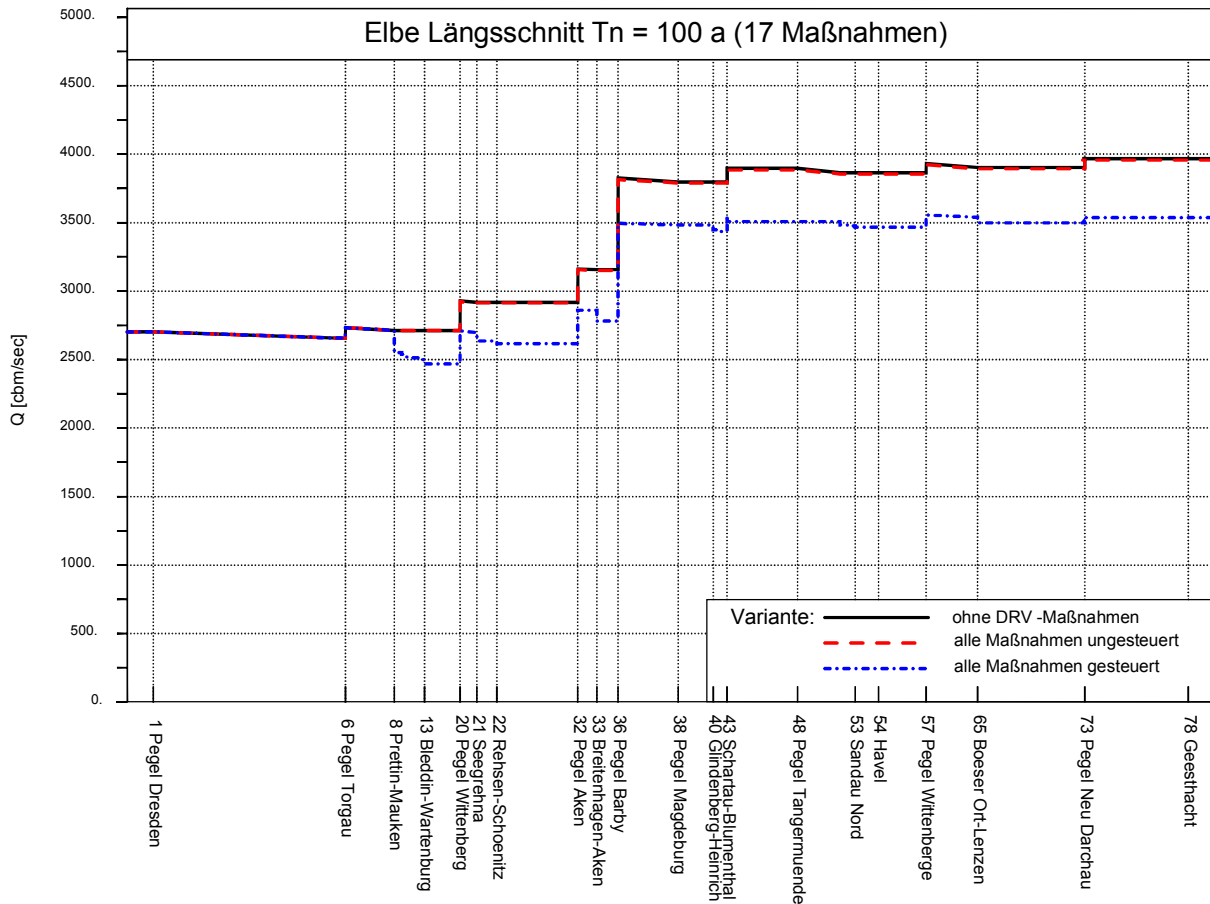


Abb. III-3.10 Längsschnitt des synthetischen Ereignisses mit  $T_n = 100a$  für alle 17 untersuchten Standorte (ohne Havelpolder).

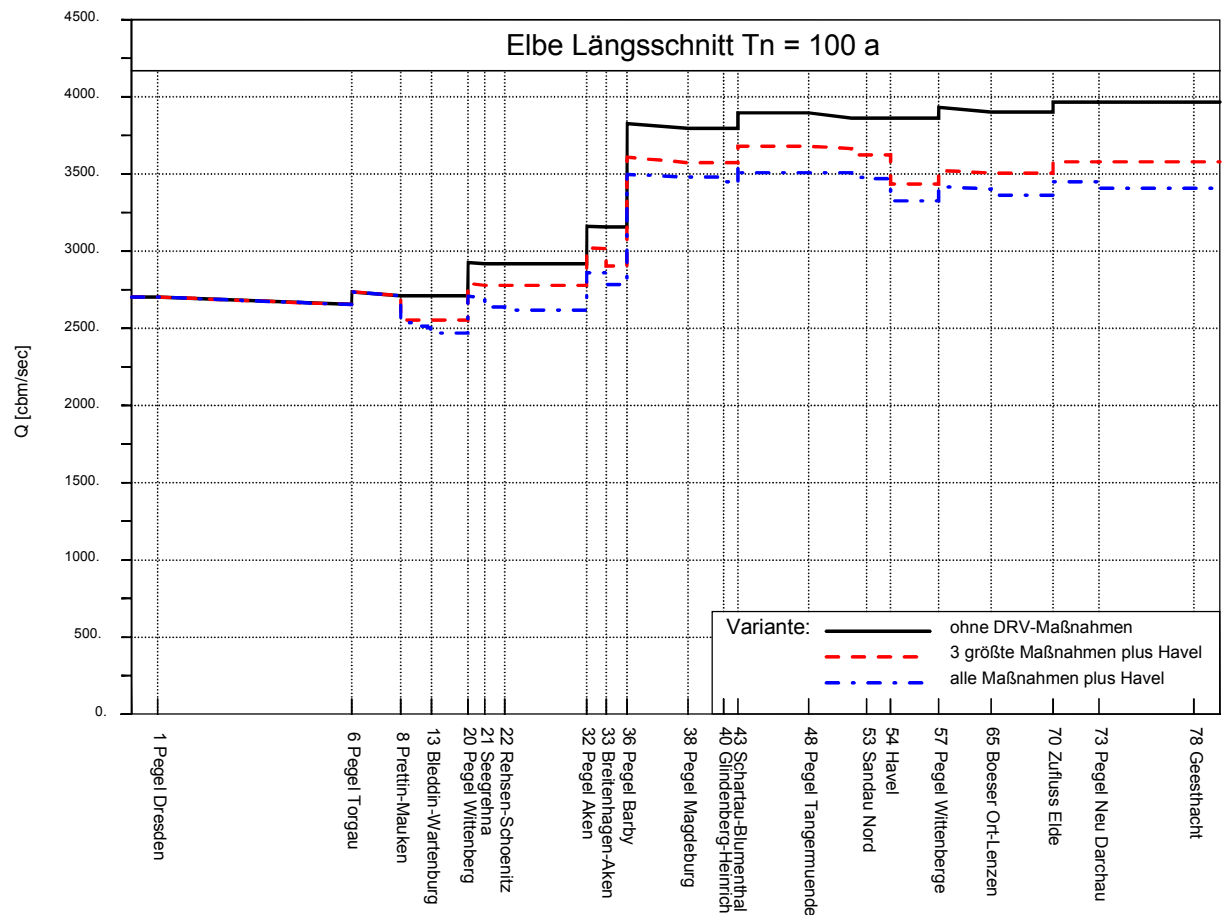


Abb. III-3.11 Längsschnitt für  $T_n = 100a$ : Vergleich der drei Varianten „ohne DRV-Maßnahmen“ mit „3 größte Standorte plus Havel“ sowie „alle DRV-Maßnahmen plus Havelpolder“.

rung des Abflussscheitelwerts verantwortlich sind, während die übrigen 14 kleineren Standorte einen deutlich geringeren Effekt auf die Abflussganglinie eines Ereignisses mit  $T_n = 100a$  bewirken.

### III-3.8 Fazit

Auf Grundlage der Simulationsergebnisse können die folgenden grundsätzlichen Erkenntnisse zur Wirksamkeit möglicher Deichrückverlegungsmaßnahmen auf das Abflussgeschehen der Elbe im Längsverlauf festgehalten werden.

- Großräumige und länderübergreifende Wirkungen von Deichrückverlegungsmaßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes entlang der Elbe, d.h. zur Minderung von Schadensrisiken in unterstromigen Gebieten, können nur durch gesteuerte Flutung der (zusätzlichen) Retentionsflächen erzielt werden.
- Wie die untersuchte Zwischenvariante der drei größten potentiellen Standorte in gesteuertem

Betrieb aufzeigt, können selbst wenige Maßnahmen nicht unerheblich zu einer gezielten Entlastung beitragen; dies gilt auch auf hohem Abflussniveau bzw. im Bereich eines Ereignisses mit  $T_n = 100a$ .

- Deichrückverlegungsflächen, die aus unterschiedlichen Gründen ungesteuert, d.h. während des natürlichen Wasserspiegelanstiegs vor Eintreffen des Wellenscheitels, geflutet werden sollen, lassen im Bereich der Einzelmaßnahme lokale Wirkungen wie Wasserspiegelabsenkungen infolge Aufweitung erwarten (wie verschiedene hydraulisch Untersuchungen im BMBF-Forschungsprogramm „Elbe-Ökologie“ zeigen). Ihre großräumigen Wirkungen auf den Abflussscheitelwert sind marginal und beschränken sich dabei auf einen verzögernden Effekt.
- Aus einer möglichen Kombination von ungesteuerten und gesteuerten Maßnahmen können somit Vorteile sowohl für den Hochwasserschutz als auch die Auenökologie entstehen:

hydrologisch grundsätzlich denkbar ist hierbei die (ungesteuerte) Flutung ökologisch wertvoller Auenflächen durch häufigere kleinere Hochwasserereignisse, während für seltene extreme Ereignisse gesteuerte Flutungen einzelner Standorte vorgesehen werden können.

- Die Nutzung der (im kritischen Fall heute bereits flutbaren) Havelniederungsgebiete im Sinne einer spürbaren Entlastung der Unteren Mittelelbe erscheint sinnvoll, wobei jedoch weitere detailliertere Untersuchungen, insbesondere zur ereignisabhängigen Steuerung, als notwendig erachtet werden.

Im Hinblick auf einen wirksamen Beitrag zukünftiger Deichrückverlegungen an der Elbe zur großräumigen Hochwasservorsorge wird empfohlen, in der Vorplanung für Flächen ab einer Größenordnung von ca. 400 bis 500 ha eine geeignete Steuerung prinzipiell mit abzuwägen. Somit kann neben den Zielen der Deichrückverlegungen am Standort selbst (z.B. Ökologie) auch das Ziel einer überörtlichen Hochwasserschutzwirkung verfolgt werden. Letzteres gilt hauptsächlich im Hinblick auf seltenere Ereignisse, d.h. für Extremhochwasser mit besonderem Schadensrisiko, die sich bei einem großen Fließgewässer wie der Elbe hydrologisch i.a. über mehrere Tage hinaus ankündigen.

## Literatur

- BÜCHELE, B., EVDAKOV, O., KIENE, S., OTTE-WITTE, K., RITZERT, F., SAUCKE, U., NESTMANN, F. (2001): Geometrie und Morphologie der Elbe (Ist-Zustandserfassung von Einzelparametern in Längs- und Querprofil). Kap. II-3 in diesem Band.
- HEILIG, J. (2000): Auswirkungen der Eindeichungen im 20. Jahrhundert AUF die Hochwasserkennwerte im Bereich der Unteren Mittelelbe. Vertiefenarbeit am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe, unveröff.
- HELMES, M., BÜCHELE, B., IHRINGER, J. (2000): Assessment of the impact of diking measures at the Elbe river. In: BfG [Hrsg.] (2000): Decision Support Systems (DSS) for river basin management. International workshop on 6 April 2000 in Koblenz, BfG-Veranstaltungen 4/2000, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 97-109
- HELMES, M., IHRINGER, J. (2001): Analysis and simulation of the flow process of the Elbe river. Beitrag zur International Conference on Hydrological Challenges in Transboundary Water Resources Management, Veranstalter: IHP/OHP-Sekretariat in der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz/Germany, 25.-27. September 2001
- HELMES, M., IHRINGER, J., NESTMANN, F. (2001): Analyse und Simulation des Abflussprozesses der Elbe. Kap. III-1 in diesem Band.
- IHRINGER, J. (1999): Softwarepaket für Hydrologie und Wasserwirtschaft – Anwenderhandbuch. Band 1: Hochwasseranalyse und –berechnung. Hrsg. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Abteilung Hydrologie, Univ. Karlsruhe
- NEUSCHULZ, F., PURPS, J. (2000): Rückverlegung von Hochwasserschutzdeichen zur Wiederherstellung von Überflutungsflächen. In: Stoffhaushalt von Auenökosystemen: Böden und Hydrologie, Schadstoffe, Bewertungen. Hrsg. K. Friese, B. Witter, G. Miehlich, M. Rode; Springer-Verlag; Berlin/Heidelberg/New York
- OTTE-WITTE, K., ADAM, K., RATHKE, K., MEON, G. (2001): Hydraulisch-morphologische Charakteristika entlang der Elbe. Kap. III-2 in diesem Band.
- PÜTTMER, A. (1990): Hochwasserschutz der Elbe unter besonderer Berücksichtigung der Mittleren Elbe. In: DVWK (1990): Deutsch-deutsche Zusammenarbeit in der Wasserwirtschaft - Beiträge zur Fachveranstaltung am 4. Oktober 1990 in Göttingen. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Nr. 94, Kommissionsvertrieb Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin
- SIMON, M. (1996): Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Elbe. Bericht, Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE), Magdeburg, Bericht, unveröff.
- STAU MD (2000): Richtlinie für die Berechnung der Entlastung des Elbehochwasserscheitels in die Havel und zur Steuerung der Wehrgruppe Quitzöbel (Stand November 1997). Schriftliche Mitteilung auf Anfrage des Projektes des Staatlichen Amtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt Magdeburg, 2000, unveröff.

## III-4 Quantifizierung sohlhöhenrelevanter Feststofftransportprozesse

W. Sauer, A. Schmidt, B. Dröge, E. Götz

### III-4.1 Veranlassung und Zielsetzung

Vertrauenswürdige Aussagen hinsichtlich der Beurteilung des aktuellen morphologischen Zustands der Elbe wie auch der Prognose zukünftiger Erosions- bzw. Anlandungstendenzen setzen die zuverlässige Quantifizierung nicht nur des Geschiebetransports, sondern auch des Feststoffanteils voraus, der nur zeitweise mit der Sohle im Austausch steht, jedoch zu einem erheblichen Maße zur Sohlbildung beiträgt. Der Ermittlung dieses Anteils kommt gerade an der Elbe besondere Bedeutung zu, da im gesamten Verlauf der deutschen Elbe Sandfraktionen einerseits in erheblichem Umfang Bestandteil des Sohlenmaterials sind, andererseits die Frachten des suspendierten Sandes diejenigen des Geschiebes teilweise deutlich übersteigen (BAW & BfG 1996, SCHMIDT 1996).

Bisher konnte dieser Anteil allenfalls nur grob abgeschätzt werden, da über die komplexen Zusammenhänge noch zu wenig bekannt ist. Ziel des Teilprojektes ‚Suspendierte Feststofffracht‘ war es, auf der Grundlage umfangreicher Naturuntersuchungen Aufschluss über Bedingungen und Wirkungsweisen der in diesem Übergangsbereich sich abspielenden Prozesse zu erlangen und Ansätze zu entwickeln, die es erlauben, alle sohlhöhenrelevanten Feststoffkomponenten zuverlässig quantifizieren zu können.

Im Rahmen des Teilprojektes ‚Hydrologisches Feststoff-Bilanz-Modell (HFBM)‘ sollten für das in der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) vorbereitete Bilanzmodell aus den Ergebnissen der an der Elbe durchgeführten Geschiebe- und Schwebstoffmessungen Transport-Abfluss-Beziehungen ermittelt werden und diese zusammen mit anderen Elbe-Parametern in das Modell implementiert werden. Die abschnittsweise Berechnung der Frachten des Geschiebes sowie des für die Bettbildung bedeutsamen Anteils der suspendiert transportierten Sandfracht und die daraus resultierenden Bilanzen (Überschüsse, Defizite) ermöglichen die Abgrenzung von Erosions- und Akkumulationsstrecken, Aussagen zur Sohlentwicklung sowie die Volumenvorgabe für eine Geschiebemanagement.

Innerhalb des Verbundprojekts ordnen sich diese Teilprojekte zur Analyse morphodynamischer Prozesse somit als Grundlagenuntersuchungen für die Prognose zukünftiger Entwicklungen ein. Für die Beantwortung ökomorphologischer Fragestellungen kommt ihnen besondere Bedeutung zu, da die Besiedlung des Lebensraumes ‚Flusssohle‘ unmittelbar von den dort anzutreffenden Bedingungen (Korngrößenverteilung von Sohle und Geschiebe, sohlnaher Schwebstoffanteil, Dynamik des Geschiebetransports und der sohlnah transportierten Sandfraktionen, Lichtklima, Transportkörper) und deren Stabilität (zeitliche und räumliche Varianz) abhängt.

### III-4.2 Untersuchungsprogramm

#### III-4.2.1 Konzeptionelle Überlegungen

Aus dem Ansatz zur Ermittlung des auf eine Breitereinheit bezogenen Transports  $m_s$  des suspendierten Feststoffes

$$m_s = \int_0^h c(y) v(y) dy \quad (1)$$

( $y$  = Vertikalkoordinate bzw. Sohlabstand;  $h$  = Wassertiefe)

ist sofort ersichtlich, dass die Kenntnis der Konzentrations- und Geschwindigkeitsvertikalverteilungen  $c(y)$  und  $v(y)$  mitsamt ihrer Beziehungen und Korrelationen zu anderen hydraulischen und sedimentologischen Größen von zentraler Bedeutung für die Aufgabenstellung und die Auswahl der Messparameter ist. Die Frage nach dem Anteil des in Suspension befindlichen *Bettmaterials* des Flusses erweist sich als Frage der Separierung der Konzentrationsverteilung  $c(y)$  dieses Anteils von dem Dauerschwebstoff, der *wash load*. Nach den unten aufgeführten Ergebnissen kann die Abgrenzung zum Dauerschwebstoff nicht einfach über einen Korndurchmesser (z.B.  $d > 63\mu\text{m}$ ) erfolgen, sondern muss durch die in der Sohle vorkommende kleinste Kornfraktion und durch das (zumindest zeitweise) Überschreiten kritischer hydraulischer Bedingungen für den Übergang dieser Kornfraktion in Suspension beschrieben werden.

Entscheidende Größen für den Übergang eines Kornes in Suspension sind die aufwärts gerichtete Komponente des turbulenten Strömungsfeldes und die ihr entgegengesetzte Sinkgeschwindigkeit  $v_s$ . Da die vertikale Turbulenzintensität nach VAN RIJN (1993) die gleiche Größenordnung wie die Sohlschubspannungsgeschwindigkeit  $v_0^*$  annimmt, kann der für den Suspensionsbeginn kritische hydraulische Zustand durch den Quotienten  $v_0^* / v_s$  definiert werden. Dieser Quotient wird von mehreren Autoren (BAGNOLD 1966; ENGELUND 1965; VAN RIJN 1993; ZANKE 1982) mit  $v_0^*_{krit} / v_s = 0,25 \dots 1$  quantifiziert.

Ein anderer – in dieser Arbeit für die Ermittlung des suspendierten Bettmaterials gewählter – Weg zur Beschreibung des Suspensionsbeginns führt über das sich ausbildende vertikale Konzentrationsprofil des suspendierten Sandes. Unter der Annahme einer Vertikalverteilung nach ROUSE (1937) für eine Referenzkonzentration  $c_a$  in der Höhe  $a$  über der Sohle

$$\frac{c(y)}{c_a} = \left( \frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^z \quad \text{mit } z = v_s / \beta \kappa v_0^* \quad (2)$$

kann man die Schwebstoffzahl  $z$  zur Unterscheidung zwischen dem Transport von Geschiebe, suspendiertem Bettmaterial und Spülfracht benutzen. Je kleiner  $z$  ist, desto gleichmäßiger ist der Schwebstoff über die Vertikale verteilt und umgekehrt wird der Transport in unmittelbarer Sohlnähe durch einen großen  $z$ -Wert beschrieben. WANG & DITTRICH (1992) erhalten aus ihren Untersuchungen  $z < 0,06$  als Kriterium für den Transport von Spülfracht,  $0,1 < z < 3$  für den Transport von suspendiertem Bettmaterial und  $z > 5$  als Kriterium für den Geschiebetransport.

Daher sind für eine mathematische Beschreibung der Prozesse neben den zentralen Parametern Fließgeschwindigkeit und Konzentration weitere Parameter wie Sohlschubspannungsgeschwindigkeit, Sinkgeschwindigkeit und Schwebstoffzahl zu ermitteln.

### III-4.2.2 Parameter

Den obigen Überlegungen folgend wurden für die Beschreibung der Resuspensions-, Sedimentations- und Transportvorgänge folgende Parameter für die Untersuchungen ausgewählt:

#### sedimentologische Parameter:

- Korngrößenverteilung des suspendierten Sandes (vertikal differenziert)
- Korngrößenverteilung des Sohlenmaterials
- Korngrößenverteilung des Geschiebes

#### hydraulische Parameter:

- Strömungsgeschwindigkeit (Vertikalverteilung und querschnittsgemittelt)
- Sohlschubspannung bzw. Sohlschubspannungsgeschwindigkeit

#### die Verteilung und Bewegung des Sediments charakterisierende Parameter:

- Konzentration des suspendierten Sandes bzw. der suspendierten Schwebstoffe (Vertikalverteilung)
- Feststofftransport des suspendierten Sandes bzw. der suspendierten Schwebstoffe
- Feststofftransport des Geschiebes (für Teilprojekt HFBM).

Die für Suspensions- bzw. Sedimentationsprozesse wichtige Größe der Sinkgeschwindigkeit der Sandpartikel wird mit Hilfe der Sanddichte berechnet. Aus den Messungen zur Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit können zusätzlich zu den o.g. Parametern die äquivalenten Sand- oder die Gesamtrauheiten berechnet bzw. abgeschätzt werden.

Die nicht sohlrelevanten feineren Schwebstofffraktionen werden nur hinsichtlich ihrer Konzentrationsverteilung erfasst, Messungen ihrer Dichte sowie der Partikelgrößen- und Sinkgeschwindigkeitsverteilungen wurden – da im Rahmen des Projektziels nicht relevant – nicht durchgeführt.

### III-4.2.3 Datenbasis

Zur Auswertung standen folgende unabhängig vom Teilprojekt erhobene Daten zur Verfügung:

- die ab 1995 von der BfG durchgeführten Schwebstoff- und Geschwindigkeitsmessungen (3 bis 6 Messlotrechten mit jeweils 4 Messtiefen pro Querschnitt) für insgesamt ca. 20 Messquer-schnitte der Elbe



- von der BfG durchgeführte Untersuchungen zur Kornverteilung der Elbesohle (BFG 1994, SCHMIDT 1996)
- von der BfG durchgeführten Messungen zum Transport und zur Kornverteilung des Geschiebes an der Elbesohle
- von den Wasser- und Schifffahrtsämtern (WSÄ) durchgeführten Geschwindigkeits- und Abflussmessungen
- von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) bereitgestellte Daten zum Wasserspiegelgefälle.

Zur Ergänzung und Erweiterung dieser Datenbasis wurde im Rahmen dieses Teilprojektes eine große Zahl zusätzlicher Messungen (ausgewählte Schwebstoff- und Geschwindigkeitsvertikalprofile, Schubspannungsmessungen, Siebanalysen von Sohlproben und von suspendiertem Sand) durchgeführt.

#### III-4.2.4 Untersuchungsraum

Die Festlegung des Untersuchungsraumes erfolgte nach folgenden Gesichtspunkten:

- In den Vertikalprofilen der Konzentration des suspendierten Sandes soll im sohlnahen Bereich - zumindest bei höheren Abflüssen - auch eine sohlnah erhöhte Sandkonzentration als Hinweis für einen Resuspensions- bzw. Sedimentationsprozess zu finden sein.
- Für die Interpretation und eine spätere mathematische Modellierung der Messergebnisse ist ein regelmäßiges Querprofil mit guten Korrelationen zwischen Abfluss und anderen hydraulischen Größen vorteilhaft.
- Für die Ermittlung von Bilanzen der suspendierten Sandfraktion und für die Zuordnung von hydraulischen Parametern sollten im untersuchten Elbabschnitt mindestens zwei geeignete Messstellen existieren, zwischen denen keine größeren Zuflüsse oder Einleiter existieren.

Entsprechend diesen Forderungen und nach Auswertung eines Teils der verfügbaren Daten erwies sich die sogenannte Erosionsstrecke zwischen Mühlberg und Wittenberg insbesondere hinsichtlich einer hohen Konzentration des sohlnah suspendierten Sandes als Untersuchungsgebiet gut geeignet.

Darüber hinaus bietet der Querschnitt Mühlberg auf Grund seiner geometrischen Regelmäßigkeit gute Korrelationen zwischen den hydraulischen Größen und somit gute Voraussetzungen für mathematische Ansätze und Simulationen.

Für einen Teil der Parameter wurden insbesondere im Zeitraum 01/00 bis 09/00 im Rahmen einer Verlängerung der beiden Teilprojekte die Untersuchungen und Auswertungen auch auf die BfG-Messstellen außerhalb des o.g. Untersuchungsgebietes ausgedehnt.

### III-4.3 Untersuchungsmethoden für die Naturmessungen

SAUER (2000) dokumentieren im Endbericht der Teilprojekte eingehend die Untersuchungsmethoden, insbesondere die Mess- und Auswerteverfahren einschließlich der eingesetzten Geräte. Sie stellen sich zusammengefasst wie folgt dar.

#### Feststoffkonzentration

Zur Bestimmung von Vertikalverteilungen der Konzentration des suspendierten Sandes wird an einer oder mehreren Lotrechten im Profil jeweils in 5 bis 7 verschiedenen Tiefenstufen (BfG-Standard-Vielpunkt-messung: 4-6 Messlotrechten mit je 4 Tiefenstufen) durch Pumpen eine definierte Wasserprobe (50 l) entnommen, aus der mittels eines 63  $\mu\text{m}$ -Siebes die Sandfraktion separiert und anschließend in ein Papierfilter mit bekannter Leermasse gespült wird. Das mit der Sandprobe beladene Papierfilter wird im Trockenschrank mindestens 12 Stunden bei 90°C getrocknet und danach unter definierten Umgebungsbedingungen gewogen.

Die Konzentration des Feinschwebstoffes (< 63  $\mu\text{m}$ ) wird über die Filtration von 4 l einer durch das 63  $\mu\text{m}$ -Sieb geleiteten Wasserprobe mit anschließender Trocknung und Wägung des Filters ermittelt (DVWK 1986).

#### Kornverteilung des suspendierten Sandes

Zur Bestimmung der Kornverteilung des suspendierten Sandes wird aus entsprechend großen Wasserproben (je nach aktueller Konzentration einige hundert Liter bis einige Kubikmeter) mittels eines 63  $\mu\text{m}$ -Siebes der Sand gewonnen und nach Trocknung

(105°C, 24 h) und Glühen (550°C, 60 min) - ebenso wie die Sohl- und Geschiebeprouben - einer Siebanalyse unterzogen. Zum Erhalt einer hinreichenden Genauigkeit bei der Siebanalyse wurden Sandmengen von mindestens 5 Gramm angestrebt, was mit den vorhandenen Pumpen zu Messzeiten von ca. 8 Stunden oder mehr für eine einzelne Vertikalverteilung führen kann. Zur Reduzierung dieser Zeit wurde für die Messungen ab 4/98 eine leistungsfähigere Pumpe eingesetzt, die gegenüber den zuvor verwendeten Pumpen zusätzlich den Vorteil der Betriebsmöglichkeit ohne Vorfilter hatte.

### Strömungsgeschwindigkeit

Bei den Messungen zur Vertikalverteilung der Strömungsgeschwindigkeit wurden analog zu den Konzentrationsmessungen an einer oder mehreren Lotrechten im Profil jeweils in 5 bis 7 verschiedenen Tiefenstufen die Geschwindigkeiten mit Messflügeln und bei einigen Messungen zusätzlich auch mit einer magnetisch-induktiven Sonde ermittelt.

Zur genaueren Bestimmung des sohlnahen Profils wurde bei einer Messkampagne eine bereits im Rhein erprobte Mehrfach-Kleinflügelanordnung der BfG (5 hydrometrische Kleinflügel mit je 10 cm Abstand übereinander angeordnet) eingesetzt, die einen Minimalabstand von ca. 5 cm zur Sohle erlaubt. Eine analog aufgebaute Mehrfachanordnung von magnetisch-induktiven Geschwindigkeitssonden wurde bei diesen Messungen erprobt.

Zur besseren Charakterisierung des sohlnahen Strömungsfeldes und wegen des Gültigkeitsbereichs der Auswerteformeln wurde für die Mehrzahl der Messpunkte der normierte Sohlabstand im Bereich  $y/h < 0,6$  gewählt.

Zur Auswertung standen auch die Strömungsgeschwindigkeitswerte der BfG-Vielpunktmessungen zum Feststofftransport (4-6 Messlotrechten mit je 4 Tiefenstufen pro Messquerschnitt) zur Verfügung.

### Trübung

Für die Trübungsmessung wurden spezielle Tauchsonden, die nach dem 90°-Streulichtverfahren arbeiten, mit den zugehörigen Auswerteeinheiten sowie entsprechender Datenaufzeichnungstechnik (Datenlogger, Laptop) eingesetzt.

Die Messsonden wurden an einem schweren Tauchkörper fixiert und mit Hilfe eines Kranauslegers in verschiedene Messtiefen in die Elbe hinabgelassen. Zur Stabilisierung und Ausrichtung wurde der Tauchkörper zusätzlich mit einer Flosse versehen. Unmittelbar über der Trübungssonde befand sich ein Saugrohr, über welches zeitgleich zur Trübungsmessung Wasserproben für eine Schwebstoffmessung entnommen wurden. Pro Tiefenmesspunkt wurde das Trübungssignal alle 1-2 Sekunden über zumeist 2 Minuten aufgezeichnet und bei der späteren Auswertung gemittelt. Dadurch war es auch möglich, kurzzeitige starke Abweichungen (z.B. durch Blatteile o.ä.) zu eliminieren.

### Sohlschubspannung

Neben der zuvor beschriebenen indirekten rechnerischen Ermittlung der Sohlschubspannung wurde eine in der ehemaligen Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffsbau (jetzt TU Berlin) entwickelte Anordnung zur direkten Messung der an der Sohle angreifenden Kraft zur Schubspannungsmessung in der Elbe im Rahmen von zwei Messkampagnen (9/97 und 10/98) eingesetzt.

Das Schubspannungsmesssystem (vgl. Abb. III-4.1) besteht aus einem als stabiles Rohrgestell ausgebildeten Geräteträger mit Sensoren für Messtiefe, Strömungsgeschwindigkeit und Neigung und dem eigentlichen Schubspannungsmessgerät. Dieses besteht aus einer frei beweglichen Messplatte, die die angreifenden horizontalen und vertikalen Kräfte auf Biegestäbe mit Dehnungsmessstreifen überträgt. Über eine *Wheatstonesche* Brückenschaltung werden die Kräfte in analoge Spannungswerte umgewandelt, die nach der Umwandlung in Digitalwerte von einem Computer aufgezeichnet werden.

Zur Durchführung der Messungen wurden das auf dem Messschiff montierte System an einem Kran zur Sohle der Elbe abgesenkt und die Signale der Messwertgeber über ca. 15 Minuten aufgezeichnet.

Die halbautomatische Entfernung einer Schutzabdeckung der Messplatte zu Messbeginn und eventuell über die Messplatte laufendes Geschiebe konnten mit einer Videokamera online beobachtet werden. Bezüglich einer detaillierten Beschreibung des Verfahrens sei auf den ausführlichen Bericht verwiesen (HOHNBERG, 1997).



Abb. III-4.1 Einsatz der Schubspannungsmesseinrichtung bei Wittenberg.

#### Fehlerabschätzung für suspendierte Sandproben

Neben subjektiven Fehlern bei der oben beschriebenen Gewinnung von Proben des suspendierten Sandes (Volumenbestimmung, Überlaufen des Siebes, Verluste beim Überführen des Sandes in das Papierfilter, Handhabung der Filter u.ä.) können insbesondere bei dem Prozess der Vorbehandlung, Trocknung und Wägung der Papierfilter stärkere Schwankungen auftreten (s. SCHMIDT 1997).

Im Vergleich zum Feinschwebstoff, dessen Masse meist im Bereich von 5% der Filtermasse liegt und bei dem diese Probleme häufig auch zu relativ starken Streuungen bei den Konzentrationswerten führen, sind die Konzentrationswerte für den suspendierten Sand aufgrund der größeren Masse des Sandes ( $\geq 10\%$  der Filtermasse bei 50 Liter-Proben) von diesen Schwankungen in geringerem Maße betroffen. Wenn die subjektiven Fehler und äußere Störungen (z.B. Schifffahrt) vermieden werden können, erhält man für die Vertikalprofile des Sandes in der Regel reproduzierbare und eindeutige Verteilungen mit geringer Streuung (ca.  $\pm 10\%$ ).

#### Organische Bestandteile

Im Regelfall wird der mittels 63  $\mu\text{m}$ -Sieb separierte Sand keiner zusätzlichen Behandlung unterzogen.

Für die in den vorliegenden Untersuchungen durchgeführten Siebanalysen wurden die aus mehreren Hektolitern Elbwasser gewonnenen Sandproben nach dem Trocknen gewogen, dann einem Glühprozess (s.o.) unterzogen und anschließend wieder gewogen. Der aus der Massendifferenz berechnete Glühverlust betrug im Mittel ca. 27 % der Ausgangsmasse für oberflächennahe Proben und verringerte sich nur für sohlennahe Proben deutlich. Das heißt aber, dass – in Abhängigkeit von Jahreszeit, Abfluss und Probenahmeparametern – durch organische Bestandteile eine zu hohe Sandkonzentration vorgetäuscht wird. Bei Pumpen mit Vorfiltern wird ein Teil dieser organischen Bestandteile zurückgehalten, allerdings fehlen diese Bestandteile dann aber in einer Feststoffbilanz.

#### Einflüsse durch die Probenahmetechnik

Die Komponenten der Probenahmetechnik können zu systematischen Fehlern führen. Beispielsweise setzt sich das 63  $\mu\text{m}$ -Sieb bei der Probenahme mit zunehmender Zeit zu und hält auch Schluffpartikel zurück, die eine höhere Sandkonzentration vortäuschen. Umgekehrt kann eine zu geringe Sandkonzentration vorgetäuscht werden, wenn im Schutzfilter der Pumpe infolge Zusetzens Sand zurückgehalten wird oder sich bei anderen Bauarten im Schutzfiltergehäuse Sand ablagert.

Weiterhin muss nach den inzwischen vorliegenden Erfahrungen eine Anpassung des Durchmessers von Ansaugrohr und Saugschlauch an die Förderleistung der Pumpe vorgenommen werden. Neben eventuellen Fehlern (insbesondere im Sohlbereich) bei einer nicht isokinetischen Probenahme am Ansaugrohr spielt das Aussinken bereits angesaugter größerer Sandpartikel im Förderschlauch eine größere Rolle als bisher angenommen.

### III-4.4 Ergebnisse

#### III-4.4.1 Hydraulische Parameter

##### Querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeiten

Die querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeit  $v_{\text{mm}} = Q/A$  ist ein wichtiger integraler Parameter zur Charakterisierung der an einer Messstelle vorliegenden hydraulischen Bedingungen und damit auch des Suspensionspotenzials.

Zur Ermittlung von funktionalen Abhängigkeiten zwischen  $v_{\text{mm}}$  und  $Q$  für die Vielpunkt-Schwebstoff- bzw. Abfluss-Messstellen an der Elbe wurden die über einen längeren Zeitraum (1994-1999) vom

Messschiff "Elbegrund" (WSA Magdeburg) regelmäßig durchgeführten Abflussmessungen herangezogen. Für jeden Messquerschnitt wurden die mit Hilfe der "Software Q" berechneten  $v_{\text{mm}}$ -Werte über dem Abfluss dargestellt und mit Hilfe von Regressionen die  $v_{\text{mm}} = f(Q)$ -Beziehungen in der Form von Potenzfunktionen berechnet. Abb. III-4.2 zeigt beispielhaft die für die Messstellen Dresden, Mühlberg und Belgern ermittelten Funktionen.

Mit Ausnahme weniger Messstellen ergeben sich für den Korrelationskoeffizienten  $R$  Werte  $> 0,9$ , was auf eine allgemein gut gesicherte funktionale Beziehung zwischen den beiden Parametern hinweist. Die Gültigkeit dieser Beziehungen ist auf die Messbereiche (i.d.R. bis maximal bordvollen Abflüssen) begrenzt. Messungen bei hohen Abflüssen um MHQ liegen bisher nur an den Messstellen Belgern und Torgau vor, hier sind auch relative Abnahmen von  $v_{\text{mm}}$  infolge Ausuferungen zu beobachten. Diese Messpunkte wurden nicht in die Regressionsrechnung einbezogen. Die Koeffizienten der Potenzfunktionen  $v_{\text{mm}} = AQ^B$  sind in Tab. III-4.1 aufgeführt. In der *Anlage/CD-Rom* sind die zugehörigen Funktionsverläufe für 24 Messstellen samt der zugrunde liegenden Daten grafisch verfügbar.

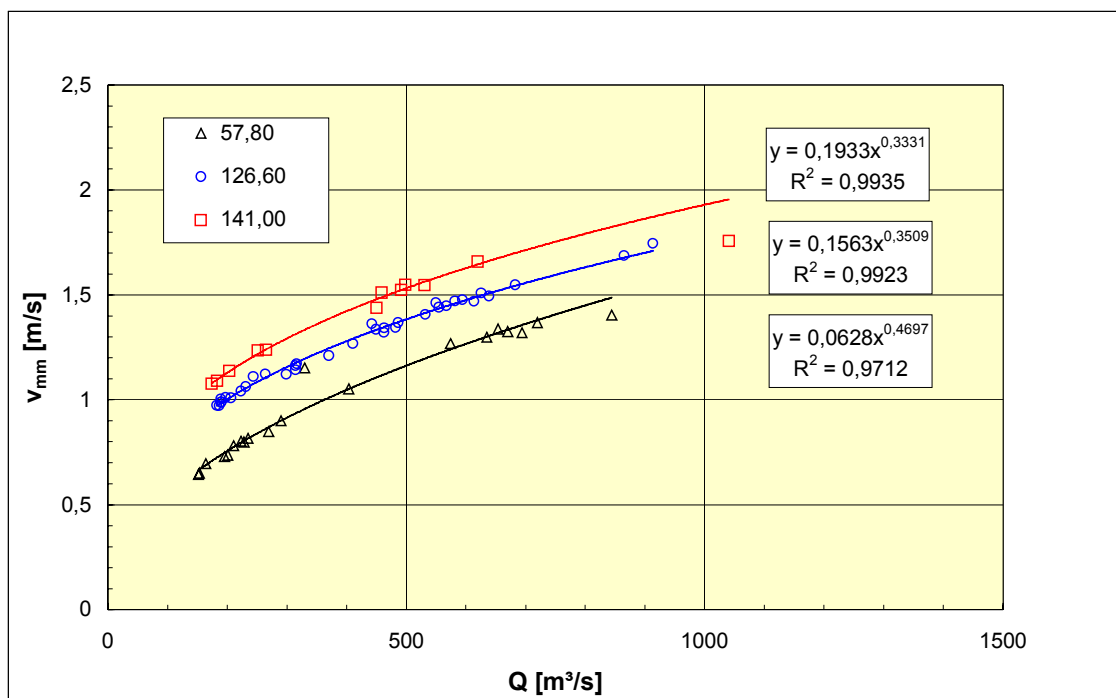
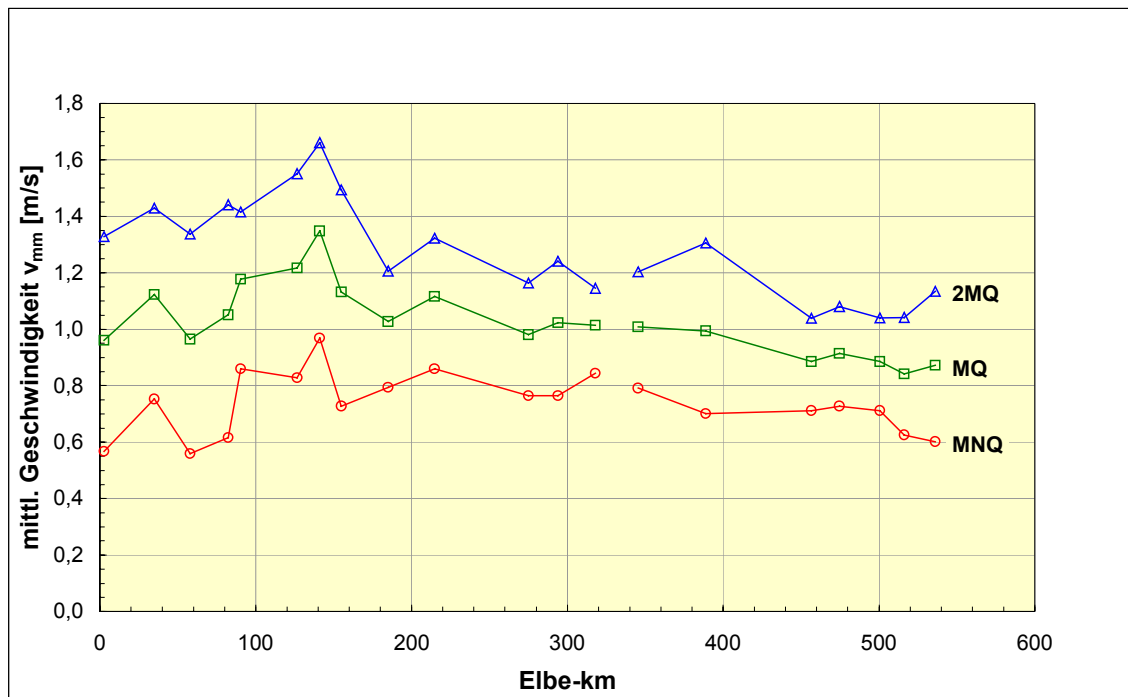


Abb. III-4.2 Mittlere Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Abflusses für die Messstellen Dresden (km 57,8), Mühlberg (126,6) und Belgern (141).

**Tab. III-4.1** Ermittelte Parameter der Regressionsfunktionen des Typs  $v_{min} = A \cdot Q^B$  für die querschnittsgemittelten Geschwindigkeiten  
 Datenbasis: Abflussmessdateien des Messschiffes "Elbegrund" (WSA Magdeburg) 1994-1999, Auswertung mit Software Q;  
 Anzahl der Messungen: N, Bestimmtheitsmaß: R<sup>2</sup>, Q\_MIN und Q\_MAX: untere/obere Grenze des Messwertintervalls.

Elbe-km	Messstelle	Bezugspegel	A	B	R <sup>2</sup>	N	Q_MIN	Q_MAX
2,600	Schöna	Dresden	0,0647	0,4663	0,9923	14	126	588
34,800	Pirna	Dresden	0,1489	0,3482	0,9911	10	141	770
57,800	Dresden	Dresden	0,0628	0,4697	0,9712	20	152	844
82,400	Meissen	Dresden	0,0743	0,4545	0,9935	6	180	582
90,400	Zehren	Dresden	0,2501	0,2656	0,9808	8	192	637
126,600	Mühlberg	Torgau	0,1563	0,3509	0,9923	35	182	914
141,000	Belgern	Torgau	0,2320	0,3008	0,9727	12	174	1040
155,000	Torgau	Torgau	0,1081	0,4011	0,9602	16	149	1313
185,000	Mauken	Torgau	0,2635	0,2321	0,9412	9	142	883
214,800	Wittenberg	Wittenberg	0,2587	0,2452	0,9059	24	168	951
275,000	Aken	Aken	0,2173	0,2478	0,8688	19	197	1077
294,000	Barby	Barby	0,1750	0,2778	0,8372	24	239	1397
318,100	Magdeburg	Barby	0,3335	0,1750	0,7813	12	251	717
321,000	Magdeburg	Barby	0,0644	0,4240	0,9163	8	297	1067
324,500	Magdeburg	Magdeburg	0,0715	0,4402	0,9976	4	236	748
327,000	Magdeburg	Magdeburg	0,1769	0,3049	0,8222	9	237	764
329,800	Magdeburg	Magdeburg	0,2942	0,2372	0,8852	16	232	1102
332,200	Magdeburg	Magdeburg	-	-	-	-	-	-
338,000	Magdeburg	Magdeburg	-	-	-	7	245	589
345,400	Niegripp	Magdeburg	0,1980	0,2559	0,9304	11	245	1285
388,800	Tangermünde	Tangermünde	0,0814	0,3929	0,9525	19	291	1356
456,600	Wittenberge	Wittenberge	0,1961	0,2301	0,6082	14	416	1390
474,500	Schnackenburg	Wittenberge	0,1901	0,2396	0,9180	11	284	936
500,560	Langendorf	Neu Darchau	0,1910	0,2338	0,6022	13	217	1277
516,160	Wilkenstorf	Neu Darchau	0,1101	0,3090	0,7803	12	331	1303
536,200	Neu Darchau	Neu Darchau	0,0710	0,3802	0,8012	19	453	1187
569,090	Hohnstorf	Neu Darchau	0,0092	0,6605	0,9595	5	516	1006



**Abb. III-4.3** Mittlere Geschwindigkeit an den Elbe-Messstellen für ausgewählte Abflüsse.

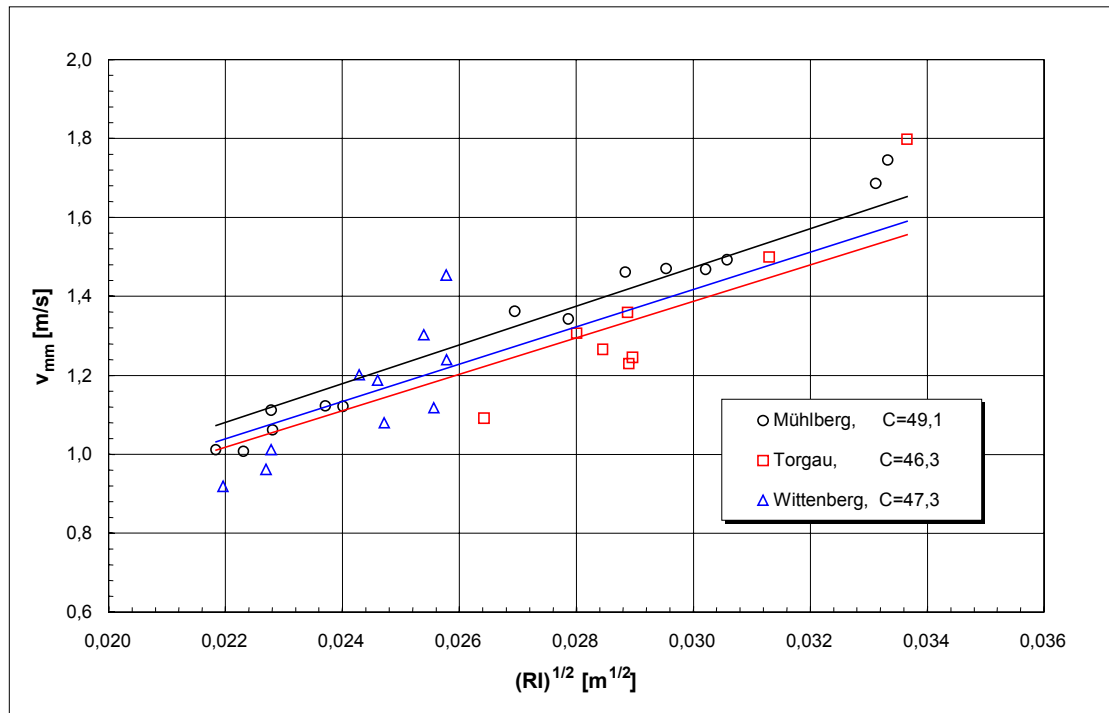


Abb. III-4.4 Ermittlung des Chézy-Koeffizienten  $C$  in  $m^{1/2}/s$  für drei Messquerschnitte der Erosionstrecke.

Abb. III-4.3 zeigt den Längsschnitt der mittleren Geschwindigkeit von km 2,5 bis km 569 für 20 Elbe-Messstellen und für drei charakteristische Abflüsse (MNQ, MQ, 2MQ). Die Stadtstrecke Magdeburg wurde hier ausgeklammert, da sich durch die Stromspaltung und den Domfelsen in diesem Bereich starke Abweichungen gegenüber den anderen Messstellen ergeben. Insgesamt sind bei Mittelwasser an den Messstellen der oberen und mittleren Elbe relativ gleichbleibende mittlere Geschwindigkeiten um 1 m/s zu beobachten – unterbrochen durch einen geringen Anstiegs bei Pirna (km 34,8) und einen Anstieg am Eingang der Erosionstrecke mit dem Maximum bei Belgern. Im Bereich der unteren Mittelelbe (etwa ab km 400) treten - hauptsächlich aufgrund des geringeren Sohlgefälles - etwa um 10-20 % geringere  $v_{mm}$ -Werte auf.

Mit Hilfe der querschnittsgemittelten Fließgeschwindigkeit und der Fließformel von Chézy wurden für einige Messstellen Abschätzungen der Sohlrauigkeit vorgenommen. Wenn man  $v_{mm}$  gegen  $(RI)^{1/2}$  aufträgt, so ergibt sich der im wesentlichen die Gerinnerrauigkeit beschreibende Chézy-Koeffizient dann als Anstieg der durch den Nullpunkt führenden linearen Regressionsgleichungen.

Abb. III-4.4 zeigt den für drei Messquerschnitte der Erosionstrecke auf diese Weise ermittelten Chézy-Koeffizienten, wobei am Querschnitt Mühlberg die für die theoretische Beziehung mit Abstand beste Korrelation gefunden wird.

### Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeit

Zur Charakterisierung des sohlernen Strömungsfeldes und des Kräfteangriffs auf die Sohlpartikel wurden mit verschiedenen Methoden Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeit ermittelt, und aus diesen die Sohl Schubspannungsgeschwindigkeiten berechnet (s.u.).

Im Regelfall ergaben die Messungen die nach dem logarithmischen Wandgesetz für den hydraulisch rauhen Bereich erwarteten logarithmischen Geschwindigkeitsverteilungen mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2 > 0,9$ , wobei bei der überwiegenden Mehrzahl der Verteilungen auch die oberflächennahen Messpunkte auf der Regressionskurve lagen, die sich aus den Messpunkten mit  $y/h < 0,6$  ergab.

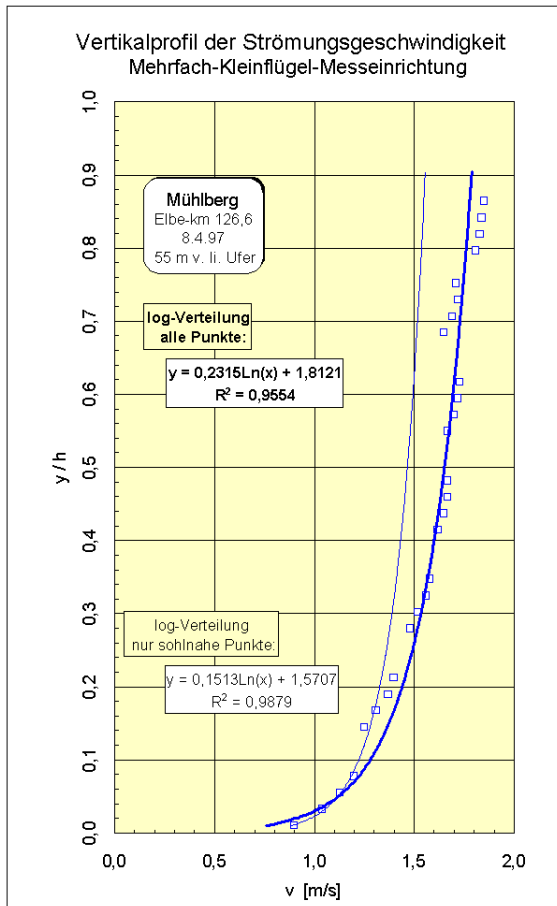


Abb. III-4.5 Vertikalprofil der Strömungsgeschwindigkeit.

Abb. III-4.6 zeigt Beispiele für mit verschiedenen Messanordnungen an den Messstellen Mühlberg und Wittenberg gemessene Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeit in halblogarithmischer Darstellung, wobei die drei bei km 126,6 gezeigten Messungen eine Abschätzung der Abweichungen zwischen den Messmethoden zulassen.

Zur genaueren Bestimmung des sohlnahen Profils wurde bei einigen Messungen die in Abschnitt III-4.3 beschriebene Mehrfach-Kleinflügelanordnung der BfG eingesetzt, die einen Minimalabstand von ca. 5 cm zur Sohle erlaubt und deren Ergebnisse ebenfalls eine logarithmische Geschwindigkeitsverteilung zeigen (Abb. III-4.5). Hierbei ergab ein Teil der Messungen leicht unterschiedliche Regressionen, in Abhängigkeit davon, ob nur die untersten (gleichzeitig aufgenommenen) Messpunkte oder alle Messpunkte herangezogen werden. Die Ursache hierfür war messtechnischer Natur, da für die unteren Punkte die Messapparatur mit den Kleinflügeln annähernd senkrecht auf der Sohle stand, während sie bei den weiteren Messpunkten in der Strömung hing und bei dem verwendeten 25 kg-Gewichtskörper eine leichte Schrägstellung wahrscheinlich ist.

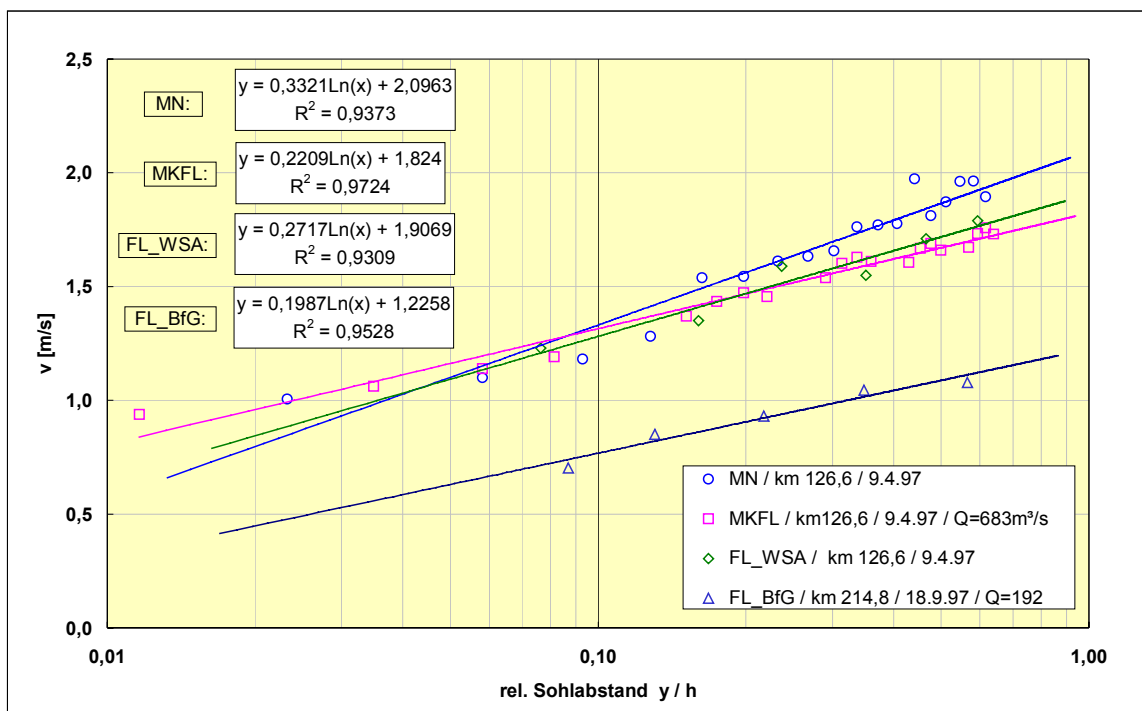


Abb. III-4.6 Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeit (FL = Standard-Messflügel, MKFL = Mehrfach-Kleinflügel, MN = Mehrfach-Nautilussonde).

Mit dem im Standardfall eingesetzten Messflügel der BfG bzw. des Messschiffes der WSV (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes) kann man sich der Sohle bis maximal 20 cm nähern, eine Interpolation bis zur ersten Rauheitsunterschicht bzw. bis zum Abstand  $k_s$  (äquivalente Sandrauigkeit) über der Sohle erscheint im vorliegenden Fall einer großen relativen Überdeckung ( $h/k_s \gg 5$ ) aber möglich (s. DITTRICH 1997).

Messungen der Strömungsgeschwindigkeit im aus biologischer Sicht interessanten Bereich  $< 5\text{cm}$  über der Elbsohle waren mit der verfügbaren Messtechnik nicht realisierbar und hätten darüber hinaus den Umfang der in diesem Projekt geplanten Arbeiten überstiegen. Ein Problem besteht darin, dass die für kleinere Fließgewässer bekannten Messmethoden für sohlnahe Strömungsverhältnisse, wie z.B. Mikroflügel (HEILMAIR 1997) oder die FST-Halbkugelmethode (STATZNER & MÜLLER 1989) nicht problemlos auf große Ströme wie die Elbe übertragen werden können.

### Sohlschubspannung / -geschwindigkeit

Wegen der zentralen Bedeutung der Sohlschubspannungsgeschwindigkeit  $v_0^* = (\tau/\rho)^{0,5}$  für den abflussabhängigen Suspensionsbeginn an der Flusssohle wurde dieser Parameter nach verschiedenen Methoden ermittelt.

Die im Abschnitt III-4.3 beschriebene direkte Messung der an der Sohle wirkenden Kraftkomponente in Fließrichtung erfordert in der Praxis einen hohen logistischen, personellen und materiellen Aufwand, so dass sie sich nicht als Routine-messung für mehrere Messquerschnitte und Abflusssituationen eignete.

Deshalb wurden mit Hilfe eigener Auswerteprogramme aus den Messdateien der vom WSA Magdeburg seit 1994 durchgeführten ca. 500 Abflussmessungen in der Elbe insgesamt etwa 6000 vertikale Geschwindigkeitsprofile (ca. 12 Messlotrechten pro Abflussmessung) rechentechnisch ermittelt und aus diesen anschließend die Sohlschubspannungsgeschwindigkeiten berechnet.

Unter der Annahme der Gültigkeit des logarithmischen Wandgesetzes der Geschwindigkeitsverteilung für den hydraulisch rauen Bereich in der Schreibweise (z.B. VAN RIJN 1990)

$$\frac{v(y)}{v_0^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{y}{y_0} \right) \quad (3)$$

erhält man  $v_0^*$  aus dem Anstieg der Regressionsgeraden der halblogarithmischen Darstellung  $v = f(y)$  bzw.  $f(y/h)$  mit  $\kappa = 0,4$ . Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Gültigkeitsbereich des logarithmischen Wandgesetzes bei naturnahen Fließgewässern nur bis zu normierten Sohlabständen von  $y/h = 0,6$  ( $h =$  Wassertiefe) angesetzt werden kann (NEZU & NAKAGAWA 1993). Aus  $v_0^*$ ,  $h$  und  $v_1 = v(y/h = 1)$  lässt sich darüber hinaus auch die äquivalente Sandrauigkeit  $k_s$  berechnen.

In einigen Fällen, in denen die vertikal gemittelte Geschwindigkeit  $v_m$  bekannt ist, kann  $v_0^*$  über die Beziehung

$$\frac{v_m}{v_0^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( 11 \frac{h}{k_s} \right) \quad (4)$$

ermittelt werden ( $k_s$  aus der Sohlrauigkeit abgeschätzt und  $h \gg k_s$ ).

Abb. III-4.7 zeigt für drei Messquerschnitte beispielhaft die nach Gleichung (3) mit den o.g. vertikalen Geschwindigkeitsprofilen ermittelten Potenzfunktionen für die Abhängigkeit der Sohlschubspannung vom Abfluss im Bereich der Flussmitte. Die in die Darstellung eingetragenen querschnittsgemittelten Messwerte der direkten Schubspannungsmessungen an den Messstellen Wittenberg und Mühlberg zeigen erhebliche Abweichungen von den berechneten Werten, die nicht abschließend geklärt werden konnten. Die starken Schwankungen zwischen Einzelmessungen bei der direkten Schubspannungsmessung weisen auf Probleme hin, die möglicherweise durch Transportkörper verursacht werden (z.B. Messung vor, auf, hinter einer Düne).

In der Anlage/CD-Rom sind die für insgesamt 23 Messstellen aus Regression ermittelten funktionalen Zusammenhänge zwischen Sohlschubspannung und Abfluss als Grafiken verfügbar, die auch die Datengrundlagen zeigen. Die Koeffizienten der Potenzfunktionen  $\tau_0^* = A Q^B$  sind in Tab. III-4.2 aufgeführt, ergänzt um daraus resultierende (berechnete) Sohlschubspannungen für die Abflusszustände MNQ, MQ und 2MQ.



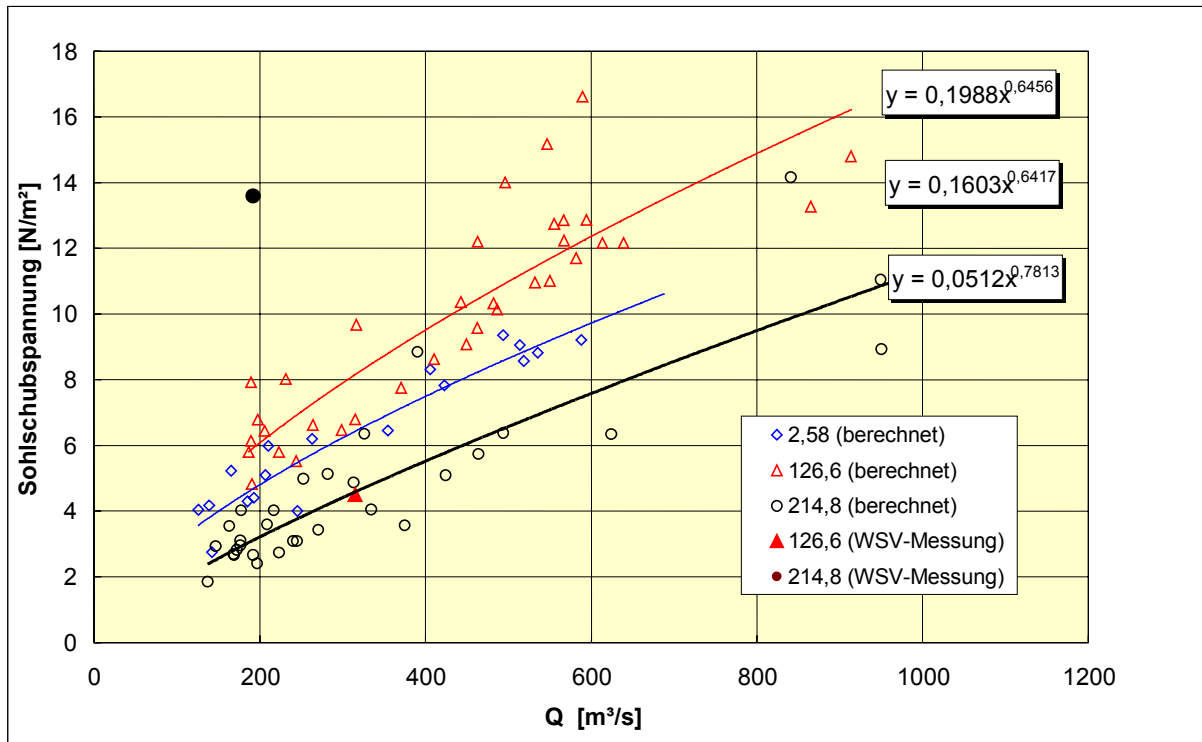


Abb. III-4.7 Sohlschubspannungen für die Messstellen Schmilka (km 2,58), Mühlberg (km 126,6) und Wittenberg (km 214,8) im Flussmittbereich als Funktion des Abflusses.

Tab. III-4.2 Ermittelte Parameter der Regressionsfunktionen des Typs  $\tau = A \cdot Q^B$  in  $[N/m^2]$  für die Sohlschubspannung (berechnet aus vertikalen Geschwindigkeitsverteilungen der Abflussmessdateien des Messschiffes "Elbegrund") Bestimmtheitsmaß:  $R^2$ ; MNQ, MQ, MHQ in  $[m^3/s]$ : Abflusskennwerte aus langjährigen Reihen [DGJ 1993].

Elbe-km	Messstelle	A	B	R <sup>2</sup>	MNQ	MQ	2MQ	$\tau$ (MNQ)	$\tau$ (MQ)	$\tau$ (2MQ)
2,60	Schöna	0,1603	0,6417	0,85	105	322	644	3,2	6,5	10,2
34,80	Pirna	0,1549	0,6632	0,90	105	322	644	3,4	7,1	11,3
57,80	Dresden	0,0419	0,8265	0,94	105	322	644	2,0	5,0	8,8
82,40	Meißen	0,0168	1,0053	0,88	105	322	644	1,8	5,6	11,2
90,40	Zehren	0,9307	0,3435	0,47	105	322	644	4,6	6,8	8,6
126,60	Mühlberg	0,1988	0,6456	0,81	116	337	674	4,3	8,5	13,3
141,00	Belgern	1,2572	0,3548	0,30	116	337	674	6,8	9,9	12,7
155,00	Torgau	0,0503	0,8190	0,63	116	337	674	2,5	5,9	10,4
167,85	Mockritz	0,6523	0,3678	0,75	116	337	674	3,7	5,5	7,2
185,00	Mauken	0,5435	0,4174	0,72	116	337	674	4,0	6,2	8,2
214,80	Wittenberg	0,0512	0,7813	0,82	134	349	698	2,4	5,0	8,5
275,00	Aken	0,3011	0,4799	0,67	161	438	876	3,4	5,6	7,8
294,00	Barby	0,3551	0,4204	0,47	202	553	1106	3,3	5,1	6,8
318,10	Magdeburg	1,3042	0,2214	0,32	202	553	1106	4,2	5,3	6,2
321,00	Magdeburg	0,0032	1,1425	0,90	202	553	1106	1,4	4,4	9,6
327,00	Magdeburg	0,5839	0,4601	0,54	224	557	1114	7,0	10,7	14,7
345,40	Niegripp	0,3069	0,4333	0,51	224	557	1114	3,2	4,8	6,4
388,80	Tangermünde	0,0406	0,7387	0,85	240	567	1134	2,3	4,4	7,3
456,60	Wittenberge	0,0451	0,7010	0,76	272	681	1362	2,3	4,4	7,1
474,50	Schnackenburg	0,1373	0,4895	0,43	272	681	1362	2,1	3,3	4,7
500,56	Langendorf	0,0500	0,6819	0,68	277	714	1428	2,3	4,4	7,1
516,16	Wilkenstorf	0,0649	0,6125	0,69	277	714	1428	2,0	3,6	5,6
536,20	Neu Darchau	0,0608	0,6229	0,46	277	714	1428	2,0	3,6	5,6

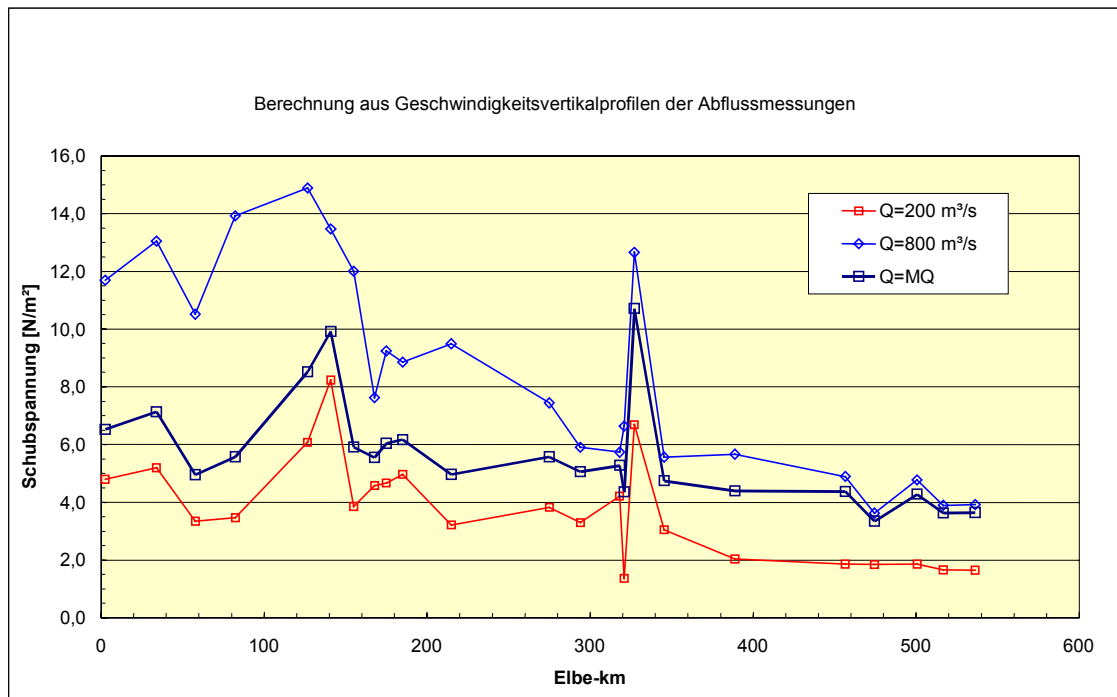


Abb. III-4.8 Längsschnitt der Sohlschubspannung im Flussmittbereich für ausgewählte Abflüsse.

Ein mit Hilfe der Funktionen erstellter Längsschnitt der Sohlschubspannung für alle Elbe-Messstellen für drei Abflüsse ist in Abb. III-4.8 dargestellt. Ein Vergleich mit berechneten Schubspannungen nach  $\tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot I$  aus morphologischen Daten (Gefälle, Wassertiefe bei MW im Talweg) zeigt qualitativ gute Übereinstimmungen (SAUER 2000). Es muss darauf hingewiesen werden, dass - im Unterschied zu den querschnittsgemittelten Geschwindigkeiten - die gezeigte Funktionsermittlung noch nicht für alle Messstellen als ausreichend gesichert angesehen werden kann. Bei einigen Messstellen fehlen noch Messungen im oberen Abflussbereich, andere sind auf Grund einer zu geringen Anzahl von Messungen noch nicht ausreichend gut korreliert (z.B. Messstelle km 167,8).

### III-4.4.2 Schwebstoffverteilung

#### Feinschwebstoff ( $d < 63 \mu\text{m}$ )

Abb. III-4.9 zeigt ein Beispiel einer Verteilung der Konzentration der Feinschwebstoffe mit einem Korndurchmesser  $< 63 \mu\text{m}$ , d.h. unterhalb der Korngröße von Feinsand. Das Bild zeigt die für *wash load* charakteristische gleichmäßige Verteilung für die über den gesamten Querschnitt verteilten Messlotrechten.

Diese Verteilungen stellen sich sowohl bei unterschiedlich hohen Abflüssen als auch bei den jahreszeitlich, hydrologisch oder anthropogen bedingten unterschiedlichen Konzentrationen ein.

Die zur Charakterisierung der Schwebstoffverteilung durchgeführten Trübungsmessungen zeigten ebenfalls sehr gleichmäßige Verteilungen in den Vertikalen (Abb. III-4.10) und über den Messquerschnitt. Aus diesen und weiteren Trübungs- und Schwebstoffmessungen in der Elbe wurden Korrelationen zwischen der Schwebstoffkonzentration und der Trübung abgeleitet (BUSSE 1998). Diese Korrelationen sind jedoch nicht allgemeingültig, sondern - wie nach den Streutheorien von Mie bzw. Rayleigh (siehe z.B. JAWORSKI & DETLAF 1972) zu erwarten - nur für die ihnen zu Grunde liegenden Kornverteilungen und Materialparameter (z.B. Brechungsindex, organischer Anteil) des Schwebstoffs anwendbar. Insbesondere ist schon für das „grobkörnigere“ Material der Feinsandfraktion ein deutlich schwindender Beitrag zum Messsignal der Trübung zu erwarten, weshalb die Trübungsmessung für die Charakterisierung von suspendiertem Sand nicht eingesetzt wurde. Die Untersuchungen zur Feinschwebstofffraktion wurden im Rahmen des Projektes nicht weiter ausgedehnt.

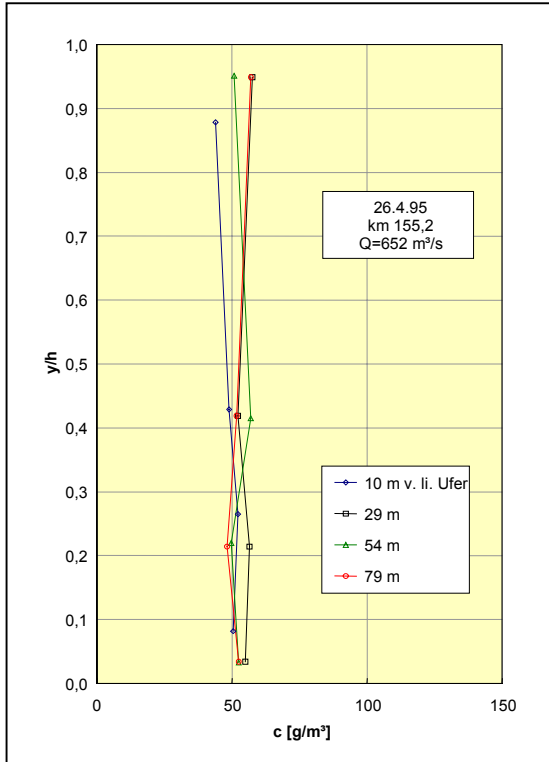


Abb. III-4.9 (links): Vertikalverteilung der Konzentration von Feinschwebstoff bei Torgau für mehrere Messlotrechten.

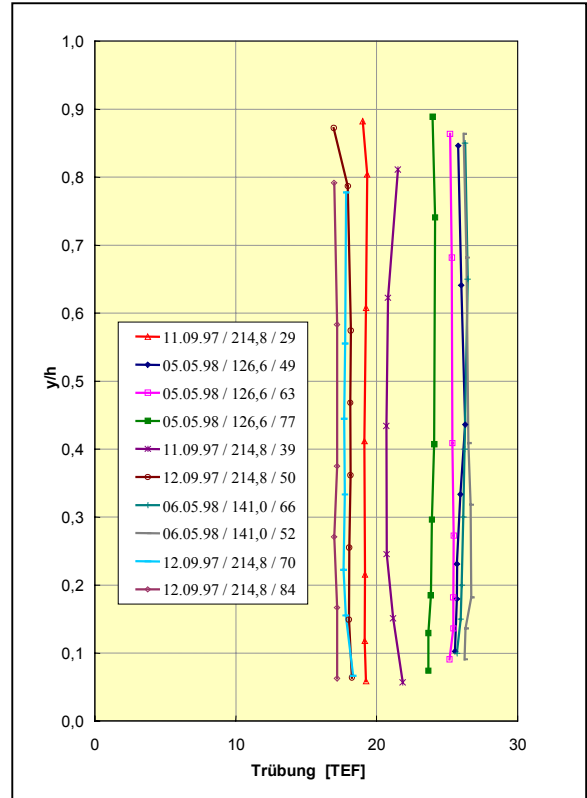


Abb. III-4.10 (rechts): Vertikalverteilung der Trübung an den Messstellen Mühlberg, Belgern und Wittenberg für mehrere Messlotrechten.

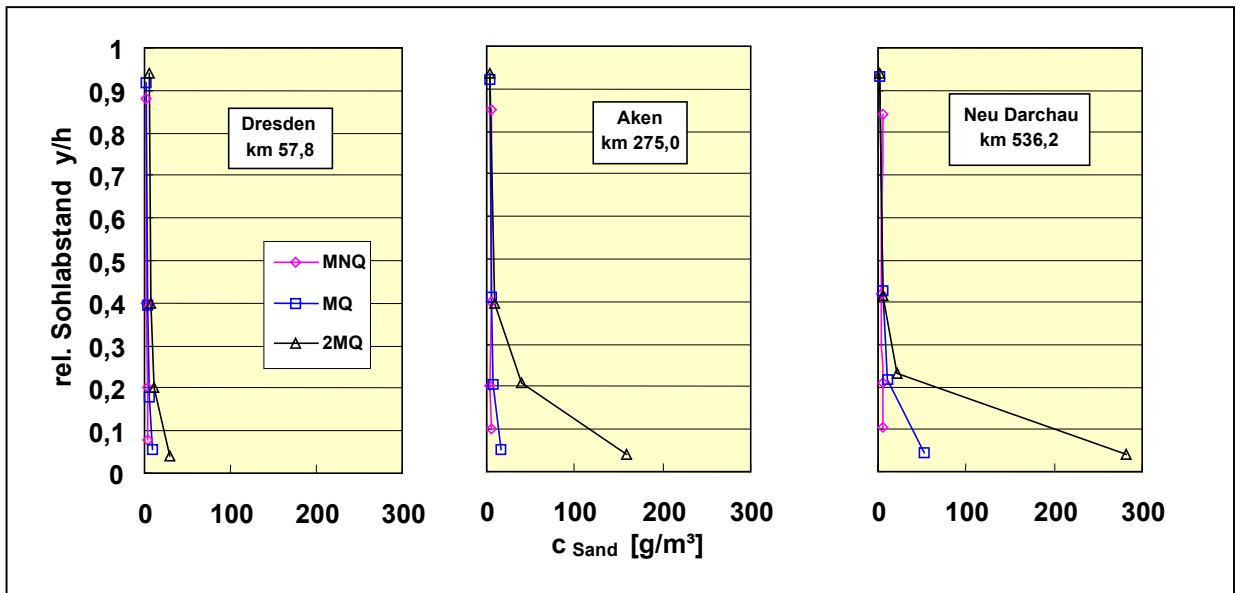


Abb. III-4.11: Vertikalprofile der Konzentration des suspendierten Sandes für die Elbe-Messstellen Dresden, Aken und Neu Darchau bei unterschiedlichen Abflüssen (MNQ, MQ, 2MQ).

### III-4.4.3 Suspenderter Sand ( $d > 63 \mu\text{m}$ )

Charakteristische Vertikalverteilungen der Konzentration des suspendierten Sandes sind in Abb. III-4.11 für drei Messstellen aus unterschiedlichen Elbeabschnitten (Oberlauf, obere und untere Mittel-elbe) dargestellt.

Bei geringen Abflüssen weist die überwiegende Mehrzahl der Profile eine in der Vertikalen (und auch über die Gewässerbreite) fast gleichmäßig verteilte Sandkonzentration von ca. 2...7  $\text{g/m}^3$  auf. Abb. III-4.12 zeigt, dass im gesamten Elbeverlauf zwischen Schmilka und Neu Darchau in der Nähe der Wasseroberfläche eine nahezu orts- und abflussunabhängige Sandkonzentration von im Mittel 3,6  $\text{g/m}^3$  auftritt (3,1  $\text{g/m}^3$  bei Nichtberücksichtigung höherer Abflüsse). Mit zunehmendem Abfluss findet ein Anstieg der Konzentration statt. Dieser Anstieg ist in Sohlhöhe am stärksten, nimmt - von der Sohle aus - etwa bis zur halben Gewässertiefe stark ab, führt jedoch bis auf wenige Ausnahmen nicht zur Erhöhung der Konzentration in Oberflächennähe. Wie Abb. III-4.11 zeigt, ist im Längsverlauf der Elbe bei vergleichbar hohen Abflussverhältnissen (2MQ) eine deutliche Zunahme dieses sohnahen Anstiegs der Sandkonzentration zu beobachten. Dies

wird auch durch Abb. III-4.13, in der alle gemessenen *sohlnahen* Sandkonzentrationen im Längsverlauf der Elbe aufgetragen sind, bestätigt (Skalierung!). Während für Messungen bei geringen Abflüssen ( $< 300 \text{ m}^3/\text{s}$ ) sich über alle Messstellen gemittelt sohlnahe Sandkonzentrationen von 6,7  $\text{g/m}^3$  ergeben, zeigt sich bei Berücksichtigung aller Messungen (Mittelwert 19,0  $\text{g/m}^3$ ) schon ein deutlicher Trend im Längsverlauf.

Die Verteilung dieser sohlnahen Konzentrationen im Querprofil einer Messstelle folgt in der Regel der Verteilung der Fließ- bzw. Schubspannungsgeschwindigkeiten und bewirkt bei höheren Abflüssen etwa in Strommitte ein Maximum an suspendiertem Sand sowie eine deutliche Abnahme zum Ufer hin (vgl. hierzu Abb. III-4.21 und Abb. III-4.22).

Messungen zur Vertikalverteilung der verschiedenen Sandfraktionen (s. Kap. III-4.4.4) bestätigen die Annahme, dass neben einer durch die turbulente Strömung gleichmäßig verteilten, nicht sohlrelevanten Feinsandfraktion mit zunehmenden Abfluss Mittel- und Grobsandfraktionen des Sohlmaterials in Suspension übergehen. Diese gelangen wegen ihrer größeren Sinkgeschwindigkeit nur in geringem Maße bis in die Nähe der Oberfläche.

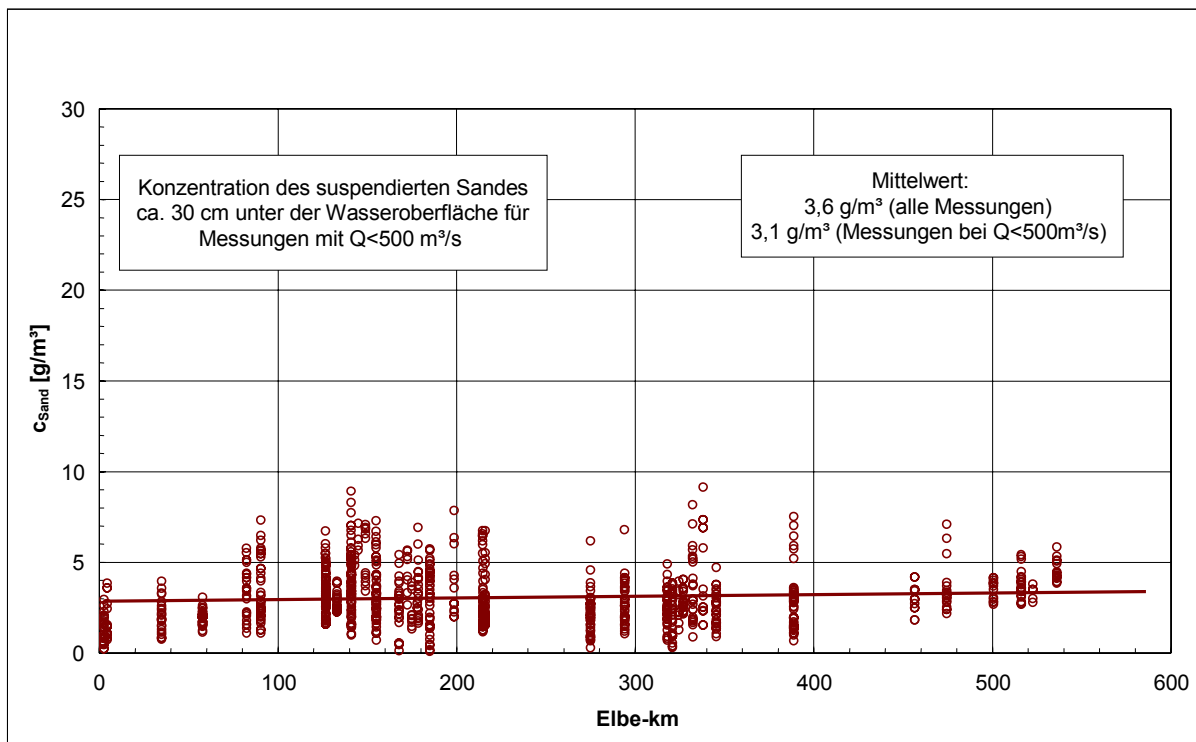


Abb. III-4.12: Oberflächennahe Konzentration des suspendierten Sandes im Längsverlauf.

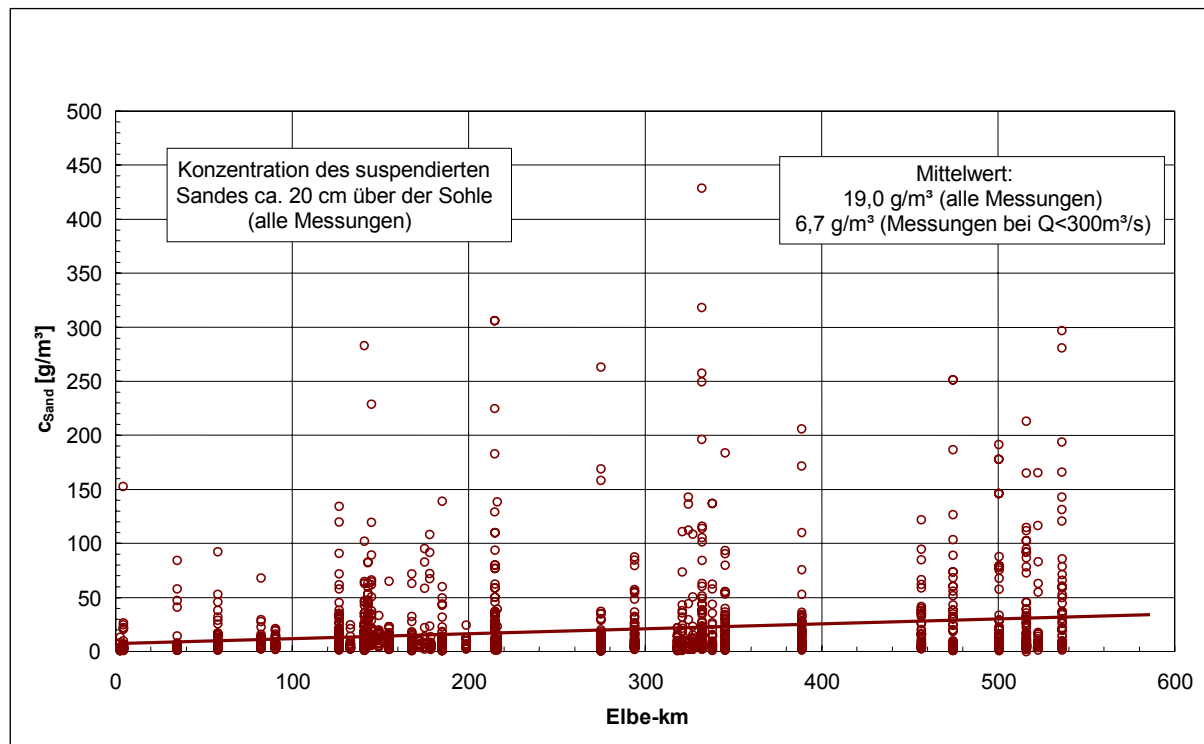


Abb. III-4.13: Sohl nahe Konzentration des suspendierten Sandes im Längsverlauf.

#### III-4.4.4 Kornverteilung des suspendierten Sandes

Aus sedimentologischen Untersuchungen der Elbesohle (BFG 1994) ist bekannt, dass Feinsandanteile ( $< 0,2$  mm) so gut wie nicht ( $< 1\%$ ) am Sohlaufbau beteiligt sind, während Grob- und Mittelsande zusammen mit einem Anteil von ca. 15 % an der tschechischen Grenze bis zu ca. 90 % bei km 575 in der Sohle vorkommen. Vertikal aufgelöste Messungen der Kornverteilung des suspendierten Sandes können deshalb wertvolle Hinweise zur Herkunft des suspendierten Sandes (Sohle, Einträge) und damit zu seinem bettbildenden Anteil geben.

Als Beispiel für derartige an verschiedenen Elbe-Messstellen und bei unterschiedlichen Abflüssen durchgeführte Messungen zeigt Abb. III-4.14 die Kornsummenkurven für einen relativ hohen Abfluss von  $841 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $MQ_{1951/1993} = 349 \text{ m}^3/\text{s}$ ) an der Messstelle Wittenberg. Mit wachsender Entnahmetiefe weisen die Kornverteilungen für den suspendierten Sand bei dieser Messung, wie auch bei allen anderen Messungen, gegenüber der oberflächennahen Kurve eine Verschiebung zu größeren Korndurchmessern auf.

Der mittlere Korndurchmesser  $d_m$  nach Meyer-Peter, Müller liegt bei der dargestellten Messung in der Nähe der Wasseroberfläche bei  $0,25$  mm und im sohl nahen Bereich bei  $0,53$  mm. Die Auswertungen ergaben, dass mit abnehmenden Abflüssen die Kornsummenkurven der unteren Tiefenstufen näher an die oberflächennahe Kurve heran rücken, und sich gleichzeitig – infolge abnehmender Resuspension von Sohlmaterial – die  $d_m$ -Werte aller Tiefenstufen dem Oberflächenwert annähern.

Bei den bisher durchgeführten Messungen des suspendierten Sandes im Elbeabschnitt zwischen Mühlberg und Wittenberg lag der mittlere Durchmesser  $d_m$  für die oberflächennahen Messpunkte zwischen  $0,08$  und  $0,25$  mm, und für die sohl nahen Punkte zwischen  $0,09$  und  $0,54$  mm.

Aus den Kornverteilungen der einzelnen Tiefenpunkte und den dazu gehörenden Konzentrationsprofilen lassen sich auch Vertikalprofile einzelner Fraktionen des suspendierten Sandes errechnen. Abb. III-4.15 zeigt eine solche Verteilung für die Messstelle Wittenberg aus Abb. III-4.14.

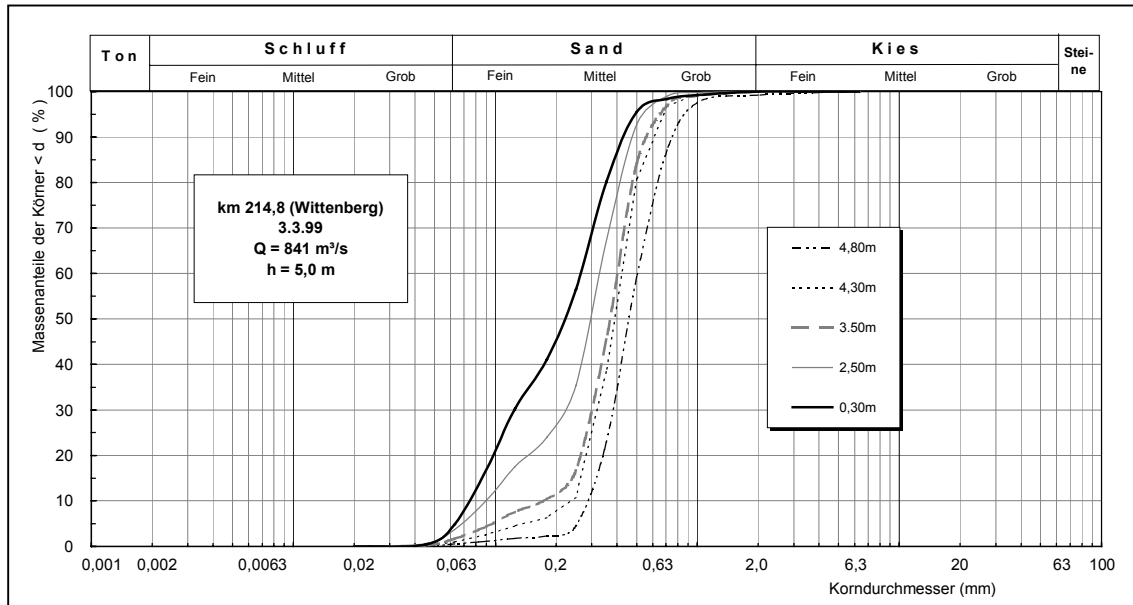


Abb. III-4.14: Kornverteilung des suspendierten Sandes für 5 verschiedene Abstände von der Wasseroberfläche (Messstelle Wittenberg).

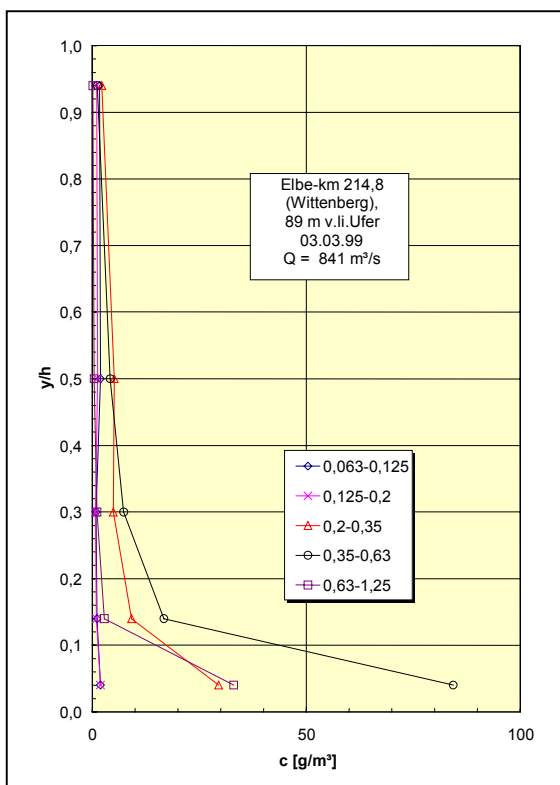


Abb. III-4.15: Vertikalprofile der Sandfraktionen (Korngrößen in mm) an der Messstelle Wittenberg.

Für eine detailliertere Betrachtung sind in dieser Abbildung die Fraktionen Fein-, Mittel- und Grobsand jeweils noch einmal unterteilt. Die Teilfraktion des Grobsands mit Korngrößen > 1,25 mm war in den Proben nicht enthalten. Während sich die (hier nahezu identischen) Konzentrationen der beiden

Feinsandfraktionen im Tiefenverlauf kaum verändern, führt aus der Sohle resuspendierter Mittelsand im unteren Viertel zu einem hohen Konzentrationsanstieg der Mittelsandfraktionen. Auch bei dem in Oberflächennähe nicht vorhandenen Grobsand ist im sohnahen Bereich ein deutlicher Konzentrationsanstieg zu verzeichnen. Messungen bei niedrigen Abflüssen (unterhalb MQ) zeigen in diesem Elbeabschnitt für den Feinsand eine mit Abb. III-4.15 vergleichbare Konzentration und Vertikalverteilung, für den Mittelsand Konzentrationen etwas unterhalb der des Feinsandes bei nahezu gleichmäßiger Vertikalverteilung und nur partiell vorhandenen Grobsand mit Konzentrationen < 1 g/m<sup>3</sup>.

Die geschilderten Verhältnisse werden in der Abb. III-4.16 für zwei Abflusssituationen an der Messstelle km 321,0 besonders deutlich. Hier sind die Konzentrations-Vertikalverteilungen für die Fraktionen Fein-, Mittel- und Grobsand in getrennten Balkendiagrammen für 5 verschiedene (normierte) Abstände von der Flusssohle dargestellt. Das Bild links zeigt bei einem geringen Abfluss von 333 m<sup>3</sup>/s (MQ<sub>1931/1993</sub> = 557 m<sup>3</sup>/s) gleichmäßige Vertikalverteilungen für Fein- und Mittelsand. Bei dem hohen Abfluss von 1219 m<sup>3</sup>/s (Bild rechts) bleibt die Konzentration und Verteilung des (nicht in der Sohle enthaltenen) Feinsandes praktisch unverändert, während die Konzentration des Mittel- und Grobsandes den beschriebenen Konzentrationsanstieg durch resuspendiertes Sohlmaterial zeigt.

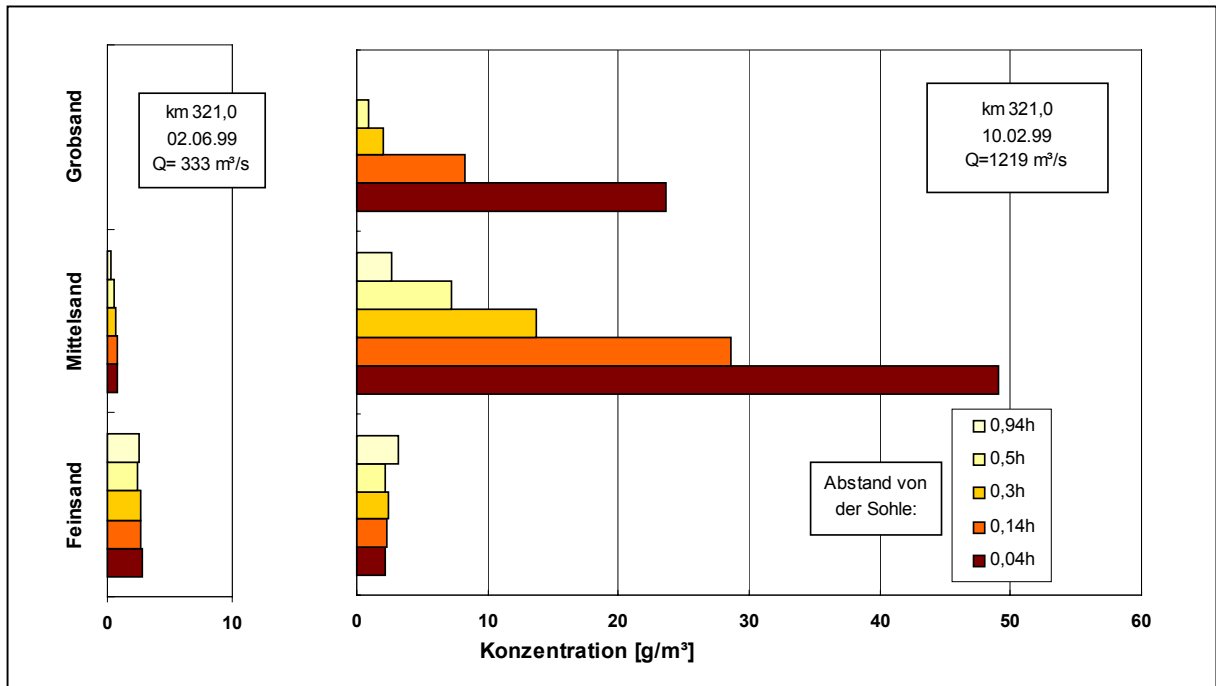


Abb. III-4.16: Konzentration von Sandfraktionen an der Messstelle km 321,0 (Magdeburg) für 5 Tiefenstufen  
links:  $Q = 333 \text{ m}^3/\text{s}$ ; rechts:  $Q = 1219 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Weitere an verschiedenen Elbe-Messstellen und bei unterschiedlichen Abflusssituationen ermittelte Konzentrations-Vertikalverteilungen für die Fraktionen Fein-, Mittel- und Grobsand sind in der *Anlage/CD-Rom* als Grafiken abgelegt: km 327,0 / Magdeburg bei  $Q=331 \text{ m}^3/\text{s}$ ; km 509,0 nahe Wilkenstorf bei  $571 \text{ m}^3/\text{s}$ ; km 516,16 / Wilkenstorf bei  $1305 \text{ m}^3/\text{s}$ ; km 474,5 / Schnackenburg bei  $1370 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

#### III-4.4.5 Schwebstoffzahl $z$

Die durch Gleichung (2) definierte, die Vertikalverteilung der Schwebstoffkonzentration und den Suspensionsgrad beschreibende Schwebstoffzahl  $z$  lässt sich aus der Gleichung nur bei Kenntnis der in der Regel unbekannt Referenzkonzentration  $c_a$  berechnen. Dieses Problem kann umgangen werden, indem man beide Seiten der Gleichung logarithmiert. Der Anstieg der Ausgleichsgeraden der Darstellung  $c = f((h-y)/y)$  ergibt dann unmittelbar die Schwebstoffzahl  $z$  (siehe z.B. VANONI 1977).

Abb. III-4.17 zeigt Vertikalprofile des suspendierten Sandes in doppelt-logarithmischer Darstellung für

drei Vertikalen in der Nähe der Flussmitte (45-65 m Abstand vom linken Ufer) für den Messquerschnitt Mühlberg.

Die Messpunkte lassen sich mit hinreichend guter Genauigkeit durch eine Gerade ausgleichen, aus den Anstiegen ergeben sich  $z$ -Werte zwischen 0,19 und 0,26, die nach WANG & DITTRICH (1992) (vgl. Abschnitt III-4.2.1) auf den Transport suspendierten Sohlmaterials hinweisen. Die so ermittelten  $z$ -Werte beschreiben allerdings nur das für den gesamten suspendierten Sand gemittelte Teilchenkollektiv, charakterisiert durch seinen mittleren Korndurchmesser  $d_m$ . Aus diesem Grunde wurden aus den Vertikalprofilen der Teilfraktionen des suspendierten Sandes (vgl. Abb. III-4.15) zusätzlich die Schwebstoffzahlen für diese Teilfraktionen ermittelt. Abb. III-4.18 zeigt die Vertikalprofile von 6 solchen Teilfraktionen des suspendierten Sandes für die in Abb. III-4.16 (b) dargestellte Messung am km 321,0 bei einem Abfluss deutlich oberhalb  $2MQ$ . Es ergeben sich für die beiden Feinsandteilfraktionen Schwebstoffzahlen  $< 0,1$ , während die größeren Sandfraktionen Werte zwischen 0,30 und 0,84 aufweisen.

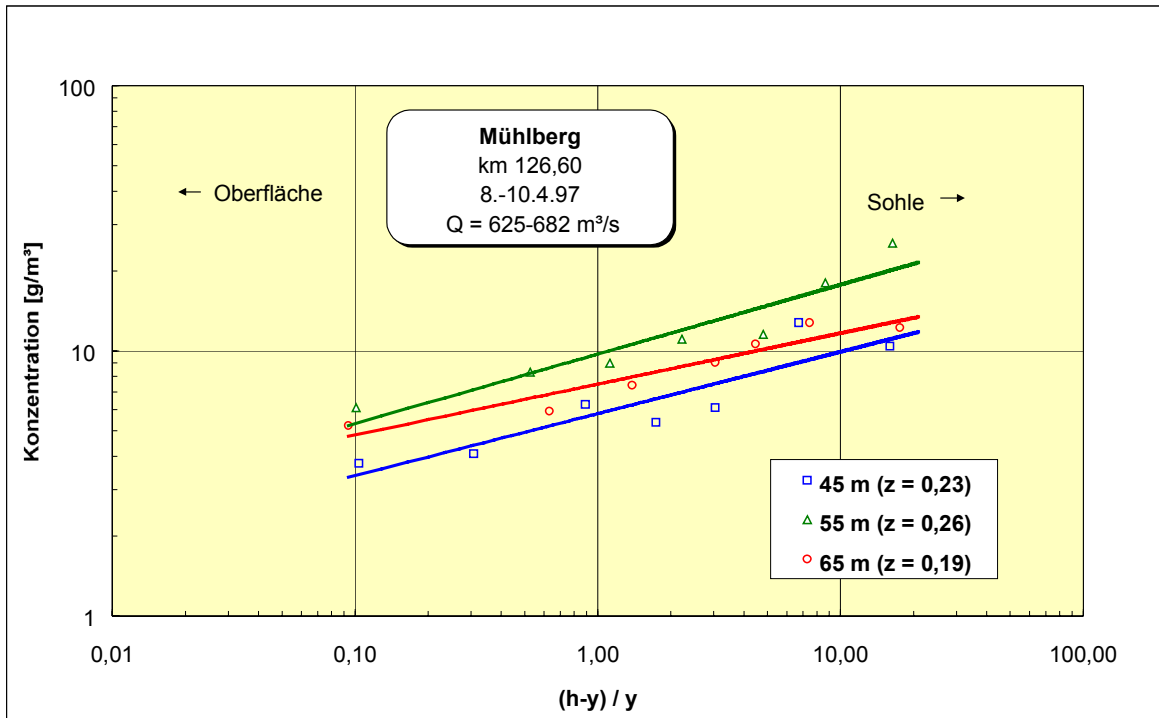


Abb. III-4.17: Vertikalprofile des suspendierten Sandes bei Mühlberg für 3 Messlotrechten in der Nähe der Flussmitte.

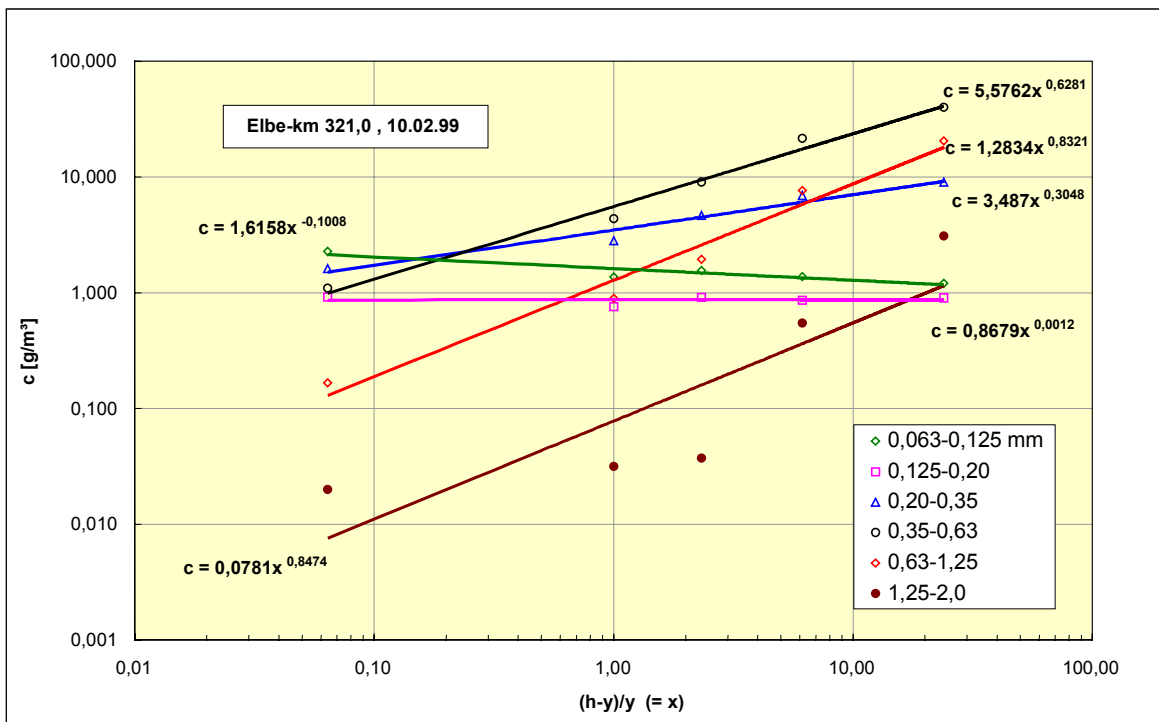


Abb. III-4.18: Vertikalprofile für Fraktionen des suspendierten Sandes an der Messstelle km 321,0 (Magdeburg).

Tab. III-4.3 zeigt eine Übersicht der aus den Vertikalprofilen der einzelnen Sandfraktionen ermittelten Schwebstoffzahlen für alle hierzu durchgeführten Messungen. Trotz der bei einzelnen Messungen auftretenden stärkeren Abweichungen,

die mit den für die Auswertung teilweise zu geringen Sandmassen zusammenhängen können, zeigen die Mittelwerte aus mehreren Messungen relativ eindeutige Ergebnisse.



Tab. III-4.3 Schwebstoffzahlen für Teilfraktionen des suspendierten Sandes (Kornfraktionen in [mm]).

Datum	Elbe-km	Abfluss Q [m³/s]	Schwebstoffzahl z [-]				
			Feinsand		Mittelsand		Grobsand
			0,063-0,125	0,125-0,2	0,2-0,35	0,35-0,63	0,63-1,25
09.02.99	324,5	1169	0,08	0,16	0,32	0,45	0,51
10.02.99	321,0	1219	-0,10	0,00	0,30	0,63	0,83
11.02.99	318,1	1160	0,16	0,35	0,67	0,77	0,66
03.03.99	214,8	841	-0,03	0,06	0,40	0,69	0,88
08.04.99	154,0	492	0,06	0,07	0,06	0,01	
27.04.99	324,5	595	-0,06	0,06	0,51	0,99	1,11
29.04.99	338,0	580	0,01	-0,05	0,16		
10.05.99	474,5	525	-0,40	-0,10	0,56	0,69	
11.05.99	509,0	571	-0,08	-0,12	0,19	0,31	0,49
17.05.99	512,0	602	-0,3	-0,01	0,88	1,09	1,00
18.05.99	500,6	599	-0,12	0,15	0,43	0,47	
01.06.99	327,0	331	0,04	0,03	0,12		
02.06.99	321,0	333	0,01	0,06	0,39		
06.07.99	141,0	147	-0,02	0,06	0,21	0,87	1,07
13.07.99	216,0	236	0,35	0,42	0,55	0,83	0,77
20.07.99	318,1	478	-0,03	-0,03	0,11		
22.07.99	338,0	397	-0,07	-0,12	0,07	0,64	1,03
04.08.99	505,6	327	0,05	0,05	0,13		
09.09.99	185,0	131	-0,02	0,40	0,40		
15.09.99	153,6	138	0,11	0,30			
16.09.99	141,0	138	0,06	0,16	0,33		
21.09.99	141,0	110	0,02	0,25	0,54		
22.09.99	126,6	126	-0,02	0,22	0,64		
23.09.99	126,6	133	0,09	0,33	0,66		
14.10.99	185,0	161	0,15	0,50	0,73		
10.02.00	474,5	1370	0,13	0,32	0,56	0,72	0,68
16.02.00	516,2	1305	-0,07	0,21	0,48	0,63	0,59
17.02.00	536,2	1319	-0,10	0,09	0,42	0,63	0,72
14.03.00	282,2	1720	0,17	0,25	0,41	0,69	0,95
11.04.00	126,6	760	0,14	0,24	0,24	0,26	0,25
13.04.00	141,0	716	0,12	0,15	0,14	0,01	

So betragen die Mittelwerte aus allen Messungen für die Feinsandteilfraktion (0,063-0,125mm)  $z = 0,02$  und steigen kontinuierlich auf  $z = 0,77$  für die Grobsandteilfraktion (0,63-1,25mm) an.

Werden die Kriterien von WANG & DITTRICH (1992) angelegt, so bestätigt die Analyse der z-Werte, dass Feinsand bei allen Abflusssituationen nur als *wash load* auftritt ( $z < 0,06$ ). Die mittleren Schwebstoffzahlen für Mittelsand ( $z = 0,39$  bzw.  $0,60$ ) erweisen sich ebenfalls als nahezu abflussunabhängig und weisen ebenso wie die mittlere Schwebstoffzahl der Grobsandfraktionen auf eine Zusammensetzung dieser Fraktionen aus suspendiertem Bettmaterial ( $z > 0,1$ ) hin.

#### III-4.4.6 Suspensionsbeginn und kritische Sohlschubspannung

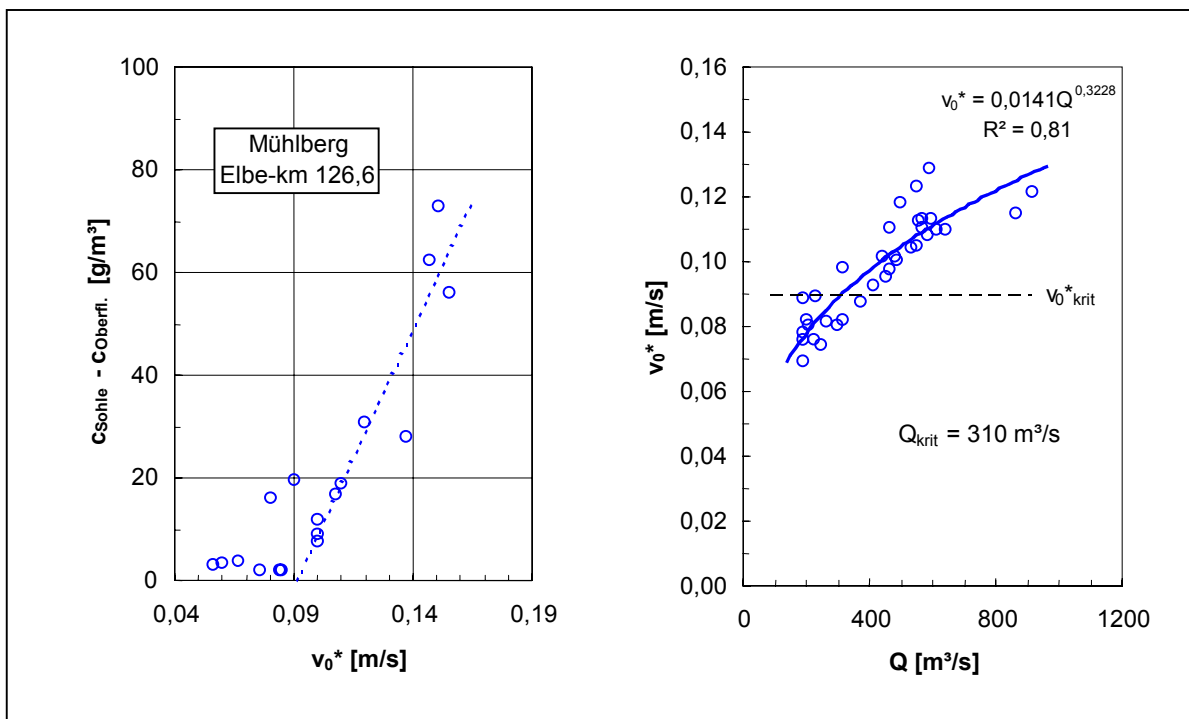
Nach den in den Abschnitten III-4.4.1 ff dargestellten Ergebnissen wäre es naheliegend, aus den Messungen Zusammenhänge zwischen den z-Werten für die Sandfraktionen und der Sohlschubspannung abzuleiten und aus diesen die für den Suspensionsbeginn kritische Sohlschubspannung zu ermitteln. Da der Datenbestand insbesondere bei den (aufwendigen) Kornverteilungsmessungen für diese Auswertung noch nicht ausreicht, wurde über eine vereinfachende Betrachtung die kritische Sohlschubspannungsgeschwindigkeit ermittelt.

Da in der Elbe Sand aus der Gewässersohle den Beobachtungen nach in der Regel nur im sohnahen Bereich transportiert wird, andererseits ein (Fein-) Sandanteil gleichmäßig verteilt auftritt (Abb. III-4.9 und Abb. III-4.10), kann man in erster Näherung als ein Maß für das suspendierte Sohlenmaterial die Differenz zwischen der sohnahen und der oberflächennahen Sandkonzentration nehmen. Beispielsweise ergibt für den Messquerschnitt Mühlberg (Elbe-km 126,6) das Auftragen dieser Differenz gegen den gleichzeitig vorhandenen lokalen Wert der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit (berechnet aus der zeitgleich gemessenen vertikalen Strömungsgeschwindigkeitsverteilung), dass Sand aus der Sohle bei einer (kritischen) Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit von ca. 0,09 m/s in Suspension geht (Abb. III-4.19).

Zur Ermittlung des zum Suspensionsbeginn zugehörigen Abflusses ist in Abb. III-4.20 die aus mehreren Messungen der Geschwindigkeitsvertikalprofile ermittelte Funktion  $v_0^* = f(Q)$  (vgl. Abschnitt III-4.4.1) zusammen mit der aus Abb. III-4.19 abgeleiteten kritischen Sohlenschubspannung aufgetragen.

Der Schnittpunkt der  $v_0^* = f(Q)$ -Kurve mit der Geraden  $v_0^* = 0,09$  m/s bei einem Abfluss von ca. 310 m<sup>3</sup>/s markiert den Suspensionsbeginn für das Bettmaterial. Die an allen Messstellen beobachtete und am Querschnitt Mühlberg besonders ausgeprägte Querverteilung des Auftretens von suspendiertem Sand (Maximum etwa in Flussmitte, starke Abnahme zu den Ufern hin) hängt unmittelbar mit der zu den Ufern abnehmenden Schubspannungsgeschwindigkeit zusammen und kann anhand von Abb. III-4.21 erklärt werden.

Die gestrichelte Kurve zeigt ein aus den vertikal gemittelten Geschwindigkeiten berechnetes Querprofil von  $v_0^*$ , wobei  $k_s = 0,08$  m mit Hilfe der *White-Colebrook-Formel* (VAN RIJN 1990) aus dem *Chézy-Koeffizienten* (in Abschn. III-4.4.1) berechnet wurde. Die waagerechte Linie stellt den oben ermittelten Suspensionsgrenzwert dar. Aus den Schnittpunkten beider Kurven ist ersichtlich, dass im mittleren Bereich mit Suspension zu rechnen ist, in den Randbereichen dagegen nicht. Ein Beispiel für eine solche Querverteilung ist in Abb. III-4.22 (sohnnahe Sandkonzentrationsverteilung für  $y/h = 0,05$ ) dargestellt.



**Abb. III-4.19 (links):** Differenz der sohnahen und oberflächennahen Sandkonzentration am Querschnitt Mühlberg in Abhängigkeit von der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit.

**Abb. III-4.20 (rechts):** Berechnete Sohlenschubspannungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abfluss für den Querschnitt Mühlberg und kritische Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit (nach Abb. links).

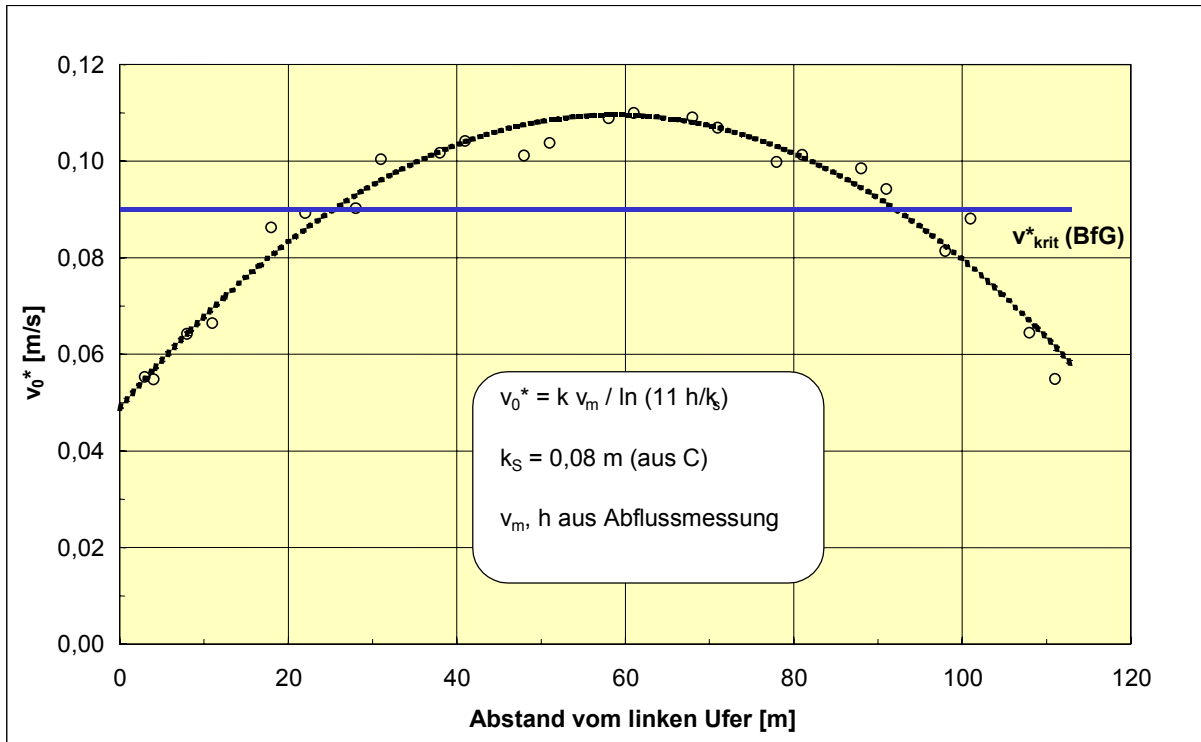


Abb. III-4.21: Querprofil der berechneten Sohl Schubspannungsgeschwindigkeiten, km 126,6 (Mühlberg), 8./9.4.1997, Q = 625-682 m³/s.

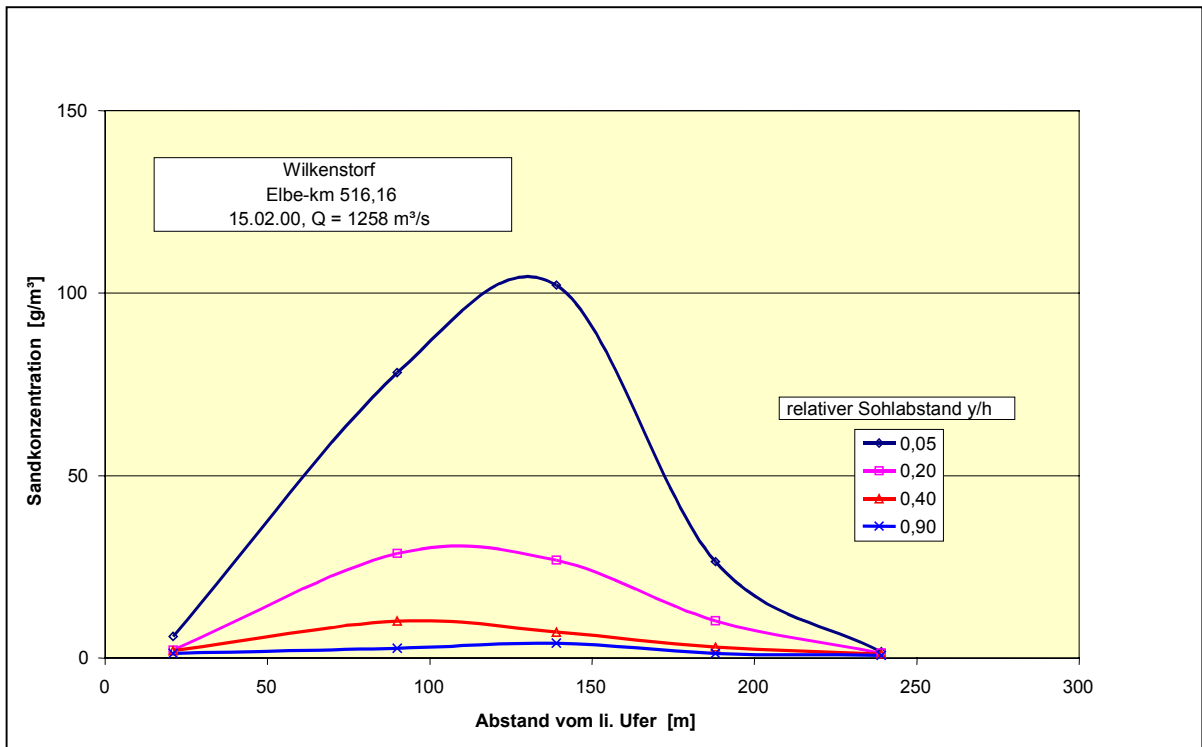


Abb. III-4.22: Verteilung des suspendierten Sandes im Messquerschnitt Wilkenstorf (km 516,16).

### III-4.5 Quantifizierung des bettbildenden Anteils des suspendierten Sandes

Die Ergebnisse aus Abschnitt III-4.4.3 und III-4.4.4 bestätigen die Annahme, dass der suspendierte Sand zum einen überwiegend aus Feinsand besteht, der z.B. aus Einleitungen, Oberflächeneinträgen, Einträgen über Nebenflüsse u.ä. stammt, und der von der turbulenten Strömung zumindest über längere Elbeabschnitte in nahezu gleichmäßiger Verteilung gehalten wird und somit der Spülfracht zugeordnet werden kann („Sand-Spülfracht“). Zum anderen zeigt sich, dass der suspendierte Sand einen Anteil enthält, der aus der Sohle oder dem Geschiebe stammt, und der nur zeitweilig bei Vorliegen ausreichend hoher Schubspannungen in Suspension überführt wird und bei geringeren Schubspannungen wieder sedimentiert (suspendiertes Bettmaterial).

Die Frage nach dem Anteil des in Suspension befindlichen Bettmaterials des Flusses erweist sich als Frage der Separierung der Konzentrationsverteilung  $c(y)$  dieses Anteils von dem der Spülfracht. Unter der Annahme einer Vertikalverteilung nach Rouse (vgl. Gl. (2)) wird nach WANG & DITTRICH (1992)  $z = 0,06$  als Kriterium für die Trennung der Sand-Spülfracht vom suspendiertem Bettmaterial angesetzt.

Zur Berechnung der Konzentrationsverteilung der Sand-Spülfracht einer Vielpunktmessung wird unter Berücksichtigung dieses Ansatzes zunächst nach Gleichung (2) aus der Konzentration des oberflächennahen Punktes mit  $z = 0,06$  für jede Messlotrechte die Referenzkonzentration  $c_a$  für  $a = 0,05$  h berechnet. Mit Hilfe dieser  $c_a$ -Werte werden dann - ausgehend von den jeweiligen oberflächennahen Sandkonzentrationen - die auf den Rouse-Kurven mit  $z = 0,06$  liegenden Konzentrationen der drei tiefer liegenden Messpunkte für alle Messlotrechten berechnet. Aus diesen Werten wird anschließend der Transport der Sand-Spülfracht für die jeweilige Messung berechnet.

Im nächsten Schritt werden für die mehrjährigen Vielpunktmessungen an den einzelnen Messstellen analog dem im Abschnitt III-4.6 beschriebenen Vorgehen Transport-Abfluss-Beziehungen für die Sand-Spülfracht abgeleitet. Abb. III-4.23 zeigt als Beispiel die für die Messstelle Schmilka so ge-

wonnene Beziehung für die Spülfracht zusammen mit der Transport-Abfluss-Beziehung für den gesamten suspendierten Sand aus Abschnitt III-4.6.

Die Transport-Abfluss-Beziehung des suspendierten Bettmaterials ergibt sich schließlich aus der Differenz des Transportes der Sand-Spülfracht zum Gesamttransport des suspendierten Sandes. In Tab. III-4.4 sind die so ermittelten Funktionen für die Elbemessstellen aufgeführt. Ein Vergleich der ermittelten Funktionen zeigt, dass im Elbeabschnitt oberhalb km 200 der Transport des suspendierten Bettmaterials immer unter dem der Sand-Spülfracht bleibt. Unterhalb von km 200 übersteigt bei hohen Abflüssen der Transport des suspendierten Bettmaterials häufig den der Sand-Spülfracht.

Aus diesen funktionalen Zusammenhängen kann der Anteil des suspendierten Bettmaterials am Gesamtsandtransport in Abhängigkeit vom Abfluss berechnet werden. Abb. III-4.24 zeigt die auf diese Weise gewonnenen funktionalen Abhängigkeiten des bettbildenden Anteils des suspendierten Sandes in Prozent vom Gesamtsandtransport für drei verschiedene Messstellen.

In Tab. III-4.5 sind diese funktionalen Abhängigkeiten für alle Messstellen zusammengestellt. Abgesehen von wenigen Ausnahmen ergeben sich für den Anteil des suspendierten Bettmaterials im Bereich der oberen Elbe Verläufe mit eher geringer Abflussabhängigkeit und geringen Anteilen (< 30 %), während im Bereich der unteren Mittelbe der Anteil mit wachsendem Abfluss deutlich zunimmt und bei Abflüssen um MHQ Werte über 50 % erreicht.

In Abb. III-4.25 sind die aus diesen Funktionen berechneten Anteile für die drei ausgewählten Abflusszustände MNQ, MQ und 2MQ im Längsverlauf der Elbe dargestellt. Die gestrichelt eingetragene Trendlinie für MQ weist eine Zunahme des bettbildenden Anteils des suspendierten Sandes zwischen Schmilka und Neu Darchau von ca. 10 % bis auf ca. 50 % auf.

Mit Hilfe der Funktionen lässt sich der bettbildende Anteil des suspendierten Sandes für verschiedene Abflusszeiträume oder -szenarien leicht berechnen (s. Abschnitt III-4.7).

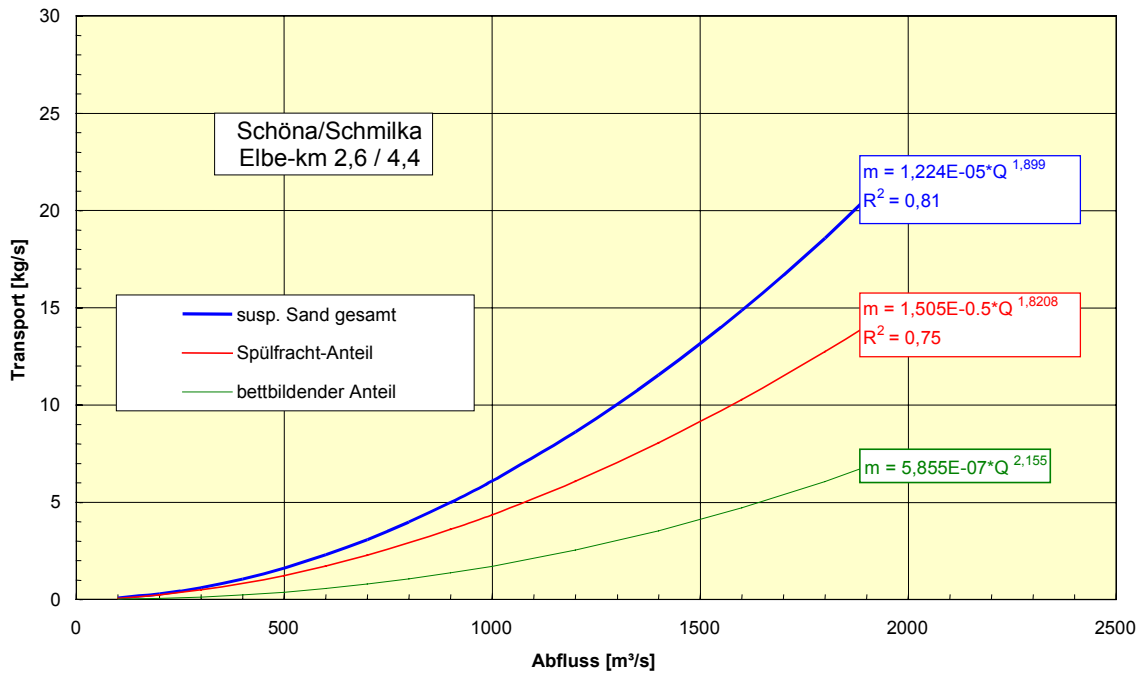


Abb. III-4.23: Transport der Anteile des suspendierten Sandes an der Messstelle Schmilka.

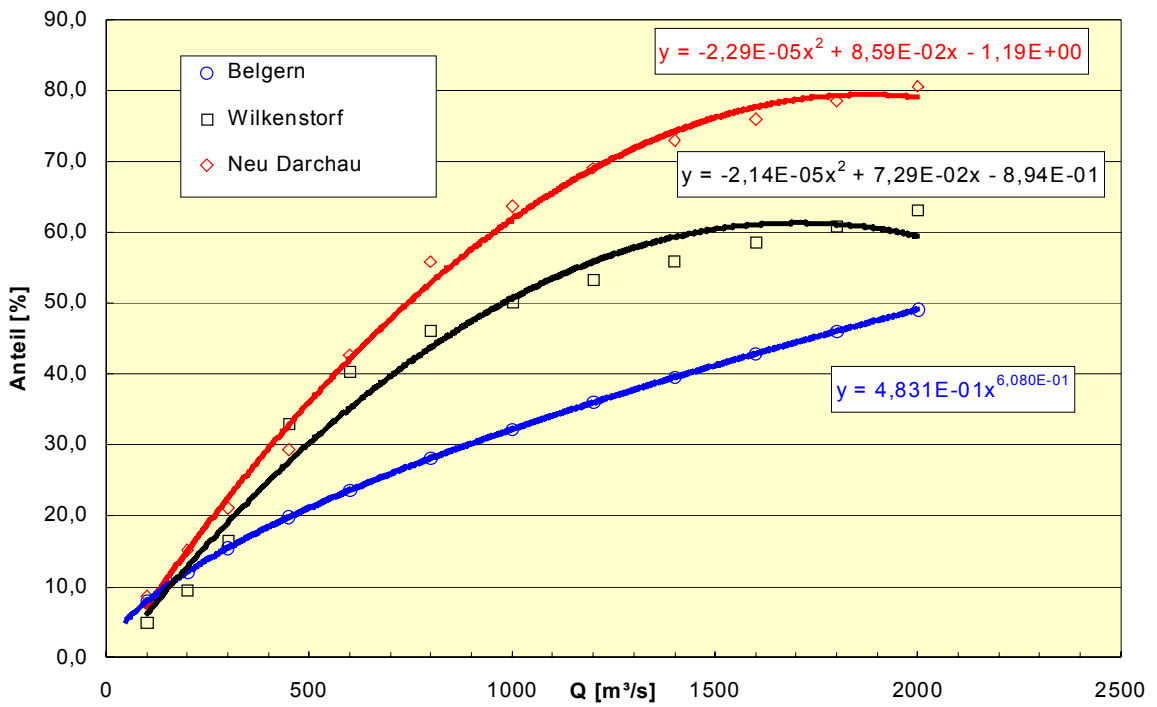
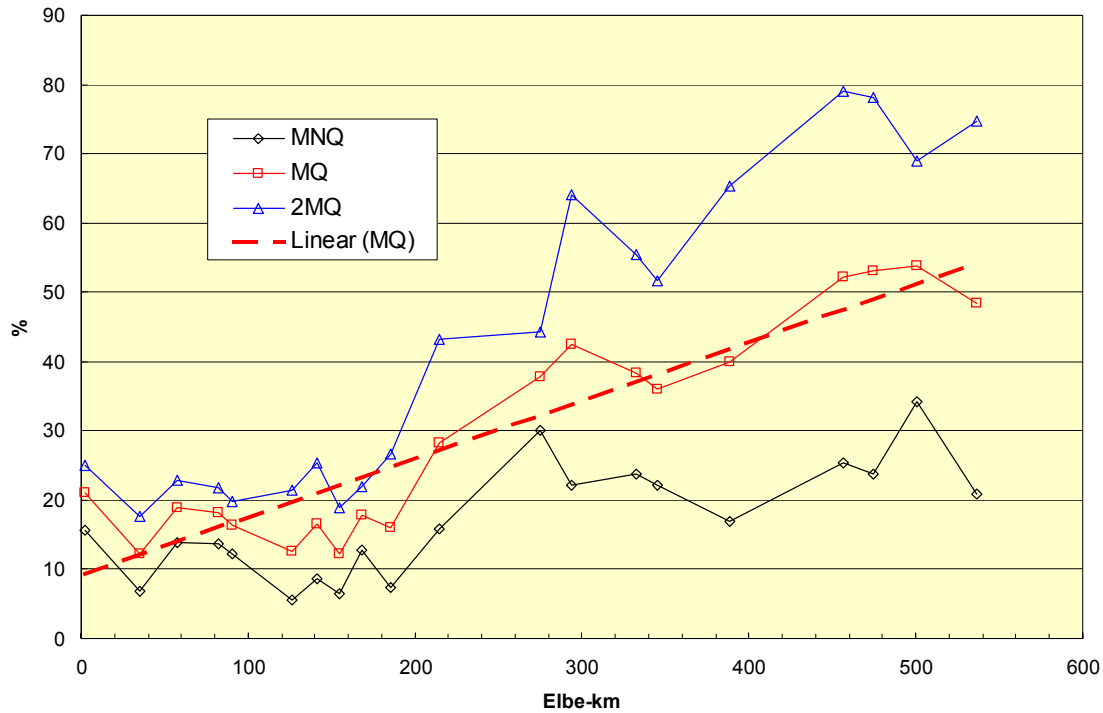


Abb. III-4.24: Prozentualer Anteil des suspendierten Sohlmaterials am gesamten suspendierten Sand für die Messstellen Belgern, Wilkenstorf und Neu Darchau.



**Abb. III-4.25:** Anteil des suspendierten Bettmaterials am Gesamttransport des suspendierten Sandes in der Elbe zwischen Schöna und Neu Darchau für verschiedene Abflüsse.

**Tab. III-4.4** Koeffizienten der Transport-Abfluss-Beziehungen des bettbildenden Anteils des suspendierten Sandes für die Elbe (Stand 12/2000), Legende siehe unten.

Elbe-km	Messstelle	$a_1$	$b_1$	$Q_{GR}$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$d_2$
2,60	Schöna/Schmilka	5,855E-07	2,155					
34,80	Pirna	2,910E-07	2,230					
57,80	Dresden	2,706E-06	1,980					
82,40	Meißen	4,260E-06	1,893					
90,40	Zehren	5,278E-06	1,829					
126,60	Mühlberg	3,449E-07	2,269					
141,00	Belgern	4,942E-07	2,262					
155,00	Torgau	5,489E-07	2,151					
167,85	Mockritz	1,012E-05	1,720					
185,00	Mauken	2,815E-06	1,950					
214,80	Wittenberg	1,807E-07	2,538					
275,00	Aken	4,721E-06	1,952					
294,00	Barby	9,372E-08	2,61	375	1,012E-05	2,000	-0,004	0,472
318,10	Magdeburg/W	9,114E-07	2,056					
321,00	Magdeburg	9,079E-09	2,80	500	2,974E-06	2,000	0,001	-0,648
324,50	Magdeburg							
327,00	Magdeburg							
332,20	Magdeburg	1,001E-05	1,919					
338,00	Magdeburg							
345,40	Niegripp	9,955E-08	2,56	400	7,718E-06	2,000	-0,003	0,523
388,80	Tangermünde	4,914E-10	3,34	200	8,003E-06	2,000	-0,003	0,226
456,60	Wittenberge	4,800E-09	3,03	525	1,458E-05	2,000	-0,011	2,395
474,50	Schnackenburg	4,406E-08	2,70	275	5,090E-06	2,000	0,002	-0,645
500,56	Langendorf	2,801E-07	2,43	200	6,402E-06	2,000	-0,001	0,024
516,16	Wilkenstorf	2,322E-07	2,38	280	2,139E-06	2,000	0,002	-0,589
522,60	Hitzacker							
536,20	Neu Darchau	4,115E-08	2,71	500	8,347E-06	2,000	-0,002	-0,433

Legende zu Tab. III-4.4 und Tab. III-4.5:

Parameter	Erläuterung
$a_i, b_i, c_i, d_i$ für $i = 1, 2$ : für $i = 3$ :	Koeffizienten bzw. Exponent der Feststoff-Transport-Funktionen in der Form $m_i = a_i Q^{b_i} + c_i Q + d_i \quad (\text{Tab. III-4.4})$ $\text{Anteil in \%} = a_3 \cdot Q^{b_3} + c_3 \cdot Q + d_3 \quad (\text{Tab. III-4.5})$
mit	$m$ = Transport des suspendierten Sandes in kg/s $Q$ = Abfluss in m <sup>3</sup> /s $Q_{GR}$ = Abflussgrenzwert bei der Beschreibung durch zwei Funktionen: Funktion $i = 1$ gilt für $Q < Q_{GR}$ ; Funktion $i = 2$ gilt für $Q \geq Q_{GR}$

**Tab. III-4.5** Funktionen für den prozentualen Anteil des suspendierten Sohlmaterials am Gesamttransport des suspendierten Sandes (Stand 12/2000), Legende siehe oben.

Elbe-km	Messstelle	$a_3$	$b_3$	$c_3$	$d_3$
2,60	Schöna/Schmika	4,784E+00	0,256		
34,80	Pirna	6,303E-01	0,515		
57,80	Dresden	3,850E+00	0,276		
82,40	Meißen	4,239E+00	0,253		
90,40	Zehren	3,500E+00	0,268		
126,60	Mühlberg	1,432E-01	0,769		
141,00	Belgern	4,831E-01	0,608		
155,00	Torgau	3,494E-01	0,612		
167,85	Mockritz	2,962E+00	0,308		
185,00	Mauken	2,321E-01	0,728		
214,80	Wittenberg	8,107E-01	0,607		
275,00	Aken	9,337E+00	0,230		
294,00	Barby	-2,050E-05	2,000	0,0732	8,1826
318,10	Magdeburg	3,934E-01	0,614		
321,00	Magdeburg	-1,030E-05	2,000	0,0549	
327,00	Magdeburg				
332,20	Magdeburg	1,338E+00	0,531		
338,00	Magdeburg				
345,40	Niegripp	-1,480E-05	2,000	0,0529	11,1130
388,80	Tangermünde	-2,810E-05	2,000	0,0927	-3,6500
456,60	Wittenberge	-2,385E-05	2,000	0,0882	3,2074
474,50	Schnackenburg	-3,190E-05	2,000	0,1020	-1,6100
500,56	Langendorf	-2,030E-05	2,000	0,0647	17,9000
516,16	Wilkenstorf	-2,140E-05	2,000	0,0729	-0,8940
536,20	Neu Darchau	-2,290E-05	2,000	0,0859	-1,1900

### III-4.6 Transport-Abfluss-Beziehungen für Geschiebe und suspendierten Sand

Den meisten der allgemein akzeptierten Transportformeln liegt eine Beziehung der Form

$$\text{Feststofftrieb} = C \cdot (\text{Wert}_{\text{aktuell}} - \text{Wert}_{\text{kritisch}})^m \quad (5)$$

zugrunde (vgl. BfG 1995). Der Feststofftrieb, d.h. der Transport durch einen Querschnittstreifen von 1 m Breite, wird abgeleitet aus dem Überschuss der gewählten hydraulischen Größe ( $\text{Wert}_{\text{aktuell}} - \text{Wert}_{\text{krit.}}$ ) und dem Wert eines charakteristischen Sediment-Koeffizienten  $C$ . Die hydraulische Größe  $\text{Wert}_{\text{kritisch}}$  ist im Falle des Geschiebetransportes mit der kritischen Kraft für das Einleiten der Sedimentbewegung an der Sohle und im Falle des Transportes in Suspension mit der für den Suspensionsbeginn erforderlichen kritischen Kraft verknüpft. Die Einflussstärke der Hydraulik  $m$  lässt sich in Abhängigkeit von der gewählten hydraulischen Variablen (z.B. Schubspannung, Abfluss) unterschiedlich bewerten.

Zur Ermittlung der empirischen Transport-Abfluss-Beziehungen dienten die von der BfG durchgeführten Naturmessungen für Geschiebe und Schwebstoff. Diese Messungen werden in Zusammenarbeit mit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) in unregelmäßiger Abfolge (Wasserführung, Verfügbarkeit des Messschiffes) über die gesamte Lauflänge der deutschen Elbe durchgeführt, wobei bisher verstärkt in den Schwerpunktbereichen Erosionsstrecke, Stadtstrecke Magdeburg und Reststrecke gemessen wurde. Zur Aufstellung funktionaler Zusammenhänge wurden die mit dem BfG-Auswerteprogrammen GAUS (Geschiebe) und SAUS (Schwebstoff /suspendierter Sand) für den Gesamtquerschnitt ermittelten Mittelwerte (Interpolation der an mehreren Messlotrechten des Gewässerquerschnitts durchgeführten Messungen) des Geschiebe- und Schwebstofftransports herangezogen.

Die Regressionsanalyse wurde zunächst mit dem in der BfG zu diesem Zweck entwickelten Programm FUNCTION (NICODEMUS 1996) durchgeführt, welches aus den in definierten dBase-Tabellen abgelegten Messergebnissen in Interaktion mit dem Programm benutzer eine dBase-Tabelle mit den Parametern der Transportfunktionen erzeugt. In Anlehnung an den oben genannten Ansatz bietet dieses

Programm eine lineare und zwei Potenz-Funktionen in den Formen

$$m_F = a \cdot (Q - Q_0) \quad (6a)$$

$$m_F = a \cdot (Q - Q_0)^b \quad (6b)$$

$$m_F = a \cdot Q^b \quad (6c)$$

zur Auswahl an.  $Q_0$  ist dabei der Abschnitt auf der x-Achse, der als (kritischer) Abflusswert für den Bewegungsbeginn / Suspensionsbeginn interpretiert werden kann.

Bei der Anwendung zeigt sich jedoch, dass für die an vielen Messstellen der Elbe noch relativ geringe Zahl von Messungen bei der häufig sehr starken Streuung der Messwerte (s.u.) die angegebenen Funktionen nicht in jedem Fall den Transport zufriedenstellend beschreiben. Trotz sorgfältiger Überprüfung der Messergebnisse und der Eliminierung einzelner stark aus dem Trend der übrigen Messungen abweichender Werte treten bei der Regression mit den Funktionen (6a) bzw. (6b) folgende Probleme auf:

- $Q_0$  nimmt einen negativen Wert an, d.h. der Schnittpunkt der Kurve liegt auf der negativen x-Achse, mithin zeigt die Funktion bei  $Q = 0$  Transportwerte  $> 0$ .
- Durch die Verteilung der (meist zahlreicheren) Messpunkte im unteren Abflussbereich wird die Potenzfunktion vom Typ (6b) häufig zu einem sehr steilen Anstieg im oberen Abflussbereich gezwungen, der weder durch die dort (meist in sehr geringer Zahl) vorhandenen Messpunkte noch durch die allgemeine Erfahrung an benachbarten Messstellen bestätigt wird.
- Umgekehrt gibt es auch Verteilungen, bei denen die Funktionen vom Typ (6a) bzw. (6b) die wenigen stark streuenden Messungen im oberen Abflussbereich besser berücksichtigen, dafür aber die größere Zahl der Messungen im unteren und mittleren Abflussbereich deutlich über- oder unterschätzen.



Wegen dieser Probleme wurde zusätzlich auch die durch den Ursprung verlaufende Gerade

$$m_F = a \cdot Q \quad (6d)$$

mit einbezogen und die Auswahl der Funktion nicht allein anhand des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$ , sondern auch anhand der besseren Anpassung an Messungen im unteren und mittleren Abflussbereich sowie anhand physikalisch sinnvoller Randbedingungen (z.B. kein Transport bei  $Q = 0$ ) getroffen. In Zweifelsfällen wurden Plausibilitäts- und Stabilitätsbetrachtungen (z.B. Verhalten der Funktion bei Wegnahme bzw. Hinzufügen einzelner Messwerte) hinzugezogen.

Für einzelne Messstellen musste auf Grund einer noch unzureichenden Datenlage auf die Erstellung einer Transportfunktion verzichtet werden, bei einigen weiteren Messstellen weisen die Messergebnisse (insbesondere beim Geschiebe) eine sehr starke Streuung auf, so dass die ermittelten Funktionen (niedrige Korrelationskoeffizienten) nur unter Vorbehalt verwendet werden sollten. Letzteres gilt auch für die Anwendung von Funktionen auf höhere Abflüsse, wenn sie nur aus Messungen um und unterhalb  $MQ$  erstellt wurden. Zur Extrapolation in einen nicht durch ausreichend Messungen gesicherten Bereich höherer Abflüsse wurden - bei annähernd gleichem Korrelationskoeffizienten - in der Regel Funktionen mit geringerem Zuwachs favorisiert und damit eine mögliche Unterschätzung bei der Frachtberechnung in Kauf genommen.

Eine Aufteilung auf zwei oder mehr Funktionen für unterschiedliche Abflussbereiche erwies sich als problematisch, da die geringe Zahl der ohnehin meist stärker streuenden Werte im oberen Abflussbereich für diese Teilfunktion eher zu schlechteren oder weniger begründeten Anpassungen führt. Im Falle von Unstetigkeiten beim Übergang von einer Teilfunktion zur anderen können bei einigen Auswertungen (z.B. der Ermittlung Bettbildender Sandanteile aus Differenzfunktionen) zwischen benachbarten Messstellen unplausibel veränderte Charakteristiken auftreten.

Ursachen für die teilweise starke Streuung der Messwerte liegen neben den an anderer Stelle zu diskutierenden messtechnischen Problemen auch im Abflussregime. Naturmessungen im Verlaufe auflaufenden und ablaufenden Hochwassers zeigen z.T. erhebliche Transportunterschiede. Wasserbauliche Versuchsreihen, bei denen eine Laborrinne (Länge 60 m, bewegliches Sohlmaterial) mit Abflusszeitreihen der Elbe beschickt wurde, bestätigen, in welchem erheblichem Maß das Transportgeschehen durch die natürliche Abfluss-Instationarität, d. h. die Abfolge wechselnder Wasserführungen, bestimmt wird (BÜCHELE & SAUER 2000). Wie diese Labormessungen zeigen, liefern Transportfunktionen der o.g. Typen streng genommen nur für stationäre Zustände zufriedenstellende Aussagen. Dagegen treten bei instationären Verhältnissen und insbesondere hohen Abflussereignissen Transportwerte auf, die um ein Mehrfaches oberhalb oder unterhalb der Transportfunktion liegen können.

Für eine getrennte Erstellung von Funktionen für stationäre und instationäre Abflusssituationen fehlt aber zurzeit noch die Datenbasis. Bei der Regressionsanalyse werden durch die ermittelten Funktionen in der Regel einzelne Maximal- und Minimalwerte nur in geringem Maße berücksichtigt bzw. es wird zwischen ihnen vermittelt, so dass diese Funktionen für die Berechnung mittlerer Frachten für ausreichend große Zeiträume (in Abhängigkeit von der hydrologischen Situation etwa ein bis mehrere Monate) durchaus als geeignet angesehen werden können.

Sämtliche (in den vorliegenden Projekt- bzw. früheren BfG-Untersuchungen) ermittelten Transport-Abfluss-Funktionen für Geschiebe, suspendierten Sand und Gesamtschwebstoff sind in SAUER ET AL. (2000) tabellarisch zusammengestellt. Für die Bewertung der Funktionen sollten die Parameter Bestimmtheitsmaß, Anzahl sowie zugehöriges Abflussintervall der zugrundeliegenden Messungen herangezogen werden. Für den suspendierten Sand wurden hier ergänzend in der *Anlage/CD-Rom* alle Transport-Abfluss-Beziehungen in Form von Diagrammen dargestellt.

### III-4.7 Das Hydrologische-Feststoff-Bilanz-Modell (HFBM) - Aufbau und Nutzungsmöglichkeiten

Das HFBM ist ein empirisches eindimensionales hydrologisches Modell bei dem Massen- und Volumenänderungen für Abschnitte, die durch jeweils zwei Messstellen begrenzt sind, berechnet werden (DRÖGE ET AL. 1997, vgl. Abb. III-4.26).

Die Datengrundlage dieses empirischen Modells bilden neben täglichen mittleren Abflüssen (hydrologische Datenbank HYDABA) und Querprofildaten im Wesentlichen die Ergebnisse der Geschiebe- und Schwebstoffmessungen. Deren Auswertung und datentechnische Weiterbehandlung bis zur Archivierung in der morphologischen Datenbank für

Geschiebe und Schwebstoff (DaGS) wird mit Hilfe mehrerer in der BfG selbst entwickelter Programme realisiert. Insgesamt wurden die aus den Messungen gewonnenen Daten von 25 Elbe-Messstellen in die morphologische Datenbank DaGS implementiert.

In den aus diesen Daten empirisch ermittelten Transport-Abfluss-Beziehungen für Geschiebe und suspendierten Sand (siehe vorige Abschnitte) sind Geometrie, Energieliniengefälle, Gesamtrauheiten, Korngrößen sowie Verfügbarkeiten des Geschiebematerials in der jeweiligen Teilstrecke implizit enthalten (black box). Diese Beziehungen müssen in angemessenen Intervallen durch neu hinzukommende Messungen aktualisiert bzw. neu ermittelt werden.

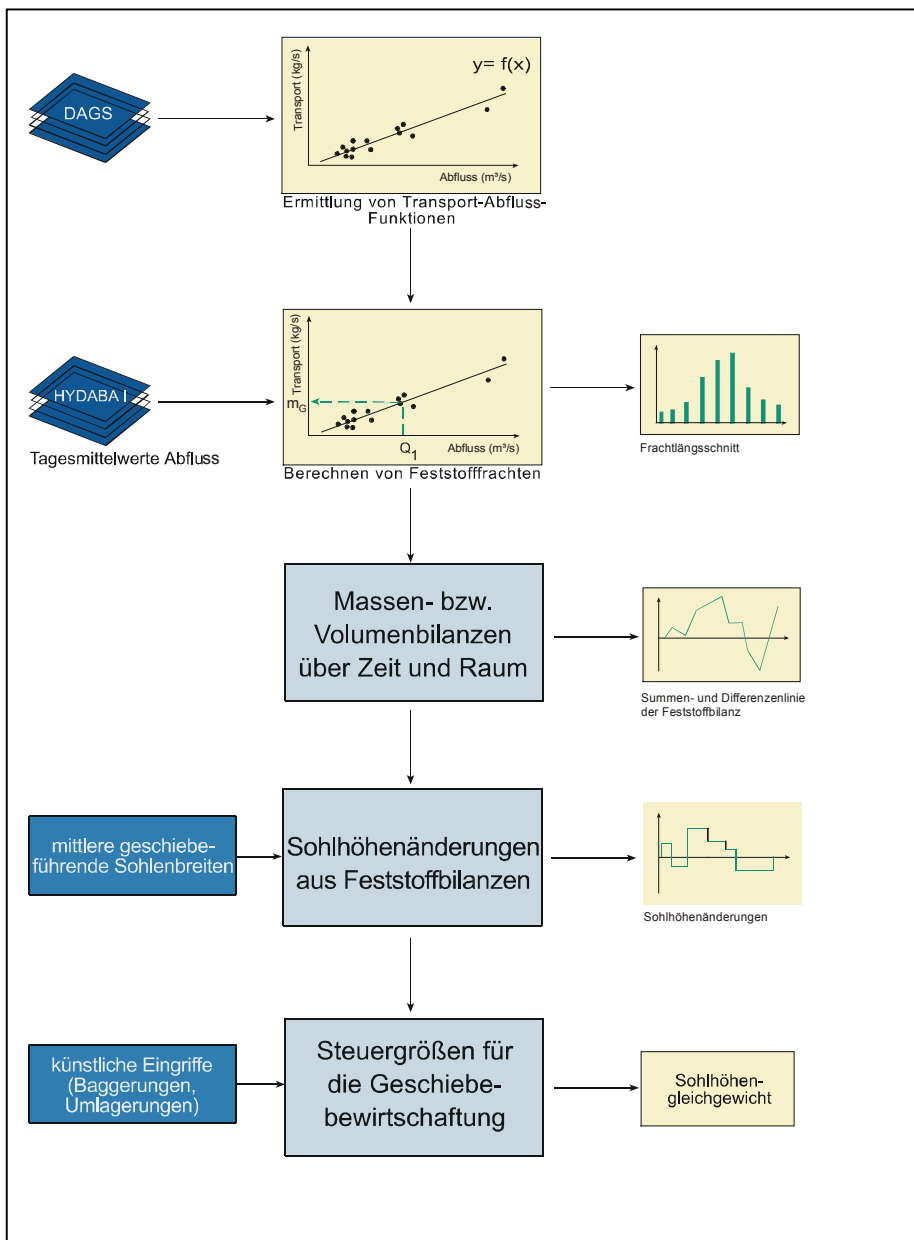


Abb. III-4.26:  
Ablaufschema des HFBM.

Für die in Abb. III-4.26 angegebenen Berechnungen der Feststofffrachten und der daraus abgeleiteten Bilanzen und Parameter wurde mit Hilfe von Visual Basic ein unter Windows 95/NT lauffähiges Programm geschaffen. Nach Auswahl der Messstellen, des Zeitraums und der Feststofffraktion (Geschiebe, suspendierter Sand, Gesamtschwebstoff) selektiert HFBM die erforderlichen in einer Datenbank gespeicherten Transportfunktionen und berechnet nach Einlesen der zugehörigen Abflussdaten tägliche Frachten, die zu Monats- oder Jahresfrachten aufsummiert werden können. In einem weiteren Modus werden bei der Frachtberechnung der an der Sohle bewegten Geschiebefracht die bettbildenden suspendierten Sandanteile zugeordnet. Die Berechnung dieser bettbildenden Sandanteile wird an Hand der Funktionen aus Abschnitt III-4.5 und III-4.6 vorgenommen und muss individuell für jede Messstelle bzw. jeden Streckenabschnitt erfolgen.

Die Feststofffrachten sind Grundlage für Bilanzierungen zwischen den Messstellen (Programmmenü „Frachtdifferenzen“) als auch im großräumigen Maßstab (Programmmenü „Geschiebedefizit“).

Zur Berechnung der Änderungen mittlerer Sohlenlagen sind geometrische Größen aus den Querprofilen, wie z.B. mittlere Sohlenbreiten (als die maximal möglichen geschiefbeführenden Breiten), erforderlich. Diese wurden mit Hilfe des Programms „PROFIL“ der Bundesanstalt für Wasserbau aus den Koordinaten für die Begrenzung der Flusssohle zwischen den Böschungsfüßen bzw. Buhenschatten ermittelt und in die Stammdaten-Datei der DaGS implementiert.

### **Anwendung des HFBM auf den Feststoffhaushalt der Elbe**

#### *Geschiebe*

Abb. III-4.27 zeigt Diagramme zum Geschiebetransport in der Elbe, die nach Implementierung aller Daten und Funktionen in das Datenbanksystem DaGS mit dem HFBM-Programm erzeugt wurden.

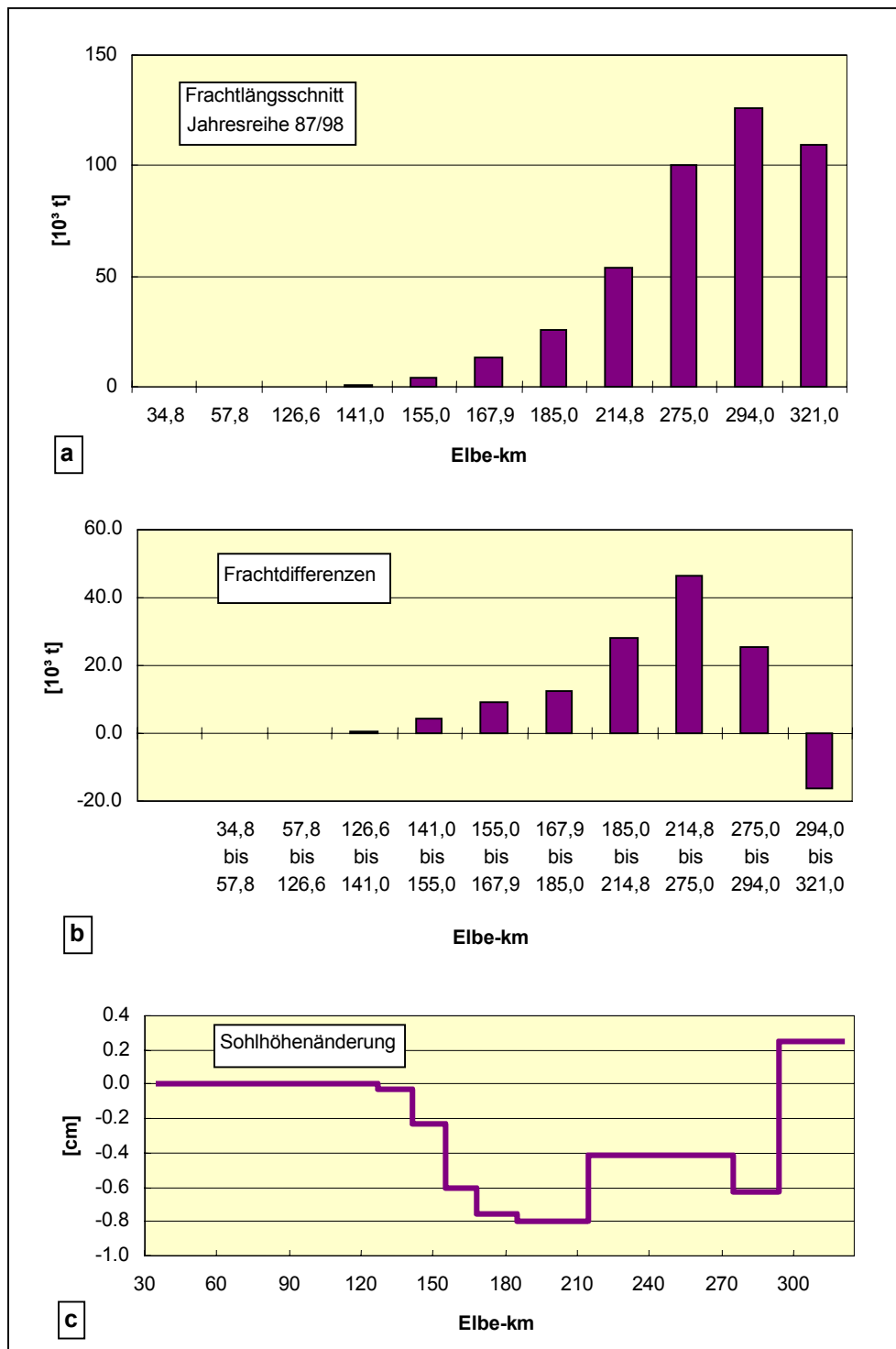
Wie der Frachtlängsschnitt (Abbildung Teil a) zeigt, findet im sächsischen Elbeabschnitt bis etwa Mühlberg kein nennenswerter Geschiebetransport statt. Dies liegt einerseits an der groben Sohlstruktur dieses Abschnitts ( $d_m > 20$  mm), andererseits ist der

Geschiebeeintrag durch Staustufen im tschechischen Teil der Elbe und Querbauwerke in den Einzugsgebieten der Nebenflüsse nahezu vollständig unterbunden.

Die Geschiebetransportmessungen bei Mühlberg bestätigen die Annahme, dass dieser Bereich als Beginn der Erosionsstrecke anzusehen ist. Dementsprechend nimmt der Geschiebetransport auf der Strecke Mühlberg-Torgau-Wittenberg-Barby (km 120-294) erheblich zu. Die Zusammensetzung der Flusssohle weist diesen Abschnitt als Übergangsbereich von stark grobkiesigem zu feinkiesigem und sandigem Material aus. Im Gegensatz zu den Verhältnissen bei Mühlberg werden in der Erosionsstrecke erhebliche Feststoffmengen an der Sohle transportiert, wobei die Sohle im Bereich Torgau bis weit über Mittelwasser recht stabil ist. Bei Wittenberg findet erheblicher Transport bereits deutlich unter Mittelwasser statt: einerseits wird in diesem Bereich Material von oberhalb eingetragen, andererseits reagiert die Sohle entsprechend ihrem vergleichsweise feinkörnigen Aufbau sehr empfindlich auf Abfluss- und entsprechende Schleppkraftzunahme.

Der Abschnitt Wittenberg bis Aken wird hier, im Gegensatz zu früheren Auswertungen, in die Erosionsstrecke einbezogen. Erst im Raum Magdeburg nimmt der Geschiebetransport wieder ab, d.h. die Sohlerosion geht in Sedimentation über. Diese Vorgänge werden mit Abbildung Teil b besonders deutlich beschrieben, eine positive Frachtdifferenz entspricht hier einer Erosion im betrachteten Elbeintervall.

In Abb. III-4.27 Teil c sind die sich rechnerisch aus den Frachtdifferenzen ergebenden mittleren jährlichen Sohlhöhenänderungen dargestellt. Der Vergleich mit aus Querprofilpeilungen ermittelten Werten für die jährliche Eintiefung der Elbesohle im Elbeabschnitt km 140 – 185 (BAW & BFG 1996) bestätigt die Größenordnung der berechneten Werte. Die Implementierung einer Plausibilitätskontrolle in das HFBM durch Vergleich der abschnittsweise ermittelten Sohlhöhenänderungen mit Differenzen aus Querprofilpeilungen und mit Wasserspiegeländerungen ist perspektivisch geplant und kann umgekehrt für eine bessere Anpassung der Modellparameter genutzt werden.



**Abb. III-4.27:** Mit HFBM ermittelte Schätzungen der mittleren jährlichen Geschiebefrachten, Frachtdifferenzen und Sohlhöhenänderungen für den Elbeabschnitt Pirna – Magdeburg auf der Basis der Abflussjahre 1987 – 98.

In dem nicht dargestellten Elbeabschnitt unterhalb Magdeburg sind die Zusammenhänge noch nicht hinreichend genau erfasst, um eine verlässliche Quantifizierung vornehmen zu können. Zwischen km 390 und km 460 kann nach dem derzeitigen Stand der Transport-Funktionen von einer leichten Anlandungstendenz ausgegangen werden, unterhalb km 460 von einer leichten Erosionstendenz. Dieser

Elbeabschnitt, insbesondere die sogenannte Reststrecke (km 508-521), ist hinsichtlich seiner Feststofftransportsituation, im Unterschied zu anderen Elbeabschnitten, durch intensive Transportkörperbewegungen gekennzeichnet, die eine Erfassung der Geschiebetransportraten naturgemäß schwierig gestalten.

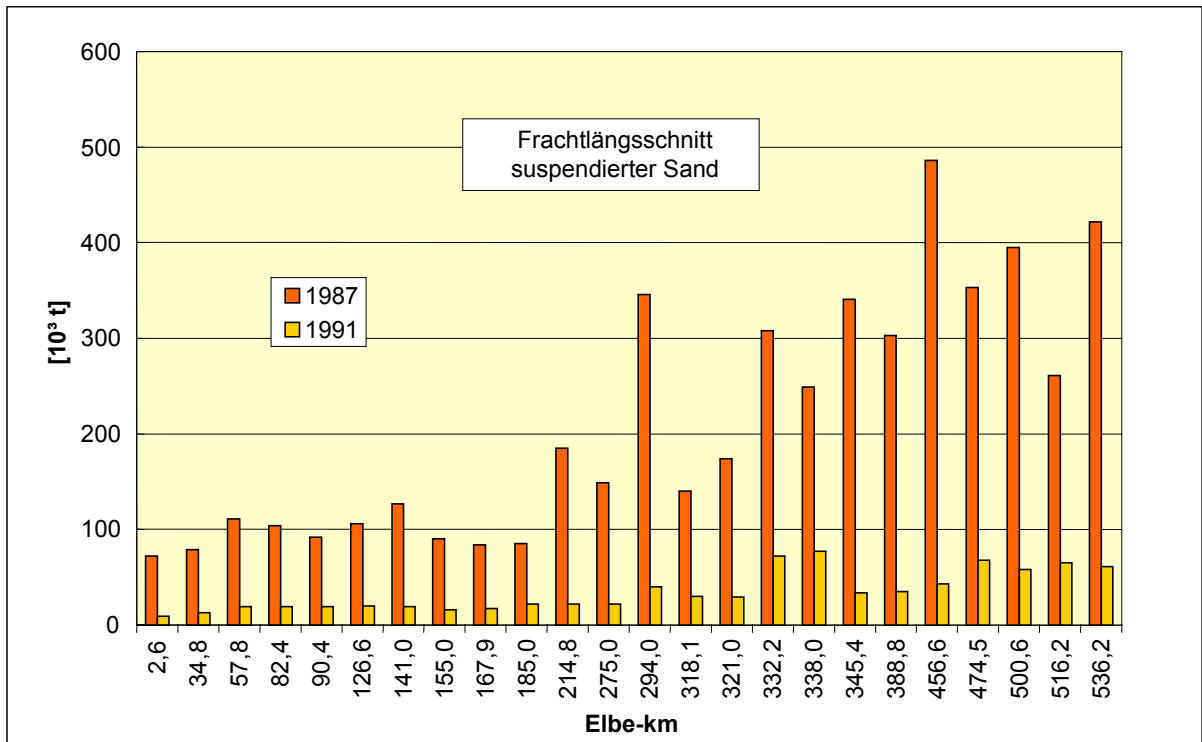


Abb. III-4.28: Berechnete Jahresfrachten des suspendierten Sandes der Elbe in den Abflussjahren 1987 und 1991.

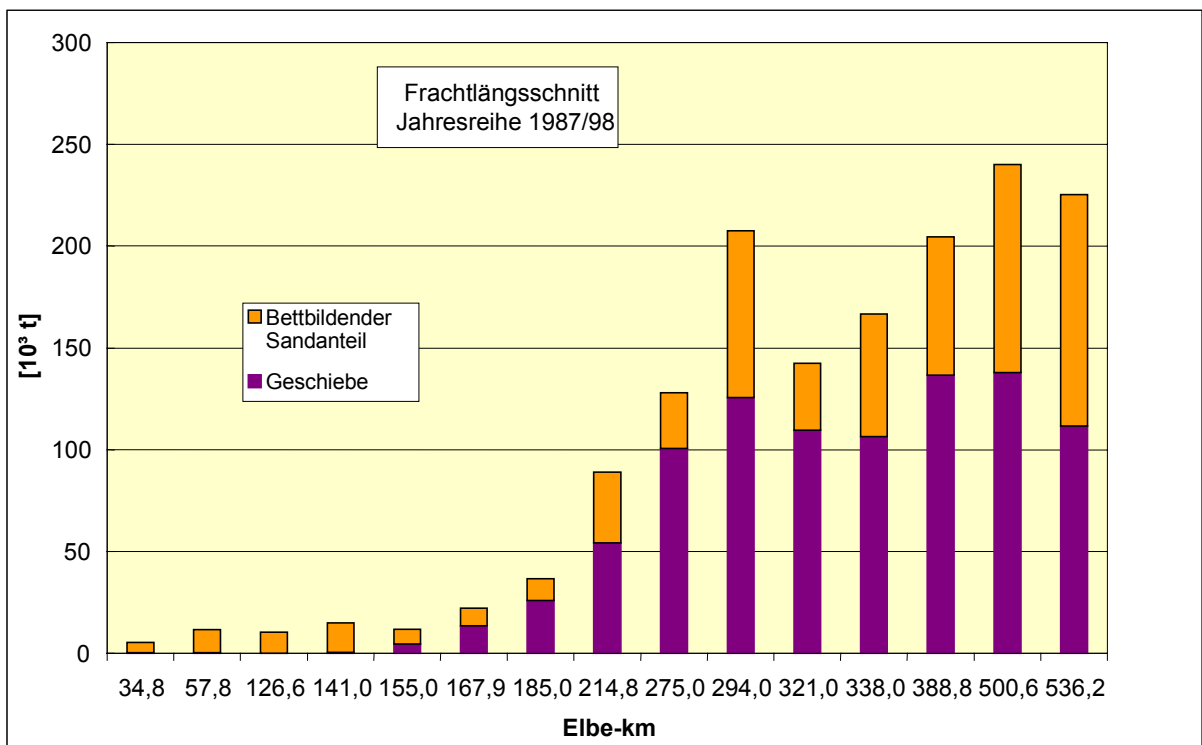


Abb. III-4.29: Schätzung der mittleren jährlichen bettbildenden Feststofffracht.

### *Suspendierter Sand*

Wegen ihrer potenziellen Bedeutung für die Sohlentwicklung wird die Schwebstoffteilmenge des suspendierten Sandes im HFBM gesondert ausgewiesen. Die Abb. III-4.28 zeigt einen mit Hilfe der ermittelten Transport-Abfluss-Beziehungen berechneten Frachtlängsschnitt des suspendierten Sandes für zwei extreme Abflussjahre (1987, 1991). Diese beiden Abflussjahre stellen hier exemplarisch je ein abflussarmes und ein abflussreiches Jahr dar; die Extrapolation der aus dem Messzeitraum 1995 – 2000 gewonnenen Funktionen auf zurückliegende Jahre ist jedoch nicht ausreichend gesichert. Der suspendierte Sand, dessen Anteil am Gesamtschwebstoff in Abhängigkeit von der Messstelle und vom Abfluss bei ca. 10 bis 30 % liegt, weist ebenfalls eine hohe Varianz der jährlichen Frachten entsprechend den in den beiden betrachteten Jahren stark unterschiedlichen Abflussverhältnissen auf. Die Zuordnung der Frachtdifferenzen zwischen benachbarten Messstellen zu Erosions- bzw. Sedimentationsvorgängen kann beim suspendierten Sand nicht so eindeutig vorgenommen werden wie beim Geschiebe, da nur eine Teilmenge des suspendierten Sandes als bettbildend angesehen werden kann. Nach den vorliegenden Erkenntnissen kann man davon ausgehen, dass beispielsweise die im abflussarmen Jahr 1991 relativ gleichbleibende Sandfracht zwischen Dresden (km 57,8) und Aken (km 275,0) überwiegend aus durchtransportiertem, nicht sohlrelevantem Sand (z.B. Feinsand aus Einträgen und Einleitungen) besteht, während im abflussreichen Jahr 1987 sich diesem Sand erhebliche Anteile von aus der Sohle stammendem Sand überlagern.

### *Bettabildende Feststofffrachten*

Zur Quantifizierung der für die Sohlentwicklung relevanten Feststofffrachten und für die Prognose zukünftiger Erosions- bzw. Anlandungstendenzen in der Elbe muss neben dem Geschiebetransport auch der Anteil des suspendierten Sandes berücksichtigt werden, der nur zeitweise mit der Sohle im Austausch steht, jedoch zu einem erheblichen Maße zur Sohlbildung beiträgt.

Die Ergebnisse aus Abschnitt III-4.5 zeigen, dass der bettabildende Anteil des suspendierten Sandes für jede Messstelle durch eine abflussabhängige Funk-

tion beschrieben werden kann und für mittlere Abflüsse (MQ) von ca. 10 % des gesamten suspendierten Sandes an der Messstelle Schöna bis zu ca. 50 % im Elbeabschnitt unterhalb Magdeburg reicht. Diese Funktionen wurden zusätzlich zu den Transport-Abfluss-Beziehungen in das HFBM implementiert.

Abb. III-4.29 zeigt einen auf der Basis dieser Funktionen ermittelten Frachtlängsschnitt der Elbe für die bettbildenden Feststofffrachten (Geschiebe und bettbildender Sandanteil) im Jahresmittel. Die Abbildung zeigt, dass bei der bettbildenden Fracht vor dem Beginn der Erosionsstrecke erwartungsgemäß der Sand gegenüber dem Geschiebe dominiert, aber dass auch in Elbeabschnitten mit hoher Geschiebefracht der bettbildende Sandanteil im Mittel noch ca. 30 bis 50 % der gesamten bettbildenden Feststofffracht beträgt.

## **III-4.8 Zusammenfassung**

Zur Quantifizierung sohlhöhenrelevanter Feststofftransportprozesse in der Elbe muss neben dem Geschiebetransport auch der Anteil des suspendierten Sandes, der mit der Sohle im Austausch steht, betrachtet werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden auf der Grundlage umfangreicher Naturuntersuchungen den Transport von suspendiertem Sand beschreibende sedimentologische und hydraulische Parameter bestimmt.

Für die von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) regelmäßig beprobten ca. 25 Elbe-Messstellen konnten zahlreiche funktionale Abhängigkeiten dieser Parameter und insbesondere auch solche, die den bettbildenden Anteil des suspendierten Sandes beschreiben, aufgestellt werden.

Zur operationellen Unterstützung dieser Aufgabe wurden in das von der BfG entwickelte Hydrologische Feststoff-Bilanz-Modell (HFBM) die für die Elbe aus den Messungen abgeleiteten Transport-Abfluss-Beziehungen implementiert und durch Simulation der zeitlichen und räumlichen Entwicklung des Geschiebetransports sowie des für die Bettbildung bedeutsamen Anteils der suspendiert transportierten Sandfracht entsprechende Frachtlängsschnitte und daraus ableitbare morphologische Größen berechnet.

Die in dieser Arbeit gefundenen Abhängigkeiten und Funktionen sollen für alle im BMBF-Forschungsprogramm „Ökologische Forschung in der Stromlandschaft Elbe (Elbe-Ökologie)“ tätigen Wissenschaftler als Informationsquelle und Entscheidungshilfe zu den Fragen des Sedimenttransportes dienen. Die abschnittsweise Berechnung der Frachten und die daraus resultierenden Bilanzen (Überschüsse, Defizite) ermöglichen die Abgrenzung von Erosions- und Akkumulationsstrecken und damit eine realistische Einschätzung der aktuellen morphologischen Verhältnisse der Elbe. Da das HFBM auf der Basis vertrauenswürdiger Naturdaten (empirisch-statistisch) operiert, eignet es sich auch hervorragend als Initial- und Eichmodell für ein physikalisch begründetes numerisches Feststofftransportmodell bzw. zu dessen Validierung.

## Literatur

- BAGNOLD, R.A. (1966): An approach to the sediment transport problem from general physics, U.S. Geological Survey Professional Paper 422-I, Washington
- BAW & BfG (1996): Erosionsstrecke der Elbe - Bericht zur wissenschaftlichen Vorbereitung und Begleitung des Naturversuchs Geschiebezugabe, Berlin, Mai 1996
- BfG (1994): Kornzusammensetzung der Elbesohle von der deutsch-tschechischen Grenze bis zur Staustufe Geesthacht, BfG-Bericht 0834, Berlin
- BfG (1995): Simulation und Prognose von Geschiebetransportprozessen mit GEM 1, BfG-Nr.0896, Koblenz, Juni 1995
- BÜCHELE, B., SAUER, W. (2000): Morphologie: Erste Ergebnisse zum Feststofftransport der Elbe, in: Prange et al. (Hrsg.): Die Elbe und ihre Nebenflüsse – Belastung, Trends, Bewertung, Perspektiven. ATV-DVWK Forschungsberichte, Hennef
- BUSSE, T. (1998): Eignung der Trübung als Steuergröße zur Entnahme von Schwebstoffproben, Diplomarbeit, Technische Fachhochschule Berlin / Bundesanstalt für Gewässerkunde
- DGJ [DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH] (1993): Elbegebiet, Teil 1, Von der Grenze zur CR bis zur Havelmündung. Hrsg.: Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt. Halle (Saale).
- DITTRICH, A. (1997): Strömungsfeld über rauen Sohlen mit geringen relativen Überdeckungen, Wasserwirtschaft 87
- DRÖGE, B. NICODEMUS, U., KUMM, H. (1997): Hydrological sediment transport balance model. Operational monitoring and control of macroscale sediment budget in rivers. Int. Journ. Sediment Research 12/3, 267-273
- DVWK (1986): Schwebstoffmessungen, Regeln zur Wasserwirtschaft Heft 125, DVWK, Verlag Paul Parey, Hamburg
- ENGELUND, F. (1965): A criterion for the occurrence of suspended load, *Notules Hydrauliques*, La Houille Blanche, Nr. 6
- HEILMAIR, T. (1997): Hydraulische und morphologische Kriterien bei der Beurteilung von Mindestabflüssen unter besonderer Berücksichtigung der sohnnahen Strömungsverhältnisse, Berichte der Versuchsanstalt Oberrach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München, Nr. 79
- HOHNBERG, H.-J. (1997): Schubspannungsmessungen in der Elbe, Abschlussbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin
- JAWORSKI, B.M., DETLAF, A.A.(1972), Physik griffbereit, Definitionen – Gesetze – Theorien, Vieweg + Sohn, Braunschweig
- NEZU, I., NAKAGAWA, H. (1993): Turbulence in open-channel flows, A.A. Balkema / Rotterdam / Brookfield
- NICODEMUS, U. (1996): Function - A Program To Set Up Functions For Sediment Transport, BfG, Koblenz, Juni 1996
- ROUSE, H. (1937): Modern concepts of the mechanics of fluid turbulence, ASCE-Transactions, Paper 1965
- SAUER, W. (2000): Quantifizierung sohlhöhenrelevanter Feststofftransportprozesse in der Elbe - Abschlussbericht der Teilprojekte IL3 „Suspendierte Feststofffracht“ und I.6 „Hydrologisches Feststoffbilanzmodell (HFBM)“ des Verbundvorhabens „Morphodynamik der Elbe“ (BMBF-Förderkennzeichen 0339566). Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG-1307), Koblenz/Berlin
- SCHMIDT, A. (1996): Ergebnisse neuerer Untersuchungen zu Gewässersohle und Feststofftransport in der Erosionsstrecke, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 74, S. 51-62
- SCHMIDT, R. (1997): Filtriermethode zur Bestimmung des Schwebstoffgehalts, Diplomarbeit, Technische Fachhochschule Berlin / Bundesanstalt für Gewässerkunde
- STATZNER, B., MÜLLER, R. (1989): Standard hemispheres as indication of flow characteristics in lotic benthos research, *Freshwater Biology* 26, 227-231
- VAN RIJN, L.C. (1990): Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans, Aqua Publications, Amsterdam
- VAN RIJN, L.C. (1993): Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua Publications, Amsterdam
- VANONI, V.A. (Ed.)(1977): Sedimentation engineering, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54, New York
- WANG, Z., DITTRICH, A.(1992): A study on problems in suspended sediment transportation, in: Hydraulic and Environmental Modelling: Estuarin and River Waters, edited by R.A.Falconer et.al., Ashgate, University Press Cambridge
- ZANKE, U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung, Springer, Berlin Heidelberg New York

**Ökologischer Einschub – Kornzusammensetzung / Geschiebe- und Feststofftransport**

von S. Kiene

Die Kornzusammensetzung der Sohle, ihre Beweglichkeit und auch das in Suspension befindliche Material sind - ebenso wie die herrschenden Strömungskräfte - wesentliche Parameter für die Besiedelbarkeit der Sohlenoberfläche und des Interstitials. Die unterschiedlichsten Organismengruppen, von Mikroorganismen über Makrozoobenthos bis zu den Fischen finden dort Lebensraum.

Die Korngrößenverteilung der Sohle hat wesentlichen Einfluss auf die Besiedlung dieses Lebensraums. Die über weite Strecken an der Elbe natürlicherweise vorherrschenden feinkörnigen Sedimente sind vor allem hinsichtlich der Makrozoobenthosbesiedlung als eher lebensfeindlich einzustufen. Sessile und Aufwuchsorganismen finden kein geeignetes Substrat, sie treten vor allem in den Steinschüttungen der Buhnen auf. Für die Besiedlung des Interstitials sind die durch die vorhandenen Korngrößen sich ergebenden Porenweiten ausschlaggebend. Aus der Gruppe des Makrozoobenthos sind lediglich einige Spezialisten, wie grabende Oligochaeten, Chironomiden- oder Libellenlarven in der Lage, diesen Lebensraum zu besiedeln.

Die Parameter Feststofftransportmenge, Geschiebedynamik und Umlagerungsraten charakterisieren die bewegliche Sohle. Aufgrund der ständigen Umlagerung ist eine bewegliche Sandsohle i.a. nur spärlich besiedelt. Auch eine Ansiedlung von höheren Pflanzen wird dadurch weitestgehend verhindert. Der Lebensraum des hyporheischen Interstitials wird bei sich bewegendem Substrat nur von einigen Spezialisten bewohnt werden können, da eine ständige Versandung des Porenraumes stattfindet. Ggf. profitieren in der festen Sohle unter dem beweglichen Anteil lebende Organismen (z. B. Oligochaeten) von dem fortwährenden Neueintrag von Nährstoffen o. ä.

In der Elbe kommt der Ermittlung des Anteils an suspendiertem Bettmaterial an der Gesamtfracht besondere Bedeutung zu, da Sandfraktionen im gesamten Verlauf der deutschen Elbe in erheblichem Umfang Bestandteil des Sohlenmaterials sind und abflussabhängig auch als Schwebstoffe transportiert werden. Die Frachten des suspendierten Sandes können in Abhängigkeit des Abflusses diejenigen des Geschiebes deutlich übersteigen. Die Differenzierungen des Schwebstoffgehaltes (Konzentration und Korngrößenzusammensetzung) sowohl innerhalb der einzelnen Untersuchungsquerschnitte als auch im Längsverlauf der Elbe werden im Bericht (Kap. II-3 und III-4) näher erläutert. Eine hohe Schwebstofffracht erschwert die Besiedelbarkeit der Flusssohle aus verschiedenen Gründen. Der sogenannte „Sandstrahleffekt“ der transportierten Korngrößen verhindert die Ansiedlung sessiler (in der Regel filtrierender) Organismen auf festen Oberflächen, vor allem wenn wie in der Elbe auch Mittel- und Grobsandfraktionen als sohlennahe Schwebstoffe transportiert werden. Hohe Schwebstoffkonzentrationen verändern auch das Lichtklima im Gewässer. Durch Verminderung der Lichtstärke an der Sohle wird die potentielle Besiedelbarkeit für Algen, Moose und höhere Pflanzen sicherlich vermindert.

Die bei Hochwasser transportierten Schwebstoffe bilden einen wichtigen Nährstoffeintrag für die Auenstandorte, deren Produktivität von dieser periodischen Nährstoffzufuhr abhängt (JÄHRLING 1994). Die Charakteristik des Schwebstofftransportes hat Einfluss auf viele andere Parameter, z.B. auf Schadstofftransporte und den Sauerstoffhaushalt und damit auf die Gewässergüte. Sowohl die Konzentration, als auch Transport und Verteilung von organischen und anorganischen Spurenstoffen sind an den Schwebstoffhaushalt gebunden (SCHUCHARDT 1995). Die variierenden Wasserführungen bedingen stark schwankende Schwebstofftransporte. Untersuchungen ergaben, dass die Schadstofftransporte in der Elbe deutlich mit den Schwebstoffen gekoppelt sind. (WILKEN ET AL. 1994). Die Analyse von Schwebstoff- und den daran gebundenen Schadstofffrachten ergab z. B., dass vor dem Hochwasserscheitel ein Maximum an Schwebstoffen zu erwarten ist, das sich durch kleine Korngrößen und hohe Anteile an leichtem organischem Material auszeichnet, das u. a. mit Schwermetallen belastet ist.

*Literatur*

- JÄHRLING, K.-H. (1994): Bereiche möglicher Deichrückverlegungen in der Elbaue im Bereich der Mittel- und Unterelbe - Vorschläge aus ökologischer Sicht als Beitrag zu einer interdisziplinären Diskussion. 6. Magdeburger Gewässerschutzseminar
- SCHUCHARDT, B. (1995): Die Schwebstoff-Dynamik in der Unterweser und ihre Bedeutung für die Gewässergüte. Limnologie aktuell, Band/Vol. 6. Gerken/Schirmer (Hg.): Die Weser. Gustav Fischer Verlag Stuttgart.
- WILKEN, R.D., FANGER, H.U., GUHR, H. (1994): Ergebnisse der Hochwassermessungen 1993/94. 6. Magdeburger Gewässerschutzseminar.



## III-5 Wirkung instationären Abflussverhaltens und von Buhnen auf den Dünentransport in der Elbe (in wasserbaulichen Laborversuchen)

Y. Wang, B. Büchele, F. Nestmann

### III-5.1 Einführung

#### III-5.1.1 Veranlassung

Die morphodynamische Entwicklung eines Flusses wird hauptsächlich durch das Stabilitätsverhalten der Gewässersohle und den Feststoffhaushalt bestimmt. Ausbaumaßnahmen greifen in diese natürlichen Prozesse eines Flusssystem ein und werden daher i.a. unabhängig von ihrer eigentlichen Zielstellung verstärkt bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Sohle hinterfragt. Wurde dem Fluss z.B. durch regulierende Maßnahmen seitlich ein Zwang angelegt, kann die morphodynamische Reaktion auf die Energiewirkung der Strömung i.a. nur noch vertikal, d.h. durch Veränderung des Sohl-niveaus, stattfinden.

Dabei ist sowohl der Transport der Feststoffe (Kiese, Sande, Feinkornanteile) in Hauptströmungsrichtung als auch in Strömungsquerrichtung, beispielsweise in Buhnenfelder oder Auen hinein, von Bedeutung. Es wird unterschieden zwischen dem Transport von Geschiebe an der Sohle und suspendierten Feststoffen (z.B. Feinsanden), die je nach Abfluss in Interaktion mit der Sohle stehen (vgl. Kap. III-4).

Gerade an Sohlen feinsandiger Flachlandflüsse verläuft der Geschiebetransport unter bestimmten hydraulischen Bedingungen nicht in Form von Einzelkornbewegungen, sondern es bilden sich aus der Sohle heraus dünenartige Großformen, welche völlig andere *Bewegungsmechanismen* aufweisen. Das Vorhandensein solcher Formationen, allgemein als *Transportkörper (Riffel, Dünen)* bezeichnet, beeinflusst das gesamte hydraulische Verhalten des Fließgewässers und wirkt sich auch direkt auf den Sedimenttransportbeginn und die Transportrate aus.

Diese Verhältnisse sind gerade auch an der Elbe vorzufinden, deren geologisch-morphologischen Gegebenheiten eine große Beweglichkeit der Sedimente im Strombett begünstigen. Die entlang der Mittleren Elbe auftretenden Erosions- und Sedimentationsvorgänge sind mit Erreichen der Elbe-Havel-Niederung zunehmend durch Bank- und Transportkörperbildung, pendelnden Talweg etc. geprägt. Dabei variieren die Prozesse stark mit schwankender Wasser-

führung; oft müssen z.B. nach Hochwasser Bänke in der Fahrrinne der Schifffahrt gebaggert werden.

Trotz der großen Bedeutung dieser Transportformen an der Unteren Mittel-elbe kann mit dem derzeitigen Kenntnisstand i.a. noch keine zufriedenstellende Beurteilung bei Fragen der Sohlstabilität und des Sedimenttransports erfolgen. Dies gilt gerade auch hinsichtlich der Schwierigkeiten in der quantitativen Erfassung und Beschreibung der (sehr variablen) Transportprozesse, die sich durch die *Instationarität der Abflüsse* ergeben. So basieren die gängigen Geschiebetransportformeln auf der Annahme einer stationären Strömung, was in der Natur im Normalfall nicht zutrifft. Am ehesten kommt eine langsam steigende / fallende Ganglinie dieser Annahme nahe. Dieser Umstand ist besonders für die Elbe nicht gegeben, deren Hochwasserwellen i.a. relativ kurze Anlauf- und Auslaufphasen aufweisen.

#### III-5.1.2 Untersuchungsschwerpunkte

Innerhalb des Teilprojekts “Physikalische Modelle“ wurden daher grundlagenorientierte Untersuchungen (wasserbauliche Modellversuche im Labor) durchgeführt, die sich mit dem Einfluss der Instationarität des Abflussgeschehens auf die Transportformen und die Transportrate (bei Dünentransport) in Hauptströmungsrichtung sowie darauf aufbauend mit der Auswirkung von Ausbaumaßnahmen (Buhnen) auf die Sohlstabilität befassen.

Um eine Übertragbarkeit der Labordaten auf Naturverhältnisse (an der Elbe) zu erreichen, sind hierzu einerseits komplexe hydraulische und sedimentologische Gesetzmäßigkeiten zu beachten, wobei im Rahmen der Untersuchung weitergehende Berechnungsansätze zur Berücksichtigung der Dichte des verwendeten Kornmaterials entwickelt werden konnten. Andererseits sind die im Modell unter bestimmten Abflussbedingungen gemessenen Transportparameter und -formen (Dünenhöhen etc.) mit den (i.a. sehr seltenen) Angaben aus der Natur zu vergleichen. Hierfür lagen Referenzdaten aus dem Abschnitt um Elbe-km 450 nahe Wittenberge vor.

Die Arbeiten umfassen folgende Auswertungen:

- Analyse von Flächenpeilungen (Sohlvermessungen) der Elbe aus dem Jahr 1997, aufgenommen bei unterschiedlichen Abflusszuständen,
- Experimentelle Erfassung des kritischen Zustands der einsetzenden Geschiebebewegung in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit und der Wassertiefe (Bewegungsbeginn des Sediments und Bildung der Transportkörper), bzw. Erfassung der Destabilisierung der Sohle durch Beobachtung der Änderungen der Form und Wandergeschwindigkeit der Transportkörper sowie durch Ermittlung der Transportraten,
- Entwicklung dimensionsloser Berechnungsansätze der Form und Bewegung der Transportkörper unter Berücksichtigung der Wassertiefe und der Dichte des Kornmaterials,
- Laufende Messung/Kontrolle relevanter (mittlerer) Größen wie Wassertiefe, Sohlgefälle, Sohl Schubspannung etc. in den Modellversuchen,
- Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Instationarität auf die Transportkörper und die Sohlstabilität anhand ausgewählter Abflussganglinien der Elbe,
- Experimentelle Untersuchungen zur Auswirkung von Buhnen auf die Transportformen in instationären Strömungen und Ermittlung der zeitlichen Veränderung des Zustandes der Sohlstabilität nach dem Einbau von Buhnen,
- Untersuchungen zur Sohlverformung anhand numerischer Berechnungen (siehe Kap. III-6).

### III-5.1.3 Zur Gliederung des Beitrags

Kapitel III-5.2 zeigt den Wissenstand und die Fragen zum Thema auf. In Kapitel III-5.3 werden die hydrologischen und morphologischen Verhältnisse im ausgewählten Referenzabschnitt der Elbe beschrieben. Kapitel III-5.4 erläutert das Versuchsprogramm und die angewandte Methodik in den Laborexperimenten. Im Anschluss werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen dargestellt. Hierbei wird zunächst auf die Vorversuche hinsichtlich Versuchsmaterial und Modellbetrieb (Kapitel III-5.5) sowie ab Kapitel III-5.6 auf die stationären und instationären Hauptuntersuchungen eingegangen.

## III-5.2 Wissenschaftliche Grundlagen und Fragestellungen

Die heute zur Verfügung stehende Literatur zum Thema „Transportkörper in kohäsionslosen Sedimentsohlen“ ist sehr umfangreich. Sie bezieht sich dabei in erster Linie auf stationäre Fließzustände, wohingegen die Gesetzmäßigkeiten bei instationären Abflüssen weitgehend unbekannt sind.

### III-5.2.1 Bewegungsmechanismus der Transportkörper

Als *Transportkörper* werden strömungsbedingte, rhythmische, wellenförmige Verformungen einer Oberfläche aus rolligem Sediment bezeichnet (ZANKE 1995). Man unterscheidet zwischen Riffeln (Kleinformen) und Dünen (Großformen), wobei im Hinblick auf die Elbe nur Dünen von Interesse sind.

Gemäß CHABERT & CHAUVIN (1963) kommt es unter folgenden Bedingungen zum Auftreten von Dünen:

$$D^* > 15 \quad \text{und} \quad Fr^* > 0,05$$

wobei gilt:

$$D^* = \left( \frac{\rho' \cdot g}{\nu^2} \right)^{1/3} \cdot d_m \quad (\text{Gl. 1})$$

mit:

$D^*$	[-]	sedimentologischer Korndurchmesser nach <i>Bonnefille</i>
$\rho'$	[-]	Korndichte unter Auftrieb (= $(\rho_s - \rho)/\rho$ )
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität
$d_m$	[mm]	mittlerer Korndurchmesser z.B. $d_{50}$ (bei 50% Siebdurchgang) oder nach FÜHRBÖTER (1961):

$$d_m = \frac{1}{9} \cdot \sum_{d=10}^d d_i$$

sowie:

$$Fr^* = \frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho)d} = \frac{\rho \cdot h \cdot I}{(\rho_s - \rho)d} \quad (\text{Gl. 2})$$

mit:

$Fr^*$	[-]	Froude-Zahl des Korns (= $\tau^*$ )
$\tau_0$	[N/m <sup>2</sup> ]	Sohlschubspannung
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Flüssigkeit
$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Sediments
$d$	[m]	Korndurchmesser

Die genaue Ursache der Transportkörperentstehung ist bis heute nicht geklärt. Bekannt ist, dass sich in laminarer Strömung keine Sohlformen ausbilden. FÜHRBÖTER (1980), RAUDKIVI & WITTE (1991) und GYR & MÜLLER (1996) nehmen turbulente *Bursts* (engl.) in der Grenzschicht als Initiatoren für anfängliche Zufallsstörungen in der ebenen Sohle an.

Der Bewegungsmechanismus der Transportkörper ist dadurch gekennzeichnet, dass die Strömung auf der flachen, konvexen Luvseite der Düne (Anstiegshang) durch *Erosion* einen ständigen Abtrag erzeugt. Dabei rollen oder hüpfen die Einzelkörner den Luvhang hinauf. Auf der steilen Leeseite wird Material abgelagert, und es kommt zur *Sedimentation*. Der Feststoffstrom  $q_s$  über einem Transportkörper ist also ungleichförmig verteilt und erreicht über dem Dünenkamm ein absolutes Maximum (FÜHRBÖTER 1967). Dabei ist der Kamm der Düne der Punkt, an dem Gleichgewicht zwischen Erosion und Sedimentation herrscht. Die Sohlformen bewegen sich durch eine ständige Umlagerung und es gilt:

$$Erosion (Luvhang) = Sedimentation (Leehang)$$

Aus dieser Massenbilanz folgt anschaulich nach ERTEL (1966) basierend auf den theoretischen Ansätzen von EXNER (1920 – 1931):

$$u = \frac{q_s(H)}{H} \quad (\text{Gl. 3})$$

mit:

$u$	[m/s]	Wandergeschwindigkeit des Transportkörpers
$H$	[m]	Höhe des Transportkörpers
$q_s(H)$	[m <sup>3</sup> /(s·m)]	Feststoffstrom über dem Kamm des Transportkörpers pro Breitereinheit

Das bedeutet, dass sich Transportkörper mit kleinen Höhen, bei sonst gleichen Strömungsbedingungen, schneller fortbewegen als solche mit großen Höhen. Somit erwartet man bei Systemen mit Transportkörpern unterschiedlicher Höhe ein Auflaufen von kleineren, schnelleren Formen auf große, langsame Dünen (FÜHRBÖTER 1967). Unter stationären Abflussbedingungen wird sich nach einer gewissen Zeit aus einer zunächst ebenen Sohle ein ausgereiftes Transportkörpersystem mit nahezu gleichen Formen, Höhen und Längen bilden. Das System bewegt sich mit nahezu konstanter Geschwindigkeit in Strömungsrichtung, zeigt aber selbst nur noch geringfügige zeitliche Veränderungen. Dieser Vorgang kann als synergetischer Selbstordnungsprozess der

Natur beschrieben werden. Die sich bei der Entstehung von Transportkörpersystemen einstellende Geometrie und Wandergeschwindigkeit der Sohlformen ist dabei das Ergebnis der Rückkopplung zwischen Strömung und Sediment.

Bei Transportkörpern kommt es durch die ständige Umlagerung des Sediments zu inneren Transportvorgängen. Ein Korn, das im Tal hinter dem Leeang liegenbleibt wird von nachfolgenden verschüttet. Es kann erst wieder in Bewegung geraten, wenn der gesamte Transportkörper über das Teilchen hinweg gewandert ist. Bei Sohlmaterial mit weiter Sieblinie kann es dabei zu Effekten der inneren Sortierung kommen (ZANKE 1976). Die Art der Sedimentbewegung ist auch im Hinblick auf die Erosionsproblematik sehr wichtig. Dadurch, dass sich die Aufenthaltszeit eines Sedimentpartikels in Transportkörperstrecken stark erhöht, wirken solche Abschnitte in natürlichen Gerinnen stark stabilisierend (FÜHRBÖTER 1980). Durch die lange Verweildauer des Sediments in Transportkörperstrecken spielen auch zunehmend Effekte der instationären Transportkörperbewegung eine Rolle. Dazu liegen bisher nur qualitative Erkenntnisse vor: Je mehr die augenblickliche Form eines Transportkörpers von der Form abweicht, die den Strömungsbedingungen entspricht, desto mehr wird die auf die Sohle übertragene Energie zur Umformung der Sohle beitragen. Entsprechend hat ein Transportkörper in erster Linie das Bestreben, seine äußere Form den Strömungsbedingungen anzupassen, wenn sich diese ändern. Das bedeutet, dass die Wandergeschwindigkeit bei instationärer Strömung stets kleiner sein muss als bei stationärer (ZANKE 1976).

### III-5.2.2 Kenngrößen der Transportkörper

Zur Beschreibung von Feststofftransport  $q_s$ , Dünengeometrie (Höhe  $H$ , Länge  $L$ ) und Wandergeschwindigkeit  $u$  der Dünen liegen zahlreiche Ansätze vor, die sich im wesentlichen auf Strömungsverhältnisse mit einer Wassertiefe von  $h > 0,30$  m beschränken.

#### Feststofftransport (Transportrate)

Der Ansatz zur Quantifizierung des Feststofftransports, der als Näherung nahezu allen bekannten Transportkörpergleichungen gemeinsam ist, lautet (nach FÜHRBÖTER 1967):

$$q_s = C \cdot v^n \quad (\text{Gl. 4})$$

mit:

$q_s$	[m <sup>3</sup> /(s·m)]	Feststofftransport pro Breitereinheit
$v$	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit
$n$	[-]	dimensionsloser Exponent; mit: 2 < n < 6 (RAUDKIVI & WITTE 1991)
$C$	[m]	dimensionsbehafte Konstante

Die Berücksichtigung der kritischen Fließgeschwindigkeit zu Bewegungsbeginn  $v_{\text{krit}}$ , wodurch auch der Korndurchmesser in die Betrachtung einfließt, führte zum erweiterten Potenzansatz von RAUDKIVI & WITTE (1991):

$$q_s = C \cdot (v - v_{\text{krit}})^n \quad (\text{Gl. 5})$$

mit:

$v_{\text{krit}}$	[m/s]	kritische Fließgeschwindigkeit zu Bewegungsbeginn
-------------------	-------	---

Neben diesem theoretischen Ansatz entwickelte VAN RIJN (1984) aus Modellversuchen eine empirische Formel zur Berechnung des sohnnahen Sedimenttransportes:

$$q_s = 0,005 \cdot v \cdot h \cdot \left( \frac{v - v_{\text{krit}}}{\left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g \cdot d_m \right)^{0,5}} \right)^{2,4} \cdot \left( \frac{d_m}{h} \right)^{1,2} \quad (\text{Gl. 6})$$

mit:

$h$	[m]	Wassertiefe
-----	-----	-------------

Diese Formel trägt dem Einfluss der densimetrischen Froudezahl Rechnung.

MEYER-PETER & MÜLLER (1949) entwickelten auf Basis zahlreicher Versuche mit Geschiebe unterschiedlicher Dichten die folgende Beziehung:

$$q^* = \frac{q_s}{v^* \cdot d_m} = 8 \cdot Fr^* \cdot \left( 1 - \frac{0,047}{Fr^*} \right)^{3/2} \quad (\text{Gl. 7})$$

mit:

$q^*$	[-]	dimensionslose Feststofftransportrate
$v^*$	[m/s]	Sohlschubspannungsgeschwindigkeit

### Wandergeschwindigkeit u

Zur Berechnung der Wandergeschwindigkeit  $u$  wird sowohl dem Einfluss der Wassertiefe  $h$ , als auch der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  Rechnung getragen.

Die wichtigsten Einflüsse sind nach ZANKE (1976):

1. Einfluss der Wassertiefe ( $h > 0,3$  m):

$Fr < 0,65$	kein merklicher Einfluss von $h$ auf die Wandergeschwindigkeit
$Fr > 0,65$	starke Abhängigkeit der Wandergeschwindigkeit von $h$ (nicht näher quantifiziert)

mit:

$$Fr \quad [-] \quad \text{Froude-Zahl} \quad Fr = v / (g h)^{1/2}$$

2. Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  ( $h > 0,30$  m und  $v < v_{\text{krit}}^{**}$ ):

$$u = A \cdot v_m^\Psi \quad (\text{Gl. 8})$$

mit:

$A$	[-]	Konstante, die von den Sedimentparametern abhängt
$\Psi$	[-]	Parameter, der vom mittleren Korndurchmesser $d_m$ abhängt (nicht näher quantifiziert)
$v_{\text{krit}}^{**}$	[m/s]	Geschwindigkeit, bei der die Dünen gerade noch nicht abgeschliffen werden

### Transportkörperhöhe H

Die wichtigsten Ansätze zur Beschreibung der Dünenhöhe stellten ZANKE (1982) und DORER (1984) zusammen. Nach einigen Autoren lassen sich die Transportkörperhöhen wie folgt beschreiben.

$$\frac{H}{h} = f\left(\frac{\tau_{\text{krit}}}{\tau_0}\right) \quad (\text{Gl. 9})$$

mit:

$\tau_0$	[N/m <sup>2</sup> ]	Sohlschubspannung
$\tau_{\text{krit}}$	[N/m <sup>2</sup> ]	kritische Sohlschubspannung

Davon seien hier einige Ansätze vorgestellt:

nach YALIN (1964):

$$H = \frac{1}{6} h \cdot \left( 1 - \frac{\tau_{\text{krit}}}{\tau_0} \right) \quad (\text{Gl. 10})$$

nach NORDIN (1965):

$$H = \frac{1}{3} h \cdot \left( 1 - \frac{\tau_{\text{krit}}}{\tau_0} \right) \quad (\text{Gl. 11})$$

nach GILL (1971):

$$H = \frac{1}{4} h \cdot \left( 1 - \frac{\tau_{\text{krit}}}{\tau_0} \right) \cdot (1 - Fr^2) \quad (\text{Gl. 12})$$

Der Vergleich der letzteren Formeln zeigt, dass sich aus verschiedenen Berechnungsansätzen äußerst unterschiedliche Transportkörperhöhen bei gleicher Wassertiefe und  $\tau_{krit}/\tau_0$  ergeben. Die Höhe nach NORDIN (1965) ist z.B. zweifach so groß wie die nach YALIN (1964). Bemerkenswert am Ergebnis des dynamischen Ansatzes von GILL (1971) ist, dass die Transportkörper für  $Fr = 1$  verschwinden, während die anderen Beziehungen diesen Zusammenhang überhaupt nicht berücksichtigen.

Darüber hinaus sehen andere Autoren die Transportkörperhöhe als Funktion von

$$\frac{H}{h} = f\left(\frac{v}{v_{krit}}, \frac{h}{d}\right) \quad (Gl. 13)$$

ZNAMENSKAJA (1966, in: ZANKE 1982) kommt zu folgendem graphischen Ergebnis:

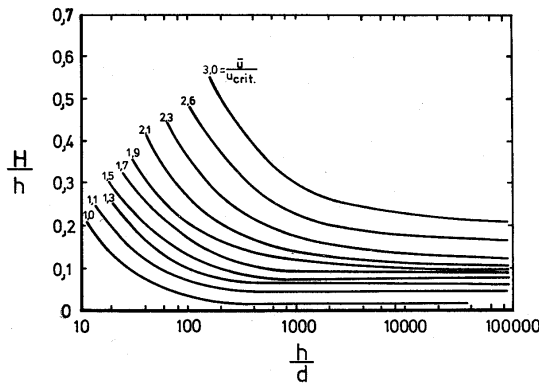


Abb. III-5.1 H/h als Funktion von h/d und v/v<sub>krit</sub> (ZNAMENSKAJA 1966).

KNOREZ (1959) gibt an:

$$\frac{H}{h} = 3,5 \cdot \frac{\left(1 - \frac{v_{krit}}{v}\right)^{2/3}}{\left(\ln \frac{h}{d} + 6\right)} \quad (Gl. 14)$$

wobei hier:

$v_{krit}$  [m/s] =  $v_{krit,10\%}$  kritische Fließgeschwindigkeit, bei der 10% der Kornpartikel in Bewegung sind

Nach VAN RIJN (1984) lassen sich die Transportkörperhöhen wie folgt berechnen:

$$\frac{H}{h} = 0,11 \cdot \left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{0,3} (1 - e^{-0,5T})(25 - T) \quad (Gl. 15)$$

mit:

$$T \quad [-] = (v^*/v_{krit}^*)^2 - 1$$

$v^*$  [m/s] relative Schubspannungsgeschwindigkeit bezogen auf das Geschiebekorn  
 $d_{50}$  [m] Korngröße bei 50% Siebdurchgang  
 $v_{krit}^*$  [m/s] kritische Schubspannungsgeschwindigkeit zu Bewegungsbeginn

JULIEN & KLAASSEN (1995) gehen zur Bestimmung der Transportkörperhöhe von der Beziehung aus:

$$\frac{H}{h} = \xi \cdot \left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{0,3} \quad (Gl. 16)$$

wobei sich 95% der dem Ansatz zugrunde liegenden Naturdaten aus zahlreichen Flüssen im Bereich von  $0,8 < \xi < 8$  befanden. Der Faktor  $\xi$  hat einen Mittelwert von 2,5.

Ausgehend von Gl. 4 und Gl. 5 zur Quantifizierung des Feststofftransportes lassen sich weitere Aussagen zur Höhe von Transportkörpern herleiten. Es ergibt sich aus dem einfachen Potenzansatz nach FÜHRBÖTER (1979):

$$\frac{H}{h} = \frac{2}{2n + 1} \quad (Gl. 17)$$

der Potenzansatz nach RAUDKIVI & WITTE (1991):

$$\frac{H}{h} = \sqrt[3]{\frac{2}{1,2} \left(1 - \frac{v}{v_{krit}}\right) + \left(1 - \frac{4,1}{1,2} \frac{v}{v_{krit}}\right)^2} - \frac{v}{v_{krit}} (2n + 1) + 2 \quad (Gl. 18)$$

Bei Gl. 18 lässt sich jedoch nicht nachvollziehen, ob  $v_{krit}$  als absolute kritische Fließgeschwindigkeit oder z.B. der 10%-ige Bewegungsbeginn definiert wurde.

RANGA RAJU & SONI (1976) leiten aus Versuchen eine weitere Gleichung ab, nach der die Transportkörperhöhen der folgenden Beziehung gehorchen:

$$\frac{H}{h} = 6500 \frac{\frac{d_{50}}{h}}{Fr^3 \sqrt{g \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) d_{50}}} (Fr^*)^{8/3} \quad (Gl. 19)$$

YALIN (1977) zeigt, dass die Rauheitswirkung einer Transportkörperstrecke sowohl von der Höhe als auch von dem Abstand aufeinanderfolgender Rauheitselemente abhängt. Damit sind die beiden Prozesse (Höhen- und Längenwachstum) voneinander abhängig. Zur Beschreibung der Rauheitswirkung wird der Parameter  $\delta = H/L$  (Steilheit) eingeführt.

$$\text{Rauheitswirkung} = f(H, \delta) \quad (Gl. 20)$$

Ausgehend von Ansätzen des Energieverlusts und des Formwiderstands leitet KARIM (1999) ab

$$\frac{H}{h} = \frac{\left( i_e - \lambda \cdot \frac{Fr^2}{8} \right) \cdot \frac{L}{h}}{\zeta \cdot Fr^2 \cdot C_1} \quad (\text{Gl. 21})$$

mit:

$i_e$	[-]	Energiegefälle
$\lambda$	[-]	Darcy-Weisbach Widerstandsbeiwert
$L$	[m]	Dünenlänge
$\zeta$	[-]	Energieverlustbeiwert
$C_1$	[-]	dimensionsloser Parameter

Auf der Grundlage zahlreicher Laborversuche von GUY ET AL. (1966) wurden von KARIM (1999) Näherungslösungen für die Berechnung des Energieverlustbeiwerts  $\zeta$ , des Darcy-Weisbach Widerstandsbeiwerts  $\lambda$  und des dimensionslosen Parameters  $C_1$  für Riffel und Dünen wie folgt angegeben:

$$\zeta = 0,55 \cdot \left( \frac{H}{h} \right)^{0,375} \cdot \left( \frac{L}{h} \right)^{-0,20} \quad (\text{Gl. 22})$$

$$\lambda = 0,135 \cdot \left( \frac{D_{50}}{h} \right)^{0,33} \quad (\text{Gl. 23})$$

$$C_1 = 0,85 \quad (\text{Gl. 24})$$

Durch Einsetzen der Gln. 22, 23, 24 in Gl. 21 folgt:

$$\frac{H}{h} = \left\{ \frac{\left[ i_e - 0,0168 \cdot \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0,33} \cdot Fr^2 \right] \cdot \left( \frac{L}{h} \right)^{1,20}}{0,47 \cdot Fr^2} \right\}^{0,73} \quad (\text{Gl. 25})$$

ZANKE (1976) stellte aus seinen Messergebnissen fest, dass Transportkörper bei einer Grenzgeschwindigkeit  $v_g$ , die nur von den Sedimentparametern abhängt, ihre größtmögliche Höhe  $H_g$  erreichen. Bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten ist die herrschende Turbulenz am Dünenkamm so groß, dass die Einzelkörner in Suspension gehen und so zum nächsten Transportkörper weiter transportiert werden. Dem Transportkörper geht dabei immer mehr Geschiebe verloren, und die Sohle ebnet sich immer weiter ein. Man spricht von Abschleifen der Transportkörper. NASNER (1974) stellt hierzu folgende Beziehung auf:

$$v_g [\text{cm/s}] = 121,6 \cdot d_m^{0,271} [\text{mm}] \quad (\text{Gl. 26})$$

### Transportkörperlänge $L$

Unter Annahme eines voll ausgebildeten Transportkörpersystems ist unter der Wellenlänge der Abstand zwischen den beiden Leehängen zweier aufeinander folgender Transportkörper zu verstehen. Diese Annahme stellt jedoch einen Idealfall dar, der in der Natur selten vorkommt. Hier treten immer Störungen bzw. überlagernde Effekte auf, die die Ausbildung der Flusssohle prägend beeinflussen. Beispielhaft zu nennen sind Einflüsse der Gerinneeometrie (Flusskrümmung, Buhnen usw.). Die durch geometrische Randbedingungen verursachten Sekundärströmungen üben einen sehr starken Einfluss auf die Sohlengestalt aus. Es kommt zur Ausbildung sogenannter Übergangsstrecken, z.B. in Form langer Sandbänke oder tiefer Kolke, in denen die Definition der Transportkörperlänge nicht eindeutig und damit i.a. subjektiv ist.

Eine allgemeingültige Formel zur Berechnung der Transportkörperlänge  $L$  existiert bisher nicht. Dennoch gibt es einige Ansätze. Aus der Analyse zahlreicher Messdaten aus Labor und Natur gaben JULIEN & KLAASSEN (1995) als Näherung an:

$$\frac{L}{h} = 6,25 \quad (\text{Gl. 27})$$

Diese Gleichung ist nah an der von VAN RIJN (1984) vorgeschlagenen Beziehung:

$$\frac{L}{h} = 7,3 \quad (\text{Gl. 28})$$

Auch YALIN (1977, vgl. auch YALIN & SILVA 2001) setzte sich mit der Frage der Transportkörperlänge auseinander und kommt zu dem mittleren Ergebnis:

$$\frac{L}{h} = 2\pi \approx 6 \quad (\text{Gl. 29})$$

### Steilheit $\delta$ der Transportkörper

Die Steilheit  $\delta$  eines Transportkörpers wird als das Verhältnis von dessen Höhe zu Länge definiert:

$$\delta = \frac{H}{L} \quad (\text{Gl. 30})$$

Der Parameter gibt zum einen Aufschluss über die Rauheitswirkung der Sohle, zum anderen eignet er sich als Vergleichsparameter zwischen verschiedenen Transportkörpersystemen, da er einen Gesamteindruck der Sohle wiedergibt.

RAUDKIVI (1982) stellt einen Zusammenhang zwischen der Steilheit  $\delta$  und der relativen Sohlbelastung  $\tau/\tau_{krit}$  („Schubspannungsüberschuss“) her. Die Ergebnisse sind in Abb. III-5.2 dargestellt. Es ist erkennbar, dass ausgehend von einer ebenen Sohle bei einsetzender Bewegung  $\delta$  mit steigendem  $\tau/\tau_{krit}$  wächst, ein Maximum erreicht und danach wieder abnimmt.

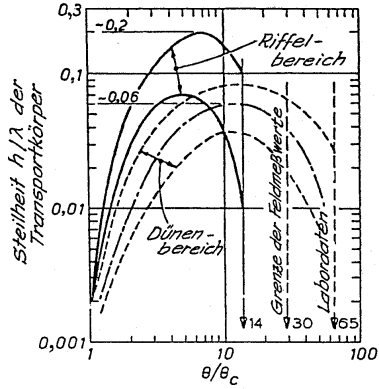


Abb. III-5.2 Steilheit  $\delta = H/L$  der Riffel und Dünen in Funktion der relativen Sohlbelastung  $\tau/\tau_{krit}$ ; RAUDKIVI (1982).

YALIN & SILVA (2001) fassen verfügbare Messdaten hierzu aus verschiedensten Quellen zusammen und leiten daraus charakteristische Beziehungen ab. Wie Abb. III-5.3 aufzeigt, ergeben sich große Unterschiede für Daten aus Labor (a: kleine Z) und Natur (b: große Z). Hierin bedeuten:  $Z = h/d$  die auf die Korngröße bezogene Fließtiefe,  $\eta_* = (v^*/v^*_{krit})^2$  die relative Fließintensität bzw. die Sohlbelastung (hier:  $v^* = (\tau_0/\rho)^{1/2}$  Schubspannungsgeschwindigkeit) und  $X = (v^* d / \nu) > 25$  die Korn-Reynoldszahl.

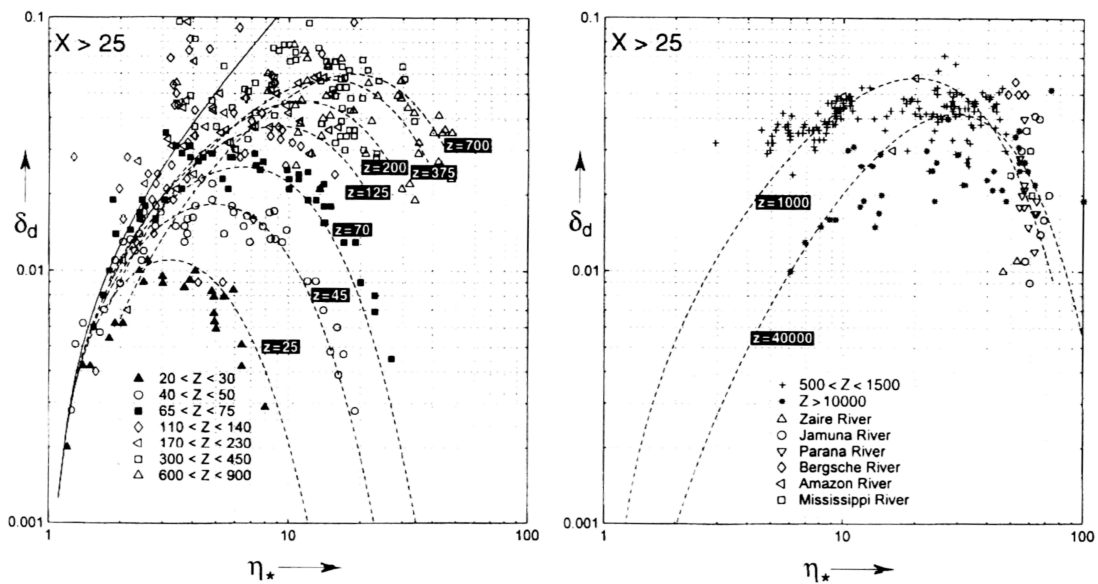


Abb. III-5.3 Gemessene Steilheiten  $\delta$  als Funktion der relativen Fließtiefe  $Z = h/d$  und relativen Sohlbelastung  $\eta_*$ : Vergleich für kleine Z (links, i.a. Daten im Labor) und große Z (rechts, mit Daten großer Flüsse); aus YALIN & SILVA (2001).

### III-5.2.3 Einfluss der Gerinnebreite

Die den gängigen Formeln für *Geschiebetransport* zugrundeliegenden Experimente wurden seinerzeit in relativ schmalen Rinnen mit kleinen Breite-zu-Wassertiefe – Verhältnissen ( $B/h$ ) durchgeführt. Ihre Ergebnisse leisten folglich für schmale Flüsse gute Dienste. Für breite Flüsse berücksichtigen sie i.a. jedoch zu wenig den Einfluss der Bettbreite. Daher können sie dort für die Erfassung des Geschiebehaushalts und der morphologischen Entwicklung des Flussbetts nicht zufriedenstellend eingesetzt werden.

ZARN (1997) untersuchte den Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. Die Versuche wurden in einer kiesführenden Rinne durchgeführt. Zur Variation der Breite der Versuchsrinne war die Rinne mit einer verschiebbaren Trennwand versehen. Gemäß seiner Modellbeobachtung verändern sich die Sohlformen mit der Verbreiterung der Rinne ausgeprägt. Er beobachtete z.B. beim Versuch mit einer Rinnenbreite von 30 cm eine ebene Sohle, während sich bei einer Rinnenbreite von 75 cm eine Übergangsform von alternierenden Bänken zu einem verzweigten Fluss ausbildete. Die Rinnenbreite von 250 cm zeigte ein verzweigtes Gerinnesystem. Anhand seiner Messergebnisse stellte er fest, dass sich die Morphologie während des Durchgangs eines Hochwassers verändert, da sie sich den Abflussbedingungen anzupassen versucht.

ZARN stellte weiter fest, dass wenn Bänke und Teilerinne vorhanden sind, sich deren Anzahl, Form und Anordnung auch bei stationärem Abfluss ändern kann; i.d.R. ist damit eine Veränderung der Geschiebetransportkapazität verbunden.

Auch die meisten Berechnungsansätze zur Transportkörperbewegung beruhen auf experimentellen Untersuchungen mit kleinen B/h-Verhältnissen der Laborrinnen. Unter solchen Randbedingungen bewegen sich Dünen parallel zur Fließrichtung, d.h. vornehmlich in zweidimensionalen Formen. Natürliche Gerinne großer Ströme weisen dagegen ein sehr großes B/h auf. Dieses beträgt z.B. an der Unteren Mittelbe im Strombett etwa 60 (vgl. Kap. II-3). Aufgrund sekundärer Strömungseffekte (quer zur Hauptfließrichtung) sind feinkörnige Sohlen dabei hauptsächlich von *dreidimensionalen* Dünenformen geprägt. Wie stark sich sekundäre Strömungseffekte auf die Transportkörperbewegung und Geschiebetransportleistung auswirken, ist bis dato noch nicht geklärt. Es ist daher kritisch zu hinterfragen, ob die bisherigen Berechnungsansätze zur Beschreibung der Transportbewegung entsprechende Gültigkeit für große B/h-Verhältnisse besitzen.

#### III-5.2.4 Einfluss der Instationarität

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich auf stationäre Abflussbedingungen, die in der Natur jedoch höchstens angenähert anzutreffen sind. Der Einfluss der Instationarität auf den Feststofftransport bei Dünenbildung wurde noch nicht systematisch untersucht, obwohl dieser i.a. nicht zu vernachlässigen ist. KAUPPERT (1997) beobachtete bei wasserbaulichen Laborversuchen mit mobilem Strombett (Elbe-Reststrecke) fest, dass sich die bei Hochwasser gebildeten großen Dünen bei nachfolgenden niedrigeren Abflüssen nur sehr langsam einebnen.

Aus den bekannten Untersuchungen unter stationären Abflussbedingungen lässt sich erkennen, dass ein Transportkörpersystem einem optimalen Endzustand zustrebt. Dieses Betreiben ist auch unter instationären Verhältnissen zu beobachten; der Endzustand wird jedoch im engeren Sinne nie erreicht, da ein Transportkörpersystem nur sehr träge auf die sich schneller ereignenden Abflussänderungen reagieren kann. Je mehr die augenblickliche Form eines Transportkörpers von derjenigen abweicht, die den aktuellen Strömungsbedingungen entspräche, desto mehr trägt die auf die Sohle übertragene Energie zur

Modifikation der äußeren Form bei. Somit steht relativ betrachtet weniger Energie für die Fortbewegung der Transportkörper zur Verfügung. Das bedeutet, dass die Wandergeschwindigkeit unter instationären Bedingungen kleiner sein muss als in einem voll ausgebildeten Transportkörpersystem im Endzustand (nur im stationären Fall erreichbar).

FÜHRBÖTER (1979) stellt fest, dass Transportkörperstrecken unter instationären Bedingungen die Funktion von Geschiebespeicherräumen übernehmen. Bei erhöhten Transportraten sammeln sie Material an und tragen dadurch langfristig zu einer Stabilisierung des Geschiebehaushalts bei. Den Anpassungsmechanismus des Transportkörpersystems beschrieb er wie folgt: Erhöht sich der Durchfluss und ist der einlaufende Feststoffstrom kleiner als das Transportvermögen auf der Transportkörperstrecke, nimmt die Querschnittfläche eines jeden Transportkörpers ab; umgekehrt nimmt die Fläche zu, wenn der Zustrom größer als das Transportvermögen ist. Wie die Untersuchungen NASERS (1974) zeigten, erfolgt der Auf- bzw. Abbau in erster Linie in der Höhe und nicht in der Länge eines Transportkörpers. Die Höhen bleiben nur im Gleichgewichtszustand konstant.

#### III-5.2.5 Einfluss von Buhnen

Über den Einfluss von Buhnen liegen bereits zahlreiche Veröffentlichungen vor. U.a. wurden von BECHTELER ET AL. (1992) zehn verschiedene Einbauten bei je drei Sohlgefällen ( $i_s = 2\text{‰}$ ,  $4\text{‰}$ ,  $6\text{‰}$ ) und einem charakteristischen Korndurchmesser ( $d_{ch} = 0,85\text{ mm}$ ) untersucht. Bei allen Versuchsreihen konnte die gleiche systematische Entwicklung festgestellt werden: Mit steigendem Verbauungsgrad nahmen erwartungsgemäß die Fließtiefen zu und die Geschwindigkeiten und der Rauheitsbeiwert nach *Strickler* ab. Ferner konnte im Ergebnis festgestellt werden: bei einem Gefälle von  $i_s = 2\text{‰}$  ist, wegen des erst bei höheren Abflüssen einsetzenden Geschiebetransports, eine befriedigende Aussage über den Einfluss der Einbauten auf die Transportkapazität kaum möglich. Bei  $i_s = 4\text{‰}$  war der Einfluss der Einbauten nur bei großen Verbauungsgraden zu erkennen. Für die Versuche  $i_s = 6\text{‰}$  wurde keine signifikante Veränderung der Transportraten gegenüber denjenigen ohne Einbauten festgestellt.

Die hier interessierende Untere Mittelbe hat dagegen ein Sohlgefälle von ca.  $i_s = 0,15 - 0,13\text{‰}$ .



### III-5.3 Morphologie und Hydrologie im betrachteten Elbeabschnitt

#### III-5.3.1 Auswahl des Referenzabschnitts

Grundlage und Ausgangspunkt für die durchgeführten Laboruntersuchungen sind die Verhältnisse im Bereich der Unteren Mittelelbe.

Morphologisch ist die Sohle praktisch im gesamten Verlauf von der Havelmündung bis zum Wehr Geesthacht durch Bank- und Transportkörperbildung geprägt. Die Auswahl einer bestimmten Referenzstrecke in diesem Elbebereich orientiert sich daher – da es sich um grundlagenorientierte Untersuchungen in einer geraden Versuchsrinne handelt – primär an der Verfügbarkeit von entsprechenden Messdaten aus der Natur zum Thema.

Der für diese Untersuchung gewählte Bezugsabschnitt liegt zwischen Elbe-km 449 und 453 nahe der Stadt Wittenberge und hat ein Sohlgefälle von ca.  $I = 0,15 \text{ ‰}$ . Hierfür lagen drei Flächenpeilungen der Elbesohle vor, die vom Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Magdeburg im Jahr 1997 bei unterschiedlichen Wasserführungen (Hochwasser-, Mittelwasser-, Niedrigwasserbereich) aufgenommen und durch die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) zur Verfügung gestellt wurden.

#### III-5.3.2 Morphologische Gegebenheiten

Während z.B. vom Rhein bekannt ist, dass oft Sanddünen über eine weniger bewegliche Kiessohle laufen, ist an der Elbe in vielen Abschnitten keine klare Unterscheidung zwischen Transportkörper und Sohle möglich. Die Transportkörper sind Teil der Sohle und von gleicher Kornstruktur, wodurch auch ihre geometrische Definition und Abgrenzung gegenüber dem Sohlhorizont Schwierigkeiten bereitet.

Dem Kornverteilungsband des Sohlmaterials entlang der Elbe (BFG 1994) ist zu entnehmen, dass sich das Sohlsubstrat ab Elbe-km 430 zu ca. 35 % bis 40 % aus Mittelsand, zu 50 % aus Grobsand, der Rest aus Fein- bis Grobkies zusammensetzt. Der mittlere Korndurchmesser im betrachteten Abschnitt liegt bei  $d_m = 1 \text{ mm}$  (vgl. hierzu Kap. III-5.4.3).

Auf Naturmessungen der BfG zum Geschiebetransport in der Elbe wird in Kap. III-5.7.7 vergleichend zu den Labordaten eingegangen.

#### III-5.3.3 Kenngrößen der Abflussdynamik

Wie angedeutet spielt das Abflussgeschehen für die morphologischen Prozesse eine maßgebende Rolle, sowohl bezogen auf das langfristige mittlere Verhalten (repräsentiert durch statistische Kenngrößen) als auch auf die individuelle Dynamik von Einzelereignissen (vor allem Hochwasser).

Für die vorliegende Arbeit sind folgende hydrologische Aspekte von besonderer Bedeutung: Einerseits ist es für die Auswertung der o.g. Flächenpeilungen erforderlich, die zu den drei Aufnahmezeitpunkten im Jahr 1997 herrschenden Abflusszustände adäquat einordnen zu können. Andererseits sind die in den instationären Modellversuchen simulierten Abflussganglinien der Elbe (Hochwasserereignisse einzelner Jahre) in Bezug zuden langfristigen hydrologischen Kenngrößen zu setzen. In diesem Fall sind dies die Jahre **1989**, **1994** und **1997**, die für den **Versuchsbetrieb** ausgewählt wurden, wobei 1997 durch den möglichen Vergleich der Sohlformen aus Labor und Natur auch der verbesserten instationären Steuerung der Laborrinne dient.

#### Hydrologische Kenngrößen

Das langfristige Abflussverhalten lässt sich bezogen auf den Pegel Wittenberge (Elbe-km 454,6) demnach wie folgt charakterisieren (in Anlehnung an die hydrologischen Analysen gemäß Kap. III-1: hierbei repräsentiert der Zeitraum 1964-1995 die heutigen Abflussverhältnisse, gerade in diesem Elbebereich, wo Eindeichungen nach 1956 zu veränderten Hochwasserabflüssen geführt haben).

In Tab. III-5.1 sind die gewässerkundlichen Hauptwerte am Pegel Wittenberge als Vergleich verschiedener Zeiträume sowie Einzeljahre aufgeführt.

**Tab. III-5.1** Zusammenstellung gewässerkundlicher Hauptwerte (Mittel- und Extremwerte des Abflusses in  $\text{m}^3/\text{s}$ ) am Pegel Wittenberge für ausgewählte (Teil-)Zeitreihen und Abflussjahre, vgl. auch Kap. III-1.

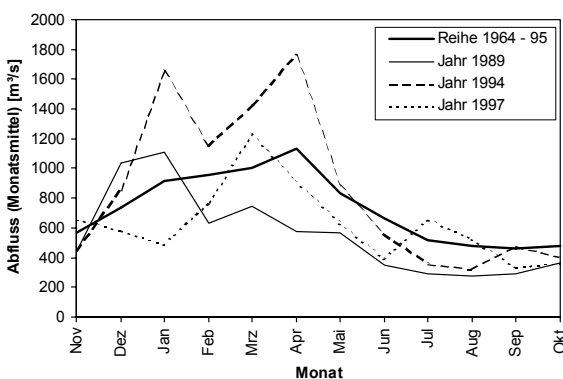
Zeitreihe	HHQ	MHQ	MQ	MNQ	NNQ
1900-95	3590	1906	677	272	120
1936-95	(23.1.1920)	1950	701	290	(20.9.1911)
1964-95		1887	715	305	
Jahr		HQ	MQ	NQ	
1989		1706	558	238	
1994		2276	854	243	
1997		1770	627	286	

In Tab. III-5.2 sind die Hochwasserkennwerte der Extremwertstatistik ablesbar. Anhand des Vergleich der beiden Tabellen wird deutlich, dass die Höchstabflüsse der Jahre 1989, 1994 und 1994 jeweils einem statistischen Wiederkehrintervall von ca. ein bis fünf Jahren zuzuordnen sind, d.h. morphologisch relevante da relativ häufige Situationen repräsentieren. Aus dem Vergleich des Jahres 1997 mit den Daten der Reihe 1964-95 kann geschlossen werden, dass es sich um ein vergleichsweise trockenes Jahr mit einem etwa zweijährlichen Hochwasser handelte, in dem die Sohlpeilungen erfolgten.

**Tab. III-5.2** Extremwertstatistik am Pegel Wittenberge für die Reihe 1964-95 (T-jährliche Hochwasserscheitelabflüsse  $HQ_T$  in  $m^3/s$ ), vgl. auch Kap. III-1.

$HQ_2$	$HQ_5$	$HQ_{20}$	$HQ_{50}$	$HQ_{100}$
1810	2500	3250	3660	3940

Das Abflussregime der Elbe ist pluvio-nival geprägt. Zur näheren Charakterisierung sind in Abb. III-5.4 die Regimeverläufe, d.h. die Jahresgänge der mittleren monatlichen Abflüsse, der Zeitreihe 1964-95 und vergleichend der o.g. Einzeljahre abgebildet. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass der typische (mittlere) Jahresgang ein Hochwasser im Winter/Frühjahr (Maximum im April) aufweist sowie eine ausgeprägte Niedrigwasserperiode im Sommer/Herbst (Minimum im September). Das Jahr 1994 fällt als relativ abflussreiches Jahr auf, mit zwei Spitzen und deutlicher Überschreitung der Mittelwerte über eine Phase von fünf Monaten (Dez. bis April). Demgegenüber präsentieren sich die Jahre 1989 und 1997 als eher trockene Jahre mit jedoch grundsätzlich ähnlichem Jahresgang.



**Abb. III-5.4** Regimeverlauf der mittleren monatlichen Abflüsse am Pegel Wittenberge der Reihe 1964-95 sowie der Abflussjahre 1989, 1994 und 1997; vgl. Kap. III-1.

In Abb. III-5.5, Abb. III-5.6 und Abb. III-5.7 sind die Ganglinien der Abflussjahre 1989, 1994 und 1997 dargestellt. Abb. III-5.7 zeigt gleichzeitig die Aufnahmezeitpunkte der drei Sohlvermessungen (Flächenpeilungen). Den drei Ganglinien ist zu entnehmen, dass in allen drei Jahren die Wasserführungen unmittelbar vor der Hochwasserwelle bei etwa  $500 m^3/s$ , d.h. deutlich unter dem mittleren jährlichen Abfluss (MQ), lagen und innerhalb etwa eines Monats ihr Maximum erreichten. Die Ganglinie 1994 weist nicht nur ein steileren und ununterbrochenen ersten Anstieg auf, sondern zugleich, wie angedeutet, mehrere Gipfel und war dadurch von insgesamt wesentlich längerer Zeitdauer als die beiden anderen Jahre.

Gemeinsam betrachtet decken die drei ausgewählten Ereignisse somit (im Rahmen der natürlichen Variabilität) unterschiedliche instationäre Abläufe ab, die um die mittleren Verhältnisse schwanken.

Aus Abb. III-5.7 ist weiterhin erkennbar, dass zwei der drei Sohlpeilungen in einem Zeitraum mit stark abnehmendem Abfluss stattgefunden haben, während die dritte Peilung in einer Periode mit mehrwöchig konstantem Abfluss ausgeführt wurde. Die erste Flächenpeilung fand knapp vier Wochen nach einem nahezu zweijährlichen Hochwasserereignis ( $Q_{max} = 1770 m^3/s$ ) statt. Während der Aufnahme betrug der mittlere Tagesabfluss  $1020 m^3/s$  und lag damit etwa im Bereich bordvoller Verhältnisse. Die zweite Flächenpeilung Ende Mai erfolgte bei  $517 m^3/s$  (unterhalb Mittelwasser) in einer Periode mit lang anhaltend rückläufigem Abfluss. Während der letzten Flächenpeilung im September betrug der Abfluss  $366 m^3/s$  und es herrschten somit Niedrigwasserverhältnisse. Man kann somit daraus schließen, dass die ersten beiden Peilungen unter instationären Bedingungen, die dritte bei nahezu stationären Verhältnissen stattfanden.

Als weiteres und an dieser Stelle letztes Merkmal zur Beurteilung der Ereignisse soll deren Form anhand der kontinuierlichen Überschreitungsdauern von Schwellenwerten dargestellt werden. Anhand der maximalen an x Tagen überschrittenen Abflüsse in den Jahren 1989, 1994 und 1997 in Abb. III-5.8 wird deutlich, dass deren Verläufe den extremwertstatistischen Wellenformen gut entsprechen, d.h. im wesentlichen parallel verlaufen.

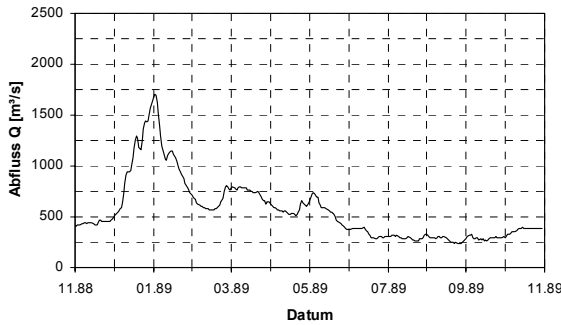


Abb. III-5.5 Ganglinie des Abflussjahres 1989 (Wittenberge).

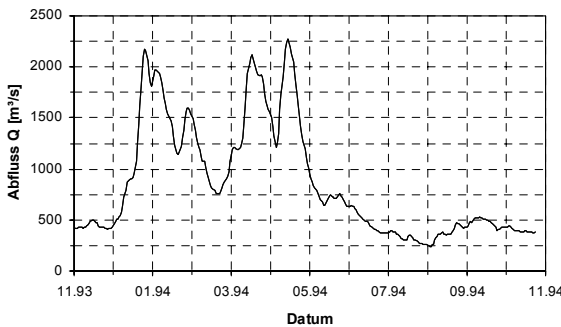


Abb. III-5.6 Ganglinie des Abflussjahres 1994 (Wittenberge)

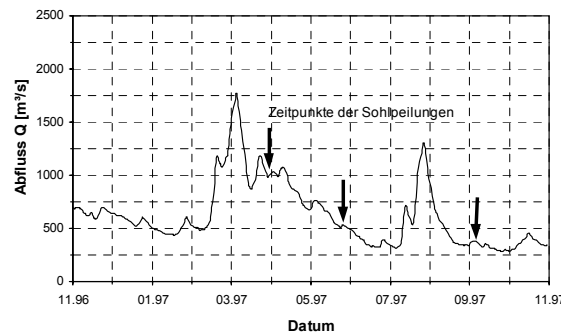


Abb. III-5.7 Ganglinie des Abflussjahres 1997 (Wittenberge) mit Aufnahmezeitpunkten der drei Flächenpeilungen

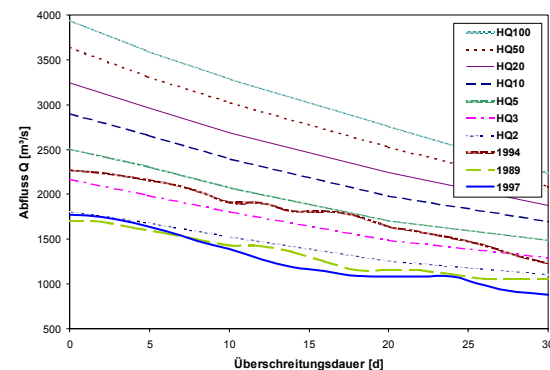


Abb. III-5.8 Kontinuierliche Überschreitungsdauern von Abflussschwellenwerten  $HQ_T$  der Jährlichkeiten T auf Basis der Abflussstatistik Reihe 1964-95 im Vergleich mit den entsprechenden Werte der Hochwasserereignisse der Jahre 1989, 1994 und 1997.

### III-5.3.4 Auswertung von Flächenpeilungen der Elbesohle unter instationären Aspekten

Um Informationen über die unter instationären Bedingungen in Natur auftretenden Sohlformen (Transportkörpergeometrien) zu gewinnen, wurden drei Flächenpeilungen der Flusssohle analysiert.

#### Datengrundlagen

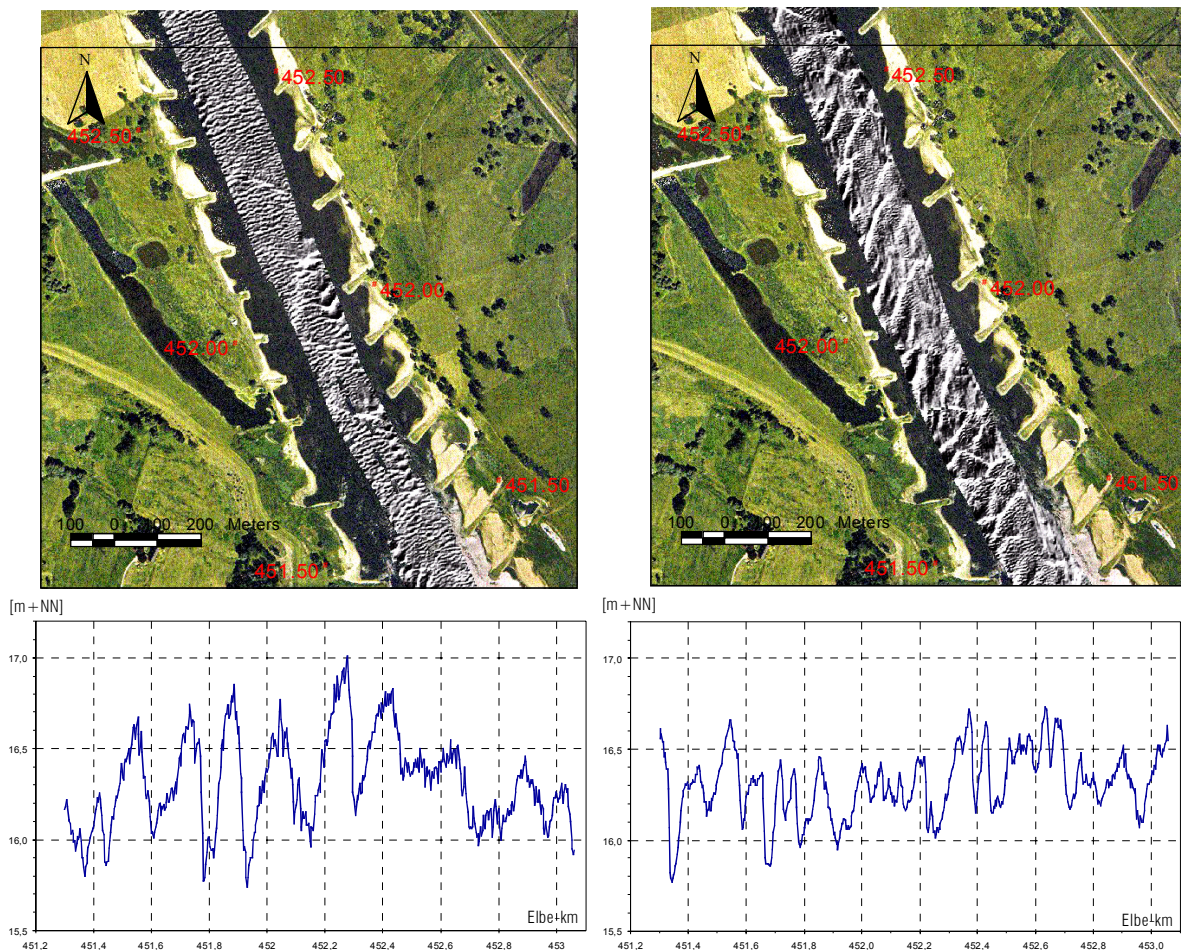
Im April, Mai und September 1997 wurden zwischen Elbe-km 449 und 453 bei Wittenberge mittels Peilung per Schiff vom WSA Magdeburg flächenhafte Vermessungen der Flusssohle vorgenommen. Die ca. vier Kilometer lange Elbestrecke lässt sich grob in zwei Hauptabschnitte unterteilen: der erste Abschnitt zwischen Elbe-km 449,0 und 451,3 beinhaltet zunächst ein kurzes Flussstück, dem sich eine starke Rechtskrümmung anschließt. Der darauffolgende Flussabschnitt zwischen Elbe-km 451,3 und 453,0 verläuft relativ geradlinig.

Tab. III-5.3 gibt Aufschluss über die Aufnahmen in den o.g. Teilstrecken. Die Aufnahme der Sohle erfolgte nicht auf der gesamten Flussbreite, sondern nur im Bereich zwischen den entlang beider Ufer in die Elbe ragenden Buhnen(-köpfen). Die Breite der gepeilten Flächen beträgt je nach Ort und Abflusszustand zwischen 100 m und 150 m.

Tab. III-5.3 Überblick über den zeitlichen Ablauf der durchgeführten Flächenpeilungen (Quelle: WSA Magdeburg); wobei „Gerade“ = ca. Elbe-km 451,3-453,0 und „Rechtskrümmung“ = ca. Elbe-km 449-451,3.

Datum	Q [m³/s]	Streckenbereich
02.04.97	1020	Gerade
03.04.97	1030	Rechtskrümmung, Gerade
27.05.97	517	Rechtskrümmung, Gerade
28.05.97	528	Rechtskrümmung
08.09.97	366	Gerade
09.09.97	354	Rechtskrümmung

Um Krümmungseinflüsse soweit wie möglich außen vor zu lassen, erfolgte die Analyse der Sohlformen in erster Linie im Bereich des geraden Flussabschnitts, d.h. die weiteren Ausführungen beziehen sich somit auf den zweiten Abschnitt der Strecke. Ferner wurde in der Auswertung versucht, eine Beeinflussung der gesuchten Parameter (Transportkörpergeometrien) durch Strukturen wie Kolke an Buhnenköpfen, Uferbänke etc. zu vermeiden.



**Abb. III-5.9** Flächenpeilungen der Elbesohle (Quelle: WSA Magdeburg, BAW) bei Hochwasser und Niedrigwasser im Vergleich:

**oben:** geschummerte Reliefdarstellung der Sohlstrukturen (Streifen in Flussmitte), graphisch eingebaut in einer Luftbildaufnahme bei Niedrigwasserführung (Quelle: WSD Ost, 1992),

**unten:** Beispiel-Längsschnitte der Sohlhöhen (jeweils gleiche Lage in Flussmitte),

**links:** Aufnahme nach Hochwasser (April 1997): kleinere Riffel laufen „waschbrettartig“ in Hauptströmungsrichtung über Großformen/Dünen hinweg (Anm.: die Länge dieser Kleinformen beträgt ca. 10 m, ihre Höhe bis zu 0,15 m),

**rechts:** Aufnahme während Niedrigwasser (September 1997): unregelmäßigere dreidimensionale Formen, keine Riffel.

### Auswertemethodik

Für die Auswertung der Flächenpeilungen (TRAU 1999) wurden folgende Methoden gewählt. Einerseits wurden aus den Daten Sohlhöhenlängsschnitte im geraden Flussabschnitt (vgl. Abb. III-5.9) extrahiert und hinsichtlich der Transportkörper nach zwei Definitionsansätzen ausgewertet. Andererseits wurden die Sohlhöhen flächenhaft statistisch analysiert, um die Variabilität insgesamt näher zu erfassen.

### Transportkörpergeometrien aus Längsschnitten

Die exakte Erfassung der Transportkörper ist eine Frage der Definition; insbesondere die Festlegung der Transportkörperlänge erweist sich als schwierig. In der analysierten Strecke (Gerade) wurde die Bestimmung dieser Größe z.B. durch zwei stationäre Sandbänke beeinflusst. Je nachdem, ob eine Sand-

bank als ein großer Transportkörper angesehen wird oder die über die Sandbänke wandernden kleineren Formen als eigenständige Transportkörper betrachtet werden, ergeben sich z.B. für die mittlere Länge sehr unterschiedliche Resultate. Zur Erfassung wurden daher zwei Definitionen verwendet bzw. verglichen, wobei in beiden Fällen zwischen Groß- und Mittelformen von Transportkörpern unterschieden wurde.

**Definition 1:** Die Transportkörperlänge wird allein nach visuellem Erscheinungsbild *im Längsschnitt* erfasst; ab einer Höhe von 0,30 m werden über Sandbänke wandernde Transportkörper als eigenständige Formen betrachtet („**Methode A**“).

**Definition 2:** Bei der Erfassung der Transportkörperlänge wird *die Draufsicht* der Flächenpeilung mit berücksichtigt um zusammenhängende Formationen, insbesondere Großformen, als solche zu erkennen und entsprechend zu werten („**Methode B**“).

**Tab. III-5.4** Ergebnisse der Transportkörperauswertung nach Methode A (nur Längsschnittbetrachtung) und B (Längsschnitt + Draufsicht).

Methoden	Parameter / Zustand	HW (02.04.97)	MW (27.05.97)	NW (08.09.97)
<b>A</b>	Anzahl Großformen (GF)	7	9	7
	Anzahl Mittelformen (MF)	2	5	7
	Mittlere Länge GF [m]	170	141	125
	Mittlere Länge MF [m]	[82]*	76	75
	Standardabweichung der Länge GF [m]	22,6	31,1	13,2
	prozentuale Abweichung vom Mittelwert	13 %	22 %	11 %
	Mittlere Höhe GF [m]	0,84	0,71	0,53
	Mittlere Höhe MF [m]	[0,38]*	0,52	0,34
	Standardabweichung der Höhe GF [m]	0,23	0,25	0,13
	prozentuale Abweichung vom Mittelwert	27 %	35 %	25 %
	Mittlere Steilheit GF [%] = Höhe / Länge	0,49	0,50	0,42
	Mittlere Steilheit MF [%]	[0,46]*	0,68	0,45
<b>B</b>	Anzahl Großformen (GF)	7	7	7
	Anzahl Mittelformen (MF)	2	3	-
	Mittlere Länge GF [m]	207	201	231
	Mittlere Länge MF [m]	[82]*	[80]*	-
	Standardabweichung der Länge GF [m]	99	112	93
	prozentuale Abweichung vom Mittelwert	48 %	56 %	40 %
	Mittlere Höhe GF [m]	0,84	0,78	0,58
	Mittlere Höhe MF [m]	[0,38]*	[0,53]*	-
	Standardabweichung der Höhe GF [m]	0,23	0,25	0,18
	prozentuale Abweichung vom Mittelwert	27 %	32 %	31 %
	Mittlere Steilheit GF [%] = Höhe / Länge	0,41	0,39	0,25
	Mittlere Steilheit MF [%]	[0,46]*	[0,66]*	-

\* [ ] bedeutet: es liegen nur wenige Werte zugrunde

In Tab. III-5.4 sind die Ergebnisse der drei Längsschnittauswertungen bei Hochwasser (HW), Mittelwasser (MW) und Niedrigwasser (NW) dargestellt.

#### Transportkörperlänge

Aus Tab. III-5.4 geht hervor, dass *nach Methode A* die Anzahl der Großformen auf der 1750 m langen Strecke unabhängig vom Abflusszustand annähernd gleich bleibt, die Anzahl der Mittelformen dagegen mit zurückgehendem Abfluss zunimmt. Die mittlere Länge der Großformen schrumpft mit kleiner werdendem Abfluss von ca. 170 m auf 125 m. Dies entspricht einem Rückgang von 36%. Die durchschnittliche Länge der Mittelformen bleibt dagegen unabhängig vom Abfluss in etwa konstant und schwankt um einen Wert von 75 m. Die Standardabweichung liefert ein Maß für die Schwankung um den Mittelwert. Prozentual bedeutet das: Bei HW bzw. NW ist die Variabilität der Transportkörperlänge mit  $\pm 13\%$  bzw.  $11\%$  relativ gering, d.h. die Transportkörper treten mit recht gleichförmiger Länge auf. Der Wert von  $22\%$  bei MW deutet auf

ungleichförmige Verhältnisse hin. Eine Begründung, warum bei MW die Längen vergleichsweise variabler ausfallen ist zunächst nur qualitativ bezogen auf die Ganglinie möglich: es kann angenommen werden, dass im Mai 1997 die Sohlformen aufgrund der vorangegangenen Entwicklung „relativ weit von dem den momentanen Strömungsbedingungen angepassten Zustand“ entfernt waren, d.h. die Abflussänderungen kurz vor der Peilung waren von der Sohle noch nicht ausgeglichen. Dagegen bewegte sich der Abflusszustand vor den beiden anderen Peilungen (HW, NW) in einem Zeitraum von bereits ca. 2-3 Wochen um den Wert des Peilzeitpunktes.

*Nach Methode B* ergeben sich aus Tab. III-5.4 im Gegensatz zu Methode A zum einen größere Werte für die mittlere Transportkörperlänge (um 200 m). Zum anderen geht aus der geringen Differenz der mittleren Länge zwischen HW und NW hervor, dass die Großformen im untersuchten Elbeabschnitt unabhängig vom Abfluss ihre Abmessungen grob beibehalten. Die Erklärung liegt nahe, dass bei Methode B mittlere und kleinere Transportkörper nicht in gleichem Maß erfasst bzw. nur als Teil

zusammenhängender Großformationen berücksichtigt werden, wobei ggf. gleichzeitig stationäre Bänke (Strukturen infolge Linienführung) indirekt erfasst werden bzw. sich überlagern.

Die Ergebnisse nach Methode A erscheinen daher als Bezug für die Laborversuche besser geeignet.

Geht man von mittleren Wassertiefen in der Größenordnung von  $h > 2$  m (NW) bis  $< 5$  m (HW) aus, so weichen die ermittelten Transportkörperlängen sehr deutlich von den o.g. Näherungsansätzen (Gln. 28, 29 und 30) ab, die von einem Verhältnis von  $L/h$  von etwa 6:1 bis 7:1 ausgehen. Das Verhältnis ist im vorliegenden Fall bis zu zehnfach größer.

#### *Transportkörperhöhe*

An den Werten in Tab. III-5.4 ist abzulesen, dass sich im Ergebnis bezüglich der Transportkörperhöhe keine wesentlichen Unterschiede zwischen Methode A und B ergeben. Es zeigt sich, dass die mittleren Höhen der Großformen mit rückläufigem Abfluss deutlich von 0,84 m auf 0,53 m abnehmen: dies entspricht einer prozentualen Abnahme der Transportkörperhöhe zwischen HW und NW um 37 %, einem Wert, der mit der oben festgestellten Verkürzung der Transportkörperlänge (nach Methode A) übereinstimmt. Die zugehörige Standardabweichung der Höhe führt zur gleichen Erkenntnis wie bei der Auswertung der Transportkörperlängen: auch hier kann für HW und NW eine Schwankungsbreite von ca. 25 % um den Mittelwert registriert werden; für den Fall MW liegt dieser Wert um etwa 10 % höher und zeigt, dass die Transportkörperhöhe in diesem Zwischenstadium die größte Variabilität aufweist.

#### *Steilheit der Transportkörper*

Aus den Ergebnissen nach Methode A geht hervor, dass die Transportkörper während bzw. nach Hochwasser (HW, MW) die größte Steilheit aufweisen. Vergleicht man z.B. die Großformen bei HW und NW, so kann eine Abnahme der Steilheit von 0,49 % auf 0,42 % festgestellt werden. Darüber hinaus zeigt sich, dass bei gleichem Abfluss Mittelformen eine größere Steilheit als Großformen aufweisen.

### **Flächenhafte statistische Analyse der Sohlhöhen**

In Ergänzung zur profilorientierten Analyse wurde eine statistische Auswertung der Flächenpeilungen vorgenommen, die bezogen auf eine definierte Grundfläche die Erfassung der minimalen und maximalen Sohlhöhe sowie die Berechnung der mittleren Sohlhöhe und deren Standardabweichung umfasst.

Für die statistische Auswertung wurde der 1750 m lange Untersuchungsabschnitt in 6 Teilabschnitte von 300 m Länge (letzter Bereich: 250 m) eingeteilt. Dieses Vorgehen leitet sich aus folgender Überlegung ab: Durch die Unterteilung in kürzere Abschnitte können u.a. gefällebedingte Änderungen der mittleren Sohlhöhe berücksichtigt werden, wobei im Teilabschnitt weiterhin mehrere Transportkörper (mit Längen von 75 m bis über 200 m, s.o.) mit ihrem gesamten Höhenspektrum abgedeckt werden. Die Breite der ausgewerteten Grundflächen wurde dabei variiert (Streifen von 16 m, 50 m, 70 m und volle gepeilte Breite, letztere jedoch uneinheitlich). Die Lage des o.g. Längsschnittes stellt jeweils die Mittenachse der Streifen in Längsrichtung dar.

#### *Mittlere Sohlhöhen*

Tab. III-5.5 fasst die ermittelten mittleren Sohlhöhen der Strecke bei verschiedenen Auswertungsbreiten zusammen. Anhand der Werte zeigt sich, dass sich die mittlere Sohlhöhe bei allen Peilungen ca. 1-2 cm variiert, unabhängig von der Breite der analysierten Grundfläche (16 m bis 70 m). Dies deutet auf eine über den betrachteten Zeitraum (5 Monate) hinweg konstante mittlere Sohlhöhe hin. Bei Berücksichtigung der vollen Breite der Peilungen, mit ihren am Rande vermehrt erfassten tieferen Stellen (wie Bühnenkolke), nimmt die mittlere Sohlhöhe ab.

Betrachtet man dahingegen die Ergebnisse in Teilabschnitten, wie in Tab. III-5.6 zusammengestellt, so zeigt sich ein deutlich variables Bild: das mittlere Sohlniveau der Teilabschnitte variiert durchschnittlich um rund 15 cm zwischen den drei Peilungen bei jeweils gleicher Grundfläche, weitgehend unabhängig von der Breite der betrachteten Sohlfläche. Die geringsten Differenzen der mittleren Sohlhöhen verschiedener Aufnahmen treten mit 8-10 cm im Teilabschnitt Nr. 3 auf, die größten mit 24-30 cm im Teilabschnitt Nr. 5. Diese Aussagen verdeutlichen die i.a. starke Abhängigkeit von Ort und Zeit von Vermessungen beweglicher Flusssohlen.

Tab. III-5.5 Mittlere Sohlhöhe  $y$  und deren Standardabweichung  $s(y)$  in Abhängigkeit der Breite der ausgewerteten Sohlfläche.

Breite B der Peilfläche (Streifen in Flussmitte)	HW (02.04.97)		MW (27.05.97)		NW (08.09.97)	
	y [m+NN]	s(y) [m]	y [m+NN]	s(y) [m]	y [m+NN]	s(y) [m]
16 m	16,31	0,20	16,30	0,24	16,31	0,16
50 m	16,31	0,23	16,30	0,28	16,29	0,21
70 m	16,31	0,26	16,30	0,30	16,30	0,25
Volle gepeilte Breite*	16,29	0,34	16,21	0,41	16,23	0,38

\*Aufgrund variierender gepeilter Breiten sowie Randeinflüssen wie Buhnenkolke sind diese Werte nur eingeschränkt vergleichbar.

Tab. III-5.6 Mittlere Sohlhöhe in den Teilabschnitten in Abhängigkeit der Breite der ausgewerteten Sohlfläche.

		Teilabschnitt Nr.					
		1	2	3	4	5	6
Elbe-km		451,3-451,6	451,6-451,9	451,9-452,2	452,2-452,5	452,5-452,8	452,8-453,05
Breite/Länge		300 m	300 m	300 m	300 m	300 m	250 m
HW (2.4.97)	16 m	16,18	16,33	16,26	16,61	16,31	16,20
	50 m	16,17	16,31	16,23	16,59	16,33	16,20
	70 m	16,17	16,31	16,26	16,54	16,33	16,21
MW (27.5.97)	16 m	16,16	16,21	16,33	16,42	16,34	16,38
	50 m	16,17	16,21	16,30	16,39	16,36	16,39
	70 m	16,18	16,22	16,33	16,37	16,36	16,37
NW (8.9.97)	16 m	16,29	16,20	16,23	16,32	16,48	16,35
	50 m	16,30	16,20	16,22	16,29	16,41	16,35
	70 m	16,32	16,20	16,25	16,30	16,41	16,34

Variabilität der Sohlhöhe

Die Standardabweichung der Sohlhöhe  $s(y)$  kann als eine Kennzahl für die Unebenheit der Sohle angesehen werden. Deren Veränderung in Abhängigkeit der Breite der analysierten Fläche (aus Tab. III-5.5) wird in Abb. III-5.10 graphisch veranschaulicht. Es zeigt sich, dass die Standardabweichung mit zunehmender Grundfläche (Breite) linear wächst, d.h. die Sohlhöhen als zunehmend variabel erfasst werden. Der Grund hierfür liegt einerseits in der sukzessiv vergrößerten Datenmenge (und damit der zusätzlich erfassten Unebenheiten der Sohloberfläche). Andererseits wirken sich, je mehr ufer- bzw. buhnen nahe Bereiche in die Auswertung einbezogen werden, Sohlstrukturen wie Kolke und Bänke (infolge Krümmung, Bauwerken etc.) im Ergebnis aus.

Vergleicht man die drei Aufnahmesituationen in Abb. III-5.10, so weist die Sohle im MW-Zustand, wie auch im Längsschnitt festgestellt, die größte Variabilität auf. Die Werte der Standardabweichung bei HW und NW liegen bei der kleinsten Breite ca. 17 % resp. 33 % unterhalb der für MW ermittelten Werte. Mit zunehmender Breite nimmt die Differenz zwischen den drei Zustände ab (<10 %).

Insgesamt wird durch die flächenhafte Auswertung der Sohloberfläche bestätigt, was schon bei der Analyse der Längsschnitte festgestellt wurde: Die Sohle zeigt für MW die größte Variabilität, wobei der Grund hierfür in ihrem Streben nach Anpassung an sich ändernde Abflussbedingungen zu suchen ist. Dies ist für HW und NW, betrachtet man die Steigung der Abflussganglinie in den 2-3 Wochen vor der jeweiligen Peilung, nicht in gleichem Maße der Fall. Die Standardabweichung für schmale Breiten stimmt gut mit dem Längsschnitt überein.

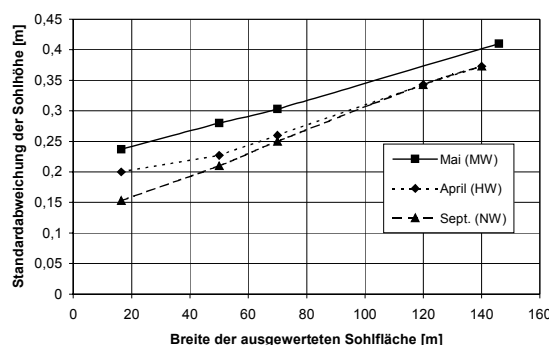


Abb. III-5.10 Standardabweichung der Sohlhöhen in Abhängigkeit der Breite der ausgewerteten Sohlfläche (über eine Streckenlänge von 1750 m).

### III-5.4 Untersuchungsprogramm und Methodik der Laborexperimente

#### III-5.4.1 Schwerpunkte der Voruntersuchungen (kleine Laborrinne)

Im ersten Schritt der experimentellen Arbeit wurden Voruntersuchungen in einer sogenannten ‚kleinen‘ Laborrinne (oder Kipprinne) durchgeführt. Kapitel III-5.4.4 beschreibt den Versuchsaufbau und die Messmethoden, Kapitel III-5.5 deren Ergebnisse.

Ein wesentlicher Schwerpunkt dieser Vorversuche war die Untersuchung und Auswahl eines geeigneten Versuchsmaterials (Sediment) für das bewegliche Bett der ‚großen‘ Laborrinne in den Hauptuntersuchungen (s.u.). Das besondere Interesse lag dabei auf der angestrebten Nutzung eines Materials *geringerer Dichte* als natürlicher Sand, d.h. eines Sediments größerer Beweglichkeit. Auf diese Weise können zeitvariante natürliche Prozesse (wie z.B. der Geschiebetransport im Verlauf eines mehrwöchigen Hochwassers oder die Bewegung einer Düne) im Labor mit akzeptablen Versuchsdauern von Stunden bis Tagen simuliert und erfasst werden. Drei Sedimenttypen (Sand, Polystyrol, PVC; s.u.) wurden hierzu unter stationären und instationären Strömungsbedingungen getestet.

Zugleich dienten die Vorversuche der Gewinnung erster Erkenntnisse bezüglich

- der Entstehung und der Dynamik von Transportkörpern (und ihrer Kenngrößen),
- der Reaktion der Sohle auf unterschiedliche Abflussänderungen in Abhängigkeit ihrer Vorbelastung bzw. ihres Zustandes,
- des instationären Versuchsbetriebs sowie der spezifischen Messtechnik,
- der Modellähnlichkeit (Modellgesetze, Entwicklung eigener Berechnungsansätze).

#### Versuchsprogramm

##### Stationärer Abfluss

- Variation von Sohlgefälle  $I$  (0 ‰ – 0,8 ‰) und Abfluss  $Q$  (5 ~ 25 l/s)
- Bestimmung der Geometrie (H, B, L) und Wandergeschwindigkeit  $u$  der Transportkörper und des Transportrate  $q_s$  des Sedimentes

##### Instationärer Abfluss

Die instationären Untersuchungen mit Sand wurden in drei Versuchsreihen durchgeführt. Die zugehörigen Fließzustände sind in Abb. III-5.11 dargestellt. Hierin ist  $v_c$  die kritische Fließgeschwindigkeit hinsichtlich des Bewegensbeginns des Sediments.

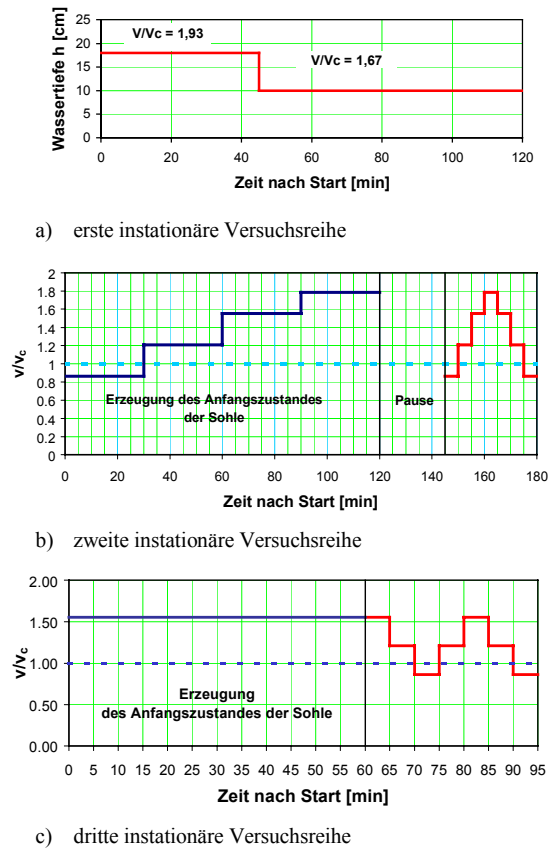


Abb. III-5.11 Fließzustände der instationären Versuchsreihen.

#### III-5.4.2 Schwerpunkte der Hauptuntersuchungen (große Laborrinne)

Die Hauptuntersuchungen wurden in der ‚großen‘ Laborrinne durchgeführt. Kapitel III-5.4.5 erläutert deren Versuchsaufbau und die dort eingesetzte Messtechnik. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt im Anschluss in Kapitel III-5.6 ff.

Zunächst wurden Experimente mit stationärer Strömung durchgeführt, wobei für unterschiedliche Abflusszustände die relevanten Parameter (s.u.) erfasst wurden. Auf Grundlage der stationären Versuche erfolgten anschließend die instationären Untersuchungen mit elbespezifischen Abflüssen. In der letzten Phase der Experimente wurde die Auswirkung von Ausbaumaßnahmen (Buhnen) auf die Transportvorgänge und die Sohlformen betrachtet.



## Versuchsmaterial

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile wurde PVC als Modellsediment in der großen Rinne verwendet. Die Anschaffungskosten der notwendigen ca. 20 m<sup>3</sup> PVC-Granulat beliefen sich auf rund 18.000 DM.

## Versuchsprogramm

### Stationärer Abfluss

Die Versuche begannen mit der Eichung eines Lamellenwehrs am Rinnenauslauf, das der Regelung der variablen Wasserspiegellage dient. Die Stellung der horizontalen Lamellen wurde dabei so geeicht, dass sich zu jedem zu untersuchenden Durchfluss im zu erreichenden Gleichgewichtszustand hinsichtlich der Sohlformation *Normalabfluss in der Rinne* einstellt. Anschließend wurde das Verhalten der Transportkörper mit Durchflüssen – umgerechnet auf die Elbe (Wittenberge) – von 200 m<sup>3</sup>/s bis ca. 1800 m<sup>3</sup>/s untersucht und dabei folgende Größen bestimmt:

- Kritische Fließgeschwindigkeit hinsichtlich des Bewegungsbeginns  $v_c$ ,
- Geometrie der Transportkörper,
- Wandergeschwindigkeit der Transportkörper  $u$ ,
- Transportrate  $q_s$ ,
- Verteilung der Fließgeschwindigkeit über, vor und hinter den Transportkörpern,
- Wasserspiegelgefälle und Sohlgefälle.

Anhand der Messergebnisse konnten die in der Voruntersuchung entwickelten Berechnungsansätze für Transportkörper überprüft, und der Einfluss der Dreidimensionalität aufgezeigt werden. Ferner bildete die stationär gemessene Transportrate eine Grundlage zur Festlegung der variablen Dosierung der Geschiebezugabe bei instationärem Abfluss.

### Instationärer Abfluss

Besonderes Augenmerk wurde der Untersuchung des Einflusses der Instationarität auf die zeitliche und geometrische Entwicklung von Transportkörpern geschenkt. Hierzu wurden in personell, zeitlich und messtechnisch aufwendigen Versuchsreihen drei Abflussganglinien der Elbe (Pegel Wittenberge) der Jahre 1989, 1994 und 1997 simuliert. Neben den o.g.

Parametern bei stationärem Abfluss wurde hierbei zusätzlich deren zeitliche Veränderung erfasst.

### Untersuchungen mit Buhnen

Zur Erfassung der Auswirkung von Ausbaumaßnahmen auf die Morphodynamik und die Sohlstabilität wurden Buhnen in die Rinne eingebaut. Dabei wurden charakteristische Abmessungen der Buhnen im Bereich der Unteren Mittelelbe gewählt. Analog zu den instationären Untersuchungen ohne Buhnen wurden die Ganglinien der Abflussjahre 1989, 1994 und 1997 simuliert, wobei auch das Geschiebe mit der entsprechenden Geschiebeganglinie (zeitvariable Dosierung) der instationären Untersuchungen zugegeben wurde. Um die Auswirkung der Ausbaumaßnahme über einen längeren Zeitraum zu untersuchen, wurde die Laborrinne jeweils dreifach wiederholt mit den Abflussganglinien der Jahre 1994 bzw. 1997 beschickt. Neben dem Einfluss der Instationarität auf die zeitliche und geometrische Entwicklung von Transportkörpern konnten somit auch die zeitliche Veränderung des Zustandes der Sohlstabilität und der Wasserspiegellage erfasst werden.

### III-5.4.3 Versuchsmaterial (Laborsedimente)

In den Vorversuchen wurde mit drei verschiedenen Sedimenten gearbeitet, aus denen ein Typ für die Hauptuntersuchungen ausgewählt wurde. Zunächst wurde ein feiner Quarzsand mit steiler Sieblinie verwendet. Die Sieblinie des Sandes ist in Abb. III-5.12 dargestellt. Zum Vergleich sind einige Kornverteilungen des Sohlmaterials im Bereich Elbe-km 425 bis 575 aufgetragen (Daten nach BFG 1994).

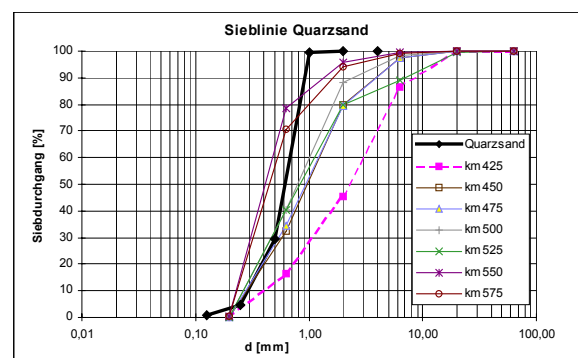


Abb. III-5.12 Sieblinie des Quarzsandes der Laborversuche im Vergleich zu Elbesieblinien nach BFG (1994).

Die untersuchten Materialien haben folgende Kenngrößen (Tab. III-5.7):

**Tab. III-5.7** Dichte, Korndurchmesser und Bonnefille-Parameter (nach Gl. 1) der untersuchten Laborsedimente und der Elbestrecke im Vergleich.

Sedimenttyp	$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$d_m$ [mm]	$D^*$ [-]
Sand (Quarz, fein) Kornverteilung	2650	0,6	14
Polystyrol-Granulat Einkornmaterial	1060	2,6	20
PVC-Granulat Einkornmaterial	1300	3,0	40
Elbe ca. km 450 (km 425 – 575)	2650	0,9 (0,5-2,0)	21 (12-48)

Der sedimentologische Korndurchmesser  $D^*$  des in den Hauptuntersuchungen verwendeten PVC-Materials liegt demzufolge im Bereich der Sedimente der Unteren Mittelelbe.

### III-5.4.4 Versuchsaufbau und Messmethoden der Voruntersuchungen

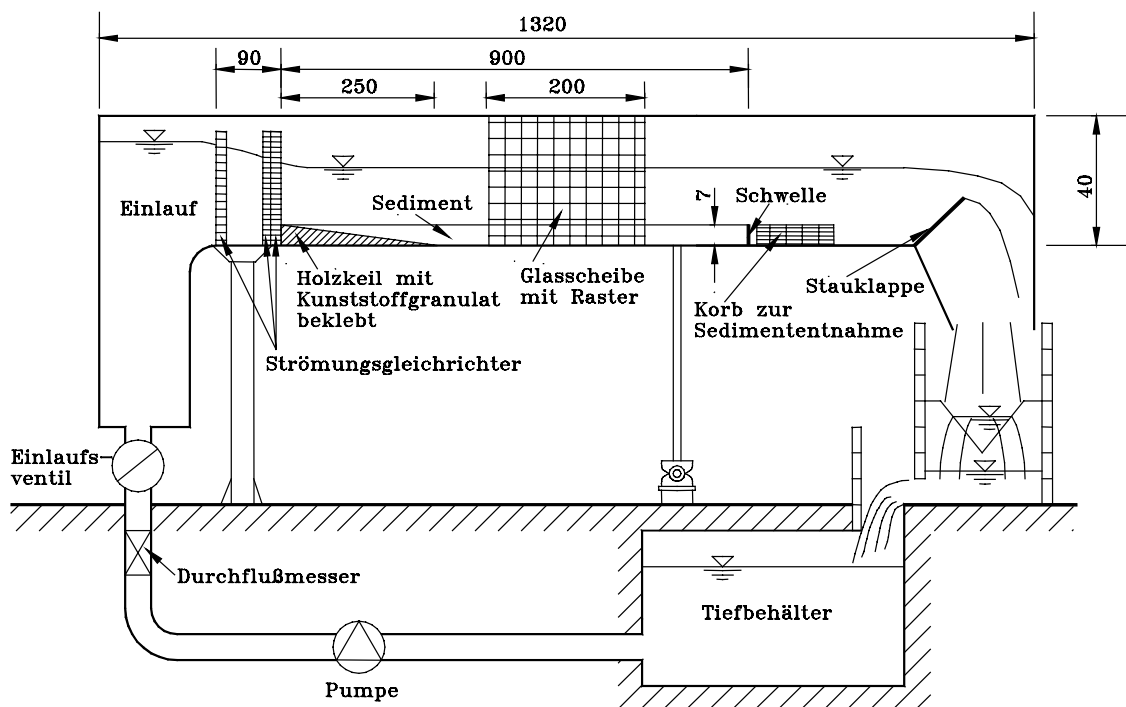
#### Versuchsaufbau

Die kleine Rinne hat eine Länge von 13,2 m, eine Breite von 0,3 m und eine Höhe von 0,4 m. Für die Versuche mit voll beweglicher Sohle wurde auf

einer Länge von 9,0 m Sediment auf die stählerne Gerinnesohle aufgebracht (Abb. III-5.13). Gläserne Seitenwände und ein darauf befestigtes Raster (Linienabstand 1 cm) im mittleren Teil der Rinne erlaubten eine gute Beobachtung des Längsprofils der Sohle während des Versuchsablaufes.

Im Einlaufbereich wurden drei Reihen Strömungsgleichrichter (grobe, mittlere und feine Röhren) angeordnet. Eine daran befestigte, während der Versuche auf der Wasseroberfläche schwimmende Kunststoffplatte diente zur Dämpfung der Oberflächenwellen. Darüber hinaus wurde direkt unterstrom der Gleichrichter ein mit Kunststoffgranulat beklebter Holzkeil (Größe L/B/H = 2,5/0,3/0,07 m) eingebaut (s. Abb. III-5.13). Durch diese Strömungsberuhigung (Gleichrichter und schwimmende Kunststoffplatte), die relativ große Rauheit des Keils und die reduzierte Menge an Sediment in diesem Bereich konnte die rein aus den Einlaufstörungen resultierende Belastung der Sohle reduziert und eine unregelmäßige Ausbildung von Sohlformen weitgehend vermieden werden.

Am Auslauf der Rinne war eine verstellbare Stauklappe angebracht, die es ermöglichte, die Wassertiefe im Gerinne unabhängig vom Durchfluss zu regeln. Mittels einer Handkurbel war es ferner möglich, die gesamte Rinne zu einem Gefälle von 0% - 2,5% zu neigen.



**Abb. III-5.13** Schemadarstellung des Versuchsaufbaus der kleinen Laborrinne (Kipprinne, Maße in cm).

### Messmethoden der Voruntersuchungen

Die Wasserzufuhr erfolgte mittels einer Pumpe aus einem Tiefbehälter der Versuchshalle. Der Durchfluss  $Q$  konnte mit Hilfe eines induktiven Durchflussmessgerätes (IDM) im Zulaufrohr mit einer Genauigkeit von 0,1 l/s geregelt werden. Aufgrund der eingebauten Strömungsgleichrichter konnten nur Durchflüsse von  $Q < 36,0$  l/s eingestellt werden.

Oberstrom und unterstrom der gläsernen Seitenwände waren in einem Abstand von 6,03 m zwei Anbohrungen an der Rinne angebracht. Diese waren jeweils an eine mit einem Spitzentaster ausgestattete Messdose angeschlossen. Damit war es möglich, die Wassertiefe an diesen Punkten zu messen (Genauigkeit: 0,1 mm).

Unter der Voraussetzung, dass die mittlere Höhe der Bettsohle – sowohl bei ebener Sohle als auch bei ausgeprägtem Transportkörpersystem – 7 cm über der Rinnensohle ( $I = 0 \text{ ‰}$ ) liegt, kann aus den beiden Spitzentastermessungen ( $h_{\text{spt1}}$ ,  $h_{\text{spt2}}$ ) die mittlere Wassertiefe  $h$  über der Sohle bestimmt werden zu:

$$h = \frac{h_{\text{spt1}} + h_{\text{spt2}}}{2} \quad (\text{Gl. 31})$$

Das Wasserspiegelgefälle  $I_w$  berechnet sich aus:

$$I_w = \frac{h_{\text{spt1}} - h_{\text{spt2}}}{603 \text{ cm}} \quad (\text{Gl. 32})$$

Obwohl die Messdosen die Schwankungen der Wasseroberfläche nur gedämpft wiedergeben, konnten Wasserspiegelschwankungen gemessen werden. Zur Kontrolle wurden daher während der Versuchsdurchführung die Spitzentaster im Abstand von fünf Minuten abgelesen und die Werte über dem gesamten Versuchsablauf gemittelt.

Zur Bestimmung der Form und Bewegung der Transportkörper standen mehrere Messmethoden zur Verfügung. Mittels des auf die Glasscheiben geklebten Rasters (1 cm s.o.) konnte die Geometrie und die Wandergeschwindigkeit der Transportkörper visuell bestimmt werden. Hierbei wurden in einem Messbereich von 0,7 m Videoaufnahmen des Sohlängsschnittes während des gesamten Versuchsablaufes durchgeführt und später wie folgt ausgewertet:

*Transportkörperhöhe  $H$* : Messung der Kammhöhe eines Transportkörpers am Anfang, in der Mitte und am Ende des Messbereichs, anschließend Mittelung

*Transportkörperlänge  $L$* : Messung von  $L$  sobald der gesamte Transportkörper (Abstand Tal – Tal) im Videobild sichtbar wurde. Bei sehr langen Transportkörpern (Abschätzung im Video nicht möglich) wurde die Länge mit dem Meterstab gemessen.

*Wandergeschwindigkeit  $u$* : Die im Videobild mitlaufende Uhr ermöglichte die Messung der Zeit, die der Kamm eines Transportkörpers benötigte um den Messbereich zu durchqueren.

Maßgebend hierfür war der Sohlängsschnitt entlang der Glasscheibe. Effekte der dreidimensionalen Ausbildung der Transportkörper konnten somit nicht berücksichtigt werden (wobei die Transportkörper bei einer Rinnenbreite von 0,3 m nach Augenschein keine Formen quer zur Fließrichtung aufwiesen).

Bei sehr geringen Transportkörperhöhen wurde festgestellt, dass mit bloßem Auge sichtbare Sohlformen auf den Videoaufnahmen nicht mehr zu erkennen sind. Bei diesen Versuchen wurden die Messungen folgendermaßen durchgeführt: Nachdem sich nach einer Anlaufzeit, ausgehend von einer ebenen Sohle, über die gesamte Rinnenlänge Transportkörper ausgebildet hatten, wurde die Wandergeschwindigkeit mehrerer Transportkörper mittels Stoppuhr am Raster gemessen. Anschließend wurde der Durchfluss durch Abstellen der Pumpen gestoppt und die Rinne sehr vorsichtig entwässert, um Priele beim Auslaufen des Wassers zu vermeiden. Auf der trockenen Sohle wurde dann die Transportkörperlänge mit Hilfe eines Meterstabes und die Transportkörperhöhe berührungsfrei mittels Laserabtastung<sup>1</sup> gemessen. Eine typische mit Hilfe der Sohlabtastung gemessene Sohlstruktur (Längsschnitt, gemittelt) ist in Abb. III-5.14 dargestellt.

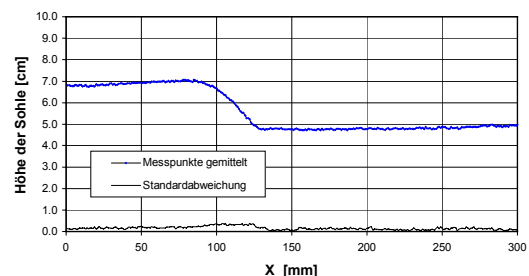


Abb. III-5.14 Typische mittels Lasersonde gemessene Sohlstruktur (Längsschnitt).

<sup>1</sup> Die Abtastung der Sohle mit Hilfe des Lasers konnte aufgrund der Lichtbrechung nicht bei fließendem oder stehendem Wasser realisiert werden (nur bezogen auf die Vorversuche).

### Vergleich/Kontrolle

Die Methode der berührungsfreien Sohlabtastung wurde auch dazu genutzt, die visuellen Messungen zu überprüfen. In Tab. III-5.8 sind einige typische mit Video und Laser gemessene Transportkörperhöhen im Vergleich angegeben:

**Tab. III-5.8** Vergleich der mittels Video und Laser gemessenen Transportkörperhöhen.

Versuch	H (Video) [cm]	H (Laser) [cm]
18.03.97	3,9	3,9
24.03.97	4,3	4,3
25.03.97	2,6	2,5
	0,9	2,3
	0,7	2,1

Diese Kontrolle zeigt, dass die Messung von größeren Dünen mit Video durchgeführt werden kann, während zur Vermessung kleinerer Transportkörper nicht auf die Laserabtastung verzichtet werden darf.

Zur Messung der *Transportrate* (Geschiebemenge pro Zeit) wurden unterstrom der Schwelle Gitterkörbe in die Rinne eingebracht, mit denen das ausgetragene Geschiebe aufgefangen werden konnte. Diese 30 cm breiten und 7 cm hohen Körbe waren mit feinmaschigem Draht ausgeschlagen und konnten leicht gewechselt werden. Die Körbe wurden in gleichmäßigen Zeitabständen gewechselt, spätestens aber, wenn nicht mehr alles ausgetragene Sediment aufgenommen werden konnte. Das Volumen des ausgetragenen Sediments wurde in einem Litergefäß in wassergesättigtem Zustand bestimmt. Mit diesen Angaben konnte die Transportrate bestimmt werden.

### III-5.4.5 Versuchsaufbau und Messmethoden (große Laborrinne)

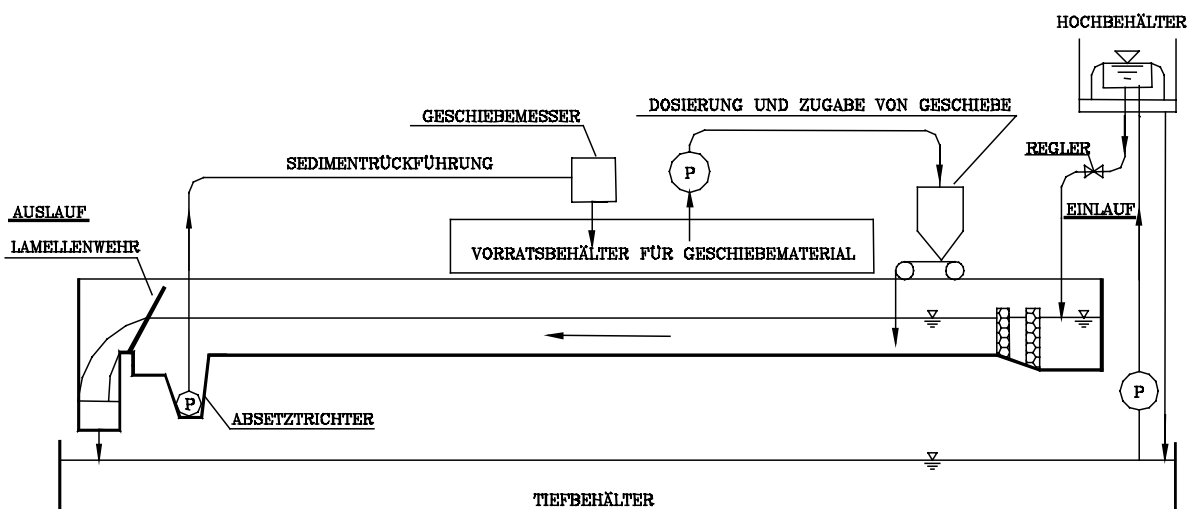
#### Versuchsstand

Der Versuchsstand bestand aus der Versuchsrinne, einem Tiefbehälter, einem Hochbehälter, drei Pumpen mit einer Gesamtkapazität von 700 l/s, Zu- und Ableitungsrohren und Regelorganen.

Die Rinne hatte eine Länge von 60 m, eine lichte Breite von 2,50 m und eine lichte Höhe von 0,70 m und ist schematisch in Abb. III-5.15 dargestellt. In einem Bereich, der 25 m vom Einlauf entfernt ist, bestanden die Seitenwände aus Edelstahlrahmen mit eingesetzten Glasscheiben von 5 m und 10 m Länge je Seite. Profilaufnahmen der verschiedenen Zustände (Wasserspiegel, Sohlstrukturen) konnten so durch die spiefelfreien Scheiben beobachtet werden.

Auf den Rinnenwänden befanden sich Trägerschienen für eine Messbrücke. Diese in x-, y- und z-Richtung verfahrbare Messbrücke (ohne Abb.) stellt einen wesentlichen Bestandteil der Versuchseinrichtung dar und konnte auf den Schienen über die gesamte Länge der Rinne eingesetzt werden. Ein Schrittmotor ermöglichte mittels entsprechender Programmierung das Ansteuern beliebiger Punkte in der gewünschten Reihenfolge.

Die Messbrücke wurde in den Versuchen sowohl mit dem Laser-Doppler-System (s.u.) zur Geschwindigkeitsmessung als auch mit einer Lasersonde (Lasertriangulator) bzw. Ultraschallsonden zur geometrischen Vermessung der Sohlfläche ausgerüstet.



**Abb. III-5.15** Schematische Seitenansicht der Einrichtung der großen Versuchsrinne.

Vom Tiefbehälter förderten drei Pumpen das Wasser zum Hochbehälter, in dem ein konstanter Wasserspiegel, d.h. eine konstante Druckhöhe für die Versuche, eingehalten werden konnte. In den drei vom Hochbehälter zur Rinne führenden Rohren waren induktive Durchflussmessgeräte (IDM) und elektronisch vom PC aus steuerbare Schieber eingebaut. Im Einlaufbereich der Rinne waren drei Beruhigungsmauern eingebaut. Vor dem Rinnenauslauf war eine Anlage zur Geschiebeentnahme und zur Messung der transportierten Feststoffmenge eingerichtet. Am Ende der Rinne war ein Lamellenwehr zur Regelung der Wasserspiegellage während des Modellbetriebes eingebaut.

### Einrichtung zur Geschiebezugabe

Das Geschiebematerial wurde von einem Vorratsbehälter über eine Förderleitung in einen Hochbehälter am Rinneneinlauf gepumpt. Unter diesem Behälter war ein Förderband angeordnet, das durch einen Motor angetrieben wird. Auf dieses Förderband wurde kontinuierlich Material abgegeben, die Dosierung hängt von der Drehgeschwindigkeit des Motors (Förderband) ab. Die Zugabe konnte somit über die Motordrehzahl vom PC gesteuert und variabel dosiert werden. Am Ende des Förderbandes fiel das Granulat in einen Verteilerkasten und wurde über sieben Kunststoffröhren fächerartig auf die gesamte Breite der Rinne verteilt. Unmittelbar hinter den Verteilerröhren sorgte ferner eine auf dem Rinnenboden angebrachte Platte, auf die in regelmäßiger Anordnung Plastikröhrchen aufgesteckt waren, für eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Zugabematerials.

### Einrichtung zur Geschiebetransportmessung

Das Geschiebe fiel am Ende der Rinne über eine scharfe Kante in einen ca. 1 m tiefen Trichter im Rinnenboden (vgl. Abb. III-5.16). Am Grunde dieser Geschiebefalle war eine Tauchpumpe positioniert, die die anfallenden Granulatteilchen sofort abführte. Die Pumpe wurde so bemessen, dass bei maximalem Geschiebetransport der Feststoffanteil ca. 20% der Fördermenge beträgt. Da die Zusammensetzung des abgepumpten Wasser-Feststoffgemisches zeitlich unterschiedlich ausfällt, wurde eine spezielle Einrichtung zur Geschiebetransportmessung konstruiert.

Das Prinzip dieser Einrichtung ist das folgende: Das Wasser-Feststoffgemisch wird in einen Behälter gepumpt, der auf zwei Seiten mit einem Edelstahlmaschengewebe versehen ist. Durch den sofortigen Wasseraustritt wird das Gemisch drainiert und das Feststoffvolumen kann bestimmt werden. Dies geschieht mit Hilfe einer Lichtschranke, die den aktuellen Füllstand des Behälters genau erfasst. Ist der maximale Füllstand im Behälter erreicht, wird ein Signal ausgegeben. Dieses bewirkt, dass das neu ankommende Wasser-Feststoffgemisch in einen parallel angeordneten Behälter gleicher Bauart umgeleitet wird. Gleichzeitig öffnet sich über einen pneumatischen Schieber der Boden des ersten Behälters und das fast trockene Granulat fällt in den Vorratsbehälter für das Geschiebematerial. Von dort kann es wieder in den Geschiebekreislauf der Rinne zurückgefördert werden. Die Füll- bzw. Entleervorgänge der Behälter werden von einem Computer registriert (bei hoher Transportrate finden mehrere Füllungen und Entleerungen pro Minute statt).



Abb. III-5.16 Geschiebefang (oben) und Lamellenwehr (unten) im Auslaufbereich der Versuchsrinne.

### Regeln des Abflusses

Der Zulauf zur großen Messrinne erfolgte über drei Rohre (zwei DN 300 und ein DN 200). Damit war es möglich, Gesamtabflüsse bis ca. 700 l/s einzustellen. Die Abflusssteuerung der Rinne erfolgte nach dem folgenden Schema: Jedes der Zulaufrohre verfügt über ein Durchflussmessgerät (IDM). Das Messgerät und der Schieber des Rohres sind über eine Regelung verbunden. Soll ein bestimmter Durchfluss im Rohr erreicht werden, so ist dieser Wert dem Regler

vorzugeben. Dieser vergleicht den Soll-Wert mit dem Ist-Wert, den das IDM liefert. Ist dieser zu hoch oder zu niedrig, so gibt der Regler ein elektronisches Signal an den Schieber, das Rohr etwas zu schließen oder zu öffnen, wobei der Regler die Position des Schiebers kennt. Für die Regelung des Abflusses über alle drei Rohre wird nur ein Regler benötigt. Er addiert die Ist-Werte, die von den einzelnen IDM's kommen, vergleicht diesen Gesamtwert mit dem angegebenen Soll-Wert und entscheidet nun, an welchem Schieber eine Korrektur nötig ist.

Für *instationäre Versuche* ist es notwendig, dem Regler nicht einen konstanten Wert vorzugeben, sondern die entsprechenden Werte einer *Ganglinie* (in mehr oder weniger diskretisierter Form). Diese Werte können über einen Computer an den Regler gegeben werden. Das Problem sind hierbei allerdings die zeitlichen Abstände der einzelnen Werte.

Das installierte Regelsystem war in der Lage, in kürzester Zeit die Werte vom Computer einzulesen, mit dem Wert des IDM zu vergleichen und eine Korrektur an den Schieber weiterzugeben.

### Regeln des Wasserstands

Bei instationärem Modellbetrieb ist neben dem Abfluss auch der Wasserstand in der Rinne kontinuierlich zu regeln. Hierzu wurde am Rinnenauslauf ein Lamellenwehr angebracht (vgl. Abb. III-5.16). Die Einstellungen der einzelnen Lamellen des Wehrs wurden für eine Vielzahl von Abflüssen im gesamten zu untersuchenden Abflussbereich angepasst. Eine solche Anpassung ist zur Gewährleistung der korrekten Simulation der Abflussganglinie mit den zugehörigen Werten unerlässlich und erfordert einen erheblichen Zeitaufwand.

### Geschwindigkeitsmessung

Zur Messung der mittleren Geschwindigkeiten in und quer zur Fließrichtung wurde ein Zweikomponenten Laser-Doppler-Anemometer (LDA) der Firma Polytec angeschafft und eingesetzt. Die Sonde des LDA-Systems besteht aus einer Edelstahlröhre mit einer in die Spitze eingesetzten Linse, durch die die Laserstrahlen austreten. Der Durchmesser der Messsonde beträgt nur 1,8 cm, so dass die Strömung nur geringfügig gestört wird.

Die Sonde wurde für die Messung der Geschwindigkeiten auf der verfahrbaren Messbrücke montiert und konnte somit sowohl in der Horizontalen als auch in verschiedenen Tiefen vom PC gesteuert eingesetzt werden. Das Messvolumen befindet sich in 5 cm Entfernung von der Sondenspitze. Die Sonde muss aus technischen Gründen mindestens 1 cm eingetaucht sein. Die Daten des LDA wurden der Datenverarbeitung (PC) im Messstand zugeführt.

### Wasserspiegelmessung

Zur Erfassung der Wasserspiegellage wurden Wegsensoren der Firma MTS vom Typ Temposonics II verwendet. Das Temposonics II Messprinzip ist ein Zeitmessverfahren. Erfasst wird dabei die Laufzeit eines Torsionsimpulses, der auf der Messstrecke – dem Wellenleiter – nach dem Prinzip der Magnetostraktion gebildet wird. Die wegproportionale Laufzeit dieses Impulses wird in der Sensorelektronik in ein analoges Ausgangssignal umgewandelt. Der Temposonics II Sensor ist mit einem sog. A-Modul ausgerüstet, das einen direkten Analogausgang mit einem Bereich von  $-10$  bis  $+10$  V dc besitzt. Der Messbereich des Sensors liegt bei 1000 mm mit einer maximalen Auflösung von 0,02 mm.

Auf einer Strecke von 50 m entlang der Rinne waren Messdosen im Abstand von 2,50 m installiert, an die die Wegsensoren, die bei Bedarf versetzbar sind, angeschlossen werden. Aus finanziellen Gründen konnten für die Untersuchung nur 10 Messsonden angeschafft werden. Die Ausgangssignale der Sensoren wurden mittels einer 12-bit Analog-Digital-Karte der Firma Stemmer in einem PC gespeichert. Zur AD-Karte wurde eigens eine spezielle Software programmiert. Eine Eichung der Sensoren kann mit gleicher Wasserspiegellage als Bezugsniveau in allen 10 Sensoren erfolgen. Aus der Spannungsdifferenz zwischen dem aktuellen Wasser- und dem Bezugsstand (Eichung) kann die Wasserspiegellage ermittelt werden.

Anhand der AD-Karte und der Software konnten alle Messwerte der 10 Sensoren zeitgleich mit einer Integrationszeit von 1 Sekunde bis 10 Minuten aufgenommen, die Werte in einer Datei im PC abgelegt und graphisch am Bildschirm dargestellt werden. Eine solche simultane Messung ist für instationäre Versuche unerlässlich.

### Erfassung der Geometrie der Sohloberfläche

Die Bettformen wurden mit Hilfe eines laseroptischen Abstandsmesskopfes (Lasertriangulator), welcher mittels der Messbrücke längs und quer der Rinne bewegt werden kann, und zwei Ultraschallmesssonden erfasst.

#### *Laseroptische Messung*

Der Messkopf des Lasers sendet infrarotes Laserlicht zu der abzutastenden Oberfläche, das von dort zurückgestreut wird. Das Streulicht erzeugt einen Lichtfleck, dessen Lage ein Maß für den Abstand der Reflektionsoberfläche zum Messkopf ist. Die Messgenauigkeit und Empfindlichkeit eines solchen Messkopfes sind in der Hauptsache durch den Winkel definiert, in dem Lichtquelle und Photozelle zueinander stehen. In der Untersuchung kam das Messsystem OPTImess 100 HP der Firma TDP zum Einsatz, dass bei einem Messabstand von 200 mm einen Messbereich von  $\pm 200$  mm mit einer mittleren Genauigkeit von 0,9 mm aufweist.

Ungünstig bei dieser Messmethode ist, dass die Sonde die Geometrie der Transportkörper aus technischen Gründen nicht richtig durch die Wasseroberfläche (hindurch) messen kann, so dass die Messung nicht während des Versuchs erfolgen kann. Zum Lösen des Problems wurde der Messkopf des Lasers in ein Gehäuse, das unten mit einer Glasscheibe versehen ist, eingebaut. Während des Versuchs hängt das Gehäuse mit der Glasscheibe im Wasser. Der Lichtstrahl des Lasers geht durch die Glasscheibe an die abzutastende Sohloberfläche. Auf diese Weise lässt sich den Einfluss von Oberflächenwellen und Lichtbrechung ausschließen.

#### *Ultraschallmessung*

Die Ultraschallsonden ermöglichen ein Abtasten der Sohle nach dem Impuls-Echo-Prinzip. Dabei wird der Abstand von der Sonde zur Sohloberfläche durch eine Laufzeitmessung ermittelt. Die Sonde gibt Ultraschallwellen als Sendeimpuls aus. Treffen diese Ultraschallwellen auf ein Medium anderer Dichte, so wird der Schall reflektiert und von der Sonde als Laufzeitecho empfangen. Während der Versuche wurden mit zwei Ultraschallsonden, die speziell für den Einsatz unter Wasser ausgerüstet sind, Längsprofile der Sohle aufgenommen.

## III-5.5 Ergebnisse der Voruntersuchungen (Grundlagen)

### III-5.5.1 Beobachtungen bei der Untersuchung stationärer Strömungen

Vor jedem Versuch wurde das jeweilige Sediment (vgl. Kap. III-5.4.3) gleichmäßig in die Rinne eingebracht und mit Hilfe eines Holzschiebers in einer Höhe von 7 cm über der Rinnensohle glattgezogen. Mittels Handkurbel wurde die Rinne auf eine Neigung von 0 % eingestellt. Danach wurde die Rinne langsam eingestaut, um Einlaufunebenheiten zu vermeiden. Nach Absenkung der zu Beginn hochstehenden Stauklappe konnte sehr rasch die gewünschte Wassertiefe und damit die gewünschte Fließgeschwindigkeit eingestellt werden.

Unmittelbar nach dieser Einstellung kam es zum Transport über ebener Sohle. Aus kleinen Anfangsstörungen an der Sohloberfläche entwickelten sich erste Sohlformen (Transportkörper). Es fiel auf, dass bei Versuchen mit kleinem Strömungsangriff mehr Zeit verging, bis die ersten Formen beobachtet werden konnten als bei großem Strömungsangriff. Die Entstehung der Transportkörper erfolgte gleichmäßig über die gesamte Rinnenlänge. Nach einer gewissen Zeit hatte sich in der gesamten Rinne ein ausgeprägtes Transportkörpersystem ausgebildet, d.h. die Dünen variierten in Geometrie und Wandergeschwindigkeit nur noch wenig. Es wurde zunächst beobachtet, dass sich bei den Versuchen mit einer Wassertiefe von  $h = 18$  cm tendenziell größere Dünen bildeten als bei  $h = 10$  cm.

Auffällig war auch, dass mit stärker werdendem Strömungsangriff die Dünen zunehmend von einer streng zweidimensionalen Form abwichen. Im unteren, weit vom Einlauf entfernten Bereich der Rinne bildeten sich gleichmäßigere Transportkörper aus bzw. nahmen die Transportkörper mit zunehmender Strecke gleichmäßigere Gestalt an.

Im Hinblick auf den in den Gitterkörben am Rinneneende aufgefangenen Sedimentaustrag zeigten sich starke Schwankungen. Diese Beobachtung bestätigt die Aussage, dass bei Dünen der Transport sehr ungleichmäßig entlang der Sohle verteilt ist (vgl. Kap. III-5.2). Wandert beispielsweise ein Dünenkamm über die Endschwelle, kommt es zu hohem Austrag, wohingegen beim Eintreffen eines Dünentals der Austrag sogar fast zu Null werden kann. Eine ideale Messung des Austrages, wobei pro Messvorgang

(Füllung des Gitterkorbes) ein Dünenkamm und ein -tal berücksichtigt wird, konnte aus versuchstechnischen Gründen selten realisiert werden.

Auffallend war auch, dass bei einigen Versuchen zunächst – solange anfangs noch Transport über ebener Sohle herrschte – mehr Geschiebe ausgetragen wurde als bei ausgeprägten Transportkörpersystemen. Dies lässt auf eine, wie FÜHRBÖTER (1980) erwähnte, Stabilisierung der Sohle durch das Entstehen von Transportkörpersystemen schließen.

Während der Versuche mit Polystyrol wurde beobachtet, dass sich die Körner bereits bei sehr geringer Fließgeschwindigkeit in Bewegung setzten. Wegen der geringen Dichte konnten zunehmend Effekte der Suspendierung beobachtet werden. Ein Teil der bewegten Körner kam nicht mehr auf der Leeseite der Transportkörper zum Liegen, sondern wurde direkt weiter zum nächsten Transportkörper verfrachtet. In diesem Fall kann streng genommen nicht mehr von einem vollständig inneren Transport (im Transportkörper) ausgegangen werden.

**III-5.5.2 Messergebnisse bei stationärer Strömung**

**Kritische Fließgeschwindigkeit**

Die kritische Fließgeschwindigkeit  $v_{krit}$  ist die Geschwindigkeit, bei der sich das Sediment gerade zu bewegen beginnt. Sie wurde in Abhängigkeit von Sedimenttyp und Wassertiefe bestimmt. Die Messergebnisse sind in der Tab. III-5.9 zusammengestellt.

**Tab. III-5.9** Gemessene kritische Fließgeschwindigkeiten  $v_c$  in Abhängigkeit der Wassertiefe  $h$  und des Sedimenttyps (vgl. Abschn. III-5.4.3).

Material	$h$ [cm]	$v_{c,absolut}$ [cm/s]	$v_{c,10\%}$ [cm/s]
Sand	10	28,2	37,1
	18	32,2	43,0
Polystyrol	10	10,8	13,5
	18	12,4	15,6
PVC	10	23,1	26,5
	18	21,9	29,1

Dabei wird unterschieden zwischen

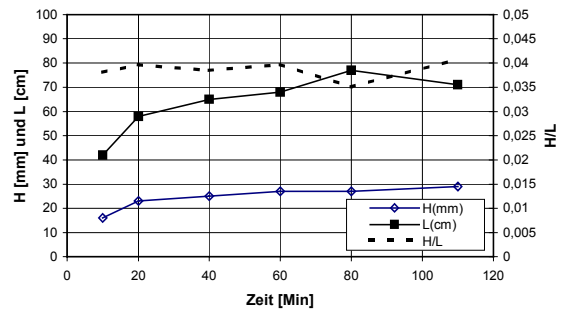
- $v_{c,absolut}$  = absoluter Bewegungsbeginn: Wenige Körner werden aus der Sohle herausgelöst und bewegen sich nur einige cm weit über die Sohle.

- $v_{c,10\%}$  = Bewegungsbeginn nach ZANKE (1982): 10% der Partikel der Sohloberfläche sind in Bewegung.

Zur Vereinfachung wird  $v_{c,absolut}$  im folgenden nur noch mit  $v_c$  bezeichnet.

**Zeitliche Entwicklung**

Aus einer anfangs ebenen Sohle bildet sich in einem Übergangszeitbereich unter konstantem Strömungsangriff ein Transportkörpersystem aus. Im Verlauf dieses Übergangsbereiches wird die Höhe und die Länge der Sohlformen tendenziell größer (Abb. III-5.17), wogegen die Wandergeschwindigkeit und die Transportrate abnimmt. Bei größeren Dünen dauert es im Vergleich zu kleineren länger, bis ein Endzustand (Mittelwert variiert kaum noch) erreicht ist.



**Abb. III-5.17** Beispiel der zeitlichen Entwicklung der Dünenhöhe  $H$ , -länge  $L$  und -steilheit  $H/L$  nach Versuchsbeginn.

Zur Beschreibung eines solchen Transportkörpersystems im ausgeprägten Zustand wird bei stationärer Strömung der Übergangsbereich nicht mehr berücksichtigt. Die Dauer des Übergangs bzw. bis zur Ausprägung eines stationären Gleichgewichtszustands ist jedoch ein wichtiger Parameter für die instationären Untersuchungen. Aus der Modellbeobachtung ergibt sich der für die stationären Versuche zu betrachtende Zeitraum (Tab. III-5.10).

**Tab. III-5.10** Mindestversuchsdauern zur Erlangung stationärer Verhältnisse.

charakteristischer Zustand	zu betrachtender Zeitraum
$h = 10\text{cm}$ $v/v_c = 1,67$	$t > 5$ min
$h = 10\text{cm}$ $v/v_c = 2,09$	$t > 10$ min
$h = 10\text{cm}$ $v/v_c = 2,22$	$t > 10$ min
$h = 18\text{cm}$ $v/v_c = 1,41$	$t > 10$ min
$h = 18\text{cm}$ $v/v_c = 1,57$	$t > 10$ min
$h = 18\text{cm}$ $v/v_c = 1,93$	$t > 10$ min
$h = 18\text{cm}$ $v/v_c = 2,15$	$t > 20$ min



### Geometrie und Wandergeschwindigkeit der Transportkörper sowie Transportrate

#### Dünenhöhe

In Abb. III-5.18 ist die Dünenhöhe  $H$  für die drei getesteten Bettmaterialien Sand, PVC und Polystyrol bei den Wassertiefen  $h = 10$  cm und  $h = 18$  cm als Funktion der Fließgeschwindigkeit  $v$  aufgetragen.

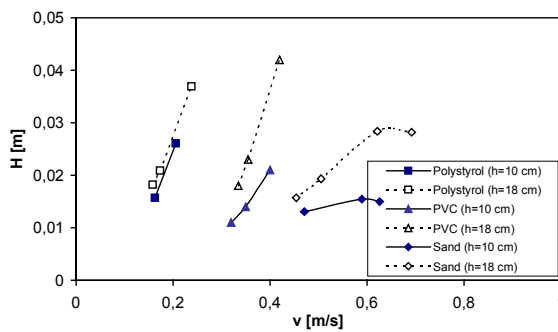


Abb. III-5.18 Höhe der Dünen aus Sand, PVC und Polystyrol in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit  $v$  bei Wassertiefen von  $h = 10$  cm und  $h = 18$  cm.

Dem Bild ist zu entnehmen, dass  $H$  sowohl von  $v$  als auch von  $h$  abhängig ist. Mit zunehmender Wassertiefe ist die Düne höher. Es fällt auf, dass die Höhe der Sanddünen mit stärkerer Belastung der Sohle zunächst zunimmt, ab Überschreiten eines Grenzwertes  $H_g$  aber wieder kleiner wird. Diese Tendenz des „Abschleifens“ der Transportkörper bei großer Strömungsbelastung ist auch, wie in Kap. III-5.2.2 aufgezeigt, in der Literatur beschrieben.

Der Einfluss der Sedimentdichte ist in Abb. III-5.18 ebenfalls deutlich zu erkennen: Die Dünenhöhe nimmt mit abnehmender Dichte des Materials zu. Im Gegensatz zu Sanddünen steigt die Höhe der Dünen aus Kunststoffgranulat bei geringerer Dichte mit zunehmender Fließgeschwindigkeit monoton an. Vermutlich ist dies darauf zurückzuführen, dass die Fließgeschwindigkeit den Grenzwert, bei dem die material- bzw. dichtespezifische Dünenhöhe ihr Maximum erreicht, noch nicht überschritten hat.

Ein Vergleich zwischen der gemessenen und der nach Gl. 14 (KNOREZ 1959) berechneten relativen Dünenhöhe  $H/h$  zeigt, wie Abb. III-5.19 darstellt, dass bis  $v/v_c \approx 1,6$  der Berechnungsansatz die tatsächliche Dünenhöhe  $H/h$  unterschätzt. Da in Gl. 14 die Sedimentdichte nicht berücksichtigt wird, sind die noch größeren Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten für die Sohle aus Polystyrolgranulat ( $\rho_s = 1060$  kg/m<sup>3</sup>) im Vergleich zur Sandsohle ( $\rho_s = 2650$  kg/m<sup>3</sup>) überraschend.

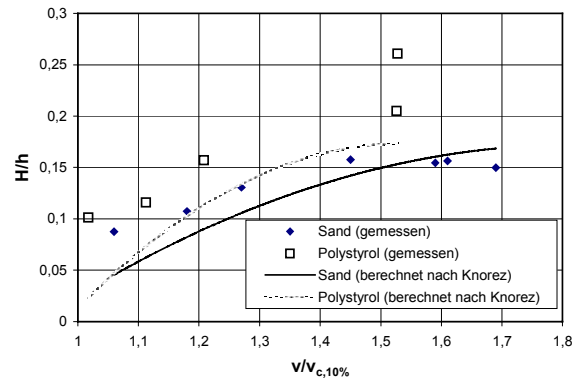


Abb. III-5.19 Vergleich der gemessenen und nach KNOREZ (1959) berechneten Dünenhöhe  $H/h$  für Sand und Polystyrol.

#### Dünenlänge

In Abb. III-5.20 sind die Dünenlängen  $L$  für Sand, PVC und Polystyrol für  $h = 10$  cm und  $h = 18$  cm in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit  $v$  aufgetragen. Im Gegensatz zur Dünenhöhe  $H$  zeigt sich kein deutlicher Zusammenhang zwischen  $L$  und den Strömungsparametern  $v$  und  $h$ . Offensichtlich ist  $L$  nicht nur von  $v$  und  $h$ , sondern auch von anderen Parametern abhängig. Da die vorhandenen Literaturangaben entweder von Riffelbildung (STEHR 1975) oder anderen Versuchsbedingungen (YALIN 1977) ausgehen, ist ein Vergleich nicht sinnvoll.

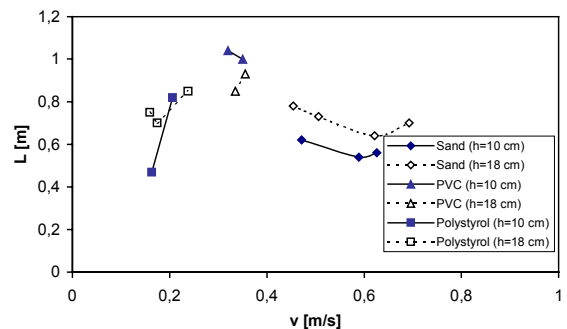


Abb. III-5.20 Dünenlänge  $L$  für Sand, PVC und Polystyrol in Abhängigkeit von  $v$  und  $h$ .

#### Wandergeschwindigkeit

In Abb. III-5.21 ist die Wandergeschwindigkeit  $u$  für Sand, PVC und Polystyrol in Abhängigkeit des Strömungsangriffs dargestellt. Man erkennt, dass die Wandergeschwindigkeit mit zunehmender Sohlbeanspruchung wächst. Erwartungsgemäß wandern Dünen aus PVC-Material bzw. Polystyrolgranulat mit geringerer Dichte deutlich schneller als Dünen aus Sand.

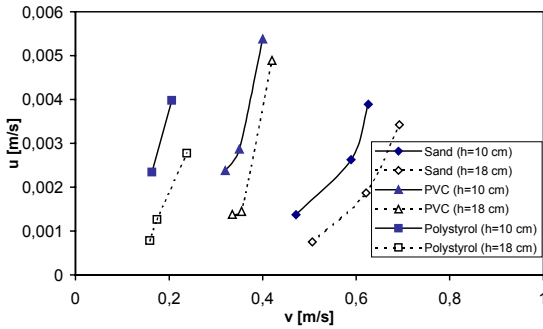


Abb. III-5.21 Wandergeschwindigkeit u in Abhängigkeit von v für das Sand-, PVC- und Polystyrolbett bei den Wassertiefen von h = 10 cm und h = 18 cm.

Zur Berechnung der Wandergeschwindigkeit u gibt FÜHRBÖTER (1967) eine von der mittleren Fließgeschwindigkeit v abhängige Gleichung an

$$u = A \cdot v^\psi \quad (\text{Gl. 8, siehe Kap. III-5.2.2})$$

mit:

A = Konstante, abhängig von den Sedimentparametern  
 $\psi = f(d_m)$ , diese Funktion wird nicht näher quantifiziert

Die Untersuchungen von ZANKE (1976) bestätigen diese Gleichung. Er erhält in einem Bereich von  $h > 30$  cm (u unabhängig von h) für  $\psi$  Werte von

$$2,3 < \psi < 3,2.$$

Die aus den Messungen berechneten Abhängigkeiten zwischen Wandergeschwindigkeit u und mittlerer Fließgeschwindigkeit v sind im Vergleich hierzu (Tab. III-5.11):

Tab. III-5.11 Parameter der Gl. 8 auf Basis der Messungen der Wandergeschwindigkeit in den Vorversuchen.

Material	h [cm]	A	$\psi$
Sand	10	0,0182	3,46
	18	0,0193	4,77
Polystyrol	18	0,205	2,98
PVC	10	0,159	3,74

Die Beschreibung der Wandergeschwindigkeit u in Abhängigkeit von v kann demnach zwar in der angegebenen Form erfolgen, die erhaltenen Werte für  $\psi$  stimmen hingegen nicht mit den Ergebnissen von ZANKE (1976) überein. Darüber hinaus zeigt sich, dass der Einfluss der Wassertiefe berücksichtigt werden muss. Mit zunehmender Wassertiefe nimmt u ab. Zudem fällt auf, dass die Konstante A für das Polystyrolbett etwa 10-fach größer ist als für das Sandbett, d.h. die Dichte des Sediments beeinflusst die Bewegung der Transportkörper wesentlich.

Transportrate

Die Transportrate  $Q_s$  kann als das Gesamtergebn der Bewegungsvorgänge an der Sohle interpretiert werden. Eine analytische Betrachtung der Transportvorgänge liefert unter Voraussetzung von zweidimensionalen Verhältnissen und einer Dreiecksform der Transportkörper die Beziehung:

$$Q_s = \frac{F}{L} \cdot B \cdot u = 0,5 \cdot H \cdot B \cdot u \quad (\text{Gl. 33})$$

mit:

F = Querschnittsfläche eines Transportkörpers

B = Gerinnebreite

In Abb. III-5.22 wurden die gemessenen Transportraten  $Q_s$  gegen die mit Hilfe der Gl. 33 berechneten Werte von  $Q_s$  aufgetragen. Bei Übereinstimmung der berechneten und der gemessenen Werte müssten alle Punkte auf der Winkelhalbierenden liegen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen Transportraten und den berechneten Werten von  $Q_s$  für das Sandbett. Beim Polystyrolbett weichen die berechneten Werte leicht von den gemessenen Werten ab. Diese insgesamt relativ gute Übereinstimmung lässt Aussagen über die Güte der hier vorgestellten Labormessungen zu.

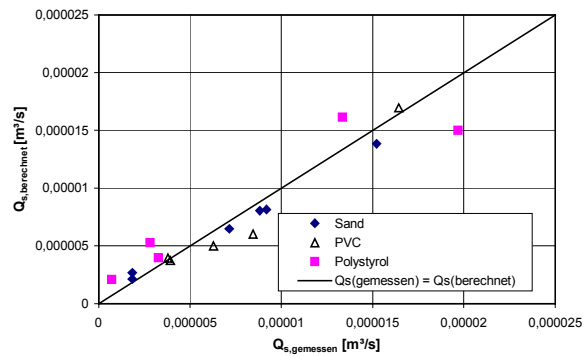
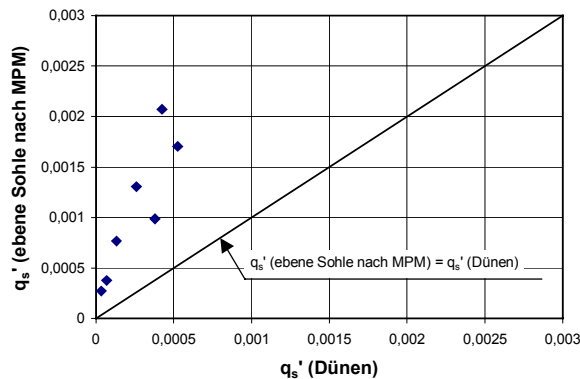


Abb. III-5.22 Vergleich der nach Gl. 33 berechneten Transportrate  $Q_s$  mit den gemessenen Werten von  $Q_s$  für Sand-, PVC- und Polystyrolmaterial bei Wassertiefen von h = 10 cm und h = 18 cm.

Wie erwähnt stellte FÜHRBÖTER (1967) fest, dass durch Auftreten von Transportkörpern eine hohe Stabilisierung der Sohle erreicht werden kann. Versuche zur Quantifizierung dieser Stabilisierungswirkung sind allerdings nicht realisierbar. So treten beim vorliegenden Sohlmaterial ab einer bestimmten Sohlbeanspruchung immer Dünen auf. Welche Transportrate ein bestimmter Strömungsangriff über einer ebenen Sohle verursachen würde, wird daher

anhand Gl. 7 (nach MEYER-PETER & MÜLLER 1948) abgeschätzt. Diese Transportformel, deren Gültigkeitsbereich die vorliegenden Verhältnisse einschließt, bietet zwar die Möglichkeit, einer Sohlstruktur mit Transportkörpern Rechnung zu tragen, sie wird hier aber bewusst auf Transportverhältnisse über einer ebenen Sohle angewandt.

In Abb. III-5.23 ist die gemessene dimensionslose Transportrate der Sanddünen der nach Gl.7 berechneten Transportrate für eine ebene Sohle gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass ein theoretischer Transport über ebener Sohle um etwa den Faktor 5 größer ist als der (gemessene) Transport in einem ausgeprägten Transportkörpersystem. Eine Stabilisierung der Sohle durch das Ausbilden von Transportkörpern kann also nachvollzogen werden.



**Abb. III-5.23** Vergleich von gemessener und nach Gl. 7 (MPM: MEYER-PETER & MÜLLER 1949) berechneter Transportrate der Sanddünen bei ebener Sohle.

Ein Vergleich der Daten mit anderen Autoren zeigt Abweichungen mit den hier erzielten Ergebnissen. Da diese Autoren allerdings von größeren Wassertiefen ( $h > 30$  cm) ausgehen, können die beobachteten Unterschiede nachvollzogen werden. Um Klarheit zu erhalten, muss man sich vergegenwärtigen, dass die wirklich maßgebende Fließgeschwindigkeit zur Beschreibung der Transportvorgänge die Geschwindigkeit  $v_s$  an der Sohle ist. Die vorhandenen Gleichungen beziehen sich jedoch auf mittlere Fließgeschwindigkeiten. Die mittlere Fließgeschwindigkeit  $v$  kann überhaupt nur deshalb sinnvoll als Variable angesetzt werden, weil das Verhältnis von  $v/v_s = 1,4 = \text{konstant}$  ist. Dies gilt in einem Bereich von  $h > h_{\min}$ .

ZANKE (1976) gibt an:

$$h_{\min} [\text{cm}] = 35,4 \cdot d_m^{0,542} [\text{mm}] \quad (\text{Gl. 34})$$

Dies ergibt hier ( $d_m = 0,6$  mm) eine Grenztiefe von  $h_{\min} = 27$  cm. Da die untersuchten Tiefen ( $h = 10$  cm und  $h = 18$  cm) unterhalb von  $h_{\min}$  liegen, ist das Verhältnis  $v/v_s$  nicht mehr konstant, sondern eine Funktion der Wassertiefe  $h$ . Somit ist zu erwarten, dass die Berechnungen mit  $v$  beim Einsetzen in die vorhandenen Formeln zu Abweichungen führen.

### III-5.5.3 Berechnungsansätze für Transportkörper unter Berücksichtigung der Wassertiefe und Sedimentdichte

Wie dargelegt sind viele Laboruntersuchungen auf Wassertiefen  $h < 30$  cm beschränkt. Ferner wird zur Verkürzung der Versuchsdauer von Experimenten zur Sedimentbewegung häufig ein Material geringerer Dichte als Sand verwendet. Im Hinblick auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist es daher sinnvoll, die Gesetzmäßigkeit der Transportkörperbewegung bei Wassertiefen  $h < h_{\min}$  (s. oben) unter Berücksichtigung der Sedimentdichte zu klären.

In der vorliegenden Untersuchung wurden anhand der Dimensionsanalyse und den Ergebnissen der Vorversuche (vgl. Kapitel III-5.5.2) dimensionslose Ansätze zur Berechnung der Höhe  $H$ , Länge  $L$ , Steilheit  $H/L$  und Wandergeschwindigkeit  $u$  der Dünen sowie der Transportrate  $Q_s$  entwickelt, die für unterschiedliche Sedimentdichten und Wassertiefen  $h < h_{\min}$  gültig sind. Demnach gilt:

– Dünenhöhe:

$$H' = \frac{H}{h} \frac{\rho_s}{\rho} = 0,237 \cdot \Delta Fr^{0,517} \quad (\text{Gl. 35})$$

– Dünenlänge:

$$L' = \frac{L}{d_m} \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 = -46,98 \Delta Fr + 82,23 \quad (\text{Gl. 36})$$

– Dünensteilheit:

$$\begin{aligned} \delta' &= \frac{H}{L} \frac{d_m}{h} \left( \frac{\rho_s}{\rho} \right)^{2,6} \\ &= -0,0868 \Delta Fr^3 + 0,0414 \Delta Fr^2 + 0,0006 \Delta Fr + 0,0005 \end{aligned} \quad (\text{Gl. 37})$$

– Wandergeschwindigkeit:

$$u' = \frac{u}{\sqrt{g \cdot d_m}} \left( \frac{\rho_s}{\rho} \right)^{1,6} = 1,689 \cdot \Delta Fr^2 + 0,113 \Delta Fr - 0,0038 \quad (\text{Gl. 38})$$

– Transportrate:

$$q_s' = \frac{Q_s}{B \cdot h \cdot v} = \frac{0,020}{\Delta^{1,2}} \cdot \Delta Fr^{2,4} \quad (Gl. 39)$$

mit:

- B [m] Gerinnebreite
- H [m] Wassertiefe
- v [m/s] Fließgeschwindigkeit
- d<sub>m</sub> [m] mittlerer Korndurchmesser nach FÜHRBÖTER (1961)
- ρ, ρ<sub>s</sub> [kg/m<sup>3</sup>] Dichte des Wassers bzw. des Sediments
- ΔFr [-] Differenzfroudezahl bezogen auf die Wassertiefe  

$$\Delta Fr = \frac{v - v_c}{\sqrt{g \cdot h}}$$
- ΔFr' [-] Differenzfroudezahl bezogen auf den Korndurchmesser  

$$\Delta Fr' = \frac{v - v_c}{\sqrt{g \cdot d_m}}$$
- v<sub>c</sub> [m/s] kritische Fließgeschwindigkeit zu Bewegungsbeginn
- Δ [-] Dichte des Sedimentes unter Auftrieb  

$$\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$$

Anhand der Gln. 35 – 39 können folglich die Höhe, Länge, Steilheit und Wandergeschwindigkeit der Dünen sowie die Transportrate für verschiedene Bettmaterialien ermittelt werden. Diese Ergebnisse sind nicht nur für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen in der großen Rinne von grundlegender Bedeutung.

In Abb. III-5.25 bis Abb. III-5.28 sind die zugrunde liegenden Messdaten und die o.g. Beziehungen für die Parameter H', L', u' und q<sub>s</sub>' als Funktion der Differenzfroudezahl ΔFr' bzw. ΔFr dargestellt; letztere kennzeichnen hierbei die auf die Sohle im bewegten Zustand effektiv wirkende und vom verwendeten Material abhängige Strömungsbelastung.

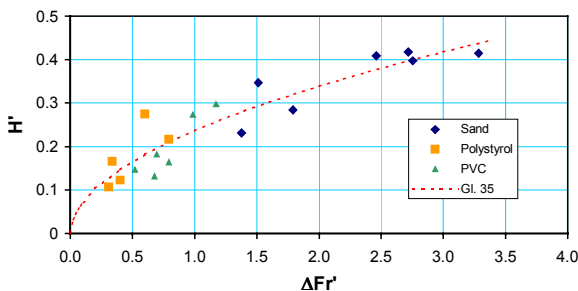


Abb. III-5.24 Dimensionslose Dünenhöhe H' in Abhängigkeit der Differenzfroudezahl ΔFr' (vgl. Gl. 35).

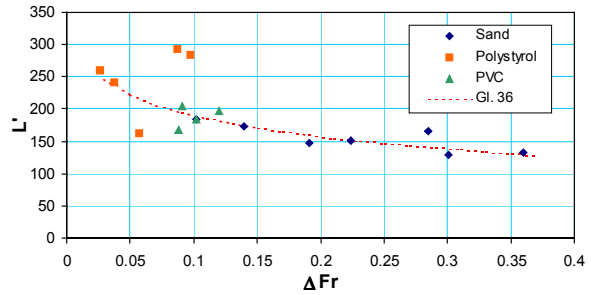


Abb. III-5.25 Dimensionslose Dünenlänge L' in Abhängigkeit der Differenzfroudezahl ΔFr (vgl. Gl. 36).

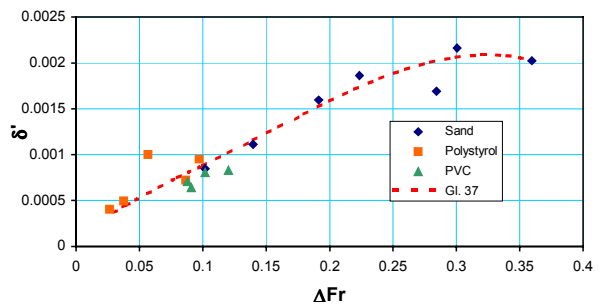


Abb. III-5.26 Dimensionslose Steilheit δ' in Abhängigkeit der Differenzfroudezahl ΔFr (vgl. Gl. 37).

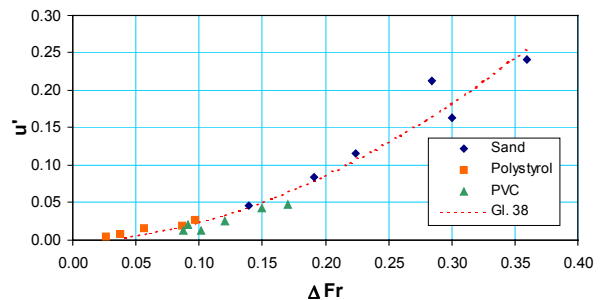


Abb. III-5.27 Dimensionslose Wandergeschwindigkeit u' in Abhängigkeit der Differenzfroudezahl ΔFr (vgl. Gl. 38).

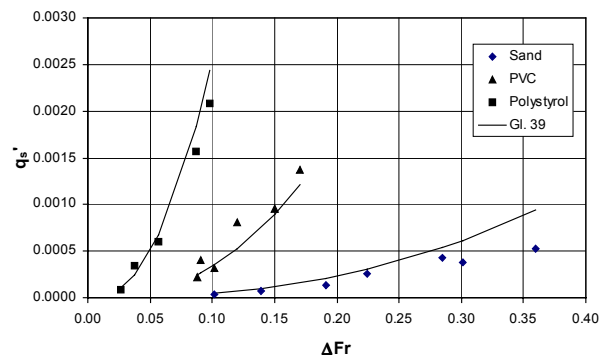


Abb. III-5.28 Dimensionslose Transportrate q<sub>s</sub>' in Abhängigkeit der Differenzfroudezahl ΔFr (vgl. Gl. 39).

### III-5.5.4 Ergebnisse bei instationärer Strömung

Wie in Kap. III-5.4.1 eingeführt, dienten die Vorversuche auch der Gewinnung erster Erfahrungen unter instationären Aspekten. Die Versuche erfolgten durch Untersuchung von drei unterschiedlichen Arten von Fließvorgängen, die in den Abb. III-5.11 a) bis c) dargestellt sind. Hieraus ergibt sich:

#### a) „Plötzliche Abnahme der Strömungsbelastung“

In der ersten Versuchsreihe wurde der Strömungsangriff übergangslos von einem Zustand mit relativ großer Wassertiefe ( $h = 18$  cm) und Sohlbelastung ( $v/v_c = 1,93$ ) auf einen Zustand mit niedrigerer Wassertiefe ( $h = 10$  cm) und geringerem Strömungsangriff ( $v/v_c = 1,67$ ) geändert (vgl. Abb. III-5.11a). Dieser abrupte Wechsel der hydraulischen Gegebenheiten verursachte einen allmählichen Wechsel der Form der Transportkörper. Es konnte beobachtet werden, dass die zu Anfang ausgebildeten großen Dünen sofort ihre Wandergeschwindigkeit ändern und nach und nach kleiner wurden.

Aufgrund der geringen Wandergeschwindigkeit der auftretenden Dünen waren Ungenauigkeiten nicht zu vermeiden. Der Versuch wurde daher dreimal wiederholt. Die gemessenen Zeitspannen des Übergangs zwischen den zwei – wiederum stationären Bedingungen entsprechenden – Transportzuständen sind in Tab. III-5.12 angegeben. Zum Vergleich wird die Dauer betrachtet, die eine vergleichbare Strömung ( $h = 10$  cm,  $v/v_c = 1,67$ ) benötigt, um die Sohlformen aus einer ebenen Sohle heraus zu bilden. Die Darstellung in Kap. III-5.5.2 (vgl. Tab. III-5.10) zeigt, dass sich bereits nach  $t > 5$  min die Vorgänge an der Sohle nicht mehr änderten.

Tab. III-5.12 Gemessene Zeitspannen des Übergangsbereichs.

Versuch	Dauer des Übergangsbereichs
1	53 min
2	28 min
3	39 min

Der Vorgang der Ausbildung der Sohlformen beim Angriff einer bestimmten Strömung dauert also länger, wenn die Sohle bereits durch eine größere Strömung vorbelastet war. Dies stimmt mit Beobachtungen aus der Natur überein, nach denen sich die bei einem Hochwasser gebildete Dünen bei rückläufigem Abfluss nur langsam einebnen.

#### b) „Instationäre Belastung einer höher vorbelasteten Sohle, mit abrupter Änderung“

Bei der zweiten Versuchsreihe wurde während einer Vorbereitungsphase der Durchfluss stufenweise gesteigert (vgl. Abb. III-5.11b). Nachdem eine bestimmte Sohlbelastung ( $v/v_c = 1,78$ ) erreicht war, wurde die Pumpe ausgeschaltet. Dadurch wurde eine dieser Strömungsbedingungen ( $v/v_c = 1,78$ ,  $h = 18$  cm) angepasste Bettform als Anfangszustand erzeugt. Nach einer Pause wurde der Versuch mit dem instationären Vorgang, ausgehend von einem kleinen Durchfluss ( $v/v_c = 0,86$ ) fortgesetzt; in stationären Versuchen ist bei diesem Strömungszustand ( $v/v_c = 0,86$ ) die Sohle eben.

Im vorliegenden Fall dagegen bedeutet das, dass die zu Beginn des instationären Vorgangs vorhandene Bettform bereits stark von der den Strömungsbedingungen angepassten Bettform abwich. Die Versuche erfolgten mit zwei Ganglinien bei einer konstanten Wassertiefe ( $h = 18$  cm) in drei bzw. fünf Stufen mit Zeitintervallen von 2,5 bzw. 5 Minuten. Der Strömungsangriff wurde zunächst vom Zustand geringeren Strömungsangriffs ( $v/v_c = 0,86$ ) stufenweise auf einen Zustand größerer Sohlbelastung ( $v/v_c = 1,78$ ) geändert und wieder stufenweise auf den Anfangszustand zurück eingestellt.

In der Literatur herrscht z.T. die Auffassung, dass der Transportbeginn bei einer mit Transportkörpern bedeckten Sohle erheblich später als bei ebener Sohle einsetzt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass es größerer Initialgeschwindigkeiten bedarf, um ein Korn auf dem negativ geneigten (ansteigenden) Luvhang einer Düne in Bewegung zu setzen. Das Ergebnis der vorliegenden Untersuchung widerspricht dieser Auffassung. Der Modellbeobachtung zufolge bewegte sich das Sohlmaterial bereits bei kleinem Strömungsangriff ( $v/v_c = 0,86$ ), das heißt es herrschte Transport obwohl die mittlere Fließgeschwindigkeit  $v$  die kritische Geschwindigkeit  $v_c$  noch nicht überschritt. Dies hängt zum Teil mit den differenten Geschwindigkeitsprofilen zusammen. Die mittlere Geschwindigkeit wird über die mittlere Wassertiefe errechnet. Tatsächlich ist die Geschwindigkeit über einem Düental kleiner als über einem Dünenkopf, wo eine geringere Wassertiefe und aus Kontinuitätsgründen die größere Geschwindigkeit herrscht. Ein anderer Grund ist die Ablösung der Strömung vom Dünenkopf auf die Sohle, die insbesondere an der Wiederanlegestelle eine größere

Sohlbeanspruchung erzeugt. Wie stark die Auswirkung der Strömungsablösung und wie groß die Zunahme der Sohlbeanspruchung ist, hängt u.a. von der Dünenform ab. Aus diesen Beobachtungen und prinzipiellen Überlegungen geht somit hervor, dass die Bettform ein maßgeblicher Parameter für den Transportbeginn bei einer mit Transportkörpern bedeckten Sohle ist.

c) „Instationäre Belastung einer (höher) vorbelasteten Sohle, mit Übergang“

Im Gegensatz zur zweiten Versuchsreihe wurde die Sohle bei der dritten Versuchsreihe mit einem konstanten Durchfluss ( $v/v_c = 1,55$ ) vorbelastet. Der instationäre Vorgang begann ohne Unterbrechung bei gleichem Durchfluss (Abb. III-5.11c). Der Strömungsangriff wurde zunächst vom Zustand größerer Strömungsbelastung ( $v/v_c = 1,55$ ) stufenweise auf einen Zustand mit geringerer Sohlbelastung ( $v/v_c = 0,86$ ) geändert. Anschließend stieg die Sohlbelastung wieder stufenweise bis zum Anfangszustand ( $v/v_c = 1,55$ ) an, um danach nochmals stufenweise auf den Zustand der Sohlbelastung  $v/v_c = 0,86$  zu fallen. Wiederum blieb dabei die Wassertiefe  $h$  konstant ( $h = 18$  cm). Die Versuche erfolgten mit zwei Abflussganglinien mit einer Gesamtzeit von sechs bzw. zwölf Stufen und Zeitintervallen von 2,5 bzw. 5 Minuten. Im Unterschied zur zweiten Versuchsreihe passte sich die Bettform bei der dritten Versuchsreihe am Anfang des instationären Vorgangs der Strömung noch an.

Während der Versuche wurde die Geschiebefracht gemessen. Um den Einfluss der Instationarität auf den Geschiebetransport bei einer mit Transportkörpern bedeckten Sohle zu erkennen, wurde die Geschiebefracht anhand Gl. 39 berechnet. Für die zweite und dritte Versuchsreihe sind in Tab. III-5.13 die auf die Transportfracht bei stationärer Strömung  $G_{f(\text{stationär})}$  normierten Differenzen der Fracht bei instationärer Strömung  $G_{f(\text{instationär})}$  und bei stationärer Strömung  $G_{f(\text{stationär})}$  zusammengestellt. Es ist zu entnehmen, dass unter instationären Fließverhältnissen die Geschiebefracht größer als unter stationären ist. Darüber hinaus hängt die Geschiebefracht auch vom Ausgangszustand der Sohle ab. Je größer der Unterschied zwischen der momentanen Bettform und der vollständig den Strömungsbedingungen angepassten Bettform ist, desto deutlicher weicht die Transportfracht bei instationärer Strömung von der

bei stationärer Strömung ab. Bemerkenswert ist, dass diese Abweichung bei kleineren Zeitschritten zunimmt.

Der Sachverhalt, dass die Transportfracht in der instationären Strömung größer als in der stationären Strömung ist, begründet sich daraus, dass die Dünen während der ganzen Versuchsdauer höher als die vollständig den Strömungsbedingungen angepasste Bettform waren. Unter diesen Umständen weist die Strömung auf Grund des größeren Formwiderstands ein steileres Energiegefälle auf. Somit wirken auch größere Strömungsangriffe auf die Sohle. Soweit die Strömungsbedingungen mit der Sohlform nicht übereinstimmen, gestaltet die Sohle ihre Form entsprechend um. Während des Vorgangs der Umgestaltung wird die Transportfracht entsprechend geändert, bis sich schließlich die Sohlform den Strömungsbedingungen anpasst. Die Dauer dieser Umgestaltung hängt vom Unterschied zwischen der augenblicklichen Bettform und der vollständig den Strömungsbedingungen angepassten Bettform ab. Wenn das Zeitintervall einer gestuften Abflussganglinie kleiner als die Dauer der Umgestaltung ist, kann die Sohle ihre stabilste Form nicht erreichen. Daher weicht die Transportfracht in instationären Strömungen steilerer Charakteristik (bzw. kürzeren Zeitintervallen bezüglich der Abflussänderung) noch deutlicher von der Fracht in stationären Strömungen ab.

Tab. III-5.13 Vergleich der Geschiebefracht  $G$  in stationärer bzw. instationärer Strömung.

Zeitintervall $\Delta t$	$\frac{G_{f(\text{instationär})} - G_{f(\text{stationär})}}{G_{f(\text{stationär})}}$	
	Versuchsreihe b)	Versuchsreihe c)
5 min	50 % - 60 %	ca. 30 %
2,5 min	ca. 150 %	ca. 150 %

Die nachfolgend dargestellten Experimente in der großen Versuchsrinne (Hauptuntersuchungen) dienen der genaueren Erforschung dieser Prozesse. Hierbei wurden labortechnisch die Voraussetzungen geschaffen, den Abfluss nicht ‚plötzlich‘ zu ändern, sondern die Versuche mit stufenloser Änderung der Wasserführung entsprechend einer natürlichen Abflussganglinie durchzuführen.

### III-5.6 Untersuchungen bei stationären Verhältnissen

#### III-5.6.1 Modellähnlichkeit

Sowohl in den stationären als auch den instationären Untersuchungen wurde *PVC-Granulat* als Versuchsmaterial für das bewegliche Bett in der großen Rinne verwendet (vgl. Kap. III-5.4).

Wie erwähnt war es nicht Ziel der Laborversuche (wie es bei gegenständlichen Wasser- oder Luftmodellen gängig ist), einen bestimmten Gewässer-ausschnitt maßstabsgetreu, d.h. dreidimensional auf Laborverhältnisse verkleinert, hinsichtlich einer konkreten Problematik strömungstechnisch zu untersuchen. Vielmehr lag das Hauptinteresse auf dem verbesserten Verständnis der physikalischen Prozesse bezüglich Dünentransport und Wirkung von Buhnen unter instationären Gesichtspunkten.

Die Anwendung der bekannten *Modellgesetze nach Froude und Reynolds* zur Ermittlung der geometrischen und hydraulischen Maßstabszahlen wird im Fall der Untersuchung von Geschiebetransport (mit mobiler Sohle) durch die Frage nach *Ähnlichkeit des Transportes* erweitert. Die hierbei üblichen Ähnlichkeitsanforderungen, d.h. die maßgebenden Modellgesetze und Maßstabsüberlegungen, werden u.a. in DVWK (1990) und von NESTMANN (1993) erörtert.

Wie sich im Zuge der ersten Versuchsreihen (bei beweglicher Sohle) bestätigte, stellen sich im instationären Fall bezüglich der Vergleichbarkeit der Ergebnisse weniger die geometrischen und hydraulischen Größen, sondern vielmehr *der resultierende sedimentologische Zeitmaßstab  $t_{rs}$  als ausschlaggebende Kenngröße* dar. Dieser Maßstab ist nicht a priori bekannt und muss unter den jeweiligen Versuchs- und Naturbedingungen empirisch bestimmt werden. Das heißt, die im Modell erzeugten Bettformen sind anhand der Variation des Zeiteinheiten im Modell mit den Naturmaßen in Einklang zu bringen (Kalibrierung). Um also die Verhältnisse an der Unteren Mittelelbe in den Laborversuchen möglichst zutreffend zu simulieren, wurden zur Ermittlung der Umrechnungsfaktoren folgende Überlegungen angestellt und im Zuge der Versuchsvorbereitungen und -vorläufe schrittweise realisiert.

1. *Bestimmung des Längenfaktors* durch Vergleich der Natur- und Modellgerinnebreiten, wobei die halbe mittlere Gewässerbreite der Elbe bei

bordvollem Abfluss einschließlich Buhnenfeldern angesetzt wurde (ca. 115 m), um später einseitig Buhneneinbau simulieren zu können,

2. *Vorläufige Bestimmung der Wandergeschwindigkeit der Dünen* (Länge/Zeit im Modell) unter stationären Bedingungen und Vergleich mit den Wandergeschwindigkeiten in Natur ergibt die Größenordnung des sedimentologischen Zeitmaßstabs  $t_{rs}$ ,
3. *Variation des Zeitmaßstabs  $t_{rs}$  bei instationären Abflussbedingungen* auf experimentelle Weise bis zum Erreichen des aus der Natur bekannten Bettzustands (vgl. Kap. III-5.3 und Kap. III-5.7) und iterativer Vergleich mit  $t_{rs}$  aus Punkt 2.

In diesem Sinne wurden die Daten aus dem Bereich der Unteren Mittelelbe (vgl. Kap. III-5.3.4) als eine wichtige Grundlage zur Beurteilung des instationären Geschehens im Modell verwendet. Auf Basis der ersten instationären Ergebnisse (vgl. Kap. III-5.5.4) wurden an den Naturdaten orientiert folgende für den instationären Betrieb und die Transportvorgänge **maßgebenden Modellmaßstäbe** gewählt:

- **Länge** (horizontal)  $L_{rx} = L_{xN}/L_{xM} = 46$
- **Höhe** (vertikal)  $L_{rz} = L_{zN}/L_{zM} = 20$
- **Überhöhungsfaktor**  $n = L_{rx}/L_{rz} = 2,3$
- **Korngröße**  $d_r = d_N/d_M = 0,9/3 = 0,3$
- **Sedimentdichte**  
unter Auftrieb  $\Delta_r = \Delta_N/\Delta_M = 1,65/0,3 = 5,5$

Aus dem Wanderverhalten der Transportkörper in Natur und Modell ergibt sich der sedimentologische bzw. morphologische Zeitmaßstab zu:

- **sedimentologischer Zeitmaßstab**  $t_{rs} = t_{sN}/t_{sM} = 480$

Die (beträchtlichen) Auswirkungen dieses Zeitmaßstabs auf die Ergebnisse werden in Kapitel III-5.7 aufgezeigt. Es ist zu betonen, dass dessen experimentelle Bestimmung trotz moderner Labortechnik einen *enormen* Zeit- und Messaufwand und fachlich sehr spezialisierten Spürsinn erforderte.

#### **WICHTIG:**

*Alle hier nachfolgend dargestellten Ergebnisse der Laboruntersuchungen wurden, soweit nicht anders gekennzeichnet, anhand der o.g. Maßstabsfaktoren sowie der entwickelten Berechnungsansätze (Kap. III-5.5.3) auf die Verhältnisse der Elbe umgerechnet.*

### III-5.6.2 Vorbereitung und Durchführung der Versuche und Sohlaufnahmen

Vor jedem Versuch wurde die bewegliche Sohle neu installiert. Hierzu wurde das Sohlmaterial gleichmäßig in der Rinne verteilt und mit einem mechanisch justierten Abziehblech glattgezogen, wobei eine konstante Sohlneigung eingehalten wurde.

Die Rinne wurde zu Beginn des Experiments langsam mit Wasser eingestaut, ohne dabei den ebenen Ausgangszustand der Sohle zu zerstören, bis der gewünschte Anfangswasserstand erreicht war. Während des Versuchs wurden der Durchfluss, die Wassertiefe, das Wasserspiegelgefälle und der Geschiebeaustrag zur ständigen Kontrolle gemessen und in regelmäßigen Zeitabständen im Messcomputer gespeichert. Die verwendeten Messmethoden der Parameter wurden in Kap. III-5.4.5 erläutert.

Anhand von der in Kap. III-5.4.5 beschriebenen Technik wurde Geschiebmaterial kontinuierlich zugegeben. Wie schon von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) ausgeführt wurde, können Versuche über Geschiebetrieb nur dann zu einem brauchbaren Resultat führen, wenn sie auf Basis der Bedingung durchgeführt werden, dass Normalabfluss besteht und dass die Sohle sich geschiebetechnisch im Gleichgewicht befindet (Gleichheit der eintretenden und austretenden Geschiebemengen der Versuchsstrecke). Die Erreichung dieses Gleichgewichtszustands erfordert sehr lange Versuchsdauern. Zur Gewährleistung des Normalabflusses bei einem konstanten Sohlgefälle ist (zusätzlich noch) ein korrekter Dosierungsverlauf der Geschiebezugabe während des Versuchs erforderlich. Zu diesem Ziel wurde nach dem Versuch bei jedem Durchfluss immer geprüft, ob der Gleichgewichtszustand erreicht worden war und das Energiegefälle konstant blieb. Aus diesem Ergebnis wurde der Dosierungsverlauf entsprechend korrigiert, und anhand dessen fuhr der Versuch erneut an. Dieser Vorgang musste bei jedem Durchfluss mehrmals wiederholt werden, bis zufriedenstellende Ergebnisse erreicht wurden. Daraus kann man die Schwierigkeit dieser zeitaufwendigen Experimente ersehen.

Hinsichtlich des Geschiebeaustrages zeigten sich über die Versuchsdauer starke Schwankungen. Diese Beobachtung bestätigt die Aussage, dass der Transport entlang eines Transportkörpers sehr unterschiedlich ist (vgl. Ausführungen in Kap. III-5.5.4).

Zur Vermessung der Sohloberfläche wurden zwei Ultraschallsonden, die jeweils in einem Abstand von 50 cm vom linken bzw. rechten Rand an der Messbrücke (Rinnenwand) angebracht waren, und eine Lasersonde in der Mitte der Rinne eingesetzt. Während des Versuchs wurden somit drei Längsprofile der sich in der Entwicklungsphase ständig verändernden Sohle in gleichen Zeitabständen ( $\Delta t = 10$  min für die stationären Untersuchungen) aufgenommen. Dabei wurden eine Messstrecke von 34 m abgefahren. Die Sohle wurde im Abstand von 1 mm abgetastet, für die gesamte 34 m Messstrecke ergaben sich damit ca. 34.000 Messpunkte je Längsprofil. Die Messungen erfolgten nur bei Fahrt der Messbrücke in Fließrichtung.

Nach dem Versuch wurde die Sohlstruktur über die gesamte Breite der Rinne erfasst. Dazu tastet der Laser im Abstand von 5 cm (in der Breite) Längsprofile über die gesamte Messstrecke ab, auch hier betrug die Aufnahmefrequenz 1 Punkt pro Millimeter. Es wurden immer 42 Profile aufgenommen, d.h. die Sohle auf einer Breite von 2,05 m erfasst. Bildeten sich große dreidimensionale Sohlenformen aus, wurden nach dem Versuch zusätzlich noch Profile quer zur Fließrichtung gemessen.

### III-5.6.3 Grundsätzliches zur Datenauswertung

Für die Auswertung der Versuchsdaten wurde das Programm MEDANA (vgl. Kap. III-6) entwickelt. Mit diesem Programm ist es möglich, alle lokalen Minima und Maxima eines Profils zu bestimmen und daraus die Dünenform zu berechnen. Mittels des Programms kann das aufgenommene Profil zunächst geglättet werden, indem mehrere Punkte zusammengefasst und gemittelt werden. Von diesem geglätteten Profil lassen sich leicht alle lokalen Minima und Maxima herausfinden; durch entsprechende Differenzbildung werden die Dünenhöhen und -längen berechnet. Als Beispiel sind in Abb. III-5.29 ein gemessenes und das geglättete Sohlängsprofil sowie die Positionen der Maxima und Minima dargestellt.

In einer Ausgabedatei des Programms werden die Anzahl, die mittlere Höhe und Länge der Dünen sowie die Koordinaten der Dünentäler und -kämme festgehalten. Ferner werden Maximum, Mittelwert und Standardabweichung der Dünenhöhe und -länge aller gefundenen Dünen eines Profils ermittelt.



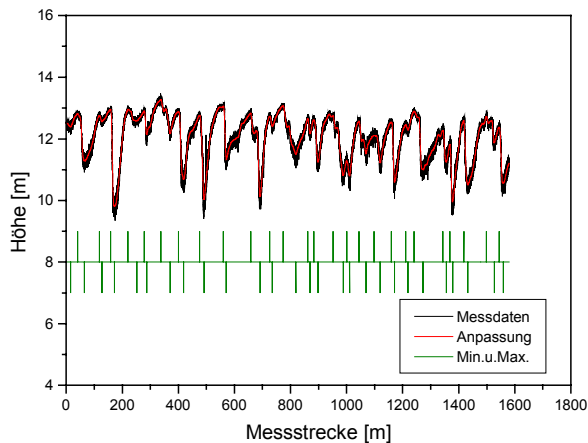


Abb. III-5.29 Darstellung eines mit dem Programm MEDANA ausgewerteten Längsprofils der Rinnensohle.

### Ermittlung der Dünenhöhe $H$ und der -länge $L$ für den stationären Zustand

Nach Analyse der aufgenommenen Längsprofile mit dem Programm MEDANA wurden die Entwicklung der Dünenhöhe  $H$  und Dünenlänge  $L$  über der Versuchszeit in einem Diagramm aufgetragen. Der stationäre Zustand eines Transportkörpersystems hat sich dann eingestellt, wenn sich die mittlere Dünenhöhe und Dünenlänge kaum mehr ändern. Die Werte für die Dünenhöhe und die Dünenlänge liegen dann annähernd auf einer Horizontalen. Bildet man nun den Mittelwert der auf dieser Horizontalen liegenden Wert, so werden die Werte für die Dünenhöhe  $H$  und die Dünenlänge  $L$  im stationären Zustand erhalten.

### Ermittlung der Wandergeschwindigkeit $u$ für den stationären Zustand

Um die Wandergeschwindigkeit  $u$  für den stationären Zustand zu ermitteln, werden die geglätteten Profile des stationären Zustandes höhenversetzt in einem Diagramm übereinandergestapelt (vgl. Abb. III-5.31). In einer solchen Darstellung lässt sich der Weg einzelnen Dünenkämme und -täler einfach verfolgen und durch Geraden miteinander verbinden. Die Wandergeschwindigkeit  $u$  entspricht dem Quotienten aus zurückgelegtem Weg und Zeiteinheit. Der zurückgelegte Weg einer Düne lässt sich mit Hilfe der Koordinaten des Dünenkamms und des Dünentals, die der Ausgangsdatei der Berechnung zu entnehmen sind, berechnen. Je Versuch wurde der Weg mehrerer Dünen ermittelt und anschließend der Mittelwert gebildet.

### Einfluss der Wandergeschwindigkeit von Dünen auf die gemessene Dünenlänge

Aufgrund der Fortbewegung der Dünen während der Längsprofilaufnahme wird ein leicht verfälschter Wert für die Dünenlänge gemessen. Wie groß der Einfluss der Wandergeschwindigkeit auf die erfasste Dünenlänge ist, soll im folgenden betrachtet werden. In Abb. III-5.30 ist die Problematik veranschaulicht.

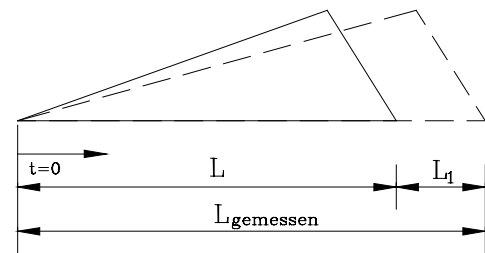


Abb. III-5.30 Einfluss der Wandergeschwindigkeit von Dünen auf die gemessene Dünenlänge (Schema).

Startet der Messwagen zum Zeitpunkt  $t = 0$  an einem Dünental und erreicht nach der Zeit  $t$  das nächste Tal, so legt er mit der Geschwindigkeit  $v_{\text{Messwagen}}$  die Strecke ( $L_{\text{gemessen}}$  bzw.  $L_{\text{gem}}$ )

$$L_{\text{gem}} = v_{\text{Messwagen}} \cdot t \quad (\text{Gl. 40})$$

zurück.

In der gleichen Zeit  $t$  wandert die Düne mit Wandergeschwindigkeit  $u$  um die Strecke  $L_1$ . Sie berechnet sich zu:

$$L_1 = u \cdot t \quad (\text{Gl. 41})$$

Die tatsächliche Länge der Düne  $L$  ergibt sich aus der Differenz zwischen  $L_{\text{gemessen}}$  und  $L_1$ :

$$L = L_{\text{gem}} - L_1 = L_{\text{gem}} \cdot (1 - u/v_{\text{Messwagen}}) = L_{\text{gem}} \cdot K \quad (\text{Gl. 42})$$

Die größte ermittelte Wandergeschwindigkeit  $u$  betrug etwa 0,1 cm/s (im Modell), die Geschwindigkeit des Messwagens hat einen Wert von 11,33 cm/s. Für den Korrekturfaktor  $K$  in Gl. 42 ergibt sich damit ein (maximaler) Wert von

$$K = 0,991.$$

Die Abweichung der gemessenen Länge von der tatsächlichen Länge der Düne beträgt folglich höchstens 0,9%. Damit ist der Einfluss der Wandergeschwindigkeit von Dünen vernachlässigbar und muss bei den Auswertungen nicht weiter berücksichtigt werden.

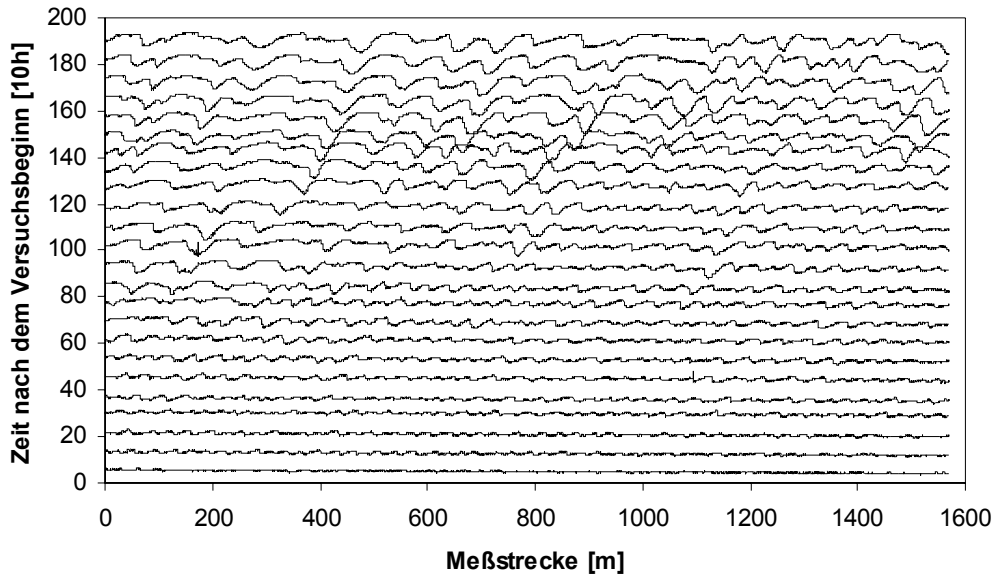


Abb. III-5.31 Zeitliche Entwicklung der Dünen in der Rinnenmitte (Einheiten entsprechen dem Naturverhältnis).

### III-5.6.4 Entstehung und zeitliche Entwicklung der Transportkörpergeometrien nach Versuchsbeginn

Unmittelbar nachdem in der zuvor eingestauten Rinne das Wasser zu fließen begann, kam es zum Sedimenttransport über der ebenen Sohle. Nach dem von FÜHRBÖTER (1991) beschriebenen Prinzip entwickelten sich aus zufälligen kleinen Anfangsstörungen erste Sohlformen. Die Entstehung dieser Sohlformen erfolgte gleichmäßig auf ganzer Rinnenlänge. Nach einiger Zeit hatte sich in der gesamten Rinne ein ausgeprägtes Transportkörpersystem ausgebildet (vgl. Abb. III-5.31). Allgemein ließ sich beobachten, dass bei größerem Strömungsangriff mehr Zeit verging, bis sich ein stabiles Transportkörpersystem herausgebildet hatte als bei kleinerem. Deutlich sichtbar war auch, dass sich bei großen Durchflüssen erheblich höhere Dünen bildeten als bei kleinen. Weiterhin war auffällig, dass die Sohlformen mit steigendem Strömungsangriff zunehmend dreidimensionale Formen aufwiesen.

Abb. III-5.32 zeigt die zeitliche Entwicklung der mittleren Dünenhöhe für verschiedene Durchflüsse  $Q$  von  $640 \text{ m}^3/\text{s}$  bis  $1790 \text{ m}^3/\text{s}$ . Exemplarisch sind hier die Ergebnisse des Laserprofils in der Mitte der Rinne dargestellt. Diese Entwicklung weist einen sehr charakteristischen Verlauf auf:

Zu Beginn der Versuche wächst die Dünenhöhe an und strebt nach einiger Zeit asymptotisch einem festen Endwert zu. Wie in der Darstellung deutlich zu erkennen ist, dauert es bei den Versuchen mit

einem größeren Durchflüssen länger, bis sich der stationäre Zustand eingestellt hat als bei den Versuchen mit kleinerem Durchfluss. Des weiteren zeigt sich, dass bereits während der Entwicklung des Transportkörpersystems die Dünenhöhe  $H$  bei höherem Durchfluss größer ist als bei kleinerem.

Das Wachstum der Dünenhöhen lässt sich mit dem von FÜHRBÖTER (1979) beschriebenen Entstehungsmechanismus der Transportkörper begründen: Aus zufälligen Einzelstörungen in der Sohle entstehen kleine Sohlformen mit unterschiedlichen Höhen und Längen, die nach unterstrom wandern. Kleine Formen wandern dabei schneller als große und laufen deshalb auf diese auf. Durch die Vereinigung zweier Dünen entsteht eine Düne mit größerer Höhe.

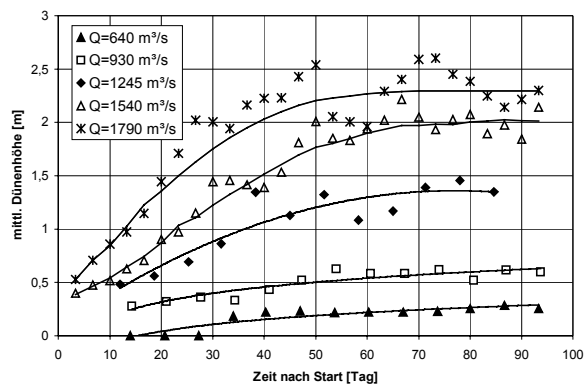


Abb. III-5.32 Zeitliche Entwicklung der Dünenhöhe  $H$  in der Rinnenmitte (Einheiten im Naturverhältnis).

In Abb. III-5.33 ist die zeitliche Entwicklung der Dünenlänge  $L$  bei Durchflüssen  $Q$  von 930, 1245, 1540 und 1790  $\text{m}^3/\text{s}$  dargestellt. Exemplarisch sind auch hier die in der Rinnenmitte erzielten Ergebnisse wiedergegeben. Tendenziell wächst die Länge der Dünen mit der Zeit an und strebt ebenso wie die Dünenhöhe einem festen Endwert zu.

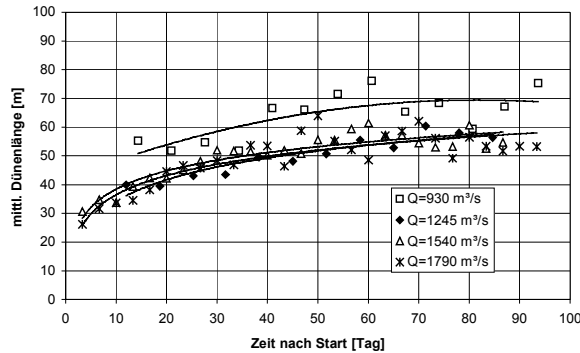


Abb. III-5.33 Zeitliche Entwicklung der Dünenlänge in Rinnenmitte bei Durchflüssen  $Q$  von 930 bis 1790  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Bei  $Q = 640 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $\approx MQ_{1997}$ ) verläuft die zeitliche Entwicklung der Dünenlänge vollkommen anders als bei größerem Durchfluss (Abb. III-5.34). Ebenfalls strebt die Entwicklung der Transportkörperlänge zwar nach einiger Zeit auch asymptotisch einem festen Endwert zu. Es zeigt sich aber, dass die Werte für die Dünenlänge bei diesem Durchfluss großen Schwankungen unterliegt. Ferner weist die Länge der Dünen im Gegensatz zu den Versuchen mit größerem Durchfluss eine Abnahme zu Beginn des Versuchs auf. Diese Phänomen ist damit zu erklären, dass bei diesem kleinem Durchfluss die Transportkörper erst begannen Sohlformen auszubilden, d.h. aus zufälligen Störungen in der Sohle auf der gesamten Rinnenlänge sehr kleine *Riffel* entstehen, die nur sehr langsam anwachsen und wandern. Im Auswertungsprogramm MEDANA wurde daher eine Mindesthöhe von Transportkörpern (entsprechend etwa der Korngröße des Sohlmaterials) festgelegt: Erst nachdem der Höhenunterschied diese Mindesthöhe erreicht, wird er vom Programm als Transportkörper erkannt. Mit der Zeit erreichen immer mehr Transportkörper diese Mindesthöhe. Die Länge nimmt folglich mit wachsender Anzahl von Transportkörpern ab. Generell bildeten sich nur wenige, dafür aber sehr lange Transportkörper aus. In diesem Falle wird der Oberflächenwiderstand der Sohle dominant und der Formwiderstand hat nur geringfügigen Einfluss auf das Strömungsgeschehen.

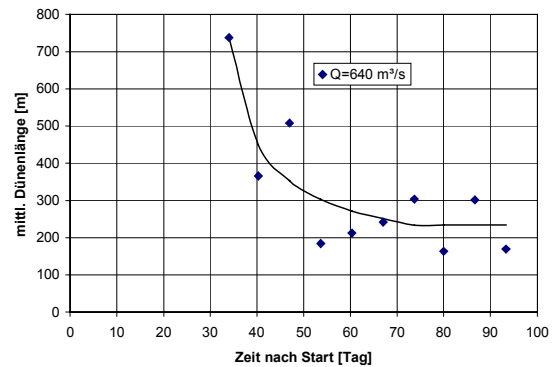


Abb. III-5.34 Zeitliche Entwicklung der Dünenlänge in Rinnenmitte bei Durchfluss  $Q = 640 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Aus Abb. III-5.33 und Abb. III-5.34 ist weiterhin zu erkennen, dass  $L$  für Durchflüsse  $Q < 1200 \text{ m}^3/\text{s}$  mit zunehmendem Durchfluss abnimmt und  $Q$  größer ca.  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  nicht mehr vom Durchfluss abhängt. Dies lässt den Schluss zu, dass die Länge der Dünen bei größerem Durchfluss weniger stark vom Strömungsangriff auf die Sohle beeinflusst wird als ihre Höhe.

Auf der Grundlage der gemessenen zeitlichen Entwicklung ist festzustellen, dass es in der Referenzstrecke der Elbe (Kap. III-5.3), ausgehend von einer anfänglich ebenen Sohle, das Erreichen eines stationären Sohlzustands länger als zwei Monate dauern kann. Daraus folgt, dass die in der Elbe während Hochwasser vorhandene Bettformation i.e.S. nie mit einem stationären Zustand vergleichbar ist.

### III-5.6.5 Messergebnisse bei stationären Verhältnissen

#### Dünenhöhe

In Abb. III-5.35 ist für den oben beschriebenen stationären Zustand des Transportkörpersystems die Dünenhöhe  $H$  in Rinnenmitte in Abhängigkeit des Durchflusses  $Q$  aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass  $H$  mit dem Durchfluss zunimmt.

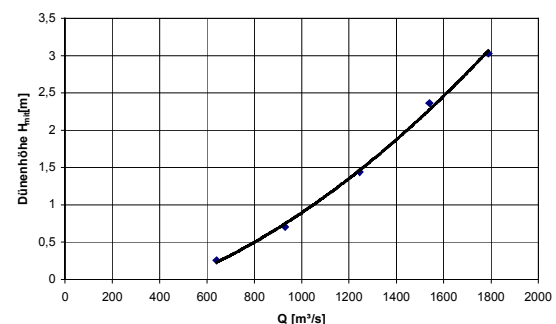


Abb. III-5.35 Dünenhöhe  $H$  in der Rinnenmitte bei stationären Verhältnissen in Abhängigkeit vom Durchfluss  $Q$ .

Im folgenden sollen die gemessenen Werte mit den Angaben anderer Autoren verglichen werden. Ein solcher Vergleich birgt allerdings folgende Schwierigkeiten:

- Bei den in der Literatur angegebenen Formeln fehlen zumeist Angaben über Gültigkeitsbereiche und Randbedingungen, unter denen die Versuche gefahren wurden. I.a. bleiben Aufbau und Geometrie der Versuchsrinne sowie der Versuchsbetrieb unbekannt.
- Bei den Gleichungen, in die der Parameter  $v/v_{\text{krit}}$  eingeht, lässt sich nicht nachvollziehen, ob  $v_{\text{krit}}$  als absolute kritische Fließgeschwindigkeit oder als der 10%-iger Bewegungsbeginn definiert wurde. In den folgenden Darstellungen wurde mit der absoluten kritischen Fließgeschwindigkeit ( $v_c$ ; vgl. Kap. III-5.5.2) gerechnet.

Gemäß der Ausführungen in Kap. III-5.2 lassen sich die meist benutzten Größen, mit denen verschiedene Autorengruppen die Höhe der Transportkörper  $H$  beschreiben, wie folgt zusammenfassen:

$$h, \frac{\tau_{\text{krit}}}{\tau_0} \quad \text{z.B. Yalin, Nordin, Gill}$$

$$h, \frac{v}{v_{\text{krit}}}, \frac{h}{d} \quad \text{z.B. Knorez, Znamenskaja, Van Rijn, Julien/Klaassen,}$$

$$h, \frac{v}{v_{\text{krit}}} \quad \text{z.B. Raudkivi/Witte}$$

$$h, i_e, Fr, \lambda, \zeta, \frac{L}{h} \quad \text{z.B. Karim}$$

Es fällt auf, dass von der ersten Gruppe die Sohlschubspannung als wesentliche unabhängige Einflussgröße verwendet wurde. Demgegenüber sei nach der Meinung der zweiten und dritten Autorengruppen die mittlere Strömungsgeschwindigkeit entscheidend vorzuziehen. In den Ansatz von KARIM (1999) sind zusätzlich der Darcy-Weisbach Widerstandsbeiwert, der Energieverlustbeiwert und die Dünenlänge einbezogen.

Im folgenden werden die gemessenen Dünenhöhen separat mit den berechneten Werten nach den Formeln der ersten bzw. der zweiten und dritten Autorengruppe verglichen. Dabei wird die relative Dünenhöhe  $H/h$  in Abhängigkeit vom Parameter  $Fr^*$ , der die auf das Korn bezogene relative Sohlschubspannung repräsentiert (Gl. 2), dargestellt.

Abb. III-5.36 zeigt die gemessenen relativen Dünenhöhen im Vergleich mit den nach Gln. 10-12 (YALIN 1964, NORDIN 1965, GILL 1971), die die relative Sohlschubspannung  $\tau_{\text{krit}}/\tau$  beinhalten, berechneten Werten. Tendenziell kann der steigende Verlauf der relativen Dünenhöhe bei allen drei Formeln nachvollzogen werden, wobei aber die berechneten Dünenhöhen mit wachsendem  $Fr^*$  wesentlich langsamer zunehmen als die gemessenen. Für kleines  $Fr^*$  ( $Fr^* = 0,06 \sim 0,08$ ) kann die gemessene Dünenhöhe nach dem Ansatz von YALIN bzw. GILL annähernd abgeschätzt, von NORDIN dagegen bei  $Fr^* = 0,06$  um etwa 100 % überschätzt werden. Ab  $Fr^* = 0,1$  verlaufen alle drei berechneten Kurven unterhalb der gemessenen Werte.

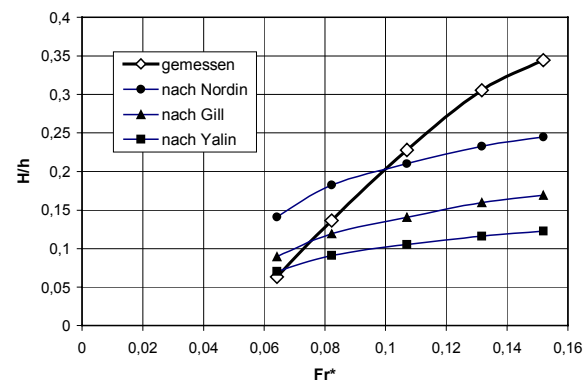


Abb. III-5.36 Vergleich der gemessenen relativen Dünenhöhe  $H/h$  mit den nach den Formeln anderer Autoren (Gln. 10-12, Kap. III-5.2.2) berechneten Werten.

In Abb. III-5.37 ist die gemessene relative Dünenhöhe  $H/h$  den berechneten Werten nach Gl. 14 und 18 (KNOREZ 1959, RAUDKIVI & WITTE 1991) gegenübergestellt.

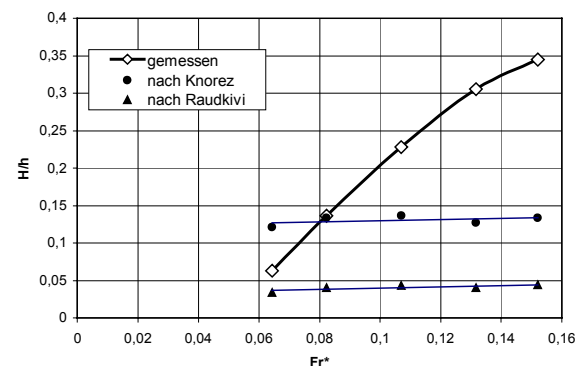


Abb. III-5.37 Vergleich der gemessenen relativen Dünenhöhe  $H/h$  mit den nach den Formeln anderer Autoren (Gln. 14, 18; Kap. III-5.2.2) berechneten Werten.

Die nach den Gln. 14 und 18 berechneten Werte für die relative Dünenhöhe  $H/h$  wachsen mit steigendem  $Fr^*$  nur unwesentlich an und liegen nahezu auf einer Horizontalen. Der Vergleich der gemessenen Dünenhöhe und der berechneten Dünenhöhe zeigt eine erhebliche Abweichung. Insbesondere für großes  $Fr^*$  (ca. 0,15) wird die gemessene Dünenhöhe durch die Gleichungen weit (ca. 60 bis 90 %) unterschätzt. Dies lässt den Schluss zu, dass im vorliegenden Fall die Dünenhöhen nicht in starkem Maße von der Fließgeschwindigkeit abhängen. Das liegt darin begründet, dass die mittlere Fließgeschwindigkeit  $v$  infolge des stark zunehmenden Formwiderstandes der Sohle mit ansteigendem Durchfluss nur geringfügig zunimmt. Folglich sind jene Ansätze, welche die Fließgeschwindigkeit als unabhängige Variable enthalten, weniger brauchbar als jene, die die Schubspannung und Wassertiefe beinhalten.

In Abb. III-5.38 sind die nach Gl. 25 (KARIM 1999) berechneten und die gemessenen Dünenhöhen aufgetragen. Es fällt auf, dass die zwei Kurven ähnliche Verläufe besitzen, wobei die gemessenen Werte um etwa 0,13 größer als die berechneten ausfallen. Daraus geht (KARIM bestätigend) hervor, dass der Energieverlust und der Formwiderstand zur Berechnung der Dünenhöhe berücksichtigt werden sollten. Der Unterschied zwischen den gemessenen und den berechneten sind vermutlich auf das unterschiedliche  $B/h$  -Verhältnis zurückzuführen.

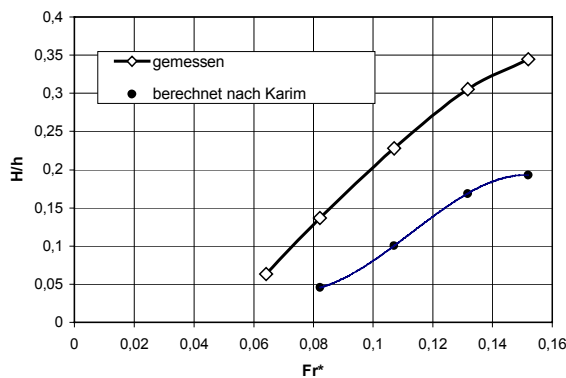


Abb. III-5.38 Vergleich der gemessenen Dünenhöhe  $H/h$  mit berechneten Werten nach Gl. 25 (Kap. III-5.2.2).

**Dünenlänge**

In Abb. III-5.39 ist die Dünenlänge  $L$  in der Rinnenmitte bei stationären Verhältnissen in Abhängigkeit vom Durchfluss aufgetragen. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Durchfluss  $Q$  die Transportkörper-

länge  $L$  abnimmt. Im Bereich  $Q < 900 \text{ m}^3/\text{s}$  nimmt die Länge der Dünen zuerst schnell ab. Bei größerem Durchfluss weist die Dünenlänge nur noch eine geringfügige Abnahme auf. Bei Durchflüssen  $Q$  größer ca.  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  nähert sich die Dünenlänge einem konstanten Wert an. Wie beschrieben wird die Dünenlänge bei größerem Durchfluss weniger vom Strömungsangriff beeinflusst als die Dünenhöhe.

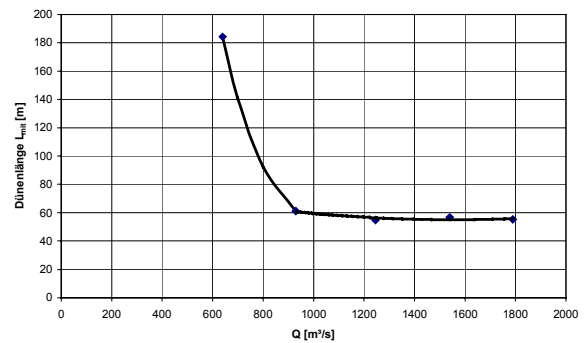


Abb. III-5.39 Dünenlänge  $L$  in der Rinnenmitte bei stationären Verhältnissen in Abhängigkeit vom Durchfluss  $Q$ .

In Abb. III-5.40 ist die gemessene relative Dünenlänge  $L/h$  gegenüber den nach Gl. 36 (Berechnungsansatz in Kap. III-5.5.3) berechneten Werten von  $L/h$  als Funktion vom  $Fr^*$  aufgetragen. Bei kleinem  $Fr^*$  ( $Fr^* < 0,08$ ) weichen die berechneten Werte deutlich von den gemessenen ab. Ab  $Fr^* = 0,8$  liegen zwar alle berechneten Werte weiterhin unter den gemessenen, der Unterschied ist jedoch gering.

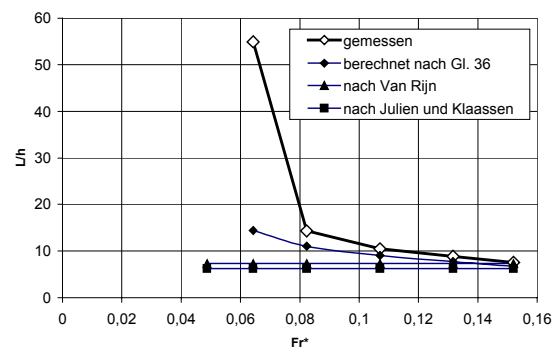


Abb. III-5.40 Vergleich der gemessenen relativen Dünenhöhe  $L/h$  mit den nach den Gln. 27 und 28 (in Kap. III-5.2.2) berechneten Werten.

Ferner ist in Abb. III-5.40 ist die Näherungslösung der relativen Dünenlänge  $L/h$  nach den Gln. 27 und 28 (JULIEN & KLAASSEN 1995, VAN RIJN 1984) dargestellt. Diese liegen unter den gemessenen. Die Differenz nimmt jedoch mit wachsender  $Fr^*$  ab. Das deutet darauf hin, dass diese Ansätzen nur für relativ großen Strömungsangriff Gültigkeit besitzen.

**Wandergeschwindigkeit**

Abb. III-5.41 zeigt die Abhängigkeit der Wandergeschwindigkeit  $u$  der Transportkörper in Rinnenmitte vom Durchfluss  $Q$ . Aus der Darstellung ist zu erkennen, dass die Wandergeschwindigkeit  $u$  zunächst mit wachsendem Durchfluss abnimmt. Für Durchflüsse  $Q > 1500 \text{ m}^3/\text{s}$  bleibt die Wandergeschwindigkeit mit zunehmendem Durchfluss nahezu unverändert.

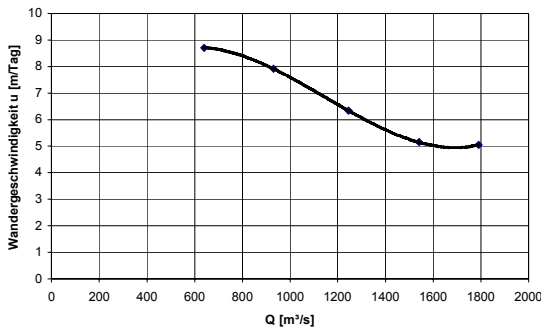


Abb. III-5.41 Wandergeschwindigkeit der Dünen bei stationären Verhältnissen in Funktion des Durchflusses  $Q$ .

Wie in Kap. III-5.2.2 dargelegt, sollte nach Angaben von ZANKE (1976) die Wandergeschwindigkeit  $u$  mit wachsender Fließgeschwindigkeit  $v$  zunehmen. Aus den Messergebnissen ergibt sich hingegen, dass die Dünen umso langsamer wandern, je größer der Durchfluss und damit die mittlere Fließgeschwindigkeit ist. Die von ZANKE (1976) angegebene Beziehung (Gl. 8) kann somit im vorliegenden Fall nicht bestätigt werden. Der Widerspruch liegt möglicherweise in unterschiedlichen Randbedingungen und Betriebsweisen in den zugrundeliegenden Versuchen (die Versuchsbedingungen von ZANKE sind nicht bekannt). Vermutlich war die Wassertiefe bei unterschiedlichem Durchfluss stets die gleiche, wodurch die mittlere Fließgeschwindigkeit  $v$  von maßgebendem Einfluss auf den Transport an der Sohle wird.

**Transportrate**

In Abb. III-5.42 ist die gemessene Feststofftransportrate  $q_s$  in Abhängigkeit vom Durchfluss  $Q$  aufgetragen. Die Feststofftransportrate ergibt sich aus der gemessenen Geschiebemenge pro Zeiteinheit bezogen auf die Breite des Querschnitts. Es wird deutlich, dass es mit zunehmendem Durchfluss  $Q$  zu einem erhöhten Geschiebetransport kommt. Mit anwachsendem Durchfluss wird die Belastung auf die Sohle immer größer, wodurch die transportierte Geschiebemenge zunimmt. Zudem wird mit zuneh-

mendem Durchfluss die Strömung im sohnahen Bereich immer turbulenter. Hierdurch wird mehr Material aufgewirbelt und von der Strömung in Suspension weitertransportiert als dies bei kleinen Durchflüssen der Fall ist (vgl. auch Kap. III-4).

Ein Vergleich der nach Gl. 7 (MEYER-PETER & MÜLLER 1949) ermittelten Feststofftransportraten mit gemessenen ist in Abb. III-5.43 dargestellt. Es zeigt sich, dass die berechnete Transportrate um etwa den Faktor 2 größer ist als die gemessene. Wie in Kap. III-5.5.2 bereits erläutert ist, beschreibt der von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) auf der Basis zahlreicher Versuche entwickelte Ansatz diejenige Transportrate, welche ein bestimmter Strömungsangriff über einer ebenen Sohle verursachen würde. Durch das Auftreten von Transportkörpern wird die Sohle stabilisiert und dadurch nimmt der Feststofftransport ab. Eine Stabilisierung der Sohle durch das Ausbilden von Transportkörpern kann hier erneut wie schon in der kleinen Rinne (Vorversuche) nachvollzogen werden. Die Abweichungen der nach Gl. 7 berechneten Werte von den gemessenen können daher als Anzeichen einer solchen vorhandenen Stabilisierungswirkung der Sohle infolge Bildung von Transportkörpern interpretiert werden.

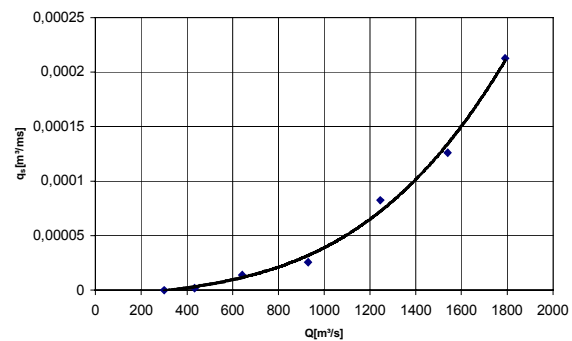


Abb. III-5.42 Geschiebetransportrate  $q_s$  bei stationären Verhältnissen in Abhängigkeit vom Durchfluss  $Q$ .

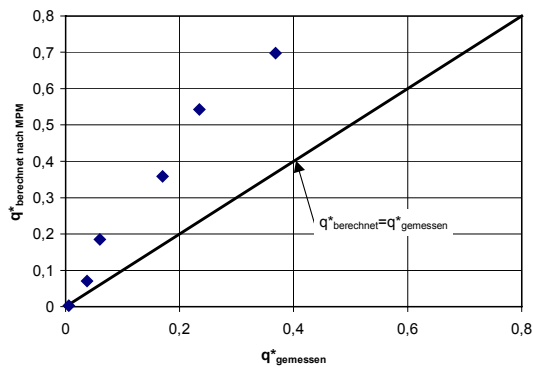


Abb. III-5.43 Vergleich gemessener und nach MEYER-PETER & MÜLLER (1949) berechneter Transportrate  $q^*$ .

### III-5.6.6 Interpretation der bisher beschriebenen Versuchsbeobachtungen

In den vorigen Abschnitten wurde gezeigt, dass die nach verschiedenen Berechnungsansätzen berechneten Dünenformen und Transportraten z.T. erheblich von den Messergebnissen der vorliegenden Untersuchung abweichen. Es wird vermutet, dass dies i.a. an unterschiedlichen Versuchsbedingungen liegt.

Bei näherer Betrachtung der Ansätze fällt bereits auf, dass sich z.B. nach NORDIN (1965) zweifach so große Dünenhöhen wie nach YALIN (1964) ergeben, bei gleicher Wassertiefe und relativer Sohlschubspannung  $\tau_{krit}/\tau_0$ . Diese Abweichung ist vermutlich auf unterschiedlichen Randbedingungen und Versuchsbetriebe zurückzuführen. Während der hiesigen Modellversuche wurde festgestellt, dass vor Erreichen des Gleichgewichtszustands (Transportgleichgewicht in der Rinne) die Bettformation und Transportrate erhebliche Abweichungen von der bei (erreichtem) Normalabfluss und Transportgleichgewicht aufweisen. Das bedeutet, dass jeder Berechnungsansatz aus Modellversuchen im strengen Sinn nur Gültigkeit für den gleichen Zustand des Geschiebetransports (Verhältnis eintretenden zu austretenden Geschiebemengen in der Versuchsstrecke) besitzen kann.

Des weiteren gehen die meisten Ansätze von einer zweidimensionalen Transportkörperbewegung aus. Während der Modellversuche in der großen Rinne wurde beobachtet, dass die Dünen nicht nur in, sondern auch quer zur Fließrichtung wandern, d.h. die Sohle war überwiegend von *dreidimensionalen Dünenformen* geprägt. Abb. III-5.44 verdeutlicht die Dreidimensionalität der gemessenen Sohlformen. Die Ursache dieses Geschehens sind die sekundären Strömungseffekte (quer zur Hauptfließrichtung) in Strömen mit großem Breite-Tiefe-Verhältnis ( $B/h$ ).



Abb. III-5.44 Beobachtete dreidimensionale Dünenformen in der großen Laborrinne.

Abb. III-5.45 wurde nach einem Versuch mit kleinem Durchfluss aufgenommen. Aus dem Bild sind durchgezogene Längsrippen auf der Sohle zu erkennen. Bei großem Durchfluss konnte die Entstehung von *Längsdünen* infolge Sekundärströmungen in der Versuchsrinne beobachtet werden: Bei deutlicher Überschreitung der kritischen Sohlschubspannung wird die Ablösezone, die sich an der Leeseite einer zweidimensionalen Düne ausbildet, instabil. Sie bricht in eine Vielzahl dreidimensionaler Hufeisenwirbel auf und verstärkt den sekundären Effekt.

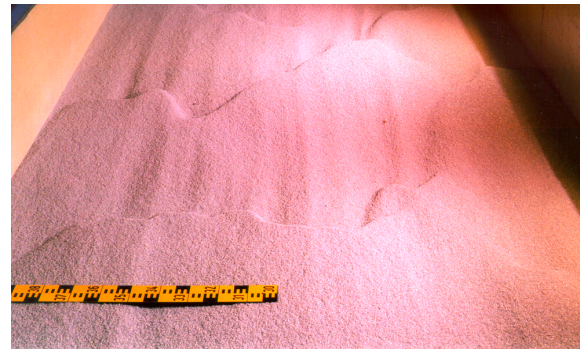


Abb. III-5.45 Beobachtete Längsrippen auf der Sohle in der großen Laborrinne.

Meist lagen zwei Längsdünen in der Rinne parallel nebeneinander, die in einer leichten Krümmung zur Mitte der Rinne hin auslaufen. Die Dünenhöhe ist am Anfang der Längsdünen maximal und nimmt über die gesamte Länge ab. Nach Versuchen mit verschiedenen Durchflüssen wurden neben den Längsprofilen auch Querprofile aufgenommen. Die erfassten Profile wurden analog zu den Längsprofilen ausgewertet. Hiermit und mit Hilfe der Fotos, die nach dem Versuch von der Sohlstruktur gemacht wurden, ließen sich die Längsdünen leicht orten und näher erfassen. Ein solches Querprofil ist in Abb. III-5.46 dargestellt. Die beiden nebeneinander liegenden Längsdünen sind leicht zu erkennen.

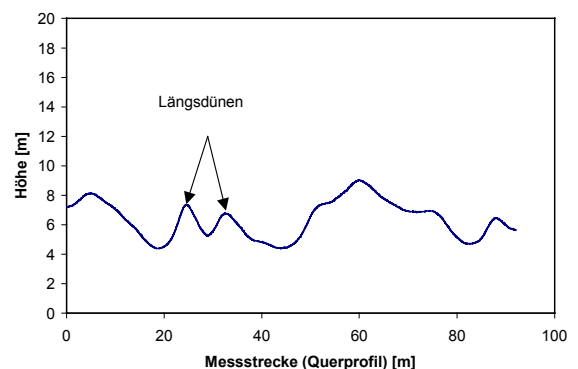


Abb. III-5.46 Beobachtete Dünenformen in der großen Laborrinne in einer Querprofilaufnahme.

Das in Abb. III-5.46 dargestellte Profil zeigt den maßgebenden Schnitt am Anfang einer Längsdüne, wo die Dünenhöhe ihren Maximalwert hat. Die Höhendifferenz aus Dünenkamm und -tal wurde berechnet. Der Abstand ist die Strecke zwischen beiden Dünenkämmen. Hierzu ergab sich folgendes.

Es ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Dünenabstand bzw. der Dünenhöhe und dem Durchfluss erkennbar. Sowohl Dünenabstand als auch Dünenhöhe erwiesen sich als relativ unabhängig von der Größe des Strömungsangriffs. Der mittlere Abstand der Längsdünen aus verschiedenen Versuchen hat einen Wert von 8 m (in Natur). Die Werte schwanken nur leicht um diesen Mittelwert, die mittlere Abweichung beträgt 0,5 m. Für die mittlere Höhe von Längsdünen ergibt sich der Wert von 2 m. Auch hier sind die Schwankungen gering und betragen im Mittel nur 0,2 m.

Es zeigt sich weiterhin, dass Längsdünen eher im Randbereich und nicht in der Mitte der Rinne zu finden sind. Damit kann auch gezeigt werden, dass in den Randbereichen der Einfluss von Sekundärströmungen größer ist als in Rinnenmitte.

Diese sekundären Strömungseffekte führen zu sehr ungleichförmigen Sohlausbildungen. Abb. III-5.47 sind die maximalen und mittleren Dünenhöhen und ihre Standardabweichung in der Mittelachse der Rinne dargestellt. Es ist zu entnehmen, dass die Variabilität der Dünenhöhe in der Rinnenmitte mit wachsendem Strömungsangriff größer wird. Bei  $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$  erreicht die Standardabweichung der Dünenhöhe ca. 20% der Wassertiefe. Dabei können die Dünen maximale Höhen der Größe der Wassertiefe erreichen ( $H_{\text{max}}/h = 1$ ), während die mittleren zweidimensionalen Dünen nach ZANKE (1976) nicht größer als ca. 1/3 der Wassertiefe werden können.

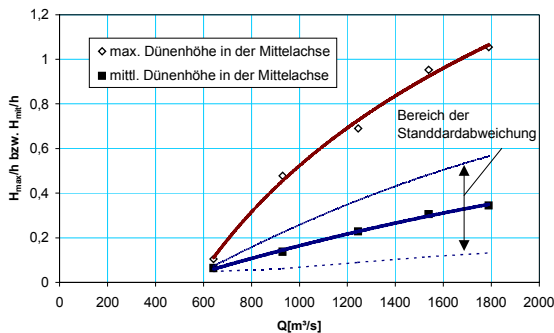


Abb. III-5.47 Maximale und mittlere Dünenhöhe H sowie der Bereich der Standardabweichung in Rinnenmitte bei stationären Durchflüssen.

Die Ungleichförmigkeit der Dünenbildung ist nicht nur in Fließrichtung, sondern auch quer zur Fließrichtung festzustellen. Ein Vergleich des gemessenen Mittenprofils mit den Profilen im Randbereich führt zu folgenden Feststellungen:

Tendenziell bilden sich am Rand höhere Dünen aus als in der Mittelachse der Rinne. Dagegen weisen die Dünen am Rand kleinere Längen als in der Mitte auf (vgl. Abb. III-5.48 und Abb. III-5.49).

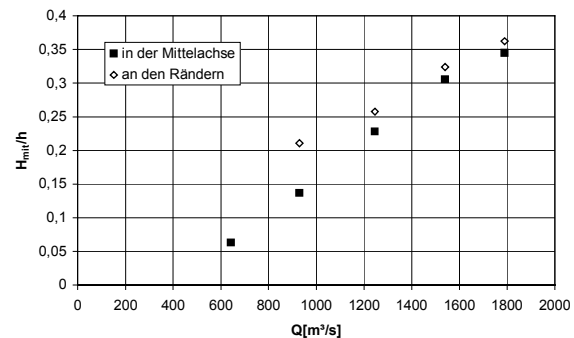


Abb. III-5.48 Vergleich der mittleren Dünenhöhen H in Rinnenmitte und an den Rändern bei stationären Durchflüssen.

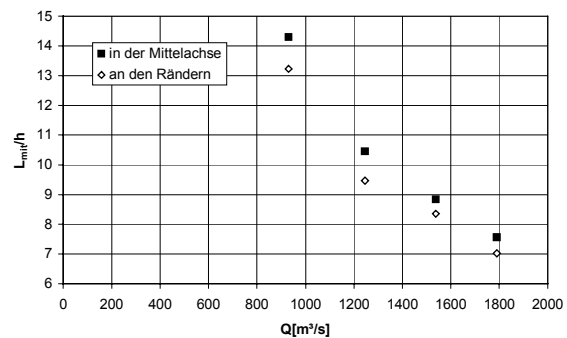


Abb. III-5.49 Vergleich der mittleren Dünenlängen L in Rinnenmitte und an den Rändern bei stationären Durchflüssen.

Es ist anzunehmen, dass die höheren und kürzeren Dünen an den Rändern der Rinne die Folge stärkerer Sekundärströmungen im Randbereich sind. Zudem verursachen Scherkräfte an der Wand hohe Turbulenzen im Randbereich. Zusätzlich zu den Scherkräften wird die Sohle durch nach unten gerichtete Sekundärströmungen und Turbulenzen belastet, was dort zu einer erhöhten Beanspruchung führt.

Zur Klärung der sekundären Strömungseffekte auf die Sohlformation und den Geschiebetransport werden im folgenden die Messergebnisse bezüglich der Bewegung der Transportkörper aus der großen Rinne mit den Messergebnissen aus der kleinen Rinne miteinander verglichen.



Wie zuvor dargestellt, wurden Vorversuche mit dem gleichen Material in einer kleineren Rinne (Länge 13,2 m, Breite 0,3 m) durchgeführt. Das Breite-zu-Wassertiefe Verhältnis ( $B/h$ ) in der kleinen Rinne lag bei  $B/h = 1,7\sim 3$ , während der  $B/h$ -Wert in der großen Rinne größer als 20 betrug. Aufgrund der schmalen Abmessungen traten in der kleinen Rinne keine Sekundärströmungen auf und es bildeten sich somit zweidimensionale Dünen aus.

Ein Vergleich der relativen Dünenhöhe  $H/h$  in Funktion von der Korn-Froudezahl  $Fr^*$  zeigt (vgl. Abb. III-5.50), dass sich in der großen Rinne vergleichsweise höhere Dünen ausbilden als in der kleinen. Der Verlauf der Dünenhöhe der großen Rinne weist eine wesentlich größere Steigung auf als der der kleinen Rinne.

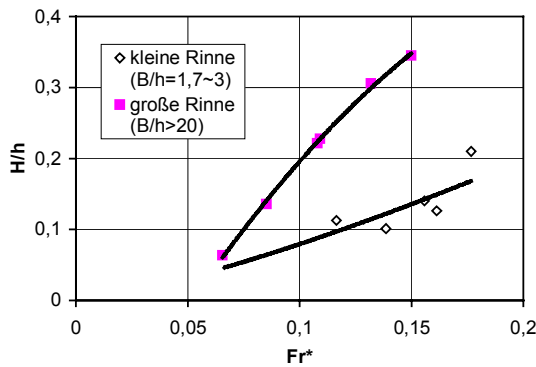


Abb. III-5.50 Vergleich der stationär gemessenen relativen Dünenhöhen  $H/h$  in der großen und kleinen Rinne.

Wie in den vorigen Abschnitten dargestellt, nimmt die Dünenlänge mit stärker werdender Belastung der Sohle zunächst ab, um sich ab ca.  $Q = 900 \text{ m}^3/\text{s}$  asymptotisch einer Konstanten (minimalen Dünenlänge) zu nähern (vgl. Abb. III-5.33 und Abb. III-5.39). Ebenso ist ab  $Fr^* = 0,08$  nur ein geringer Unterschied zwischen den Dünenlängen in der großen Rinne und der kleinen Rinne festzustellen (vgl. Abb. III-5.40). Dies lässt den Schluss zu, dass bei großer Sohlbelastung die Dünenlänge  $L$  unempfindlich ist und die sekundären Strömungseffekte beeinflusst.

In Abb. III-5.51 sind die in der großen Rinne gemessenen relativen Wandergeschwindigkeit  $u/v$  und die nach Gl. 38 (= in der kleinen Rinne entwickelter Berechnungsansatz) berechneten Werte von  $u/v$  als Funktion von  $Fr^*$  aufgetragen. Der Darstellung ist zu entnehmen, dass die Wandergeschwindigkeit  $u/v$  in der kleinen wie auch in der großen Rinne mit steigender Sohlbelastung tendenziell abnimmt, wobei der Wert in der kleinen Rinne jedoch etwa zweifach so groß ist wie in der großen Rinne. Der Grund

hierfür liegt in den erhöhten Dünen infolge Sekundärströmungen in der großen Rinne. Die Wandergeschwindigkeit der Dünen verhält sich umgekehrt proportional zur Dünenhöhe. Je höher eine Düne ist, desto langsamer wandert sie. Folglich führen die Sekundäreffekte indirekt zur Verlangsamung der Wandergeschwindigkeit von Dünen.

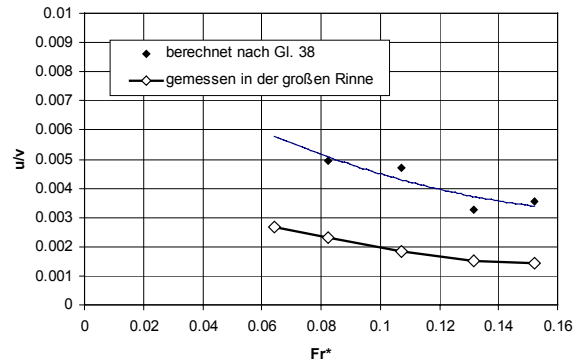


Abb. III-5.51 Vergleich der in der großen Rinne gemessenen relativen Wandergeschwindigkeit  $u/v$  mit der nach Gl. 38 (Ergebn. der kleinen Rinne) berechneten.

Abb. III-5.52 zeigt den Vergleich der dimensionslosen Geschiebetransportrate  $q^*$  (vgl. Gl. 7, erster Term) in der großen mit der in der kleinen Rinne. Es fällt auf, dass in der großen Rinne die Transportrate größer ist als in der kleinen Rinne. Je stärker die Sohle belastet wird, umso größer ist der Unterschied.

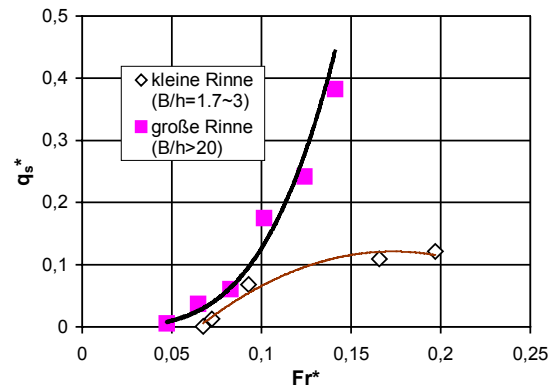


Abb. III-5.52 Vergleich der dimensionslosen Geschiebetransportrate  $q^*$  in der großen und kleinen Rinne.

Der Unterschied erklärt sich wiederum daraus, dass in einer Versuchsrinne mit großem  $B/h$  das Strömungsgeschehen durch Sekundärströmungen und erhöhte Turbulenz geprägt ist. Die nach unten gerichtete Sekundärströmung und die dadurch verstärkte Turbulenz führt zu einer erhöhten Belastung der Sohle mit der Folge, dass die Sohle instabiler wird. Da mit der Quergeschwindigkeit auch die Schubspannung in Querrichtung in einer Sekundär-

strömung mit wachsendem Durchfluss zunimmt, wirkt sich der Sekundäreffekt bei größerem Durchfluss kräftiger auf die Sohlausbildung und den Geschiebetransport aus. Zusammengefasst haben die Sekundäreffekte bzw. eine ausgeprägte Dreidimensionalität der Strömungsverhältnisse und Sohlformen eine Vergrößerung der Dünenhöhe und der Geschiebetransportrate sowie eine Verlangsamung der Wandergeschwindigkeit von Dünen zur Folge. Dagegen wird die Dünenlänge wenig von der Sekundärströmung beeinflusst.

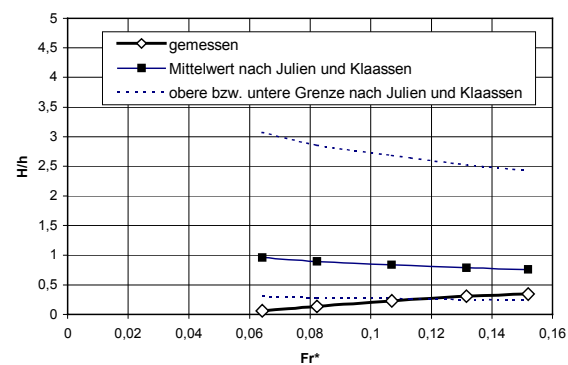
Zahlreiche Berechnungsansätze zur Beschreibung der Transportkörperbewegung, sowohl in der Literatur als auch jene der hiesigen Voruntersuchungen, basieren auf experimentellen Untersuchungen mit kleinen  $B/h$  der Laborrinnen. Unter solchen Randbedingungen wurden i.d.R. zweidimensionale Dünenformen beobachtet, die sich parallel zur Fließrichtung bewegen. Dies ist bei der hiesigen großen Rinne ( $B/h > 20$ ) nicht mehr der Fall. Natürliche Gerinne großer Ströme weisen nicht selten ein noch größeres  $B/h$ -Verhältnis auf (z.B. an der Unteren Mittelbe Elbe etwa 50 – 60). Das bedeutet, dass (gerade auch) feinkörnige Flusssohlen *hauptsächlich* von dreidimensionalen Dünenformen geprägt sind.

Aus den obigen Ausführungen geht hervor, dass die Sekundäreffekte die beschriebenen Geschiebetransportprozesse *maßgeblich* beeinflussen. Demzufolge können bei der Anwendung vorhandener Berechnungsansätze bereits unterschiedliche  $B/h$ -Verhältnisse zu erheblichen Fehleinschätzungen führen. Das bedeutet auch, dass Berechnungsansätze, die ohne Berücksichtigung der sekundären Strömungseffekte entwickelt wurden, im engeren Sinne nie für den Zustand natürlicher Gerinne mit großem  $B/h$  Verhältnis Gültigkeit besitzen.

Neben den sekundären Strömungseffekten können nach der Erfahrung im Projekt auch weitere Aspekte der Versuchsdurchführung, wie z.B. die Strömungsverhältnisse im Einlaufbereich (der Versuchsrinnen), die Bewegung von Transportkörpern beeinflussen. Denn Störungen, die dort entstehen, pflanzen sich sehr schnell nach unterstrom fort und verändern das gesamte Strömungsgeschehen und somit auch den Geschiebetransportvorgang in der Rinne. So wurde während der ersten Versuchsreihen in der großen Rinne eine unruhige und ungleichmäßige Strömung im Einlaufbereich beobachtet. Zur Verbesserung der Anströmung der Rinne wurden einige Maßnahmen

durchgeführt. Z.B. wurde ein Zulaufrohr von der Seite in die Mitte des Einlaufbeckens (um ca. 1,5 m) versetzt. Damit konnte ein Drall, den die Strömung infolge des seitlichen Einlaufs trotz der vorhandenen Beruhigungsmauern aufwies, deutlich vermindert werden. Durch die baulichen Maßnahmen wurde die Sohlformation gleichmäßiger und die Dünenhöhe  $H$  im Mittel um bis zu ca. 30% kleiner als in den Versuchen zuvor. Aus diesem Umstand geht hervor, dass auch der Anströmwinkel und die Turbulenzintensität wichtige Einflussgrößen hinsichtlich der Transportkörperbewegung sind.

In Abb. III-5.53 sind die gemessene relative Dünenhöhe  $H/h$  und die nach Gl. 16 (JULIEN & KLAASSEN 1995) berechnete dargestellt. Zusätzlich ist der von JULIEN & KLAASSEN angegebene Streuungsbereich eingetragen, wobei ihr Ansatz auf Naturmessungen in zahlreichen großen Flüssen beruht.



**Abb. III-5.53** Vergleich der in der großen Rinne gemessenen und der nach Gl. 16 (JULIEN & KLAASSEN 1995) berechneten relativen Dünenhöhe sowie ihr möglicher Streuungsbereich.

Es ist zu entnehmen, dass die berechnete Dünenhöhe überwiegend größer als die hier gemessene ausfällt, wobei die Messdaten am unteren Rand der sehr breiten Streuung liegen. Als Ursache hierfür ist anzunehmen, dass in natürlichen Strömungen sehr komplexe Randbedingungen und i.a. Krümmungen vorhanden sind, die wie beschrieben eine zusätzliche Erhöhung der Dünen bewirken. Andererseits können diese in Kombination mit der instationären Dynamik (wie nachfolgend gezeigt wird) eine große Variabilität der Dünenhöhe verursachen. Da bei der Entwicklung der Berechnungsansätze (Kap. III-5.5.3) solche mehrdimensionalen Randbedingungen sowie Instationarität nicht berücksichtigt wurden, sind diese demnach nur für grobe Näherungen geeignet (was auch für viele andere Ansätze zutreffen mag).

### III-5.7 Ergebnisse bei instationären Strömungen

In Kap. III-5.3 wurden bereits die hydrologischen Daten (Abflüsse der Jahre 1989, 1994 und 1997) behandelt, die den instationären Versuchen zugrunde liegen. Kap. III-5.4 beschreibt u.a. die Messmethoden im Labor. An diese Beschreibungen und die stationären Ergebnisse anknüpfend wird nun auf die eigentlichen instationären Untersuchungen in der großen Versuchsrinne eingegangen.

#### III-5.7.1 Instationärer Versuchsbetrieb

Die Versuchsvorbereitung (Sohlinstallation) erfolgte analog zu den Versuchen stationärer Strömungen, ebenso wie die Regelung der Durchflüsse. Statt konstanter Abflusswerte sind in instationären Versuchen dem Regler jedoch die Werte einer Abflussganglinie vorzugeben. Das installierte Regelsystem war (ist) in der Lage, in kürzester Zeit die Werte vom Computer einzulesen, mit der aktuellen Wasserzufuhr zu vergleichen und ggf. eine Korrektur zu veranlassen. Neben der Durchflussregelung ist hier aber auch eine zeitabhängige Steuerung der Geschiebezugabe nötig. Wie beschrieben wurde diese Zugabe über die Drehgeschwindigkeit eines Motors geregelt, der das Förderband für das Geschiebematerial am Einlauf der Rinne antreibt. Auch die entsprechenden Drehzahlen einer Transportganglinie wurden dem Motor über Computer vorgegeben. Das bedeutet, dass die gesamte erforderliche Dosierung (bzw. der zeitliche Verlauf) von Zufluss und Fracht *kontinuierlich*, d.h. elektronisch stufenlos geregelt, erfolgen konnte.

In Kap. 5.6.2 wurden bereits die Schwierigkeiten einer korrekten Geschiebezugabe bei stationären Verhältnissen geschildert (Erreichen eines Gleichgewichts von Eintrag und Austrag in der Rinne). In instationären Strömungen ändert sich dagegen die Transportrate u.a. abhängig vom Abfluss ständig. Hierzu liegen aus der Natur nur wenige Informationen vor. Messungen der BfG des Geschiebe- und Feststofftransports bei Wittenberge lagen zwar für den Zeitraum 1994 bis 1997 für einige Durchflüsse vor (sie sind am Ende dieses Kapitels im Vergleich zu Labordaten dargestellt). Jedoch stellten diese Daten, unter anderem aufgrund der Schwankungen, denen solche Messungen i.a. unterworfen sind, keine ausreichende Grundlage für die instationäre Zugabe in den Versuchen dar.

Ausgehend von der Annahme, dass in der Bezugsstrecke der Elbe weder eine langfristige Erosions- noch Verlandungstendenz herrscht (vgl. Kap. II-1.2), und mangels näherer (zeitkontinuierlicher) Informationen über Transportraten wurde in den instationären Untersuchungen angenommen, dass der Gleichgewichtszustand bezüglich Transport immer erreicht würde. Zu diesem Ziel wurde analog zu den stationären Untersuchungen nach dem Versuch (für jedes simulierte Abflussjahr) stets nachgeprüft, ob der Gleichgewichtszustand jederzeit erreicht wurde. Aus diesem Ergebnis wurde der Dosierungsverlauf entsprechend korrigiert und der Versuch neu begonnen. Der Vorgang musste für jedes Abflussjahr mehrmals wiederholt werden, bis zufriedenstellende Ergebnisse (d.h. eine optimierte Zugabe) erreicht wurden.

Ähnlich wie in den stationären Versuchen wurde während des Versuchs die Sohloberfläche alle zwei Tage (in Natur) einmal anhand von Längsprofilen in Fließrichtung abfahrend aufgenommen.

#### III-5.7.2 Wassertiefen (Hysterese-Effekt)

In Abb. III-5.54 ist die Ganglinie für das Jahr 1994 dem gemessenen Wassertiefenverlauf gegenübergestellt. Der Wassertiefenverlauf hat eine ähnliche Form wie die Abflussganglinie, jedoch mit einer erkennbaren *Hysterese*, die durch die Instationarität des Abflusses hervorgerufen wird. Zur Verdeutlichung sind in Abb. III-5.55, III-5.56 und III-5.57 die Wassertiefen für die Jahre 1989, 1994 und 1997 in Funktion des Abflusses, jeweils im Vergleich zu stationären Strömungsbedingungen, dargestellt. Der Hysterese-Effekt ist hieraus eindeutig zu ersehen: unter instationären Bedingungen steigt die Verlauf der Wassertiefe nicht monoton mit der Zunahme des Abflusses an, sondern zeigt eine Schleifenform (wie aus der Natur bekannt).

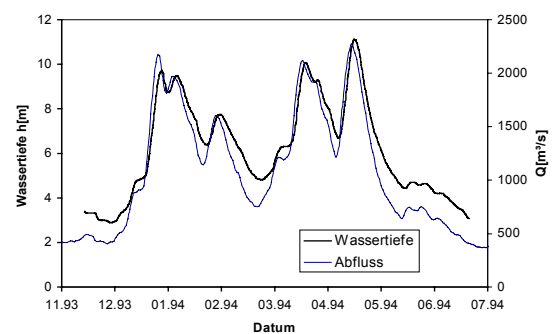


Abb. III-5.54 Ganglinie der Wassertiefe und des Abflusses für das Abflussjahr 1994.

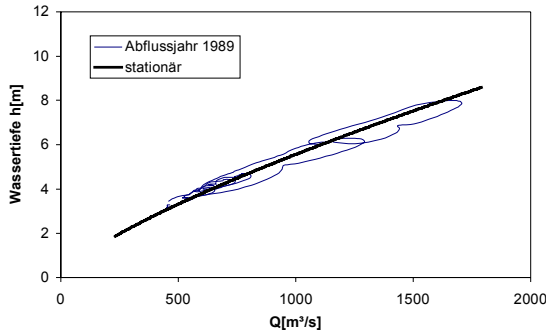


Abb. III-5.55 Wassertiefe im Modell für das Abflussjahr 1989 in Funktion des Abflusses.

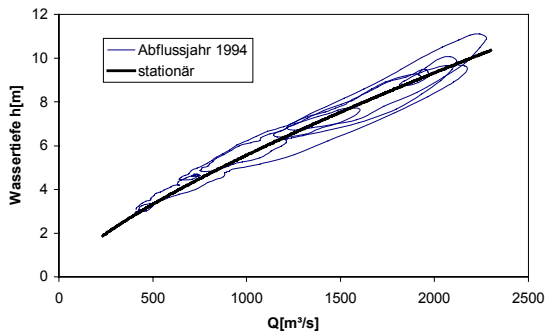


Abb. III-5.56 Wassertiefe im Modell für das Abflussjahr 1994 in Funktion des Abflusses.

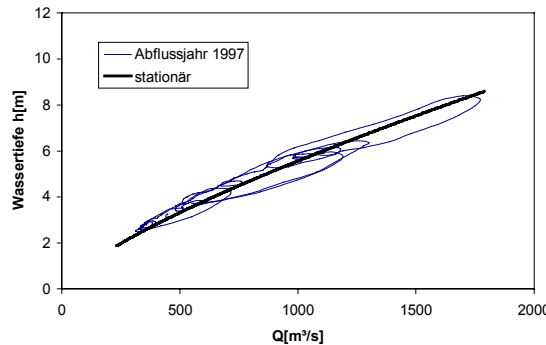


Abb. III-5.57 Wassertiefe im Modell für das Abflussjahr 1997 in Funktion des Abflusses.

### III-5.7.3 Vergleich der gemessenen Dünenhöhen und -längen der Modellversuche mit den Naturpeilungen 1997

In Kap. III-5.3.4 wurden Flächenpeilungen der Elbe-sole von 1997 hinsichtlich der Geometrie von Transportkörpern bei unterschiedlichen Wasserführungen analysiert. Diese Ergebnisse wurden zur Ermittlung des geeigneten sedimentologischen Zeitmaßstabs für die Versuche herangezogen. Nachfolgend werden die Labormessungen (Simulationen des Abflussjahres 1997) mit den aus der Analyse der Naturdaten erzielten Resultaten verglichen.

### Transportkörperhöhe $H$

In Abb. III-5.58 sind die Modellmessungen der Transportkörperhöhen den Naturdaten (Kap. 5.3.4) gegenübergestellt. Zur Verdeutlichung sind die Ergebnisse als Wertebereich (min  $H$  bis max  $H$ ) mit Balken, sowie als Mittelwert (mittlere  $H$ ) mit Strich für die drei Flächenpeilungen getrennt dargestellt.

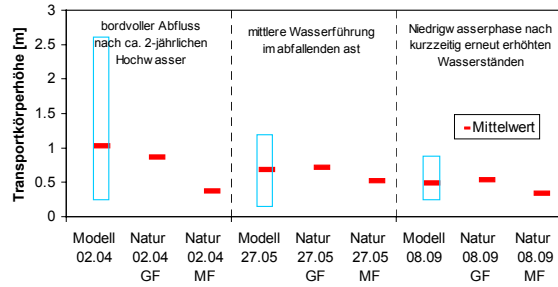


Abb. III-5.58 Vergleich der Transportkörperhöhen aus Modell und Natur für drei Zustände im Jahr 1997.

Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung der Dünenhöhen aus den Laboruntersuchungen mit den natürlichen Höhen der Transportkörper (Großformen) zu allen drei Zeitpunkten. Im April (bordvoller Abfluss nach ca. 2-jährlichen Hochwasser) liegt die Höhe der Mittelformen in der Natur zwar noch im Wertebereich der Modellversuche, ist jedoch deutlich kleiner als der Mittelwert der Modellmessungen.

### Transportkörperlänge $L$

Die Transportkörperlänge  $L$  der Modellmessungen wird in Abb. III-5.59 und Abb. III-5.60 mit den beiden Auswertungsmethoden der Naturdaten (Tab. III-5.4 in Kap. III-5.3.4) verglichen.

Den Abbildungen ist zu entnehmen, dass in der Mittel- und Niedrigwasserphase die mittleren Transportkörperlängen der Großformen in Natur im Bereich der Modelldaten liegen. Bei Hochwasser

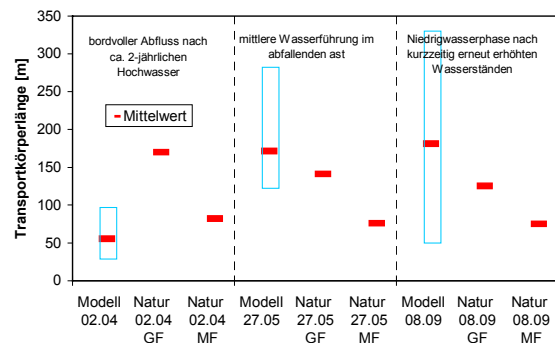


Abb. III-5.59 Vergleich der Transportkörperlängen aus Modell und Natur (Methode A) für die drei Zustände 1997.

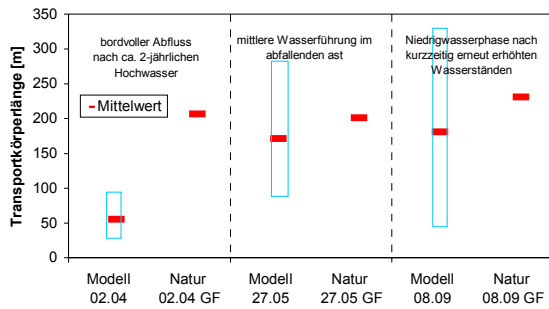


Abb. III-5.60 Vergleich der Transportkörperlängen aus Modell und Natur (Methode B) für die drei Zustände 1997.

liegt dagegen die mittlere Länge der Mittelformen der Transportkörper im Bereich der Labordaten.

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass die vorliegenden Labormessungen eher mittlere bis große Sohlstrukturen repräsentieren.

### III-5.7.4 Transportkörperhöhe H

In Abb. III-5.61, III-5.62 und III-5.63 sind die gemessenen Dünenhöhenverläufe der Jahre 1989, 1994 und 1997 dargestellt. Wie in Kap. III-5.3.3 beschrieben, lagen in allen drei Jahren die Wasserführungen unmittelbar vor Hochwasser bei ca. 500 m<sup>3</sup>/s und erreichten ihr Maximum nach etwa einem Monat.

#### Ereignisse 1989 und 1997

Die Hochwasserereignisse 1989 und 1997 hatten vergleichbare Scheitelabflüsse von ca. 1700 m<sup>3</sup>/s. Abb. III-5.61 und III-5.63 ist zu entnehmen, dass auch die jeweils gemessene maximale Dünenhöhe eine fast übereinstimmende Größe aufweist. Es fällt auf, dass die maximale Dünenhöhe nicht zum gleichen Zeitpunkt wie der Scheitelabfluss, sondern mit einer Zeitverschiebung von ca. zehn Tagen auftritt. Bei der Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Transportkörper (Kap. III-5.5.2) wurde bereits gezeigt, dass es im untersuchten Elbeabschnitt länger als zwei Monate dauern kann bis ein stationärer Sohlzustand erreicht wird (würde) und Bettformationen insbesondere bei Hochwasser nie mit einem stationären Zustand vergleichbar sind. Daraus folgt, dass beim Scheitelabfluss eines Hochwassers die Dünenhöhe kleiner als im zugehörigen stationären Zustand sein muss. Da die Dünen ihre vollständig den Strömungsbedingungen angepasste Höhe auch kurz nach dem Scheitelabfluss noch nicht erreicht haben, bewirkt der Strömungsangriff in der

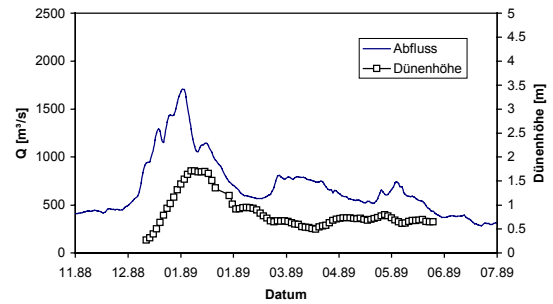


Abb. III-5.61 Verlauf der im Modell gemessenen Transportkörperhöhe H im Abflussjahr 1989.

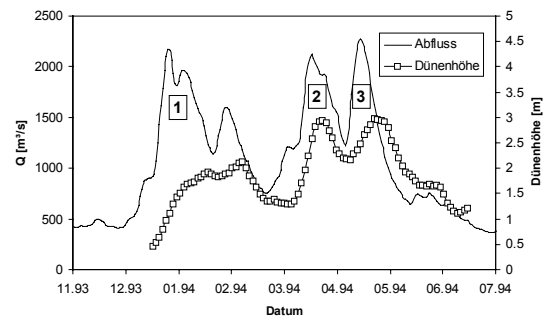


Abb. III-5.62 Verlauf der im Modell gemessenen Transportkörperhöhe H im Abflussjahr 1994.

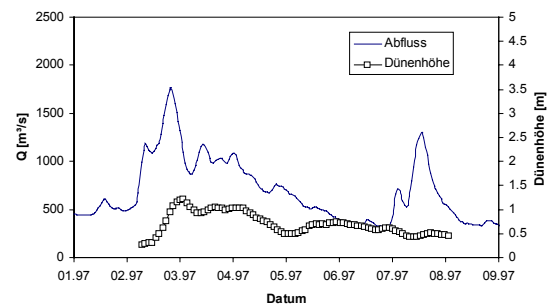
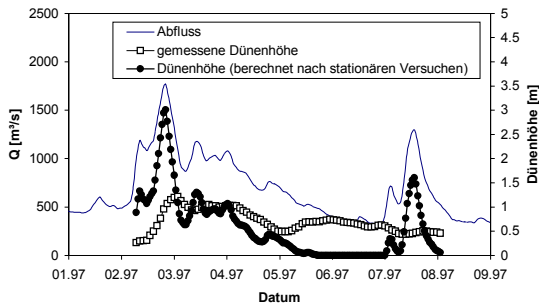


Abb. III-5.63 Verlauf der im Modell gemessenen Transportkörperhöhe H im Abflussjahr 1997.

Folge eine weitere Zunahme der Höhe. Die Dünenhöhe kann solange anwachsen, bis sie größer als die dem Strömungsangriff angepasste Bettform ist. Diese Hypothese lässt sich eindeutig durch den Vergleich der Dünenhöhe in instationären und stationären Strömungen untermauern. In Abb. III-5.64 ist der gemessene Dünenhöhenverlauf 1997 dem nach den stationären Ergebnissen berechneten Verlauf gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass auch bei Abflussrückgang im März (03.97) die gemessene Dünenhöhe weiter ansteigt und ihren Maximalwert in dem Moment erreicht, in dem die Bettform ihren – stationär ermittelten – Gleichgewichtszustand hat. In der Folge (03.97) nimmt die Dünenhöhe trotz erneuter Abflusszunahme weiter ab und erreicht ihr zeitweiliges Minimum wiederum in dem Moment, in dem die Bettform ihren angepassten Zustand hat.



**Abb. III-5.64** Vergleich des gemessenen Dünenhöhenverlaufs (instationär, 1997) mit der nach stationären Ergebnissen berechneten Dünenhöhe.

Im weiteren Verlauf in Abb. III-5.64 nähert sich die Dünenhöhe bei instationärer Strömung den Werten stationärer Verhältnisse an und verläuft von Mitte März bis Anfang April nahezu konstant. Weiterhin fällt auf, dass sich später bei Wasserführungen unter Mittelwasser (Mai, Juni) anstatt einer ebenen Sohle, wie nach stationären Ergebnissen zu erwarten wäre, stets Transportkörper von  $> 0,4$  m Höhe ausbildeten. Dass eine (im Ausgangszustand) ebene feinsandige Sohle nach instationärer Belastung als solche *nie* wieder hergestellt werden kann, soll das folgende Foto (Abb. III-5.65) verdeutlichen: die Sohle im Modell ist auch sechs Monate nach Hochwasser 1989 und bei Wasserführungen unter  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  weiterhin deutlich von Transportkörpern geprägt.



**Abb. III-5.65** Beobachtete Bettformation sechs Monate nach Hochwasser 1989 bei Wasserführungen unter  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  (Transportkörper bei Niedrigwasser).

Nach der Niedrigwasserphase im Mai/Juni war die Wasserführung im Juli 1997 erneut auf  $1300 \text{ m}^3/\text{s}$  erhöht. Dies hatte keine Erhöhung von Dünen zur Folge. Um Messfehler auszuschließen, wurde dieser Versuch wiederholt, wobei im zweiten Versuch nahezu identische Ergebnisse erzielt wurden. Zur Erklärung ist Abb. III-5.64 erneut zu betrachten: Aus dem Bild ist zu erkennen, dass von Anfang April bis Mitte Juli einschließlich der Phase mit kurzzeitig erhöhten Wasserständen die Dünen stets eine höhere als die stationär angepasste Bettform hatten, so dass die Dünen sich erwartungsgemäß nicht erhöhten. Die Dauer des zwischenzeitlichen (kleinen) Hochwasserereignisses war sehr kurz, so dass die Sohle nur geringfügig auf die erhöhte Belastung reagierte.

Die erheblichen Unterschiede zwischen stationären und instationären Strömungen deuten (erneut) darauf hin, dass sich eine instationär geprägte Sohlform nicht anhand von Berechnungsansätzen aus stationären Versuchen beschreiben lässt.

#### *Ereignis(se) 1994*

Im Vergleich zu 1989 und 1997 wies das Abflussjahr 1994 nicht nur höhere Spitzenabflüsse und eine steilere Wellenform bei Hochwasser auf, sondern auch mehrere Gipfel und eine insgesamt wesentlich längere Dauer. Die Dünen zeigten dementsprechend wesentlich größere Höhen. Der instationäre Effekt lässt sich mit Hilfe von Abb. III-5.62 gut veranschaulichen: beim Aufeinanderfolgen dreier Wellen innerhalb weniger Monate (markiert als Nr. 1 bis 3 in Abb. III-5.62) steigt die mittlere Dünenhöhe – bei jedem Ereignis ausgehend vom vorher geprägten Sohlzustand – an und erreicht ihr temporäres Maximum jeweils erst bei abklingendem Abfluss. Dabei fällt auf, dass im Frühjahr 1994 (d.h. während der Wellen „2“ und „3“) die maximale Dünenhöhe um ca. 40 % größer ausfiel als im Zeitraum Dez. 93 bis Feb. 94 (während Hochwasser „1“), obwohl die Spitzenabflüsse in beiden Zeiträumen vergleichbar groß waren. Ferner wird ersichtlich, dass die Dünen unmittelbar vor Hochwasser „2“ bereits etwa die dreifache Höhe hatten wie vor Hochwasser „1“, d.h. sie wuchsen (weiter) mit größeren Basishöhen.

Für dieses Abflussjahr 1994 wurde ein weiterer Versuch gefahren, bei dem statt wie sonst mit ebener Sohle bereits mit dünenförmiger Sohle begonnen wurde. Bei diesem Versuch lagen die mittleren

Dünenhöhen zum Zeitpunkt 23.12.1993 (vor Hochwasser „1“) bei ca. 0,8 m, während mit anfänglich ebener Sohle ca. 0,5 m gemessen wurde. Durch die höhere anfängliche Dünenhöhe stieg die maximale Dünenhöhe während Hochwasser „1“ entsprechend ebenso um etwa 0,3 m an. Demgegenüber konnte während Hochwasser „2“ und „3“ in 1994 keine Auswirkung (Differenz) mehr festgestellt werden.

Abb. III-5.66 zeigt den Verlauf der Dünenhöhe nach stationären und instationären Messergebnissen in Funktion des Abflusses. Hierbei sind die Verläufe in den ansteigenden Ästen der Hochwasserwellen „1“ bis „3“ (siehe oben Abb. III-5.62) jeweils mit durchgezogenen Linien und in deren abfallenden Ästen mit gestrichelten Linien gekennzeichnet. Es ist erkennen, dass bei den drei aufeinanderfolgenden Hochwasserwellen die Dünenhöhe spiralförmig anwächst, wobei in ansteigenden Ästen bei gleichem Abfluss geringere Dünenhöhen als in abfallenden Ästen auftreten. Mit jeder Hochwasserwelle steigt die Höhe der Transportkörper an. Der Anstieg ist jedoch wesentlich kleiner als bei stationären Strömungen (Abb. III-5.66). Außer bei Hochwasser „1“ (Dezember 1993) sind die Dünen zu Beginn jedes Anstiegs höher und bei Erreichen des Scheitelabflusses niedriger als bei stationären Zuständen.

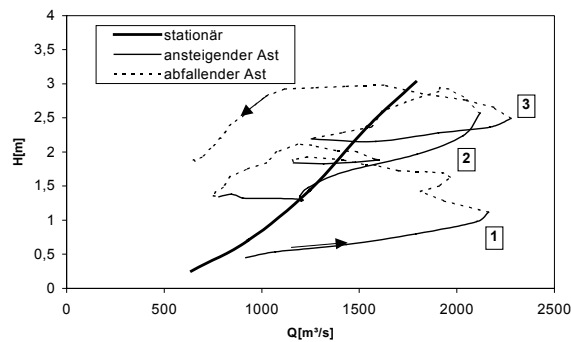


Abb. III-5.66 Dünenhöhenverlauf bei instationären Abflüssen (Hochwasserereignisse 1994) im Vergleich zu stationären Verhältnissen.

Aus Abb. III-5.66 ist weiterhin zu erkennen, dass die Dünenhöhen im dritten Anstieg die geringste und im zweiten Ast die steilste Zunahme verzeichnen. Das heißt, die Zunahme der Dünenhöhe hängt maßgebend vom Anstieg der Hochwasserwelle ab. Je schneller ein Hochwasser ansteigt, umso flacher verläuft die Zunahme der Dünenhöhe, wie die Werte in Tab. III-5.14 belegen. Es ist verständlich, dass die Dünen bei schnellerem Anstieg weniger Zeit haben sich an die veränderte Strömung anzupassen.

Tab. III-5.14 Einflussgrößen des Dünenhöhenverlaufs in den ansteigenden Ästen der Hochwasserwellen 1994.

Position	anfängliche Dünenhöhe [m]	Anstieg Q [m³/Tag]
1. ansteigender Ast	< 0,2	67
2. ansteigender Ast	1,34	52
3. ansteigender Ast	2,19	110

Um den Einfluss des Anstiegs bzw. der Geschwindigkeit der Belastungsänderung näher zu untersuchen wurde ein Versuch mit der Abflussganglinie 1989 durchgeführt, bei dem die Zeiteinheiten im Modell um 1/6 verlängert wurden. Das heißt, dass diese Abflussganglinie flacher verlief bzw. gestreckter simuliert wurde als die oben beschriebene. In Abb. III-5.67 sind die Verläufe der Dünenhöhe der beiden Fälle gegenübergestellt. Das Abschwächen der Steigung der Abflussganglinie bewirkte demnach eine bis zu 30-prozentige Erhöhung der Dünen.

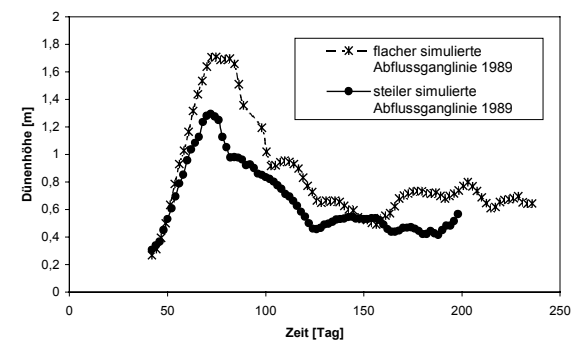


Abb. III-5.67 Einfluss der Steigung der Abflussganglinie auf die Dünenhöhe (Variation der Zeiteinheit im Modell).

Abb. III-5.68 zeigt das Verhältnis der relativen Höhenzunahme der Dünen gegenüber dem jeweiligen Belastungsanstieg (Änderung der Wassertiefe) für die ansteigenden Äste der Hochwasserwellen Dez. 88, Dez. 93, März 94, April 94 und Feb. 97. Aus dem Verlauf wird ersichtlich, dass das Höhenwachstum mit schnellerer Zunahme der Strömungsbelastung relativ betrachtet abnimmt.

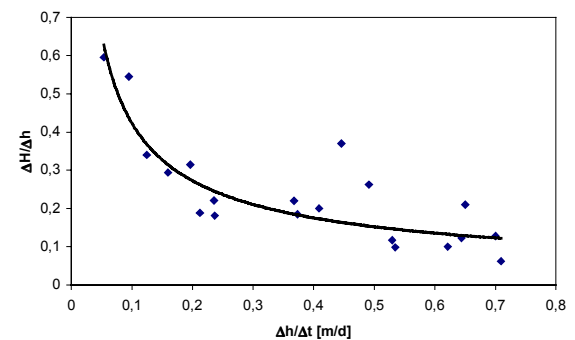
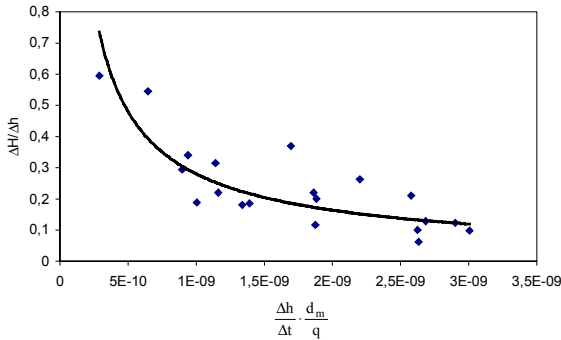


Abb. III-5.68 Verhältnis der Dünenhöhen- zur Wassertiefenänderung im Anstieg verschiedener Wellen (s. Text).

In Abb. III-5.69 sind die vorigen Größen nochmals in dimensionsloser Form aufgetragen (d.h. die auf relative Höhenänderung  $\Delta H/\Delta h$  der Dünen über die über die Korngröße  $d_m$  und den Durchfluss pro Breitereinheit  $q$  normierte Wassertiefenänderung). Die Tendenz ist ähnlich wie in Abb. III-5.68.



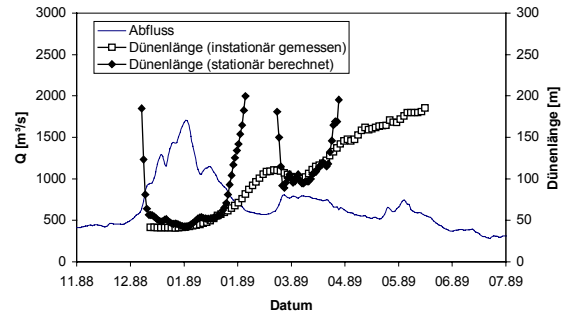
**Abb. III-5.69** Verhältnis der Dünenhöhen- zur Wassertiefenänderung im Anstieg verschiedener Hochwasser (Dez. 88, Dez. 93, März 94, April 94, Feb. 97).

**III-5.7.5 Transportkörperlänge L**

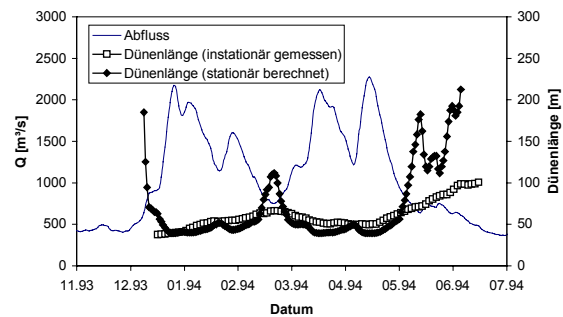
In Abb. III-5.70, III-5.71 und III-5.72 sind die gemessenen Dünenlängenverläufe entsprechend der Abflussganglinien 1989, 1994 und 1997 dargestellt. Zudem ist dabei der instationär gemessene Verlauf dem nach den stationären Versuchen berechneten Verlauf der Transportkörperlänge gegenübergestellt.

Den Abbildungen ist zu entnehmen, dass die Dünen in Niedrigwasserphasen länger als in Hochwasserphasen sind und dass die Dünenlänge während eines Hochwassers unempfindlich auf Belastungsänderungen reagiert, ähnlich wie für stationäre Zustände festgestellt wurde. Besonders auffällig ist, dass sich in Hochwasserphasen die instationär gemessenen Dünenlängen den stationären weitgehend annähern, während bei Niedrigwasser die Dünen in stationären Strömungen deutlich länger als in instationären sind.

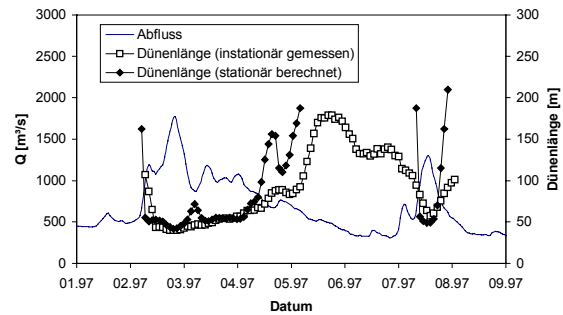
In Abb. III-5.73 sind die Dünenlängen der drei Abflussjahre (1989, 1994 und 1997) in Funktion des Abflusses dargestellt. Um die instationäre Wirkung zu verdeutlichen ist wiederum der Verlauf für stationäre Strömungen gegenübergestellt. Bei Abflüssen unter ca. 1000 m<sup>3</sup>/s ergibt sich eine große Streuung der Messwerte instationärer Bedingungen, sie liegen jedoch deutlich unterhalb der stationären Zustände. Analog den stationären nähert sich die Dünenlänge für instationäre Abflusssituationen über ~1000 m<sup>3</sup>/s einer (nicht identischen) Konstanten an.



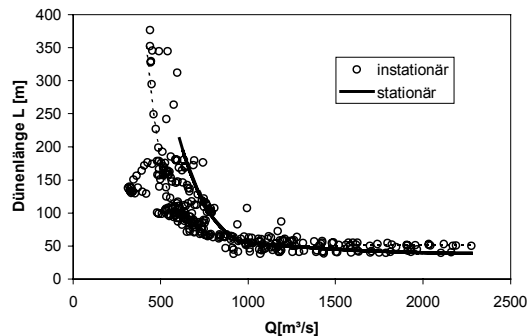
**Abb. III-5.70** Vergleich der gemessenen Dünenlängen für das Abflussjahr 1989 mit den für stationäre Strömungsbedingungen berechneten.



**Abb. III-5.71** Vergleich der gemessenen Dünenlängen für das Abflussjahr 1994 mit den für stationäre Strömungsbedingungen berechneten.



**Abb. III-5.72** Vergleich der gemessenen Dünenlängen für das Abflussjahr 1997 mit den für stationäre Strömungsbedingungen berechneten.



**Abb. III-5.73** Instationär (1989, 1994 und 1997) gemessene Dünenlängen und deren Verlauf in stationären Strömungen in Funktion des Abflusses.



### III-5.7.6 Steilheit $\delta$

In den Abb. III-5.74, III-5.75 und III-5.76 ist die aus den Höhen und Längen resultierende Steilheit der Dünen dargestellt. Die obigen Aussagen zur Instationarität der Vorgänge werden in dieser Anschauung erneut unterstrichen. Die Werte der Steilheit liegen in Niedrig- bis Mittelwasserphasen i.a. unter ca. 0,01, während sie bei Hochwasser auf ca. 0,03-0,04 und beim mehrgipfligen Ereignis 1994 weiter bis auf ca. 0,06 ansteigen. Das Maximum der Steilheit wird i.a. etwa 3-8 Tage nach dem Scheitelabfluss erreicht.

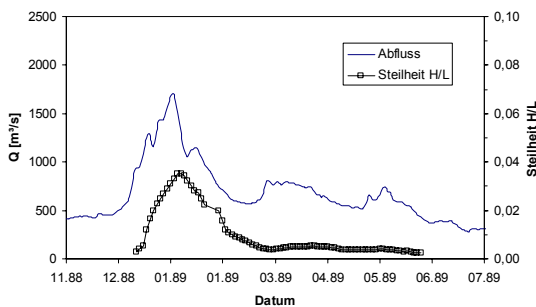


Abb. III-5.74 Steilheit der Dünen für das Abflussjahr 1989.

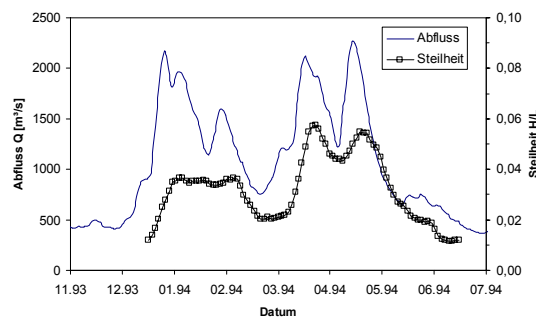


Abb. III-5.75 Steilheit der Dünen für das Abflussjahr 1994.

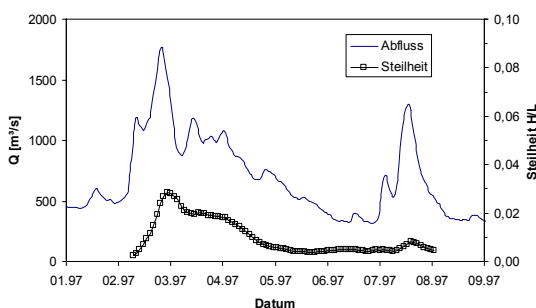


Abb. III-5.76 Steilheit der Dünen für das Abflussjahr 1997.

### III-5.7.7 Geschiebetransportrate $q_s$

Abb. III-5.77 und III-5.78 zeigen den zeitlichen Verlauf der Geschiebetransportrate  $q_s$  für 1989 und 1994. Aus Abb. III-5.77 wird ersichtlich, dass das Maximum der Transportrate praktisch zeitgleich mit dem Scheitelabfluss auftritt. Anhand Abb. III-5.78

kann festgestellt werden, dass bei raschem Anstieg der Abflussbelastung der Geschiebetransport etwas verzögert reagiert. Dieses Ergebnis liegt vermutlich darin begründet, dass die Fortpflanzung der Abflussänderung vom Einlauf bis zum Auslauf der 60 m langen Rinne sowie die Reaktion der Sohle bzw. der resultierende Feststoffaustrag darauf eine gewisse Zeit benötigt. Es ist auffällig, dass 1994 die Transportraten deutlich höher ausfallen als 1989 und dabei bei weitem steilere Verläufe zeigen.

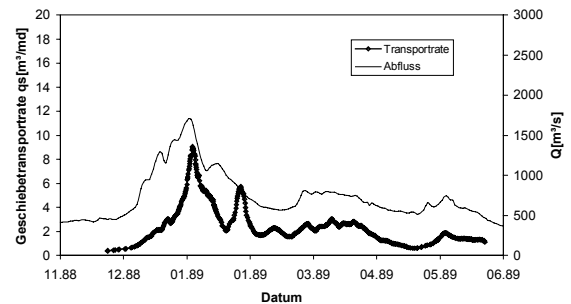


Abb. III-5.77 Zeitlicher Verlauf der Geschiebetransportrate für das Abflussjahr 1989.

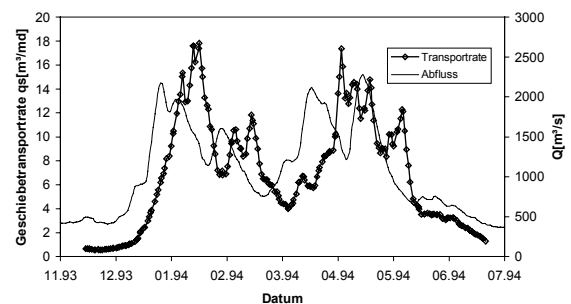
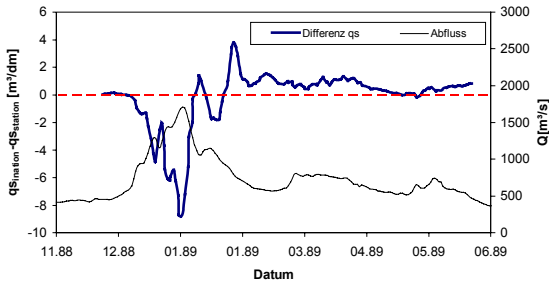
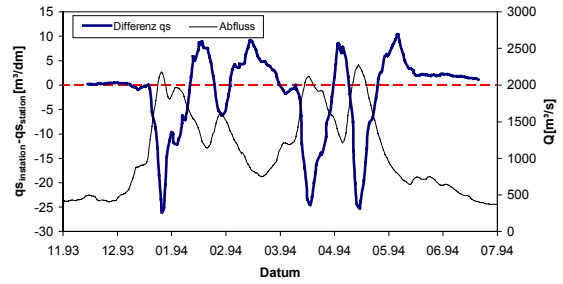


Abb. III-5.78 Zeitlicher Verlauf der Geschiebetransportrate für das Abflussjahr 1994.

In Abb. III-5.79 und III-5.80 ist für 1989 bzw. 1994 die Differenz der instationär gemessenen Geschiebetransportrate  $q_{s,instation}$  gegenüber der nach den stationären Ergebnissen berechneten  $q_{s,station}$  dargestellt. Den Bildern ist zu entnehmen, dass während Hochwasser die Transportrate geringer ausfällt als nach stationären Ergebnissen erwartet würde. Dagegen wird während Niedrigwasser unter instationären Strömungsbedingungen mehr Geschiebe transportiert als bei stationären Verhältnissen. Tatsächlich kann die Transportrate genau (und nur) zu dem Zeitpunkt stationären Zuständen entsprechen, wenn die vorhandene Bettformation auf den augenblicklichen Strömungsangriff angepasst ist. Das bedeutet, dass wenn die auf den stationären Strömungszustand bezogene Dünenhöhe momentan niedriger als ihre angepasste Höhe ist, wird weniger Geschiebe transportiert als in stationären Strömungen und die



**Abb. III-5.79** Differenz zwischen der instationär für 1989 gemessenen Geschiebetransportrate  $q_{s,instation}$  und der stationär berechneten  $q_{s,station}$ .



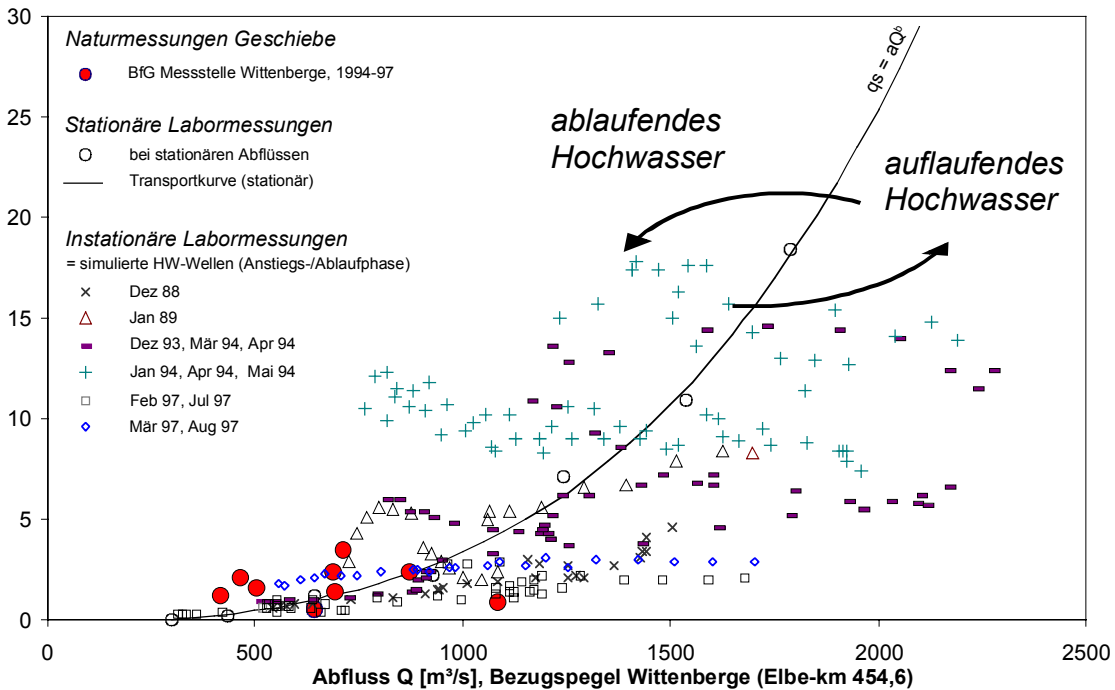
**Abb. III-5.80** Differenz zwischen der instationär für 1994 gemessenen Geschiebetransportrate  $q_{s,instation}$  und der stationär berechneten  $q_{s,station}$ .

überschüssige kinetische Energie zur Umformung der Sohle verbraucht. Die Dünen fungieren somit, wie in der Literatur angesprochen, als temporäre Sedimentspeicher und tragen zur Stabilisierung des Sohlgefüges bei. Im umgekehrten Fall wird der Geschiebetransport größer. Aus diesen Ausführungen lässt sich auch ableiten, warum sich die bei einem Hochwasser gebildeten großen Dünen bei rückläufigem Abfluss nur langsam abschleifen. Das bedeutet, dass unter diesen Umständen die Dünen allemal höher sind und somit der Geschiebetransport größer ist als unter angepassten Bedingungen, bei zugleich abnehmender Strömungsintensität.

In der Praxis existiert eine große Anzahl von Ansätzen zur mathematischen Beschreibung des Geschiebetransports, die den Zusammenhang zwischen Abfluss  $Q$  und Transportrate  $q_s$  als empirische

Beziehung der Form  $q_s = aQ^b$  formulieren. Wie die Messdaten der vorliegenden Arbeit zeigen, in Abb. III-5.81 dargestellt im Vergleich mit Naturwerten (Geschiebemessungen der BfG aus dem Zeitraum 1994-1997), liefern Transportfunktionen dieses Typs strenggenommen nur für stationäre Zustände, wie z.B. lange Niedrigwasserperioden, zufriedenstellende Aussagen. Dagegen kann ihre Anwendung auf natürliche, instationäre Verhältnisse und insbesondere hohe Abflussbereiche, in denen zuverlässige Geschiebemessungen in Natur praktisch kaum möglich sind, zu Fehleinschätzungen führen, wobei die Geschiebefracht mehrfach über- oder unterschätzt werden kann. Z.B. könnte mittels der Transportfunktion für stationäre Zustände die im Zeitraum 20.11.93 bis 28.06.94 transportierte Geschiebemenge um rund 71.000 m<sup>3</sup> überschätzt werden.

**Geschiebetransportrate  $q_s$  [m³/(m\*d)]**



**Abb. III-5.81** Differenz zwischen der instationär für 1994 gemessenen Geschiebetransportrate  $q_{s,instation}$  und der stationär berechneten.

### III-5.7.8 Hinweis zum Arbeitsprogramm

Die bis hierher besprochenen Ergebnisse lassen eindeutig erkennen, dass zum besseren Verständnis der Gesetzmäßigkeiten und Prozesse weitere systematische Grundlagenforschungen von Nöten sind. Ursprünglich waren solche Untersuchungen für das vorliegende Teilprojekt vorgesehen. Andererseits ergab sich im Ergebnis der Zwischenbegutachtung durch den zuständigen Wissenschaftlichen Beirat des BMBF nach Ablauf des ersten Projektjahrs (Zitat aus dem Protokoll): „Um die relativ (zeit-) aufwendigen Versuche einzugrenzen, sollte anstelle des Grundlagencharakters der Bezug zur Elbe stärker betont werden, das gilt insbesondere für die Bühnen-Untersuchungen.“ Dementsprechend wurde das Untersuchungsprogramm der verbleibenden Zeit geändert (u.a. an anderer Stelle reduziert). Trotz der Konzentration auf die in diesem Beitrag letztlich vorgestellten Arbeiten und trotz hohem personellen und messtechnischen (weitgehend automatisierten) Aufwand erwiesen sich die Untersuchungen als überaus zeitintensiv. Das bedeutete, dass über die geplanten drei Jahre Laufzeit hinaus der Zeitplan erheblich überzogen werden musste, getragen durch Eigenmittel des Instituts, um die nun nachfolgenden Untersuchungen zur Bühnenwirkung, einen Teil der Auswertung der Messdaten sowie die Anfertigung des Endberichts fertig stellen zu können.

Dieser Hinweis ist vor allem als Erfahrungswert für mögliche künftige Untersuchungen dieser Art und dieses Umfangs zu verstehen.

## III-5.8 Untersuchungen mit Bühnen

### III-5.8.1 Geometrie der Modellbühnen

Um die Auswirkungen von Ausbaumaßnahmen auf die Sohlstabilität zu klären, wurden für den letzten Teil der experimentellen Untersuchungen einseitig Bühnen in die Rinne eingebaut. Das heißt, die Strömungs- bzw. Bühnenfelder wurden gemäß etwa einer halben Flussbreite simuliert, wobei charakteristische Abmessungen für den unteren Elbebereich gewählt wurden. Die Geometrie der Modellbühnen entspricht nicht in allen Details den natürlichen Vorbildern, sondern wurde auf die wesentlichen geometrischen Parameter wie Bühnenkopfeigung, Böschungsneigungen, etc. beschränkt. Ein schemati-

scher Grundriss dieser Bühnen ist in Abb. III-5.82 dargestellt. Insgesamt waren 12 derartige Bühnen in einem Abstand von 125 m (in der Natur) eingebaut. Die Oberkante der Bühnenköpfe entsprach einer Höhe bei einer Wassertiefe von 3,4 m im Bett.

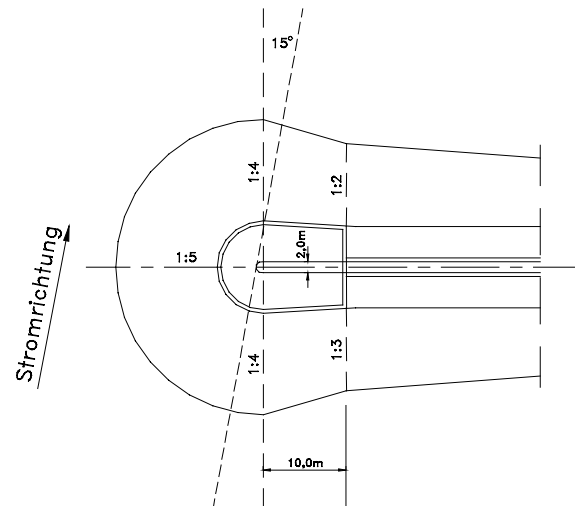


Abb. III-5.82 Schematischer Grundriss der Modellbühnen.

### III-5.8.2 Versuchsbetrieb

Die Versuchsvorbereitungen, wie z.B. Einbau einer ebenen Sohle, liefen wie in den vorigen Versuchen. Die Abflussregelung erfolgte analog zu den instationären Untersuchungen ohne Bühnen, wobei ebenso die Ganglinien der Abflussjahre 1989, 1994 und 1997 bei Wittenberge simuliert wurden. Um den Einfluss der Ausbaumaßnahme auf die Sohlstabilität aufzuzeigen, wurde das Geschiebe während der Versuche mit gleicher Rate wie in den instationären Untersuchungen zugegeben. Die Messmethoden für Wasserspiegel, Geschiebetransportmenge und Sohlgeometrie blieben wie gehabt. Um die Wirkung über eine mehrere Jahre zu erfassen, wurden die Ganglinien jeweils nacheinander dreimal wiederholt. Die einzelnen Versuchsdurchläufe (Ganglinien) werden nachfolgend als 1., 2. und 3. Jahr bezeichnet.

### III-5.8.3 Beobachtungen nach Bühneneinbau

Während der Versuche waren ständige Umformungen der Sohle in Bühnenfeldern zu beobachten. Bei einer ausgeprägten Rückströmung im Bühnenfeld bildeten sich Bühnenkopfkolk aus (Abb. III-5.83). Teilweise traten im Nachlauf der Bühnen große Längsrippen auf (Abb. III-5.84).



Abb. III-5.83 Ausgeprägte Kolkbildung am Buhnenkopf.

Die Kolkbildung an Buhnenköpfen ist ein allgemein bekanntes Phänomen. Die Ursache liegt in der Einschnürung des Fließquerschnitts und den damit lokal ansteigenden Strömungsgeschwindigkeiten. Der Kolk wächst solange an, bis der Querschnitt sich an dieser Stelle soweit vergrößert hat, dass die Strömungsgeschwindigkeiten und damit die Sohlspannungen unter eine kritische Grenze fallen.



Abb. III-5.84 Sohlformen (Längsdünen) im Buhnenfeld.

Unmittelbar nach Buhneneinbau sind die Buhnenkopfkolke noch nicht bzw. nur teilweise ausgebildet. Aufgrund der Einschnürung des wirksamen Fließquerschnitts ist der Wasserspiegel zu dieser Zeit stark erhöht. Mit fortschreitender Ausbildung der Kolke vermindert sich diese Wasserspiegelanhebung wieder (wie unten quantitativ dargestellt ist).

Durch den Einbau der Buhnen wird somit das Strömungsfeld verändert. Diese Veränderung beeinflusst ihrerseits das sedimentologische Verhalten im Fluss. Insgesamt wies die Sohle in der Buhnenstrecke sehr charakteristische Formen auf (Abb. III-5.85).

#### III-5.8.4 Buhnenüberströmung nach Einbau

In Abb. III-5.86 und III-5.87 ist der Verlauf der Buhnenüberströmung in den Jahren 1997 und 1994 zu erkennen. Hierbei handelt es sich um die auf die

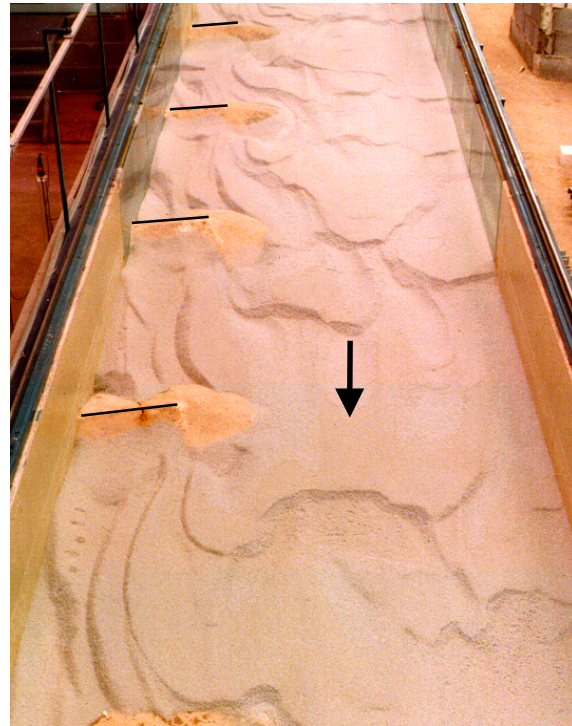


Abb. III-5.85 Beobachtete charakteristische Sohlformen in den Buhnenfeldern und im Hauptbett.

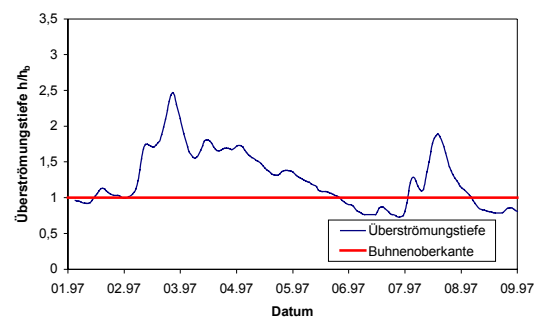


Abb. III-5.86 Buhnenüberströmung 1997 (1. Jahr).

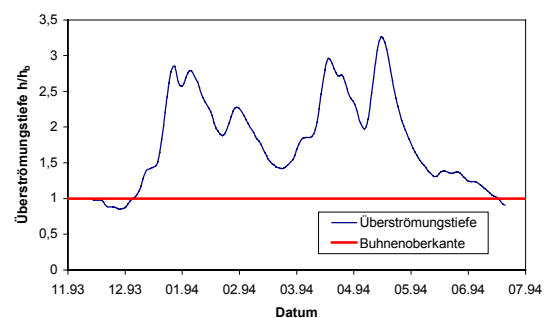


Abb. III-5.87 Buhnenüberströmung 1994 (1. Jahr).

Buhnenoberkante bezogene Überströmungstiefe  $h/h_B$  im ersten von jeweils drei aufeinanderfolgenden Versuchsdurchläufen (Ganglinie 1. Jahr). Im Vergleich der beiden Jahre war das Abflussereignis 1994 (bzw. die Wassertiefen) deutlich höher als 1997, so dass auch die Buhnenüberströmung entsprechend höher und langanhaltender ausfiel.

### III-5.8.5 Wasserspiegelentwicklung

#### Ereignis 1997

Abb. III-5.88 zeigt die Wasserspiegeländerung  $\Delta W$  im ersten Jahr und dritten Jahr nach Buhneneinbau (Ganglinie 1997), bezogen auf die im Kapitel III-5.7 gezeigten Verhältnisse ohne Buhnen.

Im ersten Jahr ist im gesamten Zeitraum von Januar bis September ein deutlich erhöhter Wasserstand zu erkennen. Auffällig ist, dass diese Anhebung nach Auftreten des Scheitelwerts des Hochwasserabflusses drastisch abnimmt. Die Erklärung für diesen Sachverhalt liegt vermutlich in der verminderten Buhnenwirkung im abfallenden Ast einer Hochwasserwelle. In dieser Phase weist die Strömung ein flacheres Wasserspiegelgefälle als bei Normalabfluss auf. Demzufolge wirkt die Strömung auch mit schwächerem Impuls auf die Buhnen, was zu einer Verminderung der Stauwirkung und somit zu einer Verminderung der anfänglichen Wasserstandserhöhung führt. Im dritten Jahr nach Buhneneinbau zeigt sich dagegen eine rückläufige Tendenz in der Wasserspiegelentwicklung (Abb. III-5.88). Aus diesen lässt sich schließen, dass beim ersten Hochwasserereignis eine starke (abrupte) Umformung der gesamten Bettform im Hinblick auf die veränderte Gerinnegeometrie stattgefunden hat, während über die weitere Zeit bzw. nachfolgende Ereignisse von einer Anpassung im Sinne sich stabilisierender Verhältnisse auszugehen ist.

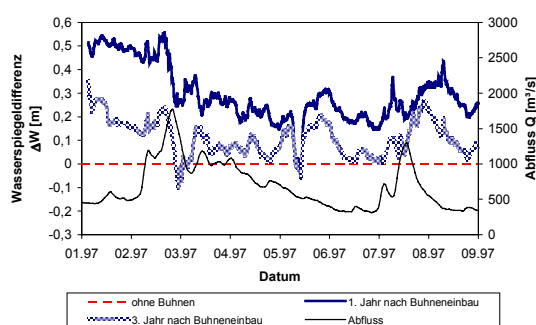


Abb. III-5.88 Wasserspiegelentwicklung im 1. und 3. Jahr nach Buhneneinbau für die Abflussganglinie 1997.

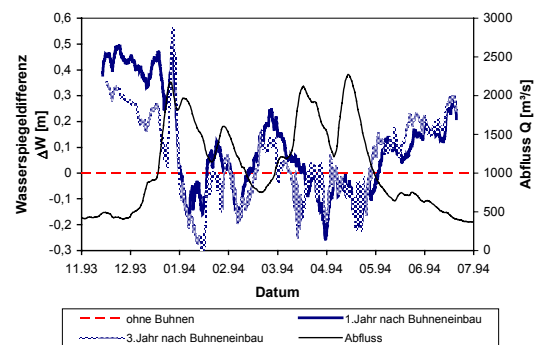
#### Ereignisse 1994

Im Gegensatz zu 1997 ist der Wasserstand für die Ereignisse 1994 im ersten Jahr nach Buhneneinbau nicht im gesamten Zeitraum höher als ohne Buhnen (vgl. Abb. III-5.89). Dies liegt möglicherweise im verminderten Formwiderstandseinfluss (der Buhnen)

bei größerer Überströmungstiefe (Abb. III-5.87) begründet. Auf der Leeseite der Buhnen löst sich die Strömung ab. Infolge der Strömungsablösung verändert sich die Druckverteilung in der Nachlaufzone. Die Änderung der Druckverteilung wirkt sich wiederum auf die Widerstandskraft auf. Der durch die Ablösung hervorgerufene Formwiderstand nimmt mit der erhöhten Überströmungstiefe ab. Das heißt, im Vergleich zu 1997 war bei den Ereignissen 1994 der durch die Buhnen verursachte Formwiderstand kleiner. Darüber hinaus nehmen die Dünenhöhe mit dem Anwachsen der Wassertiefe und damit der durch Dünen hervorgerufene Formwiderstand zu (s.u.). Der Anteil des Widerstands bezüglich Buhnen wird entsprechend kleiner. Daraus resultiert, dass bei größerer Überströmungstiefe der Wasserstand weniger durch Buhnen beeinflusst wird.

Der Wasserstandsverlauf für die Ereignisse 1994 im dritten Jahr nach Buhneneinbau entspricht nahezu den beiden Jahren zuvor (s. Abb. III-5.89).

Abb. III-5.89 Wasserspiegelentwicklung im 1. und 3. Jahr nach



Buhneneinbau für die Ereignisse 1994.

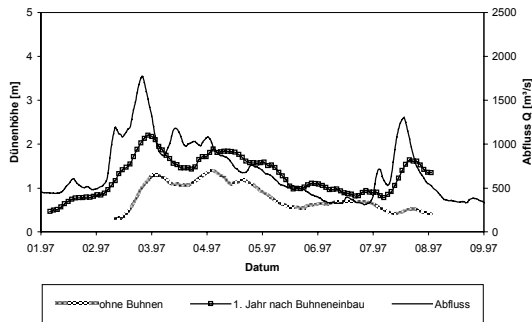
### III-5.8.6 Dünenhöhenentwicklung

#### Ereignis 1997

Abb. III-5.90 zeigt den Dünenhöhenverlauf nach Buhneneinbau für das Ereignis 1997 im Vergleich zum Zustand ohne Buhnen. Aus dem Bild ist zu ersehen, dass nach Buhneneinbau die Dünen eine erheblich größere Höhe aufweisen. Dies lässt sich anhand der Versuchsbeobachtung wie folgt erklären.

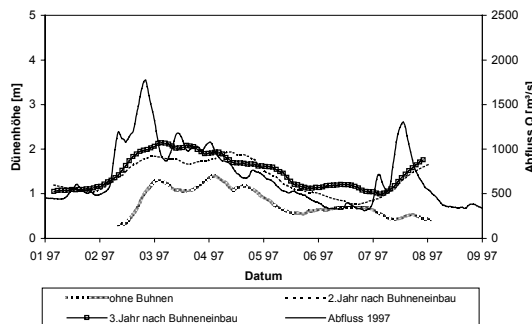
Unmittelbar nachdem im Experiment das Wasser zu fließen begann, konnten Bildungen von Transportkörpern beobachtet werden, die wesentlich früher und auch in größerer Form entstanden als im Gerinnezustand ohne Buhnen. Wie bereits ausgeführt wurde, bewirkt eine größere Anfangsdünenhöhe zu

Beginn eines Hochwassers auch höhere Dünen in dessen Verlauf. Darüber hinaus wird der Wasserstand infolge Buhnen erhöht, wie oben gezeigt wurde. Die Ergebnisse aus den Versuchen in stationären Strömungen zeigten, dass die Dünenhöhe sich mit der Wassertiefe (Sohlbelastung) erhöht. Die Erhöhung der Dünen bei vorhandenen Buhnen folgt somit aus den höheren anfänglichen Dünen vor dem Hochwasser in Kombination mit den weiteren beschriebenen Prozessen.



**Abb. III-5.90** Dünenhöhenentwicklung im 1. Jahr nach Buhneneinbau für die Abflussganglinie 1997 im Vergleich zum Gerinnezustand ohne Buhnen.

Abb. III-5.91 zeigt, dass die Dünen auch bei nachfolgenden Ereignissen (Folgejahren) stets eine erheblich größere Höhe aufweisen. Bei geringeren Abflüssen (ca. Juni/Juli) bzw. bei nicht überströmten Buhnen (vgl. Abb. III-5.86) nähern sich die Dünenhöhen den Bettformen „ohne Buhnen“.

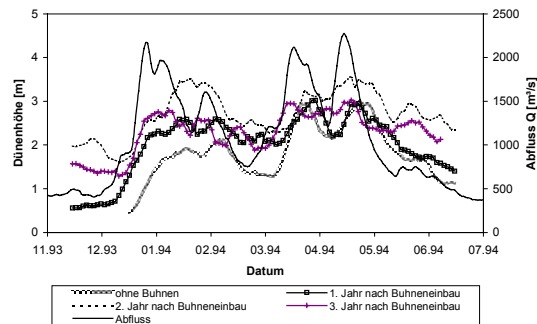


**Abb. III-5.91** Dünenhöhenentwicklung im 2. und 3. Jahr nach Buhneneinbau für die Abflussganglinie 1997 im Vergleich zum Gerinnezustand ohne Buhnen.

Eine Gemeinsamkeit ist in den beiden vorstehenden Abbildungen der Dünenhöhenverläufe 1997 wie auch den nachfolgenden zu den Ereignissen 1994 zu entnehmen: Der Buhneneinbau hat eine Erhöhung der Dünen bei bzw. unmittelbar nach Hochwasser zur Folge, was z.B. ungünstige Fahrrinntiefen für die Elbe-Schifffahrt bedeuten kann.

*Ereignisse 1994*

Abb. III-5.92 zeigt analog zu obigen Darstellungen die Dünenhöhenverläufe für die Ereignisse 1994.



**Abb. III-5.92** Dünenhöhenentwicklung nach Buhneneinbau für die Abflussganglinie 1994 (dreifach wiederholt) im Vergleich zum Gerinnezustand ohne Buhnen.

Aus dem Bild ist zu erkennen, dass nach Buhneneinbau die Dünen nicht immer höher als im Zustand ohne Buhnen waren: während der zweiten und dritten Hochwasserwelle (im 1. Jahr) weisen die Höhen einen ähnlichen Verlauf wie vor Buhneneinbau auf. Auch dies lässt sich anhand der Anfangsdünenhöhe unmittelbar vor einem Hochwasser und des Zustands des Wasserstandes erklären. Da nach Buhneneinbau der Wasserstand infolge der zweiten und dritten Welle nicht weiter erhöht wird, beeinflusst die anfängliche Dünenform den Verlauf der Dünenhöhe überwiegend. Dem Bild ist weiterhin zu entnehmen, dass unmittelbar vor dem ersten Hochwasser die Dünenhöhe etwa 0,5 m beträgt. Wie im Kap. III-5.7.4 beschrieben, wurde für die dieselbe Abflussganglinie ein Vergleichsversuch „ohne Buhnen“ mit einer anfänglichen Dünenhöhe von ca. 0,5 m durchgeführt und ein ähnliches Ergebnis erhalten: während beim ersten Hochwasser das Dünenwachstum vom vorbelasteten Zustand (Anfangsdünenhöhen) geprägt war, machte sich dies in der zweiten und dritten Welle nur noch wenig bemerkbar.

Im zweiten und dritten Jahr nach Buhneneinbau fällt der Rückgang der Dünenhöhe bei geringeren Abflüssen nicht mehr so stark aus wie im ersten Jahr, was mit dem Fehlen von längeren Niedrigwasserperioden zwischen den (wiederholten) Einzeljahren im Zusammenhang stehen mag. Andererseits ergibt sich aus den Messungen in den Folgejahren 2 und 3 des Buhneneinbaus auch der Eindruck, wie im übrigen auch für 1997 festzustellen ist, einer insgesamt nicht mehr so stark schwankenden Dünenhöhe im Vergleich zum ersten Jahr (Abb. III-5.92).

### III-5.8.7 Geschiebetransport

Der Geschiebetransport wird ebenso wie die Dünenhöhe durch Einbau von Buhnen signifikant erhöht. Diesbezüglich zeigen Abb. III-5.93 für das Abflussjahr 1989 sowie Abb. III-5.94 für das Abflussjahr 1994 die Geschiebefracht  $Q_s$  [ $m^3/d$ ] (in Analogie zu der in Kap. III-5.7.7 dargestellten Geschiebetransportrate  $q_s$  [ $m^3/(d\ m)$ ] ohne Buhnen).

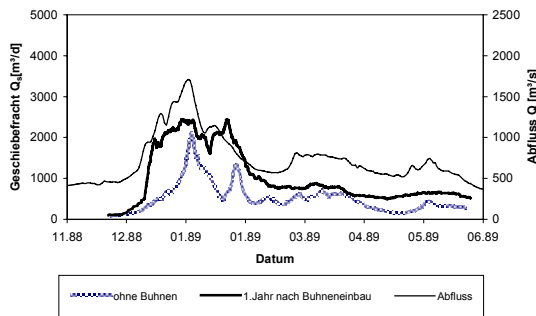


Abb. III-5.93 Geschiebefracht für die Abflussganglinie 1989 im Vergleich zum Gerinnezustand ohne Buhnen.

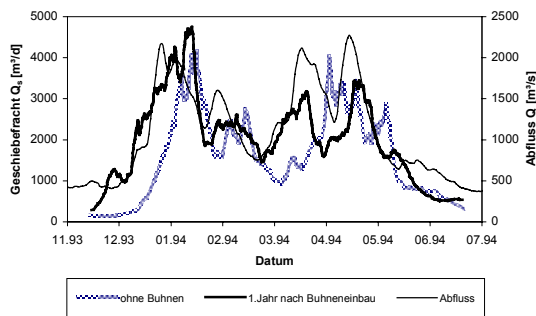


Abb. III-5.94 Geschiebefracht für die Abflussganglinie 1994 im Vergleich zum Gerinnezustand ohne Buhnen.

Aufgrund des geringeren Abflusses bzw. der kleineren Überströmungstiefe im Jahr 1989 (maximale  $h/h_b = 2,5$  mit  $h_b =$  Buhnenhöhe) wirken die Buhnen relativ stark auf die Strömung in der Nachlaufzone und somit auch auf das Geschiebetransportverhalten im Flussschlauch. Im Gegensatz hierzu zeigte die Ganglinie 1994 erheblich höhere Überströmungstiefen (maximale  $h/h_b = 3,2$ ). In diesem Fall wird die Fließgeschwindigkeit im Hauptgerinne im Vergleich zum Zustand ohne Buhnen zwar auch erhöht; diese Erhöhung ist jedoch nicht so stark wie für 1989 und 1997. Darüber hinaus wird das Flussbett wenig vom durch die Strömungsablösung hervorgerufenen Impulsaustausch beeinflusst. Daraus resultiert, dass für die Ganglinie 1994 die Buhnen keine wesentliche Wirkung auf die transportierte Geschiebemenge ausüben (Abb. III-5.94). Betrachtet man aber die Gesamtfracht über das Jahr [ $m^3/a$ ], so führt der Buhneneinbau in der Tat zu Sohlerosion (s.u.).

Abb. III-5.95 und III-5.96 zeigen die Veränderung des Geschiebetransports innerhalb drei Jahren nach dem Buhneneinbau für die Abflussganglinien 1997 und 1994. In beiden Fällen ist zu ersehen, dass für im dritten Jahr nach dem Buhneneinbau weniger Geschiebe als im ersten Jahr transportiert wird. Das deutet darauf hin, dass sich die Sohle nach und nach stabilisiert hat. Während 1997 die gesamte im dritten Jahr transportierte Geschiebemenge (Fracht) immer noch größer ist als ohne eingebaute Buhnen, ergibt sich für 1994 im dritten Jahr eine gegenüber dem Zustand ohne Buhnen kleinere Gesamtmenge.

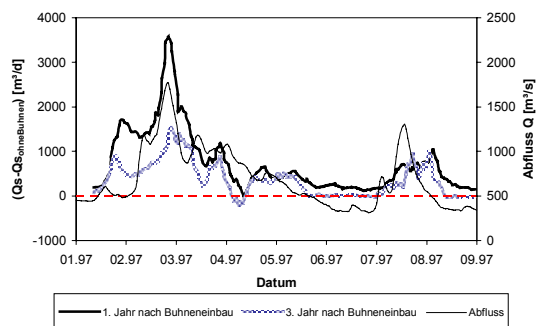


Abb. III-5.95 Veränderung der Geschiebefracht für die Abflussganglinie 1997 infolge Buhnen.

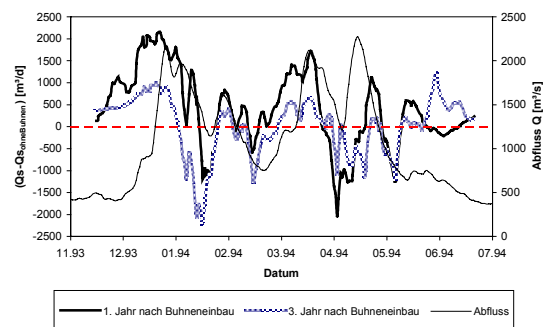


Abb. III-5.96 Veränderung der Geschiebefracht für die Abflussganglinie 1994 infolge Buhnen.

### III-5.8.8 Sohlhöhenentwicklung

Aus der Volumenbilanzierung des Geschiebetransports vor und nach Buhneneinbau sowie der Sohlfläche lässt die resultierende mittlere Sohlhöhenänderung ermitteln.

Abb. III-5.97 und III-5.98 verdeutlichen die aus dieser Bilanzierung sich ergebende (Tendenz der) Sohlhöhenänderung für die Abflussganglinien 1994 und 1997. Den Bildern ist zu entnehmen, dass sich die Sohle nach dem Buhneneinbau eintieft. Die Eintiefungsrates ist im ersten Jahr nach Buhneneinbau an stärksten und lässt mit der Zeit allmählich nach.

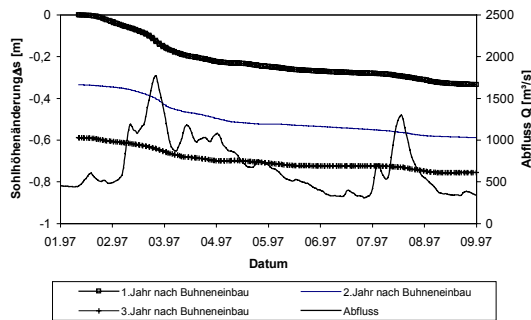


Abb. III-5.97 Sohlhöhenentwicklung für die Abflussganglinie 1997 infolge Buhnen.

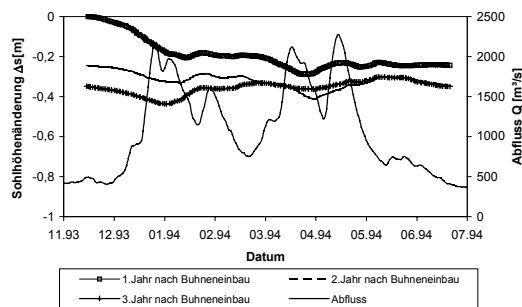


Abb. III-5.98 Sohlhöhenentwicklung für die Abflussganglinie 1994 infolge Buhnen.

Aus den Sohlhöhenänderungen über mehrere Jahre (Ganglinien) in den obenstehenden Bildern lässt sich ablesen, dass infolge der Abflüsse 1997 die Sohle stärker erodiert wird als 1994. Für die Abflussganglinie 1994 klingt im dritten Jahr die Eintiefung der Sohle während der Hochwasser ab. Würde der Versuch weiter laufen, könnte gegebenenfalls eine Tendenz zur Verlandung beobachtet werden, was mit Naturbeobachtungen an der Elbe übereinstimmt.

### III-5.8.9 Resultierende Wassertiefen

Für die Schifffahrt ist die resultierende Wassertiefe im Hauptbett bzw. ihre Änderung im Laufe der Zeit von Interesse. Die mittlere Wassertiefenänderung  $\Delta h$  (Differenz vor/nach Buhneneinbau) kann aus der Wasserspiegel-, der Sohl- und der Dünenhöhenentwicklung ermittelt werden.

Für die Abflussganglinie 1997 wächst die Wassertiefen nach Buhneneinbau von Jahr zu Jahr an (Abb. III-5.99). Die durch Buhnen erzielte Wassertiefenerhöhung  $\Delta h$  erreicht im 3. Jahr in einer Phase mittlerer bis niedriger Abflüsse ( $< 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ) einen Betrag von ca.  $+0,5 \text{ m}$ . Dagegen ist für 1994 keine deutliche Tendenz zu erkennen (Abb. III-5.100); kurzzeitig erreicht die Wassertiefe im 2. und 3. Jahr maximale Abweichungen gegenüber Zustand ohne

Buhnen von ca.  $-0,65 \text{ m}$  (Jan./Feb im 2. Jahr bei ca.  $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ , d.h. geringere Wassertiefen nach der ersten Hochwasserwelle) bis  $+0,65 \text{ m}$  (Mai im 3. Jahr bei ca.  $Q = 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ , nach der letzten Hochwasserwelle).

Interessanterweise stimmt die Versuchsbeobachtung, nach der der (in Laborrinne „plötzlich“ vollzogene, in Natur über Jahrzehnte entstandene) Buhneneinbau zu einer Vergrößerung der Wassertiefe ca.  $50\text{-}60 \text{ cm}$  führte (über mehrere Jahre einschließlich einer Stabilisierungstendenz), in etwa mit der im Zeitraum 1883-1933 beobachteten durchschnittlichen Verbesserung der Fahrwassertiefe von rund  $60 \text{ cm}$  überein, die die Mittlere Elbe unterhalb Magdeburg infolge des Mittelwasserausbaus zeigte (vgl. Kap. II-1.2.4).

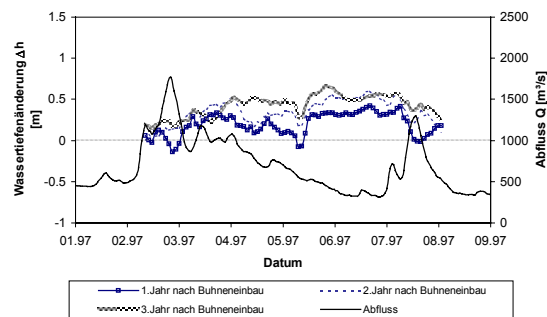


Abb. III-5.99 Entwicklung der Wassertiefen infolge Buhneneinbau und Sohlhöhenänderung 1997.

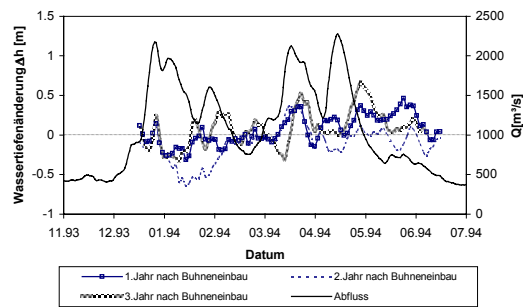


Abb. III-5.100 Entwicklung der Wassertiefen infolge Buhneneinbau und Sohlhöhenänderung 1994.

Aus der obigen Ausführung geht hervor, dass die Überströmungstiefe die Wirkung des Buhneneinbaus auf das sedimentologische Verhalten signifikant beeinflussen kann. Das legt den Schluss nahe, dass bei der Auswahl einer geeigneten Buhnenhöhe das langjährige hydrologische Verhalten berücksichtigt werden sollte. Neben der Buhnenhöhe sind u.a. die Form und der Abstand der Buhnen sowie die Verbauungsgrad ebenfalls maßgebende Einflussgrößen. Diese konnten aufgrund der zeitlichen Beschränkung in diesem Forschungsvorhaben nicht systematisch erforscht werden.



### III-5.9 Zusammenfassung und Ausblick

#### III-5.9.1 Veranlassung und Zielstellung

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen bestand zum einen in der Erweiterung der Erkenntnisse über das Verhalten der Transportkörper in der Elbe unter instationären Bedingungen und zum anderem im Aufzeigen der Auswirkung von Buhnen auf das Strömungsfeld und die Sohlstabilität.

Die Anzahl der Veröffentlichungen und Ergebnisse, die bisher zum Themengebiet „Transportkörper in kohäsionslosem Sediment“ vorliegen, lassen nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Wissensdefizite noch beträchtlich sind. Viele Ansätze wurden unter Laborbedingungen (schmale Rinnen) und bei stationären (konstanten) Abflussverhältnissen entwickelt, die jedoch praktisch nie in natürlichen Gewässern in dieser idealisierten Form anzutreffen sind. Von der Aufstellung eines allgemeingültigen, physikalisch basierten Ansatzes zur Beschreibung der maßgebenden Vorgänge der Transportkörperbewegung und den zugehörigen Wechselwirkungen zwischen Strömung und Morphologie ist man noch weit entfernt.

Für die Untersuchung relevante Fragestellungen sind vor diesem Hintergrund insbesondere:

- Wie verhält sich Geschiebetransport an Sohlen feinsandiger Flachlandflüsse bei großem Breite-Wassertiefe-Verhältnis (B/h)?
- Wie verändern sich die Transportkörper und die Transportrate in instationären Strömungen?
- Wie verändern sich die Transportkörper und die Transportrate infolge Ausbau mit Buhnen?
- Wie verändern sich Sohlstabilität, Sohlage und Wasserstand infolge Ausbau mit Buhnen?

#### III-5.9.2 Naturdatenauswertung (Elbebezug)

Um einen stärkeren Elbebezug für die grundlagenorientierten Laborexperimente herzustellen, wurde Daten aus einem Abschnitt der Unteren Mittelelbe analysiert und weiter verwendet.

Der Referenzabschnitt der Elbe liegt zwischen Elbe-km 449 und 453 oberstrom des Pegels bzw. der Stadt Wittenberge (Elbe-km 454). Dieser Bereich ist morphologisch einem feinsandigen Flachlandfluss zuzuordnen. Für diesem Abschnitt lagen drei Flä-

chenpeilungen der Elbesohle aus dem Jahr 1997 vor, die seitens der Bundesanstalt für Wasserbau zur Verfügung gestellt worden waren. Da diese Daten bei unterschiedlichen Wasserführungen zwischen Niedrigwasser und etwa bordvollen Verhältnissen (nach Hochwasser) aufgenommen worden waren, ermöglichten sie die Erfassung der Höhen, Längen etc. der Transportkörper unter Berücksichtigung der hydrologischen Vorgeschichte (bzw. ihrer instationär geprägten Entwicklung).

Folgende grundsätzliche Aussagen ergaben sich aus der Naturdatenauswertung:

- Die mittlere Transportkörperhöhe nimmt mit steigendem Abfluss zu. Bei den vorliegenden drei Peilungen liegen die mittleren Höhen der Groß- und Mittelformen (Dünen) zwischen etwa 35 und 85 cm. Kleinformen (Riffel) waren bis ca. 15 cm hoch, wurden aber nicht analysiert.
- Die mittlere Steilheit (Höhe/Länge) der Transportkörper nimmt mit steigendem Abfluss zu. Mittelformen sind bei gleichem Abfluss steiler als Großformen, da die Länge träger reagiert.
- Die mittlere Sohlhöhe der drei Peilungen war konstant (keine nennenswerte Eintiefung oder Anlandung zwischen den Zuständen).
- Die Unebenheit der Sohloberfläche (Standardabweichung der Sohlhöhen) schwankt mit dem Abfluss (soweit Krümmungen, Bauwerke etc. nicht für die Sohlform verantwortlich sind) und ist in einer Phase der Umbildung der Sohle und Anpassung an einen veränderten Zustand - z.B. nach Hochwasser - am größten.

#### III-5.9.3 Vorphase der Laboruntersuchungen

In der Anfangsphase wurde im Projekt eine 2,5 m breite und 60 m lange, mit aufwendigen Messeinrichtungen ausgestattete Versuchsrinne fertiggestellt. Die Rinne befindet sich im Theodor-Rehbock-Laboratorium des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik an der Universität Karlsruhe. Große Teile der Versuchseinrichtungen waren bereits im Vorfeld des Projekts aus Eigenmitteln aufgebaut bzw. finanziert worden; aus den Mitteln des BMBF-Vorhabens konnten u.a. ein teures Messgerät (Laser) sowie das notwendige Versuchsmaterial (Kunststoffgranulat) beschafft werden.

Die experimentelle Arbeit begann in einer kleinen Rinne mit der Auswahl eines geeigneten Versuchsmaterials sowie dem Gewinnen erster Erkenntnisse bezüglich der Entstehung und der Dynamik von Transportkörpern. Dabei wurden drei Sedimenttypen mit unterschiedlichen sedimentologischen Kenngrößen getestet. Anhand der Messergebnisse wurden bekannte Berechnungsansätze für Transportkörper in der Literatur überprüft. Da in vielen Ansätzen der Einfluss der Dichte des Sediments unberücksichtigt bleibt, besitzen diese keine Allgemeingültigkeit. Mit Hilfe der Dimensionsanalyse und Messdaten wurden für die Dünenhöhe, -länge und Wandergeschwindigkeit eigene dimensionslose Berechnungsansätze entwickelt, die für verschiedene Sedimentdichten gelten. Darüber hinaus wurden Voruntersuchungen in instationären Durchflüssen durchgeführt. Bereits aus den Ergebnissen der instationären Vorversuche ergab sich, dass sich die Instationarität der Abflüsse signifikant auf den Geschiebetransport an feinsandigen Sohlen auswirkt.

#### III-5.9.4 Stationäre Hauptuntersuchungen

Auf Basis der Erkenntnisse in der kleinen Rinne (Vorversuche) wurde PVC-Granulat als Modellsediment für die Hauptuntersuchungen in der großen Rinne ausgewählt.

Der Empfehlung des Wissenschaftlichen Beirats des BMBF (im Rahmen der Zwischenbegutachtung nach dem ersten Projektjahr) nachkommend wurde in den Hauptuntersuchungen neben dem geplanten Grundlagencharakter verstärkt der Elbebezug gesucht. Die aus der Naturdatenauswertung sowie den Vorversuchen gewonnenen Ergebnisse wurden zur Eichung des Modellversuchs unter instationären Strömungsbedingungen in der großen Rinne herangezogen. Die in diesem Bericht gezeigten Ergebnisse sind auf die Größenordnungen des gewählten Bezugsabschnitts der Elbe umgerechnet worden.

Im ersten Teil der Hauptuntersuchung wurden in der großen Rinne (Breite-Tiefe-Verhältnis  $B/h > 20$ ) Versuche bei stationären Strömungen durchgeführt. Während der Versuche wurde beobachtet, dass die Dünen infolge von Sekundärwirkungen nicht nur in sondern auch quer zur Fließrichtung wandern. Das heißt, mit zunehmender relativer Breite der Rinne werden die Prozesse zunehmend dreidimensionaler.

Eine solche nach unten gerichtete Sekundärströmung und die dadurch verstärkte Turbulenz führt zu einer erhöhten Beanspruchung der Sohle mit der Folge, dass diese instabiler wird. Da in einer Sekundärströmung mit der Quergeschwindigkeit auch die Schubspannung in Querrichtung mit wachsendem Durchfluss zunimmt, wirkt sich der Sekundäreffekt bei größerem Durchfluss kräftiger auf die Sohlstruktur und den Geschiebetransport aus. Fasst man die Beobachtungen unter stationären Verhältnissen in der großen Rinne im Vergleich zur kleinen Rinne zusammen, so haben die Sekundäreffekte bzw. die ausgeprägte Dreidimensionalität der Strömungsverhältnisse und Sohlstrukturen eine Vergrößerung der Dünenhöhe und der Geschiebetransportrate sowie eine Verlangsamung der Wandergeschwindigkeit von Dünen zur Folge. Dagegen wird die Dünenlänge von Sekundärwirkungen wenig beeinflusst.

Neben dem  $B/h$ -Verhältnis sind der Anströmwinkel und die Turbulenzintensität im Zulaufbereich ebenfalls maßgebende Einflussgrößen hinsichtlich der Bewegung von Transportkörpern. Aufgrund erster (später korrigierter) Installationen in der Laborrinne wurde beobachtet, dass eine asymmetrische Anströmung bzw. verstärkte Turbulenzintensität im Zulaufbereich der Rinne eine Erhöhung der Dünen und der Geschiebetransportmenge bewirken.

#### III-5.9.5 Vergleich der Ergebnisse mit Ansätzen in der Literatur

In der Literatur existieren zwar zahlreiche Berechnungsansätze zur Beschreibung der Transportkörperbewegung. Die meisten Ansätze, wie auch jene der hiesigen Voruntersuchungen, basieren jedoch auf Experimenten in relativ schmalen Laborrinnen (kleinen  $B/h$ ). Unter solchen Versuchsbedingungen wurden i.d.R. zweidimensionale Dünenformen beobachtet, die sich parallel zur Fließrichtung bewegen. Wie in der vorliegenden Arbeit aufgezeigt wird, besitzen Berechnungsansätze, die ohne Berücksichtigung der sekundären Strömungseffekte entwickelt wurden, im strengen Sinne nie eine Gültigkeit für natürliche Gerinne mit großem  $B/h$  Verhältnis. Ihre Anwendung auf natürliche Gewässer mit großem  $B/h$  kann zu erheblichen Fehleinschätzungen führen.

### III-5.9.6 Instationäre Hauptuntersuchungen

Nach den Experimenten in stationären Strömungen erfolgten die Untersuchungen mit instationärem Abfluss. Dabei wurden drei Abflussganglinien der Elbe (1989, 1994 und 1997 am Pegel Wittenberge) simuliert. Die Scheitelabflüsse der drei Jahre lagen im Bereich zwei- bis fünfjährlicher Hochwasser. Während 1994 ein sehr abflussreiches Jahr mit mehreren aufeinanderfolgenden Hochwasserwellen war, waren 1989 und 1997 eher trockene Jahre. Insgesamt entsprechen die drei ausgewählten Ganglinien in etwa dem langjährig mittleren Abflussverhalten.

Auf der Grundlage der instationären Messergebnisse kann festgehalten werden, dass die Bettformationen und der Geschiebetransport in einem natürlichen Fließgewässer, insbesondere während und mehrere Monaten nach einem Hochwasser, im engeren Sinne kaum mit einem stationären Zustand vergleichbar sind. Aufgrund ihres trägeren Verhaltens im Vergleich zur Abflussdynamik befinden sich die Dünen in einer ständigen Umbildung im Hinblick auf die sich ständig ändernden Wasserführungen. Bei Hochwasser beispielsweise wachsen die Dünen in ihrer Höhe auch *nach* Auftreten des Scheitelabflusses weiter an und erreichen erst ca. 3-8 Tage später ihre maximale Steilheit. Nur für einen kurzen Moment sind sie zu diesem Zeitpunkt dem Zustand der Strömung angepasst. Bei sinkendem Abfluss werden sie nur sehr langsam abgeschliffen.

Die Ausprägung der beobachteten Dünenformen sowie der Geschiebetransport sind grundsätzlich und signifikant von folgenden Einflüssen abhängig:

- jeweilige hydraulische Randbedingungen ( $B/h$ , Anströmwinkel, Bauwerke, Krümmung etc.),
- Art, Dauer und Steilheit der Abflussganglinie,
- Sohlzustand infolge der unmittelbar vorangegangenen (hydrologischen) Belastung.

In der Praxis existiert eine große Anzahl von Ansätzen zur Beschreibung des Geschiebetransports, die den Zusammenhang zwischen Abfluss  $Q$  und Transportrate  $q_s$  als empirische Beziehung der Form  $q_s = aQ^b$  formulieren. Wie die Messergebnisse der instationären Versuche zeigen, liefern Transportfunktionen dieses Typs strenggenommen nur für stationäre Zustände, wie z.B. lange Niedrigwasserperioden, zufriedenstellende Aussagen. Dagegen kann ihre Anwendung auf natürliche, instationäre

Verhältnisse und insbesondere hohe Abflussbereiche, in denen zuverlässige Geschiebemessungen in Natur praktisch kaum möglich sind, zu Fehleinschätzungen führen, wobei die Geschiebefracht mehrfach über- oder unterschätzt werden kann.

### III-5.9.7 Untersuchungen mit Buhnen

Durch Maßnahmen des Gewässerausbaus wie Buhnen werden Strömungsfelder verändert. Das sedimentologische Verhalten wird dadurch entsprechend beeinflusst.

Zur Untersuchung der Wirkung von Buhnen auf die behandelten Strömungs- und Transportvorgänge wurden für die letzte Versuchsphase halbseitig Modellbuhnen in die Laborrinne eingebaut. In den Experimenten stellte sich heraus, dass die relative Höhe der Buhnenüberströmung  $h/h_b$  ( $h_b$  = Buhnenhöhe) eine maßgebende Rolle für die Entwicklung spielt. Für die Abflussganglinie 1997 hat z.B.  $h/h_b$  einen Wert von ca. 2,5. In diesem Fall werden die Dünenhöhe, der Wasserstand und die Geschiebetransportmenge im Gerinnezustand „mit Buhnen“ im Vergleich zu „ohne Buhnen“ erheblich erhöht. Für die Abflüsse 1994 (maximal  $h/h_b = 3,2$ ), d.h. bei höherer Überströmung, werden dagegen die Dünenhöhe, der Wasserstand und die Geschiebefracht nicht so stark durch die Buhnen beeinflusst wie 1997. Die beobachtete Zunahme der transportierten Geschiebemenge führt zur Eintiefung der Sohle (Erosion). Über mehrere Jahre treten jedoch Effekte der Stabilisierung der Sohle in den Vordergrund. Die durch Buhnen verursachte Erhöhung der Dünen und der transportierten Geschiebemengen verringert sich dementsprechend. Bei einer längeren Fortsetzung der Versuchsreihen könnte an der Sohle vermutlich wieder ein Transportgleichgewicht bis hin zu einer Tendenz von Verlandung auftreten.

Aus der ermittelten Wasserstand-, der Sohlhöhen- und der Dünenhöhenänderung infolge Buhnenbau wurde die mittlere Änderung der resultierenden Wassertiefe errechnet. Für die Ganglinie 1997 wächst die Wassertiefe nach Buhneneinbau von Jahr zu Jahr an. Dagegen ist für 1994 keine eindeutige Tendenz erkennbar.

### III-5.9.8 Fazit und Ausblick

Im Themengebiet „Transportkörper in kohäsionslosem Sediment“ sind die Wissensdefizite noch enorm. Zur Klärung der Prozesse und Gesetzmäßigkeiten unter instationären Bedingungen sind weitere systematische Grundlagenforschungen erforderlich.

Gleichzeitig ist nicht bekannt, dass an anderer Stelle in diesem Gebiet und diesem inhaltlichen Umfang derartige Erfahrungen und Messergebnisse gewonnen werden konnten. Schon aus diesem Grund kommt den hier vorgestellten Ergebnissen eine große wissenschaftliche Bedeutung zu. Sie liefern vielfältige Motivationen und spezifische Ansatzpunkte für künftige Forschungen. Im Hinblick auf den instationären Versuchsbetrieb, d.h. die hierbei erforderliche automatisierte Steuerung und moderne Messtechnik, stellen die Laborversuche ebenso sehr wertvolle Erfahrungen dar.

Abschließend sei noch ein sehr wesentlicher, hier nur ansatzweise behandelter Aspekt hervorgehoben: die resultierende Veränderlichkeit des hydraulischen Widerstandsverhalten der Sohle. Aufgrund der instationären Ergebnisse ist demnach festzuhalten, dass eine im Streben nach Anpassung an die momentane Wasserführung befindliche, sich ständig verändernde Sohloberfläche auch eine variable Strömungsrandbedingung darstellt. Die Annahme konstanter Geometrien, Rauheiten etc. für einzelne Abflusszustände ist demnach kritisch zu hinterfragen. Jedes Hochwasser kann praktisch eine grundlegende Umformung des Gewässerbetts bedeuten und ein über Wochen bis Monate sich veränderndes Widerstandsverhalten nach sich ziehen. Die weitreichende Bedeutung dieses Umstands für gewässerkundliche Aufgaben (vor allem Messungen am Gewässer und/oder numerische Berechnungen auf Basis der Parameter früherer Zustände) ist leicht vorstellbar.

### Literatur

BECHTELER, W., VOLLMERS, H.-J., WIEPRECHT, S. (1992): Veränderung des Transportverhaltens von Fließgewässern durch Einbauten. Modellversuche Schlußbericht, Neubiberg.

BFG (1994): Kornzusammensetzung der Elbesohle von der deutsch-tschechischen Grenze bis zur Staustufe Geesthacht, BfG-Bericht 0834, Berlin.

CHABERT, J., CHAUVIN, J.L. (1963): Formation des dunes et des rides dans les models fluviaux. Bull. du CREC Nr. 4. Chatou.

DORER, H. (1984): Ähnlichkeit bei Flußbaulichen Modellen. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Heft 54

DVWK (1990): Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten. Zus.gestellt von R.C.M. Schröder. Hrsg. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) Bonn, Schriften Nr. 92, Paul Parey, Hamburg-Berlin.

ERTEL, H. (1966): Kinematik und Dynamik formbeständig wandernder Transversaldünen. Monatsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Band 8, Heft 10.

EXNER, F.M. (1920): Zur Physik der Dünen. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, Abt. IIa, Band 129.

EXNER, F.M. (1925): Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, Abt. IIa, Band 134.

EXNER, F.M. (1931): Zur Dynamik der Bewegungsformen auf der Erdoberfläche. Ergebnisse der kosmischen Physik, 1. Band.

FÜHRBÖTER, A. (1961): Über die Förderung von Sand-Wasser-Gemischen in Rohrleitungen. Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 19, Hannover.

FÜHRBÖTER, A. (1967): Zur Mechanik der Strömungsriffel. Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 29, Hannover.

FÜHRBÖTER, A. (et al.) (1979): Sandbewegung im Küstenraum. DFG Forschungsbericht (in: ZANKE 1982).

FÜHRBÖTER, A. (1991): Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Entstehungsprozess von Stromriffeln. Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts, Heft 111, Braunschweig.

GILL, M.A. (1971): Height of sand dunes in open channel flows. Proc. ASCE, Vol. 97, HY 12.

GUY, H.P., SIMONS, D.B., RICHARDSON, E.V. (1966): Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61. Geol. Survey Prof. Paper 462-1, U.S. Department of the Interior, Washington D.C.

GYR, A., MÜLLER, A. (1996): The Role of Coherent Structures in Developing Bedforms During Sediment Transport. Coherent Flow Structures in Open Channels.

JULIEN, P.Y., KLAASSEN, G. J. (1995): Sand-Dune Geometry of Large Rivers during Floods. J. of Hydraulic Engineering, Vol. 121, No. 9, pp. 657-663.

KARIM, F. (1999): Bed-Form Geometry in Sand-Bed Flows. Journal of Hydraulic Engineering, Vol 125, No.12.

KAUPPERT, K. (1997): Untersuchungen in einem physikalischen Flußmodell über den Einfluß der Hydrologie auf die Sohlformen der Elbe. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, unveröff.

KNOREZ, W.S. (1959): The Influence of Macro-Rugosity of the Channel on Hydraulik Resistance. Istwestia WNIIG, Nr. 62.

MEYER-PETER, E., MÜLLER, R. (1948): Formulas for bed load transport. IAHR, 2d Meeting – Stockholm.

NASNER, H. (1974): Über das Verhalten von Transportkörpern im Tidegebiet. Mitt. d. Franzius-Instituts, Heft 40, Hannover.

NESTMANN, F. (1993): Oberrheinausbau, Wassermmodell mit beweglicher Sohle des UW Iffezheim. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Nr. 70, Karlsruhe.

NORDIN, C.F., ALGERT, J.A. (1965): Geometrical Properties of Sand-Waves: A Discussion. Proc. ASCE, Vol. 81, HY 5.

RANGA RAJU, K.G., SONI, J.P. (1976): Geometry of Ripples and Dunes in Alluvial Channels. J. Hydr. Research, 14 (3), Delft.

RAUDKIVI, A.J. (1982): Grundlagen des Sedimenttransportes. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York

- RAUDKIVI, A., WITTE, H.-H. (1991): Ein synergetischer Ansatz zur Entwicklung von Transportkörpern. Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts, Heft 111, Braunschweig.
- STEHR, E. (1975): Grenzschichttheoretische Studie über die Gesetze der Strombank- und Riffelbildung. Hamburger Küstenforschung, Heft 34, Hamburg.
- TRAU, M. (1999): Analyse und Vergleich von Sohlformationen (Transportkörper) der unteren Mittelbe unter Berücksichtigung der hydrologischen Vorgeschichte. Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, unveröff.
- VAN RIJN, L. (1984): Sediment Transport Part III: Bed Forms and Alluvial Roughness. *J. Hydraulic Engineering*, Vol. 110 (12).
- YALIN, M.S. (1964): Geometrical Properties of Sand-Waves. *Proc. ASCE*, Vol. 90, HY 5.
- YALIN, M.S. (1977): *Mechanics of sediment transport*. 2nd Edition, Pergamon Press, Oxford
- YALIN, M.S., SILVA, A.M.F. (2001): *Fluvial processes*. IAHR Monograph (ISBN 90-805649-2-3), Delft.
- ZANKE, U. (1976): Über den Einfluß von Kornmaterial, Strömungen und Wasserständen auf die Kenngrößen von Transportkörpern in offenen Gerinnen. Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 44, Hannover.
- ZANKE, U. (1982): *Grundlagen der Sedimentbewegung*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York
- ZANKE, U. (1995): DFG-Rundgespräch „Geschiebe“: Transportkörper. Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 58.
- ZARN, B. (1997): Einfluß der Flußbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluß, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 154, Zürich.
- ZNAMENSKAJA, N.S. (1969): Morphological Principle of Modelling of River-Bed Processes. *Proc. 13. Kogr. IAHR*, Kyoto, Vol 5.1 (in: ZANKE 1982).
- EISENHAEUER, N.O. (1986): Alternative concept for scaling hydraulic models with movable bed. IAHR-Symposium on scale effects in modelling transport phenomena, Toronto
- ENGELUND, F. (1966): Hydraulic resistance of alluvial streams. *Proc. ASCE*, HY2, March 1962
- FÜHRBÖTER, A. (1980): Strombänke (Großriffel) und Dünen als Stabilisierungsformen. Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau, Heft 67, Braunschweig.
- GARDE, R.J., RANGA RAJU, K.G. (1977): *Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems*. Wiley Eastern Ltd.
- GEHRIG, W. (1967): Über die Frage der naturähnlichen Nachbildung der Feststoffbewegung in Modellen. Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 29, Hannover.
- KARIM, F. (1995): Bed Configuration and Hydraulic Resistance in Alluvial-Channel flows. *J. Hydr. Engineering*, Vol 121 (1).
- KLEY, G.M. (1986): Scale effects in models with bed load transport. IAHR-Symposium on scale effects in modelling transport phenomena, Toronto.
- KOBUS, H. (1974): Anwendung der Dimensionsanalyse in der experimentellen Forschung des Bauingenieurwesens. „Die Bautechnik“, Heft 3/1974, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- KÜHLBORN, J. (1993): Wachstum und Wanderung von Sedimentriffeln. Technische Berichte des Instituts für Wasserbau der TH Darmstadt, Nr. 49
- MERTENS, W. (1987): Über die Deltabildung in Stauräumen. Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts, Heft 91, Braunschweig.
- NAUDASCHER, E. (1992): *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*. Springer-Verlag, Wien, New York
- RAUDKIVI, A.J. (1997): Ripples on Stream Bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 123, No.1.
- SHIELDS, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Heft 26, Berlin
- SIMONS, D.B., RICHARDSEN, E.V. (1961): Forms of bed roughness in alluvial channels. *ASCE Journal Hydraulics Division*, Vol. 87, No. HY 3
- SMART, G.M., JAEGLI, M.N.T. (1983): Sediment Transport on Steep Slopes. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.
- THEOBALD, S. (1990): Ermittlung der Strömungscharakteristika von Transportkörpern. Diplomarbeit am Institut für Hydromechanik, TH Karlsruhe, unveröff.
- VAN RIJN, L. (1982): The Prediction of Bed Forms, Alluvial Roughness and Sediment Transport. *Res. Rep. S 487 Part III*, Delft Hydraulics Laboratory, Emmeloord.
- VOLLMERS, H., GIESE, G. (1970): Diskussion zu: Instability of flat bed in alluvial channels. *Proc. ASCE*, HY 6
- WIENROTH, W. (1967): Untersuchungen über die Förderung von Sand-Wasser-Gemischen durch Rohrleitungen und Kreiselpumpen. Dissertation, TH Hannover.
- YALIN, M.S. (1985): On the determination of ripple geometry. *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 8.
- ZANKE, U. (1990): Der Beginn der Sedimentbewegung als Wahrscheinlichkeitsproblem. Universität Hannover, Wasser und Boden 1.1990

### Weiterführende Literatur (nicht zitiert)

- ALLEN, J.R.L. (1968): Current ripples, their relation to pattern of water and sediment motion. North-Holland Publishing Company, Amsterdam.
- BECHTELER, W., VOLLMERS, H.-J. (1995): Einführung zum DFG Rundgespräch „Geschiebe“. Mitteilungen der Universität der Bundeswehr München, Heft 58.
- BONNEFILLE, R., PERNECKER, L. (1966): Le début d'entraînement des sédiments sous l'action de la houle. *Bulletin du CREC*, Nr. 15, Chatou.
- COLEMAN, S.E. (1991): The mechanics of alluvial stream bed forms. Department of Civil Engineering, University Auckland, New Zealand, Report 517
- DITTRICH, A., ROSPORT, M., BADDE, O. (1991): Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten von Gerinnesohlen. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, Heft 182
- DUNKER, W. (1997): Bestimmung von Transportform und Transportraten an feinsandigen Gewässersohlen anhand von Modellversuchen. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, TH Karlsruhe.

## III-6 Numerische Simulation der Sohlformen in einer Laborrinne

M.D. Bui, F. Nestmann

### III-6.1 Einleitung

Die zunehmende Bedeutung flussmorphologischer Fragestellungen, u.a. im Kontext mit der Schiffbarkeit von Wasserstraßen, dem naturnahen Gewässer- und Flussbau, der Gewässerrenaturierung etc., lassen in jüngster Zeit einen Bedarf an verbesserten Methoden zur Szenariensimulation von Transportvorgängen erkennen.

Neben Laboruntersuchungen werden in zunehmendem Maße numerische Methoden zur Simulation von morphologischen Vorgängen in alluvialen Fließgewässern eingesetzt. Um alluviale Prozesse angemessen modellieren zu können, sind im Prinzip 3D-Modelle erforderlich. Da die Anwendung dieser Modelle sehr zeitintensiv ist, werden sie derzeit noch selten für wasserbauliche Maßnahmen eingesetzt. Die 2D-Modelle jedoch, die bisher vornehmlich zur Nachbildung komplexer Strömungssituationen in naturnahen Flussläufen angewendet werden, entwickeln sich zunehmend zu Routinewerkzeugen im Flussbau.

Das numerische Verfahren FAST2DR zur morphodynamischen Modellierung wurde am Institut für Hydromechanik (IfH) der Universität Karlsruhe entwickelt. Die umfangreichen Modellanwendungen für verschiedene Strömungssituationen zeugen von einer breiten Einsatzmöglichkeit des entwickelten Verfahrens (BUI 1998).

Im Rahmen des Teilprojektes „Physikalische Modelle“ für Untersuchungen der Sohlstabilität sowie der Dynamik von Transportkörpern an der Elbe steht im Theodor-Rehbock-Laboratorium des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK) der Universität Karlsruhe eine große Versuchsrinne zur Verfügung (Länge / Breite: 60 (34) m × 2,5 m). In diesem physikalischen Modell wurden Sohlveränderungen und Wasserstände mit modernen Messmethoden erfasst (vgl. Kap. III-5 in diesem Band).

Gegenstand dieser Untersuchung ist die Weiterentwicklung und Anwendung des FAST2DR Verfahrens zur Simulation der Sohlverformung unter verschiedenen Strömungssituationen in der Rinne, die auch im physikalischen Modell untersucht bzw. gemessen wurden.

### III-6.2 Modellsystem

Mathematische Modelle, die die Strömung und den Sedimenttransport implizit erfassen, werden durch ein gekoppeltes Gleichungssystem beschrieben, dessen Lösung das zeitabhängige Strömungs- und Sedimenttransportfeld sowie die Sohlveränderung liefert. Wegen der Komplexität des Gleichungssystems und dem daraus resultierenden numerischen Aufwand werden jedoch auf solchen Ansätzen beruhende mathematisch-numerische Modelle sehr selten verwendet. Meistens werden zwei Vereinfachungen eingeführt. Mit der Annahme geringer Konzentrationen kann der Einfluss des Schwebstoffs auf die Strömung vernachlässigt werden. Die zweite Annahme ist die „Quasi-Stationär-Bedingung“: in einem Zeitschritt kann die Strömungsberechnung und Sedimenttransportberechnung sowie die Berechnung der Sohlverformung entkoppelt durchgeführt werden. D.h. während der Strömungsberechnung kann die Sohlhöhe als ein unveränderlicher Parameter gelten und während der Berechnung der Sohlveränderung bleibt das Strömungsfeld unverändert.

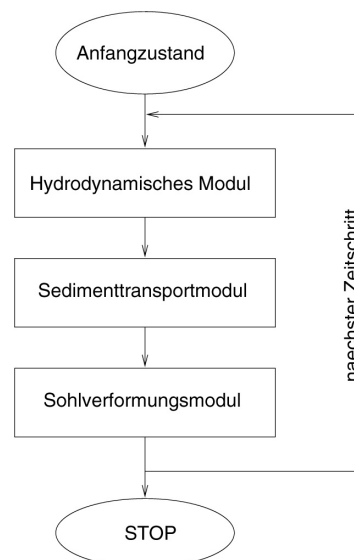


Abb. III-6.1 Schematische Darstellung des Modellsystems.

Die Modellstruktur für eine numerische Simulation der Strömung und des Sedimenttransports kann gemäß Abb. III-6.1 dargestellt werden. Das Gesamtmodell besteht aus mehreren Modulen. Das erste Modul berechnet die Strömungsgeschwindigkeiten sowie die Sohl Schubspannungen. Die turbulenten Schubspannungen werden dabei ebenfalls bestimmt. Das zweite Modul dient der Berechnung des

Geschiebe- und Schwebstofftransports sowie der Gesamttransportrate. In Abhängigkeit des Gesamttransports wird abschließend die Sohlhöhenänderung im dritten Modul berechnet. Das in dieser Arbeit verwendete Modellsystem kann wie folgt zusammengefasst werden.

Zur Simulation der Strömung werden die instationären Flachwassergleichungen verwendet, denen die Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls in einem inkompressiblen Wasserkörper und hydrostatische Druckverteilung in der Vertikalen zugrunde liegen. Die Schließung des Gleichungssystems erfolgt mit einer tiefengemittelten Version des  $k$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodells. Der Einfluss der von vertikalen Ungleichförmigkeiten der Geschwindigkeit stammenden Dispersionsterme wird über eine erhöhte Wirbelviskosität berücksichtigt. Das lässt sich durch die Kalibrierung der im sekundären Produktionsterm des  $k$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodells vorkommenden dimensionslosen Diffusivität erreichen.

Der sich im lokalen Gleichgewicht (Equilibrium) mit der Strömung befindliche Geschiebetransport kann alternativ mit verschiedenen Transportformeln berechnet werden. Der Geschiebetransport unter Ungleichgewichtsbedingungen (Non-Equilibrium) wird durch die Lösung einer semi-empirischen Bilanzgleichung berechnet. Durch Anwendung eines quasi-3D Strömungsmodells wird im Sedimenttransportmodul der Einfluss der Sohlneigung und der Gerinnekrümmung auf die Größe sowie die Richtung des Geschiebetransports berücksichtigt. Zur Berechnung des Schwebstofftransports wird die über die Fließtiefe integrierte Advektions-Diffusionsgleichung verwendet. Die Beziehungen für Erosion und Sedimentation (Nettoaustauschrate des Sediments zwischen Schwebstofftransport- und Geschiebetransportzone) werden hier als Quell- und Senkenterm eingesetzt. Die Transportberechnungen werden in Abhängigkeit der im hydrodynamischen Modul berechneten Strömungsverhältnisse durchgeführt. Das Sohlmaterial wird als kohäsionslos und mit einer mittleren Korngröße  $d_{50}$  und einer charakteristischen Korngröße  $d_{90}$  beschrieben.

Das Sohlverformungsmodul basiert auf der Massenbilanz für den Feststoff. Geschiebe- und Schwebstofftransportrate werden im vorhergehenden Schritt im Sedimenttransportmodul berechnet und sind daher in der Bodenevolutionsgleichung bekannt.

Die partiellen Differentialgleichungen für turbulente, instationäre, tiefengemittelte Gerinneströmungen und Sedimenttransport in einem krummlinigen Koordinatensystem können in allgemeiner Tensornotation folgendermaßen geschrieben werden:

$$J \frac{\partial h \phi_i}{\partial t} + \frac{\partial h (C_{i\phi} \phi + D_{i\phi})}{\partial x_i} = J h S_\phi, \quad i = 1, 2$$

wobei gilt:

$J$  - Jakobi Determinante, die die Koordinatentransformation zwischen dem allgemeinen System  $x_i$  und einem kartesischen Bezugssystem  $y_i$  beschreibt;  $C_{i\phi}$  - konvektive Terme;  $D_{i\phi}$  - diffusive Terme;  $S_\phi$  - Quellterme.

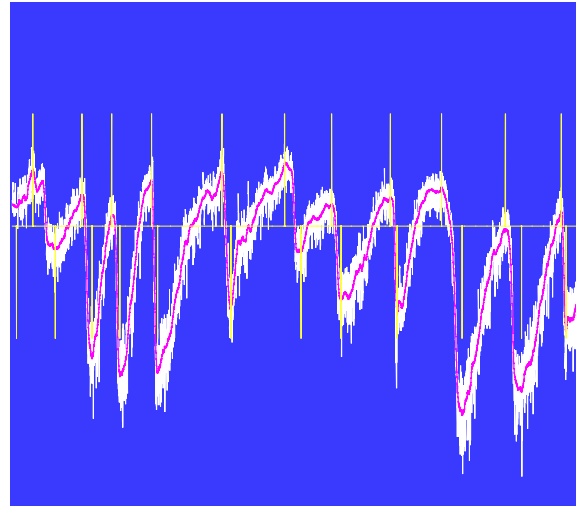
Die numerische Lösung der Erhaltungsgleichungen erfolgt mit der Methode der Finite Volumen. Zur Erfassung komplexer Gebietsberandungen werden randangepasste numerische Gitter aus weitgehend beliebig geformten Viereckelementen verwendet, deren Zentren die Berechnungspunkte des numerischen Modells bilden. Sämtliche abhängige Variablen sind im Kontrollvolumen-Zentrum gespeichert. Für die instationären Flachwasser-Gleichungen wird ein Verfahren eingesetzt, das die direkte Lösung der Kontinuitätsgleichung und die Technik des Druckkorrekturalgorithmus kombiniert. Die zeitabhängigen Terme in den Erhaltungsgleichungen des hydrodynamischen Moduls sowie des Sedimenttransportmoduls werden mit einem Diskretisierungsverfahren erster Ordnung genau in der Zeit (das implizite Euler-Verfahren) approximiert. Aus Gründen numerischer Stabilität wird das Prädiktor-Korrektor-Verfahren verwendet. Das entkoppelte Berechnungsverfahren für Strömung und Sedimenttransport setzt voraus, dass die Differentialgleichungen nacheinander gelöst werden und die Kopplung zwischen den Variablen durch zeitliche Iterationen erreicht wird. Mit Ausnahme der Bodenevolutionsgleichung und der Gleichung für Ungleichgewichts-Geschiebetransport haben sämtliche Erhaltungsgleichungen die gleiche Struktur. Die daraus resultierenden Matrizen sind schwach besetzt und haben überwiegend Bandstruktur, so dass sie sehr effizient z.B. mit dem Thomas-Algorithmus gelöst werden. Eine detaillierte Herleitung der Gleichungen und dessen numerische Lösungsverfahren kann BUI (1998) entnommen werden.

### III-6.3 Modellanwendung

#### III-6.3.1 Aufbereitung der Messdaten

Bei der Eichung des numerischen Modells sind Messdaten von zentraler Bedeutung, die im physikalischen Modell gewonnen wurden. Zur Aufbereitung und Auswertung der großen Menge an Labormessdaten ist ein komfortables Daten-Postprocessing erforderlich. Zu diesem Zweck wurde vom Autor das Programmpaket MEDANA (Measured Data Analysing) entwickelt, mit welchem die Messdaten geglättet werden, bevor sie im numerischen Modell eingesetzt werden und damit statistische Charakteristiken von Transportkörpern für die Messdatenauswertung berechnet werden können.

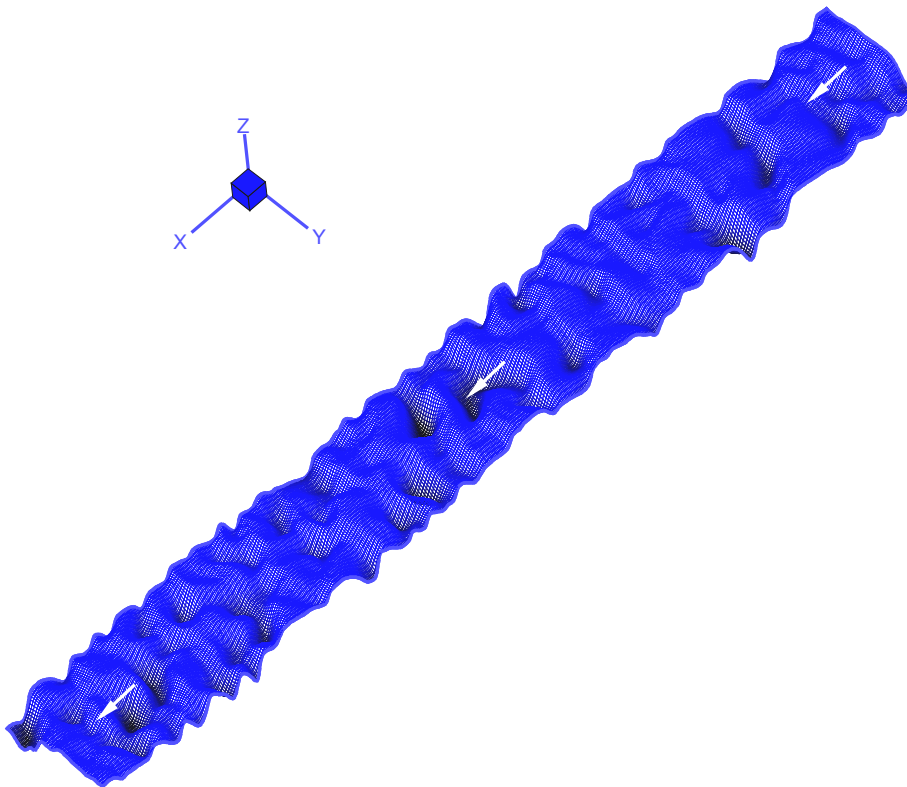
Da die Messdaten Schwankungen enthalten, sollen sie zuerst geglättet werden. Gleitende Durchschnitte stellen eine Möglichkeit zur Glättung von Messdaten dar. Die geglätteten Messdaten werden analysiert und visualisiert. Dies geschieht hier mit dem Programm MEDANA in Verbindung mit der Software TECPLOT (AMTEC 1996). Abb. III-6.2, Abb. III-6.3 und Abb. III-6.4 geben Beispiele für die Ergebnisse (Ausgabe) der beiden Programme.



**Abb. III-6.2** Auswertung und graphische Darstellung von gemessenen Sohlformen im Längsprofil.

Abb. III-6.2 zeigt gemessene Sohlhöhen in der Mittenachse der Laborrinne sowie ein geglättetes Längsprofil zur Analyse der Sohlformen (Dünen). Die senkrechten Linien im Bild stellen die Positionen von Dünenkamm und -tal (Kolk) dar.

Abb. III-6.3 gibt eine perspektivische Darstellung der vermessenen Sohloberfläche der Laborrinne (Länge des Bereichs: 34 m) nach einem Experiment.



**Abb. III-6.3** Von Dünenbildung geprägte Sohloberfläche der Laborrinne (Daten aus Vermessung mittels Lasersonde nach physikalischen Modellversuch mit beweglichem Bett, vgl. Kap. III-5).



Titel : Sohlformen entlang der Symmetrielinie (Rinnenmitte)  
(Q\_in = 120 l/s ; T = 4 h)  
Inform\_file : thu.inf  
Tecplot\_file : thu.tec  
Data\_file : 5.asc  
- Anzahl der Messpunkte : 34337  
- Abstand zwischen 2 Messpunkten (cm) : 0.10  
- Name des Gerätes : Laser

Nr.	Düne		Kamm		Kolk	
	Höhe	Länge	X	H	X	H
1	0.34	69.00	36.30	23.51	7.20	23.17
2	0.49	64.70	123.70	23.28	76.20	22.79
3	1.28	49.70	175.90	23.10	140.90	21.82
4	1.76	66.40	246.20	23.41	190.60	21.66
5	1.80	129.80	370.80	23.48	257.00	21.69
6	1.32	123.90	482.20	23.57	386.80	22.25
7	0.44	71.10	565.40	23.20	510.70	22.76
8	0.92	99.20	668.70	23.26	581.80	22.33
9	1.14	114.70	759.60	23.35	681.00	22.21
10	1.66	105.30	872.50	22.98	795.70	21.31
11	1.62	78.70	971.40	23.13	901.00	21.52
...	...	...	...	...	...	...

Anzahl der Dünen : 39  
Dünenhöhe :  
- Maximalwert : 2.35  
- Mittelwert : 1.28  
- Standardabweichung : 0.54  
Dünenlänge:  
- Maximalwert : 135.30  
- Mittelwert : 87.69  
- Standardabweichung : 23.12  
Neigung des Profils : - 0.00090636

Abb. III-6.4 Beispielergebnisse der Sohl datenauswertung  
(Ausgabedatei des Programms MEDANA).

Abb. III-6.4 zeigt Informationen der Ausgabedatei des Programms bezüglich Dünenhöhe, Dünenlänge, Kammposition, Kammhöhe, Kolkposition, Kolk tiefe sowie deren statistische Kennwerte (Anzahl der Dünen, Maximalwert, Mittelwert, Standardabweichung ... ) sowie zur Sohlneigung.

In der Anwendung auf die sehr großen Datenmengen der Laborexperimente (Kap. III-5) erwies sich das Programmpaket MEDANA stets als sehr stabiles und komfortables Werkzeug für die Aufbereitung und Auswertung der Messdaten.

### III-6.4 Erstellung des numerischen Modells

Die numerische Untersuchung wird somit nach dem Vorbild der Laborrinne in einem geraden und offenen Kanal mit Rechteckquerschnitt durchgeführt. Der modellierte Kanal ist 2,5 m breit und 35,0 m lang. Das bewegliche Bett bzw. das Sohlmaterial der Rinne besteht aus Polystyrol mit dem mittleren Korndurchmesser von  $d_m = 3,1$  mm und der Dichte von  $\rho_s = 1,3$  g/cm<sup>3</sup>. Schwebstofftransport wird im numerischen Modell vernachlässigt. Zur Berechnung der Geschiebefracht stehen im FAST2DR Code fünf verschiedene Formeln zur Verfügung. Die Berechnungen nach dem Fukuoka-Ansatz (SHIMIZU ET AL. 1989) erfolgen nach den folgenden Gleichungen:

$$q_b = 12 \sqrt{(\rho_s / \rho_w - 1) g d_m^{1.5} \tau_*^{2.5}}, \quad \tau_* = \frac{U_*^2}{(\rho_s / \rho_w - 1)}$$

Hierbei ist:

- $q_b$  - Geschiebefracht,
- $g$  - Erdbeschleunigung,
- $\rho_s$  - Dichte des Wassers,
- $U_*$  - Schubspannungsgeschwindigkeit.

Der Einfluss der Sohlneigung auf die Richtung des Geschiebetransports wird durch das Einsetzen der Formel von STRUIKSMA ET AL. (1985) berücksichtigt:

$$\operatorname{tg}(\phi) = \operatorname{tg}(\psi) - \frac{c_*^2}{(g U^2 \beta_n)} \frac{\partial z_b}{\partial n}$$

Hierbei ist:

- $n$  - horizontale Koordinate in Querrichtung,
- $s$  - horizontale Koordinate in Hauptströmungsrichtung,
- $\phi$  - Winkel zwischen Geschiebetransport und  $s$ -Richtung,
- $\psi$  - Winkel zwischen Sohl Schubspannung und  $s$ -Richtung,
- $\beta_n$  - dimensionsloser Koeffizient (liegt zwischen 1 und 2),
- $z_b$  - Sohlhöhe,
- $c_*$  - materialbezogener Chezykoeffizient,
- $U$  - resultierende Geschwindigkeit.

Der Einfluss der Sohlneigung auf die Geschiebefracht wird durch das Einsetzen der Formel von WANG ET AL. (1992) berücksichtigt:

$$q_b^* = q_b \left( 1 - \beta_s \frac{\partial z_b}{\partial s} \right)$$

Hierbei ist:

- $q_b^*$  - effektive Geschiebefracht,
- $\beta_s$  - dimensionloser Korrektorkoeffizient.

Die Sohl Schubspannung auf einer geneigten Sohle wird nach einer Gleichung von NAKAGAWA ET AL. (1980) bestimmt, wobei der Effekt der Sohlneigung sowie der Oberflächenwellen durch den Gradient der Wassertiefe berücksichtigt wird:

$$\tau_b = \rho_w c U^2 \left( 1 - \beta_\tau Fr_0^{-2} \frac{\partial h}{\partial s} \right)$$

Hierbei ist:

- $h$  - lokale Wassertiefe,
- $Fr_0$  - Froudezahl der ungestörten Strömung,
- $\beta_\tau$  - dimensionloser Korrektorkoeffizient,
- $c$  - Chezykoeffizient.

Die Diskretisierung des Modellgebietes besteht aus einem unregelmäßigen Gitter mit ca. 19200 Punkten.

Der Simulation liegen die folgenden Randbedingungen zugrunde:

- Am Einlaufquerschnitt werden die Fließgeschwindigkeiten, Geschiebefrachten und Sohlhöhen vorgegeben. Die Turbulenzenergie  $k$  und ihre Dissipation  $\epsilon$  werden durch eine vereinfachte Beziehung definiert.
- Am Auslaufquerschnitt wird der Wasserspiegel spezifiziert. Hierbei wurden Null-Gradienten-Bedingungen in Hauptströmungsrichtung für die verbleibenden Strömungs- und Sedimenttransportgrößen eingesetzt.
- An den Wänden wird eine „Undurchlässigkeits-Bedingung“ angenommen, d.h. die Geschwindigkeitskomponente orthogonal zur Wand wird zu Null gesetzt. Außerdem können für die turbulente Gerinneströmung bei Verwendung des  $k$ - $\epsilon$  Turbulenzmodells in der Regel Standard-Wandfunktionen eingesetzt werden.

### III-6.5 Eichung des Modells

Die Beobachtungen im Labor und die Auswertung der experimentell ermittelten Daten zeigen, dass die betrachteten Strömungs- und Sedimenttransportvorgänge zum Teil sehr ausgeprägt dreidimensionalen Charakter besitzen. Die vollständige, physikalisch korrekte Nachbildung dieser Vorgänge durch das zweidimensional tiefengemittelte Strömungsmodell darf daher nicht erwartet werden. Es soll jedoch überprüft werden, ob und wie weit das numerische Modell in der Lage ist, die betrachteten Phänomene im Mittel richtig wiederzugeben bzw. ihren Einfluss auf die mittleren Kenngrößen der Sohlformen richtig zu beschreiben.

Die Auswertung der Labormessdaten in Kap. III-5 zeigt, dass die Sohlformen - obwohl Experimente bei gleichem Abfluss und mit einer gleichen Sedimentzugabe durchgeführt werden - am Ende des jeweiligen Experiments stark von einander abweichen können. Dagegen kann die Eichung des numerischen Modells nur auf einem Vergleich der statistischen Kenngrößen der Sohlform und Wassertiefe sowie des Sedimentaustrags zwischen Messung und Berechnung basieren.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Erstellung des Modell ist die Wahl einer geeigneten Transportformel. Aus Vergleichen zwischen Messungen in der Laborrinne und Rechnungen mit allen in FAST2DR implementierten Transportformeln konnte ein geeignetes Verfahren (s.u. Ergebnisse) gewählt werden.

Die folgenden Parameter werden für die Modelleichung verwendet:

- Für die hydrodynamische Berechnung: der Rauheitsbeiwert und der dimensionlose Diffusivitätskoeffizient;
- Für die morphologische Berechnung: die in den Gleichungen für Sohlformeinfluss stehenden dimensionslosen Korrektorkoeffizienten.

Die Eichung erfolgte zunächst bei stationären Abflüssen. Die ausgewählten Eichparameter wurden später für die Simulation bei einer instationären Strömungssituation verwendet.

## III-6.6 Ergebnisse und Diskussion

### III-6.6.1 Stationäre Strömung

Begonnen wurde zunächst mit Berechnungen im Ruhezustand und ohne Sedimenttransport bei fester Sohle und einer Sohlneigung von 0,08 %. Am Einlauftrand wurde ein Einheitsabfluss  $Q_{\text{Ein}}$  als maßgebende Randbedingung gewählt. Am Auslauftrand wurde die mittlere Fließtiefe  $h_{\text{Aus}}$  vorgegeben. Zur „Nachrechnung“ der Labormessungen wurden in der Arbeit die zwei Fälle eingesetzt, die in Tab. III-6.1 zusammengestellt sind. In beiden Fällen ergab sich ein stationär-gleichförmiger Fließzustand nach Erreichen der vollständig konvergenten Lösung.

Die Simulation des Sedimenttransports begann dann nach Erreichen einer stationären Strömung. Dafür wurden die Verteilungen der lokalen Wassertiefe und Feststoffzugabe als zusätzliche Einlauftrandbedingung angesetzt (vgl. Tab. III-6.1).

Tab. III-6.1 Vorgegebene Randbedingungen.

Bezeichnung	$Q_{\text{Ein}}$ [l/s]	$Q_{\text{b, Ein}}$ [kg/s]	$Q_{\text{b, Aus}}$ [kg/s]	$h_{\text{Aus}}$ [cm]
R1	60	0,897	0,858	7,09
R2	100	2,184	2,041	11,42

Die Berechnungen des Geschiebetransports nach dem Verfahren von *Fukuoka* liefern Ergebnisse, die relativ gut mit den gemessenen übereinstimmen. Die Ergebnisse nach anderen Geschiebeformeln weichen hiervon teilweise ab, sowohl zu stärkerer als auch zu geringerer Sohlverformungstendenz. Diese Berechnungswerte sind nicht plausibel erklärbar. Bei den Testberechnungen zeigte sich, dass der Einfluss der Sohlneigung auf die Sohlschubspannung bzw. den Geschiebetransport im Modell berücksichtigt werden muss. Ohne diese Berücksichtigung war die berechnete Sohlbelastung sehr gering und die berechneten Sohlformen relativ eben. Dies weicht sehr stark von den Labordaten ab.

In Abb. III-6.5 sind die berechneten Sohlformen für den Fall R1 zu verschiedenen Zeitpunkten (ausgehend von einer ebenen Sohle zum Zeitpunkt  $T = 0h$ ) dargestellt. Da bei diesem relativ kleinem Abfluss die Sohlschubspannungen und damit die Transportraten gering sind, verändert sich die Sohlform nicht stark.

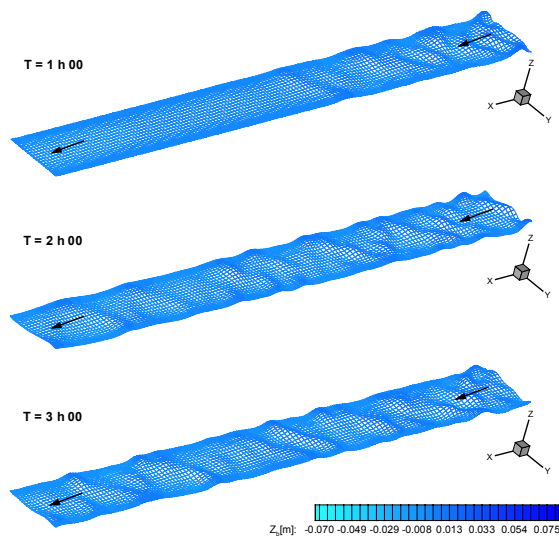


Abb. III-6.5 Berechnete Sohlveränderung zu den Zeitpunkten 1h, 2h und 3h; Variante R1 ( $Q = 60$  l/s).

Wie angesprochen waren, obwohl Experimente im Labor mehrfach unter gleicher Randbedingungen durchgeführt wurden, die auftretenden Sohlformen nie identisch. Eine Erklärung hierfür ist, dass die Entwicklung der Sohlformen zufälligen Prozessen unterliegt. Aufgrund dieser Tatsache war es unmöglich eine quantitativ gute Übereinstimmung der (numerisch eindeutig) berechneten Ergebnisse mit den Laborbeobachtungen zu erhalten (YALIN 1977).

Abb. III-6.9 zeigt das berechnete Strömungsfeld am Ende des Experimentes ( $T = 5h$ ). Es ist ersichtlich,

dass die oben beschriebene geringe Sohlveränderung nur einen geringfügigen Einfluss auf mittlere Fließgeschwindigkeit hat. Der maximale Ablenkungswinkel zwischen Strömungsrichtung und mittlerem Geschwindigkeitsvektor beträgt  $2,7^\circ$ . Die Stromlinien sind noch fast parallel zu den Rinnenseiten.

In Abb. III-6.10 sind die berechneten und gemessenen Sohlveränderung zum Zeitpunkt  $T = 5h$  dargestellt. In der Rinne sind Erosions- und Sedimentationsvorgänge in Form alternierender Bänke an beiden Seiten deutlich zu erkennen, was den im Labor beobachteten Phänomenen entspricht.

In Abb. III-6.6, Abb. III-6.12 und Abb. III-6.13 sind die entsprechenden Berechnungsergebnisse für den Fall R2 dargestellt. Bemerkenswert ist, dass die Wechselwirkungen zwischen Strömung und Sedimentbewegung in den Abbildungen deutlich zu sehen sind. Bei der Entwicklung der Sohle spielte die Sekundärströmung eine Rolle, deshalb wurde deren Auswirkung auf die Verteilung des mittleren Strömungsfelds sowie der Sohldeformation im Modell berücksichtigt. In den Berechnungen wurde der dimensionslose Diffusivitätskoeffizient zu  $e_* = 0,6$  gesetzt. Die Konstanten in den modifizierten Formeln für die Geschiebefracht  $\beta_n = 1$ ;  $\beta_s = 1$  und für die Sohlschubspannung  $\beta_\tau = 0,45$  ausgewählt.

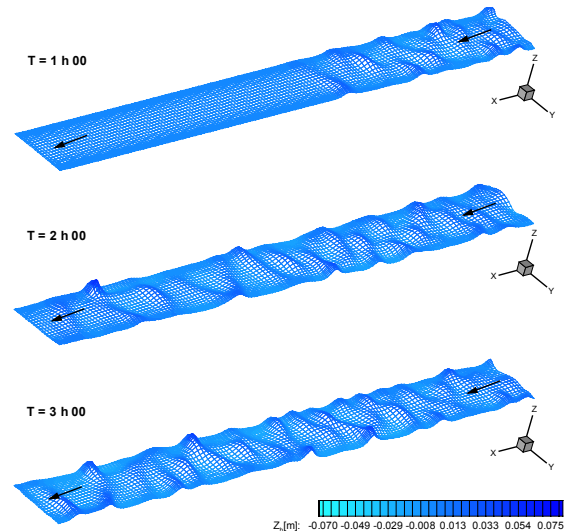


Abb. III-6.6 Berechnete Sohlveränderung zu den Zeitpunkten 1h, 2h und 3h; Variante R2 ( $Q = 100$  l/s).

Anders als bei Variante R1 ist die Ablenkung der Strömungsrichtung in diesem Fall (R2) deutlich zu sehen. Zum Zeitpunkt  $T = 5h$  stellt sich bei Variante R2 ein maximaler Ablenkungswinkel von  $11,3^\circ$  ein. Die Verteilung der Fließgeschwindigkeiten hängt mit der Veränderung der Sohlform zusammen. Die

mittleren Fließgeschwindigkeiten nehmen über den Dünenkämmen zu und über den Dünentälern ab. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die berechnete Maximalgeschwindigkeit 0,45 m/s am Dünenkamm bei etwa Profil 24,2 m, wobei die Sohlform ausgeprägt ist. Im Modell wurde die Rauheit mit einem Stricklerwert von  $k_{St} = 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  beschrieben.

Abschließend ist zu bemerken, dass die berechneten Ergebnisse mit denen der Laborbeobachtung qualitativ und grundsätzlich gut übereinstimmen.

### III-6.7 Instationäre Strömung

Die folgenden Berechnungen dienen zur Simulation der Sohlverformung in einer instationären Strömungssituation. Abb. III-6.7 zeigt den Hydrograph der mathematisch-numerischen Untersuchung. Die Berechnung des Sedimenttransports begann mit dem geschilderten stationären Zustand der Strömung bei fester Sohle und einem Durchfluss von  $Q = 60 \text{ l/s}$  mit einem im Gleichgewicht befindlichen Geschiebetransport. Am Einströmrand wurde der Zufluss linear mit der Zeit variiert und erreichte zum Zeitpunkt  $T = 2 \text{ h } 30$  ein Maximum von  $Q_{\text{Ein}} = 100 \text{ l/s}$ . Dabei wurden der Geschiebeeintrag (Zugabe) in die Strecke und die Wassertiefe der oben genannten Experimente R1 und R2 linear interpoliert. Dieser instationäre Simulationsabschnitt dauerte 5 h.

In Abb. III-6.8, Abb. III-6.11 und Abb. III-6.14 sind die berechneten Sohlzustände und Geschwindigkeitsfelder zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Im Vergleich mit den stationären Fällen findet in der Rinne eine starke Sohlverformung statt. Die Transportformen sind viel unregelmäßiger als bei den stationären Strömungen. Der maximale Ablenkungswinkel zwischen Strömungsrichtung und mittlerem Geschwindigkeitsvektor zur Zeit des maximalen Abflusses ( $T = 2 \text{ h } 30$ ) beträgt  $18,6^\circ$ . Zu diesem Zeitpunkt erreichte die maximale Geschwindigkeit einen Wert von 0,47 m/s. Zum Zeitpunkt des Höchstabflusses ist (numerisch) die ausgeprägteste Sohlverformung mit Braided-Bars (alternierenden Bänken) zu erkennen. Daraus geht hervor, dass sich in diesem Fall die Instationarität signifikant auf den Geschiebetransport auswirkt. Dies entspricht auch den im Labor beobachteten Phänomenen.

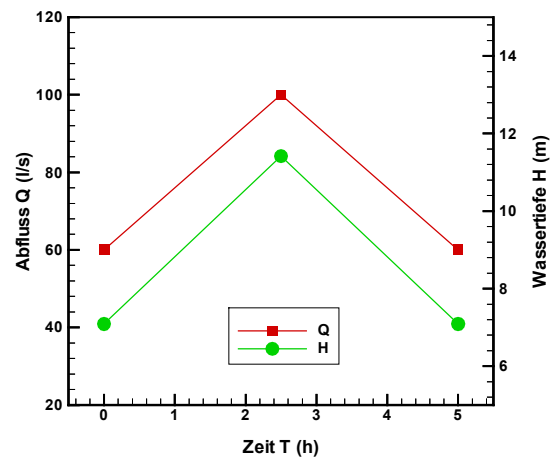


Abb. III-6.7 Hydrograph der Untersuchung.

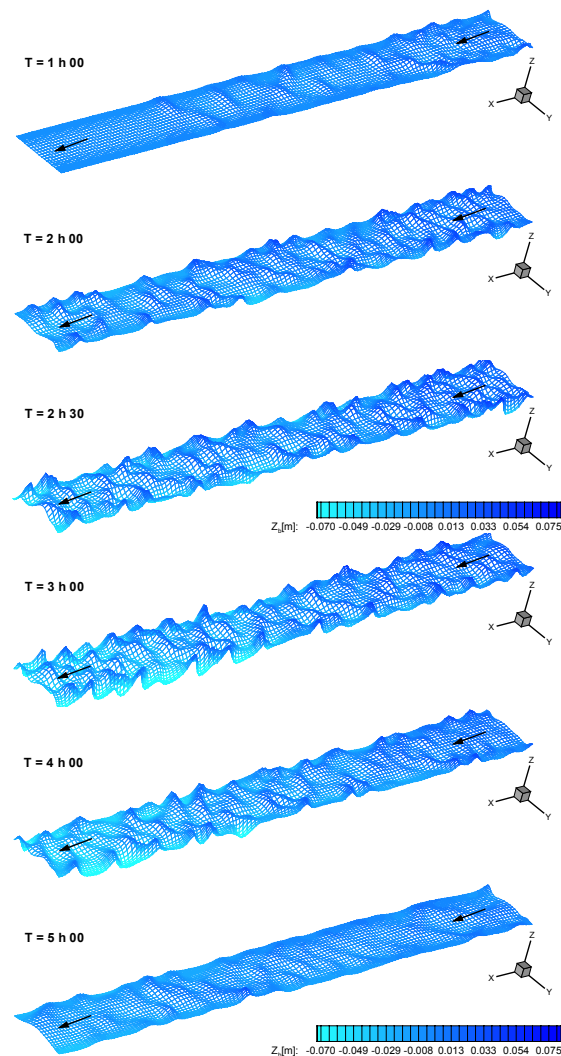


Abb. III-6.8 Berechnete Sohlveränderung zu verschiedenen Zeitpunkten des Hydrographs.

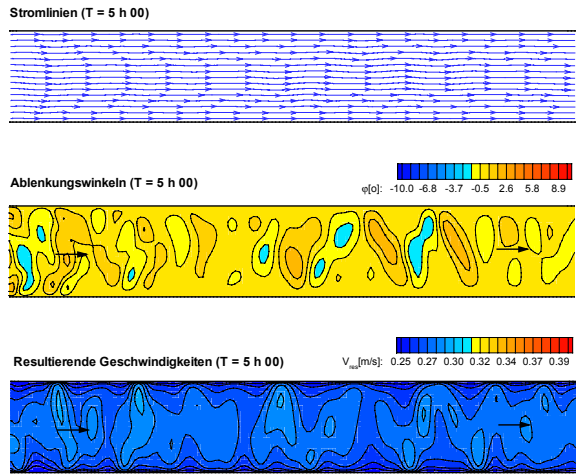


Abb. III-6.9 Berechnete Fließgeschwindigkeit zum Zeitpunkt 5h; Variante R1.

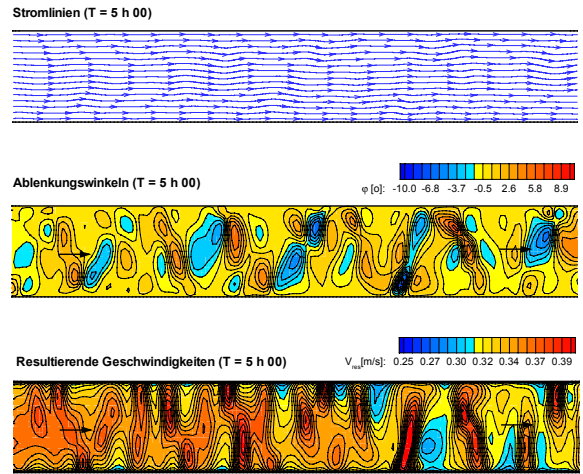


Abb. III-6.12 Berechnete Fließgeschwindigkeit zum Zeitpunkt 5h; Variante R2.

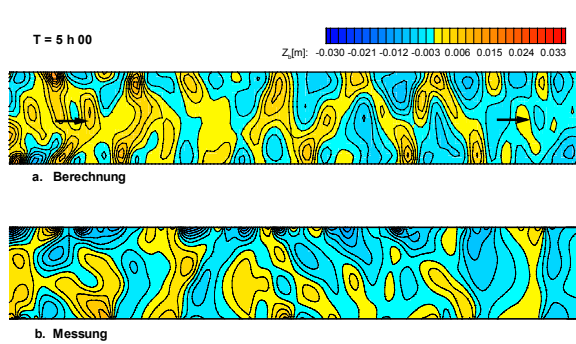


Abb. III-6.10 Vergleich der Sohlformen in Berechnung (a) und Labormessung (b) zum Zeitpunkt 5h; Variante R1.

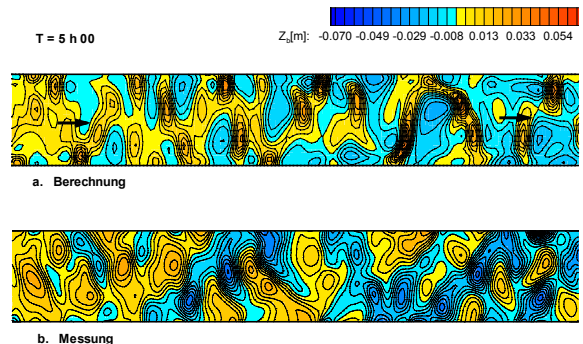


Abb. III-6.13 Vergleich der Sohlformen in Berechnung (a) und Labormessung (b) zum Zeitpunkt 5h; Variante R2.

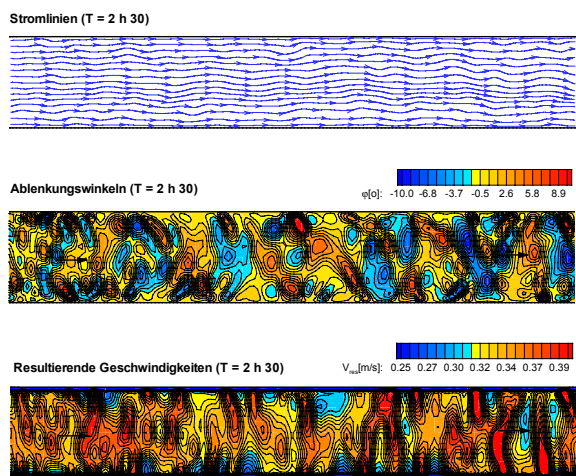


Abb. III-6.11 Berechnete Fließgeschwindigkeit zum Zeitpunkt T = 2h 30 (Höchstabfluss des Hydrographs).

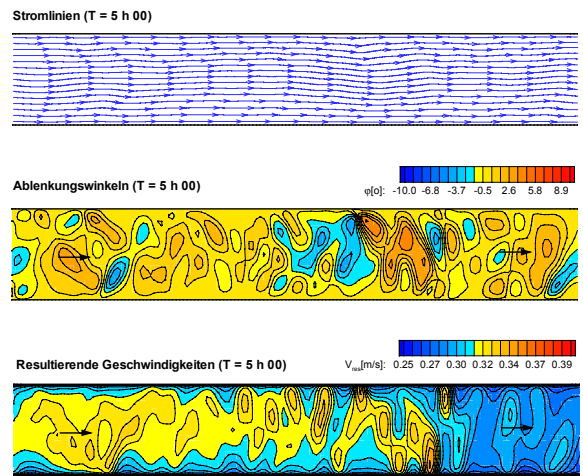


Abb. III-6.14 Berechnete Fließgeschwindigkeit zum Zeitpunkt T = 5h (Ende des Hydrographs).

### III-6.8 Fazit

Das numerische Verfahren FAST2DR wurde erfolgreich zur Modellierung der Sohlstabilität sowie der Dynamik von Transportkörpern in verschiedenen Strömungssituationen in einer Laborrinne angewendet. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass unter Berücksichtigung von Sohlformeffekten und mit einem kalibrierten dimensionslosen Diffusivitätskoeffizienten im  $k$ - $\epsilon$  Turbulenzmodell das numerische Modell die Sedimenttransportvorgänge in der Rinne relativ gut wiedergeben kann. Bei der quantitativen Kalibrierung des Modells sind Messdaten von zentraler Bedeutung, die hier in einem physikalischen Modell (wasserbauliche Laborversuche) in entsprechender Weise gewonnen werden konnten.

Die Erfahrungen bei der Bearbeitung numerischer Modelle zeigen, dass das größte Problem für die Eichung und Validierung der Modelle häufig in der Verfügbarkeit bzw. Qualität zuverlässiger Daten besteht, um die Natur- oder Laborverhältnisse in das numerische Modell zu übertragen. Es existiert einerseits Entwicklungsbedarf bei der mathematisch-numerischen Abbildung morphodynamischer Prozesse zur Verbesserung der Modellaussagen, andererseits bei der Messdatenerfassung. Bislang wird infolge nur bedingt zuverlässiger Messdaten ein großer Unsicherheitsfaktor in die Modellierung eingetragen.

### Danksagung

Diese Arbeit wurde unter fachlicher Unterstützung von Herrn Prof. Dr. habil. W. Rodi durchgeführt und vom DFG-Graduiertenkolleg "Ökologische Wasserwirtschaft" gefördert. Ihm dankt der Autor dafür. Des weiteren möchte sich der Autor bei Frau Dr.-Ing. Y. Wang für die Überlassung noch unveröffentlichter Messergebnisse und Frau Dr.rer.nat. Ch. Kämpf sowie Herrn Dipl.-Ing. B. Büchele für ihre Unterstützung bedanken.

### Literatur

- AMTEC ENGINEERING, INC. (1996): TECPLOT Version 7. Bellevue, Washington.
- BUI, M.D. (1998): Berechnung der Strömung und des Sedimenttransports in Flüssen mit einem tiefengemittelten numerischen Verfahren. Dissertation, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe.
- NAKAGAWA, H.; TSUJIMOTO, T. (1980): Sand Bed Instability due to Bed Load Motion. *Journal of Hydraulics Division, IAHR*, Vol.106, No.1.
- RODI, W. (1984): Turbulence Models and their Application in Hydraulics – a State of the Art Review. *IAHR Monograph*.
- SHIMIZU, Y.; ITAKURA, T. (1989): Calculation of Bed Variation in Alluvial Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.115, No.3, March.
- STRIJKSMA, N.; OLESEN, K.W.; FLOKSTRA, C.; DE VRIEND, H.J. (1985): Bed Deformation in Curved Alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research*, Vol.23, No.1.
- YALIN, M.S. (1977): *Mechanics of Sediment Transport*, Pergamon Press, Oxford.
- WANG, Z.B.; KARSEN, B.; ROELFZENMA, A.; WINTERWERP, J.C. (1992): A Morphodynamic Modelling System. *Proceedings of the 2nd International Conference on Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters*, Edited by R.A. Falconer, S.N. Chandler-Wilde, S.Q. Liu, Ashgate.

## KAPITEL IV VORLAND UND AUE

### IV-1 Erfassung der Elbaue bei Lenzen mittels Radarbefliegung

I. Hajnsek, C. Schmullius, P. Ergenzinger

#### IV-1.1 Einleitung

Die flugzeug- und satellitengestützte Fernerkundung der Erde stellt seit vielen Jahren eine anerkannte und vielgenutzte Informationsquelle für kartographische, geodätische und geowissenschaftliche Fragestellungen dar, die auch bereits früh zur aktuellen und großräumigen Erfassung von Umweltveränderungen genutzt wurde. Die Fernerkundung ermöglicht die Abbildung und Untersuchung der Erdoberfläche und Atmosphäre in Abhängigkeit vom Reflexions- und Absorptionsspektrum der interessierenden Objekte in verschiedener räumlicher, zeitlicher und spektraler Auflösung sowie mit unterschiedlicher radiometrischer Empfindlichkeit. Die flugzeuggestützte Radarfernerkundung ist ein relativ neues Werkzeug zur Beschreibung der Topographie, zur Vegetations- und Landnutzungskartierung und zur Erfassung von geophysikalischen Oberflächenparametern.

#### IV-1.2 Ziel der Studie

Mit der Pilotstudie der multiparametrischen Radaraufnahme, mit multifrequenter, vollpolarimetrischer und interferometrischer Konstellation, sollten die Möglichkeiten und Grenzen der Radarfernerkundung von Flussauen erprobt und aufgezeigt werden. Hierzu wurde das flugzeuggetragene experimentelle Radarsystem E-SAR (= *Experimental Synthetic Aperture Radar*), entwickelt im Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), ausgewählt und eingesetzt. Die SAR-Interferometrie wurde als Verfahren zur Evaluierung der Mikrorelieferfassung vor allem im Hinblick verlandeter rezenter Altarme und Rinnen, die als Leitbahnen für Qualmwasserströme bei Hochwasser der Elbe dienen, auf ihre Genauigkeit hin erprobt. Darüber hinaus, abgeleitet aus den polarimetrischen Radardaten, wurden verschiedene Oberflächenparameter, Oberflächenrauigkeit und Bodenfeuchte, bestimmt.

#### IV-1.3 Mögliche Anwendungen/Bedeutung

Neben den Höhendaten, die in Auengebieten als Grundlage ökologischer Zustandsbeschreibung und Prognoseentwicklung dienen (z.B. HAPE & PURPS 1999a,b), sind vor allem die Aufnahmen von Bodenwassergehalt und Oberflächenrauigkeit der Oberfläche von großer Bedeutung, da sie eine große Rolle im Energiehaushalt der Erdoberfläche spielen.

Die Rauigkeit kann einerseits aus der Bestimmung der Oberflächenstruktur (Vegetationszusammensetzung und -höhe, Landnutzung) und andererseits aus der Bestimmung der Turbulenzstruktur (Windprofile und Wasserströmungen) bestimmt werden. Sie beeinflusst entscheidend die turbulenten Austauschströme zwischen Atmosphäre und Geosphäre und ist somit ein wichtiger Inputparameter bei der Modellierung, sowohl bei kleinskaligen Grenzschicht-, als auch bei größerskaligen synoptischen Modellen (RADKE 1996).

Der Bodenwassergehalt bestimmt maßgeblich das Ausmaß von Evaporation, Transpiration, Oberflächenabfluss und Grundwasserneubildung. Er unterliegt witterungs-, substrat- und nutzungsbedingt vor allem in Oberflächennähe starken zeitlichen (sowie räumlichen) Schwankungen. Die Kenntnis des ungefähren Ausmaßes dieser zeitlichen Veränderung in der Fläche ist von wesentlicher Bedeutung für unterschiedlichste Forschungsaufgaben, wie

- die Prognose des Pflanzenwachstums,
- die Bestimmung des Zeitpunkts für die Aussaat,
- die Planung von Stilllegungsflächen in der Landwirtschaft,
- die Bestimmung der Gefährdung von landwirtschaftlich genutzten Flächen durch Winderosion und Vernässungszonen,
- die Analyse der Dynamik verschiedener physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse im Boden und auf der Bodenoberfläche,

- die Planung von (Natur)Schutzmaßnahmen oder von Schutzgebieten,
- die Bestimmung von Wasserhaushaltsparametern für hydrologische Modelle und
- die Bestimmung von Eingangsparametern für meteorologische Modelle.

Damit sind die beiden Oberflächenparameter, Bodenwasserhaushalt und Oberflächenrauigkeit, für Agrar-, Bio- und Geowissenschaften bedeutsam. Ungefähre Angaben dieser Größen für große Gebiete sind mit den klassischen Methoden der Bodenphysik kaum möglich.

Mit Hilfe der Radarfernerkundung kann erreicht werden,

- dass nur noch wenige Referenzmessungen nötig sind,
- dass Messnetze ausgedünnt werden können,
- dass erstmalig flächendeckende Angaben zu Wasserhaushaltsparametern und Rauigkeiten möglich sind und
- dass auf diese Weise Kosten eingespart werden können (VON PONCET 1995).

#### IV-1.4 Auswahl des Untersuchungsgebietes

Als Untersuchungsgebiet wurde die ‚Lenzer Wische‘ ausgewählt, ein ausgedehntes, schwach reliefiertes Niederungsgebiet mit heterogenen Landschaftsstrukturen. Das Gebiet liegt im Bereich der Unteren Mittelelbe und erstreckt sich von Elbe-km 465 bei Cumlosen bis km 485 bei Lenzen und liegt im Dreiländereck von Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Niedersachsen. Der Flugstreifen hat eine Ausdehnung von 15 km x 5,4 km (vgl. Abb. IV-1.3).

Im Vorfeld einer möglichen Deichrückverlegung fanden und finden dort intensive wissenschaftliche Untersuchungen, insbesondere in zwei parallelen, vom BMBF im Forschungsverbund ‚Elbe-Ökologie‘ geförderten, Forschungsprojekten statt. So werden im Forschungsvorhaben ‚Möglichkeiten und Grenzen der Auenwaldregeneration und Auenwaldentwicklung am Beispiel von Naturschutzprojekten an der Unteren Mittelelbe‘, koordiniert von der Landesanstalt für Großschutzgebiete Brandenburg (LAGS), ausgehend vom Ist-Zustand Leitbilder und Ent-

wicklungsszenarien erarbeitet (LAGS 1999). Die Pilotstudie liefert hierbei ergänzende Flächendaten.

Darüber hinaus können die Ergebnisse der Pilotstudie mit den wesentlichen Eingangsgrößen wie Relief- und Rauheitsstrukturen der mehrdimensionalen hydronumerischen Strömungsmodelle des Gebiets im Forschungsprojekt ‚Vorlandbereiche und Strömungsdynamik‘ der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW 2000), verglichen werden.

Um die räumlich-zeitliche Variabilität des Gebietes erfassen zu können, wurden zwei Befliegungen bei jahreszeitlich unterschiedlichen Bedingungen, jeweils begleitet von Bodenkampagnen, durchgeführt (09. April 1997 und 20. August 1997).

Es fand eine Aufteilung des Untersuchungsgebietes in sechs Testareale mit jeweils 5 bis 18 Testflächen statt (vgl. Abb. IV-1.2) wobei die Größen der Testflächen nach vegetationskundlichen Gesichtspunkten durch die Minimalareale festgelegt wurden. Als wichtigste Landschaftseinheiten treten im Untersuchungsgebiet auf: Wiesen, Weiden (binnen- und außendeichs), landwirtschaftlich genutzte Flächen (Acker- und Grünland), Auenwälder (binnen- und außendeichs), Siedlungen (Gehöfte bis Städte) und Wasserflächen (insbesondere die Elbe).

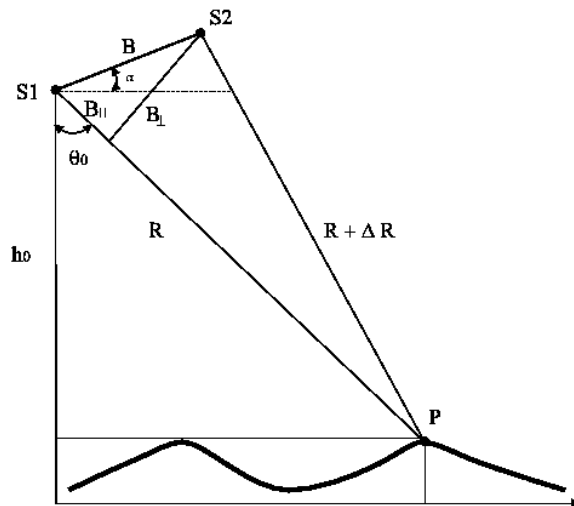
#### IV-1.5 Methodik

Für die Untersuchung wurde das flugzeuggetragene E-SAR System des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) ausgewählt. Es besitzt eine hohe räumliche Auflösung von ca. 2,5 x 2,5 m<sup>2</sup> in der Horizontalen. Das *Experimentelle Synthetische Apertur Radar* (E-SAR) ist mit seiner vielfältigen Sensorkonstellation, vier Frequenzen mit unterschiedlichen Polarisierungen und der Möglichkeit in zwei Modi SAR-Interferometrie zu betreiben, europaweit einzigartig.

Radarsysteme arbeiten im Mikrowellenbereich. Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge von 1 [m] bis 1 [mm], dies entspricht einem Frequenzbereich von 1,2 [GHz] bis 0,3 [GHz]. Im Vergleich dazu wird der Spektralbereich des sichtbaren Lichtes durch Wellenlängen von 0,4 bis 0,7 [µm] präsentiert. Der Spektralbereich der Mikrowellen wird in ‚Bänder‘ unterteilt. Die elektromagnetischen Wellen, die auf eine Oberfläche auftreffen, können gestreut, transmittiert



und/oder absorbiert werden. Die relativen Anteile jedes dieser Prozesse und ihre richtungsspezifische Charakteristik werden durch Systemparameter, wie Frequenz, Polarisation und Einfallswinkel und durch Objektparameter, wie dielektrische Eigenschaften des Mediums Boden und die Bedingungen der Grenzfläche Luft/Bodenoberfläche bestimmt (siehe Abb. IV-1.4).

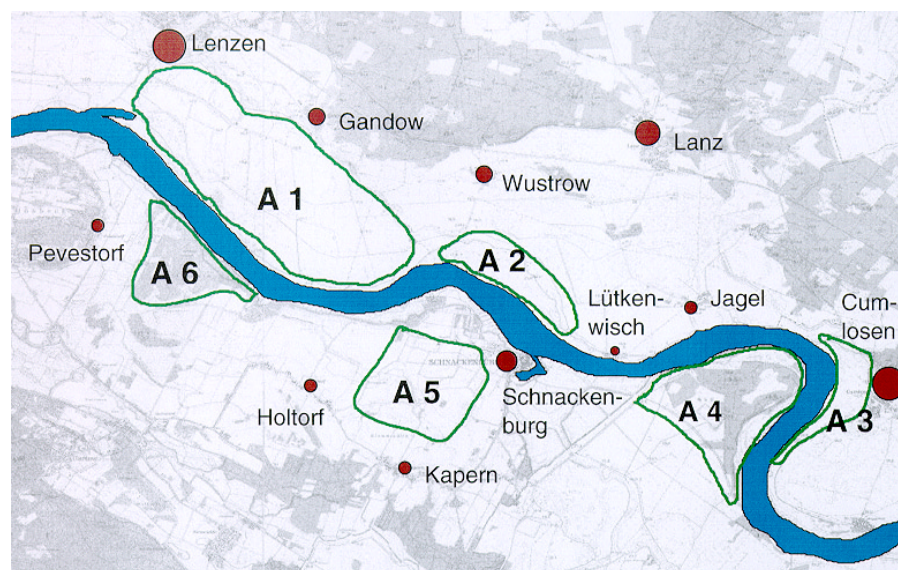


**Abb. IV-1.1** Prinzip der SAR-Interferometrie: S1 und S2 stellen zwei durch eine Baseline B getrennte Antennen, die dieselbe Szene abbilden und einen Punkt P in der Szene, der sich auf einer Höhe h befindet, dar. Die Entfernung zwischen den beiden Antennen und dem Punkt P sind durch R und R+DR gegeben.

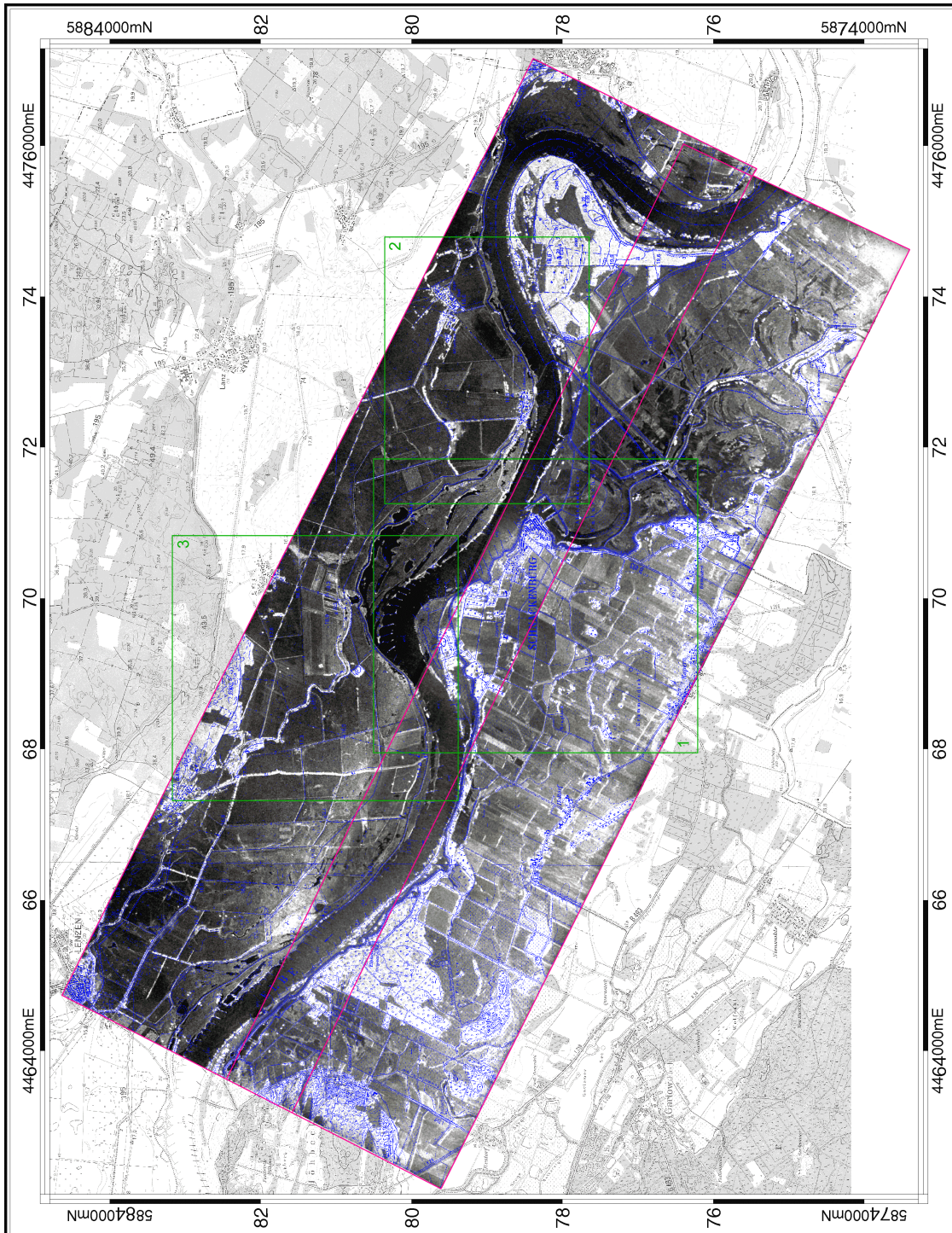
Die von aktiven Mikrowellensensoren ausgesandten Signale dringen bei vegetationsfreien Flächen in die

obersten Zentimeter des Bodens ein. Das zurückkehrende Signal, auch als Rückstreuoeffizient bezeichnet, wird am Sensor gespeichert und ist von der Bodenfeuchte und Rauigkeit abhängig. Das Prinzip der SAR-Interferometrie beruht auf der kohärenten Verarbeitung zweier SAR-Aufnahmen, die aus unterschiedlichen Positionen mittels zweier Radarsensoren aufgenommen werden. Die Differenz der Abstände zwischen den beiden Sensoren und der abgebildeten Oberfläche wird durch die Phasendifferenz der beiden Aufnahmen gemessen (vgl. Abb. IV-1.1). Aus dieser wird mittels Triangulation die Oberflächenhöhe bestimmt.

Der Vorteil der SAR-Interferometrie gegenüber konventionellen Triangulationsverfahren liegt in der Tatsache, dass die Differenz der Abstände über eine Phasemessung ermittelt wird und dadurch mit einer Genauigkeit in der Größenordnung von Bruchteilen der verwendeten Wellenlänge gemessen werden kann. Das Endprodukt ist ein digitales Oberflächenmodell (DOM). Die Genauigkeit des DOM wird aus dem Vergleich mit unabhängigen Messungen, wie Vermessungen mittels Satellitenortung (DGPS) oder Photogrammetrie, ermittelt. Die absoluten Höhengenaugigkeiten variieren je nach System, können heute jedoch mit einer Standardabweichung von bis zu 2 m angegeben werden. Die mittlere absolute Höhengenaugkeit ist im Bereich von Dezimetern bis Metern anzusiedeln. Technische Limitierungen können durch die Aufnahmegeometrie nicht ganz kompensiert werden, so dass eine Genauigkeit im Zentimeterbereich nicht unterschritten werden kann.



**Abb. IV-1.2** Untersuchungsgebiet Lenzen – Cumlosen und Testareale (Hintergrund: TK25, LGN Niedersachsen 1994, Blatt 2934 u. 2935).



**Datenquelle:**  
 E-SAR, L-Band (1,3 GHz), HH-Polarisation vom 09.04.1997, 10.01 Uhr MEZ.  
 Interne Bezeichnung: I97EBSAR0105X1\_CH1 und I97EBSAR0106X1\_CH1.  
 Projekt: Zeilum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V.  
 Institut für Hochfrequenztechnik, Oberpfaffenhofen, Deutschland.

**Kartographische und geodätische Grundlage:**  
 TK 1:25000 Blatt 2835 Schackenberg (Elbe), TK 1:25000 Blatt 2834 Lenzen (Elbe), Normalausgabe.  
 Niedersächsisches Landesverwaltungsamt (Hrsg.)  
 - Landesvermessung 1954 -  
 Warmbüchekamp 2  
 D-30159 Hannover.  
 8. Auflage, 1994.

**Gauss-Krüger-Abbildung:**  
 Bessel-Ellipsoid, Zentralpunkt Rauhenberg, Potsdam Datum

**Legende**

- Kartennatur im E-SAR-Mosaik
- Detailkarte der archaischen Grenzungen mit:  
 1. Schmeldeberg, 2. Lükewisch u. Jügel, 3. Wulstow
- Grenze der Flurgelände

**Entwurf und Bearbeitung:**  
 Thomas Busche, (06/99)

Abb. IV-1.3 Flugstreifen E-SAR des Untersuchungsgebiets (zwei überlappende Streifen), L-Band 09.04.1997.

Tab. IV-1.1 Testareale des Untersuchungsgebietes Lenzen – Cumlosen.

Areal	Standort-Kurzbeschreibung	Spezifische Auswahlkriterien
A1	geplanter Rückdeichungsbereich Lenzener-Kuhblanke rechtselbisch, 12 km <sup>2</sup>	9 Testflächen Binnendeichbereich, durchsetzt mit rezenten Rinnen (bei Hochwasser sind die Rinnen mit Qualmwasser gefüllt), große homogene Flächen, inhomogene Flächen, Projektgebiet der 'Elbe-Ökologie'-Forschung
A2	Außendeichbereich Lütkenwischer Werder rechtselbisch, 2,8 km <sup>2</sup>	5 Testflächen Außendeichbereich, Rinnenstrukturen, direkter Einfluss durch Hochwasser
A3	Außendeichbereich Cumloser Vordeichland rechtselbisch, 2,5 km <sup>2</sup>	0 Testflächen Vergleichsfläche zu A2
A4	Garbe (Auenwald) nordwestlich von Wahrenberg linkselbisch, 9 km <sup>2</sup>	4 Testflächen naturnaher Auenwald, Rinnenstrukturen, Hochwassereinfluss, hetero- u. homogene Flächen
A5	Ackerflächen südwestlich von Schnackenburg (linkselbisch), 3 km <sup>2</sup>	18 Testflächen Bodenart, Bearbeitungszustand, Vegetationsbedeckung, Größe
A6	Elbholz (Auenwald ähnlich) östlich von Pevestorf linkselbisch, 5,25 km <sup>2</sup>	8 Testflächen zwei Testflächenbereiche Auenwald und Auenwald-ähnlich, Teilstück eingedeicht und Qualmwasser-beeinflusst, Teilstück Hochwasser-beeinflusst, hetero- und homogene Flächen

Als Nebenprodukt, gleichzeitig zu den SAR-interferometrischen Informationen, können auch Informationen aus den Amplituden- und Kohärenzbildern erhoben werden. Die Amplitudendaten liefern Informationen über die Rückstreucharakteristik des beleuchteten Objektes. Die Kohärenz liefert Infor-

mationen über die räumliche Struktur der beleuchteten Objekte. Zur Vegetation und Landnutzungs-klassifikation kommen sowohl im optischen als auch im Mikrowellenbereich statistische Ansätze zur Anwendung. Detaillierte Methodenbeschreibungen finden sich u. a. in HAJNSEK ET AL. (1999).

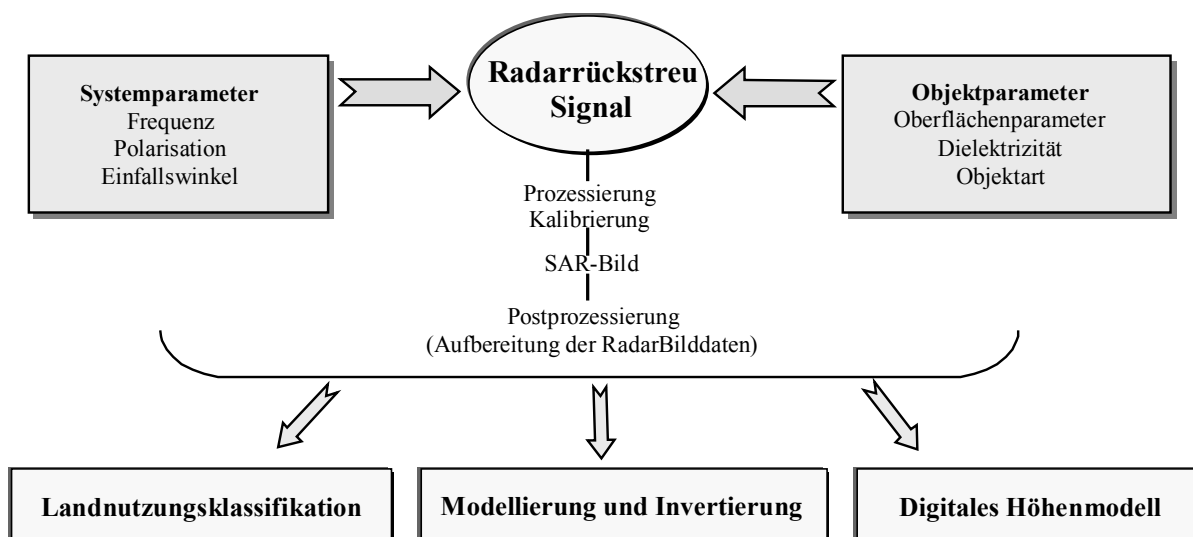


Abb. IV-1.4 Abhängigkeit des Rückstreuquerschnittes von System- und Objektparametern sowie Verarbeitungsschritte des Rückstreusignals.

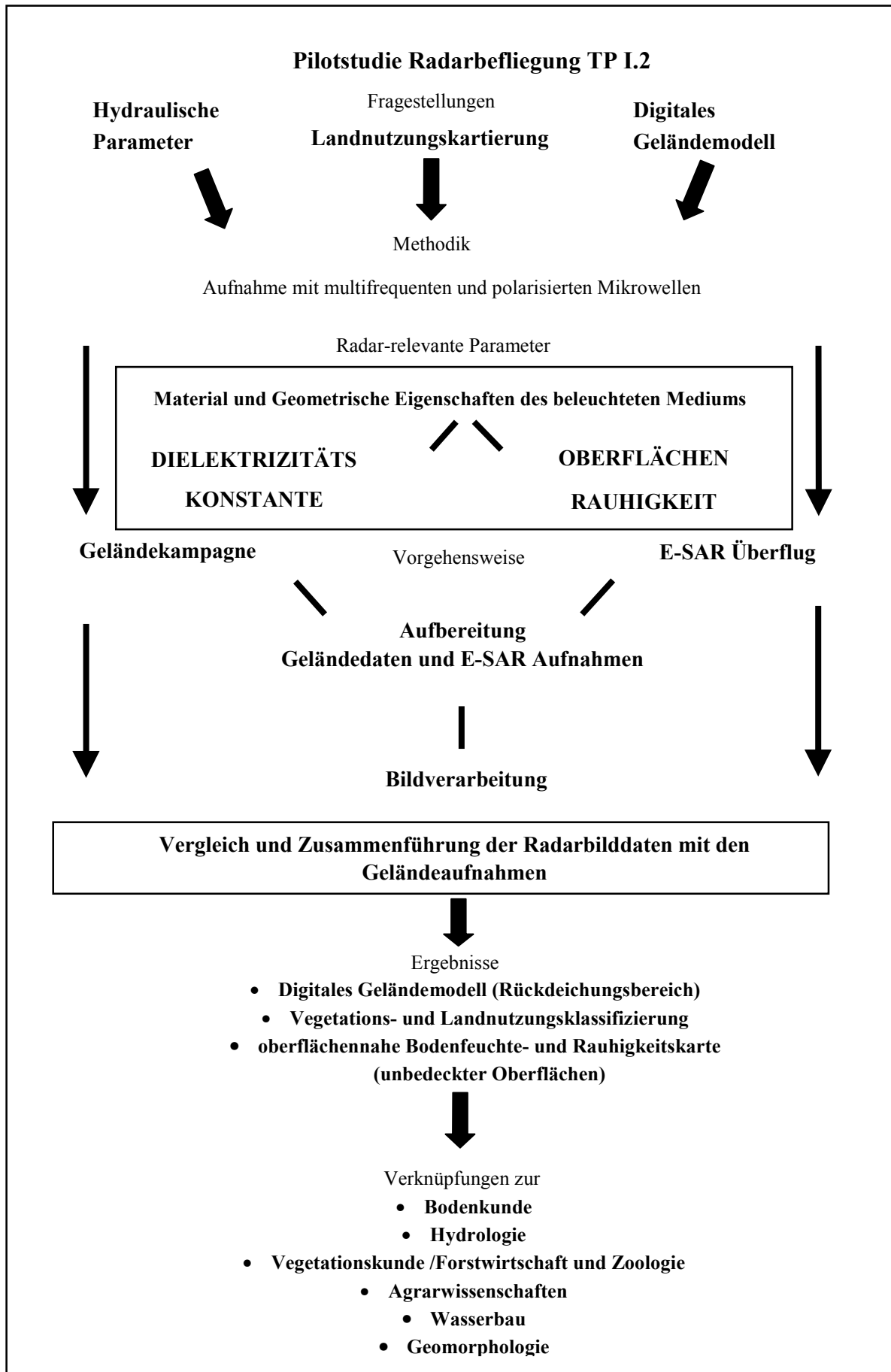


Abb. IV-1.5 Fließschema der Untersuchung.

### IV-1.6 Untersuchungsschwerpunkte

Im Rahmen der Pilotstudie wurden folgende drei Untersuchungsschwerpunkte und Vorgehensweisen festgelegt (vgl. Abb. IV-1.5):

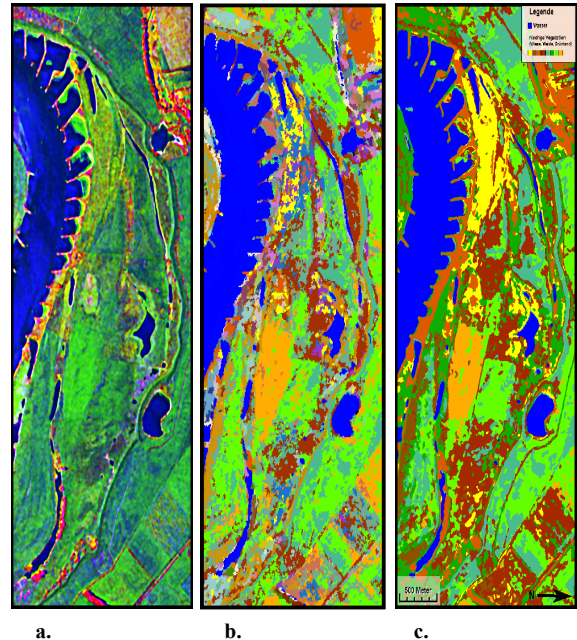
- Vegetations- und Landnutzungskartierung
- Modellierung und Invertierung von Oberflächenparametern
- Höhenextraktion mit Hilfe der SAR-Interferometrie

#### Vegetations- und Landnutzungsklassifikation

Die Klassifizierung von Fernerkundungsdaten nach interessierenden Zielobjekten ist eines der wichtigsten Anwendungsgebiete vielkanaliger Fernerkundungsdaten. Der statistische Ansatz trägt der Tatsache Rechnung, dass die Information gerade in den Merkmalsbeziehungen gegeben ist und die Betrachtung einzelner Merkmale nicht ausreicht. Die Klassifizierung ist außerdem ein wichtiges Mittel zur Beurteilung der Trennbarkeit von Objektklassen. Hierzu ergaben sich folgende drei Untersuchungsschwerpunkte:

- Auswahl eines geeigneten Bildverarbeitungssystems und einer Datenvorverarbeitung als Grundlage für eine gute und genaue Trennbarkeit von Objektklassen
- Auswahl eines geeigneten Klassifikationsverfahrens zur bestmöglichen Trennung von Objektklassen. Es wurde eine pixelbasierte Klassifikationsmethode mit einer Kombination zwischen einer unüberwachten (ISOCLUS) und einer überwachten Klassifizierung (Maximum-Likelihood) ausgewählt. Aus dem umfangreichen Datensatz wurden drei Gebietsausschnitte ausgewählt, an denen die Ergebnisse interpretiert wurden. Es handelt sich dabei um die Testareale Garbe (Klassifikationsgenauigkeit 93 [%]), den Lütkenwischer Außendeichbereich (94 [%]), sowie das Lenzener Rückdeichungsgebiet (66 [%]). Wie das Beispiel in Abb. IV-1.6 verdeutlicht, konnten für alle Ausschnitte folgende Objektklassen getrennt werden:
  - Wasserflächen und Wasserläufe
  - Grünlandflächen
  - Ackerflächen
  - Waldbereiche

Die beste Trennung erfolgte zwischen Wasserflächen und Waldbereichen, die Trennung von Grünlandklassen und Ackerflächen erwies sich dagegen als etwas schwieriger.



**Abb. IV-1.6** Vegetations- und Landnutzungsklassifikation im Testareal Lütkenwischer Außendeichbereich  
 a. RGB-Darstellung der drei Hauptkomponenten der Hauptachsentransformation  
 b. unüberwachte Klassifikation, Methode: ISOCLUS  
 c. überwachte Klassifikation, Methode: Maximum Likelihood.

- Der dritte Schwerpunkt lag in der Frage der Eignung von SAR-Bilddaten zur Objektklassifizierung und deren Genauigkeit im Vergleich zu den Geländedaten. Die Vegetations- und Landnutzungsklassifizierung mit SAR-Bilddaten ist möglich, es können statistisch Objektklassen von einander getrennt werden, jedoch ist die physikalische Interpretation der Klassen nicht eindeutig. Erste Physikalische Ansätze zeigen jedoch vielversprechende Ergebnisse.

#### Modellierung und Invertierung von Oberflächenparametern

Die Abhängigkeiten des Rückstreuquerschnittes von den drei Hauptparametern Oberflächenrauigkeit, Autokorrelationslänge und relativer Dielektrizitätskonstante ermöglichen mit Hilfe von Modellen eine Invertierung dieser Parameter. Allen Modellen ist gemeinsam, dass sie sehr große Abweichungen in

der Genauigkeit der Validierung zeigen. Es kamen zwei einfache und vielversprechende Modelle zur Anwendung, ein semi-empirisches von OH ET AL (1992) und ein empirisches von DUBOIS ET AL. (1995).

Das Dubois-Modell kann trotz sehr trockener Bedingungen die Bodenfeuchten der Felder, mit einigen Ausnahmen, erfassen. Diese Ausnahmen bilden vor allem Felder mit hoher Rauigkeit, Vegetationsaufwuchs und grenzüberschreitenden Bodenfeuchten. Der Oberflächenparameter der Rauigkeit kann nur bei geringen Rauigkeiten, langen Autokorrelationslängen und sehr spärlichem Vegetationsaufwuchs erfasst werden. Ein Einfluss der Bodenfeuchte auf die Rauigkeitsmessungen ist schwierig zu beurteilen, da die stark streuenden Werte sowohl erhöhte Rauigkeiten wie auch erhöhte Bodenfeuchten aufweisen.

Das Oh-Modell dagegen erfasst die Bodenfeuchten nur mäßig. Bei feuchten Konditionen (April) werden sie unterbewertet, bei trockenen überbewertet. Dagegen erfasst das Oh-Modell die Rauigkeiten viel sensitiver auch bei hohen Rauigkeiten, kurzen Autokorrelationslängen und dichter Vegetation.

Aus technischen Gründen konnte nur das Dubois-Modell angewendet werden. Detaillierte Beschreibungen und Erläuterungen der Ergebnisse finden sich in HAJNSEK ET AL. (1999). Abb. IV-1.7 zeigt die Ergebnisse der Dubois-Auswertung für die oberflächennahe Bodenfeuchte, Abb. IV-1.8 analog die Karte der oberflächennahen Rauigkeit. Beide Karten des Gebietes sind in Originalauflösung auch in der *Anlagen-CD* verfügbar.

Hinsichtlich der Modellierung und Invertierung von Oberflächenparametern besteht weiterhin hoher Forschungsbedarf.

### **Höhenextraktion mit Hilfe der SAR-Interferometrie**

Wie beschrieben stellt die SAR-Interferometrie ein Werkzeug zur Erfassung von topographischen Höhenunterschieden dar. Das Verfahren gewann in den letzten Jahren durch zunehmende Operationalisierung und steigende Höhengenaugigkeit in der Erstellung von digitalen Oberflächenmodellen (DOM) immer mehr an Bedeutung. Da systembedingte technische Schwierigkeiten zu einer Fehl-

aufzeichnung in der Datenerfassung (während der Befliegung) und daraus resultierenden Höhenungenauigkeiten im Datenmaterial geführt hatten, die bis zu 10 m reichen, wurde eine weitere Auswertung der im Pilotprojekt erfassten Höheninformationen als wenig sinnvoll erachtet. Eine Wiederholung der Befliegung konnte aus Kostengründen nicht stattfinden. Aus diesen Gründen wird im folgenden ein Vergleich der wichtigsten Methoden zur Geländevermessung bzw. Erstellung von digitalen Geländehöhenmodellen aus aktueller, theoretischer Sicht angestellt.

### **IV-1.7 Vergleich der SAR-Interferometrie mit anderen Erfassungsmethoden**

Zur Erstellung von Digitalen Geländehöhenmodellen (DGM) kommen in der Praxis neben der hier erprobten SAR-Interferometrie z.Zt. vor allem vier Verfahren der Datenerhebung zur Anwendung:

- Terrestrische Vermessung
- Auswertung von Höheninformationen der Topographischen Karte (z.B. TK 10, 25)
- Aerophotogrammetrie/Aerotriangulation (Luftbildbefliegung/-auswertung)
- Laser-Scanner-Technik (Befliegung)

HAPE & PURPS (1999a) verglichen am Beispiel des Untersuchungsgebietes Lenzen drei unterschiedlich erstellte digitale Geländemodelle (Datengrundlage: a.) topographische Karten im Maßstab 1:10000; b.) Photogrammetrie; c.) Laser-Scanner-Technik) bezüglich ihrer Eignung für landschaftsökologische Fragestellungen in Auengebieten. Zum Vergleich mit der Radartechnik werden hier einige Merkmale und Vor- bzw. Nachteile der Erfassungstechniken herausgestellt:

#### **Terrestrische Vermessung**

Die terrestrische Vermessung erfordert die Begehung des Gebietes und unterliegt daher i.a. einer gewissen Subjektivität des Vermessenden. Eine flächendeckende Erfassung der Geländeoberfläche im Sinne eines engmaschigen Gitters findet in der Regel nicht statt (d.h. tachymetrische Punkt- und Polygonaufnahmen der Geländehöhe, heutzutage oft unterstützt durch satellitenmäßige Lagebestimmung

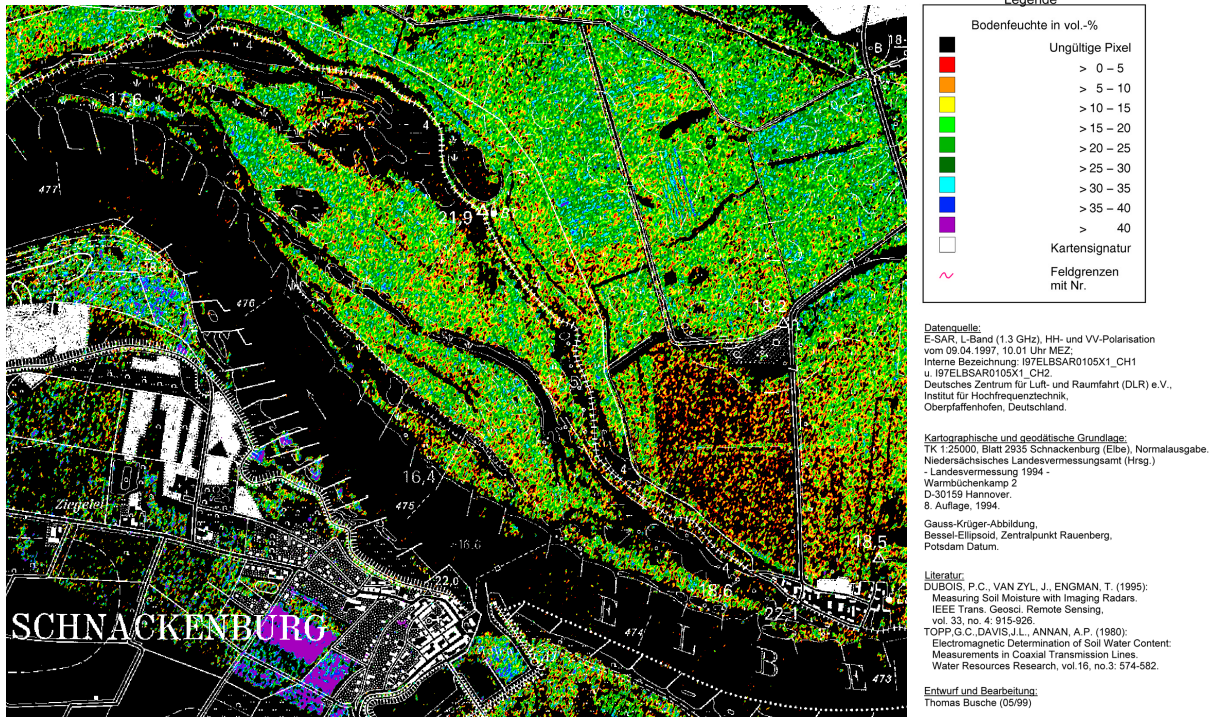


Abb. IV-1.7 Ergebniskarte (Ausschnitt): Oberflächennahe Bodenfeuchte an der Unteren Mittelbe bei Schnackenburg (Elbe-km 473 bis 477, zum Vergleich siehe auch *Anlagen-CD*).

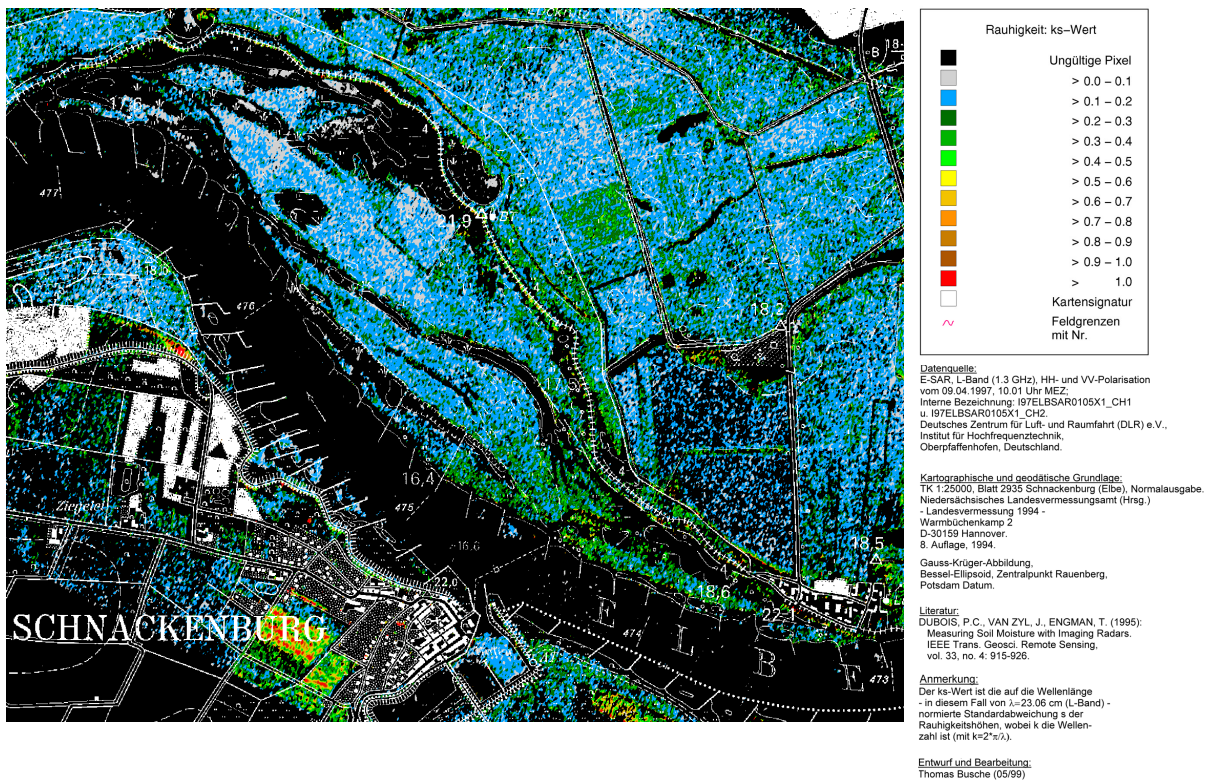


Abb. IV-1.8 Ergebniskarte (Ausschnitt): Oberflächennahe Rauigkeit an der Unteren Mittelbe bei Schnackenburg (Elbe-km 473 bis 477, zum Vergleich siehe auch *Anlagen-CD*).

= GPS). Die terrestrische Vermessung stellt eine heute wie früher meist unerlässliche Erfassungsmethode in Ergänzung der weiteren (Befliegungs-)Methoden dar, insbesondere an geometrischen Problemstellen wie Bauwerken, zur Referenzierung der Befliegungsdaten sowie z.B. zur Gewässer- vermessung unter Wasser.

### Topographische Karten (TK)

Die Möglichkeit der Verwendung von Höhen- und Strukturinformationen auf Grundlage der amtlichen topographischen Karten (die an der Elbe flächen- deckend in der Regel im Maßstab 1:10000 und höher vorliegen, in Niedersachsen 1:5000) zur Generierung digitaler Geländemodelle wird noch heute in vielen Bereichen genutzt, insbesondere falls problemspezifische Geländeaufnahmen als zu aufwendig erscheinen. Der Nachteil liegt vor allem in der mangelnden Aktualität sowie in der Genera- lisierung der enthaltenen Höheninformation.

### Photogrammetrie (Luftbildauswertung)

Die Erfassung von Gebieten mittels Luftbildauf- nahmen aus Befliegungen (Aerophotogrammetrie und Aerotriangulation) ist eine seit vielen Jahr- zehnten bewährte und praktizierte Methode, deren Einsatz jedoch mit nicht unerheblichem Aufwand verbunden ist.

Vorteile:

- Möglichkeit der Erkennung und Nachbear- beitung von höhenrelevanten Strukturen wie Bruchkanten im Gelände (Böschungen mit Ober- und Unterkante, Deichlinie, Graben- system etc.)
- Visuelle Interpretation von Objekten

Nachteile:

- Große Wetterabhängigkeit
- Hoher Zeitaufwand zur Erstellung der Aerotriangulation (Netzgenerierung)
- Probleme bei dicht bewaldeten Flächen und bei Seen

### Laser-Scanner-Technik

Dieses in den letzten Jahren zunehmend verbreitete flugzeuggestützte Verfahren nutzt einen Scanner zur Abtastung der Erdoberfläche in einem be- stimmten Punktabstand. Je geringer der Punktab- stand, desto genauer kann das DGM sein, desto teurer wird jedoch auch die Modellerstellung. Eine eingehende Beschreibung der Methode findet sich u.a. in HAJNSEK ET AL (1999). Nach aktuellem Stand des Auswerteverfahrens kann die Höhen- genauigkeit der Laserpunkte mit einer Standard- abweichung von < 15 cm angegeben werden (HAJNSEK ET AL. 1999).

Vorteil:

- Punktdichte und -genauigkeit

Nachteile:

- Ein wesentlicher Nachteil des Verfahrens ist, dass eine Trennung der Laserpunkte der Gelän- deoberfläche von denen der Bauwerke und der dichten Vegetation schwierig ist, so dass ma- nuelle Nachklassifizierungen nötig werden.
- Das Verfahren ist stark wetterabhängig, es können keine Messungen bei Bewölkung, Regen oder Schnee durchgeführt werden. Auch Schwankungen der Luftfeuchtigkeit beein- flussen und können Schwankungen in den Messergebnissen verursachen. Daraus ergibt sich, dass Befliegungen nur in relativ geringen Höhen durchgeführt werden können und somit nur schmale Flugstreifen erfasst werden.
- Geländestrukturen wie Kanten, Kuppen o.ä. werden oft nicht ausreichend scharf erfasst.
- Es ist nicht möglich, dicht bewachsenes Wald- gebiet zu durchdringen (z.B. Nadelwald).
- Bestimmte Oberflächen reflektieren nur schwach (z.B. Wasser, Asphalt).
- Boden- und Vegetationsreflexionen sind schwer zu trennen.
- Es ist schwierig, mehrere Flugstreifen zu ver- schneiden, da am Bildrand hohe Verzerrungen (bidirektionale Reflexionseffekte) auftreten, die nicht immer exakt korrigiert werden können.
- Es wird empfohlen, während der Befliegung eine zusätzliche flugstreifenorientierte Video- aufzeichnung durchzuführen.



Das im LAGS-Projekt verwendete Laser-Scanner-Modell weist einen Punktabstand von 4-6 m im Gelände auf (bei guter Höhen-Abbildung des Untersuchungsgebietes) und wurde durch Bruchkanten, Deichlinien (-varianten) und mögliche Flutrinnen ergänzt (HAPE & PURPS 1999b).

### **Bewertung der SAR-Interferometrie im Vergleich zur Laser-Scanner-Methode**

Die deutlichen Vorteile der Mikrowellenfernerkundung gegenüber den optischen Fernerkundungssystemen liegen vor allem in den hier aufgeführten ersten vier Eigenschaften, die einen komplementären Einsatz ermöglichen. Sie stellen sich wie folgt dar.

Vorteile der SAR- Interferometrie:

- In der Unabhängigkeit von der natürlichen Beleuchtung und Bewölkung,
- in der Fähigkeit, in natürliche Oberflächenmaterialien einzudringen und sie zu durchdringen,
- in der Information über Oberflächenrauigkeit und Feuchtigkeitsgehalt des streuenden Mediums,
- sowie in der Möglichkeit, mit dem Radar die Entfernung und Geschwindigkeit des beleuchteten Objektes zu bestimmen.
- Ein bereits bei der Methodenbeschreibung erwähnter Vorteil der SAR-Interferometrie gegenüber konventionellen Triangulationsverfahren liegt in der Tatsache, dass mit der Genauigkeit in der Größenordnung von Bruchteilen der verwendeten Wellenlänge gemessen werden kann.
- Ein weiterer Vorteil gegenüber den klassischen optischen Geländehöhenaufnahmen ist die wetter- und jahreszeitliche Unabhängigkeit vom Aufnahmezeitpunkt, sowie seine hohe Flächenleistung, die je nach Modi Streifenbreiten von mehreren Kilometern aufweisen kann. Auch ist das gesamte Produktionsverfahren, von der Aufnahme der Daten bis zum Endprodukt, operationalisierbar, das heißt, es sind keine manuellen Bearbeitungsschritte nötig. Dies garantiert eine konstante Qualität, schnelle Lieferleistung und geringe Kosten.

- Die Verschneidung von mehreren Flugstreifen ist ohne Verzerrungen am Bildrand möglich. Nach einer automatischen radiometrischen und lokalen Einfallswinkelkorrektur kann ein Mosaiking (Verschneidung) stattfinden.

Die SAR-Interferometrie weist folgende Nachteile auf:

- Die flächenhafte Vermessung eines Reliefs mit der SAR-Interferometrie kann im unteren Skalenbereich nie die Genauigkeit einer Einzelpunktmessung durch die Tachymetrie oder DGPS erreichen.
- Es wird ein DOM erstellt und nicht, wie von interdisziplinärer Sicht gefordert, ein DGM. Die Generierung eines DGM aus SAR-Interferometrischen Messungen ist heute noch im experimentellen Stadium. Es werden derzeit verschiedene Ansätze entwickelt, die in HAJNSEK ET AL. (1999) beschrieben werden.
- Ein weiterer Nachteil äußert sich in der stark reliefierten Topographie mit Schatten und Layover-Bereichen aufgrund der Besonderheiten der SAR-Aufzeichnungsgeometrie. Dies bringt eine spezielle Art von Artefakten in das DOM, die nur mit großem Aufwand kompensiert werden können.
- Es gibt keine eindeutige Trennung von Signalen, die an der Oberfläche oder, nach den Eigenschaften der elektromagnetischen Welle, tiefer in das beleuchtete Medium eindringend zurückgestreut werden.
- Es muss mindestens einen exakt vermessenen Passpunkt geben, um die hohe Genauigkeit des DOM zu gewährleisten. Als Passpunkt wird ein genau einjustierter und vermessener Winkelspiegel (Korner Reflektor) am Boden verwendet, der im SAR-Bild durch seine maximale Rückstreuung gut ersichtlich ist.

BROCKMANN (1998) stellt folgenden Vergleich zwischen dem Laser-Scanner System Optech ALT1020 und dem flugzeuggestützten interferometrischen SAR System AeS-1 dar (Tab. IV-1.2).

**Tab. IV-1.2** Methodenvergleich Radar – Laser-Scanner nach BROCKMANN (1998).

Erreichbare Höhengenaugigkeiten	Laser-Scanner	SAR-I.
Bei flachem bis wenig geneigtem Gelände und geringem Bewuchs	15 [cm]	20 [cm]
Stark geneigtes Gelände	55 [cm]	20 [cm]
Flach mit dichtem Bodenbewuchs	40 [cm]	20 [cm]
Wasserspiegel	20 [cm]	20 [cm]
Technische Daten		
Flughöhe	900 [m]	3100 [m]
Streifenbreite	350 [m]	2000 [m]
Streifenlänge	100 [m]	500 [m]
Raster	2.3 x 2.3 [m]	2 x 2 [m]

### Bewertung

Das Laser-Scanner-System ergibt bessere Ergebnisse in der Genauigkeit der Höhe und in der Auflösung. Die SAR-Interferometrie zeichnet sich dagegen durch technische Überlegenheit aus. Sie ist vielfach flexibler, unabhängig von der Wetterlage und erbringt eine vielfach höhere Flächen- und somit kostengünstigere Leistung. Sie ist daher als zukunftsfähiges System zu bezeichnen, deren erreichbare Höhengenaugigkeiten mit Verbesserung der Technik steigen. Höhenauflösungen, die im Dezimeterbereich liegen, wurden zum jetzigen Zeitpunkt mit Flugzeugsensoren in Europa schon bestätigt (HAJNSEK ET AL. 1999). Neben dem SAR-Interferometrischen Produkt können gleichzeitig Informationen in Form von Amplituden- und Kohärenzbildern gewonnen werden.

### IV-1.8 Zusammenfassende Beurteilung der Pilotstudie

Die SAR-Interferometrie stellt ein Werkzeug zur Erfassung von topographischen Höhenunterschieden dar. Eine Anwendung von SAR-Daten für die flächendeckende Ermittlung des Bodenwassergehaltes als Start- und Kontrollwert für Bodenwasserhaushalts- und Gebietswasserhaushaltsmodelle oder als Grundlage für regionale Planungen ist vom heutigen technischen Standpunkt aus möglich und stellt eine Alternative zu den

aufwendigen klassischen Punktmessungen dar. Der besonders hohen räumlichen Auflösung von flugzeuggetragenen Systemen steht allerdings die Unflexibilität in der zeitlichen Verfügung entgegen, sowie die umfangreiche Infrastrukturplanung einer Kampagne mit Geländeaufnahmen, die zur Zeit noch als Validierung benötigt werden.

Mit Fortgang der technischen Entwicklung werden in naher Zukunft (noch) manuelle Verarbeitungsschritte für flugzeuggetragene Systeme operationalisiert werden können. Satelliten-Radarsysteme ermöglichen derzeit schon eine operationelle Vorgehensweise, jedoch ist die Verfügbarkeit von geeigneten Radarfernerkundungsdaten eingeschränkt. Hier spielt vor allem die technische Realisierbarkeit in der benötigten Stromversorgung, Datenrate und –menge sowie Antennendimension eine limitierende Rolle. Die geometrische Auflösung von Satellitensystemen erreicht nicht die der flugzeuggetragenen Systeme, die eine kleinräumige Untersuchung erlauben. Die derzeitigen Satellitensysteme werden oft nur mit einer Frequenz und gleichpolarisierter Konfiguration betrieben. In vielen Arbeiten (PROCEEDINGS IGARSS 1997-2000) konnte gezeigt werden, dass ein vollpolarmetrisches System bei der Extraktion, Modellierung und Invertierung des Radarrückstreuquerschnittes in der qualitativen Analyse zusätzliche Informationen liefern kann und in der quantitativen Analyse genauere Ergebnisse erhalten werden können.

Mit dem erfassten Radardatensatz im Pilotgebiet konnten verschiedene Oberflächenparameter wie Vegetations- und Landnutzungseinheiten, Rauheit und Bodenfeuchte klassifiziert werden, die eine wertvolle Informationsgrundlage und Ergänzung der Arbeiten der beiden weiteren BMBF-Projekte im Gebiet darstellen. Aufgrund systembedingter Schwierigkeiten erfolgte keine Auswertung der Höheninformation. Es erfolgte eine theoretische Erörterung der Vor- und Nachteile der SAR-Interferometrie im Vergleich zu anderen modernen Erfassungsmethoden wie der Laser-Scanner-Technik. Die Arbeiten im Projekt liefern wichtige Erkenntnisse und Erfahrungen zur technischen Weiterentwicklung der SAR-Interferometrie.

## Literatur

- BAW (BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU) (2000):  
 Untersuchung der Auswirkung von Maßnahmen im  
 Elbevorland auf die Strömungssituation und die  
 Flussmorphologie am Beispiel der Erosionstrecke und der  
 Rückdeichungsbereiche zwischen Wittenberge und Lenzen -  
 Schlussbericht. BMBF-Forschungsprojekt  
 Förderkennzeichen 0339575, Karlsruhe
- BROCKMANN, H. (1998): Einsatzmöglichkeiten der flugzeug-  
 gestützten Laser-Scanner-Technik zur Erfassung räumlich-  
 hydrologischer Informationen an Fließgewässern. DGM, Nr.  
 42, Heft 2, S. 68.
- DUBOIS, P.C., VAN ZYL, J.J., ENGMAN, T. (1995): Measuring  
 Soil Moisture with Imaging Radars. IEEE Trans. Geosci.  
 Remote Sensing, Vol. 33, No. 4, 915-926.
- HAJNSEK, I., ERGENZINGER, P., SCHMULLIUS, C. (1999):  
 Endbericht TP I.2: Pilotstudie Radarbefliegung der Elbaue.  
 Teilprojekt-Abschlussbericht im Verbundvorhaben  
 „Morphodynamik der Elbe“ (BMBF-FKZ 0339566),  
 unveröffentlicht
- HAPE, M., PURPS, J. (1999a): Digitale Geländemodelle als  
 Grundlage für orientierende hydraulische Aussagen in der  
 angewandten landschaftsökologischen Forschung – Mög-  
 lichkeiten, aufgezeigt anhand des Rückdeichungsvorhabens  
 Lenzen/ Elbe. In: LAGS (LANDESANSTALT FÜR GROß-  
 SCHUTZGEBIETE, Hrsg.) (1999): Auenreport – Beiträge aus  
 dem Biosphärenreservat Flusslandschaft Elbe – Branden-  
 burg, Sonderband 1/ 5. Jahrgang 1999, S. 17-26.
- HAPE, M., PURPS, J. (1999b): Digitale Geländemodelle als  
 Grundlage für stationäre und instationäre Überflutungs-  
 simulationen. Beitrag zur Fachtagung Elbe Dynamik und  
 Interaktion von Fluß und Aue, Wittenberge, 04.-07.05.1999,  
 Tagungsband, Hrsg. Institut für Wasserwirtschaft und  
 Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (Eigenverlag)
- LAGS (LANDESANSTALT FÜR GROßSCHUTZGEBIETE, Hrsg.)  
 (1999): Ergebnisse des Forschungsvorhabens  
 „Möglichkeiten und Grenzen der Auenregeneration und  
 Auenwaldentwicklung am Beispiel von  
 Naturschutzprojekten an der Unteren Mittelbe  
 (Brandenburg)“. Beiträge aus dem Biosphärenreservat  
 Flusslandschaft Elbe - Brandenburg, Auenreport -  
 Sonderband 1/ 5. Jahrgang 1999.
- OH, Y., SARABANDI, K., ULABY, F. (1992): An Empirical Model  
 and Inversion Technique for Radar Scattering from Bare  
 Soil Surface, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 30,  
 No.2, 370-381.
- RADKE, M. (1996) Bestimmung der Rauigkeit bracher Felder  
 aus Synthetic-Aperature-Radar-Daten, Diplomarbeit DLR,  
 unveröffentlicht.
- VON PONCET, F. (1995): Methodenentwicklung zur Nutzung von  
 Satelliten-SAR-Daten für die Kartierung und Erfassung von  
 Parametern und Phänomenen des Bodenwasserhaushalts,  
 ZALF-Berichte Nr. 17, S. 83.
- PROCEEDINGS IGARSS (1997-2000), IEEE-Verlag, ISBN 1-  
 800-678-IEEE.



## IV-2 Strömungs- und Erosionsvorgänge in fluviatilen Sedimenten

U. Saucke, J. Brauns

### IV-2.1 Allgemeines

Der Untergrund entlang von Flüssen besteht überwiegend aus fluvial und glazial geprägten Lockergesteinen (vgl. Kap. II-1.1). Generell bilden die aus dem Quartär stammenden glazialen Sedimente die Basis für die jungen, dem Holozän zuzuordnenden fluvialen Ablagerungen. Die zurückliegende Morphodynamik des Flusses - im wesentlichen basierend auf dem Abflussgeschehen und den Gesetzmäßigkeiten für Gerinneströmung und Feststofftransport - hat vorwiegend durch Prozesse wie Sedimentation und Erosion auch die Untergrundzonen, die heute als in Ruhe befindlich bezeichnet werden können (wie z.B. in den Vorländern), entscheidend geprägt. Bei oberflächlicher Betrachtung erscheinen diese Zonen zunächst als einheitliche, mit einer mehr oder weniger durchgängigen Lehmauflage versehene Sand/Kies-Komplexe, die sich jedoch bei detaillierter Untersuchung bereichsweise als stark heterogen darstellen, was u.U. auch zu Fragen in Bezug auf die innere Stabilität der Sedimentkörper führt (BRAUNS & WIBEL 1985).

### IV-2.2 Problemstellung

Ein wie oben beschriebener Untergrund stellt fast ausnahmslos die Gründungsverhältnisse für Bauwerke entlang von Flüssen, wie z.B. Deiche und bauliche Anlagen von Staustufen, dar. Im Zuge der durch die jüngsten Hochwasserereignisse wieder verstärkt in den Mittelpunkt gerückten Fragestellung in Bezug auf die Standsicherheit von Deichen sind neben der Stabilität des eigentlichen Bauwerkes auch die hydraulischen Vorgänge im Untergrund bei Einstau desselben von wesentlicher Bedeutung. Ebenso ist eine derartige Problematik im Zusammenhang mit der Verlegung von Deichen und Dämmen bei der Bereitstellung neuer Retentionsräume von hoher Relevanz. Im hydraulischen Lastfall kommt es infolge eines erheblichen Potentialunterschiedes zwischen Wasser- und Luftseite des Deiches im Untergrund zu verstärkten Strömungsvorgängen, die bei ausgeprägter Schichtung mit einhergehenden Korngrößendifferenzen zu örtlichen Erosionsvorgängen führen können.

Im Zusammenhang mit dem oftmals unter Druck stehenden Grundwasser unterhalb einer bindigen Deckschicht, die das direkte Auflager für den

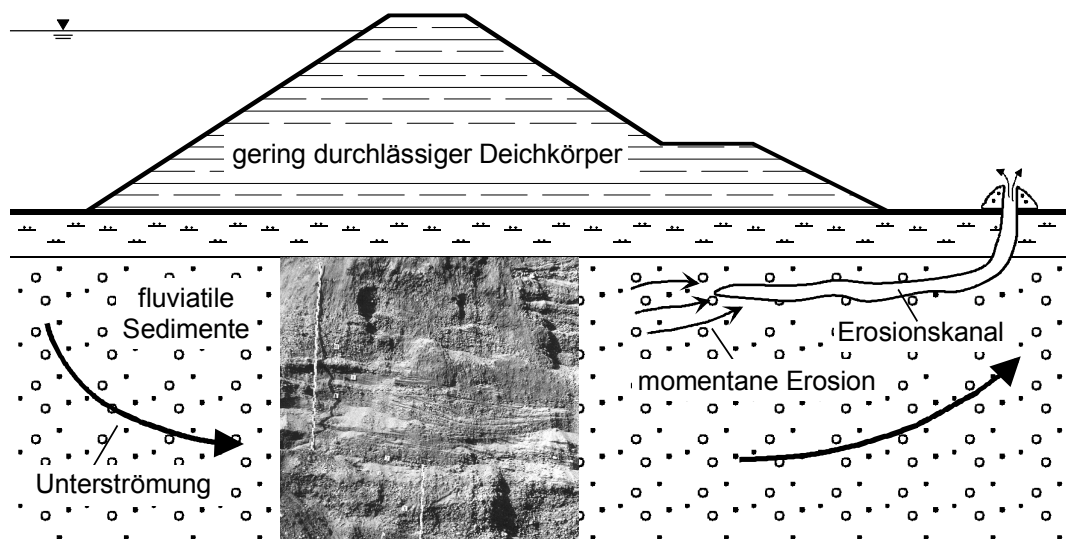


Abb. IV-2.1 Hochwasserschutzdamm auf fluvialem Untergrund mit Veranschaulichung der Sedimentstruktur und des Phänomens der rückschreitenden Erosion (BRAUNS & BIEBERSTEIN 1998, verändert).

Deichkörper bildet, bricht diese an Schwachstellen luftseitig des Deichfußes bevorzugt auf, so dass im Verbund mit den beschriebenen Vorgängen unterhalb des Deiches die Voraussetzungen für rückschreitende Erosion, sogenanntes "Piping" (vgl. Abb. IV-2.1), gegeben sind (HANSES ET AL. 1985, BRAUNS & BIEBERSTEIN 1998). Bei anhaltenden hydraulischen Randbedingungen können diese Vorgänge infolge einer u.U. stark progressiven Entwicklung die Standsicherheit des Bauwerkes gegebenenfalls gefährden.

### IV-2.3 Schichtungsverhältnisse

Die vorstehenden Ausführungen haben die Bedeutung des Untergrundaufbaus hinsichtlich der dargestellten Problematik ersichtlich werden lassen. Im Zusammenhang mit Geländeuntersuchungen in Bezug auf Strömungsvorgänge in fluviatilen Sedimenten (vgl. Kap. II-1.1.6) konnte am gewählten Standort in den Elbauen nahe der Ohremündung, nördlich von Magdeburg, detailliertes Datenmaterial für den Untergrundaufbau mit Hilfe von Bohraufschlüssen gewonnen werden. Die aus einer engmaschigen Beprobung gewonnenen Kornverteilungskurven eines Bohraufschlusses ergeben in ihrer Gesamtheit, wie in Abb. IV-2.2 dargestellt, einen in einem breiten Band variierenden Kornaufbau der einzelnen Schichten mit  $d_{10}$ -Werten im Bereich von 0,08 mm bis 0,51 mm und Ungleichförmigkeits-

zahlen von  $1,5 \leq U \leq 49$ . Typisch für den untersuchten Abschnitt ist offensichtlich eine vergleichsweise schmale Variation im Bereich von Massenanteilen bis 20%. (An anderen Strömen werden sehr viel ausgeprägtere Schichtungsverhältnisse vorgefunden, vgl. BRAUNS & BLINDE 1978.)

Nicht zu erkennen sind hier zunächst etwaige erosionsanfällige Schichtkombinationen, die die Bewegung der feinen Partikel entlang von Schichtgrenzen zu Zonen gröberer Materials aus rein geometrischen Gründen zulassen würden. Nicht vertreten sind gleichfalls extrem gestreckte Kornverteilungen und Ausfall-Körnungen, bei denen nicht durch Vorgänge an den Schichtgrenzen Instabilitäten ihren Ursprung finden, sondern bei denen das Korngemisch selbst durch das Auswaschen von Feinanteilen in sich an Tragfähigkeit verlieren kann (Suffosion).

Die vorstehend in einer Gesamtbetrachtung dargestellten Verhältnisse stellen sich allerdings bei einer höhendifferenzierten Analyse deutlich variabler dar (vgl. Abb. IV-2.3). Die Darstellung der Korndurchmesser  $d_{15}$  und  $d_{85}$  (wesentliche Parameter für das klassische Filterkriterium von *Terzaghi*) über die Höhe des Bohraufschlusses lassen die Variabilität ersichtlich werden. Es sind Zonen mit extrem schmalen und einheitlichen Korngrößenbändern zu erkennen (Zonen A u. C). Andere Zonen weisen hingegen eine deutlich höhere Variationsbreite auf (Zonen E u. F). Für die klassische Schichterrosion

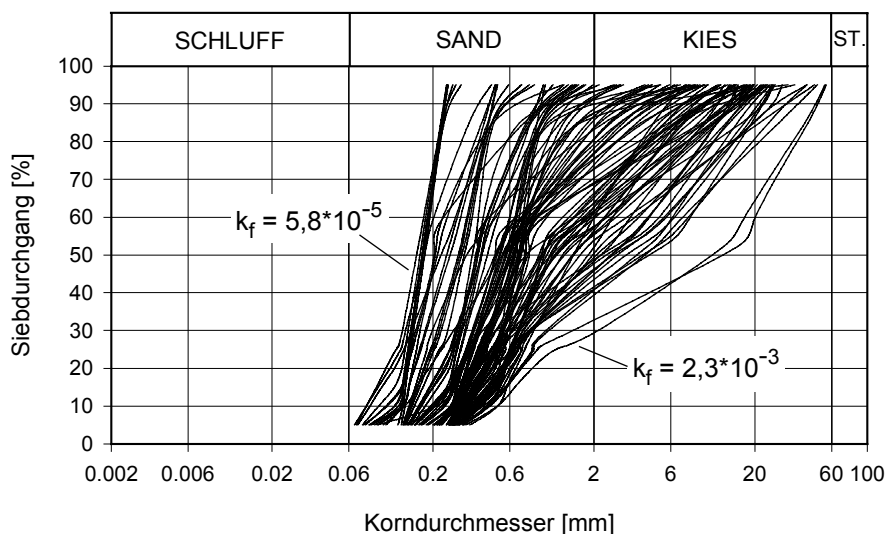


Abb. IV-2.2 Kornverteilungen eines Bohraufschlusses (105 Proben, 10 cm Probenraster) und minimale bzw. maximale resultierende hydr. Durchlässigkeiten  $k_f$ .

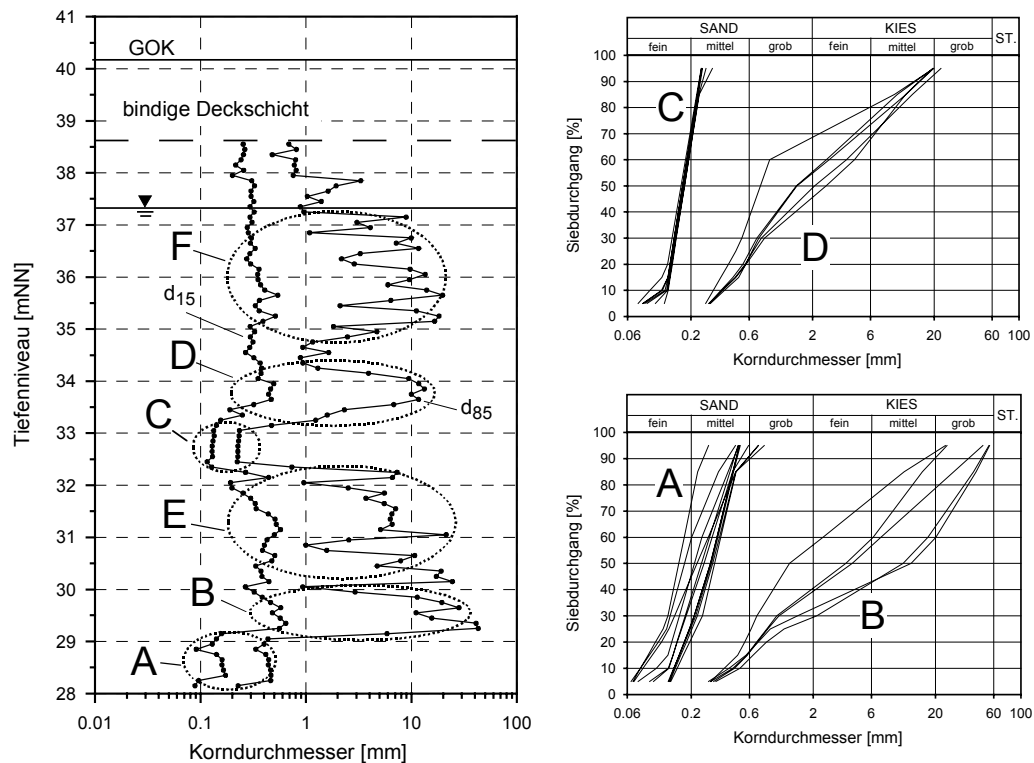


Abb. IV-2.3 Darstellung der Korndurchmesser  $d_{15}$  und  $d_{85}$  eines Bohraufschlusses und exemplarische Kornverteilungskurven für charakteristische Schichtgrenzen

sind besonders diejenigen Niveaus von Interesse, in denen die Unterschiede zwischen den kleinen Partikeln in einer groben Zone zu denen der groben in der angrenzenden feinen Zone stark ausgeprägt sind (vgl. Grenzbereiche zwischen A/B und C/D bzw. rechte Darstellung in Abb. IV-2.3). Für die dargestellten Verhältnisse ist dies in den Tiefenniveaus 33,3 mNN und 29,0 mNN besonders augenfällig.

#### IV-2.4 Dipol-Tracer-Methode

Neben geometrischen Bedingungen, die für Erosionsvorgänge erfüllt sein müssen, ist auch die Überschreitung von hydraulischen Kriterien für den Bewegungsbeginn der Partikel erforderlich (BRAUNS 1985, WEIJERS & SELMEIJER 1993). Erst der hydraulische Kraftangriff auf die Partikel kann Kornumlagerungsvorgänge ermöglichen. In diesem Zusammenhang ist die Variabilität der Fließgeschwindigkeiten infolge einer schwächer oder stärker ausgeprägten Strukturierung des Untergrundes bzw. erheblichen Korngrößendifferenzen zwischen den jeweiligen Strukturen von wesentlicher Bedeutung. Darüber hinaus spielt nicht nur für die Strömungs- sondern auch für die Erosionsvorgänge

eine Rolle, wie weit etwaige Horizontbildungen - hier insbesondere die stark durchlässigen - sich lateral durchgängig erstrecken.

In diesem Zusammenhang stellen komplexe Tracerversuche in Kombination mit detailliert untersuchten Bohraufschlüssen eine Basis dar, um Aussagen in Bezug auf die Variationsbreite von Fließgeschwindigkeiten in fluvial geprägten Untergrundzonen zu machen. Hierfür wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten die Dipol-Tracer-Methode (DTM) entwickelt. Die Dipol-Tracer-Methode stellt ein kleinräumiges, hochauflösendes Tracerverfahren dar (vgl. Abb. IV-2.4). Hierfür wird mittels einer Kreislaufströmung zwischen einem Entnahme- und einem Einspeisebrunnen im Untergrund ein hydraulischer Dipol erzeugt. Sobald stationäre Verhältnisse vorliegen, wird über den Einspeisebrunnen zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit des Grundwassers dem Kreislauf zeitlich begrenzt eine Kochsalzlösung zugegeben. Für die Detektion der Salzlösung in der gesättigten Untergrundzone wurde eine Multi-Messlanze entwickelt, die höhendifferenziert in Abständen von 25 cm die Messung der elektrischen Leitfähigkeit im Grundwasser ermöglicht. Hierfür sind in direkter Linie zwischen den

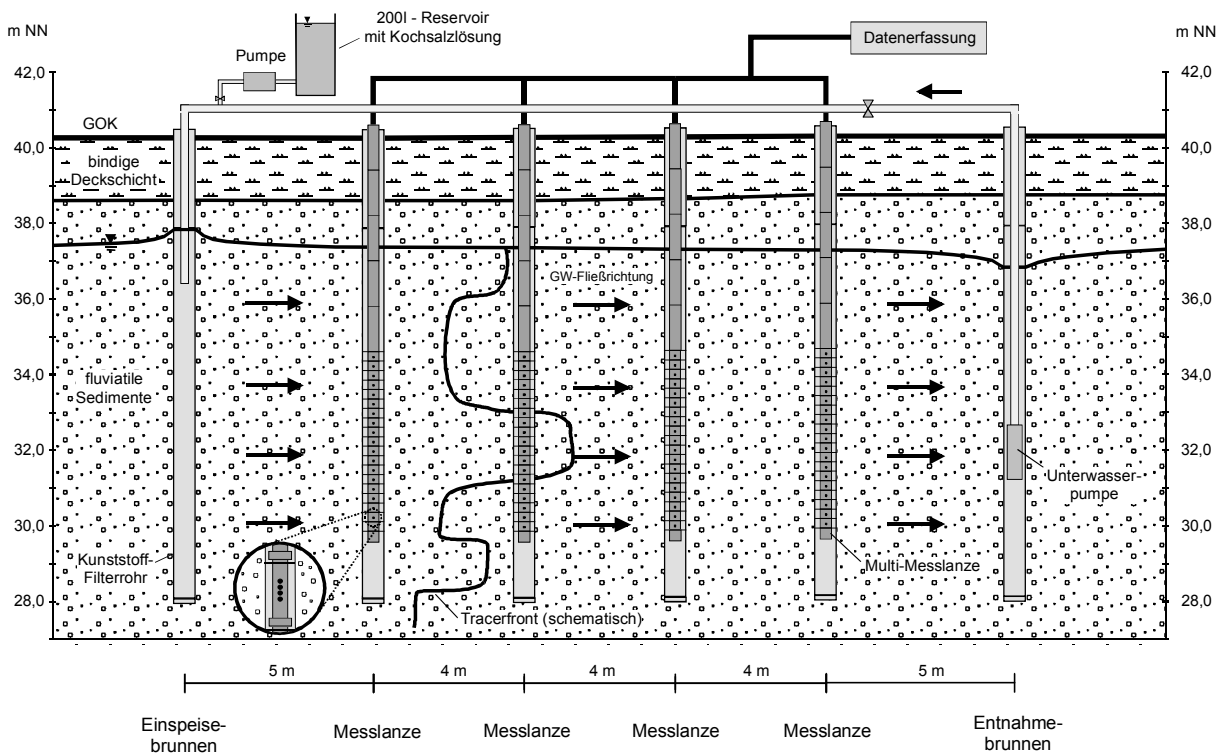


Abb. IV-2.4 Prinzipische Skizze Dipol-Tracer-Methode.

hydraulischen Brunnen Messstellen installiert, so dass aus den erfassten Tracerganglinien Fließgeschwindigkeiten als Aufschluss für den strukturellen Aufbau des Sedimentkörpers ermittelt werden können.

Für den erstmaligen Einsatz der DTM wurde ein Versuchsgelände auf Grundlage von geologischen Vorkundungen im Bereich der Ohremündung nördlich von Magdeburg bestimmt. Zur Gewinnung einer breiten Datenbasis sind zwei rechtwinklig zueinander angeordnete Messprofile erstellt worden. Mit Hilfe des Hohlbohrschneckenverfahrens wurden hierfür insgesamt 16 4''-Brunnen bzw. -Messstellen errichtet, für die mittels Rammkerngewinnung im Liner-Verfahren ein detaillierter Bodenaufschluss gewonnen wurde. Die gewonnenen Bohraufschlüsse wurden im Labor mit Hilfe von Siebanalysen in Bezug auf die Korngrößenverteilungen umfangreich untersucht, so dass auf Grundlage von Korngrößenparametern hydraulische Durchlässigkeiten in einem 10 cm Raster für die Brunnen und Messstellen bestimmt werden konnten. Im Zuge der sechswöchigen Untersuchungen wurden ein Kleinpumpversuch und sieben Versuche mit der Dipol-Tracer-Methode durchgeführt. Für diese Versuchsreihen wurden in den beiden Messprofilen

die Strömungsrichtung und die Tiefenlage der Multi-Messlanzen in den Messstellen variiert. In allen Versuchen wurden der Durchfluss im hydraulischen Dipol mit  $12 \text{ m}^3/\text{h}$ , die Zugabedauer der Salzlösung mit einer Stunde und die Salzkonzentration mit  $4 \text{ g/l}$  konstant gehalten.

Wie oben dargelegt, ist Grundlage für statistische Untersuchungen in Bezug auf Zusammenhänge zwischen Untergrundaufbau und Strömungsvorgängen in demselben zunächst die Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten auf Grundlage von gemessenen Tracerdurchgangskurven (vgl. Abb. IV-2.5). Hierzu sind für den Messabschnitt zwischen Einspeisebrunnen und nächstgelegener Messstelle in Abb. IV-2.6 horizontale Durchlässigkeiten (auf Grundlage der Korngrößenanalysen) normierten Fließgeschwindigkeiten über die Tiefe gegenüber gestellt, die sich aus den in Abb. IV-2.5 gezeigten Tracerdurchgangskurven bzw. analytisch bestimmten Tracerdurchgangszeiten ergeben. Deren Verlauf weist eine deutliche Korrelation zu den aus den Kornverteilungen bestimmten hydraulischen Durchlässigkeiten auf. Ersichtlich sind ein Zusammenhang zwischen Zonen mit geringen Fließzeiten und hoher hydraulischer Durchlässigkeit bzw. gegenteilige Verhältnisse (SAUCKE 2000).



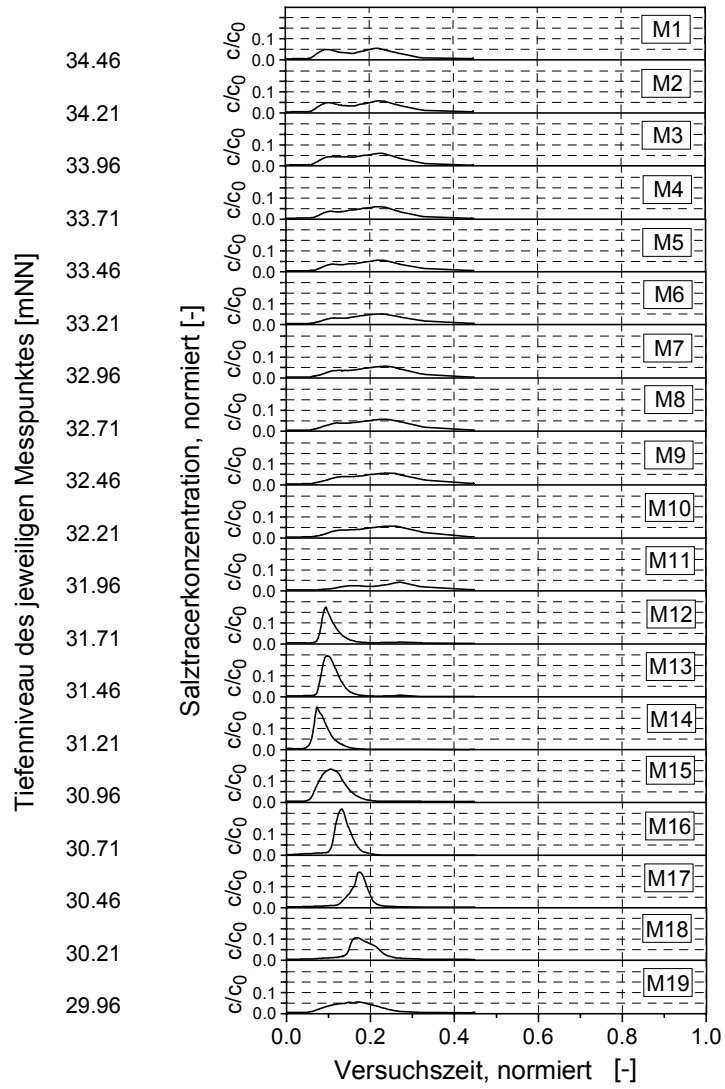


Abb. IV-2.5 Normierte Tracerdurchgangskurven für die 19 Messstellen einer Multi-Messlanze.

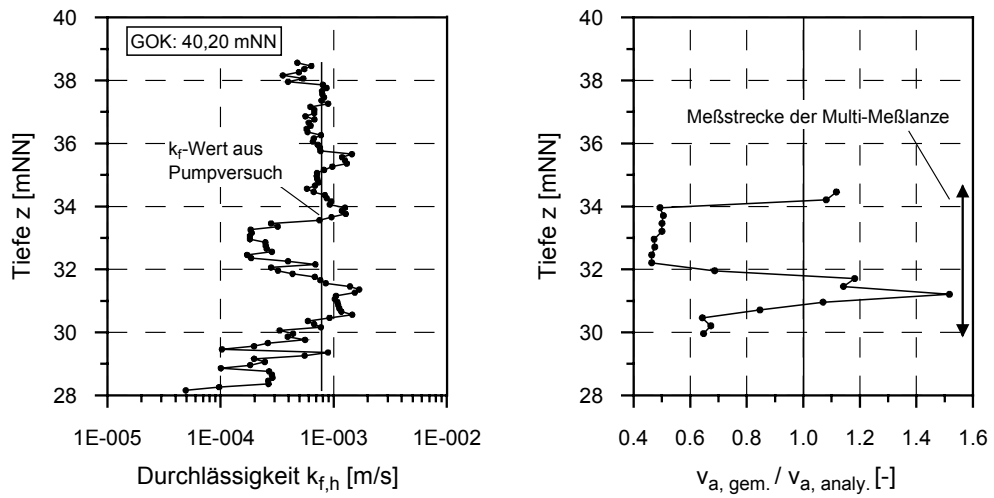


Abb. IV-2.6 Berechnete horizontale Durchlässigkeiten auf Grundlage von Siebanalysen und mittels analytischer Lösung normierte Fließgeschwindigkeiten auf Basis gemessener Tracerdurchgänge für den Messabschnitt zwischen Einspeisebrunnen und erster Messstelle.

#### IV-2.5 Ausblick

Wie aus dem Vorstehenden hervorgeht, besteht zwischen den Durchlässigkeitswerten auf Basis der durchgeführten Siebanalysen und den bestimmten Fließgeschwindigkeiten eine ersichtliche Korrelation. Der geschilderte Sachverhalt lässt es sinnvoll erscheinen, mit Hilfe eines geostatistischen Simulationsverfahrens (konditionierte sequentielle Indikator-Simulation, JOURNEL & ALBERT 1989, GOMEZ-HERNANDEZ & SRIVASTAVA 1990) auf Grundlage der vorliegenden hydraulischen Durchlässigkeitswerte einen Untergundaufbau zu generieren. Mit Hilfe einer derartigen Simulation, der erfassten Tracerdurchgangskurven, eines numerischen Grundwassersimulationsprogramms mit Transportrechnung und eines Monte-Carlo-Ansatzes besteht die Möglichkeit, eine dreidimensionale Durchlässigkeitsverteilung, die den gegebenen räumlichen Strukturen des vorliegenden Untergundaufbaus entspricht, zu bestimmen.

Diese Durchlässigkeitsfelder stellen die gesuchte Datengrundlage dar, um bei gegebenen hydraulischen Randbedingungen mit Hilfe von numerischen Simulationsprogrammen Aussagen über die Fließgeschwindigkeitsverteilungen zu machen, die für die oben dargelegten Fragestellungen entscheidend sind. Diese Ergebnisse können wiederum den Resultaten aus der Variographie der geostatistisch analysierten Bohrprofile gegenübergestellt werden, um auf dieser Grundlage ein Werkzeug zur Verfügung zu stellen, mit dem maximale Abweichungen der Fließgeschwindigkeiten von denen für

vergleichbare homogene Verhältnisse und ihre räumliche Verteilung angegeben werden können. Diese Fragestellung ist letztendlich auch maßgebend für die Beurteilung fluviatil geprägter Untergrundverhältnisse im Hinblick auf die oben genannten Transport- oder Kornumlagerungsvorgänge.

#### Literatur

- BRAUNS, J., BIEBERSTEIN, A. (1998): Geotechnische Bewertung von Hochwasserschutzdeichen. Hochwasser- und Küstenschutz. Niedersächs. Akad. d. Geowissenschaften, Hannover
- BRAUNS, J. (1985): Erosionsverhalten geschichteten Bodens bei horizontaler Durchströmung. Wasserwirtschaft 75
- BRAUNS, J., BLINDE, A. (1978): Die Bedeutung der Untergrundschichtung bei der Ausbreitung von Injektionssuspensionen in fluvialen Sedimenten. Die Bautechnik
- BRAUNS, J., WIBEL, A.R. (1985): Bautechnische Schwierigkeiten tiefer Baugruben mit offener Sohle im Grundwasser. Wasserwirtschaft 75 (9)
- DEUTSCH, C.V., JOURNEL, A.G. (1997): GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford University Press
- GOMEZ-HERNANDEZ, J.J., SRIVASTAVA, R.M. (1990): ISIM3D: An ANSI-C Three-Dimensional Multiple Indicator Conditional Simulation Program, Computers & Geosciences 16(4)
- HANSES, U., MÜLLER-KIRCHENBAUER, H., SAVIDIS, S. (1985): Zur Mechanik der rückschreitenden Erosion unter Deichen und Dämmen. Bautechnik 62
- SAUCKE, U. (2000): The Dipole-Tracer-Method for the Investigation of the Geohydraulic Properties of Non-Homogenous Aquifers. Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering, Balkema, 2000
- WEIJERS, J.B.A., SELLMELJER, J.B. (1993): A New Model to Deal with the Piping Mechanism. Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Balkema, 1993

## IV-3 Grundwasserdynamik in Vorland- und Auenbereichen am Beispiel des geplanten Deichrückverlegungsgebietes „Rogätz“

U. Mohrlök, G.H. Jirka

### IV-3.1 Einführung

Ökosysteme in Flusstälern und deren nachhaltige Entwicklung sind heute vielfach Gegenstand eingehender Untersuchungen, die in der Planungsphase anthropogene Beeinflussungen zu bewerten haben, wie sie z.B. von Deichrückverlegungen zu erwarten sind. Diese Ökosysteme sind stark geprägt von hydrologischen Prozessen, insbesondere der Hochwasserdynamik in den Fließgewässern und der daraus resultierenden Grundwasserdynamik. Beim Einfluss der Hochwasserdynamik auf das Grundwasser lassen sich im Wesentlichen zwei hydraulische Prozesse unterscheiden: der Austausch zwischen Fließgewässern und Grundwasser durch Uferfiltrat sowie die Infiltration über die bei Hochwasser überstauten Auen- und Vorlandbereiche.

Ziel des hier vorgestellten Forschungsvorhabens war es, diese Prozesse mit einem physikalisch basierten Ansatz in ein Prognosemodell einzuarbeiten, so dass dieses als verlässliche Entscheidungshilfe, z.B. bei der Planung von Deichrückverlegungen, eingesetzt werden kann. Mittels eines instationären, numerischen Grundwasserströmungsmodells erfolgten Berechnungen der Grundwasserdynamik sowohl des aktuellen Zustandes (Ist-Zustand) als auch von Prognosen bei unterschiedlichen Deichrückverlegungsvarianten. Durch statistische Zeitreihenanalysen der Ergebnisse konnten relevante Parameter erarbeitet werden, die eine Bewertung der Beeinflussung der Grundwasserdynamik ermöglichten.

Die Erstellung des numerischen Grundwassermodells basierte auf einem hydrogeologischen Modell für das in Abstimmung mit der Projektgruppe „Elbe-Ökologie“ gewählte Untersuchungsgebiet nördlich von Magdeburg, das Elbetal im Bereich der Ohremündung, welches auch Gegenstand weiterer Forschungsvorhaben war. Durch das hydrogeologische Modell waren die Abgrenzungen und Eigenschaften des Aquifers sowie die Randbedingungen festgelegt. Sowohl der Austausch zwischen Fließgewässern und Grundwasser als auch die Infiltration von den Überflutungsflächen durch die Deckschichten wurden über einen sogenannten Leakage-Ansatz in das

Modell implementiert. Zur Parametrisierung dieser Infiltration wurden an repräsentativen Standorten im Untersuchungsgebiet Bodenproben entnommen und deren hydraulische Eigenschaften im Labor ermittelt. Die Messreihen der temporär im Untersuchungsgebiet errichteten Grundwassermessstellen, von November 1997 bis Oktober 1999, lieferten die zur Kalibrierung des numerischen Modells erforderliche Datenbasis.

Mit dem kalibrierten Modell wurde für den Zeitraum von November 1985 bis Oktober 1999 die Grundwasserdynamik ermittelt. Zur Prognose der Veränderung der Grundwasserdynamik für eine mögliche Variante der Deichrückverlegung wurde derselbe Zeitraum simuliert. Die Bewertung dieser Veränderung erfolgte anhand eines Vergleichs der beiden Modellergebnisse unter Verwendung von statistischen Parametern aus der Zeitreihenanalyse. Daraus resultierende Kartendarstellungen, z.B. von der mittleren Veränderung des Flurabstandes, stehen als Eingangsdaten für weitergehende ökologische Aussagen zur Verfügung.

### IV-3.2 Untersuchungsgebiet

#### IV-3.2.1 Topographie

Das gewählte Untersuchungsgebiet liegt im Elbetal ca. 15 km nördlich von Magdeburg. Es umfasst den Abschnitt des gesamten Elbetals zwischen Glindenberg und Rogätz. Die Topographie im Untersuchungsgebiet wurde aus den Topographischen Karten 1:25.000 und 1:10.000 entnommen (Abb. IV-3.1). Für den Bereich zwischen Loitsche, Heinrichsberg und der Ohremündung sowie für das östliche Elbevorland wurde ein digitales Geländemodell auf der Basis von CIR-Luftbildern des Landesamts für Vermessung und Datenverarbeitung Sachsen-Anhalt in Halle erstellt (MOHRLÖK & JIRKA 2001). Die stereoskopische Auswertung ermöglichte die Beschreibung der Gebiete mit ausgeprägtem Geländere relief mit einer Genauigkeit von etwa 0,5 bis 1 m in der Geländehöhe. Dabei wurde die Datendichte selektiv am Geländere relief orientiert.

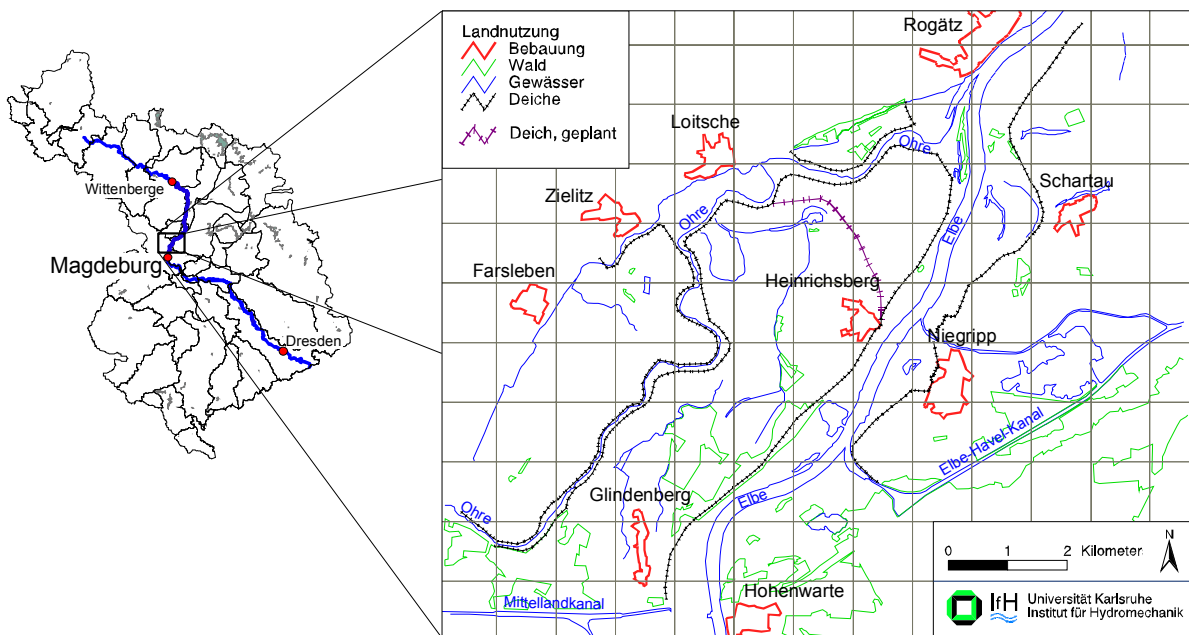


Abb. IV-3.1 Lage des Untersuchungsgebiets mit möglichem Deichrückverlegungsgebiet an der Ohremündung.

Das Geländere relief spiegelt die Landschaftsentwicklung des Elbetals wieder, die im Wesentlichen von Flusslaufverlagerungen und Hochwasserereignissen in den vergangenen Jahrtausenden beeinflusst war. Eine anthropogene Überprägung dieser Entwicklung in Form von Landnutzung durch Landwirtschaft und damit verbundenem Hochwasserschutz durch Deichbau hat sich in den vergangenen Jahrhunderten manifestiert (vgl. hierzu SAUCKE & BRAUNS: Kap. II-1.1 und KIENE ET AL.: Kap. II-1.2 in diesem Band).

Der Verlauf der aktuellen Deichlinien weist dabei die Auen- und Vorlandbereiche aus, die bei Hochwasser überstaut werden können. Durch eine mögliche Variante der Deichrückverlegung im Bereich der Ohremündung werden diese Flächen wesentlich vergrößert (Abb. IV-3.1).

#### IV-3.2.2 Hydrologie

Die Hydrologie des Untersuchungsgebiets ist geprägt von der Abflussdynamik der Elbe. Aufgrund der Lage des Einzugsgebiets, mit einer niederschlagsreichen Mittelgebirgsregion im Oberlauf und niederschlagsarmen Tiefländern im Mittel- und Unterlauf, wird im Mittel ein Verhältnis von 1:21 zwischen Niedrig- und Hochwasserabflüssen beobachtet.

Hochwasserereignisse treten vorwiegend im Winter und Frühjahr auf. Zur Erfassung der für die Modellierung wesentlichen Wasserstandsdynamik standen langjährige Zeitreihen von den Pegeln Rothensee, Niegrupp und Rogätz zur Verfügung, wobei die Zeitreihe am Pegel Rogätz bis zum 1. November 1997 durch Regression anhand der Zeitreihe des Pegels Niegrupp ergänzt wurde.

Dagegen ist das Abflussgeschehen der Ohre von lokalen Niederschlagsereignissen im Einzugsgebiet geprägt. Zur Charakterisierung der Abflussdynamik der Ohre im Untersuchungsgebiet stand die langjährige Zeitreihe des Pegels Wolmirstedt vom Staatlichen Amt für Umweltschutz in Magdeburg (STAU) zur Verfügung. Im Bereich der Mündung wird im Falle eines Hochwassers in der Elbe der Abfluss der Ohre einige Kilometer zurück gestaut.

#### IV-3.2.3 Hydrogeologie

Die Geologie des Untersuchungsgebiets ist geprägt von den pleistozänen Eiszeiten. Großräumig ist das Gebiet in die Moränen- und Sanderflächen der Saaleeiszeit eingebettet. Bereits in der Weichsel-eiszeit war der Durchbruch der Elbe nach Norden vorhanden, so dass dieser Zeit die fluviatilen Sedimente des heutigen Elbetals entstammen. Im

Holozän hatte die Elbe ihren Lauf in diesem Tal mehrfach verlagert, woraus heute die uneinheitliche Mächtigkeit der Auelehmdeckschichten und das ausgeprägte Geländere relief resultieren.

Diese geologische Entwicklung im Untersuchungsgebiet bedingt einen recht komplexen und differenzierten Aquiferaufbau (Abb. IV-3.2). Der eigentliche Talaquifer besteht aus gut durchlässigen weichseleiszeitlichen Sanden und Kiesen und wird im Liegenden durch mehr oder weniger einheitlich ausgeprägte Geschiebemergel aus der Saaleeiszeit begrenzt (SAUCKE & BRAUNS: Kap. II-1.1). Die Festlegung der Aquiferbasis erfolgte mittels der Hydrogeologischen Karte HK50 Wolmirstedt/Burg (1:50.000), aus der die Lage und das Relief der Aquiferbasis abgeleitet wurde. Die seitliche Abgrenzung wird von den saaleeiszeitlichen Moränen- und Sanderflächen gebildet, die aus Geschiebemergel mit ausgedehnten Sandeinlagerungen aufgebaut sind und ist durch den Talrand vorgegeben. Daten zu den hydraulischen Eigenschaften des Aquifers waren nur vereinzelt verfügbar (HK50 Wolmirstedt/Burg, SAUCKE & BRAUNS: Kap. IV-2) und waren daher Gegenstand der Modellkalibrierung (s. Kap. IV-3.4.1).

Hydrogeologisch kann der Talaquifer wie folgt charakterisiert werden. Der talparallele Grundwasserabstrom im Untersuchungsgebiet ist in bedeuten-

dem Maße von der hydraulischen Anbindung der Fließgewässer Elbe und Ohre geprägt. Insbesondere während Hochwasserperioden findet fast ausschließlich eine Infiltration von den Fließgewässern und gegebenenfalls von überstauten Vorland- und Auenbereichen ins Grundwasser statt, die diesen Grundwasserabstrom weitestgehend unterbindet. Während Niedrigwasserperioden hingegen bilden die Fließgewässer die Vorflut für den Grundwasserabstrom.

Die Grundwasserneubildung in den angrenzenden Moränen- und Sandergebieten führt zu einem für die Wasserbilanz relevanten randlichen Zustrom ins Untersuchungsgebiet. Diese Zuflüsse wurden aus der Grundwasserneubildung auf Grundlage verfügbaren Kartenmaterials (JORDAN & WEDER 1995) abgeschätzt. Ein wesentlicher Abstrom der Grundwasserneubildung in der Colbitz-Letzlinger Heide erfolgt in das Ohretal und nicht direkt ins Untersuchungsgebiet, da dieses unterhalb der Einmündung des Ohretals ins Elbetal gelegen ist. Dieser wird daher mit dem südwestlichen Grundwasserzustrom in das Untersuchungsgebiet aus dem Elbetal erfasst. Zuflüsse in das Untersuchungsgebiet durch großräumige vertikale Zirkulation über die Aquiferbasis wurden gegenüber den seitlichen Randzuflüssen vernachlässigt.

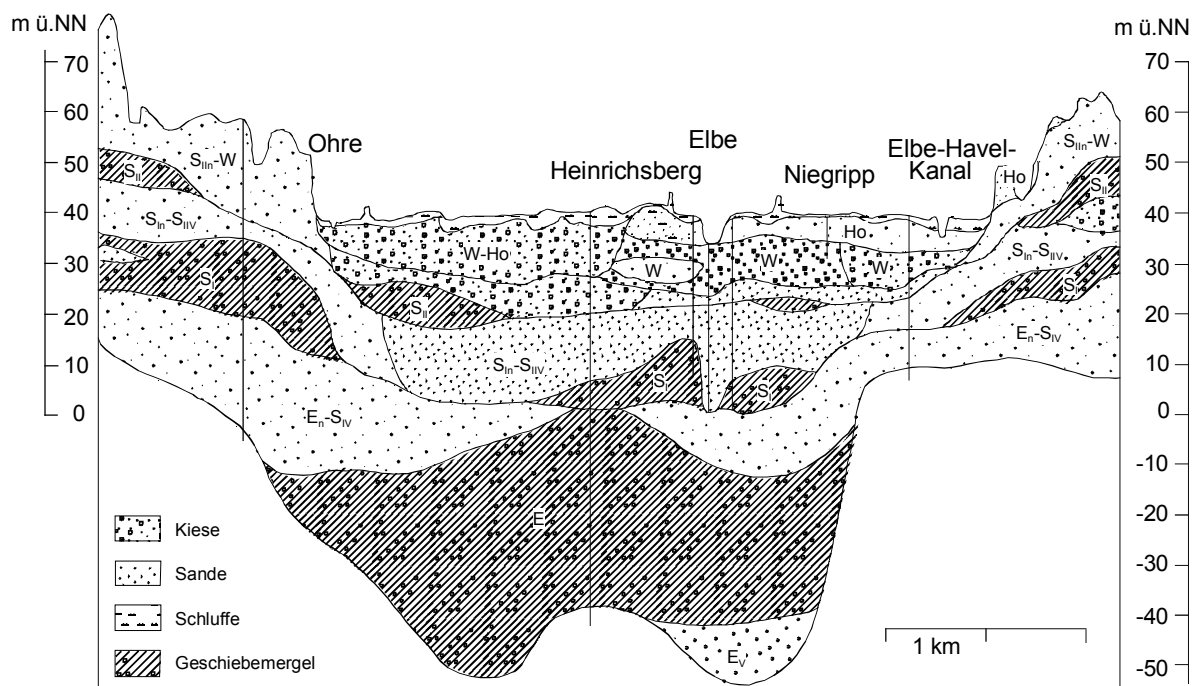


Abb. IV-3.2 Geologischer Profilschnitt im Untersuchungsgebiet, 50-fach überhöht (nach ROMMEL 1998).

Die Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet selbst ist zwar gering jedoch nicht vernachlässigbar. Eine Abschätzung der Grundwasserneubildungsrate wurde anhand einer klimatischen Wasserbilanz und Bodenwasserbilanz auf Tagesbasis durchgeführt (BUREK 1999). Dazu standen Klima- und Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie die bodenhydraulischen Kenngrößen der Deckschichten zur Verfügung. Nur bei wenigen, starken Niederschlagsereignissen trat eine zu berücksichtigende Grundwasserneubildungsrate auf.

Zur Charakterisierung der Grundwasserdynamik im Untersuchungsgebiet standen Ganglinien von Grundwassermessstellen des STAU, des Wasserstraßenneubauamts Magdeburg (WNA) und von zusätzlich im Rahmen des Projekts errichteten Messstellen (Rammpegeln) zur Verfügung (s. Abb. IV-3.4). Die langjährigen Zeitreihen vom STAU und kurzen Zeitreihen der Rammpegel sind durch landeseinheitliche Stichtagsmessungen definiert. Erst seit November 1985 sind Ganglinien von allen Landesmessstellen aus dem Untersuchungsgebiet verfügbar. Die teilweise vorhandenen Datenlücken konnten durch Regressionen aus vollständigen

Datenreihen, wie z.B. der Elbepegel, ergänzt werden (FRIST 1999). Diese Daten dienten zur Festlegung der Modellrandbedingungen für den Zeitraum November 1985 bis Oktober 1999. Hingegen wurden die kurzen Zeitreihen der Rammpegel von November 1997 bis Oktober 1999 zur Modellkalibrierung verwendet. Die Daten des WNA wurden nicht weiter berücksichtigt, da diese relativ kurze Zeitreihen sehr ähnlich der Zeitreihe der Landesmessstelle M36370032 waren.

#### IV-3.2.4 Deckschichten der Auen und Vorländer

Die bodenhydraulische Charakterisierung der Deckschichten bildete einen Schwerpunkt im Projekt. Um ein verlässliches Prognosewerkzeug zu erstellen, war es Ziel des Projekts die Infiltration von den bei Hochwasser überstauten Auen und Vorländern durch die Deckschichten ins Grundwasser mittels eines physikalisch basierten Ansatzes, dem sogenannten Leakage-Ansatz (siehe Kap. IV-3.3.1, Gl. 2), zu quantifizieren. Dazu war es erforderlich, die Mächtigkeit und die bodenhydraulischen Eigenschaften der Deckschichten möglichst detailliert zu erfassen.

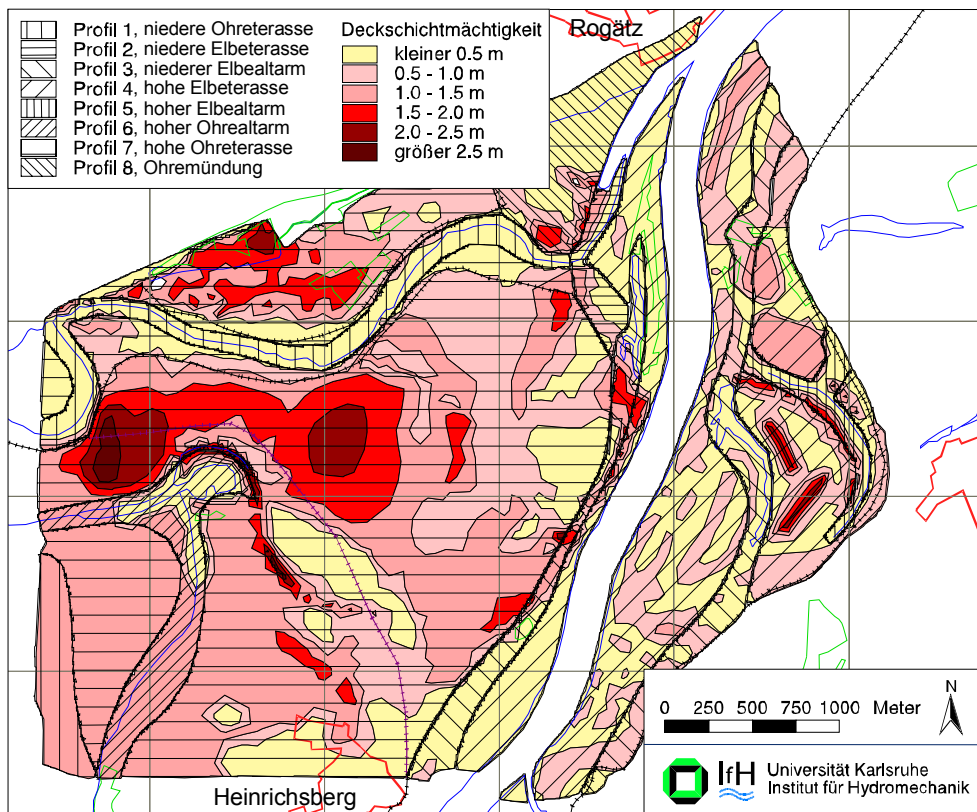


Abb. IV-3.3 Deckschichtmächtigkeiten und regionalisierte, repräsentative Bodenprofile im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes (ROMMEL 1998; MOHRLÖK & JIRKA 2001); ergänzende Darstellungen siehe auch *Anlagen-CD*.

Die räumlich differenzierte Deckschichtenmächtigkeit stand für den Bereich der möglichen Variante der Deichrückverlegung an der Ohremündung zur Verfügung (ROMMEL 1998). Für die Mächtigkeiten im östlichen Vorland wurde die in Abb. IV-3.3 dargestellte Abschätzung vorgenommen.

Zur Charakterisierung der bodenhydraulischen Eigenschaften der Deckschichten wurden für die Bodenprobennahme Standorte ausgewählt, die bedingt durch die Landschaftsentwicklung unterschiedliche Bodenprofile repräsentieren (vgl. hierzu SAUCKE & BRAUNS: s. Kap. II-1.1.5). Eine Regionalisierung dieser Bodenprofile wurde anhand der Topografie und der bekannten landschaftsgeschichtlichen Zusammenhänge vorgenommen (Abb. IV-3.3).

An den repräsentativen Bodenprofilen wurden in den einzelnen angetroffenen Schichten drei Parallelproben mit genormten Stechzylindern (100 cm<sup>3</sup>) entnommen. Neben der Kornverteilung wurden im Labor mittels Entwässerungsversuchen (MONTENEGRO 1995) für die Bodenproben die bodenhydraulischen Parameter nach VAN GENUCHTEN (1980), die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und die Porosität bestimmt (MOHRLOK & JIRKA 2001; MOHRLOK ET AL. 2000). Die Parameter der unterschiedlichen Bodenschichten der jeweiligen Profile dienten zusammen mit der Mächtigkeit dann zur Abschätzung der Leakageparameter (s. Kap. IV-3.3.2).

### IV-3.3 Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Zur quantitativen Erfassung der Grundwasserdynamik im Untersuchungsgebiet wurde ein numerisches Grundwasserströmungsmodell erstellt. Das Modell diente nach erfolgreicher Kalibrierung zur Beschreibung des Ist-Zustandes und Prognose der möglichen Veränderungen der Grundwasserdynamik bei Deichrückverlegung.

#### IV-3.3.1 Modellansätze

##### Grundwasserströmung

Der mathematischen Beschreibung der Grundwasserströmung im Untersuchungsgebiet wurde die instationäre, tiefengemittelte Differentialgleichung mit Quell- und Senkentermen für eine freie Grundwasser Oberfläche zugrunde gelegt, die sich aus

Kombination der Kontinuitätsgleichung mit dem Darcy-Gesetz ergibt:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mathbf{K}(h - z_B) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mathbf{K}(h - z_B) \frac{\partial h}{\partial y} \right) = n_e \frac{\partial h}{\partial t} - N \quad (1)$$

Dabei ist  $h(x,y,t)$  die Standrohrspiegelhöhe bzw. das hydraulische Potenzial,  $z_B(x,y)$  die Höhe der Aquiferbasis (beide sind definiert bzgl. eines konstanten Bezugsniveaus, z.B. ü.NN),  $\mathbf{K}(x,y)$  der hydraulische Leitfähigkeitstensor (anisotrop) des Aquifers,  $n_e(x,y)$  die effektive Porosität als speichernutzbares Hohlraumvolumen des Aquifers und  $N(x,y,t)$  die Grundwasserneubildungsrate (z.B. in mm/d) sowie lokale Entnahmen und Zugaben. Für die großräumige Betrachtung der Grundwasserströmung im Untersuchungsgebiet wurde eine tiefengemittelte Betrachtung gewählt, da die vertikalen Strömungskomponenten aufgrund der geringen wassererfüllten Mächtigkeit ( $h - z_B$ ) von 3 – 40 m im Vergleich zur horizontalen Erstreckung des betrachteten Aquifers von 5 – 10 km vernachlässigt werden konnten. Die Grundwasserdynamik wurde erst durch die Festlegung der Aquiferparameter,  $\mathbf{K}$ ,  $n_e$ ,  $z_B$ , und der Randbedingungen im Untersuchungsgebiet definiert.

##### Randbedingungen

Folgende Arten von Randbedingungen wurden zur Charakterisierung des Untersuchungsgebietes verwendet. Potenzialrandbedingungen wurden dort definiert, wo die Standrohrspiegelhöhen aus Grundwasserstandsganglinien bekannt waren. Vorgegebene Zufluss-/Abflussraten wurden mittels Flussrandbedingungen beschrieben. Für Gewässer mit gegebenen Wasserstandsganglinien, die in hydraulischem Kontakt mit dem Aquifer stehen, wurden sogenannte Leakagerandbedingungen verwendet. Die hydraulischen Eigenschaften der Schicht, die den hydraulischen Kontakt vermittelt, und die dort anliegende Potenzialdifferenz definieren die Austauschrate

$$q_L = \frac{K'}{d'} (h - h_L) = \lambda (h - h_L) \quad (2)$$

Dabei erfasst der Leakageparameter  $\lambda(x,y,t)$  die hydraulische Eigenschaft der Kontaktschicht und ergibt sich aus der hydraulischen Leitfähigkeit  $K'(x,y,t)$  und der Dicke  $d'(x,y,t)$  dieser Kontaktschicht. Die Potenzialdifferenz ( $h - h_L$ ) ist durch den Grundwasserstand  $h(x,y,t)$  und den Wasserstand im

angrenzenden Gewässer  $h_L(x,y,t)$  gegeben. Die Zeitabhängigkeit des Leakageparameters  $\lambda$  resultiert aus einer möglichen zeitlichen Veränderung der hydraulischen Leitfähigkeit  $K'$ , z.B. aufgrund von Kolmation, oder der Schichtdicke  $d'$ , z.B. aufgrund von Sedimentation oder Erosion.

### Finite Elemente Programm HFLOW\_HT

Diese Modellansätze sind in dem Finite-Elemente-Programm HFLOW\_HT implementiert, das eine Weiterentwicklung einer am Institut für Hydromechanik entwickelten Programmfamilie (HERRLING 1982) darstellt. Der Finite-Elemente-Ansatz bietet den Vorteil, geometrische Strukturen, wie z.B. die Topografie, sehr gut wieder zu geben. Das Modellgebiet ist in Elemente (hier: Dreiecke) unterteilt, die durch entsprechende Eckknoten beschrieben werden.

An diesen Knoten sind die Größen Aquiferbasis, Aquiferoberkante und hydraulisches Potenzial, d.h. Standrohrspiegelhöhe bzw. Grundwasserstand, definiert. Die Aquiferparameter sind elementweise definiert und innerhalb der jeweilige Elemente konstant. Quell- und Senkenterme sowie die Flussrandbedingungen können sehr flexibel punktweise (Knoten), linienweise (Elementkanten) oder flächig (Elemente) definiert werden. In gleicher Weise können auch die Leakage-Randbedingungen vorgegeben werden, wobei der Leakageparameter als flächenbezogene Größe dann entweder für das Element, die Elementkante mit einer anzugebenden Breite oder dem Knoten mit einer anzugebenden Fläche definiert wird. Die entsprechenden Zeitreihen für die Leakagerandbedingung werden jedoch an den Knoten vorgegeben. Die Quell- und Senkenterme und alle Arten von Randbedingungen sind als Zeitfunktionen vorzugeben.

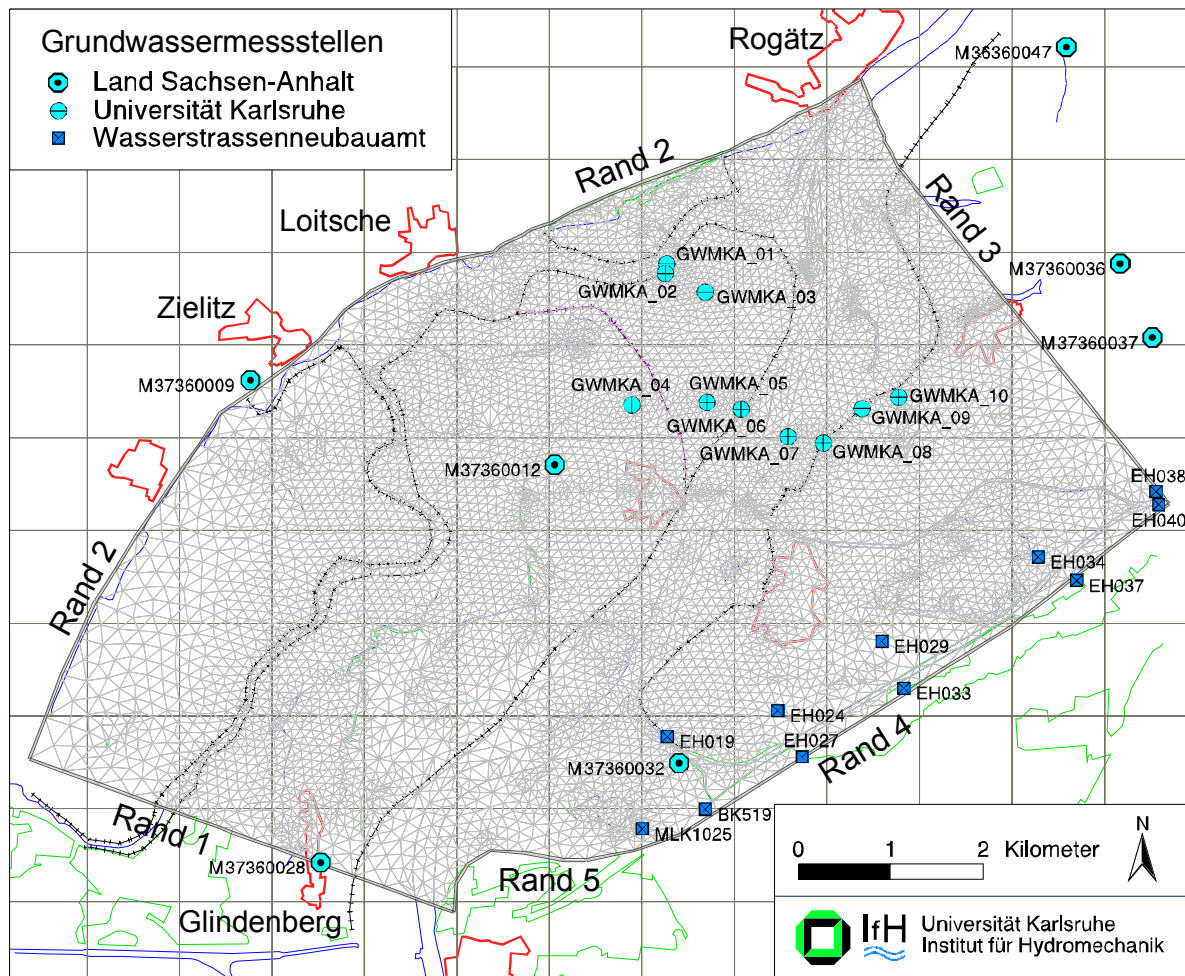


Abb. IV-3.4 Modellgebiet mit Diskretisierung und Grundwassermessstellen.



### IV-3.3.2 Modellerstellung

#### Modellgebiet

Als Modellgebiet wurde das Elbetal zwischen Glindenberg und Rogätz abgegrenzt (Abb. IV-3.4). Die Modellränder im NW (Rand 2) und SO (Rand 4, Rand 5) sind durch die hydrogeologischen Begrenzungen des Talaquifers gegeben, die mit den topografischen Talrändern übereinstimmen. An diesen Modellrändern finden Zuflüsse von den angrenzenden Grundwasserneubildungsgebieten ins Modellgebiet statt. Der Modellrand im SW (Rand 1) grenzt nördlich von Wolmirstedt an den Talrand im NW und verläuft geradlinig über Glindenberg nach SO bis an die Elbe, die dort an den Talrand im SO grenzt. Der Modellrand im NO (Rand 3) verbindet in nahezu gerader Linie den Talrand im NW bei Rogätz mit dem Elbe-Havel-Kanal bei Burg, dem Talrand im SO.

Die Diskretisierung des Modellgebiets (Abb. IV-3.4) erfolgte durch 7772 Knoten und 15402 Finite-Elemente (Dreiecke). Die Ausrichtung der Elementkanten wurde dabei an die Begrenzungen der größeren Gewässer (Elbe, Baggerseen, breite Altarme), der Verläufe kleinerer Gewässer (Ohre, Altarme), der Gebiete mit unterschiedlicher Grundwasserneubildung (Ackerland, Wald, bebauten Gebiete) und der Deichlinien (aktuelle, geplante) angelehnt. Aufgrund zusätzlicher lokaler Verdichtungen der Knoten, wie im Bereich der Grundwassermessstellen, variierten im Modellnetz die Abstände der Knoten bzw. die Längen der Elementkanten zwischen ca. 5 und 150 m.

#### Randbedingungen

An den Modellrändern wurden fünf unterschiedliche Randbedingungen differenziert (PFISTERER 1998), die sich aufgrund ihrer Art und/oder der zugrunde liegenden Daten unterschieden (Abb. IV-3.4). Rand 1 wurde als Potenzialrand anhand der Grundwasserstandsganglinie der Landesmessstelle M37360028 in Glindenberg, des Elbe- und Ohrewasserstandes am Modellrand definiert (s.u.). Die Zeitreihen für die Randbedingungen an den einzelnen Randknoten wurden zwischen Elbe und Ohre interpoliert und zwischen Ohre und Modellrand im NW extrapoliert.

Rand 2 wurde als Leakagerand auf Basis der Grundwasserstandsganglinie der Landesmessstelle

M37360009 bei Zielitz definiert, die in dem an das Modellgebiet angrenzenden Aquifer einer Sanderfläche liegt. Der Leakageparameter  $\lambda = 10^{-8}$  1/s wurde ermittelt über die hydraulische Leitfähigkeit dieses Aquifers  $K' = 10^{-6}$  m/s und der Entfernung der Messstelle zum Modellrand  $d' = 100$  m. Eine Differenzierung der Zuflüsse über den Rand 2 erfolgte durch Variation des Leakageparameters in Abhängigkeit der aus der HK50 Wolmirstedt/Burg zu entnehmenden, hydrogeologischen Gegebenheiten.

Rand 3 wurde wiederum als Potenzialrand definiert. Zur Interpolation der Zeitreihen an den Randknoten standen die Ganglinien des Elbepegels Rogätz, der Landesmessstellen M36360047, M37360036 und M37360037 sowie vom Rand 4 (s.u.) zur Verfügung (Abb. IV-3.4). Die Ganglinien der Landesmessstellen wurden unter Verwendung eines mittleren hydraulischen Gradienten von 0.015 % an den Modellrand projiziert.

Eine Analyse der Ganglinien der Messstellen des WNA und der Landesmessstelle M37360032 ergab, dass entlang des Randes 4 (Elbe-Havel-Kanal), die Randbedingung an allen Randknoten durch die langjährige Zeitreihe der Landesmessstelle festgelegt werden konnte.

Rand 5 wurde als Zuflussrand definiert. Die mittlere Zuflussrate von ca. 11 l/s/km wurde aus der mittleren abströmenden Grundwasserneubildung nach JORDAN & WEDER (1995) aus dem Fläming zu diesem Modellrand abgeschätzt. Die zeitliche Variation dieses Zuflusses wurde durch Korrelation mit der Ganglinie der Landesmessstelle M37360009 unter Annahme ähnlicher Grundwasserneubildungsraten im westlichen wie östlichen an das Modellgebiet angrenzenden Gebiet abgeleitet.

#### Fließgewässer

Die Fließgewässer Elbe und Ohre sind durch Leakagerandbedingungen in das Modell eingebunden. Für die Elbe als breites Fließgewässer wurde eine flächige (elementweise) Leakagerandbedingung definiert. Die Festlegung der Zeitreihen für die Knoten entlang des Flusslaufs erfolgte durch Interpolation aus den Zeitreihen der verfügbaren Elbepegel, so dass die Wasserstände zwischen einzelnen Abschnitten um ca. 4 cm differierten. Bei der Kalibrierung wurde ein einheitlicher Leakageparameter ermittelt (s. Kap. IV-3.4.1).

Die Ohre hingegen wurde durch Elementkanten mit Leakagerandbedingung repräsentiert. Dies erforderte die zusätzliche Angabe einer Breite der Ohre, die entlang des Verlaufs im Modellgebiet einheitlich mit 15 m angenommen wurde. Der Leakageparameter wurde ebenfalls einheitlich bei der Kalibrierung ermittelt (s. Kap. IV-3.4.1). Die Wasserstände der Knoten an der Ohre wurden unter Berücksichtigung eines Rückstaus von der Elbe bei Hochwasser aus den Zeitreihen des Ohrepegels Wolmirstedt und des Elbepegels Rogätz interpoliert. In der Ohre wurde bis zum Rückstau Punkt Normalabfluss mit einem Wasserspiegelgefälle von 0.035 % angenommen. Die Entfernung des Rückstau Punktes von der Ohremündung wurde in Abhängigkeit des Wasserspiegels am Elbepegel Rogätz festgelegt (FRIST 1999).

Die hydraulische Wirkung der stehenden Gewässer im Untersuchungsgebiet kann generell als dämpfende auf die Grundwasserdynamik charakterisiert werden. Diese konnte jedoch im numerischen Modell aufgrund mangelnder Daten über die Wasserstände keine Berücksichtigung finden. Auch die Verdunstung von den relativ großen Wasserflächen der stehenden Gewässer musste ebenfalls mangels Daten vernachlässigt werden.

### Überstaute Vorlandbereiche

Eine wesentliche Aufgabe des Projekts bestand darin, für die hydraulische Anbindung der bei Hochwasser überstaute Vorländer und Auen an das Grundwasser einen physikalisch basierten Ansatz zu entwickeln. Dies war Voraussetzung für die Entwicklung eines prognosefähigen Modellwerkzeugs. Dazu wurde der Leakageansatz als praktikabler Ansatz bei großräumiger Betrachtung gewählt, wobei zur Berücksichtigung der bodenhydraulischen Eigenschaften der Deckschichten und zeitlich variablen Bodenfeuchte die Leakageparameter zeitabhängig und räumlich differenziert zu definieren waren.

Die Zeitreihen der Wasserstände in den Vorländern wurden von den Elbewasserständen direkt quer zum Flusslauf in die Vorländer übertragen. Die Wirksamkeit der Leakagerandbedingung bezogen auf die Hochwasser-/Überflutungsperiode wurde durch die Zeitabhängigkeit der Leakageparameter gesteuert. Eine Überflutungsperiode wurde mangels Daten aus Abflussmodellierungen wiederum einheitlich für das

Modellgebiet angenommen, wenn am Elbepegel Niegripp die Marke von 40.8 m ü.NN überschritten war.

Zur räumlichen Differenzierung der Leakageparameter wurden für die 8 repräsentativen Bodenprofile die bodenhydraulischen Parameter der einzelnen Schichten dieser Bodenprofile im Labor ermittelt (MOHRLOK & JIRKA 2001). Die Bestimmung der Leakageparameter erfolgte über die numerische Modellierung der Versickerung für die einzelnen Profile mit unterschiedlichen Profiltiefen und Einstauhöhen (MOHRLOK ET AL. 2000). Für jedes Profil wurden mehrere Klassen von Profiltiefen betrachtet und mit dem Programm SWMS (SIMUNEK ET AL. 1994) die Versickerungsdynamik  $q_i(t)$  bei Überstau mit einer Wassertiefe von 10 cm berechnet (Tab. IV-3.1). Jeweils für die im Gelände aufgenommenen Profiltiefen wurden zusätzlich Berechnungen mit Überstauhöhen von 1 und 30 cm durchgeführt (Tab. IV-3.1). Für alle Berechnungen war der Grundwasserspiegel untere Randbedingung am Profil und Ausgangssituation die Wassergehaltsverteilung, die sich im jeweiligen Profil nach einmonatiger Austrocknung einstellen würde.

Der Durchbruch der Versickerung  $q_i(t)$  ereignete sich innerhalb des ersten Tages nach Beginn des Überstaus und stellte sich in fast allen Fällen innerhalb weniger Minuten ein (Abb. IV-3.5). Aufgrund dieses sehr kurzfristigen Durchbruchs wurde als Zeitfunktion für den jeweiligen Leakageparameter

$$\lambda_i(t) = \frac{q_i(t)}{\Delta h_i} \quad (3)$$

eine einfache Rechteckfunktion gewählt, die während der Überflutungsperioden (s.o.) definiert war (Tab. IV-3.1). Da nach Durchbruch der Versickerung alle betrachteten Profile nahezu gesättigt waren, konnte der Leakageparameter eines jeden Bodenprofils  $\lambda'_i$  aus den gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten  $K_{s,ij}$  und Mächtigkeiten  $d_{ij}$  der einzelnen Schichten, bzw. der effektiven gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit  $K_{s,eff,i}$  und Mächtigkeit  $L_i$  des Profils, abgeschätzt werden (Tab. IV-3.1)

$$\lambda'_i = \frac{1}{\sum_j \frac{d_{ij}}{K_{s,ij}}} = \frac{K_{s,eff,i}}{L_i} \quad (4)$$

**Tab. IV-3.1** Leakageparameter der einzelnen Bodenprofile (ergänzende Darstellungen hierzu siehe auch *Anlagen-CD*): $\lambda_i$  aus der numerischen Simulation der Versickerungsdynamik (Gl. 3), $\lambda'_i$  aus der effektiven gesättigten hydraul. Leitfähigkeit und Profiltiefe (Gl. 4).

Profil	Profiltiefe L [cm]	Überstau-Wassertiefe [cm]	Potenzial-differenz $\Delta h$ [cm]	spez. Sickerrate $q_i$ [cm/s]	Leakageparameter $\lambda_i$ (Gl. 3) [1/s]	eff. gesättigte hydraulische Leitfähigkeit $K_{s,eff}$ [cm/s]	Leakageparameter $\lambda'_i$ (Gl. 4) [1/s]
1	25	10	35	$4.78 \times 10^{-4}$	$1.37 \times 10^{-5}$	$5.62 \times 10^{-4}$	$2.25 \times 10^{-5}$
	75	10	85	$7.54 \times 10^{-4}$	$8.87 \times 10^{-6}$	$9.27 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-5}$
	135	1	136	$5.40 \times 10^{-4}$	$3.97 \times 10^{-6}$	$7.56 \times 10^{-4}$	$5.60 \times 10^{-6}$
	135	10	145	$7.28 \times 10^{-4}$	$5.02 \times 10^{-6}$	$7.56 \times 10^{-4}$	$5.60 \times 10^{-6}$
	135	30	165	$9.28 \times 10^{-4}$	$5.62 \times 10^{-6}$	$7.56 \times 10^{-4}$	$5.60 \times 10^{-6}$
	175	10	185	$7.38 \times 10^{-4}$	$3.99 \times 10^{-6}$	$7.19 \times 10^{-4}$	$4.11 \times 10^{-6}$
2	25	10	35	$3.52 \times 10^{-3}$	$1.01 \times 10^{-4}$	$2.52 \times 10^{-3}$	$1.01 \times 10^{-4}$
	75	10	85	$1.48 \times 10^{-4}$	$1.74 \times 10^{-6}$	$1.28 \times 10^{-4}$	$1.70 \times 10^{-6}$
	125	10	135	$1.17 \times 10^{-4}$	$8.67 \times 10^{-7}$	$1.07 \times 10^{-4}$	$8.55 \times 10^{-7}$
	160	1	161	$1.03 \times 10^{-4}$	$6.40 \times 10^{-7}$	$1.01 \times 10^{-4}$	$6.34 \times 10^{-7}$
	160	10	170	$1.09 \times 10^{-4}$	$6.41 \times 10^{-7}$	$1.01 \times 10^{-4}$	$6.34 \times 10^{-7}$
	160	30	190	$1.22 \times 10^{-4}$	$6.42 \times 10^{-7}$	$1.01 \times 10^{-4}$	$6.34 \times 10^{-7}$
3	25	10	35	$5.42 \times 10^{-3}$	$1.55 \times 10^{-4}$	$3.87 \times 10^{-3}$	$1.55 \times 10^{-4}$
	75	10	85	$5.18 \times 10^{-5}$	$6.09 \times 10^{-7}$	$4.55 \times 10^{-5}$	$6.06 \times 10^{-7}$
	125	10	135	$3.86 \times 10^{-5}$	$2.86 \times 10^{-7}$	$3.60 \times 10^{-5}$	$2.88 \times 10^{-7}$
	140	1	141	$3.66 \times 10^{-5}$	$2.60 \times 10^{-7}$	$3.97 \times 10^{-5}$	$2.84 \times 10^{-7}$
	140	10	150	$3.98 \times 10^{-5}$	$2.65 \times 10^{-7}$	$3.97 \times 10^{-5}$	$2.84 \times 10^{-7}$
	140	30	170	$4.56 \times 10^{-5}$	$2.68 \times 10^{-7}$	$3.97 \times 10^{-5}$	$2.84 \times 10^{-7}$
4	25	10	35	$6.64 \times 10^{-4}$	$1.90 \times 10^{-5}$	$4.74 \times 10^{-4}$	$1.90 \times 10^{-5}$
	75	10	85	$5.48 \times 10^{-4}$	$6.45 \times 10^{-6}$	$4.84 \times 10^{-4}$	$6.45 \times 10^{-6}$
	125	10	135	$3.50 \times 10^{-4}$	$2.59 \times 10^{-6}$	$3.21 \times 10^{-4}$	$2.57 \times 10^{-6}$
	180	1	181	$2.18 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-6}$	$2.16 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-6}$
	180	10	190	$2.30 \times 10^{-4}$	$1.21 \times 10^{-6}$	$2.16 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-6}$
	180	30	210	$2.54 \times 10^{-4}$	$1.21 \times 10^{-6}$	$2.16 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-6}$
5	25	10	35	$1.55 \times 10^{-3}$	$4.44 \times 10^{-5}$	$1.11 \times 10^{-3}$	$4.44 \times 10^{-5}$
	60	1	61	$1.15 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-5}$	$1.13 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-5}$
	60	10	70	$1.32 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-5}$	$1.13 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-5}$
	60	30	90	$1.70 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-5}$	$1.13 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-5}$
	125	10	135	$1.21 \times 10^{-3}$	$8.96 \times 10^{-6}$	$1.12 \times 10^{-3}$	$8.96 \times 10^{-6}$
	175	10	185	$1.18 \times 10^{-3}$	$6.39 \times 10^{-6}$	$1.12 \times 10^{-3}$	$6.39 \times 10^{-6}$
6	25	10	35	$6.48 \times 10^{-4}$	$1.85 \times 10^{-5}$	$4.63 \times 10^{-4}$	$1.85 \times 10^{-5}$
	70	1	71	$1.69 \times 10^{-4}$	$2.38 \times 10^{-6}$	$1.64 \times 10^{-4}$	$2.34 \times 10^{-6}$
	70	10	80	$1.90 \times 10^{-4}$	$2.38 \times 10^{-6}$	$1.64 \times 10^{-4}$	$2.34 \times 10^{-6}$
	70	30	100	$2.38 \times 10^{-4}$	$2.38 \times 10^{-6}$	$1.64 \times 10^{-4}$	$2.34 \times 10^{-6}$
	125	10	135	$2.50 \times 10^{-4}$	$1.85 \times 10^{-6}$	$2.29 \times 10^{-4}$	$1.83 \times 10^{-6}$
	175	10	185	$2.86 \times 10^{-4}$	$1.55 \times 10^{-6}$	$2.67 \times 10^{-4}$	$1.53 \times 10^{-6}$
7	25	10	35	$6.60 \times 10^{-4}$	$1.89 \times 10^{-5}$	$4.71 \times 10^{-4}$	$1.88 \times 10^{-5}$
	75	1	76	$4.22 \times 10^{-4}$	$5.55 \times 10^{-6}$	$4.17 \times 10^{-4}$	$5.56 \times 10^{-6}$
	75	10	85	$4.72 \times 10^{-4}$	$5.55 \times 10^{-6}$	$4.17 \times 10^{-4}$	$5.56 \times 10^{-6}$
	75	30	105	$5.84 \times 10^{-4}$	$5.56 \times 10^{-6}$	$4.17 \times 10^{-4}$	$5.56 \times 10^{-6}$
	125	10	135	$4.44 \times 10^{-4}$	$3.29 \times 10^{-6}$	$4.11 \times 10^{-4}$	$3.29 \times 10^{-6}$
	175	10	185	$4.46 \times 10^{-4}$	$2.41 \times 10^{-6}$	$4.53 \times 10^{-4}$	$2.59 \times 10^{-6}$
	225	10	235	$4.46 \times 10^{-4}$	$1.90 \times 10^{-6}$	$4.82 \times 10^{-4}$	$2.14 \times 10^{-6}$
	275	10	285	$4.46 \times 10^{-4}$	$1.56 \times 10^{-6}$	$5.02 \times 10^{-4}$	$1.82 \times 10^{-6}$
8	25	10	35	$8.10 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{-5}$	$5.88 \times 10^{-4}$	$2.35 \times 10^{-5}$
	75	10	85	$3.26 \times 10^{-4}$	$3.84 \times 10^{-6}$	$2.82 \times 10^{-4}$	$3.76 \times 10^{-6}$
	125	10	135	$2.74 \times 10^{-4}$	$2.03 \times 10^{-6}$	$2.84 \times 10^{-4}$	$2.27 \times 10^{-6}$
	160	1	161	$2.50 \times 10^{-4}$	$1.55 \times 10^{-6}$	$3.21 \times 10^{-4}$	$2.01 \times 10^{-6}$
	160	10	170	$2.74 \times 10^{-4}$	$1.61 \times 10^{-6}$	$3.21 \times 10^{-4}$	$2.01 \times 10^{-6}$
	160	30	190	$3.24 \times 10^{-4}$	$1.70 \times 10^{-6}$	$3.21 \times 10^{-4}$	$2.01 \times 10^{-6}$

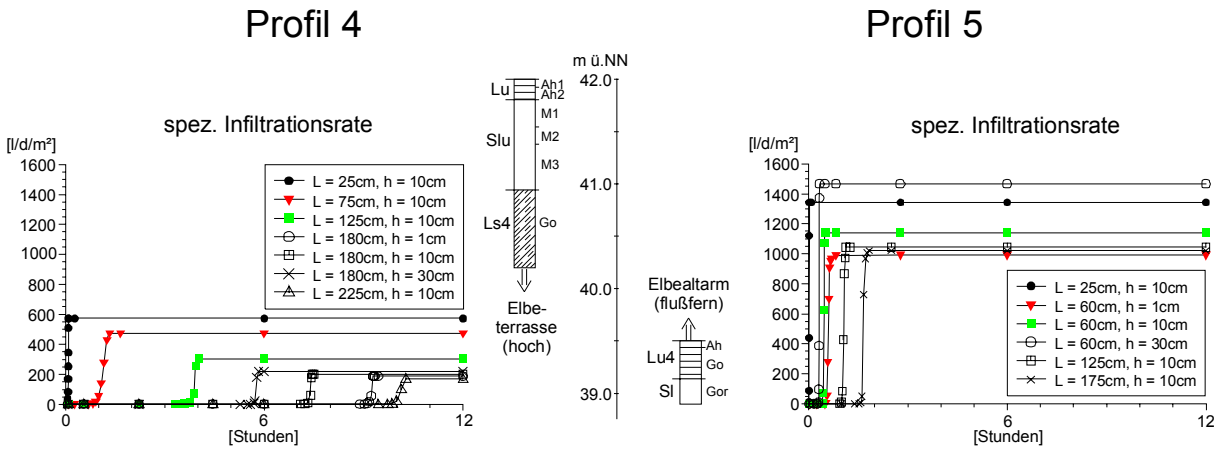


Abb. IV-3.5 Versickerungsdynamik  $q(t)$  an zwei unterschiedlichen Bodenprofilen bei verschiedenen Profiltiefen  $L_i$  und verschiedenen Überstauhöhen  $h$  (Darstellungen zu weiteren Profilen siehe *Anlagen-CD*).

Der Vergleich der beiden unterschiedlich ermittelten Werte des Leakageparameters  $\lambda_i(t)$  und  $\lambda'_i$  ergab geringe Unterschiede, so dass bei praxisrelevanten Fragestellungen die Bestimmung des Aufbaus der Bodenprofile und der hydraulischen Leitfähigkeit der einzelnen Schichten für die Erfassung der Versickerungsdynamik bei Überstau ausreicht.

Die Ermittlung der räumlichen Verteilung der Leakageparameter im Bereich des Deichrückverlegungsgebiets (Abb. IV-3.6) erfolgte auf Basis der Regionalisierung der Bodenprofile und Klassifizierung der Deckschichtenmächtigkeiten (Abb. IV-3.3) im gesamten nördlichen Teil des Modellgebiets. Dabei wurden die ermittelten Werte der Leakageparameter für die einzelnen Bodenprofile mit unterschiedlichen Profiltiefen in wenigen Klassen zusammengefasst. Wie erwartet, besitzen die Flutrinnen mit geringer Auelehmächtigkeit die größten Werte und damit den besten hydraulischen Anschluss an das Grundwasser ( $\lambda = 0.1 \dots 1.0 \times 10^{-4}$  1/s). Im Gegensatz dazu besitzen die mächtigen Auelehmschichten dazwischen einen um mehrere Größenordnungen geringeren Leakageparameter ( $\lambda = 0.5 \dots 5.0 \times 10^{-6}$  1/s) und damit ein Großteil der Vorländer eine geringe Infiltrationskapazität.

**Grundwasserneubildung**

Die Grundwasserneubildungsraten (s. Kap. IV-3.2.3) wurden entsprechend der Landnutzung im Modellgebiet differenziert (Abb. IV-3.1). Es wurde zwischen Bebauung mit stark eingeschränkter, Gewässerflächen ohne, Wald und landwirtschaftlich

genutzter Fläche mit der ermittelten Grundwasserneubildung unterschieden.

**Wasserentnahmen**

Im Modellgebiet liegt nördlich von Heinrichsberg landesseitig des Deiches links der Elbe die Brauchwasserentnahme des Kaliwerks Zielitz. Die Förderrate wurde mit der im Wasserrecht genehmigten Entnahmemenge von ca. 16 l/s als konstant angenommen, da für den Modellzeitraum keine detaillierten Daten zur Verfügung standen.

**Aquiferparameter**

Für das Modellgebiet wurde ein tiefengemittelter Ansatz mit freier Grundwasseroberfläche gewählt (vgl. Kap. IV-3.3.1). Somit waren die Lage der Aquiferbasis  $z_B$ , die hydraulische Leitfähigkeit  $K$  und der Speicherkoeffizient  $S$  vorzugeben. Die Informationen zur Lage der Aquiferbasis  $z_B(x,y)$  wurden aus der HK50 Wolmirstedt/Burg abgeschätzt und an die Knoten des Finite-Elemente-Netzes interpoliert. Die hydraulische Leitfähigkeit  $K$  wurden im Modellgebiet als homogen und isotrop angenommen. Der Wert wurde über die Kalibrierung ermittelt (s. Kap. IV-3.4.1). Für den hier vorliegenden Fall eines ungespannten Aquifers wurde als Speicherkoeffizient eine ebenfalls homogene entwässerbare Porosität  $n_e$  kalibriert (s. Kap. IV-3.4.1).

### Deichrückverlegung

Für ein Szenario der Deichrückverlegung mussten mit dem oben beschriebenen Vorgehen nur noch die Infiltrationsflächen (Leakage) definiert werden, um die Vorländer bei Deichrückverlegung erweitert werden. Die Leakageparameter wurden daher für die

gesamten Deckschichten im nördlichen Untersuchungsgebiet erhoben und nicht nur im aktuellen Vorlandbereich. Die Wasserstände in den erweiterten Vorländern wurden wie oben beschrieben festgelegt.

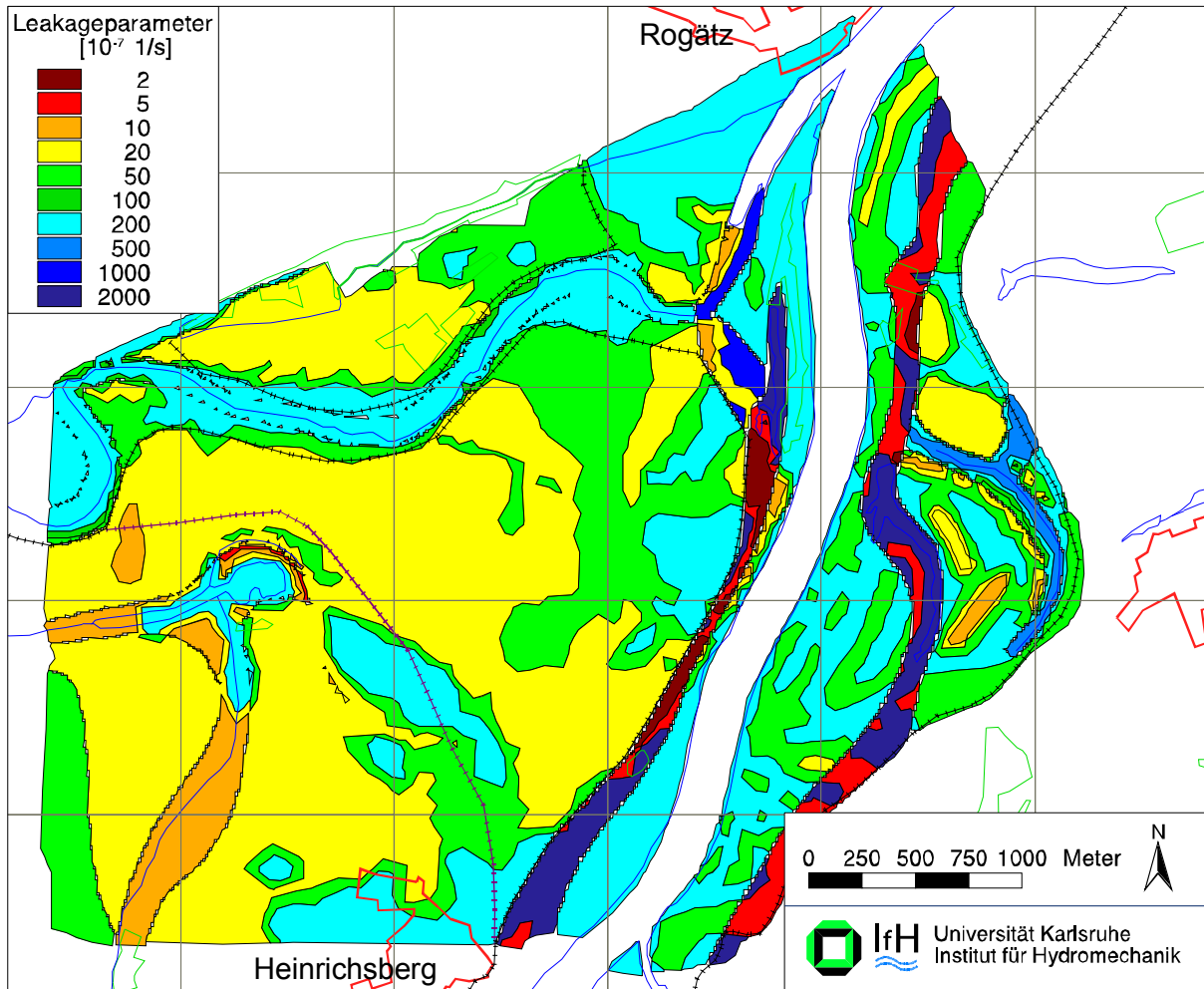


Abb. IV-3.6 Leakageparameter der Deckschichten im Deichrückverlegungsgebiet (zum Vergleich siehe *Anlagen-CD*).

## IV-3.4 Simulationsergebnisse

### IV-3.4.1 Kalibrierung

Ziel der Kalibrierung des instationären Grundwassermodells war die Ermittlung der Werte für die hydraulischen Aquiferparameter  $K$  und  $n_e$  sowie die Leakageparameter zur hydraulischen Anbindung der Ohre und Elbe an das Grundwasser. Die Kalibrierung wurde für den Zeitraum von November 1997 bis Oktober 1999 auf Basis der gemessenen Ganglinien der Grundwasserstände an den Messstellen GWMKA\_01 – GWMKA\_10 und der Landesmessstelle M37360012 durchgeführt.

Durch die Kalibrierung konnten die Ganglinien aller Messstellen gut nachgebildet werden. Die mittleren Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Ganglinien lagen bei 15 cm. Es wurde die zunehmende Dämpfung mit zunehmendem Abstand der Messstellen von der Elbe erfasst. Insbesondere konnte der Einfluss der Infiltration von den bei Hochwasser überstauten Vorländern gut nachgebildet werden (Abb. IV-3.7).

Bei der Kalibrierung wurde für das Modellgebiet eine homogene hydraulische Leitfähigkeit  $K = 8.0 \times 10^{-4}$  m/s und eine homogene entwässerbare Porosität  $n_e = 0.09$  ermittelt. Diese Werte sind vergleichbar mit Werten wie sie aus der HK50 Wolmirstedt/Burg und Geländeuntersuchungen (SAUCKE & BRAUNS: Kap. IV-2) bekannt sind. Die hydraulische Anbindung der Elbe und Ohre wurde im Wesentlichen durch die Anpassung der Ganglinien von den Messstellen GWMKA\_01 an der Ohre und GWMKA\_07 an der Elbe ermittelt und jeweils mittels eines ebenfalls einheitlichen Leakageparameters,  $\lambda_{\text{Elbe}} = 2.5 \times 10^{-5}$  1/s bzw.  $\lambda_{\text{Ohre}} = 2.0 \times 10^{-5}$  1/s, beschrieben. Die Werte dieser Leakageparameter aus der Kalibrierung stimmen gut mit Abschätzungen überein unter Annahme einer 1 – 2 m mächtigen Gewässersohle aus Mittelsanden für die Elbe und einer 0.5 – 1 m mächtigen Gewässersohle aus Fein- bis Mittelsanden für die Ohre. FRIST (1999) ermittelte die Sensitivitäten der einzelnen Parameter auf die Simulationsergebnisse.

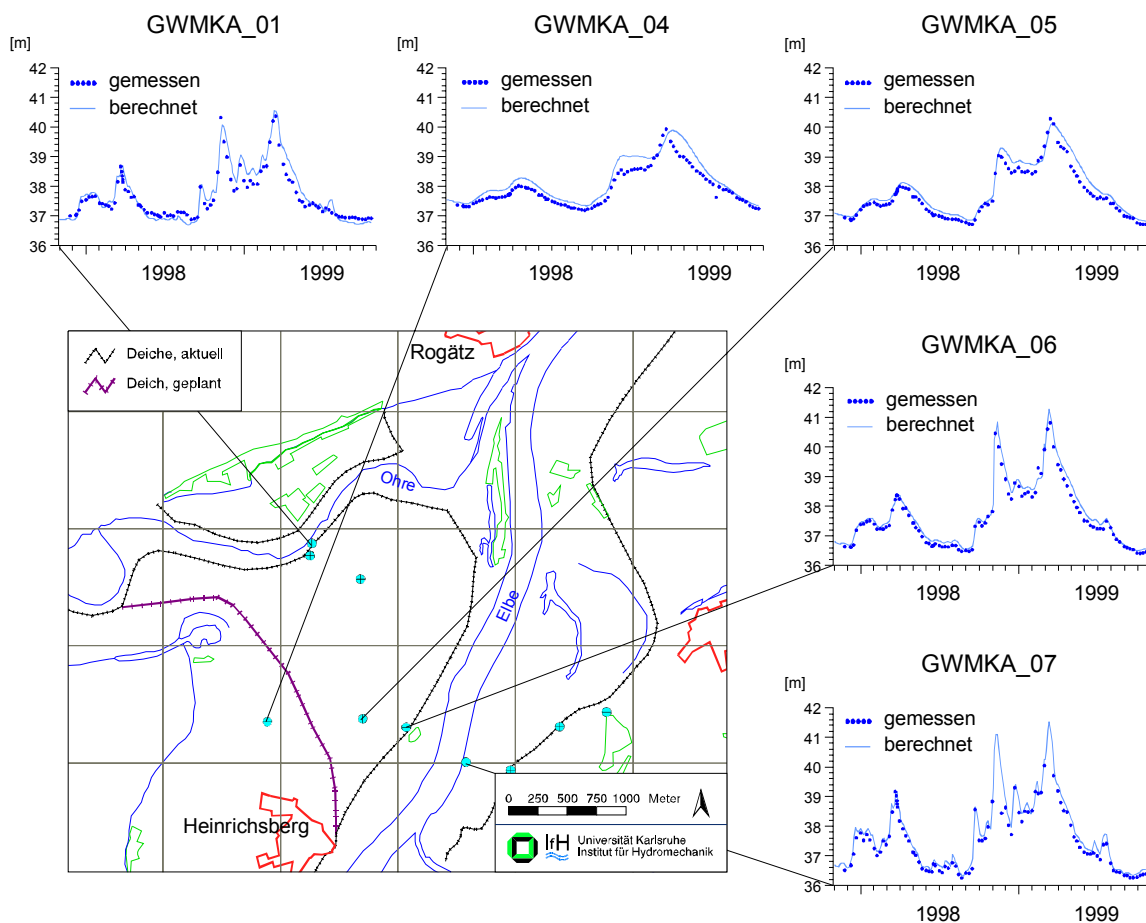


Abb. IV-3.7 Gemessene und mit dem kalibrierten Modell berechnete Grundwasserstandsganglinien an den Messstellen GWMKA\_01, GWMKA\_04 – GWMKA\_07 (zum Vergleich siehe *Anlagen-CD*).

#### IV-3.4.2 Ist-Zustand der Grundwasserdynamik

Mit dem kalibrierten, instationären Grundwasserströmungsmodell wurde für den Zeitraum von November 1985 bis Oktober 1999 der Ist-Zustand der Grundwasserdynamik ermittelt. Diese Berechnung wurde mit 3-Tages-Zeitschritten durchgeführt, um die Rechenzeit und Datenmenge zu beschränken ohne damit an Genauigkeit zu verlieren. Zur Auswertung wurden die berechneten Ganglinien an allen Knoten des Finite-Elemente-Netzes herangezogen. Zur Darstellung der Grundwasserdynamik anhand von Ganglinien wurden exemplarisch die ersten drei Jahre des Berechnungszeitraums, November 1985 bis Oktober 1988 gewählt.

In einem Profil senkrecht zum Flusslauf der Elbe zeigt sich die abnehmende Dynamik der Grund-

wasserstände bedingt durch den Einfluss des Elbewasserstandes (Abb. IV-3.8). Anhand der Ganglinie im Vorland konnte mit Hilfe der Überflutungswasserstände (Abb. IV-3.8) eine mittlere Infiltrationsrate von etwa  $5 \text{ l/d/m}^2$  ermittelt werden. Während der Überflutungsperioden lagen an der betrachteten Stelle die Druckspiegel über der Geländeoberkante.

Diese Dynamik der Grundwasserstände prägte direkt den Grundwasserabstrom. So erfolgte im betrachteten Profil (Abb. IV-3.8) bei Niedrig- bzw. Mittelwasserabflüssen der Grundwasserabstrom von etwa  $50 \text{ l/d/m}^2$  zur Elbe (Abb. IV-3.9). Bei Hochwasser hingegen drehte sich die Strömungsrichtung um beinahe  $180^\circ$  von der Elbe weg und der Grundwasserabstrom erhöhte sich auf etwa  $400 \text{ l/d/m}^2$  (Abb. IV-3.9).

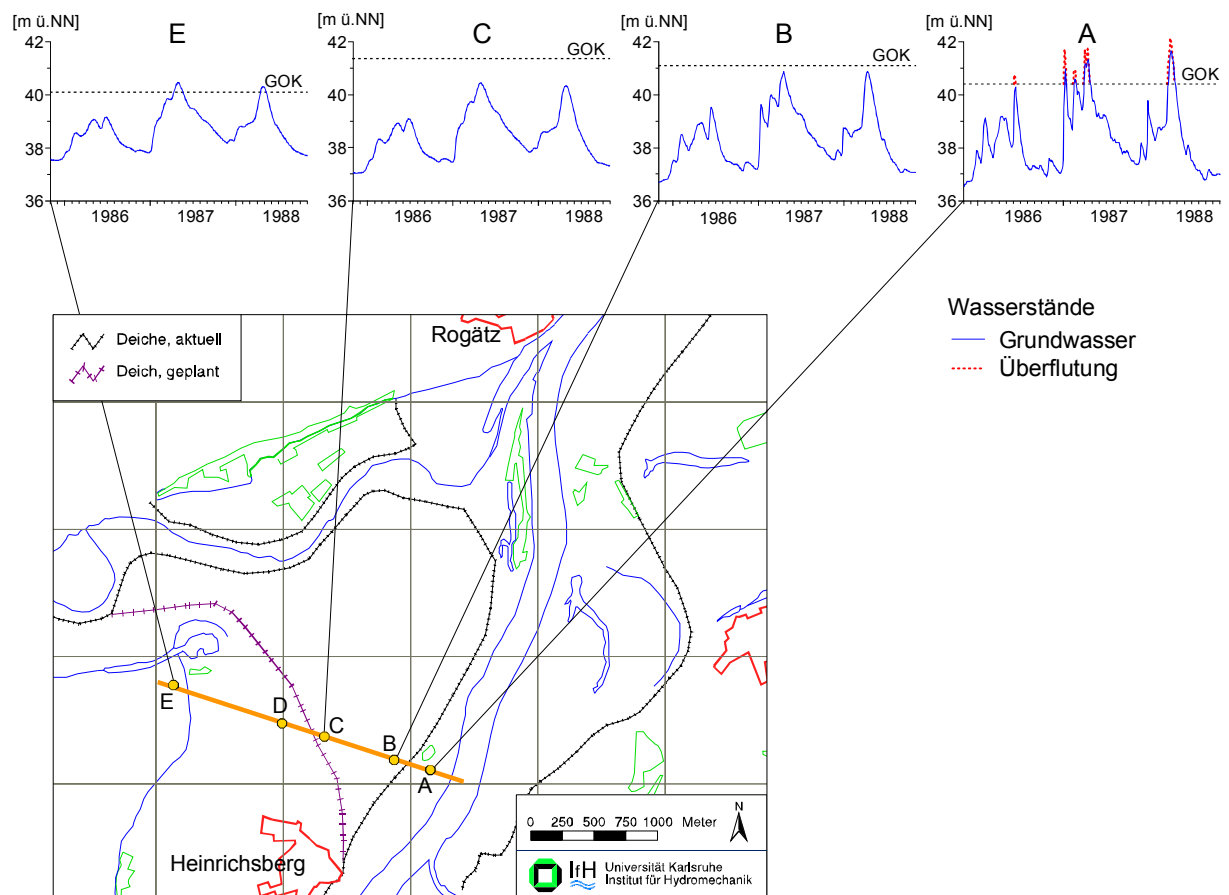


Abb. IV-3.8 Berechnete Grundwasserdynamik (Ist-Zustand) in einem Profil senkrecht zur Elbe; im Vorland mit Ganglinie der Überflutung (ergänzende Darstellungen der Grundwasserstandsganglinien im Profil siehe auch *Anlagen-CD*).

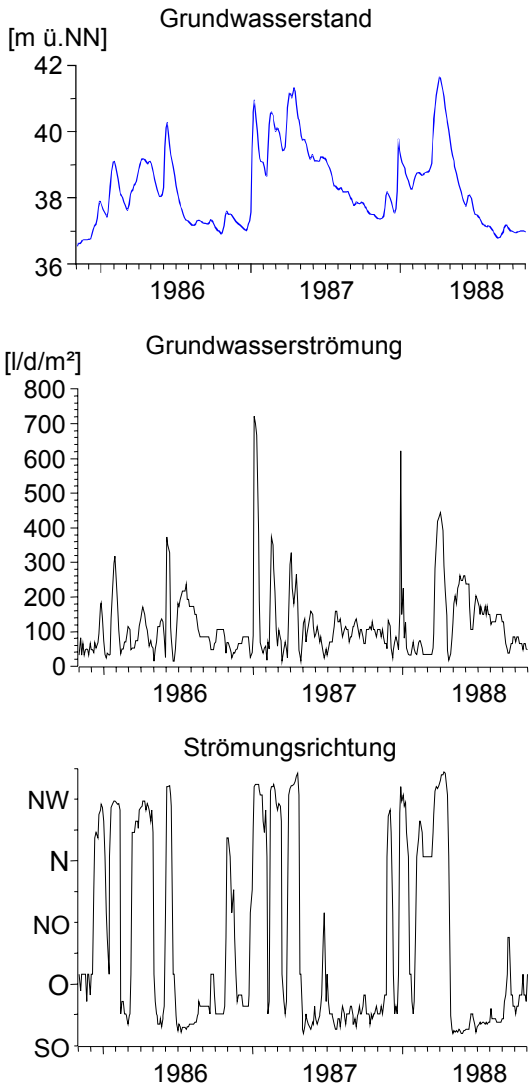


Abb. IV-3.9 Zeitliche Variabilität der Grundwasserströmung am Punkt A im Profil quer zur Elbe (vgl. Abb. IV-3.8).

### IV-3.4.3 Grundwasserdynamik bei Deichrückverlegung

Für ein mögliches Szenario der Deichrückverlegung (Abb. IV-3.10) wurde über denselben Zeitraum wie für den Ist-Zustand die Grundwasserdynamik simuliert. Dieses Vorgehen ermöglichte einen direkten Vergleich, wenn auch keine echte Prognose, denn es wurden keine Zeitreihen der Randbedingungen für die Zukunft generiert. Für das Szenario der Deichrückverlegung wurde ausschließlich der Bereich mit den bei Hochwasser überfluteten Vorländern erweitert (Abb. IV-3.10). In den aktuellen Vorländern änderte sich die Grundwasserdynamik nur unbedeutend.

Die wesentliche Veränderung der Grundwasserströmung erfolgte sowohl im Bereich der aktuellen als auch der neuen Deichlinie (Abb. IV-3.11). Entlang der Deiche verläuft der Rand der Infiltrationsbereiche, an dem die größten Unterschiede der Standrohrspiegelhöhen vorliegen. Dort treten daher bei Hochwasser neben den Uferbereichen der Elbe und Ohre die größten Strömungsgeschwindigkeiten auf. Der Vergleich der Grundwassersimulationen ergab deutlich geringere Geschwindigkeiten entlang der neuen Deichlinie bei Deichrückverlegung als entlang der aktuellen Deichlinie beim Ist-Zustand, da an der aktuellen Deichlinie eine durch große Leakageparameter gekennzeichnete Flutrinne liegt, hingegen der neue Deich im Bereich einer mächtigen Deckschicht mit geringem Leakageparameter geplant ist (vgl. Abb. IV-3.6).

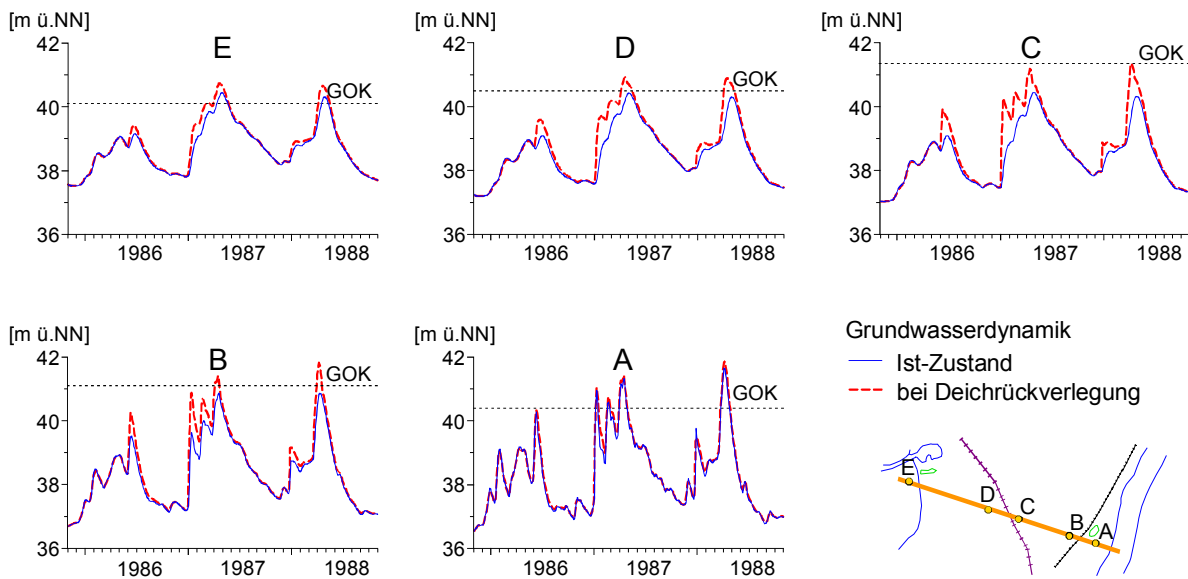


Abb. IV-3.10 Berechnete Grundwasserdynamik im Profil (vgl. Abb. IV-3.8) senkrecht zur Elbe; Ist-Zustand und bei Deichrückverlegung.



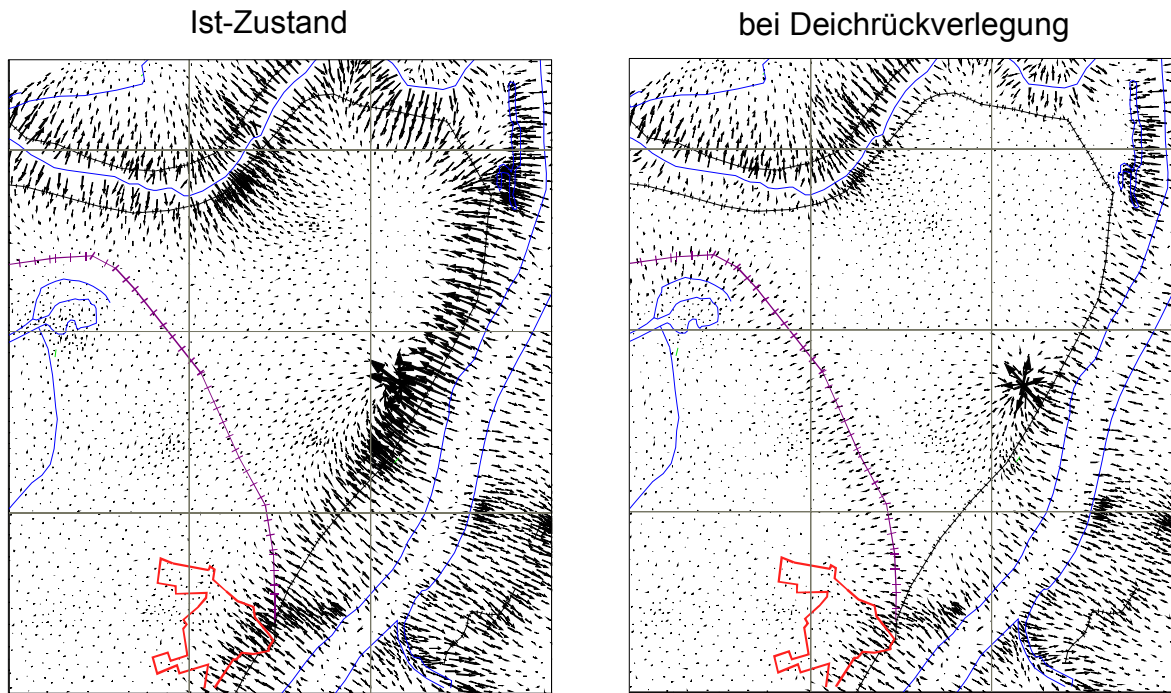


Abb. IV-3.11 Strömungsfeld bei Hochwasser (4.6.1986) für den Ist-Zustand und bei Deichrückverlegung.

Weiterhin kann bei Deichrückverlegung ein Rückgang des Qualmwasserandrangs im Deichrückverlegungsgebiet entlang der aktuellen Deichlinien erwartet werden und der Qualmwasserandrang entlang des neuen Deiches wird nicht die Ausmaße erreichen, wie im Bereich des aktuellen Deiches. Im Strömungsfeld gut zu erkennen ist auch der lokale Einfluss der Brauchwasserentnahme des Kaliwerks Zielitz im Bereich des westlichen Elbedeichs (Abb. IV-3.11).

## IV-3.5 Statistische Auswertungen

### IV-3.5.1 Statistische Größen

Um eine flächenhafte Auswertung der Simulationsergebnisse durchführen zu können, welche die mehrjährige Grundwasserdynamik repräsentiert, wurden folgende statistische Größen für die berechneten Grundwasserstände ermittelt. Für alle Knoten des Finite-Elemente-Netzes wurden Häufigkeitsverteilung der Zeitreihen der Grundwasserstände erstellt, von denen jeweils Dauerlinien der Überschreitungswahrscheinlichkeit und deren Perzentilen abgeleitet wurden. Ebenso wurden die Mittelwerte, Streuungen und absoluten Extremwerte (Minimum, Maximum) der einzelnen Zeitreihen

ermittelt. Anhand dieser statistischen Parameter ließ sich die Veränderung der Grundwasserdynamik bei Deichrückverlegung sowohl im bereits oben betrachteten Profil als auch in der Fläche darstellen.

Durch Verschneidung dieser statistischen Größen der Grundwasserstände mit den Geländehöhen konnten äquivalente statistische Größen für die Flurabstände ermittelt werden. Da Geländehöhen nur für den nördlichen Bereich des Modellgebiets, dem Bereich der geplanten Deichrückverlegung, vorlagen, war eine Auswertung der Flurabstände allerdings nur für dieses Teilgebiet möglich.

### IV-3.5.2 Statistik der Grundwasserdynamik

#### Veränderung im Profil

Die Dauerlinien zeigten bei Deichrückverlegung an den einzelnen Konten im Profil (Abb. IV-3.12) ebenfalls die oben beschriebene Veränderung der Grundwasserdynamik (vgl. Kap. IV-3.4.3). Es wird deutlich, dass die Überschreitungsdauer geringer Flurabstände bzw. Dauer des Grundwassereinstaus im Falle einer Deichrückverlegung zunimmt. Dies betrifft insbesondere die Bereiche im Deichrückverlegungsgebiet aber auch die Bereiche landseitig der neuen Deichlinie.

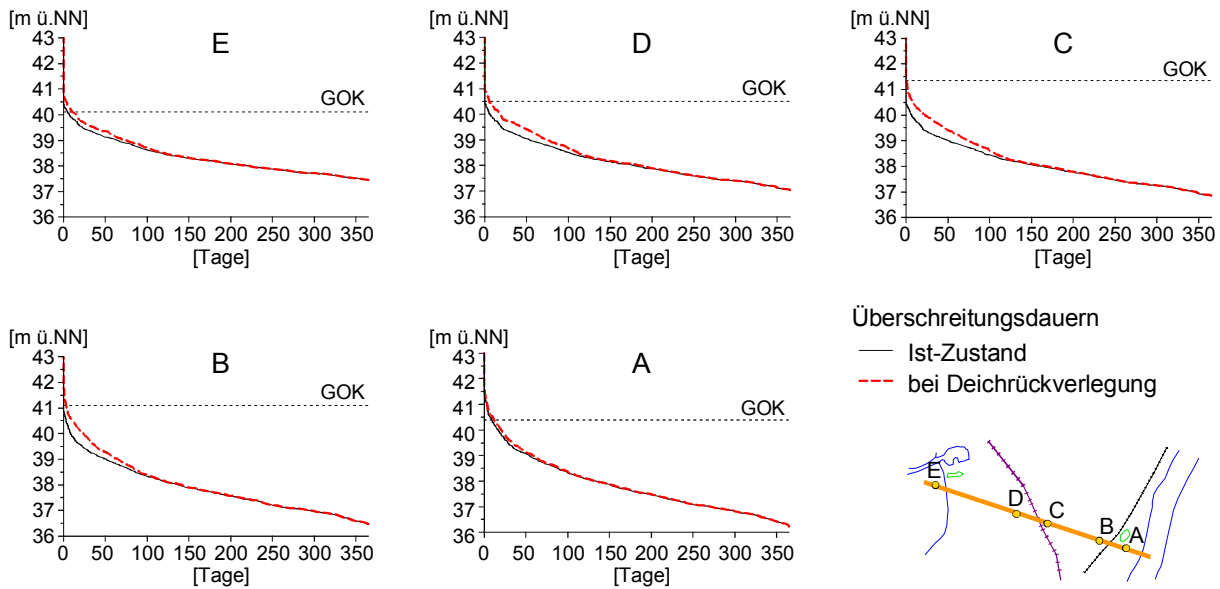


Abb. IV-3.12 Überschreitungsdauern der Grundwasserstände im Profil senkrecht zur Elbe (vgl. Abb. IV-3.8): Ist-Zustand und bei Deichrückverlegung.

Auch eine Darstellung der weiteren statistischen Größen der Grundwasserstände im Profil zeigt diese Veränderung (Abb. IV-3.13). Aufgrund der hydraulischen Wirkung der erweiterten Vorlandbereiche nur während der Überflutungsperioden (bei Hochwasser) verändert sich die Grundwasserdynamik und deren Dauerlinien sowie statistischen Größen nur für höhere Grundwasserstände. Insbesondere die Maximalwerte, Höchstwasserstand HHW und mittlerer Hochwasserstand MHW, erfahren bei Deichrückverlegung im gesamten Profil eine drastische Erhöhung.

**Veränderung in der Fläche**

Generell ist bei Deichrückverlegung ein Anstieg der Grundwasserstände und damit eine Verringerung der Flurabstände zu erwarten. Die Veränderungen der

Flurabstände sind identisch mit den Veränderungen der Grundwasserstände, da eine konstante Geländeoberfläche vorausgesetzt werden kann. Wie bereits im Profil gezeigt, traten diese Veränderungen nicht nur im Bereich der erweiterten Vorländer sondern auch landseitig der neuen Deichlinie südöstlich des geplanten Deichrückverlegungsgebiets auf (Abb. IV-3.14). Außerhalb der anderen Begrenzungen des Deichrückverlegungsgebiets, die von der Elbe und Ohre gebildet werden, waren aufgrund der guten hydraulischen Anbindung der Elbe und Ohre an das Grundwasser keine nennenswerten Veränderungen zu beobachten.

Bei Betrachtung der Veränderung der räumlichen Verteilung der Grundwasserstände für die Perzentilen von 50 und 10 % Überschreitungswahrscheinlichkeit zeigen sich deutliche Unterschiede.

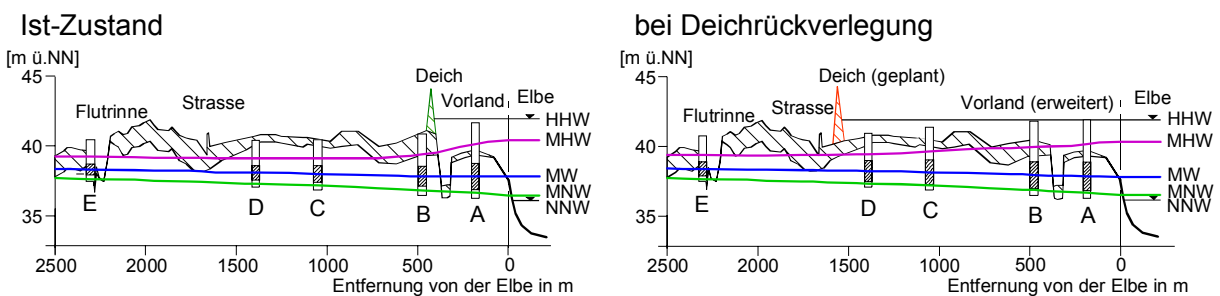
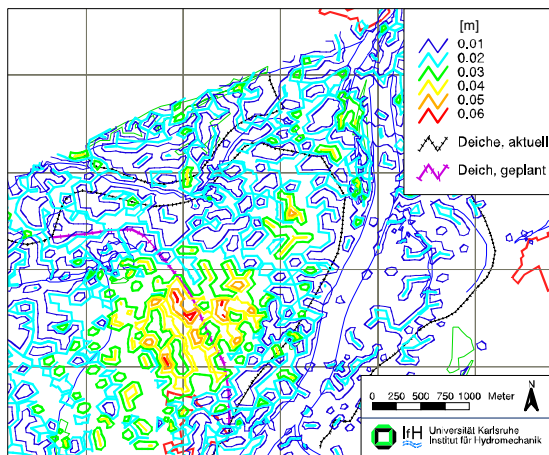
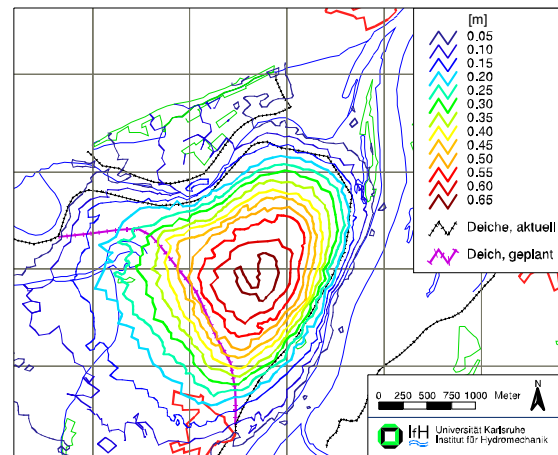


Abb. IV-3.13 Statistische Größen der Grundwasserdynamik im Profil senkrecht zur Elbe (vgl. Abb. IV-3.8): Mittelwert, Schwankungsbreiten und Extremwerte.

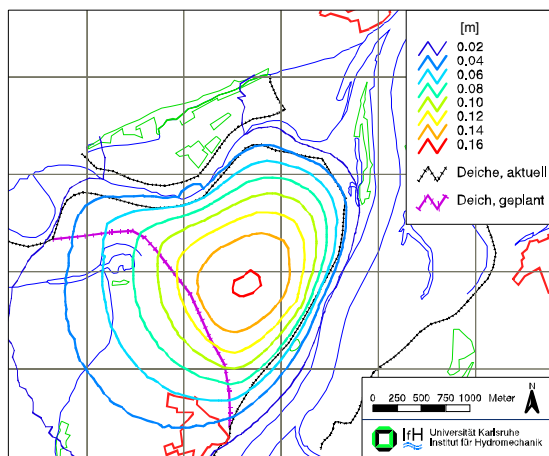
a) Änderung der 50%-Perzentilen des Flurabstands



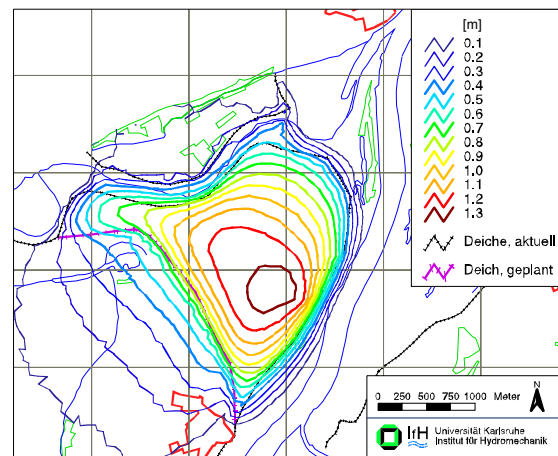
b) Änderung der 10%-Perzentilen des Flurabstands



c) Änderung des mittleren Flurabstands



d) Änderung des maximalen Flurabstands



**Abb. IV-3.14** Veränderungen der statistischen Größen der Grundwasserdynamik im Deichrückverlegungsgebiet: Verringerung der Flurabstände bzw. Erhöhung der Grundwasserstände (erweiterte Kartendarstellungen siehe auch *Anlagen-CD*).

Die Grundwasserstände der 50%-Perzentile (Abb. IV-3.14a) entsprechen einem Zustand, der nur indirekt von der Deichrückverlegung betroffen war. Die beobachtbare Veränderung lag bei maximal 7 cm und wurde durch ein verzögertes Absinken der Grundwasserstände hervorgerufen. Die Grundwasserstände der 10%-Perzentile (Abb. IV-3.14b) hingegen waren durch die gesamte Veränderung der Grundwasserdynamik beeinflusst und lagen bei Deichrückverlegung um bis zu 70 cm höher.

Die mittleren Grundwasserstände zeigten bereits einen Einfluss der veränderten Grundwasserdynamik bei Deichrückverlegung von bis zu 17 cm (Abb. IV-3.14c). Die Veränderungen von einigen cm reichten bis weit hinter die neue Deichlinie. Die Veränderung der Maxima hingegen beschränkte

sich weitestgehend auf das eigentliche Deichrückverlegungsgebiet und betrug bis zu 140 cm (vgl. Abb. IV-3.14d). Hinter der neuen Deichlinie überstieg deren Veränderung jedoch immer noch weit die maximale Veränderung der Mittelwerte.

#### IV-3.5.3 Ökologische Auswirkungen

Die ökologischen Auswirkungen einer Deichrückverlegung bezogen auf das Grundwasser sind vorwiegend an die veränderte Dynamik der Flurabstände gekoppelt. In großen Teilen des Deichrückverlegungsgebiets liegen Flurabstände größer als 150 cm vor, so dass selbst große Veränderungen kaum ökologische Auswirkungen haben werden. Ökologisch von Bedeutung sind hingegen Bereiche

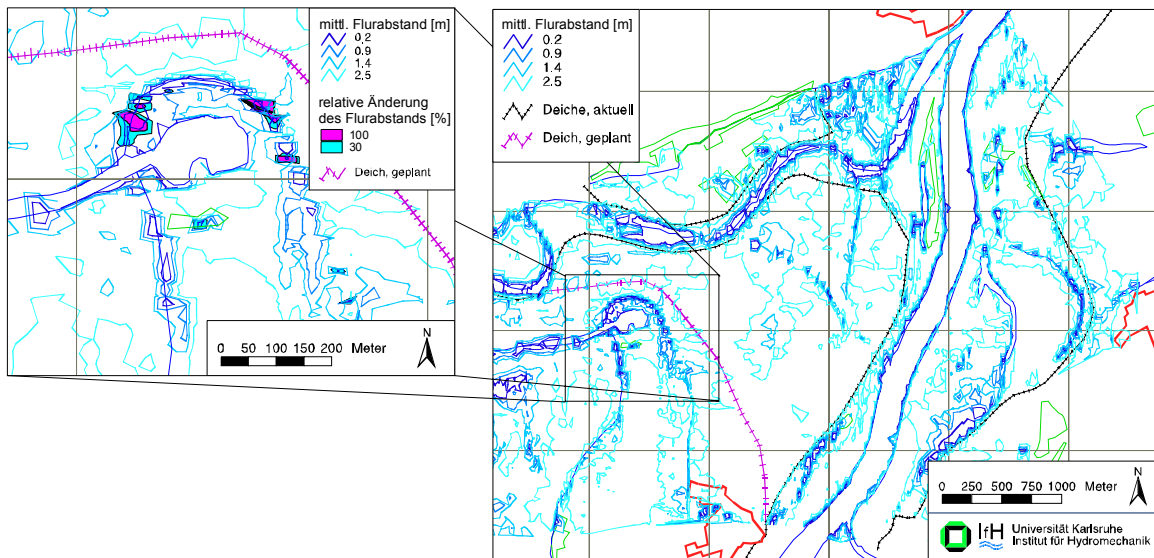


Abb. IV-3.15 Aktueller mittlerer Flurabstand und dessen relative Änderungen bei Deichrückverlegung.

mit geringen Flurabständen, deren Dynamik wesentlich beeinflusst wird. Eine solcher Bereich findet sich am westlichen Ende des Profils, an dem sich die Dauer eines Grundwassereinstaus von 5 auf 10 Tage erhöhte (Abb. IV-3.12). Am betrachteten Punkte im Profil direkt landseitig des geplanten Deichs hingegen wurde bei Deichrückverlegung ein Flurabstand von 20 cm an ca. 15 Tagen unterschritten, der im Ist-Zustand so gut wie nie erreicht wurde (Abb. IV-3.12).

Des Weiteren sind ökologisch auch die relativen Änderungen des Flurabstandes von großer Bedeutung, da dann auch kleine absolute Änderung der Dynamik des Flurabstands zu drastischen Änderungen im Bodenwasserhaushalt führen können. Allerdings traten im Untersuchungsgebiet solche Bereiche lokal sehr beschränkt auf (Abb. IV-3.15), da nur sehr wenige Bereiche geringe mittlere Flurabstände aufwiesen.

#### IV-3.6 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Ermittlung des Einflusses einer Deichrückverlegung auf die Grundwasserdynamik wurde im Untersuchungsgebiet, dem Elbetal nördlich von Magdeburg im Bereich der Ohremündung, auf Basis der hydrogeologischen Gegebenheiten ein numerisches Grundwasserströmungsmodell erstellt. Die instationären Berechnungen wurden mit dem am Institut für Hydromechanik entwickelten Finite-Elemente-Programm HFLOW\_HT durchgeführt.

Die hydraulische Anbindung der bei Hochwasser überstauten Vorland- und Auenbereiche wurde mittels eines physikalisch basierten Leakageansatzes im Modell realisiert. Dieser Ansatz ermöglichte die Erfassung der Infiltrationsraten durch die Auedeckschichten bei Hochwasser auf Basis deren hydraulischer Eigenschaften und Mächtigkeiten und damit eine verlässliche Prognose der Grundwasserdynamik bei Deichrückverlegung, d.h. einer Erweiterung der Vorlandbereiche in der Fläche. Die für diesen Ansatz erforderlichen Leakageparameter wurden räumlich differenziert und zeitabhängig definiert.

Die Kalibrierung des numerischen Grundwasserströmungsmodells erfolgte anhand der Ganglinien von den zu diesem Zweck errichteten Grundwasserpegeln. Trotz der geringen Datenbasis, die der Modellerstellung zugrunde lag, konnte eine gute Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Ganglinien erzielt werden. Die mittlere Abweichung lag bei etwa 15 cm.

Mit dem kalibrierten Modell wurde durch eine mehrjährige Simulation, November 1985 bis Oktober 1999, der Ist-Zustand definiert und mittels statistischer Parameter charakterisiert. Die Auswertung der Mittelwerte, Schwankungsbreiten, Extremwerte und Dauerlinien an allen Berechnungsknoten des Finite-Elemente-Netzes ermöglichte eine flächige Darstellung der instationären Grundwasserdynamik. Anhand dieser statistischen Parameter wurde auch der Einfluss einer Deichrückverlegung auf die Grundwasserdynamik quantifiziert. Dabei wurde

zur Prognose der Grundwasserdynamik bei Deichrückverlegung derselbe Modellzeitraum wie für den Ist-Zustand allerdings mit erweiterten Vorland- und Auenbereichen simuliert.

Der Einfluss einer Deichrückverlegung zeigte sich an einer generellen Zunahme der Wasserstandsdynamik bei Hochwasser, d.h. bei hohen Wasserständen. Daraus resultiert eine starke Veränderung der minimalen Flurabstände sowie eine Verlängerung der Unterschreitungsperioden geringer Flurabstände. Eine bedeutsame Beeinflussung der Grundwasserdynamik konnte sowohl im Bereich der erweiterten Vorländer als auch landseitig der neuen Deichlinie beobachtet werden, wobei Gebiete mit geringen Flurabständen betroffen sind. Diese Ergebnisse ermöglichen weitergehende ökologische Aussagen, insbesondere zur Flora und Fauna, in Bereichen, in denen sich kritische Flurabstände verändern.

Neben einer direkten Anwendung zur Ermittlung des Einflusses von Deichrückverlegungen bietet das numerische Modell die Möglichkeit, andere Veränderungen der hydraulischen Bedingungen, wie z.B. Wasserstandsänderungen der Elbe durch Sohlein-tiefungen, im Untersuchungsgebiet in ihrer Auswirkung auf die Grundwasserdynamik zu untersuchen. Da das kalibrierte numerische Modell auf physikalischen Ansätzen beruht, d.h. dass die zugrunde liegenden hydraulischen Parameter direkt die Aquifereigenschaften charakterisieren, sind auch Prognoserechnungen mit veränderten Randbedingungen durchführbar. Somit kann auch der Einfluss eines veränderten Abflussgeschehens in der Elbe, z.B. aufgrund von Ausbaumaßnahmen oder globalen Klimaveränderungen, auf die Grundwasserdynamik prognostiziert werden.

Mit der hier vorgestellten Methodik zur Erstellung eines numerischen Grundwasserströmungsmodells können vergleichbare Untersuchungen und Aussagen für andere Untersuchungsgebiete erfolgen. Zur Festlegung eines hydrogeologischen Modells für das Untersuchungsgebiet bedarf es der Kenntnisse der Abgrenzungen des Aquifers und der hydraulischen Randbedingungen. Die wesentlichen hydraulischen Prozesse, der Austausch zwischen den Oberflächengewässern und dem Grundwasser, muss mit physikalisch basierten Ansätzen erfolgen, um die Prognosefähigkeit des Modells zu gewährleisten. Die Abschätzung der Infiltration von bei

Hochwasser überstauten Vorländern kann, wie gezeigt, mit Hilfe der bodenhydraulischen Parameter und Mächtigkeit der Deckschichten sowie der Überflutungswasserstände beschrieben werden.

Da die Datenlage oft sehr gering und die Erstellung eines detaillierten numerischen Modells oft sehr aufwendig ist, ist es erforderlich vereinfachte Ansätze zu entwickeln, mit denen Aussagen zu den oben genannten statistischen Größen der Grundwasserdynamik mit ähnlicher Zuverlässigkeit bei wesentlich geringerem Aufwand getroffen werden können. Mit Hilfe eines numerischen Modells können solche Ansätze in einem Untersuchungsgebiet getestet und validiert werden. Diese Ansätze können z.B. auf einer stark vereinfachten Beschreibung der Grundwasserdynamik mit eindimensionalen analytischen Lösungen (BUREK & NESTMANN: vgl. Kap. IV-4) oder auf Transferfunktionen beruhen, deren Parameter direkt durch der Aquifergeometrie, den Aquifereigenschaften und den Randbedingungen im Untersuchungsgebiet definiert sind. Diese vereinfachten Ansätze sind von großer Bedeutung, um eine schnelle, grobe Abschätzung unterschiedlicher, anthropogen bedingter Veränderungen der Grundwasserdynamik ermitteln und im Vergleich bewerten zu können. Sie können allerdings nicht einen Ersatz für detaillierte Untersuchungen zur Quantifizierung solcher Einflussgrößen sein.

## Literatur

- BUREK, P. (1999): Berechnung der Grundwasserneubildungsrate im Bereich der Ohremündung nördlich von Magdeburg. Persönliche Mitteilung, Karlsruhe
- BUREK, P., NESTMANN, F. (2001): Auswirkung von Deichrückverlegungen auf die langfristige Grundwasserdynamik in Auen (Untersuchungsgebiet „Sandau/Elbe“). Kap. IV-4 in diesem Band.
- FRIST, M. (1999): Instationäre Berechnungen der Grundwasserströmung im Elbetal infolge von Hochwasserereignissen. Unveröffentlichte Vertiefungsarbeit, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe.
- HERRLING, B. (1982): Finite element computations of horizontal groundwater flow with moving boundaries. In *Finite Elements in Water Resources*, ed. K.P. Holz et al. Springer Verlag, Berlin, Germany. S. 10.25-10.39.
- JORDAN, H., WEDER, H.-J. (1995): *Hydrogeologie: Grundlagen und Methoden; regionale Hydrogeologie: Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen*. Enke-Verlag, Stuttgart. 603 S.

- KIENE, S., HARMS, O., BÜCHELE, B., NESTMANN, F. (2001): Morphologische Entwicklung der Elbe vor dem Hintergrund anthropogener Einflüsse – eine Zusammenstellung von Angaben aus der Literatur. Kap. II-1.2 in diesem Band
- MOHRLOK, U., JIRKA, G. H. (2001): Grundwasserdynamik in Vorland- und Auenbereichen. Abschlussbericht des Teilprojekts im BMBF-Forschungsvorhabens Morphodynamik der Elbe, FKZ 0339566, Institut für Hydromechanik, Ber.-Nr. 775, Universität Karlsruhe.
- MOHRLOK, U., EBERHARDT, E., JIRKA, G. H. (2000): Modelling groundwater recharge from intermittent flooded areas by calibration of time dependent leakage parameters. In: F. Stauffer, W. Kinzelbach, K. Kovar, E. Hoehn, Calibration and reliability in groundwater modelling - coping with uncertainty, IAHS publication no. 265, Wallingford, UK, 509-514.
- MONTENEGRO, H. (1995): Parameterbestimmung und Modellierung der Wasserbewegung in heterogenen Böden. Fortschritt-Berichte VDI, 15(134). VDI-Verlag, Düsseldorf.
- PFISTERER, J. (1998): Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Randbedingungen auf die Grundwasserströmung im Elbtal mit Hilfe numerischer Modellierung. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe.
- ROMMEL, J. (1998): Geologie des Elbetals nördlich von Magdeburg. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Geologisches Institut, Universität Karlsruhe.
- SAUCKE, U., BRAUNS, J. (2001): Stromtalgeschichte und Flussgeologie im deutschen Elbegebiet. Kap. II-1.1 in diesem Band
- SAUCKE, U., BRAUNS, J. (2001): Strömungs- und Erosionsvorgänge in fluviatilen Sedimenten. Kap. IV-2 in diesem Band.
- SIMUNEK, J., VOGEL, T., VAN GENUCHTEN, M. TH. (1994): The SWMS\_2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media - Version 1.2. Research Report No. 132, Department of Agriculture, U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California
- VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980): A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil. Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.

### Ökologischer Einschub – Grundwasserhaushalt

S. Kiene

Die Dynamik des Grundwassers ist ein prägender Faktor für den Lebensraum Aue. Eine Änderung der Grundwasserdynamik führt bedingt durch die Dynamik zwischen Abflussregime, Oberflächen- und Grundwasserhaushalt zur Änderung der biotischen Prozesse im gesamten System, vom Auwald bis zur Interstitialbesiedelung. Hochwasserereignisse führen zur Infiltration in den Grundwasserleiter, zur Grundwasseranreicherung und Überflutung. Die langfristige Antwort des Grundwassers bestimmt wiederum die Menge des verfügbaren Bodenwassers und somit u.a. die Pflanzengesellschaften und -produktivität. Die Menge des eingespeisten Wassers ist abhängig von Überstaupflähe und -dauer und vom Substrat. Bei lange anhaltenden Trockenperioden kann es dagegen zur Exfiltration des Auengrundwassers in den Fluss kommen.

Durch diese Prozesse kommt es zur ständigen Porendurchspülung und folglich zu hohen Stoffumsatzraten (JÄHRLING 1994). Die Porosität eines Bodens bestimmt dabei die Transportvorgänge des Wassers mit. Bei sehr durchlässigem Untergrund und langer Überflutungsdauer beeinflusst die Überflutung der Talaue den Grundwasserstand noch mehrere Kilometer weit vom Flusslauf entfernt.

Die periodischen Überflutungen oder periodischen Druckwasserüberschwemmungen der Auen führen zu starken Grundwasserschwankungen. Es kommt zur Bildung charakteristischer Auenböden aus den Auensedimenten. Auenböden sind im allgemeinen sauerstoffreich, weil eine hohe Wasserleitfähigkeit einen raschen Austausch mit sauerstoffreichem Grundwasser ermöglicht (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL 1979). Häufig sind sie nährstoffreich und besitzen eine hohe biologische Aktivität. Der Sättigungszustand des Bodens mit Wasser, erfassbar durch die Saugspannung, ist ein wesentlicher Parameter für die Wasserverfügbarkeit für die Pflanzen.

Sohlen- und Wasserspiegelabsenkungen ziehen Änderungen des Grundwasserspiegels in der Aue nach sich, dadurch kann es zur Austrocknung der Aue und der Auwälder kommen. In der hauptsächlich aus durchlässigem Sandmaterial aufgebauten Flussniederung haben die Wasserspiegelabsenkungen die größten Auswirkungen. Mit steigender Entfernung vom Fluss nehmen die Auswirkungen auf den Grundwasserspiegel ab.

#### Literatur

- JÄHRLING, K.-H. (1994): Bereiche möglicher Deichrückverlegungen in der Elbaue im Bereich der Mittelelbe - Vorschläge aus ökologischer Sicht als Beitrag zu einer interdisziplinären Diskussion.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHNABEL, P. (1979): Lehrbuch der Bodenkunde. 10. Auflage. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.

## IV-4 Auswirkung von Deichrückverlegungen auf die langfristige Grundwasserdynamik in Auen (Untersuchungsgebiet „Sandau/Elbe“)

P. Burek, F. Nestmann

### IV-4.1 Einleitung

Seit Jahrhunderten nimmt der Mensch Einfluss auf die Gestalt der Mittleren Elbe und ihre Auen, z.B. durch Deichbau und Flussbegradigungen zum Hochwasserschutz und durch Anlage von Leitwerken und Buhnen zur Schiffbarmachung. Das Ergebnis sind anthropogen überprägte Gewässer und Auen, die in ihrer zeitlichen und räumlichen Dynamik eingeschränkt sind und eine abnehmende Biotop- und Artenvielfalt aufweisen. Als Folgen von Meliorationen, Flussbegradigungen, Flussvertiefungen und Sohlerosion treten Grundwasserabsenkungen und damit Austrocknung der Böden auf und durch Einengung der natürlicher Retentionsräume kommt es zu einer Verschärfung der Hochwassergefahr (BMBF 1995). Als ehemals natürliche Vegetation blieben die großflächigen Hart- und Weichholzauenwälder fragmentarisch erhalten. Der Elbe stehen heute nur noch 13,6% ihres ehemaligen Überflutungsgebietes als Retentionsflächen bei Hochwasser zur Verfügung (SIMON 1996). Diese Bereiche zeichnen sich an der Elbe im Vergleich zu anderen mitteleuropäischen Flüssen jedoch durch eine relativ große Naturnähe aus (HAFERKORN 2000).

In diesem Beitrag wird ein neuartiges vereinfachtes physikalisch basiertes Grundwassermodell vorgestellt, das im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs „Ökologische Wasserwirtschaft“ an der Universität Karlsruhe entwickelt wurde. Kernziel dieses Modells ist die Simulation der langfristigen Dynamik des Wasserhaushalts in Auengebieten (BUREK 1999). Die Modellentwicklung erfolgte mit Unterstützung des BMBF-Verbundprojekts Morphodynamik der Elbe. Im folgenden wird die Anwendung auf das Untersuchungsgebiet „Sandau“ im BMBF-Verbundprojekt „Rückgewinnung von Retentionsflächen und Altauenreaktivierung an der Mittleren Elbe in Sachsen-Anhalt“ vorgestellt.

Zunächst wird auf die Zielsetzung (IV-4.2), Konzeption (IV-4.3) und den Modellaufbau (IV-4.4) des Grundwassermodells eingegangen. In Kapitel IV-4.5 wird das Untersuchungsgebiet Sandau beschrieben und in IV-4.6 die einzelnen Modellkomponenten erläutert. Nach der Modellanpassung und Validie-

rung (IV-4.7) wird die langfristige Grundwasserdynamik des Ist-Zustandes zeitlich und räumlich beschrieben (IV-4.8) und die Veränderungen durch die geplante Deichrückverlegung im Untersuchungsgebiet „Sandau“ aufgezeigt (IV-4.9).

### IV-4.2 Zielsetzung

Ziel der Untersuchung ist es, die Kenngrößen der räumlichen und zeitlichen Dynamik des Grundwassers zu erfassen und Aussagen über die Veränderung der Grundwasserdynamik aufgrund von veränderten Randbedingungen wie z.B. Deichrückverlegungen oder Abfluss- bzw. Klimaszenarien zu treffen.

Der Grundwasserhaushalt wird meist mit deterministischen, physikalischen Ansätzen beschrieben. Um Aussagen über Häufigkeiten verschiedener Systemzustände zu erhalten, in Analogie zur Hydrologie der Oberflächengewässer, wie z.B. gewässerkundliche Hauptwerte, ist es notwendig, deterministische mit stochastischen Komponenten zu verknüpfen. Diese stochastischen Komponenten können nur durch Langzeitsimulationen abgeschätzt werden.

Hier wird ein Grundwassermodell vorgestellt, das aufgrund seines langen Betrachtungszeitraumes (ca. 30 Jahre) und des mesoskaligen räumlichen Größensbereichs einfach zu erhebende Parameter und vereinfachte physikalische Modellkonzeptionen verwendet, wie sie in den Arbeiten von WALD ET AL. (1986) und DISSE (1995) eingesetzt wurden. Die Maßgabe zur vereinfachten Betrachtung, als eindimensionales Grundwassermodell oder als Bodenwasserspeichermodell, bedeutet aber keinen Verzicht auf physikalisch begründete Teilmodelle.

Zur Validierung des Modells werden die Ganglinien der Simulation mit den Grundwassermessungen verglichen. Hauptaugenmerk wird auf den Vergleich der statistischen Kenngrößen gelegt statt auf den Vergleich von Einzelwerten, da die gemessene Datenreihe nur *eine* Realisation hydrologischer Prozesse darstellt (KRON 1996) und sich in dieser Form *niemals* wiederholt.

Ein Beispiel für die Modellanwendung liefern die geplanten Deichrückverlegungsmaßnahmen an der Mittleren Elbe. Für ca. 40 Standorte (NEUSCHULZ & PURPS 2000) werden Deichrückverlegungen diskutiert, um einen Beitrag zur Auenökologie zu leisten und ggf. den Hochwasserschutz zu verbessern. Die möglichen Auswirkungen der Maßnahmen werden im BMBF-Forschungsprogramm „Elbe-Ökologie“ vielfältig untersucht, so u.a. im Verbundprojekt „Morphodynamik der Elbe“ (vgl. Kap. III-3) sowie im Verbundprojekt „Rückgewinnung von Retentionsflächen und Altauenreaktivierung an der Mittleren Elbe in Sachsen-Anhalt“ im Gebiet „Sandau“ (Elbe-km 416-425) und „Rogätz“ (km 340-350). Für das Gebiet „Sandau“ werden in dieser Arbeit die Auswirkungen von Deichrückverlegungen auf die langfristige Grundwasserdynamik dargestellt.

### IV-4.3 Modellkonzeption

Für statistische Beschreibung der langfristigen Dynamik des Grundwassers kommen drei verschiedene Modellkonzeptionen in Betracht, die im folgenden näher erläutert werden.

#### IV-4.3.1 Statistische Modellierung

Mittels eines multiplen nichtlinearen Regressionsansatz werden Kenngrößen der Grundwasserdynamik aus den Gebietskenngrößen (z.B. Wasserstands-, Niederschlagskennwerte, Abstand vom Vorfluter und Kennwerte des Aquifers) abgeleitet. Ein ähnlicher Ansatz wird von LUTZ (1984) verwendet, um mit Einzugsgebietskenngrößen die Kenngrößen von Hochwasserabflüssen zu regionalisieren.

Die Vorteile des statistischen Ansatzes liegen in der direkten Übertragung der Dynamik der Abflüsse bzw. Niederschläge auf das Grundwasser ohne den Umweg über die Berechnung der Grundwasserganglinien und in der daraus resultierenden hohen Berechnungsgeschwindigkeit.

Mit diesem konzeptionellen Ansatz kann jedoch nur die Dynamik des Ist-Zustandes erfasst werden, da bei veränderten Bedingungen ein rein konzeptionelles Modell nicht in der Lage ist, die veränderten Wechselbeziehung verschiedener Prozesse nachzuvollziehen.

#### IV-4.3.2 Modellierung mit mathematisch-numerischen Grundwassermodellen

Die mathematisch-numerischen Grundwassermodelle basieren auf der Kombination von Kontinuitätsgleichung mit dem Gesetz von Darcy. Sie bieten den Vorteil eines physikalisch begründeten Modellansatzes. Als numerische Lösungsmethoden werden die Finite Elemente, -Volumen und -Differenzen Methode verwendet. Für eine möglichst realitätsnahe Modellierung kann eine sehr feine räumliche (je nach Problemstellung auch dreidimensional) und eine hohe zeitliche Auflösung der Ein- und Ausgabedaten verwendet werden. Nachteilig ist die lange Berechnungszeit für numerische Grundwassermodelle. Um die Dynamik des Grundwassers zu beschreiben, wird deshalb meist ein kürzerer Zeitraum oder repräsentative Ereignisse ausgewählt um die Berechnungszeit in Grenzen zu halten.

#### IV-4.3.3 Vereinfachte physikalisch basierte Modellierung

Die Verwendung einer vereinfachten physikalisch basierten Modellierung als Bodenspeichermodell (DISSE 1995) oder als analytisches Grundwassermodell entlang von Senkrechten zum Vorfluter (WALD ET AL. 1986) macht es möglich, die wesentlichen Prozesse soweit nachzubilden, dass die Dynamik des Systems abgeleitet werden kann.

Der Vorteil dieses vereinfachten Ansatzes liegt in der hohen Ausführungsgeschwindigkeit, selbst für langfristige Modellierungen über 30 Jahre. Unter der Voraussetzung, dass die modellierten Prozesse auch unter veränderten Bedingungen die Dynamik des Systems erklären, können mit Hilfe dieser Modellkonzeption Szenarien untersucht werden.

Mit der vereinfachten Modellierung können keine Prognosen der Ganglinie erstellt werden, aber die in der Hydrologie verwendeten statistischen Verfahren der Zeitreihenanalyse für die Abflussbemessung lassen sich auf die Grundwasserstände bzw. Flurabstände übertragen. Somit ist es nicht notwendig repräsentative Ereignisse auszuwählen und ggf. auf den Bemessungswert hochzuskalieren, sondern der in der Hydrologie verwendete Zeitrahmen, als Bemessungsgrundlage der Abflüsse wird auch für die Beschreibung der Dynamik des Grundwassers verwendet.



#### IV-4.4 Modellaufbau

Für die Beschreibung des Wasserhaushaltsdynamik in Niederungsgebieten lassen sich drei Prozessgruppen ausmachen:

1. Direkter Wasseraustausch zwischen Fließgewässer und Aquifer
2. Infiltration bei Überflutung der Aue
3. Infiltration und kapillarer Aufstieg infolge Niederschlag und Verdunstung

Aufgrund der besonderen Situation in Niederungsgebieten mit geringem Anteil von Oberflächenabfluss und den genannten drei wichtigsten Prozessgruppen wird eine Modellstruktur aus zwei unabhängigen Modellteilen verwendet, die über die Grundwasserhöhe miteinander gekoppelt sind:

- Ein Grundwassermodell, das den horizontalen Wassertransport beschreibt und vor allem den Einfluss des Vorfluters quantifiziert (Modellierung von Punkt 1 und 2 der Prozessgruppen).
- Ein Bodenwassermodell, um den direkten Wasseraustausch zwischen der ungesättigten und der gesättigten Bodenzone zu erfassen (Modellierung von Punkt 3 der Prozessgruppen).

Das Grundwassermodell wird eindimensional entlang einzelner Transekten analytisch berechnet. Dabei werden veränderliche Wasserstände und veränderliche Ausuferungen des Vorfluters miteinbezogen.

Strömung parallel zum Vorfluter, seitlicher Zustrom, Unterströmung des Vorfluters oder weitere Grundwasserstockwerke werden nicht berücksichtigt. Es wird zwar davon ausgegangen, dass es zu einem Zu- und Abstrom über den unteren Rand und die seitlichen Ränder kommt (siehe Abb. IV-4.1 Seitenansicht), dieser Zu- und Abstrom jedoch keinen wesentlichen Beitrag zur vertikalen Dynamik des Grundwassers darstellt.

Grundlage hierfür sind Untersuchungen von HALL ET AL. (1972), SERRANO (1995), WALD (1990) und WORKMAN ET AL. (1997), die ihre mittels analytischer Lösung berechneten Grundwasserpegelstände mit Naturmessungen vergleichen.

Der Arbeit von WALD (1990) wird der Aufbau des Gebiets mittels Gliederung in Transekten entnommen. Das zu modellierende Gebiet wird mit einem Knotennetz belegt und für jeden dieser Knotenpunkte wird eine eigene Transekte erstellt. (siehe Abb. IV-4.1 mit den Knotenpunkten und Transekten der 18 Grundwassermessstellen). Die Berechnung mit dem Grundwasser- und Bodenwassermodell wird separat für jede Transekte über den gesamten Zeitraum durchgeführt.

Als Ergebnis wird für jeden Knotenpunkt die Zeitreihe der Grundwasserpotentialhöhe ausgegeben.

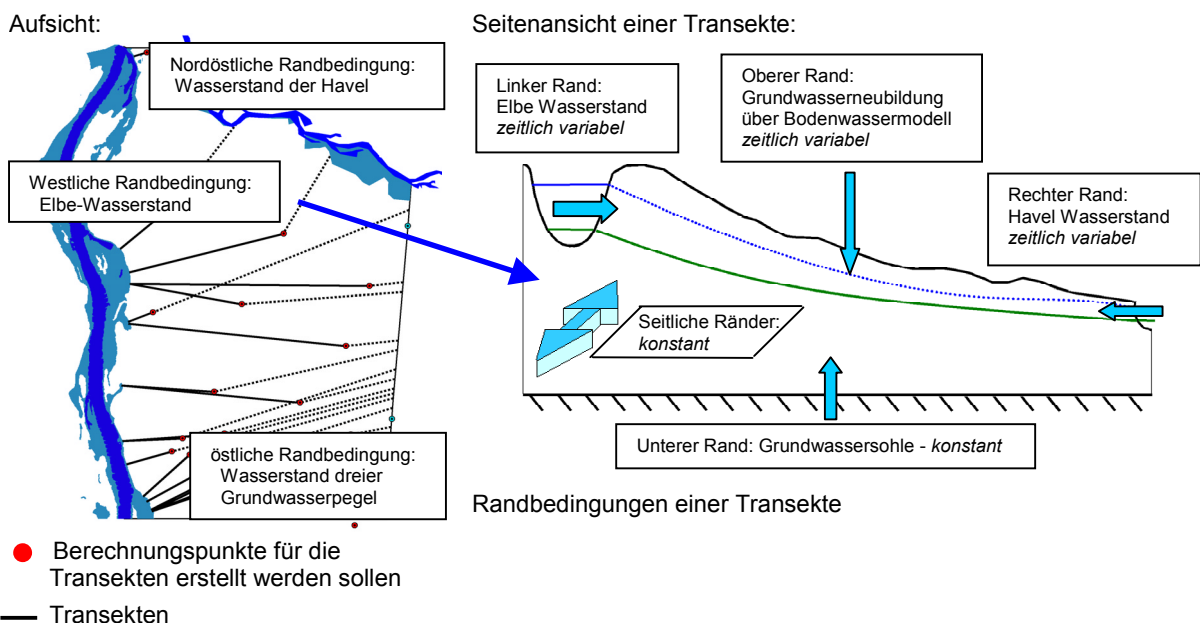


Abb. IV-4.1 Beispiel für Berechnungspunkte und Transekten des Grundwassermodells.

Da für jeden Knotenpunkt ein eigener Parametersatz verwendet wird, sind wechselnde Grundwassersohlhöhen und unterschiedliche Landnutzung innerhalb der Transekte und veränderliche Vorfluterwasserstände und Ausuferungszustände mit berücksichtigt.

Das Bodenwassermodell wird vertikal als eindimensionales Speichermodell der durchwurzelten Zone entwickelt, da die Infiltrationsgeschwindigkeit bei fehlendem Oberflächenabfluss aufgrund der geringen Oberflächenneigung zu vernachlässigen ist. Grundlage hierfür sind Modelle von HENNIG ET AL. (1992), DISSE (1995) und das WASIM Modell von SCHULLA (1998).

Für jeden Knotenpunkt setzt sich die resultierende Grundwasserneubildung aus dem Mittelwert mehrerer Bodenwasserknotenpunkte entlang der Transekte zusammen.

Die Kopplung beider Modellteile erfolgt mittels des Grundwasserspiegels, der eine variable Randbedingung des Bodenwassermodells darstellt und dem durch Grundwasserneubildung Wasser zugeführt und durch kapillaren Aufstieg Wasser entnommen wird. Ähnliche Konzepte der Kopplung von ungesättigter mit gesättigter Bodenzone werden auch

von WALD (1994) (Lineares Bodenspeichermodell und Grundwassermodell MODFLOW) und von HE (1994) (Bodenwasserhaushaltsmodell SWACRO und Grundwassermodell FEWA) verwendet.

## IV-4.5 Untersuchungsgebiet

### IV-4.5.1 Gebietsbeschreibung

Das Untersuchungsgebiet Sandau liegt südlich der Stadt Havelberg. Das Relief ist eben mit einem Höhenbereich von 23-37 m ü. NN. Es fällt Richtung Havel nach Nordosten hin ab. Abb. IV-4.2 zeigt das 55,6 km<sup>2</sup> Untersuchungsgebiet Sandau und seine Lage im deutschen Einzugsgebiet der Elbe. Der östliche und der nördliche Rand sind durch die Elbe von Elbe-km 411,4 bis Elbe-km 422,4 und durch die Havel gegeben. Der östliche und südliche Rand wurde so gewählt, dass die Grundwassermessstellen mit Zeitreihen ab 1964 als Randbedingungen verwendet werden können. Das Gebiet hat in Ost-west-Richtung eine Ausdehnung von 6,8 km, in Nordsüd-Richtung von 10,6 km.

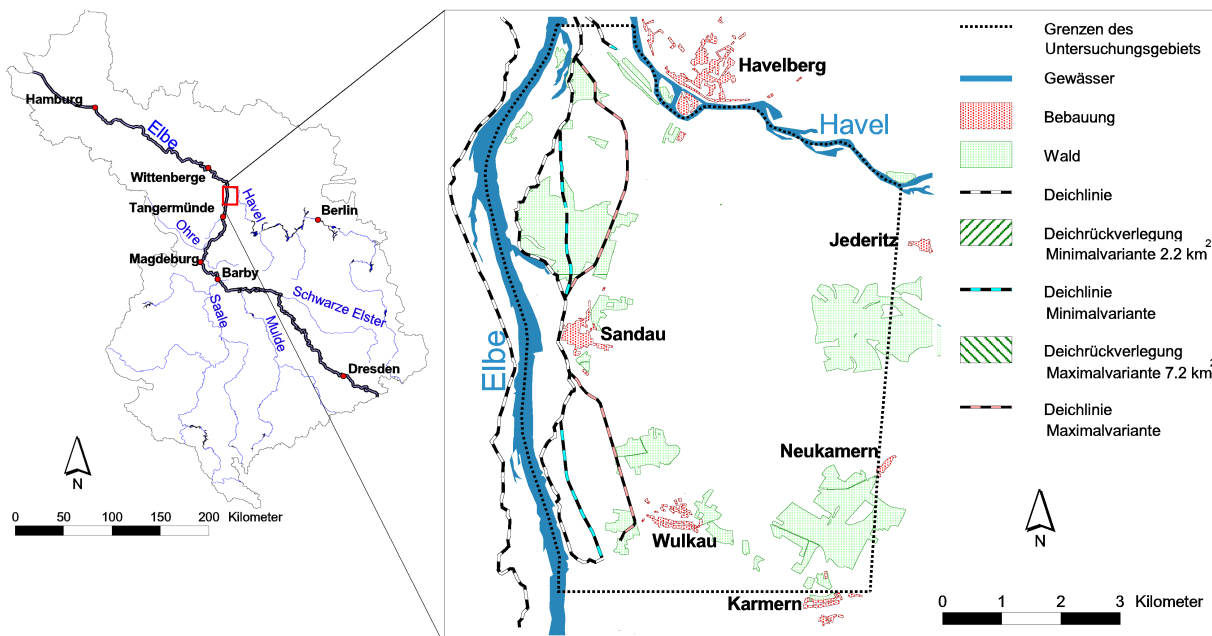


Abb. IV-4.2 Lage des Untersuchungsgebietes.

Das Gebiet des Elb-Havel Winkels stellt einen Landschaftsbereich dar, dessen Entwicklung hauptsächlich durch die Folgen der letzten Weichsel-Kaltzeit bestimmt wurde. Hier erreichten die Gletscher im Brandenburger Stadium vor ca. 20 000 Jahren ihre maximale Ausdehnung. Die Elbe markiert die in Nord-Südrichtung verlaufende Grenze zwischen Alt- und Jungmoränenlandschaft. Seine Ausformung erfuhr das Elb-Havelgebiet während des letzten Abschnittes des Weichsel-Hochglazials durch Schmelzwässer. In den Niederungen wurden spätglazial geschüttete Talsande und Auensedimente als Hochflutbildungen abgelagert. Auf diesen Ablagerungen setzte die Bodenbildung ein, die in der Folge immer wieder durch Hochflutereignisse überprägt und beeinflusst wurde und im rezenten Überflutungsbereich noch weiter überprägt wird (ALTERMANN ET AL. 1999).

**IV-4.5.2 Hydrologie, Fließgewässerhydraulik und Klimatologie**

Die Elbe ist der wichtigste Vorfluter in beiden Untersuchungsgebieten. Sie zählt mit eine Länge von 1091 km und einem Einzugsgebiet von 148268 km<sup>2</sup> zu den größten Flüssen Mitteleuropas. Das Abflussverhalten wird vorwiegend durch Winter- und Frühjahrs,hochwasser geprägt.

Für die hydrologischen Verhältnisse sind folgende Werte charakteristisch (Tab. IV-4.1):

**Tab. IV-4.1** Einzugsgebietsgröße A<sub>E</sub> und Abfluss am Gebietsauslass bei Elbe-km 422,6 aus dem hydrologischen Längsschnitt der Elbe 1964-95 (HELMs et al. 1999)

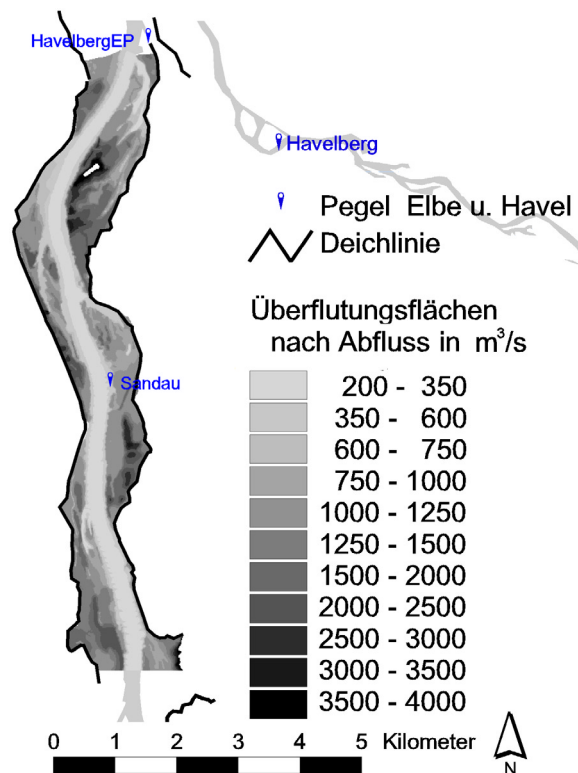
A <sub>E</sub> [km <sup>2</sup> ]	MQ [m <sup>3</sup> /s]	MHQ [m <sup>3</sup> /s]	HQ <sub>5</sub> [m <sup>3</sup> /s]	HQ <sub>10</sub> [m <sup>3</sup> /s]	HQ <sub>20</sub> [m <sup>3</sup> /s]	HQ <sub>100</sub> [m <sup>3</sup> /s]
98322	583	1722	2275	2718	3114	3918

Im Umland des Untersuchungsgebietes liegen zwei Elbepegel (Havelberg EP Elbe-km 422,5 und Sandau Elbe-km 416,6) sowie zwei Havelpegel (Havelberg Havel-km 145,2 und Rathenau Havel-km 103,5).

Die Wasserspiegellagen werden mit einem instationären zweidimensionalen numerischen Modell auf Grundlage der Flachwassergleichung berechnet (SCHWANENBERG ET AL. 2001). Für 18 Abflüsse von Q = 250 m<sup>3</sup>/s bis Q = 3918 m<sup>3</sup>/s (entspricht HQ<sub>100</sub>) liegen von Elbe-km 412,0 bis 424,4 die

Wasserstände und Überflutungsflächen als westliche Randbedingung für das Grundwassermodell vor (siehe Abb. IV-4.3).

Für die Havel liegen keine hydraulischen Berechnungen vor. Da dieses Gewässer nur eine geringe mittlere Wasserspiegelneigung von 0,06 ‰ besitzt, wird zwischen dem Pegel Rathenau und dem Pegel Havelberg linear interpoliert.



**Abb. IV-4.3** Überflutungsflächen aus Ergebnissen der instationären numerischen Modellierung (SCHWANENBERG 2000, verändert)

Die klimatischen Verhältnisse sind den Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) entnommen. Im näheren Umland des Untersuchungsgebietes liegen 13 Niederschlagsstationen. Als charakteristische Werte für das Untersuchungsgebiet werden hier die Werte Station Havelberg für den Zeitraum 1964-1995 angegeben.

Klimastation Havelberg:

- Mittlerer Jahresniederschlag: 532 mm
- Mittlere Jahrestemperatur: 8,8 °C

### IV-4.5.3 Hydrogeologie

Hydrogeologisch ist das Untersuchungsgebiet geprägt durch den guten hydraulischen Kontakt zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser aufgrund der gut durchlässigen Sande der Flusssohlen von Elbe und Havel. Diese gute hydraulische Anbindung bedingt einen Wechsel von influenten und effluenten Zuständen je nach Flusswasserstand. Um die Gefahr des Rückstaus in das Untere Havelgebiet bei Elbehochwasser zu verringern, wurde ein Trenndeich zwischen Elbe und Havel errichtet und die Havelmündung von 1772 bis 1956 um über 10 km nach unterstrom verlegt (ROMMEL 2000). Dadurch erzielte man eine Verringerung der Rückstauhöhe in der Havelaue um 2,8 m (SIMON 1996) und einen Mittelwasserstand der Havel beim Pegel Havelberg, der 1,3 m unterhalb des Mittelwasserstandes am Elbepegel Havelberg liegt. Die Havel stellt somit den eigentlichen Vorfluter des Gebietes dar.

Für die Flussauen ist ein stark inhomogener heterogener und anisotroper Untergrundaufbau charakteristisch, der aufgrund von zeitlich und räumlichen Änderungen der fluviatilen Erosions-, Transport- und Sedimentationsvorgänge entstanden ist. Die Elbaue setzt sich dabei aus einem Mosaik von Sedimentationskörpern zusammen (siehe Abb. II-1.11 in Kap. II-1.1: SAUCKE & BRAUNS 2001), die zu verschiedenen alten Elbeläufen des zwischen seinen Talrändern pendelnden Flusses gehören (ROMMEL 1998).

Aufgrund von flussgeologische Prozessen im Holozän und der daraus folgenden Laufverlegungs-dynamik (siehe Abb. II-1.8 in Kapitel II-1.1: SAUCKE & BRAUNS (2001) für den Bereich Sandau) entstand eine komplexe Abfolge von Auensedimenten verschiedener Mächtigkeit und Struktur mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten. Im Grundwasser kommt es daher je nach Auendeckenstruktur und Grundwasserstand zu ungespannten, teilgespannten oder gespannten Verhältnissen. Im Bereich der Ohremündung wurde die holozäne Sedimentation kartiert und im Grundwassermodell von MOHRLOK & JIRKA (2001) weiter verarbeitet. Für das Untersuchungsgebiet Sandau liegen solche umfangreichen Arbeiten nicht vor und können auch nicht in den eindimensionalen Modellansatz eingebaut werden.

Für die Kalibrierung des Grundwassermodells müssen die Parameter Mächtigkeit des Aquifers bzw.

Aquiferbasis, hydraulische Leitfähigkeit und der Speicherkoeffizient abgeschätzt werden. Wegen der Komplexität des Aquiferaufbaus werden Parameterbereiche aus der Hydrogeologischen Karte HK50 Blatt Sandau (Maßstab 1:50000) abgeleitet und mit Hilfe der Modellkalibrierung weiter eingegrenzt.

Die hydraulische Leitfähigkeit und der Speicherkoeffizient werden für das gesamte Gebiet als einheitlicher Wert gewählt. Für das Untersuchungsgebiet liegt ein digitales Geländemodell (DGM) im 10 m Raster vor, das im wesentlichen auf Topographischen Karten 1:10 000 beruht (SCHWANENBERG ET AL. 2001). Das Relief der Aquiferbasis (siehe Abb. IV-4.4) wird ebenfalls als 10 m Raster flächendifferenziert aus der Hydrogeologischen Karte abgeleitet und während der Kalibrierung verändert.

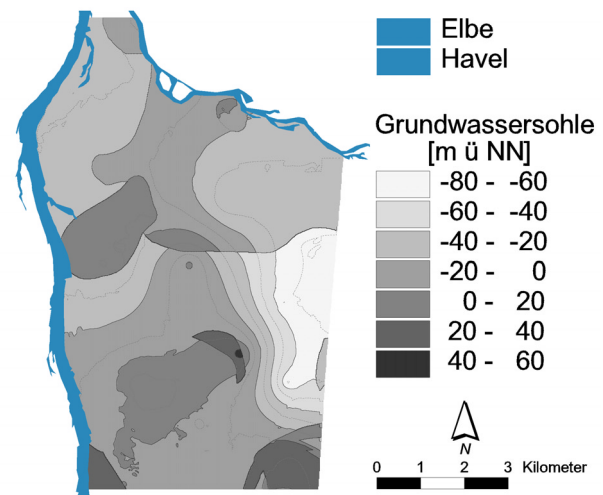


Abb. IV-4.4 Relief der Aquiferbasis auf Basis der Hydrogeologischen Karte (HK 50).

#### IV-4.5.4 Grundwasserdaten und Bestimmung der Randbedingungen

Im Untersuchungsgebiet befinden sich 22 Grundwassermessstellen des Staatlichen Amtes für Umwelt (STAU) Magdeburg (siehe Abb. IV-4.5). Die Messreihen des STAU decken allerdings unterschiedliche Zeitspannen von 7 Jahren (GW2849) bis 36 Jahren (GW2906) in einem Zeitraum vom 1.11.1963 bis 22.10.1999 ab.



Abb. IV-4.5 Grundwassermessstellen im Untersuchungsgebiet.

Um das Untersuchungsgebiet zu begrenzen, müssen zwei räumliche Ränder festgelegt werden, für die Zeitreihen der Wasserstände bzw. Grundwasserstände von 1964 bis 1995 in diskreten Abständen (100m) berechnet werden.

Als westlicher Rand wird die Mittelwasserlinie der Elbe verwendet. Die Zeitreihe der Elbe-Wasserstände wird als Randbedingung über instationäre zweidimensionale numerische hydraulische Modellierung bestimmt.

Der östliche Rand wird von km 0,0 (Grundwassermessstelle GW2810) an der südöstlichen Ecke des Untersuchungsgebiets bis km 6,9 (Grundwassermessstelle GW2921) aus den Grundwasserzeitreihen GW2810, GW 2853 und GW2921 bestimmt.

Von km 6.9 bis 7.8 wird zwischen der Grundwasserzeitreihe GW2921 und Havel-km 140,7 interpoliert.

Die Havelstrecke von Havel-km 140,7 bis 147,3 (entspricht der Kilometrierung östlicher Rand km 7,8 bis km 14,4) wird durch lineare Interpolation der Havelpegel Wasserstandszeitreihen Rathenau (Havel-km 103,5) und Havelberg (Havel-km 145,2) bestimmt.

#### IV-4.6 Analytisches Grundwassermodell

##### IV-4.6.1 Anordnung der Berechnungsknoten und Transekten

Das Gebiet wird im Preprocessing mit einem Knotennetz belegt und für jeden Knoten wird eine Transekte festgelegt, der ein eigener Parametersatz zugeordnet wird. Im Modelldurchlauf wird jede Transekte einzeln modelliert (siehe Abb. IV-4.6).

Die Anordnung dieses Knotennetzes erfolgt unter Berücksichtigung von drei Aspekten:

- Die Ausrichtung des Knotennetzes erfolgt entlang des Hauptvorfluters als westliche Randbedingung in diskreten Abständen
- Die Entwicklung der Knoten entlang einer Linie erfolgt senkrecht zur Achse des Hauptvorfluters
- Aufgrund der Abnahme der Grundwasserdynamik mit zunehmendem Abstand vom Vorfluter, werden die Abstände der Knoten einer Linie mit der Entfernung vom Vorfluter größer

Die Transekten werden so gelegt, dass der Einfluss der Randbedingungen maximiert wird. Dies bedeutet, dass die Transekten nicht immer gerade verlaufen, sondern am Knotenpunkt abknicken können.

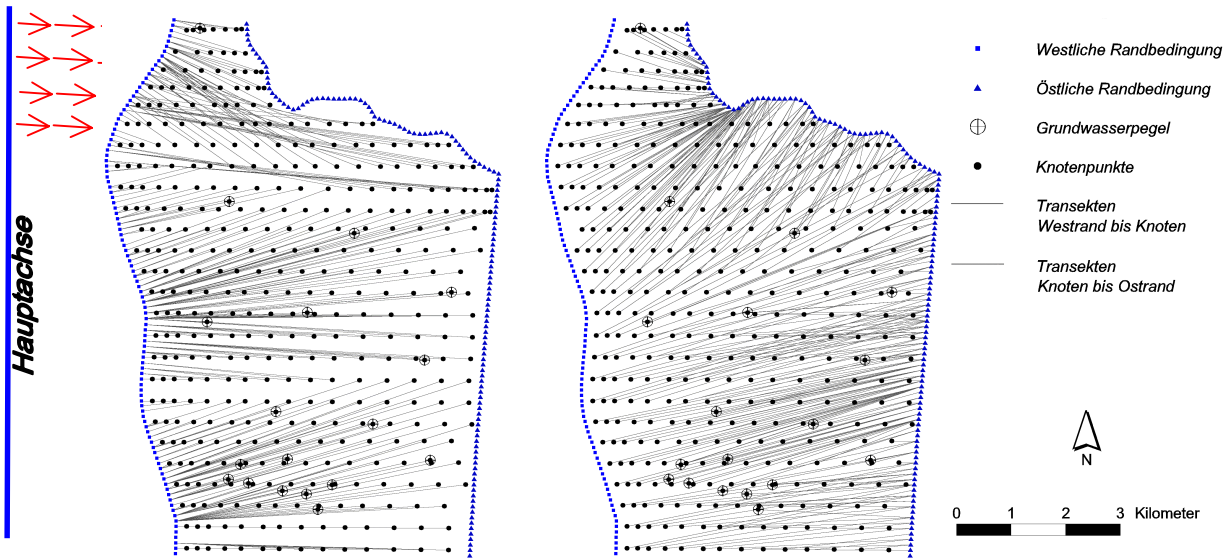


Abb. IV-4.6 Anordnung der Knotenpunkte und Aufteilung der Transekten in zwei Abschnitte.

Zur Ermittlung der Lage der Transekten für die Berechnungsknoten wird jede Transekten in zwei Abschnitte unterteilt:

1. Abschnitt vom westlichen Rand (Elbe) zum Knotenpunkt (siehe Abb. IV-4.6 linke Seite). Der Ansatzpunkt am westlichen Rand ergibt sich aus der minimalen Distanz zwischen Elbe und Knotenpunkt, wobei sich der Ort des westlichen Randes je nach Überflutungszustand verändern kann. Anhand der Transekten der Messstelle GW0006 wird für zwei Abflüsse

( $Q = 456 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $Q = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und den entsprechenden Überflutungszuständen in Abb. IV-4.7 dieses Verfahren detaillierter beschreiben.

2. Abschnitt vom Knotenpunkt zum östlichen Rand (siehe Abb. IV-4.6 rechte Seite). Der Ansatzpunkt am östlichen Rand ergibt sich zunächst wieder aus der minimalen Distanz. Während der Kalibrierung kann der Ansatzpunkt jedoch verändert werden.

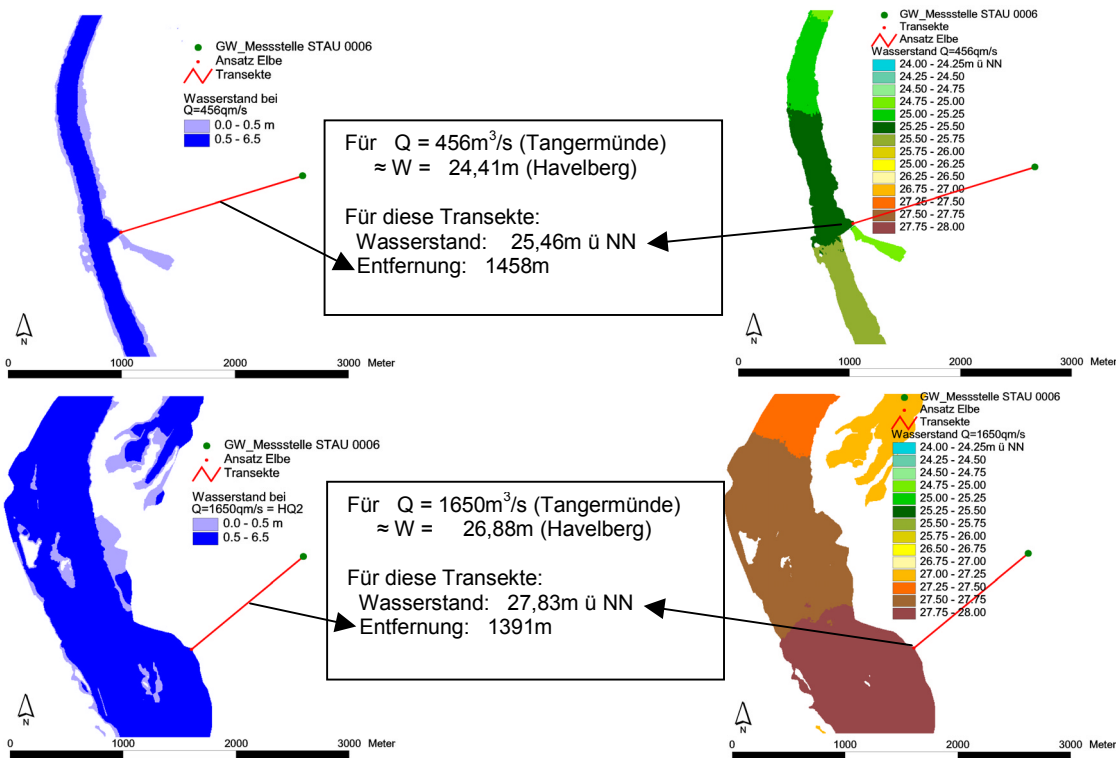


Abb. IV-4.7 Veränderung der Lage der Transekten bei unterschiedlichen Abflüssen/Überflutungszuständen der Elbe.

#### IV-4.6.2 Parameterermittlung aus den Transekten

Aus den Transekten werden die räumlichen Parameter abgeleitet, die für eine Simulation benötigt werden.

Für das Grundwassermodul sind dies folgende:

- Punkt an dem die Transekte den westlichen Rand (1. Rand) schneidet. Dies ist wichtig für die Bestimmung des Ortes, an dem der Vorfluterwasserstand zu ermitteln ist
- Entfernung vom westlichen Rand zum Knoten
- Punkt an dem die Transekte den zweiten Rand schneidet
- Entfernung vom Knoten zum zweiten Rand
- Höhe der Geländeoberkante am Knoten
- Höhe der Grundwassersohle aus Mittelung der Grundwassersohle entlang der Transekte
- Piezometerhöhe am Knoten zum Startzeitpunkt der Modellierung

Für das Bodenwassermodul werden entlang einer Transekte entsprechend ihrer Länge (bis zu neun) Standorte mit einem Mindestabstand von 200 m gewählt. An diesen Standorten werden voneinander unabhängig die Grundwasserneubildung berechnet und der Mittelwert gebildet.

Die räumlichen Parameter für das Bodenwassermodul sind:

- Entfernung des Standortes vom Vorfluter (1. Rand)
- Geländehöhe des Standortes
- Indize zur Zuordnung zu einer Landnutzung und zu einem Bodenparametersatz

#### IV-4.6.3 Grundwasserhydraulik

Die Grundgleichung der Grundwasserbewegung für den instationären Fall lässt sich kombinieren aus der Kontinuitätsgleichung für ideale Flüssigkeiten und dem Gesetz von *DARCY*.

Es ergibt sich daraus die *LAPLACE*-Gleichung für den dreidimensionalen Abfluss:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R$$

mit:

- $x, y, z$ : Richtungen im Koordinatensystem
- $K_{x,y,z}$ : Durchlässigkeitsbeiwert in  $x, y, z$  Richtung
- $h$ : Grundwasserpotential zur Bezugshöhe 0 als Aquiferbasis
- $S$ : Speicherkoeffizient (im ungespannten Aquifer effektive Porosität)
- $R$ : Zufluss zum Grundwasser aus dem Niederschlag

(1)

Unter der Annahme, der *DUPUIT*-Voraussetzungen, bei der die Durchlässigkeit  $K$  in alle Richtungen gleich ist (isotroper Aquifer) und unter der Annahme, dass man sich nur für die Abflussänderung in einer Dimension interessiert, um die Dynamik des Grundwassers zu erfassen, kann man die *LAPLACE*-Gleichung zur nichtlinearen *BOUSSINESQ*-Gleichung umformen.

Da in Flussauen mit geringem Gefälle die Änderungen des Grundwasserpotential  $h$  im Vergleich zur gesamten Mächtigkeit des Aquifers als gering angesehen werden kann, wird die *BOUSSINESQ*-Gleichung dadurch linearisiert, dass eine mittlere konstante Transmissivität des ungespannten Aquifers angenommen wird.

$$T = k \cdot \bar{h} \quad (2)$$

Es ergibt sich hieraus die linearisierte *BOUSSINESQ*-Gleichung:

$$T \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = S \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (3)$$

Die Bedingungen sind hier noch einmal zusammengefasst:

- Isotropie, d.h. die Durchlässigkeit ist in alle Richtungen gleich groß
- Die Dichte des Grundwassers ist im gesamten Aquifer einheitlich
- Da die Mächtigkeit des Aquifers groß ist im Verhältnis zur Änderung des Grundwasserspiegels mit der Zeit und dem Ort kann angenommen werden, dass der Stromlinienverlauf horizontal ist und die Linearisierung eine angemessene Näherung darstellt
- Es wird nur eine Strömungsrichtung (eindimensional) betrachtet, da für die Grundwasserdynamik nur der Vorfluterwasserstand, der Niederschlag und der Einfluss von überstauten Flächen als relevante Einflussgrößen angenommen werden.

### Analytische Lösung der Grundwassergleichung

Am Beispiel einer Transekte mit Randbedingungen des Dirichlet-Typs (zeitlich variable Piezometerhöhe) wird die Vorgehensweise der eindimensionalen analytischen Lösung beschrieben. Hierzu sind weitere Annahmen notwendig:

- Es handelt sich um einen ungespannten Aquifer.
- Der Vorfluter steht im direkten hydraulischen Kontakt mit dem Grundwasser. Die Randbedingung am linken Rand (Vorfluter) ist der Wasserstand des Vorfluters und entspricht der Piezometerhöhe bei  $h(x=0,t)$ .
- Die Randbedingung am rechten Rand ist entweder feste Piezometerhöhe (Dirichlet-Typ) oder fester gegebener Zufluss (Neumann-Typ).

Aufgrund der Linearität der Gleichung (3) kann die Lösung in zwei verschiedene Komponenten aufgeteilt werden: in einen stationären Anteil  $V(x)$  und einen instationären Anteil  $u(x,t)$ . Die Lösung von Gleichung (3) kann als Summe der beiden Komponenten ausgedrückt werden (POWERS 1979 und BRAUN 1994).

$$h(x,t) = V(x) + u(x,t) \quad (4)$$

Die Lösung für den stationären Anteil  $V(x)$  kann einfach berechnet werden (POWERS 1979 und WORKMAN ET AL. 1997).

Der instationäre Anteil  $u(x,t)$  stellt eine partielle Differenzialgleichung dar. Dieses Gleichungssystem wird dadurch gelöst, dass man das Problem auf die Lösung zweier gewöhnlicher Differenzialgleichungen zurückführt (Separation der Variablen) und anschließend die Linearkombination (Superposition) der Funktionen  $u_n(x,t)$  bestimmt wird (POWERS 1979 und BRAUN 1984).

Die Lösung der linearisierten *BOUSSINESQ*-Gleichung (3):

$$T \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = S \frac{\partial h}{\partial t} - R$$

mit den folgenden Randbedingungen:

$$\begin{aligned} h(0,t) &= h_1(t) \\ h(L_x,t) &= h_2(t) \\ h(x,0) &= h_0(x) \end{aligned} \quad (5)$$

mit:

- $h(x,t)$ : Piezometerhöhe zum Ort  $x$  und zur Zeit  $t$
- $h_1(t)$ : Linke zeitabhängige Randbedingung
- $h_2(t)$ : Rechte zeitabhängige Randbedingung
- $h_0(x)$ : Piezometerverteilung über  $x$  zum Zeitpunkt  $t_0$  (Anfangsbedingung)
- $L_x$ : Länge der Transekte [m]

kann mit folgender Gleichung angegeben werden:

$$\begin{aligned} h(x,t) = & -\frac{R}{2T}x^2 + \frac{RL_x}{2T}x + \frac{(h_2 - h_1)}{L_x}x + h_1 \\ & + \frac{2}{L_x} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \int_0^{L_x} (h_0(x) - V(x)) \sin(\lambda_n x) dx \cdot \right. \\ & \left. \sin(\lambda_n x) \exp\left(-\frac{\lambda_n^2 T t}{S}\right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{mit } \lambda_n = n\pi/L_x \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Zur Bestimmung der Anfangsbedingungen werden die Piezometerhöhen  $h(x,t)=0$  als stationärer Anteil bei einem bestimmten Vorfluterwasserstand  $h_1(t=0)$  und bei einer bestimmten Grundwasserneubildungsrate ( $R$ ) berechnet.

Bei der quasi-instationären Simulation werden die zeitlich variablen Randbedingungen pro Zeitschritt (1 Tag) sprunghaft verändert und für diesen Parametersatz der Zustand ermittelt, den das System innerhalb des gewählten Zeitschrittes erreicht. Für den nächsten Zeitschritt gelten die berechneten Piezometerhöhen  $h(x,t)$  als Anfangsbedingungen.

#### IV-4.6.4 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildungsrate wird über ein Bodenwasserhaushaltsmodell berechnet. Hierzu wird ein Speichermodellansatz gewählt, der eine Auffüllung des Bodens bis zur Feldkapazität zulässt und darüber hinaus infiltrierenden Niederschlag als Perkolationswasser in das Grundwasser abgibt (HENNIG ET AL. 1992, DISSE 1995, SCHULLA 1998).

Die Vorteile dieses Ansatzes liegen in der Verwendung einfacher Kennwerte des Bodenwasserhaushaltes und in der geringen Rechenzeit.

Für vegetationsbedeckte Standorte lässt sich der Wasserhaushalts durch die Gleichung beschreiben:

$$N = I + E + kA + \Delta S + GN \quad [\text{mm/d}] \quad (7)$$

Im einzelnen stellen  $N$  den Niederschlag,  $I$  den Interzeptionsverlust,  $E$  die aktuelle Evapotranspiration,  $kA$  den kapillaren Aufstieg,  $GN$  die vertikale Versickerung (Grundwasserneubildung) und  $\Delta S$  die



Änderung des gespeicherten Bodenwasservorrates dar. Für ebene Standorte kann der Oberflächen- und der oberflächennahe Abfluss vernachlässigt werden.

Die einzelnen Glieder der Gleichung (7) werden jeweils durch in sich abgeschlossene Prozesse modelliert.

Die Interzeption wird über ein statistisches Modell nach HOYNINGEN-HUENE (1983) berechnet. Zur Ermittlung der potentiellen Evapotranspiration wird das Verfahren nach HAUDE verwendet und mit dem Modell von RENGER ET AL (1974) zur aktuellen Verdunstung weiterverarbeitet. Der kapillare Aufstieg wird nach RENGER ET AL (1974) modelliert, jedoch im folgenden vernachlässigt, da der Einfluss auf den Grundwasserspiegel relativ gering ist und Fehler in der Berechnung des kapillaren Aufstiegs, aufgrund der Unsicherheiten im digitalen Gelände-modell sehr hoch sind.

#### IV-4.6.5 Kopplung von Grundwasser- und Bodenwassermodell

Da innerhalb der Transekte nur eine einheitliche Grundwasserneubildungsrate angenommen werden kann (siehe Glg. 3), wird die Grundwasserneubildungsrate aus mehreren Bodenwasserknotenpunkte entlang der Transekte gemittelt. Je nach Länge der Transekte werden hierzu bis zu neun Bodenwasserhaushaltsberechnungen durchgeführt.

### IV-4.7 Modellanpassung und Validierung

#### IV-4.7.1 Modellierung von 19 Grundwassermessstellen

Bei der Modellkalibrierung werden die Modellparameter ermittelt. Für das Grundwassermodul sind dies vier Parameter deren Anfangswerte zunächst nur abgeschätzt werden:

1. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  für das gesamte Gebiet
2. Der Speicherkoeffizient  $n_e$  für das gesamte Gebiet
3. Die Endpunkte der Transekten am Vorfluter Havel oder östlichen Rand werden durch minimale Entfernung vom Rand zum Knotenpunkt bestimmt

4. Die Aquifersohle aus Aquiferbasiskarte (siehe Abb. IV-4.5) für jede der 19 Messstellen, wird aus dem arithmetischen Mittel über die Transekte berechnet

Das Bodenwassermodell besitzt jeweils zwei Parameter für jede der vier Landnutzungsformen (Grünland, Acker, Wald, Bebauung):

1. Nutzbare Feldkapazität nFK (aus Bodenübersichtskarte 1:1Mio)
2. Wurzeltiefe  $L_{WRZ}$  (aus Bodenübersichtskarte 1:1Mio)

Die Ergebnisse werden anhand von 19 Grundwasserzeitreihen validiert. Da die Zeitreihen unterschiedliche Zeitspannen im Zeitraum 1970 bis 1999 abdecken, werden die 19 Grundwasserknotenpunkte im Zeitraum 1970 bis 1999 modelliert und in drei unterschiedlichen Zeiträumen (72-79, 83-90 und 88-95) mit den Messwerten verglichen.

Die Kalibrierung erfolgt mittels eines multiobjektiven, generativen Verfahrens (MOCOM-UA Methode GUPTA ET AL. 1998) und visueller Überprüfung der Ergebnisse. Die Kalibrierung der Grundwasserparameter wird nach zwei Gütemaßen beurteilt:

- Summe aller 19 gewichtet quadratischer Fehler. Die Gewichtung wird durch die Standardabweichung der Messzeitreihe vorgenommen und entspricht somit dem NASH-SUTCLIFF Gütemaß. Damit wird berücksichtigt, dass bei vorfluternahen Grundwasserpegeln mit einer hohen Amplitude auch ein größerer absoluter und quadratischer Fehler auftritt.
- Summe aller 19 quadratischen Fehler der Grundwasser Dauerlinien Dezentile. Da die Modellierung vor allem die Dynamik des Systems widerspiegeln soll und die Dauerlinie eine Möglichkeit zur Darstellung dieser Dynamik ist, wird für jeden Grundwasserpegel der quadratische Fehler der Dauerlinien Dezentile aufsummiert.

Das Ergebnis der Kalibrierung ist eine homogene Leitfähigkeit von  $3,5 \cdot 10^{-3}$  m/s und ein Speicherkoeffizient von 0,25. Weiterhin wird die Aquiferbasis für jede Transekte und der Endpunkt der Transekten am östlichen Rand verändert. Für das Bodenwassermodell wird die nutzbare Feldkapazität und die Wurzeltiefe je nach Landnutzung verändert. Die Gütekriterien für alle 19 Grundwassermessstellen

sind in Tab. IV-4.2 jeweils für die drei unterschiedlichen Zeiträume aufgelistet.

Durch die Kalibrierung wird die Übereinstimmung der modellierten Zeitreihen an die gemessenen Zeitreihen verbessert. Im Mittel über alle 19 Grundwassermessstationen stellt sich ein mittlerer absoluter Fehler von 0,22 m und ein mittlerer quadratischer Fehler von 0,29 m ein. Die Güte der Anpassung

nimmt dabei mit zunehmender Entfernung von der Elbe ab.

Für die elbnahen Standorte GW2941 (Entfernung von der Elbe 298m), GW2906 (Entfernung 997 m) und GW2903 (Entfernung 1018 m) sind die Anpassungen gut mit mittleren quadratischen Fehlern bis zu 0,27 m.

**Tab. IV-4.2** Gütekriterien der 19 Grundwassermessstellen für verschiedene Zeiträume nach der Kalibrierung.

<b>1988-95 [m]</b>	<b>GW0006</b>	<b>GW2941</b>	<b>GW2811</b>	<b>GW2850</b>	<b>GW2851</b>	<b>GW2852</b>	<b>GW2906</b>	<b>GW2908</b>	<b>GW2920</b>	<b>GW2930</b>
Messzeitraum <sup>1</sup>	1976-99	1969-99	1978-99	1968-99	1968-99	1968-99	1964-99	1973-99	1968-99	1983-98
Max. Entfernung von der Elbe <sup>2</sup>	1817	298	4647	2313	2810	4665	997	2835	5494	1306
Mittelwert Mess. <sup>3</sup>	24,48	24,15	25,64	25,69	25,52	24,85	25,27	24,85	24,24	25,69
Mittelwert Modell <sup>4</sup>	24,47	24,04	25,52	25,67	25,50	24,86	25,32	24,88	24,16	25,76
Standardabw. Mess. <sup>5</sup>	0,52	0,65	0,25	0,38	0,29	0,28	0,64	0,32	0,36	0,43
Standardabw. Mod. <sup>6</sup>	0,63	0,67	0,30	0,49	0,47	0,33	0,65	0,49	0,32	0,52
Spannweite Mess. <sup>7</sup>	2,10	2,09	1,00	1,66	1,34	1,36	2,66	1,54	1,53	1,71
Spannweite Mod. <sup>8</sup>	2,64	2,19	1,07	2,10	2,01	1,44	2,85	2,17	1,52	2,25
Maximaler Fehler (GW <sub>Mess</sub> -GW <sub>Sim</sub> ) <sup>9</sup>	-0,90 08.05.95	-0,75 22.12.89	0,37 22.10.95	-0,72 22.07.95	-0,86 22.05.94	-0,48 08.06.94	1,44 22.12.93	-1,15 22.05.94	0,63 01.01.94	-0,79 15.05.94
Mittl. Abs. Fehler <sup>A</sup>	0,189	0,171	0,146	0,210	0,248	0,123	0,156	0,258	0,184	0,194
Mittl. Quad. Fehler <sup>B</sup>	0,254	0,205	0,167	0,277	0,314	0,154	0,201	0,334	0,225	0,255
Mittl. Quad. Fehler Dauer-Dezentile <sup>C</sup>	0,192	0,135	0,131	0,164	0,225	0,063	0,120	0,246	0,100	0,212
Max. Abs. Fehler Dauer-Dezentile <sup>D</sup>	0,520	0,230	0,170	0,400	0,480	0,170	0,310	0,550	0,180	0,600

<b>1972-79 [m]</b>	<b>GW2918</b>	<b>GW2849</b>	<b>GW2880</b>	<b>GW2900</b>	<b>GW2902</b>	<b>GW2903</b>	<b>GW2910</b>	<b>83-90</b>	<b>GW2915</b>	<b>GW2932</b>
Messzeitraum <sup>1</sup>	1973-82	1976-82	1964-94	1968-87	1968-90	1968-82	1971-83		1983-90	1983-90
Max. Entfernung von der Elbe <sup>2</sup>	3924	2473	5022	1905	1356	1018	3838		2206	2163
Mittelwert Mess. <sup>3</sup>	24,17	25,64	24,53	25,77	25,95	25,85	25,04		25,33	25,61
Mittelwert Modell <sup>4</sup>	24,13	25,89	24,50	25,78	25,90	25,96	25,07		25,57	25,71
Standardabw. Mess. <sup>5</sup>	0,33	0,42	0,29	0,42	0,51	0,46	0,26		0,34	0,27
Standardabw. Mod. <sup>6</sup>	0,44	0,35	0,30	0,45	0,49	0,52	0,32		0,41	0,42
Spannweite Mess. <sup>7</sup>	1,56	2,25	1,43	2,18	2,40	2,57	1,43		1,46	1,41
Spannweite Mod. <sup>8</sup>	1,82	1,73	1,42	1,92	2,27	2,52	1,36		1,72	1,80
Maximaler Fehler (GW <sub>Mess</sub> -GW <sub>Sim</sub> ) <sup>9</sup>	-1,35 15.05.79	-0,87 22.08.76	-0,53 22.06.79	-0,63 15.02.75	-0,82 22.09.77	-1,03 15.01.75	-1,22 22.03.75		-1,11 08.05.88	-1,43 15.05.87
Mittl. Abs. Fehler <sup>A</sup>	0,393	0,305	0,161	0,183	0,201	0,203	0,184		0,338	0,315
Mittl. Quad. Fehler <sup>B</sup>	0,465	0,358	0,198	0,244	0,265	0,271	0,289		0,425	0,424
Mittl. Quad. Fehler Dauer-Dezentile <sup>C</sup>	0,184	0,297	0,052	0,074	0,090	0,149	0,066		0,282	0,225
Max. Abs. Fehler Dauer-Dezentile <sup>D</sup>	0,460	0,590	0,100	0,150	0,150	0,280	0,160		0,570	0,530

(alle Angaben in [m] außer Jahreszahlen)

- <sup>1</sup> Zeitraum in dem gemessene Daten vorliegen
- <sup>2</sup> Entfernung der Grundwasserstelle von der Elbe bei Niedrigwasser
- <sup>3,4</sup> Mittelwert der jeweiligen 7-Jahresspanne von Mess- und Modellreihe
- <sup>5,6</sup> Standardabweichung von Mess- und Modellreihe
- <sup>7,8</sup> Spannweite (Maximum – Minimum)
- <sup>9</sup> Maximaler Unterschied zwischen Mess- und Modellreihe mit Datumsangabe

- <sup>A</sup> Mittlerer absoluter Fehler
- <sup>B</sup> Mittlerer quadratischer Fehler
- <sup>C</sup> Mittlerer quadratischer Fehler der Dauersummen Dezentilen 0%, 10%, 20%, ... 100%
- <sup>D</sup> Maximaler Unterschied der Dauersummen Dezentilen 0%, 10%, 20%, ... 100%

An den elbfernen Standorten wie z.B. GW2918 (Entfernung 3929 m) und GW2880 (Entfernung 5022 m) sind die Anpassungen schlechter mit mittleren quadratischen Fehlern bis zu 0,46 m, da hier der Einfluss der Elbewasserstände abnimmt und der Einfluss von Entwässerungsgräben, seitlicher Zufluss zum Grundwasser und Wasserentnahmen zunimmt.

Die teilweise großen maximalen Fehler von über 1 m liegen darin begründet, dass der sehr schnelle Anstieg bzw. Abfall vor und nach einem Hochwasser durch das Modell zwar nachvollzogen wird, jedoch kann es zu einem Zeitversatz von mehreren Tagen kommen. Beim direkten Vergleich der Tageswerte entstehen dadurch größere Unterschiede zwischen Modell- und Messreihe, obwohl die Amplitude der Schwankung gut simuliert wird.

Die Aufgabe des Modells ist es die Dynamik der Grundwasserschwankungen aufzuzeigen. Hierbei ist es wichtig, dass die Zeitreihe möglichst genau nachgezeichnet wird, jedoch soll das Modell nicht zur Vorhersage von Grundwasserständen, sondern zur Darstellung der Dynamik des Grundwassers verwendet werden. Deshalb wurde zur Kalibrierung nicht nur die beste Anpassung an die gemessene Ganglinie gewählt, sondern als zweites Kriterium die beste Anpassung an die Dauerlinie der Messreihe. Hierzu werden die quadratischen Fehler der Dauerliniendezentile und des Minimums und Maximums berechnet und aufaddiert. Der mittlere quadratische Fehler sämtlicher 19 Grundwassermessstationen liegt bei 0,16 m. Der Mittelwert der maximalen Fehler im Vergleich der Dauerlinien liegt bei 0,35 m (siehe Tab. IV-4.2).

#### IV-4.7.2 Modellierung von drei Grundwasserzeitreihen im Zeitraum 1970 - 1999

Für drei Grundwassermessstellen in unterschiedlicher Entfernung von der Elbe (GW2906 mit 997 m Entfernung von der Elbe, GW2850 mit 2313 m und GW2852 mit 4665 m) wird der gesamte Modellierungszeitraum von 29 Jahren (1.11.70 bis 31.10.99) analysiert. Für die Modellierung werden die durch die Kalibrierung ermittelten Parameterwerte verwendet.

Beim Vergleich der Hauptwerte von gemessenen Reihen mit den modellierten Reihen anhand von

Tab. IV-4.3 kann man feststellen, dass nur geringe Unterschieden auftreten. Der maximale Unterschied von Mittelwert, MNW und MHW aller drei Grundwasserzeitreihen beträgt 0,08 m (MNW an Grundwassermessstelle GW2906).

In Abb. IV-4.8 ist mit zunehmender Entfernung von der Elbe eine Abnahme der Amplitude zu beobachten. Am Pegel Sandau (Elbe-km 416,0) beträgt die Spannweite zwischen maximalem und minimalem Wasserstand 5,15 m. In 4665 m Entfernung von der Elbe, an der Grundwassermessstelle GW2852, beträgt die Spannweite noch 1,46 m, aber der Einfluss der Elbe ist selbst bei dieser Entfernung unverkennbar.

In Abb. IV-4.9 ist zu erkennen, dass die Dauerlinie und der Jahresgang der drei Grundwasserganglinien gut durch die Modellierung beschrieben werden. Der mittlere quadratische Fehler aller Dezentilen (0%, 10%, bis 100%) der Unterschreitungsdauern beträgt maximal 0,157 m bei der Grundwassermessstelle GW2906.

Tab. IV-4.3 Gütekriterien von drei Grundwassermessstellen im Zeitraum 1970-99.

1970-99 [m]	GW2906	GW2850	GW2852
MHW Messung <sup>1</sup>	26,50	26,31	25,30
MHW Modell <sup>1</sup>	26,56	26,33	25,23
Mittelwert Messung	25,50	25,80	24,94
Mittelwert Modell	25,51	25,85	24,97
MNW Messung <sup>2</sup>	24,73	25,32	24,64
MNW Modell <sup>2</sup>	24,81	25,37	24,68
Standardabw. Messung	0,63	0,38	0,26
Standardabw. Modell	0,66	0,46	0,27
Spannweite Messung	2,98	2,08	1,46
Spannweite Modell	3,49	2,11	1,44
Maximaler Fehler ( $GW_{Mess} - GW_{Sim}$ )	1,41 22.12.93	-1,18 22.04.81	0,72 01.04.84
Mittl. Abs. Fehler	0,178	0,240	0,125
Mittl. Quad. Fehler	0,238	0,323	0,161
Mittl. Quad. Fehler Dauer-Dezentile	0,157	0,092	0,047
Max. Abs. Fehler Dauer-Dezentile	0,54	0,35	0,13

(alle Angaben in [m] außer Jahreszahlen)

<sup>1</sup> Mittleres Hochwasser Messung und Modell im Zeitraum 1970-1999

<sup>2</sup> Mittleres Niedrigwasser Messung und Modell im Zeitraum 1970-1999

ansonsten siehe Tab. IV-4.2

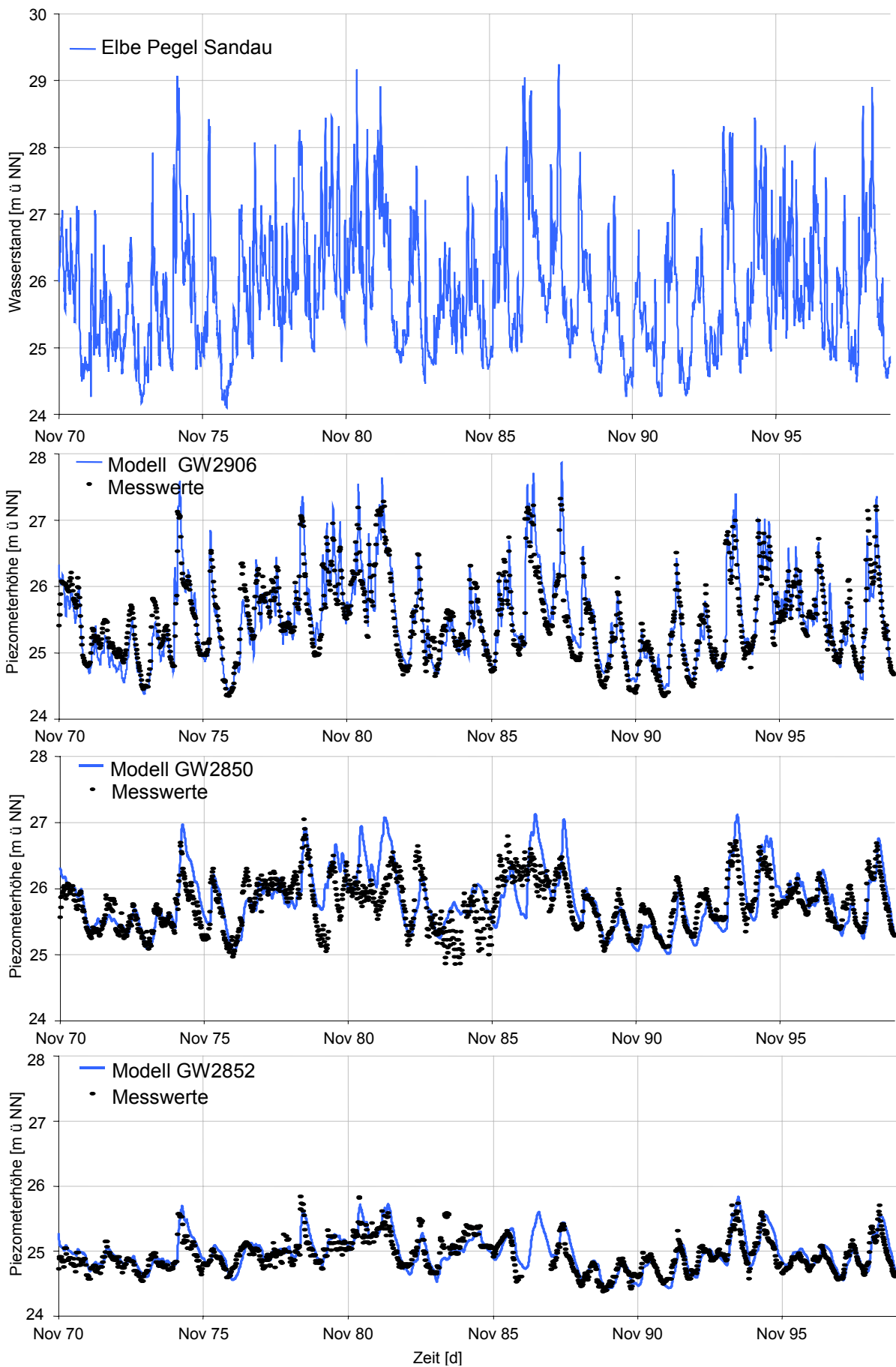


Abb. IV-4.8 Ganglinien der Elbe und dreier Grundwasserpegel vom 1.11.70 bis 31.10.99.

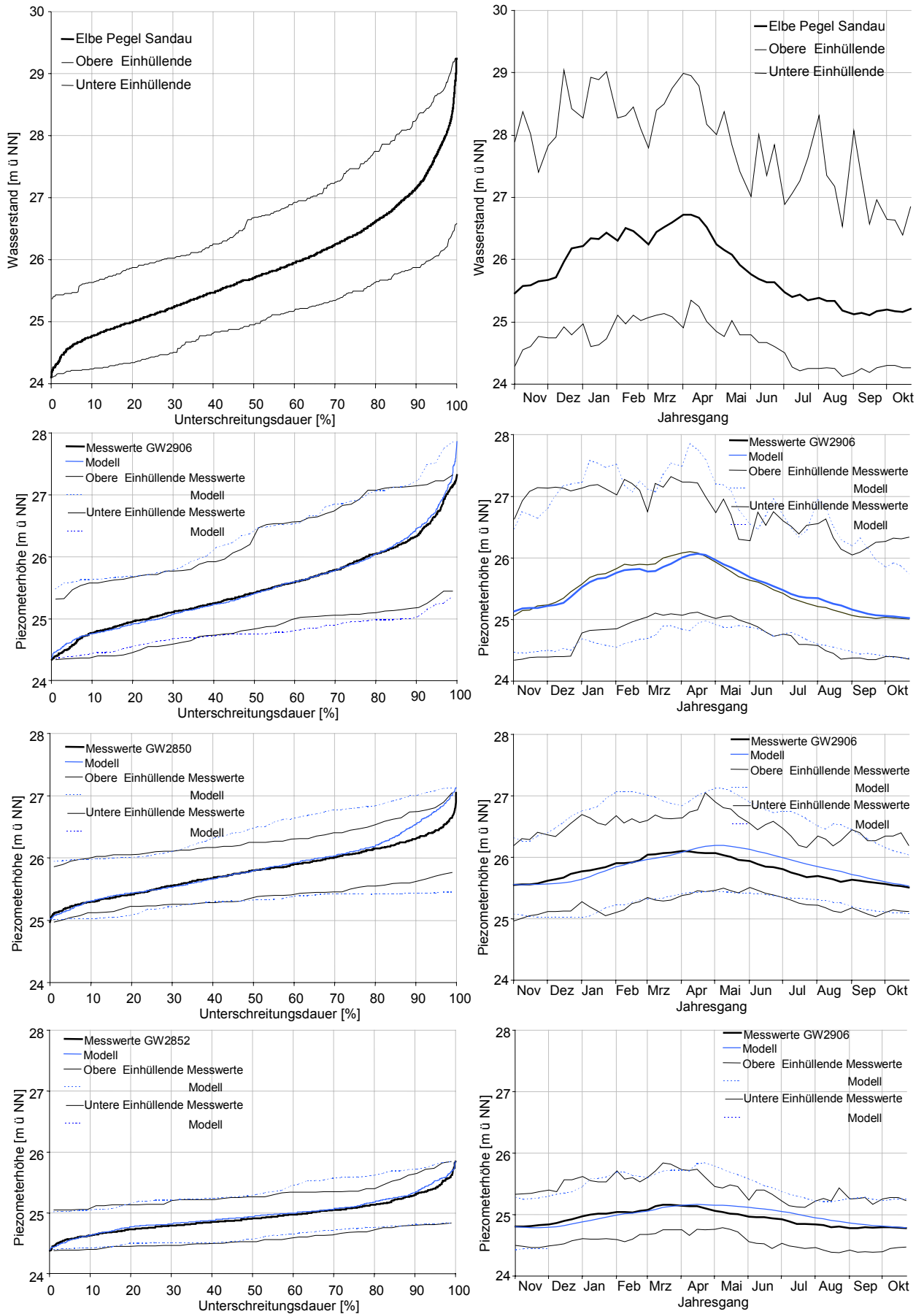


Abb. IV-4.9 Dauerlinie und Jahresgang der Elbe und dreier Grundwasserpegel, Vergleich vom Messung und Simulation.

### IV-4.7.3 Räumliche Modellierung

Für die räumliche Modellierung werden die Transekten sämtlicher 409 Knotenpunkte (siehe Abb. IV-4.6) modelliert. Das räumliche Bild entsteht durch Interpolation mittels Krigingverfahren.

In Abb. IV-4.10 werden die Grundwasseroberflächen für drei charakteristische Wasserstände der Elbe aufgezeigt, Niedrigwasser am 7.11.91 (Wasserstand Elbepegel Havelberg 23,31 m), Mittelwasser am 30.4.92 (Wasserstand Elbepegel Havelberg 24,66 m) und Hochwasser am 7.4.88 (Wasserstand Elbepegel Havelberg 27,91 m entspricht ca. HQ20).

Bei Hochwasser kommt es zu effluente Verhältnisse mit Isohypsen parallel zur Elbe. Wegen der dämpfenden Wirkung des Aquifers, dauert es Tage bis Wochen nach dem Scheitel des Elbehochwassers bis die Front der maximalen Grundwasserstände den Ostrand des Untersuchungsgebietes erreicht.

Bei Mittelwasser bilden sich Isolinien aus, die senkrecht zur Elbe und parallel zur Havel liegen. Dies bedeutet eine Strömung des Grundwassers in Richtung Nordost, die annähernd parallel zur Elbe in Richtung Havel verläuft.

Bei Niedrigwasser bilden sich bis weit in den südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes Isolinien parallel zur Havel aus. Nur in sehr geringer Entfernung zur Elbe kommt es zu influenten Verhältnissen mit Zustrom von Grundwasser in die Elbe.

### IV-4.8 Langfristige Grundwasserdynamik des Ist-Zustandes

Für die räumliche Modellierung wird der Zeitraum 1964 bis 1995 betrachtet, da dieser Zeitraum der hydrologischen Analyse (HELMS ET AL. 1999) entspricht und auch die numerische Modellierung der Wasserspiegellagen diesen Zeitraum als Datenbasis verwendet (SCHWANENBERG et al.2001).

Hierzu müssen zunächst die Zeitreihen der Randbedingungen verlängert werden, da für den östlichen Rand nur eine Zeitreihe von 1970 bis 1999 vorliegt. Mit Hilfe von Regressionsbeziehungen werden die Zeitreihen der Grundwassermessstellen GW2810 (1970-99), GW2853 (1968-99) und GW2921 im Zeitraum 1964 bis 1970 ergänzt.

Die Beschreibung der Grundwasserdynamik basiert auf der Auswertung der 32-jährigen Zeitreihen vom 1.1.1964 (da keine Daten der Havelabflüsse bzw. Wasserstände vor 1964 vorhanden sind) bis 31.10.1995 aller 409 Knotenpunkte im Untersuchungsgebiet Sandau und anschließender räumlicher Interpolation. Zur Auswertung werden folgende statistische Verfahren verwendet:

- Deskriptive Statistik zur Ermittlung von Mittelwert und Streuungsmaßen
- Ermittlung von Hauptwerten entsprechend den gewässerkundlichen Hauptwerten wie höchster bekannter Wasserstand (HHW), mittlerer jährlicher höchster Wasserstand (MHW), mittlerer jährlicher niedrigster Wasserstand (MNW) und niedrigster bekannter Wasserstand (NNW).

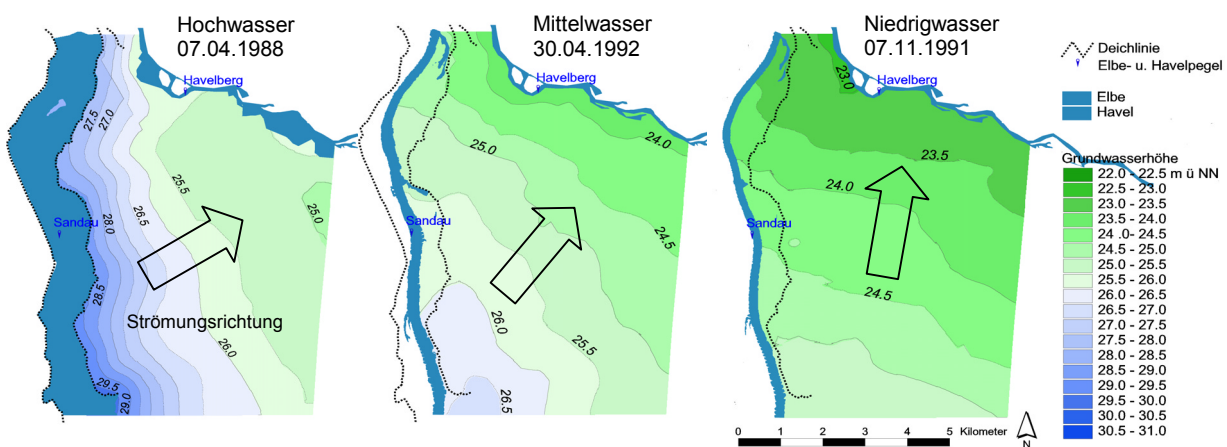


Abb. IV-4.10 Grundwasserpiezometerhöhe bei Hoch-, Mittel- und Niedrigwasser der Elbe.

- Dauerlinienanalyse zur Ermittlung von Häufigkeiten bestimmter Wasserstände

Die Ergebnisse können als räumliche Darstellung der Grundwasseroberfläche und der Flurabstände sowie als Profilschnitte erfolgen. Die Flurabstände werden durch Abzug der Grundwasseroberfläche vom digitalen Höhenmodell erzeugt.

Als beispielhafte Auswertung werden in Abb. IV-4.11 die Flurabstände der Hauptwerte gezeigt.

Bei mittlerem Niedrigwasser (MNW) sind die permanenten Gewässer Kamorscher See (mit Kürzel *K* in Abb. IV-4.11) und Trübengraben (*T*) und wenige Gebiete mit Grundwasserabständen kleiner 1m zu erkennen (Abb. IV-4.11 linkes Bild).

Bei mittlerem Hochwasser (MHW) durchströmt die Elbe die gesamte Breite zwischen den Deichen. Flächen mit oberflächlich austretenden Grundwasser (Qualmwasser) finden sich in der Nähe der Deiche, in ehemaligen Altarmen der Elbe und im Nordosten des Untersuchungsgebietes (Abb. IV-4.11 rechtes Bild).

In zwei Querschnitten in Abb. IV-4.12 bei Elbe-km 420,6 und 415,5 sind die Hauptwerte der Grundwasserstände aufgetragen. Man kann am sich verengenden Band der Hauptwerte die Abnahme der Grundwasserdynamik mit zunehmender Entfernung von der Elbe erkennen.

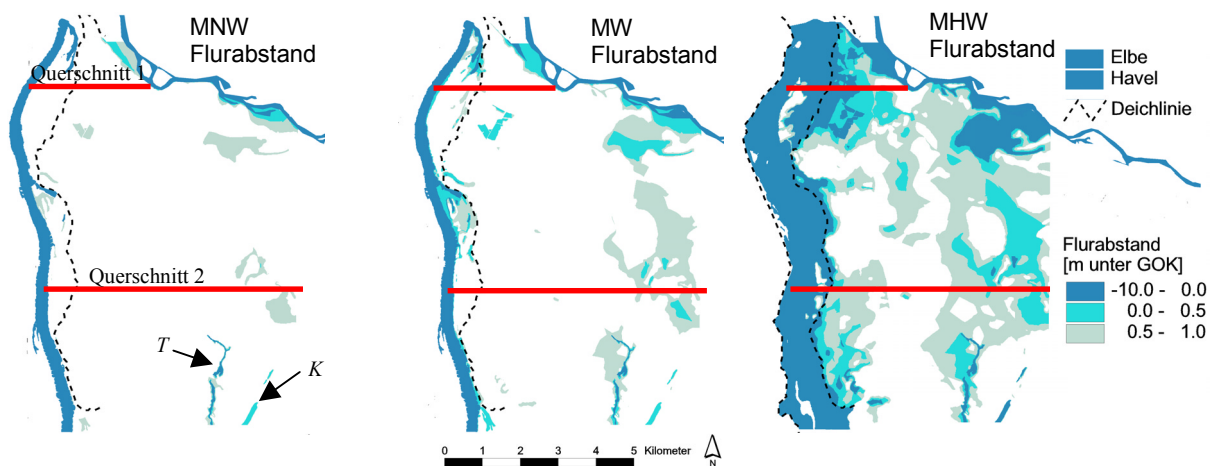


Abb. IV-4.11 Räumliche Darstellung der Hauptwerte der Grundwasserflurabstände (Ist-Zustand, Zeitreihe 1964-1995).

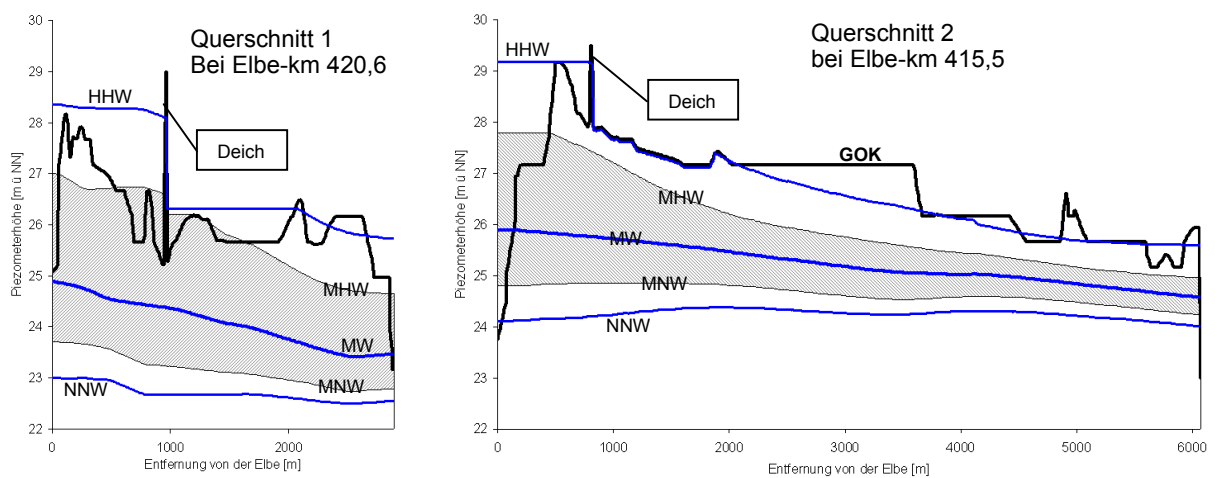


Abb. IV-4.12 Hauptwerte der Grundwasserstände in zwei Querschnitten (Ist-Zustand, Zeitreihe 1964-1995).

#### IV-4.9 Modellierung der Grundwasserdynamik bei geplanter Deichrückverlegung

Im Rahmen der Kooperation mit dem BMBF-Projekt „Rückgewinnung von Retentionsflächen und Altauenreaktivierung an der Mittleren Elbe in Sachsen-Anhalt“ wird das Grundwassermodell verwendet, um den Einfluss eines geplanten Deichrückbaus auf die Grundwasserdynamik zu untersuchen. Durch eine Überlagerung mit Ergebnissen der biologischen und bodenkundlichen Untersuchungen (des genannten Projekts) sollen Zusammenhänge herausgearbeitet werden, die zur Prognose der Entwicklung in den Rückdeichungsgebieten genutzt werden sollen (SCHWANENBERG ET AL. 2000).

Im Untersuchungsgebiet Sandau sind insbesondere zwei Deichrückverlegungsvarianten von Interesse.

Die sogenannte minimale Variante gliedert sich in zwei Teilflächen nördlich und südlich der Ortschaft Sandau mit zusammen 220 ha. In der Maximalvariante können beide Teilflächen auf zusammen 718 ha vergrößert werden (siehe Abb. IV-4.13).

Als Zeitraum der Untersuchung werden zum Vergleich mit dem Ist-Zustand die Jahre 1964 bis 1995 betrachtet. Durch die hydrodynamischen Untersuchungen von SCHWANENBERG ET AL. (2001) sind die Wasserstände und Überflutungsbereiche für 18 Abflüsse der Elbe zwischen  $Q = 258 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $Q = 3895 \text{ m}^3/\text{s}$  für den Ist-Zustand und für beide Deichrückverlegungsvarianten gegeben. Diese Wasserstände und Ausuferungszustände werden als westliche Randbedingungen für das Grundwassermodell genutzt.

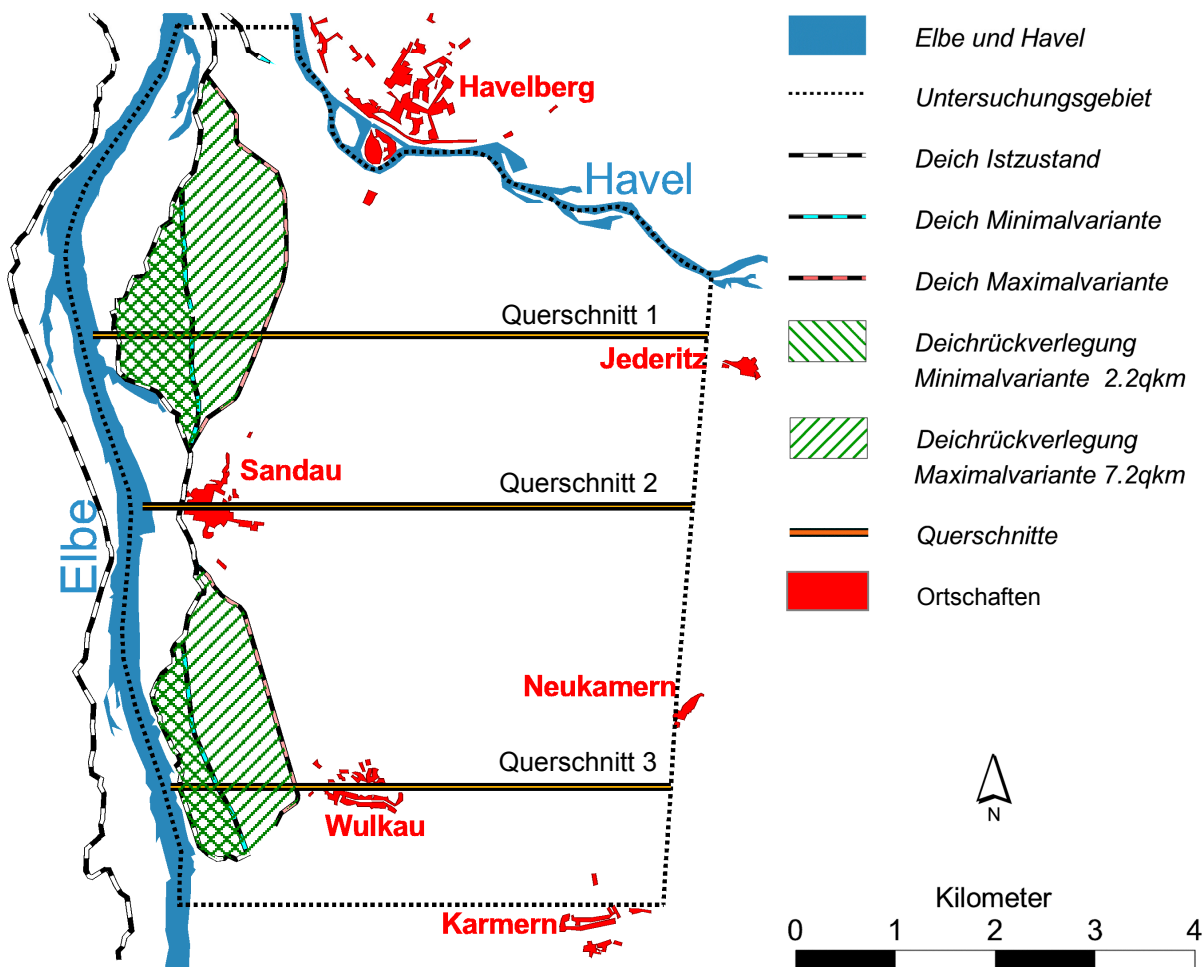


Abb. IV-4.13 Untersuchungsgebiet Sandau mit „minimaler“ und „maximaler“ Deichrückverlegungsvarianten.



#### IV-4.9.1 Räumliche Betrachtung

Die geplanten Deichrückverlegungsmaßnahmen bewirken in Bezug auf die Grundwasserdynamik zwei sich überlagernde gegensätzliche Effekte. Zum Einen wird bei Hochwasser der lokale Wasserspiegel aufgrund der Vergrößerung des durchflossenen Querschnitts abgesenkt. Nach SCHWANENBERG ET AL. (2001) ergibt sich eine maximale Wasserspiegelabsenkung im Oberlauf des betrachteten Untersuchungsgebietes bei der maximaler Deichrückverlegungsvariante von 0,05 m bei HQ<sub>2</sub> ( $\approx Q = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$  am Pegel Tangermünde) und 0,45 m bei HQ<sub>100</sub> ( $\approx Q = 3895 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Die Wasserspiegelabsenkung der Elbe führt ebenfalls zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels in Deichnähe. Zum Anderen bewirkt die Verlegung der Deiche eine schnellere Reaktion und eine höhere Amplitude des Grundwassers in Gebieten, die nun näher an den neuen im Hochwasserfall durchströmten Retentionsräumen liegen.

In Abb. IV-4.14 ist der Median flächenhaft als Grundwasserpotenzial und die Überflutungsräume der Elbe nach SCHWANENBERG ET AL. (2001) dargestellt. Der Unterschied zwischen der Maximalvariante und dem Ist-Zustand fällt mit +/- 0,10m eher gering aus. Auffallend ist hier, dass der Effekt der lokalen Wasserspiegelabsenkung zu einer Absenkung des Medians des Grundwasserpotenzials im Bereich oberhalb von Sandau führt.

In Abb. IV-4.15 ist das mittlere jährliche Hochwasser (MHW) des Grundwasserpotenzials dargestellt. Deutlich fallen hier die „Fahnen“ mit erhöhten Grundwasserständen um die rückverlegten Deiche auf. Bei Hochwasser reagiert der nun, im Bereich der rückverlegten Deiche, deichnahe Aquifer schneller und mit höheren Spitzenwerten auf den Flusswasserstand als im Ist-Zustand. Dieser Effekt nimmt mit zunehmender Entfernung von der Elbe ab und führt zu immer geringeren Unterschieden zwischen den Varianten und dem Ist-Zustand. Jeweils unterhalb der nördlichen und südlichen Deichrückverlegungen sind Bereiche zu erkennen die verringerte Grundwasserstände aufweisen. Da der Deichbereich um die Ortschaft Sandau nicht verlegt wird, sind innerhalb der Ortschaft bei einer Deichrückverlegung verringerte Grundwasserstände von bis zu 0,15 m zu erwarten. Bei der Maximalvariante sind die Flächen mit verringerten Grundwasserständen gegenüber dem Ist-Zustand geringer als

bei der Minimalvariante, da sich hier die oben angesprochene Effekte gegenseitig kompensieren.

Abb. IV-4.16 zeigt die Flurabstände bei maximalem Grundwasserstand. Bei den Unterschieden der beiden Varianten zum Ist-Zustand sind immer noch die „Fahnen“ mit niedrigeren Flurabständen deutlich erkennbar, jedoch sind die „Fahnen“ zergliedert durch Flächen, die schon im Ist-Zustand Grundwasserstände bis zur Geländehöhe aufweisen.

Bei der Minimalvariante kommt es aufgrund der lokalen Wasserspiegelabsenkung zu einer Erhöhung der Flurabstände in der Ortschaft Sandau und einer geringfügigen Verringerung der Flurabstände in der Ortschaft Wulkau.

Bei der Maximalvariante liegt die neue Deichlinie sehr nahe an der Ortschaft Wulkau. Dies führt zu einer erheblichen Verringerung der Flurabstände in Wulkau (an den Ortsrändern bis zu 1 m). Um dieser Veränderung entgegenzuwirken müssen ggf. Maßnahmen ergriffen werden, wie z.B. Entlastungsgräben hinter dem Deich, um das hydraulische Potenzial im Grundwasser zu verringern.

#### IV-4.9.2 Betrachtung von drei Querschnitten

In drei Querschnitten senkrecht zur Elbe (Lage in Abb. IV-4.13 ersichtlich) sind die Veränderung der Hauptwerte HHW, MHW, MW und MNW der Grundwasserstände im Profil dargestellt (siehe Abb. IV-4.17). Man kann erkennen dass es bei den Hauptwerten MNW und MW erwartungsgemäß kaum zu Veränderungen durch die Deichrückverlegung kommt. Erst durch die Überflutung der neu geschaffenen Retentionsflächen verändert sich die Grundwasserdynamik und damit vor allem die Hauptwerte HHW und MHW.

Querschnitt 1 und 3 liegen im Bereich der rückverlegten Deichvarianten. Hier kommt es zu einer Veränderung der Grundwasserdynamik, vor allem der Hochwasserwerte bis zu einer Entfernung von ca. 2000 m (MHW) und ca. 3000 m (HHW) um die neu geschaffene Deichlinien. Querschnitt 2 führt durch die Ortschaft Sandau. In diesem Bereich ist deshalb keine Deichrückverlegung möglich und die Einflüsse der nördlichen und südlichen Maßnahmen sind nur beim maximalen Hochwasser bei der Maximalvariante (siehe auch Abb. IV-4.16 rechts unten) zu erkennen.

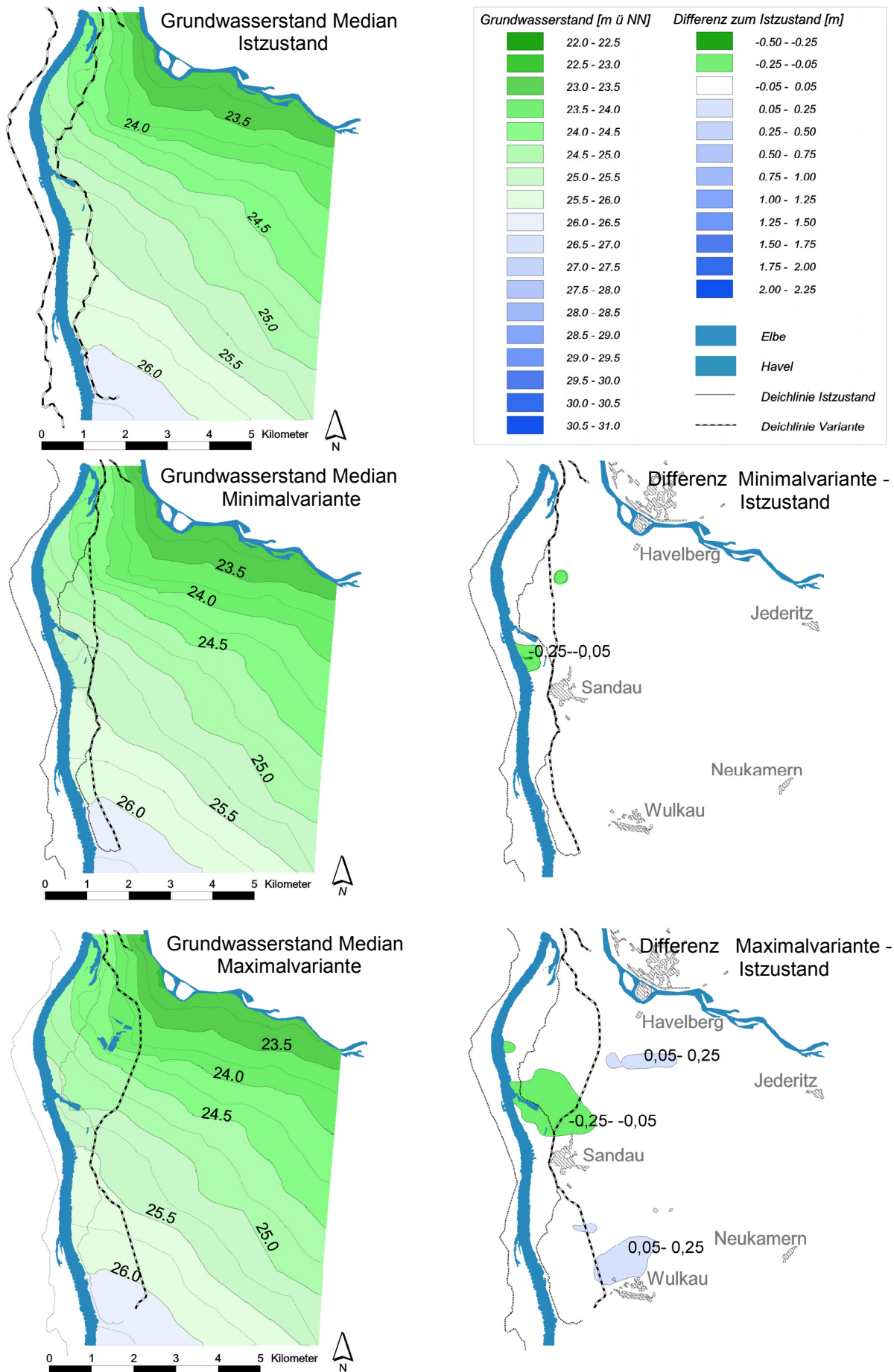


Abb. IV-4.14 Median der Grundwasserpotenziale und Differenzen zum Ist-Zustand für die Minimal- und die Maximalvariante.

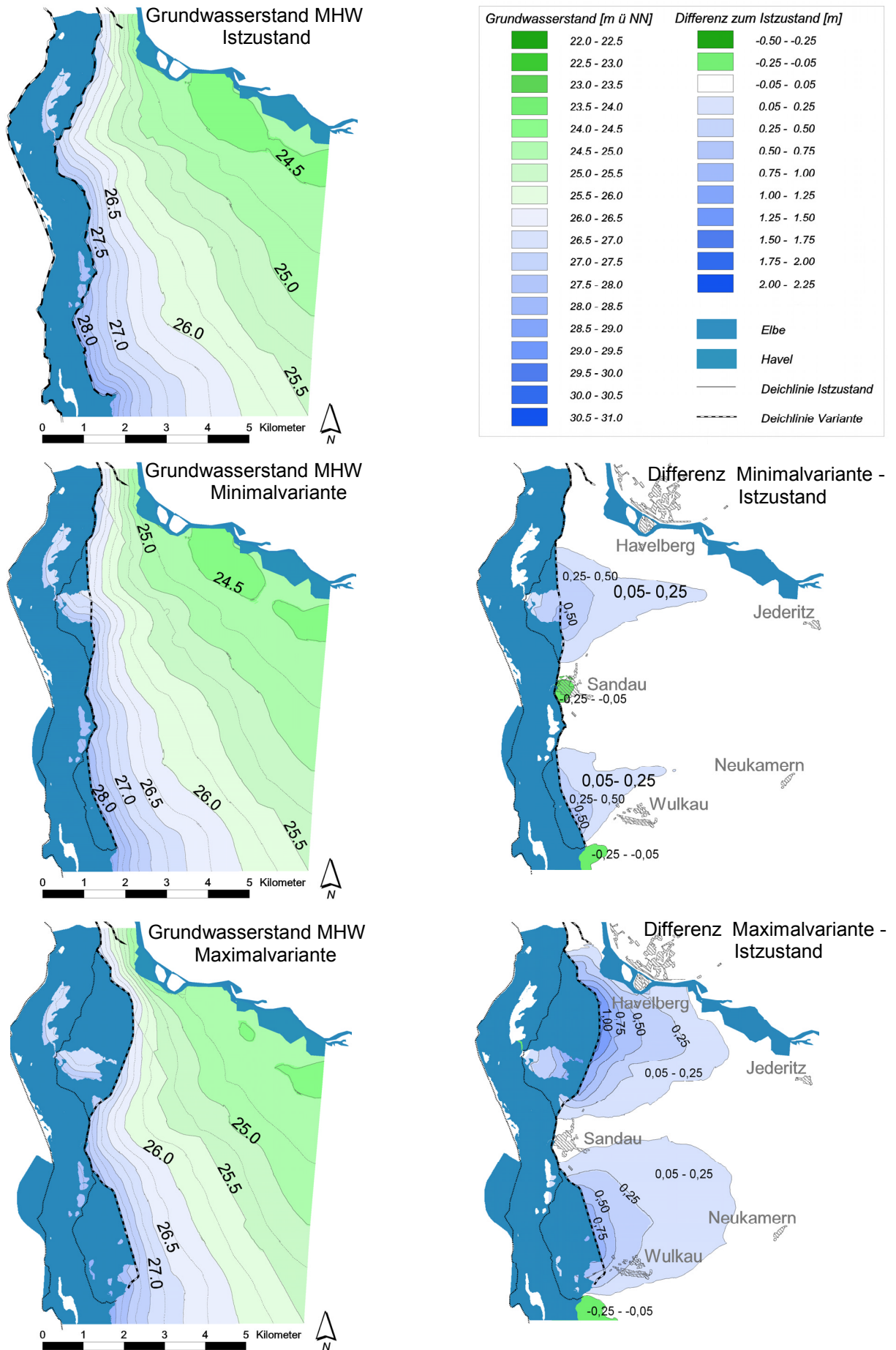


Abb. IV-4.15 MHW der Grundwasserpotezialien und Differenzen zum Ist-Zustand für die Minimal- und die Maximalvariante.

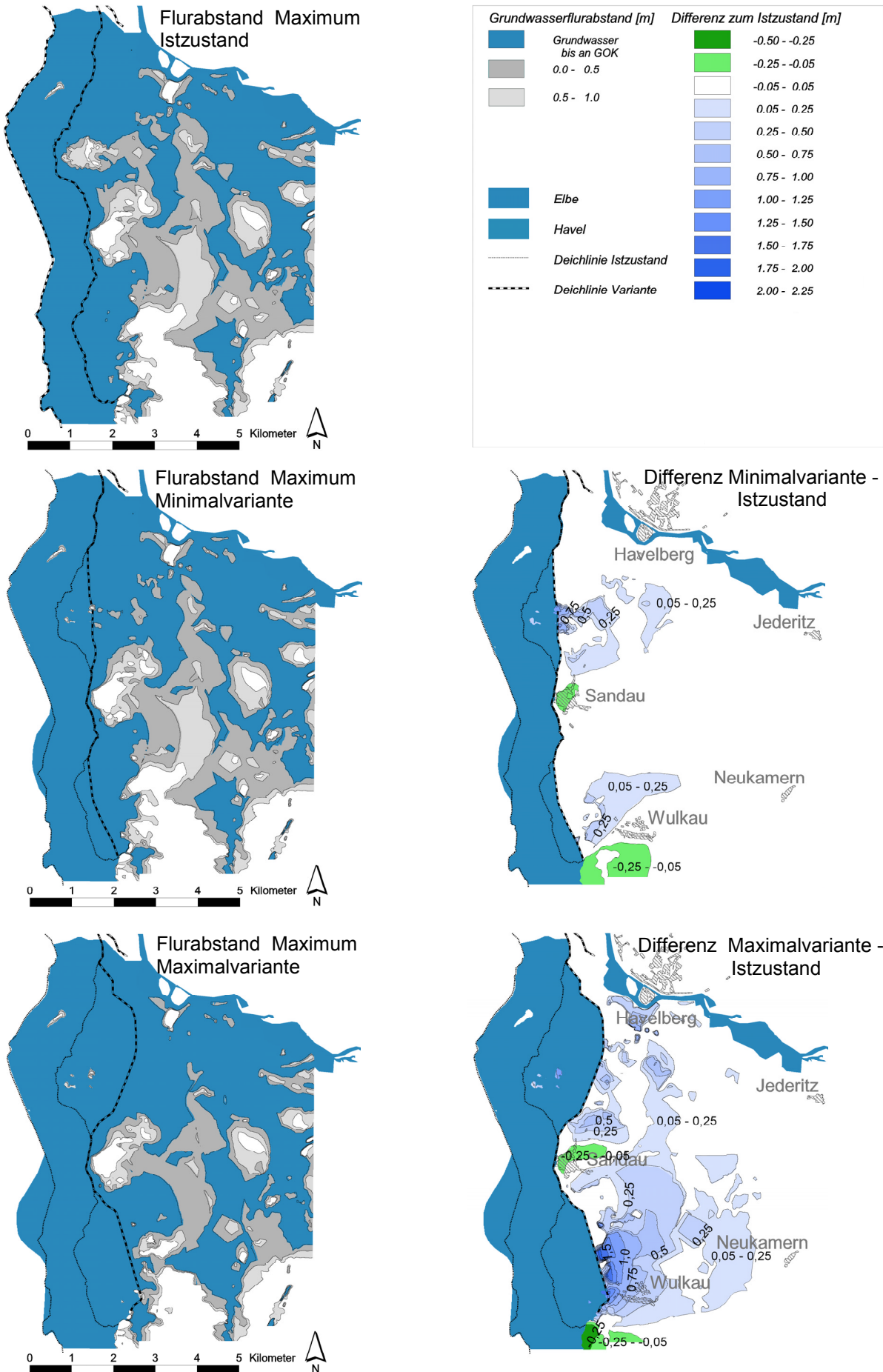


Abb. IV-4.16 Minimale Flurabstände im Zeitraum 1964-95 und Differenzen zum Ist-Zustand für die Minimal- und die Maximalvariante.

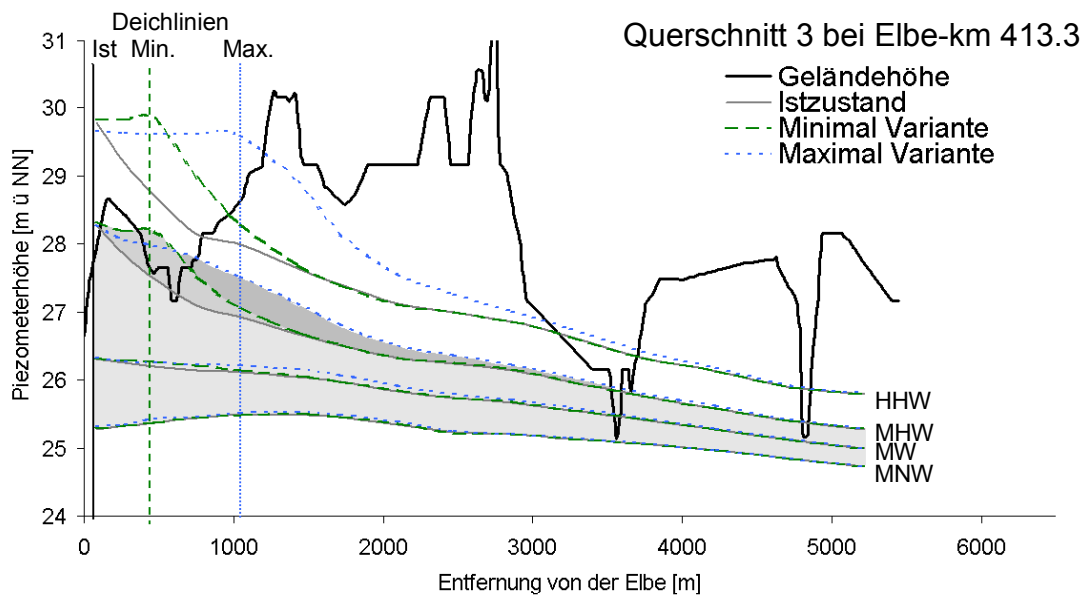
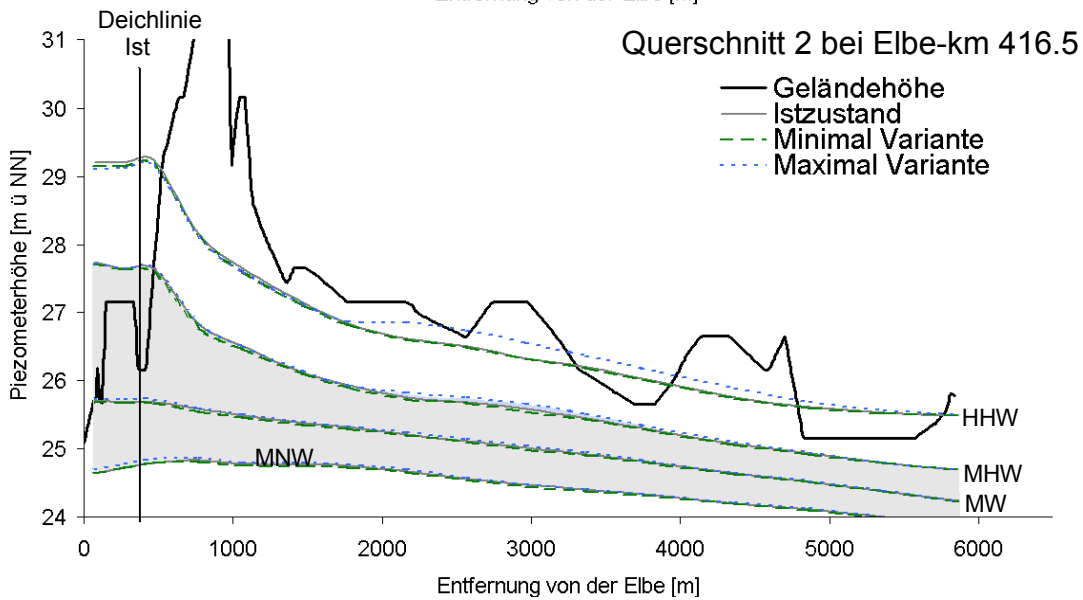
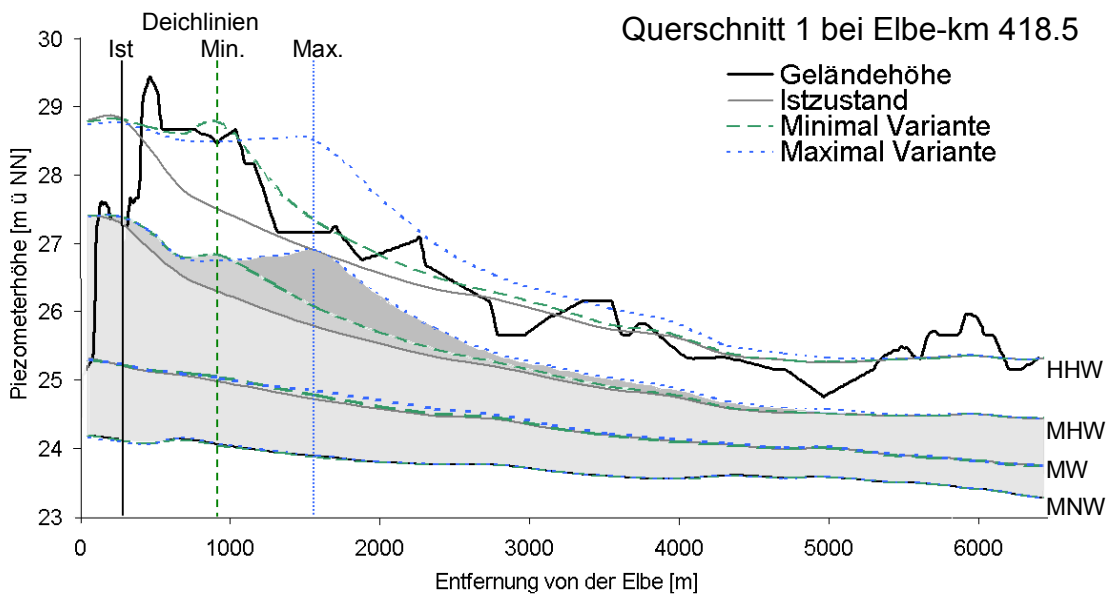


Abb. IV-4.17 Hauptwerte der Piezometerhöhen in drei Querschnitten im Ist-Zustand und in zwei Deichrückverlegungsvarianten..

#### IV-4.10 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel dieser Untersuchung ist es, die langfristige zeitliche und räumliche Grundwasserdynamik des 55,6 km<sup>2</sup> großen Untersuchungsgebietes Sandau im Ist-Zustand zu beschreiben. Weiterhin sollen die Auswirkungen von zwei Deichrückverlegungsvarianten auf die Grundwasserdynamik erfasst und analysiert werden.

Durchgeführt wurde die Grundwassermodellierung mittels vereinfachter physikalischer Ansätze als analytisches Grundwassermodell entlang von Transekten mit Kopplung an ein Bodenspeichermmodell.

Hierbei stehen folgende Prozesse im Vordergrund:

- Direkter Wasseraustausch zwischen Fließgewässer und Aquifer
- Infiltration bei Überflutung der Aue
- Infiltration und kapillarer Aufstieg infolge Niederschlag und Verdunstung

Die Veränderung der Wasserstände und Überflutungsbereiche der Elbe stellt den Haupteinflussfaktor der Dynamik des Grundwassers bis zu einer Entfernung von mehreren Kilometern von der Elbe dar. Um diese Randbedingung möglichst genau zu erfassen, wurde das Grundwassermodell mit den Ergebnissen der hydraulischen Berechnungen eines zweidimensionalen numerischen Modells (SCHWANENBERG ET AL. 2001) gekoppelt.

Das Grundwassermodell wurde anhand der Messreihen von 19 Grundwassermessstellen des Staatlichen Amtes für Umweltschutz Magdeburg (STAU) im Zeitraum 1970 bis 1999 kalibriert und validiert. Es konnte dabei eine gute Übereinstimmung der modellierten Zeitreihen mit den gemessenen Zeitreihen erzielt werden. Die statistischen Maßzahlen zur Beschreibung der langfristigen Dynamik des Grundwassers (Gewässerkundliche Hauptwerte und Dauerlinien) können mit dem Modell gut nachvollzogen werden. Das zeigt, dass sich die natürlichen Vorgänge mit den o.a. modellierten Prozessen in weitreichender Güte beschreiben lassen.

Für die Charakterisierung des Ist-Zustandes wurden zunächst statistische Maßzahlen der Grundwasserhöhen aus der Analyse der modellierten Zeitreihen im Zeitraum 1964 bis 1995 berechnet. Dieser Zeitraum entspricht der hydrologischen Analyse der

Elbeabflüsse (HELMS ET AL. 1999). Die statistischen Maßzahlen werden dann räumlich und als Querschnittsprofile dargestellt.

Durch eine Deichrückverlegungsmaßnahme wird zunächst die lokale Abflusscharakteristik vor allem bei Hochwasser verändert. Für zwei Deichrückverlegungsvarianten wurden die Veränderung der Elbewasserstände mit einem numerischen Modell berechnet (SCHWANENBERG ET AL. 2001) und als Randbedingung in die Grundwassermodellierung übernommen.

Die Grundwasserdynamik verändert sich im Untersuchungsgebiet in zwei Aspekten. In den Bereichen, in denen die alte Deichlinie belassen wird (z.B. um die Ortschaft Sandau) führt die lokale Wasserspiegelabsenkung der Elbe bei Hochwasser auch zu einer Absenkung des Grundwassers. In den Bereichen mit rückverlegtem Deiche reagiert der nun bei Hochwasser deichnahe Aquifer schneller und mit höheren Spitzenwerten auf den Elbewasserstand als im Ist-Zustand. Dieser Effekt nimmt mit zunehmender Entfernung von der Elbe ab.

Der Vorteil des gewählten Modellansatzes liegt in der schnelleren Bearbeitungs- und Kalibrierungszeit gegenüber numerischen Modellen. Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass mit diesem Ansatz die statistische Größen der Grundwasserdynamik abgeleitet werden können. Mit der Kopplung an die Ergebnisse eines numerischen Strömungsmodells wird die Einflussgröße Elbewasserstand, die den höchsten Anteil an der Varianz der Grundwasserdynamik hat, möglichst exakt als Randbedingung des Grundwassermodells beschrieben. Der Modellansatz beruht zwar auf wenigen Prozessen, diese können jedoch den Hauptanteil der Grundwasserdynamik erklären und werden physikalisch basiert modelliert. Am Beispiel der Deichrückverlegungsszenarien kann daher erstmals gezeigt werden, dass das entwickelte Modell zu anschaulichen und sinnvollen Ergebnissen kommt.

Da die Grundwassergleichung eindimensional entlang von Transekten gelöst wird, ist es nicht möglich die Heterogenität des Aquifers, wie z.B. der Wechsel von ungespannten zu gespannten Aquifer oder den Einfluss des Grabensystems, mit in die Modellierung zu implementieren. Die Erhebung der dafür notwendigen Daten erfordert jedoch erheblichen Aufwand, wie z.B. die Aufnahme räumlich differenzierter Leakageparameter der verschiedenen

Auelehmdeckschichten in MOHRLOK & JIRKA (2001) oder die Erfassung des Grabensystems und der Übergänge zwischen gespannten und ungespannten Grundwasserverhältnissen in MONTENEGRO ET AL. (2000).

Problematisch sind Aussagen bei extremen Hochwasserereignissen, da hier Prozesse in den Vordergrund treten, die unter Normalbedingungen eine untergeordnete Rolle spielen. Dies soll an zwei Beispiele illustriert werden:

1. Das Grabensystem hinter dem Deich hat z.B. bei Mittelwasserabfluss nur einen geringen Einfluss auf die Grundwasserdynamik, bei Hochwasser bewirken die Gräben jedoch eine Entlastung des hydraulischen Potential und eine Absenkung der Grundwasserstände (siehe auch MONTENEGRO ET AL. 2000).
2. Solange der Grundwasserstand unterhalb der schwer durchlässigen Auelehmdecke befindet kann man von ungespannten Grundwasserverhältnissen ausgehen. Steigt bei Hochwasser der Grundwasserspiegel in den Bereich der Auedeckschicht stellen sich, je nach Mächtigkeit und Aufbau der Auedeckschicht ungespannte, teilgespannte und gespannte Grundwasserverhältnisse ein. Die räumliche Verteilung der Auedeckschicht kann sehr komplex und heterogen sein (siehe SAUCKE & BRAUNS in Kapitel II-1.1).

Zudem sind diese extremen Ereignisse nur schwer an Messergebnissen zu validieren, da sie nur selten auftreten und die Messung mit größeren Unsicherheiten behaftet sind, als vergleichbare Messungen unter Normalbedingungen. Die Modellierung von extremen Zuständen ist daher weniger ein Problem des hier gewählten Modellansatzes, als vielmehr ein allgemeines Modellierungsproblem, da der Aufwand zur Bereitstellung notwendiger Daten und die Implementation zusätzlicher Prozesse zur physikalisch basierten Modellierung extremer Ereignisse stark ansteigt.

Der in dieser Untersuchung verwendete Modellansatz soll als zusätzliches Verfahren verstanden werden, um im Vergleich zu numerischen Modellen mit geringerem Aufwand Aussagen über den derzeitigen Zustand bzw. über mögliche Veränderung der langfristigen Grundwasserdynamik aufgrund von anthropogenen Maßnahmen zu treffen.

Zur detaillierten Untersuchung und zur Prognose von Grundwasserständen sind aber weiterhin mehrdimensionale numerische Grundwassermodelle unerlässlich (siehe auch MOHRLOK & JIRKA 2001).

In der *Anlagen-CD* des Berichts finden sich weitere georeferenzierte Karten der Grundwasserstände und Flurabstände, sowie Differenzkarten von Deichrückverlegungsvarianten zum Ist-Zustand.

### Danksagung

Der Autor dankt dem DFG-Graduiertenkolleg „Ökologische Wasserwirtschaft“ (DRK 147) an der Universität Karlsruhe für die finanzielle sowie den Verbundprojekten im BMBF-Forschungsprogramm Elbe-Ökologie („Morphodynamik der Elbe“, FKZ 0339566 und „Rückgewinnung von Retentionsflächen und Altauenreaktivierung an der Mittleren Elbe in Sachsen-Anhalt“, FKZ 0339576) für die inhaltliche Unterstützung.

### Literatur

- ALTERMANN, M., ROSCHE, O., WIECHMANN, H., EISENMANN, V. (1999): Zustand und Eigenschaften der Auenböden sowie deren ökologische Eigenschaften und Bewertung nach Deichrückbau. Zwischenbericht. BMBF-Forschungsprojekt Förderkennzeichen 0339576, Halle.
- BMBF (1995): Forschungskonzeption Ökologische Forschung in der Stromlandschaft Elbe (Elbe-Ökologie) des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF). Bonn.
- BRAUN, M. (1994): Differentialgleichungen. Springer-Verlag. Berlin.
- BUREK, P. (1999): Entwicklung eines analytischen Modells der Aquifer-Fließgewässer-Interaktion. In: „Fachtagung Elbe - Dynamik und Interaktion von Fluß und Aue“, Wittenberge, 4.-7. Mai 1999, Karlsruhe, 82 – 85.
- DISSE, M (1995): Modellierung der Verdunstung und der Grundwasserneubildung in ebenen Einzugsgebieten. Dissertation am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft. Heft 53. Universität Karlsruhe.
- GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., YAPO, P.O. (1998): Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resour. Res.*, 34 (4), 751-761.
- HAFERKORN, J. (2000): Das Gesamtprojekt „Rückgewinnung von Retentionsflächen und Altauenreaktivierung an der Mittleren Elbe in Sachsen-Anhalt“. Sachstandsbericht zur Zwischenbegutachtung. BMBF-Forschungsprojekt Förderkennzeichen 0339576, Halle.
- HALL, R.H., MOENCH, A.F. (1972): Application of the convolution equation to stream-aquifer relationships. *Wat. Resour. Res.* 8 (2), S. 487-493.

- HENNING, A., ZEPP, H. (1992): Simulation der vertikalen Bodenwasserdynamik mit linearen und nichtlinearen Speicherkaskaden - Eine Praxisorientierte Alternative zu Bodenphysikalisch-deterministischen Modellen. DGM 36: S.108-115.
- HE, Y. (1994) Kopplung eines Bodenwassermodells mit einem Grundwassermodell. Mitteilungen Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover. Heft 79.
- HELMS, M., BELZ, S., IHRINGER, J. (1999): Analyse und Situation von Abflußzeitreihen der Elbe. In: „Fachtagung Elbe - Dynamik und Interaktion von Fluß und Aue“, Wittenberge, 4.-7. Mai 1999, Karlsruhe, 24-43.
- HOYNINGEN-HUENE, J. V. (1982): Die Interzeption des Niederschlages in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen und der Einfluß der Landnutzung auf den gebietswasserhaushalt. DVWK Schriften 57.
- KRON, W. (1996): Stochastische Simulation des Geschiebe- transports am Zusammenfluß zweier Gewässer. Dissertation am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft. Heft 59. Universität Karlsruhe.
- LUTZ, W. (1984): Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. Dissertation am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft. Heft 24. Universität Karlsruhe.
- MOHRLOK, U., JIRKA, G.H. (2001): Grundwasserdynamik in Vorland- und Auenbereichen am Beispiel des geplanten Deichrückverlegungsgebietes „Rogätz“. Kapitel IV-3 in diesem Band.
- MONTENEGRO, H., HOLFELDER, T., WAWRA, B. (2000): Modellierung der Austauschprozesse zwischen Oberflächen- und Grundwasser in Flußauen. In: Stoffhaushalt von Auenökosystemen. FRIESE, K. (Hrsg.), Berlin.
- NEUSCHULZ, F., PURPS, J. (2000): Rückverlegung von Hochwasserschutzdeichen zur Wiederherstellung von Überflutungsflächen. In FRIESE, K. (Hrsg.): Stoffhaushalt von Auenökosystemen: Böden und Hydrologie, Schadstoffe, Bewertungen. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- POWERS, D.L. (1979): Boundary Value Problems. Academic Press, New York.
- RENGER, M., STREBEL, O., GIESEL, W. (1974): Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mit Hilfe von klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kennwerten. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung. 15. S.353-366.
- ROMMEL, J. (1998): Geologie des Elbetals nördlich von Magdeburg. Geologisches Institut der Universität Karlsruhe, unveröffentlichte Diplomarbeit.
- ROMMEL, J. (2000): Studie zur Laufentwicklung der deutschen Elbe bis Geesthacht seit ca. 1600. Unveröffentlicht
- SAUCKE, U., BRAUNS, J. (2001): Stromtalgeschichte und Flussgeologie im deutschen Elbegebiet. Kapitel II-1.1 in diesem Band.
- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Dissertation. ETH Zürich.
- SCHWANENBERG, D., RÖLLE, B., VOIGT, R. (2000): Teilprojekt 1. Strömungstechnik und Hydrologie. Sachstandsbericht zur Zwischenbegutachtung. BMBF-Forschungsprojekt Förderkennzeichen 0339576, Halle.
- SCHWANENBERG, D., HARMS, M., VOIGT, R. (2001): Teilprojekt 1. Strömungstechnik und Hydrologie. Abschlussbericht. BMBF-Forschungsprojekt FKZ 0339576, Halle.
- SERRANO, S.E. (1995): Analytical solutions of the nonlinear groundwater flow equation in unconfined aquifers and the effect of heterogeneity. Water. Resour. Res., 31 (11), 2733 – 2742.
- SIMON, M. (1996): Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Elbe. Untersuchungsbericht der Int. Kommission zum Schutz der Elbe. Magdeburg.
- WALD, J., KRON, K., BUCK, W., PLATE, E.J. (1986): Generation of storm runoff in an area with a high groundwater table.- In: Conjunctive Water Use. Understanding and managing surface water-groundwater interactions. IAHS Publication No. 165. GORELICK, S.M. (Ed.). Wallingford.
- WALD, J. (1990): Entwicklung und Anwendung eines instationären Drainagemodells zur Untersuchung der Hochwasserabflußverhältnisse im Schutter-Unditz-Niederungsgebiet. Wasserwirtschaft, 80 (7/8), S.358-369.
- WALD, J. (1994): Niederschlags-Abfluß-Modell für Niederungsgebiete mit Berücksichtigung des Grundwasserabflusses; 18. DVWK-Fortbildungslehrgang Hydrologie. Karlsruhe.
- WORKMAN, S.R., SERRANO, S.E., LIBERTY, K. (1997): Development and application of an analytical model of stream/aquifer interaction. J. Hydrol., 200, S. 149-163.



# KAPITEL V INFORMATIONSTECHNIK

## V-1 Datenbank und Informationssystem des Verbundprojekts

R. Becker, F. Nestmann

### V-1.1 Einleitung

Ein Forschungsprojekt wie das vorliegende kann aus wirtschaftlicher Sicht als Betrieb aufgefasst werden. Ein Betrieb kauft Rohstoffe oder Zwischenprodukte ein und fertigt daraus mit Hilfe der Produktionsmittel Arbeit und Kapital Zwischen- oder Endprodukte, um einen Markt zu bedienen.

Wie bei vielen anderen Projekten ist das Endprodukt des Forschungsprojekts „Morphodynamik der Elbe“ *Information*, die auf bestimmten Märkten nachgefragt wird. Sie dient der Beantwortung drängender Fragen u.a. in der öffentlichen Verwaltung und in der Umweltforschung an der Elbe. Selbst erhobene, von anderen bereitgestellte, oder eingekaufte Daten bilden die Rohstoffe der Forschung.

Wichtigste Betriebsmittel sind Computermodelle, in denen die Zutaten zusammengefügt werden, um Information zu produzieren, die einen Erkenntnisgewinn darstellt. Das erhaltene Zwischenprodukt muss abschließend durch geeignete Dokumentation und Visualisierung „veredelt“ werden.

Ausgangsdaten und Ergebnisse, welche weitere Prozesse durchlaufen können, müssen effektiv verwaltet, gelagert und ausgetauscht werden können, sonst arbeitet das „Unternehmen“ unwirtschaftlich.

Um die Kommunikation zwischen den Mitarbeitern des Verbundprojekts zu unterstützen und die Datenauswertung und -pflege zu optimieren, werden (wurden) verschiedene Werkzeuge der modernen Informationstechnik eingesetzt. Die Auswahl der Werkzeuge orientiert(e) sich an den Anforderungen des Projekts und dem Bedarf der Mitarbeiter.

Zunächst bilden die sehr großen Datenmengen ein Problem. Es muss dem Bearbeiter ermöglicht werden, aus Gigabytes von Daten interessante Teilmengen schnell und flexibel zu extrahieren und weiter zu bearbeiten.

Naturgemäß verfügen die umfangreichen Daten eines Forschungsvorhabens, welches sich in einem Flusseinzugsgebiet bewegt, über einen Raumbezug.

Neben spezieller Software zur Bearbeitung fachspezifischer Aufgaben verwenden viele Mitarbeiter Standard-Software wie z.B. MS Office-Pakete, um Datenkonvertierungen oder einfache Analysen durchzuführen und Ergebnisse darzustellen.

Es lassen sich demnach folgende *Anforderungen* an den informationstechnischen Werkzeugkasten des Forschungsprojekts formulieren:

1. Effiziente Verwaltung großer Datenmengen,
2. Analyse und Visualisierung raumbezogener Daten,
3. standardisierte Schnittstellen.

Im Zentrum des aufgebauten Werkzeugkastens steht ein Datenbank-Managementsystem (**DBMS**), welches Schnittstellen für die verwendeten Analysewerkzeuge bereitstellt. DBMS gehören heute genauso zum Standardrepertoire zeitgemäßer Datenverarbeitung wie die im Projekt ebenfalls eingesetzten Geographischen Informationssysteme (**GIS**). Datenbanken und GIS haben ursprünglich unterschiedliche Anwendungsgebiete, doch die immer häufigere Forderung nach effektiver, schneller und flexibler Analyse sehr großer Datenmengen (Stichwort „Information Retrieval“ oder „Data Mining“) lassen die beiden Systeme weiter zusammenwachsen: Auf der einen Seite werden Datenbanken mit GIS-Funktionalitäten ausgestattet, auf der anderen Seite muss ein GIS mittlerweile über standardisierte Schnittstellen auf Datenbanken zugreifen und dort gelagerte Datenbestände visualisieren und verändern können.

Wie viele Projekte im BMBF-Forschungsprogramm ‚Elbe-Ökologie‘ (vgl. [HTTP 1]) zeigen, besteht u.a. bei den Aufgaben im Umwelt- und Wasserbereich ein dringender Bedarf nach einfachem Datenaustausch zwischen Datenbanken und GIS. Deshalb wurden im Teilprojekt neben der zentralen Aufgabe, dem Aufbau der projekteigenen Datenbank, verschiedene Möglichkeiten zur Kopplung dieser

beiden Systeme untersucht. Weitere informationstechnische Maßnahmen, die zur Unterstützung der Forschungsarbeiten auch über das eigene Vorhaben hinaus umgesetzt wurden, sind: Einrichtung eines Email-Verteilers („Listserv-Liste“) zum effektiven Nachrichtenaustausch zwischen den Projekten, Aufbau von Web-Seiten ([HTTP 2]) zur Information über das Projekt und Unterhaltung eines FTP-Servers zur unkomplizierten Übertragung von Dateien.

## V-1.2 Die Datenbank

### V-1.2.1 Datenbanken und Dateisysteme

Eine einfache und weit verbreitete Form der Datenspeicherung ist die Speicherung in Dateien, die häufig zu Problemen führt, wenn mehrere Benutzer simultan die Daten bearbeiten. Außerdem ist es schwierig, bei einer großen Anzahl von Dateien, die möglicherweise zusätzlich in verschiedenen Versionen vorliegen, den Überblick zu bewahren.

Datenbank-Managementsysteme (DBMS) können Abhilfe schaffen und besitzen im Vergleich zu dateibasierter Datenhaltung wesentliche **Vorteile**:

1. Der in der Datenbank zentral gesammelte Datenbestand stellt eine vereinheitlichte Basis für alle Anwendungen und Anwender dar.
2. Es gibt einen gültigen, konsistenten Datenbestand für alle Benutzer. Bei dateibasierter Datenhaltung kommt es im Gegensatz hierzu immer wieder zu Problemen, weil verschiedene Benutzer auf eigenen Kopien einer Ursprungsdatei arbeiten. Eventuelle Änderungen werden lokal durch den Benutzer durchgeführt und führen häufig zu Inkonsistenzen zwischen den verschiedenen Kopien der Benutzer.
3. Ändern hingegen zwei Benutzer in der Datenbank denselben Datensatz, sorgt das Transaktionsmanagement dafür, dass der Datenbestand auch bei verschachtelten Transaktionen immer konsistent, d.h. in sich schlüssig, bleibt. Nach Abschluss der Änderungen sind diese für alle Benutzer sichtbar. Sollte es dennoch nötig sein, verschiedene Versionen des Datenbestandes vorzuhalten, kann man innerhalb der Datenbank entsprechende Maßnahmen treffen.
4. Ein DBMS bietet Möglichkeiten, die Daten schon bei der Eingabe auf Korrektheit und

Integrität zu überprüfen. So lässt sich beispielsweise vereinbaren, dass ein Abflusswert an einem Pegel eine positive Fließkommazahl sein muss (Korrektheit), und dass dieser Abfluss nur dann eingetragen werden darf, wenn der zugehörige Pegel bereits in der Datenbank existiert (Integrität).

5. Professionelle Datenbank-Managementsysteme erlauben bei richtigem „Tuning“ sehr schnellen Zugriff auf große Datenmengen von vielen Gigabytes.
6. Das DBMS trennt die Daten von den Programmen, die über standardisierte Schnittstellen auf diese zugreifen. Damit wird die Anwendungsentwicklung und -pflege erheblich vereinfacht.
7. Die Zugriffe auf den Datenbestand werden vom DBMS zentral geregelt. So können individuelle Rechte zum Lesen, Schreiben, Ändern, Löschen der Daten oder zum Anlegen und Löschen von Strukturen wie Tabellen oder Sichten erteilt werden.
8. Speicherung und ggf. Wiederherstellung der Daten werden zentral kontrolliert.

Aufgrund dieser überzeugenden Argumente wurde im Verbundprojekt entschieden, ein professionelles, skalierbares<sup>1</sup> Datenbank-Managementsystem einzusetzen. Jetzt bestand die Aufgabe, das „richtige“ Datenbank-Managementsystem aus der Vielzahl der Angebote herauszufinden.

### V-1.2.2 Klassen von Datenbanken

Bei dem Aufbau einer Datenbank muss der interessierende Ausschnitt der „wirklichen Welt“<sup>2</sup> identifiziert und modelliert werden: Welche Entitäten<sup>3</sup> oder Objekte der Wirklichkeit sollen berücksichtigt werden, wie sind ihre Eigenschaften beschaffen, welche Beziehungen herrschen zwischen den Objekten und welche Operationen können auf den Objekten ausgeführt werden? Der Typ eines sol-

<sup>1</sup> Skalierbar: Das DBMS muss in der Lage sein, im Laufe der Zeit immer größer werdende Datenbestände zu beherrschen.

<sup>2</sup> Es fällt schwer, den in der englischen Literatur verwendete Begriff „real world“ zu übersetzen. Die Übersetzung „Realwelt“ wirkt unbeholfen. Gemeint ist die empirisch erfahrbare Welt, die Wirklichkeit, eben die „echte“ Welt.

<sup>3</sup> Entität (von lat. ens, „seiend“): „Seinhaftigkeit von etwas (mit dem Nebensinn, „dass“ etwas ist, im Unterschied davon, „was“ es ist.“ [nach SCHMIDT (1991)]

chen „Datenmodells“ ist das wichtigste Unterscheidungsmerkmal von DBMS. Die drei derzeit wichtigsten Datenbankentypen mit unterschiedlichen Datenmodellen sind „relationale“, „objektrelationale“ und „objektorientierte“ Datenbanken.

Im Moment sind Relationale Datenbank-Managementsysteme (**RDBMS**) am weitesten verbreitet. Das ihnen zugrunde liegende relationale Datenmodell besteht aus Entitäten und ihre Beziehungen, die in mathematischem Sinne durch Relationen dargestellt werden. Diese Relationen werden in der Datenbank durch Tabellen repräsentiert. Der Vorteil von RDBMS im Vergleich zu anderen Datenbankklassen ist vor allem, dass sie seit Jahrzehnten eingesetzt werden und ausgereift sind. Viele Softwareprodukte können über standardisierte Schnittstellen auf RDBMS zugreifen. Häufig wird dabei (manchmal versteckt) die „Structured Query Language“ (**SQL**) verwendet. Die meisten RDBMS verwenden SQL zur Definition, Abfrage und Modifizierung der Daten.

Der größte Nachteil von RDBMS ist das „flache“ Datenmodell: Attribute von Entitäten können nur aus atomaren und simplen Datentypen wie Zahlen oder Zeichenketten bestehen. Zwar wurde später noch ein allgemeiner Binärdatentyp eingeführt (BLOB: „Binary Large Object“), der aber innerhalb der Datenbank einen unstrukturierten Attributtyp darstellt und deshalb dort nicht mit anderen Daten verknüpft oder bearbeitet werden kann. Ein BLOB ist lediglich ein Container, der irgendwelche binäre Information aufnehmen kann.

Um dem Nachteil des flachen Datenmodells zu begegnen, bieten viele Datenbankhersteller Erweiterungen zu ihren relationalen Systemen an, so dass diese zu „Objektrelationalen Datenbank-Managementsystemen“ (**ORDBMS**) werden. ORDBMS ermöglichen die Verwendung benutzerdefinierter oder „abstrakter“ Datentypen (ADT: „Abstract Data Type“) und lassen es zu, dass man eigene Funktionen für diese ADTs definiert. Ein Beispiel für ein ORDBMS ist Oracle 8i Spatial (vgl. [HTTP 3]). Die Datenbank verfügt über einen allgemeinen Geometriedatentyp<sup>4</sup>, mit dem geometrische Elemente wie Linien oder Polygone, wie sie in GIS verwendet werden, gespeichert werden können. Ferner bietet

das System Funktionen für räumliche Operationen auf diesen Objekten an. So lassen sich auf Datenbankebene zwei Geometriedatentypen verschneiden, wobei man als Ergebnis wieder einen Geometriedatentyp erhält. Trotz der ADTs ist die Objektorientierung bei ORDBMS nicht vollständig umgesetzt, da sie wesentliche Konzepte objektorientierter Programmiersprachen wie z.B. „Vererbung“ oder „Polymorphismus“ nicht unterstützen.

Das Datenmodell Objektorientierter Datenbanken (**OODB**) ist von den objektorientierten Programmiersprachen abgeleitet. Objekte besitzen Attribute beliebiger Komplexität. Objekte können aus anderen Objekten zusammengesetzt sein. Sie bringen selbst die Methoden mit, mit denen sie bearbeitet werden können. Objekte können Attribute und Methoden an Objekte vererben, die aus ihnen abgeleitet wurden.

### V-1.2.3 Auswahl für das Projekt

Betrachtet man die Anforderungen, die das Forschungsprojekt mit sich bringt, wäre eine OODB aufgrund ihres extrem flexiblen Datenmodells das geeignete Mittel, um die vielfältigen Daten zu speichern. Andererseits sind OODB vergleichsweise neu und nicht so weit verbreitet, wie RDBMS oder ORDBMS. Zu wenige wichtige Software-Produkte unterstützen Anbindungen an OODB. Deshalb fiel im Verbundprojekt die Wahl auf ein Relationales bzw. Objektrelationales Datenbank-Managementsystem der Firma Oracle. Es bot sich auch deshalb an, da das Rechenzentrum der Universität Karlsruhe über fundiertes Know-How im Bereich von Oracle-Datenbankserver verfügt und regelmäßig Schulungen durchführt, die von Mitarbeitern schon vor dem Projekt besucht wurden. Im Bedarfsfall kann somit günstig Support innerhalb der Universität in Anspruch genommen werden.

Das erste installierte DBMS war ein Oracle 7.3.4 Server auf einer HP-Workstation (HP-UX 10.20). Nach mehrfachen Migrationen ist der aktuelle Server ein Oracle8i (8.1.6) DBMS, erweitert um Oracle8i Spatial. Das DBMS läuft auf einem PC (Intel Pentium II, 400 Mhz, 256 MB RAM). Das Betriebssystem ist Linux, Kernel 2.4 (Distribution SuSE 7.1). Die Firma SuSE bietet auf ihren Webseiten [HTTP 4] wertvolle Informationen über den Betrieb von Oracle-DBMS auf Linux-Plattformen.

<sup>4</sup> „The spatial component of a spatial feature is the geometric representation of its shape in some coordinate space. This is referred to as its geometry.“ (nach [HTTP 3])

### V-1.2.4 Die 3-Ebenen-Architektur

Um die Architektur eines DBMS darstellen zu können, wurden verschiedene Beschreibungsmodelle eingeführt. Die verschiedenen Abstraktionsstufen eines DBMS lassen sich etwa anhand des 3-Ebenen-Architektur-Modells erklären, wie es vom American National Standards Institute (ANSI) vorgeschlagen wurde (Abb. V-1.1).

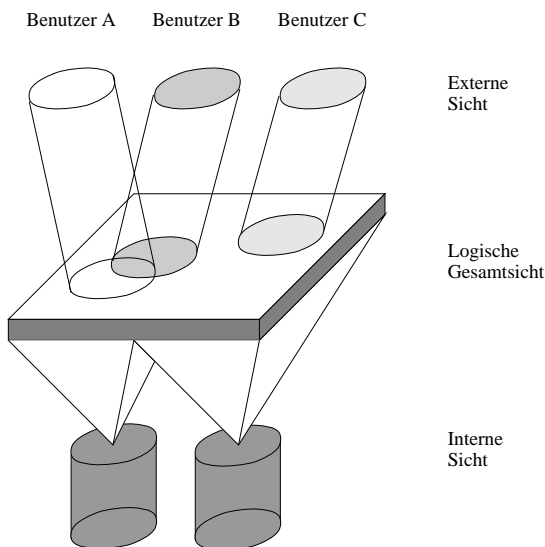


Abb. V-1.1 3-Ebenen-Architektur eines Datenbanksystems.

Die unterste Ebene bildet das „interne Schema“ oder die „interne Sicht“. In ihr werden zum Beispiel Zugriffspfade und Speicherverfahren vereinbart. Die Organisation der Datenspeicherung ist Aufgabe des DBMS allein. Sie entbindet den Benutzer davon, sich um die Speicherung der Daten kümmern zu müssen. Die durch die interne Sicht gewonnene Abstraktion erlaubt zum Beispiel eine Reorganisation und Optimierung der Datenspeicherung, ohne dass sich die Zugriffspfade für die Benutzer ändern.

Die mittlere und wichtigste Ebene trägt das „konzeptuelle Schema“ der Datenbank. Der für eine bestimmte Anwendung gewählte Ausschnitt der „Diskurswelt“ wird in diesem Schema abgebildet. Das konzeptuelle Schema bildet also die „logische Gesamtsicht“ der Daten: Nur die Objekte und Beziehungen, die dort abgebildet werden, sind in der Datenbank bekannt und können abgefragt oder bearbeitet werden.

Die oberste Ebene ist die mit dem höchsten Abstraktionsgrad: das „externe Schema“. Mit Hilfe dieser externen Sicht lässt sich bestimmen, welche Daten der logischen Gesamtsicht einem Benutzer zugänglich sind und welche Rechte (lesen, schrei-

ben, ändern, löschen) er auf diesen Daten hat. Ferner lassen sich Datenstrukturen der internen Sicht verändern, wobei die externe Sicht erhalten werden kann, so dass sich für den Benutzer nichts ändert.

Durch entsprechende Ausnutzung des externen Schemas kann die Unabhängigkeit von Daten und Anwendungen gewährleistet werden. Die externe Sicht bildet die logische Schnittstelle zu den Benutzern. Um nun möglichst vielen Anwendern einen dezentralen Zugang zur Datenbank von ihrem Arbeitsplatz aus zu ermöglichen, wurde ein Client-Server-System aufgebaut.

### V-1.2.5 Client-Server-Architektur

Mit „Client-Server-Architektur“ wird ein Verbund von Computern bezeichnet, die über ein Netzwerk kommunizieren, wobei einige Rechner („Server“) zentrale Dienste bereitstellen, die von den anderen („Clients“) in Anspruch genommen werden.

Das zentrale Datenbank-Managementsystem des Verbundprojekts stellt einen solchen Serverdienst bereit. Wenn auf den Arbeitsplatzcomputern der Mitarbeiter die entsprechende Kommunikationssoftware installiert ist, kann auf die Datenbank über das Netzwerk zugegriffen werden.

Eine wichtige Randbedingung im Projekt wurde von den Mitarbeitern formuliert: Es sollte möglich sein, mit Standardsoftware unter Microsoft Windows auf die Daten der zentralen Datenbank zuzugreifen, um sie analysieren und darstellen zu können.

Ein weitverbreiteter Standard für Datenbankschnittstellen ist der von Microsoft entworfene „Open-Database-Connectivity-Standard“ (ODBC). Diese Schnittstelle vermittelt zwischen Anwendungsprogrammen und Datenbank. Alle gängigen Datenbanksysteme verfügen über ODBC-Schnittstellen, die von vielen Produkten wie „Excel“ und „Access“ von Microsoft oder dem GIS „ArcView“ der Firma ESRI unterstützt werden. Die Idee hinter solchen Standardschnittstellen ist, dass sie unabhängig vom verwendeten Datenbanksystem ein einheitliches Applikationsinterface (API) bereitstellen, so dass die verschiedenen ODBC-Schnittstellen für die Anwendungen gleich aussehen. Nur auf der Datenbankseite unterscheiden sich die Schnittstellen und haben eine herstellereigenspezifische Ausprägung. Setzt

eine Anwendung auf ODBC auf, soll man (in der Theorie) die Datenbank samt ihrem ODBC-Treiber austauschen können ohne die Anwendung auf das neue Datenbanksystem anpassen zu müssen.

Eine häufig realisierte Client-Server-Struktur ist die Verbindung von Access als Client zum Oracle8i-Datenbank-Server über ein TCP/IP-Netzwerk-Protokoll. Dabei dient Oracle als Lager eher persistenter Daten, deren Struktur sich konsolidiert hat. Access bietet die Möglichkeit, schnell Abfragen auf lokalen oder verbundenen Oracle-Tabellen zu formulieren oder kleine Anwendungsprogramme zu schreiben, die die Auswertung unterstützen.

Abb. V-1.2 zeigt die für die Kommunikation zwischen Access und Oracle notwendigen Komponenten im OSI-Stack-Modell.

Die OSI-Schichten 1-4 (unten, dunkelgrau dargestellt) bilden den TCP/IP-Netzwerk-Stack, von der physikalischen Verbindung bis zum Transfer-Kontrollprotokoll (TCP). TCP/IP ist das am weitesten verbreitete Netzwerkprotokoll und gehört zum Standardumfang der meisten Betriebssysteme.

Der „Oracle Net Foundation Layer“ (früher SQL\*Net oder Net8) bildet Schicht 5. Als Sitzungsebene („session layer“) ist Oracle Net für Aufbau und Aufrechterhaltung einer Verbindung zwischen Client und Server verantwortlich. Eine Sitzung beginnt mit der Öffnung eines Kommunikationskanals („logon“) zwischen den Kommunikationspartnern und endet mit dessen Schließung („logoff“).

Verschiedene Betriebssysteme unterscheiden sich im allgemeinen in den verwendeten Zeichensätzen und in der binären Darstellung verschiedener Datentypen. „Two Task Common“ (TTS) auf OSI-Schicht 6 („presentation layer“) führt die notwendigen Zeichensatz- und Datentypkonvertierungen durch.

Die 7. und letzte Schicht ist die Anwendungsschicht („application layer“). Im vorliegenden Beispiel bildet das Oracle-DBMS die Anwendung auf der Server-Seite. Auf Client-Seite wird die Anwendungsschicht von MS-Access und dem ODBC-Treiber für Oracle-Datenbanken ausgefüllt.

Um eine solche Kommunikationsverbindung zu realisieren, sind folgende Schritte notwendig:

1. Installation des Oracle-DBMS und der Netzwerkkomponenten (Oracle-Net) auf dem Linux-Server,
2. Einrichten des TCP/IP-Netzwerks auf den Client-PCs unter Microsoft-Windows,
3. Installation und Konfiguration von Oracle-Net auf den Windows-PCs der Mitarbeiter,
4. Installation der Oracle-ODBC-Treiber auf den PCs der Mitarbeiter.

Leider ist die Oracle-Client-Software in einem großen Softwarepaket zusammengefasst, so dass die für die gewünschte Konfiguration wirklich notwendigen Komponenten erst mühsam identifiziert und individuell installiert werden müssen.

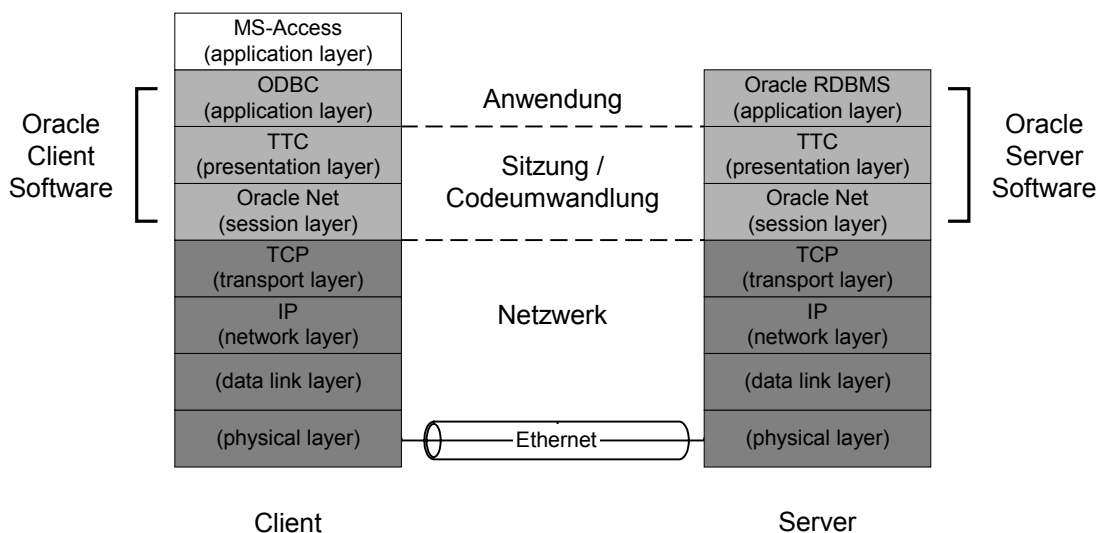


Abb. V-1.2 Beispiel einer Client-Server-Kommunikation im OSI-Sack-Modell.

Ein größeres Problem stellen die verschiedenen SQL-Versionen von Oracle und Microsoft dar. Trotz eines SQL-Standards verfügen viele Datenbanken über erweiterte SQL-Dialekte und es treten manchmal Schwierigkeiten bei der Übersetzung von einem Dialekt in einen anderen auf, wenn etwa über ODBC zugegriffen wird.

In der im Projekt realisierten Konfiguration gab es konkret das Problem, dass Oracle über einen numerischen Datentypen verfügt (`number(N,P)`), der in Access unbekannt ist. Versucht man nun aus Access heraus eine Oracle-Tabelle zu verknüpfen, deren Schlüssel ein Attribut dieses Datentyps enthält, werden alle Datensätze von Access als „gelöscht“ bezeichnet, was natürlich nicht stimmt.

Der „work around“ besteht darin, auf der Oracle-Datenbank die entsprechenden Attributtypen von „`number(N,P)`“ in „`number`“, „`integer`“ oder „`float`“ umzuwandeln. Diese Typen werden vom ODBC-Treiber richtig übersetzt und sind mit Access verträglich.

### V-1.2.6 SER-Modell

Neben der Bereitstellung der technischen Infrastruktur ist die wichtigste Aufgabe zum Aufbau eines Datenbank-Servers die *Modellierung der Daten*. Mit Hilfe von „Entity-Relationship-Modellen“ (ER-Modellen) lassen sich die Entitäten des betrachteten Wirklichkeitsausschnitts und ihre Beziehungen untereinander graphisch in „Entity-Relationship-Diagrammen“ (ER-Diagrammen) darstellen. Es existieren kanonische Übersetzungsregeln, um aus einem ER-Modell die für das konzeptuelle Schema der Datenbank notwendigen Tabellen abzuleiten. Diese Regeln werden „*Normalformen*“ (NF) genannt, die vor Integritätsverletzungen, Redundanzen und Anomalien bei der Bearbeitung schützen.

Mängel in der Modellierung von Existenzabhängigkeiten von Entitäten, die bei der Verwendung der ersten ER-Modelle auftraten, führten zu einigen verbesserten „Dialekten“ in der Entity-Relationship-Modellierung. Das „Strukturierte Entity-Relationship-Modell“ (SER-Modell, FERSTL & SINZ 1993), das im Projekt zur Datenmodellierung und -dokumentation verwendet wird, ist ein erweitertes ER-Modell, bei dem eine topologische Sortierung

für die ER-Diagramme eingeführt wurde, um die Existenzabhängigkeit der Elemente durch ihre Position zu beschreiben: Steht im SER-Diagramm ein Element B rechts von einem Element A, dann kann B ohne A nicht existieren ( $B \Rightarrow A$ ). Dadurch können Existenzabhängigkeiten schon auf der Objektebene modelliert werden. Bei früheren ER-Diagrammen mussten Existenzabhängigkeiten auf der Ebene der Attribute dargestellt werden.

Besonders in umfangreichen konzeptuellen Schemata führen die strengerer Layout-Vorgaben in SER-Diagrammen zu einer besseren Übersicht und verhindern Fehler wie zyklische Existenzabhängigkeiten ( $B \Rightarrow A \Rightarrow B$ ).

Abb. V-1.3 zeigt beispielhaft ein einfaches SER-Diagramm<sup>1</sup>, welches die semantischen Beziehungen zwischen „Pegel“ und „Pegelzeitreihe“ darstellt.

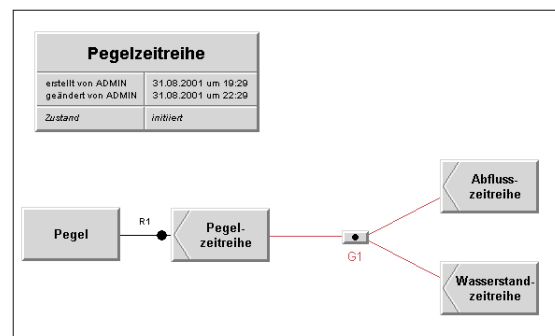


Abb. V-1.3 Beispieldiagramm SER-Modell „Pegelzeitreihe“.

„Pegel“ ist eine eigenständige Entität, im SER-Jargon ein „E-Typ“, der durch ein einfaches Rechteck dargestellt wird. „Pegelzeitreihe“ ist ein sogenannter „ER-Typ“, der dem schwachen Entitätstyp des ER-Modells entspricht. Das heißt, eine Pegelzeitreihe ist keine für sich allein existierende Entität, sondern von der Entität „Pegel“ abhängig: Eine Zeitreihe, von der nicht bekannt ist, an welchem Pegel sie aufgezeichnet wurde, ist unbrauchbar. Zwischen diesen beiden Elementen besteht die Beziehung „R1“. Der einfache Strich zeigt an, dass Pegel auch ohne Zeitreihe existieren dürfen. Ein doppelter Strich für „R1“ würde anzeigen, dass ein Pegel nur aufgenommen werden darf, wenn auch eine Zeitreihe vorliegt. Der Punkt am der Pegelzeitreihe zugewandten Ende heißt, dass ein Pegel mit mehreren Werten aus der Pegelzeitreihe in Beziehung stehen darf, z.B. mit allen Abflusswerten der ihm zugeordneten Abflusszeitreihe. Ein

<sup>1</sup> Die folgenden Diagramme wurden mit dem CASE-Tool „Innovator“ der Firma MID erstellt.

weiterer Elementtyp, der in diesem SER-Diagramm nicht auftaucht, ist der „R-Typ“, mit dem Beziehungen höherer Komplexität ausgedrückt werden, wenn etwa eine Entität A mit mehreren Entitäten B und umgekehrt ein B mit mehreren A in Beziehung stehen kann.

Die im Diagramm (Abb. V-1.3) modellierte „Pegelzeitreihe“ stellt eine Generalisierung der tatsächlich vorliegenden Zeitreihen dar. Sie existiert in dieser abstrakten Form nicht, sondern ist (hier) entweder eine Abfluss- oder eine Wasserstandzeitreihe.

Aus dem obigen SER-Diagramm lassen sich nun die E- und ER-Typen ableiten und durch Hinzufügen von Attributen konkretisieren.

Abb. V-1.4 zeigt die Struktur des E-Typs „Pegel“. Das Attribut „Pegelnummer“ reicht aus, um jeden Pegel eindeutig zu identifizieren und wird deshalb als „Primärschlüssel“ gewählt, erkennbar an dem „P“ in der zweiten Spalte der Tabelle. „nn“ (not Null) in derselben Spalte zeigt an, dass das Attribut angegeben werden muss und nicht leer sein darf.

Pegel					
erstellt von ADMIN	31.08.2001 um 19:30				
geändert von ADMIN	31.08.2001 um 20:29				
Zustand	initiiert				
Attribute					
	Eigenschaften		Datentypen		
	Schlüssel	Kurzname	Datenelement	Deutsch	ORACLE
Pegelnummer	P	P_NR	Pegelnummer	Ganze Zahl (10-stellig)	number(10)
Name	nn	NAME		Alphanumerisch(40)	varchar2(40)
Abkürzung		ABK		Alphanumerisch(10)	varchar2(10)
Gewässer	nn	GEW		Alphanumerisch(40)	varchar2(40)
Stromkilometer	nn	STROM_KM	Stromkilometer	Reelle Zahl (8 Byte)	number(6,3)
Rechtswert	nn	RW	Rechtswert	Ganze Zahl (7-stellig)	number(7)
Hochwert	nn	HW	Hochwert	Ganze Zahl (7-stellig)	number(7)
Pegelnulppunkt	nn	PNP		Reelle Zahl (8 Byte)	number(6,2)
Einzugsgebiet		EZG		Reelle Zahl (8 Byte)	number(8,2)

Abb. V-1.4 Beispieldiagramm für die Struktur des Entitätstyps (E-Typs) „Pegel“.

Die Struktur des ER-Typs „Abflusszeitreihe“ wird in Abb. V-1.5 wiedergegeben. Hierbei besteht der Primärschlüssel aus dem Tupel (Pegelnummer, Tag): Um genau einen Abflusswert zu identifizieren, muss angegeben werden, zu welchem Pegel und zu welchem Tag der Wert gehört.

Das „P“ in der Kennung „PF“ für die Pegelnummer bedeutet wieder, dass sie Primärschlüsselattribut ist. Mit „F“ wird angezeigt, dass sich die Pegelnummer auf einen „Fremdschlüssel“ bezieht, nämlich dem der Entität „Pegel“. Damit wird erreicht, dass in

„Abflusszeitreihe“ nur Pegelnummern verwendet werden können, die bereits in „Pegel“ vorliegen. Diese referenzielle Integritätsbedingung ist eine Folge der „schwachen Entität“.

Abflusszeitreihe					
erstellt von ADMIN	31.08.2001 um 19:33				
geändert von ADMIN	31.08.2001 um 22:31				
Zustand	initiiert				
Attribute					
	Eigenschaften		Datentypen		
	Schlüssel	Kurzname	Datenelement	Deutsch	ORACLE
Pegelnummer	PF	P_NR	Pegelnummer	Ganze Zahl (10-stellig)	number(10)
Tag	P	TAG	Tag	Datum	date
Abfluss	nn	Q		Reelle Zahl (8 Byte)	number(7,2)

Abb. V-1.5 Beispieldiagramm für die Struktur des E-Typs „Abflusszeitreihe“.

Die sorgfältige Modellierung des Datenbestands mit Methoden wie SERM ist die wichtigste Aufgabe beim Aufbau einer Datenbank. Sie hilft allen Beteiligten, die für das Projekt relevanten Entitäten zu identifizieren und ihre Zusammenhänge zu erkennen. Häufig wird erst in einer solch intensiven Auseinandersetzung und Strukturierung der Daten richtig klar, was eigentlich erreicht werden kann.

### V-1.2.7 Normalformen

Normalformen sind Regeln für den Aufbau eines relationalen Datenbestands. Sie schützen vor *Anomalien* bei der Bearbeitung der Daten. Um typische Anomalien, die im Datenmodell vermieden werden sollen, und deren Bedeutung für die Bearbeitung zu veranschaulichen, wird zunächst folgendes Beispiel gegeben.

Tab. V-1.1 zeigt eine Relation (Tabelle), wie man sie oft in Tabellenkalkulationsprogrammen findet. Sie zeigt einen Ausschnitt von Abflusszeitreihen eines Pegels. Der Schlüssel dieser Tabelle ist das Tupel (P\_NR, TAG).

Tab. V-1.1 Beispielausschnitt einer Datenbanktabelle mit Anomalien („Relation verletzt 2. Normalform“).

P_NR	NAME	RW	HW	TAG	ABFLUSS
502010	AKEN	450410	574712	01.01.1990	476
502010	AKEN	450410	574712	02.01.1990	461
502010	AKEN	450410	574712	03.01.1990	425
501060	DRESDEN	462201	565912	01.01.1990	319
501060	DRESDEN	462201	565912	02.01.1990	304
501060	DRESDEN	462201	565912	03.01.1990	282

Bei dieser Relation treten folgende Anomalien auf:

1. *Änderungsanomalie*: Soll der Name des Pegels mit der Pegelnummer P\_NR=501060 von „DRESDEN“ auf „Dresden“ geändert werden, muss diese Änderung anstatt an einer einzigen Stelle in vielen Datensätzen (Tabellenzeilen) durchgeführt werden.
2. *Löschanomalie*: Angenommen, der Pegel Aken verfüge in dieser Tabelle nur über eine Zeitreihe für das Jahr 1990. Sollten nun die Zeitreihen aller Pegel des Jahres 1990 zum Beispiel aus Platzgründen gelöscht werden, würde auch die Information über den Pegel Aken (Pegelnummer, Koordinaten etc.) verloren gehen.
3. *Einfügeanomalie*: Schlüsselfelder dürfen nicht leer sein, da sonst ein eindeutiger Datensatzbezeichner fehlt. Deshalb kann im Beispiel von Tab. V-1.1 kein Pegel eingefügt werden, wenn nicht auch Abflüsse für diesen Pegel vorliegen.

Um diesen Problemen entgegenzuwirken, wurden die „Normalformen“ (NF) eingeführt:

- **1. NF**: Alle Attribute sollen „atomar“ sein. Wenn etwa bei einer Tabelle mit Personendaten Vor- und Nachname zusammengesetzt in einem Tabellenfeld gespeichert werden, lassen sich die Datensätze nicht nach dem Nachnamen allein durchsuchen.
- **2. NF**: Alle Attribute, die nicht zum Schlüssel gehören, sollen voll funktional vom Schlüssel abhängen. Das bedeutet, es darf keine Untermenge des Schlüssels geben, so dass ein anderes Attributfeld eindeutig referenziert wird. Tritt so etwas auf, muss die Tabelle in zwei Tabellen zerlegt werden.
- **3. NF**: Ein Attribut, das nicht zum Schlüssel gehört, darf nicht von einem anderen Nichtschlüsselattribut voll funktional abhängig sein.

Es gibt noch andere Normalformen wie die Boyce-Cott-NF, oder die 4. NF. Wenigstens die dritte Normalform sollte in einem Datenmodell erreicht werden, um die größten Fehler zu vermeiden.

### V-1.2.8 Einblick in den Datenbestand

Um eine konkretere Vorstellung von dem nach dem oben beschriebenen Schema modellierten Daten-

bestand im Projekt zu geben, können als wichtigste in der relationalen Datenbank abgelegte Informationen die folgenden aufgelistet werden (ohne GIS-Daten oder anderweitige Daten wie Bilder). Nähere Einzelheiten zu Art und Umfang der Daten sind den einzelnen Kapiteln in diesem Bericht zu entnehmen (vor allem Kap. II-3, III-1, III-2, III-4 und IV-3).

Für die Elbe bzw. in der Datenbank sind demnach in umfangreicher und nach Möglichkeit weitgehend vollständiger Form vorhanden und objektrelational miteinander verknüpft (in Klammer: Quelle/Abk.):

- Hydrologische Zeitreihen, insbesondere langjährige (i.a. > 30 Jahre) tägliche Abflüsse und Wasserstände an den wichtigsten Pegelstellen der deutschen Elbe und ihren Hauptzuflüssen (BfG); auch umfangreiche Klimadaten (DWD),
- Querprofile der Elbe (WSV), ca. 3400 Profile
- Wasserspiegelfixierungen (WSV) für unterschiedliche Abflüsse und Strecken,
- Hydraulische Parameter aus Berechnungen für eine Vielzahl von Abflusszuständen über ca. 507 km Elbe (BAW, BfG, Projekt),
- Kornfraktionen der Elbesohle (BfG),
- Messungen zu Strömung und Feststofftransport an verschiedenen Messstellen (BfG, WSV),
- Grundwasserstandsmessungen an verschiedenen Messstellen (StAU, LAU, Projekt),
- u.a.

### V-1.2.9 Metadaten

Metainformationssysteme werden eingesetzt um Informationen über Daten bereitzustellen. Ursprung, Struktur, Genauigkeit und rechtliche Bedingungen zur Verwendung der Daten sind Beispiele wichtiger Zusatzinformationen.

Metadaten besitzen unterschiedliche Abstraktionsgrade: Sie können beispielsweise die detaillierte Struktur einer Tabelle oder den allgemeinen Überblick über eine Datensammlung wiedergeben.

Das wichtigste Element zur Beschreibung des Datenbankaufbaus ist das SER-Modell. Im Projekt wurden noch weitere Metadatenmodelle verschiedener Abstraktion und Struktur getestet und verwendet. Um dem Interessierten einen Einblick über



die im Projekt vorliegenden Daten zu geben, wird das Metainformationssystem „ELISE“ [HTTP 1] der Forschungsprogramms Elbe-Ökologie genutzt.

Daneben wird der Aufbau der in der zentralen Projektdatenbank gespeicherten Tabellen durch Metadatentabellen beschrieben, die ebenfalls in der Datenbank liegen. Sie wurden mit einer Web-Schnittstelle versehen, so dass ihr Inhalt in Form von dynamischen HTML-Seiten dargestellt werden kann.

Ein weiteres weit verbreitetes Metainformationssystem, das vom Abstraktionsgrad her zwischen den beiden beschriebenen Methoden liegen kann, ist der Umweltdatenkatalog (UDK, vgl. [HTTP 5]). Der UDK wurde 1991 - 1995 im Niedersächsischen Umweltministerium im Rahmen eines vom Umweltbundesamt geförderten Forschungsvorhabens entwickelt. Seit Januar 1996 ist eine Bund-Länder-Verwaltungsvereinbarung in Kraft, die die Weiterentwicklung, Pflege und Einführung des UDK zum Ziel hat. Jede der genannten Methoden ist für eine bestimmte Art der Datenbeschreibung besonders geeignet.

Es wurde im Projekt untersucht, ob sich der UDK eignet, die Daten des Informationssystems zu beschreiben, welches der Projektdokumentation dient und bei Projektende auf CD weitergegeben wird. Es hat sich ergeben, dass der UDK sehr gut für diese Aufgabe geeignet ist, aber die Umsetzung wurde wegen des hohen Aufwands verworfen.

### V-1.3 Anwendungsbeispiel

Ein einfaches Beispiel soll einen Eindruck der Möglichkeiten zur Datenanalyse vermitteln, die das Datenbankkonzept des Verbundprojekts bietet. Hierzu wird folgende Aufgabe schrittweise erörtert.

**Beispielaufgabe:** *Wie hoch über Mittelwasser liegt der Wasserstand, der in einem Gewässerabschnitt um Stromkilometer 132 zu einer deutlichen Ausuferung bzw. Überflutung des Vorlandes führt?*

#### Schritt 1: Analyse der Querprofile

Die Tabelle TPI4.QUERPROFIL (vgl. Beispielausschnitt in Tab. V-1.2) der zentralen Oracle-

Datenbank beinhaltet etwa 3400 Querprofile in 346000 Zeilen, wie sie in den hydraulisch-numerischen Modellen (vgl. Kap. III-2) verwendet wurden. Das an einem Stromkilometer (Spalte: STROM\_KM) vorliegende Querprofil entspricht dem Höhenverlauf entlang der gedachten Geraden, deren Lage durch die Hektometersteine (d.h. die amtlichen Festpunkte der Kilometrierung an beiden Uferseiten) bestimmt ist. Die Profile werden als (x,y)-Koordinatenpaare entlang dieser Linie abgelegt, wobei X ist den Abstand (in m) vom linken Hektometerstein und Y die Sohlhöhe über NN an der Koordinate X bezeichnet. An einer Gewässerstelle können die Querprofilkoordinaten in mehreren Versionen vorliegen. Neben den Originaldaten der Vermessung (Spalte: BS=0) sind dies vor allem die für numerische Strömungsmodelle aufbereiteten Versionen, bei denen sogenannte Buhenschatten (BS=1) als hydraulisch wirksame Geometrien im Profil berücksichtigt wurden.

**Tab. V-1.2** Ausschnitt der Tabelle TPI4.QUERPROFIL der Projektdatenbank zur Verdeutlichung der Struktur.

STROM_KM	X	Y	BS
131.9	360	87.7	0
131.9	390	87.4	0
131.9	400	91	0
132	-166.505	90.835	0
132	-165.062	90.949	0
132	-150.08	86.277	0
132	-88.586	87.279	0
132	-69	87.284	0
132	-49.545	87.714	0
132	-14.254	87.519	0

Von Access aus lässt sich über ODBC eine Verbindung mit dieser Tabelle herstellen. Dadurch bleiben die Daten physikalisch auf dem Oracle-Server und werden nur bei Anfrage über das Netz übertragen und temporär vorgehalten. Der Benutzer kann auf solchen verbundenen Tabellen genauso arbeiten, wie auf lokal in Access gespeicherten Tabellen.

Um die Information verständlich zu präsentieren, wurde für Projektzwecke ein einfacher „Querprofil-Browser“ mit der in Access enthaltenen Sprache „Visual Basic for Applications“ programmiert. Abb. V-1.6 zeigt dieses Werkzeug, das eine graphische Darstellung der in der verknüpften Oracle-Tabelle enthaltenen Querprofile erlaubt.

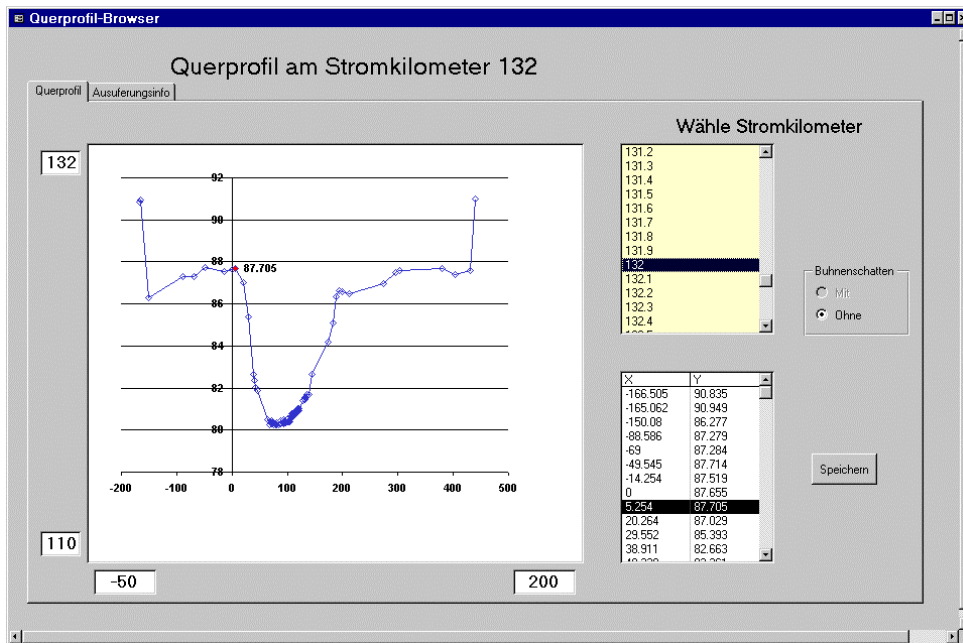


Abb. V-1.6 Beispiel: Graphikobjekt „Querprofil-Browser“ zur Visualisierung der Datenbanktabelle TPI4.QUERPROFIL.

Die Auswahlliste (Abb. V-1.6 oben rechts) zeigt die Stromkilometer an, an denen Querprofile vorhanden sind. Wählt der Benutzer einen Stromkilometer aus, wird das entsprechende Querprofil aus der verbundenen Oracle-Datenbanktabelle extrahiert und in dem Graphikobjekt links als Linie dargestellt.

Die mit „Bühnenschatten“ bezeichnete Gruppe von Umschaltknöpfen gibt an, welcher Version (Originalprofil oder mit Bühnenschatten) das Querprofil entspricht. Liegen beide Versionen vor, kann ausgewählt werden, welche dargestellt werden soll.

In der Liste unten rechts sind die Koordinaten des Profils zu finden. Die vom Benutzer im Hinblick auf die Frage „ab welchem Punkt am linken Ufer ist von deutlicher Überflutung des Vorlands auszugehen“ ausgewählten Koordinaten der Liste werden in der Graphik mit dem Wert für die Y-Koordinate markiert. Auf Knopfdruck lässt sich die Auswahl in einer lokalen Access-Tabelle speichern. Die auf diese Weise aktuell gespeicherten Querprofilpunkte werden auf dem nächsten Registerblatt (Menü) „Ausuferungsinfo“ angezeigt (Abb. V-1.7).

STROM_KM	X	Y	LR	KAT_NR	BEM_NR
132	-50	87.714	L	3	0
132	5	87.705	L		0
132	193	86.628	R	1	Ausuferungsbeginn
132	380	87.7	R	2	deutliche Vorlandüberflutung
				3	komplette Überflutung

Abb. V-1.7 Beispiel: Registerblatt „Ausuferungsinfo“ zur Ansicht gespeicherter markanter Querprofilpunkte.

In dieser Ansicht können weitere Informationen wie die Uferseite (links, rechts) hinzugefügt und die Ausprägung der Ausuferung (hier z.B.: „Beginn“, „deutlich“, „komplett“) näher beschrieben werden.

Nachdem nun auf diese Weise die Information bezüglich der Ausuferung auf den Querprofilen extrahiert und in der lokalen Access-Tabelle WSP\_AUSUFER abgelegt wurde, müssen zur Erfüllung der gestellten Aufgabe weitere Informationen herangezogen und verschnitten werden.

## 2. Schritt: Verschneidung mit Wasserspiegeltabelle

Abb. V-1.8 zeigt das von Access bereitgestellte graphische Werkzeug zur Generierung von Abfragen an die Datenbank. Der von Microsoft verwendete Begriff „Auswahlabfrage“ ist gleichbedeutend mit „Sicht“ oder „View“.

Mit Hilfe der Verknüpfung von Tabelle WSP\_AUSUFER\_KAT (verschiedene Kategorien der Ausuferung) mit der eben erstellten Tabelle WSP\_AUSUFER werden zunächst alle Punkte selektiert, die, wie in der Aufgabe gefordert, zur Kategorie „deutliche Vorlandüberflutung“ gehören.

Aus der Oracle-Tabelle TPI4\_WSP, die die Ergebnisse numerischer Strömungsberechnungen enthält, wird der am Stromkilometer errechnete Wasserstand extrahiert. Es kann sein, dass für einen Flussabschnitt verschiedene Berechnungsvarianten eines hydraulischen Modells erstellt wurden. Es ist deshalb durchaus möglich, für einen Stromkilometer

nicht nur unterschiedliche Wasserspiegel für verschiedene Abflüsse, sondern auch bei gleichem Abfluss vorzufinden, falls verschiedene Varianten zugrunde liegen. Um somit die Wasserspiegel näher zu spezifizieren, ist vom Bearbeiter zunächst eine bestimmte Modellvariante auszuwählen. Im vorliegenden Beispiel wurde Variante 3 (MOD\_ID=3) gewählt. Weitere Metainformationen (Bearbeiter, Datum, Kommentar ...) über das Modell können der verknüpften Tabelle TPI4\_WSP\_MODELL entnommen werden.

Nun muss für das gewählte Modell der Abfluss identifiziert werden, der dem Mittelwasserzustand „MQ“ der Gewässerstrecke entspricht (Verschneidung mit Tabelle TPI4\_WSP\_QSTAT, in der die Ergebnisse der Abflussstatistik abgelegt sind). Als Ergebnis der Verschneidungen erhält man alle Wasserstände aus Tabelle TPI4\_WSP, die mit dem Modell 3 für den mittleren Abfluss (der Zeitreihe ...) gerechnet wurden.

Als nächstes werden die erhaltenen Wasserspiegel mit den Informationen zur Ausuferung anhand der Stromkilometer verknüpft. Das Resultat ist eine Menge verschiedener (bzw. exakt jener) Gewässerpunkte, an denen sowohl Informationen über die Ausuferung als auch die Höhe des Mittelwassers vorliegen.

Schließlich wird die Höhe des Mittelwasserspiegels (TPI4\_WSP.WSP) von der Geländehöhe des aus dem Querprofil abgelesenen Ausuferungspunkts (WSP\_AUSUFER.Y) abgezogen.

The screenshot displays the Access Query Design View for a query named "Ausuferungshöhe über MQ: Auswahlabfrage". It shows four tables connected by lines: WSP\_AUSUFER\_KAT, WSP\_AUSUFER, TPI4\_WSP\_MODELL, and TPI4\_WSP\_QSTAT. The criteria grid at the bottom is as follows:

Feld:	BESCHREIBUNG	LR	STROM_KM	DIFF: [WSP_AUSUFER].[Y]-[TPI4_WSP].[WSP]	QSTAT	MOD_ID	QUELLE
Tabelle:	WSP_AUSUFER_KAT	WSP_AUSUFER	WSP_AUSUFER		TPI4_WSP_QSTAT	TPI4_WSP_QSTAT	TPI4_WSP_MODELL
Sortierung:							
Anzeigen:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Kriterien:					"MQ"	3	
oder:							

Abb. V-1.8 Beispiel: Auswahlabfrage zur Verschneidung mehrerer (lokaler und verknüpfter) Datenbanktabellen.

BESCHREIBUNG	LR	STROM KM	DIFF	QSTAT	MOD_ID	QUELLE
deutliche Vorlandüberflutung	L	128	3.81	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	R	128.5	3.23	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	R	129	3.59	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	L	130	4.11	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	L	130.5	3.66	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	L	131	3.68	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	R	131.5	3.70	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	L	132	4.03	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	L	132	4.03	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	R	132.5	3.64	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	R	133	4.48	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	R	133.5	3.45	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	R	134	4.23	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	R	134.5	4.54	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	L	135.5	3.92	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	L	136	3.99	MQ		3 BAW
deutliche Vorlandüberflutung	L	136.5	4.01	MQ		3 BAW

Abb. V-1.9 Ergebnis der Verschneidungsoperation mehrerer Datenbanktabellen.

Abb. V-1.9 zeigt das Ergebnis der Verschneidung. Die markierte Zeile besagt, dass am betrachteten Stromkilometer eine deutliche Überflutung des linken Vorlands dann eintritt, wenn der Wasserstand etwa 4 m über Mittelwasser liegt und dass die Wasserspiegel für MQ mit Hilfe von Modell 3 berechnet wurden, das in der BAW erstellt wurde.

Eine komplexe graphische Darstellung dieser Ergebnisse zeigt Abb. II-3.23 als Längsschnitt entlang der Elbe zum Thema Ausuferungshäufigkeit (vgl. Kap. II-3.4.4). Die zugehörige Verschneidungsoperation erfolgte über 7 Wasserspiegellagenmodelle zwischen Elbe-km 120 und 536, selektierte hieraus genau jene Stromkilometer im Abstand von 500 m, an denen der „deutliche Überflutungsbeginn“ im Querprofil sinnvoll bestimmt werden konnte und bezog diese auf drei ausgewählte Bezugwasserführungen (Mittelwasser, mittleres Hochwasser und 5-jährliches Hochwasser) mit veränderlichen Abflusswerten gemäß der Statistik im Längsverlauf.

### V-1.4 GIS-Datenbank-Kopplungen

#### V-1.4.1 Geographische Informationssysteme

Geographische Informationssysteme (GIS) sind Werkzeuge zur Analyse und Visualisierung raumbezogener Daten. Man unterscheidet zwischen vektor- und rasterbasierten GIS. Erstere verfügen über einfache geometrische Datentypen wie „Punkt“, „Linie“ und „Polygon“. Komplexere geometrische Figuren werden daraus abgeleitet.

Reale Objekte, die sich sehr gut in dieser Weise darstellen lassen, sind zum Beispiel Pegelstandorte (Punkte), Flussläufe (Linien) oder Einzugsgebietsgrenzen (Polygone).

Rasterbasierte GIS verwalten geographische Informationen in Dateien, deren innere Struktur einem regelmäßigen, rechteckigen Raster entspricht. Um ein Raster zu definieren, muss die Position einer Ecke des umfassenden Rechtecks, die Größe einer Rasterzelle und die Anzahl der Rasterzellen in beiden Raumrichtungen angegeben werden. Die Werte der Zellen sind sequentiell in der Datei abgelegt. Eine bestimmte Rasterzelle erreicht man dann durch Abzählen. Digitale Geländemodelle werden etwa als Raster verwaltet. Auch Bilder lassen sich als Raster auffassen.

Das im Projekt zumeist verwendete GIS ArcView ist ein vektorbasiertes GIS, dem eine Erweiterung („Spatial Analyst“) zur Bearbeitung von Rasterdaten hinzugefügt werden kann.

#### V-1.4.2 Dateibasierte geographische Informationssysteme

Bei der Bearbeitung kleinerer Projekte werden üblicherweise sowohl die geographischen Objekte wie Flächen, Linien und Punkte als auch deren Attribute auf dem Dateisystem des Computers abgelegt (Abb. V-1.10).

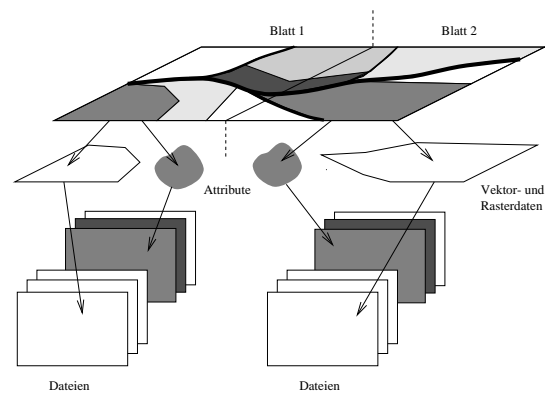


Abb. V-1.10 Dateibasierte Datenspeicherung.

Der Vorteil dieser Datenhaltung liegt in der einfachen Handhabung. Diese Methode besitzt aber alle Nachteile dateibasierter Datenspeicherung:

- Die Skalierbarkeit ist sehr eingeschränkt, denn die Verwaltung großer Datenmengen und Mehrbenutzerbetrieb sind kaum zu realisieren.
- Umfangreiche Realweltausschnitte müssen in kleinere Segmente zerlegt werden („Blattschnitte“), um bearbeitet werden zu können. Das bereitet vor allem dann Probleme, wenn

sich die Objekte für eine räumliche Analyse (Abstandsbestimmung, Nachbarschaftsbeziehung...) über mehrere Kartenblätter erstrecken.

- Die dedizierte Vergabe von Rechten ist umständlich und geht nur im Dateisystem.
- Es gibt kein Transaktionsmanagement, so dass die geographischen Objekte nur auf Dateiebene gesperrt werden können. Es muss also vermieden werden, dass mehrere Benutzer gleichzeitig auf den Dateien arbeiten.
- Die Konsistenz des Datenbestandes kann durch die große Anzahl von Dateien und Versionen leicht verletzt werden.
- Die Änderung der Attributdaten im GIS ist oft umständlich.
- Die Abhängigkeit von Daten und Programmen ist groß. Allein eine Verschiebung der Dateien auf dem Dateisystem kann dazu führen, dass GIS-Projekte beim nächsten Aufruf erst einmal restauriert werden müssen.

#### V-1.4.3 Geographische Informationssysteme mit externer Attributdatenbank

Diese Kopplung stellt eine Mischform der Datenspeicherung dar. Geometrische Informationen werden auf dem Dateisystem gespeichert, während die Attributdaten der geometrischen Objekte in einer Datenbank liegen (Abb. V-1.11).

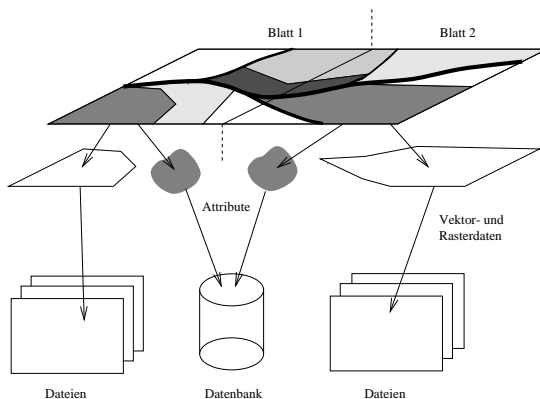


Abb. V-1.11 Gemischte Datenspeicherung.

Eine solche Vorgehensweise lässt sich zum Beispiel mit ArcView realisieren. In diesem GIS kann über ODBC eine Tabellenverknüpfung zu einer relationalen Datenbank hergestellt werden. Diese Verknüpfung erzeugt eine lokale Kopie der Tabelle, die als Attributtabelle an die geometrische Information

gehängt werden kann. Bei jedem Aufruf des ArcView-Projekts wird die Tabelle mit den Werten aus der verknüpften Datenbanktabelle aktualisiert.

Schon diese lose Kopplung von GIS und DBMS bietet gegenüber der rein dateibasierten Datenerhaltung einige Vorteile:

- Die Verwaltung durch ein zentrales DBMS führt zu einem vereinheitlichten Attributdatenbestand.
- Durch das Transaktionsmanagement ist ein Mehrbenutzerbetrieb bei Bearbeitung der Attributdaten kein Problem.
- Die verknüpften Attributdaten lassen sich in der Datenbank leicht verändern, besonders dann, wenn die Verknüpfung indirekt über entsprechende Sichten erfolgt (externes Schema). Bei richtiger Strukturierung der Daten muss nur eine Abfragebedingung der Sicht verändert werden, um einen anderen Ausschnitt der Attributdaten im GIS darzustellen.

Trotz dieser Verbesserungen in der Datenverwaltung bleiben einige Nachteile bestehen:

- Da die geometrische Information noch immer auf dem Dateisystem liegt, werden große Projekte auch hier schnell unübersichtlich.
- Grosse Datenbestände müssen noch immer abschnittsweise in das GIS geladen werden, so dass die Gesamtsicht nicht blattschnittfrei ist.
- Für die geometrischen Daten gibt es keine Verbesserung bei der Vergabe von Zugriffsrechten oder bei gleichzeitiger Bearbeitung durch mehrere Benutzer.

#### V-1.4.4 Geodatenbanken

Spezielle Managementsysteme für geographische Daten vereinigen die Vorteile moderner relationaler Datenbank-Managementsysteme und geographischer Informationssysteme.

Die unter Bezeichnungen wie "Spatial Database" oder "Geodatabase Extension" bekannten Systeme erweitern die Möglichkeiten der GIS-Datenbank-Kopplung durch objektrelationale Datenbankerweiterungen. Dadurch können auch Vektordaten wie Flächen, Punkte und Linien in Datenbanken abgebildet werden (Abb. V-1.12).

Der gesamte geographische Datenbestand liegt zusammen mit den dazugehörigen Attributdaten als blattschnittfreie Gesamtsicht vor, so dass beim "Information Retrieval", dem Suchen bestimmter Informationen, die gesamten Daten auf einmal gefiltert werden.

Ferner werden Teile der Funktionalität wie bestimmte Verschneidungsoperationen von Vektordaten schon auf der Datenbankseite ausgeführt, was zu einer erheblichen Verbesserung der Performance in Client-Server-Systemen führt. Anstatt die zu verschneidenden Objekte (Flächen) zum Client (GIS) zu übertragen und die gewünschte Operation dort auszuführen übernimmt die Geodatenbank diese Aufgabe und überträgt nur das im allgemeinen kleinere Ergebnis der Berechnung zum Client. Damit wird das Netz entlastet und die Rechenzeit vom Client auf den Server verlagert.

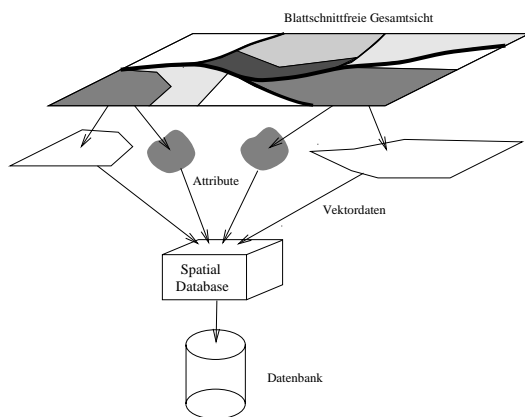


Abb. V-1.12 Geodatenbank.

Die Vorteile einer Geodatenbank sind:

- Blattschnittfreie Gesamtsicht,
- Transaktionsmanagement auf Objektebene,
- vereinheitlichter Datenbestand,
- zentrales Backup und Recovery,
- gutes Laufzeitverhalten.

Ein solches System hat aber folgende Nachteile:

- Erhöhter Administrationsaufwand,
- intensives und häufiges Datenbank-Tuning,
- keine Unterstützung für Rasterdaten.

Bei Projekten ab einer bestimmten Größe relativieren sich die ersten beiden Nachteile angesichts der Effizienzsteigerung in der Datenverarbeitung. Die Mitarbeiter werden entlastet, da sie sich nicht mehr selbst um eine konsistente Datenhaltung

bemühen müssen und Analysen werden durch den unkomplizierten Zugriff auf den zentralen Datenpool erheblich vereinfacht.

Die fehlende Unterstützung von Rasterdaten ist hingegen von großem Nachteil, denn große Teile des geographischen Datenbestandes wie digitale Geländemodelle oder Luftbilder liegen in Rasterformaten vor. Das Problem kann z.T. umgangen werden, wenn die Raster in ein vektrielles Datenformat für Punkte umgewandelt werden.

Im Projekt wurden zwei Systeme getestet, die geometrische Figuren auf Datenbanken abzubilden ermöglichen. Das erste ist die "Spatial Database Engine" (SDE) von ESRI, in Version 3.0.2.0 für Oracle-Datenbanken. Die SDE wird zum Beispiel im Wasserstraßen-GIS (WaGIS) der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung eingesetzt (vgl. BAW 2001). Es handelt sich um einen separaten Serverprozess (Middleware), der zwischen Datenbank und Endanwendung vermittelt. Die SDE bietet zwei verschiedene Möglichkeiten, geometrische Figuren in einer relationalen Datenbank abzulegen:

1. Speicherung der Geometrie als (x,y)-Koordinatenpaare in relationalen Tabellen,
2. Speicherung der Geometrie als BLOBs.

Es werden keine objektrelationalen Erweiterungen bereitgestellt oder genutzt. In beiden Fällen wird die Information nur in relationalen Tabellen gespeichert, die im zweiten Fall über eine Spalte zur Speicherung von unstrukturierten Binärdaten verfügen. Die Middleware muss die Daten für eine Bearbeitung zunächst aus der Datenbank auslesen, dann verschneiden und ggf. zurückschreiben oder an einen Client weiterleiten.

"Oracle8i Spatial", eine Oracle eigene Erweiterung des DBMS, ist das zweite untersuchte System. Auch hier gibt es zwei Alternativen der Datenspeicherung:

1. Speicherung in relationalen Tabellen,
2. Verwendung einer objektrelationalen Erweiterung.

Letztere stellt in der Datenbank einen neuen geometrischen Datentypen inklusive Methoden zur räumlichen Analyse bereit. Der Aufbau von Oracle Spatial orientiert sich stark an der Spezifikation des OpenGIS-Consortiums (OGC) [HTTP4] für „SQL

mit Geometriedatentypen“.<sup>1</sup> Mit dieser Erweiterung können alle topologischen Operationen mit den einfachen Geometrietypen „Punkt“, „Linie“ und „Polygon“ effektiv und schnell innerhalb des ORDBMS durchgeführt werden. Weitere Ergebnisse sind in BECKER & IHRINGER (1999) zu finden.

Setzt man einmal das Vorhandensein einer Oracle-Datenbank voraus, ist im Vergleich zur SDE (Version 3.0.2.0 für Oracle) Oracle8i Spatial die flexiblere und wohl auch zukunftsweisende Methode, geometrische Objekte durch Ausnutzung objekt-relationaler Erweiterungen in Datenbanken zu speichern.

Vergleicht man die Kopplung zwischen diesen beiden Geodatenbanken und ihren Clients, sind große Unterschiede im Funktionsumfang festzustellen.

Ein lesender Zugriff auf die SDE 3.0.2.0 ist in ArcView 3.x leicht zu realisieren. Will man jedoch Geodaten schreiben oder verändern, ist der Benutzer gezwungen, kleine Programme (Scripts) in der ArcView eigenen Programmiersprache „Avenue“ zu schreiben.

Greift man mit dem GIS „Map Extreme“ der Firma MapInfo auf Oracle Spatial zu, hat man über die graphische Kartendarstellung vollen Zugriff auf die geometrischen Objekte in der Datenbank. Wenn man zum Beispiel ein Objekt in der Karte aktiviert und verschiebt, wird die Änderung gleichzeitig in der Datenbank vollzogen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Geodatenbanken leistungsfähige und sehr flexible Systeme darstellen, die viele Benutzer gleichzeitig in der Selektion und Analyse von Daten unterstützen können. Aufgrund des Administrationsaufwands lohnt sich der Einsatz erst ab höheren Anforderungen an die Datenauswertung, was Laufzeit, Menge der Daten und viele simultane Zugriffe angeht.

### V-1.5 Informationssystem

Auf Grundlage der gesammelten Erfahrungen und daraus abgeleiteter Erkenntnisse wurde im Projekt

beschlossen, ein Informationssystem (IS) kleineren Umfangs zu realisieren, das auf der vergleichsweise losen GIS-Datenbank-Kopplung „GIS mit externer Attributdatenbank“ basiert.

Dieses IS dient der angemessenen Darstellung der im Projekt erarbeiteten Ergebnisse und gibt anhand von Datenauszügen aus der Projektdatenbank und anderer Informationsquellen einen Überblick über den vorhandenen Datenbestand und die durchgeführten Arbeiten der Teilprojekte.

Im nachfolgenden Kapitel V-2 wird die Architektur und Funktionsweise des IS näher beschrieben.

### V-1.6 Zusammenfassung

Wie bereits in der Einleitung erwähnt kann ein Forschungsprojekt als Unternehmen aufgefasst werden. Aus informationstechnischer Sicht besteht jedoch ein gravierender Unterschied: Das Datenmodell eines Unternehmens ist vergleichsweise starr, während sich das Datenmodell in einem Forschungsprojekt erst im Laufe der Zeit konsolidiert. Einige Strukturen der Eingangsdaten sind zwar von Beginn an klar (Zeitreihen ...), aber andere treten erst in der intensiven Forschungstätigkeit zutage. Oft zu Beginn nicht klar, welche Ergebnisse erzielt werden und wie diese datentechnisch zu modellieren sind oder es ergeben sich plötzlich neue Fragestellungen, die bisher bei der Datenmodellierung nicht berücksichtigt wurden.

Ein weiteres Problem sind die komplizierteren Anforderungen eines Forschungsvorhabens an die Auswertung. Es ist oft notwendig, Sachdaten mit räumlichen Informationen zu verschneiden und numerische Modelle damit zu füttern.

Kommerzielle Systeme sind klar auf die Anforderungen von Unternehmen ausgerichtet. Man findet viele Produkte, die Aktienverläufe als dynamische Graphiken im Internet darstellen können, aber keine, die dasselbe für Sieblinien oder Niederschlagszeitreihen leisten. Auch bei der noch nicht befriedigenden GIS-Datenbankkopplung wird deutlich, dass es kein System „von der Stange“ gibt, welches die Anforderungen eines Forschungsprojekts vollauf erfüllt.

Trotzdem hat der Einsatz eines professionellen Datenbank-Managementsystems im Verbundpro-

<sup>1</sup> „The object-relational model corresponds to a "SQL with Geometry Types" implementation of spatial feature tables in the OpenGIS ODBC/SQL specification for geospatial features.“ [HTTP 6]

jekt gegenüber herkömmlichen Methoden zu einer erheblichen Effizienzsteigerung in der Bearbeitung geführt. Viele der flexiblen Analysen hätten mit anderen Werkzeugen nur unter großem Zeitaufwand oder gar nicht durchgeführt werden können.

Die Verwendung von Access und Excel als Client des leistungsfähigen Oracle-Datenbankservers hat sich bewährt. In Oracle liegen die Teile des Datenmodells, die sich bereits gefestigt haben, während Access die Möglichkeit zur schnellen und flexiblen Datenauswertung bietet.

In vergangenen Projekten wurde die Erfahrung gemacht, dass mit dem Ende eines Projekts und dem Wechsel der Bearbeiter wichtige Informationen über die Daten oder sogar die Daten selbst verloren gehen.

Die im Projekt realisierte zentrale Datenbank trägt wie das mit dem Abschlussbericht zusammen verteilte Informationssystem auf CD dazu bei, die Lebensdauer wenigstens der eigenen Arbeitsergebnisse zu erhöhen.

Die „Ökologische Forschung in der Stromlandschaft Elbe“ verfügt mit ELISE über eine mächtige Metadatenbank, die Verweise auf die Quellen der erhobenen Daten enthält. Oft werden auch die Daten selbst dort abgelegt, aber der semantische Zusammenhang der Daten über Projektgrenzen hinweg fehlt: Ein Stapel loser Blätter mit Hinweis auf den Autor ist auch eine zentrale Datensammlung ohne erkennbare Semantik.

Um aus einem „bloßen“ Informationssystem ein Analysewerkzeug zu machen, muss der logische Zusammenhang der Daten modelliert werden: Welche Daten sind wie aus anderen hervorgegangen? Sind die Daten vergleichbar, wenn man ihre räumliche und zeitliche Auflösung und die verschiedenen Methoden, mit denen sie erhoben wurden, berücksichtigt? Man sollte sich, wenn möglich, auf Standards in den Koordinatensystemen von Zeit und Raum einigen.

Wenn diese Daten schließlich in eine projektübergreifende Geodatenbank übernommen würden, stünde ein leistungsfähiges und extrem flexibles System zur Verfügung, mit dem Daten leicht selektiert und schnell analysiert werden könnten. Dadurch könnte eine wesentlich höhere Effizienz und Wirtschaftlichkeit in groß angelegten For-

schungsprojekten erreicht werden. Durch die Modellierung des interessierenden Realweltausschnitts über Projektgrenzen hinweg würden Synergismen gefördert. Berührungspunkte und neue Fragen träten deutlicher zutage.

Es ist allerdings bei allen potentiellen Vorteilen solcher Geodatenbanken zu beachten, dass diese Werkzeuge zum Teil sehr neu und deshalb noch fehlerhaft sind und einige wichtige Funktionen erst gerade implementiert werden. Aufgrund der großen Nachfrage seitens der Wirtschaft wird die Entwicklung jedoch schnell vorangetrieben und die Fehler und Unzulänglichkeiten mit der Zeit beseitigt. Doch selbst bei tadelloser Funktionsfähigkeit ist der administrative Aufwand für ein solches System erheblich. Jede der drei Hauptkomponenten GIS, Geodatenbankerweiterung und relationale Datenbank erfordern viel Know-How und Pflege. Beobachtet man jedoch den Markt (Stichwort "Data Warehouse" oder „Data Mining“), wird deutlich, dass bei entsprechend intensiver Nutzung die Produktivitätssteigerung in der Analyse geographischer Daten die Investition und die laufenden Kosten eines solchen Systems wett macht.

## Literatur

- BAW (2001): Informationen zu WaGIS der Fachstelle für Informationstechnik, In: Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) 2000, Hrsg. BAW, ISSN 0720-8065, Karlsruhe.
- BECKER, R., IHRINGER J. (1999): Geometrische Objekte in relationalen und objektrelationalen Datenbanken. Poster und Kurzbeitrag zum Statusseminar Elbe-Ökologie (Berlin, 2.-5.11.1999). Vgl. auch: BfG [Hrsg.] (2000): Statusseminar Elbe-Ökologie. Tagungsband, BfG-Mitteilungen Projektgruppe Elbe-Ökologie Nr. 6, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Berlin.
- FERSTL, O. K., SINZ, E. J. (1993): Wirtschaftsinformatik, Oldenbourg Verlag München, 1993
- SCHMIDT, H. (1991): Philosophisches Wörterbuch, Kröner Verlag, 1991

## Internetadressen (Stand: 2000)

- HTTP 1: <http://elise.bafg.server.de/>
- HTTP 2: <http://ihwhp1.bau-vern.uni-karlsruhe.de/~elbe/>
- HTTP 3: [http://technet.oracle.com/docs/products/oracle8i/doc\\_library/817\\_doc/inter.817/a85337/toc.htm](http://technet.oracle.com/docs/products/oracle8i/doc_library/817_doc/inter.817/a85337/toc.htm)
- HTTP 4: <http://www.suse.de/en/support/oracle/>
- HTTP 5: <http://www.umweltdatenkatalog.de/>
- HTTP 6: <http://www.opengis.org>



## V-2 Das Informationssystem zum Schlussbericht (Anlagen-CD)

P. Preuß, R. Becker, B. Büchele, F. Nestmann

### V-2.1 Veranlassung und Zielstellung

Wie in den Nebenbestimmungen zur Förderung des Verbundvorhabens durch das BMBF festgehalten ist, wurde im Vorfeld der Projektbearbeitung die Verpflichtung eingegangen, die gewonnenen Daten und Ergebnisse im Sinne einer weiterführenden Verwertung durch die zuständigen Behörden und die Forschungsvorhaben der „Elbe-Ökologie“ (d.h. für nicht kommerzielle Nutzungen) so weit wie möglich frei verfügbar zu machen.

Um dieser Vereinbarung zu entsprechen und die Forschungsergebnisse des Verbundprojekts „Morphodynamik der Elbe“ einer breiten Öffentlichkeit in angemessener Weise zugänglich zu machen, wurde als integraler Bestandteil des Schlussberichts ein interaktives Informationssystem entwickelt, mit dem raumbezogene Daten zu verschiedenen Themen dargestellt werden können.

Bei diesem eigens hierfür entwickelten geographischen Informationssystem (GIS) stehen Verwaltung, Darstellung und Recherche der Daten und nicht deren geographische Analyse im Vordergrund.

Die hierbei zu verwaltende Datenmenge erfordert eine systematische Gliederung nach Thema und Raumbezug. Die Navigation durch den Datenbestand ist eine Kombination aus gewähltem Kontext und räumlicher Selektion. Damit können Auskünfte über die spezifischen Sachdaten eingeholt werden, die gemäß ihrem Kontext mit weiteren Funktionen verknüpft sind. Durch Anklicken bestimmter geographischer Objekte oder von Programmfunktionen im Kontextmenü werden etwa Diagramme oder Informationstexte aktiviert, die in einem Zusammenhang mit dem Objekt stehen.

### V-2.2 Systemarchitektur

Der Programmentwicklung fußt auf Erkenntnissen, die aus dem praktischen Einsatz von gekoppelten GIS und Datenbanksystemen gewonnen wurden (zum Vergleich siehe Kap. V-1 in diesem Band). Das Informationssystem realisiert eine lose GIS-Datenbank-Kopplung (Abb. V-1.11). Geometrische

Informationen (Punkte, Linien, Polygone im GIS) werden in Form von *Shapefiles*<sup>1</sup> auf dem Dateisystem gespeichert. Teile der Attributdaten und weitere Informationen, die einen Auszug der umfassenden Oracle™-Projektdatenbank bilden, liegen in Datenbank-Files im Format von Microsoft Access™.

Darüber hinaus liegen Graphikdateien und textuelle Beschreibungen, die im Zusammenhang mit einem geographischen Objekt stehen, im Dateisystem. Die objektspezifischen Informationen lassen sich über leicht zu bedienende Programmfunktionen abrufen.

Das Programm verfügt im Kern über GIS-Funktionen, die mit Bibliotheksfunktionen zur Bearbeitung von geographischen Daten realisiert werden. Bei der verwendeten Bibliothek handelt es sich um das Produkt MapObjects LT™ der Firma ESRI.

Die wichtigste Klasse, die von dieser Bibliothek bereitgestellt wird, ist die *Karte* oder *Map*. Mit Hilfe eines Kartenobjekts, einer Instanz dieser Klasse, lassen sich *Shapefiles* (z.B. Polygone oder Punkte im Raum) und georeferenzierte Bilder in verschiedenen Schichten („Layer“) darstellen. In der Karte kann durch räumliches Verschieben und Zoomen frei navigiert werden. Es lassen sich Layer ein-/ausblenden und hinzufügen oder die den Layern thematisch zugeordneten Attribute und Datenansichten abrufen.

Um die Abhängigkeit von Programm und darzustellenden Informationen zu reduzieren, wurde die sogenannte Index-Datenbank (*index.mdb*) realisiert. Zu jedem im GIS räumlich zugeordneten Thema wird in der Index-Datenbank beschrieben, welche Quelle zugrunde liegt und wie die Darstellung der verfügbaren Informationen erfolgen soll.

Abb. V-2.1 zeigt die Verzeichnisstruktur des Informationssystems der Anlagen-CD, die einen Einblick in die Architektur des Programmsystems gewährt.

<sup>1</sup> Ein „Shape-File“ ist ein von der Firma ESRI eingeführtes Dateiformat zur Speicherung von geometrischen Vektordaten. Shape-Files werden mittlerweile von verschiedenen Anwendungen unterstützt und können als Quasi-Standard angesehen werden.

Die Datenbankdatei „*master.mdb*“ im Microsoft-Access-Format ist ein für dieses Informationssystem erstellter Auszug ausgewählter Datensätze der zentralen Oracle-Projektdateibank (vgl. Kap. V-1). Sie enthält die für die Präsentation der Ergebnisse relevanten Daten und unterscheidet sich von der Projektdateibank hauptsächlich in ihrem Umfang.

Die zur Programmparametrisierung notwendige Datenbank *index.mdb* bildet somit die Verbindung zwischen der Darstellungs- und Datenebene. Sie enthält Informationen über jedes darzustellende Thema wie zum Beispiel der Name des Shapefiles, Attribute für die graphische Darstellung, und Pfadangaben zu Bildinformationen.

Das Verzeichnis *Shapes* enthält alle vom Programm verwendeten Geodaten. Diese shapefiles beinhalten Flächen, Polygone, Linien und Punkte wie z.B. Überflutungsflächen, Flussachsen und Pegelstellen.

Das Verzeichnis *Images* beinhaltet Grafiken aus Ergebnissen der diversen Teilprojekte, wobei zwei

Standardformate gewählt wurden: Das *GIF* (*Graphics Interchange Format*) und das von Microsoft entwickelte *WMF* bzw. *EMF* (*Windows Meta File*). *GIF* eignet sich hier besonders zum Speichern von Rasterbildern nicht vektorielle Art. Wenn eine geringe Farbauflösung gewählt wird (256 Farben) und das Bild über große einfarbige Flächen verfügt, werden die Dateien durch den angewandten Algorithmus stark komprimiert. Das *WMF*-Format eignet sich dagegen vor allem zum Speichern vektorielle Grafiken wie z.B. *Excel*-Diagrammen. Die großen Vorteile sind der geringe Speicherbedarf und die freie Skalierbarkeit, die Größenänderbarkeit ohne sichtbare Verluste.

Das *Readme*-Verzeichnis enthält Beschreibungen und Erläuterungen zu den im Programm enthaltenen Daten, Datenständen, Ergebnissen, verwendeten Verfahren, Grundlagen und ihren Autoren. Die hier zu findenden Dateien in einem einfachen Textformat (.txt) sind über die *index*-Datenbank direkt mit den entsprechenden Themen verknüpft.

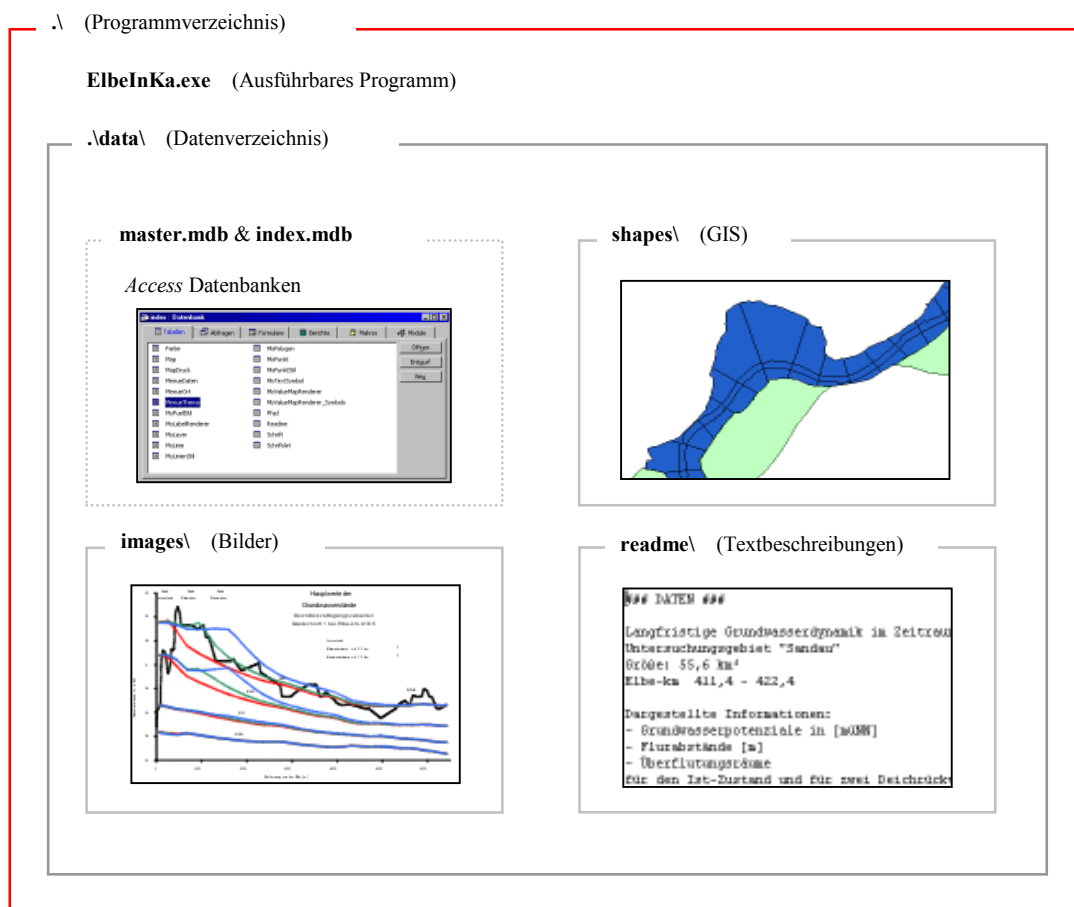


Abb. V-2.1 Verzeichnisstruktur des Systems.

### V-2.3 Erläuterung der Programmoberfläche und -funktionen

Bei der Programmentwicklung wurde darauf geachtet, dass sich der Anwender leicht mit dem Programm zurechtfinden kann. Nur zwei Fenster (Navigationsfenster und Datenfenster) reichen aus, um alle verfügbaren Detailinformationen darstellen zu können. Ergänzt werden diese um je ein Fenster zur Auswahl bzw. mit Bemerkungen zum Thema.

#### V-2.3.1 Das Navigationsfenster

Das erste Fenster dient dem Anwender zur Navigation und geographischen Orientierung. Dieses Navigationsfenster lässt sich in sieben funktionale Bereiche gliedern (vergleiche Abb. V-2.2).

##### 1. Das Menü Themenauswahl

Über das Menü „Themenauswahl“ kann der Anwender durch die unterschiedlichen im System verfügbaren Hauptthemen (Fachgebiete, Teilprojekte) und

deren Datenansichten navigieren. Dabei sind die Datenansichten immer einem Thema untergeordnet. Auf diese Weise wird ein hierarchischer Verzeichnisbaum aufgebaut.

Eine dritte Ebene des Baumes lässt sich im *Navigationsfenster* durch direktes Anwählen des Ortes in der Hauptkarte erreichen. Im *Datenansichtsfenster* ist diese als zusätzliches *dropdown*-Menü (Liste nach Ortsbezug) angelegt. Es bestehen also immer zwei Möglichkeiten einen bestimmten Ort wie z.B. eine Pegelstelle zu erreichen: durch Anklicken auf der Karte (Navigationsfenster) oder durch Auswählen im Menü des Datenansichtsfensters.

Abb. V-2.3 verdeutlicht schematisch die Hierarchie in den Auswahlmenüs (1. Ebene: Themenkomplex, 2. Ebene: Datenansichten, 3. Ebene: Raumbezug).

##### 2. Die Hauptkarte:

In dieser Karte lassen sich beliebige sogenannte *Layer* oder Kartenebenen darstellen. Möglich sind hierbei *MapLayer* (→ „Shapefiles“, „ARC/INFO

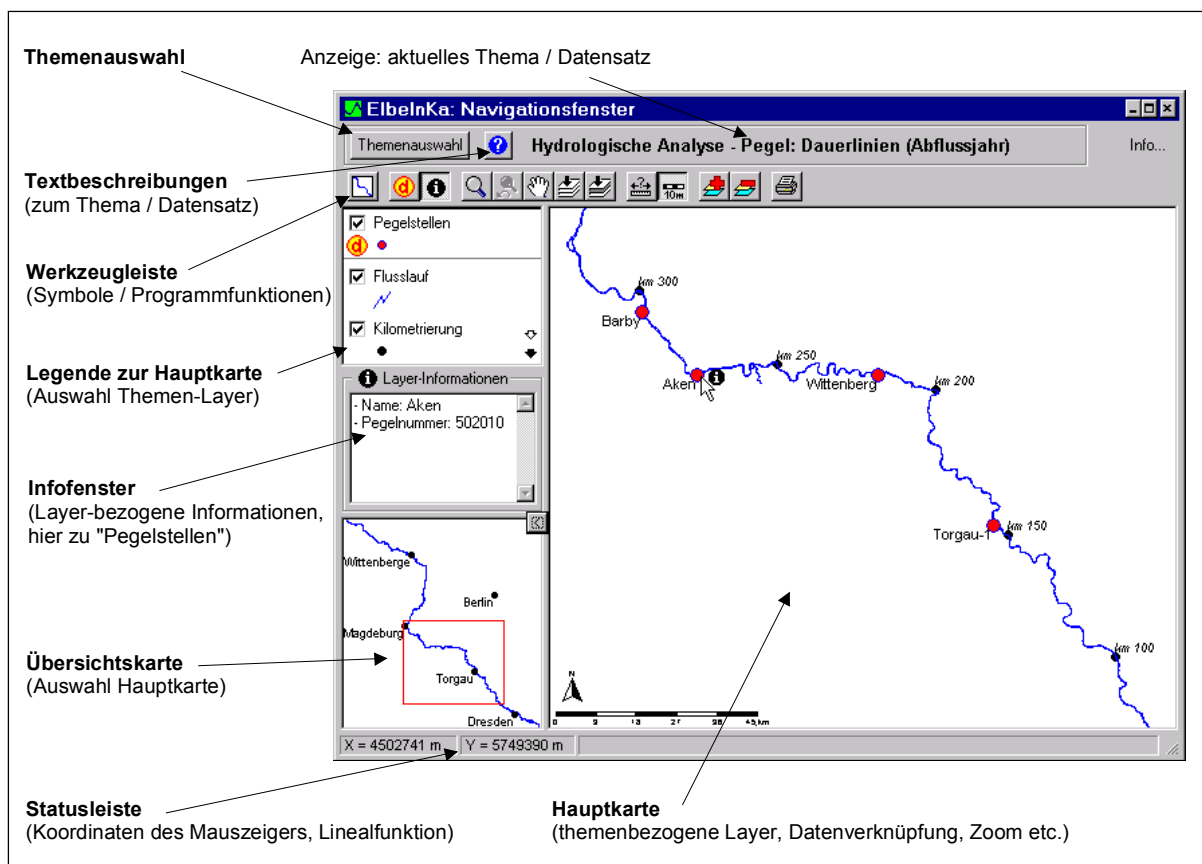


Abb. V-2.2 Das Navigationsfenster.

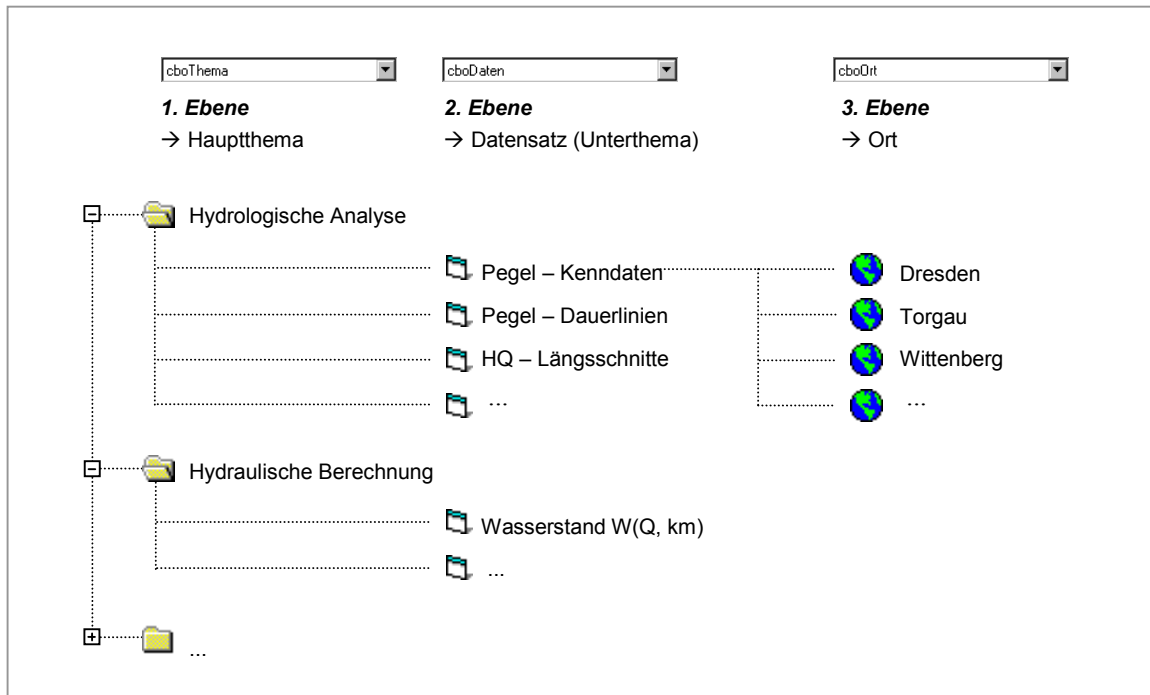


Abb. V-2.3 Schematische Darstellung der Hierarchie in den Auswahlmenüs.

coverages“, „CAD drawings“ und „VPF files“) und *ImageLayer* (→ georeferenzierte Bilder wie z.B. topographische Karten). Im gegenwärtigen Informationssystem werden ausschließlich *Shapefiles* und *ImageLayer* verwendet. Den hinzugefügten *Shapefiles* werden durch das Programm Eigenschaften wie z.B. Füllfarbe, -stil oder Rahmenfarbe zugewiesen. Die für den Anwender eingebauten Funktionen sind unter „Werkzeugleiste“ beschrieben.

Die Hauptkarte dient dem Anwender zur visuellen Navigation durch die Datensätze, für bestimmte Teilprojekte aber auch zur Präsentation von räumlichen Ergebnisdaten (wie z.B. thematische Karten zu „Überflutungsflächen“, „Flussgeologische Kartierung“ oder zur „Grundwasserdynamik“).

### 3. Die Übersichtskarte:



Sie soll dem Anwender eine Übersicht auf das gesamte Projektgebiet geben. Der in der Hauptkarte sichtbare Bereich ist in der Übersichtskarte mit einem roten Rechteck markiert. So lässt sich bei kleineren Teilprojekten gut die Relation zum Gesamtprojekt zeigen. Mit der linken Maustaste lässt sich das rote Rechteck neu platzieren. Mit der rechten Maustaste kann der Anwender das rote Rechteck (Auswahl Hauptkarte) neu aufziehen.

### 4. Die Legende zur Hauptkarte:


Die Legende enthält alle in der Hauptkarte dargestellten Layer. Der Anwender erhält hier Informationen über die farbliche Kennzeichnung jedes Kartenelements.

Jeder Layer lässt sich durch An- bzw. Abwählen des *checkboxes* (Kontrollkästchen) ein-/ausblenden. Die einzelnen Layer lassen sich per *drag & drop* mit der linken Maustaste bezüglich ihrer Darstellungsreihenfolge neu anordnen.

Die Legende eines jeden Layers kann durch Anklicken mit der rechten Maustaste versteckt bzw. wieder eingeblendet werden. Dies ist besonders bei Kartenzusammenstellungen mit vielen Layern und Layern mit umfangreicher Legendenaufteilung nützlich. Bei umfangreichen Legenden, die den vorgesehenen Fensterbereich überschreiten, erscheint in der Legende ein *scroll*-Balken (Bewegung mit Pfeil auf/ab).

Zu besseren Orientierung ist der Layer mit der Datenanbindung mit einem kleinen gelb/roten  markiert (in der Regel der erste Layer). Mit Datenanbindung ist gemeint, dass man durch Anwählen der Elemente (z.B. Pegel, Flussabschnitte, ...) dieses Layers in das zweite Fenster, das *Datenansichtsfenster* (siehe unten) gelangt und zu dem jeweils angewählten Ort detailliertere Informationen erhält (siehe auch Hinweise zu  unten).

## 5. Das Infofenster

In diesem Fenster können über die „Info“-Funktion (siehe unten) wichtige Informationen zu einem in der Legende markierten Layer angezeigt werden. Das Infofenster erscheint, wenn das Symbol  in der Werkzeugleiste aktiviert ist. Z.B. können die Namen von dargestellten Orten abgerufen werden

## 6. Die Statusleiste:

Die Statusleiste ist in drei Bereiche unterteilt. Feld 1 und 2 geben die aktuelle Position (X und Y) des Mauszeigers in der Hauptkarte bzw. der Übersichtskarte an. In welchem Koordinatensystem dabei die Position angegeben wird hängt von den dargestellten Layern ab. Bei diesem Projekt sind allerdings ausschließlich Koordinaten in Gauss-Krüger Form / Bessel-Ellipsoid 4. Streifen / Zentralpunkt Rauenberg / Potsdam Datum vorzufinden; diese trägt die Einheit [m].

Das dritte Feld ist für zusätzliche Funktionen reserviert und standardmäßig leer. Die *Lineal*-Funktion aus der Werkzeugleiste benutzt dieses Feld z.B. um die gemessene Länge einer markierten Polygonstrecke anzuzeigen.

## 7. Die Werkzeugleiste:

Die Werkzeugleiste umfasst viele Funktionen der weiteren Informationsdarstellung. Diese sind:






Legende/ Übersichtskarte ausblenden



Legende/ Übersichtskarte einblenden



Wenn das Symbol in der Werkzeugleiste aktiviert ist, lassen sich über die Datenverknüpfung weitere Informationen zu Einzelthemen abrufen.

Durch Anwählen des -Symbols ändert sich der Mauszeiger in  und es lassen sich die Orte des mit  gekennzeichneten Layers in der Karte anklicken. Das Datenansichtsfenster öffnet sich und die angefragte Information wird dort dargestellt. Z.B. sind zum Thema „Hydrologische Analyse“ die Pegelstellen anklickbar.



Mit der Informationsverknüpfung lassen sich ähnlich wie bei der Datenverknüpfung Informationen zu einem einzelnen Layer abfragen, wenn dieser mit solchen Beschreibungen versehen wurde. Angezeigt werden diese Informationen (z.B. Ortsnamen, Flussnamen oder Flächengrößen) in einem erscheinenden kleinen Fenster unter der Legende. **Wichtig:** Ein Layer, dessen Attribut-Informationen abgerufen werden sollen, muss zuvor in der Legende per Mausklick selektiert werden.



Durch Anklicken wird in einem weiteren Fenster eine Textdatei mit einer Kurzbeschreibung zum ausgewählten Thema/Datenfenster geöffnet. Der Informationstext kann markiert werden und über Kopieren in ein Textverarbeitungsprogramm ausgedruckt werden. Der Knopf ist inaktiv (grau statt blau), wenn keine Textdatei verknüpft ist.



**Zoom:** Mit der linken Maustaste lässt sich entweder durch einfaches Klicken der Ausschnitt der Hauptkarte um 100% vergrößern oder durch Ziehen eines Rechtecks direkt an die gewünschte Position bringen. Mit der rechten Maustaste wird der Kartenausschnitt um 50% verkleinert.



**Letzter Zoom:** Hier kann man die aktuelle Zoomeinstellung rückgängig machen (um bis zu 5 Stufen).



**Pan:** Ist das Hand-Symbol aktiv, so kann man sich durch Klicken und Ziehen mit der Maus durch die Karte navigieren.



**Direkter Zoom auf den in der Legende markierten Layer.** Diese Funktion ist besonders bei Layern mit im Gegensatz zur Gesamtkarte kleiner räumlicher Ausdehnung sinnvoll.



**Zoom auf die gesamte Kartenzusammenstellung.** Es werden alle in der Legende verfügbaren Layern in vollem Umfang angezeigt.



**Linealfunktion:** Ist diese aktiviert, kann der Benutzer im Kartenbild Längen abmessen. Durch mehrfaches Klicken der linken Maustaste wird ein Polygon gezogen, dessen aktuelle Länge in der Statusleiste angezeigt wird. Bei Doppelklick wird der Polygonzug vollendet und, über einen weiteren Klick, die Funktion neu gestartet. Mit der rechten Maustaste lässt sich jeweils der letzte Punkt im gezogenen Polygon löschen.



Der Maßstabsbalken wird bei Auswahl in der linken unteren Ecke der Karte angezeigt. Er gibt die Längenverhältnisse der Hauptkarte in der aktuellen Zoomstufe wieder und wird bei einem möglichen Ausdruck der Karte mit angezeigt.



**Layer hinzufügen:** Anhand dieser Funktion können zusätzliche Layer in die Karte geladen werden. Dies können z.B. entweder Daten aus dem Datenverzeichnis „shapes“ oder auch projektfremde georeferenzierte Daten sein, sofern sie ein unterstütztes Format besitzen (im Moment nur ESRI shapefile; möglich wären durch MapObjects aber auch SDE layer, ARC/INFO coverage, CAD files und VPF data). Bei Überlagerung fremder Daten mit den *Shapefiles* des Projekts ist der passende Koordinatenbezug zu wählen (siehe oben unter 6.).



**Layer entfernen:** Hiermit können Layer der Legende bzw. aus der Kartenzusammenstellung entfernt werden (der mit Datenansichten verknüpfte Layer ist allerdings nicht entfernbar!). Dies ist nur temporär möglich, d.h. beim erneuten Laden des aktuellen Themas ist alles wieder wie voreingestellt.




Mit der Druckfunktion wird der aktuelle Fensterinhalt an den Drucker gesandt. Dabei wird automatisch ein Rahmen eingefügt, der die Bearbeitungsquelle der dargestellten Information beschreibt.

**Wichtig:** Zusätzlich zum Kartenausschnitt wird im Ausdruck die Legende aller selektierten Layer hinzugefügt. Dies ist besonders bei Kartenzusammenstellungen mit umfangreichen Zusammenstellungen und Layern mit Abstufungen sinnvoll (z.B. Grundwasserkarten). Vorsicht! Ist das Symbol bzw. die

Legende eines Layers aktuell ausgeblendet (an/aus mit der rechten Maustaste), so erscheinen diese Informationen auch nicht im Ausdruck der Karte. Es wird empfohlen, vor dem Ausdruck das Fenster auf Bildschirmgröße zu maximieren.

### V-2.3.2 Das Datenansichtsfenster

Im zweiten Fenster („Datenansicht“, in Abb. V-2.4 im Vordergrund rechts stehend) werden Grafiken und Tabellen dargestellt, die mit dem im Navigationsfenster ausgewählten Thema in Zusammenhang stehen (siehe oben, Funktion )

Das Datenansichtsfenster besteht aus zwei Bereichen. Der die Menüs umfassende obere Teil ist schon vom Navigationsfenster bekannt und dient zum Umschalten der Datenansichten. Änderungen in der Auswahl im Datenansichtsfenster werden an das Navigationsfenster weitergegeben. Das rechte Menü ersetzt die geographische Auswahlmöglichkeit in der Karte des Navigationsfensters und beinhaltet alle Orte des aktuellen Themas. So sind in diesem Menü z.B. in Abb. V-2.4 alle Gewässerstellen im Abstand von 500 m aufgelistet, an denen eine Wasserstand-Abfluss-Beziehung (Auswahl: *Hydraulische Berechnungen – Wasserstand W (am km)*) verfügbar ist.

Wiederum ist eine Druckfunktion vorzufinden mit der man die im unteren Teil angezeigten Information ausdrucken kann. Für manche Datensätze ist sie allerdings deaktiviert.

Der größte Teil des Fensters ist für ein beliebiges „Anzeigeobjekt“ reserviert (in Abb. V-2.4 z.B. die Wasserstand-Abfluss-Beziehung am km 457,5). Abhängig davon, welche Informationen dem Anwender vermittelt werden sollen, wird hier ein Bild, eine Grafik oder ein anderes Objekt (z.B. Tabelle) angezeigt. Je nach Datensatz handelt es sich um feststehende Daten oder um eine dynamisch (ortsabhängig) aus Datenbanktabellen der *master.mdb* erzeugte Diagramme (z.B. Wasserstand-Abfluss-Beziehungen, Längsschnitte für Hochwasserabfluss-Kennwerte, Kornverteilungen u.a.).

Im Informationssystem wurden demzufolge für verschiedene Datenarten spezifische Anzeigeobjekte realisiert. Das am häufigsten verwendete ist das Grafikobjekt. Es kann feststehende Grafiken im Dateiformat *wmf/emf*, *bmp*, *gif* und *jpg* darstellen und damit für viele der Themen verwendet werden.

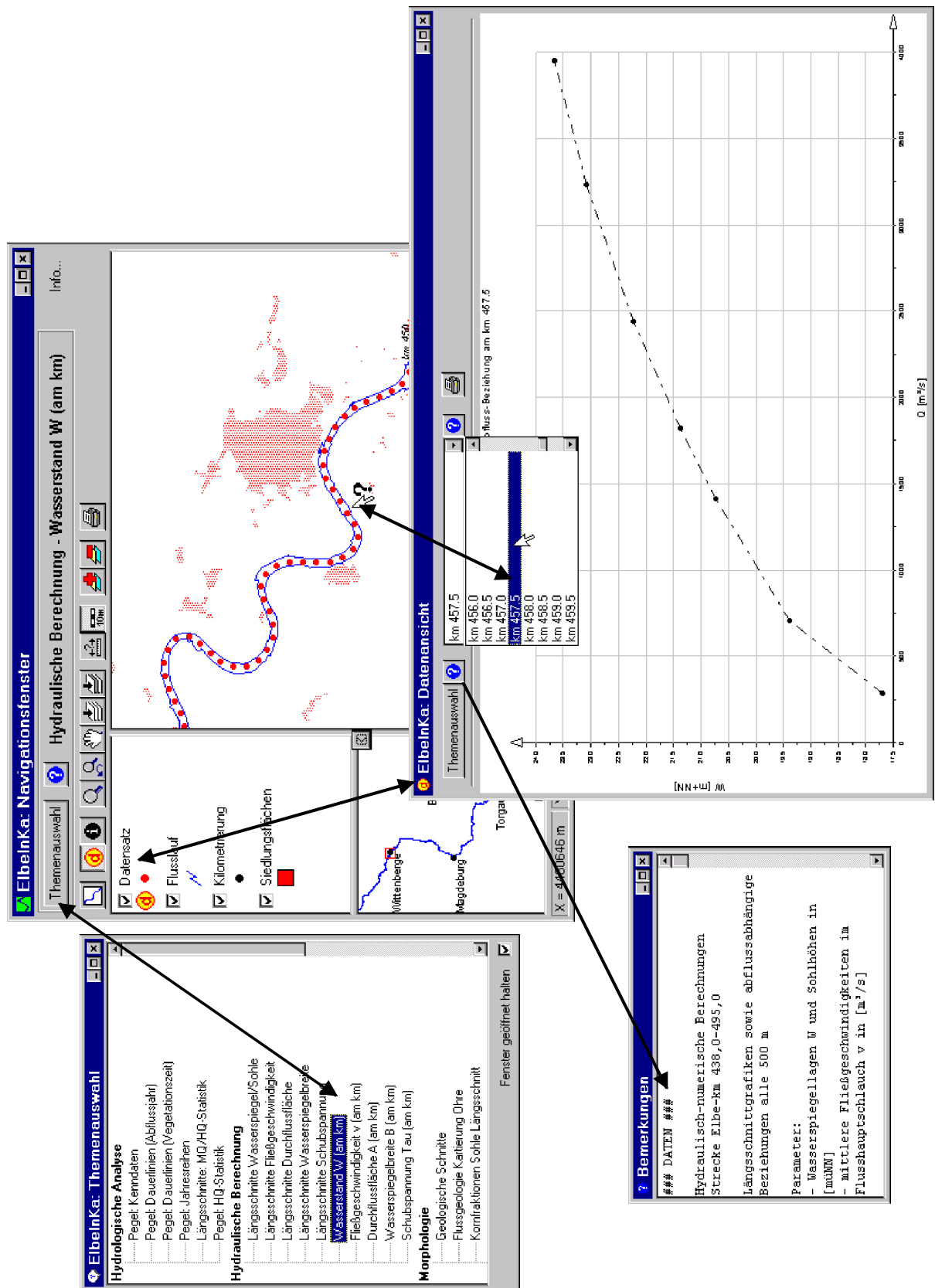


Abb. V-2.4 Die Fenster des Informationssystems und ihre spezifischen Verknüpfungen: das Navigationsfenster (o.l.), das Datenansichtsfenster (o.r.), die Themenauswahl (u.l.) sowie das Bemerkungsfenster (u.r.).

Besonders empfehlenswert ist hier das Metaformat *wmf/emf*, da die Bildelemente vektoriell gespeichert werden. Solche Grafiken lassen sich am Bildschirm wesentlich besser skalieren, d.h. in ihrer Größe ändern, ohne dass die Erkennbarkeit der Beschriftungen und Linien leidet. Im Projekt war es nicht immer möglich auf dieses Metaformat zurückzugreifen (z.B. bei geologischen Schnitten des Elbetales oder Wahrscheinlichkeitsdiagrammen der Hochwasserstatistik). Solche wurden in der Regel mit dem sparsamen *gif*-Bildformat gespeichert.

Alle anderen Anzeigebjekte sind Speziallösungen und bestehen aus mehreren Grafiken, Tabellen oder Diagrammen, aber auch aus eingebauten Funktionen zur interaktiven Auswahl. Hierzu gehören u.a.

- Kennzahlen der hydrologischen Pegel,
- Ergebnisse der Hochwasserstatistik,
- Längsschnitte hydrologischer Parameter,
- Hydraulische Parameter (Wasserspiegel, Fließgeschwindigkeit etc.) im Abstand von 500 m entlang des Elbelaufes,
- Kornfraktionen der Elbe-Sohle.

So lassen sich z.B. beim Thema „*Kornfraktionen der Elbe-Sohle*“ bis zu fünf Sieblinien einzelner Elbekilometer auswählen und gleichzeitig darstellen.

**Wichtig:** In der Regel sind die Darstellungen im Datenansichtsfenster für den möglichen Ausdruck auf Papier optimiert. Je nach Datenart (vor allem bei *gif*-Bildern) und aktueller Größe des Ansichtsfensters können am Bildschirm leicht verzerrte Darstellungen und visuelle Unschärfen auftreten, die im Ausdruck der Graphik verschwinden.

### V-2.3.3 Die beiden weiteren Fenster

Im Informationssystem können maximal vier Fenster gleichzeitig geöffnet sein. Dabei werden die beiden oben beschriebenen Hauptfenster (Navigations- und Datenansichtsfenster) durch das Themenauswahl-Fenster sowie durch das von der aktuellen Datenansicht abhängige Bemerkungsfenster ergänzt. Eine Gesamtansicht dieser Fenster mit ihren spezifischen Verknüpfungen liefert Abb. V-2.4.

Alle wichtigen Funktionen des Informationssystems sind hiermit angesprochen, so dass einer einfachen Handhabung nach kurzer Eingewöhnung durch den Benutzer nichts im Wege stehen dürfte.

## V-2.4 Themenübersicht

Tab. V-2.1 gibt einen Überblick über die enthaltenen fachspezifischen Informationen im System.

## V-2.5 Hinweise zu Start und Nutzung des Informationssystems

### Systemvoraussetzungen

Obleich die Software spezifische Dateiformate von Datenbanken und Geoinformationssystemen verarbeitet, ist es für den Betrieb des Informationssystems nicht erforderlich, auf dem Computer des Benutzers entsprechende Programme installiert oder im Hintergrund geöffnet zu haben. Das heißt, es besteht eine weitreichende programmtechnische Unabhängigkeit.

Die entwickelte Software ist lauffähig unter dem Betriebssystem Microsoft Windows™ (getestete Versionen: 95, 98, NT, 2000). Empfohlen wird ein PC mit 200 MHz und 64 MB RAM.

### Installation

Ein Start der Software direkt von CD aus ist nicht möglich, d.h. sie muss installiert werden. Der notwendige Speicherplatz beträgt insgesamt ca. 30 MB. Nach Einlegen der CD in den Computer und Aufruf der Datei „*setup.exe*“ wird der Benutzer durch ein Installationsmenü geführt.

### Nutzung

Das Informationssystem ist untrennbarer Bestandteil dieses Schlussberichtes (Anlage). Mit Installation verpflichtet sich jeder Benutzer zum rechtmäßigen Umgang mit dem Informationssystem und den hierin zur Verfügung gestellten Daten. Eine kommerzielle Verwertung ist untersagt. Nutzungen für öffentliche (behördliche) und wissenschaftliche Zwecke setzen die Nennung der Quellen bzw. Urheber voraus. (siehe auch Nutzungsbedingungen bei Installation).

### Berichte

Auf der CD ist der Schlussbericht digital abgelegt. Die Einzelkapitel sind druckreif als *pdf*-Dateien gespeichert, die mit dem Programm Acrobat Reader™ der Firma Adobe geöffnet werden können (frei im Internet verfügbar unter: <http://www.adobe.de>).



**Tab. V-2.1** Übersicht der verschiedenen Themenkomplexe und Daten im Informationssystem der Anlagen-CD.

<b>Themenkomplex</b>	<b>Datenansicht</b>	<b>Kurzbeschreibung (Verweis/Quelle)</b>
Hydrologische Analyse	Pegel: Kenndaten	Detailinformationen der hydrologischen Analyse: Ergebnisgraphiken und Zahlenangaben am Einzelpegel bzw. im Elbe-Längsschnitt (vgl. Kapitel III-1)
	Pegel: Dauerlinien (Abflussjahr)	
	Pegel: Dauerlinien (Vegetationszeit)	
	Pegel: Jahresreihen	
	Pegel: HQ-Statistik	
	Längsschnitte: MQ/HQ-Statistik	
Hydraulische Berechnung	Längsschnitte Wasserspiegel/Sohle	Parameterdarstellungen der hydraulischen Berechnungen zwischen Elbe-km 0 und 568: - Längsschnitte für 21 Teilstrecken à 20-30 km - abflussabhängige Beziehungen alle 500 m (vgl. Kapitel III-2)
	Längsschnitte Fließgeschwindigkeit	
	Längsschnitte Durchflussfläche	
	Längsschnitte Wasserspiegelbreite	
	Längsschnitte Schubspannung	
	Wasserstand W (am km)	
	Fließgeschwindigkeit v (am km)	
	Durchflussfläche A (am km)	
	Wasserspiegelbreite B (am km)	
	Schubspannung Tau (am km)	
Morphologie	Geologische Schnitte	17 geologische Schnitte des Elbetals + geologische Karte an der Ohre (vgl. Kapitel II-1.1)
	Flussgeologie Kartierung Ohre	
	Kornfraktionen Sohle Längsschnitt	
	Kornverteilung Sohle am Kilometer	
	Uferbreite und -neigung (NQ-MQ)	
	Uferverbau und -verlandung	
	Überflutungsbereiche	
Messungen Strömung/Transport	Strömungsgeschwindigkeiten	Auswertung von Messdaten an 25 Messstellen im Elbe-Längsverlauf im Hinblick auf den Transport von Feststoffen (vgl. Kapitel III-4)
	Sohlschubspannungen	
	Sandtransport	
Grundwasserdynamik	Ohre: Ist-Zustand	Ergebnisse der GW-Modellierung im Gebiet Ohremündung/Rogätz, Untersuchung der Auswirkung einer möglichen Deichrückverlegung (vgl. Kapitel IV-3)
	Ohre: Deichrückverlegung	
	Ohre: Bodenparameter	
	Ohre: Leakageparameter	
	Sandau: Übersicht	
	Sandau: Ist Zustand	
Sandau: Deichrückverlegung		
Diverses...	Elbe Einzugsgebiet	Reliefdarstellung des Elbe-Einzugsgebietes
	Radarbefliegung Lenzen	Ergebniskarten Bodenfeuchte, Rauigkeit (vgl. Kapitel IV-1)
	Historische Karte	Georeferenzierter Ausschnitt einer historischen Karte der Elbe (1724) und darin enthaltener Querprofile (vgl. Kapitel II-2.2)



## TEILPROJEKTE UND PARTNER DES VERBUNDPROJEKTES

### Partner

Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe	(IWK)
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe	(IBF)
Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe	(IfH)
Fachbereich Technischer Umweltschutz, Universität-GH Paderborn, Abteilung Höxter	(FBTU)
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz - Berlin	(BfG)
Institut für Geographische Wissenschaften, Freie Universität Berlin	(IGW)
Institut für Hochfrequenztechnik, Weßling, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	(DLR)

### Teilprojekte

Nr.	Teilprojekt	Partner Institut	Kurzbeschreibung	Kapitel Nr.* (Querverweis)
<b>Projekt I: Analyse und Bewertung des Ist-Zustandes</b> <i>Hydrologie – Hydraulik – Morphologie – Geologie – Ökologie</i>				
TP I.1	Geländemodell und GIS	IWK + FBTU	Geometrische Beschreibung des Flussschlauches und der Vorländer sowie Auswertung und Visualisierung der flächenbezogenen Daten und Ergebnisse mittels Geoinformationssystem (GIS)	<b>II-3, III-2</b> (II-2, III-3, IV-1, IV-4, IV-5)
TP I.2	Pilotstudie Radarbefliegung	IGW + DLR	Möglichkeiten der Erfassung von Topographie, Rauheit und Vegetation durch multifrequente Radaraufnahmen	<b>IV-1</b> (II)
TP I.3	Wasserspiegellagen und Feststofftransport	IWK + FBTU	1D-Berechnung der bestehenden hydraulischen Verhältnisse und des Feststofftransportes	<b>III-2</b> (III-3, IV-3, IV-4)
TP I.4	Hydrologische Analyse und Datenmanagement	IWK (vormals IHW)	Beschreibung der großräumigen Abflusssdynamik durch statistische Analyse und Regionalisierung der hydrologischen Kenngrößen Verwaltung der Projektdaten in einer zentralen Datenbank Zusatzuntersuchung in 2000: Wirkung von Deichrückverlegungen auf die Abflussverhältnisse im Längsverlauf	<b>III-1, III-3, V-1, V-2</b> (III-2, III-4, III-5, IV-3, IV-4, u.a.)
TP I.5	Untergrundverhältnisse	IBF	Untergrund im Flussschlauch Elbe: Aufbau, Uferstabilität, Feinstrukturen und hydraulische Eigenschaften in der Aue	<b>II-1, II-3, IV-2</b> (IV-3)
TP I.6	Hydrologisches Feststoffbilanzmodell (HFBM)	BfG	Optimierung notwendiger Eingriffe zur dynamischen Sohlstabilisierung	<b>III-4</b> (III-1, III-2, III-5)
<b>Projekt II: Grundlagen für die Untersuchung zukünftiger Zustände und möglicher Entwicklungen</b> <i>Detailanalysen in Teilstrecken – Naturuntersuchungen – Experimentelle Labormodelle</i>				
TP II.1	Physikalische Modelle	IWK	Laboruntersuchungen zum Einfluss der Abflusssdynamik auf die Transportformen und das Transportverhalten	<b>III-5</b> (II-3, III-1, III-4, III-6)
TP II.2	Hydrologisch-morphologische Prognose	IWK (vorm.IHW)	Langzeitsimulation zur Ermittlung der Auswirkung von Maßnahmen auf die Morphodynamik	<b>III-1</b> (s. TP I.4)
TP II.3	Suspendierte Feststofffracht	BfG	Quantifizierung sohlhöhenrelevanter Feststoffkomponenten	<b>III-4</b> (s. TP I.6)
TP II.4	Grundwasserdynamik	IfH	Untersuchung der Grundwasserdynamik unter Wechselwirkung zwischen Fluss und Aue sowie des langzeitigen Wasserhaushaltes	<b>IV-3</b> (II-1, II-3, III-1, III-2, IV-4)
<b>Verbundprojektkoordination</b>				
TP S	Schnittstelle Abiotik-Biotik	IWK	Definition von abiotischen Parametern, die für die Entwicklung ökomorphologischer Leitbilder relevant sind, Begleitung der Teiluntersuchungen aus ökologischer Sicht	<b>II-1, II-2, II-3</b> (alle)
TP K	Koordination	IWK	Projektbegleitende administrative und inhaltliche Steuerung der interdisziplinären Zielsetzungen und Methoden	<b>alle</b>

\*) In dem angegebenen Kapitel sind wesentliche Ergebnisse des Teilprojekts dargestellt bzw. eingeflossen. Querverweise in Klammer bedeuten Datenaustausch, inhaltliche Abstimmung etc. zwischen den Teilprojekt-Bearbeitungen im Verbundprojekt.

## BERICHTE DES VERBUNDPROJEKTES

### Berichte des Verbundprojekts

- Verbundvorhaben „Morphodynamik der Elbe“ (1996): Verbundprojektantrag 1996. Universität Karlsruhe, BMBF-Förderkennzeichen 0339566, Karlsruhe
- Verbundvorhaben „Morphodynamik der Elbe“ (1997): Sachstandsbericht 01.08. bis 31.12.1996. Universität Karlsruhe, BMBF-Förderkennzeichen 0339566, Karlsruhe
- Verbundvorhaben „Morphodynamik der Elbe“ (1997): Zwischenbericht – Stand der Arbeiten August 1997. vorgelegt im Rahmen der Zwischenbegutachtung durch den Wissenschaftlichen Beirat ‚Elbe-Ökologie‘ des BMBF. Universität Karlsruhe, BMBF-Förderkennzeichen 0339566, Karlsruhe
- Verbundvorhaben „Morphodynamik der Elbe“ (1998): Sachstandsbericht 01.01. bis 31.12.1997 (mit Anlagen). Universität Karlsruhe, BMBF-Förderkennzeichen 0339566, Karlsruhe
- Verbundvorhaben „Morphodynamik der Elbe“ (1999): Sachstandsbericht 01.01. bis 31.12.1998. Universität Karlsruhe, BMBF-Förderkennzeichen 0339566, Karlsruhe
- Verbundvorhaben „Morphodynamik der Elbe“ (1999): Aufstockungsantrag (bis Ende 2000). Universität Karlsruhe, BMBF-Förderkennzeichen 0339566, Karlsruhe
- Verbundvorhaben „Morphodynamik der Elbe“ (2000): Sachstandsbericht 01.01. bis 31.12.1999. Universität Karlsruhe, BMBF-Förderkennzeichen 0339566, Karlsruhe
- Verbundvorhaben „Morphodynamik der Elbe“ (2001): Sachstandsbericht 01.01. bis 31.12.2000. Universität Karlsruhe, BMBF-Förderkennzeichen 0339566, Karlsruhe

### Schlussberichte der Teilprojekte (sofern nicht im vorliegenden Gesamtbericht enthalten)

*\*) als PDF-Datei in der Anlagen-CD verfügbar*

- \*) Adam, K., Meon, G., Rathke, G. (1999): Teilprojekt I.3 „1-D-Modellierung der Wasserspiegellagen und des Feststofftransports“ - Abschlußbericht der Phase bis September 1999. Universität-GH Paderborn, Abteilung Höxter, Fachbereich 8 Technischer Umweltschutz
- \*) Hajnsek, I., Ergenzinger, P., Schmullius, C. (1999): Endbericht Teilprojekt I.2 „Pilotstudie Radarbefliegung der Elbaue“. Freie Universität Berlin, Institut für Geographische Wissenschaften, Fachrichtung Physische Geographie / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Hochfrequenztechnik, Weßling
- Kiene, S., Harms, O., Nestmann, F. (1999): Abschlussbericht Teilprojekt „Schnittstelle“. Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik
- Merkel, U., Helms, M., Büchele, B., Ihringer, J. (2001): Wirksamkeit von Deichrückverlegungsmaßnahmen auf die Abflussverhältnisse entlang der Elbe. Abschlussbericht der hydrologischen Zusatzuntersuchung (Verlängerungsphase 2000). Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik
- \*) Otte-Witte, K., Meon, G., Rathke, G. (2001): Teilprojekt I.3 „1-D-Modellierung der Wasserspiegellagen und des Feststofftransports“ - Schlussbericht (der Verlängerungsphase). Universität-GH Paderborn, Abteilung Höxter, Fachbereich 8 Technischer Umweltschutz
- Saucke, U. Brauns, J. (1999): Die Untergrundverhältnisse entlang der Elbe im Hinblick auf Decklehmmächtigkeiten, Uferbeschaffenheit und Strömungsvorgänge in fluviatilen Sedimenten. Endbericht des TP I.5. Universität Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Abt. Erddamm- und Deponiebau
- \*) Sauer, W., Gözl, E., Schmidt, A. (2000): Quantifizierung sohlhöhenrelevanter Feststofftransportprozesse in der Elbe. Abschlussbericht der Teilprojekte II.3 „Suspendierte Feststofffracht“ und I.6 „Hydrologisches Feststoffbilanzmodell“. Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz/Berlin (BfG-Bericht 1307)
- Wang, Y., Nestmann, F. (1999): Schlussbericht Teilprojekt II.1 „Physikalische Modelle“. Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik

## VERÖFFENTLICHUNGEN / TAGUNGSBEITRÄGE

nach Veranstaltungen

### **7. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Budweis/Tschechische Republik, 22.-25.10.1996**

in: Prange et al. [Hrsg.] (1996): *Ökosystem Elbe – Zustand, Entwicklung und Nutzung*. 7. Magdeburger Gewässerschutzseminar. Hrsg. von VÜV TGM Prag, GKSS Forschungszentrum Geesthacht u.a.

Nestmann, F. (1996): Flußausbaumaßnahmen unter ökologischen Gesichtspunkten. 52-58

### **8. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Karlsbad/Tschechische Republik, 20.-23.10.1998**

in: Geller et al. [Hrsg. UFZ, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH] (1998): *Gewässerschutz im Einzugsgebiet der Elbe / 8. Magdeburger Gewässerschutzseminar*. Teubner Stuttgart/Leipzig, 1998

Adam, K., Meon, G., Rathke, K. (1998): Verbundvorhaben „Morphodynamik der Elbe“, Teilprojekt „1D-Berechnung der Wasserspiegellagen und des Feststofftransportes“. 383-384

Becker, R. (1998): Die Datenbank des Verbundprojektes „Morphodynamik der Elbe“. 305-310

Büchele, B., Nestmann, F. (1998): Zeitabhängige Klassifizierung von Überflutungsflächen in einem GIS am Beispiel der Mittleren Elbe bei Dessau. 305-310

Harms, O., Kiene, S., Nestmann, F. (1998): Morphologische Gewässerstrukturen der Elbe, ihre Entwicklung, ihre ökologische Bedeutung und ihre Entwicklungsmöglichkeiten. 387-388

Helms, M., Ihringer, J. (1998): Analyse von Abflußzeitreihen der Elbe. 405-406

Mohrlok, U., Jirka, G.H. (1998): Numerische Modellierung der Grundwasserdynamik im Elbtal um die Ohremündung. 365-366

Saucke, U., Rommel, J., Brauns, J. (1998): Kartierung der holozänen Sedimentation und alter Flußläufe im Mündungsbereich der Elbe in die Elbe bei Magdeburg. 393-394

### **Fachtagung Elbe – Dynamik und Interaktion in Fluß und Aue. Wittenberge, 04.-07.05.1999**

in: *Tagungsband, Zusammenstellung von Kiene, S., Harms, O., Büchele, B.* [Hrsg. Universität Karlsruhe] (1999), *Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, im Eigenverlag*

Adam, K., Meon, G., Rathke, K. (1999): Eindimensionale Strömungs- und Feststofftransport-Berechnungen der Elbe. 68-71

Adam, K., Meon, G., Rathke, K. (1999): Übersicht der 1D-Berechnungen (Wasserspiegellagen und Feststofftransport) an der Elbe. 72-73

Adam, K., Meon, G., Rathke, K. (1999): Möglichkeiten und Grenzen der 1D-Berechnungen in einem Abschnitt an der mittleren Elbe (Biosphärenreservat). 74-75

Becker, R., Ihringer, J. (1999): Die Datenbank des Verbundprojektes "Morphodynamik der Elbe". 21-23

Belz, S., Vogt, Th. (1999): Ausweisung von Feuchtezonen in der Elbaue anhand von Landsat TM Daten am Beispiel des NSG Steckby-Lödderitzer Forst. 40-43

Büchele, B., Nestmann, F. (1999): Verbundprojekt "Morphodynamik der Elbe": Gesamtkonzeption und Arbeitsstand. 11-20

Burek, P. (1999): Entwicklung eines analytischen Modells der Aquifer-Fließgewässer-Interaktion. 82-85

Dröge, B. (1999): HFBM – Ein Instrument zur Kontrolle und Steuerung des Geschiebehaushalts. 61-62

Harms, O., Kiene, S. (1999): Morphologische Gewässerstrukturen der Elbe 1776 und 1992. 97-98

Harms, O., Hinkel, J., Saucke, U. (1999): Vegetationsfreie Ufer der Elbe zwischen km 270,3 und 290,6. 99-100

Hajnssek, I., Allgeyr, S., Schullius, C., Ergenzinger, P. (1999): Landnutzungsklassifikation mit Hilfe der Radarfernerkundung am Beispiel der mittleren Unterelbe. 113-114

- Hajnsek, I., Busche, T., Schullius, C., Ergenzinger, P. (1999): Vergleich von Algorithmen zur Modellierung von hydrologischen Parametern mit Hilfe von flugzeuggetragenen Radarsensoren (ESAR). 115-116
- Helms, M., Belz, S., Ihringer, J. (1999): Analyse und Simulation von Abflußzeitreihen der Elbe. 24-39
- Kiene, S. (1999): Analyse autökologischer Ansprüche als Beitrag zum Leitbild. 101-102
- Kiene, S., Harms, O., Nestmann, F. (1999): Die Schnittstelle im Verbundprojekt "Morphodynamik der Elbe" - Vernetzung von Biotik und Abiotik. 92-96
- Mohrlok, U., Jirka, G. H. (1999): Grundwasserdynamik in den Auen des Elbetals: Aspekte der Deichrückverlegung an der Ohremündung. 76-79
- Mohrlok, U., Jirka, G. H. (1999): Numerische Modellierung der Grundwasserdynamik im Elbetal um die Ohremündung. 80-81
- Ritzert, F., Nestmann, F. (1999): Digitale Geländemodelle der Elbe. 44-47
- Ritzert, F., Nestmann, F. (1999): Entstehung eines DGM (für die Elbe). 48
- Ritzert, F., Nestmann, F. (1999): Nutzen eines digitalen Geländemodells zur Prognose biotischer Entwicklungen am Beispiel von Weich- und Hartholzauenverteilungen. 49
- Saucke, U., Rommel, J., Brauns, J. (1999): Die Geologie der Elbe. 50-54
- Saucke, U., Rommel, J., Brauns, J. (1999): Kartierung der holozänen Sedimentation und alter Flußläufe im Mündungsbereich der Ohre in die Elbe bei Magdeburg. 55-56
- Sauer, W., Schmidt, A. (1999): Ermittlung des bettbildenden Anteils des suspendierten Sandes in der Elbe. 63-65
- Sauer, W., Bungartz, H. (1999): Messung und Simulation der Verteilung des suspendierten Sandes im Elbabschnitt Mühlberg – Wittenberg (km 125 – 215). 66-67
- Saucke, U., Brauns, J. (1999): Die Bedeutung strukturierter Sedimente im Hinblick auf Strömungsvorgänge und hydraulische Untergrundstabilität. 86-89
- Saucke, U., Brauns, J. (1999): Die Dipol-Tracer-Methode zur Erkundung von Strömungsvorgängen in strukturierten Sedimenten. 90-91
- Schmidt, A., Dröge, B. (1999): Feststofftransport in der Elbe. 57-60
- Schulze, I. (1999): Diplomarbeit: Vergleichende Untersuchung der Möglichkeiten von multifrequenten E-SAR Quicklookdaten und Luftbildern zur Beschreibung von Oberflächenformen in Talauen. 117-118
- Wang, Y., Gottauf, A., Bui, M. D., Trau, M., Nestmann, F. (1999): Bewegungen von Transportkörpern an der Elbesohle. 103-112

### **Statusseminar Elbe-Ökologie, Berlin, 02.-05.11.1999**

*in: BfG [Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde] (2000): Statusseminar Elbe-Ökologie. Tagungsband, BfG-Mitteilungen Projektgruppe Elbe-Ökologie Nr. 6, Berlin*

- Becker, R., Ihringer, J. (1999): Geometrische Objekte in relationalen und objektrelationalen Datenbanken. 184-185
- Büchle, B., Nestmann, F. (1999): Verbundprojekt „Morphodynamik der Elbe“ (Stand September 1999). 25-31
- Helms, M., Belz, S., Ihringer, J. (1999): Analyse von Abflußzeitreihen der Elbe. 177-178
- Burek, P., Ihringer, J. (1999): Langzeitliche Modellierung der Wasserhaushaltsdynamik an der Elbe. 182-183
- Helms, M., Ihringer, J. (1999): Simulation von Abflußzeitreihen im Elbe-Einzugsgebiet. 179-181
- Kiene, S. (1999): Parameter im Verbundprojekt „Morphodynamik der Elbe“. 169–171
- Ritzert, F., Nestmann, F. (1999): Einfluß von verlandeten Buhnenfeldern auf die Wasserspiegelentwicklung in sieben ausgewählten Referenzabschnitten der Elbe. 175 - 176

### **BMBF-Symposium Elbeforschung, Berlin, 23.-24.10.2000**

in: Geller et al. [Hrsg. ATV-DVWK] (2000): *Gewässerlandschaften – Aquatic Landscapes. Tagungsband Teil I, BMBF-Symposium Elbeforschung. ATV-DVWK-Schriftenreihe 21, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef*

Nestmann, F., Büchele, B. (2000): Ergebnisse des Verbundvorhabens „Morphodynamik der Elbe“. 203-228

### **9. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Berlin, 25.-27.10.2000**

in: Geller et al. [Hrsg. ATV-DVWK] (2000): *Gewässerlandschaften – Aquatic Landscapes. Tagungsband Teil II, 9. Magdeburger Gewässerschutzseminar: Einzugsgebietsmanagement (River Basin Management) – Die IKSE: 10 Jahre intergriertes Management im Einzugsgebiet der Elbe. ATV-DVWK-Schriftenreihe 22, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef*

Becker, R., Ihringer, J., Nestmann, F. (2000): Der Einsatz einer objektrelationalen Datenbank zur Verwaltung raumbezogener Daten. 201-202

Büchele, B., Thiem, K. (2000): Mesoskalige Flächenverteilung von Auenbiotoptypen in Abhängigkeit abiotischer Standortfaktoren am Beispiel der Mittleren Elbe. 195-196

Burek, P., Ihringer, J. (2000): Langzeitliche Modellierung der Wasserhaushaltsdynamik an der Elbe. 199-200

Helms, M., Ihringer, J. (2000): Stochastische Simulation von Abflusszeitreihen der Elbe. 197 – 198

Ihringer, J., Helms, M., Merkel, U. (2000): Wirksamkeit von Deichrückverlegungsmaßnahmen auf die Abflussverhältnisse entlang der Elbe. 189-192

Nestmann, F., Büchele, B., Kiene, S. (2000): Erfasstes Parametersystem im Verbundvorhaben „Morphodynamik der Elbe“. 193 – 194

### **European Conference on Advances in Flood Research, Potsdam, 01.-03.11.2000**

in: Bronstert, A., Bismuth, C., Menzel, L. [Eds.] (2000): *European Conference on Advances in Flood Research. Proceedings Vol. 1 and Vol. 2, Potsdam Institute for Climate Impact Research, PIK-Report No. 65, Potsdam*

Helms, M., Ihringer, J., Merkel, U., Büchele, B. (2000): Assessment of the impact of diking measures on the flow situation along the Elbe river. 696-708

Helms, M., Ihringer, J. (2000): Stochastic simulation of daily streamflow series in the Elbe basin. (on CD)

### **EGS (European Geophysical Society) - 26th General Assembly, Nice/France, 20.-25.03.2001**

in: *European Geophysical Society (2001): Geophysical Research Abstracts (on CD), ISSN 1029-7006*

Büchele, B., Träbing, K. (2001): Estimation of the potential natural morphological state of a lowland stream channel (sand-like behaviour, Example: Elbe) using historical informations.

Burek, B. (2001): Assessment on the impact of dike shifting on groundwater dynamics in an Elbe river wetland.

Ihringer, J., Helms, M., Merkel, U., Büchele, B. (2001): Efficiency of potential dike-shifting measures on the flow situation along the Elbe river.

Helms, M. (2001): Analysis and Simulation of the Flow Process of the Elbe River.

### **Weitere Veröffentlichungen**

Büchele, B., Sauer, W. (2000): Morphologie: Erste Ergebnisse zum Feststofftransport der Elbe. In: Die Elbe und ihre Nebenflüsse. Belastung, Trends, Bewertung, Perspektiven. Bearb.: Prange et al. Hennef: GfA 2000. (ATV-DVWK «Schadstoffe und Ökologie der Elbe»), Kap. 4.3, 107 – 109

Büchele, B. (2000): Ökologische Aspekte. In: Die Elbe und ihre Nebenflüsse. Belastung, Trends, Bewertung, Perspektiven. Bearb.: Prange et al. Hennef: GfA 2000. (ATV-DVWK «Schadstoffe und Ökologie der Elbe»), Kap. 4.5.7, 138 - 142

- Büchle, B. (2000): Untersuchungen zur Morphologie und zum Feststofftransport. In: Die Elbe und ihre Nebenflüsse. Belastung, Trends, Bewertung, Perspektiven. Bearb.: Prange et al. Hennef: GfA 2000. (ATV-DVWK «Schadstoffe und Ökologie der Elbe»), Kap. 3.6, 39 - 41
- Bui, M. D., Nestmann, F. (2000): Numerical modelling of sediment waves in an experimental channel. In: , Y. Goda et al. [Eds.] (2000): Hydrodynamics IV, Proc of the 4th Int. Conf. On Hydrodynamics, Yokohama, Japan, 899 - 904
- Hajnsek I., Ergenzinger P., Schmullius C. (1998): Flood-Plain Mapping of the River Elbe with Multi-Frequency and Multi-Polarisation Airborne-Radar Data. Proceedings IGARSS, Seattle, 1998.
- Hajnsek I., Busche T., Schmullius C., Ergenzinger P. (1999): Determination of Hydrological Parameters Using Airborne-Radar Data (DLR E-SAR). Proceedings IGARSS, Hamburg, Vol. II, 1108-1110
- Hajnsek I., Papathanassiou K. P., Reigber A., Cloude S. (1999): Soil-Moisture Estimation Using Polarimetric SAR Data. Proceedings IGARSS, Hamburg, Vol. V, 2440-2442
- Helms, M., Ihringer, J. (2001): Analysis and simulation of the flow process of the Elbe river. In: Hydrological Challenges in Transboundary Water Resources Management; Intern. Conf. Koblenz/Germany 25-27.9.2001, Hrsg. Deutsches Nationalkomitee für das Internationale Hydrologische Programm (IHP) der UNESCO und das Operationelle Hydrologische Programm (OHP) der WMO in der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), IHP/OHP-Berichte Sonderheft 12, ISSN 0177-9915, Koblenz 2001
- Helms, M., Büchle, B., Merkel, U., Ihringer, J. (2001): Statistical analysis of the flood situation and assessment of the impact of diking measures along of the Elbe (Labe) river. Hydrology and Earth System Sciences – EGS Journal (ISSN 1027-5606), in Vorbereitung (Review)
- Kämpf, C., Büchle, B. (2000): River basin management - a transdisciplinary approach experiences of transdisciplinarity in present research and plans to establish transdisciplinarity in a graduate programme. In: Haeberli et al. [Eds.] (2000): Transdisciplinarity: Joint Problem-Solving among Science, Technology and Society, Proc. of the Int. Transdisciplinarity 2000 Conference, Zürich, Switzerland, Feb.27 - March 1, 2000. Workbook I: Dialogue Sessions and Idea Market, Haffmans, 467 – 471
- Mohrlok, U., Eberhardt, E., Jirka, G. H. (2000): Modelling groundwater recharge from intermittent flooded areas by calibration of time dependent leakage parameters. In: F. Stauffer, W. Kinzelbach, K. Kovar, E. Hoehn, Calibration and reliability in groundwater modelling - coping with uncertainty, IAHS publication no. 265, Wallingford, UK, 509-514.
- Nestmann, F., Buck, W., Kämpf, C., Oberle, P., Theobald, S., Ihringer, J., Helms, M, Büchle, B. (2000): Environmental Management Methodology to Support Sustainable River Basin Development – Features of a Goal-Oriented Decision-Support System (DSS). International Workshop „Decision Support Systems“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), BfG-Veranstaltungen 4/2000, Koblenz/Germany

### **Diplom- und Studienarbeiten** (*unveröffentlicht, angefertigt im Projektkontext*)

- Allgyer, S. (1999): Vegetations- und Landnutzungsklassifikation mit Hilfe eines multifrequenten, multipolarisierten E-SAR Datensatzes am Beispiel der unteren Mittelbe. Diplomarbeit, Institut für Physische Geographie, Universität Erlangen
- Busche, T. (1999): Bestimmung von Oberflächenparametern aus ESAR Daten am Beispiel unbedeckter Felder im Bereich der Unteren Mittelbe-Niederung. Diplomarbeit, Institut für Geographie, Universität Göttingen
- Dunker, W. (1997): Bestimmung von Transportformem und Transportraten an feinsandigen Gewässersohlen anhand von Modellversuchen. Diplomarbeit, Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe
- Frist, M. (1999): Instationäre Berechnungen der Grundwasserströmung im Elbetal infolge von Hochwasserereignissen. Vertieferarbeit, Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe
- Haberer, M. (1998): Berechnung zeitabhängiger Überflutungsflächen für einen ausgewählten Flußabschnitt der Elbe. Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe



- Hack, A. (1998): Untersuchung einer Deichrückverlegung an der Elbe zwischen der Havelmündung (Elbe-km 438) und Gorleben (Elbe-km 495) mit Hilfe eines eindimensionalen hydronumerischen Feststofftransportmodells. Diplomarbeit an der Universität-GH Paderborn, Abteilung Höxter, Fachbereich 8 – Technischer Umweltschutz. Angefertigt an der Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Berlin
- Heilig, J. (2000): Auswirkungen der Eindeichungen im 20.ten Jahrhundert auf die Hochwasserkennwerte im Bereich der Unteren Mittelbe. Vertieferarbeit, Inst. für Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe
- Henneboel, S. (1999): GIS-gestützte Ermittlung von Überflutungsflächen am Beispiel der Mittleren Elbe. Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe
- Hinkel, J. (1999): Die Ermittlung vegetationsfreier Flächen entlang der Elbeufer aus Luftbildern und ihre Korrelation mit der Flußgeometrie und dem Uferverbau. Diplomarbeit im Studienfach Geoökologie, Universität Karlsruhe
- Hüsener, T. (1998): Hydraulisch-sedimentologische Untersuchung einer linksseitigen Elbedeichrückverlegung unterhalb von Aken. Diplomarbeit, Universität-GH Paderborn, Abteilung Höxter, FB Techn. Umweltschutz
- Kumer, D. (1998): Bestimmung der hydraulischen Parameter natürlicher Bodenproben in einem Versuchsstand mit automatischer Messwerterfassung zur Ermittlung der ungesättigten Sickerströmung an einem Bodenprofil. Vertieferarbeit, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe
- Möber, C. (2001): Auswirkungen von Deichrückverlegungsmaßnahmen auf die Grundwasserdynamik im Vorlandbereich an der Mittelbe in Sachsen-Anhalt. Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe
- Otte-Witte, K. (1998): Untersuchung einer Deichrückverlegung an der mittleren Elbe mit Hilfe eines eindimensionalen hydronumerischen Strömungs- und Feststofftransportmodells. Diplomarbeit, Universität-GH Paderborn, Abteilung Höxter, Fachbereich 8 – Technischer Umweltschutz
- Pfefferle, A. (1997): Interpolation von Querprofilaufnahmen zur Erzeugung digitaler Geländemodelle. Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe
- Pfisterer, J. (1998): Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Randbedingungen auf die Grundwasserströmung im Elbtal mit Hilfe numerischer Modellierung. Diplomarbeit, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe
- Preuß, P. (2001): Entwicklung eines Informationssystems mit GIS- und Datenbank-Anbindung zur Visualisierung hydrologisch-hydraulisch-morphologischer Sachdaten der Elbe. Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe
- Rommel, J., (1998): Geologie des Elbetales nördlich von Magdeburg. Diplomarbeit, Geologisches Institut der Universität Karlsruhe
- Schulze, I. (1998): Auswertung von multifrequenter Echtzeit-prozessierter ESAR Daten am Beispiel zweier Testgebiete an der Elbe. Diplomarbeit, Fachbereich Geographische Wissenschaften, Freie Universität Berlin
- Subke, G. (1999): Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit in strukturierten Sedimenten. Vertieferarbeit, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Abt. Erddamm- und Deponiebau, Universität Karlsruhe
- Thiem, K. (1999): Darstellung des Zusammenhangs zwischen Überflutung und natürlicher Biotopentwicklung in Auen – Untersuchung der Korrelation am Beispiel des Biosphärenreservats Mittlere Elbe. Diplomarbeit, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Landschaftslehre der Technischen Universität (TU) Dresden
- Thorkelsdottir, H. K. (1997): Auswirkungen ausgewählter wasserbaulicher Maßnahmen auf die abiotischen Parameter der Elbe. Vertieferarbeit, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe
- Trau, M. (1999): Analyse und Vergleich von Sohlformationen (Transportkörper) der Unteren Mittelbe unter Berücksichtigung der hydrologischen Vorgeschichte. Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe

## EXTERNE KOOPERATION / ELBE-ÖKOLOGIE-FORSCHUNG

### Teilnahme an projektübergreifenden Treffen im BMBF-Forschungsprogramm

<i>Datum</i>	<i>Thema des Treffens, Ort</i>
21./22.07.1997	Koordinationsstreffen Elbe-Ökologie, Lenzen (Naturpark Elbtalau)
15.09.1997	„Buhnen- und Fischökologie“, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Außenstelle Berlin
25./26.09.1997	„Auenökologie und -hydrologie“, BfG Berlin
20./21.11.1997	„Landschaftswasser- und -stoffhaushalt im Elbe-Einzugsgebiet“, BfG Berlin
16./18.02.1998	„Leitbildentwicklung und Bioindikation in der Elbe-Ökologie“, BfG Berlin
26./27.02.1998	„Grundwasser“, im Bayr. Landesamt f. Wasserwirtschaft, München
23./24.06.1998	„ELISE - Informationssystem für die Elbe-Ökologie“, Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB) Karlsruhe
23./24.07.1998	Koordinationsstreffen Forschungsverbund Elbe-Ökologie, BfG Berlin
23./24.11.1998	Projekte im Bereich "Ökologie der Fließgewässer", BfG Berlin
14./15.12.1998	„Nutzungs- und Entwicklungskonzepte für Auen“, Lenzen (Naturpark Elbtalau)
29./30.03.1999	„Biologische Fragestellungen und Bioindikation“, Umweltforschungszentrum (UFZ) Leipzig
14./15.10.1999	„GIS/Datenverwaltung“, BfG Berlin
16.03.2000	„Ökomorphologie und Stoffdynamik im Fließgewässer“, BfG Berlin
07.09.2000	Präsentation/Diskussion der Machbarkeitsstudie zum Aufbau eines computergestützten Entscheidungsunterstützungssystems (Decision Support System - DSS) für die Elbe, BfG Koblenz
13.09.2000	Arbeitskreis Elbe-Ökologie-Kompodium, Band „Struktur und Dynamik des Flusslaufs und deren Beeinflussung durch wasserbauliche Maßnahmen“, Staatliches Amt für Umweltschutz (StAU) Magdeburg
08.05.2001	Arbeitskreis Elbe-Ökologie-Kompodium, Band „Struktur und Dynamik des Flusslaufs und deren Beeinflussung durch wasserbauliche Maßnahmen“, StAU Magdeburg

### Abstimmungsgespräche des Projekts mit Behörden und möglichen „Nutzern“ der Ergebnisse

- projektbegleitend: BfG / Projektgruppe Elbe-Ökologie
- 23.11.1999, BfG Berlin: Thema „Hydrologische Daten – Arbeitsergebnisse und mögliche Korrekturen“ mit Vertretern der WSV, unter Koordination der BfG
- 26.01.2000, IKSE Magdeburg: Thema „Deichrückverlegungen entlang der Elbe“ mit Vertretern der IKSE und der Länder Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Niedersachsen sowie weiteren Experten (BAW u.a.)
- 2000: BfG/Projektgruppe Elbe-Ökologie und Universität Twente/NL (Prof. Wind): „Verfügbare Daten und Modelle des Projekts als Grundlage für den Aufbau eines Decision Support Systems (DSS) für die Elbe“
- 31.01.2000, BAW Karlsruhe: Thema „Hydraulische Berechnungen und mögliche Nachnutzung der Projektergebnisse“ mit Vertretern der BAW
- 27.09.2000, IKSE Magdeburg: Thema „Deichrückverlegungen entlang der Elbe“ mit Vertretern der IKSE und der Länder Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Niedersachsen sowie weiteren Experten (BAW u.a.)
- 05.12.2000, BAW / Uni Karlsruhe: „Abstimmung bezgl. Übernahme der Projektergebnisse durch die BAW“

**Kontakte zu Projekten des Forschungsverbunds „Elbe-Ökologie“ (Kurzbezeichnung)**

*Abstimmungen und Informationsaustausch auf Treffen, Zusendung von Berichten o.ä.*

*\*) mit Datenaustausch, Weiterverwendung von Projektergebnissen o.ä.*

- Vorlandbereiche und Strömungsdynamik (Bundesanstalt für Wasserbau) \*
- Auenregeneration und Deichrückverlegung (Landesanstalt für Großschutzgebiete Brandenburg) \*
- Bühnen und semiterrestrische Flächen (Technische Universität Darmstadt)
- Ökologie der Elbe-Fische (Universität Hamburg) \*
- Retentionsflächenrückgewinnung (Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt) \*
- Naturschutz und Landwirtschaft (Alfred Töpfer Akademie für Naturschutz) \*
- Elbe-Ökologie-Informationssystem ELISE (Bundesanstalt für Gewässerkunde) \*
- Naturräumliche Klassifizierung des Elbe-Einzugsgebiets (Forschungszentrum Jülich) \*
- Auswirkung der Landnutzung auf den Wasser- und Stoffhaushalt der Elbe und ihres Einzugsgebietes (Potsdam Institut für Klimafolgenforschung) \*
- Monetäre Bewertung einer nachhaltigen Entwicklung der Stromlandschaft Elbe (Technische Universität Berlin) \*
- Wasser- und Stoffhaushalt im Festgestein (Universität Dresden)
- Bioindikationssystem für Auen / RIVA (Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle)
- u.a.

## WICHTIGE ABKÜRZUNGEN

### *Institutionen*

ARGE Elbe	Arbeitsgemeinschaft zur Reinhaltung der Elbe
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz-Berlin
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin (zum Zeitpunkt der Projektbewilligung 1996: Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Bonn)
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
GLA	Geologisches Landesamt
IKSE	Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
LAU	Landesamt für Umweltschutz
LVA, LVÄ	Landesvermessungsamt (-ämter)
StAU	Staatliches Amt für Umweltschutz
WSD Ost	Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost
WSA, WSÄ	Wasser- und Schifffahrtsamt (-ämter)
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

### *Allgemeine Abkürzungen und Symbole*

DGM, DHM	Digitales Geländemodell, Höhenmodell
GIS	Geoinformationssystem
GW	Grundwasser
HH..	Gewässerkundliche Hauptwerte: oberster Grenzwert gleichartiger Zeitspannen (Definition: DIN 4049)
HK	Hydrogeologische Karte
MN.., M.., MH..	Gewässerkundliche Hauptwerte: arithmetische Mittelwerte gleichartiger Zeitspannen (Definition: DIN 4049)
NN..	Gewässerkundliche Hauptwerte: unterster Grenzwert gleichartiger Zeitspannen (Definition: DIN 4049)
TK	Topographische Karte (z.B. TK 10 : im Maßstab 1:10.000)
TP	Teilprojekt
Q	Abfluss
W	Wasserstand

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN ISBN 3-00-008977-2	2. Berichtsart Schlussbericht
3a. Titel des Berichts „MORPHODYNAMIK DER ELBE“ Schlussbericht des BMBF-Verbundprojektes mit Einzelbeiträgen der Partner und Anlagen-CD	
3b. Titel der Publikation siehe 3a. Titel der Einzelbeiträge (Kapitel + Autoren) im Schlussbericht	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Nestmann, Franz; Büchele, Bruno (Hrsg.) Liste der Autoren/Bearbeiter im Bericht	5. Abschlussdatum des Vorhabens März 2001
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) siehe 4a.	6. Veröffentlichungsdatum Januar 2002
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Federführung / Koordination des Verbundprojekts: Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK) Universität Karlsruhe (TH), 76128 Karlsruhe  Verbundprojektpartner: - Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe (TH) - Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe (TH) - Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz-Berlin - Universität-GH Paderborn/ Abteilung Höxter, FB Technischer Umweltschutz - Freie Universität Berlin, Institut für Geographische Wissenschaften + Institut für Hochfrequenztechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Weßling	7. Form der Publikation Eigenverlag IWK
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  53170 Bonn	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 0339566
	11a. Seitenzahl Bericht 468
	11b. Seitenzahl Publikation 468
	12. Literaturangaben 333
	14. Tabellen 61
	15. Abbildungen 357
16. Zusätzliche Angaben digitaler Datenträger (CD-Rom) in der Anlage des Berichts enthält Ergebnisdatensätze des Vorhabens	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung <p>Die quantitative Beschreibung der abiotischen Umweltrandbedingungen in der Stromlandschaft Elbe, insbesondere der Hydrologie und Morphologie mit ihren naturräumlich variablen Ausprägungen im Gewässerlängsschnitt, bildet die Grundvoraussetzung für das Verständnis und die Bewertung der ökologischen Funktionen im System (Fluss-Ufer-Aue) und der ökonomischen Nutzungen (Schifffahrt, Besiedlung, Landwirtschaft etc.). Angesichts der konkurrierenden Anforderungen an den Naturraum und dessen künftige Entwicklung sind gegebenenfalls Maßnahmen erforderlich, deren langfristige Auswirkungen auf andere Zielbereiche untersucht und bewertet werden müssen. Insbesondere die Frage der morphologischen Entwicklung (Tiefenerosion der Flusssohle in Gewässerabschnitten, Gestalt der Uferstrukturen, Ausdehnung und Nutzung der Überflutungsbereiche etc.) ist sowohl ökologisch als auch ökonomisch von größtem Interesse und Gegenstand künftiger (interdisziplinärer) Entscheidungen.</p> <p>In diesem Kontext wurden im Verbundprojekt umfangreiche Grundlagen (Daten, Simulationsmodelle etc.) erarbeitet, die den Ist-Zustand der Elbe im Sinne einer Gesamtbetrachtung des Systems (568 km deutsche Fließstrecke) beschreiben. Im Ergebnis beinhaltet dies die großräumig und langfristig orientierte Erfassung und Analyse der maßgeblichen Einflussgrößen, Prozesse und Wechselwirkungen der Morphologie, des Abflussgeschehens, der Strömung und des Feststofftransports im Fließgewässer sowie des Grundwassers in der Aue. Durch die Definition der abiotischen Randbedingungen im Ist-Zustand und die Ableitung einer potentiell natürlichen Querschnittsform in unterschiedlichen Gewässerabschnitten wird die Grundlage für die Beschreibung ökologischer Leitbilder für große Fließgewässer gelegt. Wichtige Ergebnisdatensätze des Projekts sind dem Bericht in digitaler Form auf einer CD-Rom beigelegt, das ein Informationssystem (Software) mit Datenbank- und GIS-Funktionalitäten enthält. Anhand des erarbeiteten Gesamt-Instrumentariums (bestehend aus verschiedenen hydrologischen, hydraulischen und morphologischen Berechnungsmodellen, Geoinformationssystem, Datenbank etc. einschließlich der vollständigen Sachdatenbestände, basierend auf den projekteigenen Arbeiten sowie den einbezogenen Datengrundlagen, vor allem von Behörden) lassen sich die natürlichen Zusammenhänge sowie mögliche Szenarien (Maßnahmenwirkungen, z.B. bei Deichrückverlegungen) quantifizieren, darstellen und bewerten. Die Projektarbeiten liefern damit grundlegende Beiträge für künftige Untersuchungen an der Elbe im Interessenbereich der Bundes- und Landesbehörden sowie der Wissenschaft (speziell der „Elbe-Ökologie“-Forschung).</p>	
19. Schlagwörter Elbe ; Ökologie ; Fließgewässer ; Morphodynamik ; Hydrologie ; Abflussprozesse ; Hydraulik ; numerische Modellierung ; Gewässermorphologie; Feststofftransport ; Transportprozesse ; Grundwasserdynamik ; Deichrückverlegung ; GIS ; Datenbank	
20. Verlag Eigenverlag IWK	21. Preis auf Anfrage

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN ISBN 3-00-008977-2	2. Type of Report Final report
3a. Report Title „MORPHODYNAMICS OF THE RIVER ELBE“ Final report on the BMBF-funded Joint Research Project incl. contributions of all partners and annexes on CD-Rom	
3b. Title of Publication see 3a. Title of individual contributions see report	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Nestmann, Franz; Buechele, Bruno (Eds.) list of authors/participants see report	5. End of Project March 2001
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) see 4a.	6. Publication Date January 2002
8. Performing Organization(s) (Name, Address)  Responsible for the Joint Project / Management: Institute for Water Resources Management, Hydraulic and Rural Engineering (IWK) University of Karlsruhe (TH), 76128 Karlsruhe, Germany  Collaborating partners: - Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe (TH) - Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe (TH) - Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz-Berlin - Universität-GH Paderborn/ Abteilung Höxter, FB Technischer Umweltschutz - Freie Universität Berlin, Institut für Geographische Wissenschaften + Institut für Hochfrequenztechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Weßling	7. Form of Publication (Institutes Report)
13. Sponsoring Agency (Name, Address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  53170 Bonn	9. Originator's Report No.  10. Reference No. 0339566  11a. No. of Pages Report 468  11b. No. of Pages Publication 468  12. No. of References 333  14. No. of Tables 61  15. No. of Figures 357
16. Supplementary Notes Annexe CD-Rom is containing digital data (information system, project results)	
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract  The major objective of the joint research project "Morphodynamics of the river Elbe" is the quantitative description of the main abiotic parameters and processes in the river along its course of approx. 600 km on German territory, including the floodplain areas. The assessment and analysis of the status quo situation of the river conditions in an overall view - focussing on the areas of morphology, hydrology, hydraulics and groundwater dynamics - is a fundamental precondition for the understanding and the evaluation of ecological and economical river functions (shipping, settlements, agriculture, wetlands etc.). A sustainable regional development needs instruments (e.g., simulation models) to quantify scenarios and support interdisciplinary decisions (e.g., long-term effects of natural processes like bed erosion and/or measures for shipping, flood protection, nature protection etc.).  In this context, the different activities in sub-projects concentrated on the assessment and systematic analysis of extensive data sets (e.g., hydrological time series, hydraulic conditions, sediment transport measurements etc. - using existing data material provided by authorities) and the (further) development and interdisciplinary application of numerical models. Examples are among others: calculation of hydraulic parameters along 507 km for longitudinal sections of hydrological flow parameters, flood routing along the Elbe course with simulation of historical and/or potential retention areas, analyses of sediment transport data at 28 measurements points, numerical modeling of groundwater dynamics in areas of planed dike shifting measures. The results of all activities were integrated in a central information system, which consists of a relational database and geographical information system (GIS). By the definition of the present abiotic conditions along the river and the determination of its natural profile shape at the scale of river reaches with different morphological situations (based on the historical width-depth-ratio before river regulation), it is possible to contribute basics for the quantitative description of the potential natural state of the ecosystem. The elaborated instruments (simulation models, database, GIS etc.) can be used in further investigations by the authorities and research projects for the quantification, visualization and evaluation of scenarios. The annexe of the final report is consisting of a CD-Rom, including the most important digital data sets and graphics, which were integrated in an self-developed independent information tool (software) with GIS- and database-funcionalities.	
19. Keywords Elbe ; ecology ; river system ; morphodynamics ; hydrology ; flow process ; hydraulics ; numerical model ; river morphology ; sediment transport ; transport processes ; ground water dynamics ; dike shifting ; GIS ; database	
20. Publisher IWK (Originator)	21. Price on request