

# **Regelung und Steuerung von überlagerten Hochwasserereignissen am Beispiel der Elbe**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTOR-INGENIEURS**

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

**DISSERTATION**

von

Dipl.-Ing. Robert Mikovec

aus Most (Tschechien)

Tag der mündlichen

Prüfung: 28.12.2014

Referent: Univ.-Prof. Dr. -Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann, Ordinarius

Korreferent: Prof. Dr. Günter Meon

Karlsruhe 2014

# **Regelung und Steuerung von überlagerten Hochwasserereignissen am Beispiel der Elbe**

**Robert Mikovec**

## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen aus der Literatur verwendet habe.

In Thaur, den 21.1.2015

Robert Mikovec

## Danksagung

Bei vielen Menschen möchte ich mich für ihre Hilfe bei der Erstellung dieser Dissertation herzlich bedanken. Diese Arbeit konnte mit der finanziellen Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Graduiertenprogramms „Naturkatastrophen“ sowie mit der Unterstützung des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie ausgearbeitet werden, dafür bedanke ich mich. Ein besonderes Wort des Dankes möchte ich an meine Betreuer Herrn Jürgen Ihringer und Herrn Franz Nestmann richten. Ich bedanke mich bei Herrn Günter Meon als Korreferent. Für fachliche Diskussionen und Ideen möchte ich mich besonders bei meinen ehemaligen Kollegen vom IWG, nämlich bei Herrn Martin Helms, bei Herrn Bruno Büchele und bei Herrn Hans Helmut Bernhard bedanken. Meinen großen Dank für die Motivation auf dem langen Weg zur Erlangung der anerkannten Dissertation möchte ich Frau Jutta Szabadics, Frau Raziye Fiden, Frau Karin Krix, Frau Maria Rieger, Frau Veronika Weithallerová, Herrn Patrick Preuss, Herrn Johannes Höfer und Herrn Thorsten Ulbrich ausdrücken. Für die sprachlichen Korrekturen bedanke ich mich herzlich bei Claudia Leder, Eva Weizmann, Antje Thomas, Patrick Preuss, Thorsten Ulbrich, Doris Zoidl, Gertraud Krieger, Kristina Wiedenhofer-Petak und Eric Heinrichs.

## Abstract

Reservoirs and detention basins are widely used as a functional part of flood protection measures to reduce the peak flow during flood events. The goal of this thesis is to show a possibility to managing of extreme superimposed flood events (return period 100 years and more) in situation, when all protection measures have been already used. For that, the Elbe River was chosen as a reference example to investigate damping effects of such retention measures on extreme large-scale flood events. The Elbe River basin was selected, because it was affected in August 2002 by an extreme flood event and because of an excellent observed data as well as historical documentation of floods. The city of Dessau on the confluence of Elbe and Mulde Rivers was selected to be protected by the planned polders. It can be affected by superposition of both floods. Three controlled polder areas were analysed upstream from Dessau on the Elbe River with a total storage of 138 million m<sup>3</sup>. To investigate the damping effects of those polders on the peak flow of the flood event from August 2002 hydrologic flood-routing model coupled with storage module was used. This investigation reveals that a peak flow reduction is possible from 30 to 50 cm depending on flood event, forecast and controlling strategy. Only one flood event is not sufficient to get a possible variability of future extreme event. For this reason, historical events and different scenarios were also used with the polders. In all cases simulations of known process in the next future were carried out. But in real situation the next future of such extreme floods is known only limited. Within the scope of the thesis the operation of the polders was investigated to achieve the optimal peak reduction. So an investigation of effectiveness of polders on peak flow was analysed under the uncertain conditions of the forecast. It requires a quality assessment of official forecast data from the last extreme flood event. The quality of forecast is decisive for the in time controlling of the polders. The control concept of polder filling was developed basing on forecast as well as the uncertainty of the operational assessed observed flow data. The forecasted flood hydrograph is transformed using the routing model from upstream gauging station Ústí nad Labem to downstream gauging station Torgau (about 200 km river reach) to estimate the flow value, from which the polders start to fill by flood peak volume during an extreme situation. It was shown that the decision has to be done during only few hours (max three) to achieve an optimal effectiveness of peak reduction. This investigation was carried out independent on the situation on the Mulde River. As mentioned above, the city of Dessau is located on the confluence of both rivers. So the forecast and flood situation of the smaller Mulde River has to be taken in account to develop a control concept of polder operation on the Elbe River. For that, flood event superposition of both rivers was researched basing on historical data series 1890 - 2006. It can be assumed that a superposition of flood events is probably and the peak flows of Mulde River can arrive only 2 to 3 days before the Elbe River peak flows. In these situations the flow of Elbe River has to be reduced earlier to avoid a flow increase in the confluence area in Dessau. The flood event of Mulde River can flow to the reduced Elbe River without essential aggravation of the flood situation in Dessau. In conclusion, hydrologic-hydraulic coupling of approaches were indicated for the flood event from August 2002 as an example. It can be concluded that flood retention measures and their controlling depending on the forecast can be a part of functional protection measures to reduce the risk along large rivers. These presented methods are applicable also along other rivers taking in to account specific flow behaviour and forecast system.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung - die Bewältigung der Extremereignisse .....	2
1.2	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit .....	3
1.3	Fallbeispiele von anderen Einzugsgebieten .....	7
1.3.1	Mississippi in den USA .....	7
1.3.2	Indus in Pakistan .....	8
1.3.3	Roter Fluss (Song Hong) in Vietnam .....	9
1.3.4	Fluss Chao Phraya in Thailand .....	10
1.3.5	Große Flüsse in Mitteleuropa .....	12
1.3.6	Zusammenfassung zu den Retentionsmaßnahmen .....	13
<b>2</b>	<b>Grundlagen – Begriffe, Beschreibung des Einzugsgebiets, Daten und Datenanalysen .....</b>	<b>14</b>
2.1	Der Begriff Notpolder – Erklärung .....	14
2.2	Grundinformationen über das Einzugsgebiet der Elbe .....	14
2.3	Stand des Wissens im Elbeeinzugsgebiet im Hinblick auf das internationale Hochwassermanagement .....	17
2.3.1	Wetter- und Abflussvorhersage .....	17
2.3.2	Internationale Vorhersage im Elbegebiet .....	18
2.3.3	Beiträge zur Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen .....	19
2.4	Hochwasserschutzmaßnahmen mittels der steuerbaren Rückhalteräume und der natürlichen Retention .....	21
2.5	Daten, Arbeitsgrundlagen und Datenanalysen .....	23
2.5.1	Hydrologische Daten – Zeitreihen .....	23
2.5.2	Andere hydrologische Daten .....	28
2.5.3	Raumbezogene Daten und Karten .....	28
2.5.4	Daten und Informationen zu den Talsperren und Deichen .....	29
2.5.5	Daten und Informationen von anderen Projektergebnissen .....	29
2.6	Datenüberprüfung, Konsistenzanalyse und Datenergänzung .....	30
2.7	Statistische Untersuchung zur langfristigen Abflussänderungen .....	33

2.7.1	Ermittlung der statistischen Kennwerte.....	33
2.7.2	Mittlere MQ und maximale HQ Jahresabflüsse, Gruppierungseffekte .....	33
2.7.3	Trendanalyse der mittleren (MQ) und der maximalen (HQ) Jahresabflüsse .....	34
2.7.4	Untersuchung der HQ mittels der Doppelsummenanalyse .....	36
<b>3</b>	<b>Angewendete Modelle.....</b>	<b>38</b>
3.1	Modellauswahl.....	38
3.2	Beschreibung des Translations-Diffusions-Modells.....	39
3.3	Angewendete Modelle und Verfahren für die operationelle Abflussvorhersage und für die Szenariensimulationen.....	43
3.3.1	Niederschlag-Abflussmodellierung im tschechischen Einzugsgebiet der Elbe .....	44
3.3.2	Niederschlag-Abflussmodellierung im deutschen Teileinzugsgebiet der Elbe .....	54
<b>4</b>	<b>Großskalige hydrologische Untersuchung von Ereignissen .....</b>	<b>56</b>
4.1	Gekoppelte Abflusssimulation in Bezug auf die Planung der Notpolder.....	56
4.2	Parameteroptimierung und –Ermittlung .....	57
4.3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen von der Parameterermittlung .....	60
4.4	Untersuchung von Ereignissen .....	62
4.5	Ereignisauswahl .....	63
4.6	Untersuchung der möglichen Ereignisüberlagerung .....	65
4.6.1	Untersuchung zur möglichen Hochwasserüberlagerung Elbe – Moldau .....	69
4.6.2	Hochwasserüberlagerung der Elbe und der Mulde .....	71
4.7	Ergänzung der Zeitreihen.....	76
4.8	Hochwasserereignis vom August 2002 im Elbeeinzugsgebiet.....	77
4.8.1	Meteorologische Situation .....	77
4.8.2	Hydrologische Situation und Auswirkung im Einzugsgebiet .....	78
4.8.3	Deichbrüche- und Retentionswirkungen während des HWE 2002.....	80
4.8.4	Wirkung auf den Hochwasserverlauf und Modellanpassung.....	85
4.9	Winterhochwasserereignis 2006 .....	88
4.10	Anpassung der jährlichen Abflusswerte in Dresden an den heutigen Zustand – mit Talsperreneffekten – „Update“.....	89
4.10.1	Einleitung, Problemstellung .....	89
4.10.2	Ergebnisse der Talsperrenstudie .....	91
4.10.3	Anpassung und Verfahren in Děčín .....	91

4.10.4	Anpassung und Verfahren in Dresden.....	94
4.10.5	Schlussfolgerungen.....	95
<b>5</b>	<b>Untersuchung der Notpolder in Sachsen-Anhalt .....</b>	<b>97</b>
5.1	Auswahl von den möglichen Notpolderflächen.....	97
5.2	Lokale Standortbetrachtung und Ermittlung der Speicherinhaltslinien .....	99
5.3	Die Auswahl der Varianten der Notpolder .....	105
5.4	Angewandtes Model zur Untersuchung der Retentionsmaßnahmen .....	105
5.5	Notpolderwirksamkeit und die untersuchten Ereignisse .....	106
5.6	Die Schlussfolgerungen zur optimalen Wirksamkeit der Notpolder .....	110
5.7	Die Kriterien der verlässlichen Funktionsfähigkeit der künftigen Notpolder .....	110
<b>6</b>	<b>Anwendung der Szenarien im Hinblick auf die</b>	
	<b>Notpolderuntersuchung.....</b>	<b>112</b>
6.1	Historische und gegenwärtige Hochwasserereignisse .....	113
6.2	Szenarien aus simulierten Niederschlägen .....	115
6.2.1	Niederschlagssimulation durch das meteorologische Modell COSMO-LM .....	116
6.2.2	Die Anwendung der meteorologischen Szenarien bei der Abflussmodellierung.....	120
6.2.3	Ergebnisse der großskaligen Niederschlag-Abfluss-Modellierung der Niederschlagsszenarien von COSMO-LM .....	121
6.3	Aus der Kombination von Eingangsparametern und Gebietszustand abgeleitete Szenarien 124	
6.4	Szenarien aus stochastischer Simulation.....	129
6.5	Zusammenfassung der Anwendung der Szenarien im Hinblick auf die Notpolderuntersuchung .....	130
6.6	Überlagerung der RIMAX Szenarien der Elbe und Mulde.....	133
<b>7</b>	<b>Operationeller Betrieb - Steuerungsstrategie .....</b>	<b>136</b>
7.1	Steuerungsstrategie mit Einbeziehung der Mulde .....	137
7.2	Lokale Abflusentnahme in die Notpolder .....	144
7.3	Ergebnisse der Simulation der Szenarien mit den Notpoldern in den Längsschnitten .....	146
7.4	Ergebnisse der Simulation mit den Notpoldern in den Plotting Positions .....	150
7.5	Einbeziehung der Unsicherheiten der Abflussvorhersage und Simulationen bei der Notpolderuntersuchung .....	152
7.5.1	Kenntnisse über die Vorhersageunsicherheit im tschechischen Elbegebiet.....	153

7.5.2	Auswertung der Vorhersage im Jahr 2002 .....	153
7.5.3	Statistische Auswertung der Vorhersagen seit 2002 .....	154
7.5.4	Ergebnisse der tschechischen Studien .....	154
7.6	Bezug der Informationen über Vorhersage auf den Betrieb der Notpolder .....	157
7.7	Einbeziehung der Vorhersageunsicherheit bzw. datenbedingte Unsicherheit für den operationellen Betrieb der Notpolder .....	158
7.8	Ableitung der unsicheren Abflussganglinien – der datenbedingten Unsicherheiten.....	159
<b>8</b>	<b>Lokale Untersuchung der Flutung der Notpolder .....</b>	<b>169</b>
8.1	Hydraulische Grundlagen der Einlaufbauwerke .....	169
8.2	Ungesteuerte Abflussentnahme über ein festgelegtes Überfallbauwerk .....	175
8.3	Steuerbare Abflussentnahme durch eine Öffnungskonstruktion.....	178
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>183</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>186</b>

## Abkürzungen

### Institutionen

BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde

BMBF Bundesministeriums für Bildung und Forschung

CHMU / CHMI Tschechisches Hydrometeorologisches Institut

CR Tschechische Republik

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

DWD Deutscher Wetterdienst

EFAS Europäisches Hochwasserfrühwarnsystem

ECMWF Europäisches Zentrum für Mittel- und Langfristvorhersage

EU Europäische Union

HVZ Hochwasservorhersagezentrale

IKSE Internationale Kommission zum Schutz der Elbe

IMK Institut für Meteorologie und Klimaforschung

IWG Institut für Wasser und Gewässerentwicklung

LfUG Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie

LHW SA Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt

LHWZ Landeshochwasserzentrum des Freistaates Sachsen

MŽP Umwelt Ministerium der Tschechischen Republik

RID Royal Irrigation Department (Königliches Bewässerungsamt) in Bangkok

VUV TGM Wasserwirtschaftliche Forschungsanstalt Tomáš Garrigue Masaryk in Prag

WSA Wasser- und Schifffahrtsämter

WSD Wasser- und Schifffahrtsdirektion

### Szenarien und Varianten

V0 Variante ohne Notpolder

V1 – V4 Varianten mit Notpoldern

COSMO-REF Referenzsimulation der Luftmassen der Großwetterlage von August 2002

TP15 Temperaturerhöhung der Luftmassen um 1,5 K der COSMO-REF-Simulation

TP20 Temperaturerhöhung der Luftmassen um 2 K der COSMO-REF-Simulation

TM Temperatursenkung der Luftmassen K der COSMO-REF-Simulation

RP10 und RP20 Erhöhung der relativen Luftfeuchte um 10 bzw. 20 % der COSMO-REF-Simulation

N1,N2, O1,O2, S1, S2, W1, W2 Verschiebungen (Nord, Ost, Süd, West) der Luftmassen der COSMO-REF-Simulation um eine bzw. zwei Gitterzellen

SZE Szenario

### **Geographische Namen**

A9 Autobahn 9

AK Aken

DD Dresden

DE Dessau

RO Rosslau

TO Torgau

VO Vockerode

US Ústí nad Labem

ZW Zwischeneinzugsgebiet Dresden – Aken

### **Sonstige**

D Diffusionskoeffizient

DGM Digitales Geländemodell

EZG Einzugsgebiet

FGM Flussgebietsmodell

GM gleitendes Mittel

GME Globales Modell Europa

HQ Hochwasserabfluss

HWE Hochwasserereignis

MQ mittlerer Abfluss

NA Niederschlag-Abfluss

NSK Nash Sutcliffe-Kriterium

P Notpolder

PNP Pegelnullpunkt

Q Abfluss

QB beobachteter Abfluss

Q<sub>krit</sub> kritischer Abflusswert

QSIM simulierter Abfluss

RIMAX Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse

SAC-SMA Sacramento Soil Moisture Accounting Model

u Translationskoeffizient

W-Q Wasserstand-Abfluss

# 1 Einleitung

Extremhochwassersituationen stellen ein gesamtgesellschaftliches Problem insbesondere der Betroffenen dar. Man redet nur in dem Falle von einer Katastrophe, wenn Menschenleben oder Eigentum in Gefahr stehen. Hochwasserereignisse werden durch Starkniederschläge ausgelöst, die durch die Eigenschaften des Einzugsgebiets in Abflüsse umgesetzt werden. Für die Größe des Abflussereignisses (Hochwassers) spielt neben der Größe und der Verteilung des Niederschlags, die aktuelle Abflussbereitschaft (Sättigung des Bodenkörpers) des Einzugsgebiets die entscheidende Rolle. Ein Katastrophenhochwasser entsteht aus einem ungünstigen Zusammentreffen von Starkniederschlag und hoher Abflussbereitschaft des Gebiets. Unter Katastrophenhochwasser sollen solche Ereignisse verstanden werden, deren Jährlichkeit bei  $T_n = 100$  Jahren und darüber liegt, und deren Auswirkung Einfluss nimmt auf das Eigentum der Menschen oder sogar das Leben.

Die Abschätzung von solch extremen Hochwasserereignissen erfolgt heute über eine gleichzeitige Anwendung der Methoden der Extremwertstatistik und der Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Diese parallele Betrachtungsweise ist notwendig, damit die Größenordnung des Ereignisses sinnvoll eingegrenzt werden kann. Beide Verfahren haben jedoch den Nachteil, dass nur ungenügend genaue Kenntnisse über das natürliche Verhalten des Niederschlag-Abfluss-Prozesses aus beobachteten Daten abgeleitet werden können. Beobachtete Daten liegen meist nur über einen Zeitraum von deutlich unter 100 Jahren vor. Die Jährlichkeiten der beobachteten Extremereignisse erreichen selten eine Größenordnung von  $T_n = 100$  Jahren. Deshalb muss immer aus dem Bereich der kleineren, häufig auftretenden Ereignisse in den seltenen extremen Bereich, extrapoliert werden. Die Anwendung dieser Verfahren ist sehr stark an die Messstellen (Pegel) in einem Gewässernetz und damit an die Verfügbarkeit der Daten gebunden. Für eine flächenhafte Betrachtung müssen die aus den Daten der Messstellen abgeleiteten Erkenntnisse regionalisiert werden. Beispielweise zum Längsverlauf der Elbe liegen diesbezüglich umfangreiche Ergebnisse und Erfahrungen nutzbar vor (Nestmann und Büchele 2002).

Für die Minderung der Schäden in Folge eines Hochwassers gibt es zwei Arten von Schutzmaßnahmen. Eine Möglichkeit ist die Eindeichung entlang der Flüsse mit hinreichender Sicherung gegen Beschädigung oder Überströmung in einem Extremfall. Infolge dieser Maßnahme kommt es zu einem Verlust natürlicher Ausuferungsflächen entlang der Flüsse und somit zu einer geringeren Wellenverformung. Hiermit wird der Abflussscheitelwert durch den Flood-Routing-Prozess nicht oder nur wenig gedämpft und der Wellenablauf könnte beschleunigt werden. Dies führt zu einer stärkeren Gefährdung des unterstromigen Gebiets, vor allem durch die ungünstige mögliche Ereignisüberlagerung vonseiten der Zuflüsse.

Die zweite Möglichkeit ergibt sich aus einem Eingriff in das extreme Abflussereignis - entweder durch einen gesteuerten Rückhalt der hohen Abflüsse in den Hochwasserrückhaltebecken, Poldern, Hochwasserschutzräumen der Talsperren und Notpoldern, oder durch die Abführung durch Hochwasserentlastungskanäle. Extreme Scheitelwerte können dabei sowohl mit Talsperren als auch mit steuerbaren (Not)Poldern reduziert werden. Auf dem Gebiet der Tschechischen Republik (CR) handelt es sich um Talsperren mit erheblichem Hochwasserschutzraum, vor allem im Bereich der Moldau und der Eger. Entlang des Elbelaufes in Deutschland ist an Standorten, an denen es die Geländebedingungen in der Flussaue es ermöglichen, die Einrichtung von (Not)Poldern vorgesehen, besonders in Sach-

sen-Anhalt. Eine neue Optimierung der Flutung der vorhandenen Notpolder bspw. in Brandenburg wurde analysiert (vgl. Bronstert 2004). Nach dem Extremereignis von 2002 wurden im internationalen „Aktionsplan Hochwasserschutz Elbe“ (IKSE 2006 und IKSE 2009) und in staaten- und länderspezifischen Hochwasserkonzepten der Bedarf und die Überlegungen zur Einrichtung zusätzlicher Retentionsräume präzisiert.

Die vorliegende Arbeit knüpft unmittelbar an diesen großräumigen Untersuchungsbedarf an und baut auf erste aktuelle Berechnungen zum weitläufigen hochwasserdämpfenden Effekt der Notpolder auf. Dafür wurde das Abflussgeschehen großräumig im Elbeeinzugsgebiet untersucht, um die Möglichkeit der Retentionsmaßnahmen als einen Teil des möglichen Hochwasserschutzkonzeptes zu beweisen.

Seit jeher werden Menschen bzw. Gesellschaften mit Naturkatastrophen konfrontiert, besonders mit den hier beschriebenen Hochwasserereignissen. Deswegen streben Gesellschaften seit Jahrhunderten danach, einen Umgang zu finden, um Risiko und Schäden zu minimieren, oder sie gar zu vermeiden. Jedes verheerende extreme Hochwasserereignis schafft eine neue und erhöhte Wahrnehmung durch die davon betroffenen Menschen (Laien sowie Experten), d.h. ein stärkeres Bewusstsein für das Risiko. Schon immer in der Geschichte wurden die Wasserläufe durch das Wirken des Menschen beeinflusst, einerseits um ihre Kraft zu nutzen und ihre Naturschätze zu gewinnen, andererseits um die auftretenden Hochwasser fernzuhalten. Ortschaften und Ackerland entlang der Wasserläufe wurden dort, wo die Bedingungen es ermöglichten, vor Hochwasser geschützt - es wurden Deiche errichtet. Das ist auch der Fall entlang der mittleren und unteren Elbe.

Dadurch hat sich nach einigen Hochwasserereignissen ein gezieltes, operationelles Hochwassermanagement entwickelt. Zahlreiche Methoden und Maßnahmen wurden geschaffen, um hohe Abflüsse nicht nur extremer Ereignisse bewältigen zu können. Mit den Aufgaben des Hochwassermanagements werden sowohl Bedingungen geschaffen, die die langfristige und wirtschaftliche Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen durch Experten und zuständige Behörden ermöglichen, als auch Bedingungen für den operationellen Einsatz solcher Maßnahmen zugunsten einer sofortigen Entscheidung während eines Ereignisses. Die technischen Hochwasserschutzmaßnahmen wie z.B. Deiche, Hochwasserrückhaltebecken, steuerbare (Not)Polder, Steuerungspläne der Talsperren, sowie mobile Hochwasserschutzwände werden schon im Voraus entworfen. Die Wasserstands- und Abflussvorhersage dient als Grundlage für die Entscheidung der Expertengruppen und ist ein wichtiger Bestandteil des operationellen Hochwasserschutzmanagements, um die Betroffenen möglichst frühzeitig warnen zu können. Die zuverlässige und möglichst lange Vorhersage verlängert die Zeit für die notwendige Vorbereitung der Maßnahmen, sowohl für Experten und zuständigen Behörden, als auch für die Betroffenen, um Schäden minimieren zu können.

## **1.1 Problemstellung - die Bewältigung der Extremereignisse**

Für die Bewältigung von Hochwasserereignissen werden als Teil des Hochwasserschutzes Talsperren und Rückhaltebecken benutzt, um den höheren Abfluss durch deren Flutung reduzieren zu können. Dadurch wird ein Teil des höheren Abflusses in die Rückhalteräume abgeleitet und dieser Anteil des Ereignisvolumens vorübergehend gespeichert (zurückgehalten). Dies hat wiederum zur Folge, dass der Durchfluss aufgeteilt und der restliche Abfluss im Gerinne reduziert wird. Diese Maßnahmen sind

in Einzugsgebieten größerer Skale nur bei Hochwasserereignissen in Größenordnungen mit kleinerem oder mittlerem Wiederkehrintervall erfolgreich wirksam. Im Rahmen dieser Arbeit stellt die Bewältigung von Extremhochwasserereignissen mittels der Flutung von Notpoldern bzw. der dafür vorgesehenen Flächen eine zentrale Frage dar. Im Katastrophenfall wäre diese Maßnahme eine Lösung, den extrem hohen Abfluss kontrolliert zu kappen. Diese Idee beruht auf den in der Vergangenheit aufgetretenen Extremereignissen und ihren Auswirkungen in zahlreichen Einzugsgebieten, die Umsetzung und der Nachweis der Funktionsfähigkeit ist in der vorliegenden Untersuchung eine große Herausforderung. Die Wirkung von möglichen zufälligen Deichbrüchen oder Deichüberströmungen mit einer unkontrollierbaren Flutung des geschützten Geländes ist hier hervorzuheben; dies geschah mit hochwasserdämpfendem Effekt bspw. an der Oder 1997 sowie an der Elbe 2002. Zahlreiche Deichversagen mit anschließenden Flutungen, unter anderen an der Theiß, Weichsel, dem Indus und am Mississippi, führten zur Entlastung der kritischen Situationen für die Unterlieger. Diese Tatsachen gaben den Anlass, solche Schutzmaßnahmen im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchen. Es wird angestrebt, einen extrem hohen Wasserstand durch möglichst steuerbare Notpolder, unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der Abflussvorhersage, im operationellen Betrieb zu senken.

Die zentrale Frage der vorliegenden Arbeit bezieht sich auf die Maßnahmen zur Bewältigung der extrem hohen Ereignisabflüsse, die die Bemessungswerte der technischen Hochwasserschutzmaßnahmen überschreiten:

„Wie kann ein extrem hoher Abfluss reduziert werden, wenn bereits alle Möglichkeiten der Bemessungsmaßnahmen ausgeschöpft wurden?“

Die Informationen und Erfahrungen über die Bewältigung der Extremereignisse anderer Gebiete und Flüsse sind für dieses Vorhaben von großer Bedeutung. Sie können eine Idee oder Motivation für ein Hochwassermanagement darstellen, insbesondere im Hinblick auf die zusätzlichen Retentionsmaßnahmen als letzte Möglichkeit einer Schadenreduzierung im Notfall. Darüber hinaus werden Methoden zur Planung von Schutzmaßnahmen auch anderer Einzugsgebiete weltweit angesprochen, soweit sie verfügbar sind.

## **1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit**

Im Vordergrund steht die Frage des möglichen Hochwasserschutzes mittels einer Reduzierung durch die steuerbare Retention der extrem hohen Abflüsse im Falle der Überschreitung von Bemessungswerten. Dies wird mit steuerbaren Rückhaltbecken – den Poldern – überprüft, wobei in diesem Fall der Begriff Notpolder verwendet wird, die nur für Extremereignisse einer Größenordnung über HQ 100 vorgesehen sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine großskalige, hydrologische Untersuchung des Abflussprozesses in der oberen Hälfte des Einzugsgebiets der Elbe, insbesondere im Hinblick auf die in der Vergangenheit vorgekommenen Extremereignisse, durchgeführt. Die Extremereignisse der letzten Jahre seien Anlass und Motivation für diese Untersuchung. Die verheerenden Ereignisse an der Oder vom Juli 1997 sowie an der Elbe und Donau vom August 2002 haben ihre vernichtenden Auswirkungen auf das menschliche Eigentum oder sogar auf das Leben gezeigt. Dadurch entstanden viele Fragen und Bedürfnisse sowie Untersuchungen zur Verbesserung der damals bestehenden Hochwasserschutzsysteme.

Diese Arbeit bezieht sich auf die hydrologische Untersuchung der Notpolder an der Elbe im Bereich Sachsen-Anhalts, bezogen auf das Ereignis vom August 2002, wo es zu Deichbrüchen gekommen ist, deren dämpfende Wirkung sich reduzierend auf den Hochwasserscheitelwert ausgewirkt hat. Gerade dieses ereignisspezifische Geschehen war der Anlass, die steuerbaren Notpolder in diesem Bereich und deren Wirkung auf den Unterlauf zu untersuchen. Das Ergebnis ist eine lokale Auswahl und Analyse der möglichen Notpolderflächen und der Kapazität der Einlaufbauwerke, sowie der Entwicklung der optimalen Steuerungspläne für die Öffnungsbauwerke mit der Heranziehung der hydrologischen Einsätze. Letztere bestimmen die Randbedingungen für eine detaillierte hydraulische Untersuchung, welche nicht Bestandteil dieser Arbeit ist. Eine optimale Funktionsfähigkeit der steuerbaren Notpolder erfordert neben dem Steuerungsplan eine zuverlässige verlängerte, operationelle Wasserstands- und Abflussvorhersage. Dafür wurden die bestehenden deutschen und tschechischen hydrologischen Modelle (Flood-Routing) gekoppelt oder erweitert, bzw. deren Parameter für Zwecke der Notpolderuntersuchung optimiert. Dieses ist aber nicht Schwerpunkt dieser Arbeit, es geht darum, auf eine verlängerte Vorhersagedauer hinzuweisen, die notwendig ist für die Vorbereitung und Entscheidung zur Notpolderflutung. Daneben muss die Unsicherheit der operationellen Abflussvorhersage in Betracht gezogen werden, d.h. die Sensitivität eines solchen Systems, gerade bei unsicheren, mit zahlreichen Fehlern behafteten operationellen Beobachtungen und Vorhersagen, muss analysiert werden. Die wichtige und begründete Frage, inwieweit die großen tschechischen Talsperren auf den deutschen Elbepegeln noch wirksam sind, konnte anhand der Modellkopplung im Rahmen dieser Untersuchung beantwortet werden.

Die wichtigsten Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit lassen sich zusammenfassen wie folgt:

- Die bisherigen Untersuchungen beziehen sich im Grunde auf die letzten beobachteten Extremereignisse, die teilweise als „Bemessungshochwasser“ angenommen wurden. Ein kommendes Extremereignis wird jedoch nicht in gleicher Form und Auswirkung auftreten. Die Notpolderwirksamkeit auf den Wellenablauf muss auch bei anderen Extremereignissen, also in Szenarien nachgewiesen werden. Dafür wurden zahlreiche, vielfältige Szenarien von der großskaligen Niederschlag-Abfluss-Modellierung (RIMAX) herangezogen, um sie mit den untersuchten Notpoldern kappen zu können. Dadurch wurde eine Option der steuerbaren hochwasserdämpfenden Maßnahmen für die vielfältigen Extremereignisse bewiesen.
- Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der praktischen Umsetzung der o. g. Idee, d.h. in der rechtzeitigen und effektiven Steuerung bzw. Flutung der Notpolder. Wie bereits erwähnt, setzen zahlreiche Untersuchungen einen bekannten Hochwasserverlauf voraus, wobei dies in der Natur während einer gespannten Hochwassersituation kaum realistisch ist. Oft werden bereits bestehende Retentionsmaßnahmen, konservativ ab Erreichen eines Abflussschwellenwertes (z.B. ab HQ 25), unabhängig vom vorhergesagten Hochwasserverlauf, geflutet. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Flutung abhängig von der Vorhersage untersucht, um diese Retentionsmaßnahmen effektiv zu nutzen.
- Die Notpolder müssen operationell eingesetzt werden, um den Scheitelabfluss möglichst effektiv zu kappen. Dies hängt von der Zuverlässigkeit der vorhergesagten Abfluss- und Wasserstandsganglinie, sowie der bereits ausgewerteten operationellen tlw. beobachteten Daten ab, das bedeutet wiederum, dass die geplanten Notpolder unter der Annahme der unvollständigen und ungenauen Vorhersage gesteuert bzw. geflutet werden müssen. Dieses erfordert eine Analyse und Abschätzung der Unsicherheit der Vorhersage.

- Die Einbeziehung der Unsicherheit führt zum weiterführenden Problem der Sensitivität bzw. Robustheit eines solchen Systems. Es wurde untersucht, inwieweit dieses Notpoldersystem noch wirksam sein könnte und wo die Grenzen der Wirksamkeit/Effizienz unter den unsicheren, extremen Bedingungen sind. Ebenfalls wurde rechnerisch gezeigt, wie schnell während einer Extremsituation gehandelt werden muss.
- Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zwei verschiedene Steuerungskonzepte untersucht. Beim ersten Konzept werden die Notpolder so gesteuert, dass eine optimale Abflussdrosselung der Elbe unmittelbar unterhalb der Maßnahmen erreicht wird. Die verschärfende Situation durch die unterstromigen Zuflüsse, wie der Mulde, wird dabei nicht berücksichtigt. Dafür werden beim zweiten Steuerungskonzept auch die Situationen der unterstromigen Zuflüsse berücksichtigt. Ein Steuerungskonzept mit Berücksichtigung der verschärfenden Wirkung der Mulde, die unterhalb der Retentionsmaßnahmen in die Elbe fließt, auf das Hochwasserereignis der Elbe, wurde ausgearbeitet. Im Grunde heißt es, dass die Notpolder an der Elbe, hinsichtlich der möglichen Überlagerung von zwei Hochwasserereignissen, gesteuert werden müssen. In diesem Fall muss das Elbehochwasserereignis bereits etwas früher, als beim ersten Konzept während des Anstiegs, durch die Flutung gedrosselt werden, obwohl eine optimale Abflussreduzierung an den Standorten der Notpolder nicht erreicht wird. Dafür kann das Muldehochwasser das Elbehochwasser „überholen“ und die Situation im Mündungsbereich (in Dessau) wird nicht wesentlich verschärft. Das zweite Steuerungskonzept erfordert die Vorhersagen der Elbe und Mulde sowie den Verlauf, der durch die Notpolder reduzierten Elbeganglinie. Das zweite Steuerungskonzept ist im Hinblick auf die Verringerung des Überflutungsrisikos der Stadt Dessau generell zu bevorzugen.
- Die Übertragbarkeit; die hier präsentierte Idee der möglichen Steuerung von extremen Hochwasserereignissen am Beispiel der Elbe ist natürlich in anderen Einzugsgebieten verwendbar, wo die Überlagerung von Hochwasserereignissen eine wesentliche Verschärfung der Situation für die Unterliger verursachen könnte. So kann diese Idee mit gebietspezifischer Anpassung z. B. am Rhein, wo die potenzielle Überlagerung von großskaligen Hochwasserereignissen von Neckar, Main, Mosel mit dem Rhein ein ernsthaftes Problem darstellt, verwendet werden. Die bereits existierenden und geplanten Polder in Elsass, Baden und Pfalz könnten für den Hochwasserschutz im Hinblick auf die Überlagerung der o.g. Zuflüsse genutzt werden. Ebenso könnte diese Idee am Inn mit seinen Zuflüssen mit der Donau untersucht werden, ob ein Hochwasserereignis zurückhalten bzw. bremsen kann, um die zeitgleiche Überlagerung minimieren zu können.

Diese Arbeit wird in die folgenden Kapitel gegliedert:

- Zuerst werden Ziel und Konzept der Arbeit aufgrund der bisherigen Informationen und Erfahrungen aus der Bewältigung von Extremereignissen weltweit definiert. Es wird erklärt, warum das Untersuchungsgebiet gerade an der Elbe ausgewählt wurde.
- Im Kapitel „Grundlagen“ folgt die Beschreibung des Einzugsgebietes der Elbe; hier wird die Morphologie und Demographie kurz angegangen, sowie die wichtigsten anthropogenen Einflüsse im Einzugsgebiet, die für die Abflussdynamik verändert relevant sind, werden kurz vorgestellt. Die für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit erhobenen und verwendeten Daten, Unterlagen und Informationen werden vorgestellt und gegliedert. Die hydrologischen Zeitreihen mussten einer (Qualitäts-) Konsistenzüberprüfung unterworfen werden, um mög-

- liche Fehler zu identifizieren. Dabei werden die wichtigsten statistischen Kennwerte aus den Zeitreihen ermittelt. Ebenfalls werden Verbindungen und beidseitiger Informationsaustausch zwischen dieser Arbeit und anderen Projekten erwähnt. Der Begriff Notpolder wird erläutert.
- Eine kurze Beschreibung der angewendeten Modelle und Methoden wird in Kapitel 3 angegangen, um das genannte Ziel untersuchen zu können. Im Vordergrund steht die Anwendung des Flood-Routing-Modells und Bilanzmodells. Das Wissen über die im Rahmen anderer Projekte und Studien eingesetzten Niederschlag-Abfluss-Modelle ermöglicht die Abschätzung der daten- und modellbedingten Vorhersage- und Simulationsunsicherheit der Ergebnisse, die hier weiter verwendet wurden.
  - Für die Planung der Retentionsmaßnahmen stellt ein ausführliches Wissen über die großräumigen historischen und seltenen gegenwärtigen Extremereignisse eine wichtige Randbedingung dar. Ein Extremereignis ist spezifisch und einzigartig, mögliche unvorhersagbare Effekte wie z.B. außergewöhnliche Ausuferungen oder Retentionen durch Deichbrüche. Dies muss mit dem Flood-Routing-Modell gekoppelt werden. Die Frage bezieht sich auf das maximal mögliche Bemessungshochwasser, welches u.a. von den beobachteten Situationen abgeleitet wurde.
  - Im Rahmen der lokalen Untersuchung der möglichen Notpolderflächen wurden Standorte im Hinblick auf die lokalen Bedürfnisse und Gegebenheiten ausgewählt. Damit wurden die wichtigsten Kennwerte – Speichervolumen und Einstauziel – ermittelt. Die hochwasserdämpfende Funktionsfähigkeit bzw. Notpolderwirkung auf den Unterlauf wurde durch die beobachteten Daten des Ereignisses vom August 2002 rechnerisch nachgewiesen.
  - Jede Planung von Schutzmaßnahmen erfordert eine Definition des Bemessungshochwassers. Oft wurde das letzte extreme Hochwasserereignis als Bemessungshochwasser angenommen. Dies ist jedoch nicht ausreichend, um eine schlagkräftige Aussage über die Variabilität und mögliche Auswirkungen eines künftigen Ereignisses treffen zu können. Aus dem Grunde wurden zuerst historische Ereignisse und später simulierte RIMAX-Szenarien herangezogen. Dabei handelt es sich um eine Definition der Ableitung und daraus folgend eine Kopplung der Szenarienergebnisse der tschechischen und deutschen Modelle, die für die Planung der Notpolder relevant sind.
  - Die o.g. Arbeitspunkte richten sich auf die Planung der Bemessung der Schutzmaßnahme, jedoch nicht auf deren operationellen Betrieb während einer Extremsituation. Gerade die Umsetzung im operationellen Betrieb unter den unsicheren Bedingungen der Vorhersage und der aktuellen Datenauswertung stellt eine große Herausforderung dieses Vorhabens dar. Dafür müssen die Quellen der unsicheren Bedingungen identifiziert werden und unter Nachweis der untersuchten Effizienz der Notpolder quantifiziert werden. Hier werden die Leitfäden des operationellen Betriebes erwähnt.
  - Im letzten Kapitel werden die Anforderungen an hydraulische Untersuchungen definiert, da die bisherigen Ergebnisse der hydrologischen Untersuchungen über die Effizienz solcher Maßnahmen die Randbedingungen für lokale hydraulische und konstruktive Erörterungen darstellen.

## 1.3 Fallbeispiele von anderen Einzugsgebieten

### 1.3.1 Mississippi in den USA

Der Fluss Mississippi in Nordamerika, mit einer Einzugsgebietsfläche von 2 980 000 km<sup>2</sup>, ist recht gut online dokumentiert und seit dem 19. Jahrhundert beobachtet. Laut „Project Flood“ (The Mississippi River and Tributaries Project, 2004) wurde das Hochwasserereignis von 1927, als das verheerendste Ereignis bezeichnet, mit erheblichen Deichbrüchen am Unteren Mississippi und anschließenden Gebietsüberflutungen - bis zu 67 000 km<sup>2</sup> Fläche. Im Rahmen von o.g. Projekt wurde das Hochwasserereignis 1927 um 10 % erhöht und wurde weiter als Bemessungshochwasser für die Planung der Maßnahmen angenommen. Im Falle eines Hochwasserereignisses für eine lokale Entlastung im Bereich des Zusammenflusses Mississippi und Ohio, wird der Umflutkanal zwischen Cairo und New Madrid benutzt.

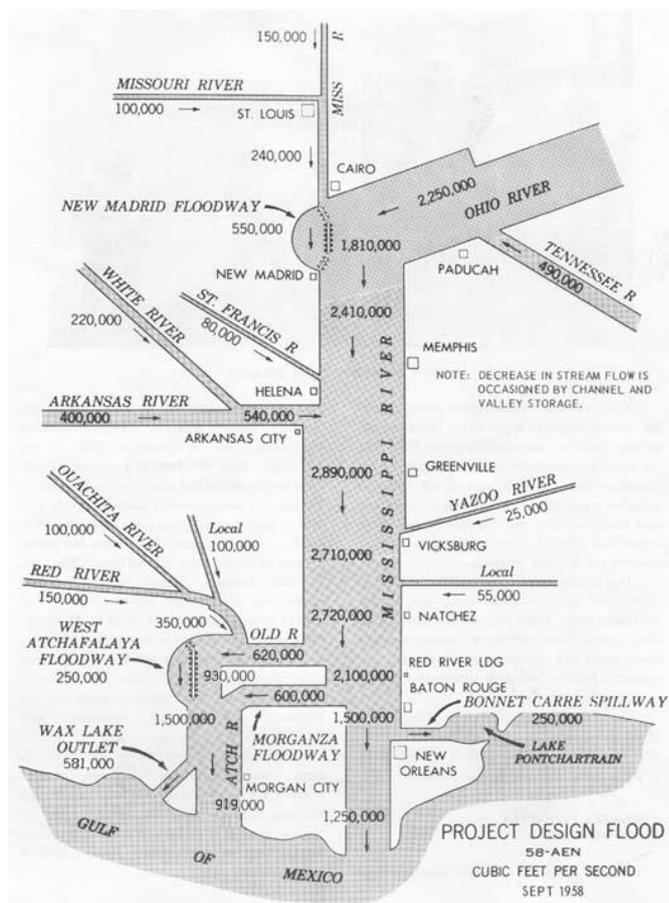


Abbildung 1.1: Das Fluss- und Kanalsystem des Unteren Mississippi mit Abflussangaben (in Kubikfuß pro Sekunde) vom Hochwasserereignis 2011 (Quelle: America's Wetland Resource Centers 2011)

Am Unteren Mississippi wird das alte Flussbett des Atchafalaya-Flusses mittels des Morganza Wehrs im Extremfall geflutet, um die Stadt New Orleans schützen zu können. Dadurch wird ein Teil des Extremabflusses (bis zur halben Menge – 42 000 m<sup>3</sup>/s) direkt in den Golf von Mexiko abgeführt. Nach den Internetangaben des America's Wetland Resource Centers 2011, wird der Hochwasserabflussanteil 3:7 zugunsten des Mississippi verteilt. Oberhalb der Stadt New Orleans befindet sich ein Einlassbauwerk mit einem Verbindungskanal Bonnte Carré, durch das ein Teil des Abflusses in den See Pon-

tchartain abgeführt wird. Die maximale Entnahme/ Abgabe beträgt ca. 7000 m<sup>3</sup>/s. Bis jetzt wurde die im Jahr 1935 eingerichtete Anlage zehnfach im operationellen Betrieb eingesetzt, wobei der Abfluss in 2011 laut der zitierten Studie etwa 9000 m<sup>3</sup>/s betrug. Dieser See ist jedoch mit dem Golf von Mexiko verbunden und nicht gestaut, sodass er über eine unbeschränkte Volumenkapazität verfügt. Ein Schema des Unteren Mississippi ist auf Abbildung. 1.1. dargestellt.

### 1.3.2 Indus in Pakistan

Das Einzugsgebiet des Indus in Pakistan wurde durch ein verheerendes Hochwasserereignis im Juli und August 2010 stark betroffen. Es wurde von den lang andauernden starken Monsunregen im nördlichen Teil ausgelöst, schätzungsweise wurden bis zu 20 % (160 000 km<sup>2</sup>) des Landes überflutet. Zu den wichtigsten Zuflüssen gehören folgende Flüsse: Kabul, Jhelum, Chenab, Ravi und Sutlej. An den Flüssen wurden die großen Talsperren ODER wie Tarbele/Indus (8170 Mio. m<sup>3</sup>), Mangla/Jhelum (5600 Mio. m<sup>3</sup>), und Chashma/Indus (324 Mio. m<sup>3</sup>), sowie zahlreiche Kanäle eingerichtet, um die Energieproduktion, Bewässerung und teilweise den Hochwasserschutz sicherstellen zu können. Das Einzugsgebiet vom Süden bis zu Nordosten Pakistans ist flach. Im ganzen Gebiet befinden sich etwa 6800 km Deiche. Nach den Angaben von NDMA (2010) werden Modelle für die Niederschlag-Abfluss-Simulation SAMO und für den Flood-Routing-Prozess SOBEK für die hydrologische Vorhersage benutzt.

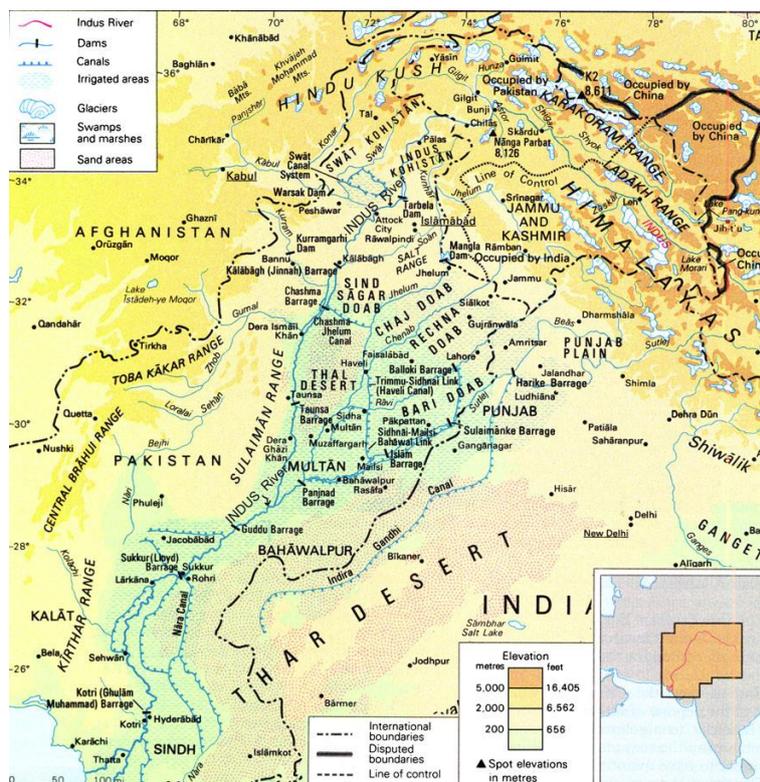


Abbildung 1.2: Übersichtskarte des Einzugsgebiets des Indus (Quelle: Bushra Kahn et al. 2010)

In der Provinz Punjab wurden mögliche Entfernungen der hydraulischen Hindernisse (Hochwasserschutzdeiche, Bahn- und Straßendämme) im Falle eines extremen Ereignisses ausgewählt (FFC 2010). Insgesamt handelt es sich um 14 Entfernungen/ Brüche. Diese Information stammt jedoch aus dem

Extremereignis 2010 und die Maßnahmen und Auswirkungen sind nicht bekannt. An vier vorher definierten Stellen im Bereich der Stauanlage Jinah (Provinz Punjab) wurden Deiche entfernt oder gesprengt, um den Scheitelwert reduzieren zu können. Dabei wurde das Flachland hinter den Deichen kontrolliert geflutet. Der maximale Bemessungsabfluss am Wehr Chashma wurde überschritten. Im Bereich der Stauanlage Taunsa brach ein Schutzdeich während des Scheitelauftritts am Indus. Daneben brachen Deiche am Bewässerungskanal. Höchster Abfluss wurde am Pegel Guddu am Indus mit  $32\,000\text{ m}^3/\text{s}$  erreicht. Unter anderem wird hier erwähnt, dass einige Talsperren nur über einen kleinen bzw. keinen Hochwasserschutzraum verfügen. Die Wartung einiger Deiche war nicht ausreichend. Es gibt nur wenige Entlastungskanäle. Hochwasserentlastungsanlagen der meist vorhandenen Stauanlagen verfügen nicht über ausreichende Kapazitäten zur Ableitung extremer Abflüsse.

In demselben Bericht (FFC 2010) sind ebenfalls Empfehlungen für das künftige Hochwasserschutzmanagement zusammengefasst. Dazu gehören:

- die Überarbeitung der Steuerungspläne der größten Talsperren Tarbela und Mangla
- die Planung künftiger Mehrzwecktalsperren
- die Identifizierung der möglichen Entlastungskanäle der Stauhaltungen Taunsa, Guddu und Sukur für die Überführung des Abflusses im Extremfall in die Wüstengebiete oder in die dafür vorgesehenen Räume, um die Extremabflüsse kappen zu können.
- die Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Brücken und Stauanlagen für den Bemessungsabfluss, der dem des Ereignisses von 2010 entspricht.

### 1.3.3 Roter Fluss (Song Hong) in Vietnam

Roter Fluss (vietnamesisch Song Hong), im Norden des Landes, hat eine Einzugsgebietsfläche von  $171\,000\text{ km}^2$ , die wichtigsten Nebenflüsse sind Klarer Fluss (Song Lo) und Schwarzer Fluss (Song Da). Die folgenden Informationen wurden dem Bericht Dang Quang Tinh von 1999 entnommen. Die größten Talsperren befinden sich mit Hoa Binh ( $9500\text{ Mio. m}^3$  und Betriebsraum  $5600\text{ Mio. m}^3$ ) am Fluss Song Da und mit der Talsperre Thac Ba am Fluss Chay (Betriebsraum  $1200\text{ Mio. m}^3$ ). In Hanoi kann dadurch der Scheitelwert bis um  $1,5\text{ m}$  reduziert werden. Angaben über den entsprechenden Abfluss sind nicht verfügbar. Ausgewählte Empfehlungen und Untersuchungsergebnisse laut des o.g. Berichts sind:

- Einrichtung neuer Speicherräume (Talsperren) im oberen Einzugsgebiet (nicht nur für den Hochwasserschutz)
- Überarbeitung der Steuerungspläne der bestehenden Talsperren.
- Das bisher höchste beobachtete Hochwasserereignis trat 1971 mit  $37\,800\text{ m}^3/\text{s}$  am Pegel Son Tay in der Nähe von Hanoi auf. Um die Belastung und damit mögliches Versagen der Schutzdeiche verringern zu können, werden Hochwasserüberfälle/ Entlastungsanlagen an den Deichen geplant. Sie sollen  $100$  bis  $300\text{ m}$  breit sein. Durch die Talsperre Hoa Binh soll der Scheitelabfluss von  $38\,000\text{ m}^3/\text{s}$  auf  $23\,000\text{ m}^3/\text{s}$  reduziert werden (Ereignis 1971).
- Daneben soll bis zu  $5000\text{ m}^3/\text{s}$  vom Roten Fluss in den Day Fluss (oberhalb von Hanoi) abgeführt werden, um den Wasserstand um  $20$  bis  $30\text{ cm}$  reduzieren zu können.
- Dort sind zwei Retentionsräume vorgesehen, jedoch sind nähere Informationen nicht bekannt.

Die großen Talsperren stehen unter Verwaltung der dortigen Energetischen Betriebe, in der Monsunsaison (Mitte Juni bis Mitte September) werden sie jedoch von der Hochwasserkommission betrieben. Im Extremfall werden landwirtschaftlich genutzte Flächen durch die neu eingerichteten festen Notüberfallbauwerke überflutet, um die Deiche im unteren, vor allem städtischen Bereich Hanoi, entlasten, und vor Überströmung schützen zu können. Im Rahmen der Untersuchung in Vietnam wurden ebenfalls Szenarien aus den beobachteten Abflussreihen (ab 1909) sowie mittels der hydrologischen Niederschlag-Abfluss-Modellierung abgeleitet. Informationen zu den Retentionsflächen sind unbekannt. Das Flussschema inklusiv der Retentionsflächen und der großen Talsperren ist auf Abbildung 1.3. dargestellt.

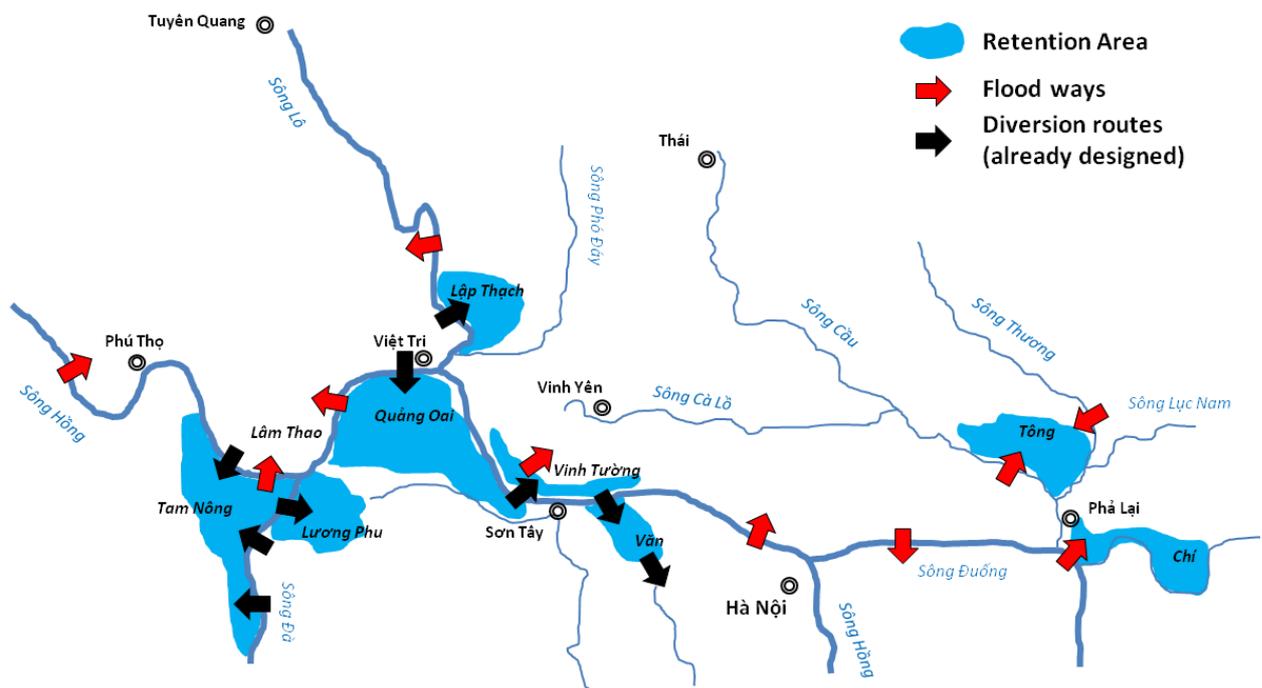


Abbildung 1.3: Übersichtskarte des unteren Einzugsgebiets des Roten Flusses in Vietnam mit vorgeschlagenen Retentionsmaßnahmen (Quelle: Dang Quang Tinh 1999)

### 1.3.4 Fluss Chao Phraya in Thailand

Das Einzugsgebiet von Chao Phraya erstreckt sich auf einer Fläche von 160 000 km<sup>2</sup>, die durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme beträgt 1179 mm (ONWCR 2004), mittlerer Jahresabfluss 724 m<sup>3</sup>/s (Noata 2003). Die größten Talsperren sind Bhumiphol / Ping mit 13 500 Mio. m<sup>3</sup> und Sirikit / Nan mit 10 640 Mio. m<sup>3</sup> ebenfalls mit Hochwasserschutzraum. Es befindet sich im Norden des Landes. Das nördliche Gebiet ist gebirgig, der südliche Teil sehr flach.

Im Jahre 2011 wurde der nördliche Teil des Landes von starkem Monsunregen betroffen. Besonders verheerend waren die Überschwemmungen im Einzugsgebiet des Flusses Chao Phraya und seiner Zuflüsse Ping und Yom, vor allem im südlichen flachen Teil. Es wurde versucht, die Hauptstadt Bangkok durch Schließen der sich oben befindenden Wehranlage vor dem Hochwasserereignis zu schützen, jedoch musste die Wehranlage wegen der außergewöhnlichen Belastung der Deiche geöffnet werden.



RID hat 8 Polder mit Gesamtvolumen von 70 Mio. m<sup>3</sup> vorgeschlagen, die Verwaltung der Stadt und der Region Bangkok hat für den Hochwasserschutz 21 Notpolder mit einem Gesamtvolumen von 12,7 Mio. m<sup>3</sup> ausgewiesen. Weiter wurde die Retentionswirkung der 5 Flächen (835 km<sup>2</sup>, 1164 Mio. m<sup>3</sup>) im Norden und der 8 Flächen (925 km<sup>2</sup>, 1738 Mio. m<sup>3</sup>) im Süden untersucht, sie werden als „Lowland Areas“ bezeichnet. Jedoch können diese Maßnahmen nur bei Ereignissen der Größenordnung des 20-jährigen Hochwassers wirksam sein (Somkiat 2009).

### 1.3.5 Große Flüsse in Mitteleuropa

In Mitteleuropa wurden einige Notmaßnahmen ausgebaut oder sie sind in Untersuchung bzw. Planung. Wobei unterschieden werden muss zwischen den steuerbaren Notpoldern, den Poldern und Rückhaltebecken. Im Vergleich zu o.g. Studien wurden hier teilweise ausführlichere Informationen hinsichtlich der methodischen Herangehensweise gefunden.

Die Notpolder in der Havelniederung wurden bereits in den 50er Jahren errichtet und zum ersten Mal während des Hochwasserereignisses von 2002, mittels des Einlasswehrs Neuwerben (Elbe – Havel) und Sprengung der Schutzdeiche, kontrollierbar geflutet. Laut (IKSE 2004) wurde eine Wasserstandsreduzierung der Elbe am Pegel Wittenberge bis zu 41 cm dadurch erreicht. Die Wirksamkeit dieser Notpolder wurde bereits (Kranawettreiser 2002) bei den Ereignissen 1954, 1981 und 1997 mittels einer hydrodynamischen Methode geprüft. Dabei wurden die Wasserstandsvorhersage und Laufzeiten der o.g. Ereigniswellen als Kriterium für die Flutung angesprochen. Eine ausführliche Nachsimulation des Ereignisses von 2002 wurde unter der Beachtung der ökologischen und ökonomischen Aspekte der Flutung der Havelpolder von (WASY 2006) durchgeführt. Daneben wurden einige Szenarien anhand der beobachteten Ereignisse durch die Kombination des Scheitels und Volumens abgeleitet, um die mit den Havelpoldern „kappen“ zu können. Die Simulation des Füllvorgangs wurde mit Hilfe des hydrodynamischen Oberflächenwassermodells MIKE11 gerechnet. Ebenfalls wurde die Wirkung der Polderflutung auf das Grundwasser anhand des Modells FEFLOW untersucht.

Im Einzugsgebiet der Unstrut wurden die Polder und ihre Wirksamkeit mit einem hydraulischen Modell 1MoFlood untersucht (Schuhmann 2008). Es handelt sich um ein gekoppeltes Modell, bestehend aus dem Gerinne- und Überflutungsmodul. Jedoch wurde diese Polderuntersuchung für eine Gebietskala von etwa 2000 km<sup>2</sup> untersucht, für ein größeres Gebiet sind andere Aspekte zu berücksichtigen. In diesem Fall werden die genannten Maßnahmen auch für kleinere Ereignisse eingesetzt, so dass es sich nicht um Notfallmaßnahme handelt.

Eine numerische Simulation hinsichtlich der Strömung innerhalb des Polders Grietherbusch am Rhein wurde von (Göbel 1997) mittels des Modells CARIMA durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein Abflussschwellenwert des Rheins definiert, bei dem das Poldersystem gefüllt werden soll. Hier handelt es sich nicht um Notpolder.

Mit der Simulation der Flutung der geplanten Notpolder in Sachsen-Anhalt hat sich (Huang 2007) beschäftigt. Dafür wurde ein quasi-2-D Modell DYNHYD angewendet. Im Rahmen der genannten Arbeit wurden Ereignisse vom August 2002 und Januar 2003 durchgerechnet.

### **1.3.6 Zusammenfassung zu den Retentionsmaßnahmen**

Bei allen oben zitierten existierenden oder geplanten Retentionsmaßnahmen wurden leider nur wenige oder keine methodischen Ansätze gefunden. In allen Fällen wurden letzte beobachtete Extremereignisse als Bemessungsereignisse angenommen. Nur selten (als Bsp. Roter Fluss in Vietnam) wurden relevante Extremszenarien für den Beweis der Wirksamkeit der Retentionsmaßnahmen generiert und herangezogen. Die Fragen bezüglich des operationellen Einsatzes sowie der Qualität der Abflussvorhersage in den o.g. Studien bleiben offen.

## 2 Grundlagen – Begriffe, Beschreibung des Einzugsgebiets, Daten und Datenanalysen

Um dieses Vorhaben erzielen zu können, wurde das Einzugsgebiet der Elbe dafür ausgewählt. Da die Datengrundlagen sehr breit sind, und hier zahlreiche Studien durchgeführt wurden, sind deren Ergebnisse im Rahmen dieses Vorhabens gut verwendbar. Jedenfalls stellen die extremen historischen und gegenwärtigen Ereignisse eine gute Basis dar.

### 2.1 Der Begriff Notpolder – Erklärung

Der Notpolder, um den es sich in dieser Arbeit handelt, ist im Prinzip ein Rückhaltebecken, das neben einem Fluss eingerichtet wurde und nicht Teil des Flussbetts ist. Ein Notpolder besteht aus einer zugewiesenen Fläche, die mit einem Schutzdeich oder einem natürlichen Hochgestade abgegrenzt ist. Dadurch hat ein Notpolder bei maximalem Wasserstand (Einstauziel) ebenfalls ein maximales Speichervolumen. Ein wichtiger Teil des Notpolders ist die Zulaufstelle; das können ein Einlaufbauwerk, überströmbare Dämme oder ein Areal für kontrollierbare Deichsprengungen sein. Jeder Notpolder ist auch mit einem Auslassbauwerk ausgestattet, um ihn nach dem Ablauf des Hochwassers entleeren zu können. Die hier beabsichtigten Notpolder werden nur für Extremereignisse benutzt und im Normalfall kann die Fläche innerhalb des Notpolders landwirtschaftlich oder als Aue benutzt werden. In diesem Fall wird sie als Notpolder bezeichnet, da ein Einsatz nur für extreme Notfälle vorgesehen ist. Die Wassermenge eines Extremereignisses im Scheitelsbereich wird kurz oder während seines Scheitels in einem Notpolder zurückgehalten und dadurch wird eine Kappung (Reduzierung) des Scheitels erreicht. Im Grunde handelt es sich um eine Abflussspaltung mit dem Ziel, den restlichen Abfluss im Gerinne zu drosseln. Eine Funktion des Notpolders ist in Abbildung 2.2b in Kapitel 2.4 erläutert.

### 2.2 Grundinformationen über das Einzugsgebiet der Elbe

Die Elbe (tschechisch Labe) mit ihrer Länge von 1094,3 km entspringt im Riesengebirge nahe Špindlerův Mlýn in 1386 m Höhe über Normal Null (ü. NN). Sie fließt zuerst südwestlich und dann nordwestlich in die Nordsee bei Cuxhaven. Mit der Einzugsgebietsfläche von 148 268 km<sup>2</sup> ist die Elbe viertgrößter Fluss Mitteleuropas. Der langfristige mittlere Jahresabfluss (MQ) im Mündungsbereich beträgt 861 m<sup>3</sup>/s. Etwa zwei Drittel des Einzugsgebiets befinden sich in Deutschland und ein Drittel in der Tschechischen Republik (ČR). Nur ein geringer Anteil des Einzugsgebiets liegt in Österreich und in Polen. Das südliche und südwestliche Gebiet (Böhmen, Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt) ist mit den Gebirgen der mittleren Höhe gebildet (ab 400 m). Dazu gehören unter anderem: Riesengebirge, Adlergebirge, Böhmisches-Mährische Höhe, Böhmerwald, Erzgebirge, Thüringer Wald und Harz. Die größten Zuflüsse der Elbe sind: die Moldau/Vltava, die Havel, die Saale, die Mulde, die Schwarze Elster und die Eger/ Ohře.

Die böhmischen Flüsse fließen alle relativ fächerartig zusammen, das Gebiet ist wie ein „Kessel“ zu bezeichnen, während die deutschen Flüsse schrittweise in die Elbe münden, siehe Abbildung 2.1 und 2.4. in Kapitel 2.5. Die Struktur des Fließnetzes kann zu den ungünstigen Ereignisüberlagerungen der

Scheitelabflüsse aus den einzelnen Teileinzugsgebieten führen, dies passierte vor allem an der Moldau und Berounka beispielsweise in den Jahren 1890 und 2002. Die Geländehöhe des Gebiets über dem Meer ist für die Abflussverhältnisse maßgeblich, etwa eine Hälfte des Gebiets liegt unter 200 m über NN vor allem in Mittel- und Norddeutschland. Laut Bericht (IKSE 2004) liegen fast 29 % des gesamten Gebiets über 400 m ü. NN. Diese Bereiche gelten als hochwasserauslösende Gebiete. Die Niederschläge sind hier abhängig von der Orographie stärker und die Temperaturen niedriger und dadurch ist die Verdunstung geringer.

Im gesamten Einzugsgebiet leben etwa 24,5 Millionen Einwohner, davon 18,5 Millionen in Deutschland und 6 Millionen in der Tschechischen Republik. Die Kilometrierung ist an der deutsch-tschechischen Staatsgrenze bei Schöna - Hřensko mit dem Null-Kilometer festgelegt. Die deutsche Elbe ist von dem Punkt stromabwärts und die tschechische Elbe stromaufwärts kilometriert. Die Elbeabschnitte werden geomorphologisch wie folgt unterschieden in:

- die Obere Elbe; ab dem Quellgebiet bis zum Schloss Hirschstein in der Nähe der Stadt Riesa (Elbe-km 96)
- die Mittlere Elbe; von Schloss Hirschstein bis zum letzten Wehr Geesthacht (Elbe-km 589,9)
- die Untere Elbe; ab Wehr Geesthacht bis zur Mündung in die Nordsee (Elbe-km 727,7), die von Tide und Ebbe beeinflusst ist.

Das Einzugsgebiet der Elbe befindet sich im Bereich der gemäßigten Klimazone, die von dem ozeanischen feuchten Klima Westeuropas sowie dem kontinentalen trockenen Klima Osteuropas beeinflusst wird. Die mittlere jährliche Niederschlagssumme des gesamten Elbeeinzugsgebiets beträgt 627 mm. Die maximale und minimale jährliche Niederschlagssumme variiert zwischen 1800 mm im Harz und 430 mm bei Saaz / Žatec im Niederschlagsschatten (nordwestlich von Prag) vom Duppauer Gebirge und Erzgebirge. Das Abflussregime ist vorwiegend von der Schneeschmelze (nival), in den höheren Lagen, in den Monaten März und April geprägt.

Jeder mitteleuropäische Fluss ist von den anthropogenen Einflüssen mehr oder weniger betroffen. Die menschliche Tätigkeit hat die Abflussbereitschaft des Einzugsgebiets durch die landwirtschaftliche Nutzung beeinflusst. Die Bewaldung beträgt 29% der gesamten Fläche. Im Mittelalter wurden viele Teiche besonders in Böhmen errichtet um Fischzucht sicherzustellen. Bis jetzt sind 21 000 Teiche vorhanden. Die Schifffahrt war immer ein wichtiger Wirtschaftsfaktor für die Entwicklung der Städte und Ortschaften entlang der Elbe und ihren Zuflüssen. Die Bedingungen für die Schifffahrt wurden durch die Flussregulierungen verbessert. Damit der Wasserstand beim Niedrigwasser höher bleibt, wurden die Buhnen ausgebaut und die Ufer befestigt, um die Seitenerosion sowie die Verlagerung des Flussbettes zu vermeiden. Entlang der vielen deutschen Flüsse wurden im Flachgelände Schutzdeiche gebaut und schrittweise erhöht, um das Ackerland und die Ortschaften vor Hochwasserereignissen schützen zu können.

Auf dem böhmischen Gebiet wurde unter anderem die Elbe (die Kleine Elbe zwischen Hradec Králové / Königgraz und Mělník / Melk) um etwa die Hälfte gekürzt und durch den Ausbau der Stauanlagen kanalisiert. Die Kanalisierung der Elbe und Moldau hat im 19. Jahrhundert für die Schifffahrt begonnen. Heute besteht an der Elbe und Moldau ein Staustufensystem von miteinander verbundenen Stauhaltungen. Bzgl. Informationen über den Ausbau ist auf die Literatur (Rubin 1900) hinzuweisen. Seit dem 19. Jahrhundert wurden viele Talsperren besonders in den Gebirgsregionen und dort, wo

die Geländebedingungen es ermöglichten, ausgebaut. Die größten Talsperren befinden sich an der Moldau, Eger und Saale. Im Allgemeinen haben die Maßnahmen und Eingriffe zu einem beschleunigten Ablauf von Hochwasserereignissen geführt, was eine potenzielle Verschärfung der extremen Situationen bedeutet. Über die Einflüsse der Talsperren auf die jährlichen Hochwasserabflüsse wird in den Kapiteln 2.7.4 und 4.11 berichtet.

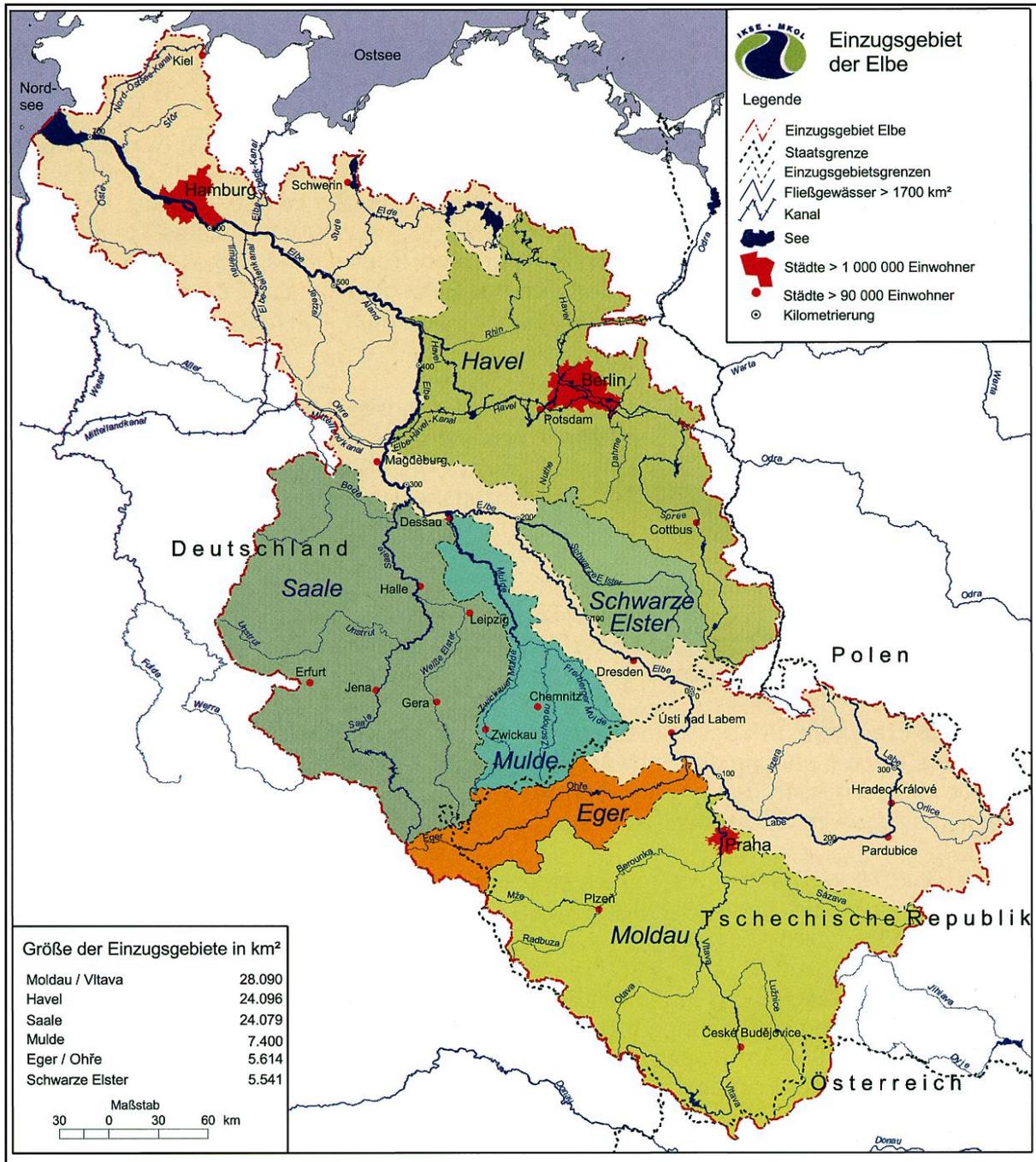


Abbildung 2.1: Eine Übersichtskarte des Elbeinzugsgebiets und ihrer wichtigsten Zuflüsse und Teil-einzugsgebiete (Quelle: IKSE 2004 und BfG)

## **2.3 Stand des Wissens im Elbeeinzugsgebiet im Hinblick auf das internationale Hochwassermanagement**

Ein ausführliches Wissen über die großskaligen hydrologischen Prozesse einerseits und der Beobachtungen andererseits, im Elbeeinzugsgebiet, ist eine wichtige Voraussetzung und gleichzeitig ein Ausgangspunkt für die Untersuchung der Hochwasserschutzmaßnahmen mittels steuerbaren Rückhalts. Dieses Vorhaben erfordert die Suche nach den Erfahrungen und Methoden auch von anderen Einzugsgebieten, wo sie bereits erfolgreich angewendet wurden. Nach der Zielsetzung dieser Arbeit, die am Anfang des ersten Kapitels angesprochen wurde, müssen die Informationen über die historischen sowie gegenwärtigen Extremereignisse detailliert betrachtet werden, um alle Aspekte, Auswirkungen und Folgerungen richtig verstehen zu können. Erst danach wurden die darauffolgenden durchgeführten Studien, Maßnahmen, Forschungsarbeiten recherchiert. Informationen über existierende Retentionsmaßnahmen, die in anderen Einzugsgebieten eingerichtet wurden, sind für diese Arbeit von Vorteil. Damit wurden Kenntnisse z.B. von den Havel- oder Rheinpoldern herangezogen, soweit sie verfügbar sind.

Als nächster Schritt zur Erweiterung des Informationsstands, der eine unverzichtbare Voraussetzung für diese Arbeit darstellt, ist eine gezielte Recherche der zahlreichen durchgeführten Arbeiten mit ähnlicher Thematik, erarbeitet von der fachlichen Öffentlichkeit und von Experten.

Anfang der 90er Jahre wurde von der Bundesrepublik Deutschland und der Tschechischen Republik die Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE) gegründet, um die Wassergüte der damals stark verschmutzten Elbe sowie die Kommunikation bezüglich der Abflussvorhersage zu verbessern. Die Aufgabe dieser Organisation ist vor allem Initiierung und Koordinierung gemeinsamer Problemstellungen. Sie ermöglicht eine internationale Kommunikation insbesondere bei den bilateralen deutsch-tschechischen Lösungen sowie im Rahmen der Europäischen Union (EU). Von dieser Kommission wurden zahlreiche Literatur und Berichte, die hier oft zitiert sind, veröffentlicht. Die Mitglieder sind vor allem Experten von Behörden und Organisationen wie z.B. Staatsbetriebe Povodí Ohře, Vltavy und Labe, Umweltministerium der ČR, Tschechisches Hydrometeorologisches Institut (CHMU), Wasser- und Schifffahrtsämter (WSA), Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Deutscher Wetterdienst (DWD), Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW), Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG) und andere.

### **2.3.1 Wetter- und Abflussvorhersage**

Die Zuverlässigkeit der Wetter- und Abflussvorhersage stellt eine Herausforderung der Forschungsgruppen und der zuständigen Behörden der Meteorologen und Hydrologen dar. Es ist eine wichtige Basis für die Entwicklung und die Funktion des operationellen Hochwassermanagements sowie für die Planung von Schutzmaßnahmen. Im Rahmen des Hochwassermanagements wurde ein Frühwarnsystem eingeführt, um die Betroffenen möglichst lange vor dem kommenden Hochwasserereignis informieren zu können.

Die Wettervorhersage wird mit Hilfe numerischer Modelle durchgeführt, mit dem Ziel die atmosphärischen Prozesse zu simulieren. In der Tschechischen Republik wird das französische Modell ALADIN bei dem CHMU eingesetzt und betrieben, um die kurzfristige Wettervorhersage (neben anderen zeit-

lichen und räumlichen Niederschlagssummen) simulieren zu können. Die Wettervorhersage in Deutschland wird vom DWD mittels des Globalen Modells Europas (GME), das durch schrittweise Runterskalierung und Nesting lokal feiner ausgelöst werden kann, gewährleistet. Die beiden Wettervorhersagen werden um die Ergebnisse des Wettermodells des Europäischen Zentrums für Mittel- und Langfristvorhersage (ECMWF) in Großbritannien ergänzt.

Die Abflussvorhersage genauso wie die Wettervorhersage in der Tschechischen Republik wird durch CHMU gewährleistet. Dafür wurde ein operationelles komplexes Vorhersagemodell entwickelt, AquaLog, dessen Komponenten auf amerikanischen Niederschlag-Abfluss-Modellen wie z.B. SAC-SMA, Snow-17 basieren. Die Simulation der Speicherung in den Talsperren wird mit dem dafür entwickelten Modell sMAN und der Wellenablauf im Gewässernetz mit dem Muskingum-Verfahren durchgeführt. Die lokale Auswertung der Wasserstände wird mit dem hydrodynamischen Modell HEC-RAS ermittelt.

Die Abflussvorhersage in Deutschland, die von der Niederschlag-Abfluss-Simulation des Abflussprozesses der deutschen Teileinzugsgebiete durchgeführt wird, liegt in der Kompetenz der Behörden der einzelnen Länder. Eine Abflussvorhersage der Elbe wird vom Modellsystem ELBA ermittelt, das im Grunde dem Translations-Diffusions-Ansatz entspricht. Es wurde in den 80er Jahren als Zentralmodell Elbe (Güthlein 1980) entwickelt, und wird von der BfG betrieben. Heutzutage wird dieses Modell nicht mehr weiter entwickelt, sondern wurde durch das hydrologisch-hydraulische Wasserstands-Abflussvorhersagemodell WAVOS ersetzt. Die Reaktion des Einzugsgebiets in Sachsen wird mit dem Modell KALYPSO (Björnsen 2010) simuliert. Die Niedrig- und Mittelwasserstände der Elbe von Ústí nad Labem bis Boizenburg werden durch WSA Magdeburg vorhergesagt. Eine Hochwasservorhersage wird von den jeweiligen zuständigen Landesbehörden wie z. B. dem Landeshochwasserzentrum des Freistaates Sachsen (LHWZ), der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) des LHW sowie durch WSA durchgeführt. Für Simulationen und Nachberechnungen des Niederschlag-Abfluss-Prozesses wurde ein stochastisches konzeptionelles Blockmodell für das Zwischeneinzugsgebiet Dresden – Aken am IWG (Helms 2008) entwickelt.

### **2.3.2 Internationale Vorhersage im Elbegebiet**

Die internationale Abflussvorhersage zwischen der Tschechischen Republik und Deutschland wird mittels der Kommunikation zwischen der CHMU und der Hochwasserzentrale der WSA Magdeburg sowie der LfUG (Sachsen) und LHW (Sachsen-Anhalt) sichergestellt, wobei die Vorhersagen mit den oben genannten Systemen durchgeführt werden. Daneben wird das Europäisches Hochwasserfrühwarnsystem (European Flood Alert System - EFAS), das von der EU-Forschungsstelle in Ispra in Italien (JRC) entwickelt wurde und für viele Einzugsgebiete in Europa eingesetzt werden soll, getestet. Das Modell wird von den Simulationsläufen der Wettervorhersagen von DWD und ECMWF gespeist. Die Ergebnisse dieser Vorhersage werden als Gefahrenkarten mit der zeitlichen Entwicklung der Alarmwarnstufen entlang der betroffenen Flüsse dargestellt. Die Abflüsse insbesondere in den großen europäischen Einzugsgebieten werden mit dem Modell LISFLOOD mit einer räumlichen Verteilung 1 x 1 km berechnet (Thielen 2009).

### 2.3.3 Beiträge zur Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen

Ein bedeutender Teil des Hochwassermanagements neben der Hochwasservorhersage ist der Hochwasserschutz, der von zweierlei Art sein kann. Eine Möglichkeit ist der Schutz gegen Flutung und hohen Wasserstand mittels der technischen, oft lokalen Hochwasserschutzmaßnahmen – Hindernissen. Dies sind z.B. Deiche, mobile Schutzwände, Sandsäcke usw., die aber anfällig für ein Versagen sind. Mit solchen Maßnahmen wird das Risikopotenzial durch höheren Wasserstand und mögliches Versagen mit der Folge einer unkontrollierbaren schnellen Flutung erheblicher. Die zweite Art des Hochwasserschutzes ist ein Eingriff in das Ereignis an sich. Es wird versucht, einen Teil des Ereignisvolumens im Gebiet zurückzuhalten oder zu verzögern, den Scheitelabfluss durch Retentionsmaßnahmen und geeignete Steuerung zu reduzieren. Die Planung und Vorbereitung von Hochwasserschutzmaßnahmen erfordert sowohl detaillierte Kenntnisse über die historischen Hochwasserereignisse einschließlich ihrer Auswirkungen und Rekonstruktionen mit vorhandenen Modellen, als auch über die bisherigen Arbeiten und Maßnahmen. Die physikalischen Gegebenheiten für den Fall eines Ereignisses im Einzugsgebiet müssen schon vor der Planung ausführlich erfasst werden, nur so können alle Aspekte bei der Simulation bzw. Vorhersage des Ablaufs bei einem künftigen Extremereignis berücksichtigt werden. Eine entscheidende Fragestellung zur Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen ergibt sich aus der Größe des Bemessungshochwasserabflusses.

Hier werden nur die Maßnahmen im Hinblick auf die Steuerungsstrategie beschrieben, die mit diesen Fragestellungen thematisch zusammenhängen. Die Havelniederung ist von dem Elbehochwasser mit Deichen und Wehr Neuwerben geschützt, und im Fall eines extremen Hochwasserereignisses insbesondere an der Elbe kann diese Niederung mit 6 Poldern mit dem gesamten Speichervolumen von bis zu 250 Millionen m<sup>3</sup> für die Scheitelkappung der Elbe geflutet werden. Dieses System der Polder wurde bereits in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts im Havelbereich eingerichtet, und wurde während des Ereignisses vom 2002 zum ersten Mal in seinem Zweck genutzt. Dadurch konnte man eine Qualifizierung der Handlungen zum operationellen Betrieb hin ermöglichen (Bronstert 2004, WASY 2006). Für die Vorhersage des Füllungsprozesses des Poldersystems wurde das von Kranawetterreiser entwickelte Kappungsmodell des LHW angewendet (Kranawetterreiser 2002). Hochwasserdämpfende Wirkung dieses Poldersystems wurde für das Hochwasserereignis vom August 2002 von (Bronstert 2004) mit dem neu entwickelten konzeptionellen „Gekoppelten-Speicher-Modell“ (GSM) überprüft. Das Modell besteht aus miteinander gekoppelten Speichern und wird aus drei Objekttypen (Speicher, Speicherverbindungen und Randbedingungen) gebildet (Bronstert 2004). Die Parametrisierung und Kalibrierung erfordert langzeitbeobachteten Daten, die aber erst seit August 2002 aufgezeichnet wurden.

Die Gesellschaft WASY hat die Polderflutung mit dem hydrodynamischen Modell MIKE 11, mit dem instationären 3D-Grundwassermodell FEFLOW sowie mit der Kopplung dieser Modelle mit IFMMIKE 11 untersucht. Die in dieser Arbeit beschriebenen Polder wurden von (Lindenschmidt 2007) bezüglich ihrer steuerbaren Füllung mit einem hydrodynamischen 1D und 2D Einsatz DYNHYD überprüft.

Ähnliche Retentionsmaßnahmen wurden ebenfalls entlang des Rheins in Elsas, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen nach den extremen Hochwasserereignissen der 90er Jahren entworfen und gebaut. Als Beispiel wird hier eine Gutachtung (Göbel 1997) des deutlich kleineren Polders Grietherbusch (maximale Fläche 12 km<sup>2</sup>) am Niederrhein erwähnt, wo der Füllungspro-

zess mittels des hydrodynamisch numerischen Modells CARIMA und mittels eines zweidimensionalen Strömungsmodells analysiert wurde.

Aus der o.g. zitierten Literatur und durchgeführten Studien bezüglich der Poldersteuerungsstrategie ist zu erkennen, dass nur das „Gekoppelte-Speicher-Modell“ einen Einsatz bietet, der nicht die hydrodynamisch detaillierte rechnerische Analyse der Flutung anwendet. Andererseits muss deutlich betont werden, dass die hydrologischen Einsätze über Grenzen ihrer Anwendungen verfügen, dadurch können ihre Ergebnisse als Randbedingungen für eine nächste detaillierte hydrodynamische Untersuchung gehalten werden.

Die Planung der Hochwasserschutzmaßnahmen erfordert ebenfalls ein umfangreiches Wissen über den Abflussprozess als physikalisches Geschehen im Einzugsgebiet, insbesondere während extremer Situationen. Zeitliche Abflussvariabilität und –verhalten anhand der historischen Ereignisse sind ein unvermeidbarer Bestandteil aller Untersuchungen zur Planung heutiger und künftiger Maßnahmen. Zahlreiche hydrologische Untersuchungen zum Abflussprozess im Elbeeinzugsgebiet wurden im Rahmen des Verbundprojektes „Morphodynamik der Elbe“ (Nestmann und Büchele 2002) ausgearbeitet und ausführlich dokumentiert. Mit dieser Studie wurden qualitative Analysen der deutschen Elbepegel durchgeführt, um die statistischen Kennwerte der Abflussreihen bestimmen zu können. Die Abflusssdynamik während des beobachteten Zeitraums wurde ebenfalls untersucht, um die möglichen langfristigen Änderungen im Prozess identifizieren zu können. Viele der Analysen wurden mithilfe des Softwarepakets des IWG „Hochwasserstatistik“ (Ihringer 1999) untersucht. Neben der Bestimmung der statistischen Kennwerte der Abflussreihen, wie z.B. der jährlichen Abflüsse HQ und der mittleren Abflüsse MQ, wurden die Jahre der signifikanten Änderung der Abflüsse durch die Doppelsummenanalyse ermittelt. Mit den statistischen Untersuchungen wurden die Gruppierungseffekte in den Reihen ermittelt, sowie ein Erkennen des Tendenzmittels der Trendanalyse bestrebt. Diese Ansätze wurden auch im Rahmen dieser Arbeit angewendet. Mit den statistischen Analysen werden beobachtete und extrapolierte HQ-Werte in die Wiederkehrintervalle bestimmter Jährlichkeit zugeordnet, die für die Definition des Bemessungshochwassers relevant sind und deren Ergebnisse lokal an bestimmten Pegeln oder oft in den Längsschnitten dargestellt werden. In den Längsschnitten lassen sich ebenfalls mögliche systematische Fehler im Abgleich mit den benachbarten Pegeln identifizieren.

Ein Teil des bereits abgeschlossenen Projektes „Morphodynamik der Elbe“ hat sich der oft diskutierten Deichrückverlegung, hinsichtlich des Abflussprozesses während eines Hochwasserereignisses, gewidmet. Die unterschiedlichen Auswirkungen auf den Abflussprozess in Gerinne und Ausuferungsbereich zwischen der Deichrückverlegung und den steuerbaren Poldern werden im nächsten Kapitel 2.4 und auf der Abbildung 2.2 erläutert. Es wurde nachgewiesen, dass durch eine Deichrückverlegung nur eine vernachlässigbare Abflussscheitelkappung erreicht werden könnte.

Viele wissenschaftliche Beiträge und Untersuchungen wurden im Rahmen des deutschlandweiten Verbundprojektes des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) „Risikomanagement extremer Hochwasser“ (RIMAX) durchgeführt. Damit konnten insgesamt 38 voneinander unabhängige Projekte bezüglich der extremen Hochwasserereignisse ausgearbeitet werden. So wurden z.B. die historischen Daten herangezogen und für heutige Aufgaben weiterverwertet (Bürger 2006, Grünwald 2007). Die Erkenntnisse über die Abflussbedingungen und –geschehen der Vergangenheit sollen Ableitungen und Definitionen für heutige und zukünftige Extremereignisse unterstützen. Viele der

Projekte fokussierten operationelles Hochwassermanagement insbesondere im Hinblick auf die Verbesserung der meteorologischen und hydrologischen Vorhersagen sowie der lokalen Wasserstandsvorhersage (Bronstert 2008, Disse 2008). Das Projekt „Operationelles Hochwassermanagement in großräumigen Extremsituationen am Beispiel der Mittleren Elbe“, welches von IWG und Partnern ausgearbeitet wurde, stellt eine Prozesskette der Forschungsdisziplinen dar, die ein extremes Hochwasserereignis und seine Auswirkungen mit Fokus Meteorologie über Hydrologie und hydrodynamische Simulationen bis hin zur lokalen Standsicherheit der Deiche analysiert (Nestmann, 2008). Insbesondere von Meteorologie und Hydrologie wurden möglichst extreme Szenarien anhand der physikalisch möglichen Situationen und historischen Beobachtungen definiert und anschließend über die ganze Prozesskette simuliert.

## **2.4 Hochwasserschutzmaßnahmen mittels der steuerbaren Rückhalteräume und der natürlichen Retention**

Die Havelpolder sowie Deichbrüche während des Ereignisses von 2002 haben eine positive hochwasserdämpfende Wirkung auf den Hochwasserverlauf, vor allem auf den Scheitel, gezeigt. Mehrere Informationen folgen in Kapitel 4.9. Dies war der Anlass, diese Idee auch in Sachsen-Anhalt zu folgen und zu untersuchen. Die hier beschriebenen Untersuchungen zur Beeinflussung bzw. Minderung der extrem hohen Abflüsse eines Ereignisses beziehen sich auf steuerbare Rückhalteräume d.h. (Not)Polder und Talsperren. Der Begriff (Not)Polder wurde im Kapitel 2.1 erklärt, hier wird die Funktionsfähigkeit im Gegensatz zur Deichrückverlegung oder der nichtsteuerbaren Poldern mit Hilfe Abbildung 2.2 erläutert. Die Notpolder sind nur für extreme Ereignisse (ab HQ größer 100 Jahre) vorgesehen, sodass die mit Deichen abgegrenzte Fläche bei normalen Fällen landwirtschaftlich oder anders benutzt werden kann.

Wenn der Elbewasserstand, der vom Abfluss abhängig ist, steigt, wird der Rückhalteraum des Polders entweder durch die Öffnung eines Einlaufbauwerks oder durch die Deichsprengung in Abhängigkeit zur Vorhersage normalerweise erst kurz (einige Stunden) vor dem Eintreten des Hochwasserscheitels geflutet, damit ein optimaler hochwasserdämpfender Effekt auf die Elbewelle erreicht werden kann. Während der Wasserstand der Elbe steigt, bleibt das Einlaufbauwerk geschlossen und der Rückhalteraum bleibt leer bis zum Zeitpunkt des Öffnens, wobei die Entscheidung zur Flutung von dem vorhergesagten Abfluss abhängig ist. Dieses erfordert eine noch vor der Flutung vorbereitete Steuerungsstrategie – einen Steuerungsplan. Durch die Rückhaltung des Ereignisvolumens im Polder während des Scheitelauftritts und dadurch eine Aufspaltung des Durchflusses wird eine Scheitelkappung (im Grunde eine Abflussspaltung) bestrebt. Ein Sonderfall der unkontrollierbaren Polderflutung kann mittels der überströmbaren Dämme realisiert werden, die aber bis jetzt nur an kleineren Poldern oder Rückhaltebecken eingerichtet wurden, letzteres ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

In den letzten Jahren wird im Zusammenhang mit Renaturierungsmaßnahmen oft die Möglichkeit einer Deichrückverlegung diskutiert, um den Flüssen ihre natürlichen Retentionsräume zurückgeben zu können (Merkel 2002, Helms 2002). Über die Auswirkung der Eindeichungen (der Verlust der natürlichen Speicherung) auf das Hochwasser wird z.B. mehr in (Heilig 2000) berichtet. Mit der Deichrückverlegung wird eine Entfernung der bestehenden Deiche und Einrichtung neuer, weiter vom Elbelauf entfernter Deiche verstanden. Damit könnte neuer Retentionsraum geschaffen werden, wo der Wasserspiegel im Ausuferungsbereich gleichzeitig mit dem Elbewassersstand steigt, wie im Prinzip

bei einer natürlichen Seeretention, siehe Abbildung 2.2a. Dies hat nach (Merkel 2002) vor allem eine verzögernde Wirkung auf den Wellenablauf mit lokaler Wasserstandreduzierung und vernachlässigbarer Abflusssdämpfung. Diese Maßnahmen würden einen großen Aufwand sowie erhebliche Landnahmen erfordern, weshalb die lokalen (Not)Polderstandorte von den betroffenen Kommunen bevorzugt werden.

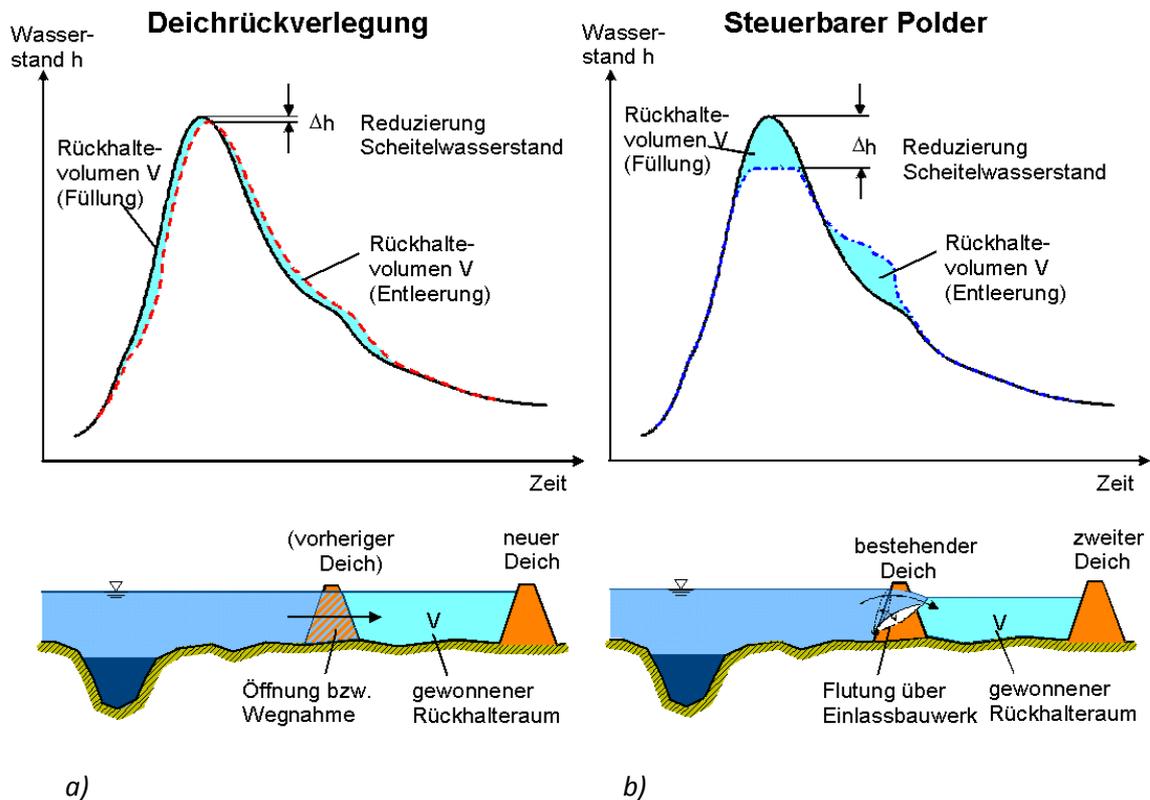


Abbildung 2.2: Unterschied zwischen einer Deichrückverlegung (a) und steuerbaren Poldern (b) auf den Hochwasserverlauf. Oben sind die von den ungesteuerten (a) und gesteuerten (b) Retentionsmaßnahmen beeinflussten Wasserstandganglinien dargestellt (Quelle Büchele).

Im Einzugsgebiet der Elbe wurden zahlreiche Talsperren zu mehreren Zwecken und Aufgaben gebaut. Die wichtigsten Aufgaben der größten Talsperren sind die Abflussbereicherung in den Trockenperioden, damit ein entsprechender erwünschter minimaler Abfluss für Industrie und Bewässerung sichergestellt werden kann, wie auch die Energieerzeugung durch Wasser. Erst danach kommt die Aufgabe, den Hochwasserschutz zu gewährleisten. Über die Auswirkungen auf den Hochwasserverlauf und jährliche Hochwasserabflüsse wird im Kapitel 4.11 sowie in der Talsperrenstudie (MŽP 2005) näher eingegangen. Jede Talsperre ist mit den steuerbaren Auslässen und Sicherheitsüberfällen ausgerüstet. Die Höhenabgrenzung des Speichervolumens jeweiliger Zwecke (Energieerzeugung, Abflussbereicherung, Hochwasserschutz) und der sogenannte schadhlose Ausfluss während eines Hochwasserereignisses sind im Steuerungsplan jeder Talsperre definiert. Die detailliert beschriebenen Stauraumkennwerte der Talsperren sind beispielsweise in Literatur (Dyck 1976) zu entnehmen. Die zeitliche Errichtung der Talsperren sowie der Stauhaltungen und vor allem deren Volumen ist in Abbildung 2.3. dargestellt.

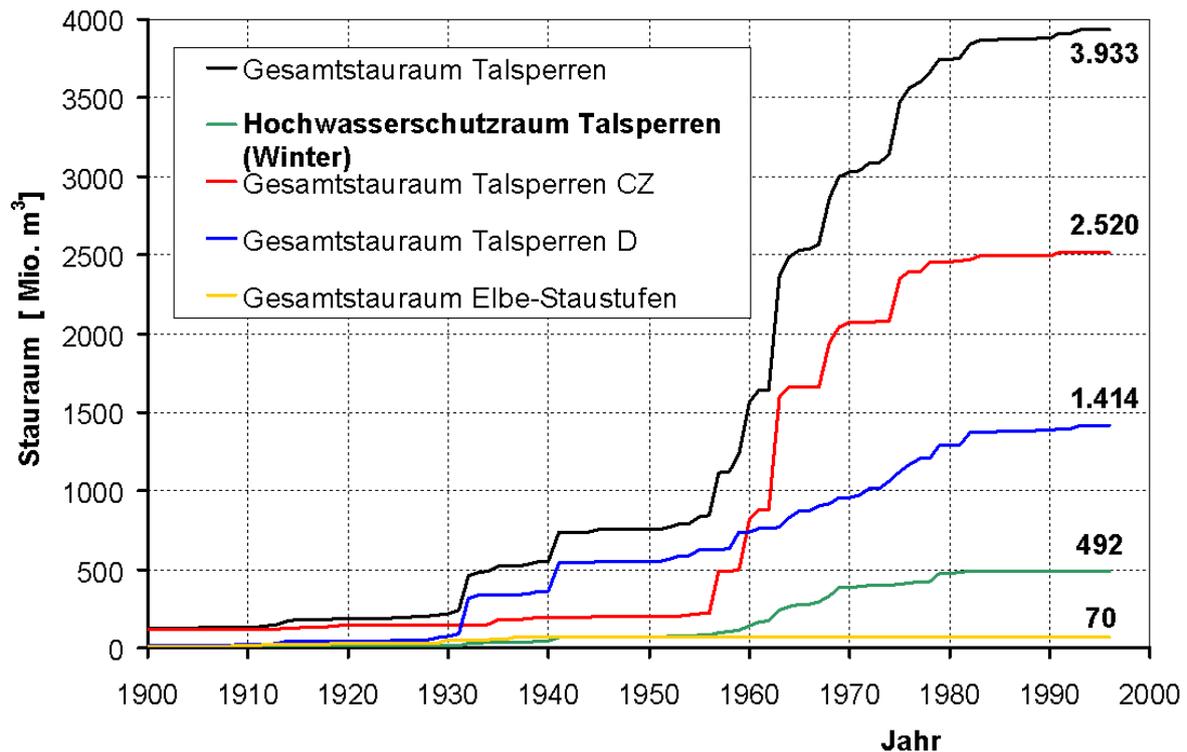


Abbildung 2.3: Zeitliche Entwicklung der Volumina der Stauräume der Talsperren (Quelle IKSE 1996 und Nestmann 2002). Der große Sprung in 1963 deutet auf die Inbetriebnahmen der größten Talsperre Orlik an der Moldau hin.

## 2.5 Daten, Arbeitsgrundlagen und Datenanalysen

Die Aufgaben dieser Arbeit konnten nur mit Hilfe unverzichtbarer Daten wie z.B. hydrologischen Daten, raumbezogenen Informationen und Charakteristika von wasserwirtschaftlichen Objekten (Talsperren, Wehranlagen) durchgeführt werden, die von verschiedenen Institutionen und Behörden sowie von den parallel zu dieser Dissertation laufenden ähnlichen Projekten bereitgestellt wurden. Für diese Arbeit wurden ebenfalls Ergebnisse und Informationen anderer Studien, Projekte und Erfahrungen und lokaler Kenntnisse von zuständigen Fachleuten und Beamten herangezogen.

### 2.5.1 Hydrologische Daten – Zeitreihen

Eine zeitliche Diskretisierung der angewendeten Daten ist von der Bestimmung ihrer weiteren Nutzung abhängig. Für die Untersuchung der langfristigen Abflussdynamik wurden Tages- und mittlere Jahresabflüsse angewendet. Für die Simulation des Flood-Routings-Prozesses im Gerinne wurden die Tagesabflüsse herangezogen, wobei für die Modellparameterermittlung beobachtete bzw. abgeleitete Daten in feinerer Auflösung (im 1-Stunden oder im 6-Studenschritt) erhoben wurden.

### **2.5.1.1 Daten im Tagesschritt**

Die Abflüsse gelten als die wichtigste physikalische Größe, mit der die hydrologischen Prozesse simuliert und die Vorhersagen durchgeführt werden. Die Abflüsse sind in diesem Fall nicht direkt messbare Größen, sondern müssen von einer Abflusskurve (Wasserstand-Abfluss-Beziehung) jeweiliger Pegel ermittelt werden, die von den Durchflussmessungen im Gerinne erstellt werden. Die Datenauswahl entspricht dem Vorhaben dieser Dissertation. Wie bereits erwähnt, wurde eine großräumige Wirkung der kombinierten Retentionsmaßnahmen der Notpolder vor allem in Sachsen-Anhalt und der Talsperren in den oberen Elbeteileinzugsgebieten auf extreme Hochwasserereignisse untersucht. Zum Teil folgt ebenso eine langfristige Abflussdynamik im Einzugsgebiet. Für diese Aufgaben wurden beobachtete Abflüsse nicht nur der extremen Ereignisse, sondern möglichst in den gesamten Messzeiträumen von 35 ausgewählten Pegeln erhoben; die verfügbaren Daten der ausgewählten Pegel sind in der Übersichtskarte 2.4 dargestellt und in der Tabelle 2.1 sind die Quellen der Daten mit verfügbaren Messzeiträumen zusammengefasst. Die Abflussdaten der tschechischen Pegel (der Elbe, Moldau, Lužnice, Otava, Berounka, Sázava, Jizera und Ohře) wurden von dem Tschechischen Hydrometeorologischen Institut in Prag (CHMI) bereitgestellt. Die Abfluss- und Wasserstandsreihen der deutschen Elbepiegel und ihrer Zuflüsse wurden von der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz (BfG) in Zusammenarbeit mit den Wasser- und Schifffahrtsämtern in Dresden und Magdeburg erhoben. Teilweise wurden die Daten und deren Analysen vom abgeschlossenen Projekt „Morphodynamik der Elbe“ herangezogen. Die meisten Abfluss- und Wasserstandswerte im Tagesschritt sind für die hier beschriebenen Dissertationsvorhaben ausreichend, besonders für die großräumige und langfristige Betrachtung der Abflussdynamik. Für eine lokale Untersuchung der Notpolderflutung sowie der Parameteroptimierung des Flood-Routing-Einsatzes hat sich gezeigt, dass die Werte im Tagesschritt nicht ausreichen, um einen erfolgreichen und detaillierten Prozess besonders bei Hochwasserereignissen analysieren zu können. Dafür wurden nachträglich die Abfluss- und Wasserstandsreihen in der feineren Diskretisierung im 6-Stunden-, 1-Stunden- und im 15-Minutenschritt herangezogen. Die Abflussreihen wurden schrittweise je nach Bedarf und Stand der Arbeit in digitaler Form soweit verfügbar erhoben.

Eine besondere Art der Daten, die hier genutzt wurden, sind historische Wasserstände und Abflüsse der Hauptpegel der Elbe und ihrer Zuflüssen, die teilweise für die Verlängerung der vorhandenen digitalen Reihen benutzt wurden. Solche Daten wurden aus den preußischen, österreichischen und böhmischen historischen hydrologischen Jahresbüchern der verschiedenen Bibliotheken sowie Archive in Deutschland und Tschechien kopiert und folglich mit einem Programm (FineReader) teilweise automatisch digitalisiert. Ebenso wurden die handschriftlichen Pegelrapporte der täglichen Wasserstände sowie Stunden- oder 6-Stundenwasserstände einiger Hochwasserereignisse fotografiert und später digitalisiert. Insgesamt wurden etwa 500 Jahre vor allem Wasserstände und Abflüsse digitalisiert. Dadurch ist ein umfangreicher Datensatz entstanden, der für die historische Untersuchung der extremen Ereignisse sowie der lokalen Abflussänderungen von großer Bedeutung ist. Mit dieser Datenerweiterung konnten einige historische Ereignisse rekonstruiert werden.

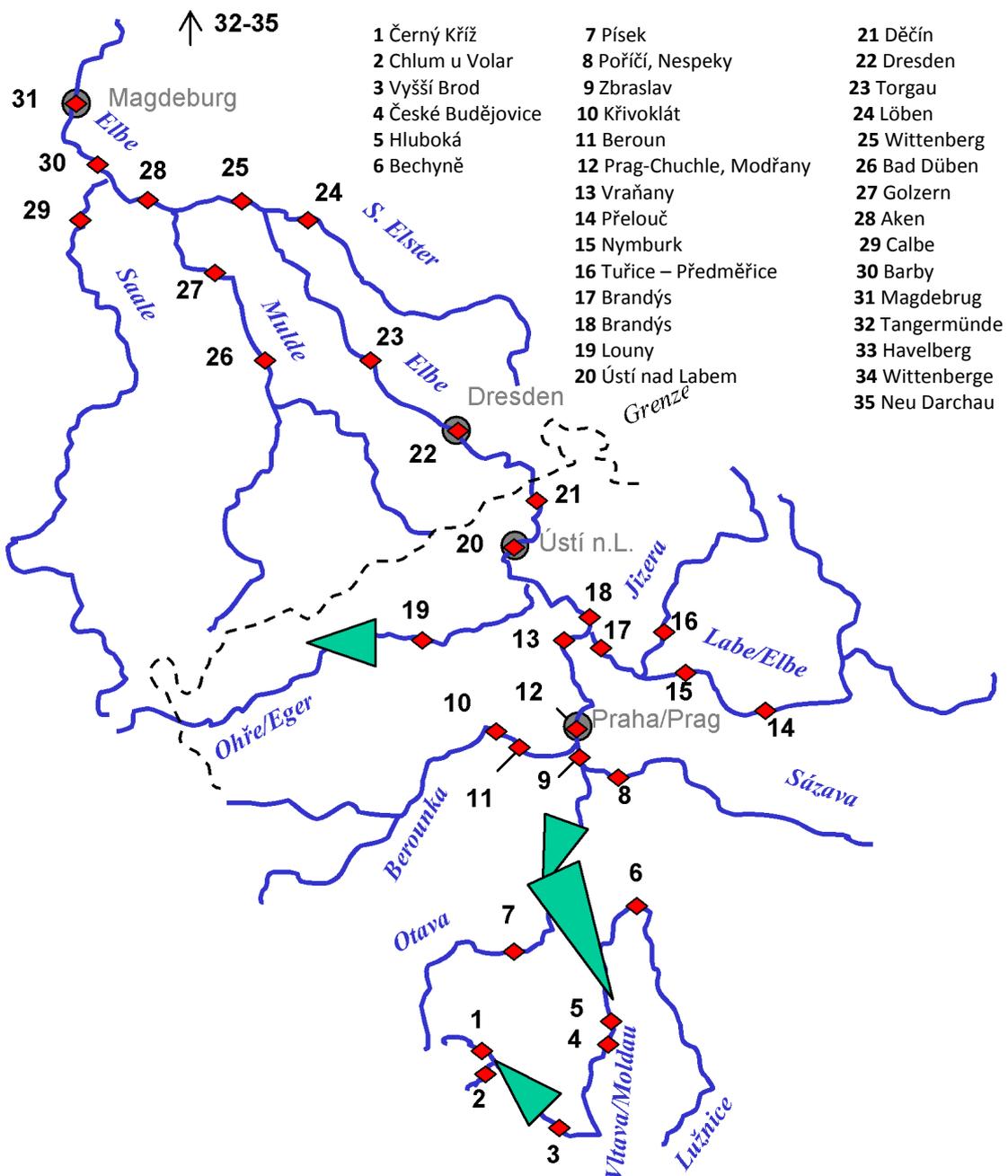


Abbildung 2.4: Übersichtskarte der verfügbaren Abflussreihen von den Pegeln der Elbe und ihrer Hauptzuflüsse sowie der großen Talsperren. Die Nummerierung der Pegel erfolgt nach der Tabelle 2.1. Die Pegel Tangermünde bis Neu Darchau sind nicht hier dargestellt.

Tabelle 2.1: Zusammenstellung der beobachteten täglichen Abflussreihen in m<sup>3</sup>/s von den Pegeln im tschechischen und deutschen Einzugsgebiet der Elbe, die für die Aufgaben der Dissertation verwendet wurden (EZG- Einzugsgebiet in km<sup>2</sup>, CHMI- Tschechisches hydrometeorologisches Institut, BfG- Bundesanstalt für Gewässerkunde), \*) ohne August 2002

Nr.	Pegel	Fluss	EZG-Fläche	Zeitraum	Herkunft
1	Černý Kříž	Kalte Moldau	103	1947-2006	CHMI
2	Chlum u Volar	Warme Moldau	347	1989-2006	CHMI
3	Vyšší Brod	Moldau	997	1911-1920, 1926-2003	CHMI
4	České Budějovice	Moldau	2 848	1989-2006	CHMI
5	Hluboká	Moldau		1941-1991	CHMI
6	Bechyně	Lužnice	4 046	1911-2006	CHMI
7	Písek	Otava	2 913	1912-2006	CHMI
8	Poříčí Nespeky	Sázava	4 038	1912-2001 2002-2006	CHMI CHMI
9	Zbraslav	Moldau	17 827	1941-2006	CHMI
10	Křivoklát	Berounka		1931-1994	CHMI
11	Beroun	Berounka	8 284	1912-1920, 1951-2006	CHMI
12	Prag-Chuchle Prag-Modřany	Moldau Moldau	26 730	1986-2006 1901-1990	CHMI CHMI
13	Vraňany	Moldau	28 057	1983-2006 *)	CHMI
14	Přelouč	Elbe	6 435	1971-2006	CHMI
15	Nymburk	Elbe	9 720	1931-2006	CHMI
16	Tuřice - Předměřice	Jizera	2 158	1911-1999, 1999-2006	CHMI
17	Brandýs	Elbe	13 109	1911-2006	CHMI
18	Mělník	Elbe	41 825	1926-1945, 1971-2006 *)	CHMI
19	Louny	Eger	4 962	1922-2006	CHMI
20	Ústí nad Labem	Elbe	48 540	1940-2006	CHMI
21	Děčín	Elbe	51 123	1888-2006	CHMI
22	Dresden	Elbe	53 096	1853-2006	BfG
23	Torgau	Elbe	55 211	1936-2006	BfG
24	Löben	Schwarze Elster	4 327	1974-2006	BfG
25	Wittenberg	Elbe	61 879	1951-2006	BfG
26	Bad Dübén	Mulde	6 171	1937, 1961-2006	BfG
27	Golzern	Mulde	5 442	1910-2006	BfG
28	Aken	Elbe	69 849	1936-2006	BfG
29	Calbe	Saale	23 719	1932-2006	BfG
30	Barby	Elbe	94 060	1900-2006	BfG
31	Magdeburg- Strom.	Elbe	94 942	1931-2006	BfG
32	Tangermünde	Elbe	97 780	1961-2006	BfG
33	Havelberg	Havel	24 037	1946-2006	BfG
34	Wittenberge	Elbe	123 532	1900-2006	BfG
35	Neu Darchau	Elbe	131 950	1890-2006	BfG

### 2.5.1.2 Daten im Stundenschnitt

Erst später nach der Parameteroptimierung des Flood-Routing-Modells wurde festgestellt, dass die täglichen Abflüsse nicht ausreichend für die weiteren Analysen feiner aufgelöst sind. Dafür wurden die Abflüsse im Stundenschnitt von CHMI von den tschechischen Hauptpegeln (Prag und Vraňany an der Moldau, Mělník und Ústí an der Elbe und von Louny an der Eger) erhoben. Es wurden die beobachteten Stundenabflüsse nur von einigen Ereignissen herangezogen, die im CHMI digital vorliegen, welche normalerweise nicht nach außen zur Verfügung gestellt werden, da es sich um unbereinigte Daten handelt und aus diesem Grund mögliche Fehler in Betracht gezogen werden müssen. Sie gelten als inoffizielle Daten. Die häufigsten Fehler wie z. B. kurzer Ausfall oder falsche Schreibung sowie eine zeitliche Verschiebung wurden gleich in den visuellen Darstellungen gefunden. Diese Fehler wurden durch die lineare Interpolation korrigiert oder richtig verschoben. Da einige Pegel sich unterhalb der steuerbaren Stauhaltungen befinden, die vor den größeren Ereignissen entleert werden müssen, sind die beobachteten Abflüsse durch die kurzen und plötzlichen Manipulationen der Öffnungskonstruktionen sowie der Kraftanlagen stark beeinflusst. Dort, wo dieses Problem signifikant war, wurden die Reihen durch das mehrstündige (z. B. 5-Stunden) gleitende Mittel geglättet. In der Abbildung 2.5 ist ein Beispiel der unbereinigten Stundenabflüsse vom Ereignis 1976 dargestellt. Anderes Problem ist, dass die Stundenwerte nur im Falle vereinzelter Ereignisse der hier im Gesamten betrachteten Pegel digitalisiert wurden. Laut mündlicher Informationen der Mitarbeiter des CHMU werden die Abflüsse und Wasserstände seit 2002 auch im Stundenschnitt archiviert.

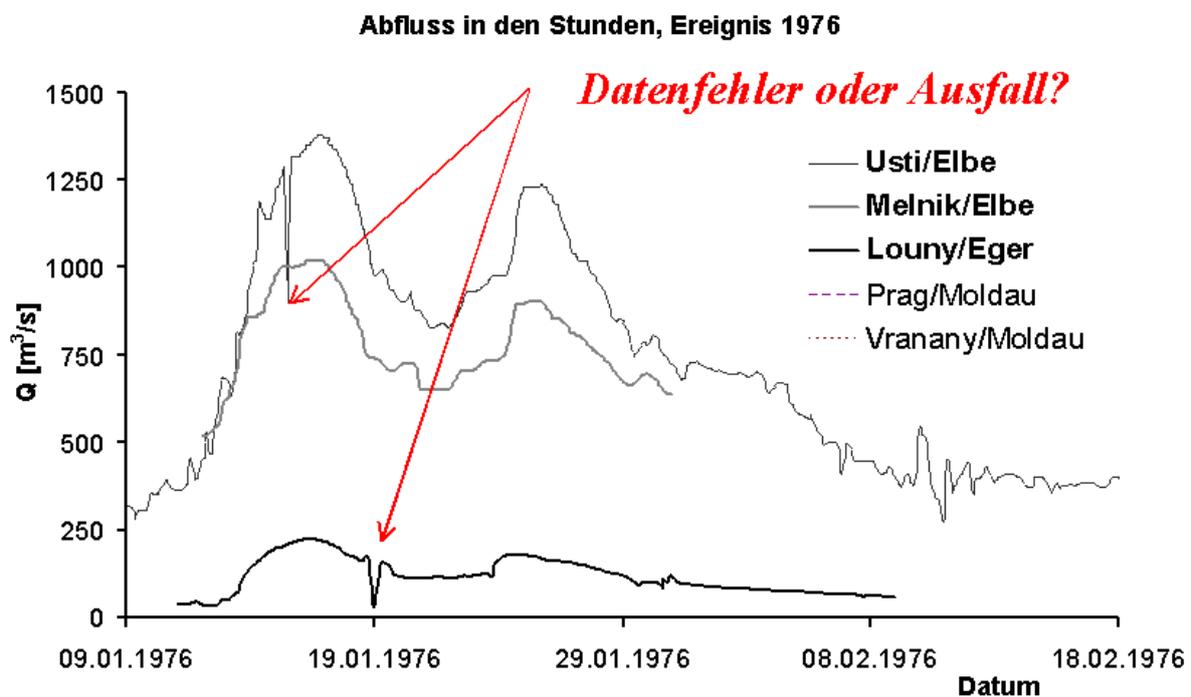


Abbildung 2.5: Ein Beispiel der Abflüsse anhand unbereinigter Daten im Stundenschnitt, ebenfalls mit möglichen Fehlern, in diesem Fall in Ústí nad Labem und Louny während des Ereignisses 1976. Das andere Problem ist, dass die Daten nicht aller Pegeln von einem Ereignis zur Verfügung stehen.

Alle Zeitreihen mussten einer qualitativen Prüfung der Konsistenz unterworfen werden, bevor sie eingesetzt werden könnten, um mögliche Fehler erst zu identifizieren und danach zu eliminieren,

darüber wird im Kapitel 2.6 berichtet. Die verfügbaren Daten sind in der Tabelle 2.1 zusammengestellt. Dadurch wurde untersucht, ob die Daten für weitere Analysen und Anwendungen geeignet sind.

### **2.5.2 Andere hydrologische Daten**

Neben den o.g. Zeitreihen der Wasserstände und Abflüsse wurden für mögliches Korrigieren der Daten die Abflusskurven der jeweiligen Elbepegel herangezogen. Diese Abflusskurven - auch Wasserstand-Abfluss-Beziehung genannt - wurden von BfG bereitgestellt und sie deuten auf eine zeitliche Variabilität und Entwicklung eines Messprofils des Gerinnes hin. Deren Anwendung wurde mittels der hydrometrischen historischen und gegenwärtigen Durchflussmessungen überprüft.

Zur besseren und zeitlich feineren Erfassung des Verlaufs ausgewählter Ereignisse wurden zusätzlich handschriftliche Terminabflüsse und -wasserstände vom tschechischen Archiv CHMU herangezogen, soweit sie verfügbar sind. Die Werte sind in unregelmäßigen Intervallen zu bestimmten Zeitpunkten erfasst.

### **2.5.3 Raumbezogene Daten und Karten**

Da diese Dissertationsarbeit mit einer lokalen Untersuchung der Polderwirkung auf den Wellenablauf angefangen hat, wurden die Geoinformationsdaten bzw. die Ergebnisse basierend auf diesen Daten vom parallel laufenden BMBF-Projekt „Morphodynamik der Elbe“ (Nestmann 2002) benutzt. Es handelt sich um eine orthogonale Punktedatei mit dem Abstand 10 x 10 m und gegebener Punktehöhe. Damit wurde ein digitales Geländemodell (DGM) zwischen der Landesgrenze Sachsen – Sachsen-Anhalt und dem Pegel Aken mit der GIS-Software ArcView und ArcGIS der Firma ESRI erstellt. Die fehlenden Höheninformationen wurden mit einer Funktion von ArcGIS interpoliert. Von dem o.g. Projekt (Nestmann 2002) wurden die digitalisierten (Shapes) Daten wie z.B. Landesgrenze, Ortslagen- und Überflutungsflächen vom Ereignis des Jahres 2002 herangezogen. Die maximalen Wasserstände im 100 m Abstand wurden ebenfalls als Shape-Datei bereitgestellt. Für die örtliche Auswahl und Analysen wurden die digitalen topographische Karten im Maßstab 1: 50 000 TOPO50 Sachsen-Anhalt und 22 Blätter der topographischen Karten im Maßstab 1: 10 000 vom Landesamt für Vermessung und Datenverarbeitung Sachsen-Anhalt benutzt.

Für die Analysen bezüglich der Parameteroptimierung und der Abschätzung der großen Ausuferungen entlang der tschechischen Elbe wurde das DGM der Staatsfirma Povodí Labe (Gewässerbetrieb Elbe) in Hradec Králové bereitgestellt. Das Modell besteht aus Einzelpunkten in unregelmäßiger Position und aus den pflichtigen Verbindungslinien zwischen den Punkten. Das DGM beginnt in Brandýs nad Labem und reicht bis an die tschechisch-deutsche Grenze. Als Übersichtskarten der Pegel, Talsperrren und allgemein der Gewässer in der Tschechischen Republik wurden 14 Blätter der topographischen Karten der Tschechischen Republik 1:200 000 vom Herausgeber Český úřad zeměměřický a katastrální (Tschechisches Vermessungs- und Katasteramt) beschafft.

#### **2.5.4 Daten und Informationen zu den Talsperren und Deichen**

Neben dem Geländemodell waren Informationen über die Deiche entlang der deutschen Elbe unvermeidbar. Für dieses wurden Informationen über die Deiche im Rahmen der Polderstudie (Ihringer 2003) mittels LHWs von der Ingenieurgesellschaft Prof. Dr.-Ing. E. Macke mbH Braunschweig-Dessau „Studien zur Bewertung von Zustand und Hochwasserschutzgrad der Elbe- und Muldedeiche“ (Macke 2001) zur Verfügung gestellt. Hier wurden die Höhenangaben der Deiche von Ist-Zustand und geplanter künftiger Situation entnommen, wobei diese Informationen noch vor dem Ereignis 2002 stammen.

Am Anfang dieser Arbeit war die Idee, die hochwasserdämpfende Wirkung besonders der sich an der Moldau befindenden großen Talsperren (Moldauer Kaskade) auch entlang des deutschen Elbelaufs abzuschätzen. Zu diesem Zweck wurden Informationen zu den wichtigsten Talsperrencharakteristika nach der Besprechung mit den zuständigen Mitarbeitern der Staatsfirma Povodí Vltavy (Gewässerbetrieb Moldau) in Prag herangezogen. Die Informationen sind vor allem die Speicherinhaltslinien, die Abflusskurven der Entlastungsbauwerke (Grund- und Hochwasserablässe, Kraftanlagen) sowie die zum Jahr 2003 gültigen Steuerungspläne der Talsperren Lipno, Orlík und Slapy an der Moldauer Kaskade.

#### **2.5.5 Daten und Informationen von anderen Projektergebnissen**

Zu den wichtigen Grundlagen dieser Arbeit gehören Ergebnisse anderer Arbeiten oder Projekte, die diese Arbeit in direkt wirkendem und starkem Zusammenhang beeinflusst hat. Die Erkenntnisse und Erfahrungen der vorliegenden Arbeit konnten teilweise in den Projekten genutzt werden, aber auch umgekehrt. Besonders viele ähnliche Informationen und Methoden wurden von der Polderstudie (Ihringer 2003) eingesetzt. Hier wurden die Hauptcharakteristika der potentiellen Notpolder ermittelt. Vom RIMAX-Projekt (Nestmann 2009) wurden die Werte der simulierten Extremszenarien d.h. die Abflussreihen im 6-Stundenschritt der großskaligen Niederschlag-Abfluss-Modellierung des tschechischen Pegels Ústí nad Labem herangezogen und weiter mit dem Wellenablaufmodell zu den untersuchten Notpoldern geroutet.

Durch diese Arbeit wurde ein Teil der Daten und lokalen Rekonstruktion des Hochwasserereignisses von 2002 und der pegelweisen Untersuchung der Abflusskurven zum Rahmen des BfG-Projekts (Helms 2013) beigetragen. Dadurch ist es zu einem sinnvollen, beidseitigen Informations- und Verfahrensaustausch gekommen.

Neben diesen zwei Projekten, mit denen diese Arbeit teilweise verbunden war, wurden Ergebnisse anderer Projekte angewendet. Ergebnisse der Rekonstruktion der Deichbrüche der Arbeit „Hydrologisch-hydraulische Untersuchungen mit dem Fließstrecken-Retentions-Modell“ (Bjarsch 2003) wurden herangezogen, die später im Rahmen dieser Arbeit noch überprüft wurden. Um die Wirkung der großen tschechischen Talsperren auf die maximalen Jahresabflüsse (Ereignisse) vom 1890 bis 2002 am Pegel Dresden abschätzen zu können, wurden wertvolle Ergebnisse der Talsperrenstudie (MŽP 2005) angewendet. Dadurch wurden Unterlagen für eine homogenisierte Hochwasserstatistik in Dresden abgeleitet, siehe Kapitel 4.11.

Die Zusammenfassung der an diese Arbeit gekoppelten Projekte und Ziele:

- „Einfluss der großen Talsperren im Elbeeinzugsgebiet auf den Hochwasserabfluss“ bearbeitet von MŽP, VUV TGM, CHMU, AquaLog. Hiermit wurden die Talsperreneinflüsse auf HQ simuliert. Die bereitgestellten Simulationsergebnisse der Zeitreihe 1890 – 2002 berücksichtigen zwei Zustände – Abflussprozesse im HQ-Bereich, beeinflusst mit und ohne Talsperren. Davon wurden zwei kontinuierliche Abflussreihen im 6-Stundenschritt der Pegeln Děčín, Ústí nad Labem, Mělník und Prag zur Verfügung gestellt, die weiter für die Ableitung der Unterlagen für eine homogenisierte Hochwasserstatistik verwertet wurden.
- „Untersuchung von Hochwasserretentionsmaßnahmen entlang der Elbe im Bereich der Landkreise Wittenberg und Anhalt-Zerbst: Grundsatzstudie bezüglich der hydrologischen Wirkung“ bearbeitet am IWG. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden mögliche Notpolderstandorte mit Absprache des LHW SA ausgewählt und die wichtigsten Kennwerte ermittelt.
- BMBF-Verbundvorhaben „Operationelles Hochwassermanagement in großräumigen Extremsituationen am Beispiel der Mittleren Elbe“ bearbeitet u.a. von IWG, IMK, CHMU und AquaLogic. Es handelt sich um eine Prozesskette von der Meteorologie, über die Hydrologie und die Hydraulik bis hin zur Deichsicherheit. Vor allem wurden extreme Szenarien im gesamten Einzugsgebiet mittels Modifikationen der Luftmassen vom August 2002 und des Einzugsgebietszustandes und des Niederschlagsinputs simuliert, die weiterhin mit genutzt wurden bei der Notpolderuntersuchung.
- „Überarbeitung der HQ(a)-Reihen und Abflusstafeln der Elbepegel (1890-2006)“, bearbeitet vom IWG. Es handelt sich um die Absicherung der beobachteten und ausgewerteten Wasserstands- und Abflussreihen. Teilweise wurden die Abflussreihen von den neu erhobenen und digitalisierten Wasserständen in die Vergangenheit verlängert. Die historischen Informationen von Archiven und Jahressbüchern wurden auch hier weiterverwertet.

## **2.6 Datenüberprüfung, Konsistenzanalyse und Datenergänzung**

Damit eventuelle Fehler, mit denen die Ergebnisse behaftet könnten, in den gemessenen Zeitreihen ausgeschlossen bzw. erst gefunden werden, wurde eine Konsistenzanalyse der Abflussdaten durchgeführt. Gefundene Inkonsistenzen (Fehler) der Abflussreihen sollten identifiziert werden und möglicherweise durch weitere Analysen unter Heranziehung zusätzlicher Informationen korrigiert oder ergänzt werden. Eine Analyse mit fehlerhaften Reihen könnte zur Verzerrung der Ergebnisse und zu falschen Schlussfolgerungen führen. Ausführliche Beschreibung über die Konsistenzanalyse ist in (Helms 2002) zu finden.

Die in den Reihen möglichen Fehler sind entweder Einzelfehler oder Systemfehler. Die Ursachen der Einzelfehler könnten Schreib- oder Druckfehler bzw. falsche Ablesung oder Messung sein, wobei diese Fehler relativ einfach identifiziert und korrigiert werden können. Eine Art der Einzelfehler kann ebenso ein kurzer Messungsausfall der Station, wie beispielsweise im August 2002 in Mělník, oder eine falsche Zuordnung des Datums sein.

Identifizierung und Behebung der Systemfehler ist aufwendiger, in dem Fall werden die Abflussreihen benachbarter Pegeln durch Ereignisbilanzierung aufeinander abgestimmt. Die andere Identifizierung

der Systemfehler kann mit einem Routing-Verfahren (hier mit dem Translations-Diffusions-Modell) der oberen Abflussganglinie zum unteren Pegel überprüft werden. Ein Grund solcher Fehler kann die Benutzung einer falsch ermittelten oder ungültigen Abflusskurve sein, dafür werden Wasserstandsreihen und Abflussmessungen der Pegel benötigt.

Mehr Erkenntnisse und Informationen über die Behebung der Einzel- und Systemfehler wurden aus dem Projekt (Helms in Bearb.) herangezogen, in dem die Wasserstands- und Abflussreihen der wichtigsten Elbepegel behandelt wurden, hier wurden einige Ergebnisse angewendet.

Im ersten Schritt wurden die Abflussreihen aller Pegel umformatiert und dann als Zeitreihen in Microsoft Excel geplottet, um mögliche Unstimmigkeiten oder Fehler visuell identifizieren zu können. Danach wurden alle Ereignisse zeitlich abgegrenzt und daraus die Ereignisfüllen an den oberen und unteren benachbarten Pegeln errechnet, siehe Abbildungen 2.6 und 2.7.

Die Ereignisfüllen benachbarter Pegel an der Elbe und deren Zuflüssen wurden verglichen, wobei die Ereignisfülle am oberen Pegel kleiner sein muss als die Ereignisfülle am unteren Pegel. Dieses Kriterium wurde fast in allen Fällen erfüllt und dadurch kann angenommen werden, dass die betrachteten Abflussreihen der wichtigen Pegel und Ereignisse plausibel für weitere Anwendungen sind, d.h. die Reihen weisen keine wesentlichen Systemfehler bezüglich der Untersuchung der Hochwasserereignisse auf.

Bereits im Rahmen zahlreicher Studien zur Absicherung der Abflussreihen wurden Unstimmigkeiten der beobachteten Abflüsse zwischen Děčín und Dresden gefunden. Insbesondere bei dem Ereignis von 1890 wurden die Abflüsse im Scheitelbereich in Dresden (Grünwald 2007) und Děčín bzw. in Ústí nad Labem neugerechnet und um  $250 \text{ m}^3/\text{s}$  reduziert.

Durch die Regressionsanalyse, die in der hydrologischen Statistik breit anwendbar ist, werden die Abflussreihen der unteren Pegel unterhalb der Zusammenflüsse zweier Flüsse von den oberen Abflussreihen ergänzt bzw. abgeschätzt. So ist hier ein Beispiel zu nennen - die Abflussreihen von Brandýs an der Elbe und Prag-Chuchle an der Moldau wurden für die Abschätzung der Qualität der Beobachtung der Abflüsse unterhalb des Zusammenflusses am Pegel Mělník geschätzt. Mit dieser Analyse wurden akzeptable Übereinstimmungen der beobachteten Abflusswerte erreicht. Hierbei wurden Nichtübereinstimmungen einiger Hochwasserabflüsse zwischen Ústí nad Labem und Dresden gefunden, wie z.B. 1988 in Ústí nad Labem, der Scheitelwert war um  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  größer als in Dresden, obwohl in Dresden die Ereignisfülle größer als in Ústí nad Labem war, trotz der Tatsache, dass die Talstrecke nur eine vernachlässigbare Wellenabflachung ermöglicht. Dieses Problem würde detaillierteren Untersuchungen mittels der Heranziehung der Wasserstandsreihen in Ústí nad Labem und Abflussreihen von Nebenzuflüssen aus dem Zwischengebiet (Bílina, Ploučnice, Kamenice, Jílovský potok, Gottleuba, Kírnitz, usw.) erfordern, was aber leider nicht gegeben war. Die Abflussdaten (Tageswerte) - außer eventuell des oben erwähnten Problems der unterschiedlichen Scheitelwerte in Ústí nad Labem und Dresden – sind für weitere Analysen und Anwendungen geeignet. Dazu ist es wichtig zu erwähnen, dass die Abstimmung zwischen den zuständigen deutschen und tschechischen Behörden wegen der Abflussunstimmigkeiten der grenznahen Pegel sinnvoll wäre.

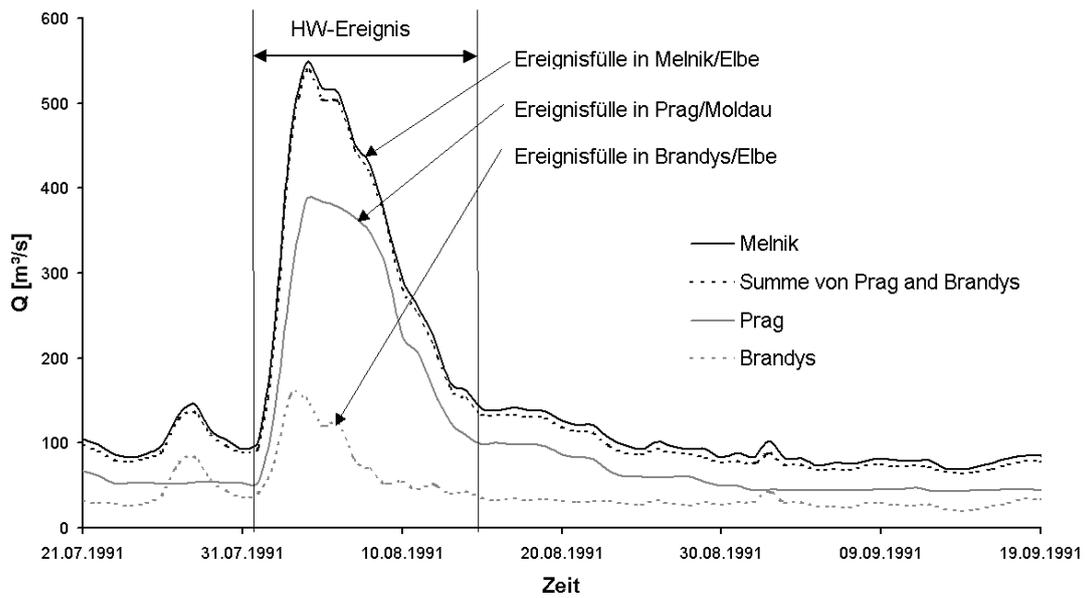


Abbildung 2.6: HW-Ereignisfülle unterhalb des Zusammenflusses Elbe/Moldau in Mělník

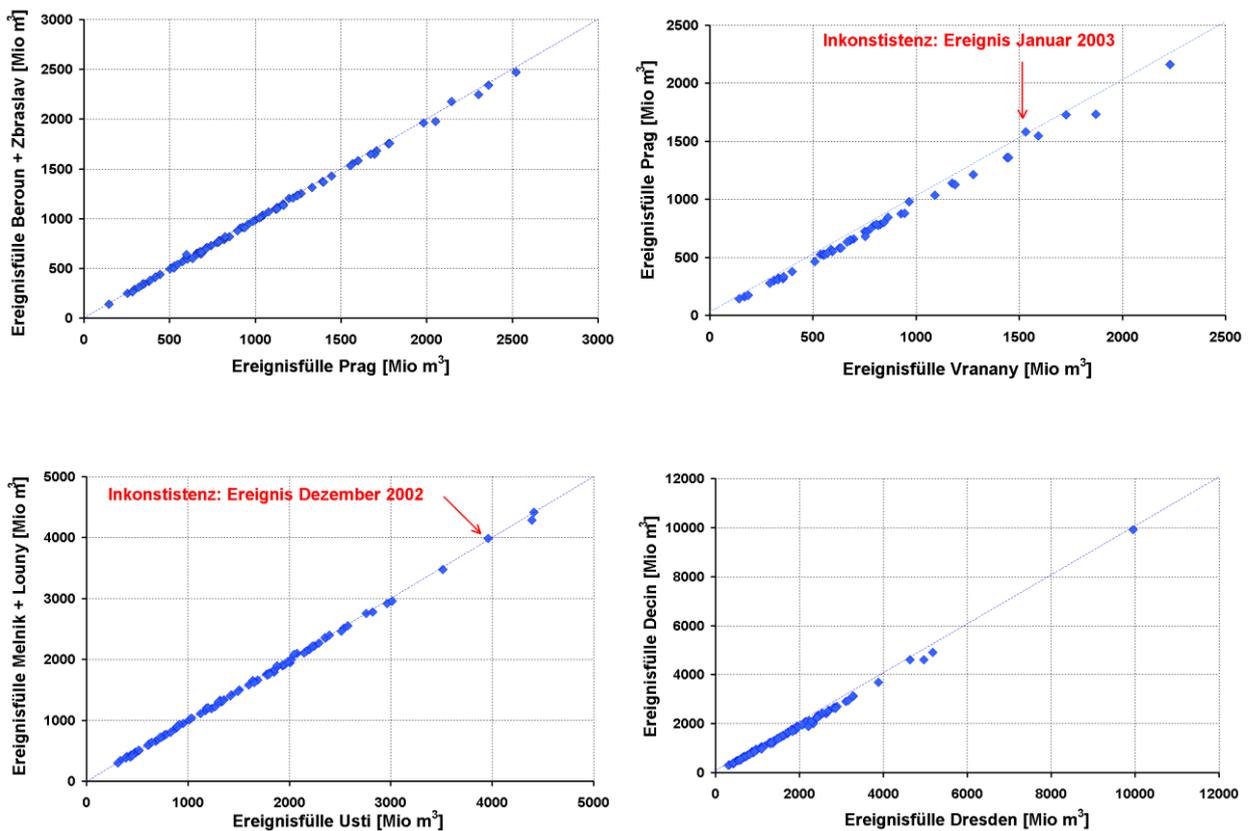


Abbildung 2.7: Gegenüberstellung der ausgewählten Ereignisfüllen der oberen und unteren benachbarten Pegel. In allen Diagrammen ist eine Trennlinie, unter der die Wertepaare der Ereignisfüllen liegen sollen, dargestellt. Dieses Kriterium ist in den meisten Fällen erfüllt, außer beim Ereignis 2002/12 bzw. 2003/01, wo die Fülle in Prag bzw. die Summe von Mělník und Louny größer ist, als an den unteren Pegeln Vraňany bzw. Ústí nad Labem.

## 2.7 Statistische Untersuchung zur langfristigen Abflussänderungen

Um die möglichen, langfristigen Abflussänderungen insbesondere im Hinblick auf die Hochwasserabflüsse identifizieren zu können, wurden zuerst die statistischen Kennwerte aus den beobachteten Zeitreihen als Basis ermittelt. Weiter wurden die jährlichen statistischen Kennwerte der Zeitreihen der Trendanalyse bezüglich ihrer Tendenz unterworfen, da die Doppelsummenanalyse nur bei den Reihen durchgeführt werden kann, die keinen signifikanten Trend aufweisen. Die Methoden sind unten kurz beschrieben.

### 2.7.1 Ermittlung der statistischen Kennwerte

Aus den umfangreichen Mengen von Daten wurden die wichtigsten statistischen Charakteristika ermittelt, die für die statistischen Analysen sowie für die Bemessungsentwürfe und Planung von Schutzmaßnahmen von großer Bedeutung sind. Von allen Abflussreihen wurden jährlichen Kennwerte, wie die mittleren Jahresabflüsse (MQ) und die maximalen Jahresabflüsse (HQ), die für die Trendanalyse, Gruppierungseffekte und den statistischen Nachweis der anthropogenen Einflüsse (z.B. Talsperreneffekte, Entnahme der natürlichen Retention) und damit verbundene Abflussänderungen herangezogen wurden, bestimmt. Dafür wurde das Softwarepaket „Hochwasserstatistik“ des IWG (Ihringer 1999) eingesetzt. Es ist wichtig hier zu erwähnen, dass alle Untersuchungen und Bezeichnungen sich auf das hydrologische Jahr beziehen, d.h. immer vom 1.11. des vorherigen Jahres bis 31.10. des gegebenen Jahres. Es musste bei der Ermittlung der HQ die Lage der kritischen Ereignisse über die Jahreswende des hydrologischen Jahres beachtet werden. Das sind die Ereignisse, die am Ende des Jahres anfangen und deren Scheitel im nächsten Jahr vorkommt, sodass die Abflüsse des ansteigenden Astes den HQ-Wert des alten Jahres beeinflussen können. Mittels der statistischen Analyse dieser jährlichen Werte lässt sich die langfristige Variabilität der Abflussdynamik feststellen.

### 2.7.2 Mittlere MQ und maximale HQ Jahresabflüsse, Gruppierungseffekte

Zu den wichtigen statistischen Abflusskennwerten gehören der mittlere jährliche Abfluss (MQ) und der maximale jährliche Abfluss (HQ). Sie wurden mit dem o.g. Programm von allen verfügbaren beobachteten Jahren und den tschechischen Pegeln ermittelt und graphisch dargestellt. Die deutschen Abflussreihen wurden bereits im Rahmen des Projekts (Helms 2002) untersucht. Diese Abflusswerte sind als quantitative Größe für die Untersuchung der Hochwasserstatistik von Interesse, welche für die Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen, der Wasserbewirtschaftung sowie der Schifffahrt notwendig ist. Dies stellt aber nicht die Hauptaufgabe dieser Arbeit dar. Die MQ und HQ Werte wurden für die langfristige Untersuchung der möglichen Abflussänderung benutzt. Die Gruppierungseffekte von MQ und HQ wurden durch das 5-jährige gleitende Mittel (GM) ermittelt, damit die Schwungung zwischen den trockenen und nassen Jahren identifiziert werden konnte. Ein Beispiel dieser Analyse der Zeitreihe vom Pegel Prag ist auf der Abbildung 2.8 dargestellt.

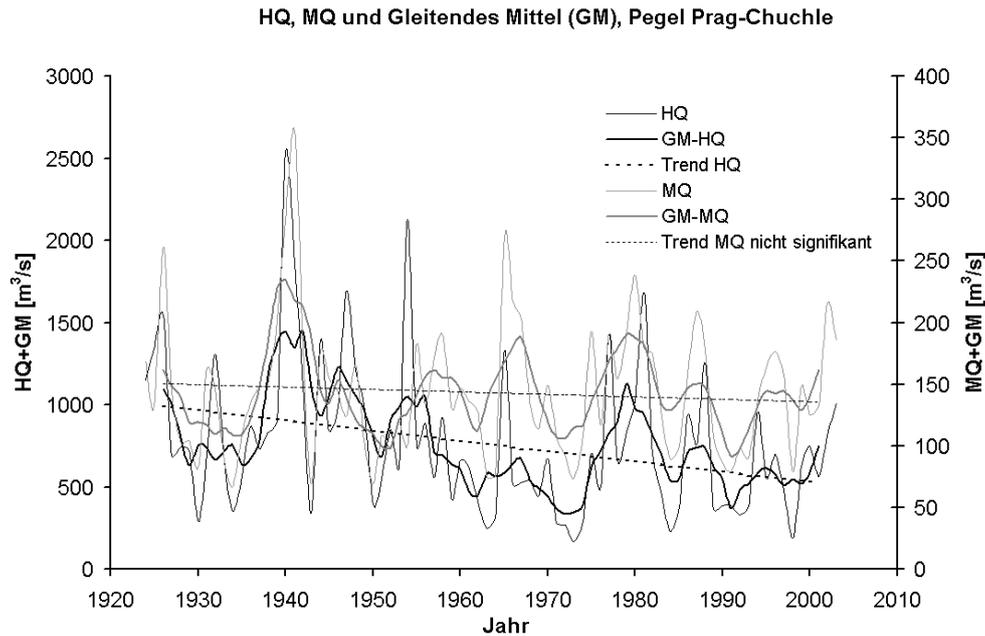


Abbildung 2.8: Abflüsse HQ, MQ und ihre 5-jährigen gleitenden Mittel GM ermittelt aus der beobachteten Abflussreihen 1923- 2001 für den Pegel Prag-Chuchle. Daneben ist die Gruppierung von trockenen und nassen Jahren erkennbar, sowie ein fallender signifikanter Trend der HQ.

### 2.7.3 Trendanalyse der mittleren (MQ) und der maximalen (HQ) Jahresabflüsse

Um eine Tendenz der MQ- und HQ-Werte, die z.B. durch die natürliche Variabilität (Klimawandel) oder durch die anthropogenen Einflüsse (Einrichtung der Talsperren, der Eindeichungen) verursacht werden könnten, langfristig untersuchen zu können, wurden Trendanalysen mit Hilfe des o.g. Softwarepakets erstellt. Der lineare Trend wurde durch eine Regressionsrechnung nach der Gleichung 2.1 ermittelt. Dafür wurde der Steigungsparameter  $A_1$  (Trendsteigung) – die durchschnittliche lineare Zu- oder Abnahme der MQ oder HQ pro Jahr - durch die Summe der Fehlerquadrate und der Mittelwert  $A_0$  von dem untersuchten Zeitraum berechnet. Weiter wurde die Trendsignifikanz nach Mann und Kendall getestet, mehr Informationen sind in (Helms 2002, Hartung 1991) erfasst. Die Ergebnisse der Trendanalyse der MQ und HQ sind in der Tabelle 2.3 zusammengefasst. Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Trendanalyse nur bis Jahre 2001 durchgeführt wurde, um das seltene Extremereignis vom August 2002 auszuschließen, weil dieses eine bedeutende Auswirkung auf den Trendverlauf haben könnte. Der signifikante Trend der mittleren jährlichen Abflüsse MQ wurde nur an den zwei Pegeln identifiziert; in Černý Kříž an der Kalten Moldau oberhalb der Talsperre Lipno mit kleinem Einzugsgebiet nur  $103 \text{ km}^2$  im Böhmerwald wurde ein steigender Trend und am Pegel Poříčí an Sázava ein fallender Trend ( $-0,870 \text{ m}^3/\text{s}$  pro Jahr) gefunden. Im zweiten Fall lässt sich dieser Trend durch die Trinkwasserentnahme von den Trinkwassertalsperren im Einzugsgebiet der Sázava, die in den 50er Jahren errichtet wurden, erklären. Laut der Angaben der zuständigen Behörden beträgt die Wasserentnahme etwa  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  für die Wasserversorgung der Stadt Prag und der Umgebung. Allgemein lässt sich durch diese Untersuchung des Trends folgern, dass die mittleren jährlichen Abflüsse MQ im tschechischen Einzugsgebiet der Elbe über den Zeitraum keine signifikanten Änderungen oder Tendenzen

aufweisen. Die Tendenzen der MQ an den zwei Pegeln sind für die statistische Untersuchung der Hochwasserereignisse in der großen Skale unbedeutend.

$$x_t(t) = A_0 + A_1 t \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Tabelle 2.3: Ergebnisse der Trendanalyse der mittleren und maximalen jährlichen Abflüsse bis 2001. Der Trend ist als Abflussänderung pro Jahr [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{J}$ ] ermittelt.

Nr.	Pegel	Zeitraum	Trend MQ/J	sign.	Trend HQ/J	sign.
1	Černý Kříž	1947-2001	0.120	ja	0.162	ja
2	Chlum u Volar	1989-2001	0.150	nein	0.228	ja
3	Vyšší Brod	1911-1920, 1926-2001	-0.330	nein	-0.859	ja
4	České Budějovice	1989-2001	0.241	nein	1.972	nein
5	Hluboká	1941-1991	-0.690	nein	-3.057	ja
6	Bechyně	1911-2001	-0.660	nein	-0.672	ja
7	Písek	1912-2001	-0.150	nein	-0.285	nein
8	Poříčí	1912-2001	-0.870	ja	-1.176	ja
9	Zbraslav	1941-2001	-0.412	nein	-7.762	ja
10	Křivoklát	1931-1994	0.001	nein	-1.317	nein
11	Beroun	1912-1920, 1951-2001	0.270	nein	-0.755	nein
12	Prag-Ch. und M.	1900-2001	-0.690	nein	-4.271	ja
13	Vraňany	1983-2001	-0.826	nein	5.835	nein
14	Přelouč	1971-2001	0.135	nein	4.379	nein
15	Nymburk	1931-2001	0.820	nein	0.403	nein
16	Tuřice - Předměřice	1911-2001	0.350	nein	0.201	nein
17	Brandýs	1911-2001	0.160	nein	0.842	nein
18	Mělník	1926-1945, 1971-2001	-0.260	nein	-4.316	nein
19	Louny	1922-2001	-0.380	nein	-1.633	ja
20	Ústí nad Labem	1940-2001	-0.191	nein	-7.771	nein
22	Dresden	1853-1996*) 1941-1996*)	0.320	nein	-4.920 -7.444	ja nein

\*) z.Z. der Analyse lagen die Abflüsse bis 2006 von Dresden noch nicht vor.

In gleicher Weise wie bei der Untersuchung der MQ, wurde der Trend der HQ analysiert. Demgegenüber wurden hier signifikante Änderungen der maximalen jährlichen Abflüsse insbesondere an den Pegeln der Moldau und Eger, wo die größten Talsperren eingerichtet wurden, identifiziert, siehe Tabelle 2.3. Aus der Tabelle ist zu erkennen, dass ein signifikanter fallender Trend an den Pegeln unterhalb der großen Talsperren identifiziert wurde. An den Hauptpegeln der Elbe Mělník (1926-1945 und 1971-2001) und Ústí nad Labem (1940-2001) wurde kein signifikant Trend in dem angegebenen Messzeitraum gefunden, demgegenüber die maximalen jährlichen Abflüsse HQ in Dresden von der Zeitreihe (1853-1996) auf einen signifikant fallenden Trend hinweisen. Wenn der Trend der Zeitreihe von 1941 bis 2001 in Ústí nad Labem sowie in Dresden ermittelt wird, werden ähnliche nicht signifikant fallende Tendenzen ( $-7,444 \text{ m}^3/\text{s}$ ) an den beiden Pegeln identifiziert. Der signifikante Trend wurde an den Pegeln unterhalb der Talsperren im Moldau- und Egereinzugsgebiet, die in den 50er

und 60er Jahren des 20. Jh. in Betrieb genommen wurden, gefunden. Durch die Überlagerung mit anderen Zuflüssen der Elbe, bei denen keine großen Talsperren vorhanden sind, wird der Trend der HQ stromabwärts abnehmend und nicht mehr signifikant, vor allem im 20. Jahrhundert.

#### **2.7.4 Untersuchung der HQ mittels der Doppelsummenanalyse**

Für eine Untersuchung der systematischen Veränderungen bzw. Inhomogenitäten (Trends oder Sprünge) der langfristigen Abflussdynamik wurde die Doppelsummenanalyse (Wittenberg 2011) verwendet. Vor allem wurden Abflussänderungen durch die Einflüsse der großen Talsperren und Eindeichungen auf HQ untersucht. In den 1950er und 1960er Jahren wurden große Talsperren im Einzugsgebiet der Moldau (Lipno, Orlick und Slapy) und der Eger/Ohře (Nechranice) errichtet. Zu einer der wichtigen Aufgaben gehört der Hochwasserschutz durch den Rückhalt in den Stauhaltungen. Diese haben u.a. einen dämpfenden Effekt auf den Hochwasserverlauf. Daher ist es notwendig ihre Auswirkungen auf die Abflussprozesse auch mit statistischen Analysen zu untersuchen. Die Talsperreneffekte wurden statistisch unter der Nutzung der MQ- und HQ- Reihen Prag und dem gut abgesicherten Pegel Dresden (Helms 2008) untersucht und miteinander verglichen. Durch die Trendanalyse der MQ (1924 – 2001) wurde kein signifikanter Trend identifiziert, d.h. die Talsperren haben einen saisonalen Füllvorgang und keinen maßgeblichen Einfluss auf die mittleren Jahresabflüsse. Dagegen wurde mit der gleichen Analyse für HQ ein signifikanter Trend in Prag gefunden, siehe oben, daraus folgt, dass die Talsperren die maximalen Jahresabflüsse großräumig beeinflussen und über eine hochwasserdämpfende Funktion verfügen.

Mit der Doppelsummenanalyse wurden die MQ und HQ fortlaufend aufsummiert und gegeneinander geplottet. Damit ergibt sich die Doppelsummenkurve der MQ und HQ. Durch die aufsummierten Wertepaare der MQ und HQ wurden ein oder mehrere Regressionsgrade gelegt, nur in dem Falle dass die aufsummierten Werte gut korrelieren. Von dem Verlauf der aufsummierten Werte lassen sich Knicks erkennen. Das deutet auf mögliche Änderungen (z. B. Trend) oder auf einen Fehler bzw. Sprung hin. Für die zeitliche Feststellung solcher Knickpunkte wird die Knickpunktanalyse verwendet, um die Lage des Wendejahrs finden zu können. Für jeden untersuchten Punkt der Doppelsummenkurve wird eine Regression bis zum und ab dem betreffenden Punkt durchgeführt. Zu jedem Punkt werden die Standardfehlersummen gerechnet. Ein Knickpunkt befindet sich dort, wo die Standardfehlersumme am kleinsten ist. Für mehrere Information kann auf die Literatur (Helms 2002) verwiesen werden. Dieses wurde wie oben angesprochen für den Pegel Prag/Moldau und Dresden/Elbe angewendet. Von dieser Analyse kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die HQ an der Moldau in Prag mehr durch die nah gelegenen Talsperren beeinflusst wird/werden als die HQ an der Elbe in Dresden, wo die Talsperreneinflüsse auf die HQ bereits geringer sind. Der Knickpunkt befindet sich an beiden Pegeln im Jahr 1953, siehe Abbildung 2.9. Damit wurde gezeigt, dass die tschechischen Talsperren eine Wirkung auf die Hochwasserverhältnisse auch an der deutschen Elbe haben. Ausführlich über die Wirkung der großen Talsperren ist im Kapitel 4.11 und in der Literatur (MŽP 2005) berichtet. Das Hochwasserereignis von 2002 wurde aufgrund der Datenunsicherheit und- lücken sowie wegen seiner seltenen Extremität hier nicht berücksichtigt, weil die Einbeziehung die Analysenergebnisse stark verzerren könnte.

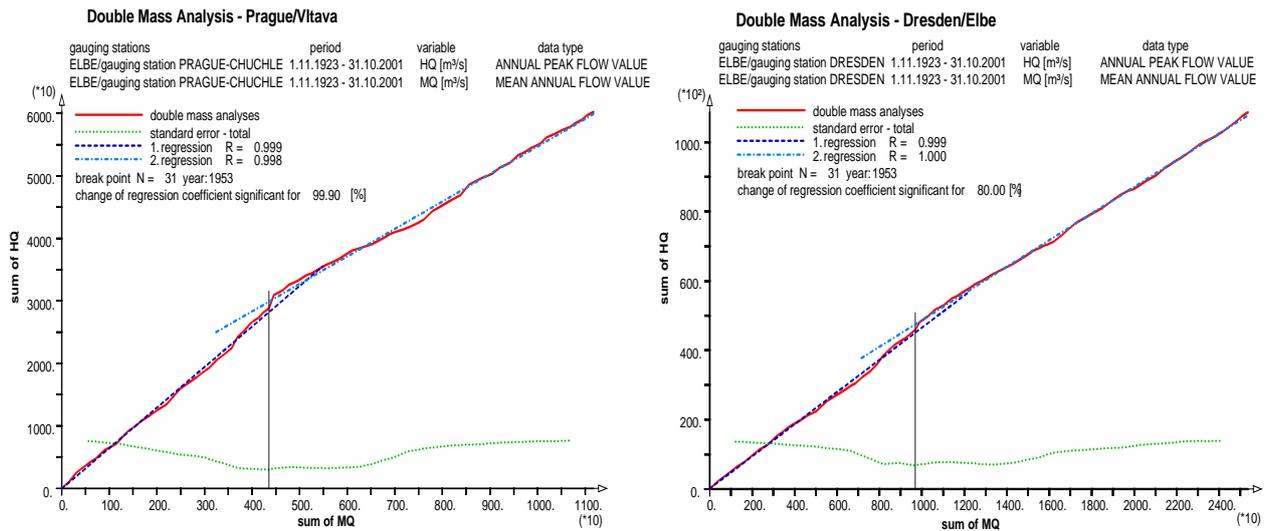


Abbildung 2.9: Doppelsummenanalyse von den Zeitreihen MQ und HQ 1924 bis 2001 der Pegel Prag (rechts) und Dresden (links). Damit wurde eine Inhomogenität der jährlichen HQ festgestellt. Der Knickpunkt trat jeweils 1953 auf. Das deutet auf die Veränderung der HQ durch Einrichtung der großen tschechischen Talsperren hin.

### 3 Angewendete Modelle

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zahlreiche Analysen und Berechnungen, die auf der Benutzung der bereits bestehenden Modelle und Einsätze beruhen, durchgeführt. Es handelt sich um in der Praxis gut bewährte Modelle, die von den Ämtern sowie Forschern teilweise weiter betrieben, ergänzt oder entwickelt werden, insbesondere für die Zwecke der Abflussvorhersage. Hier wurde das Flood-Routing-Verfahren anhand des Translations-Diffusions-Ansatzes angewendet und teilweise mussten einige Parameter optimiert werden, oder das Modell wurde sogar auf anderen Flussabschnitten mit Hilfe der Parameterermittlung erweitert. Dieses Modell wurde für die Simulation der Wellenverformung einerseits angewendet für das beobachtete bzw. rekonstruierte Ereignis vom August 2002 und die modellierten Hochwasserszenarien, und andererseits auf die tschechischen Elbe- und Moldauabschnitte erweitert. Die Retention in den steuerbaren Notpoldern wurde mit einem gewöhnlichen Speicheransatz (Seeretention) nachgebildet.

Die Modellauswahl, wo andere Vor- und Nachteile anderer Modelle kurz beschrieben sind, wird in dem folgenden Abschnitt kurz erwähnt, vor der Beschreibung des Flood-Routing-Modells.

#### 3.1 Modellauswahl

Der Wellenablauf zwischen zwei benachbarten Pegeln wird in der Hydrologie als Flood-Routing bezeichnet. Er umfasst die physikalischen Prozesse der strömenden Wassermenge im Flussbett oder Kanal sowie bei Hochwasser im Vorland. Darunter lässt sich eine Wellentransformation (Verformung) oder eine Wellenabflachung anhand der Speicherfähigkeit entlang der Flusstrecke und der Wirkung der instationären Strömung vorstellen. In diesem Kapitel werden kurz die Modelle beschrieben, die ihre Herkunft in der Bewegungsgleichung haben. Eine detaillierte Lösung der Wellenverformung erfordert ein hydrodynamisch begründetes (hydraulisches) Modell mit verteilten Parametern, das den Saint-Venant-Gleichungen entspricht, siehe z.B. (Dyck 1995). Sie bestehen aus der dynamischen Grundgleichung und der Kontinuitätsgleichung, siehe Abbildung 3.1. Dieser hydraulische Ansatz ist für die Planungs- und Bemessungsaufgaben besonders der lokalen Maßnahmen geeignet, aber andererseits weniger geeignet für eine großräumige operationelle (möglichst schnelle) Hochwasserabflussvorhersage. Dafür sind die genauen Geometriekennwerte und Rauigkeit des Gerinnes unverzichtbar. Durch die Vernachlässigung der Trägheitsglieder der Bewegungsgleichung ergibt sich der Diffusionswellenansatz (Translations-Diffusions-Modell), dessen Anwendung auf den Flüssen mit großen Ausuferungen (Rückstauwirkungen) gute Ergebnisse durch den vollständigen Ansatz liefert. Wird das Druckglied in der Bewegungsgleichung vernachlässigt, erhält man den kinematischen Wellenansatz. Dieser vereinfachte Ansatz ist für die Flusstrecken ohne bedeutende Rückstauwirkungen geeignet. Das Anwendungsgebiet entspricht ebenso den konzeptionellen Modellen, bei denen die physikalischen Prozesse zwischen dem Eingang und Ausgang durch physikalisch begründete Parameter vereinfacht bzw. ersetzt werden. In diese Modellgruppe gehören z.B. Blocksystemmodelle (Muskingum-Cunge- und Kalinin-Miljukov-Modelle).

Der Baustein des Flood-routing-Modells nach Kalinin-Miljukov ist eine lineare Speicherkaskade, die auf der Methode des Einzelspeichers basiert. Die Wellenbewegung wird in Flussabschnitten berechnet. Ein Flussabschnitt ist in gleichen Unterabschnitten der Länge  $L$  aufgeteilt. Diese Methode erfor-



Das Modell wurde in ELBA als nichtlineares bzw. abschnittsweise lineares Stufenmodell umgesetzt, wo sich die charakteristischen Eigenschaften bezüglich der Eingangsparameter des Modells mit zunehmendem Abfluss verändern.

Die Bewegung des Wassers im Gerinne beruht auf den Gesetzen der Erhaltung von Masse und Energie. Dies kann aufgrund der Energiegleichung (auch dynamische oder Bewegungsgleichung genannt) und der Kontinuitätsgleichung mathematisch mit den Saint-Venant-Gleichungen beschrieben werden. Die Energiegleichung besteht aus der Schwerkraft, reduziert um Druckkraft und Reibungskraft, und ergibt Masse multipliziert mit der Beschleunigung (3.1).

$$\rho g A I_s dx - \rho g A \frac{\partial y}{\partial x} dx - \rho g A I_e = \rho A dx \frac{dv}{dt} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Für die Massenbilanz gilt die Kontinuitätsgleichung 3.2, wie folgt:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (\text{Gl. 3.2})$$

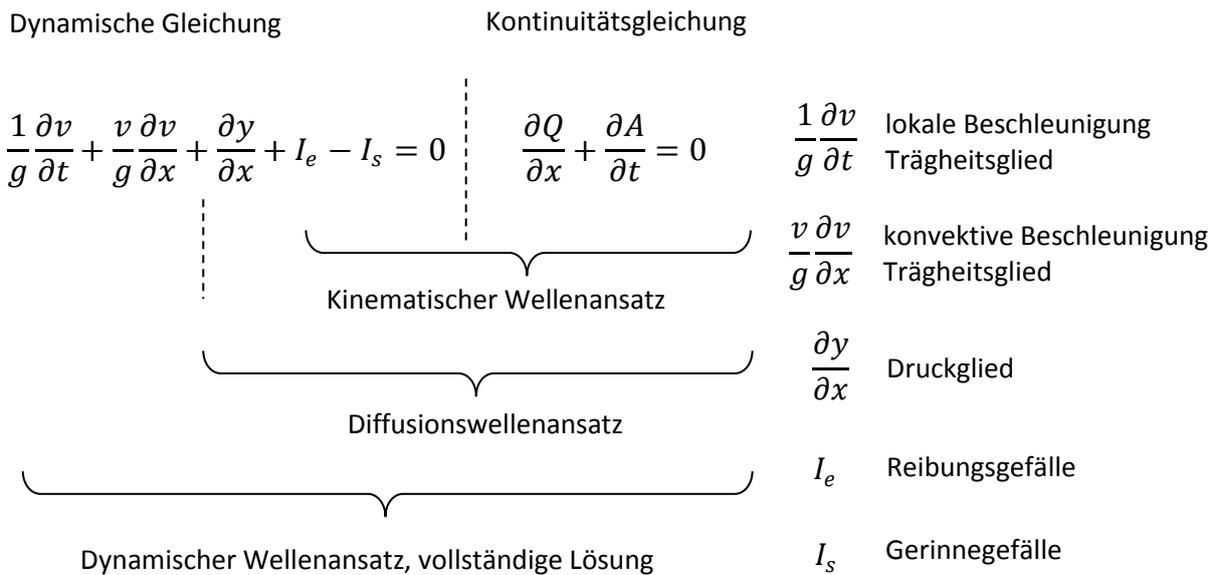


Abbildung 3.2: Eindimensionale Darstellung der Saint-Venant-Gleichung des instationären Strömungsprozesses nach (Dyck 1995).

Bei dem Modellansatz handelt es sich um eine Translations-Diffusions-Analogie, deren Ursprung in den Saint-Venant-Bewegungsgleichungen ist. Werden die Trägheitsglieder in den Gleichungen vernachlässigt, erhält man die reduzierte Bewegungsgleichung und Kontinuitätsgleichung. Durch Ableitung der reduzierten Bewegungsgleichung und Kontinuitätsgleichung ergibt sich die Systemfunktion, auch Impulsantwort des Translations-Diffusions-Modells  $h(x,t)$  genannt, welche die Eigenschaften des Abflussverhaltens einzelner Gewässerabschnitte und Abflussbereiche beinhaltet. Mittels dieser Systemfunktion lässt sich die Abflussganglinie am unteren Pegel durch das Faltungsintegral der Abflussganglinie der oberen Pegel berechnen, d.h., dass jeder stündliche Abflusswert nach der System-

funktion über die Zeit verteilt wird, es kann ebenfalls als Gedächtnis eines Impulses bezeichnet werden. Das Translations-Diffusions-Modell ist ein konzeptionelles Modell, bei dem einige physikalische Prozesse durch parametrisierten Ansatz ersetzt wurden. Die ausführliche Beschreibung dieser Problematik ist z.B. bei (Dyck 2010) zu entnehmen. Die Gleichung 3.3 der Systemfunktion  $h(x,t)$  nach der Reduzierung lautet, wie folgt:

$$h(x, t) = \frac{1}{2(\pi D)^{1/2}} \frac{x}{t^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(u t - x)^2}{4 D t} \right] \quad (\text{Gl. 3.3})$$

mit:

- $x$  [km] Flussabschnittslänge
- $t$  [h] Zeitschritt
- $u$  [km/h] Translationskoeffizient
- $D$  [km<sup>2</sup>/h] Diffusionskoeffizient

Die variablen Inputparameter, die für die jeweilige Strecke und den jeweiligen Abflussbereich unterschiedlich sind, stellen den Translationskoeffizienten, auch bekannt als Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit  $u$ . Der Diffusionskoeffizient bezeichnet ebenfalls die Wellenabflachung oder – Ausbreitung  $D$ . Neben den zwei physikalischen Größen ist die Form der Systemfunktion noch von der Flussabschnittslänge und dem Zeitschritt abhängig.

Die diskrete Form des Faltungsintegrals wird mit der Gleichung 3.4 beschrieben. Der simulierte Abfluss  $QSIM_{IH}$  zum Zeitpunkt  $IH$  besteht aus der Summe der einzelnen Impulsantworten der beobachteten Abflusswerte  $QB_{IH}$  bis ältere  $QB$  mehrere Stunden davor nach der Systemfunktion bestimmter Gedächtnislänge, die von der Streckenlänge und von den Parametern  $u$  und  $D$  abhängig ist. Beispielsweise aus der Abbildung 3.3 ist zu erkennen, dass der beobachtete Abflusswert  $QB$  des oberen Pegels sich einige Stunden später am unteren Pegel auswirkt. Das Berechnungsschema mittels der Translations-Diffusions-Analogie und der Faltung ist in Abbildung 3.3 erläutert. Der Prozess beginnt mit der Konvertierung der Tagesabflusswerte auf die Stundenwerte, die über den ganzen Tag gleichmäßig verteilt werden. Weiter werden die Systemfunktionen für die gegebenen Abflussbereiche ermittelt. Die Auswirkung jedes Stundenwertes wird nach der Systemfunktion innerhalb der Gedächtnislänge verteilt und mit der Auswirkung des nächsten Stundenwertes gefaltet. So erhält man die simulierten Abflüsse in Stunden, die nach Bedarf auf Tagesabflüsse umgerechnet werden können.

$$QSIM_{IH} = \sum_{HT=1}^{IH} QB_{IH-HT+1} h_{HT} \quad (\text{Gl. 3.4})$$

mit:

- $QSIM$  [m<sup>3</sup>/s] simulierter Abfluss am unteren Pegel oder Stelle
- $QB$  [m<sup>3</sup>/s] beobachteter Abfluss
- $h$  [-] dimensionsloser Wert der Systemfunktion
- $IH$  [h] Zeitpunkt der Abflussreihe
- $HT$  [h] Zeitpunkt der Systemfunktion

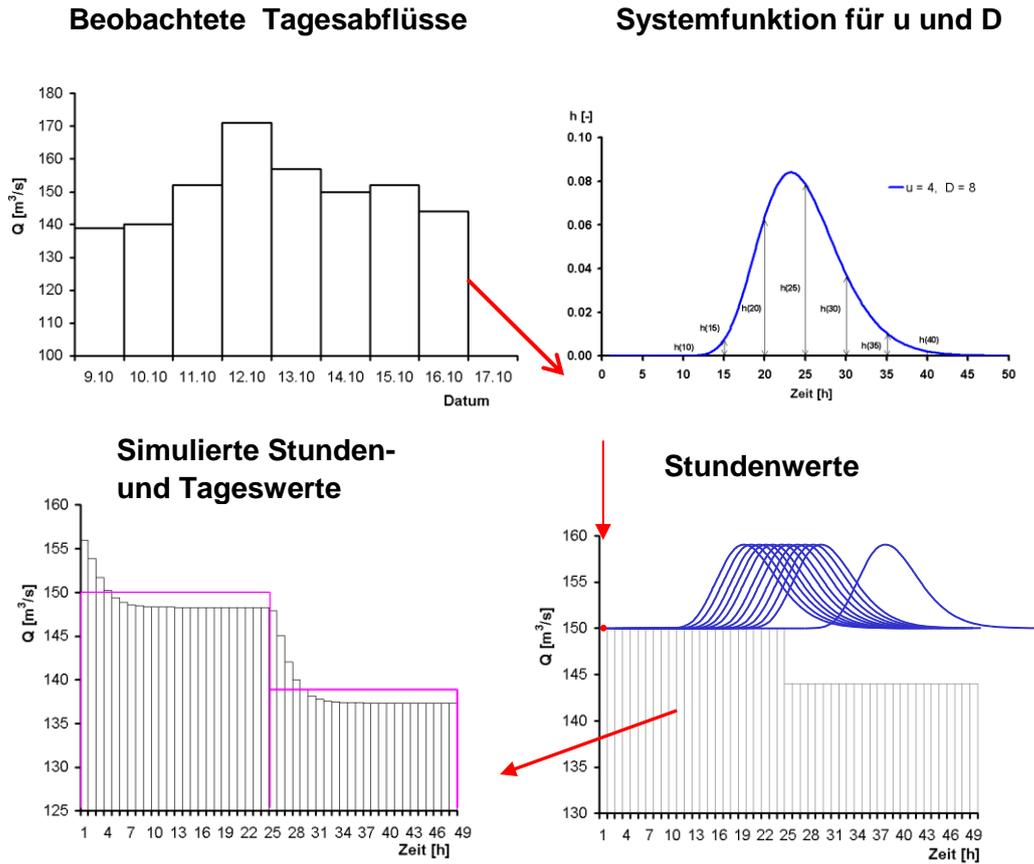


Abbildung 3.3: Berechnungsschema des Translations-Diffusions-Modells mit der Faltung. Die Tageswerte werden auf Stundenwerte gleichmäßig umgerechnet. Danach wird die Systemfunktion für jeweiligen Abflussbereich ermittelt, mittels ihr und der Faltung werden die simulierten Stundenabflüsse gerechnet.

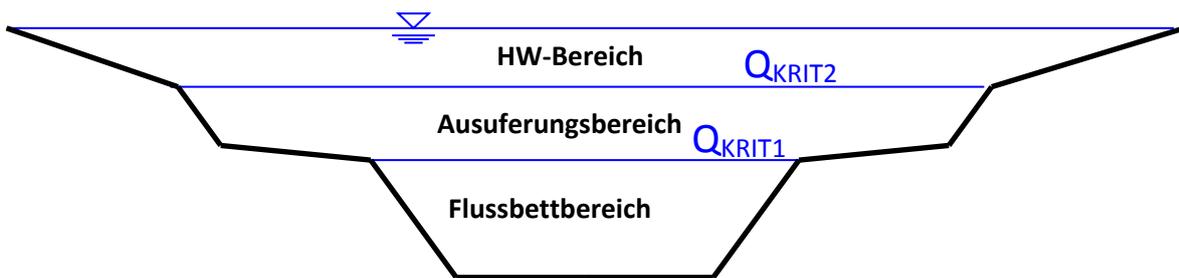


Abbildung 3.4: Gliederung der Abflussbereiche in einem Flussquerprofil und im Vorland

Aus der Anwendung dieses Modells an der Elbe hat sich gezeigt, dass die geeignete Übereinstimmung der simulierten Abflussganglinien durch den Einsatz des 3-stufigen Translations-Diffusions-Modells erreicht werden kann, siehe Abbildung 3.4. Das bedeutet, dass bei der Simulation extremer Abflüsse der Durchfluss in drei Abflussbereiche – Flussbettbereich, Ausuferungsbereich und Hochwasserbereich - verteilt wird, und für jeden Abflussbereich wird auch eine Systemfunktion mit verschiedenen jeweiligen Translations- und Diffusionskoeffizienten ermittelt, siehe Abbildung 3.5. Die Simulationsausgänge in den einzelnen Abflussbereichen sind durch Superposition zu überlagern.

Dazu kommen noch zwei zusätzliche Parameter, so genannten kritischen Abflusswerte  $Q_{krit}$ , die die Grenzen zwischen den einzelnen Abflussbereichen darstellen. Der Grund solcher Gliederung ist die unterschiedliche Rauigkeit sowie unterschiedliches Abflussverhalten in einzelnen Abflussbereichen, die eine Wirkung auf Strömungsgeschwindigkeiten und dadurch auch auf Koeffizienten -Translation und -Diffusion haben.

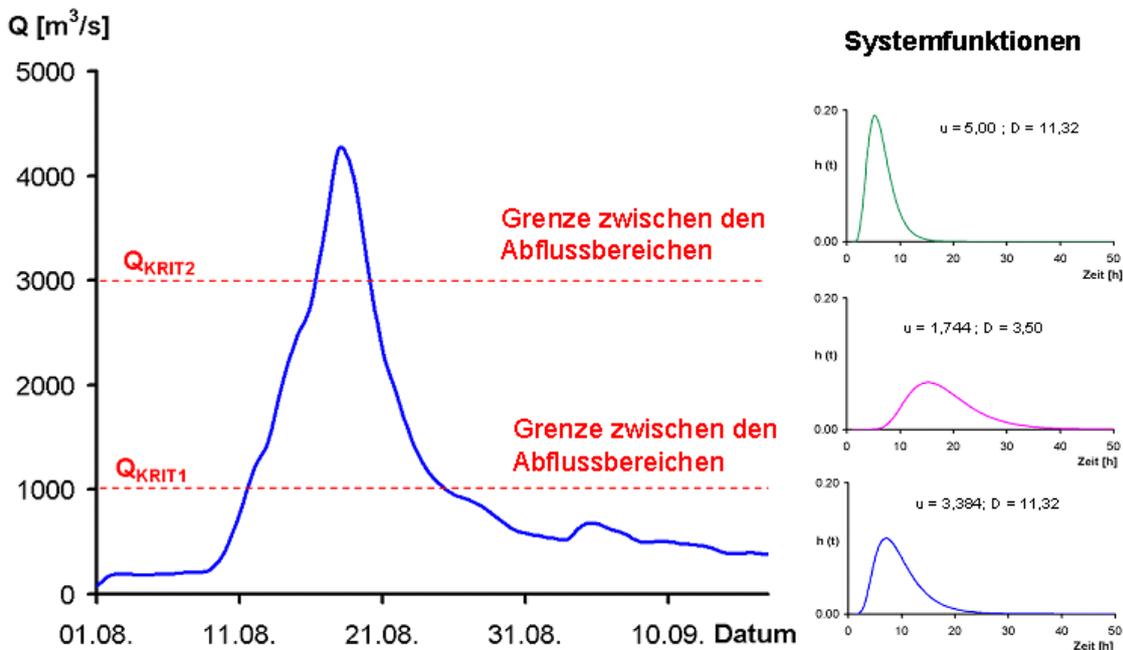


Abbildung 3.5: Abflussganglinie, die mittels der drei Systemfunktionen verschiedener Parameter jeweiligen Abflussbereichen gefaltet und durch die Superposition ermittelt wird.

Der Vorteil dieses Modells ist eine schnelle und zuverlässige Ermittlung der vorhergesagten Abflussganglinien an beliebigen Pegeln oder Stellen sowie eine einfache Datei- und Parametereingabe. Der andere Vorteil ist, dass die Wellenverformung mit der Speichersimulation gekoppelt werden kann. Der Nachteil besteht darin, dass das Translations-Diffusions-Modell nur eine zeitliche Transformation berechnen kann, aber leider werden nicht die kleineren Zuflüsse aus dem Zwischengebiet berücksichtigt, die als gemessene Ganglinie zu der simulierten Abflussganglinie ohne Transformierung zuaddiert werden könnten.

### 3.3 Angewendete Modelle und Verfahren für die operationelle Abflussvorhersage und für die Szenariensimulationen

Die Steuerung der Notmaßnahmen bzw. die Entscheidung zur Flutung während der extrem verschärften Hochwassersituationen erfordert jedenfalls das Wissen über die Verfahren und die Qualität der operationellen Abflussvorhersagen im gesamten oberen Einzugsgebiet der Elbe. Dafür ist eine Abgrenzung der Verlässlichkeit der vorhergesagten Abflussganglinien anhand der Modellfunktionen von großer Bedeutung. Daneben sind die praktischen Erfahrungen aus beobachteten Extremereignissen mit ihren spezifischen und einzigartigen Eigenschaften für die Abschätzung der Verlässlichkeit der Notmaßnahmen heranzuziehen.

### 3.3.1 Niederschlag-Abflussmodellierung im tschechischen Einzugsgebiet der Elbe

Um die Auswirkung der Niederschläge in die Abflüsse umwandeln zu können, wurde das tschechische komplexe Modellsystem AquaLog der Firma AquaLogic und der Institution CHMI, mit dem die offiziellen Abflussvorhersagen von dem Tschechischen Hydrometeorologischen Institut (CHMI) durchgeführt werden, benutzt. Das Modell besteht aus den miteinander gekoppelten einzelnen Modulen, die das Niederschlag-Abfluss-Geschehen im Einzugsgebiet, das Flood-Routing in den Gewässern und die Speicherung in den Talsperren beschreiben. Das gesamte Modellschema ist in Abbildung 3.6. dargestellt.

NA-Modellierung wird in die üblichen Komponenten Niederschlag, Schneedeckenentwicklung, Abflussbildung und Abflusskonzentration gegliedert. Die NA-Komponenten sind im Modellsystem AquaLog integriert und sie beruhen auf den Komponenten des amerikanischen Modellsystems NOAA NWSRFS (National Weather Service River Forecasting System), welches bereits von (Burnash 1995) entwickelt wurden. AquaLog ist ein semi-verteiltetes Modellsystem mit einer räumlichen Diskretisierung der Teileinzugsgebiete von 5 bis 10 km<sup>2</sup>. Die Abflussbildung aus einer Fläche wird mit dem Modell SAC-SMA (Sacramento-Modell), das auch von NWSRFS entwickelt wurde, ermittelt. Damit können hydrologische Prozesse in den Bodenzonen mit Berücksichtigung der Sättigung und der Verdunstung simuliert werden. Das Einzugsgebiet ist im Modell als horizontal und vertikal miteinander verbundener Speicher gegebener Kapazität dargestellt. Das Ergebnis dieses Prozesses ist ein verteilter Abfluss aus den einzelnen Bodenzonen, sowie Direktabfluss aus der Oberfläche.

Für den Schneedeckenaufbau, -Entwicklung und -Schmelze wurde das konzeptionelle Modul SNOW 17 ebenfalls von NWSRFS angewendet. Dadurch wird der Energieaustausch zwischen Luft und Schneedecke bilanziert, ferner wird die Retention des flüssigen Wassers in der Schneedecke ermittelt.

Die Stationsniederschläge und -Temperaturen wurden erst anhand der Thiessen-Polygone auf die Fläche verteilt. Im Laufe weiterer Entwicklungen wurde das Inverse-Distanz-Verfahren eingesetzt, um die simulierten Niederschläge, die als Rasterdatei bereitgestellt wurden, mit dem hydrologischen Verfahren koppeln zu können. Die flächenhaften Abflüsse werden in die Abflusskonzentration in den Gerinnen für die mesoskaligen Einzugsgebiete der Größe 30 bis 40 km<sup>2</sup> mittels des Faltungsintegrals und der Einheitsganglinie umgerechnet.

Das Flood-Routing-Modell der Wellenfortpflanzung und -Abflachung in den Gerinnen beruht auf der Methode Muskingum-Cunge oder auf der Lösung der Translations-Diffusions-Gleichungen, die bereits im Kapitel 3.2 beschrieben wurden. Die beiden Modelle kann man sich als Speicher einzelner Gewässerabschnitte vorstellen, deren Parametrisierung anhand der physikalischen Charakteristika des Flusssystems und beobachteten Abflussreihen abgeleitet wurde. Daneben wurde das hydrodynamische Modell HEC-RAS dort angewendet, wo der Wasserstand ermittelt werden musste, um eine lokale Abschätzung des Hochwasserrisikos quantifizieren zu können. Der parametrisierte Translations-Diffusions-Ansatz wurde auch an der deutschen Elbe angewendet.

Da sich im tschechischen Einzugsgebiet zahlreiche große Talsperren, die eine maßgebliche Wirkung auf die Abflussverhältnisse haben, befinden, wurde ihr Effekt mit dem Speichermodell sMAN simuliert. Es handelt sich um die Bilanzierung zwischen Zufluss und Ausfluss in bzw. aus der Talsperre. Dabei wird Kapazität aller Entlassungsanlagen in Abhängigkeit von Wasserstand und Größe der aktu-

ellen Öffnung berücksichtigt. Dafür sind die Kenntnisse und Erfahrungen der Steuerungsstrategie, die im Steuerungsplan jeder Talsperre beinhaltet sind, von der großen Bedeutung für die Simulation des Talsperreneffekts solcher Anlagen.

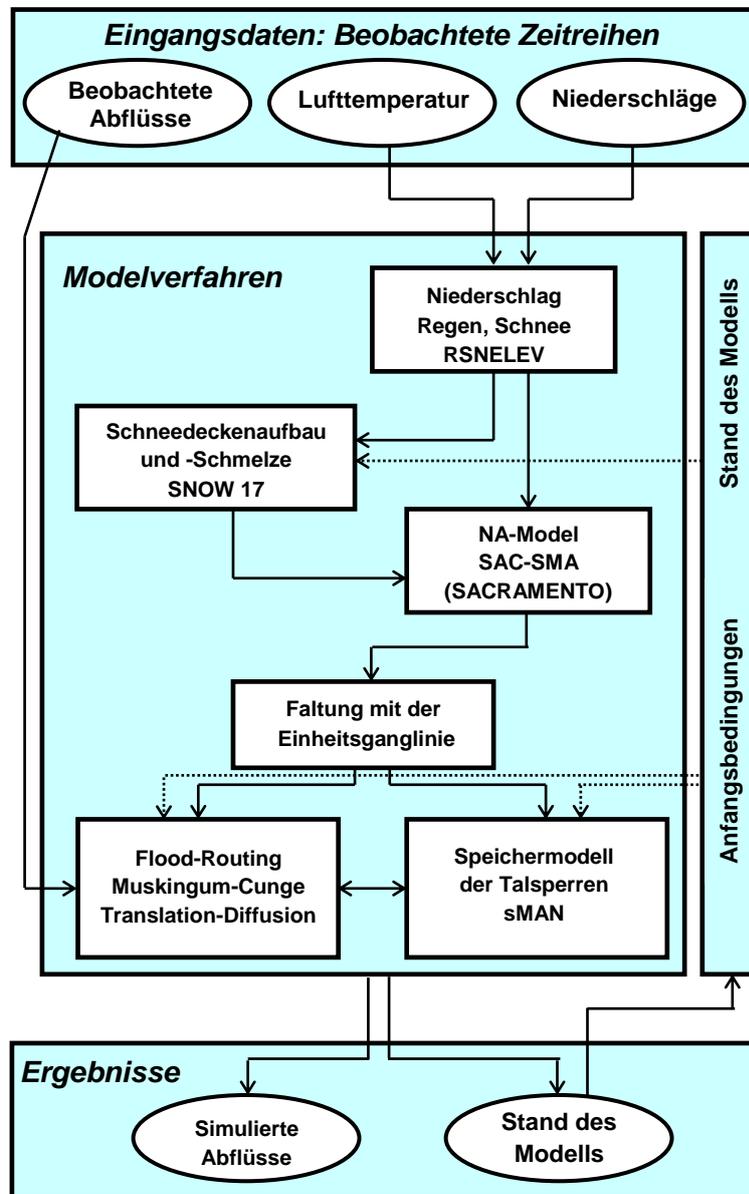


Abbildung 3.6: Ablaufschema des im tschechischen Elbegebiet offiziell eingesetzten Vorhersage- und Simulationsmodells AquaLog und seine Komponenten, welches von der Gesellschaft AquaLogic entwickelt wurde und von CHMI betrieben wird (englische Quelle: AquaLog).

Das Modell des Einzugsgebiets der tschechischen Elbe wird als ein räumlicher Knotenplan dargestellt. Es beinhaltet Flusstrecken bzw. -Netz, Pegel und große Talsperren, die eine hochwasserdämpfende Wirkung haben. Das Modell besteht aus den miteinander gekoppelten einzelnen Modulen, die das Niederschlag-Abfluss-Geschehen im Einzugsgebiet, das Flood-Routing in den Gewässern und die Speicherung in den Talsperren beschreiben. Es handelt sich um eine Prozesskette, die mit der Vorhersage der Niederschläge anfängt, weiter wird die Transformierung der Niederschläge im Einzugs-

gebiet und im Gewässernetz mittels NA- und Flood-Routing-Modelle simuliert und zum Schluss können lokal die Wasserstände mit einem hydraulischen Modell ermittelt werden.

Das angewendete und entwickelte Modell AquaLog wurde seit 2001 für eine operationelle Echtzeitvorhersage sowie für Simulationen von Szenarien im Elbeinzugsgebiet in der Tschechischen Republik angesetzt. Der operationelle Betrieb des Modells besteht aus drei folgenden Arbeitsschritten bzw. Modellen (Daňhelka 2006):

- **MODS** ist ein Modul für die operationelle vorübergehende Änderung der ausgewählten Parameter und des Anfangszustandes von SCA-SAM sowie SNOW-17. Oft werden Anfangswasseräquivalent zum Schnee, Schmelz- und Windfaktor beim Schneemodell verändert. Ebenfalls der Zustand der (zugefrorenen oder durchlässigen) Oberfläche muss am Anfang der Berechnung modifiziert werden. Die Parameter der Bodenvorfeuchte der einzelnen Bodenzonen müssen auch initialisiert werden.
- **UPDATE** kann die bereits simulierten Ergebnisse mit den aktuell beobachteten Zuständen im Einzugsgebiet korrigieren bzw. anpassen.
- **OPTIMIERUNG DER ANFANGSBEDINGUNGEN** der Vorfeuchte ist ein unvertretbares Input für das Modell SAC-SMA. Damit wird die Vorfeuchte der Bodenzonen aus dem vorigen Zeitraum (10 Tage) anhand der beobachteten Niederschläge und Abflussganglinien optimiert.

### 3.3.1.1 Meteorologisches Input

Für Simulationen des NA-Prozesses werden beobachtete Daten (Temperatur, Niederschlagshöhe, Stand der Schneedecke, usw.) aus den etwa 400 Niederschlags- und etwa 160 Klimastationen von CHMI angewendet. Für die operationelle Abflussvorhersage werden neben den aktuell beobachteten Daten aus den Messnetzstationen die Radarniederschläge und meteorologischen Vorhersagen vom Modell ALADIN (Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International) benutzt. Dieses numerische Modell des Wetters wurde durch den Französischen Meteorologischen Dienst (Meteo France Toulouse) seit 1991 entwickelt. Es besteht aus den Differenzialgleichungen, die das Verhalten der Atmosphäre anhand der meteorologischen Messungen beschreiben. Die Berechnung erfolgt erst mit dem globalen meteorologischen Modell ARPÉGE mit einer räumlichen Diskretisierung von 15 km. Weiter werden die Ergebnisse mit dem lokalen Modell ALADIN auf 9 km räumlicher Auflösung runterskaliert. Die Ergebnisse der Berechnung werden im 6-Stunden Schritt mit Vorhersagezeit für die nächsten 54 Stunden bereitgestellt. Dadurch werden Zeitreihen der physikalischen Parameter der Luftmassen simuliert, d.h. Lufttemperatur, Niederschläge, Windrichtung und -geschwindigkeit, Bewölkung.

### 3.3.1.2 Beschreibung des Niederschlag-Abfluss-Modells SAC-SMA

Im Rahmen des komplexen Vorhersagesystems AquaLog wird der Niederschlag-Abfluss-Prozess mit dem von NWSRFS (National Weather Service River Forecast System) in den USA seit den 1970er Jahren entwickelten Modell SAC-SMA gerechnet (Burnash 1995). Das konzeptionelle Modell SACramento Soil Moisture Accounting basiert auf der Parametrisierung der Bodenfeuchte, wobei das Einzugsgebiet als miteinander gekoppelter Speicher dargestellt ist.

Das Modell wird aus einzelnen Speicherzonen mit definierter Kapazität erstellt, durch die das Wasser horizontal und vertikal durchströmen kann. In der oberen Zone wird das Wasser nur kurzfristig gespeichert, während in der unteren Zone der Wasseranteil als langfristig gespeichertes Wasser bezeichnet wird. Zu den Hauptkomponenten des Abflusses aus dem Einzugsgebiet gehören der Direktabfluss, der Abfluss von den undurchlässigen Flächen, der Oberflächenabfluss und der unterirdische Abfluss. Die auf die Fläche gefallenen Niederschläge fließen teilweise durch den Oberflächenabfluss ab und zum Teil infiltrieren sie in die unteren Bodenzonen. Dabei ist die Verteilung des Abflusses abhängig von der Sättigung des freien und gebundenen Wasseranteils im oberen Speicher.

Das Modellschema ist in Abbildung 3.7 (nach NWSRFS und CHMI) erläutert. Im Allgemeinen wird der Abflussprozess in den oberen und unteren Zonen betrachtet. In der oberen Zone füllt der Niederschlag den Speicher mit dem gebundenen (gespannten oder kapillaren) Wasser. Wenn der Bodenkörper in diesem Speicher nun vom Niederschlag gefüllt ist, d.h. wenn alle Poren vom Wasser aufgefüllt worden sind, kommt es zur anschließenden Füllung des unteren Speichers mit dem freien Wasseranteil. Nach der Vollsättigung der beiden Speicher (mit gespanntem und freiem Wasseranteil) kann es entweder zur Perkolation (Durchsättigung) des Wassers in die untere Bodenzone oder zu dem unterirdischen Abfluss führen. Falls der Niederschlag die beiden Speicher (mit dem gebundenen und freiem Wasseranteil) vollfüllt, resultiert dies in der schnellen Reaktion des Direktabflusses im Einzugsgebiet. Auch die untere Zone besteht aus zwei Speichern mit dem gebundenen und freiem Wasseranteil, welche diese Zone durch Perkolation erreichen. Wenn die untere Zone gesättigt ist, kommt es zu einem kurzfristigen und langfristigen Basisabfluss. Es wird angenommen, dass die Entwässerung aus der unterirdischen Zone nach Darcys Gesetz verläuft (Daňhelka 2003).

Das Modell ist von folgenden (nach Hogue 2000 und Daňhelka 2006) Parametern abhängig, die Informationen (teilweise mit Werteangaben) stammen aus der Region des Oberen Mississippi, wo der Vorhersagedienst North Center River Forecast Central (NCRFC) tätig ist, zusätzliche Informationen sind von CHMI Prag:

- **UZWWM** - maximales Volumen des gebundenen Wassers in der oberen Zone [mm]
- **UZFWM** - maximales Volumen des freien Wassers in der oberen Zone [mm]
- **LZWWM** - maximales Volumen des gebundenen Wassers in der unteren Zone [mm]
- **LZFPM** - primäres maximales Volumen des freien Wassers in der unteren Zone [mm]
- **LZFSPM** - ergänzendes maximales Volumen des freien Wassers in der unteren Zone [mm]
- **UZK** - laterale Abbaurate des freien Wassers in der unteren Zone [ $\text{Tag}^{-1}$ ]
- **LZPK** - primäre Abbaurate des freien Wassers in der unteren Zone [ $\text{Tag}^{-1}$ ]
- **LZSK** - ergänzende Abbaurate des freien Wassers in der unteren Zone [ $\text{Tag}^{-1}$ ]
- **ZPERC** - maximale Durchlässigkeitsrate [-]
- **REXP** - Exponent der Durchlässigkeitsgleichung [-]
- **RSERV** - Anteil des freien Wasseranteils der unteren Zone, der nicht übertragbar vom gebundenen Wasser ist [%]
- **PFREE** - Anteil des Durchlässigkeitswassers von der oberen Zone direkt in die untere Zone des freien Wassers [%]
- **PCTIM** - undurchlässiger Bruchteil des Einzugsgebietes [%]
- **ADIMP** - zusätzliche undurchlässige Fläche [%]
- **RIVA** - Ufervegetation [%]
- **EFC** - effektive Bewaldung

- **SIDE** - Anteil des Tiefzuflusses in den Basisabfluss in Gerinne [%]
- **PXADJ** - Niederschlagskorrekturfaktor (Wind, Interzeption)
- **PEADJ** - Evapotranspirationskorrektur
- **IOPDET** - Anwendung der Kurve der täglichen Evapotranspiration [0/1]
- **ET demand** - potentielle Evapotranspiration

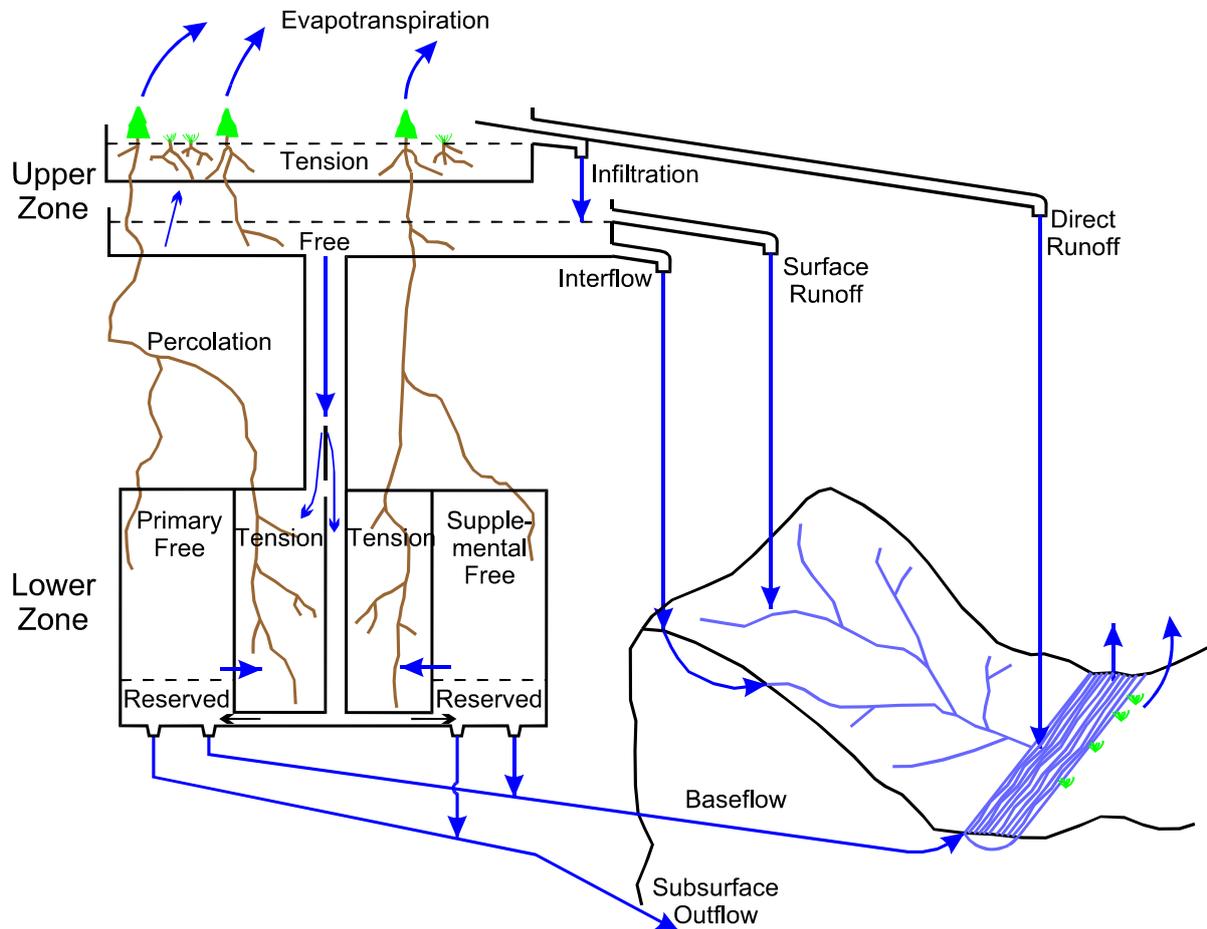


Abbildung 3.7: Funktionsschema des Niederschlag-Abfluss-Modells SAC-SMA (NWS 1999) dargestellt in miteinander gekoppelten horizontalen und vertikalen Speichern.

### 3.3.1.3 Beschreibung des Schneemodells SNOW-17

Für den Schneedeckenaufbau, -entwicklung und -schmelze wurde das konzeptionelle Modul SNOW-17 herangezogen, ebenfalls von NWSRFS angewendet. Dadurch wird der Energieaustausch zwischen Luft und Schneedecke bilanziert, ferner wird die Retention des flüssigen Wasseranteils in der Schneedecke ermittelt. Mit dem Modell wird das Input durch den Schnee für das Niederschlag-Abfluss-Modell SAC-SMA generiert. Daneben sind die Ergebnisse dieses Modells für eine kontinuierliche Entwicklung der Variablen des Niederschlag-Abfluss-Prozesses auch nach der Frühlingstauperiode von großer Bedeutung.

Das Modell der Schneeschmelze basiert auf der Gleichung des Wärmeaustauschs, welches den Grad-Tag-Faktor (Anderson 1973) nutzt. Die Berechnung der Schneedeckenentwicklung ist von den Zeitreihen der Temperatur und Niederschläge abhängig. Der ermittelte Wasserinhalt im Schnee sowie die

Eigenschaften der Schneedecke sind die Anfangsbedingungen für den nächsten Berechnungsschritt. Erst wird die Intensität der Schneeschmelze je nachdem ermittelt, ob Niederschläge auf die Schneedecke fallen. Dafür gelten zwei verschiedene Berechnungsansätze (Daňhelka 2006).

Im Zusammenhang mit diesem Modell wird das Modell RSNWELEV benutzt. Es berechnet den Zustand des Wassers nach der Höhe über dem Meer. Auf Grund der Temperatur und des Temperaturgradienten der Höhe wird die Höhe (Isotherme) ermittelt, bei welcher die Temperatur 0 °C beträgt. Oberhalb dieser Isotherme ist der Niederschlag im festen Zustand (Schnee) und unterhalb dieser Grenze handelt es sich um flüssigen Niederschlag.

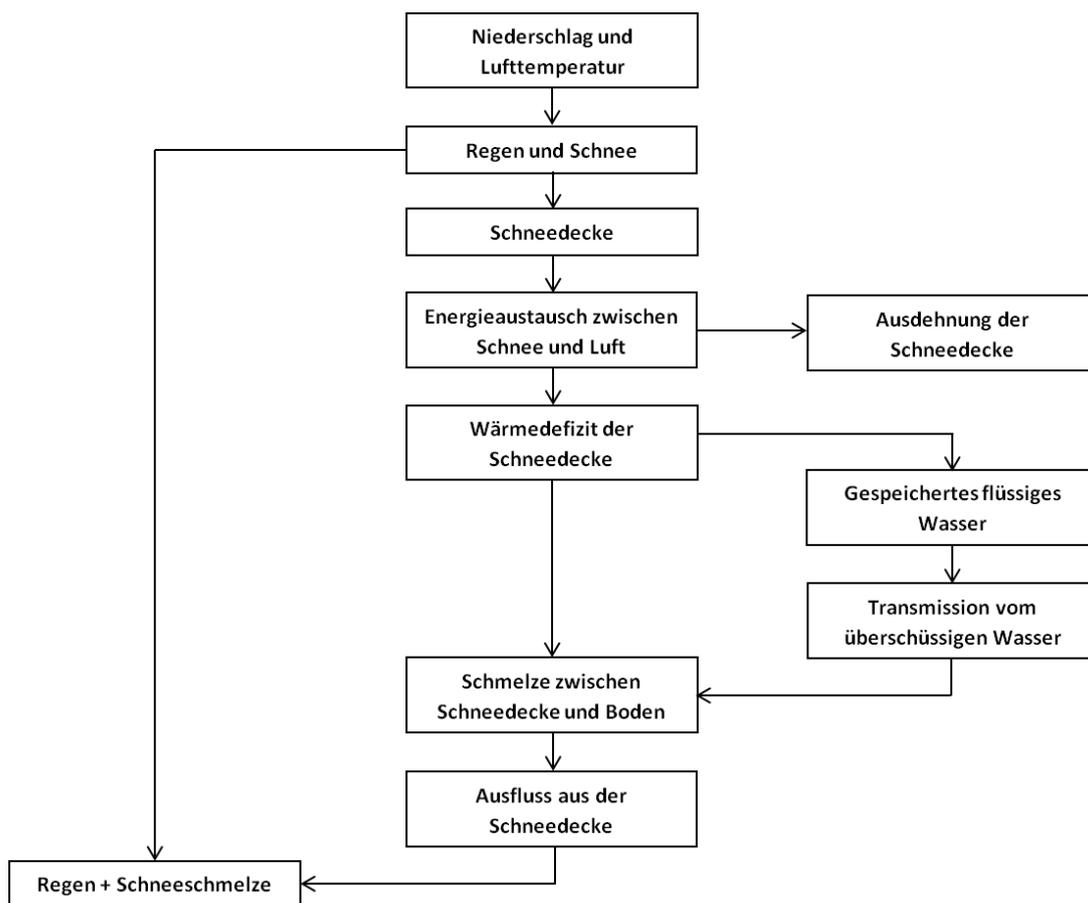


Abbildung 3.8: Schema des Schneemodells SNOW-17 (NWS 2007)

Das Modell SNOW-17 simuliert den Inhalt sowie die Übertragung des flüssigen Wassers in der Schneedecke. Das Ergebnis ist der Input des Wassers auf die Bodenoberfläche, was in der Berechnung des NA-Prozesses mittels SAC-SMA weiter durchgeführt wird. Das Modellschema ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Die Modellparameter des Schneemodells SNOW-17 nach (Anderson 2006) sind zusammengefasst, wie folgt:

- **SCF** - Multiplizierfaktor für die Anpassung der Stationsniederschlagsdaten, um die Mängel während Schneefall zu erfassen (Wind, Verluste der Interzeption) [-]
- **MFMAX** - maximaler Faktor der Schneeschmelze [mm/°C/6h]
- **MFMIN** - minimaler Faktor der Schneeschmelze [mm/°C/6h]
- **UADJ** - Faktor der Windfunktion [mm/hPa/6h]

- **SI** – Modellparameter, der den mittleren Wasseräquivalent der Schneedecke definiert [mm]
- **Areal depletion curve** - Kurve, die die räumliche Ausdehnung von Schnee als Funktion des restlichen Schnees definiert
- **NMF** - maximaler negativer Schmelzfaktor [mm/hPa/6h]
- **TIPM** - voriger Temperaturindex (0.1 - 1.0)
- **PXTEMP** - Temperatur, die den Regen vom Schnee abgrenzt [°C]
- **MBASE** - Grundtemperatur für die Berechnung der Schneeschmelze [°C]
- **PLWHC** - prozentuelle Aufnahmefähigkeit des flüssigen Wassers in der Schneedecke
- **DAYGM** - konstanter Betrag des Schmelzwasseranteils zwischen dem Schnee und der Bodenoberfläche [mm/Tag]

#### 3.3.1.4 Beschreibung des Talsperrenmodells sMAN

Für die Simulation des Abflusses durch die großen Talsperren wurde das Modell sMAN entwickelt. Das Modell kann die Steuerung der Talsperren unter verschiedenen Annahmen des Ausflusses simulieren. Das Modell nutzt die Bilanzierung des Wasservolumens anhand des Zuflusses, Ausflusses, aktuellen Wasserstands und der Speicherinhaltslinie. Das Modell ermöglicht den Ausfluss von einer Talsperre über die einzelnen Bauwerke (Hochwasserentlastungsanlage, Grundablass, Kraftwerk) zu simulieren. Dabei ist der Steuerungsplan neben dem Anfangswasserstand vor einem Ereignis ein wichtiges Kriterium für die operationelle Anwendung dieses Modells.

Auf der Abbildung 3.9 ist das Modell sMAN für die Moldauer Talsperrenkette schematisiert. Die einzelnen Verbindungslinien zwischen beiden Punkten stellen einen Ausfluss über die o.g. Bauwerke dar. Sie repräsentieren hydraulisch klar definierte Prozesse. Das Model sMAN besteht aus folgenden Komponenten:

- **RES** - Bilanz in der Talsperre
- **MS3** - Überfall
- **MB3** - Grundablass
- **ELN** - Kraftwerk
- **DMY** - Ein Modell für die Abflussüberführung zwischen den einzelnen Verbindungslinien
- **QVH** - Abflusskurve des Überfalls und Grundablasses
- **MCT** - Muskingum-Cunge-Modell
- **TDR** - Translations-Diffusions-Modell
- **REL** - Kontrolle der maximalen Ausflüsse von der Talsperre mittels der Abflusskurve

Vor allem die Wirkung der großen Talsperren an der Moldau (Lipno, Orlik und Slapy) und Nechanice an der Eger, auf die jährlichen Hochwasserabflüsse, wurden im Rahmen der Talsperrenstudie (MŽP 2005) ausführlich untersucht, deren Ergebnisse weiter auf die deutschen Pegel verwertet wurden, siehe Kapitel 4.11. Damit wurden Jährlichkeiten der Ereignisse bestimmt, bei denen die Talsperren weiterhin wirksam auf die Scheitelabflüsse sein könnten. Die ebenfalls in Kapitel 6 angesprochenen Extremszenarien wurden mit den Einflüssen der großen Talsperren modelliert.

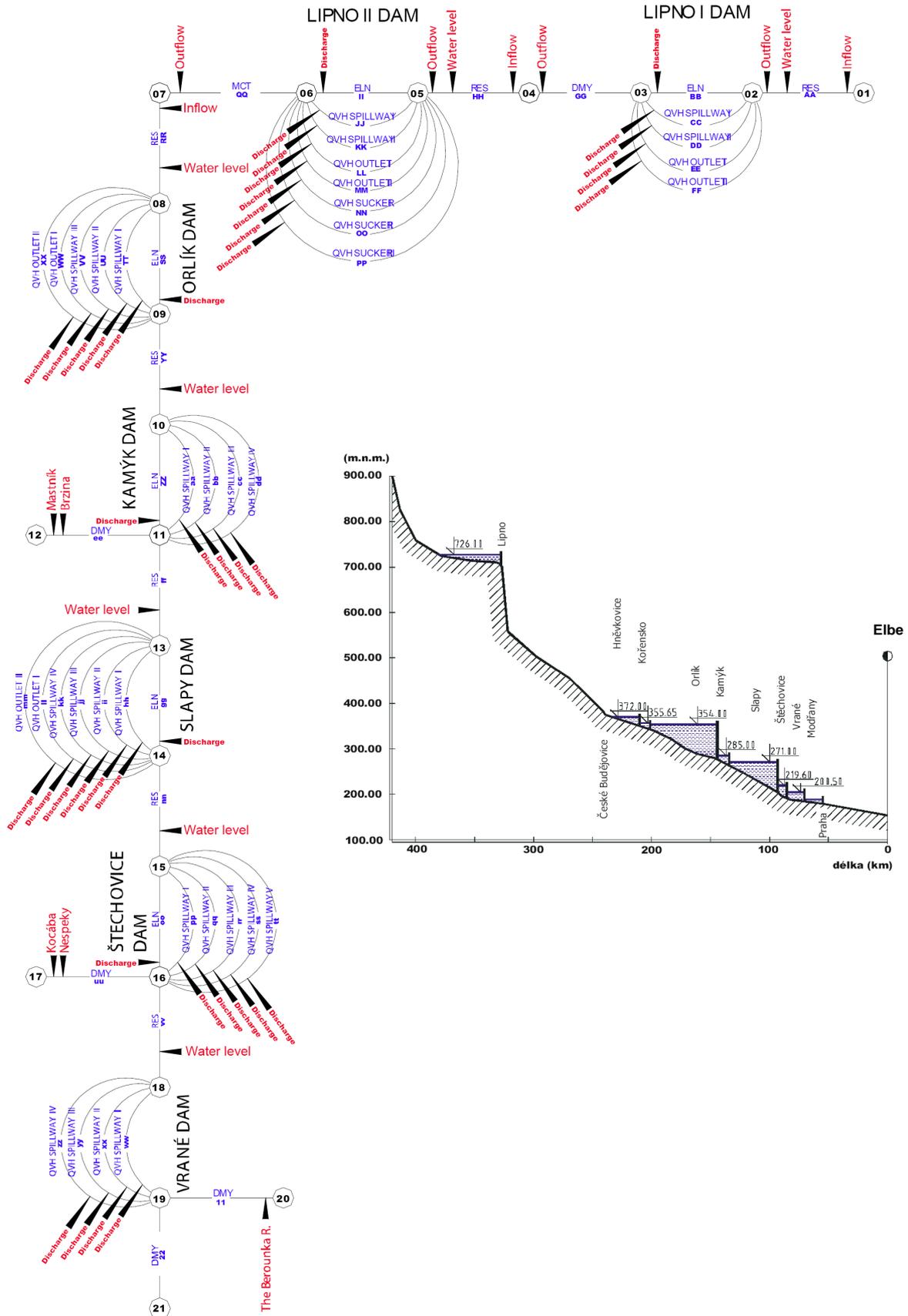


Abbildung 3.9: Modellschema des Talsperrenmodells sMAN und ein Längsschnitt der Moldauer Talsperrenkette (MŽP 2005 und CHMU)

### 3.3.1.5 Einheitsganglinie

Wie bereits erwähnt wurde, errechnet das Modell SNOW-17 den Input für das Niederschlag-Abfluss-Modell SAC-SMA. Mit diesem NA-Modell wird die Abflussbildung auf der Oberfläche und im Boden bis zu einem Schließprofil in Gerinne simuliert. Ferner muss die Abflusskonzentration aus der Einzugsgebietsfläche mittels der ermittelten Abflussbildung und der Einheitsganglinie berechnet werden.

### 3.3.1.6 Flood-Routing Modelle (Wellenablaufmodelle)

Der Wellenverlauf zwischen zwei benachbarten Pegeln wird in der Hydrologie als Flood-Routing bezeichnet. Es umfasst physikalische Prozesse der strömenden Wassermenge im Flussbett oder im Kanal sowie bei Hochwasser im Vorland. Darunter lässt sich eine Wellentransformierung (Verformung) oder eine Wellenabflachung anhand der Speicherfähigkeit entlang der Flusstrecke und der Wirkung der instationären Strömung vorstellen. In diesem Kapitel werden kurz die Modelle beschrieben, die ihre Herkunft in der Bewegungsgleichung haben. Eine detaillierte Lösung der Wellenverformung erfordert ein hydrodynamisch begründetes (hydraulisches) Modell mit verteilten Parametern, das den Saint-Venant-Gleichungen entspricht, siehe Kapitel 3.2 und Abbildung 3.1. Sie bestehen aus der dynamischen Grundgleichung und der Kontinuitätsgleichung. Dieser hydraulische Ansatz ist für die Planungs- und Bemessungsaufgaben besonders der lokalen Maßnahmen geeignet aber andererseits weniger geeignet für eine großräumig operationelle (möglichst schnelle) Hochwasserabflussvorhersage im Gerinne. Dafür ist die Kenntnis der genauen Geometriekennwerte und Rauigkeit unverzichtbar. Durch die Vernachlässigung der Trägheitsglieder der Bewegungsgleichung (Dyck 1995) ergibt sich der Diffusionswellenansatz (Translations-Diffusions-Modell), dessen Anwendung auf den Flüssen mit großen Ausuferungen (Rückstauwirkungen) gute Ergebnisse wie der vollständige Ansatz liefert. Wird das Druckglied in der Bewegungsgleichung vernachlässigt, erhält man den kinematischen Wellenansatz. Dieser vereinfachte Ansatz ist für die Flusstrecken ohne bedeutende Rückstauwirkungen geeignet. Das Anwendungsgebiet entspricht ebenso den konzeptionellen Modellen, bei denen die physikalischen Prozesse zwischen Eingang und Ausgang durch physikalisch begründete Parameter vereinfacht bzw. ersetzt werden. In diese Modellgruppe gehören z.B. Blocksystemmodelle (Muskingum-Cunge- und Kalinin-Miljukov-Modelle).

Der Baustein des Flood-Routing-Modells nach Kalinin-Miljukov ist eine lineare Speicherkaskade, die auf der Methode des Einzelspeichers basiert. Die Wellenbewegung wird in Flussabschnitten berechnet. Ein Flussabschnitt ist in  $n$  gleichen Unterabschnitten der Länge  $L$  geteilt. Diese Methode erfordert geometrische Kennwerte der Flussabschnitte und Wasserspiegelaufnahmen, die aber am Anfang dieser Dissertation nicht zur Verfügung standen. Mehr Informationen über diese Methoden sind ausführlich in (Dyck 1995 und Maniak 2010) beschrieben.

Das zweite oft benutzte Flood-Routing-Modell ist das Muskingum-Cunge-Verfahren, wo die lineare Speicherbeziehung um einen instationären Anteil, der mit dem dimensionslosen Anpassungsparameter  $X$  gesteuert wird, erweitert wird. Ebenso bei dem Modell wird die Speicherkonstante  $K$  in Stunden ermittelt. Der Vorteil dieses Modells ist, dass es eine Bestimmung zweier Parameter für den normalerweise gesamten Abflussbereich erfordert, wenn keine signifikante Nichtlinearität (Rückstauwirkungen) auftritt.

Da das Translations-Diffusions-Modell bereits in den 1980er Jahren an dem deutschen Elbelauf im Rahmen des ELBA-Konzeptes (Güthlein, 1980) entwickelt wurde und es sich dort gut bewährt hat, wurde dies auch auf den tschechischen Flussstrecken der Elbe und Moldau im Rahmen der vorliegenden Arbeit angesetzt, um eine einheitliche Modellkopplung erreichen zu können. Für eine nähere Beschreibung ist auf Kapitel 3.2. zu verweisen. An den tschechischen Abschnitten der Elbe und Moldau wird im Rahmen des offiziell benutzten Vorhersagesystems AquaLog das Muskingum-Cunge-Verfahren benutzt.

### 3.3.1.7 Parameterermittlung, Rand- und Anfangsbedingungen

Anfangsbedingungen stellen ein wichtiges Input des Modells dar. Die Bodenvorfeuchte ist die bedeutendste Anfangsbedingung beim Niederschlag-Abfluss-Modell. Jedoch bei einer längeren kontinuierlichen Simulation des NA-Prozesses mittels der beobachteten Niederschlagsreihen fällt diese Anfangsbedingung aus. Um die Anfangsbedingung – Bodenvorfeuchte – richtig abschätzen zu können, müssen die Niederschlagssummen von den vorherigen Monaten herangezogen werden (MŽP 2005). Für das Talsperrenmodell sMAN ist der Anfangswasserstand in einer Talsperre als Anfangsbedingung maßgeblich.

Randbedingungen für das NA-Modell und Schneemodell sind vor allem die Zeitreihen der Niederschläge, Temperatur und Wasserinhalt (Äquivalent) in der Schneedecke. Ebenfalls als Randbedingungen lassen sich die Topographie und Bodentypen des Einzugsgebiets bezeichnen. Bei dem Talsperrenmodell werden die Randbedingungen durch den Zu- und Ausfluss, sowie die Speicherinhaltslinie definiert.

Das Ziel der Modellkalibrierung ist, die geeigneten Parametersätze zu finden, die die beste Übereinstimmung zwischen Simulationen und Beobachtungen liefern können. Dafür sind die Beobachtungsreihen der Niederschläge und der Abflussganglinien des simulierenden Einzugsgebiets unverzichtbar. In den Einzugsgebieten ohne beobachtete Daten wird die Ähnlichkeit der Eigenschaften der benachbarten Einzugsgebiete, wo Beobachtungen und Parameter existieren, angewendet.

Erst wurde eine manuelle Parameterkalibrierung der konzeptionellen Modelle SAC-SMA und SNOW17 bearbeitet. Dies basierte auf der Methode „Versuch – Fehler“. Jede Simulation wurde mit der beobachteten Ganglinie mittels Graphik und Tabelle verglichen. Diese manuelle Methode der Kalibrierung ist jedoch zeitaufwändig und sie erfordert umfangreiche Erfahrungen mit der Kalibrierung des Bearbeiters (MŽP 2005). Nach den Erfahrungen beim NWS erfordert dies 15 bis 20 Arbeitsstunden, im Gegensatz dazu dauert eine automatische Kalibrierung etwa 3 bis 4 Stunden (Hogue 2000). Aus diesem Grund wurde diese Methode der Kalibrierung im Laufe der Zeit mit den automatischen Methoden Shuffle Complex Evolution (SCE-UA) (Duan 1991) und Multi-Step Automatic Calibration Scheme (MACS) (Tomkins 2001) ersetzt. Daneben wurden im Rahmen des Vorhersagesystems AquaLog noch Methoden Pattern Search (Monro 1971) und Adaptive Random Search (ARS) (Brazil 1989) angewendet. Die Parameteroptimierung mittels MACS erfolgte stufenweise in drei Schritten (MŽP 2005). Erst wurden die Parameter des Basisabflusses ermittelt und danach wurden die Parameter für Hochwasserabflüsse kalibriert. Zum Schluss wurden Parameter des unterirdischen Abflusses aus der unteren Zone kalibriert.

Für die Bewertung der Kalibrierungsparameter sind die Hochwasserscheitelwerte und Ereignisvolumen maßgeblich. Im Rahmen des RIMAX-Projekts wurden diese Kennwerte (Scheitelwerte und Ereignis-

nisvolumen) von den Simulationen und Beobachtungen ausgewählter Ereignisse aus 2002, 2003 und 2006 tabellarisch zusammengefasst und verglichen (Daňhelka 2006). Mit der Heranziehung der zusätzlichen beobachteten Daten muss die Unsicherheit der Vorhersage und der Simulation nicht unbedingt verringert werden (Beven 1993).

Die Grundursache der Unsicherheit in den Modellprozessen kann in der ungeeigneten Modellstruktur sowie in dem falschen Kalibrierungsprozess der verschiedenen Parametersätze (Wagener 2003) liegen. Um die möglichen Fehler der konzeptionellen Modelle analysieren und identifizieren zu können, wurde die Methode Dynamic identifiability analysis (DYNIA) entwickelt. Mit dieser Methode wurde versucht, die Informationsverluste der aufsummierten Modellresiduen in der Zeit zu vermeiden.

### 3.3.2 Niederschlag-Abflussmodellierung im deutschen Teileinzugsgebiet der Elbe

Für die Niederschlag-Abflusssimulation im deutschen Zwischeneinzugsgebiet zwischen den Pegeln Dresden und Aken wurde ein großskaliges stochastisch-konzeptionelles Blockmodell am IWG nach Helms (2008 und 2009) entwickelt. In diesem Modell wird der Niederschlag-Abfluss-Prozess in einzelnen Modulen gerechnet wie folgt: raumzeitliche Niederschlags- und Temperaturverteilung, Schneedeckenentwicklung, Abflussbildung und Abflusskonzentration, Fließprozess im Gewässer.

Das Gebietsinput aller Niederschläge sowie Wasserabgabe aus der Schneedecke wird als eine Zeitreihe, die u.a. mittels der Inverse-Distance-Methode ermittelt wurde, in das Modell eingegeben.

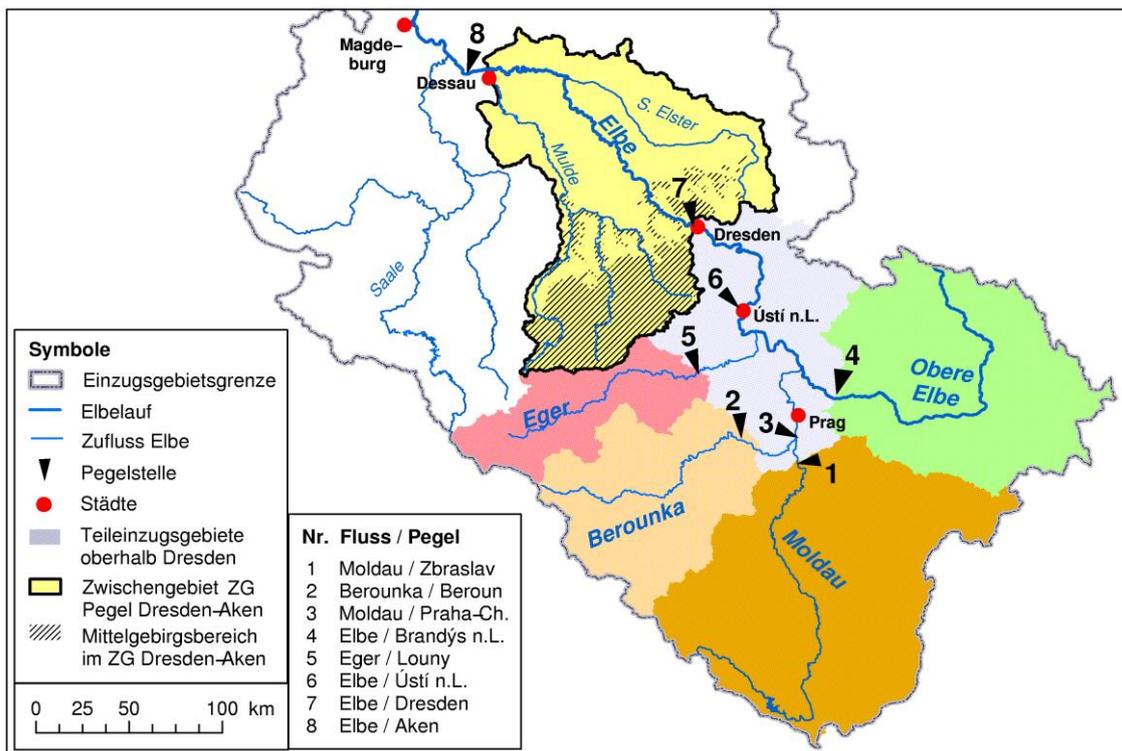


Abbildung 3.10: Einzugsgebiete, wo die NA-Prozesse großskalig simuliert wurden - im tschechischen Teil mit dem AquaLog und im deutschen Teil mit dem stochastisch-konzeptionell Blockansatz. Das Mittelgebirgsbereich ist hier schraffiert (Helms 2009)

Das Modul für die Simulation der Abflussbildung und der Abflusskonzentration besteht aus zwei Modellen – aus dem Grundmodell des gesamten Zwischengebiets und aus dem Mittelgebirgsmodell,

welches als hochwasserauslösendes Gebiet gilt. Der Gebietsinput wurde nach den Kriterien, die z.B. in der Literatur ausführlich (Helms 2009) beschrieben wurden, je nach Größe und Dauer definiert. Bei höheren Werten des Gebietsinputs wurde der Input-Überschuss des Mittelgebirges eingeführt und gleichzeitig wurde das Mittelgebirgsmodell neben dem Grundmodell zugeschaltet. Die einzelnen Abflusskomponenten (persistenter Abfluss, Basisabfluss und Direktabfluss) werden mit den Einzelspeichern, die mit der linearen Speicherkaskade und den Saisonparametern usw. kombiniert wurden, berechnet. Der Berechnungsprozess der Abflusssimulation durch das Mittelgebirgsmodell basiert auf dem Durchlauf durch eine lineare Speicherkaskade. Für eine detaillierte Beschreibung sowie Bilddarstellung des Modells wird auf die Literatur (Helms 2009) verwiesen.

## 4 Großskalige hydrologische Untersuchung von Ereignissen

Wie bereits am Anfang dieser Arbeit erwähnt wurde, stellt eine Bewältigung extrem großer Ereignisse am Beispiel der mittleren deutschen Elbe in Sachsen-Anhalt die zentrale Frage dar. Daraus ergibt sich die nächste Fragestellung zu möglichen künftigen Extremereignissen vor allem in Ausmaß, Größe und Ablauf. Deshalb müssen erst die historischen beobachteten Ereignisse gründlich untersucht und danach aufgrund der physikalisch begründeten Randbedingungen der beobachteten Situationen Extremszenarien mithilfe von NA-Modellen und Flood-Routing-Modelle generiert werden.

### 4.1 Gekoppelte Abflusssimulation in Bezug auf die Planung der Notpolder

Einer der Schwerpunkte dieser Arbeit ist die Optimierung bzw. Kopplung von bereits bestehenden hydrologischen Modellen, die am tschechischen und deutschen Elbelauf genutzt werden, in Bezug auf die in Sachsen-Anhalt untersuchten Notpolder und deren operationellen Betrieb (Steuerung). Mittels einer zuverlässigen und möglichst genauen Hochwasservorhersage kann eine optimale dämpfende Wirkung der Notpolder auf den Hochwasserscheitelwert und dadurch eine größere Sicherheit für die unterliegenden Betroffenen und daraus eine Schadensminderung erreicht werden. Mit dem FGM Programmsystem lässt sich der Hochwasserablauf im Gerinne und im Vorland als komplexes Vorhersagesystem ermitteln und operationell anwenden. Dafür wurde im Rahmen dieser Dissertation die Erweiterung des Translations-Diffusions-Modells stromaufwärts bis Prag an der Moldau und Brandýs an der Elbe angestrebt. Hiermit kann die Abflussvorhersage je nach Ereignis um 1 bis 2 Tage verlängert werden, um die notwendigen Maßnahmen und Entscheidungen im Hinblick auf die Notpoldersteuerung in Sachsen-Anhalt vorbereiten zu können. Andererseits konnten durch die Kopplung der bestehenden tschechischen und deutschen Modelle Ergebnisse verschiedener Studien und Projekte (RIMAX, Talsperrenstudie), welche die Talsperreneinflüsse auf Hochwasser beinhalten, weiter entlang der deutschen Elbe angewendet werden, um die Notpolderwirksamkeit und die bisherige Polderuntersuchung besser begründen zu können.

Entlang der deutschen Elbe wird das Translations-Diffusions-Modell, wie hier bereits erwähnt, für die Abflussvorhersage und –simulation eingesetzt. In der Tschechischen Republik wird das komplexe Modell AquaLog, in dem die Methode Muskingum-Cunge für das Flood-Routing-Prozess integriert ist, benutzt. Die Inputparameter - der Translationskoeffizient  $u$  und der Diffusionskoeffizient  $D$  - des Modells sind ab Ústí nad Labem stromabwärts für alle Abflussbereiche und Streckenabschnitte in Deutschland durch die BfG bekannt, siehe Abbildung 4.1. An den tschechischen Streckenabschnitten der Elbe und Moldau stehen die Parameter nicht zur Verfügung, deshalb müssen sie durch die gemessenen Abflussganglinien und den Modellansatz iterativ ermittelt werden. Dafür wurde eine geeignete Kombination aus den Modellparametern  $u$  und  $D$  gesucht, die sich der Realität – an die beobachtete Abflussganglinie des unteren Pegels – am bestens annähert.

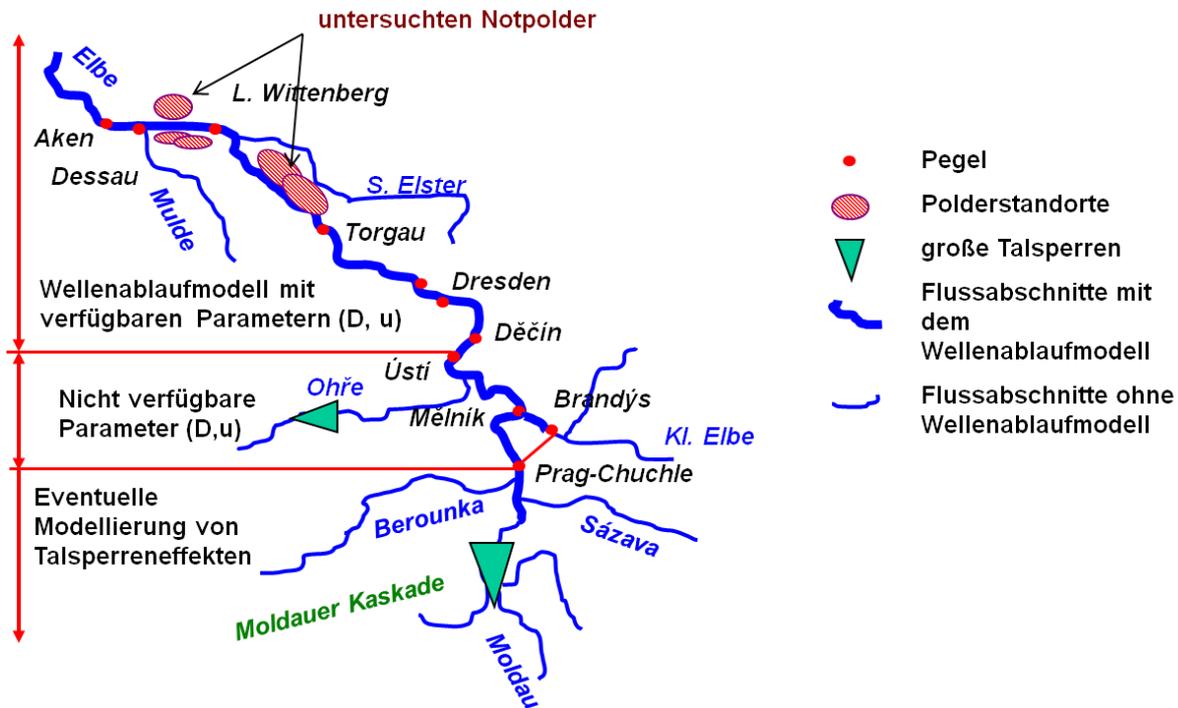


Abbildung 4.1: Eine Übersichtskarte der Elbe und ihrer wichtigen Modellstrukturen

## 4.2 Parameteroptimierung und –Ermittlung

Da das Translations-Diffusions-Modell, welches im Kapitel 3.2 bereits beschrieben ist, auch auf die tschechischen Abschnitte der Elbe bis Brandýs und Moldau bis Prag erweitert werden soll, mussten die Parameter dafür ermittelt werden. Aus dem Grund wurden die beobachteten Abflussganglinien von den Pegeln Prag und Vraňany an der Moldau, Děčín, Ústí nad Labem, Mělník und Brandýs an der Elbe und Louny an der Eger herangezogen. In der Vergangenheit gab es zusätzlich eine Beobachtung in Roudnice, die hier nicht zur Verfügung gestellt wurde.

Die Parameter  $u$  und  $D$  wurden für jeden Abflussbereich und Streckenabschnitt iterativ ermittelt. Dafür wurde ein FORTRAN-Programm entwickelt, mit dem der Flood-Routing-Prozess zwischen zwei Pegeln mit zahlreichen Parameterkombinationen simuliert wurde, um anschließend die besten Simulationen mit einem Auswertungskriterium zu analysieren.

Der iterative Berechnungsprozess der Parameterermittlung besteht aus folgenden Schritten im Allgemeinen:

- Verteilung der Streckenabschnitte nach den verfügbaren Pegelreihen
- Einlesen der beobachteten Abflussganglinien von den unteren und oberen Pegeln
- Einlesen der Kombinationen der Parameterpaare  $u$ ,  $D$  und Berechnung der Systemfunktionen
- Faltung der Abflussganglinien mit allen Systemfunktionen
- Ergebnisse der simulierten Abflussganglinien für alle Kombinationen  $u$  und  $D$
- Auswertung der simulierten Abflussganglinien für alle Kombinationen  $u$  und  $D$  mit der unteren beobachteten Ganglinie mittels des Gütekriteriums nach Nash-Sutcliffe

Die Strecken wurden in die folgenden Teilstrecken aufgeteilt, wo die Parameter nur teilweise iterativ ermittelt werden konnten, siehe Abbildung 4.2:

- Ústí nad Labem – Dresden (98,8 km) / Elbe
- Mělník – Egermündung (45 km), Egermündung – Ústí nad Labem (25 km), zwei Strecken mit gleichen Parametern, ermittelt als eine Strecke, Louny – Egermündung bei Terezín/ Theresienstadt (40 km) ohne Parameterermittlung
- Brandýs – Mělník (28,4 km), ohne Parameterermittlung
- Vraňany – Mělník (11,3 km) / Moldau, ohne Parameterermittlung
- Prag-Chuchle – Vraňany (49,5 km) / Moldau

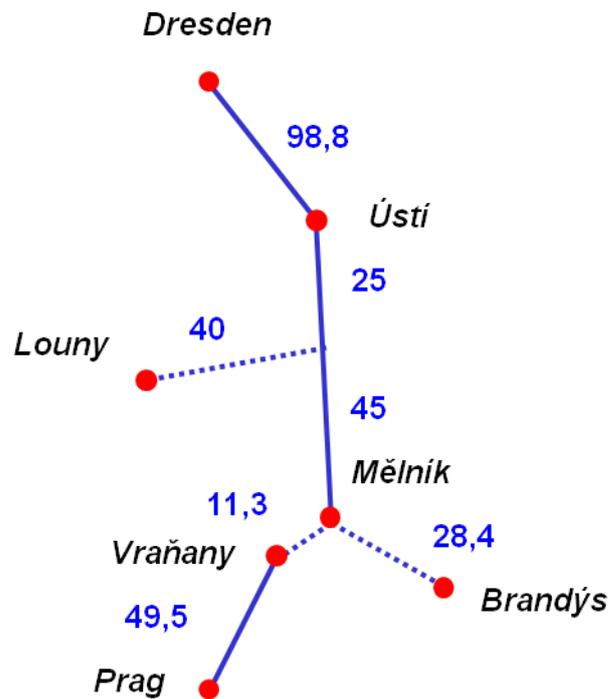


Abbildung 4.2: Ein Berechnungsschema der Parameteroptimierung der tschechischen Elbe- und Moldauabschnitte mit Angaben der Entfernung zwischen den jeweiligen Pegeln oder Punkten. Entlang der gestrichelten Abschnitte konnten die Parameter nicht iterativ ermittelt werden.

Da Simulationen für 100 bis 300 Kombinationen von den Parametern  $u$  und  $D$  durchgeführt wurden, wurden diese mit dem in der Hydrologie häufig angewandten Gütekriterium nach Nash und Sutcliffe (siehe Gleichung 4.1) ausgewertet. Dabei werden die Summen der quadratischen Fehler zwischen den simulierten und beobachteten Abflusswerten des jeweiligen Zeitpunktes  $IH$  und zwischen den beobachteten und mittleren beobachteten Werten ermittelt. Je näher das Kriterium 1 ist, umso besser die Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Simulation

$$NSK = 1 - \frac{\sum_{IH=1}^{IH} (Qsim_{IH} - QB_{IH})^2}{\sum_{IH=1}^{IH} (QB_{IH} - \overline{QB})^2} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

mit:

- NSK [-] Nash-Sutcliffe-Kriterium
- $Q_{sim_{IH}}$  [ $m^3/s$ ] simulierter Abfluss
- $Q_{B_{IH}}$  [ $m^3/s$ ] beobachteter Abfluss
- $\overline{QB}$  [ $m^3/s$ ] mittlerer beobachteter Abfluss
- IH [h] Zeitpunkt der Abflussreihe

Da es sich um ein dreistufiges Modell handelt, wurde die Parameterermittlung folglich mit der niedrigsten Abflussstufe bis  $Q_{KRIT1}$  angefangen. Dabei wurden jedoch bei der Auswertung mit dem Gütekriterium Niedrigabflüsse kleiner als  $200 m^3/s$  wegen der großen Unsicherheit und der Wirkung der Seitenzuflüsse ausgeschlossen. Da der kritische  $Q_{KRIT1}$  Wert unbekannt ist, wurde er auf  $300 m^3/s$  gelegt und jeweils um  $100 m^3/s$  erhöht. Der kritische Wert wurde dort ausgewählt, wo sich die Eingangsparameter gegenüber der vorherigen Simulation mit dem niedrigeren kritischen Wert erheblich verändert haben. Damit wurden die Parameter  $u$  und  $D$  des ersten Abflussbereiches ermittelt und weiter bei der Ermittlung des nächsten Abflussbereiches angewendet. Hier wurde die optimale Kombination von Parametern für die Abflüsse zwischen  $Q_{KRIT1}$  und  $Q_{KRIT2}$  gesucht. Mit der gleichen Weise wurden die Parameter der höchsten Abflüsse, die bis in die Ausuferungsbereiche reichen, ermittelt.

Aus der Zusammenstellung der Strecken mit angegebenen Pegelstellen, an denen die Modellparameter optimiert werden sollen, ist zu erkennen, dass auf einigen Strecken eine Parameterermittlung nicht direkt möglich ist, weil die Plausibilisierung der Simulation bei fehlender Beobachtung nicht durchführbar ist. Aus diesem Grund wurde in diesen Fällen von einer Ermittlung abgesehen. Auf diesen Strecken wurden dafür die beobachteten Ganglinien um einige Stunden laut der Fließzeitenkarte zwischen zwei Pegeln oder Stellen (Kašpárek 2004) zeitlich verschoben.

Zuerst wurde mit der Strecke Ústí nad Labem – Dresden (98,8 km) angefangen, trotz der Tatsache, dass die Parameter bereits von der BfG vorlagen. Es handelt sich um die Entwicklung und nachträgliche Anwendung des o.g. Optimierungssystems. Die Elbe fließt hier ohne erhebliche Ausuferungen, Retentionen und Staustufen durch eine Talstrecke, jedoch mit Seitenzuflüssen (Jílovský potok, Ploučnice, Kamenice, Kirnitzsch, Polenz, Gotleuba, Müglitz) aus dem mittelgebirgigen Zwischeneinzugsgebiet (9 % Gebietszuwachs). Die Wirkung von 11,7 % wurde mit Hilfe der Ereignisfüllen der beobachteten Ganglinien dieser zwei Elbepegel abgeschätzt und im Folgenden auf die Simulationen zugeschlagen.

Die Parameterermittlung der Strecke Mělník – Ústí nad Labem war komplizierter, weil die Eger bei Theresienstadt in die Elbe mündet und sich hier entlang der ganzen Strecke eine Staustufenkette befindet. Bei Theresienstadt und Mělník kam es im Jahr 2002 zu großen natürlichen Ausuferungen, die auf bis zu 200 Millionen  $m^3$  geschätzt wurden (MŽP 2005). Die Stauanlagen werden für die Schifffahrt und Energiegewinnung genutzt, wobei sie vor oder während eines Hochwassers entleert werden, um eine möglichst schadhafte Überführung eines Hochwasserereignisses sicherstellen zu können. Es wurde angenommen, dass entlang der beiden Strecken Mělník – Theresienstadt und Theresienstadt – Ústí nad Labem die gleichen Parameter  $u$  und  $D$  gelten, weil in Theresienstadt keine beobachtete Ganglinie vorliegt, mit der die Parameterkalibrierung erfolgen könnte. Die Parameterermittlung wurde in gleicher Weise durchgeführt wie auf der Strecke Ústí nad Labem – Dresden, jedoch mit zwei Teilstrecken unterschiedlicher Länge (25 und 45 km) und damit auch mit unterschiedlichen Formen der Systemfunktionen gleicher Parameter. Die 40 km entfernte Ganglinie in Louny an der Eger wurde

mit Verzögerung von 18 Stunden ohne Wellentransformation nach Theresienstadt übernommen, weil die Abflussverhältnisse der Eger wegen dem Einfluss der großen Talsperre Nechanice sehr träge sind und nur auf langsame Änderungen verweisen. Der Abflusszuwachs zwischen Mělník bzw. Louny und Ústí nad Labem beträgt etwa 1,1 %. Bei der Analyse wurde festgestellt, dass die Tagesreihen zu grob sind. Dafür mussten, soweit verfügbar, Abflussganglinien im Stundenschritt herangezogen werden. Die Translation einer kleineren oder mittleren Hochwasserwelle beträgt in diesem Fall weniger als einen Tag. Leider existieren von den Pegeln nur wenige beobachtete Ereignisse im Stundenschritt, auf dieser Strecke sind es nur 8, siehe Tabelle 4.1. Dazu sind die Anstiegsphasen dieser Reihen mit der Entlastung der Stauanlagen behaftet, was die Auswertung mit dem Gütekriterium erschwert. Laut Informationen der zuständigen Behörden sind diese Beobachtungen nicht korrigiert.

Der dritte Abschnitt, an dem die Parameter ermittelt werden sollten, ist an der Moldau zwischen Prag-Chuchle und Vraňany (49,5 km). Es handelt sich um eine Talstrecke vernachlässigbarer Ausuferungen, dafür jedoch mit Staustufen. Auch hier wurde bei der Parameterermittlung mit den Tagesreihen angefangen und später zu den Stundenreihen übergegangen. Da leider nur vier (nicht so extreme) Hochwasserereignisse mit einem maximalen Scheitelwert  $1260 \text{ m}^3/\text{s}$  zur Verfügung gestellt wurden, siehe Tabelle 4.1, wurde auf eine weitere Parameterermittlung verzichtet, weil der Schwerpunkt in der Untersuchung von Extremereignissen liegt.

### 4.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen von der Parameterermittlung

Wie bereits erwähnt, wurde die Parameterermittlung zum Zweck der Planung einer Poldersteuerung in Sachsen-Anhalt durchgeführt, um mögliche Extremszenarien von der tschechischen Seite (Talsperrenstudie und RIMAX) auch auf den deutschen Elbelauf übertragen zu können. Auf der anderen Seite können damit verschiedene Unsicherheiten bei der Vorhersagesimulation in Betracht gezogen werden, die für eine optimale Wirkung und für den rechtzeitigen Notpoldereinsatz zu beachten sind. Aus der durchgeführten Parameterermittlung können folgende Ergebnisse und Kenntnisse zusammengefasst werden:

- Die Parameterermittlung wurde nur iterativ durchgeführt und mit dem Gütekriterium ausgewertet.
- Die Abflussreihen im Tagesschritt waren nur an der Strecke Ústí nad Labem – Dresden ausreichend, an den restlichen Strecken musste die Ermittlung mit den Reihen im Stundenschritt durchgeführt werden.
- Die Änderung des Diffusionskoeffizienten hatte eine vernachlässigbare Wirkung auf den Simulationsverlauf und ist in vielen Fällen nicht physikalisch begründbar.
- Die großen Ausuferungen von 2002 wurden nicht berücksichtigt.
- Auf der Strecke Ústí nad Labem – Dresden wurde eine Schwankung des Translationskoeffizienten  $u$  (6,5 bis 9 km/h) des ersten Abflussbereiches bis  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  identifiziert; die Ermittlung erfolgte für jedes Jahr zwischen 1940 und 2001.
- Die Parameterermittlung der Stundenwerte wurde durch die Vorentlastung der Staustufen erschwert.
- Trotz aller Komplikationen wurden befriedigende Parametersätze gefunden, mit denen ausreichend genaue Simulationen der Abflussganglinien gerechnet werden können.

- Eine genauere Ermittlung würde eine detaillierte hydraulische Untersuchung der Profile, bei denen keine beobachteten Reihen existieren, erfordern.

Die Ergebnisse der Parameterermittlung  $u$  und  $D$  der tschechischen Abschnitte der Elbe sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Ein Simulationslauf mit den ermittelten optimalen Modellparametern ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Die Modellerweiterung konnte dadurch nur bis Mělník, leider nicht bis Prag, erreicht werden. Ebenfalls lässt sich damit die Simulationsvorhersage um 1 bis 2 Tage verlängern.

Tabelle 4.1: Erhobene beobachtete Ereignisse im Stundenschritt der Strecken, an denen das Simulationsmodell erweitert wurde oder werden sollte. Die maximalen Abflüsse beziehen sich auf die unteren Pegel der jeweiligen Strecke.

Prag-Chuchle – Vraňany Moldau		Mělník – Ústí nad Labem Elbe	
Jahr - Monat	max. Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	Jahr - Monat	max. Abfluss [m <sup>3</sup> /s]
		1965 - 3	1180
		1965 - 5	1690
		1974 - 12	1490
		1976 - 1	1020
		1981 - 7	2080
1988 - 3	1260		
1993 - 12	1150		
		1994 - 1	1600
1995 - 1	587	1995 - 1	1150
1995 - 6	552	1995 - 5	958
<b>4 Ereignisse</b>		<b>8 Ereignisse</b>	

Tabelle 4.2: Ergebnisse der iterativen Parameterermittlung der Elbestrecke Mělník – Ústí nad Labem. Damit wurden die Parameter Translation  $u$  und Diffusion  $D$  des angewandten Ansatzes ermittelt.

Mělník – Ústí nad Labem (70 km)	$u$ [km/h]	$D$ [km <sup>2</sup> /h]	$Q_{KRIT}$ [m <sup>3</sup> /s]
1. Abflussbereich	5.1	25	0 bis 500
2. Abflussbereich	6.1	60	500 bis 1000
3. Abflussbereich	6.5	65	über 1000

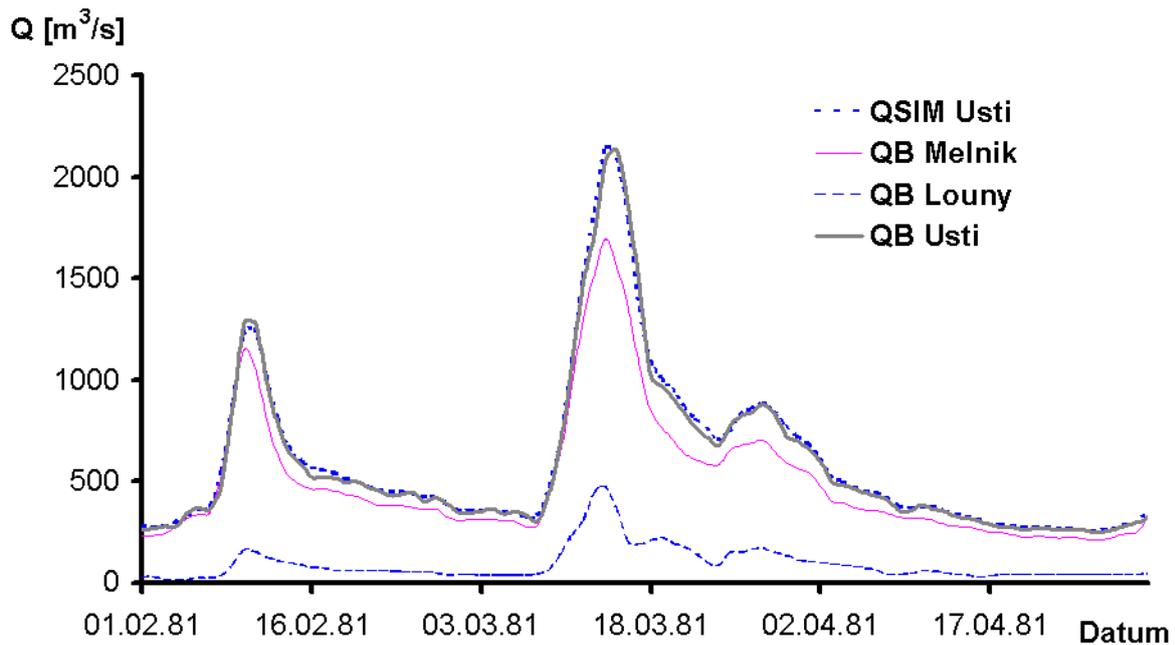


Abbildung 4.3: Die Anwendung der ermittelten Parameter des dreistufigen Translations-Diffusions-Modells der Elbestrecke Mělník – Ústí nad Labem für das Ereignis 1981, die Parameter sind in der Tabelle 4.2 zusammengefasst.

#### 4.4 Untersuchung von Ereignissen

Im Rahmen dieser Dissertation wurden gegenwärtige und historische Hochwasserereignisse ausgewählt und ferner untersucht, um die Hochwasserschutzmaßnahmen wirtschaftlich und gezielt planen zu können. Detaillierte Kenntnisse über die Hochwasserereignisse aus der Geschichte sind für die weitere Untersuchung unverzichtbar und stellen wichtige Randbedingungen für die Definition der simulierten Szenarien dar. Aus den historischen Informationen, über die Charakteristika der beobachteten Hochwasserereignisse, ergeben sich wichtige Fragen bezüglich der künftigen Ereignisse und deren Eigenschaften. Bei der Beschreibung und Untersuchung der historischen Hochwasserereignisse sowie künftiger Szenarien stellen sich folgende Fragen:

- Wie groß und extrem könnte ein Hochwasserereignis sein?
- In welchen Teileinzugsgebieten könnte es ausgelöst werden?
- Was ist die Ursache der Auslösung (Schneesmelze oder extreme Niederschläge)?
- Wie könnte es im ganzen Einzugsgebiet verlaufen?
- Wie würden sich die gegenwärtigen und künftigen Retentionsmaßnahmen auswirken?

Um diese Fragen beantworten zu können, müssen die historischen und aktuellen Ereignisse näher betrachtet werden.

Die Ereignisauswahl hängt von der Ereignisgröße (Scheitelwert) als einem Hauptkriterium ab. Daneben werden die zeitlichen Verläufe und damit ebenfalls die Dauer und Ereignisfüllen in Betracht gezogen. Ein wichtiger Aspekt bei der Ereignisauswahl ist das Gebiet, in dem ein Ereignis ausgelöst

werden kann, sowie die mögliche Ereignis/Wellenüberlagerung von den einzelnen Teileinzugsgebieten, welche zu verschärften Extremsituationen führen kann.

An den wichtigen Pegeln wurde jedes Ereignis zeitlich abgegrenzt und schon im Rahmen der Konsistenzprüfung der Daten, siehe Kapitel 2.6 und Abbildung 2.6, ihre Fülle ermittelt, um mögliche Systemfehler der Messung zu identifizieren. Von den ausgewählten Ereignissen wurden unter anderem das gleitende Maximum, siehe Kapitel 2.7.2 und Abbildung 2.8, und die ununterbrochene Überschreitungsdauer ermittelt um die kritische Deichbelastungsdauer zu bestimmen. Da der Niederschlag-Abfluss-Prozess im Elbeeinzugsgebiet nival und pluvial ist, d.h. der Abfluss wird von den Regen- oder Schneeniederschläge bzw. von beiden verursacht, wurden die Ereignisse für das Sommer (Juni-November) und Winterhalbjahr (Dezember-Mai) getrennt betrachtet. Die ausgewählten Ereignisse wurden tabellarisch zusammengefasst. Die Ereignisscheitelwerte der benachbarten Einzugsgebiete wurden in der Graphik gegenübergestellt, siehe Abbildung 4.5 und 4.6, um die mögliche Wellenüberlagerungen zweier Einzugsgebiete untersuchen zu können.

## 4.5 Ereignisauswahl

Die Ereignisauswahl wurde unter zwei Aspekten, je nach Szenarienmodellierung und Definition durchgeführt:

- aus meteorologischer Sicht – engere Auswahl (hier kurz beschreiben)
- aus hydrologischer Sicht – erweiterte Auswahl

Im Rahmen des RIMAX- Projekts wurden in Zusammenarbeit mit den Meteorologen des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) die unten genannten Sommer- und Winterereignisse unter dem meteorologischen Aspekt (je nach der Großwetterlage) ausgewählt. Aus diesen Ereignissen wurden die gemessenen klimatologischen Daten (Niederschlag, Temperatur, Schnee) erhoben, um das Modell zu validieren und zu überprüfen. Dadurch konnten großskalige Betrachtungen vorgenommen werden und Szenarien im Hinblick auf den simulierten Niederschlag durchgeführt werden. Die gemessenen und die durch die meteorologische Modellierung simulierten Niederschläge werden in Niederschlag-Abfluss-Modellen eingesetzt, um hydrologische Simulationen – Wellenablauf und Speichersimulation – vornehmen zu können. Die beobachteten und teilweise historischen Ereignisse wurden ferner nach ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit, Form und Vorkommen charakterisiert. Ggf. wurden auch die Vorereignisse, welche die Speicherfähigkeit und Bodenvorfeuchte des Einzugsgebiets beeinflussten, mit einbezogen. Für ausgewählte Ereignisse wurden in den einzelnen Teileinzugsgebieten der Elbe Hochwasserereignisse modelliert, um die Niederschlagsmenge und die räumlich-zeitliche Niederschlagsverteilung verschiedener Szenarien und der daraus resultierenden Hochwasserereignisse bestimmen zu können. Aus meteorologischer Sicht spielte die Verfügbarkeit der gemessenen Klimadaten (Niederschlag, Temperatur, Schneedecke) bei der Auswahl eine wesentliche Rolle. In Zusammenarbeit mit den Meteorologen wurden die folgenden Winter- und Sommerereignisse identifiziert und enger betrachtet, wie folgt:

a) Winterereignisse:

- März 1981: Es ist ein 1-gipfliges Ereignis, das oberhalb von Brandys im Elbeeinzugsgebiet und im Mulde- und Egereinzugsgebiet entstanden ist. Es ist zur Wellenüberlagerung der Elbe und Moldau in Mělník, sowie der Elbe und Mulde in Aken gekommen. HQ [m<sup>3</sup>/s]: Brandýs/Elbe

1140, Louny/Eger 471, ZW(DD-AK) 822, Prag/Moldau 644 und Dresden/Elbe 2186. Ein Monat vor dem Hauptereignis war ein kleines Vorereignis.

- Januar und März/April 1987 – zwei Ereignisse: Vor allem die oberen Elbe- und Muldeinzugsgebiete. Das erste Ereignis war ein 1-gipfliges, kurz andauerndes Ereignis ohne Vorereignis, HQ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]: Brandýs/Elbe 862, ZW(DD-AK) 694 und Dresden/Elbe 1720. Keine Überlagerung und kein Vorereignis. Das zweite 3-gipflige Ereignis kam im März und April und war etwa gleicher Größe wie im Januar. Entstehung in allen Gebieten.
- März und April 1987: Das 3-gipflige, lang andauernde Ereignis (1 Monat) wurde im oberen Elbe-, Moldau- und ZW- Einzugsgebiet ausgelöst. Die Hochwasserereignisse der Elbe und Moldau haben sich überlagert. HQ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]: Prag/Moldau 758 (erster Gipfel), Brandýs/Elbe 681 (erster Gipfel), ZW(DD-AK) 606 (dritter Gipfel) und Dresden 1780 (erster Gipfel).
- Januar 2003: Es handelt sich um ein 1-gipfliges Hochwasserereignis, verursacht von den Regenniederschlägen in den Wintermonaten ohne Schneeschmelze. Es kam zu einer Wellenüberlagerung von Moldau und Elbe. HQ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]: Prag/Moldau 1010, Brandýs/Elbe 665, ZW(DD-AK) z.Z. der Analyse keine Daten vorhanden. Ein Monat vorher trat ein Vorereignis auf.
- März und April 2006: Extreme Schneelage in den oberen Teilen des Einzugsgebiets. Das Ereignis wurde durch eine Kombination von Schneeschmelze mit extremen Regenniederschlägen verursacht. Die Dauer ist verhältnismäßig lang und die Ereignisfülle sehr groß. Dazu traten Effekte der Wellenüberlagerung und -fortpflanzung auf, so dass keine Reduktion des Wellenscheitels entlang der Fließstrecke durch Diffusion stattfand, sondern sogar ein gegenteiliger Effekt beobachtet werden konnte.

b) Sommerereignisse:

- Juli 1954: Es war ein 1-gipfliges, kurz andauerndes Ereignis ohne Vorereignis. Es wurde durch die Extremniederschläge im Moldau-, Berounka- und Egereinzugsgebiet und durch die folgende Überlagerung ausgelöst. HQ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]: Prag/Moldau 2130, Beroun/Berounka 750, Louny/Eger 460 und Dresden/Elbe 2300. Das Ereignis wurde im Moldaueinzugsgebiet durch die Inbetriebnahme der Talsperre Slapy erheblich beeinflusst. Mehr Details über dieses Sonderereignis werden im Kapitel 4.11.3 gegeben.
- Juli 1980: Dieses 2-gipflige, lang andauernde Ereignis mit einem Vorereignis (zwei Monaten zuvor) entstand im Moldau-, Berounka und oberen Elbeeinzugsgebiet. Im Zwischengebiet DD-AK trat nur ein 1-gipfliges Ereignis auf. HQ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]: Prag/Moldau 1020, Brandýs/Elbe 593, ZW (DD-AK) 495 und Dresden/Elbe 1734.
- Juli 1981: Dieses 1-gipflige, kurz andauernde Ereignis trat mit schnellem Anstieg auf und es hatte kein Vorereignis. Es entstand im Moldau- und Berounkaeinzugsgebiet sowie im oberen Elbeeinzugsgebiet. HQ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]: Prag/Moldau 1680, Beroun/Berounka 885, Brandýs/Elbe 718 und Dresden/Elbe 2238, im ZW (DD-AK) war kein wesentliches Ereignis.
- Juli 1997: Extremes Hochwasserereignis im Einzugsgebiet der Oder und der Marsch/Morava; Der Ostteil des Elbeeinzugsgebiets im Riesengebirge und Adlergebirge wurde betroffen. Auf den deutschen Elbelauf hatte dieses Ereignis keine nachhaltige Auswirkung. Dieses meteorologische Ereignis ist für das mögliche Szenario der Verschiebung dieser Wetterlage Typ Vb (wie im August 2002) in Richtung West d.h. ins Elbeeinzugsgebiet interessant.

- August 2002: Extremes Hochwasserereignis, vor allem in den Einzugsgebieten der Moldau, Berounka und Mulde. Während der kurzen Periode traten zwei extreme Niederschlagsereignisse kurz hintereinander auf. Durch die Steuerungsmaßnahmen der großen Talsperren wurde das erste Ereignis im Moldaueinzugsgebiet zurückgehalten. Dieses ist im Kapitel 4.9 beschrieben.

#### 4.6 Untersuchung der möglichen Ereignisüberlagerung

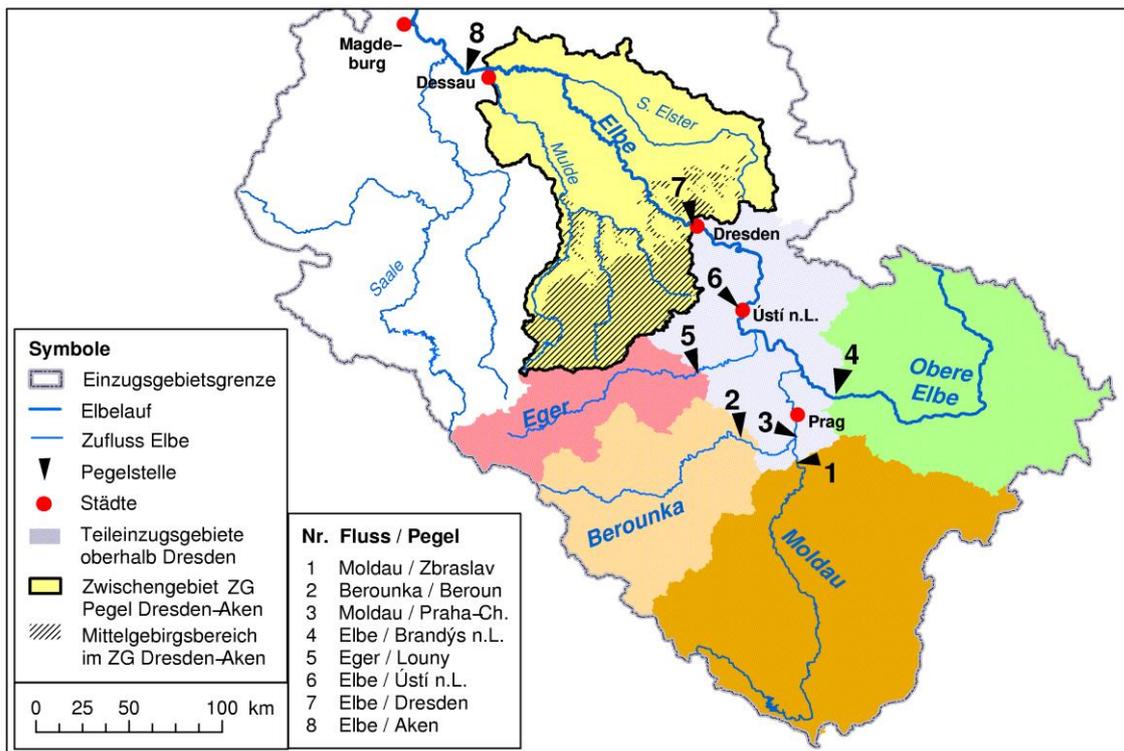


Abbildung 4.4: Übersichtskarte der Teileinzugsgebiete der Elbe, die bei der Ereignisüberlagerung hier untersucht wurden (Quelle: Helms 2009)

Die ungünstige Ereignisüberlagerung durch zwei Einzugsgebiete stellt ein hohes Risikopotenzial dar. Dies muss anhand der beobachteten Situation mittels Aufzeichnung quantifiziert werden. Insgesamt wurden 6 benachbarte Einzugsgebieten-Paare untersucht, um die potentiell ungünstige Wellenüberlagerung zu ermitteln. Die Gegenüberstellungen ermöglichen es Aussagen über das Auftreten der Ereignisse sowie ihrer potenziellen Überlagerung zu treffen. Das Ziel ist die Möglichkeit der Wellenüberlagerung zweier Einzugsgebiete zu quantifizieren. Da es zeitaufwändig wäre, alle jährlichen maximalen Ereignisse zu untersuchen, wurden nur größere und überlagerungswirksame Ereignisse ausgewählt. Dafür wurde eine Tabelle aller potentiellen Ereignisse ausgearbeitet. Die Ereignisse wurden nach ihrer Größe identifiziert. Ebenso wurde der Einfluss der Vorereignisse, welche verschärfende Effekte auf das Hauptereignis haben können, berücksichtigt. Die ausgewählten Ereignisse wurden während des RIMAX-Projekts hydrologisch modelliert und in einem weiteren Schritt die Talsperreneffekte auf den Hochwasserablauf abgeschätzt. Die Wahrscheinlichkeit der Wellenüberlagerung hängt von der Richtung der Großwetterlage (zeitlich-räumliche Niederschlagsverteilung und -intensität) sowie der Morphologie und den Fließzeiten im Gewässer ab.

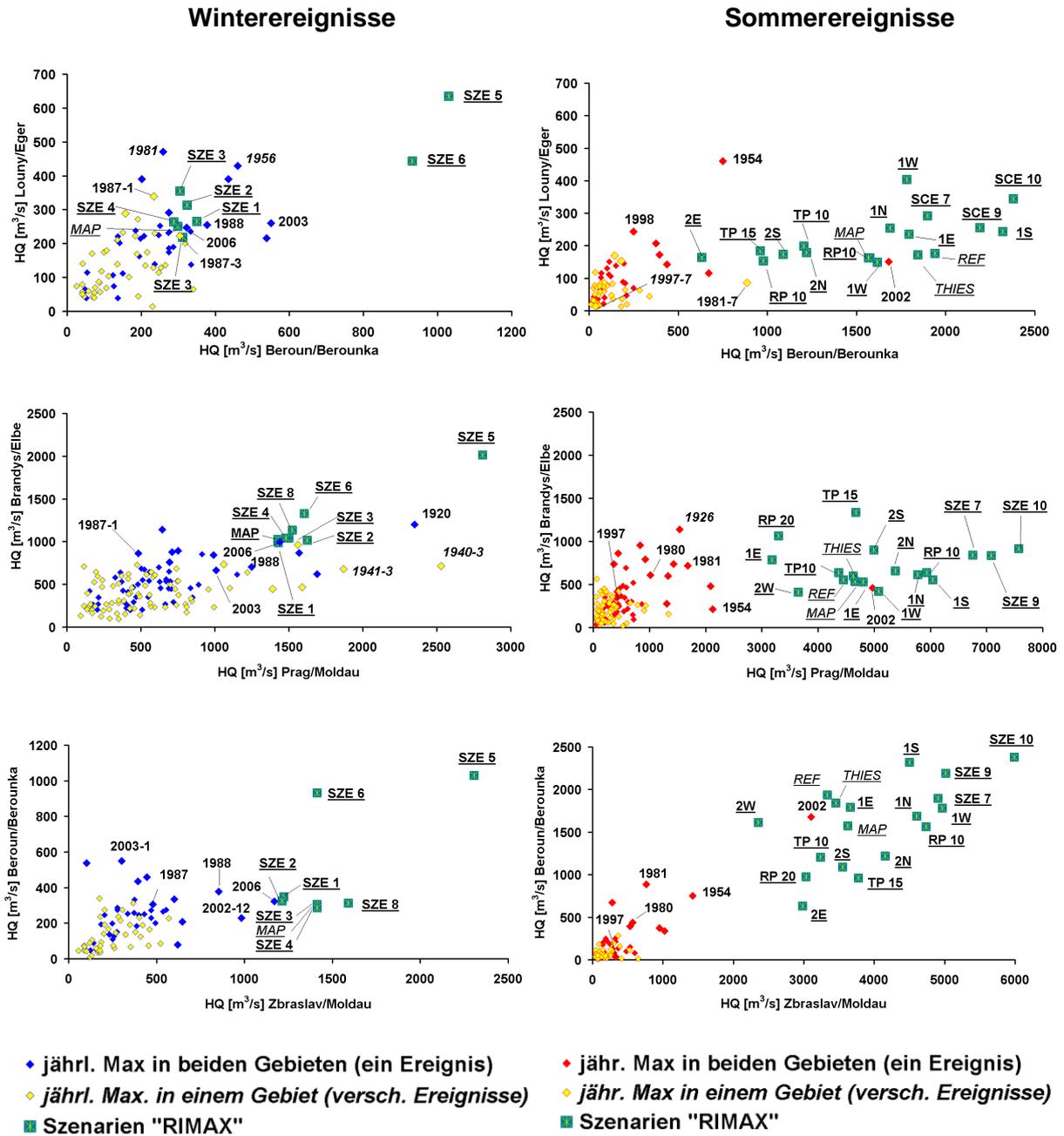


Abbildung 4.5: Gegenüberstellung der Winter- und Sommerereignisse von den benachbarten Einzugsgebieten (Eger – Berounka, Elbe – Moldau, Berounka - Moldau) einschließlich der vom RIMAX- Projekt abgeleiteten Szenarien.

Um den Aufwand bei der hydrologischen Modellierung zu minimieren, wurden für jedes Einzugsgebiet etwa 5 bis 8 extremste Ereignisse ausgewählt und mit den Ereignissen von benachbarten Einzugsgebieten verglichen. Die Sommer- und Winterhochwasserereignisse von folgenden Teileinzugsgebietspaaren wurden je nach Datenverfügbarkeit gegenübergestellt und ausgewählt:

- Moldau/Prag – Elbe/Brandýs
- Moldau/Zbraslav – Berounka/Beroun
- Elbe/Mělník – Eger/Louny

- Berounka/Beroun – Eger/Louny
- Eger/Louny – Mulde/ Brücke A9 (bzw. Zwischengebiet DD-AK)
- Elbe/Wittenberg – Mulde/ Brücke A9 (bzw. Zwischengebiet DD-AK)

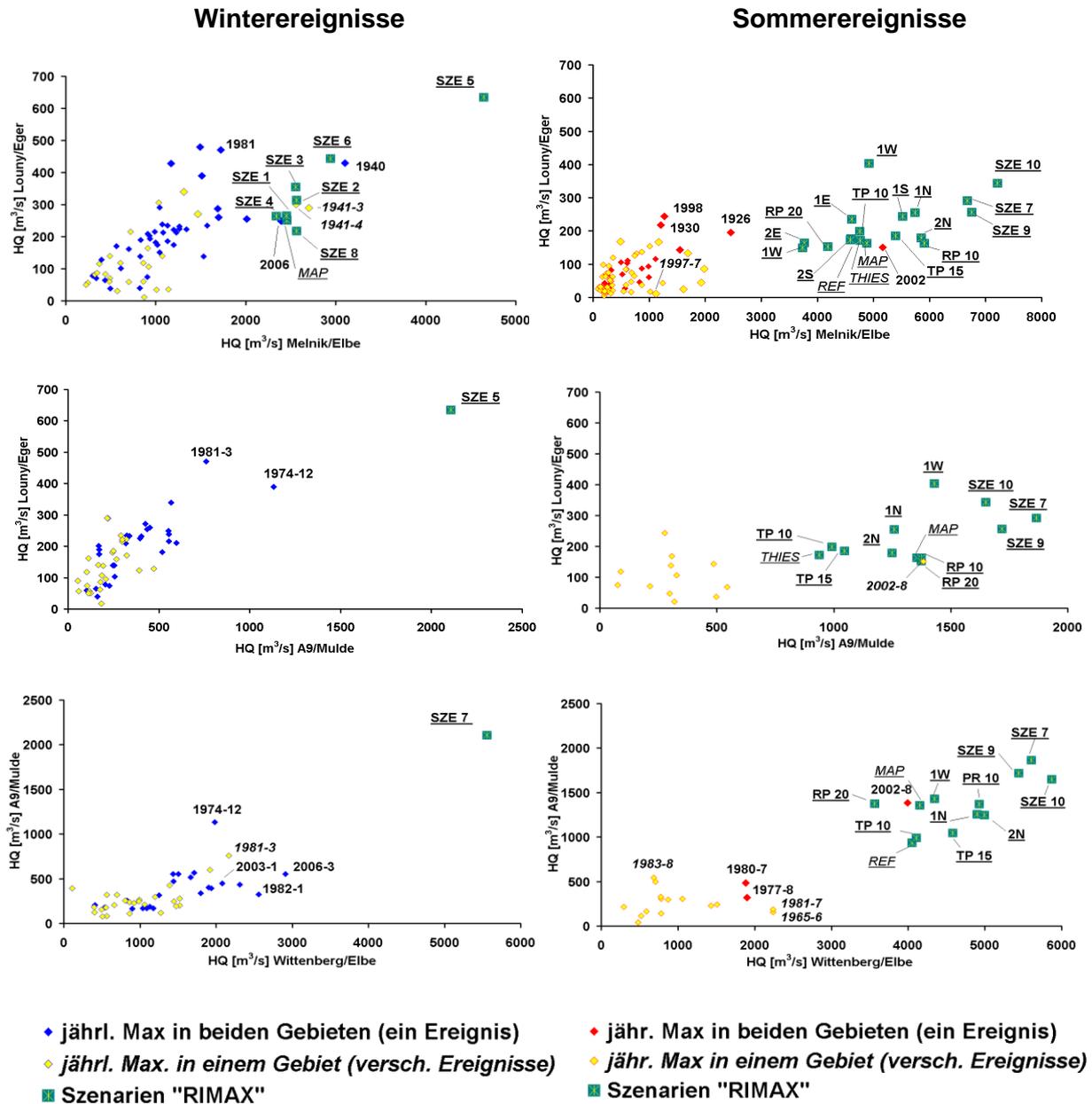


Abbildung 4.6: Gegenüberstellung der Winter- und Sommerereignisse von den benachbarten Einzugsgebieten (Eger – Elbe, Eger – Mulde, Elbe – Mulde) einschließlich der vom RIMAX-Projekt abgeleiteten Szenarien.

Aus den gemessenen und abgeschätzten Abflussganglinien wurden jährliche HQ-Werte gefunden und in dem 5, 10, 25, und 50 % Quantil zugeordnet, da diese Arbeit nicht zum Ziel setzt, die Jährlichkeit des HQ-Auftretens zu ermitteln. Dafür wurden verfügbare HQ- Abflussreihen relativ gleicher Länge zu den Schließpegeln (Beroun, Brandýs, Zbraslav und Louny) der Teileinzugsgebiete herangezogen. Sie sind, je nach Ereigniszuordnung im Quantil, in den Abbildungen 4.7. und 4.8 schraffiert dargestellt.

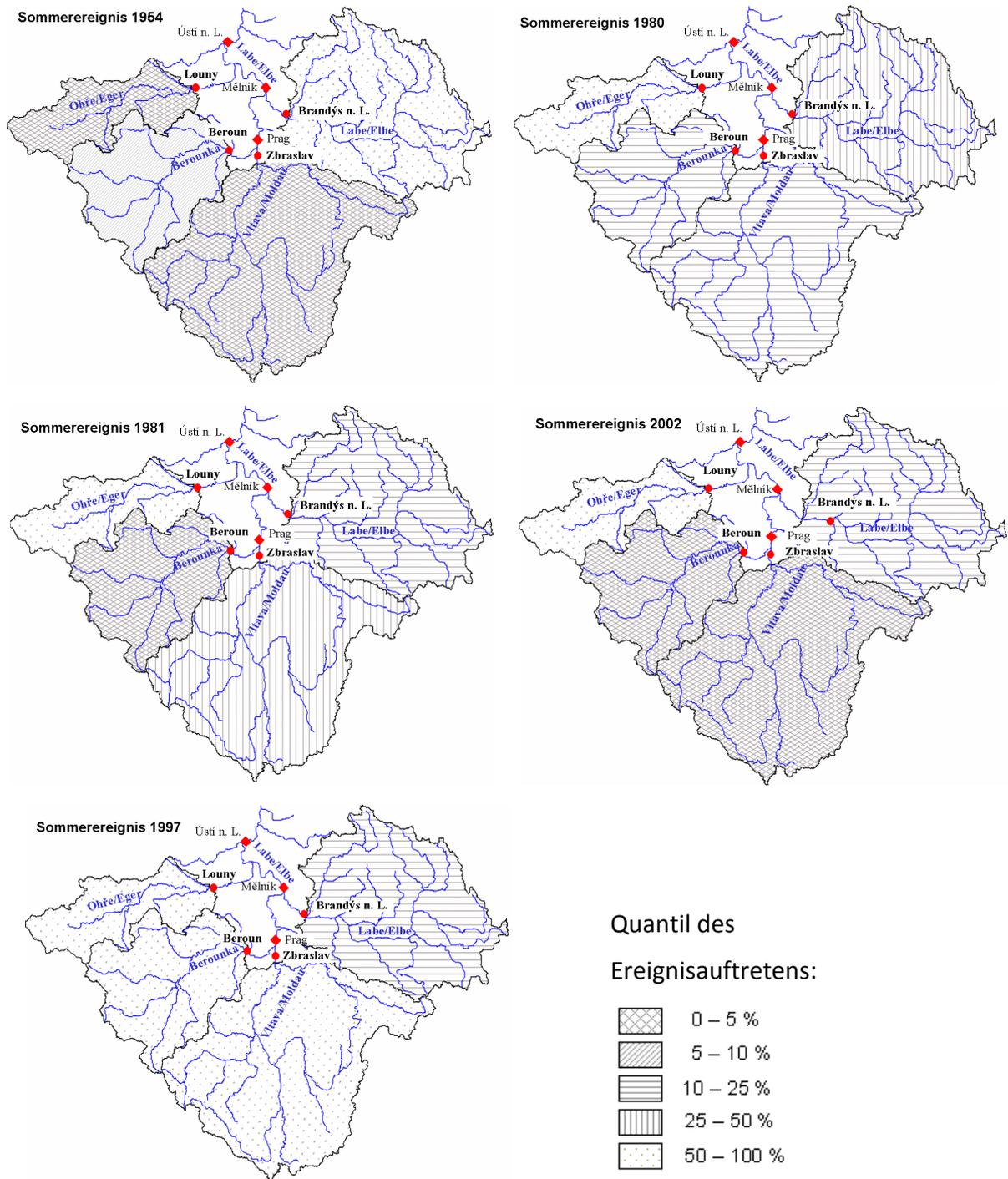


Abbildung 4.7: Auftreten und Zuordnung in die Quantile der Sommerereignisse in einzelnen Teileinzugsgebieten der tschechischen Elbe. Aus den schraffierten Abbildungen einzelner Gebiete ist die Wellenüberlagerung (Superposition) zu erkennen, z.B. kam es 2002 zur Ereignisüberlagerung vom Mol-dau- und Berounkaeinzugsgebiet.

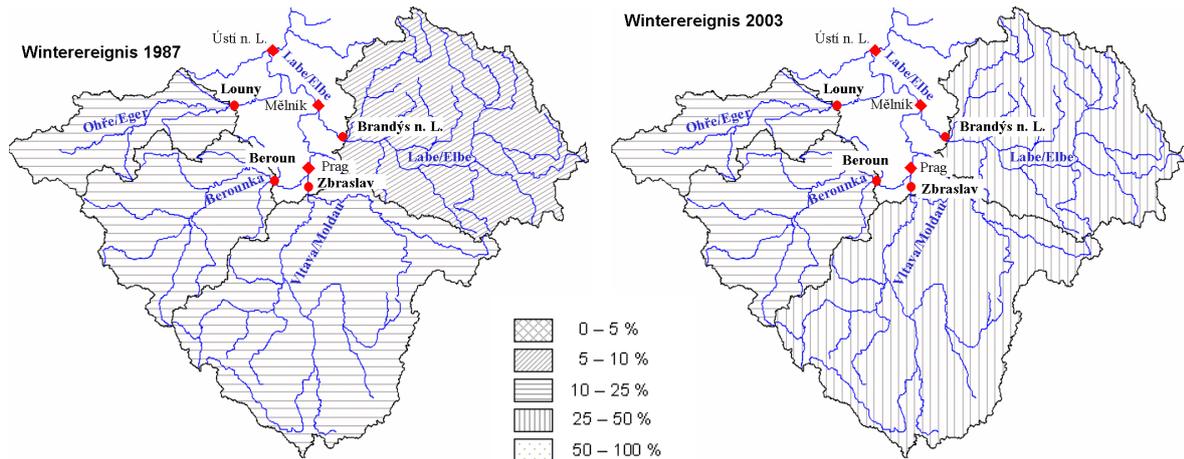


Abbildung 4.8: Auftreten und Zuordnung in die Quantile der Winterereignisse in einzelnen Teileinzugsgebieten der tschechischen Elbe. Das Ereignis von 1987 wurde von der Schneeschmelze ausgelöst, das Ereignis vom Januar 2003 wurde von Regenniederschlägen ohne Schneeschmelze verursacht.

#### 4.6.1 Untersuchung zur möglichen Hochwasserüberlagerung Elbe – Moldau

Die Zielsetzung dieser Untersuchung zur möglichen Hochwasserüberlagerung der Moldau und der Elbe ist, eine Aussage über die Tiefdruckverteilungen und ihre Zugbahnen im gesamten tschechischen Einzugsgebiet der Elbe zu treffen, durch welche die Hochwasserereignisse ausgelöst wurden.

Diese Untersuchung wurde anhand der gemessenen bzw. abgeschätzten Ereignisscheitelwerte der Pegel Prag/Moldau und Brandýs/Elbe durchgeführt. Weil die kontinuierlich gemessenen Abflussganglinien im Tagesschritt aus dem 19. Jahrhundert nicht zur Verfügung stehen, wurden die gemessenen historischen Scheitelwerte aus dem Buch „Historische und gegenwärtige Hochwasserereignisse der Tschechischen Republik“ (Brázdil 2006) herangezogen. Die in der zitierten Literatur enthaltenen Scheitelwerte beziehen sich auf die Pegel Prag/Moldau, Louny/Eger und Děčín/Elbe, leider sind jedoch keine historischen Scheitelwerte aus dem oberen Einzugsgebiet (oberhalb des Moldau/Elbe Zusammenflusses), der Kleinen Elbe z.B. des Pegels Brandýs bekannt. Aus diesem Grund wurden die Scheitelwerte des Pegels Brandýs durch Superposition der Scheitelwerte von Prag, Louny und Děčín abgeschätzt. Abflüsse beider Pegel wurden als Abflusspenden (Abfluss von einem Quadratkilometer)  $q$  [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-1}$ ] zusammengestellt. Eine Zusammenstellung aller Ereignisse in Děčín größer als  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$  sind in Tabelle 4.3 enthalten. Aus der Tabelle ist zu erkennen, dass mehrere hochwasserauslösende Situationen beider Einzugsgebiete in der Vergangenheit vorgekommen sind (grau markiert). Ein besonderer Schwerpunkt wird hier auf das Einzugsgebiet der Moldau gelegt, weil hier im Vergleich mit dem oberen Einzugsgebiet der Kleinen Elbe die verheerendsten Hochwasserereignisse entstanden sind.

Tabelle 4.3: Die Zusammenstellung der Ereignisse ab 1853 als Abflusspenden in Bezug auf die Ereignisüberlagerung der Elbe und Moldau, wo die Scheitelwerte von den Pegeln Děčín, Prag und Louny beinhaltet sind (Brázdil 2006). Das zeitgleiche Ereignisauftreten in beiden Gebieten ist hier grau markiert. Die Sommerereignisse sind unterstrichen. Fortsetzung der Tabelle ist auf der nächsten Seite.

Děčín/ Elbe		Louny/ Eger		Prag/ Moldau			Brandýs/ Elbe		
Datum	Q [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Datum	Q [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Datum	Q [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	q [l s <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup> ]	Datum	Q [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	q [l s <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup> ]
30.04.1853	2120			29.04.1853	1370	<b>51.3</b>		650	<b>49.6</b>
03.03.1855	3170			02.03.1855	2220	<b>83.1</b>		850	<b>64.8</b>
11.02.1856	2370			10.02.1856	1660	<b>62.1</b>		610	<b>46.5</b>
02.04.1860	2320			31.03.1860	1960	<b>73.3</b>		260	<b>19.8</b>
18.02.1864	2300	03.02.1862	1135	170.2.1864	1610	<b>60.2</b>		590	<b>45.0</b>
10.04.1865	3390			08.04.1865	2370	<b>88.7</b>		920	<b>70.2</b>
31.01.1867	2840			30.01.1867	2160	<b>80.8</b>		580	<b>44.2</b>
22.02.1871	2380			21.02.1871	1210	<b>45.3</b>		1070	<b>81.6</b>
20.02.1876	4210			19.02.1876	2670	<b>99.9</b>		1440	<b>109.8</b>
16.02.1877	2030			14.02.1877	1220	<b>45.6</b>		710	<b>54.2</b>
10.03.1881	2850			08.03.1881	1710	<b>64.0</b>		1040	<b>79.3</b>
30.12.1882	2940			29.12.1882	2260	<b>84.5</b>		580	<b>44.2</b>
25.03.1886	2880	24.03.1886	580	23.03.1886	2000	<b>74.8</b>		300	<b>22.9</b>
13.03.1888	2730	12.03.1888	458	12.03.1888	1820	<b>68.1</b>		452	<b>34.5</b>
<u>06.09.1890</u>	4450			04.09.1890	3980	<b>148.9</b>		370	<b>28.2</b>
08.03.1891	2540	25.11.1890	741	07.03.1891	1540	<b>57.6</b>		544	<b>41.5</b>
		13.02.1893	456						
		13.02.1893	456						
28.03.1895	2940			26.03.1895	2090	<b>78.2</b>		750	<b>57.2</b>
07.05.1896	3100			06.05.1896	2470	<b>92.4</b>		530	<b>40.4</b>
<u>02.08.1897</u>	2670			31.07.1897	2090	<b>78.2</b>		480	<b>36.6</b>
<u>15.09.1899</u>	2160			14.09.1899	2130	<b>79.7</b>			
		25.01.1900	420						
01.03.1900	2320	28.02.1900	411	28.02.1900	1270	<b>47.5</b>		639	<b>48.7</b>
10.04.1900	3780			09.04.1900	2770	<b>103.6</b>		1010	<b>77.0</b>
		05.03.1901	617						
07.02.1909	2640	06.02.1909	1018	05.02.1909	2150	<b>80.4</b>			
		08.03.1914	409						
09.03.1915	2510	08.03.1915	578	08.03.1915	1590	<b>59.5</b>	08.03.1915	410	<b>31.3</b>
<u>10.10.1915</u>	2480			08.10.1915	2090	<b>78.2</b>	09.10.1915	299	<b>22.8</b>
06.01.1917	2060	04.01.1917	420	04.01.1917	917	<b>34.3</b>	05.01.1917	793	<b>60.5</b>
19.04.1917	2340			17.04.1917	1570	<b>58.7</b>	18.04.1917	706	<b>53.9</b>
16.01.1920	3580			15.01.1920	2350	<b>87.9</b>	15.01.1920	1060	<b>80.9</b>
05.02.1923	2810			04.02.1923	1850	<b>69.2</b>	04.02.1923	780	<b>59.5</b>
30.03.1924	2140	28.03.1924	457	28.03.1924	1150	<b>43.0</b>	29.03.1924	567	<b>43.3</b>
<u>21.06.1926</u>	2530	20.06.1926	163	20.06.1926	1340	<b>50.1</b>	20.06.1926	1140	<b>87.0</b>

Fortsetzung der Tabelle 4.3

Děčín/ Elbe		Louny/ Eger		Prag/ Moldau			Brandýs/ Elbe		
Datum	Q [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Datum	Q [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Datum	Q [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	q [l s <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup> ]	Datum	Q [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	q [l s <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup> ]
04.12.1939	2100	02.12.1939	324	02.12.1939	1060	<b>39.7</b>	03.12.1939	734	<b>56.0</b>
17.03.1940	3350	15.03.1940	429	15.03.1940	2530	<b>94.7</b>	16.03.1940	712	<b>54.3</b>
13.03.1941	2800	12.03.1941	171	11.03.1941	1560	<b>58.4</b>	12.03.1941	955	<b>72.9</b>
09.04.1941	2820	08.04.1941	301	08.04.1941	1870	<b>70.0</b>	08.04.1941	661	<b>50.4</b>
09.04.1944	2050	07.04.1944	287	07.04.1944	1390	<b>52.0</b>	08.04.1944	401	<b>30.6</b>
11.02.1946	2310	10.02.1946	408	10.02.1946	990	<b>37.0</b>	10.02.1946	813	<b>62.0</b>
17.03.1947	2500	16.03.1947	201	15.03.1947	1690	<b>63.2</b>	16.03.1947	522	<b>39.8</b>
12.02.1948	2310	10.02.1948	355	10.02.1948	1220	<b>45.6</b>	11.02.1948	640	<b>48.8</b>
<u>12.07.1954</u>	2360	11.07.1954	280	10.07.1954	2130	<b>79.7</b>	11.07.1954	215	<b>16.4</b>
<u>07.07.1958</u>	2020	06.07.1958	166	06.07.1958	924	<b>34.6</b>	06.07.1958	724	<b>55.2</b>
<u>25.08.1977</u>	2080	24.08.1977	24.6	24.08.1977	1430	<b>53.5</b>	24.08.1977	514	<b>39.2</b>
15.03.1981	2240	14.03.1981	471	14.03.1981	644	<b>24.1</b>	14.03.1981	1140	<b>87.0</b>
22.07.1981	2320	21.07.1981	86.4	21.07.1981	1680	<b>62.9</b>	21.07.1981	346	<b>26.4</b>
29.03.1988	2340	28.03.1988	255	18.03.1988	1250	<b>46.8</b>	28.03.1988	697	<b>53.2</b>
<u>16.08.2002</u>	4620	15.08.2002	153	14.08.2002	4970	<b>185.9</b>	15.08.2002	460	<b>35.1</b>
04.04.2006	2710	03.04.2006	247	02.04.2006	1410	<b>52.7</b>	04.04.2009	996	<b>76.0</b>

#### 4.6.2 Hochwasserüberlagerung der Elbe und der Mulde

In diesem Kapitel wird die Hochwasserüberlagerung der Elbe und Mulde analysiert. Insbesondere nach der Überlagerung könnte die Stadt Dessau von beiden Flüssen bedroht werden. Um abschätzen zu können wie die künftigen Hochwasserschutzmaßnahmen (Notpolder) gesteuert werden sollen, müssen dafür die historischen Informationen ausgewertet werden.

Die Kenntnisse und Informationen des Abflussprozesses in der Vergangenheit sind für weitere Untersuchung zur Überlagerung unverzichtbar. Um die Wirkung der Überlagerung abschätzen zu können wurde eine Betrachtung bezüglich der Ereignisüberlagerung der Elbe und der Mulde anhand der beobachteten Abflussganglinien durchgeführt, weil dies ein hohes Risiko für die Stadt Dessau darstellt. Aufgrund der hohen elbewasserstände ist selbst die Mulde im Stadtbereich häufig rückgestaut.

Um diese Aufgaben erfüllen zu können wurden Beobachtungen der Abflussganglinien von Mulde und Elbe herangezogen. Die Abflüsse des Muldeinzugsgebiets (Einzugsgebietsfläche 7400 km<sup>2</sup>) werden mit dem Pegel Bad Dübén ab 1961 (Einzugsgebietsfläche 6171 km<sup>2</sup>) erfasst, welcher 68,1 km von der Mündung entfernt liegt. Ebenfalls wurde die Abflussganglinie vom weiter oben gelegenen Pegel Golzern (57 km von Bad Dübén) herangezogen, um den beobachteten Zeitraum bereits ab 1900, mit kurzer Unterbrechung, erweitern zu können. Die Abflussganglinie wurde ohne Abflusszuwachs vom Zwischeneinzugsgebiet zur Brücke der Autobahn A9 (etwa 14 km vor der Mündung) geroutet. Auf die gleiche Weise wurden Abflussganglinien von Dresden ab 1900 bzw. von Wittenberg ab 1951 nach Vockerode (Elbe) geroutet. Später wurden auch die im Rahmen des BfG-Projektes überarbeiteten

und anhand der beobachteten Wasserstände bereits ab 1890 rekonstruierten Abflussganglinien von Bad Döben und Wittenberg herangezogen. Die Abflussreihe von Bad Döben gilt nicht als offiziell anerkannte Reihe, sondern wurde mit Hilfe der beobachteten Wasserstandsganglinien und Abflusskurven simuliert, um die Abflussreihen der Elbepegel überprüfen zu können. Dadurch wurden geroutete Abflussganglinien zweier Einzugsgebiete im Mündungsbereich vom 1890 bis 2006 mit kurzer Unterbrechung im 1906 und 1910 erhalten.

Daraus wurden maximale jährliche Abflüsse HQ ermittelt. Wenn der HQ nicht gleichzeitig in beiden Einzugsgebieten während eines Ereignisses auftrat, wurde ihm einer aus der gleichen Zeit entsprechender Wert zugeordnet. Die HQ-Werte wurden als Sommer- und Winterereignisse getrennt gegenüber dargestellt, siehe Abbildung 4.9. Dazu wurden 11 Sommerszenarien und ein Winterszenario vom RIMAX-Projekt herangezogen.

Neben der Auswahl und Identifizierung aller Ereignisse und jährlichen HQ-Werte (insgesamt 164), musste ein zeitliches Auftreten der beiden Scheitelwerte berücksichtigt werden. In Tabelle 4.5 sind alle Ereignisse, deren Größe, deren Typ (Sommer- oder Winterereignisse) und deren Datum zusammengefasst. Bei allen Ereignispaaren wurde das zeitliche Auftreten im Mündungsbereich aufgezeichnet, um die Verschärfung der lokalen Situation im Hinblick auf die Scheitelwertüberlagerung quantifizieren zu können.

Die HQ-Werte bzw. die entsprechenden Werte und das Datum des Scheitelwerts wurden tabellarisch erfasst. Insgesamt wurden folgende Charakteristika aus den Abflussganglinien gefunden:

- 62 jährliche maximale Abflusswerte in beiden Gebieten (ein Ereignis) im Sommer
- 53 jährliche maximale Abflusswerte in beiden Gebieten (ein Ereignis) im Winter
- 98 (zwei Ereignisse pro Jahr) jährliche maximale und entsprechende Abflusswerte in einem Gebiet (verschiedene Ereignisse), d.h. in 49 Jahren

Von den 164 ausgewählten Ereignissen wurde eine Säulengraphik erstellt, die eine Aussage über den zeitlichen Unterschied (in Tagen) zwischen dem Eintreffen der Ereignisse aus beiden Gebieten liefert. In den 61 Fällen betrug der Unterschied 3 Tage, in den 43 Fällen 2 Tage. Nur bei 4 Fällen kam es zur Scheitelüberlagerung, jedoch handelte es sich um Ereignisse unbedeutender Größe, siehe Abbildung 4.9.

Weiter wurden 41 Ereignisse ausgewählt, in Abhängigkeit woher die extremsten Abflüsse kamen. So wurden alle Ereignisse größer als  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  an der Mulde (29 Ereignisse), größer als  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$  an der Elbe (23 Ereignisse) und größer als  $2200 \text{ m}^3/\text{s}$  beider Flüsse nach ihrer Superposition (29 Ereignisse) ausgewählt.

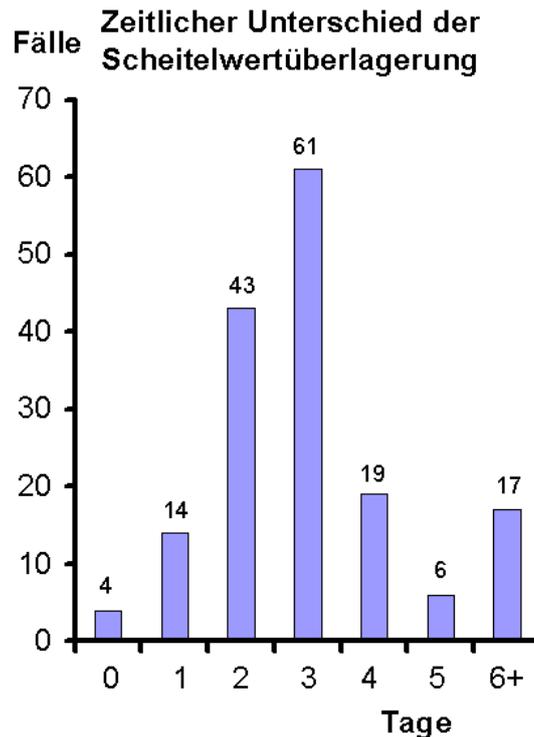


Abbildung 4.9: Zeitlicher Unterschied des Auftretens in Tagen zwischen den Ereignissen aus den beiden Einzugsgebieten der Elbe und Mulde in Dessau. Insgesamt wurden 164 Fälle dargestellt, die Anzahl des jeweiligen Unterschieds ist als Säule hier dargestellt

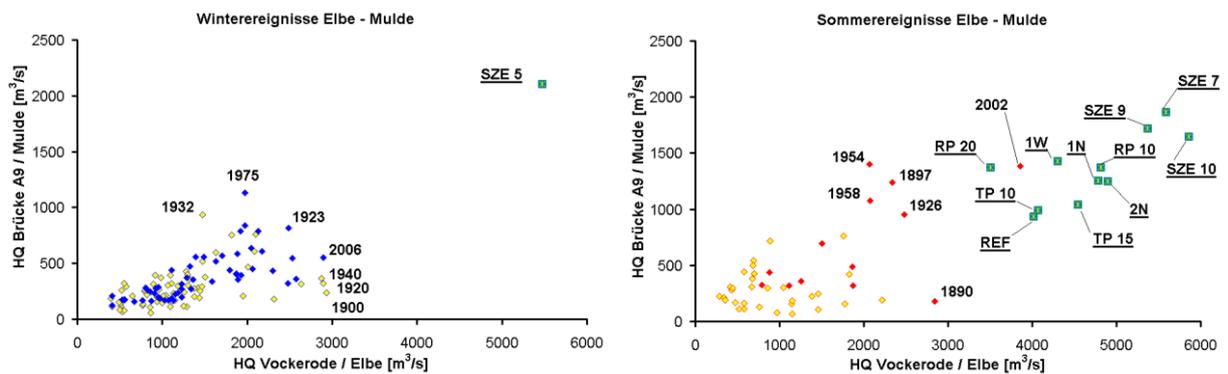


Abbildung 4.10: Streudiagramme der HQ-Werte und die entsprechenden Werte der Einzugsgebiete der Elbe und der Mulde im Bereich von Dessau jeweils für Winterereignisse (links) und Sommerereignisse (rechts). Die wichtigsten Ereignisse und alle RIMAX-Szenarien sind hier dargestellt.

Die extremsten Ereignisse (größer als  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) an der Mulde traten in 1897, 1954, 1958, 1975 und 2002 auf. Die extremsten Ereignisse (größer als  $2800 \text{ m}^3/\text{s}$ ) in Vockerode an der Elbe traten in 1890, 1900, 1920, 1940 und 2002 auf, d.h. mit Mulde zusammen nur im 2002. Die Überlagerung beider Flüsse, die für die Untersuchung des lokalen Risikos in Dessau relevant ist, ergab in 8 Fällen Abflüsse größer als  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$  in den Jahren 1897, 1900, 1920, 1940, 1954, 1958, 2002 und 2006. Hierbei erreicht das Ereignis vom 2002 einen Scheitelwert von schätzungsweise  $4429 \text{ m}^3/\text{s}$ , welches deutlich alle beobachteten maximalen Abflüsse überschritt.

Tabelle 4.5: Überlagerung der extremsten Ereignisse (HQ in m<sup>3</sup>/s) der Elbe und Mulde im Bereich von Dessau. In der Tabelle sind das Datum des Auftretens der Scheitelwerte und die zeitliche Differenzen dargestellt.

Jahr	HQ A9 > 500		HQ Vockerode > 2000		HQ Überlag. > 2200		Diff. Tage	Typ
	Mulde	Datum	Elbe	Datum	Beide	Datum		
1890	182	07.09.1890	2842	09.09.1890	2992	09.09.1890	2	s
1897	1237	02.08.1897	2339	05.08.1897	3012	05.08.1897	3	s
1900	236*	17.04.1900	2933	13.04.1900	3110	13.04.1900	4	w
1920	320*	16.01.1920	2897	19.01.1920	3179	19.01.1920	3	w
1940	365*	22.03.1940	2876	19.03.1940	3109	19.03.1940	3	w
1954	1399	13.07.1954	2070	15.07.1954	3156	14.07.1954	2	s
1958	1076	08.07.1958	2078	10.07.1958	3011	10.07.1958	2	s
1975	1132	11.12.1974	1970	14.12.1974	2628	12.12.1974	3	w
2002	1384	15.08.2002	3861	18.08.2002	4429	18.08.2002	3	s
2006	553	30.03.2006	2897	06.04.2006	3231	06.04.2006	7	w

\*) dem Elbeereignis entsprechender Abfluss der Mulde, kein jährlicher HQ

W- Winterereignisse

S – Sommerereignisse

Folgende Hochwasserereignisse, die in der o.g. Tabelle 4.5 zusammengefasst sind, sind zu nennen:

- Beispielsweise ist das extremste Ereignis aus dem Jahr 2002 zu erwähnen, bei dem es zwar nicht gleichzeitig zur Scheitelüberlagerung kam, der Scheitelwert mit 1384 m<sup>3</sup>/s der Mulde aber 3 Tage vor dem Scheitelwert an der Elbe mit 3861 m<sup>3</sup>/s kam. Trotzdem führten die fallenden Muldeabflüsse der Ganglinie zu einer verschärften Situation im Mündungsbereich und weiter stromabwärts an der Elbe. Der hier angesprochene Scheitelwert der Mulde ist im Bereich von Dessau ohne Retentionswirkung des Resttagebaulochs Goitsche bei Bitterfeld dargestellt, die hochwasserdämpfende Wirkung wurde im Rahmen des RIMAX-Projekts auf 300 m<sup>3</sup>/s geschätzt.
- Das Ereignis vom 1890 kam mit 2842 m<sup>3</sup>/s vor allem von der Elbe, während an der Mulde nur 182 m<sup>3</sup>/s erreicht wurden. Die Situation im Mündungsbereich wurde damit nur unwesentlich verschärft.
- Ein Hochwasserereignis wurde an der Mulde 1897 beobachtet, der Scheitelwert betrug dabei 1237 m<sup>3</sup>/s und ist damit das drittgrößte beobachtete Ereignis seit 1890. Es kam 3 Tage vor dem Elbescheitel. An der Elbe wurden zu dieser Zeit 2339 m<sup>3</sup>/s beobachtet. Es kam zu einer ungünstigen Situation im Mündungsbereich mit bis zu 3012 m<sup>3</sup>/s.
- Der höchste Scheitelwert an der Mulde war laut der hier verwendeten Informationen im Jahr 1954 mit 1399 m<sup>3</sup>/s zu verzeichnen. Er traf nur 2 Tage vor dem Elbescheitel ein. Das Elbeereignis mit 2070 m<sup>3</sup>/s wurde dank der Inbetriebnahme der Talsperre Slapy an der Moldau deutlich reduziert, siehe Kapitel 4.10.3.2.

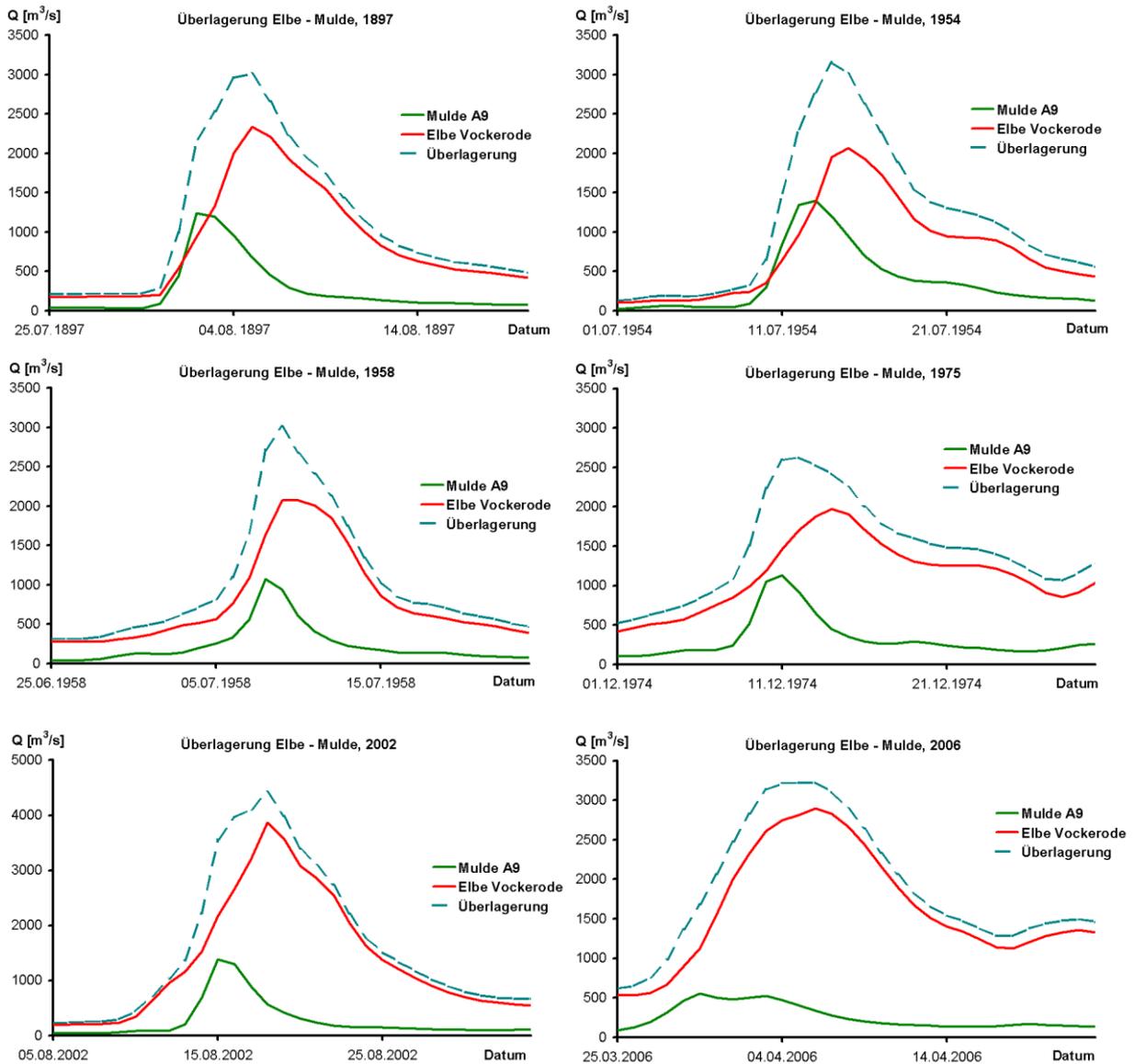


Abbildung 4.11: Historische und gegenwärtige Überlagerungen der Elbe- und Muldeereignisse im Bereich von Dessau, welche zu den ungünstigen Hochwassersituationen führten. Zum erheblichen Abflussanstieg kam es 1954 und 1958.

- Das langandauernde Winterereignis vom März und April 2006 wurde von der Schneeschmelze und zusätzlichen Niederschlägen im oberen Elbegebiet ausgelöst. Das erheblich voluminöse Elbeereignis überlagerte sich mit den Ereignissen aus den Zuflüssen und wurde durch die natürliche Retention kaum transformiert, sodass Scheitelwerte im unteren Elbelauf höhere Abflüsse als im Jahr 2002 erreichten. Es kam zur Verschärfung der Hochwassersituation im Mündungsbereich durch die Überlagerung der hohen Abflüsse der Elbe mit 2897 m³/s und Mulde mit 553 m³/s und einem 7-tägigem Abstand. Der Abfluss nach der Überlagerung betrug 3231 m³/s.

- Bei den Ereignissen von 1900, 1920 und 1940 wurden nach der Überlagerung Scheitelwerte von über  $3100 \text{ m}^3/\text{s}$  erreicht, jedoch kam es nicht zur kritischen Verschärfung der Situation durch die Muldeabflüsse, die relativ gering waren (bis  $365 \text{ m}^3/\text{s}$ ).
- Die Muldeereignisse von 1958 und 1975 wiesen Scheitelwerte von etwa  $1100 \text{ m}^3/\text{s}$  auf, die Elbeereignisse brachten etwa  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Insbesondere beim Ereignis vom 1958 kam es zu einer Überlagerung der hohen Mulde- und Elbeabflüsse mit insgesamt über  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Obwohl es nicht zur direkten Scheitelüberlagerung bei den angesprochenen Ereignissen kam, wurden die Hochwassersituationen im Mündungsbereich in den 6 extremsten Fällen wesentlich verschärft. Die Ereignisse 1897, 1954, 1958, 1975, 2002 und 2006 sind graphisch in Abbildung 4.11 dargestellt. Bei den o.g. Ereignissen kam es zur Beschleunigung des Scheitelwerts um etwa einen Tag. Die größten Erhöhungen der Elbescheitelwerte wurden durch die Muldeereignisse in 1954 um  $1086 \text{ m}^3/\text{s}$  und in 1958 um  $933 \text{ m}^3/\text{s}$  beobachtet, demgegenüber betrug die Erhöhung im Jahr 2002 „nur“  $568 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dabei ist wichtig zu erwähnen, dass die Untersuchung der Überlagerung keine Rückstaueffekte und mögliche Deichbruchretentionen in Betracht nehmen kann.

Mit der Untersuchung der historischen und gegenwärtigen Extremsituationen kann die Aussage getroffen werden, dass die Wirkung der Mulde bei der Entwicklung der Steuerungsstrategie der künftig oberhalb vom Zusammenfluss liegenden Notpolder zu berücksichtigen ist. Die Mulde könnte zur Abflusserhöhung beitragen, trotz der Tatsache, dass der Muldescheitelwert wenige Tage (2 bis 3 in den meisten Fällen) früher in Dessau eintrifft.

#### 4.7 Ergänzung der Zeitreihen

Aus der Tabelle 2.1 mit den Datenverfügbarkeiten ist zu erkennen, dass einige Abflussreihen nicht kontinuierlich und vollständig, oder zu kurz sind. Die Abflussreihen wurden nur dort ergänzt bzw. abgeschätzt, wo es für weitere Analysen erwünscht war.

Die Abschätzung bzw. Ergänzung der Tagesabflüsse wurde mit Hilfe des linearen Regressionsansatzes benachbarter Abflussganglinien durchgeführt. Genauer wäre es, die Seitenzuflüsse zu berücksichtigen. Dies ist aber oft aufgrund der nicht beobachteten Zuflüsse kaum möglich. Die Regressionsparameter wurden aus den beobachteten, sich zeitlich überlappenden zwei oder mehr Abflussreihen der benachbarten Pegel ermittelt. Dies ist eine einfache und bewährte Methode. Dort, wo ein Flood-Routing-Modell mit Parametrisierung vorhanden ist, wurden die Lücken der Reihen, insbesondere bei Hochwasserereignissen, mit dem kombinierten Ansatz eines Flood-Routing-Modells und einer Regression ergänzt.

Eine gewöhnliche lineare Regression wurde für die Ergänzung der Abflussreihe Beroun über den nah gelegenen Pegel Křivoklát (am Fluss Berounka) genutzt, um daraus die Gegenüberstellung und Überlagerung der Moldau und Berounka zeigen zu können. Am Pegel Beroun/Berounka ist die Zeitreihe von 1921 bis 1950 unterbrochen. Der Zufluss aus dem Zwischengebiet Křivoklát – Beroun ist zu vernachlässigen. Die Parameter des Regressionsansatzes wurden von der sich überlappenden Abflussreihe 1951-1994 ermittelt und daraus die Abflussreihe in Beroun ergänzt. In ähnlicher Weise, unter Heranziehung der Reihe von Prag/Moldau, wurde die Zeitreihe (1941-2003) für den Pegel Zbraslav/Moldau (oberhalb der Berounka- Mündung) ab 1936 abgeschätzt.

Eine andere Option der Abflussreihenergänzung ist die Verwendung der beobachteten Wasserstandsreihe, sofern sie vorhanden sind. Dies wurde anhand des Pegels Ústí nad Labem/Elbe versucht, um die Abflussreihe in die Vergangenheit zu verlängern. Dafür wurden die täglichen Wasserstände und Abflüsse gegenüber gestellt, die hier als WQ-Paare bezeichnet sind, um eine Abflusskurve des Fließprofils (Wasserstand-Abfluss-Beziehung) abzuleiten. Normalerweise sollten diese Wertepaare auf einer Abflusskurve liegen, da dies hier jedoch nicht der Fall ist und eine eindeutige Abflusskurve nicht erkennbar ist, wurde die Abflussreihe der beobachteten Wasserstände nicht in die Vergangenheit verlängert. Eine Plausibilisierung der Abflusskurve ist anhand der Ergebnisse der hydrometrischen Abflussmessungen möglich, soweit diese in der Vergangenheit durchgeführt wurden und verfügbar sind.

## **4.8 Hochwasserereignis vom August 2002 im Elbeeinzugsgebiet**

Eine gute Kenntnis über die gegenwärtigen sowie die historischen Hochwasserereignisse und deren Auslösung, Auswirkung und Ablauf stellt eine unvermeidbare Voraussetzung für die Untersuchung oder Entwicklung des zukünftigen Hochwassermanagements dar. Um die Aufgaben und die Zielsetzung dieser Arbeit gut verstehen und erfüllen zu können, wird im ersten Schritt der Ablauf und das Geschehen während des Ereignisses vom August 2002 erläutert. Dieses Ereignis war der Anlass für dieses Vorhaben, der Bewältigung und Minderung der Extremereignissen.

Die mitteleuropäischen Einzugsgebiete der Elbe und Donau vor allem in Deutschland, Tschechien und Österreich wurden im August 2002 von einem extremen, an vielen Orten noch nie so groß beobachteten Hochwasserereignis, stark betroffen. Besonders erhebliche Schäden wurden in den Einzugsgebieten der Moldau und der Mulde sowie direkt entlang des Elbelaufs von Měnlík bis Wittenberge verursacht. Dabei sind 38 Leute ums Leben gekommen. Die Schäden an Privateigentum, Infrastruktur und Betrieben waren erheblich – sie erreichten bis zu 9,87 Milliarden Euro (IKSE 2004).

### **4.8.1 Meteorologische Situation**

Die Ursache der extremen Abflüsse waren starke Regenfälle, die aus sehr feuchten Luftmassen des Tiefdruckgebiets gefallen sind. Von Juni bis August wurde die Großwetterlage über Europa durch wiederholtes Verdrängen der kalten Luft aus der Tiefe, die vom Atlantik aus dem Nordwesten kam, über das Mittelmeer ausgedehnt. Insbesondere im Golf von Genua kam es zum Kontakt zwischen kalten Luftmassen und warmen Wasserdämpfen des Mittelmeers, die so zu einer Sättigung der kalten Luftmassen führten. Von hier bewegte sich dieses Tiefdruckgebiet mit seinen wasserreichen Luftmassen in Richtung Nord bis Nordost, über die Alpen nach Mitteleuropa, wo es sich mit kalter Luft, von Norden kommend, zusammentraf. Zusammen mit dem orographischen Einfluss hat dies Starkregen mit katastrophalen Einflüssen auf die Elbe- und Donaeinzugsgebiete ausgelöst. Das Tiefdruckgebiet wird mit seinen Zugbahnen als „Vb-Wetterlage“ bezeichnet, welche schon in der Vergangenheit Starkregen (Hochwasserereignisse an der Elbe 1954, Oder 1997, Weichsel 2001, Rumänien und Alpen 2005) oder Starkschneefall (Österreich 1951) verursachte.

#### 4.8.2 Hydrologische Situation und Auswirkung im Einzugsgebiet

Das Elbeeinzugsgebiet wurde vom 6.8. bis zum 13.8.2002 von heftigen, zeitlich und räumlich ungünstig verteilten Niederschlägen getroffen. Das Hochwasserereignis wurde von zwei starken Niederschlagsperioden in kurzer Zeit geprägt. Der erste Starkregen fiel zwischen dem 6.8. und dem 8.8.2002, in Südböhmen mit bis zu 180 mm pro Tag und im Erzgebirge mit nur bis zu 20 mm pro Tag. Dies hatte eher eine lokale Auswirkung auf die Hochwasserauslösung, vor allem wurden jedoch dadurch die Speicherkapazität des Einzugsgebietes und die vorhandenen Hochwasserrückhalteräume der Talsperren gesättigt bzw. gefüllt. Der zweite Starkregen fiel vom 11. bis zum 13.8.2002 auf den großen Teil Südwestböhmens (Moldau und Berounka) bis hin nach Nordostböhmen und Sachsen (Mulde). Die höchste tägliche Niederschlagssumme wurde mit 312 mm in Zinnwald im Erzgebirge beobachtet (IKSE 2004). Der Gebietsrückhalt war bereits vom ersten starken Niederschlagsereignis ausgeschöpft. Das führte dazu, dass das Volumen aus dem zweiten noch stärkeren Niederschlagsereignis kaum gespeichert werden konnte und zur Folge schnell in einen direkten Abfluss mit extrem hohen Scheitelwerten umgewandelt wurde. Aufgrund der Morphologie des Flussnetzes und ungünstiger Zugbahnen des Tiefdruckgebiets kam es besonders in Süd- und Westböhmen zu einer Wellenüberlagerung der Scheitelwerte z.B. der Moldau und Berounka. Andererseits floss das Ereignis der Mulde mit einem Tag Vorlauf gegenüber dem eintreffenden Elbescheitel in Dessau in die Elbe. Es ist wichtig zu bemerken, dass das Hochwasser an der Elbe insbesondere im Moldaueinzugsgebiet ausgelöst wurde, während an der Kleinen Elbe oberhalb des Moldauezufusses kein größeres Ereignis auftrat. Eine ähnliche Situation geschah beim extremen Hochwasserereignis vom Juli 1890.

An vielen Pegeln in Böhmen und Sachsen wurden extreme Abflusswerte erreicht, wie sie in der Vergangenheit noch nie beobachtet wurden. Die maximalen Abflussscheitelwerte oberhalb Prags wurden einem 500- bis 1000-jährlichen Wiederkehrintervall zugeordnet (IKSE 2004). Die Scheitelabflüsse an den Muldepegeln erreichten Wiederkehrinterwalle von 100 - 400 Jahren. Die Extremität der Hochwasserwelle nahm stromabwärts durch ihre Abflachung mittels zahlreicher großräumiger Überschwemmungen ab, sodass die Scheitelabflüsse an der Elbe unterhalb der Havelmündung „nur“ ein 35-jährliches Wiederkehrintervall erreicht haben.

Die wichtigsten Auswirkungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- An vielen kleineren Flüssen im Einzugsgebiet der Moldau kam es zur ungünstigen Wellenüberlagerungen. Das passierte z.B. in Böhmisches Budweis / České Budějovice sowie an den Zuflüssen in die größte Talsperre Orlik an der sog. Moldauer Kaskade. Diese Talsperre wurde bereits durch das erste Ereignis vollgefüllt. Es kam wegen der Überflutung durch das Unterwasser zum Ausfall des Kraftwerkes und infolgedessen zu einer Beeinträchtigung der Wasserüberführung in allen Talsperreneinrichtungen bis zu  $600 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Stauhaltung dieser Talsperre wurde bei dem Hochwasserereignis um 1,57 m über dem maximalen Bemessungsstauziel gefüllt (Povodí Vltavy 2003). Trotz dieser Tatsache kam es zu einer unkontrollierten, erheblichen Abflusskappung der Moldau, die von den zuständigen Behörden CHMU und Povodí Vltavy mit bis zu  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  abgeschätzt wurde. Die Wellenüberlagerungen der Moldau mit den Zuflüssen Sázava und Berounka oberhalb von Prag konnten nicht vermieden werden. Mit der Folge dass in Prag (an der Moldau) ein bis dahin noch nie beobachteter maximaler Abfluss von  $5160 \text{ m}^3/\text{s}$  erreicht wurde. Ein derart extremer Abfluss wurde im August 2002 im ganzen Elbeeinzugsgebiet an keinem Pegel erreicht. Die Prager Untergrundbahn wurde über-

flutet und stark beschädigt. Etwa 50 km stromabwärts transformierte sich die Moldau- bzw. Elbewelle durch eine Ausuferung mit 51 km<sup>2</sup> im flachen Gelände im Bereich des Elbe-Moldau-Zuflusses bei Mělník. Obwohl an der tschechischen oberen (Kleinen) Elbe kein extremes Hochwasserereignis vorkam, wurde sie von dem hohen Wasserstand der Moldau bis Neratovice etwa 10 km aufwärts rückgestaut, wo ein Chemiewerk überflutet wurde. Ebenso ergab sich eine große Ausuferung mit bis zu 67 km<sup>2</sup> bei Litoměřice im Mündungsbereich der Eger. Durch die beiden Ausuferungen mit einem erheblichen großen natürlichen Speicher wurde das Ereignis unter Berücksichtigung der Zuflüsse (Elbe und Eger) bis um 800 bis 1000 m<sup>3</sup>/s abgeflacht und mit dem Scheitelwert 4700 m<sup>3</sup>/s um einen Tag in Ústí nad Labem verzögert (MŽP 2005).

- Entlang der Talstrecke zwischen Ústí nad Labem und Dresden kam es auf Grund der Morphologie nicht zu einer wesentlichen Wellenverformung. Die Auswirkung der extremen Starkregen vom 12. und 13.8.2002 und die daraus folgenden Abflüsse im Osterzgebirge, insbesondere in den Tälern von Müglitz und Weißeritz, war durch lokale, hohe Geschwindigkeiten des strömenden Wassers verheerend. Unter anderem wurde der Dresdener Hauptbahnhof von der Weißeritz überflutet. Die Hochwasserwellen im Osterzgebirge verschärften die Hochwassersituation an der Elbe nicht wesentlich, weil der Elbescheitel aus dem tschechischen Einzugsgebiet erst einige Tage später eintraf (am 17.8.).
- Bei Riesa und unterhalb von Torgau brachen die Hochwasserschutzdeiche an mehreren Stellen unter der außergewöhnlichen Belastung durch den extrem hohen Wasserstand, oder sie wurden überströmt. Damit wurde das Ereignis unkontrollierbar gedämpft. Eine nähere Beschreibung der Deichbrüche ist im Kapitel 4.8.4 zusammengefasst. Die in der Flachebene am Zusammenfluss der Mulde und Elbe liegende Stadt Dessau ist durch Hochwasserereignisse beider Flüsse gefährdet. Auch hier sind einige Deiche im August 2002 gebrochen. Das Hochwasserereignis an der Mulde wurde vor allem nach extremen Starkregen im Erzgebirge genauso wie an der Müglitz und Weißeritz ausgelöst. Der Scheitelwert der Mulde betrug 2200 m<sup>3</sup>/s bei Golzern (IKSE 2004). Auch entlang der Mulde kam es zu den zahlreichen Deichbrüchen. Der bekannteste Deichbruch geschah beim Dorf Pouch, wo das Tagebaurestloch Goitsche von dem Muldeereignis unkontrollierbar gefüllt wurde. Der Wasserstand stieg im Tagebaurestloch um 6,90 m, und 90 Millionen m<sup>3</sup> Ereignisvolumen wurden zurückgehalten. Der Muldescheitel traf in Dessau drei Tage vor dem Elbescheitel am 15.8. ein, sodass sich die beiden Scheitelwerte der Flüsse nicht überlagerten. Jedoch wurde die Situation im Bereich der Stadt Dessau dadurch weiter verschärft. Von Dessau stromabwärts wurde die Hochwasserwelle durch die natürlichen Ausuferungen verformt. Die Saale selbst brachte keine außergewöhnlichen Hochwasserabflüsse in die Elbe, ihr Einzugsgebiet blieb von den extremen Niederschlägen verschont. Bei Magdeburg brachen einige Deiche, ohne erheblichen Effekt auf das Elbeereignis. Bei Magdeburg wurde der extreme Abfluss der Elbe zum Teil durch den Umflutkanal über das Pretziner Wehr verteilt. Die Havel wurde vom Hochwasser nicht direkt betroffen. Der Havelmündungsbereich ist durch ein Hochwasserschutzsystem, welches aus den Wehranlagen Neuwerben und Quitzöbel sowie sechs Poldern besteht, vom Elbehochwasser geschützt. Dieses System wurde hier zum ersten Mal durch die Öffnung und die Deichsprengungen benutzt. Dadurch wurde eine Scheitelkappung der Elbe im Bereich der Havelmün-

ung von bis zu 720 m<sup>3</sup>/s (WASY 2006) und stromabwärts in Wittenberge von bis zu 440 m<sup>3</sup>/s erreicht.

### 4.8.3 Deichbrüche- und Retentionswirkungen während des HWE 2002

Die Mittlere und Untere Elbe fließt durch das Flachland, und ist über 1200 km teilweise auf beiden Seiten durch Deiche, die das Land vor Überflutung schützen, beschränkt. Während des Hochwasserereignisses vom August 2002 kam es auf der Elbestrecke zu einer außerordentlichen Situation, die mehrere Deichbrüche durch die extremen Wasserstände der Elbe und Mulde zur Folge hatte. Die extremen Abflüsse und damit verbundenen extrem hohen Wasserstände haben eine enorme Deichbelastung hervorgerufen, welche zu lokalen Deichversagen geführt hat. An einigen Stellen wurden die Deiche überströmt, weil die extrem hohen Wasserspiegel bereits über dem Niveau der Deichkronen lagen. In Sachsen und Sachsen-Anhalt wurden 21 Deichbrüche an der Elbe und 125 an der Mulde registriert. Durch die unkontrollierbaren Deichbrüche und Deichüberströmungen wurden große Gebiete mit teilweise bebauten und landwirtschaftlich genutzten Flächen hinter der Deichlinie überflutet, so dass es zu hohen Schäden kam. Auf den überfluteten Gebieten wurden erhebliche Wassermengen gespeichert bzw. zurückgehalten. Es ist zu berücksichtigen, dass einige Deichbrüche an Elbe und Mulde sowie die gesteuerte Flutung der Havelpolder die Scheitelabflüsse teilweise reduziert haben (IKSE 2004).

Die Wasserstände der Elbe am Pegel Torgau wurden durch zwölf Deichbrüche sowie durch großräumige Überströmungen der Deiche in Dresden und im Landkreis Riesa-Großenhain beeinflusst. Es kam am 17.08.2002 zu acht Deichbrüchen noch vor dem Durchgang des Hochwasserscheitels bei Riesa. Zwischen Torgau und Aken wurden durch Deichbrüche und Deichüberströmungen schätzungsweise 280 bis 318 km<sup>2</sup> Fläche überflutet und etwa 275 Millionen m<sup>3</sup> Wasser zurückgehalten (IKSE 2004 und Bjarsch 2003). Die in dieser Arbeit beschriebenen Deichbrüche befanden sich zwischen der Landesgrenze Sachsen / Sachsen-Anhalt und Aken. Zu den wesentlichsten Deichbrüchen kam es bei Prettin-Mauken oberhalb der Mündung der Schwarzen Elster und unterhalb von Wittenberg bei Pratau und Seegrehna, welche einen hochwasserdämpfenden Effekt auf den Abflussscheitel ausübten und detailliert untersucht werden mussten, um das Flood-Routing-Modell an das Hochwasserereignis von 2002 anpassen zu können. Dafür wurden die zwei wesentlichen Retentionseffekte in Dautzschen und Seegrehna/Pratau, die durch Deichbrüche verursacht worden waren, analysiert. Die Informationen aus verschiedenen Quellen wichen dabei voneinander ab.

#### 4.8.3.1 Deichbruch Dautzschen

Zu großen Deichbrüchen kam es an drei Stellen unterhalb Torgaus: bei Dautzschen (Elbe-km 163,2 am 17.08.2002 um 13.50 Uhr), Domnitzsch (Elbe-km 172,4 linkselbisch am 18.08.2002 um 9.05 Uhr) und Sachau-Priesitz (Elbe-km 180,0 am 18.08.2002 um 18.00 Uhr), wobei die letzten beiden genannten Deichbrüche mit einer überfluteten Fläche von nur 5,7 km<sup>2</sup> einen vernachlässigbaren Effekt hatten. Der rechtselbische Deichbruch bei Dautzschen hatte eine verheerende Wirkung auf die Ortschaften hinter dem Deich – es wurden insgesamt 214 km<sup>2</sup> Fläche unkontrolliert überflutet. Die Deichlücke vergrößerte sich von 30 m auf 310 m. Diese Fläche wurde teilweise von unten, durch den Deichbruch Gorsdorf (am 17.08.2002) an der durch die Elbehochwasser gestauten Schwarzen Elster überflutet. Der hohe Wasserstand während des Elbehochwassers hat die Schwarze Elster bis zu 10 km vom

Mündungsbereich nach Jessen zurückgestaut. Das Gelände, siehe Abbildungen 4.12a und c, ist zwischen der Landesgrenze und der Schwarzen Elster mäßig geneigt, sodass die Wassermenge vom Deichbruch Dautzschen über den Deichbruch bei Gorsdorf, die zusätzlichen Deichöffnungen und zurück durch die Schwarze Elster in die Elbe floss. Damit kam es zu einer Speicherung des Volumens im Scheitelbereich mit dem daraus folgenden positiven hochwasserdämpfenden Einfluss auf den Wellenverlauf der Elbe (IKSE 2004).

An dieser Stelle soll die Methode der Bestimmung des gespeicherten Volumens und des Effekts auf den Hochwasserverlauf betrachtet werden. Die zentrale Frage ist, das gespeicherte Volumen auf dieser Fläche und seine zeitliche Verteilung abzuschätzen. Die Ermittlung der überfluteten Volumina folgte durch die Auswertung der Höheninformationen mittels des bereits angewendeten digitalen Höhenmodells in Abhängigkeit von der Einstauhöhe über die einzelnen Teilflächen. Im August 2002 wurde keine genaue zeitlich-verteilte Messung der Einstauhöhe durchgeführt, deswegen wurde diese aus dem Satellitenbild des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) von 20.08.2002 und aufgrund der Höhenkonturen des Geländes abgeschätzt. Aus dem Satellitenbild, siehe Abbildung 4.12a, sind die vollkommen überfluteten, teilweise überfluteten und trockenen Flächen zu erkennen. Mittels dieser Informationen können die Wassertiefen einzelner Teilflächen grob abgeschätzt werden. Mithilfe des interpolierten DGM mit Höhenlinien und anhand der in den topographischen Karten markierten Höhenangaben wurden so die unterschiedlichen Flächen anhand einer GIS-Bearbeitung abgegrenzt. Natürliche Hochgestade, Straßen, Wege und Bahnen wurden bei der Abgrenzung berücksichtigt, weil sie ein Hindernis für frei fließendes Wasser bilden und dadurch einen eventuellen Einstau verursachen können.

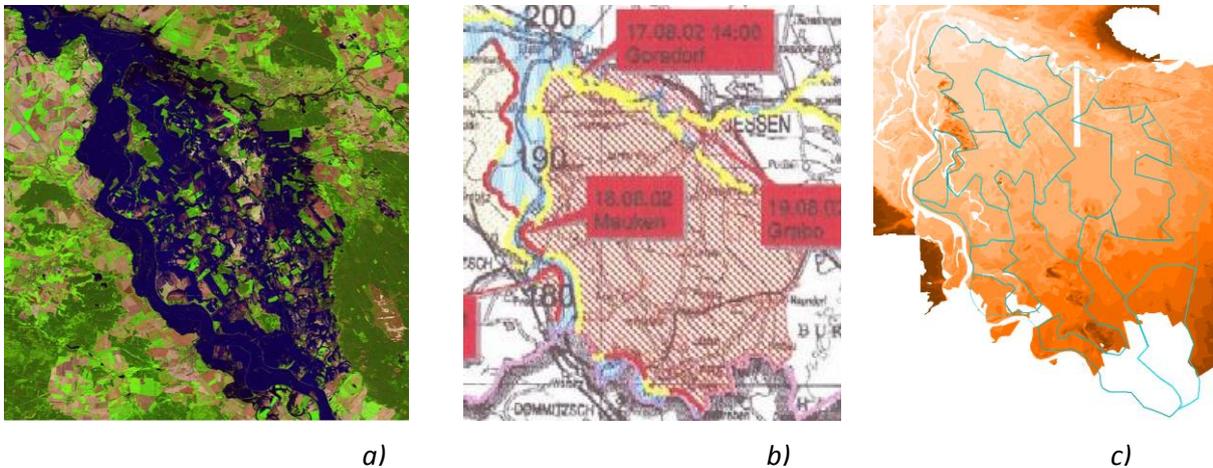


Abbildung 4.12: a) Ein Satellitenbild der überfluteten Fläche Dautzschen am 20.8.2002 (DLR), b) eine Abschätzung der überfluteten Fläche gleich nach dem Hochwasser (LHW), c) digitales Geländemodell (Quelle: LVA-SA) der überfluteten Fläche mit der Abgrenzung der Teilflächen, deren Volumen ermittelt wurde.

Die überflutete Fläche wurde in 6 Teilflächen (mit einer Gesamtfläche von  $88,16 \text{ km}^2$ ) mit größeren Wassertiefen und unterschiedlichen Einstauhöhen (m ü. NN) gegliedert. Von jeder Teilfläche – im GIS als Polygon - wurden mehrere Höhepunkte der Wasserausbreitung anhand der topographischen Karte abgelesen, um die mittlere Einstauhöhe (Wassertiefe) abschätzen zu können. Daraus wurden die Speicherinhaltslinien, siehe Abbildung 4.13, und die entsprechenden Volumina ermittelt. Das Verfahren ist in den Abbildungen 4.12 a,b,c erläutert. Bei den „wenig“ überfluteten Gebieten wurde

nur die Fläche von 22,9 km<sup>2</sup> ermittelt und angenommen, dass die Wassertiefe hier flächenmäßig 0,5 m betrug. Das entspricht einem Volumen von 11,45 Millionen m<sup>3</sup> Wasser. Durch diese Untersuchung wurde das gespeicherte Volumen aller Teilflächen des Deichbruchs Dautzschen auf etwa 83,5 Millionen m<sup>3</sup> abgeschätzt.

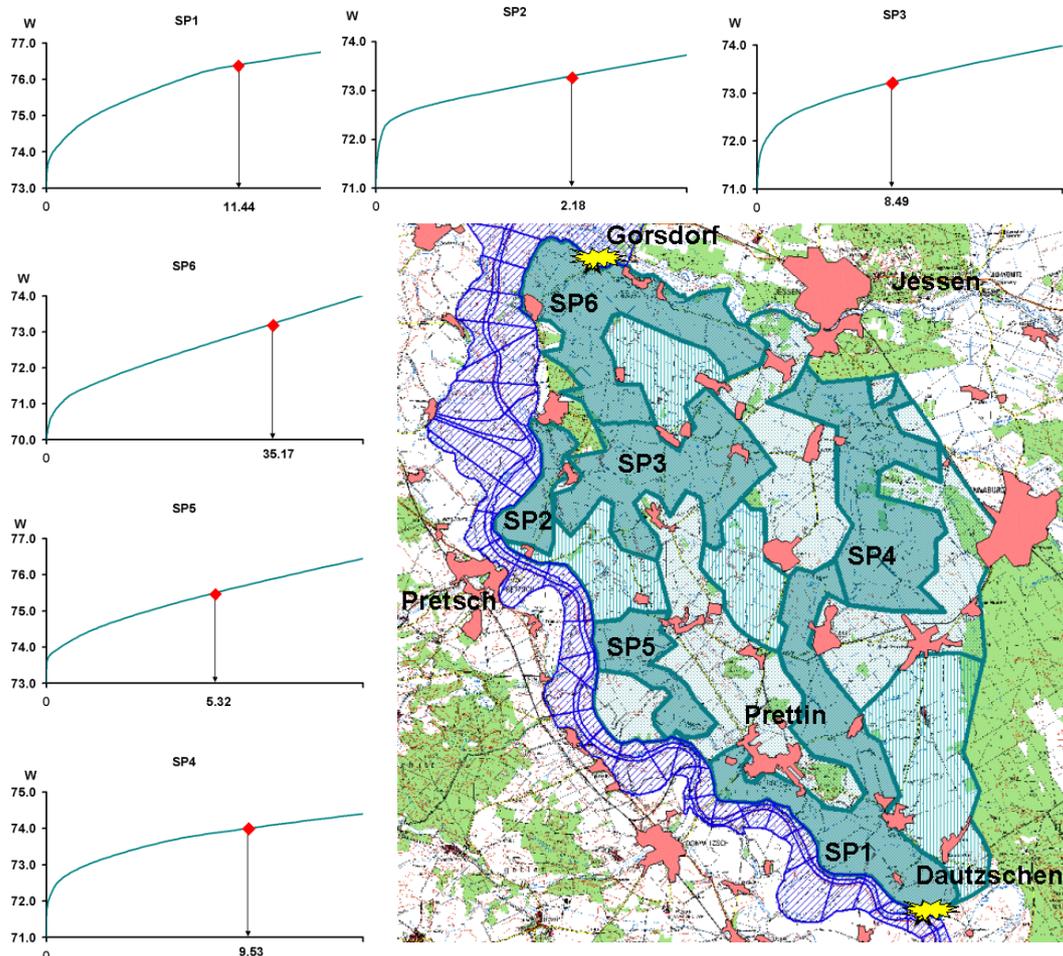


Abbildung 4.13: Analyse der überfluteten Fläche Dautzschen, die in sechs Teilflächen unterschiedlicher Wassertiefen und Volumen gegliedert wurden, um das gesamte Volumen abschätzen zu können. Aus diesem Grunde wurden zuerst die Teilflächen anhand des Satellitenbildes und Informationen des LHW im digitalen Geländemodell (siehe Abbildung 4.12a) abgegrenzt, um die Speicherinhaltslinien ermitteln zu können. Das gespeicherte Volumen wurde auf 83,5 Millionen m<sup>3</sup> abgeschätzt (benutzt TOPO50).

#### 4.8.3.2 Deichbrüche Pratau und Seegrehna

Während des Hochwasserereignisses von 2002 traten zwischen Wittenberg und der Muldemündung zwei große Deichbrüche links der Elbe bei Wittenberg auf. Die Deichbrücheffekte waren unterschiedlich groß und es ist zu beachten, dass die Informationen über die Deichbrüche und überfluteten Flächen aus verschiedenen Quellen kommen, wodurch einige Unsicherheiten in Betracht gezogen werden müssen. Der Deichbruch Pratau (Elbe-km 214,1), der unmittelbar oberhalb des Pegels Wittenberg lag, trat am 17.08.2002 um 23 Uhr ein. In der Literatur (IKSE 2004) ist eine überflutete Fläche

von 8 km<sup>2</sup> angegeben. Die zweite Deichbruchstelle geschah bei Seegrehna (Elbe-km 222,6) am 18.8.2002 um 16 Uhr (IKSE 2004).

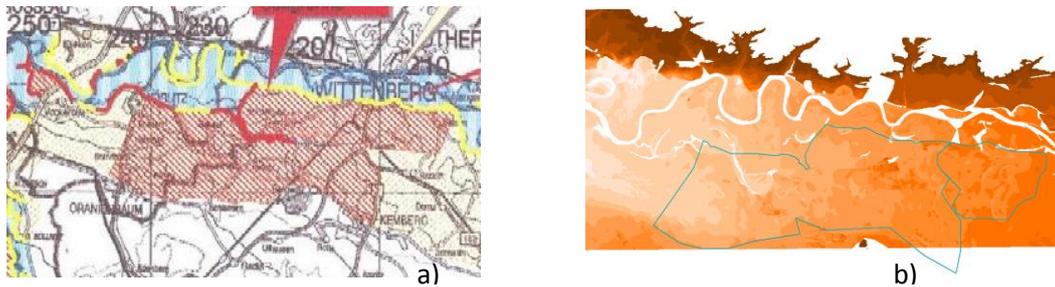


Abbildung 4.14: a) ein Ausschnitt aus der Karte der Überflutung bei Pratau und Seegrehna im August 2002 (LHW), b) ein digitales Geländemodell 10 x 10 m der gleichen Überflutung (Quelle: LVA-SA). Anhand dieser Informationen konnte das zurückgehaltene Volumen analysiert werden, s. folgende Abbildung 4.15.

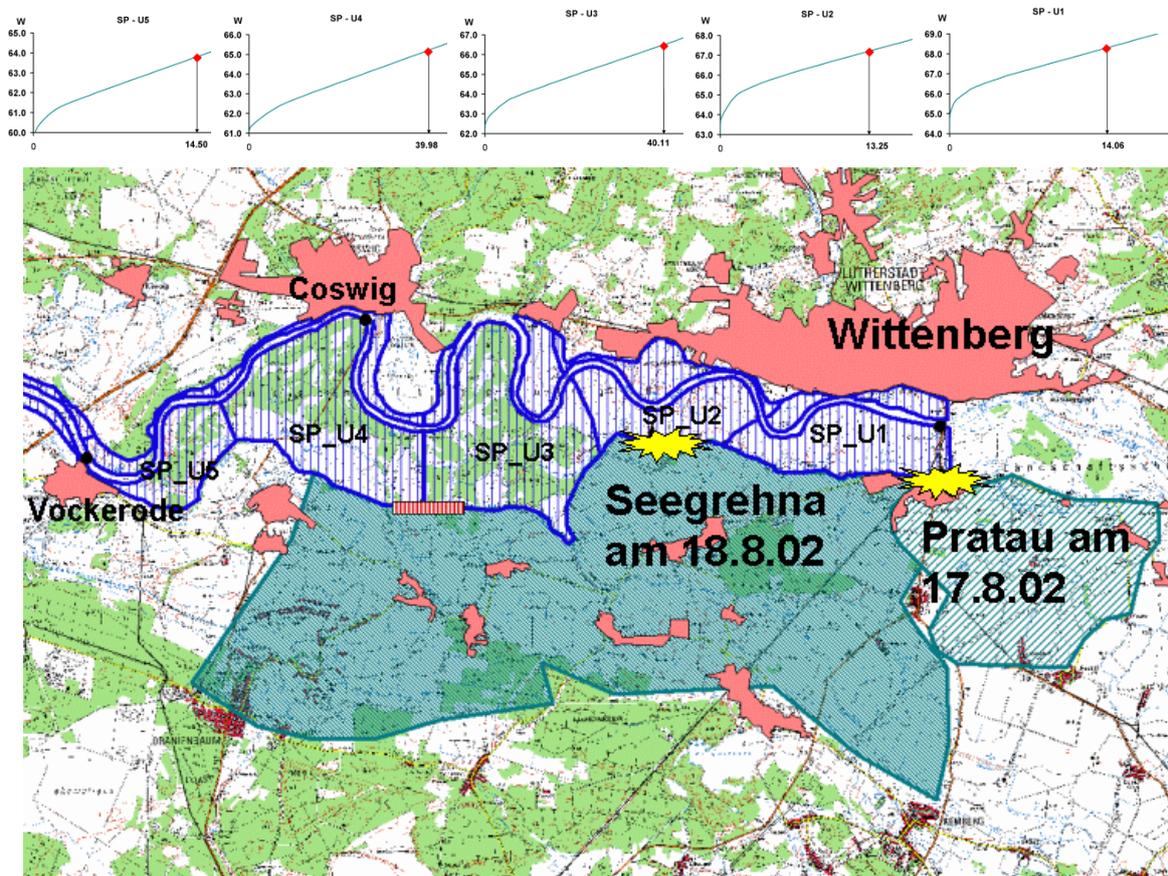


Abbildung 4.15: eine Übersichtskarte (TOPO50) der überfluteten Fläche durch die Deichbrüche Pratau und Seegrehna sowie der natürlichen Ausuferungen einschließlich der Speicherinhaltslinien SP-U1 bis 5 entlang des Elbelaufs zwischen Wittenberg und Vockerode und zwischen der Hochgestade (Nord) und den Deichen (Süd). Die Ermittlung des gespeicherten Volumens hinter den Deichbruchstellen ist in der folgenden Abbildung 4.16 dargestellt. Das durch die Deichbrüche gesamte gespeicherte Volumen wurde mit bis zu 173 Millionen m<sup>3</sup> und das Volumen in den Ausuferungen mit bis zu 125 Millionen m<sup>3</sup> Wasser geschätzt.

Die Fläche des durch die beiden Deichbrüche überfluteten Gebietes wurde nach (Bjarsch 2003) und den Informationen vom LHW auf 99 km<sup>2</sup> abgeschätzt, wobei hier kein Satellitenbild der Überflutung von Seiten des DLR zur Verfügung steht. Die Wirkung diesen Deichbruchs und den daraus resultierender Überflutung wurde im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe einer GIS-Bearbeitung, analog wie bei dem Deichbruch Dauztschen, näher analysiert. Auch hier wurden ein DGM und topographische Karten (TOPO10 und 50) benutzt um Hindernisse (Straßen, Hochgestade, Deiche, Eisenbahnen) der Überflutung im Gebiet anhand der Informationen vom LHW abgrenzen zu können. Nach Abgrenzung der Überflutung wurden die Speicherinhaltslinien der beiden Überflutungen ermittelt und graphisch dargestellt, siehe Abbildung 4.14. Damit konnte festgestellt werden, dass das Volumen der Überflutung Seegrehna etwa 150 – 160 Millionen m<sup>3</sup> und bei Pratau etwa 23 Millionen m<sup>3</sup> betrug, d.h. mehr als bei dem Deichbruch Dauztschen.

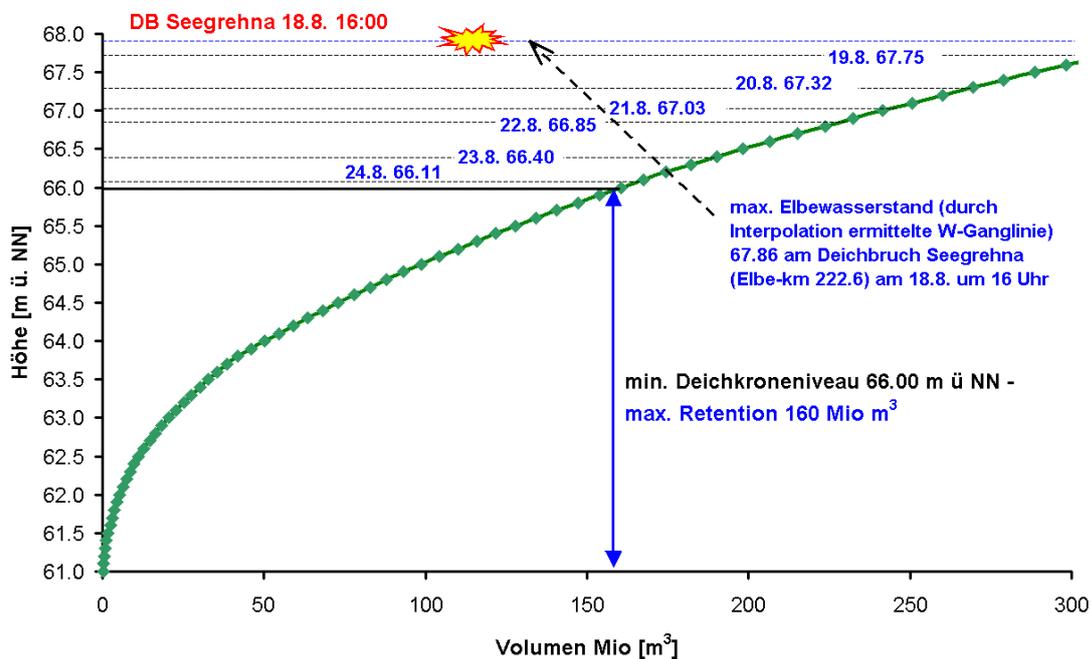


Abbildung 4.16: Speicherinhaltslinie der durch den Deichbruch Seegrehna überfluteten Fläche mit markierten Elbewasserständen jeweils um 0:00 Uhr. Damit wurde das gespeicherte Volumen in Abhängigkeit von der Einstauhöhe auf bis zu 150 - 160 Millionen m<sup>3</sup> abgeschätzt. Am 24.8. kam es zum Wasserstandsausgleich zwischen Elbe und der überfluteten Fläche. Der Deichfuß an der Deichbruchstelle beträgt etwa 65 m ü. NN. Diese Überflutung war hydraulisch mit der Überflutung Pratau, die hier nicht dargestellt ist, verbunden. Insgesamt wurden etwa 183 Millionen m<sup>3</sup> gespeichert.

#### 4.8.3.3 Natürliche Ausuferungen zwischen Wittenberg und Vockerode

Entlang der Strecke zwischen Wittenberg und Vockerode (32,4 km) wurden große natürliche Ausuferungen zwischen den Deichen bzw. Hochgestade untersucht, deren Breiten bei Wittenberg bis zu 4,2 km, bei Coswig bis zu 5 km und im Mündungsbereich der Mulde 2,8 km betragen. Der Effekt des natürlich zurückgehaltenen Volumens auf den Wellenverlauf und folgend auf das Translations-Diffusions-Modell wurde überprüft. Dafür wurden die digitalen Informationen der Ausuferungen vom LHW (Polygone der Überflutungen bzw. der Ausuferungen als Shape-Datei, Scheitelwasserstände von 2002 alle 100 m) sowie Abfluss- und Wasserstandsganglinien der o.g. Pegel herangezogen. Die Stre-

cke (32,4 km lang) wurde in 6 Teilüberflutungsgebiete unterteilt. Zu jeder Fläche wurden Speicherinhaltslinien und ihr entsprechendes Volumen in Abhängigkeit von dem abgeschätzten, teilweise interpolierten Scheitelwasserstand ermittelt, siehe Abbildung 4.15. Das Volumen der natürlich überfluteten Vorlandsfläche wurde mit etwa 125 Millionen m<sup>3</sup> abgeschätzt. Die Wirkung der erheblichen Ausuferung auf den Wellenverlauf war verzögernd, vor allem während des Anstiegs und nur mit einer vernachlässigbaren Abflussscheitelreduktion. Der Effekt auf die Ganglinie ist in Abbildung 4.18. dargestellt.

#### 4.8.4 Wirkung auf den Hochwasserverlauf und Modellanpassung

Der Grund für die Untersuchung der Deichbrucheffekte und Ausuferungen ist die Überprüfung oder Verbesserung bzw. Anpassung des bereits verwendeten hydrologischen Flood-Routing-Modells, welches an der Elbe zur Abflussvorhersage benutzt wird. Es ist ein dreistufiges Translations-Diffusions-Modell, deren Parameter  $u$  (Translation) und  $D$  (Diffusion) jeweils für jeden Abflussbereich (2 bis 3) durch die BfG bekannt sind und angewendet werden. Zusätzliche Informationen dieses Modells sind im Kapitel 3.2 zusammengefasst. Die damals gültigen Modellparameter (BfG) wurden mit den beobachteten Abflüssen anderer Ereignisse, mit weniger extremen Werten als das Ereignis 2002, kalibriert. Wichtig ist zu betonen, dass das Ereignis 2002 so extrem war und durch die aufgetretenen Deichbrüche zusätzlich sehr spezifisch und einzigartig war, dass die verschiedenen bestehenden, bewährten Modelle nur beschränkt zufriedenstellende Ergebnisse vorhersagen konnten. Die Parameter der Strecke Dresden bis Aken wurden schon im Rahmen der Polderstudie (Ihringer 2003) überprüft und angepasst. Die Modellanpassung beruht auf einer möglichen Änderung der folgenden Eingangsparameter des Modells:

- $u$  km/h Translation (Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit)
- $D$  km<sup>2</sup>/h Diffusion (Wellenabflachung)
- Verschiebung oder veränderte Abgrenzung der einzelnen Abflussbereiche
- Teilung einer Strecke in mehrere Strecken mit ungleichen Parametern

Um eine mögliche Parameteranpassung der von den Deichbrüchen betroffenen Strecke zwischen Torgau und Wittenberg durchführen zu können, wurden die beobachteten Ganglinien von Torgau, Mauken und Wittenberg an der Elbe und Bad Liebenwerda an der Schwarzen Elster herangezogen. Es ist davon auszugehen, dass die beobachteten Wasserstands- und Abflussganglinien an o.g. Pegeln auch während des Hochwasserereignisses zuverlässig waren. Die Verformung und der Verlauf der Abflussganglinie von Torgau nach Wittenberg wurde mit dem o.g. Flood-Routing-Modell und seinen gültigen Parametern (BfG) berechnet. Den Pegel Torgau (Elbe-km 154,2) erreichte der Hochwasserscheitel am 18.08.2002 um 1:45 Uhr und den Pegel Wittenberg (Elbe-km 214,2) am selben Tag gegen 14:15. Die von Torgau geroutete Abflussganglinie, ohne Deichbrucheffekte in Wittenberg, wurde mit der durch Deichbrüche beeinflussten beobachteten Abflussganglinie visuell verglichen und überprüft. Es wurde festgestellt, dass die Modellparameter bei diesem extremen Sonderereignis keine zuverlässigen Ergebnisse lieferten. Deswegen mussten die Parameter iterativ so lange angepasst werden, bis die Scheitelwerte der simulierten und beobachteten Abflussganglinie in Wittenberg zeitlich übereinstimmten. Gleichzeitig wurde der Verlauf des ansteigenden und fallenden Astes berücksichtigt. Die Ergebnisse der Parameteranpassung sind in Tabelle 4.5 erfasst. Um den Effekt des Deichbruches Dautzschens auf den Verlauf des Ereignisses quantifizieren zu können, wurde eine simulierte Entnah-

meganglinie von (Bjarsch 2003) herangezogen. Um die Abflusentnahme durch den Deichbruch Dauztschen bei Axien berücksichtigen zu können, musste die Elbestrecke Torgau – Wittenberg in zwei Strecken Torgau – Axien 27,5 km und Axien – Wittenberg 32,0 km unterteilt werden. Die Modellparameter der zweiten Teilstrecke mussten dabei verändert werden, siehe Tabelle 4.5. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.17 dargestellt, wo am Pegel Wittenberg ein Band zwischen der simulierten Abflussganglinie ohne Deichbrucheffekte und der beobachteten Abflussganglinie mit den Deichbrucheffekten Dauztschen zu erkennen ist. Durch die Untersuchung mittels der Abflussganglinien ergaben sich etwa die gleichen gespeicherten Volumina von 88 Millionen m<sup>3</sup>. Es wurde festgestellt, dass der Effekt des Deichbruches Dauztschen nur lokal auf der Strecke von der Deichbruchstelle über Mauken bis hin zur Mündung der Schwarzen Elster wirkte. Nach (IKSE 2004) betrug der maximale Zufluss hinter die Deichlinie und gleichzeitig auch die maximale Abflussreduktion etwa 700 m<sup>3</sup>/s. Dies kann ebenfalls als Abflussverzweigung durch den Deichbruch betrachtet werden. Ein großer Teil dieses Zuflusses floss über die Schwarze Elster zurück in die Elbe und wurde nur kurz zurückgehalten, so dass sich der weitlaufende hochwasserdämpfende Einfluss des Deichbruchs auf die Hochwasserwelle vor allem verzögernd und lokal auswirkte.

Tabelle 4.5: Die in der Polderstudie (Ihringer 2003) verwendeten Modellparameter des Translations-Diffusions-Ansatzes (Teil des ELBA-Modells), die für das Ereignis vom August 2002 teilweise angepasst werden mussten. Die Originalparameter wurden von BfG übernommen und sie sind in Klammern angegeben. Zahlen ohne zusätzliche Zahl in Klammern sind die gültigen Originalparameter (BfG), die nicht verändert werden mussten.

Gewässerabschnitt	Länge x [km]	Abfluss- bereich i	Q <sub>i</sub> [m <sup>3</sup> /s]	D <sub>i</sub> [km <sup>2</sup> /s]	u <sub>i</sub> [km/s]
Torgau – Axien	27,5	1	700	32,11	3,384
		2	2000	14,25	2,190
		3	-	82,40	3,270
Axien – Wittenberg/L. (Gesamtstrecke Torgau – Wittenberg)	32,0 (59,5)	1	700	32,11	3,384 (2,799)
		2	2000 (1400)	14,28	2,190
		3	-	82,40 (10,30)	3,500 (2,090)
Wittenberg/L. – Vockerode (Gesamtstrecke Wittenberg – Dessau)	32,4 (47,1)	1	1000	11,32	3,384
		2	3000 (7000)	3,50	1,744
		3 (ohne)	- (-)	11,32 (0,00)	5,000 (0,000)
Vockerode – Dessau	14,5	1	1000	11,32	3,384
		2	3000 (7000)	3,50	1,744
		3 (ohne)	- (-)	30,00 (0,00)	5,000 (0,000)

Die Wirkung dieses Deichbruches auf den Abflussscheitel der Elbe stromabwärts war etwa geringer, die Abflussreduktion am Pegel Wittenberg einschließlich der natürlichen Wellenabflachung (Bjarsch 2003) betrug etwa  $250 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Demgegenüber brachen die Deiche bei Pratau und Seegrehna zwischen Wittenberg und Vockerode erst während des Eintreffens des Scheitels, sodass die Wirkung des ungesteuert gespeicherten Hochwasservolumens erst im fallenden Ast beobachtet wurde. Es kam dadurch zu einer vernachlässigbaren Scheitelkappung. Die großen natürlichen und breiten Ausuferungen auf dieser Strecke wirkten verzögernd auf den steigenden Ast der Abflussganglinie. Auch hier wurde die Elbestrecke Wittenberg – Dessau in zwei Teilstrecken Wittenberg – Vockerode und Vockerode – Dessau unterteilt, weil am Pegel Vockerode eine beobachtete Abflussganglinie verfügbar ist, welche die Verifizierung der o.g. Modellparameter ermöglicht. Auf den beiden Teilstrecken wurden die Parameter des ersten und zweiten Abflussbereiches bis  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$  wie ursprünglich von der BfG angegeben belassen. Hier wurde die dritte Abflussstufe auf  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$  erweitert, um den richtigen Wellenverlauf mit den neuen Parametern besser nachsimulieren zu können. Die Parameteranpassung bzw. –erweiterung ist in der Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Die gespeicherten Volumina wurden rechnerisch mit den neuen Parametern auf 125 Millionen  $\text{m}^3$  bei den natürlichen Ausuferungen und beim Deichbrucheffect auf 173 bis 183 Millionen  $\text{m}^3$  geschätzt. Dies ist in Abbildung 4.18 als Band zwischen den beobachteten und gerouteten Abflussganglinien am Pegel Vockerode ersichtlich.

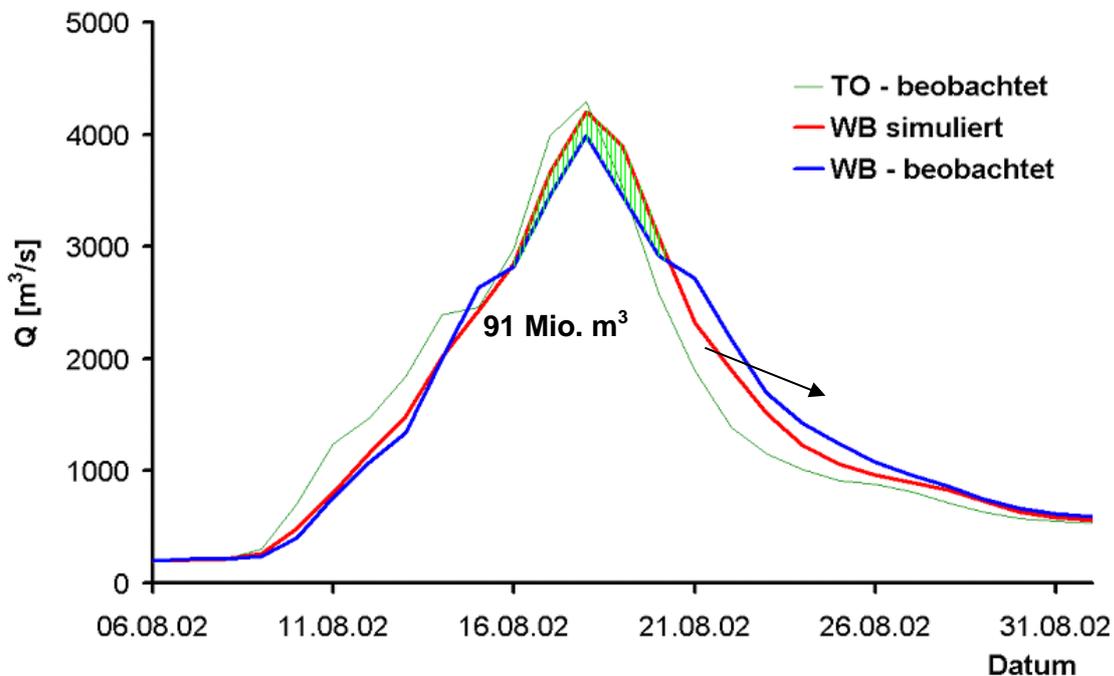


Abbildung 4.17: Beobachtete Abflussganglinien Torgau (TO) und Wittenberg (WB) und geroutete Abflussganglinie von Torgau nach Wittenberg (59,5, km) einschließlich der Schwarzen Elster mit den neuen Modellparametern. Auf dem Bild ist die Wirkung des Deichbruches Dauztschen als Band zu erkennen.

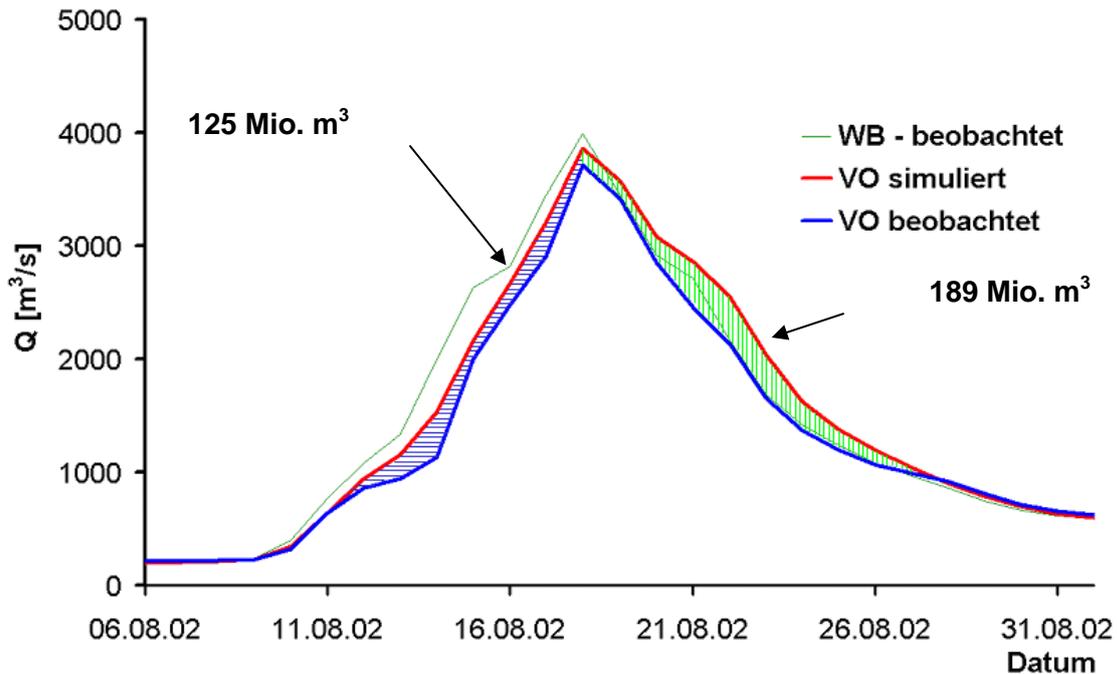


Abbildung 4.18. Beobachtete Abflussganglinien Wittenberg (WB) und Vockerode (VO) sowie geroutete Abflussganglinie von Wittenberg nach Vockerode (32,4 km) mit den neuen Modellparametern. Auf dem Bild ist die Wirkung der Deichbrüche Seegrehna und Pratau (fallender Ast) und der natürlichen Ausuferung (steigender Ast) als Band zu erkennen.

#### 4.9 Winterhochwasserereignis 2006

Kaum 4 Jahre später, im März und April 2006, entstand ein Winterhochwasserereignis, welches vor allem in den Gebirgsbereichen der Schneeschmelze der damals dicken Schneeschicht und zusätzlichen Niederschlägen mit warmer Luft ausgelöst wurde. In den oberen Bereichen kam es zur fortschreitenden Bildung des Ereignisses ohne extreme Auswirkung, jedoch durch die Überlagerung einzelner Zuflüsse zu einem erheblichen Ereignisvolumen. Dies hatte zur Folge, dass das Ereignis von 2006 im Gegensatz zu 2002 nicht durch die natürliche Diffusion (Ausuferungen und Retention) abflachte, sondern weiter anwuchs, sodass die maximalen Abflüsse unterhalb von Wittenberge höher als beim Ereignis vom 2002 waren. Das Winterereignis lässt sich durch einen langandauernden Scheitel mit erheblichen Ereignisvolumen charakterisieren. Die Havelpolder wurden wegen des erheblichen Volumens und der flachen Scheitel nicht eingesetzt, sie wären wirkungslos gewesen.

Solche extremen Hochwasserereignisse kommen nur sehr selten vor, trotzdem sind sie ein Auslöser für eine Verbesserung des bestehenden Hochwasserschutzes und des operationellen Hochwassermanagements. Vor allem wurde die Wahrnehmung eines solchen Risikos nicht nur Betroffenen bewusster. Nach dem Ereignis von 2002 ergaben sich viele neuen Aufgaben und Aktivitäten, unter anderem diese Arbeit, die sich mit den Retentionsmaßnahmen – steuerbaren Notpoldern – als Teil des Hochwasserschutzes beschäftigt. Im Vergleich zu den ähnlich extremen historischen Ereignissen z.B. vom Juli 1890, wurde das Ereignis vom August 2002 gut beobachtet, analysiert und dokumentiert, sowie einige Prozesse nachträglich simuliert, sodass man eine gute Datenbasis für die Planung und Entwicklung des Hochwasserschutzes und die Forschung erhielt. Trotz dieser Tatsache ist die Anzahl

der bisher beobachteten Extremereignisse zu gering, um eine klare Aussage über die mögliche Form und Auswirkung der künftiger Extremereignisse treffen zu können.

#### **4.10 Anpassung der jährlichen Abflusswerte in Dresden an den heutigen Zustand – mit Talsperreneffekten – „Update“**

In diesem Kapitel wird die Methode zur Abschätzung der hochwasserdämpfenden Effekte der großen tschechischen Talsperren am Pegel Dresden mittels der Ergebnisse der Talsperrenstudie (MŽP 2005) behandelt. Zusätzlich wird die Methode der Simulation und der weiterer Nutzung in Betrachtung gezogen.

##### **4.10.1 Einleitung, Problemstellung**

Die Bestimmung des (extremen) Bemessungshochwassers stellt eine Wissenslücke dar, die zu Unsicherheiten bei der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen und -management führt. Um diese Wissenslücke zu eliminieren, werden die Abflusswerte des Bemessungshochwassers – statistische Wiederkehrintervalle – aus gemessenen und zusätzlich simulierten Abflussreihen ermittelt. Mit dieser Kenntnis werden Hochwasserschutzmaßnahmen dann so bemessen, dass ein Ereignis mit einem Abflussscheitel bis zur vorgegebenen Überschreitungswahrscheinlichkeit keine Schäden verursacht. Bemessungsgrößen sind meist jährliche Hochwasserscheitelabflüsse  $HQ(a)$ . Die Ermittlung des Bemessungsabflusses besteht in der extremwertstatistischen Analyse der Stichprobe der  $HQ(a)$ -Reihen durch Anpassung einer theoretischen Verteilungsfunktion. Die Quantifizierung des anthropogenen Einflusses vor allem durch die großen Talsperren im oberen Elbeeinzugsgebiet ist zur Ableitung von heute gültigen Bemessungshochwasserwerten unverzichtbar. Das Ziel dieser Untersuchung ist die Ableitung der Unterlagen für eine homogenisierte Hochwasserstatistik am Pegel Dresden für zwei Zustände – mit und ohne Talsperreneinflüsse.

In den tschechischen Teileinzugsgebieten der Elbe wurden Mehrzwecktalsperren in den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts einige große gebaut, siehe Abbildung 4.19. Die größten in der Studie (MŽP 2005) untersuchten Talsperren verfügen über erhebliche Hochwasserschutzräume, siehe Tabelle 4.6, welche hochwasserdämpfenden Effekte auf Hochwasserereignisse haben. Die hydrologischen Einflüsse auf den Hochwasserverlauf wurden von den Talsperren Lipno, Orlík und Slapy an der Moldau und Nechanice an der Eger untersucht. Es handelt sich um Mehrzwecktalsperren. Der Hauptzweck der Talsperren Orlík und Nechanice ist die Niedrigwasseranreicherung in den Trockenperioden, weiter die Nutzung für die Energiegewinnung. In den letzten Jahren trat das Hochwasserschutzpotenzial aller großen Talsperren in Bezug auf eine großskalige Hochwassermodellierung in den Vordergrund der Untersuchung von Hochwasserereignissen. Die Talsperren wurden wie folgt schrittweise in Betrieb genommen: Slapy 1954, Lipno 1960, Orlík 1964 und Nechanice 1968. Informationen über die Steuerungspläne der Moldauer Talsperren, sowie teilweise Angaben über Änderungen stehen zur Verfügung.

Eine zeitliche Entwicklung der gesamten Volumina aller Stauräume der Talsperren im Einzugsgebiet der Elbe sind bereits in Abbildung 2.4. im Kapitel 2.4. gezeigt.

Tabelle 4.6: Kennwerte der untersuchten tschechischen Talsperren mit Angaben des Jahres der Inbetriebnahme

Nr.	Name	Jahr	Einzugsgebiets-Fläche [km <sup>2</sup> ]	Hochwasser-Schutzraum [Mio. m <sup>3</sup> ]
1	Slapy	1954	12 952	17.1
2	Lipno	1960	948,2	30.4 (Winter), 11 (Sommer)
3	Orlík	1964	12 106	62
4	Nechranice	1968	3 590	36.6

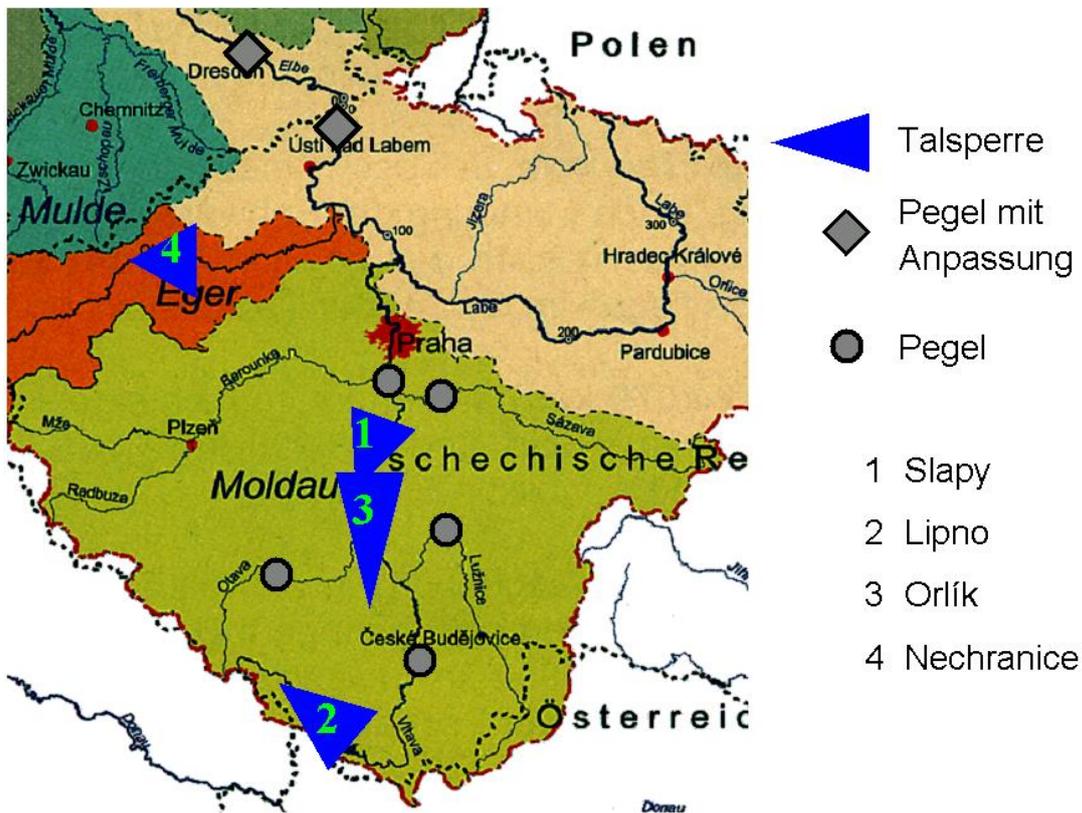


Abbildung 4.19: Übersichtskarte mit den untersuchten Talsperren, deren hochwasserdämpfende Wirkung auf jährliche Hochwasserabflüsse simuliert wurde. Die Ergebnisse zum grenznahen Pegel Děčín – zwei kontinuierlichen Abflussreihen mit und ohne Talsperreneffekte – wurden für die Anpassung der Reihen in Dresden weiter verwertet.

#### 4.10.2 Ergebnisse der Talsperrenstudie

Die Ergebnisse der Talsperrenstudie wurden im Rahmen der „Studie zur Wirkung der großen tschechischen Talsperren im Einzugsgebiet der Elbe auf den Hochwasserverlauf“ (MŽP 2005) im Auftrag des tschechischen Umweltministeriums (MŽP) durch das Wasserwirtschaftliche Forschungsinstitut (VÚV TGM), ČHMU und anderen Partner ausgearbeitet. In der Studie wurden die Einflüsse der vier großen Talsperren auf den Hochwasserverlauf untersucht und dadurch die T-Jährlichkeiten (Wiederkehrintervalle) der Hochwasserereignisse ermittelt, bei denen die Talsperren noch einen hochwasserdämpfenden Effekt haben. Im Rahmen dieser Studie wurden u.a. maximale jährliche Ereignisse für zwei Zustände – mit und ohne Talsperreneinflüsse - simuliert. Ergebnisse dieser Studie sind zwei kontinuierliche homogenisierte Abflussganglinien im 6-Stundenschritt von 1890 bis 2003 für ausgewählte Pegel, wie z.B. Děčín, Ústí nad Labem, Mělník und Prag für die beiden Zustände. Die Simulationen wurden mit Hilfe des komplexen Simulationsmodells AquaLog durchgeführt. Dieses Modell besteht aus Niederschlag-Abfluss-, Schneeschmelze-, Flood-Routing- und Speichermodellen. Für die Simulation wurden digitale und historisch gemessene Klima- und Abflussdaten herangezogen. Da die Datelage nicht vollständig bis ins 19. Jahrhundert reicht, konnten die Ergebnisse teilweise nicht mit der beobachteten Situation verglichen werden. Es muss angenommen werden, dass die simulierten Ganglinien bestimmte Fehler aufweisen, da das komplexe Modell nicht für den ganzen Zeitraum kalibriert werden konnte, und da die Datenbasis für den ganzen Zeitraum vorliegt.

#### 4.10.3 Anpassung und Verfahren in Děčín

Damit die Talsperrenwirkung auch am Pegel Dresden abgeschätzt werden kann, wurden die Simulationen an die beobachtete Abflussreihe in Děčín angepasst. Es handelt sich an erste Stelle um die Anpassung der historischen Zeitreihen an den heutigen Zustand (mit Talsperren), und später um die Anpassung der heutigen Zeitreihen an den historischen Zustand (ohne Talsperren). Damit lässt sich die Zeitreihe hinsichtlich der maximalen jährlichen Abflüsse homogenisieren. Der Pegel Děčín an der Elbe ist wegen seiner Lage nahe der Staatsgrenze (12 km) und seiner langen Beobachtung ein Referenzpegel für die Abflusssimulation stromabwärts in Deutschland. Wie bereits erwähnt wurde, sind die Simulationen durch fehlende beobachtete Daten nicht ganz genau. Für den Zeitraum 1890 – 2003 am Pegel Děčín bestehen drei Abflussganglinien: eine beobachtete, eine simulierte mit Talsperreneffekten, und eine simulierte ohne Talsperreneffekte. Das Ziel dieser Anpassung in Děčín ist die Übertragung der hochwasserdämpfenden Talsperreneffekte an die beobachtete Ganglinie, die nicht oder nur teilweise durch die heute fertigen Talsperren und deren gültigen Steuerungsplänen beeinflusst ist. Das Verfahren der Übertragung besteht in der Berücksichtigung der schrittweisen Talsperrenentwicklung und –Inbetriebnahmen in der Vergangenheit, siehe Tabelle 4.6. Aus der Tabelle ist zu erkennen, dass sich insgesamt vier zeitliche Situationen im Ausbau der Inbetriebnahmen erkennen lassen:

- 1890 – 1953 Zeitraum ohne Talsperren
- 1954 Sondersituation - Füllung der Talsperre Slapy (wird später erklärt)
- 1955 – 1968 Zeitraum der fortschreitenden Talsperreninbetriebnahmen und
- 1969 – 2003 Zeitraum mit allen Talsperren in Betrieb.

Die simulierten Zeitreihen wurden zusammen mit der beobachteten Zeitreihe geplottet, dadurch wurde eine zeitliche Unstimmigkeit gefunden. Aus diesem Grund wurde für alle Ereignisse immer das Bestimmtheitsmaß von 4 Monaten berechnet und entsprechend verschoben. Bei Ereignissen bis 1950 betrug die Verschiebung 24 bis 72 Stunden, für die jüngeren Ereignisse 0 bis 24 Stunden. Für diese Zeiträume wurden unterschiedliche Anpassungsmethoden angesetzt.

#### 4.10.3.1 Zeitraum 1890 – 1953

Es handelt sich um den Zeitraum, in dem noch keine großen Talsperren fertiggestellt waren und die Abflussverhältnisse der beobachteten Abflussreihen nicht durch Talsperren beeinflusst waren. Da ein Unterschied zwischen den simulierten und beobachteten Ganglinien besteht, konnte die Simulation nicht direkt durch das Routing-Verfahren nach Dresden übertragen werden. Die Wirksamkeit aller Talsperren stellt das Unterschiedsband – die Differenzganglinie - anhand der beiden Simulationen mit und ohne Talsperre dar. Die mit dem Zeitintervall multiplizierte Differenzganglinie stellt den Hochwasserschutzraum aller Talsperren dar. Diese Differenzganglinie wurde von der beobachteten Abflussganglinie, die in diesem Zeitraum noch nicht von den Talsperren beeinflusst war, abgezogen, damit der heutige Zustand mit den Talsperren der historischen Abflussganglinie erreicht werden kann.

#### 4.10.3.2 Sonderfall 1954

Kurz von der Fertigung der ersten Talsperre an der Moldau Slapy wurde das Einzugsgebiet im Juli 1954 von einem Extremereignis getroffen, als die Talsperre noch zum Großteil leer war. Aus diesem Grund wird diese Situation als Sonderfall bezeichnet, der sich nie wiederholen wird. Im Rahmen dieser Anpassung wurde dieses Ereignis ebenfalls analysiert. Es war ein erhebliches Talsperrevolumen vorhanden - etwa ein Drittel des gesamten Raums. Es liegen keine Informationen über den Beginn der Füllung vor. Um den Zustand unmittelbar vor dem Ereignis abschätzen zu können, wurden Abflussganglinien von Zuflüssen, Ausflüssen und vom Zwischengebiet analysiert. Die oberen Pegel sind: Hluboká/Moldau (2848 km<sup>2</sup>), Bechyně/Lužnice (4046 km<sup>2</sup>) und Písek/Otava (2913 km<sup>2</sup>). Der untere Pegel ist Zbraslav/Moldau und beinhaltet den Zufluss Sázava mit dem Pegel Poříčí. Zuerst wurde ein Abflusszuwachsbeiwert des Zwischeneinzugsgebiets aus den mittleren jährlichen Abflüssen (1941 – 1953) der oberen und unteren Pegel abgeschätzt, er beträgt 1.16. Die drei aufsummierten Ganglinien wurden mit dem Abflusszuwachsbeiwert multipliziert, um den Zufluss in die Talsperre Slapy vom Zwischengebiet berücksichtigen zu können. Die Ausflussganglinie wurde von dem sich in der Nähe befindenden Pegel Zbraslav an der Moldau und durch Abzug der Abflussganglinie des Zuflusses Sázava, der in die Moldau unterhalb der Talsperre fließt, abgeschätzt. Der Beginn des Füllprozesses hat etwa im März 1954 angefangen. Durch die Volumenbilanz der abgeschätzten Zu- und Ausflussganglinien wurde festgestellt, dass die Talsperre bis zum 7. Juli 1954 – ein Tag vor dem Ereignis – zu etwa 2/3 (183,5 Mio. m<sup>3</sup>) des gesamten Stauraums gefüllt war, d.h. es waren noch 85,8 aus dem Gesamtvolumen von 269,3 Mio. m<sup>3</sup> frei. Dadurch konnte die Talsperre schnell gefüllt werden und vor allem wurde das Ereignis 1954 durch diese außergewöhnliche Situation um 325 m<sup>3</sup>/s gekappt und zurückgehalten. Es wurde eine Differenzganglinie mit der Talsperrenwirkung ermittelt. Da diese Differenzganglinie in ähnlicher Größenordnung ist wie die Differenzganglinie mit und ohne Talsperren in Děčín, und gleichzeitig kein vollständiges Flood-Routing-Modell zwischen der Talsperre und Vraňany

für die gesamte Strecke Zbraslav – Děčín vorhanden ist, kann die simulierte Abflussganglinie mit dem Talsperreneinfluss in Děčín für die nächste Übertragung nach Dresden als angepasste Ganglinie angenommen werden. Die beobachteten und abgeschätzten Abflussganglinien vom Ereignis 1954 sind in der folgenden Abbildung 4.20 dargestellt.

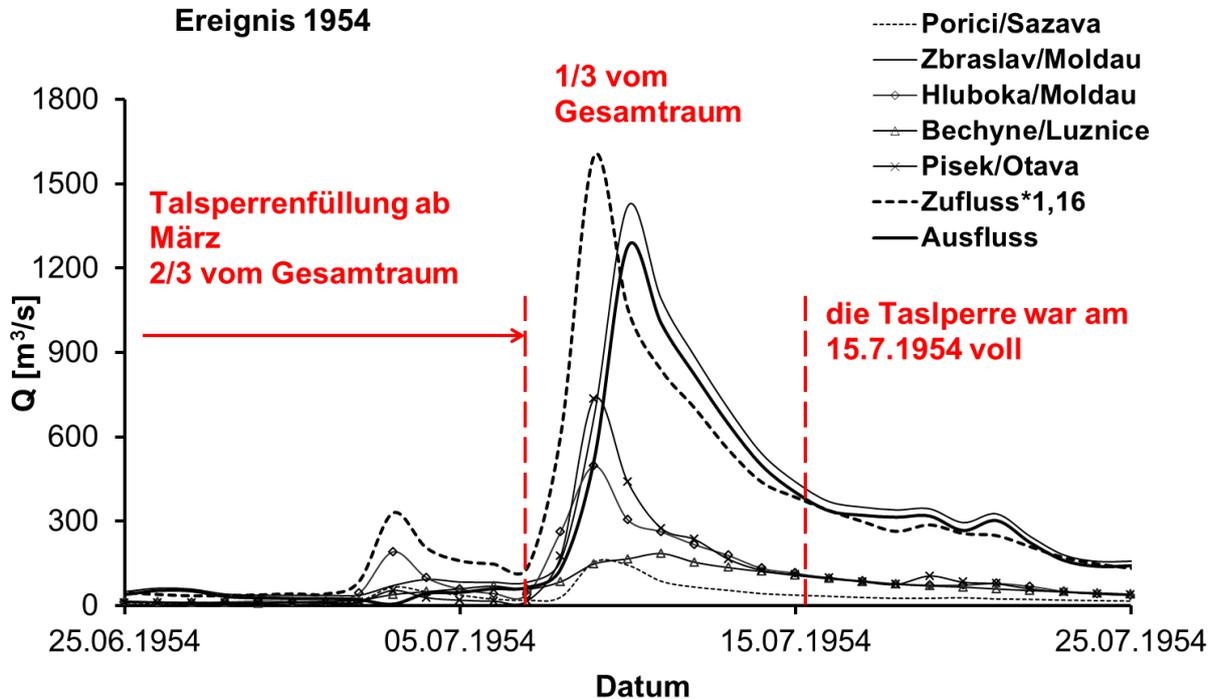


Abbildung 4.20: Rekonstruktion des Ereignisses 1954 in Bezug auf den Füllungsprozess der Talsperre Slapy mit Hilfe der beobachteten Abflussreihen der benachbarten Pegel

#### 4.10.3.3 Zeitraum 1955 – 1968, Übergangszeit

Während der Übergangszeit zwischen 1955 und 1968 wurden die größten Talsperren schrittweise in Betrieb genommen. Dabei es ist für den Hochwasserschutzraum, der während des Jahres (Winter und Sommer) nicht gleich ist, zu beachten: 1954 Slapy/Moldau (17.1 Mio.m<sup>3</sup>), 1960 Lipno I/Moldau (30.4 im Winter und 11 im Sommer Mio.m<sup>3</sup>), 1964 Orlik/Moldau (62 Mio.m<sup>3</sup>) und 1968 Nechranice/Eger (36.6 Mio.m<sup>3</sup>). Die Wirksamkeit der einzelnen existierenden Talsperren in betrachteten Jahren wird proportional zum gesamten Volumen der Moldauer Talsperren gerechnet.

Da die Talsperre Nechranice an der Eger im Verhältnis zu ihrer Einzugsgebietsfläche sehr groß ist und dadurch auch die Extremereignisse laut der Talsperrenstudie gedämpft werden können, wird ihre Wirksamkeit nicht proportional ermittelt, sondern ein pauschal bestimmter Abfluss wurde von der Differenzganglinie abgezogen. Durch die Talsperre Nechranice wurden höchstens 200 m<sup>3</sup>/s – schadloser Abfluss - nach dem alten Steuerungsplan durch die Grundablässe abgegeben. Dieser Betrag über dem Schwellenabfluss wurde von der beobachteten Abflussganglinie Louny an der Eger abgezogen und nach Děčín übertragen. Ereignisse größer als 200 m<sup>3</sup>/s wurden vollständig gekappt und im Hochwasserschutzraum dieser Talsperre zurückgehalten. Z.B. am 6.3.1956 lag der Abfluss in Louny bei 430 m<sup>3</sup>/s, d.h. 230 m<sup>3</sup>/s wurden zurückgehalten und von der gesamten Differenzganglinie am Pegel Děčín abgezogen, wobei die Wellenabflachung auf der Strecke vernachlässigt wurde. Von der

so erhaltenen Differenzganglinie wird proportional zum gesamten Volumen der Moldauer Talsperren zu dem bereits vorhandenen Talsperrenvolumen eine aktuelle Differenzganglinie im bestimmten Jahr ermittelt. Diese proportionale Differenzganglinie wird auf die beobachtete Abflussganglinie übertragen, siehe Abbildung 4.21.

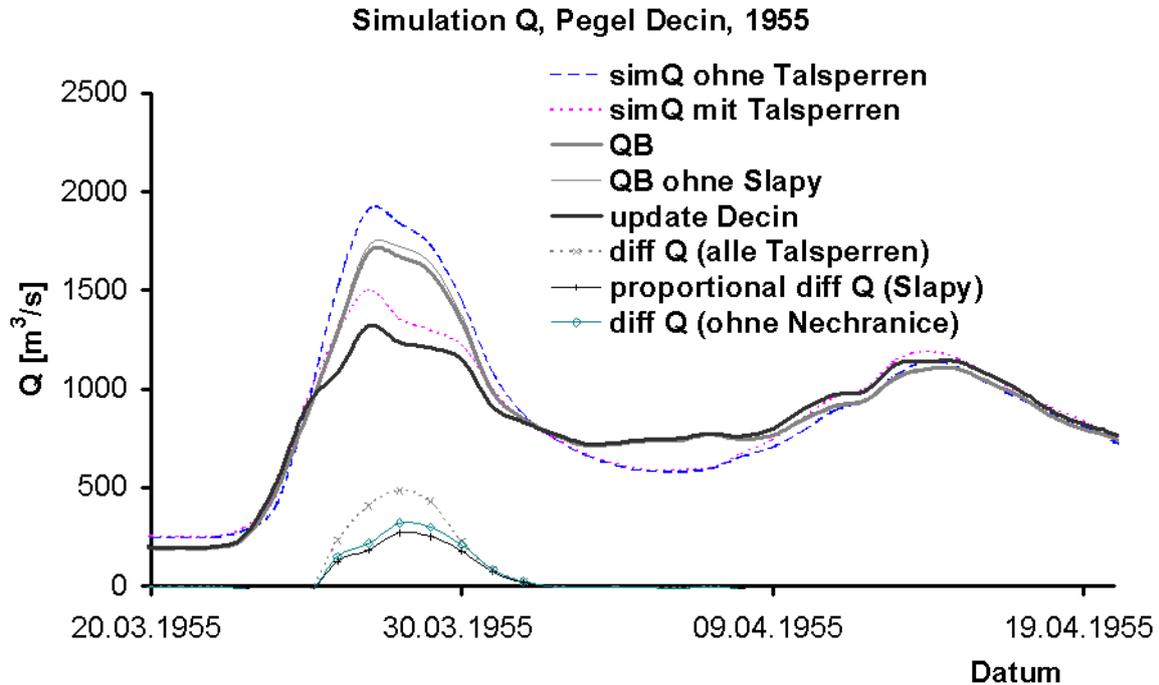


Abbildung 4.21: Anpassung der beobachteten Abflussganglinie an den heutigen Zustand in Děčín während der Übergangszeit; im 1955 war nur die Talsperre Slapy im Betrieb.

#### 4.10.3.4 Zeitraum 1969 – 2003

Da in diesem Zeitraum bereits alle Talsperren vorhanden waren, und somit die beobachtete Abflussganglinie von den Talsperren beeinflusst ist, wurde hier keine Anpassung durchgeführt. Andererseits wurde im Rahmen der Talsperrenstudie für den ganzen Zeitraum vom 1890 –2003 eine Simulation ohne Talsperren durchgeführt. Ein solcher Zustand wird sich nie ergeben, jedoch wurde diese Simulation als Quantifizierung des hochwasserdämpfenden Talsperreneffektes angenommen.

#### 4.10.4 Anpassung und Verfahren in Dresden

Das Ziel dieser Anpassung in Dresden ist die Erstellung der Unterlagen für eine homogenisierte Hochwasserstatistik anhand der Ergebnisse der tschechischen Talsperrenstudie. Gleichzeitig ist die Auswertung der Wirksamkeit der tschechischen Talsperren für die deutsche Elbe von Bedeutung. Für diese Untersuchung wird die angepasste Abflussganglinie „Update“ von Děčín benutzt. Um die hochwasserdämpfende Wirksamkeit der großen tschechischen Talsperren auch in Dresden auswerten zu können, wurden die angepassten und beobachteten Abflussganglinien von Děčín mittels des Flood-Routing-Modells (Translations-Diffusions-Modell) ohne Berücksichtigung der Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet nach Dresden geroutet. In Dresden wurde über die beiden von Děčín gerouteten Ganglinien eine Differenzganglinie für den gesamten Zeitraum von 1890 – 2003 ermittelt, unabhängig von den vorhandenen Talsperren, siehe Abbildung 4.22. Diese Differenzganglinie wurde

von der beobachteten Abflussganglinie Dresden abgezogen, um die neue, an den heutigen Zustand mit Talsperren angepasste Abflussganglinie zu erhalten. Die Ganglinie wird auch hier als „Update“ bezeichnet. Es muss beachtet werden, dass die maximalen Abflussscheitelwerte (HQ) in manchen Jahren für die beiden Pegel Děčín und Dresden nicht gleichzeitig vorkamen, in diesen Fällen gibt es jedoch einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Unterlagen für die Homogenisierung.

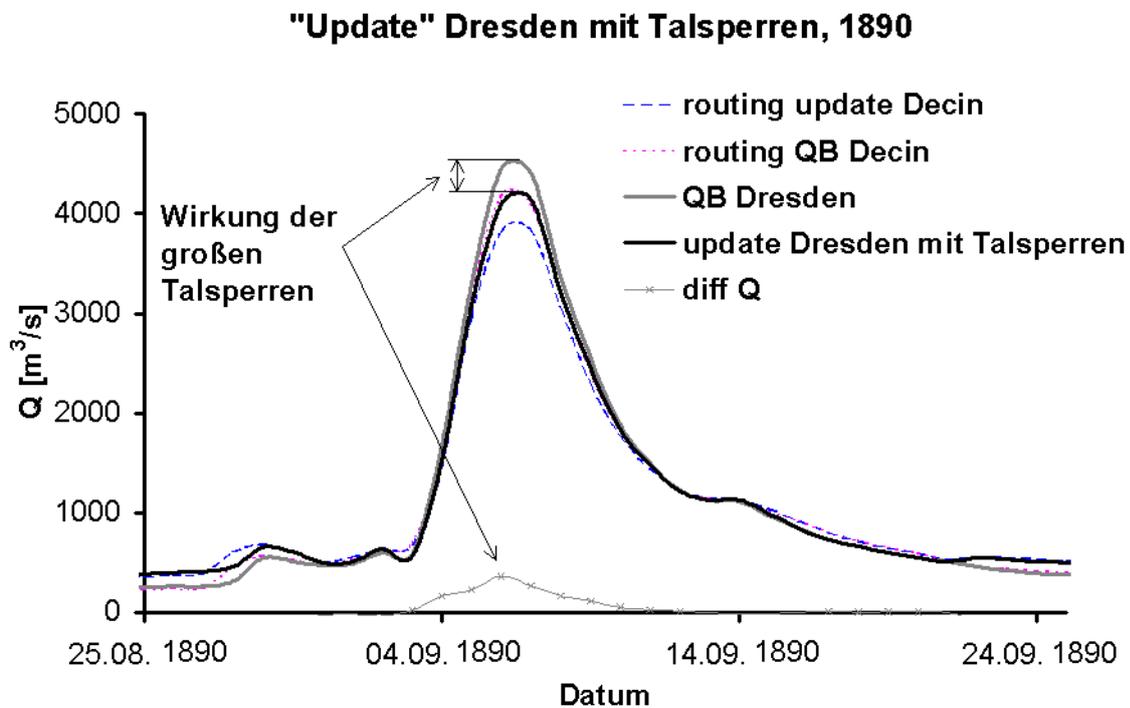


Abbildung 4.22: Anpassung der Hochwasserabflüsse „Update“ - Wirkung der großen Talsperren - in Dresden, Ereignis 1890.

#### 4.10.5 Schlussfolgerungen

Mit der Talsperrenstudie wurden wertvolle Informationen über die hochwasserdämpfenden Effekte der großen Talsperren in Tschechien ausgearbeitet, die weiter entlang der deutschen Elbe verwendet wurden. Es muss beachtet werden, dass die Simulationen einen bestimmten Fehler aufweisen. Die beobachteten und an den heutigen Zustand angepassten jährlichen Scheitelwerte stellen die Grundlage für eine homogenisierte Statistik in Dresden dar. Die Scheitelwerte der Beobachtung und „Update“ sind in Abbildung 4.23 gegeneinander dargestellt. Für eine bessere Vorstellung der Talsperrenwirkung ist in Abbildung 4.23 eine Trennlinie eingezeichnet, anhand jener die Kappungswirkung als Differenz zwischen der Trennlinie und den einzelnen Werten zu interpretieren ist. Beispielsweise ist in Abbildung 4.23 am Ereignis vom 1890 zu erkennen, dass eine Kappungswirkung von bis zu 360  $\text{m}^3/\text{s}$  hätte erreicht werden können, wären die Talsperren damals vorhanden gewesen.

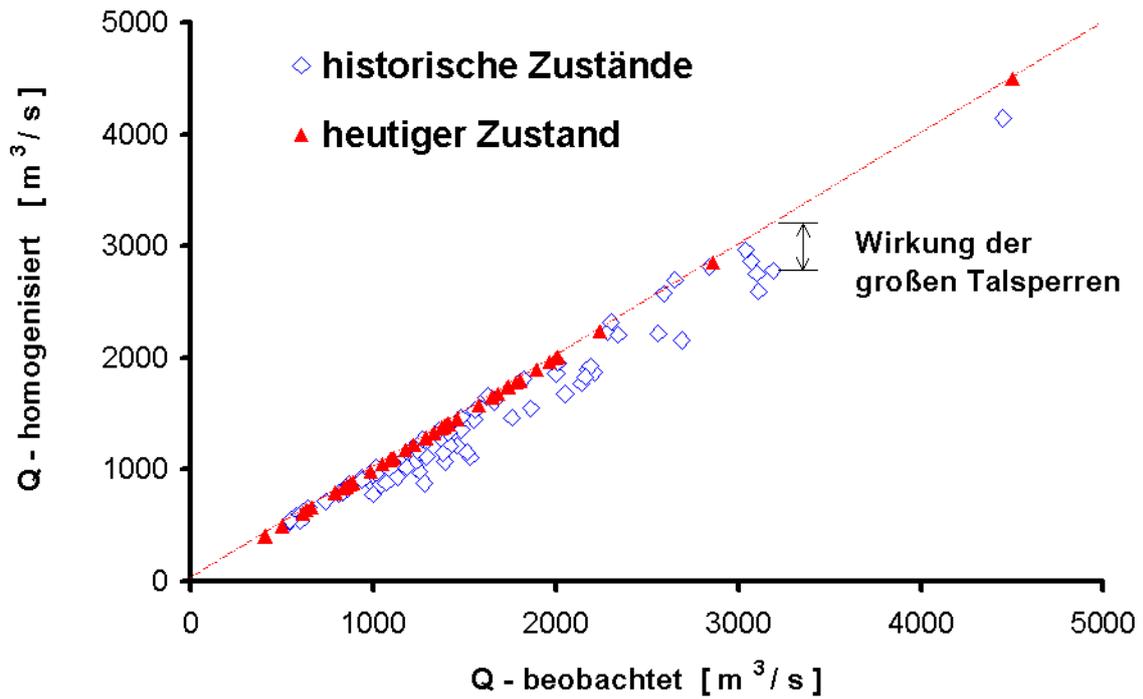


Abbildung 4.23: Grundlagen für eine homogenisierte Statistik in Dresden, homogenisierte und beobachtete maximale jährliche Abflussscheitelwerte (HQ), die mittels der Ergebnisse der tschechischen Talsperren abgeschätzt ermittelt wurden.

## 5 Untersuchung der Notpolder in Sachsen-Anhalt

Diese Dissertation hat mit der Untersuchung von Notpoldern als Reaktion auf das Extremereignis von 2002 angefangen. Die zahlreichen Deichbrüche in Sachsen und Sachsen-Anhalt sowie die Flutung der damals bestehenden Havelpolder, die zum ersten Mal gesteuert geflutet wurden, zeigten ihr hochwasserdämpfendes Potenzial als Eingriff in die Elbewelle, mit dem Ziel extreme Abflüsse zu vermindern. Dies war ein Anlass, dieser Idee im Rahmen der Polderstudie (Ihringer 2003), die ein Bestandteil dieser Arbeit ist, zu folgen. Im August 2002 kam es zu mehreren Deichbrüchen entlang der Elbe als Folge des extrem hohen Wasserstandes vor allem im Bereich zwischen Torgau und Dessau in Sachsen-Anhalt. Die Deiche brachen in den meisten Fällen kurz vor dem Scheiteleintreten oder während des Hochwasserscheitels. Dadurch wurden große Flächen mit Ortschaften ungesteuert (unkontrollierbar) überflutet und ein wesentlicher Anteil des Hochwasservolumens wurde damit auf diesen Flächen zurückgehalten. Dies hatte einen positiven Einfluss auf die Scheitelreduzierung der Elbe, die z.B. am Pegel Vockerode bis zu  $250 \text{ m}^3/\text{s}$  betrug, andererseits kam es zur geringen Wellenverzögerung und damit nicht zur Wellenüberlagerung mit anderen Zuflüssen während des Scheitels. Im Rahmen dieser Arbeit und der o.g. Polderstudie wurden ausgewählte steuerbare Rückhaltebecken – Notpolder – und besonders ihre hochwasserdämpfende Wirkung auf den Elbeunterlauf hydrologisch untersucht. Mit dieser Untersuchung der lokalen Maßnahmen wurde eine weitläufige Scheitelreduzierung entlang der Elbe bewiesen. Im Grunde genommen bedeuten die Notpolder einen Verlust von landwirtschaftlich genutztem Ackerland. Dafür müssen die Verluste und Kosten, wo Notpolder eingerichtet werden sollen, gegen den möglichen Schaden durch extreme Ereignisse in den unten gelegenen Städten wie z.B. Dessau, analysiert werden. Dies führt zu Diskussionen zwischen den von der Notpoldereinrichtung Betroffenen und den von extremen Hochwasserereignis gefährdeten Betroffenen, in gleicher Weise wie z.B. am Rhein (Poldermaßnahmen am Oberrhein in Baden-Württemberg, Elsass, Rheinland-Pfalz und Unterrhein bspw. Koblenz und Köln).

Die hier ausgearbeitete Notpolderuntersuchung besteht aus miteinander gekoppelten folgenden Aufgaben:

- Auswahl der möglichen Standorte
- Lokale Standortbetrachtung und Ermittlung der Speicherinhaltslinien und maximaler Einstauhöhe
- Die Modellanwendung zur hydrologischen Untersuchung
- Die Auswahl der Notpoldervarianten
- Die Modellanpassung auf das Ereignis 2002 mit und ohne Deichbrüche
- Notpolderwirksamkeit auf den Elbescheitel

### 5.1 Auswahl von den möglichen Notpolderflächen

Die potenziellen Notpolderstandorte wurden in Absprache mit den zuständigen Behörden und Kommunen ausgewählt. Die potenziellen Notpolderstandorte befinden sich meist in den im August 2002 überfluteten Bereichen, vor allem in dem Dreieck zwischen Elbe und Schwarzer Elster, in dem eine Fläche von bis zu  $214 \text{ km}^2$  (IKSE 2004) überflutet wurde, d.h. gleich am Anfang des Landes Sachsen-Anhalt im Landkreis Wittenberg, für das eine solche Maßnahme von Vorteil wäre. Weitere potenzielle Notpolderstandorte wurden bei Seegrehna im Landkreis Anhalt-Zerbst und bei Kliecken ausge-

wählt und untersucht. Eine Übersichtskarte der ausgewählten und weiter untersuchten möglichen Notpolderstandorte ist in Abbildung 5.1 wie auch Tabelle 5.1 dargestellt. Die lokalen flächenhaften Analysen der Notpolderstandorte erfolgten mit Hilfe von GIS auf Basis der digitalen räumlichen Informationen. Dafür wurden Topographische Karten herangezogen und ein Digitales Gelände Model DGM mit Hilfe von ArcView und ArcGIS erstellt. Maßgeblich für die maximalen Einstauhöhen sind die künftigen Deichhöhen, die nach Informationen des LHW um einen Meter erhöht dem Hochwasserstand von 2002 entsprechen.

Tabelle 5.1: Ausgewählte und analysierte potenzielle Polderstandorte in Sachsen-Anhalt

Bezeichnung der Standorte	Name der Standorte	Fläche [km <sup>2</sup> ]
P1-a / P1-b / P1-c	Prettin-Mauken (3 Varianten)	11.92 / 24.46 / 32.57
P2	Sachau-Priesitz	2.09
P3	Mauken-Kleindröben	8.23
P4-a / P4-b	Schützberg-Gorsdorf (2 Varianten)	25.09 / 22.46
P5	Seegrehna	5.63
P6	Rehsen-Schönitz	3.67
P7	Kliecken (2 Teilflächen West/Ost)	7.64 / 5.33

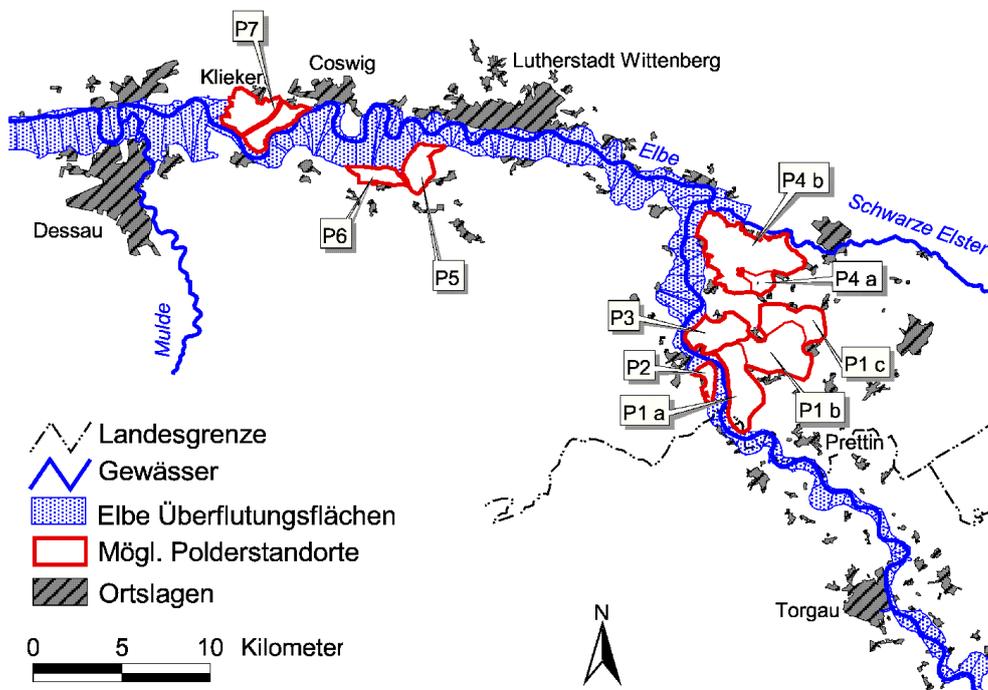


Abbildung 5.1: Die Übersichtskarte der ausgewählten potenziellen Standortvarianten (insgesamt 7 Notpolderflächen) in Sachsen-Anhalt und der im August 2002 überfluteten Flächen (Ihringer 2003)

## 5.2 Lokale Standortbetrachtung und Ermittlung der Speicherinhaltslinien

Insgesamt wurden 7 mögliche Notpolderstandorte (siehe Tabelle 5.1) unter der Voraussetzung der Einhaltung der wichtigen lokalen Kriterien und Bedürfnisse der Kommunen ausgewählt und näher analysiert. Dafür wurde ein DGM mit räumlicher Auflösung 10 x 10 m erstellt, in welchem die Notpolderflächen anhand der verfügbaren topographischen Karten abgegrenzt wurden. Die Grenzen der potenziellen Notpolder nutzen zum Teil die bereits bestehenden Deiche und Straßen sowie Hochgestade. Es musste berücksichtigt werden, dass kein Ort bei einem Extremfall (Notpolderflutung) ohne Zufahrtstraße abgetrennt (isoliert) sein darf. An einigen Stellen sind die Notpolder mit dem natürlichen höheren Gelände abgegrenzt. Die Geländebedingungen neben den Ortschaften sind maßgebend für die Notpolderausdehnung. Idealerweise ist es von Vorteil, dass die Fläche der möglichen Zulaufstelle (Einlaufbereich) geneigt ist, damit der vollkommene Überfall sichergestellt werden kann, d.h. damit der Zufluss in den Notpolder nicht gleich nach der Öffnung durch das zurückgehaltene Wasser und dem höheren Wasserstand im Notpolder beeinflusst wird. Dieses würde zur Kapazitätsbeschränkung des Einlassbauwerkes führen und aus dem Grund soll der Einlaufbereich im oberen Bereich des Notpolders eingerichtet werden. Die Entwässerung erfolgt durch die bereits vorhandenen Rinnenstrukturen.

Die Notpolder P1 Prettin-Mauken, P3 Mauken-Kleindröben und P4 Schützberg-Gorsdorf wurden rechts der Elbe zwischen der Landesgrenze und der Schwarzen Elster, wo diese Fläche im August 2002 durch den Deichbruch überflutet wurde, untersucht. Die Fläche der ersten zwei Notpolder P1 mit allen Varianten und P3 ist günstig geneigt, während die Geländebedingungen des Notpolders P4 mit beiden Varianten sehr flach sind, was die Füllung bzw. Entleerung und damit die ganze optimale Funktionsfähigkeit des Notpolders beschränken könnte. Der Einlaufbereich des Notpolders P1 ist an der obersten Stelle etwa am Elbe-km 176 vorgeschlagen. Die Notpolder P1 einschließlich aller Varianten und P3 sind voneinander mit einem Deich getrennt, wobei die Füllung des Notpolders P3 vom Notpolder P1 hier mit einem Bauwerk ermöglicht wird, d.h. die Notpolder P1 und P3 werden hydraulisch verbunden. Eine direkte Füllung des Notpolders P3 soll durch den Einlaufbereich unterhalb von Mauken sichergestellt werden. Die Notpolder P1 und P3 stellen je nach der aktuellen Füllung und Situation ein verbundenes System dar. Der Wasserspiegelunterschied bei der maximalen Notpolderfüllung beträgt 1,7 m, da die Notpolder nicht die gleiche Deichhöhe haben und das Gelände mit der Elbe geneigt ist. Für die Entwässerung sind die bestehenden Rinnen (Klödener Riß, Kleindröbener Riß, Landlache) vorgesehen.

Der große Notpolder P4 Schützberg-Gorsdorf wurde zwischen Klöden und Schützberg an der Elbe und Grosdorf an der Schwarzen Elster in zwei Ausdehnungsvarianten untersucht. Auch dieses Gebiet wurde im August 2002 durch mehrere Deichbrüche überflutet. Der Einlaufbereich ist zwischen Klöden und Schützberg vorgesehen, die Entwässerung des gespeicherten Wasservolumens kann in der Schwarzen Elster abgeführt werden. Diese Notpolderfläche könnte wegen des flachen Geländes und wegen des baldigen Rückstaus des Einlaufsbereichs nur langsam geflutet werden, daher wird sie von den zuständigen Behörden nicht bevorzugt.

Der kleinste Notpolder P2 Sachau-Priesitz links der Elbe hat kaum eine hochwasserdämpfende Wirksamkeit, daher hat nur eine vernachlässigbare Wirkung bei der Scheitelkappung.

Die Notpolderstandorte P5 Seegrehna und P6 Rehsen-Schönitz wurden unterhalb von Wittenberg links der Elbe auf dem im 2002 überfluteten Gebiet untersucht. Teilweise könnten die bestehenden Deiche bei der Abgrenzung benutzt werden. Der Einlaufbereich von P5 wird etwa 800 m entfernt vom Hauptstrom vorgeschlagen und bei P6 wird es etwa 2 km entfernt vorgesehen. Die letzte untersuchte mögliche Notpolderfläche P7 Klieken befindet sich unterhalb von Coswig rechts der Elbe. Dieser Notpolder nutzt teilweise die bestehenden Deiche und natürlichen Hochgestade und es ist durch die Autobahn A9 in zwei hydraulisch miteinander verbundenen Flächen getrennt. Der Vorteil von diesem Notpolder ist, dass die Einlaufbereiche unmittelbar nah an dem Elbeschlauch eingerichtet werden können, was eine schnelle Füllung gewährleisten könnte.

Von jedem Notpolder wurden die wichtigsten Kennwerte – die Speicherinhaltslinien, d.h. Volumen über die abgegrenzte Fläche in Abhängigkeit von der Einstauhöhe – ermittelt, siehe Abbildungen 5.2 bis 5.9. Daneben wurden Wasserstände (Einstauhöhen) bestimmt, die den Höhen des maximalen Hochwasserstandes vom 2002 am Einlaufbereich sowie der geplanten Deichhöhen im unteren Notpolderbereich (der maximale Einstau) entsprechen. Dies wurde anhand des digitalen Geländemodells durchgeführt. Dabei wurden die Lagen der künftigen Einlaufbereiche, die möglichst höher liegen sollen, ausgesucht. Die im Jahr 2001 aktuellen Deichhöhen wurden dem Bericht (Macke 2001) entnommen und die künftigen Deichhöhen nach ihrer Sanierung oder Ausbau wurden nach Absprache mit den zuständigen Behörden (LHW) ermittelt. Damit wurde die Volumenkapazität aller Notpolder für jeweilige Wasserstände (Einstauhöhen), die für das Zurückhalten des Ereignisvolumens während des Scheitels erforderlich sind, festgestellt.

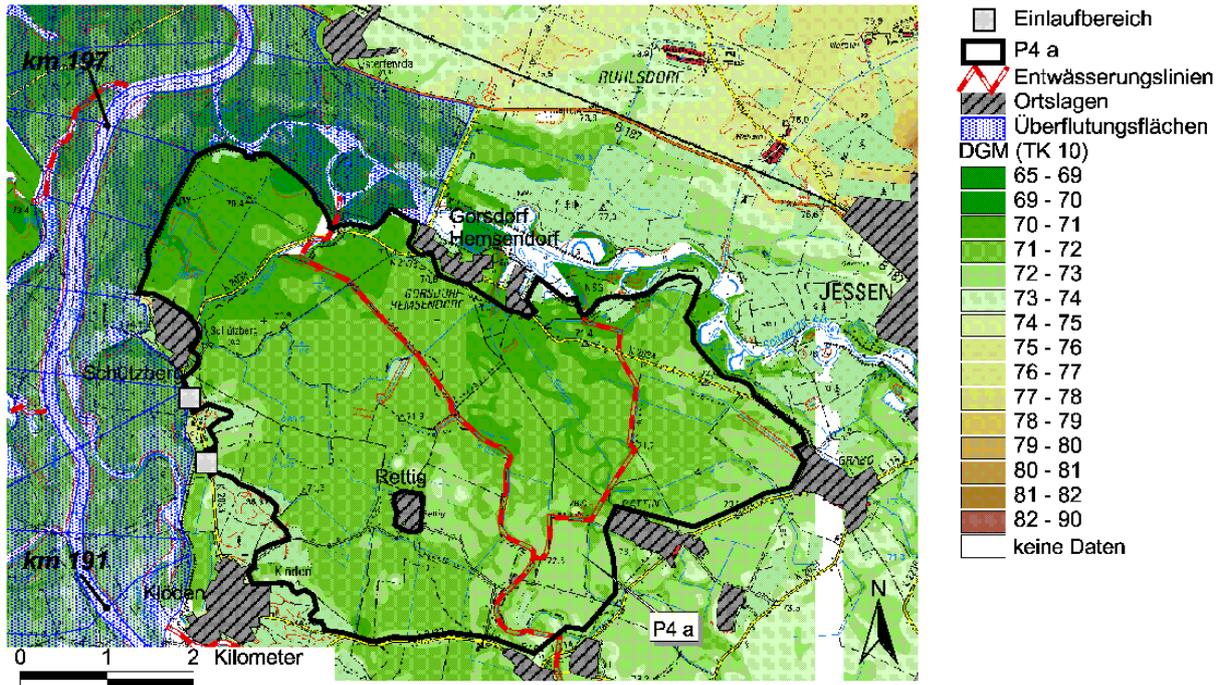


Abbildung 5.2: Die detaillierte Karte des Notpolders Schützberg-Gorsdorf, Variante P4 a mit dem Ringdeich um Rettig herum, im Bereich der Mündung der Schwarzen Elster

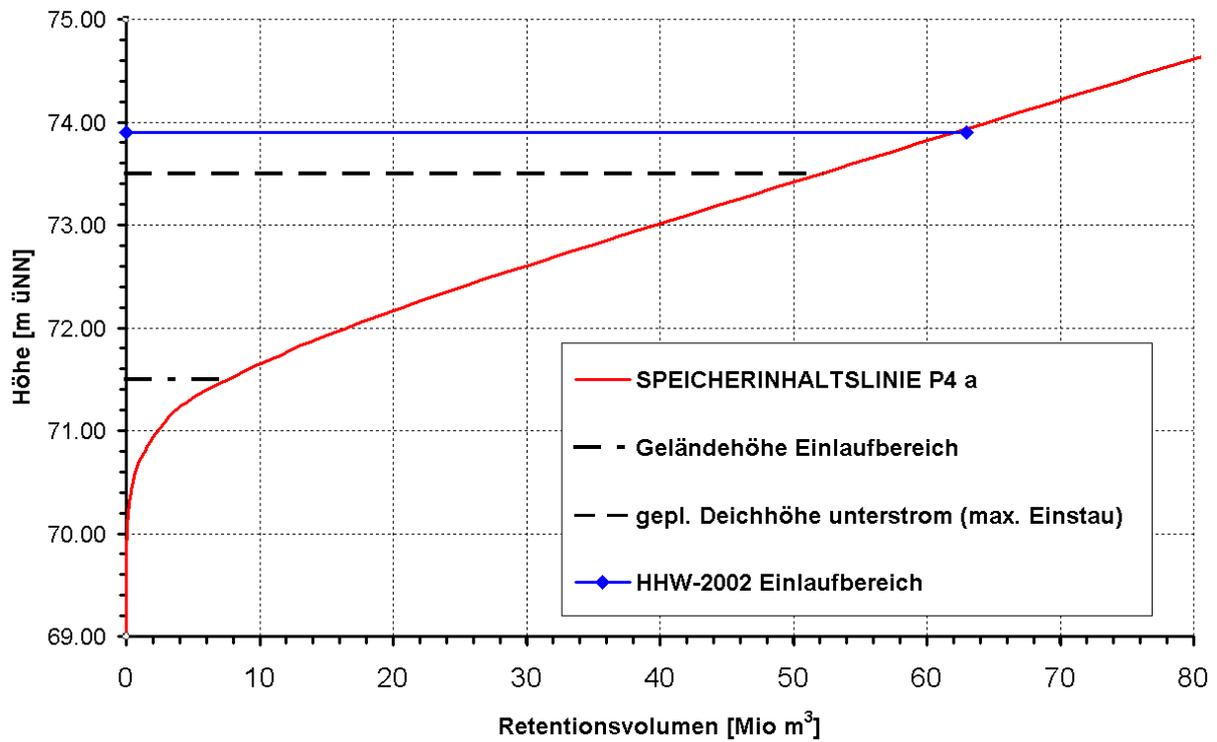


Abbildung 5.3: Die Speicherinhaltslinie des Notpolders P4 a Schützberg-Gorsdorf

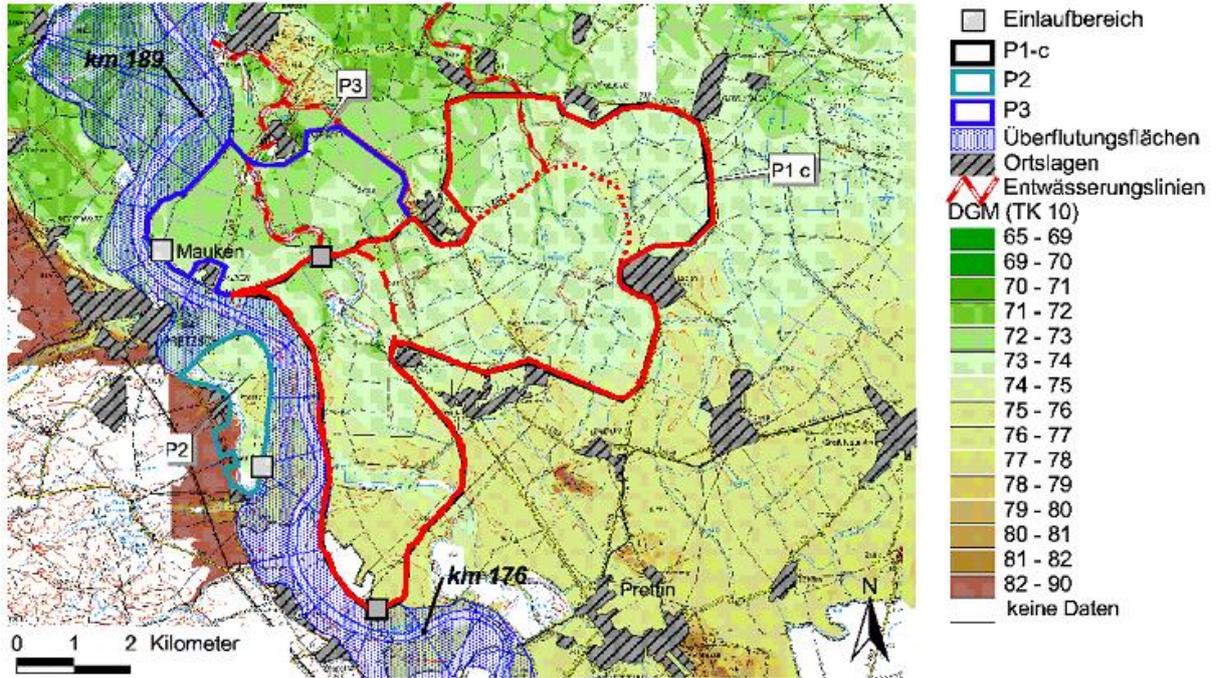


Abbildung 5.4: Die detaillierte Karte der Notpolder im Bereich Prettin – Mauken zwischen Elbe-km 176 und 189; P1 Prettin-Mauken mit drei Ausdehnungsvarianten, Notpolder P2 Sachau-Priesitz und der Notpolder P3 Mauken-Kleindröben im DGM dargestellt (Ihringer et al).

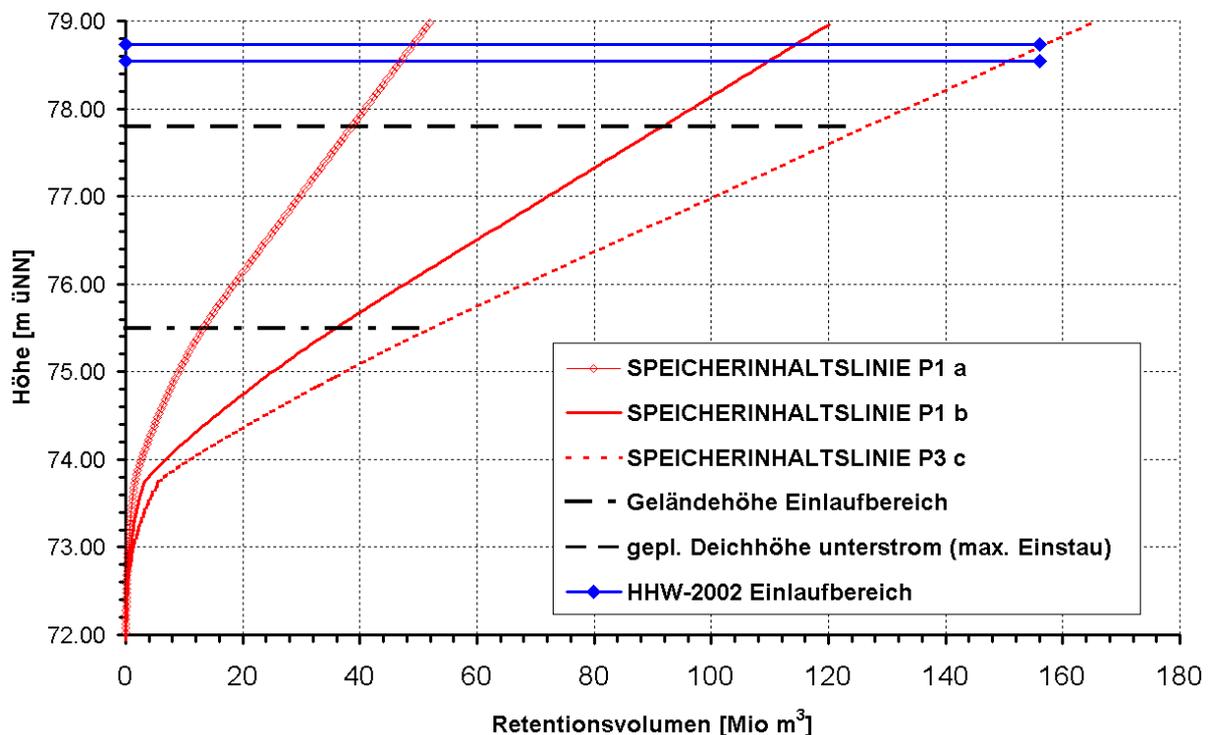


Abbildung 5.5: Die Speicherinhaltslinien – Volumen in Abhängigkeit von der Einstauhöhe im Notpolder - der Notpoldervarianten P1 Prettin-Mauken als die wichtigsten Charakteristika und Randbedingungen für die Polderuntersuchung. In der Graphik sind ebenfalls die jeweiligen Höhen, die die Speicherkapazität des Notpolders bestimmen, dargestellt.

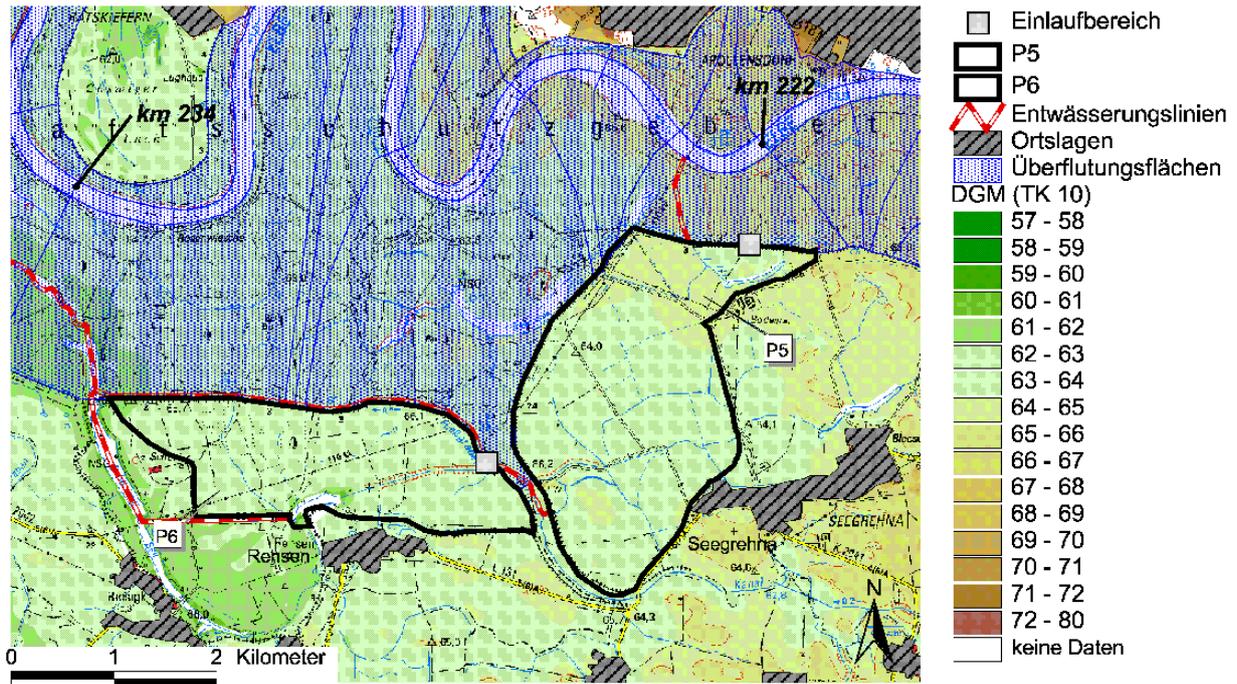


Abbildung 5.6: Die detaillierte Karte der zwei Notpolder P5 Seegrehna und P6 Rehsen-Schönitz, die nicht hydraulisch verbunden sind.

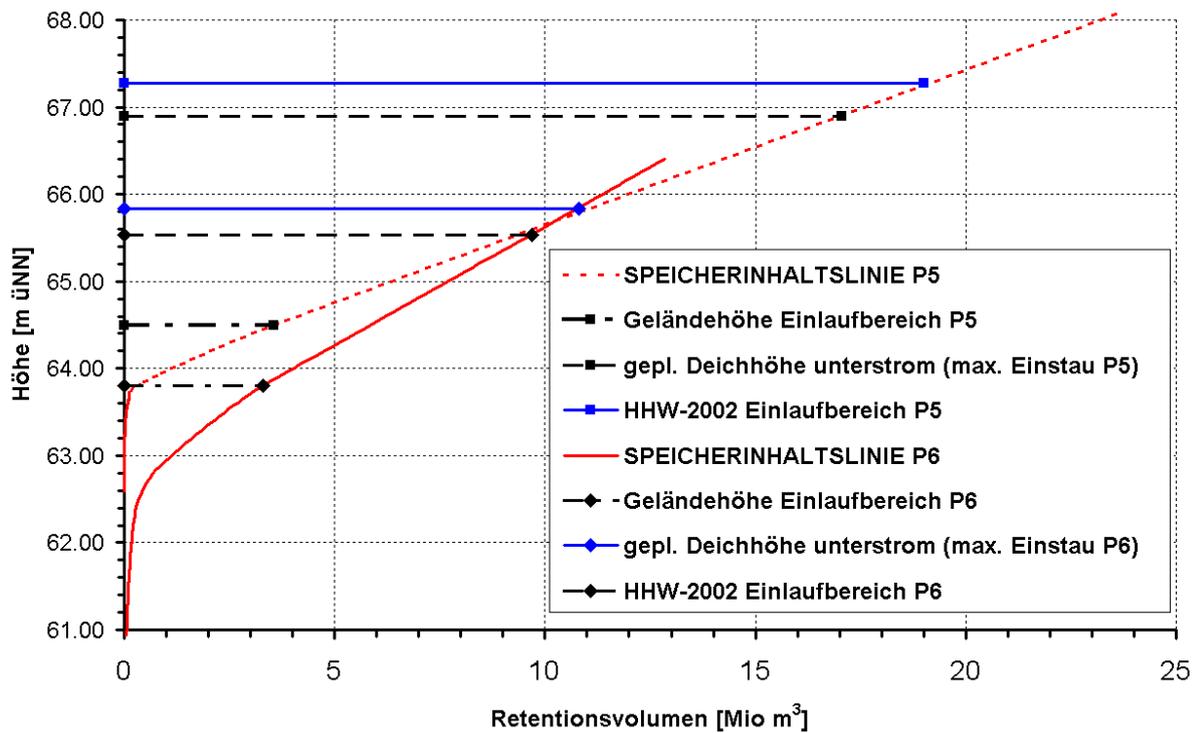


Abbildung 5.7: Die Speicherinhaltslinien der Notpolder P5 Seegrehna und P6 Rehsen-Schönitz

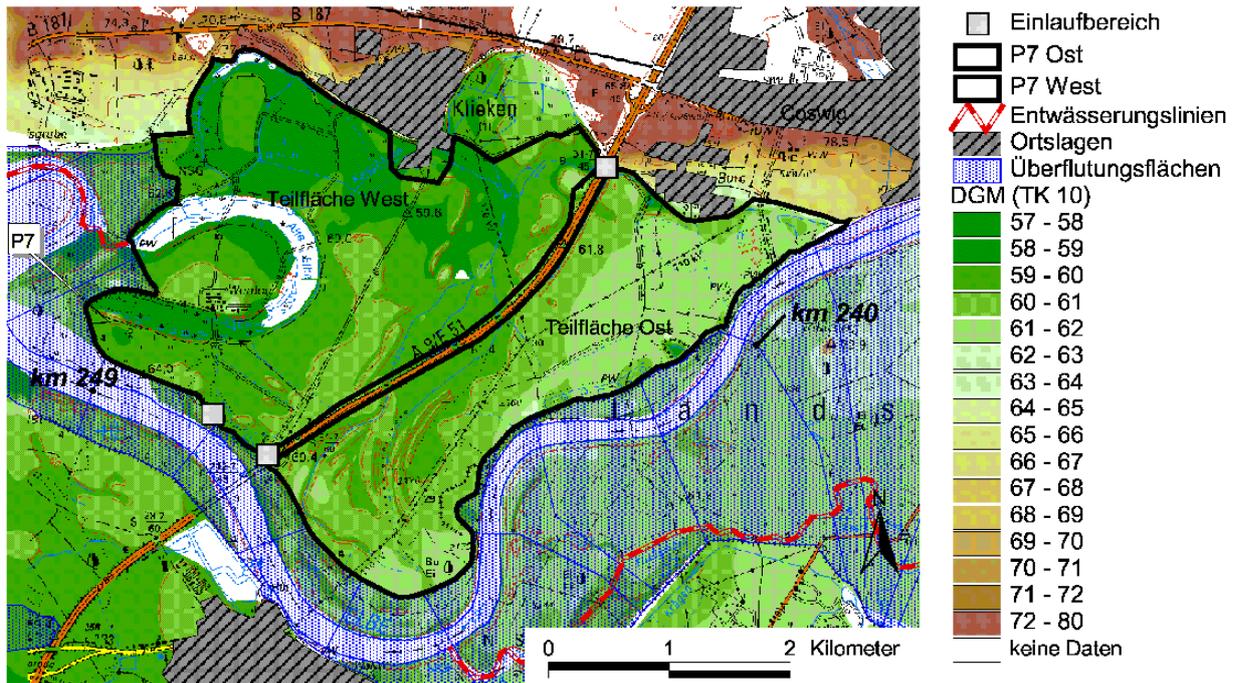


Abbildung 5.8: Die detaillierte Karte des Notpolders P7 Kliecken bei Coswig, es handelt sich um hydraulisch verbunden zwei Notpolder, die mit der Autobahn A9 getrennt sind.

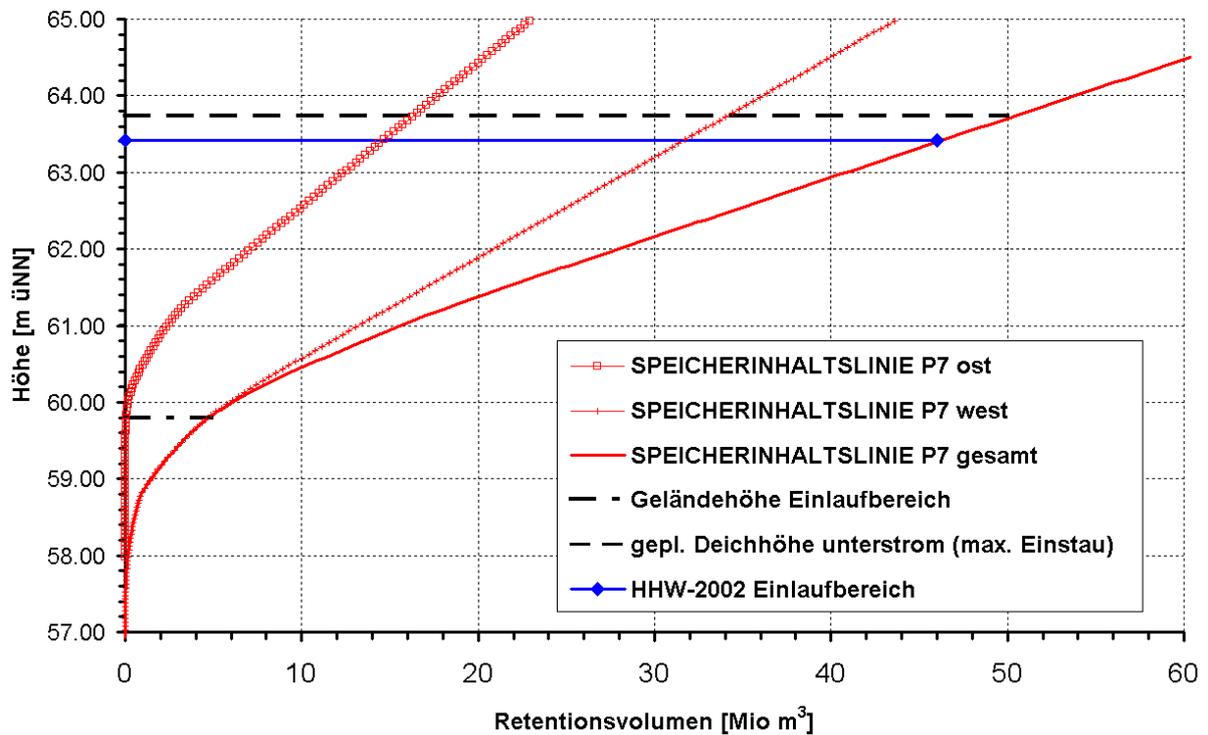


Abbildung 5.9: Die Speicherinhaltslinie der Notpolderteilflächen Ost und West und des gesamten hydraulisch verbundenen Notpolders P7 Kliecken.

### 5.3 Die Auswahl der Varianten der Notpolder

Nach den detaillierten Standortanalysen, die mit der Beschreibung der lokalen Bedingungen sowie der Ermittlung der möglichen Notpolderflächen und Einstauhöhen sowie dem Rückhalt verbunden ist, wurden in Absprache mit den zuständigen Behörden und Kommunen die möglichen Varianten der Notpolder ausgewählt und ferner mit dem o.g. hydrologischen Modell rechnerisch untersucht, d.h. zuerst wurde das Ereignis vom August 2002 mit den steuerbaren Retentionsmaßnahmen solcher ausgewählter Notpolder im Hinblick auf die gezielte Scheitelkappung kombiniert.

Hier wurden insgesamt 4 Notpoldervarianten (V1-V4) und eine Nullvariante V0, d.h. ohne Notpoldermaßnahmen (IST-Zustand), untersucht. Bei den Varianten V1-V4 wird Wirksamkeit von den minimalen bis zu den maximalen Notpolderfüllen (55 – 216 Millionen m<sup>3</sup>) mit dem Ereignis vom 2002 sowie den simulierten Szenarienergebnissen, die in Kapitel 6 beschrieben sind, überprüft. Grundsätzlich gilt der Notpolderstandort P1 Prettin-Mauken einschließlich aller Ausdehnungsvarianten mit seiner Lage und Größe als Vorzugsstandort. Dieser Notpolder verfügt über ausreichendes Volumen für den Rückhalt und hat vorteilhafte Geländebedingungen für die Füllung. Ebenfalls werden die Notpolder P3 und P7 zusammen mit dem Notpolder P1 bei allen überprüften Varianten miteinbezogen. Die Kombinationen der überprüften Notpoldervarianten erläutert die folgende Tabelle 5.2, wo die den Einstauhöhen entsprechenden Füllen angegeben sind.

Tabelle 5.2: Übersicht der in der hydrologischen Untersuchung angewendeten Notpoldervarianten V1-V4 mit den Angaben der Einstauhöhen und dementsprechenden Füllen

Modellvariante	Maßnahmenkombination							Summe [Mio. m <sup>3</sup> ]
	Standort-/Füllvariante							
<b>V1</b>	<b>P1-a</b>		<b>P3</b>				<b>P7</b>	55.0
Einstau [m ü NN]	77.5		74.0				60.5	
Volumen [Mio. m <sup>3</sup> ]	35.0		10.0				10.0	
<b>V2</b>	<b>P1-a</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4-b</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	98.0
Einstau [m ü NN]	77.5	76.6	74.0	72.2	66.0	64.5	60.5	
Volumen [Mio. m <sup>3</sup> ]	35.0	5.0	10.0	20.0	12.0	6.0	10.0	
<b>V3</b>	<b>P1-b</b>		<b>P3</b>				<b>P7</b>	138.0
Einstau [m ü NN]	<b>77.5</b>		<b>75.3</b>				<b>62.4</b>	
Volumen [Mio. m <sup>3</sup> ]	<b>85.0</b>		<b>20.0</b>				<b>33.0</b>	
<b>V4</b>	<b>P1-c</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4-a</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	216.0
Einstau [m ü NN]	77.0	76.6	75.3	72.9	66.4	64.8	62.4	
Volumen [Mio. m <sup>3</sup> ]	100.0	5.0	20.0	37.0	14.0	7.0	33.0	

### 5.4 Angewandtes Model zur Untersuchung der Retentionsmaßnahmen

Für die Simulation des Wellenablaufs wurde das im Kapitel 3 beschriebene Programmsystem „FGM“ angewendet, dessen Komponente auf der Translations-Diffusions-Analogie beruht und welches mit dem Speicherinhaltsansatz gekoppelt ist. Mit diesem Programmsystem wurde ein rechnerisches Knotenschema des Elbelaufs von der tschechisch-deutschen Grenze bis nach Neu Darchau erstellt, um

einen Flood-Routing-Prozess (Wellenverformung) der Hochwasserereignisse simulieren zu können, siehe Abbildung 5.10. Mit diesem Tool lassen sich unter anderem die natürlichen Retentionen (Ausuferungen) sowie künstlich steuerbare Rückhalte koppeln. Die Knoten können z.B. die Eingabe der beobachteten Abflussganglinien, der Zuflüsse, der vorgesehenen Einlaufbereiche der Notpolderstandorte darstellen, und es lässt sich auch zum beliebigen Knoten eine simulierte (vorhergesagte) Abflussganglinie anhand des hydrologischen Flood-Routing-Ansatzes ermitteln.

## 5.5 Notpolderwirksamkeit und die untersuchten Ereignisse

Nach der Erklärung der Funktionsfähigkeit der steuerbaren Retentionsmaßnahmen (z. B. Notpolder) und der Standortbeschreibung, sowie der Modellanpassung auf das Hochwasserereignis vom August 2002 wurde die Notpolderwirksamkeit d.h. die optimale (ideale) Scheitelkappung der extremen Ereignisse untersucht, um das Risikopotenzial der unten gelegenen Betroffenen zu verringern. Die ausgewählten Notpolderstandorte und ihre Charakteristika (Speichervolumen) wurden zusammen mit den extremen Hochwasserereignissen und –szenarien mit Hilfe des hydrologischen Programmsystems „FGM“ simuliert. Im Grunde wird ein Volumen während des Scheitelerntreffens in den Notpoldern mit gegebenem Speicher zurückgehalten. Wenn dieses Volumen mit der Zeit bzw. Füllungsdauer dividiert wird, erhält man einen mittleren Zufluss, was für die extremen Abflüsse der Elbe eine mittlere Entnahme bzw. Abflussreduzierung bedeutet.

Bei der hydrologischen Simulation der Notpolderwirksamkeit wird ein Schwellenwert für den restlichen Abfluss der Elbe unterhalb solcher Maßnahmen eingeführt, der nicht überschritten werden darf. Es wird angenommen, dass die Differenz zwischen dem höheren Abfluss oberhalb der Maßnahmen und dem Schwellenabfluss in den Notpoldern gespeichert wird. Nach dem Ablauf werden die Notpolder entleert. Daraus ergibt sich die wichtige Frage des maximalen Zuflusses für die Bemessung des künftigen Öffnungsbauwerkes (Einlassbauwerk) eines Notpolders. Die andere genauso wichtige Frage ist die Entwicklung der Steuerungsstrategie im Hinblick auf die effektive und optimale Notpolderfüllung, weil es sich hier um ein System von einigen Notpoldern handelt. Mit der hydrologischen Modellierung der Notpolderwirksamkeit wurden die Randbedingungen für unvermeidbare hydraulische Untersuchungen des Füllungsprozesses insbesondere im Hinblick auf die Bemessungen der technischen Einrichtungen gesucht.

Zuerst wird hier die optimale Notpolderwirksamkeit für das Hochwasserereignis 2002 vorgestellt. Das Berechnungsschema der deutschen Elbe ist von einem Knotenmodell, das bereits im Rahmen des Projekts „Morphodynamik der Elbe“ (Nestmann 2002) angewendet wurde, gebildet, es musste zu diesem Zweck geringfügig ergänzt werden mit wenigen Knoten, die die Einlaufbereiche der Notpolder oder die Deichbruchstellen im Modell darstellen. So wurde die Abflussganglinie vom Pegel Torgau mit den angepassten Parametern bis an die Knoten der möglichen Notpolderstandorte (Prettin-Mauken, Sachau-Preisitz, Mauken-Kleindröben, Schützberg-Gorsdorf ) geroutet, um dort den Speicherprozess bzw. die Abflussentnahme simulieren zu können. Auf diese Weise wurde die simulierte bereits reduzierte Abflussganglinie weiter über den Mündungsbereich der Schwarzen Elster zum Pegel Wittenberg geroutet. Hier ist der optimale Effekt der oberen Notpolder (P1 bis P4) erkennbar. Von hier wird die simulierte Abflussganglinie über die Knoten der Notpolder Seegrehna und Pratau weiter zu den Knoten Vockerode, Notpolder Klieken, Dessau und Aken geroutet. Der Ausschnitt aus dem Knotenmodell ist auf der Abbildung 5.10 dargestellt. Die Simulation des Rückhalts in den Not-

poldern kann beliebig aus- oder eingeschaltet werden, sodass verschiedene Varianten (V0 bis V4) und Szenarien ohne großen Aufwand untersucht werden können. Das verheerende extreme Hochwasserereignis von 2002 war Anlass zur Untersuchung der steuerbaren Notpolder. Dafür wurde die Notpolderwirksamkeit aller Varianten V0-V4 zuerst mit diesem relativ gut erfassten Hochwasserereignis untersucht und mit diesem Ereignis exemplarisch gezeigt. Logischerweise ist die Wirksamkeit von der Größe der Variante abhängig, siehe Tabelle 5.3, und die simulierten Abflussganglinien auf der Abbildung 5.11. Die Ergebnissganglinien sind im Stundenschritt dargestellt.

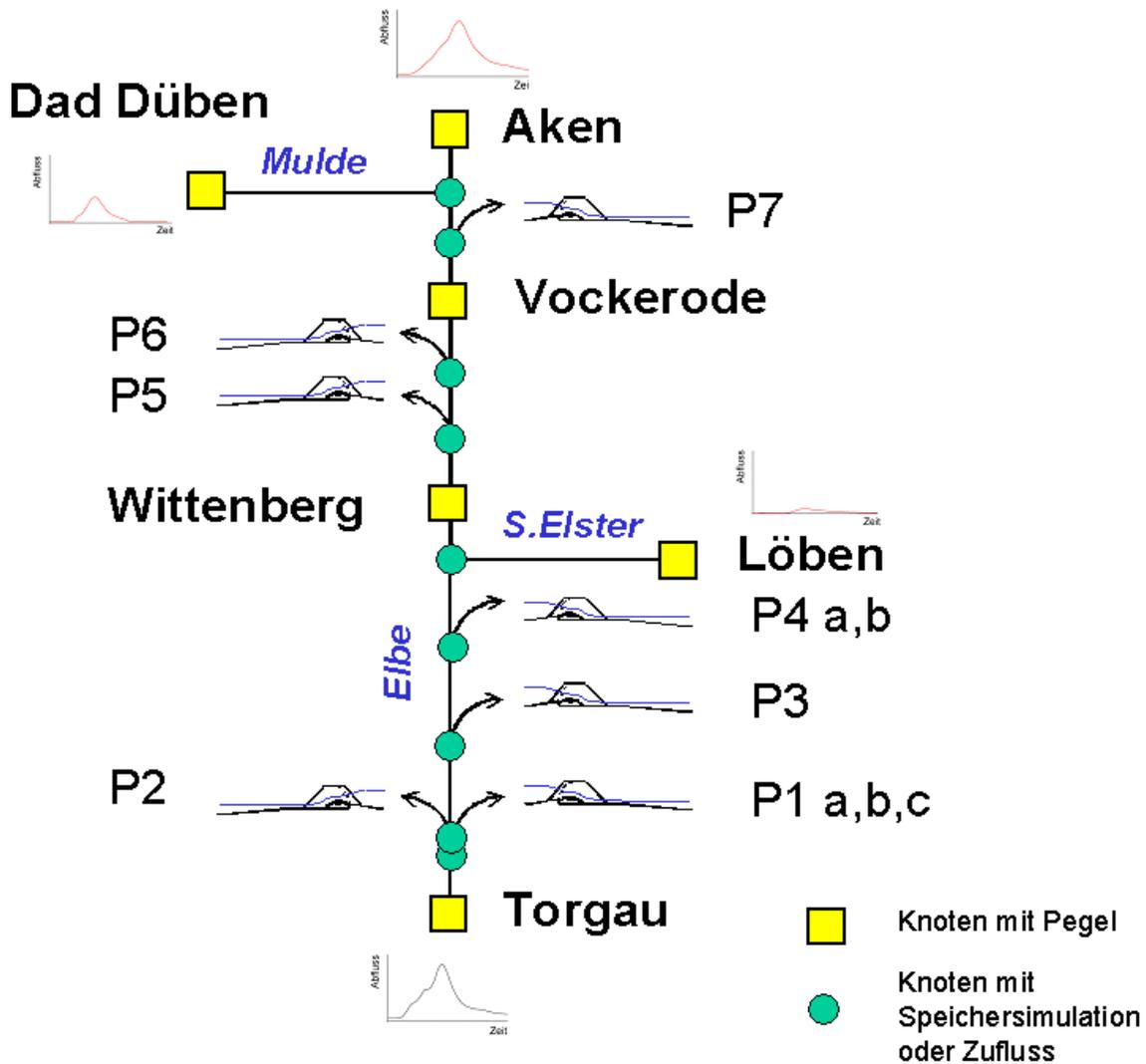


Abbildung 5.10: Ausschnitt aus dem Knotenmodell der deutschen Elbe, das mit dem Programmsystem FGM erstellt wurde. In diesem Fall beginnt die Simulation mit dem Einlesen der Abflussganglinie am Pegel Torgau (unten) und an den weiteren Knoten werden die Speichersimulationen je nach Variante berechnet. Ebenfalls sind die Zuflüsse der Schwarzen Elster und Mulde berücksichtigt.

Tabelle 5.3: Übersicht der Wirksamkeit der Notpolder auf die Scheitelwertkappung einzelner Varianten V1 – V4 gegenüber nicht vorhandener Maßnahmen (V0), jedoch ohne Deichbrüche beim Ereignis vom 2002. Die Werte sind in Stunden angegeben.

Abfluss	Scheitelwert HQ [m <sup>3</sup> /s]					Differenz HQ zu V0 [m <sup>3</sup> /s]			
	V0	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4
Wittenberg	4346	3958	3926	3622	3358	388	420	723	988
Vockerode	4338	3956	3811	3622	3288	382	527	716	1051
Aken	4787	4355	4254	3946	3671	432	533	841	1116

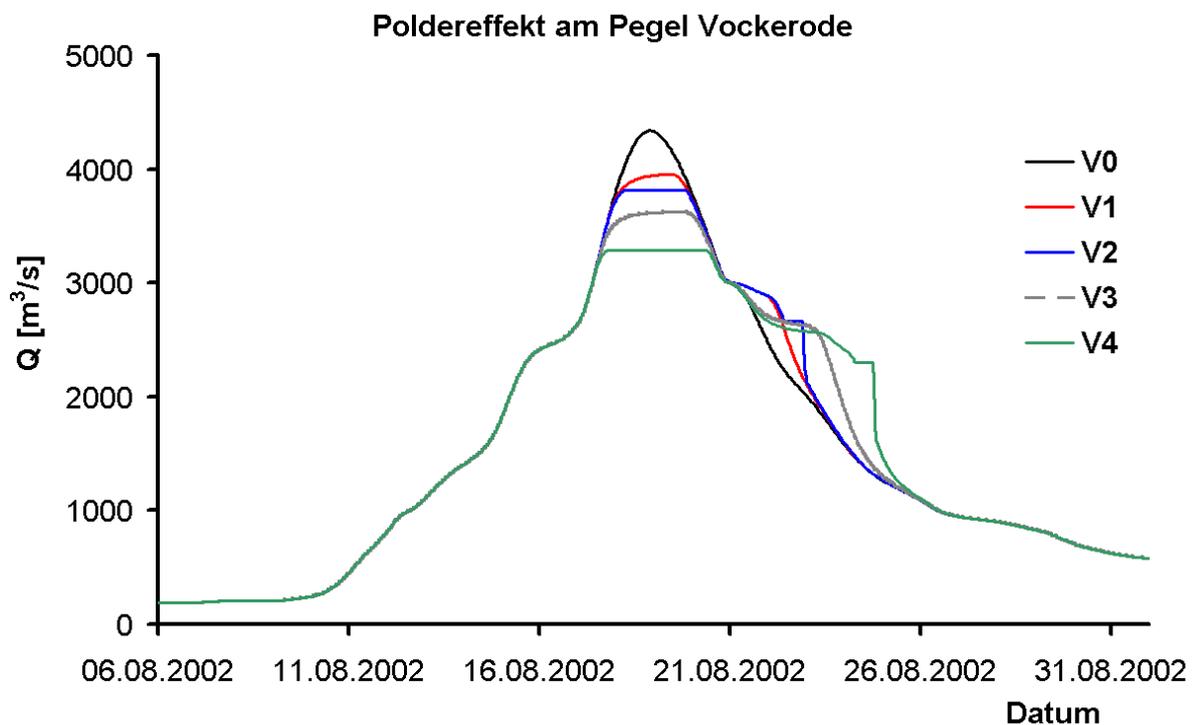


Abbildung 5.11: Die mit den Notpoldern simulierten Abflussganglinien des Ereignisses von 2002 am Pegel Vockerode für alle Varianten. Hier und in der Tabelle 5.3 ist die optimale dämpfende Wirkung der Retentionsmaßnahmen auf den Wellenverlauf, die zwischen 382 und 1051 m<sup>3</sup>/s variiert, zu erkennen.

Der Verlauf der Scheitelwerte eines Ereignisses oder einer Simulation entlang der Elbe lässt sich visuell im hydrologischen Längsschnitt darstellen, um die maximalen Abflusswerte (Scheitelwert) an der beliebigen Stelle bzw. dem Knoten erkennen zu können. In diesem Fall wurde das rekonstruierte Hochwasserereignis vom August 2002, d.h. ohne Deichbrüche, zusammen mit der Wirksamkeit aller Notpoldervarianten auf den Verlauf der Scheitelwerte im Längsschnitt dargestellt. Die Graphik wurde mit dem Programmsystem FGM konstruiert, sowie die entsprechenden Werte an den Knoten und Pegelstellen wurden ebenfalls mit FMG erstellt, mit dem auch die Analysen des Flood-Routings-Verfahrens und der Speichersimulation berechnet wurden.

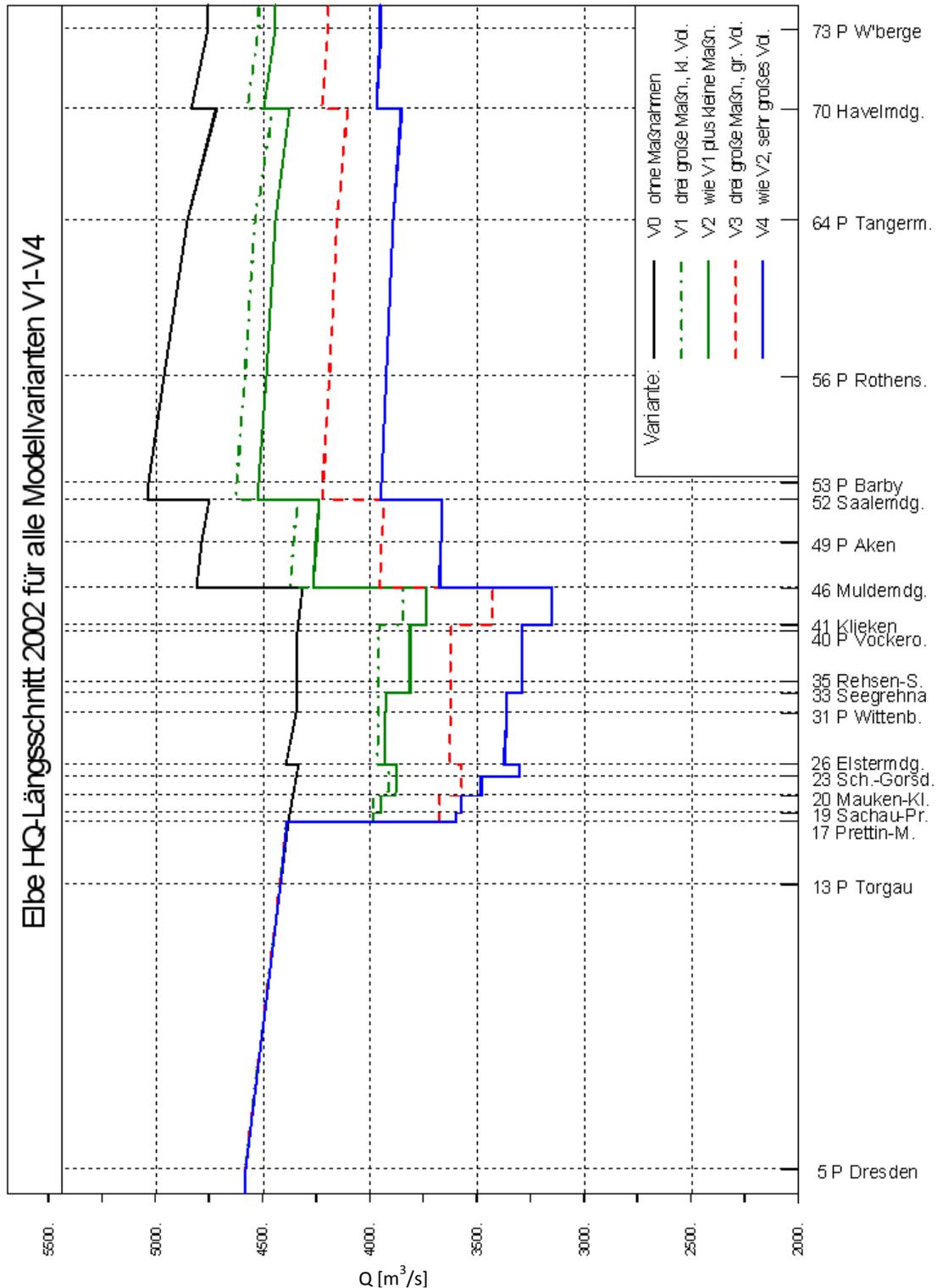


Abbildung 5.12: Längsschnitt der Scheitelwerte zwischen Dresden und Wittenberge mit der Polderwirkung und allen Notpoldervarianten (V0- V1). Die Simulation bezieht sich auf das Hochwasserereignis vom August 2002 jedoch ohne Deichbrüche. Die Zuflüsse der Schwarzen Elster, der Mulde und der Saale sind hier dargestellt. Die Simulation wurde mit dem Programmsystem FGM im Rahmen der Notpolderstudie durchgeführt (Ihringer 2003).

So ist aus der Abbildung 5.12 die weitgehende Kappungswirkung der Notpoldervarianten unter Voraussetzung einer verlässlichen Funktionsfähigkeit des Systems dargestellt. Die Sprünge nach unten

stellen die Abflussentnahme mittels der steuerbaren Notpoldermaßnahmen dar, und die Sprünge nach oben stellen die Nebenzuflüsse der Schwarzen Elster, der Mulde und der Saale dar.

## 5.6 Die Schlussfolgerungen zur optimalen Wirksamkeit der Notpolder

Die Ergebnisse der Grundsatzstudie sind in dem folgenden Satz zusammengefasst. Durch die Untersuchung der Notpolder (Ihringer 2003) wurde nachgewiesen, dass eine Hochwasserscheitelkappung von 20 bis 50 cm unter der Voraussetzung einer optimalen ereignisspezifischen Steuerung, einer verlässlichen Abflussvorhersage und in Abhängigkeit der Variante möglich wäre. Die Wirkung der Scheitelkappung ist nicht nur lokal, sondern weitläufig entlang mehrerer zehn Kilometer. Es ist wichtig zu erwähnen, dass es sich um eine ideale Scheitelkappung durch die volle Nutzung der steuerbaren Rückhalteräume handelt. Aus den Ergebnissen der Studie ergeben sich weitere Fragen, die teilweise im Rahmen dieser Arbeit angegangen oder gelöst wurden. Die in Tabelle 5.3 und in Abbildung 5.11 gezeigten Ergebnisse der hochwasserdämpfenden Wirkung gelten für das Ereignis von 2002. Das Problem ist, dass ein nächstes extremes Hochwasserereignis wieder anders verlaufen wird und auch seine Form und Auswirkung anders aussehen werden, aus welchem Grund keine allgemeingültige Aussage anhand dieser Ergebnisse getroffen werden kann. So müssen andere extreme Ereignisse mit den untersuchten Notpoldern geprüft werden. Dafür müssen extreme Ereignisse aus den historischen Beobachtungen herangezogen werden oder müssen von den physikalisch begründeten Randbedingungen simuliert werden. Sie werden als Szenarien bezeichnet. Die Herkunft der Szenarien ist wie folgt:

- historische und gegenwärtige Ereignisse, siehe Kapitel 6.1
- die im Rahmen des RIMAX-Projektes modellierten Szenarien, siehe Kapitel 6.2
- die in der Grundsatzstudie nach dem Treiber-Modell simulierten Szenarien, siehe Kapitel 6.4

Die simulierten Szenarien sowie die herangezogenen historischen Ereignisse stellen eine große Vielfalt der möglichen Hochwassereigenschaften dar, die für die Bemessung solcher technischen Maßnahmen notwendig sind.

## 5.7 Die Kriterien der verlässlichen Funktionsfähigkeit der künftigen Notpolder

Eine optimale Notpolderwirkung kann nur mit der optimalen Notpolderfüllung durch die geeignete operationelle Steuerung erreicht werden. Dies erfordert eine Steuerungsstrategie, die von den o.g. Szenarien abgeleitet werden muss und vom Ereignis her schon klar definiert ist. Daneben erfordern diese Maßnahmen eine verlässliche möglichst frühzeitige Abflussvorhersage, die ebenfalls für die Steuerung und Funktionsfähigkeit des gesamten Systems maßgebend ist. Dafür wird im Rahmen dieser Dissertationsarbeit die Verlängerung der bestehenden Abflussvorhersage und deren Abschätzung der Qualität im Hinblick auf die Notpoldersteuerung fokussiert, siehe Kapitel 7.6.

Ein unverzichtbarer Teil der Entwicklung der Steuerungsstrategie ist die detaillierte hydraulische Analyse der Notpolderfüllung und -steuerung. Dieses erfordert ein zwei-dimensionales hydrodynamisches Modell, um die Bemessungswerte der Öffnungsbauwerke überprüfen zu können. Das wurde teilweise von der Firma HGN (Bollman 2005) durchgeführt, deren Ergebnisse bezüglich der Bemessung hier verwendet wurden. Letztendlich würde diese Untersuchung ebenfalls ein physikalisches

Modell erfordern, um das Verhalten, Bemessungswerte und Füllverlauf in den Notpoldern sowie in dem Elbeschlauch überprüfen zu können. Mit einer Untersuchung mittels eines physikalischen Modells würden vor allem die Beiwerte des vollkommenen oder unvollkommenen Überfalls der Bauwerke und dadurch die Leistungsfähigkeit (Kapazität) überprüft werden.

## 6 Anwendung der Szenarien im Hinblick auf die Notpolderuntersuchung

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erwähnt wurde, beschäftigt sich diese Arbeit mit der Verminderung der Scheitelabflüsse extremer Hochwasserereignisse, die über die Bemessungshochwasser hinaus gehen mittels steuerbarer Retentionsmaßnahmen – durch die geplanten Notpolder – entlang der deutschen Mittleren Elbe. In Kapitel 5 wurde bereits auf die Untersuchungsschritte zur hochwasserdämpfenden Notpolderwirkung aus hydrologischer Sicht ausführlich eingegangen. Die Ergebnisse zeigten, dass eine Scheitelkappung von 20 bis 50 cm unter der Voraussetzung der optimalen Steuerung und der verlässlichen Abflussvorhersage je nach der Notpoldervariante (V1 bis V4) und dem Ereignis möglich wäre. Damit wurden die wichtigsten Merkmale der geplanten Notpolder (Standorte, Ausdehnung, Kapazität und Stelle der Einlaufbauwerke) mittels des extremen Ereignisses von 2002 ermittelt. Dieses ist jedoch nicht für die allgemeine Planung der Hochwasserschutzmaßnahmen ausreichend und relevant, da das Ereignis sich nie in der gleichen Form, Größe und Auswirkung wiederholen werden kann. Daraus resultiert eine Fragestellung der beobachteten extremen Ereignisse, deren Anzahl für die Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen sehr gering und nicht ausreichend ist, um die mögliche Form und den Verlauf sowie die Größe des Scheitelwerts der künftigen Ereignisse in Betracht nehmen zu können.

Aus dem oben genannten Grund müssen historische extreme Ereignisse für die Planung jedenfalls in diese Untersuchung einbezogen werden, um die Variabilität der Ereignisse erweitern zu können. Dieses erfordert eine Betrachtung und Bearbeitung der historischen Informationen, die im Elbeeinzugsgebiet recht wohl und teilweise ausführlich im Vergleich zu anderen Einzugsgebieten dokumentiert wurden. Wobei mit bestimmten Ungenauigkeiten und Inhomogenität in der Datenbasis gerechnet werden muss. Deren Anzahl und Beobachtung ist leider sehr beschränkt und für die Planung ungenügend.

Da die Anzahl der vergangenen und gegenwärtigen beobachteten extremen Ereignisse gering ist, wurden die simulierten Szenarien, die von der Rekombination der beobachteten Eigenschaften der vorherigen oder historischen Ereignisse und Inputgrößen abgeleitet wurden, für die Überprüfung der geplanten Notpolder herangezogen.

Für die weitere und detaillierte Notpolderuntersuchung wurden zahlreiche Ereignisse und Szenarien aus gekoppelten verschiedenen Projekten angewendet, wie folgt:

- Historische und gegenwärtige Hochwasserereignisse von 1862, 1890, 1940, 1954, 2002 und 2006
- 5 Extremhochwasser aus der stochastischen Simulation nach dem Treiber-Modell (Grundsatzstudie)
- Niederschlagsszenarien der Verschiebung bzw. Änderung von Eigenschaften der meteorologischen Situation vom August 2002 mit Hilfe des COSMO-LM (RIMAX)
- Rekombination von dem Gebietszustand (vorfeuchte und Schneedecke) der Ereignisse von 2002 und 2006 mit den klimatischen historischen Situationen (RIMAX)

In den nächsten Absätzen folgt eine kurze Beschreibung der Ableitung der Szenarien sowie eine Auswahl der historischen Ereignisse. Dadurch konnte eine Vielfalt der Ereignisszenarien erhalten wer-

den, deren Variabilität für die Planung unvertretbar und relevant ist. Diese Ergebnisse wurden weiter mit den beabsichtigten geplanten Notpoldervarianten durchgerechnet, um die hochwasserdämpfenden Effekte der einzelnen Notpoldervarianten beweisen zu können.

## 6.1 Historische und gegenwärtige Hochwasserereignisse

Diese Untersuchung wurde mit dem gut erfassten Ereignis vom August 2002 angefangen. Der Anlass war, den steuerbaren Retentionsmaßnahmen als Teil des Hochwasserschutzes zu folgen mit dem Ziel, die extrem hohen Abflüsse im Scheitelbereich zu reduzieren, siehe Kapitel 5. Die Anwendung nur eines einzigen Ereignisses von 2002 ist nicht ausreichend, um die Variabilität und Vielfalt der künftigen extremen Hochwasserereignisse mit den Notpoldermaßnahmen zu erfassen.

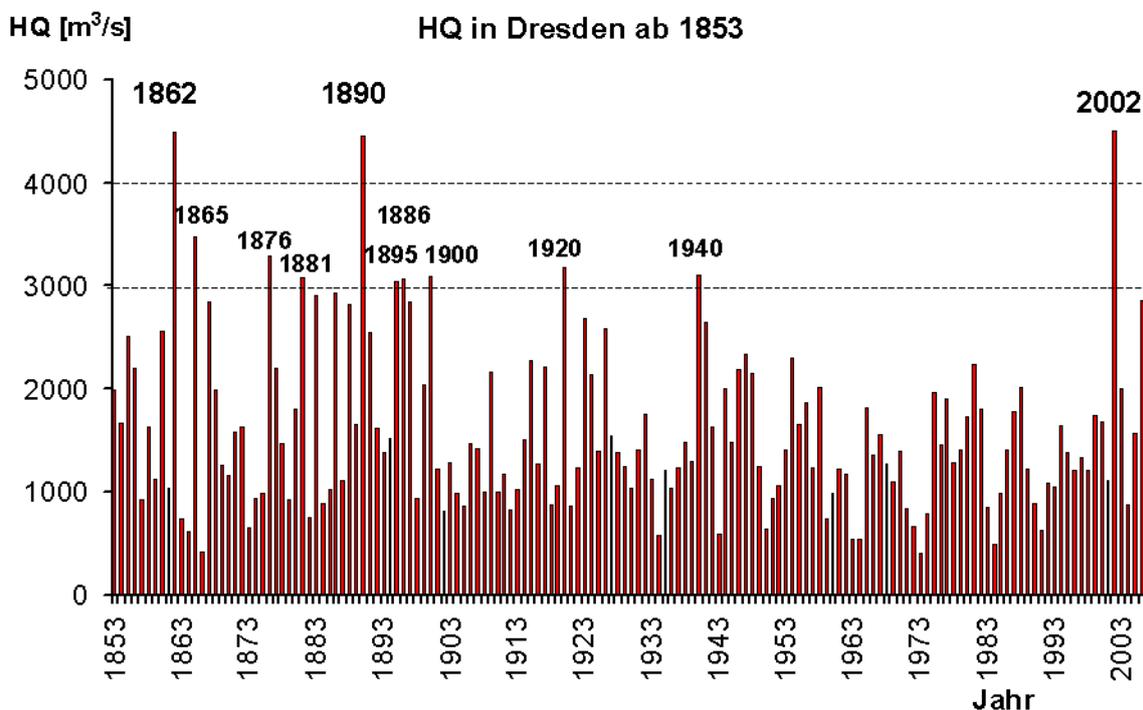


Abbildung 6.1: Maximale jährliche Abflüsse (HQ) in Dresden von 1853 bis 2006. Für die Notpolderuntersuchung wurden die Ereignisse größer  $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ , d.h. vom Februar 1862 und vom September 1890, die auf der folgenden Abbildung 6.2 dargestellt sind, herangezogen.

Aus dem Grund mussten ebenfalls die historischen Extremereignisse mittels der beobachteten Abflussreihe von Dresden herangezogen werden, da die erfassten Beobachtungen hier am längsten für die gesamte Elbe (von 1853 bis 2006) sowie zahlreiche Abflussrekonstruktionen vorliegen. Die Auswahl der extremen Ereignisse wurde mittels der Darstellung der jährlichen HQ aus der Abflussreihe im Balkendiagramm durchgeführt, siehe Abbildung 6.1. Dadurch wurden zum Ereignis von 2002 vergleichbar große Ereignisse vom Februar 1862 mit maximalen Abflüssen  $4054 \text{ m}^3/\text{s}$  und September 1890 mit  $4242 \text{ m}^3/\text{s}$  ebenfalls herangezogen, deren Scheitelwerte mehr als  $4000 \text{ m}^3/\text{s}$  erreichten, siehe Abbildung 6.2. Jedoch sind die Informationen von diesen Ereignissen nicht in gleichem Umfang und Qualität wie beim Ereignis vom 2002 vorhanden. Die Ungenauigkeit liegt vor allem darin, dass beobachteten Abflussreihen der Pegel Torgau, Wittenberg usw. nicht exakt vorliegen. Diese histori-

schen Ereignisse wurden von Dresden nach Torgau und Wittenberg, jedoch ohne mögliche Deichbrucheffekte und Zuflüsse aus dem Zwischengebiet, mittels des bewährten ELBA-Modells geroutet.

Neben diesen zwei extremsten Ereignissen, wurden noch acht Ereignisse größer als 3000 m<sup>3</sup>/s identifiziert. Sie wurden bei der Notpolderwirksamkeit nicht angewendet. Sie wären von Bedeutung für die Untersuchung der Wellenüberlagerung der Elbe und Mulde und der Auswertung der verschärften Situation in Dessau, jedoch ist dies aufgrund der fehlenden Beobachtung der Mulde nur schwer nachvollziehbar.

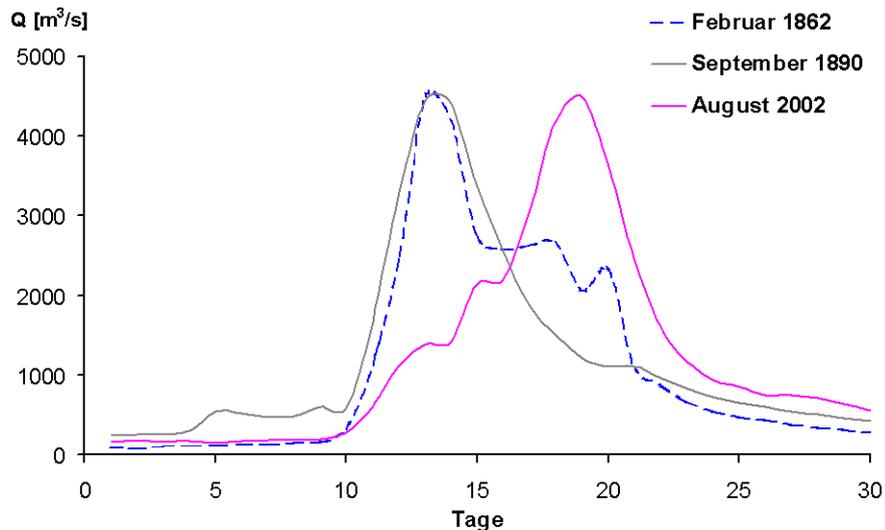


Abbildung 6.2: Beobachtete Extremereignisse in Dresden vom Februar 1862, September 1890 gegenüber dem Ereignis vom August 2002. Die beiden historischen Ereignisse lassen sich mit dem schnellen Einstieg charakterisieren.

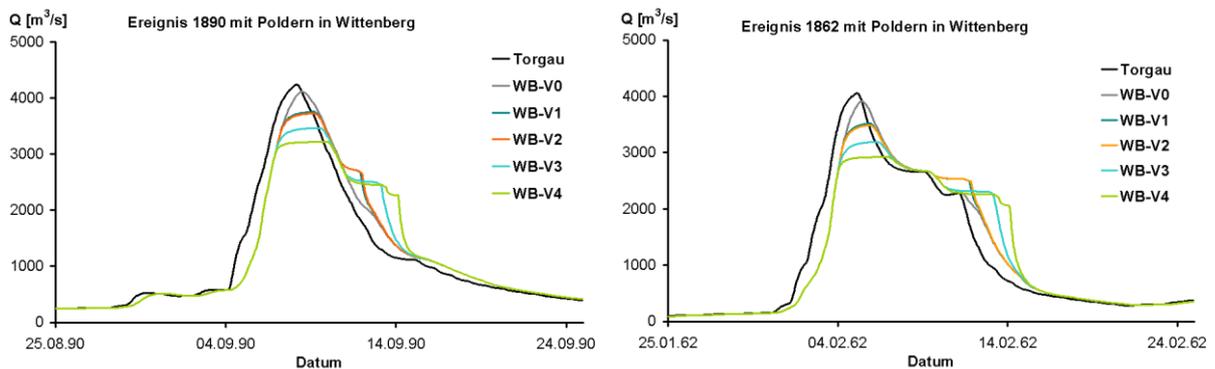


Abbildung 6.3: Die optimale Notpolderwirksamkeit in Wittenberg (WB) in allen Varianten V0 bis V4. Die Simulationen wurden mittels des Routings der beobachteten Abflussganglinien von Dresden berechnet, siehe Abbildung 6.2. Da die Ereignisgröße und –Form der beiden historischen Ereignisse ähnlich zu dem vom 2002 ist, wurde ebenfalls eine ähnliche Notpolderwirksamkeit bei der Scheitelkapung erreicht.

Die beiden historischen Hochwasserereignisse wurden von Dresden nach Torgau geroutet und wurden weiter mit den untersuchten Notpoldern schrittweise bis Aken transformiert. Im Gegensatz zum Ereignis 2002 sind die beiden historischen Ereignisse beim Einstieg deutlich schneller. Aufgrund der fehlenden Beobachtungen konnten die damaligen Deichbrüche im Fall des Ereignisses vom 1890, die von der Literatur (Bölte 1910) beschrieben wurden, nicht genau quantifiziert und einbezogen werden.

Bei der Berechnung der beiden historischen Ereignisse wurde eine ebenfalls zum Ereignis vom 2002 ähnliche Notpolderwirksamkeit auf die Scheitelwerte nachgewiesen, da die Ereignisse alle ähnlich in Form und Größe sind, siehe Abbildung 6.3 und Tabelle 6.1. Es muss betont werden, dass diese Simulationen aus den Abflussganglinien von Dresden durchgeführt wurden, ohne dass die Zuflüsse (Zwischengebiet – Elbeschlauch, S. Elster und Mulde) berücksichtigt werden konnten.

Hier ist zum Ereignis von 1890 zu vermerken, dass die Abflusswerte in Dresden, die hier präsentiert sind, beispielweise mit hydraulischer Untersuchung von (Grünwald 2007) und mit hydrologischer Überprüfung nach (Helms 2013) rekonstruiert wurden. Die Rekonstruktion führte zur Abflussreduzierung im Scheitelbereich um etwa 300 m<sup>3</sup>/s. Jedoch konnte als Szenario die ursprüngliche nach zuständigen Behörden damals offizielle Abflussreihe angewendet werden. Zu einem vergleichbaren Ergebnis der Rekonstruktion in Děčín war es im Rahmen der Talsperrenstudie (MŽP 2005) gekommen. Die Kennwerte der historischen Ereignisse konnten ebenfalls als Randbedingungen und Grundlagen für die Ableitung der physikalisch basierten Szenarien angewendet werden.

*Tabelle 6.1: Ergebnisse der Scheitelkappung der historischen Ereignisse von 1862 und 1890 an den Pegeln Wittenberg, Vockerode und Aken durch die verschiedenen Poldervarianten. Dabei ist es wichtig zu erwähnen, dass die Seitenzuflüsse (Schwarze Elster und Mulde usw.) hier nicht beinhaltet sind. Im Fall des Ereignisses 1890 handelt es sich um Originaldaten, nicht um die in der letzten Zeit korrigierten Daten.*

Szenario	Pegel	Scheitelwert HQ [m <sup>3</sup> /s]					Diff. HQ [m <sup>3</sup> /s] zu V0			
		V0	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4
1862	Wittenberg	3911	3520	3490	3192	2922	390	420	719	989
	Vockerode	3896	3516	3299	3190	2818	380	598	706	1078
	Dessau	3865	3373	3214	<b>2958</b>	2707	492	651	<b>906</b>	1158
	Aken	3830	3372	3214	2958	2707	492	616	872	1123
1890	Wittenberg	4117	3759	3732	3469	3220	358	386	648	898
	Vockerode	4110	3757	3582	3468	3113	353	528	642	997
	Dessau	4089	3650	3516	<b>3265</b>	2976	440	573	<b>824</b>	1113
	Aken	4068	3650	3516	3265	2976	419	552	803	1092

## 6.2 Szenarien aus simulierten Niederschlägen

Im Rahmen des RIMAX-Projekts „Operationelles Hochwassermanagement in großräumigen Extremsituationen am Beispiel der Elbe“ wurden zahlreiche Extremszenarien anhand der vorher definierten

Bedingungen simuliert, unter anderem um der Notpolderuntersuchung weiter folgen zu können. Hier wurde eine Prozesskette anhand der beobachteten Situation vom August 2002 von der Meteorologie über die Hydrologie und Hydraulik bis zur lokalen Deichsicherheit durchgeführt. Dadurch wurden die einzelnen Prozesse gekoppelt, um den operationellen Einsatz in der Praxis ermöglichen zu können. Auf der anderen Seite wurden viele Extremszenarien für die Planungszwecke des Hochwasserschutzes definiert und simuliert. Im Rahmen des Teils Meteorologie des o.g. Projekts wurden Niederschlagssummen und -Verteilungen in der Zeit und im Gebiet simuliert und weiter modifiziert, um diese später im Teil Hydrologie durch die Niederschlag-Abflussmodellierung in die Abflüsse an wichtigen Pegelstellen umwandeln zu können. In dem Untersuchungsgebiet bei Dessau wurden die extremen Szenarienabflüsse mittels der hydrodynamischen Ansätze in die Wasserstände umgerechnet, um die lokale Deichbelastung und Abschätzung des Deichversagens vorhersagen zu können, da für die Betroffenen der vorhergesagte Wasserstand maßgeblich ist.

Für die Notpolderuntersuchung wurden insbesondere die Ergebnisse vom Teilprojekt Hydrologie, bei dem der Niederschlag-Abflussprozess von den Auslösungsgebieten bis zu den Notpolderstandorten großskalig nachgebildet wurde, bewertet. Die simulierten Extremszenarien stellen eine gute Basis für die weitere Bewertung im Hinblick auf die Notpolderplanung und auf die Hochwasserschutzmaßnahmen dar. Um die Definition der Szenarien richtig verstehen zu können, werden die Modelkomponente der Meteorologie und Hydrologie in den nächsten Abschnitten dieser Arbeit stichpunktartig angegangen. Dabei werden die Niederschlagsszenarien durch die Modifikation bzw. Verschiebung der Großwetterlage und der Luftmassen beschrieben.

### **6.2.1 Niederschlagssimulation durch das meteorologische Modell COSMO-LM**

Auslöser eines extremen Hochwasserereignisses sind normalerweise die in Zeit und Raum ungünstig verteilten extremen Niederschläge im Einzugsgebiet. Bei Betrachtung der extremen Situationen ist es notwendig, dafür bei der Niederschlagssimulation anzufangen. Im Rahmen des RIMAX- Projekts wurde dafür das COSMO- Lokal Modell des Deutschen Wetterdienstes, wobei die Randbedingungen von einem globalen Modell geliefert wurden, angewendet. Die Berechnung beginnt mit der großskaligen Simulation der Großwetterlagen über ganz Europa mittels globalem Zirkulationsmodells (GME - Global Model Europe), wo die Zugbahnen sowie Feuchte und Temperatur der Luftmassen bestimmt werden. Diese Analysedaten von GME werden als Randbedingungen für das schrittweise Nesting des feineren verteilten Modells über 28 und 7 bis zu 2,8 km der Gitterweite bis zur Anwendung des COSMO-LM angewendet. Nesting heißt eine Anbindung des grob verteilten Modells einer großen Skala in das klein verteilte Modell einer kleineren Skala mit Übernahme der Randbedingungen. Damit erhält man simulierte Niederschlagssummen, verteilt über das Einzugsgebiet im 6-Stundenschritt mit Berücksichtigung der Orographie. Detailliertere Beschreibung folgt in der Literatur (Kron 2010, Schlüter 2010, Meißner 2008, MZ 2008, COSMO 2012). Diese schrittweise Runterskalierung der meteorologischen Simulationsprozesse und -ergebnisse ermöglicht die weitere Anwendung bei der hydrologischen Modellierung des Niederschlag-Abflussprozesses im Einzugsgebiet, wo ein Skalensprung zu überwinden ist.

Mit diesem Modell wurden erst die Niederschläge des beobachteten Extremereignisses vom 6. bis 13. August 2002 als Referenzlauf simuliert. Das Ergebnis ist eine zeitliche und räumliche Niederschlagsverteilung mit Raster 2,8 x 2,8 km, die für die Modellierung des Niederschlag-Abflussprozesses im Einzugsgebiet überreicht wurde. Der Referenzlauf (hier genannt als COSMO-REF) ergab

eine befriedigende Übereinstimmung mit den Beobachtungsniederschlägen vom August 2002 im Hinblick auf die zeitliche und räumliche Verteilung, jedoch ergab der Verlauf der Tagessummen der Niederschläge beim dem Referenzlauf gegen die Beobachtung eine leichte Unterschätzung bei dem maximalem Wert am 12.8.2002, siehe Abbildung 6.5; mehrere Informationen beinhaltet die Literatur von (Nestmann 2009 und Schlüter 2010).

### 6.2.1.1 Szenariendefinition aus meteorologischer Sicht

Die Methode der Niederschlagssimulation wurde im vorherigen Abschnitt erläutert. Bei der Definition der Niederschlagsszenarien wurde von zwei Ideen der Modifikation ausgegangen, die auf den physikalischen Bedingungen der Luftmassen bzw. der Zugbahnen der Großwetterlagen basieren:

- Eine Option ist die Verschiebung der Großwetterlage bzw. die Änderung der Zugbahnen vom August 2002 (des Referenzlaufes) in allen vier Richtungen jeweils um 28 bzw. 56 km (bzw. um eine oder um zwei Gitterzellen), siehe Abbildung 6.4.
- Die zweite Option ist eine leichte Änderung der Charakteristika der Luftmassen. Einerseits wurde die Temperatur jeweils um 0,5; 1; 1,5 und 2 K erhöht bzw. erniedrigt ohne die relative Feuchte geändert zu haben und andererseits wurde die relative Feuchte um 5, 10, 15 und 20 % erhöht bzw. erniedrigt, bei gleicher Temperatur.

Dabei ist zu unterstreichen, dass bei den Niederschlagssimulationen die orographische Wirkung berücksichtigt wurde d.h., dass die ausgefallenen simulierten Niederschläge am stärksten in den Gebirgsbereichen auftraten. Dabei wurde mit den Meteorologen diskutiert, ob die Erhöhung bzw. Erniedrigung der relativen Feuchte bzw. Temperatur physikalisch möglich wäre. Diese Ergebnisse zeigten eine Variabilität der zeitlich und räumlich verteilten Niederschlagsszenarien, die weiter bei den hydrologischen Aufgaben verwendet wurden, siehe nächstes Kapitel 6.2.1.2. Durch die Verschiebung der simulierten Niederschlagsfelder wurden andere Teileinzugsgebiete mit den starken Niederschlägen betroffen, so dass eine Auswirkung in den einzelnen Teileinzugsgebieten im Hinblick auf die mögliche Wellenüberlagerung betrachtet wurde.

### Verschiebung um 28 km nach Osten

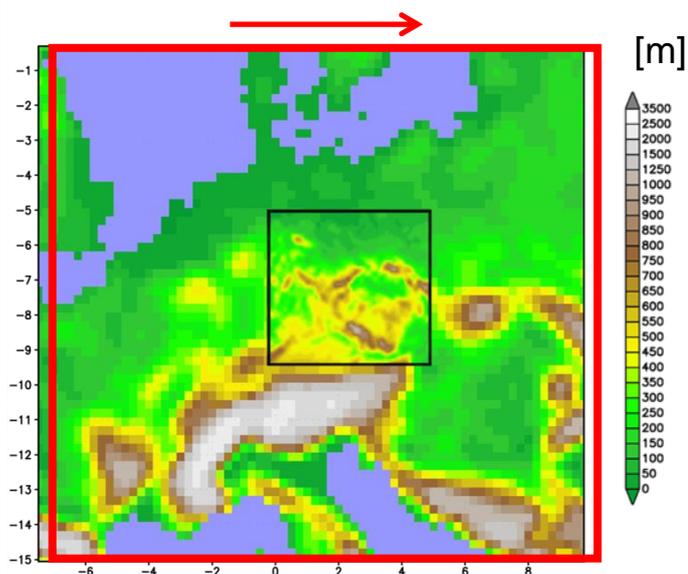


Abbildung 6.4: Die Verschiebung der Großwetterlage – des Referenzlaufes vom 2002 - um eine Gitterzelle 28 km nach Osten über Mittel Europa als Szenario E1. Das kleine Quadrat wurde modelltechnisch in das größere Quadrat genestet, die Randbedingungen für die detaillierte Simulation mit kleinerem Raster erst 7 und dann 2,8 km der Gitterweite. Analogerweise wurde die Wetterlage (Referenzlauf vom 2002) um 28 bzw. 56 km in alle Richtungen verschoben (Quelle: Nestmann und Schlüter 2009).

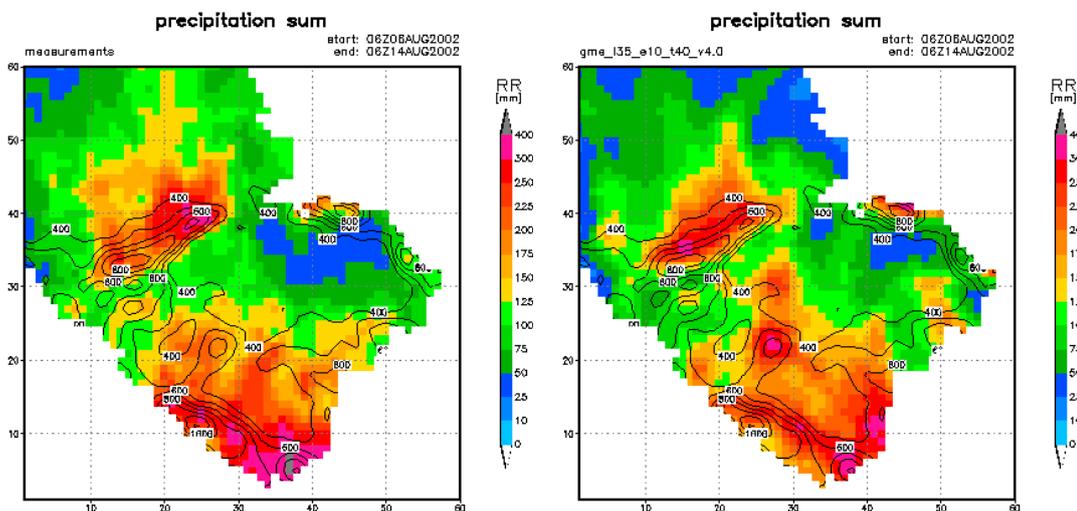


Abbildung 6.5: Auf den beiden Bildern sind die Niederschlagssummen vom 8. bis 14. August 2002 und Höhenlinien des Reliefs. Auf dem linken Bild handelt es sich um die Beobachtung, während das rechte Bild die Simulation des sog. Referenzlaufes vom August 2002 dargestellt ist (Quelle: Nestmann und Schlüter 2009).

#### 6.2.1.2 Ergebnisse der meteorologischen Simulationen

Insgesamt wurden 16 Niederschlagsszenarien, die mit den COSMO-LM generiert wurden, für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung ausgewählt. So wurden 8 Szenarien durch die Verschiebung der Wet-

terlage um eine bzw. zwei Gitterzellen (mit Bezeichnung: N1,N2, O1,O2, S1, S2, W1, W2) generiert. Die nächsten acht Niederschlagsszenarien wurden durch die Änderung der Luftmassencharakteristika d.h. mit der Erhöhung der relativen Luftfeuchte um 5 bis 20 % bei konstanter Temperatur und andererseits der Erhöhung der Temperatur um 0,5 bis 2 K bei der gleichen relativen Luftfeuchte.

Aus den Simulationsergebnissen, die in der Literatur (Nestmann 2009, Schlüter 2010) als Differenz der Niederschlagssummen zwischen dem jeweiligen Szenario und dem Referenzlauf zusammengefasst sind, ist zu sehen, dass es bei den Verschiebungen in Richtung Nord (N1 und N2) um 28 und 56 km und West (W1) nur um 28 km zu den stärkeren Niederschlägen kam. Bei der Westverschiebung (W2) um 56 km kam es nur zur vernachlässigbaren Niederschlagssummenerhöhung, bei den restlichen Verschiebungen der Wetterlage nach Osten und Süden (O1, O2, S1, S2) ergaben sich geringere Niederschlagssummen.

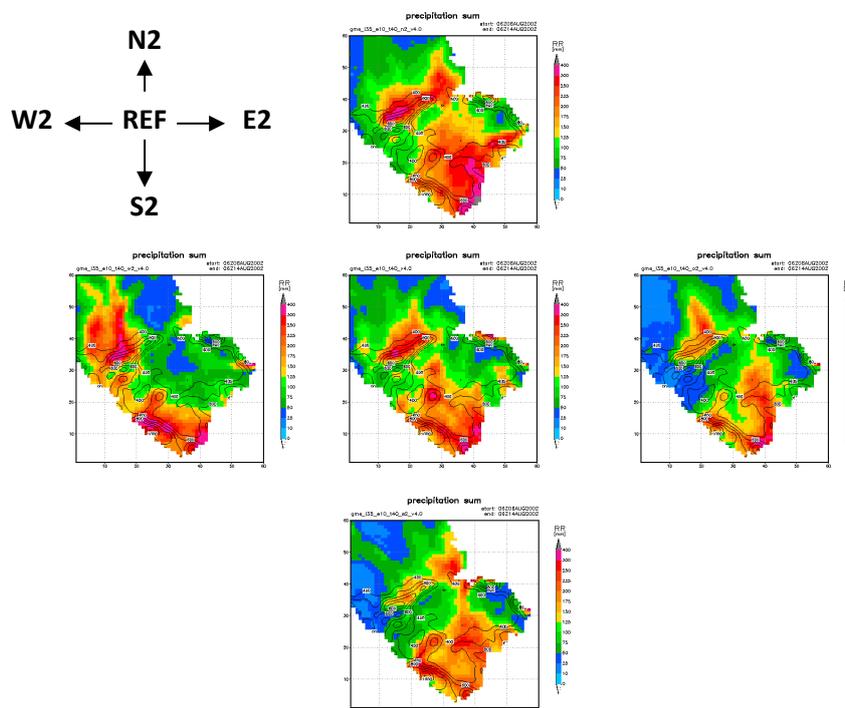


Abbildung 6.6: Szenarien, die von der Verschiebung der Wetterlage (des Referenzlaufes 2002) um zwei Gitterzellen (56 km) in alle Richtungen abgeleitet wurden. Durch die Verschiebungen nach Norden und Westen ergaben sich intensivere Niederschläge (Quelle: Nestmann und Schlüter 2009).

Die Temperaturerhöhung der Luftmassen um 1,5 und 2 K (TP15, TP20) führte zu erheblich stärkeren Niederschlägen, wobei im Gegenteil die Erhöhung um 0,5 und 1 K (TP05, TP10) bewirkte eine geringere Niederschlagserrhöhung. Die Temperatursenkung (TM-) brachte nur schwächere Niederschläge als beim Referenzlauf. Die Abnahme der relativen Luftfeuchte (RM-) führte ebenfalls nicht zur Intensivierung der Niederschläge. Bei der Feuchtenerhöhung um 5 % kam es zur minimalen Zunahme der Niederschlagssumme, bei den Szenarien mit der erhöhten Luftfeuchte um 10 bis 20 % kam es zur ähnlich deutlichen Auswirkung der Niederschlagssummen. Die Ergebnisse der Niederschlagsszenarien sind in Abbildung 6.7 zusammengefasst.

Die Niederschlagsszenarien, die durch Verschiebung sowie Temperatur- und Feuchterhöhung modifiziert wurden, wurden an die Hydrologen überreicht. Die Auswirkungen in den Einzugsgebieten von solchen Niederschlagsszenarien wurden simuliert, um das lokale Risiko bei Dessau abschätzen zu können. Ebenfalls wurden die Szenarien, die nach Osten und Süden verschoben wurden und die wenigen Niederschläge in der Summe auslösten, auch mittels der Niederschlag-Abfluss-Modellierung untersucht, da es zu einer zeitlichen Wellenüberlagerung zweier mit ungünstigen Niederschlagsfeldern betroffenen Einzugsgebiete kommen konnte. Die Auswirkung, sowie die Niederschlags-Abfluss-Modellierung der Niederschlagsszenarien wird in den nächsten Kapiteln behandelt.

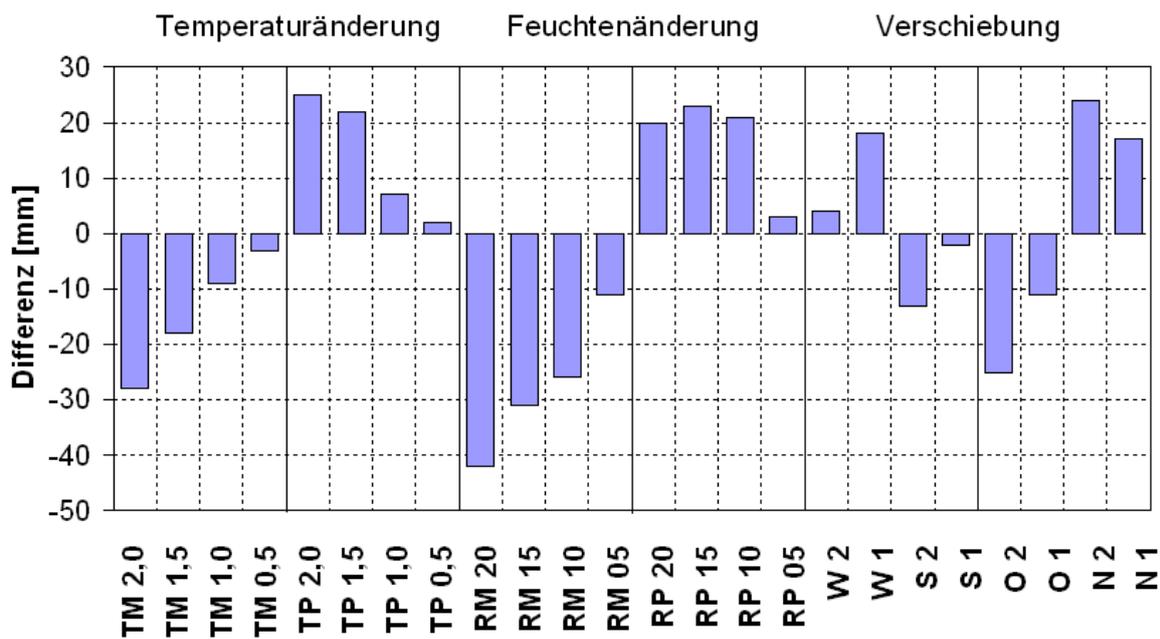


Abbildung 6.7: Die Ergebnisse der Niederschlagsszenarien als Differenzen der Summen zwischen dem Referenzlauf und dem jeweiligen Szenario. Die Temperatur- und Feuchtenabnahme der Luftmassen und Verschiebungen nach Osten und Süden ergaben niedrigere Werte (Quelle: Nestmann und Schlüter 2009).

### 6.2.2 Die Anwendung der meteorologischen Szenarien bei der Abflussmodellierung

Die im vorherigen Kapitel beschriebenen simulierten Niederschlagsszenarien wurden mittels der Komponente der Niederschlag-Abfluss-Modellierung in die Abflüsse umgewandelt, um die ermittelten simulierten Abflussganglinien für die Abschätzung des lokalen Risikos und für die Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen anwenden zu können. Dieses erfordert umfangreiche Kenntnisse über das Abflussverhalten im Einzugsgebiet und im Flussnetz insbesondere bei extremen Situationen. Das geeignete Modellsystem musste je nach der Aufgabe und Einzugsgebietsgröße ausgewählt werden. Dabei ist es wichtig zu erwähnen, dass jedes Modellsystem aufgaben- und skalenspezifisch ist. In diesem Fall wurde der Abflussprozess der o.g. Niederschlagsszenarien von der tschechischen Einzugsgebietsfläche von etwa 50 000 km<sup>2</sup> und von der deutschen Zuwachsfläche von etwa 20 000 km<sup>2</sup> von Dresden bis zum Untersuchungsgebiet simuliert. In beiden Fällen handelte sich um verschiedene großskalige Niederschlag-Abfluss-Modellierungen, deren Ergebnisse mittels Flood-Routing-Modell gekoppelt wurden. Das Abflussgeschehen im tschechischen Einzugsgebiet der Elbe wurde mit dem

für die offizielle Abflussvorhersage benutzen Modell AquaLog simuliert. Auf dem deutschen Einzugsgebiet der Elbe wurde die Abflusssimulationen für das Zwischengebiet zwischen Dresden und Aken, welches unter anderem die Zuflüsse Schwarze Elster und Mulde beinhaltet, mit einem stochastisch konzeptionellen Blockmodell untersucht. Eine kurze Beschreibung der beiden Modelle folgt in den nächsten Abschnitten, für detaillierte Informationen ist auf die Literatur (Nestmann 2009, Helms 2008) zu verweisen.

### **6.2.3 Ergebnisse der großskaligen Niederschlag-Abfluss-Modellierung der Niederschlags-szenarien von COSMO-LM**

Die im Kapitel 6.2.1 beschriebenen meteorologischen Szenarien (Niederschläge) wurden weiter mit den o.g. deutschen und tschechischen Niederschlag-Abfluss-Modellen in die Abflüsse im Einzugsgebiet der Elbe transformiert. Die erwünschten Ergebnisse waren die Abflussganglinien an den Pegeln der Elbe und der Hauptzuflüsse, und an den Notpolderstellen in Sachsen-Anhalt. Diese waren von großer Bedeutung, um das lokale Hochwasserrisiko abschätzen zu können. Daneben wurden die Auswirkungen dieser Szenarien in den einzelnen Teileinzugsgebieten bis zu den unteren Pegeln, die in Abbildung 6.9 aufgelistet sind, ebenfalls betrachtet. Dabei wurde festgestellt, dass die Wirkung der außergewöhnlich extremen Hochwasserereignisse der einzelnen Teileinzugsgebiete durch die schrittweise Überlagerung und das folgende Routing bis zu der Untersuchungsstelle nach Sachsen-Anhalt reduziert wurde. Für die großskalige Untersuchung der extremen Abflüsse ist ein Hochwassergeschehen in kleineren Teileinzugsgebieten unwichtig, da solche Extreme bzw. lokale Abflussüberschätzung mit dem zunehmenden Einfluss der Zwischeneinzugsgebiete und der Ereignisüberlagerung reduziert werden.

Erst wurde eine visuelle Abschätzung der Niederschlagsszenarien aufgrund der täglichen Niederschlagsverteilungen und der simulierten Abflussganglinien zu den Schließpegeln aller Teileinzugsgebiete gegenüber der realen Situation vom August 2002 geprüft, wo sich das Ereignis auslöste und wie es weiter unten auswirkte, siehe Abbildung 6.8. An diesem Beispiel wird das Szenario TP15 – Erhöhung der Temperatur um 1,5 K – gegenüber dem beobachteten Zustand der jeweiligen Tage vom 6. bis 13.8. im Einzugsgebiet der Oberen Elbe oberhalb von Brandýs visuell verglichen. Dabei ist ein Niederschlagszuwachs des Szenarios an allen Tagen zu erkennen, welcher sich ebenfalls deutlich auf die Abflüsse auswirkte. Auf diese Weise wurde jedes Teileinzugsgebiet (Obere Elbe, Sázava, Moldau zu Orlick, Berounka, Eger, Moldau zu Vraňany und die Elbe zu Ústí nad Labem) der tschechischen Elbe einzeln dargestellt und angesehen, siehe Abbildung 6.9. Dieses Szenario folgte den starken Niederschlägen in den Einzugsgebieten von Sázava und Obere Elbe und andererseits führte es in den südlichen und westlichen Gebieten zu geringeren Niederschlägen. In Ústí nad Labem ergaben sich höhere Extremabflüsse als beim realen Ereignis vom 2002, die Werte liegen etwa um  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  höher. Durch das Flood-Routing-Verfahren und schrittweise Überlagerung wurden die Szenarienabflüsse bis zu den deutschen Pegeln Dresden, Torgau, Wittenberg, Dessau, Aken und zu den Notpolderstellen transformiert. An dem letzten genannten Pegel wurden die Szenarienabflüsse mit denen der Mulde überlagert, soweit sie von der deutschen Modellierung verfügbar waren. Die Ergebnisse der COSMO-Szenarien mit der Notpolderwirkung sind in der Tabelle 6.2 zusammengefasst.

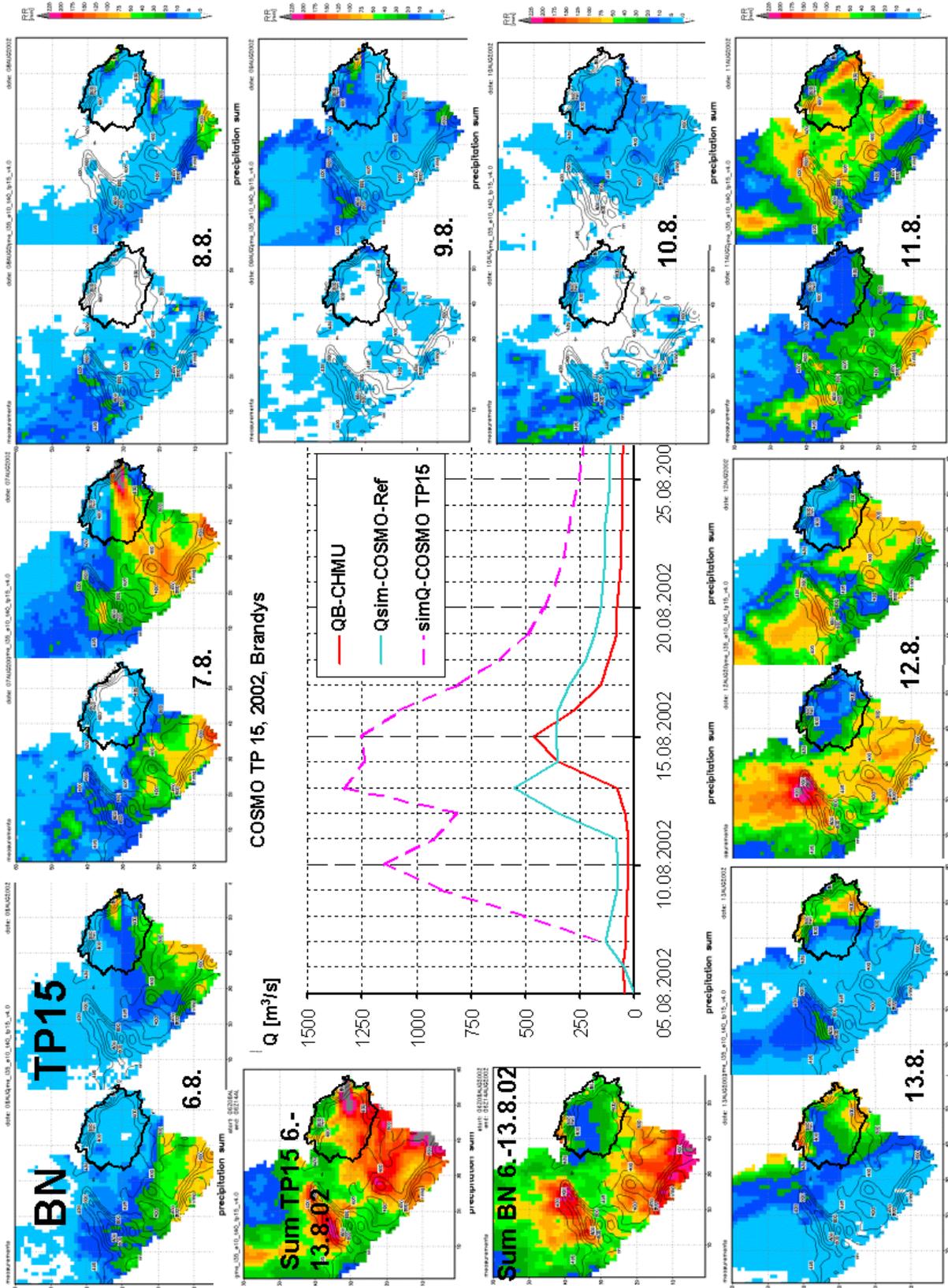


Abbildung 6.8: Die Niederschlagsverteilungen des Niederschlagsszenarios TP15 – Erhöhung der Temperatur um 1,5 K (rechts) - und des beobachteten Zustandes vom August 2002 (links) an jeweiligen Tagen für das Teileinzugsgebiet der Oberen Elbe am Pegel Brandýs. In der Mitte sind die Abflussganglien der Beobachtung, des Referenzlaufs und des Szenarios TP15 dargestellt.

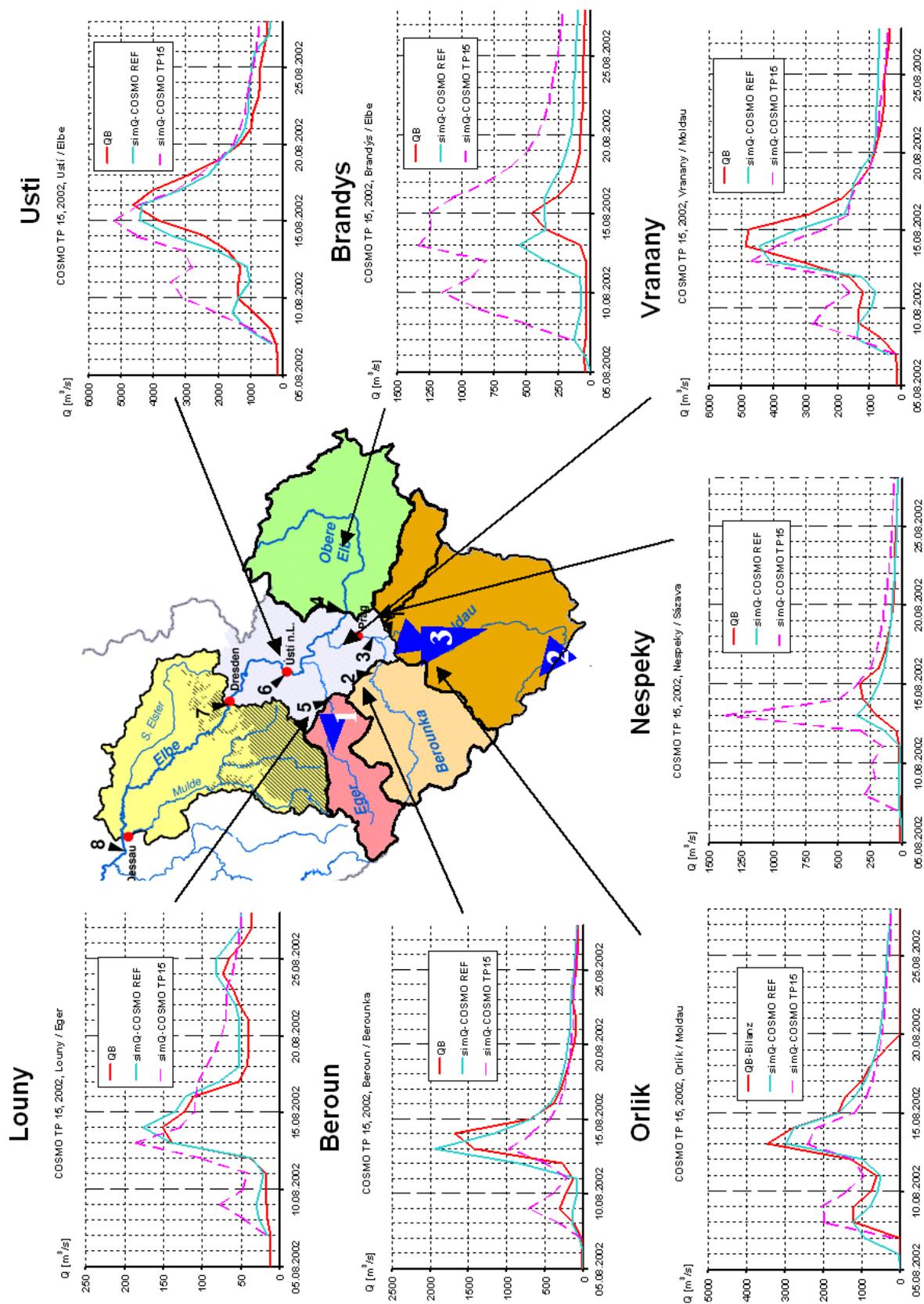


Abbildung 6.9: Die räumliche Entwicklung des Szenarios TP15 - Erhöhung der Temperatur um 1,5 K – in den tschechischen Teileinzugsgebieten der Elbe. Dieses Szenario folgte den starken Niederschlägen in den Einzugsgebieten von Sázava und Oberer Elbe und andererseits führte es in den südlichen und westlichen Gebieten zu geringeren Niederschlägen.

Alle Szenarien, deren Niederschläge und Temperaturen mit dem COSMO-LM simuliert und mit dem AquaLog in die Abflüsse umgewandelt wurden, wurden auch bei der hydrologischen Untersuchung der geplanten Notpoldermaßnahmen eingesetzt. Damit konnten anhand der hier beschriebenen Aufgaben die erweiterten physikalisch basierenden Grundlagen über die Abflusscharakteristika geliefert werden. Insbesondere sind die Szenarienergebnisse interessant, die größer oder im Scheitelbereich voluminöser sind als bei dem Ereignis vom August 2002. Das sind vor allem die Szenarien, die als die Verschiebungen der Wetterlage nach Norden (1N und 2N), nach Süden (nur 1S) und nach Westen (nur 1W) sowie als die Luftfeuchterhöhung um 10% und Temperaturerhöhungen um 1,5 und 2 Kelvin definiert wurden.

Die Szenarien sind als Abflussganglinien am Pegel Torgau, siehe Abbildung dargestellt, weil es sich gleich oberhalb der geplanten Maßnahmen befindet und die mögliche Notpolderwirksamkeit auf den unten liegenden Pegeln Wittenberg, Vockerode, Dessau und Aken in Tabelle 6.2 zusammengestellt ist. Dabei sei darauf hingedeutet, dass die potenziellen unkontrollierbaren Retentionseffekte durch die kaum vorhersehbare Deichbrüche bei der Simulation des Flood-Routing-Prozesses nicht berücksichtigt werden konnten.

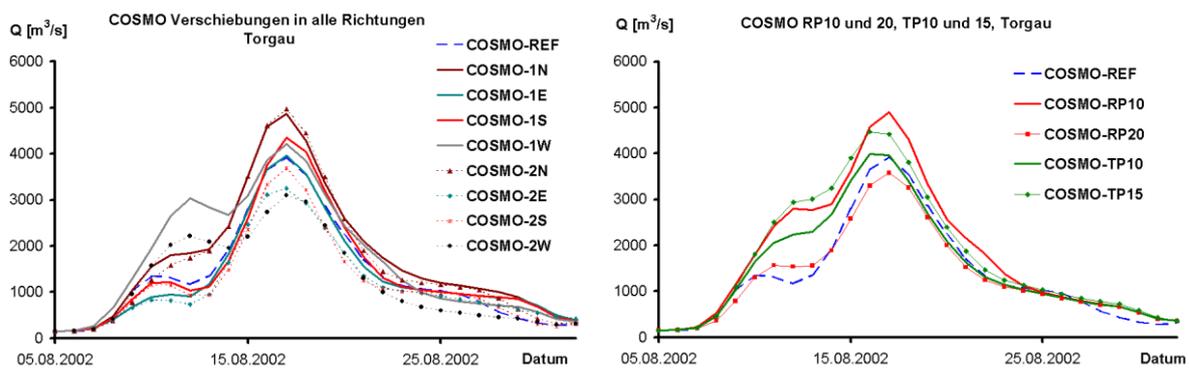


Abbildung 6.10: Szenarien am Pegel Torgau, die als Verschiebung der Wetterlage (links) bzw. Änderung der Feuchte und Temperatur der Luftmassen (rechts) vom August 2002 mit dem COSMO-LM simuliert wurden. Die Ganglinien sind hier im Tagesschritt dargestellt.

### 6.3 Aus der Kombination von Eingangsparametern und Gebietszustand abgeleitete Szenarien

Bereits im Rahmen des RIMAX-Projekts wurde eine Idee der möglichen Ableitung der Randbedingungen für die Szenarien aufgrund der physikalisch möglichen Kombination der beobachteten Gebietszustände und der klimatischen Situationen gefolgert. Mit anderen Worten heißt dies, dass ein gemessener Gebietszustand – Bodenfeuchte, Schneeschicht – mit einer ebenfalls in anderem Zeitraum beobachteten Wettersituation – Lufttemperatur und Niederschläge - kombiniert werden kann. Aus der Geschichte wurden die hochwasserrelevanten Großwetterlagen mittels des Katalogs der Großwetterlagen nach der Literatur von (Hess 2005) ausgewählt, wo die Wettersituation, Tiefdruckgebiete mit ihren Zugbahnen während der Beobachtungszeit ausführlich aufgezeichnet wurden. Hier wurden die Abfolge, Tippen und Zugbahnen der beobachteten hochwasserauslösenden Großwetterlagen über Mittel Europa insbesondere dem Elbeeinzugsgebiet identifiziert, um zu können, welche Wettersitua-

tionen und zeitliche Abfolgen in der Zukunft realistisch denkbar wären bzw. vorkommen könnten. Ebenfalls ist die meteorologische Vorgeschichte vor jeder betrachteten Wettersituation zu beachten. Daraus wurden meteorologische Elemente (Temperatur und Niederschlag) des gegebenen Zeitraums übernommen. Auf der anderen Seite wurden Gebietszustände z.B. mit der extremen Schneedecke oder mit der Vorfeuchte der ausgewählten Winter- bzw. Sommerereignisse herangezogen. Dementsprechend wurden winterliche bzw. sommerliche Niederschläge und Lufttemperaturen zugeordnet.

In diesem Fall wurde das Winterereignis vom März 2006 mit einer extrem dicken Schneedecke ausgewählt und mit dem winterlichen Niederschlag vom Dezember 1974 in verschiedener Dauer bzw. vom Mai 1978 kombiniert, um die Hochwassersituation, die 2006 auftrat, als Szenario verschärfen zu können. Die Wettersituationen und Zugbahnen waren ähnlich zu denen im März/April vom 2006 mit dem Unterschied, dass die gefallene Niederschlagssumme deutlich höher war.

In ähnlicher Weise wurden die sommerlichen Niederschläge vom Juli/August 2002 mit verändertem Gebietszustand (hier Vorfeuchte) modifiziert. Beispielsweise ist hier ein doppeltes Vorkommen der Niederschläge vom August 2002 zu nennen, die bereits einen Monat vor dem realen Ereignis „runtergefallen“ sind. Dieses hatte eine höhere Vorfeuchte vor dem realen Ereignis zur Folge und ergab einen deutlich extremeren Scheitelwert des Hauptereignisses im August. Als weitere Szenarien wurden 20%ige Niederschlagserhöhungen während des Vor- und Hauptereignisses ebenfalls vom August 2002 angenommen. Auch diese Modifikationen der Inputdaten könnten die Hochwassersituation, wie die simulierten Ergebnisse (Abflussganglinien) in Abbildung 6.11 zeigen, wesentlich verschärfen.

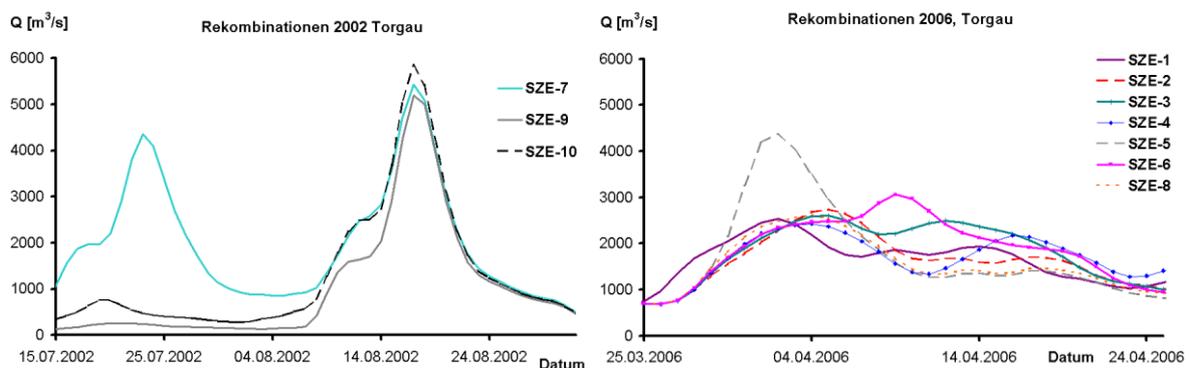


Abbildung 6.11: Szenarien, die als Kombinationen der beobachteten Gebietszustände von 2002 (links) und 2006 (rechts) sowie der Wetterlagen definiert wurden.

Diese Kombinationen und Änderungen der Inputgrößen sind zukünftig nicht auszuschließen. Damit konnten 10 physikalisch basierten Szenarien abgeleitet werden, um die Stichprobe der selten auftretenden Extremereignisse erhöhen zu können. Die hier abgeleiteten Szenarien ermöglichen eine Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen und eine Bewertung des Risikos an der Elbe. Im Rahmen dieser Arbeit wurden sie weiter bei der Notpolderuntersuchung angesetzt, um die Funktion der Retentionsmaßnahmen detaillierter im Fokus auf die Ableitung der Steuerungsregeln überprüfen zu können. Für die Untersuchung der Wirksamkeit der geplanten Notpolder wurden die Sommerszenarien SZE –7, 9, 10 und Winterszenarien SZE–5 weiter angewendet, da sie mit ihren Formen und Scheitelwerten (z.B. beim SZE-10 in Vockerode mit einem Scheitel von  $6860 \text{ m}^3/\text{s}$ ) gute Beispiele der Ereignisvariabilität für diese Aufgaben darstellen. Die restlichen Winterszenarien (SZE 1-4, 6, 8) wurden

Tabelle 6.2: Die Notpolderwirkung als Differenz zwischen den Scheitelwerten der simulierten Ganglinien mit und ohne Maßnahmen aller Notpoldervarianten und von ausgewählten Szenarien COSMO-LM sowie Rekombinationen. In diesem Fall ist die maximale Notpolderwirkung an den jeweiligen Stellen vor allem an den Pegeln Wittenberg und Vockerode abgesehen von den Muldeereignissen gezeigt. Bei dieser Annahme konnte die maximale Abflussdrosselung in Dessau nicht erreicht werden. Die Ergebnisse der bevorzugte Notpoldervariante V3 sind hier fett hervorgehoben.

Szenario	Pegel	Scheitelwert HQ [m <sup>3</sup> /s]					Diff. HQ [m <sup>3</sup> /s] zu V0			
		V0	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4
COSMO – REF	Schwellenwert		4600	4400	<b>4200</b>	4200				
	Wittenberg	4803	4478	4287	4134	4036	325	516	669	766
	Vockerode	4797	4475	4142	4131	3877	323	655	666	920
	Dessau	<b>5542</b>	5202	4973	<b>4795</b>	4614	339	569	<b>747</b>	927
	Aken	5528	5165	4910	4750	4579	363	618	778	949
COSMO – 1N	Schwellenwert		5200	5000	<b>4800</b>	4800				
	Wittenberg	5337	5092	4888	4727	4617	344	549	710	820
	Vockerode	5426	5086	4725	4724	4434	339	701	702	991
	Dessau	<b>6465</b>	6067	5837	<b>5659</b>	5462	398	628	<b>806</b>	1003
	Aken	6425	6024	5765	5600	5417	401	660	824	1008
COSMO – 1W	Schwellenwert		4400	4400	<b>4000</b>	4000				
	Wittenberg	4633	4278	4089	3932	3833	355	544	701	800
	Vockerode	4325	4275	3948	3931	3689	351	677	695	936
	Dessau	<b>5717</b>	5421	5222	<b>5060</b>	4897	296	496	<b>658</b>	820
	Aken	5702	5380	5153	5004	4845	321	549	698	857
COSMO – 2N	Schwellenwert		5200	5200	<b>5000</b>	4800				
	Wittenberg	5452	5155	4954	4801	4689	297	499	651	763
	Vockerode	5459	5150	4796	4798	4515	300	653	652	935
	Dessau	<b>6471</b>	6125	5901	<b>5736</b>	5551	346	570	<b>734</b>	920
	Aken	6444	6083	5831	5677	5501	361	613	767	943
COSMO – RP10	Schwellenwert		5200	5000	4800	4600				
	Wittenberg	5414	5072	4864	<b>4705</b>	4627	342	549	708	786
	Vockerode	5408	5067	4706	4702	4417	341	701	706	990
	Dessau	<b>6425</b>	6128	5903	<b>5753</b>	5573	297	522	<b>672</b>	852
	Aken	6407	6087	5832	5693	5521	320	576	714	886
COSMO – RP20	Schwellenwert		3600	3600	<b>3400</b>	3200				
	Wittenberg	3935	3582	3411	3262	3170	354	525	674	766
	Vockerode	3928	3579	3275	3261	3036	349	653	668	893
	Dessau	<b>4822</b>	4576	4332	<b>4242</b>	4101	246	490	<b>580</b>	721
	Aken	4806	4525	4259	4164	4027	281	547	642	779

Fortsetzung der Tabelle 6.2: Notpolderwirkung bei den u. g. Szenarien

Szenario	Pegel	Scheitelwert HQ [m <sup>3</sup> /s]					Diff. HQ [m <sup>3</sup> /s] zu V0			
		V0	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4
COSMO – TP 10	Schwellenwert		4200	4000	<b>3800</b>	3800				
	Wittenberg	4453	4057	3898	3764	3680	396	555	689	773
	Vockerode	4442	4055	3777	3763	3543	387	665	679	899
	<b>Dessau</b>	<b>5304</b>	4911	4694	<b>4518</b>	4351	393	610	<b>786</b>	953
	Aken	5275	4879	4668	4505	4343	396	607	769	932
COSMO – TP 15	Schwellenwert		4600	4600	<b>4400</b>	4200				
	Wittenberg	4979	4553	4385	4239	4150	426	594	740	829
	Vockerode	4966	4551	4260	4238	4012	415	706	728	954
	<b>Dessau</b>	<b>5824</b>	5413	5197	<b>5029</b>	4863	411	627	<b>795</b>	962
	Aken	5792	5381	5169	5010	4847	411	623	782	945
SZE 5	Schwellenwert		4200	4000	<b>3800</b>	3800				
	Wittenberg	4352	4053	3911	3791	3717	299	441	561	635
	Vockerode	4348	4051	3811	3790	3611	297	537	558	737
	<b>Dessau</b>	<b>5942</b>	5805	5717	<b>5590</b>	5465	137	225	<b>352</b>	478
	Aken	5911	5754	5615	5519	5404	156	296	392	507
SZE 7	Schwellenwert		5800	5600	<b>5400</b>	5200				
	Wittenberg	6161	5668	5438	5274	5165	493	723	887	996
	Vockerode	6141	5661	5271	5270	4988	480	869	870	1153
	<b>Dessau</b>	<b>7463</b>	7079	6828	<b>6718</b>	6570	384	636	<b>746</b>	893
	Aken	7460	7009	6759	6649	6491	451	702	811	969
SZE 9	Schwellenwert		5800	5400	<b>5200</b>	5200				
	Wittenberg	6097	5571	5323	5122	5017	526	775	976	1080
	Vockerode	6071	5561	5138	5118	4834	510	934	953	1237
	<b>Dessau</b>	<b>7164</b>	6695	6392	<b>6317</b>	6180	469	771	<b>847</b>	984
	Aken	7107	6642	6322	6245	6087	465	784	862	1020
SZE 10	Schwellenwert		6400	6200	<b>6000</b>	5800				
	Wittenberg	6636	6182	5945	5785	5667	455	691	851	969
	Vockerode	6617	6173	5759	5780	5458	445	858	838	1159
	<b>Dessau</b>	<b>7771</b>	7380	7103	<b>6971</b>	6803	391	668	<b>800</b>	968
	Aken	7770	7349	6980	6898	6720	420	790	871	1050

zur Notpolderüberprüfung nicht herangezogen, weil sie keine erhebliche Verschärfung der Hochwassersituation darstellen würden. Auf anderer Seite könnte auch diese Szenarien eine Rolle spielen, falls auch die mögliche Wellenüberlagerung von den unteren Zuflüssen der Mulde und Havel betrachtet würde.

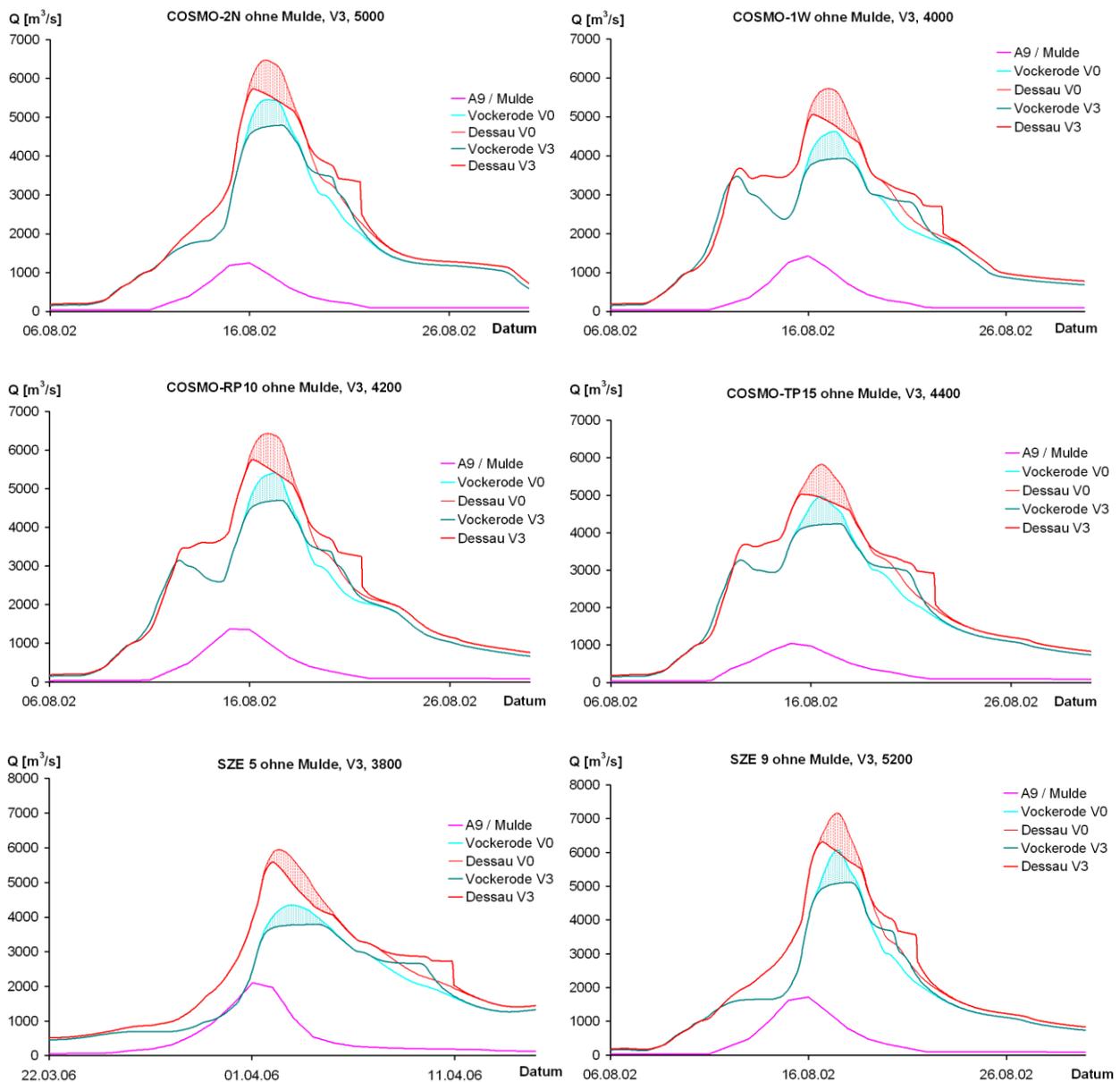


Abbildung 6.12: Die simulierten Abflussganglinien der ausgewählten Szenarien ohne Einbeziehung der Mulde und mit optimaler Notpolderwirkung der Variante V3 in Vockerode und Dessau. Die Notpolder sollen so gesteuert werden, dass die größte Abflussreduzierung unmittelbar unterhalb der Notpolder bei Wittenberg erreicht werden kann. So ist es in Vockerode deutlich sichtbar, dass die Szenarienergebnisse optimal durch die Notpolder P1 und P3 reduziert werden könnten, jedoch kann die effektivste Abflussdrosselung in Dessau (einschließlich mit Wirkung des P7) nach der Überlagerung mit der Mulde nicht bewiesen werden. Die numerischen Werte der Simulationen sind in der Tabelle 6.2 zusammengefasst.

## 6.4 Szenarien aus stochastischer Simulation

Wie bereits erklärt wurde, könnte das Elbehochwasser vom August 2002 nicht mehr in derselben Form auftreten, und andererseits sind drei beobachtete Naturereignisse (1862, 1890 und 2002) für die hydrologische Notpolderuntersuchung nicht ausreichend, um eine zuverlässige Aussage über die Notpolderfunktionsfähigkeit treffen zu können. Bereits am Anfang dieses Vorhabens wurden weitere Extremszenarien mit Hilfe des stochastischen Modells nach (Treiber 1975) und (Kron 1996) generiert.

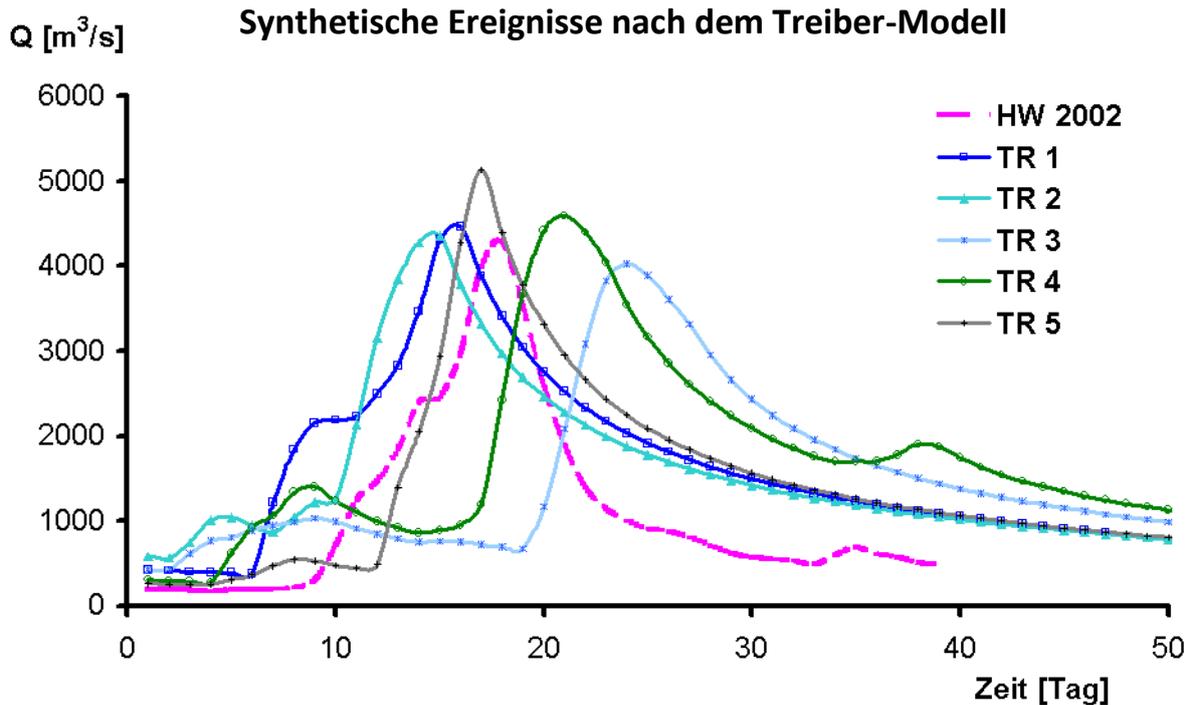


Abbildung 6.13: Die synthetisch generierten Ereignisse nach dem Treiber-Modell am Pegel Torgau.

Dabei wurde eine Abflussganglinie im Tageschritt am Pegel Torgau für eine 3840 Jahre lange Reihe erzeugt, deren statistischen Eigenschaften der langjährig beobachteten Abflussreihe (1936 – 1995) derselben Pegelstelle entsprechen. Aus der generierten Reihe wurden 5 synthetische Ereignisse (TR1 – TR5), deren Größenordnung ähnlich zum Ereignis vom August 2002 ist, ausgewählt, siehe Abbildung 6.13.

Das Modell besteht aus dem stochastischen Teil, wo Impulse als Zufallsgrößen erzeugt werden, und aus dem deterministischen Teil, wo die erzeugten Impulse mittels einer Systemfunktion in die Abflüsse gefaltet werden. Für eine detaillierte Beschreibung des Prozessverfahrens der Reihengenerierung mit diesem Modell ist auf die Literatur (Ihringer 2003, Nestmann 2002, Treiber 1975, Kron 1996) zu verweisen. Aus der Abbildung 6.13 ist zu erkennen, dass das Szenario TR 5 den höchsten Scheitelwert mit  $5134 \text{ m}^3/\text{s}$  erreichte. Das Szenario TR 4 ist mit seinem Scheitelwert  $4594 \text{ m}^3/\text{s}$  zwar kleiner als beim TR 5, sein Scheitelwert ist aber breiter und voluminöser. Die realistisch denkbare Variabilität der Szenarien ist für die weitere Notpolderuntersuchung unvertretbar und letztendlich auch maßgebend für die Planung von Schutzmaßnahmen an der Elbe.

Im Rahmen der Risikoanalyse wurden mittels des gleichen o.g. Modells extreme synthetische Hochwasserganglinien generiert, um die Überströmwahrscheinlichkeiten der Dämme oder Talsperren ermitteln zu können (Meon 2007).

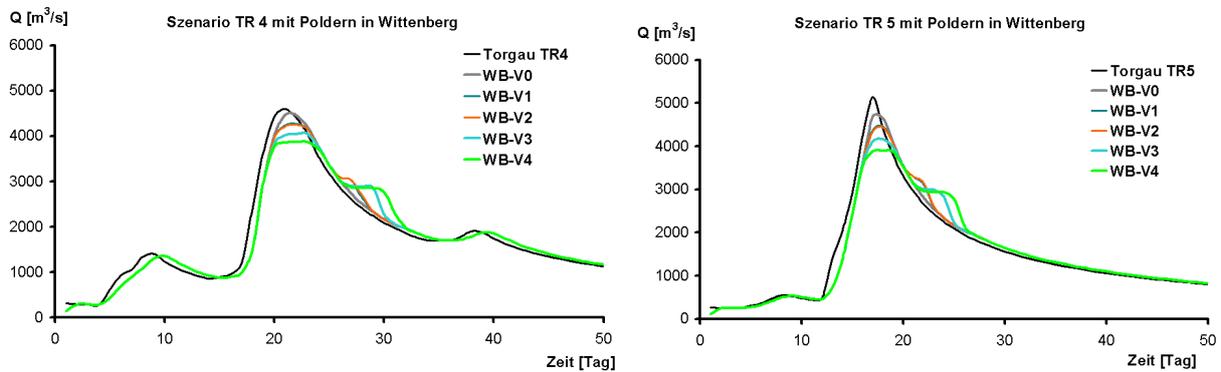


Abbildung 6.14: Die Notpolderwirksamkeit in Wittenberg in allen Varianten von V0 bis V4 bei der Verwendung der Szenarien nach dem Treiber-Modell TR 4 und TR 5

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Scheitelkappung der nach dem Treiber-Modell generierten Szenarien an den Pegeln Wittenberg, Vockerode und Aken durch die verschiedenen Notpoldervarianten. Dabei ist es wichtig zu erwähnen, dass die Seitenzuflüsse (Schwarze Elster und Mulde) hier nicht beinhaltet sind.

Szenario	Pegel	Scheitelwert HQ [m³/s]					Diff. HQ [m³/s] zu V0			
		V0	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4
Treiber 4	Wittenberg	4465	4270	4249	4049	3866	196	216	416	599
	Vockerode	4488	4266	4144	4049	3791	222	344	440	697
	Dessau	4532	4197	4099	3914	3691	335	433	618	840
	Aken	4491	4196	4099	3914	3691	295	392	577	800
Treiber 5	Wittenberg	4689	4464	4400	4159	3898	225	249	530	791
	Vockerode	4755	4473	4299	4153	3801	282	456	603	955
	Dessau	4925	4373	4230	3956	3680	556	698	972	1249
	Aken	4782	4360	4226	3956	3680	422	556	826	1102

## 6.5 Zusammenfassung der Anwendung der Szenarien im Hinblick auf die Notpolderuntersuchung

Mittels der herangezogenen heutigen und historisch beobachteten Extremsituationen vom 2002, 1890 und 1862 wurden die wichtigsten Abflusscharakteristika solcher Ereignisse definiert und ihre Auswirkung im Einzugsgebiet ausführlich betrachtet und dokumentiert. Daneben wurden zahlreichen Studien und Nachsimulationen unter den verschiedensten Randbedingungen (Szenarien) durchgeführt, um das Abflussverhalten während einer Extremsituation besser verstehen zu können. Die Anzahl dieser natürlichen Extremereignisse ist nicht ausreichend, um die Planung von Hochwasser-

schutzmaßnahmen für künftige Ereignisse verantwortlich und wirtschaftlich begründen und andererseits das Hochwasserrisikopotenzial abschätzen zu können. Dafür wurden in den Kapiteln 6.2 bis 6.4 extreme Szenarien definiert und simuliert, um die Stichprobe der nur selten aufgetretenen Extremereignisse zu erhöhen.

Insgesamt wurden 27 Szenarienganglinien unter anderem für die Zwecke der Überprüfung der dämpfenden Wirksamkeit der geplanten steuerbaren Hochwasserretentionsräume (Notpolder) analysiert, sie sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst. Die Form und Größe der simulierten Abflussganglinien sind für die weiteren Analysen unvertretbar.

Bei der Retention der Wassermenge eines Ereignisses in den steuerbaren Notpoldern wurde davon ausgegangen, dass sie in Abhängigkeit von einer zuverlässigen Abflussvorhersage rechtzeitig gefüllt und damit gesteuert werden müssen. Das heißt, dass die hier gezeigte hochwasserdämpfende Notpolderfunktion nur Fall einer optimalen Steuerung gilt. Dabei handelt es sich um die maximale Ausschöpfung des vorhandenen Volumens in den geplanten Notpoldern, unter der Voraussetzung einer in der Zeit zuverlässigen Steuerung. Bei dieser Annahme wird das Ereignisvolumen einer Szenarienganglinie im Scheitelbereich in den Notpoldern unabhängig von der Größe des Scheitelwerts zurückgehalten, sodass die Betrachtung der Formen und Verläufe der Szenarien vor allem in den höheren Abflussbereichen für die Notpolderuntersuchung und Entwicklung der Steuerungsstrategie relevant ist. Die Notpolderwirksamkeit (Effizienz) von allen Varianten und bei allen Szenarien, die als Abflussdifferenz zwischen den Ganglinien mit und ohne Maßnahmen definiert ist, wird im Zusammenhang mit der Kappungsdauer, d.h. die Gesamtdauer der Notpolderfüllung, in der Abbildung 6.15 erläutert. Es ist deutlich zu erkennen, dass größere Abflussdrosselungen bei kürzeren Notpolderfüllungsdauern erreicht wurde. Beispielweise ist das Extremszenario SZE 9 (rekombinierte Inputgrößen vom August 2002) mit dem Scheitelwert von  $6012 \text{ m}^3/\text{s}$  in Dessau zu nennen, welches sich mit einem schnell steigenden und fallenden Ast und damit ebenfalls mit schmaler Form und geringerem Volumen im Scheitelbereich charakterisieren lässt. Trotz der Scheitelgröße kann eine Abflussreduktion um bis zu  $1549 \text{ m}^3/\text{s}$  bei einer Kappungsdauer von 60 Stunden nach den hier durchgeführten Analysen erreicht werden. Demgegenüber ist die Abflussreduktion von  $773 \text{ m}^3/\text{s}$  durch die Notpolderfüllung bei dem nach dem Treibermodell generierten Szenario TR 3 geringer, weil dieses Szenario im Scheitelbereich breiter, dadurch ebenfalls voluminöser und länger andauernder ist, wobei der Scheitelwert mit  $3963 \text{ m}^3/\text{s}$  wesentlich niedriger ist. Die Kappungsdauer beträgt 116 Stunden.

Die Heranziehung der historischen Ereignisse, sowie der künstlich modellierten Szenarien, die im Rahmen des RIMAX-Projekts definiert und simuliert wurden, zeigte sich für die fernere Überprüfung der beabsichtigten Retentionsmaßnahmen in Sachsen-Anhalt als notwendig, wobei die Variabilität einen wichtigen Bestandteil bei der Entwicklung der Steuerungsstrategie für die Notpolderfüllung darstellt. Aus den bisherigen Erkenntnissen der Kombination der Szenarien und der geplanten Notpolder lässt sich schlussfolgern, dass alle hier angewendeten extremen Abflüsse der Szenarien, ihrer Größenordnung das reale Ereignis vom 2002 um ein Wesentliches überschreiten, durch die Maßnahmen reduzierbar sind. Dies gilt nur unter der Voraussetzung einer verlässlichen und genauen Abflussvorhersage und optimaler Steuerung. Es kann angenommen werden, dass das Volumen während des Scheitels bei jedem Extremereignis zurückgehalten werden kann. Daraus resultiert die wichtige Frage der Steuerungsstrategie, die bereits vor dem nächsten Extremereignis entworfen und vorhanden werden muss. Darüber wird im nächsten Kapitel berichtet.

Tabelle 6.4: Zusammenfassung der für die Notpolderuntersuchung angewendeten beobachteten Extremereignisse sowie Szenarien mit kurzer Definition.

Bezeichnung	Beschreibung
HW 2002	beobachtetes Ereignis (ohne Deichbrüche)
HW 1890	beobachtetes Ereignis
HW 1862	beobachtetes Ereignis
COSMO REF	Nachsimulation der Niederschläge vom August 2002
COSMO N1	Simulation der Niederschläge, Verschiebung um 1 Zelle nach Nord
COSMO E1	Simulation der Niederschläge, Verschiebung um 1 Zelle nach Ost
COSMO S1	Simulation der Niederschläge, Verschiebung um 1 Zelle nach Süd
COSMO W1	Simulation der Niederschläge, Verschiebung um 1 Zelle nach West
COSMO N2	Simulation der Niederschläge, Verschiebung um 2 Zellen nach Nord
COSMO E2	Simulation der Niederschläge, Verschiebung um 2 Zellen nach Ost
COSMO S2	Simulation der Niederschläge, Verschiebung um 2 Zellen nach Süd
COSMO W2	Simulation der Niederschläge, Verschiebung um 2 Zellen nach West
COSMO TP10	Simulation der Niederschläge, Erhöhung der Temperatur um 1 K
COSMO TP15	Simulation der Niederschläge, Erhöhung der Temperatur um 1,5 K
COSMO RP10	Simulation der Niederschläge, Erhöhung der Luftfeucht um 10 %
COSMO RP20	Simulation der Niederschläge, Erhöhung der Luftfeucht um 20 %
Rek. SZE 1	Schneedecke März/April 2006 mit Niederschlag vom Dezember 1974
Rek. SZE 2	Schneedecke März/April 2006 mit Niederschlag vom Dezember 1974
Rek. SZE 3	Schneedecke März/April 2006 mit Niederschlag vom Dezember 1974
Rek. SZE 4	Schneedecke März/April 2006 mit Niederschlag vom Dezember 1974
Rek. SZE 5	Schneedecke März/April 2006 mit Niederschlag vom Mai 1978
Rek. SZE 6	Schneedecke März/April 2006 mit Niederschlag vom Mai 1978
Rek. SZE 7	HWE 2002 mit Vorgeschichte im Juli
Rek. SZE 8	Schneed. März/April 2006 + 20% höhere Niederschläge beim Hauptereignis
Rek. SZE 9	20% höhere Niederschläge beim Vorereignis im August 2002
Rek. SZE 10	20% höhere Niederschläge beim Hauptereignis im August 2002
TR 1	Simulation mit dem Treiber-Modell
TR 2	Simulation mit dem Treiber-Modell
TR 3	Simulation mit dem Treiber-Modell
TR 4	Simulation mit dem Treiber-Modell
TR 5	Simulation mit dem Treiber-Modell

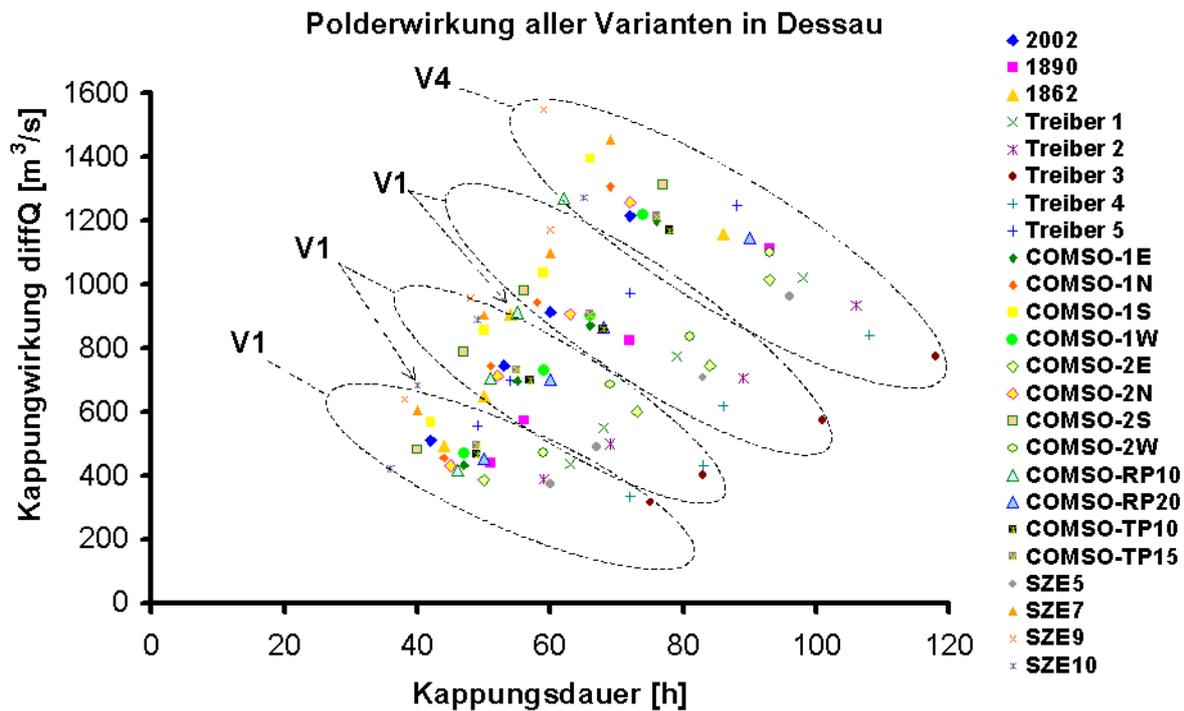


Abbildung 6.15: Die Notpolderwirksamkeit – Kappung – aller Varianten und aller angewendeten Ereignisse und Szenarien (2002, 1890, 1862, Treiber, COSMO und Rekombinationen) in Dessau in Abhängigkeit von der Kappungsdauer

Die mit den Notpoldern kombinierten Extremszenarien und deren Auswirkungen auf den Unterlauf stellen ebenfalls eine unvertretbare Randbedingung für die Planung von lokalen und weitgehenden Hochwasserschutzmaßnahmen, insbesondere im Hinblick auf die mögliche Wellenüberlagerung der Elbe und ihrer Zuflüsse, weil die Retentionsmaßnahmen oberhalb der Zuflüsse zu einer Verschärfung der Situation im Bereich des Unterlaufs führen könnten.

## 6.6 Überlagerung der RIMAX Szenarien der Elbe und Mulde

Die Anzahl der ausgewählten historischen und gegenwärtigen beobachteten Ereignisse reichen nicht aus, um eine zuverlässige Aussage bezüglich der Muldewirkung auf die Hochwassersituation im Bereich von Dessau und weiter stromabwärts treffen zu können. Dafür mussten die durch das RIMAX Projekt abgeleitete Szenarien auch bei dieser Untersuchung der Notpolderwirkung und -steuerung herangezogen werden. Das Verfahren und die Methode der Ableitung und Definition der Szenariensimulation sowie die angewendeten Modelle wurden bereits in den Kapiteln 6.2 bis 6.4 kurz herangezogen.

Nach der graphischen Darstellung und tabellarischen Zusammenfassung aller RIMAX Szenarien konnte festgestellt werden, dass es zur Überlagerungen in allen Fällen mit einem ein- bis zweitägigen Unterschied kam und damit zur erheblichen Verschärfung und Abflusserhöhung an der Elbe durch die hohen Muldeabflüsse. Diese Szenarien sind relevant für die weitere Untersuchung der Steuerungsstrategie der oben geplanten Notpolder. Die Szenarienscheitelwerte der Mulde variieren zwischen knapp 1000 bis 2100 m<sup>3</sup>/s, der Elbe zwischen 4000 bis 5900 m<sup>3</sup>/s. Die größten Scheitelwerte wurden

beim Winterszenario (Schneedecke vom 2006 kombiniert mit zusätzlichen Niederschlägen) SZE 5 an der Elbe mit 5474 m<sup>3</sup>/s und an der Mulde 2106 m<sup>3</sup>/s und nach der Überlagerung 7468 m<sup>3</sup>/s erreicht. Laut der Überlagerung in Dessau könnten die extremen Elbeabflüsse in Folge der hohen Muldeabflüssen um bis zu 1964 m<sup>3</sup>/s ohne Rückstaueffekte erhöht werden.

Im Vergleich zu den beobachteten und teilweise historischen Ereignissen, war die Scheitelwertüberlagerung der Mulde und Elbe in Dessau bei den generierten Szenarien dichter, sodass die Verschärfung der Hochwassersituation in Dessau und weiter stromabwärts erheblich zugenommen hätte.

*Tabelle 6.5: Überlagerung der Szenarien, die im Rahmen des RIMAX-Projekts abgeleitet wurden. Bei allen Szenarien kam es zur Überlagerung mit wesentlichen Abflusserhöhungen der Elbe. Die graphische Darstellung der Ganglinien ist in Abbildung 6.16 zu finden.*

Szenario	A9 Mulde	Datum	Vockerode Elbe	Datum	Überlager. Elbe + M.	Datum
<b>COSMO-1N</b>	1258	16.08.2002	4785	17.08.2002	5716	17.08.2002
<b>COSMO-1W</b>	1430	16.08.2002	4297	18.08.2002	5337	17.08.2002
<b>COSMO-2N</b>	1249	16.08.2002	4891	18.08.2002	5799	17.08.2002
<b>COSMO-RP10</b>	1373	15.08.2002	4811	17.08.2002	5799	17.08.2002
<b>COSMO-RP20</b>	1374	15.08.2002	3502	18.08.2002	4023	18.08.2002
<b>COSMO-TP10</b>	991	15.08.2002	4066	17.08.2002	4806	17.08.2002
<b>COSMO-TP15</b>	1045	15.08.2002	4541	17.08.2002	5273	17.08.2002
<b>SZE 10</b>	1649	16.08.2002	5856	18.08.2002	6873	17.08.2002
<b>SZE 7</b>	1866	16.08.2002	5585	18.08.2002	6793	17.08.2002
<b>SZE 9</b>	1719	16.08.2002	5368	18.08.2002	6179	17.08.2002
<b>SZE 5</b>	2106	01.04.2006	5474	02.04.2006	7438	02.04.2006

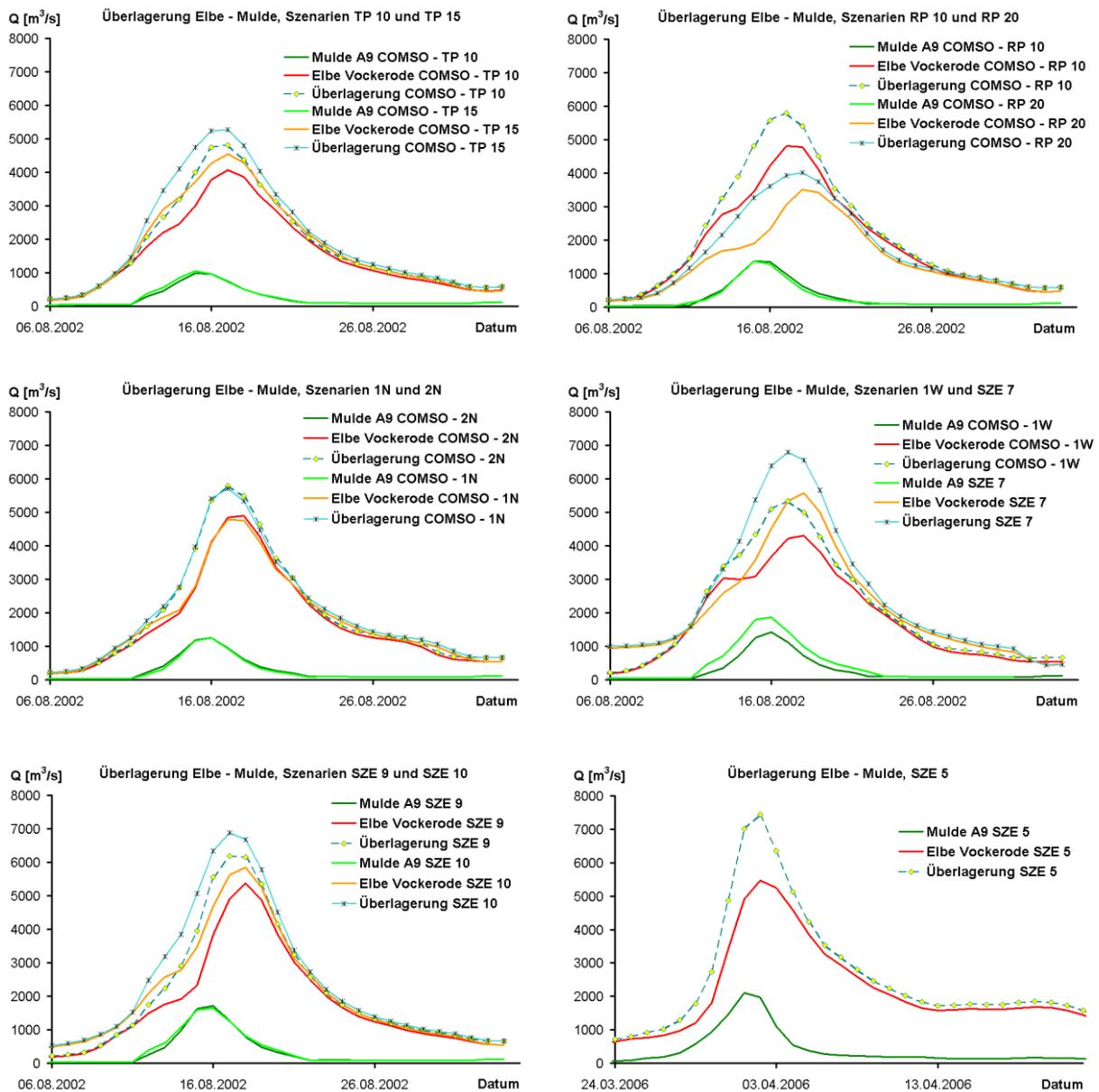


Abbildung 6.16: Überlagerung der Elbe und der Mulde bei den herangezogenen Szenarien, die im Rahmen des RIMAX- Projekts abgeleitet wurden. Die Überlagerung der Szenarien würde zur wesentlichen Verschärfung der Hochwassersituation im Mündungsbereich und weiter stromabwärts führen. Die Scheitelwerte und Datum des Auftretens sind in Tabelle 6.5 erfasst.

## 7 Operationeller Betrieb - Steuerungsstrategie

Das Ziel der gesteuerten Retentionsmaßnahmen ist die extremen Abflüsse eines Ereignisses durch die Rückhaltung des Spitzenvolumens zu kappen oder je nach der möglichen vorhergesagten Ereignisüberlagerung der unten mündenden Zuflüsse, den Elbescheitelwert zeitlich zu verzögern. Das höchste Risikopotential in Sachsen-Anhalt, wie bereits angesprochen wurde, befindet sich am Zusammenfluss der Elbe und Mulde in Dessau. Da die durch das Hochwasser gefährdete Stadt Dessau am Zusammenfluss der Elbe und der Mulde liegt, d.h. unterhalb der geplanten Maßnahmen, sollten die künftigen Notpolder im Hinblick auf den Einfluss der Mulde insbesondere bei der Wellenüberlagerung während des Scheitels (gesteuert) gefüllt werden. An dieser Stelle könnten die erhöhten zusätzlichen Abflüsse der Mulde die Hochwassersituation der Elbe im Mündungsbereich und weiter stromabwärts erheblich verschärfen.

Bei der Untersuchung der Steuerungsstrategie der oberhalb geplanten Notpolder wurde von zwei möglichen Gesichtspunkten ausgegangen:

- Die erste und einfachere Möglichkeit ist, die Notpolder an der Elbe ohne Berücksichtigung des Geschehens an der Mulde zu steuern. Auf diese Art könnte optimale Scheitelwertkappung unmittelbar unterhalb der Notpolderstellen erreicht werden, jedoch nicht weiter unten nach der möglichen Überlagerung der Zuflüsse.
- Die zweite Option ist die Notpolder an der Elbe in Abhängigkeit davon, was an der Mulde zu erwarten ist, zu steuern. Damit könnte zwar nicht die beste Abflussdrosselung unmittelbar unterhalb der Notpolderstellen erreicht werden, andererseits wäre dieses effektiver im Hinblick auf das Hochwasserschutzziel der Stadt Dessau.
- Die dritte Option wäre die Einbeziehung sowohl der Mulde als auch der Saale, die ebenfalls die Hochwassersituation an der Elbe verschärfen könnte. Diese wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Eine Auswertung der Überlagerung könnte nur anhand der historischen beobachteten Daten ergänzt werden. Für das Saaleinzugsgebiet wurden keine RIMAX Szenarien simuliert.

Um die hochwasserdämpfende Auswirkung der Notpolder an der Elbe in Dessau zusammen mit der Mulde quantifizieren zu können, wurde die Überlagerung der Mulde und Elbe bereits im Kapitel 4.6.2 anhand der beobachteten sowie simulierten Abflussganglinien untersucht. Das Ergebnis dieser Untersuchung sagt, dass die Mulde einen hochwasserverschärfenden Effekt auf die Abflussverhältnisse der Elbe in den meisten Fällen hatte und wahrscheinlich bei künftigen Extremereignissen haben könnte.

Im Kapitel 6 wurde die Notpolderwirksamkeit auf den Elbelauf bei historischen und gegenwärtigen Ereignissen sowie bei den verschiedenen simulierten Szenarien ohne Berücksichtigung der Mulde zusammengefasst. Dabei handelte es sich „nur“ um eine potenzielle Kappungswirkung der extremen Abflüsse der Elbe mittels der Notpolder bei der Erschöpfung ihrer geplanten vorhandenen Rückhaltevolumen unter den optimalen Bedingungen der steuerbaren Füllung, d.h. es handelt sich um einen Idealfall, der in der Natur kaum erreichbar ist. Theoretisch (optimal) könnten extrem hohe Abflüsse aller Ereignisse und Szenarien im Scheitelbereich gedrosselt werden, selbst die extremsten Szenarien wie z.B. SZE 10 oder COSMO-2N könnten laut der bisherigen Ergebnisse reduziert werden, siehe Abbil-

dung 7.1. Daraus ergibt sich die Fragestellung des Ziels, welches mit dem hochwasserdämpfenden Notpoldereffekt erreicht werden soll. Das Ziel ist der Hochwasserschutz vor allem der Stadt Dessau durch eine gesteuerte (kontrollierbare) Scheitelreduzierung der Elbe mit Berücksichtigung der verschärfenden Wirkung der Mulde.

Bei der Untersuchung der Steuerungsstrategie im Hinblick auf die Scheitelreduzierung im Bereich von Dessau wurde von zwei verschiedenen Annahmen ausgegangen:

- Eine Option ist die Notpolder so zu steuern, dass der maximale Abfluss gleich unterhalb der Notpolder reduziert wird, soweit das vorhandene Notpoldervolumen voll genutzt wird. Dieses wurde bereits oben beschrieben, jedoch ist die Muldewirkung hier nicht beinhaltet. Dafür wird es versucht, eine maximale Notpolderwirkung in Dessau unterhalb der Muldemündung zu erreichen. In beiden Fällen erfordert diese Annahme eine möglichst genaue Abflussvorhersage von beiden Einzugsgebieten. Dabei handelt es sich um eine operationelle Steuerung, die von der hydrologischen Vorhersage und dem aktuellen Geschehen im Einzugsgebiet abhängig ist. Auf diese Weise kann theoretisch eine Abflussdrosselung bei jedem Ereignis erreicht werden.
- Eine andere Option ist die Notpolder so zu steuern, dass ein vorgegebener maximaler Bemessungsabfluss in Dessau oder an anderer Stelle durch die Retentionsmaßnahmen nicht überschritten wird. Dieses würde in der Praxis bedeuten, dass bei sehr extremen Ereignissen die steuerbaren Retentionsmaßnahmen nicht mehr optimal funktionieren könnten und sie versagen könnten. Dadurch könnte der erwünschte Hochwasserschutzgrad nicht erzielt werden. Es muss akzeptiert werden, dass ein künftiges Hochwasserereignis so extrem sein könnte, dass man es durch Maßnahmen nicht mehr beeinflussen und bewältigen kann. Im Allgemeinen gilt: Jeder Hochwasserschutz ist nur bis zum bestimmten vorgeschlagenen Bemessungsabfluss optimal funktionsfähig. In gleichem Sinne wurde der sog. schadlose Abfluss der Moldau in Prag von den dortigen zuständigen Behörden definiert; er beträgt  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Beim Durchlauf dieser Abflussmenge durch Prag entstehen keine erheblichen Schäden durch den erhöhten Abfluss. Es wird angestrebt, diesen Abfluss in Prag nicht zu überschreiten. Dies wird mit der passenden Ausflusssteuerung der Moldauer Kaskade unter Berücksichtigung der aktuellen Abflussvorhersage der Moldau und ihrer Zuflüsse von Berounka und Sázava, die in die Moldau unterhalb der Talsperren fließen, durchgeführt. Nach dieser Kenntnis ist ein maximaler Bemessungsabfluss der Elbe in Dessau festzulegen.

## 7.1 Steuerungsstrategie mit Einbeziehung der Mulde

Da die vom Hochwasser gefährdete Stadt Dessau am Zusammenfluss der Elbe und Mulde liegt, müssen die Muldeabflüsse ebenfalls bei der Notpoldersteuerung der oberhalb der Mündung geplanten Notpolder einbezogen werden. Wie bereits im Kapitel 4.6 angesprochen wurde, könnten die erhöhten Muldeabflüsse zu einer ungünstigen verschärften Hochwassersituation in Dessau beitragen. Bei dieser Annahme wurde die maximale Abflussdrosselung der Elbe nach der Überlagerung mit der Mulde durch den Notpoldereinsatz untersucht und in diesem Kapitel werden die Ergebnisse präsentiert.

Dafür wurde die gleiche Methode (Retention und Flood-Routing) wie bei der Ermittlung der Notpolderwirksamkeit ohne Muldeinfluss mittels des FGM-Systems, welches den Elbelauf als Knotenmodell darstellt, angewendet, deren Ergebnisse im Kapitel 5 und 6 beschrieben sind. In dem Fall, in dem die Mulde nicht in Betracht gezogen wurde, wurde die maximale Abflusskappung nur an der Elbe insbesondere an den Pegeln Wittenberg und Vockerode, d.h. oberhalb der Muldemündung ausgewertet. Damit wurde die effizienteste Notpolderwirkung bis kurz vor Dessau jedoch ohne Muldewirkung nachgewiesen. Solche Scheitelreduzierung der Elbe kann nur teilweise die verschärfte Hochwassersituation im Bereich von Dessau durch die erhöhten Muldeabflüsse entspannen. Aus diesem Grunde wurde eine optimale Notpoldersteuerung im Hinblick auf die Muldeereignisse bzw. -Szenarien iterativ abgeleitet. Weil die beobachteten und ergänzten Scheitelwerte der Mulde den Mündungsbereich 1 bis 3 Tage vor dem Elbescheitel erreicht haben, siehe Kapitel 4.6.2, wo diese Problematik kurz angesprochen wurde, wurde diese Tatsache bei der Notpoldersteuerung berücksichtigt. Durch die Ereignisüberlagerung der beiden Flüsse entstand ein neuer Scheitelwert der Elbe unterhalb von Dessau, welcher etwa nur 1 Tag vor dem Elbescheitel (ohne Mulde) eintraf. Im Grunde genommen bedeutet es, dass die extremen Abflüsse der Elbeereignisse oder –Szenarien bereits vor dem Erreichen ihrer Scheitelwerte durch Notpolderfüllung gedrosselt werden müssen, um den wesentlichen Abflusszuwachs der Elbe von der Mulde minimieren zu können. Es wurde ein Abflussschwellenwert der Elbe des jeweiligen Szenarios bzw. Ereignisses noch oberhalb von der Muldemündung angenommen, der nicht überschritten werden darf. Es handelt sich um einen restlichen durch die Notpoldermaßnahmen reduzierten Abfluss der Elbe.

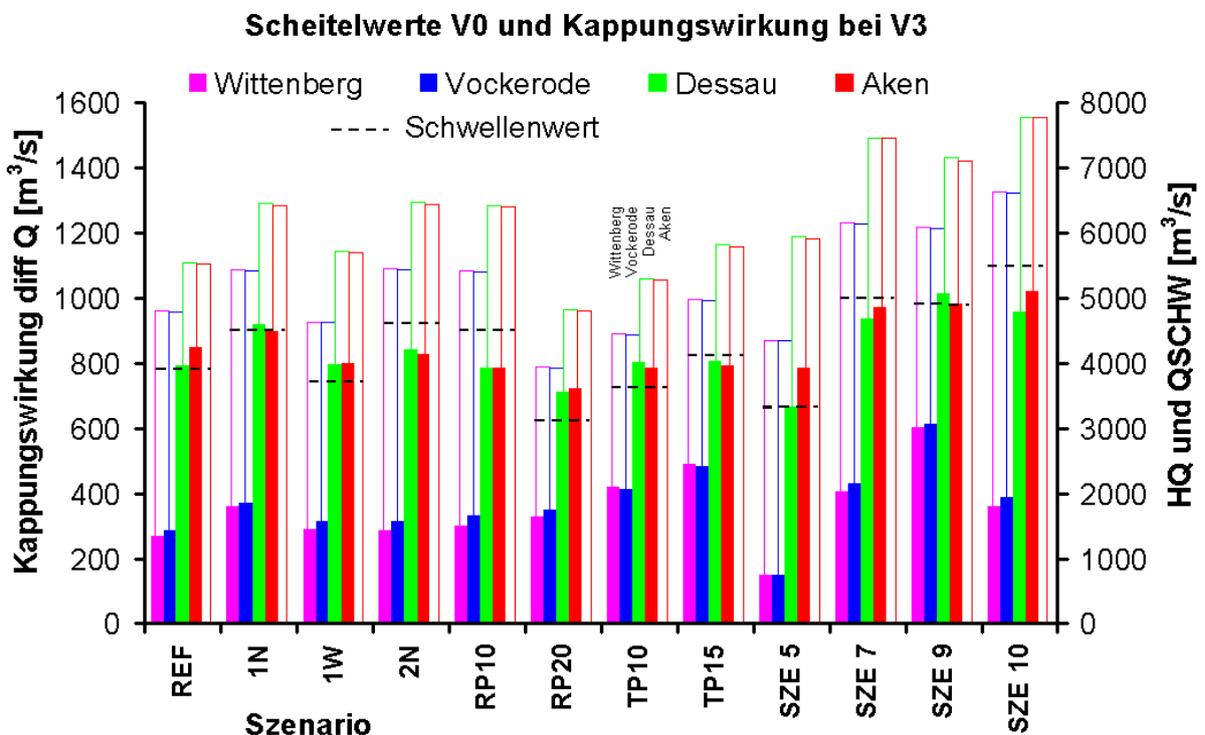


Abbildung 7.1: Die Ergebnisse der Notpolderwirkung bei V3 auf die Abflussreduzierung der Szenarien unter der Berücksichtigung der Mulde. Im Diagramm sind die HQ-Werte ohne Maßnahmen (dünne Balken) und die Kappungswirkung (Differenz zwischen V0 und V3, vollfarbige Balken) an den Pegeln dargestellt. Die Schwellenwerte, die nicht überschritten werden sollen, sind ebenfalls hier dargestellt.

Tabelle 7.1: Szenarienergebnisse der Notpoldersimulation unter der Berücksichtigung der Mulde. Ergebnisse der bevorzugten Notpoldervariante V3 sind auch auf der Abbildung 7.1 dargestellt. Die Wirkung in Dessau ist hier fett hervorgehoben.

Szenario	Pegel	Scheitelwert HQ [m <sup>3</sup> /s]					Diff. HQ [m <sup>3</sup> /s] zu V0			
		V0	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4
COSMO - REF	Schwellenwert		4400	4100	<b>3900</b>	3800				
	Wittenberg	4803	4643	4666	4535	4472	160	137	267	331
	Vockerode	4797	4624	4624	4511	4415	173	174	286	382
	<b>Dessau</b>	<b>5542</b>	5145	4874	<b>4750</b>	4598	397	668	<b>792</b>	943
	Aken	5528	5132	4830	4678	4571	396	698	850	956
COSMO - 1N	Schwellenwert		5000	4700	<b>4500</b>	4300				
	Wittenberg	5437	5207	5199	5078	5063	230	238	359	373
	Vockerode	5426	5200	5171	5056	5041	226	254	370	384
	Dessau	<b>6465</b>	6021	5676	<b>5544</b>	5373	444	789	<b>920</b>	1092
	Aken	6425	5989	5662	5527	5355	436	763	897	1070
COSMO - 1W	Schwellenwert		4200	3900	<b>3700</b>	3500				
	Wittenberg	4633	4458	4492	4342	4345	175	141	290	288
	Vockerode	4625	4432	4418	4313	4317	193	207	313	308
	Dessau	<b>5717</b>	5344	5056	<b>4920</b>	4750	373	661	<b>797</b>	967
	Aken	5702	5327	5035	4901	4730	374	666	800	972
COSMO - 2N	Schwellenwert		5100	4800	<b>4600</b>	4400				
	Wittenberg	5452	5296	5309	5167	5162	156	143	286	290
	Vockerode	5449	5276	5212	5135	5131	173	237	314	318
	Dessau	<b>6471</b>	6062	5757	<b>5631</b>	5458	409	714	<b>840</b>	1013
	Aken	6444	6049	5745	5615	5442	396	699	829	1002
COSMO - RP10	Schwellenwert		5000	4700	4500	4300				
	Wittenberg	5414	5252	5274	<b>5115</b>	5114	162	140	298	299
	Vockerode	5408	5221	5170	5077	5077	187	237	331	331
	<b>Dessau</b>	<b>6425</b>	6050	5749	<b>5641</b>	5478	375	676	<b>784</b>	947
	Aken	6407	6032	5728	5622	5459	375	679	785	948
COSMO - RP20	Schwellenwert		3500	3300	<b>3100</b>	2900				
	Wittenberg	3935	3769	3750	3608	3653	167	185	328	282
	Vockerode	3928	3745	3519	3579	3569	183	409	349	359
	Dessau	<b>4822</b>	4498	4238	<b>4109</b>	3913	324	584	<b>713</b>	909
	Aken	4806	4468	4206	4085	3895	338	600	721	910
COSMO - TP 10	Schwellenwert		4000	3800	<b>3600</b>	3400				
	Wittenberg	4453	4150	4130	4035	4050	303	323	418	403
	Vockerode	4442	4140	4022	4029	4047	301	420	412	395
	Dessau	<b>5304</b>	4868	4681	<b>4502</b>	4339	436	623	<b>802</b>	965
	Aken	5275	4856	4653	4488	4300	419	621	787	975

Fortsetzung der Tabelle 7.1

Szenario	Pegel	Scheitelwert HQ [m <sup>3</sup> /s]					Diff. HQ [m <sup>3</sup> /s] zu V0			
		V0	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4
<b>COSMO - TP 15</b>	Schwellenwert		4500	4300	4100	3900				
	Wittenberg	4979	4646	4595	4490	4507	333	384	489	472
	Vockerode	4966	4634	4284	4482	4503	332	682	484	463
	Dessau	5824	5368	5181	5016	4834	456	643	808	990
	Aken	5792	5356	5155	4999	4826	435	637	792	966
<b>SZE 5</b>	Schwellenwert		3700	3400	3300	3200				
	Wittenberg	4352	4272	4280	4203	4182	80	72	149	170
	Vockerode	4348	4268	4276	4199	4178	80	72	149	170
	Dessau	5942	5551	5261	5275	5097	391	681	667	846
	Aken	5911	5480	5190	5125	5026	431	720	786	885
<b>SZE 7</b>	Schwellenwert		5600	5300	5000	4800				
	Wittenberg	6161	5848	5871	5755	5746	313	291	407	415
	Vockerode	6141	5809	5628	5712	5703	332	513	429	437
	Dessau	7463	7000	6678	6528	6342	464	786	935	1121
	Aken	7460	6980	6657	6489	6322	480	803	972	1139
<b>SZE 9</b>	Schwellenwert		5400	5100	4900	4700				
	Wittenberg	6097	5799	5745	5495	5487	299	353	602	610
	Vockerode	6071	5757	5587	5457	5439	314	484	615	633
	Dessau	7164	6599	6214	6149	5982	565	950	1014	1182
	Aken	7107	6554	6189	6126	5958	553	918	981	1149
<b>SZE 10</b>	Schwellenwert		6100	5800	5500	5300				
	Wittenberg	6636	6395	6404	6275	6255	241	232	361	381
	Vockerode	6617	6353	6192	6230	6210	265	426	387	408
	Dessau	7771	7286	6937	6814	6588	485	834	957	1183
	Aken	7770	7284	6923	6749	6569	486	847	1020	1200

Die Notpolderwirkung von ausgewählten Szenarien und allen Varianten ist in der Tabelle 7.1 zusammengefasst. Im Allgemeinen lässt sich die Aussage treffen, dass die effektivste Scheitelreduzierung in Dessau sich bei der rechtzeitigen Drosselung gerade beim Abflussanstieg der Elbe durch den Rückhalt in den Notpoldern beweisen lässt, da der Muldescheitel in der Regel vor dem Elbescheitel früher eintreffen kann. Dadurch kann die wesentliche Abflusserhöhung der Elbe unterhalb der Muldemündung verringert werden, siehe Abbildung 7.2.

Beispielweise beim Szenario COSMO-1W und bei der Notpoldervariante V3 wurde der Schwellenwert auf 3700 m<sup>3</sup>/s oberhalb der Muldemündung gelegt, bei dem die größte Abflussreduzierung im Bereich von Dessau nach der Überlagerung der beiden Flüsse erreicht werden könnte. Damit könnte die Scheitelkappung in Wittenberg nur 290 m<sup>3</sup>/s während in Dessau knapp 800 m<sup>3</sup>/s durch Simulation erreicht werden.

Werden die Ergebnisse der Notpolderuntersuchung mit Einbeziehung der Mulde, die in der Tabelle 7.1 zusammengefasst sind, insbesondere bei der von den zuständigen Behörden bevorzugten Not-

poldervariante V3 betrachtet, kann schlussgefolgert werden, dass die Effektivität der Scheitelkappung in Dessau durch die drei Notpolder zwischen 667 (SZE5) und 1014 (SZE9)  $\text{m}^3/\text{s}$  unter optimalen Steuerungsbedingungen variiert. Demgegenüber in Wittenberg variiert die Notpolderwirkung zwischen 149 (SZE5) und 602 (SZE9)  $\text{m}^3/\text{s}$ , wobei die effektivste Wirkung hier nicht erreicht wurde, weil das Hauptziel der Hochwasserschutz in Dessau ist. Dies erfordert jedenfalls eine verlässliche und genaue Abflussvorhersage beider Flüsse, um die Notpolder operationell steuern zu können, d.h. rechtzeitig füllen zu können.

Die Abflussschwellenwerte ( $Q_{\text{SCHW}}$ ), die unmittelbar unterhalb der Notpolder nicht überschritten werden sollen, wurden iterativ im Hinblick auf das Muldeereignis für alle Szenarien mittels FGM-Systems festgestellt. Der Schwellenwert ist maßgeblich für die Entscheidung zur Notpolderfüllung, d.h., ein restlicher Abfluss entsprechend dem Schwellenwertabfluss unterhalb der Maßnahmen bleibt in der Elbe und das, was höher ist, wird in den Notpoldern zurückgehalten. Wie sensitiv das System beispielsweise bei der Variante V3 ist, wenn der Schwellenwert falsch angenommen wurde, ist auf der Abbildung 7.3 gezeigt. Die Iteration des Schwellenwerts folgte im Schritt von  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Als Auswertungsmaß wurde der durch die Notpolder geringste vereinigte Abfluss nach der Überlagerung der Elbe mit der Mulde in Dessau angenommen, d.h. bei welchem Schwellenwert wurde die Notpolderwirksamkeit in Dessau am effektivsten, siehe Tabelle 7.1, Abbildung mit einem Säulendiagramm 7.1 und Abbildung 7.3. Die Größen der ermittelten Schwellenwerte der Szenarien variieren zwischen  $3100 \text{ m}^3/\text{s}$  bei COSMO RP 20 und  $5500 \text{ m}^3/\text{s}$  bei SZE 10.

Eine wichtige Fragestellung ergibt sich zu der Zuverlässigkeit des Systems, insbesondere im Hinblick auf die optimalste Scheitelkappung durch die rechtszeitige Notpolderfüllung, die mit der Genauigkeit der Abflussvorhersage stark zusammenhängt. Auf der Abbildung 7.3 wird beim Szenario COSMO-REF und Notpoldervariante V3 erklärt, wie sich die hochwasserdämpfende Wirkung auf den Unterlauf ändern könnte, falls die Notpolder zu früh oder zu spät gefüllt werden. Dazu ist wichtig zu vermerken, dass die in der Tabelle 7.1 angegebenen Schwellenwerte als ereignisbezogen gelten und es handelt sich nicht um festgelegte Werte, die für alle künftigen extremen Ereignisse gültig wären. Bei dem operationellen Betrieb müsste vom Schwellenabfluss an einem oberen Meldepegel z. B. Torgau entschieden werden. Die Ereignisform und -größe ist bereits von der oberen Elbe bekannt oder zumindest vorhersehbar. Beispielsweise beim Szenario COSMO-REF könnte die optimalste Notpolderwirksamkeit in Dessau erreicht werden, wenn der restliche Abfluss nicht  $3900 \text{ m}^3/\text{s}$  überschreitet. Dieser Wert wäre bei jedem Extremereignis schwierig einzuhalten, da das Verhalten und weitere Entwicklung eines Ereignisses oft kaum vorhersagbar ist. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden ebenfalls andere Schwellenwerte, bei denen die Notpolderfüllung anfang, angenommen. So ist deutlich zu erkennen, dass die Notpolderwirkungen in Dessau bei der Erhöhung oder Senkung des Schwellenwerts nur geringfügig voneinander abweichen. Bei Schwellenwerten zwischen  $3900$  und  $4200 \text{ m}^3/\text{s}$  variiert der gekappte Abfluss in Dessau von  $4750$  bis  $4795 \text{ m}^3/\text{s}$ . Demgegenüber könnte es zu einer wesentlichen Abflusserhöhung unterhalb der Maßnahmen kommen, wenn die Notpolder bei einem zu niedrig gelegten Schwellenwert von  $3800 \text{ m}^3/\text{s}$  gefüllt werden, sodass der restliche gekappte Abfluss  $5115 \text{ m}^3/\text{s}$  betragen würde.

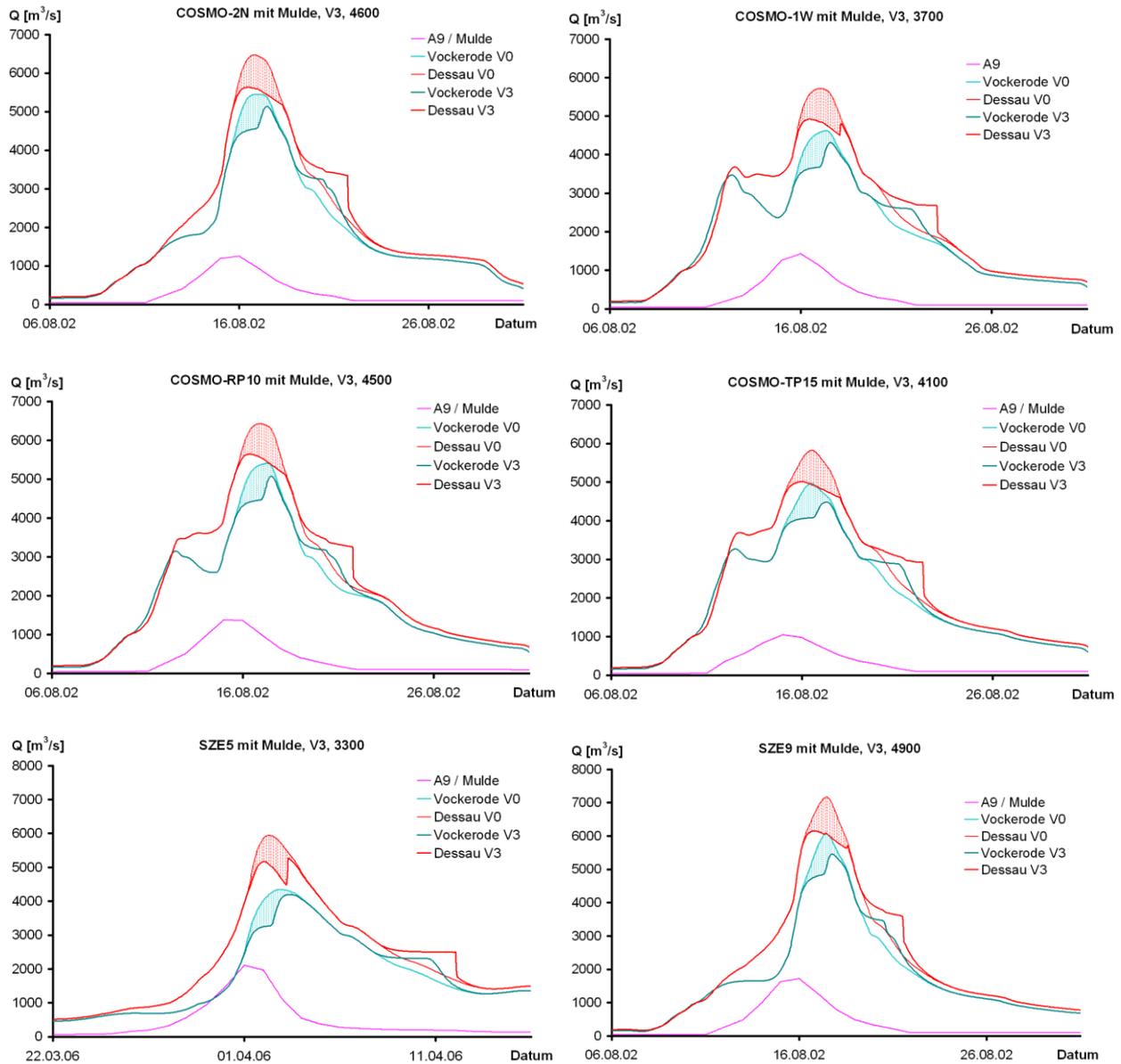


Abbildung 7.2: Die Abflussganglinien der ausgewählten Szenarien mit Einbeziehung der Mulde und mit der Notpolderwirkung der Variante V3 in Vockerode und Dessau. Die Notpolder sollen so gesteuert werden, dass die größte Abflussreduzierung nach der Überlagerung der Elbe und Mulde in Dessau erreicht wird. So ist in Vockerode deutlich sichtbar, dass vor allem der ansteigende Ast durch die Notpolder P1 und P3 reduziert wurde. Dadurch wurde nicht die effektivste Abflussdrosselung in Wittenberg und Vockerode erreicht, jedoch die effektivste Abflussdrosselung wurde in Dessau (einschließlich mit Wirkung des P7) nachgewiesen. Bei jeder Szenariensimulation ist der Abflussschwellenwert vermerkt. Die numerischen Werte sind in der Tabelle 7.1 zusammengefasst.

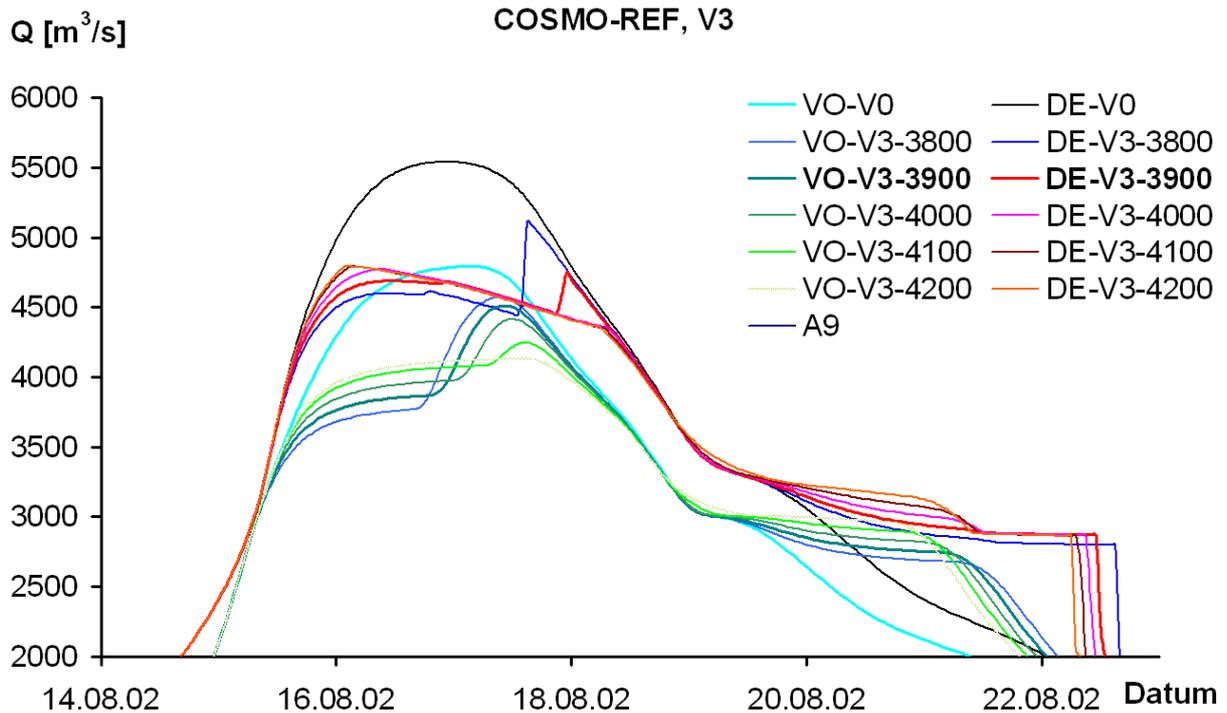


Abbildung 7.3: Eine Detailsicht auf die Abflussganglinien in Vockerode (VO) und in Dessau (DE) des Szenarios COSMO-REF. Die effektivste Abflusskappung in Dessau variiert nur um  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  bei Schwellenwerten ab  $3900 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Die hier gezeigten Schwellenwerte, bei denen die Notpolder gefüllt werden sollen, wären in der Praxis schwierig einzuhalten, dafür ist eine Spannweite der Schwellenwerte, bei der durch die Notpolder noch eine optimale hochwasserdämpfende Wirkung in Dessau erreicht werden kann, hilfreich. Der Abflussbereich zwischen  $3900$  und  $4200 \text{ m}^3/\text{s}$  entspricht den Wasserständen nach der offiziellen Abflusskurve der BfG in Wittenberg (W-Q-Beziehung)  $657$  und  $667 \text{ cm}$ , d.h. nur  $10 \text{ cm}$  Spannweite des Wasserstandes, siehe Abbildung 7.4. Die Kappungswirkung der Notpolder als Wasserstandsdifferenz in Dessau ist nicht direkt feststellbar, da keine Abflusskurve des Profils dieser Arbeit vorliegt. Die nächste Abflusskurve der Elbe unterhalb von Dessau besteht am Pegel Aken. Der Wasserstand ohne Maßnahmen nach dieser Kurve für dieses Szenario wäre  $837 \text{ cm}$  und bei der optimalen Steuerung der Variante V3  $800 \text{ cm}$ . Bei den o.g. Schwellenwerten würden die reduzierten Wasserstände nur vernachlässigbar um  $2 \text{ cm}$  voneinander abweichen. Ähnliche Ergebnisse, die hier nicht dargestellt sind, wurden bei allen Szenarien identifiziert. Eine solche Genauigkeit wäre in der Realität während eines Extremereignisses kaum erreichbar und vorhersagbar.

Dieses ist eine wichtige Erkenntnis für die Aussage über die Sensitivität eines solchen Systems. Trotz abweichender Annahme des Schwellenwertes könnte eine befriedigende hochwasserdämpfende Wirksamkeit - Abflusskappung - in Dessau erreicht werden.

Der maximale Bemessungsabfluss wurde im Rahmen dieser Arbeit in Dessau für die Zwecke der Notpolderuntersuchung vom heutigen bzw. künftigen Zustand und den Höhen der Deiche definiert. Von den zuständigen Behörden in Sachsen-Anhalt (LHW) wird angestrebt, die Höhen der Schutzdeiche entsprechend des Elbewasserstands, der beim Ereignis 2002 erreicht wurde, zusätzlich um einen Meter erhöht auszubauen. Die Deiche wurden unter dieser Annahme ausgebaut oder sie sollen so

ausgebaut werden. Dadurch hat der Elbeschlauch im Bereich der Stadt Dessau eine gegebene maximale Leistungsfähigkeit, die unter anderem von den Deichhöhen abhängt. Bis zur definierten Leistungsfähigkeit soll der Hochwasserabfluss schadlos durch den Stadtbereich abgeleitet werden. Dieser Arbeit liegen die Informationen über die Deiche und Ausbauvorhaben nach dem Ereignis 2002 nicht vor. Bereits 2003 wurde eine Studie (Macke 2001) zur Verfügung gestellt, in der Informationen über den Zustand der Deiche entlang der Elbe und Mulde im Jahr 2001 und über das Vorhaben des Zukunftszustandes nach dem Ausbau ausführlich dokumentiert sind.

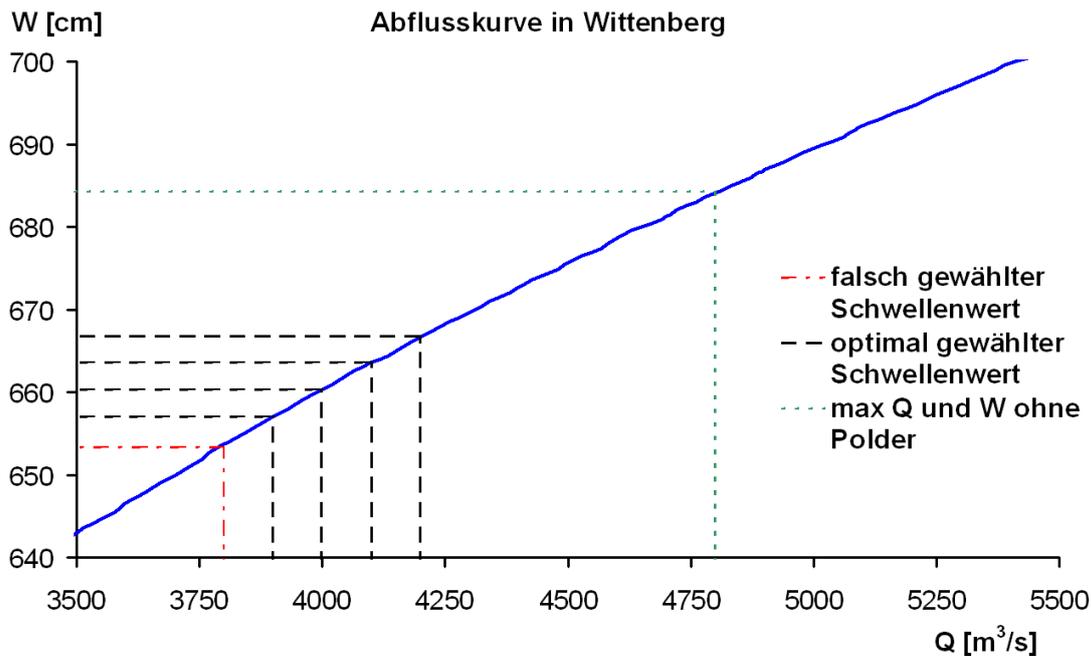


Abbildung 7.4: Abflusskurve ( $W$ - $Q$ -Beziehung) des Profils in Wittenberg, nach der die Abflüsse mittels der beobachteten Wasserstände abgelesen wurden. In der Abbildung ist der maximale Wasserstand ohne Maßnahmen dargestellt, optimaler Bereich zwischen 657 und 667 cm (10 cm Spannbreite) und falsch gewählter Schwellenwert, bei dem die Notpolderwirkung in Dessau nach der Überlagerung mit der Mulde nicht erreicht wurde. Die Werte sind auf das Szenario COSMO-REF und die Notpoldervariante V3 bezogen.

## 7.2 Lokale Abflusentnahme in die Notpolder

In den vorherigen Kapiteln wurde die Notpolderwirksamkeit an wichtigen Stellen als reduzierte Abflussganglinie für beobachtete Ereignisse sowie Szenarien simuliert und dargestellt, daneben wurden die Ganglinien ohne Maßnahmen ebenfalls dargestellt. Die Notpolderwirksamkeit kann als ein Band zwischen der Ganglinie mit und ohne Maßnahmen interpretiert werden, jedoch ist dies keine exakte Entnahmeganglinie vom jeweiligen Notpolder. Für die Planung und Bemessung der Einlaufbauwerke und eine lokale Untersuchung ist sie nicht ausreichend genau. Dieses „Band“ ist von dem Flood-Routing-Prozess im Gerinne erheblich beeinflusst. Mittels des FGM- Programmsystems, welches den Elbelauf mit den wichtigen Pegel- und Notpolderstellen als Knotenplan beschreibt, wurde die Entnahme als Unterschiedsganglinie zwischen den oberen unteren Ganglinien an den Notpolderstandorten ermittelt. Die Entnahme von der Elbe kann als der restliche Abfluss vorgestellt werden, der über

den Schwellenwert hinaus geht, gleichzeitig kann er als Zufluss in den Notpolder bezeichnet werden. Auf der Abbildung 7.5 ist die Entnahme in einzelne Notpolder bei der Variante V3 und dem Szenario COSMO-REF dargestellt. Da die Notpolder P1 und P3 nebeneinander mit einem Deich getrennt geplant sind, könnten die beiden Notpolder durch nur ein Einlaufbauwerk bestimmter Leistungsfähigkeit gefüllt werden, wodurch ein Einlaufbauwerk gespart werden kann.

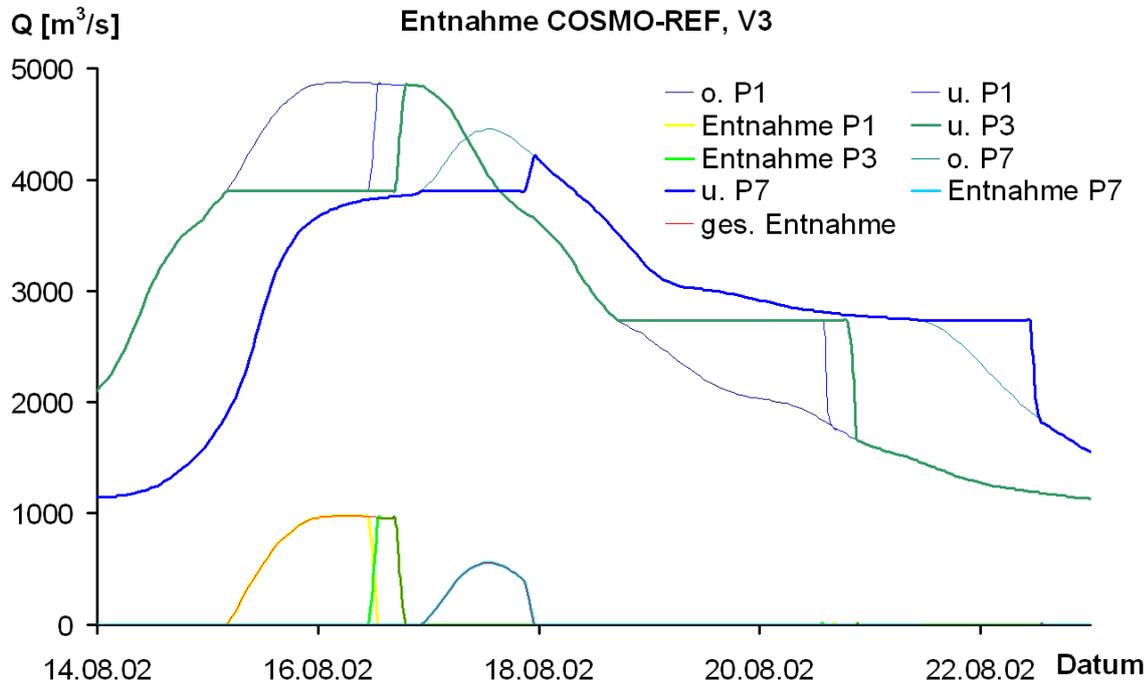


Abbildung 7.5: Abflussentnahme (Zufluss) beim Szenario COSMO-REF und Notpoldervariante V3 durch die einzelnen Notpolder P1, P3 und P7. In der Abbildung sind die Ganglinien unmittelbar oberhalb (o.) und unterhalb (u.) der Notpolderstellen dargestellt. Notpolder P1 und P3 können durch ein Einlaufbauwerk gefüllt werden, da sie nebeneinander vorgesehen sind.

Die Formen der Entnahmeganglinien (Zuflussganglinien) wurden für alle Szenarien ermittelt. Die Formen sind selbstverständlich von den Szenarienvläufen abhängig, siehe Abbildung 7.6, die den aktuellen Wasserständen der Elbe und denen in Notpoldern entsprechen. Die Entnahmeganglinien sind die wichtigsten Voraussetzungen für die Bemessungen der einzelnen Einlaufbauwerke. Für alle COSMO- Szenarien außer 1N soll die maximale Leistungsfähigkeit des Einlaufbauwerks bei P1+3 um  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  und bei P7 um  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  betragen. Beim Szenario 1N müsste die Leistungsfähigkeit bis  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  betragen. Bei den rekombinierten Szenarien SZE 5, 7, 9 und 10 variiert die maximale Entnahme zwischen  $1100 \text{ m}^3/\text{s}$  bis  $1450 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Dauer der Füllung von der Klappenöffnung bis zum Notpoldervollstau variiert von 34 bis 46 Stunden bei P1+3 und von 19 bis zu 36 Stunden bei P7. Die Entnahmeganglinien gelten als theoretisches erwünschtes Ziel und sie sind nur ereignis- bzw. szenariospezifisch. Sie stellen die Herausforderungen und Randbedingungen für eine detailliertere hydraulische Untersuchung dar, die nicht Bestandteil dieser Arbeit ist.

Oben wurde die Entnahmeganglinie als Zuflussganglinien in den jeweiligen Notpolder simuliert und dargestellt, obwohl das Ziel ein restlicher Abfluss der Elbe einzuhalten ist, bei dem ein Schwellenwert

nicht überschritten werden soll und wie beispielsweise in der Abbildung 7.5 erläutert ist, soll dieser über eine bestimmte Zeit konstant eingehalten werden.

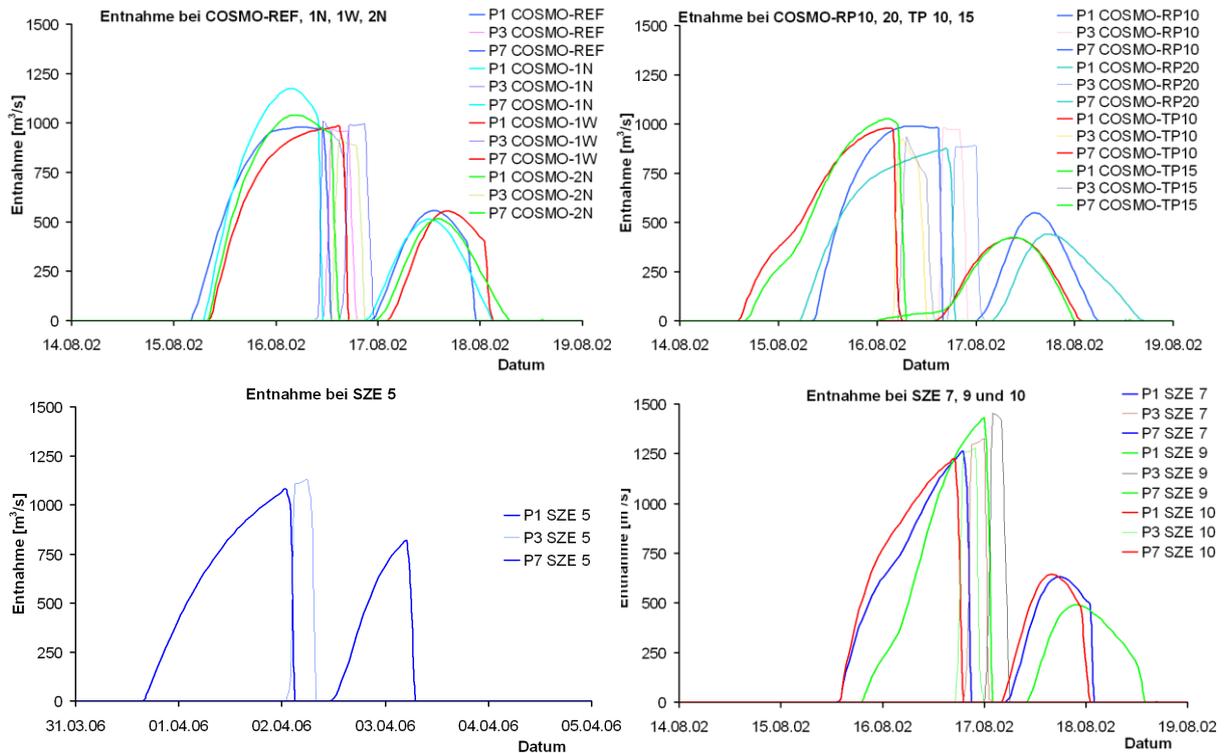


Abbildung 7.6: Entnahmeganglinien (Zuflussganglinien in die Notpolder) von den Szenarien für die Notpoldervariante V3 an den Standorten P1+3 und P7.

### 7.3 Ergebnisse der Simulation der Szenarien mit den Notpoldern in den Längsschnitten

Ergebnisse der oben erwähnten Simulationen der weitläufigen hochwasserdämpfenden Wirkung der geplanten Notpolder lassen sich einfach und übersichtlich in den Längsschnitten mittels des Programmsystems FGM darstellen. In den Längsschnitten ist eine großräumige Entwicklung der Abflüsse – in diesem Fall Hochwasserscheitelwerte - entlang der untersuchten Strecke der Elbe von Torgau bis Aken beinhaltet. Mit dieser Darstellung kann an beliebiger Stelle der Elbe der maximale Abfluss der beobachteten sowie simulierten Ereignisse sofort ermittelt werden. Auf allen folgenden Abbildungen 7.6 bis 7.11 ist die weitläufige Wirkung der einzelnen Notpolder (P1+3 und P7) der bevorzugten Variante 3 und des erheblichen Einflusses der erhöhten Muldeabflüsse bereits in dem vom Hochwasser meist gefährdeten Bereich von Dessau zu sehen. Hierbei ist auf den Unterschied zwischen den zwei verschiedenen Annahmen der Steuerung (mit und ohne Mulde) hinzuweisen. Insbesondere bei Szenario SZE 5 ergaben sich wesentliche Unterschiede in Dessau, sodass die Wirkung der Mulde bei dem operationellen Betrieb der Notpolder einbezogen werden muss. Im Gegenteil beim Szenario COSMO-TP15 ergaben die beiden Simulationen voneinander nur geringfügige Abweichungen.

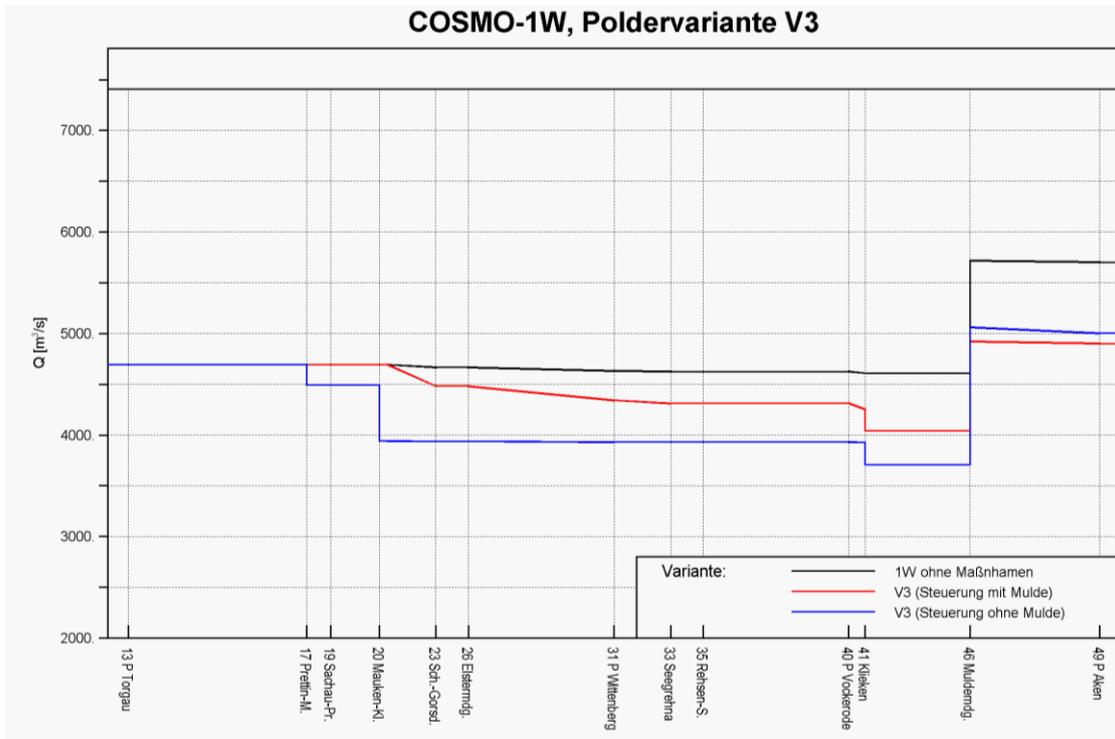


Abbildung 7.6: Hochwasserlängsschnitt des Szenarios COSMO-1W ohne Notpoldermaßnahmen und mit Maßnahmen der Notpoldervariante V3 für zwei mögliche Annahmen – mit und ohne Berücksichtigung der verschärfenden Wirkung der Mulde

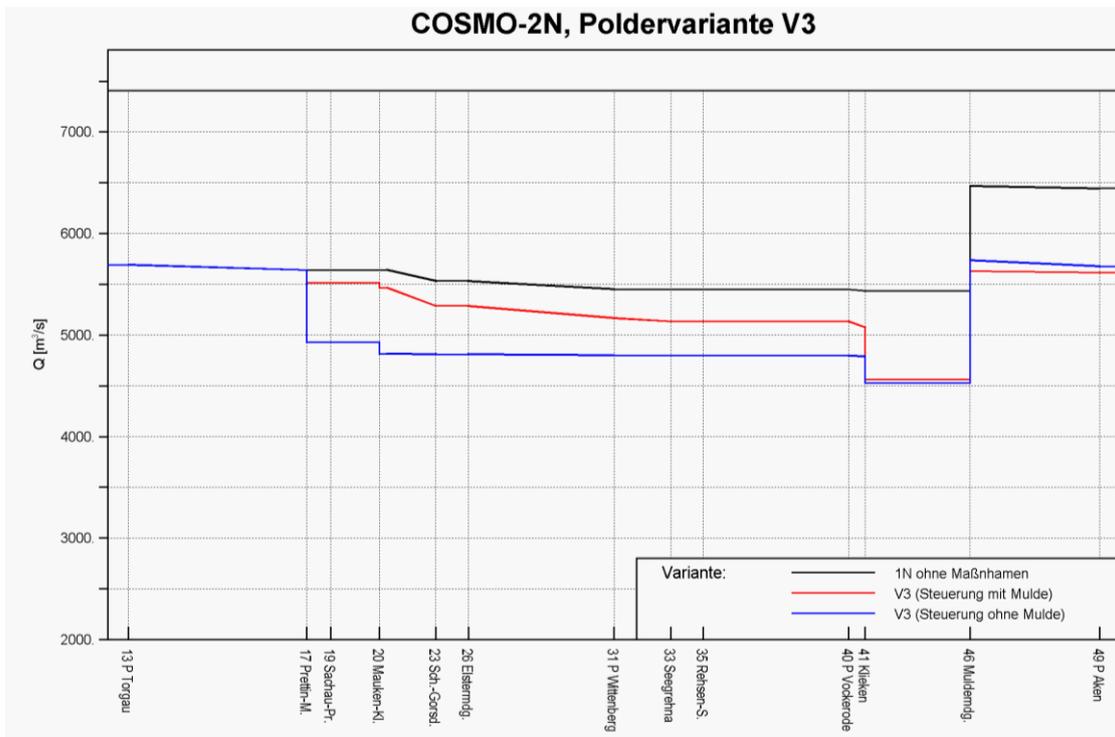


Abbildung 7.7: Hochwasserlängsschnitt des Szenarios COSMO-2N ohne Notpoldermaßnahmen und mit Maßnahmen der Notpoldervariante V3 für zwei mögliche Annahmen – mit und ohne Berücksichtigung der verschärfenden Wirkung der Mulde

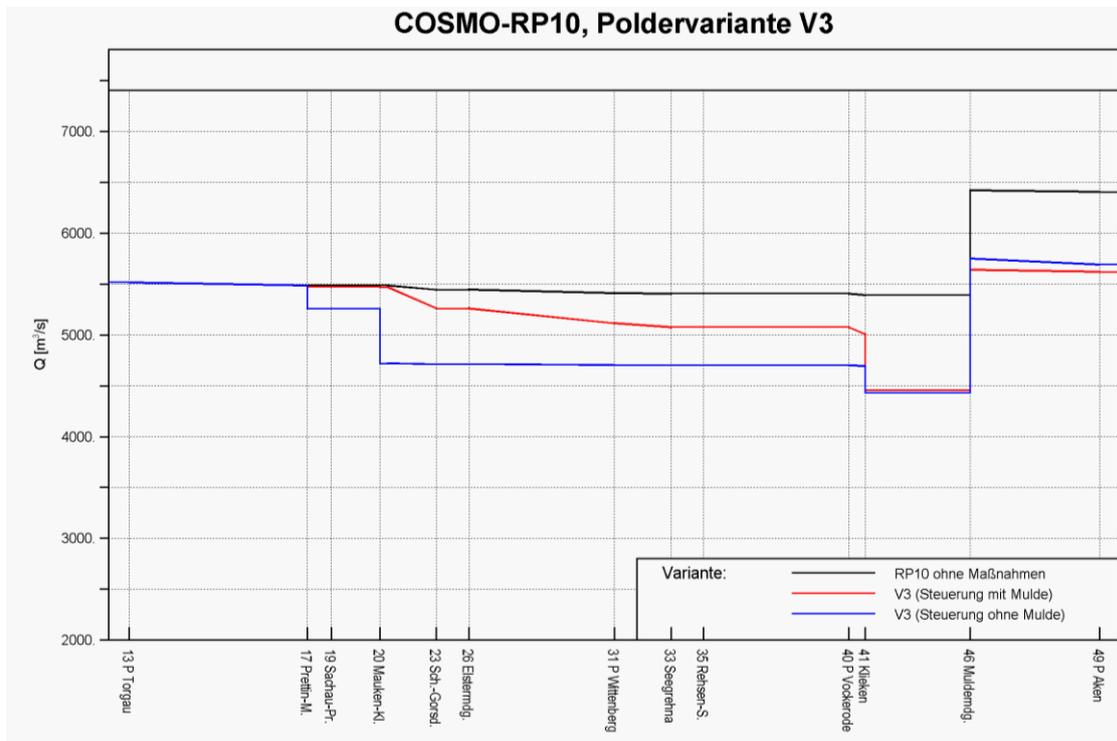


Abbildung 7.8: Hochwasserlängsschnitt des Szenarios COSMO-RP10 ohne Notpoldermaßnahmen und mit Maßnahmen der Notpoldervariante V3 für zwei mögliche Annahmen – mit und ohne Berücksichtigung der verschärfenden Wirkung der Mulde

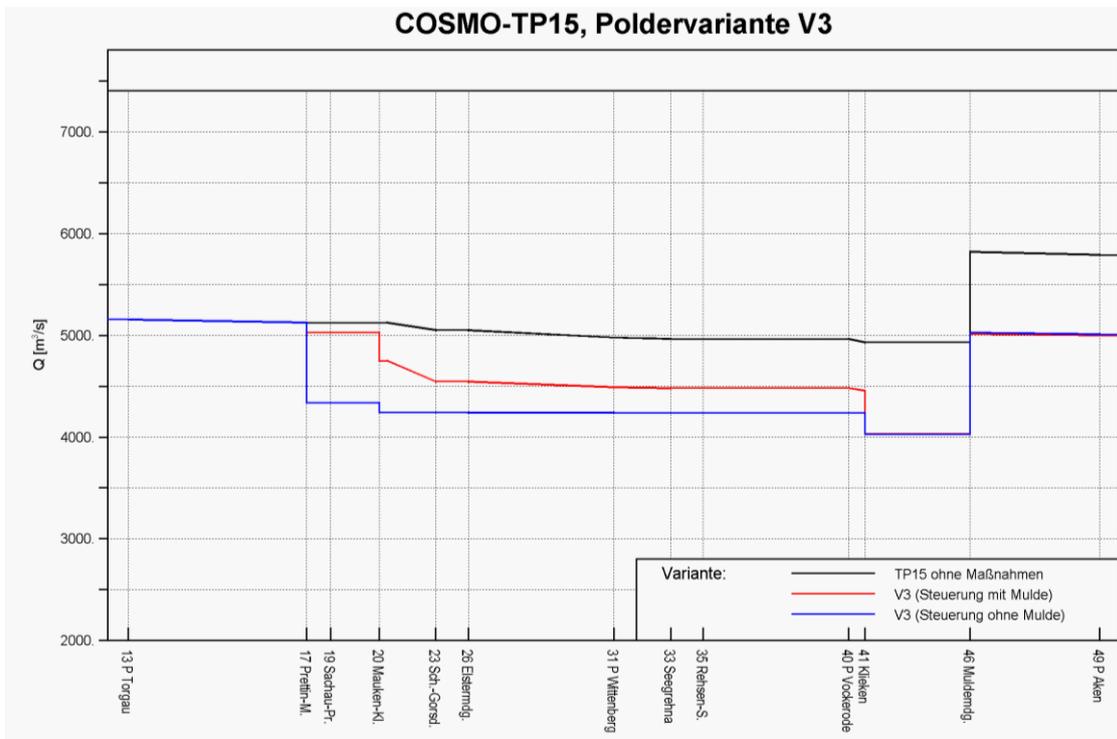


Abbildung 7.9: Hochwasserlängsschnitt des Szenarios COSMO-TP15 ohne Notpoldermaßnahmen und mit Maßnahmen der Notpoldervariante V3 für zwei mögliche Annahmen – mit und ohne Berücksichtigung der verschärfenden Wirkung der Mulde

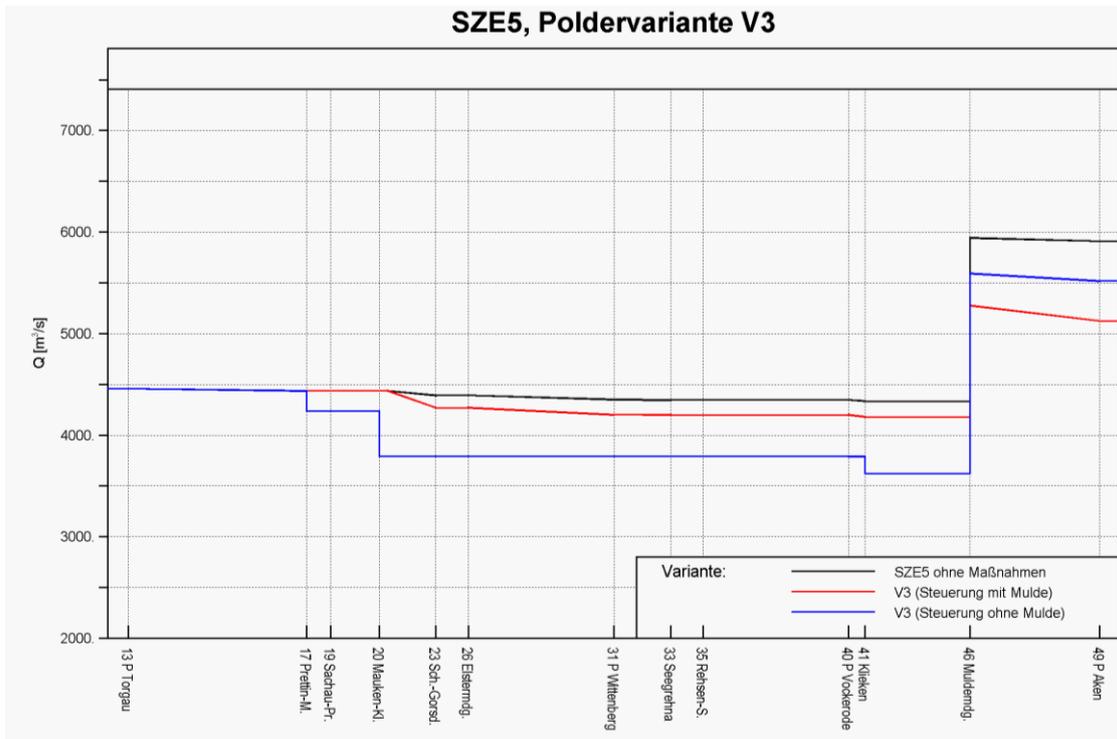


Abbildung 7.10: Hochwasserlängsschnitt des Szenarios SZE5 ohne Notpoldermaßnahmen und mit Maßnahmen der Notpoldervariante V3 für zwei mögliche Annahmen – mit und ohne Berücksichtigung der verschärfenden Wirkung der Mulde

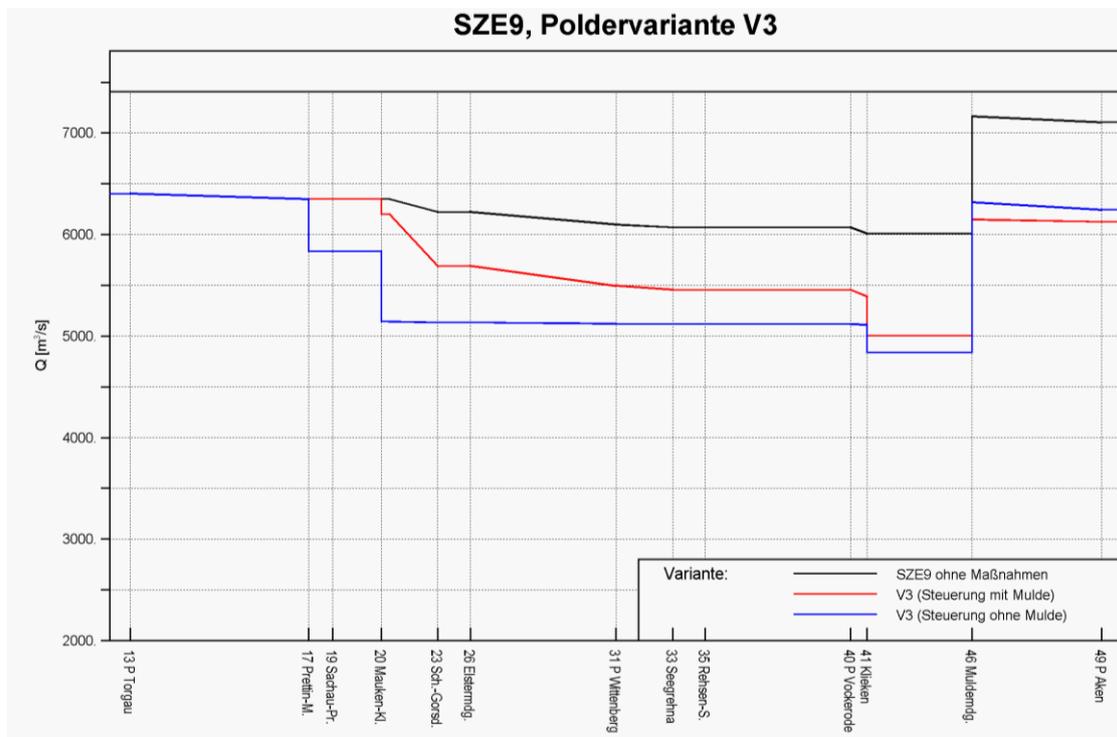


Abbildung 7.11: Hochwasserlängsschnitt des Szenarios SZE9 ohne Notpoldermaßnahmen und mit Maßnahmen der Notpoldervariante V3 für zwei mögliche Annahmen – mit und ohne Berücksichtigung der verschärfenden Wirkung der Mulde

## 7.4 Ergebnisse der Simulation mit den Notpoldern in den Plotting Positions

Die maximalen Abflusswerte der beobachteten Zeitreihen sowie der Simulationen wurden den empirischen Überschreitungswahrscheinlichkeiten in den folgenden Plotting Positions zugeordnet. Die maximalen Abflusswerte der Szenarien wurden hier ohne Zuordnung der Wahrscheinlichkeiten als Striche dargestellt. Um die Plotting Positions erstellen zu können, wurden maximale jährliche Abflüsse aus den überarbeiteten Zeitreihen, die im Rahmen eines BfG – Projekts (Helms 2013) anhand der historischen Wasserstandsbeobachtungen von den hydrologischen Jahressbüchern und abgeleiteten Abflusskurven ergänzt bzw. korrigiert wurden, herangezogen. Dazu ist wichtig zu vermerken, dass diese Reihen zur Zeit von den zuständigen Ämtern nicht als offiziell anerkannte Abflüsse gelten, sondern als Arbeitsgrundlagen für das o.g. Projektvorhaben.

Die Software „Hochwasseranalyse“ des IWG (Ihringer 1999) wurde angewendet, um diese Extremwertanalyse durchzuführen. Mit Hilfe dieses Programms wurden Plotting Positions nach Weibull sowie nach Blom im logarithmierten Gaussnetz erstellt. Weiter wurden vorgeschlagene erwartungstreue Verteilungsfunktionen durch die eingetragenen HQ-Werte erstellt. Die Güte der Anpassung erfolgte mittels des Kolmogoroff-Smirnov-Tests, siehe (Plate 1993), wobei die erwartungstreue Anpassung der Verteilungsfunktion visuell mit Hilfe der Graphiken ausgewählt wurde. Nähere Beschreibung der Plotting Positions und Anpassung der Verteilungsfunktion ist beispielsweise auf (Maidment 1993) zu verweisen.

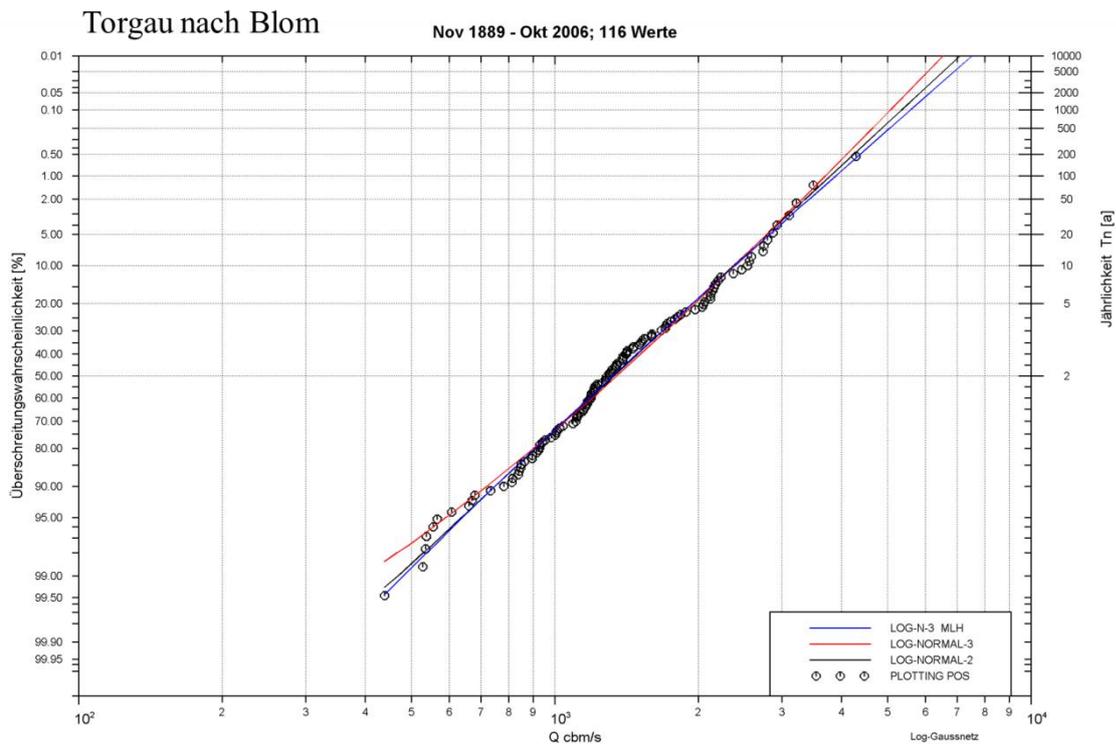


Abbildung 7.12: Plottins Positions am Pegel Torgau nach Blom von der Reihe 1890-2006 mit den angepassten Verteilungsfunktionen LOG-NORMAL 2 und 3

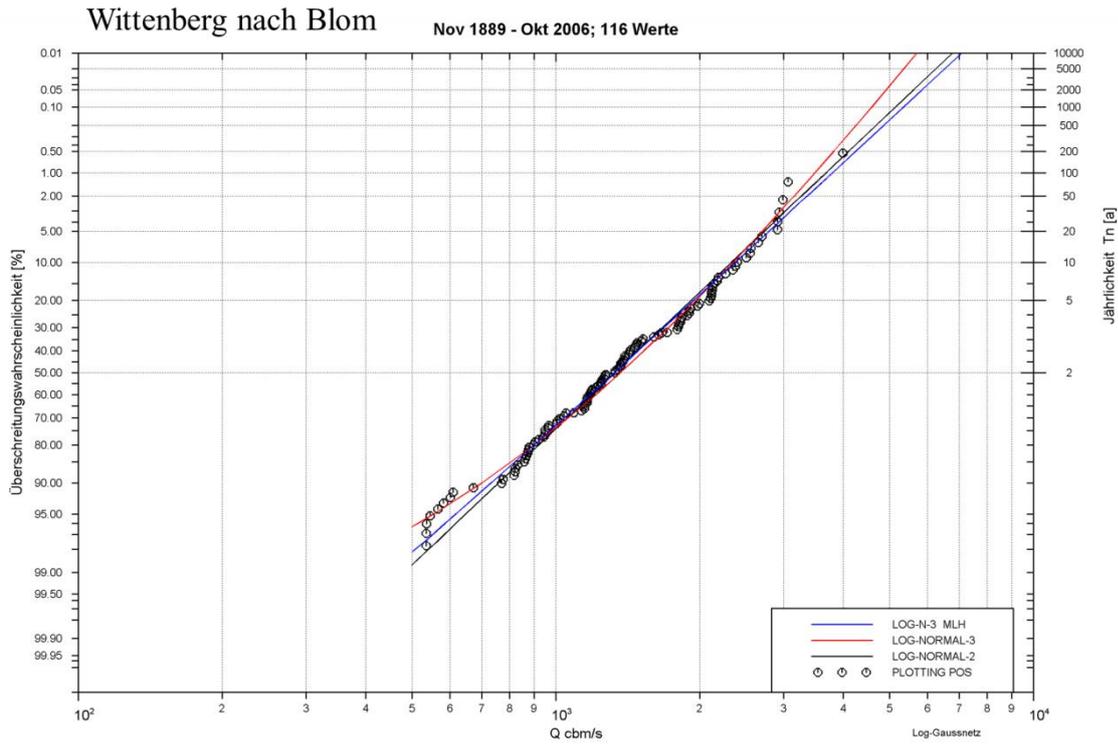


Abbildung 7.13: Plottins Positions am Pegel Wittenberg nach Blom von der Reihe 1890-2006 mit den angepassten Verteilungsfunktionen LOG-NORMAL 2 und 3

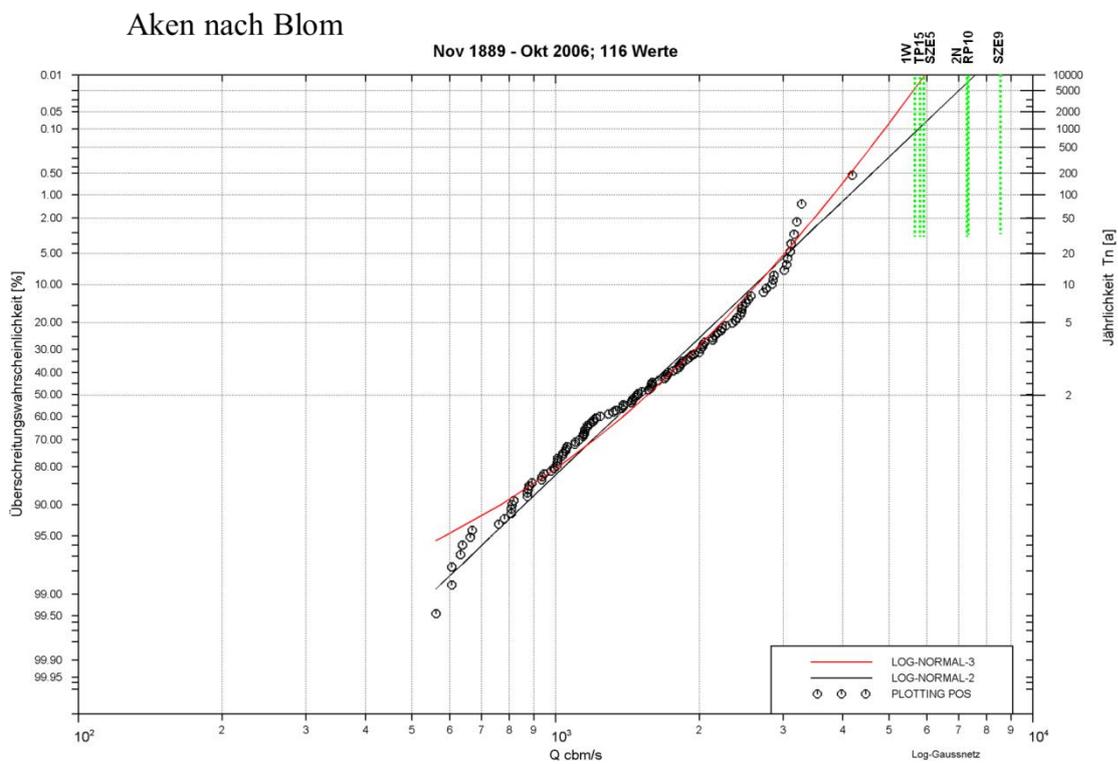


Abbildung 7.14: Plottins Positions am Pegel Aken nach Blom von der Reihe 1890-2006 mit den angepassten Verteilungsfunktionen LOG-NORMAL 2 und 3. Die ausgewählten Szenarien sind hier als Striche ohne Zuordnung des Wiederkehrinterwalls dargestellt.

Die Plottings Positions, siehe Abbildungen 7.12 bis 7.14, wurden für den Pegel Torgau (oberhalb der Maßnahmen), den Pegel Wittenberg (teilweise mit Maßnahmen) und den Pegel Aken (mit Maßnahmen und mit der Mulde) durchgeführt. Neben den o.g. jährlichen HQ-Werte sind die Szenarien jedoch ohne Zuordnung der Jährlichkeit dargestellt. In Torgau wurde die LOG-NORMAL 2 Verteilungsfunktion als erwartungstreu gefunden. In Wittenberg scheinen die LOG-NORMAL 2 und 3 Verteilungsfunktionen gut angepasst zu sein. In Aken scheint die Durchlegung der LOG-NORMAL 2 und 3 Verteilungsfunktion komplexer zu sein, da im Extrembereich bei den extremsten Ereignissen von 1890 und 2002 große Abweichung vorliegen.

## 7.5 Einbeziehung der Unsicherheiten der Abflussvorhersage und Simulationen bei der Notpolderuntersuchung

Eine optimale Wirkung der geplanten Notpolder in Sachsen-Anhalt auf die Reduzierung des Scheitelwerts bei einem Extremereignis erfordert unter anderen eine zuverlässige Entscheidung über den Beginn und den Verlauf der Füllung/Flutung (Ihringer 2003). Dies ist von der Qualität der Abflussvorhersage abhängig. Die Situation im August 2002 hat die Güte sowie auch „die Grenze“ der operationellen Vorhersage mit vielen unvorhersehbaren Aspekten (großen natürlichen Ausuferungen und Deichbrücheffekten), die eine reduzierende und verzögernde Wirkung auf einen Hochwasserablauf hatten, gezeigt. Das reicht jedoch nicht aus, um eine klare Aussage über die Berücksichtigung von allen möglichen Unsicherheiten der großskaligen hydrologischen Vorhersage bei künftigen Extremereignissen treffen zu können. Das Ziel dieser Überlegung ist zu beweisen, wie effektiv die geplanten Notpolder auf den Wellenverlauf unter der Annahme der unsicheren oder sogar falschen Abflussvorhersage wirken könnten.

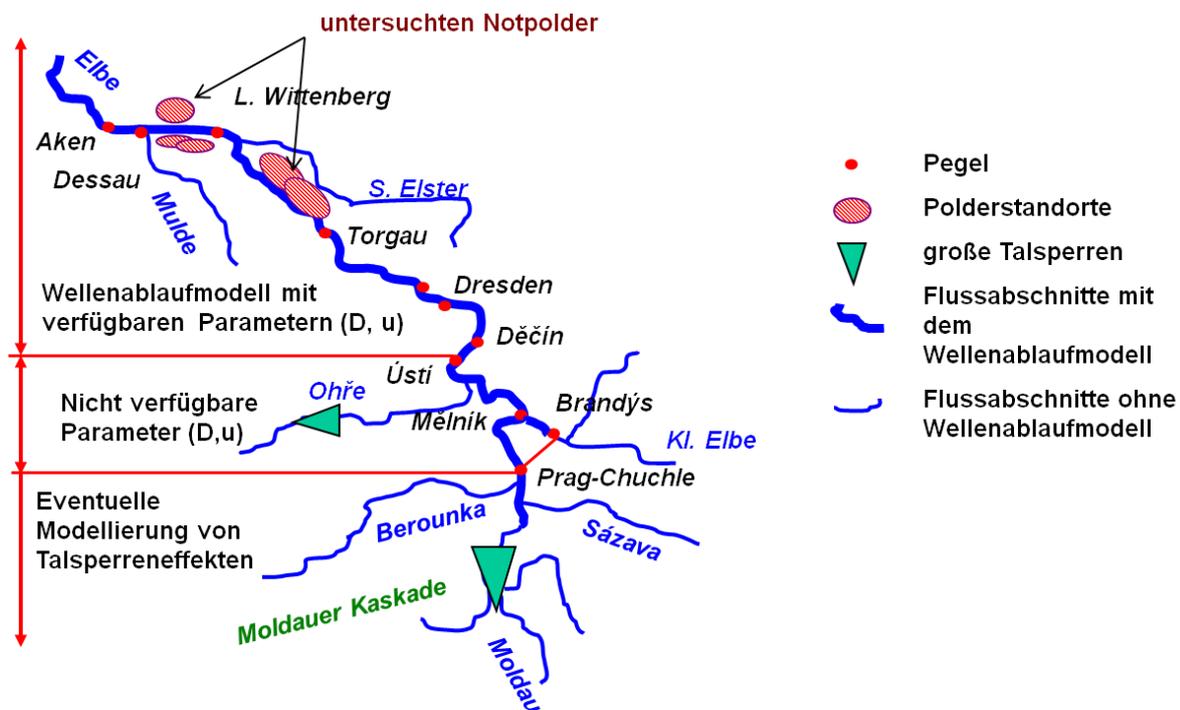


Abbildung 7.15: Übersichtskarte des Elbeinzugsgebiets mit dem vorhandenen Flood-Routing-Modell

Im Rahmen der deutsch-tschechischen Zusammenarbeit (IWG-CHMU) im Projekt RIMAX mit dem Schwerpunkt der hydrologischen großskaligen Abflussmodellierung im Einzugsgebiet der Elbe bis Dessau wurden zahlreiche Szenarien definiert und nachträglich mit den hydrologischen Modellen (AquaLog in Tschechien und stochastisches Blockmodell in Deutschland) simuliert. Aus dem Projekt stehen Abflussganglinien der Szenarien von den großen Teileinzugsgebieten (obere Moldau, Sázava, Berounka, Obere Elbe, gesamte Moldau, Eger und die gesamte tschechische Elbe, sowie die Mulde und Reaktion von dem Zwischengebiet Dresden - Aken) zur Verfügung. In den Simulationen sind die Wirkungen der großen tschechischen Talsperren beinhaltet, jedoch die Simulationen der Steuerung wurden subjektiv anhand der Erfahrungen des Bearbeiters durchgeführt (Daňhleká 2006 und 2008). Die Wirkung des Elbeschlauchs (2115 km<sup>2</sup>) zwischen Dresden und Torgau steht in dem Fall nicht zur Verfügung und Deichbrücheffekte sind bei Simulationen ausgeschlossen.

Im Elbegebiet in der Tschechischen Republik wird das Vorhersagemodell AquaLog mit dem Modell ALADIN für den operationellen Ansatz benutzt. Es besteht aus den Modulen SAC-SMA, SNOW17, sMAN, Muskingum-Cunge, für nähere Beschreibung siehe Kapitel 3.3.

Eine Unsicherheit besteht aus dem Bedrohungselement und der Ungewissheit (Gutknecht 2006), wobei man sich die Ungewissheit als Unberechenbarkeit des Auftretens vorstellen kann. Gutknecht hat diesen Begriff in die naturgegebene Ungewissheit (Niederschlag, Abfluss), in die Unschärfe (Vorhersage) und in die Ungewissheit des unvorhergesehenen Auftretens (Deichbrüche) gegliedert.

### **7.5.1 Kenntnisse über die Vorhersageunsicherheit im tschechischen Elbegebiet**

Die Quellen der Unsicherheiten in Allgemeinem unterscheidet man wie folgt:

- Unsicherheit durch die ungeeignete Modellstruktur
- Unsicherheit durch die falsch ermittelten bzw. gewählten Modellparameter, Anfangs- und Randbedingungen
- Unsicherheit durch fehlerhafte bzw. nichtverfügbare beobachtete Daten
- Unsicherheit durch die unvorhersehbaren Aspekte (Auswirkung der Ausuferungen, Deichbrüche, ..)

### **7.5.2 Auswertung der Vorhersage im Jahr 2002**

Es muss betont werden, dass das Hochwasserereignis vom 2002 spezifisch und einzigartig war. Die Unsicherheiten sowie Erfahrungen der offiziell benutzten Vorhersage während des extremen Hochwasserereignisses in 2002 lassen sich laut Bericht (Šercl 2003) zusammenfassen:

- Große Defizite bei Vorhersagen der Niederschlagsummen vor allem im Böhmer Wald mit dem meteorologischen Modell (Vorzeit 48 h) in den Quellengebieten.
- Der großskalige Niederschlag-Abfluss-Prozess wurde mit dem komplexen Modell AquaLog befriedigend erfasst
- Erhebliche Fehler bei der Extrapolation der Abflusskurven im Extrembereich an vielen Pegeln (tschechischen und deutschen), daraus resultierten große Unsicherheiten bei der Ermittlung des aktuellen (operationellen) Abflusses, der weiter für die „Updating“ der Vorhersage für das untere Gebiet relevant ist.

- zusätzliche hochwasserdämpfende Effekte der großen Talsperren insbesondere Lipno und Orlík, deren maximaler Wasserstand (und damit auch Speichervolumen) überschritten wurde
- zusätzliche hochwasserdämpfende und verzögernde Effekte der großen natürlichen Ausuferungen (keine Deichbrüche) zwischen Prag und Ústí nad Labem in Mündungsbereichen der Elbe/Moldau und der Elbe/Eger

Im Allgemeinen ist eine operationelle Abflussvorhersage in den höher gelegenen (hochwasserauslösenden) Gebieten wegen der schnellen Abflussreaktion kompliziert und sie ist stark von der Zuverlässigkeit der Bestimmung der vorhergesagten Niederschläge sowie der Abschätzung der aktuellen Bodenfeuchteparameter abhängig.

An den unteren Pegeln wurden die Abfluss- bzw. Wasserstandsvorhersagen manuell von den Experten mittels der Abflussinformationen von Beobachtungen an den oberen Pegeln sowie vom Zwischengebiet prognostiziert.

Die Abflussvorhersagen wurden operationell zum bestimmten Zeitpunkt aktualisiert – Updating. Dies erforderte eine genaue Auswertung des aktuellen Abflusses von dem gemessenen Wasserstand, wobei Komplikationen mit den damals gültigen Abflusskurven im Extrembereich auftraten.

Die operationellen d.h. mit dem hydrologischen Modell herausgegebenen Abflussvorhersagen wurden mit einer Vorlaufzeit für die nächsten 24 - 48 Stunden durchgeführt.

Folgende Methoden zur Auswertung der Güte der Vorhersagesimulation in der Tschechischen Republik (Vlasák und Daňhelka 2009 und 2010) werden angewendet:

- Korrelationskoeffizient
- RMSE (root-mean-square error)
- Relativer Volumenfehler VE
- Relativer Scheitelwertfehler MF

### **7.5.3 Statistische Auswertung der Vorhersagen seit 2002**

Bei der Auswertung wurden alle Ereignisse, bei denen Abfluss der ersten Warnstufe (Alarmstufe) überschritten wurde, seit 2002 analysiert, wobei diese Warnstufe dem 1 – 5 jährlichem Hochwasserereignis entspricht (Vlasák und Daňhelka 2009 und 2010). Die Auswertung wurde auf den Scheitelwert und das Volumen bezogen. Dies ist für die Notpolderplanung in Sachsen-Anhalt unwichtig, da sich nicht um Extremereignisse handelt.

### **7.5.4 Ergebnisse der tschechischen Studien**

Von der tschechischen Seite (Vlasák 2009 und Šercl 2003) stehen die folgenden Abbildungen der Vorhersage des Ereignisses vom August 2002 (Wasserstands- und Abflussganglinien) zur Verfügung. Die Abbildungen gelten für den nah der Staatsgrenze gelegenen Elbepegel Ústí nad Labem. Die Linien bestehen aus dem operationell angewendeten Abfluss, der als aktuell während eines Ereignisses gilt, und dem nachträglich ausgewerteten Abfluss, jedoch deren Werte weichen voneinander ab. Von dem operationell angewendeten Abfluss werden die 24-Stunden-Vorhersagen mit dem hydrologischen Modell simuliert, wobei eine Anpassung (Updating) an den aktuellen Abfluss durchgeführt wird, siehe Abbildung 7.17.

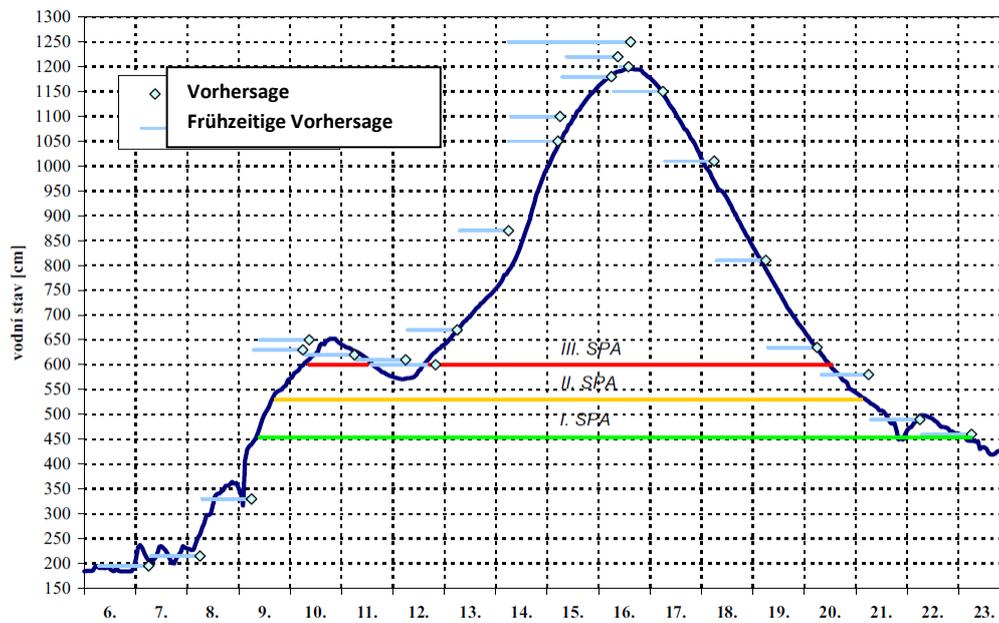


Abbildung 7.16: Wasserstandsvorhersage und frühzeitige Wasserstandsvorhersage für den Pegel Ústí nad Labem (Quelle: Šercl 2003)

Im Gegensatz zu dieser Methode werden auch manuelle Abfluss- bzw. Wasserstandsvorhersagen anhand der subjektiven Erfahrungen der Hydrologen prognostiziert, siehe Abbildung 7.16. Die manuellen sowie hydrologischen Terminvorhersagen der Abflüsse für die nächsten 24 bzw. 48 Stunden sind auf der Abbildung 7.18 dargestellt. Hier wird der operationell angewendete Abfluss zusätzlich mit der Wertabweichung  $\pm 20\%$  simuliert. Eine gute Übereinstimmung insbesondere beim ansteigenden Ast wurde bei der manuellen Vorhersage getroffen.

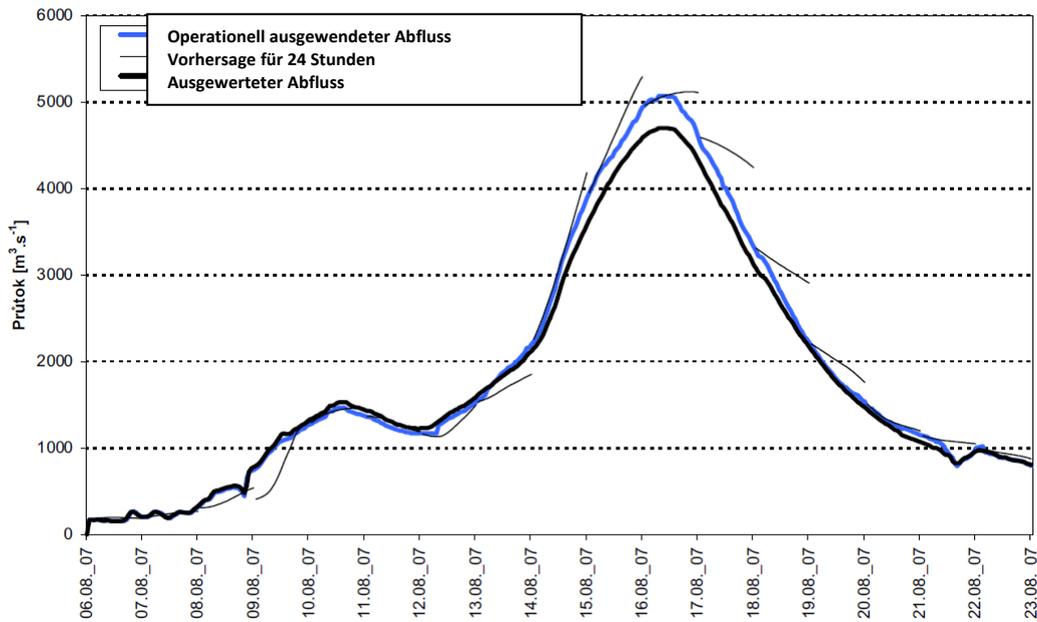


Abbildung 7.17: Abflussvorhersage für den Pegel Ústí nad Labem mit der Anpassung „Updating“ (Quelle: Šercl 2003)

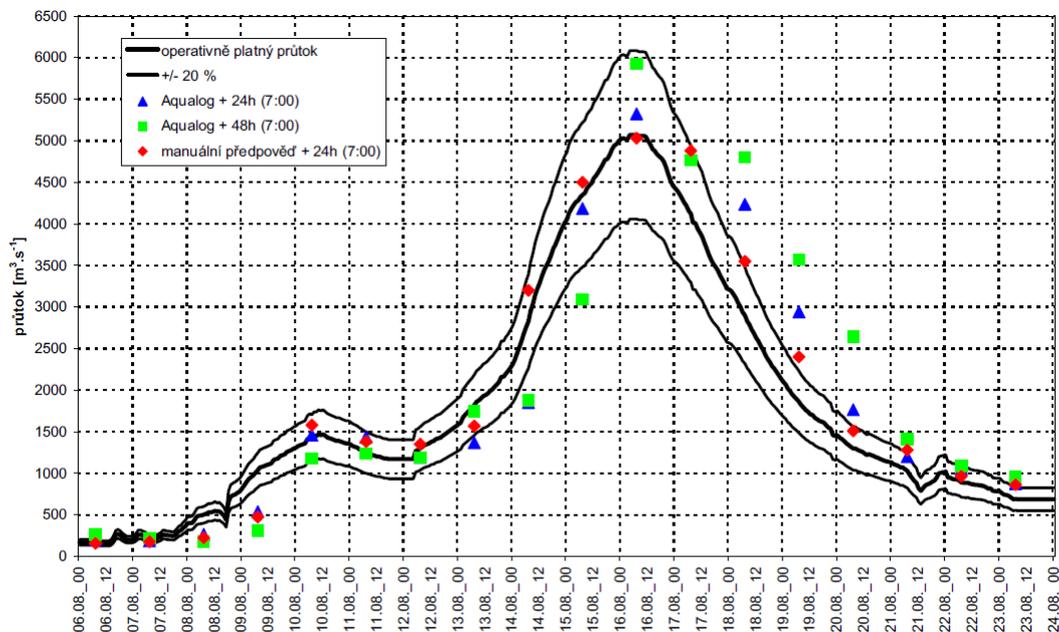


Abbildung 7.18: manuelle und hydrologische Terminabflussvorhersage für den Pegel Ústí nad Labem, sowie 20 %-er Bereich der Abflussganglinie (Quelle: Šercl 2003)

Diese Abflussvorhersagen in Ústí nad Labem (48 540 km<sup>2</sup>), die mit dem komplexen Modell AquaLog von CHMU durchgeführt werden, sind ebenfalls relevant für die Abflussvorhersage und Hochwasserwarnung für die oberen deutschen Elbepegel und -Standorte. Sie gelten ebenfalls als unvermeidbares Hilfsmittel des operationellen Hochwassermanagements entlang der deutschen Elbe.

## 7.6 Bezug der Informationen über Vorhersage auf den Betrieb der Notpolder

Eine wesentliche Vernachlässigung bei der Simulation der Szenarien ist die Nichteinbeziehung der Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet zwischen Ústí nad Labem und Dresden (4554 km<sup>2</sup>). Andererseits ist diese Vernachlässigung im Hinblick auf die Verschärfung im Scheitelbereich der Elbe und auf die Wirksamkeit der Notpolder begründbar, da die Abflussreaktion aus diesem Gebiet das Hauptereignis der Elbe überholt. Eine Kopplung mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell KALYPSO (BCENA), welches in Sachsen im operationellen Betrieb angewendet wird, wäre für die Eliminierung der Unsicherheit und der Abschätzung der Wirkung dieses Einzugsgebiets auf die Elbe sinnvoll. Die Simulationen und Erfahrungen des operationellen Betriebs stehen jedoch nicht zur Verfügung. Mit dem Modell wird ebenfalls der Niederschlag-Abfluss-Prozess im Muldeinzugsgebiet simuliert und vorhergesagt, wobei die Wirkung der Mulde für den Hochwasserschutz der Stadt Dessau sowie für den operationellen Betrieb der geplanten Notpolder an der Elbe von großer Bedeutung ist.

Im Rahmen des RIMAX-Projekts wurden Szenarienergebnisse des stochastischen Blockmodells, welches am IWG (Helms 2009) entwickelt wurde, auch für die Notpolderuntersuchung herangezogen. Dieses Modell wird für die Simulationen der Szenarien oder für die Rekonstruktionen der historischen Ereignisse benutzt, jedoch nicht für die Vorhersage. Dieses Modell wurde erst für das Zwischengebiet Dresden – Aken entwickelt, später wurde die Mulde von diesem Gebiet getrennt simuliert. So bleibt in der Simulation der Abfluss aus dem Elbeschlauch, wo u.a. auch der linkselbische Zufluss Weißeritz beinhaltet ist, und der Schwarzen Elster zum Pegel Wittenberg. Da der größte Notpolder oberhalb der Mündung der Schwarzen Elster vorgesehen ist, kann dadurch der Zufluss der Schwarzen Elster bei der Simulation der Flutung nicht berücksichtigt werden.

Die beobachteten extremen Elbeereignisse (1890 und 2002) waren besonders durch große Ausuferungen zwischen Prag und Ústí nad Labem, sowie durch zahlreiche Deichbrüche in Sachsen und Sachsen-Anhalt geprägt. Diese wiederum wirkten auf den Wellenablauf verzögernd und hochwasserdämpfend. Bereits von Ústí nad Labem kann ein Hochwasserereignis bis zu den Notpolderstandorten recht gut vorhergesagt werden und an den Pegeln Dresden und Torgau muss ein Update der Vorhersage präzisiert werden. Mit den veränderten Modellparametern des Translations-Diffusions-Ansatzes lässt sich die vorhergesagte Abflussganglinie „beliebig“ variieren. Die Pegel Torgau und Wittenberg müssen für die Entscheidung über die Flutung bei einem operationellen Betrieb unbedingt einbezogen werden.

Die Vorhersageunsicherheit bzw. Ungenauigkeit soll sich jedenfalls auf das Vorhaben dieser Arbeit konzentrieren, d.h. auf der großen Gebietsskala (bis zu 70 000 km<sup>2</sup>) und für ein Extremereignis.

Ebenfalls sind Informationen bzw. Erfahrungen über die Vorhersagegüte von anderen Einzugsgebieten hier zu nennen. Hochwasserfrühwarnung und Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg wird mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM durchgeführt. Die Frühwarnvorzeit bei der Vorhersage beträgt 6 – 24 Stunden und die Genauigkeit ist je nach der Gebietsskala +/-10 cm. Bei der Frühwarnung beträgt diese Vorzeit bis zu 7 Tage, jedoch die Genauigkeit des Wasserstandes ist sehr grob (Bremicker 2006). Modellkalibrierung bzw. Parameteranpassung muss nach großen Ereignissen überprüft oder ermittelt werden (Laurent 2009). Die Unsicherheit der Vorhersage ist hier für die oberen und unteren Einzugsgebiete getrennt abgeschätzt.

## 7.7 Einbeziehung der Vorhersageunsicherheit bzw. datenbedingte Unsicherheit für den operationellen Betrieb der Notpolder

Die bisher durchgeführten Analysen der geplanten Notpolder gehen davon aus, dass die vorhergesagten Abflussganglinien zu den Standorten genau bekannt wären. Das ist jedoch bei einer realen Extremsituation ausgeschlossen, da jede operationelle Vorhersage mit bestimmten Fehlern behaftet ist, obwohl es sich in diesem Fall um die großskalige Abflussvorhersage handelt, die im Vergleich zu kleineren Gebieten genauer ist. Ein Beweis der Funktionsfähigkeit dieser Retentionsmaßnahmen unter den ungewissen Umständen im Extremfall erfordert ein ausführliches Wissen über die angewendeten Vorhersagemodelle und –Erfahrungen im gesamten Elbegebiet, d.h. Informationen über tschechisches Modell AquaLog und deutsches Modell KALYPSO. Die Güte der Vorhersagen und der operationell ausgewerteten aktuellen Abflüsse an bestimmten Pegeln stellt ebenfalls die Basis für die Überprüfung der Retentionsmaßnahmen dar. Die Analyse der Vorhersagegüte vom August 2002 vom CHMU sowie des realen Ablaufs ist ein wichtiger Stützpunkt für die Unsicherheitsbewertung bis zu den Standorten. Die Fehler der Vorhersagesimulationen liegen an:

- den falschen Modellparametern vor allem im Extrembereich
- den erheblichen Ausuferungseffekten und Deichbrucheffekten, deren Auswirkungen auf das Wellenablaufmodell vorher nicht bekannt sind.
- den falschen Extrapolationen der Abflusskurven im Extrembereich an vielen Pegelstellen, dadurch wurde der aktuelle Abfluss vom Wasserstand anhand der Abflusskurve oft falsch ausgewertet
- der nicht genauen meteorologischen Vorhersage der Niederschläge vor allem in kleineren Einzugsgebieten.
- der Steuerung der großen Talsperren, die oft subjektiv durchgeführt wurde.
- der nicht vollständigen Einbeziehung aller Zwischeneinzugsgebiete bei der Vorhersage oder Simulation
- den ungeeigneten Modellen, Modellkomponenten und den Rand- und Anfangsbedingungen.

Die hier erwähnten Fehler der Vorhersage erscheinen in einer Ganglinie als Volumen- oder Scheitelwertfehler oder auch als zeitlicher Fehler des Wellenablaufs. Laut Informationen vom Ereignis 2002 wurden die Scheitelabflüsse an einigen Elbepegeln nach den damals gültigen Abflusskurven überschätzt, bspw. in Dresden bis zu 10 %. Durch die extremen Ausuferungen oder Deichbrüche kam es zu einer Verlangsamung des Wellenablaufs, sodass die Modellparameter des Flood-Routing-Prozesses (in diesem Fall Translation  $u$  und Diffusion  $D$ ) nachträglich an das Ereignis angepasst werden mussten. Dies führte zu einer anderen verzögerten Form der Ganglinie zwischen zwei Pegeln. Es ist jedoch ungewiss, ob eine gute Übereinstimmung durch die letzte Parameteranpassung bei der nächsten Extremsituation erreicht werden kann. Dafür ist eine Sensitivitätsanalyse der Funktionsfähigkeit solcher Maßnahmen hinsichtlich der unsicheren Vorhersage begründbar.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden Simulationen hydrologischer Prozesse angewendet und nicht Ergebnisse einer Vorhersage. Zu den Simulationen muss ein „Unsicherheitsband“ anhand der Informationen oder Erfahrungen bspw. vom letzten beobachteten Ereignis 2002 zugeschlagen oder abgezogen werden. Auf diese Weise werden die Ereignisse vom 1890 und 2002 variiert.

## 7.8 Ableitung der unsicheren Abflussganglinien – der datenbedingten Unsicherheiten

Wie bereits angesprochen wurde, werden die Notpolder anhand der operationell ausgewerteten und vorhergesagten Abflussganglinien gesteuert. Die Entscheidung zu einer optimalen Steuerung (Notpolderflutung) wird aufgrund der aktuellen Informationen und Zustände am Pegel Torgau getroffen. Im Rahmen dieses Vorhabens werden die Unsicherheiten durch die falsch angewendeten Modellparameter des Flood-Routing-Prozesses im Extremabflussbereich sowie durch die datenbedingte Unsicherheit der operationell ermittelten Abflussdaten mittels der Abflusskurven untersucht.

Um die Güte des Translations-Diffusions-Modells bzw. seine Parameter überprüfen zu können, wurde die offizielle beobachtete Abflussreihe vom Ereignis 2002, die im Tagesschritt vorliegt, von Ústí nad Labem nach Dresden und weiter nach Torgau geroutet (99 km und 98,8 km). Die Ausgangsdaten müssen wegen weiterer Analysen im Stundenschritt umgerechnet werden. Mithilfe der graphischen Darstellung der von Ústí nad Labem nach Dresden gerouteten Abflussganglinie zusammen mit der beobachteten Abflussganglinie in Dresden kann schlussgefolgert werden, dass die Routingsimulation im Extrembereich etwa um 4 Stunden schneller ist als die Beobachtung, siehe Abbildung 7.19. Dieses bedeutet, dass eine Anpassung der Modellparameter durchgeführt werden muss. Die Zuflüsse aus dem Zwischengebiet Ústí nad Labem - Dresden wirkten sich vor allem vor dem Scheitel der Elbe aus, sodass die Verschärfung während des Elbescheitels minimal (schätzungsweise  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) war. Die Flood-Routing-Simulation an der Strecke Dresden – Torgau (98,8 km) mit den bestehenden Parametern ergibt befriedigende Übereinstimmung mit der Beobachtung in Torgau. Die zeitliche Diskrepanz im Extrembereich beträgt nur zwei Stunden, wobei die Zuflüsse aus dem Zwischengebiet nicht inbegriffen sind. Mittels der gerouteten und beobachteten Ganglinien wurde eine synthetische Abflussganglinie aus diesem Zwischengebiet abgeleitet. Vor allem die erheblichen Deichbrucheffekte und außergewöhnlichen Ausuferungen verursachten die Verzögerung des Flood-Routing-Prozesses. Diese Verzögerung wurde nachträglich mit den Modellparametern behandelt.

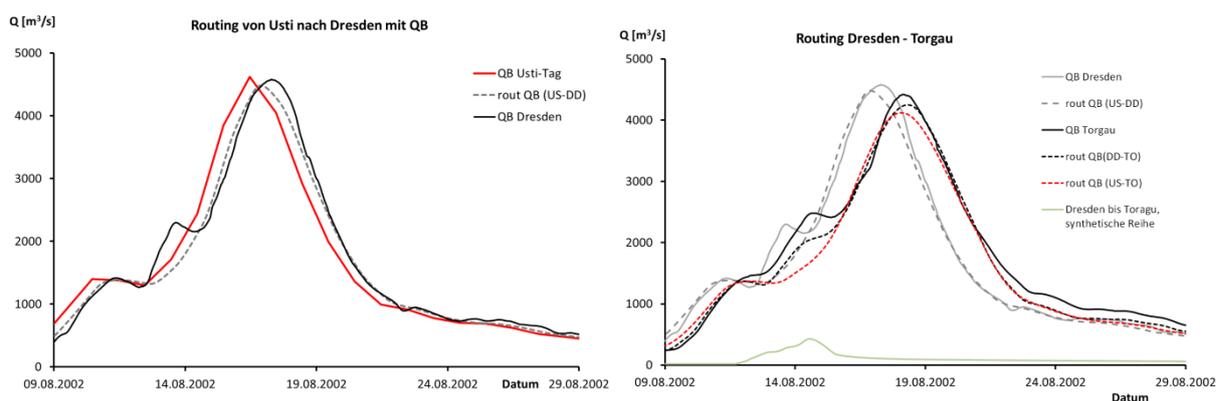


Abbildung 7.19: Überprüfung des Flood-Routing-Modells und seiner Parameter der Strecken Ústí nad Labem – Dresden – Torgau.

Im Gegensatz zu der Unsicherheit des Flood-Routing-Modells ist die datenbedingte Unsicherheit bei Vorhersagen signifikanter, insbesondere in Extremfällen. Diese Unsicherheit ist vor allem pegelspezifisch zu verzeichnen. Dies bestätigen zahlreiche Berichte und Studien von Hochwasserereignissen

1890 und 2002 (Grünewald 2007, MŽP 2005, Helms 2013), die erst nach dem Ablauf durch zuständige Behörden und Institutionen vervollständigt oder wieder analysiert wurden.

Der Wasserstand an einem Pegel gilt als direkt messbare und exakte Größe, mögliche Fehler können als Schreibfehler erscheinen, die jedoch als „Ausreißer“ in der Zeitreihe leicht zu identifizieren und folglich zu korrigieren sind. Von dem aktuell beobachteten Wasserstand wird anhand der gültigen Abflusskurve des (Pegel)Flussprofils (Wasserstand-Abflussbeziehung) der aktuelle Abfluss ermittelt.

Die Erstellung einer Abflusskurve erfordert eine Durchflussmessung im gegebenen Flussquerschnitt, die normalerweise in der Nähe des Pegels durchgeführt wird. Die Erstellung einer Abflusskurve wird zusätzlich mit einer hydrodynamischen Analyse überprüft. Die Durchflussmessungen (hydrometrische Messungen) wurden auch während der extremen Hochwasserereignisse von 1890, 2002 und 2006 durchgeführt und sind in den Hydrologischen Jahresbüchern dokumentiert. Eine Durchflussmessung wurde in der Vergangenheit mittels eines Flügels punktuell verteilt durch ein Flussquerprofil von einer Brücke oder von einem Schiff aus durchgeführt. Damit wurden punktuelle Geschwindigkeiten und daraus die Isotachen ermittelt, um die Wassermenge pro Zeiteinheit mithilfe der bekannten beobachteten Querschnittsfläche des Gerinnes feststellen zu können. Heutzutage wird diese Messmethode durch die moderne Ultraschallmessung ADCP ersetzt. Grundsätzlich ist es kompliziert die selten aufgetretenen und spezifischen Extremereignisse im Hochwasserbereich zu erfassen. Dabei muss auf die Instationarität der Abflusskurven bzw. des Gerinnes hingewiesen werden.

Im Rahmen der Zusammenarbeit IWG-BfG „Überarbeitung der HQ(a)-Reihen an den Hauptpegeln der Elbe für den Zeitraum 1890 -2006“ (Helms 2013) wurden die offiziellen Abflussreihen miteinander abgestimmt, um die Inkonsistenzen in den Abflüssen zwischen der benachbarten Pegeln eliminieren zu können. Neben den beobachteten Wasserstands- und Abflussreihen wurden die hydrometrischen Messungen, die Informationen der Pegelnullpunkte (PNP), die Informationen über Eisverhältnisse und die Abflusskurven (W-Q-Beziehungen) von den zuständigen Ämtern und Archiven herangezogen. Mit dieser Untersuchung wurde eine Variabilität der Anwendung der Abflusskurven in der Zeit an allen Pegeln gefunden. Diese Variabilität der Abflusskurven lässt sich durch die natürlichen oder menschlich verursachten Änderungen der morphologischen Bedingungen des Elbegerinnes erklären. Als Beispiel ist hier die Situation vom August 2002 in Dresden zu nennen, wo der beobachtete Wasserstand um 1 m höher war als der von 1890 bei nur geringem Abflussunterschied. Diese kleinere Kapazität wurde durch die Änderung des Flussbetts im städtischen Bereich in Dresden während des 2. Weltkrieges verursacht. Eine erhebliche Änderung der Leistungsfähigkeit des Flussgerinnes in Torgau ist durch die natürliche Erosion und Morphodynamik auf dieser Elbestrecke zu verzeichnen. Die Extrapolationen der Abflusskurven in den Extrembereichen für einige Zeiträume wurden nicht angewendet, weil kein großes Hochwasserereignis auftrat, sodass ihre Gültigkeit nicht überprüft werden konnte. Auf den Abbildungen 7.20 ist die Variabilität der Abflusskurven in Dresden und Torgau vor allem in den Hochwasserbereichen recht gut zu erkennen. Die Abflusskurven wurden immer für den angegebenen Zeitraum angewendet, jedoch nach großen Ereignissen mussten sie durch die Durchflussmessung und hydraulische Berechnung nachträglich angepasst werden. Dies führte oft zu der falschen Ermittlung des Abflusses von dem aktuell beobachteten Wasserstand im operationellen Vorhersagebetrieb vor allem in Extremsituationen. Laut Erfahrungen mit dem Ablauf des Ereignisses von 2002 wurden die Abflüsse oft erheblich überschätzt, bspw. siehe Abbildung 7.17 für den Pegel Ústí nad Labem.

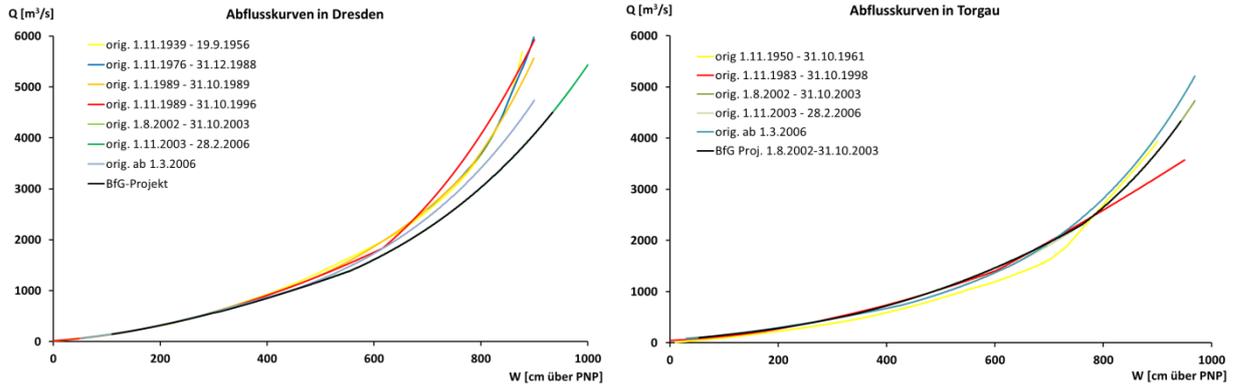


Abbildung 7.20: Ausgewählte Abflusskurven an den Pegeln Dresden und Torgau, die für die Ableitung der „falsch“ ermittelten Abflusswerten von den beobachteten Wasserständen als Szenarien für die Steuerung der Notpolder benutzt wurden.

Für die Aufgaben der Untersuchung zur Flutung der beabsichtigten Notpolder in Sachsen-Anhalt müssen solche Unsicherheiten in Betracht gezogen werden, weil, wie bereits angesprochen wurde, die Notpolder abhängig von der operationellen Abflussvorhersage einschließlich der Unsicherheiten gesteuert / geflutet werden müssen. Die beobachtete sowie vorhergesagte Hochwassersituation am Pegel Torgau ist relevant für die Entscheidung zur Steuerung, da die Fortpflanzungsdauer einer Hochwasserwelle zu den ersten zwei Notpoldern etwa 2 bis 3 Stunden (27,5 km) stromabwärts beträgt. Zu dem Zeitpunkt wäre jedoch der Hochwasserverlauf mit abgeschätzten bzw. simulierten Abflusswerten gerade am tschechischen Elbepegel Ústí nad Labem näherungsweise bekannt, siehe Abbildung 7.19. Die Größenordnung des Ereignisses lässt sich abschätzen, sodass ein Schwellenwert (bestrebter restlicher Abfluss unterhalb solcher Maßnahmen, bspw. in Dessau) definiert werden muss, bei dem die Notpolder optimal geflutet werden sollen.

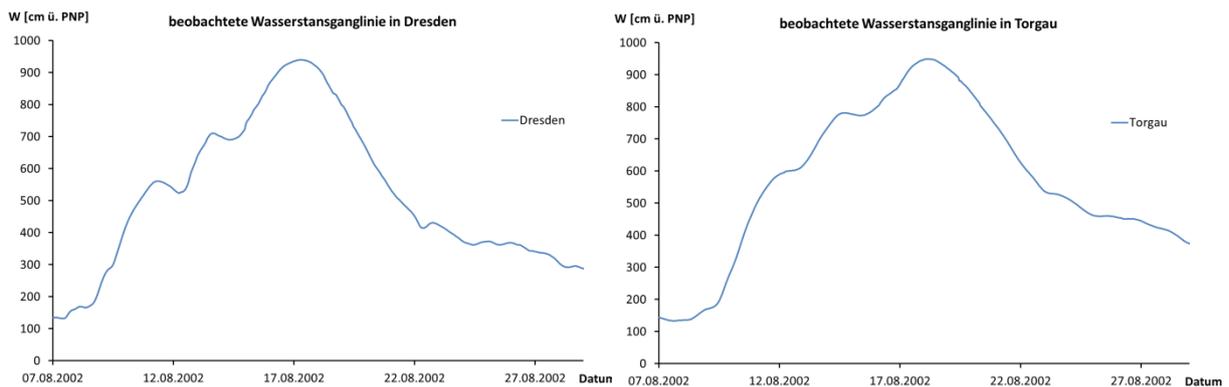


Abbildung 7.21: Beobachtete Wasserstände vom Ereignis 2002 in Dresden und Torgau. Von diesen Wasserständen wurden die Abflüsse mittels der gültigen sowie ungültigen Abflusskurven, die auf der Abbildung 7.20 dargestellt sind, ermittelt und als Szenarien variiert.

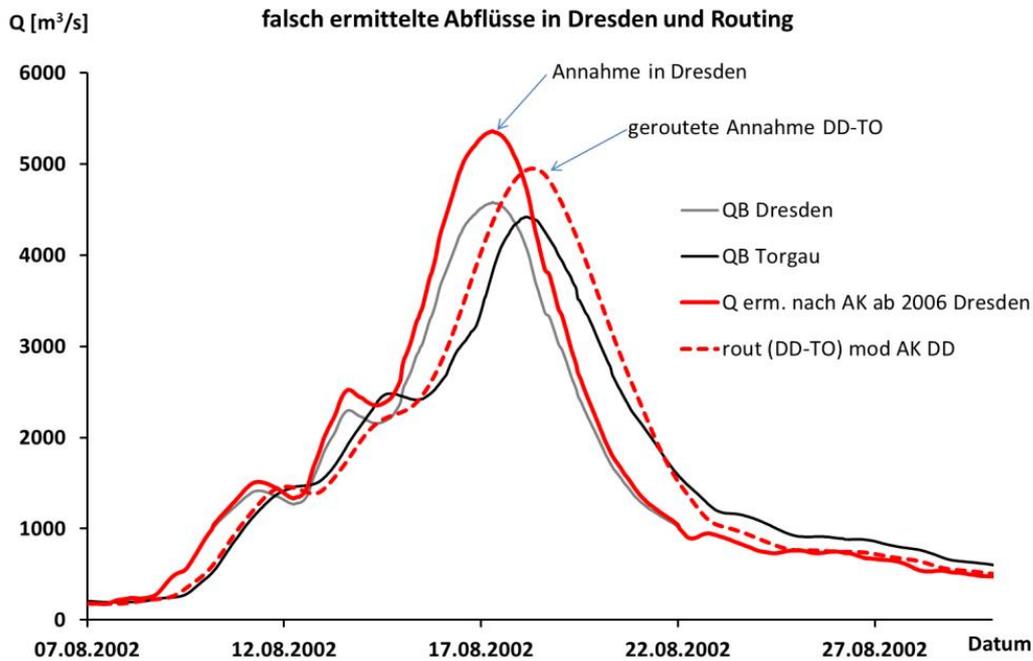


Abbildung 7.22: Die falsch ermittelten Abflüsse am Pegel Dresden von den beobachteten Wasserständen und Routing nach Torgau als Szenarien für die Entscheidung zur Flutung der Notpolder.

Es wird davon ausgegangen, dass der Wellenverlauf (die Abflussganglinie) vom Ereignis 2002 in Ústí nad Labem (197 km oberhalb von Torgau) exakt beobachtet und anschließend ermittelt wurde. Das Verfahren ist auf den Abbildungen 7.22 und 7.23 erläutert. Diese Abflussganglinie (QB) von Ústí nad Labem wurde mit dem Flood-Routing-Modell und mit den bestehenden Parametern nach Dresden (99 km) und weiter nach Torgau (98 km) ohne Zuflüsse und ohne Deichbrüche geroutet.

Den beobachteten Wasserständen in Dresden wurden die Abflusswerte von der Abflusskurve nach BfG zugeordnet. Damals war die offiziell gültige Abflusskurve (W-Q-Beziehung) jedoch im Extremabflussbereich nicht aktuell, dafür wurden die Abflüsse nachträglich durch eine neue Abflusskurve und hydraulische Berechnung ermittelt. Als falsches Szenario für die Notpolder wird jedoch eine andere Abflusskurve angewendet (original ab 2006 BfG), um „falsche“ Abflussganglinie (bezeichnet als Szenario) in Dresden erhalten zu können. Diese neu ermittelte Ganglinie wurde weiter nach Torgau zu den Notpolderstandorten geroutet. Der neu ermittelte Scheitelwert in Dresden würde dadurch 5360 m<sup>3</sup>/s gegen den ursprünglichen QB 4581 m<sup>3</sup>/s betragen, siehe Abbildungen 7.22 und 7.23. Diese Ganglinie wurde weiter geroutet. Diese hätte ebenfalls ein größeres Volumen und die Steuerung der Notpolder müsste nach einem höheren Schwellenwert gesteuert / geflutet werden, wobei betont werden muss, dass dieses eine Annahme für eine Entscheidung zur Steuerung bedeutet und die reale Abflussganglinie würde mit dieser Annahme (Q Schwellenwert) durch die Notpolder transformiert.

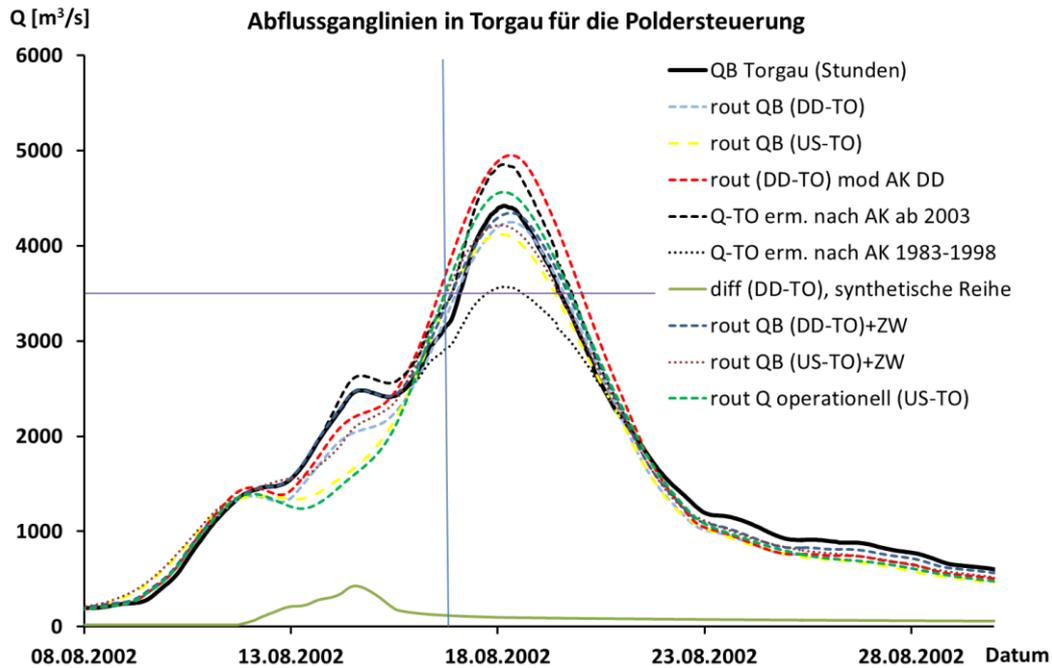


Abbildung 7.23: Abgeleitete Abflussganglinien in Torgau anhand der "falsch" angewendeten Abflusskurven.

In Torgau wurden die Abflüsse aufgrund der falsch angenommenen Abflusskurven (AK ab 2003 und AK 1983 – 1998) von verschiedenen Zeiträumen auch ermittelt, jedoch diese Modifikation verliert den Sinn, weil es für die Entscheidung zur Flutung erst in Torgau zu spät wäre. Andererseits kann dies als Szenarien bzw. Abflussganglinien mit dem datenbedingten Unsicherheitsband angewendet werden. Der Verläufe der Abflussganglinien sind zu dem Zeitpunkt der Entscheidung jedoch nicht exakt bekannt, nur die Vorhersage ist näherungsweise bekannt. Mit dieser Untersuchung wird eine optimale Notpolderwirkung rechnerisch unter der Voraussetzung bewiesen, wann die Abflussganglinien vorher exakt bekannt wären, wobei das in der Tatsache kein realer Fall ist.

So werden diese Randbedingungen (Q Schwellenwert) der Steuerung für die gegebenen falsch vorhergesagten Abflussganglinien d.h. die Schwellenwerte, die in Roßlau nicht überschritten werden sollen, ermittelt. Nach diesen Schwellenwerten wird die richtige beobachtete Ganglinie durch die Notpolder transformiert. Die Schwellenwerte sind in der Tabelle 7.2 zusammengefasst.

Die kritische Situation der Funktionsfähigkeit dieser Retentionsmaßnahmen kann durch die Unterschätzung der vorhergesagten Abflussganglinie vorkommen, d.h. der niedrig gewählte Schwellenwert führt zu einer frühzeitigen Erschöpfung der bemessenen Volumenkapazität und dadurch wird eine gewünschte Abflussdrosselung nicht erreicht, siehe Abbildung 7.24. Demgegenüber bei dem zu hoch gewählten Schwellenwert würden die Notpolder nicht komplett gefüllt und dadurch derer Volumenkapazität nicht optimal genutzt.

Als Beispiel ist hier das Routing der beobachteten Abflüsse von Ústí nad Labem nach Torgau ohne Anpassung an die aktuelle Situation (Updating) in Dresden und ohne Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet zu erwähnen. Diese Simulation würde in Torgau mit  $4120 \text{ m}^3/\text{s}$  im Scheitelbereich betragen, wobei die reale beobachtete Abflussganglinie um  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  größer war ( $4420 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Dabei würde die Entscheidung getroffen werden, dass der reduzierte restliche Abfluss durch die Notpolder nicht

den Wert 3300 m<sup>3</sup>/s überschreiten darf. Diese Entscheidung würde zu einer Überfüllung der Notpolder führen und dadurch könnte die Kappung in Roßlau (oberhalb des Muldezuflusses) nicht vollständig eingehalten werden. Betrachtet man die Abbildung 7.24, würde der reduzierte Abfluss erst 3300 m<sup>3</sup>/s bleiben und danach würde er schlagartig auf 3800 m<sup>3</sup>/s steigen. Trotz dieser Tatsache käme es zu einer Abflusskappung im Scheitelbereich (von 4243 m<sup>3</sup>/s ohne Kappung) um 440 m<sup>3</sup>/s in Roßlau und nach der Überlagerung mit der Mulde im Bereich der Stadt Dessau und am Pegel Aken von 4580 m<sup>3</sup>/s auf 3874 m<sup>3</sup>/s. Im idealen Fall wäre es möglich eine Kappung bis auf 3825 m<sup>3</sup>/s je nach den Abflussverhältnissen der Mulde zu erreichen.

Mithilfe der Vorhersage und dem beobachteten Wasserstand in Torgau muss die Entscheidung zur Flutung getroffen werden. Von der Abflusskurve entsprechen die Abflüsse 3300 m<sup>3</sup>/s und 3500 m<sup>3</sup>/s den Wasserständen 864 cm und 881cm. Es wäre möglich, eine Wasserstandsreduzierung in Aken von 795 auf 757 bzw. 754 cm zu erreichen.

*Tabelle 7.2: Q-Schwellenwerte [m<sup>3</sup>/s] für Roßlau der falsch ermittelten Abflussganglinien für eine optimale Wirkung der Notpolder, nach denen anschließend die richtige beobachtete Ganglinie transformiert wurde.*

Name der Modifikation Beschreibung	Scheitelwert in Torgau	Scheitelwert in Roßlau	Kappung in Roßlau	Schwellenwert in Roßlau
<b>rout-QB (US-TO)</b> Routing QB von Ústí nad Labem ohne ZW	4120	4008	3216	3300
<b>rout-QB (US-TO)+ZW</b> Routing QB von Ústí nad Labem mit ZW (DD-TO)	4217	4109	3326	3300
<b>rout-QB (DD-TO)</b> Routing QB von Dresden	4250	4244	3356	3400
<b>rout-QB (DD-TO)+ZW</b> Routing QB von Dresden mit (ZW- TO)	4345	4224	3408	3500
<b>rout (DD-TO) mod AK DD, 3700</b> Routing der Modifikation nach einer AK in Dresden von den beobachteten W ohne ZW	4951	4797	3921	4000
<b>rout operationeller Q (US-TO)</b> Routing der operationell ausge- werteten Abflussganglinien von Ústí nad Labem	4564	4418	3600	3600
<b>QB Torgau</b> beobachtete Abflüsse	4420	4244	3356	3400

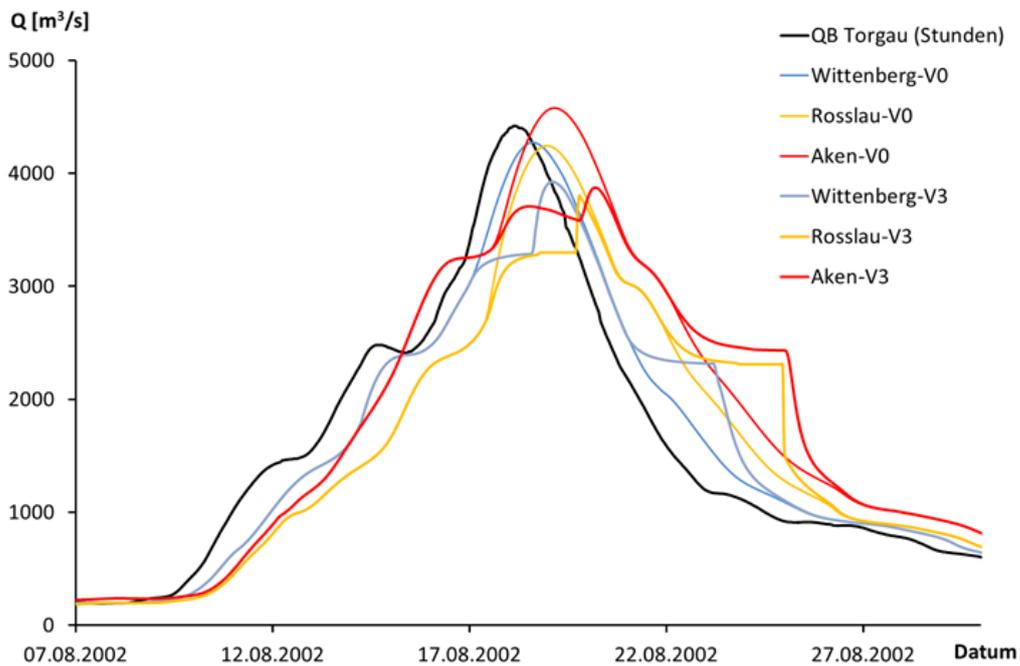


Abbildung 7.24: Effekt des falsch angenommenen Schwellenwerts durch die ungenaue Vorhersage auf den durch die untersuchten Notpolder reduzierten Wellenverlauf.

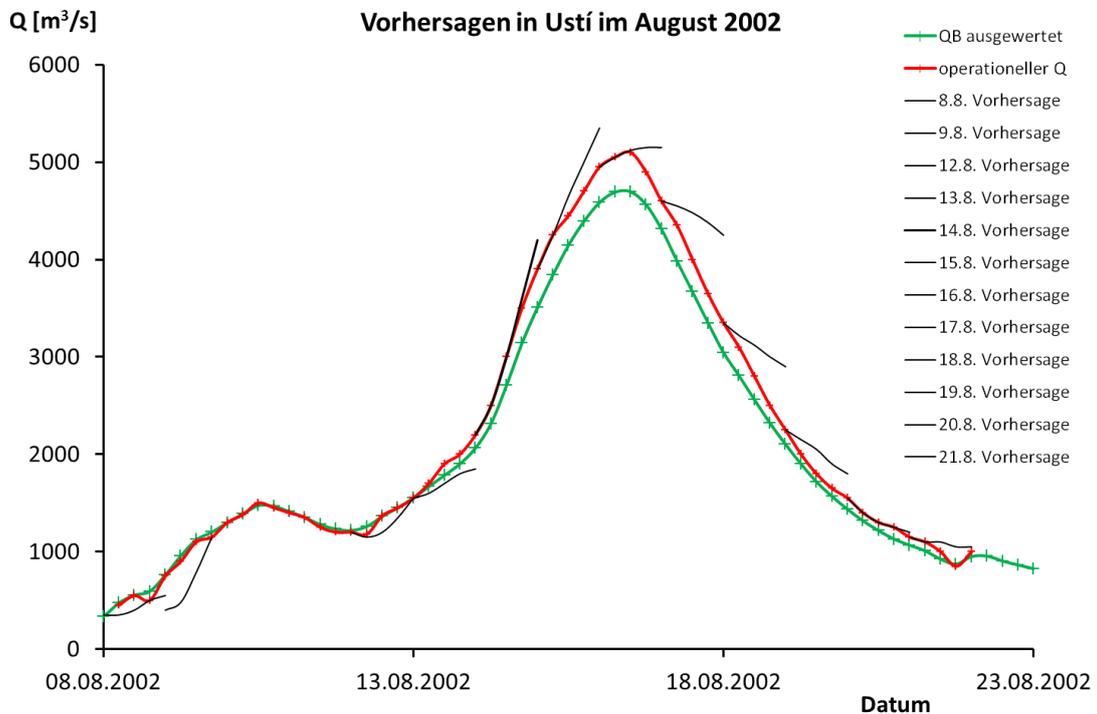


Abbildung 7.25: Abflussvorhersage für die nächsten 24-Stunden mit der Anpassung „Updating“ (operationeller Q) und nachträglich ausgewerteten beobachteten Abfluss QB (Quelle: digitalisiertes Bild von der Abbildung 7.17) am Pegel Ústí nad Labem

Tabelle 7.3: Volumenfehler der Vorhersage, des operationellen Abflusses gegenüber der nachträglich ausgewerteten Beobachtung in Ústí nad Labem. Das gesamte Volumen der geplanten Notpolder und der bevorzugten Variante 3 beträgt etwa 138 Mio. m<sup>3</sup>.

Volumenfehler in Ústí nad Labem nach der Abbildung 7.26 ab 2500 m <sup>3</sup> /s [Mio. m <sup>3</sup> ]			
Datum	Vorhersage gegen Q oper.	QB gegen Q operationell	Vorhersage gegen QB
14.08.2002	5,940	23,421	30,292
15.08.2002	15,840	30,325	46,062
16.08.2002	12,762	30,931	43,413
17.08.2002	41,796	27,997	<b>69,856</b>
18.08.2002	28,496	20,631	48,555
<b>Summe</b>	<b>104,834</b>	<b>133,305</b>	<b>238,178</b>

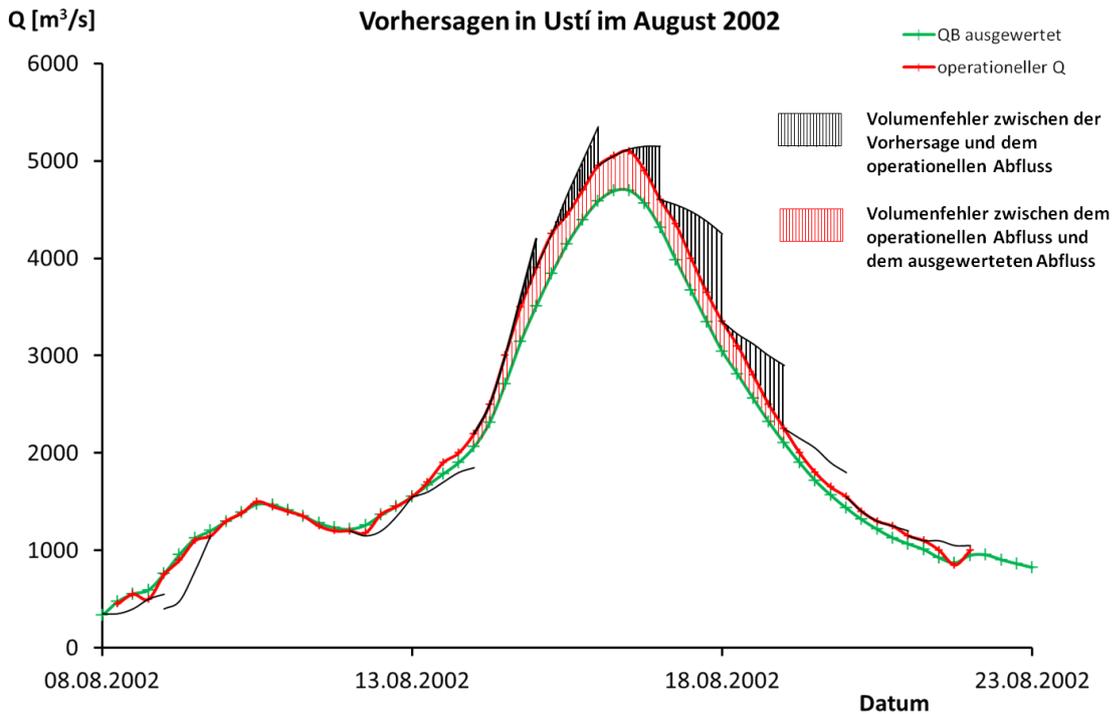


Abbildung 7.26: Volumenfehler der Vorhersage, des operationell ausgewerteten Abflusses gegenüber der nachträglich ausgewerteten Beobachtung in Ústí nad Labem

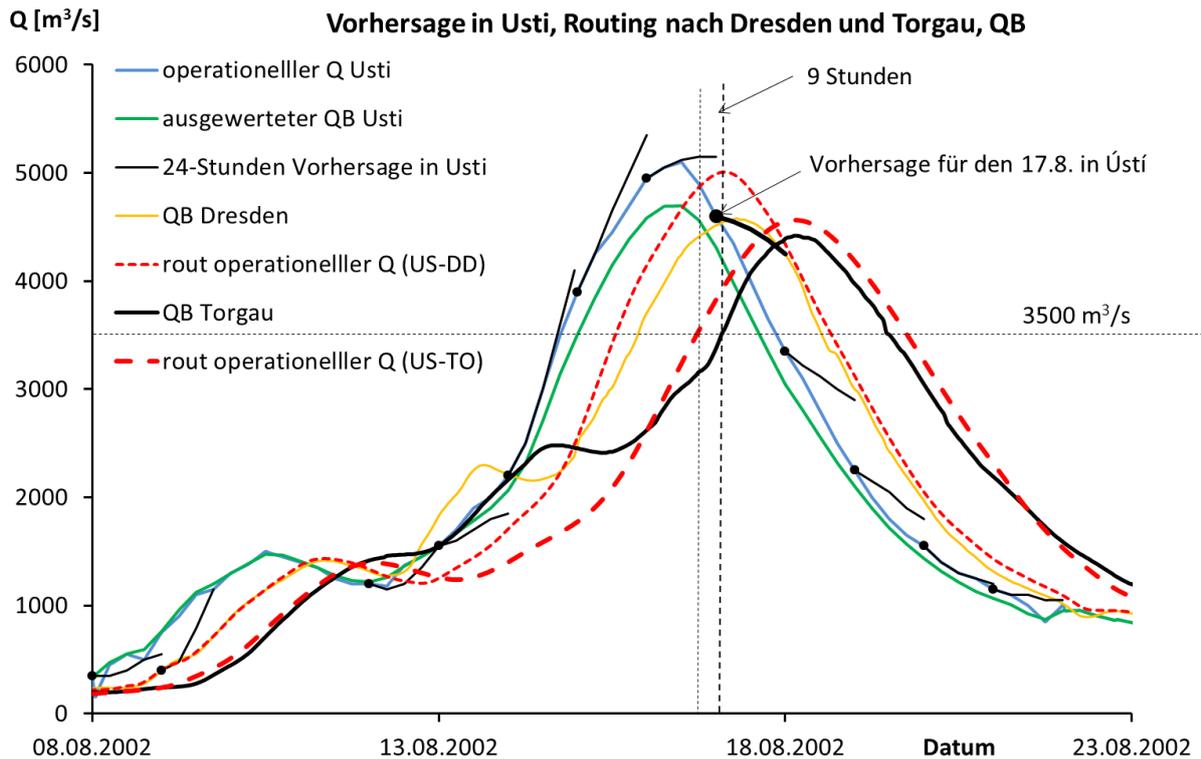


Abbildung 7.27: Vorhersagen, Beobachtungen und operationell ausgewertete Abflüsse in Ústí nad Labem, die weiter nach Dresden und Torgau geroutet wurden. Auf der Abbildung ist der Zeitpunkt des Anfangs der Flutung dargestellt (senkrechte gestrichelte Linie).

Wie bereits angesprochen wurde, wird die Entscheidung zu der Flutung der Notpolder anhand der beobachteten Situation am Pegel Torgau und der vorhergesagten Abflussganglinie getroffen. Betrachtet wird die Abbildung 7.27 mit den 24-Stunden-Vorhersagen (mit Updating), den operationell ausgewerteten Abflüssen und den nachträglich ausgewerteten (beobachteten) Abflüssen in Ústí nad Labem. Die Abflussganglinien wurden weiter nach Dresden (98,8 km) und Torgau (noch 99 km) mit dem Flood-Routing-Modell geroutet und mit der Beobachtung an den jeweiligen Pegeln verglichen (in der Abbildung bezeichnet als „rout operationeller Q (US-DD)“ und „rout operationeller Q (US-TO)“). Der beobachtete Abfluss in Torgau hat den Wert 3500 m³/s am 17.8.2002 um 2 Uhr erreicht, 9 Stunden später als die geroutete operationell ausgewertete Abflussganglinie. Zu diesem Zeitpunkt wird entschieden, dass die Notpolder geflutet werden müssen. Bis dahin ist die Situation an den oberen Pegeln in Ústí nad Labem und Dresden näherungsweise bekannt, der Scheitel ist durch Ústí nad Labem bereits durchgegangen und die Abflüsse stagnieren und in Dresden ist der Scheitel noch nicht erreicht. Am 17.8.2002 um 0 Uhr wird die nächste Vorhersage ausgehend von den operationell ausgewerteten Abflüssen (Update – dicker schwarzer Punkt in der Abbildung) für die kommenden 24 Stunden (fette Linie) herausgegeben. Der Volumenfehler der Vorhersage in Ústí nad Labem für den 17.8. gegenüber dem realen beobachteten Abfluss (schwarze und grüne Linien auf der Abbildung 7.27) beträgt etwa 70 Mio.m³, etwa die Hälfte der gesamten Volumenkapazität der Notpolder bei der Variante 3. Der Unterschied im Scheitelbereich zwischen der von Ústí nad Labem gerouteten operationell ausgewerteten Abflussganglinie und der beobachteten Ganglinie in Torgau beträgt etwa 150 m³/s, wobei die Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet in der Routingsimulation nicht inbegriffen sind. Die herausgegebenen Vorhersagen und die Ermittlung des aktuell operationellen Abflusses

wurden gegenüber der Beobachtung überschätzt. Dies könnte zu einer späteren Flutung führen, jedoch nicht zur Erschöpfung des vorhandenen Volumens der Notpolder. Die gesamte Volumenkapazität der Notpolder wäre nicht komplett ausgenutzt, jedoch käme es zu einer erheblichen Abflussdrosselung im Scheitelbereich, insbesondere nach der Überlagerung der Elbe und Mulde. Bei der Simulation „operationeller Q + Vorhersage 17.8.“ wurde ein Schwellenwert  $3600 \text{ m}^3/\text{s}$  ermittelt, der nicht überschritten werden soll. Letztendlich wird nach diesem Kriterium die reale Abflussganglinie mittels der Notpolder transformiert, dadurch werden die drei Notpolder „nur“ mit  $100 \text{ Mio. m}^3$  Wasser gefüllt und deren Kapazität  $138 \text{ Mio. m}^3$  wird nicht voll ausgenutzt. Trotz dieser Tatsache würde eine Wasserstandsenkung in Aken (mit Mulde) um  $30 \text{ cm}$  gegenüber der Beobachtung ohne Maßnahmen erreicht. Bei der optimalen Flutung bereits beim Schwellenwert  $3400 \text{ m}^3/\text{s}$  würde die Wasserstandsreduzierung  $41 \text{ cm}$  betragen. Dies deutet auf die Robustheit eines solchen Notpoldersystems hin. Die Überschätzung der vorhergesagten Ganglinie würde zur Entscheidung führen, die Notpolder später zu fluten. Die Dauer des Abflussanstiegs von  $3400$  auf  $3600 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $17 \text{ cm}$  Wasserstandsunterschied) in Torgau im August 2002 betrug nur 2 bis 3 Stunden, sodass die Handlungszeit zur Entscheidung die Notpolder zu füllen sehr kurz ist.

Da die o.g. Simulationen der herausgegebenen Vorhersagen und des falsch ermittelten operationellen Abflusses wegen der ungünstigen Abflusskurven zu einer Überschätzung führten, wird in diesem Abschnitt eine mögliche Unterschätzung der Vorhersage oder Simulation bzw. der falschen Entscheidung eines niedrigeren Schwellenwerts angesprochen. In diesem Fall wurde der Schwellenwert um  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  niedriger gelegt auf  $3200 \text{ m}^3/\text{s}$ ; das entspricht einer Wasserstandsdifferenz in Torgau von  $17 \text{ cm}$ .

## 8 Lokale Untersuchung der Flutung der Notpolder

Wie bereits im Kapitel 7 erwähnt, wurde eine optimale Funktionsfähigkeit der geplanten Notpolder aus hydrologischer Sicht mit dem realen Ereignis vom August 2002 rechnerisch nachgewiesen. Zusätzlich wurden zahlreiche Szenarien, die im Kapitel 6 beschrieben wurden, herangezogen, um die Notpolderwirksamkeit dadurch überprüfen zu können. Die Ergebnisse, die als im Scheitelbereich reduzierte Abflussganglinien dargestellt sind, gelten als idealisiert zu betrachten, sie deuten auf die potenzielle Möglichkeit der Abflussminderung mit solchen Maßnahmen bei extremen Situationen hin. Diese Ergebnisse stellen erst die Randbedingungen für eine lokale hydraulische Untersuchung der Abflussentnahme von der Elbe in die Notpolder dar. Die Umsetzung in die Praxis erfordert weitere Ideen und gezielte Untersuchungen, die bis zur Entwicklung der Steuerungsstrategie und des operationellen Managements und damit verbundenen Bemessungsgrundlagen der Bauwerke führen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei Möglichkeiten der Abflussreduzierung, die sich ebenfalls als Entnahme des extremen Abflusses bezeichnen lässt, diskutiert. Im Allgemeinen handelt es sich um eine Verzweigung (Entnahme, seitlicher Abfluss) des Abflusses von der Elbe in die Notpolder bzw. Rückhalteräume, die neben dem Elbestrom vorgesehen sind. Das kann erzielt werden durch:

- die ungesteuerte Entnahme über eine festgelegte überströmbare Deichkrone (Überfallbauwerk) ohne Möglichkeit den Zufluss in die Notpolder zu regeln (steuern)
- die Entnahme über eine steuerbare Öffnungskonstruktion, mit welcher der Zufluss je nach der Abflussvorhersage sich operationell regeln lässt
- kontrollierbare Deichsprengung, die hydraulisch nur schwierig zu untersuchen ist. Zu diesem Thema gibt es nur wenige Informationen. Die Deichsprengungen wurden bisher nur in Extremfällen ohne nähere Angaben über die Ausweitung eines Deichbruches durchgeführt.

In dem nächsten Abschnitt werden die hydraulischen Grundlagen der Seitenentnahme erläutert, die maßgebend für die Berechnung und Bemessung der Überfallbauwerke relevant sind.

### 8.1 Hydraulische Grundlagen der Einlaufbauwerke

Die durch die hydrologische Untersuchung angesprochene Abflussentnahme – Kapazität – eines Einlaufbauwerks stellt eine Herausforderung an die hydraulische Untersuchung dar. Dafür ist das theoretische und praxisorientierte Wissen über das Verhalten der strömenden Wassermenge über Einlaufbauwerke oder eine Wehranlage für die Planung und Bemessung solcher Anlagen von großer Bedeutung.

Im Grunde handelt es sich um die Gerinneströmung mit seitlichem Abfluss, der ab bestimmter Menge von dem Hauptgerinne abgeführt wird. Die Abflussmenge im Gerinne nimmt in Fließrichtung ab, wobei sie von der lokalen Wassertiefe  $y(x)$  im Gerinne abhängig ist.

Als Einlaufbauwerk ist ein Streichwehr parallel zur Fließrichtung der Elbe vorgesehen, welches zur Hochwasserableitung genutzt wird. Nähere Beschreibungen der Streichwehre sind in der Literatur (Naudascher 1992, Bollrich 2007) enthalten. Die Grundrissformen der Streichwehre können gerade oder schief mit Verengung des Gerinnes gestaltet werden.

Ein stationär gleichförmiger Abfluss  $Q$  im Gerinne wird als Normalabfluss bezeichnet, wenn dessen Wassertiefe, Geschwindigkeit und Energiehöhe über der Sohle mittels Gefälle, Rauheit und Querschnittsgeometrie unverändert bleibt. Gleichzeitig ist die Sohlgefälle  $I_o$ , Wasserspiegelgefälle  $I_w$  und Energiegefälle  $I_e$  (infolge Reibungsverlusten) gleich (Bollrich 2007). Auf der Abbildung 8.1 ist die Ableitung der Differentialgleichung der Wasserspiegellinie skizziert.

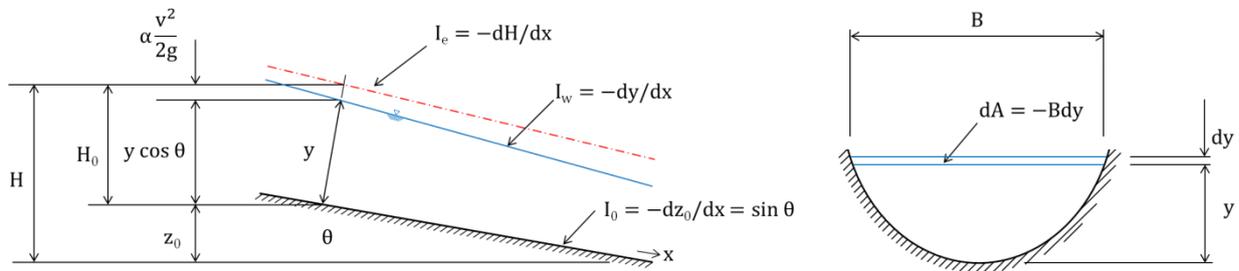


Abbildung 8.1: Eine Skizze (Längs- und Querschnitt) des Gerinnes zur Ableitung der Differentialgleichung der Wasserspiegellinie (Quelle: Naudascher 1992)

In diesem Abschnitt wird die Ableitung der Gleichung der Seitenentnahme vom Gerinne über ein Streichwehr angesprochen. Die seitlich abfließende Wassermenge  $q$  pro Längeneinheit  $x$  ist mit der folgenden Gleichung  $q = dQ/dx$  definiert. Mittels der Abbildung 8.1 wird die spezifische Energiehöhe für einen Gerinnequerschnitt mit der Beziehung 8.1 beschrieben:

$$H_o = y \cos \theta + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (\text{Gl. 8.1})$$

In der Differentialform lautet die Gleichung wie folgt:

$$\frac{dH_o}{dx} = I_o - I_e \quad \frac{dH_o}{dx} = \frac{dy}{dx} \cos \theta + \alpha \frac{1}{2g} \left( \frac{2Q}{A^2} \frac{dQ}{dx} - \frac{2Q^2}{A^3} \frac{dA}{dx} \right) \quad (\text{Gl. 8.2})$$

Nach Einsetzen von  $dA/dx = B dy/dx$  erscheint die o.g. Differentialgleichung in der Form wie folgt:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{I_o - I_e - \frac{q}{gA} \alpha V}{\cos \theta - \alpha \frac{V^2}{g \frac{A}{B}}} \quad (\text{Gl. 8.3})$$

wobei  $V = Q/A$  die mittlere Fließgeschwindigkeit im Gerinne ist.

Entlang der Streichwehre kann nach der Strömung im Gerinne entweder strömender Abfluss oder schießender Abfluss identifiziert werden. Die möglichen Strömungsfälle sind auf der folgenden Abbildung 8.2 skizziert:

- Strömender Abfluss im Gerinne entlang des Streichwehrs mit zunehmendem Wasserspiegel (Abbildung 8.2 a).

- Strömender Abfluss im Gerinne mit anschließend schießendem Abfluss und einem Wechselsprung entlang des Streichwehrs (Abbildung 8.2 b).
- Strömender Abfluss im Gerinne dem anschließend schießendem Abfluss entlang der gesamten Länge des Streichwehrs und einem Wechselsprung erst unterhalb des Streichwehrs (Abbildung 8.2 c).
- Schiessender Abfluss im Gerinne vor dem Streichwehr mit anschließendem Wechselsprung (Abbildung 8.2 d).
- Schiessender Abfluss im Gerinne vor und nach dem Streichwehr mit dem abgesenkten Wasserspiegel (Abbildung 8.2 e).

Die Leistungsfähigkeit des Streichwehrs im schießenden Bereich ist wesentlich kleiner als im strömenden Bereich, da die abzweigenden Stromlinien zur Gerinneachse sehr kleine Winkel einschließen. Erst im strömenden Bereich, bspw. nach dem Wechselsprung, wird die Leistungsfähigkeit des Streichwehrs höher (Schmidt 1957). Im Vergleich mit geraden, senkrecht angeströmten Überfällen können die Strömungsvorgänge an Streichwehre wegen der komplizierten Strömungsverhältnisse nicht exakt mathematisch erfasst werden. Das ist der Grund, warum in der Literatur die Abflussbeiwerte der Streichwehre vor allem für den strömenden Abfluss angegeben sind.

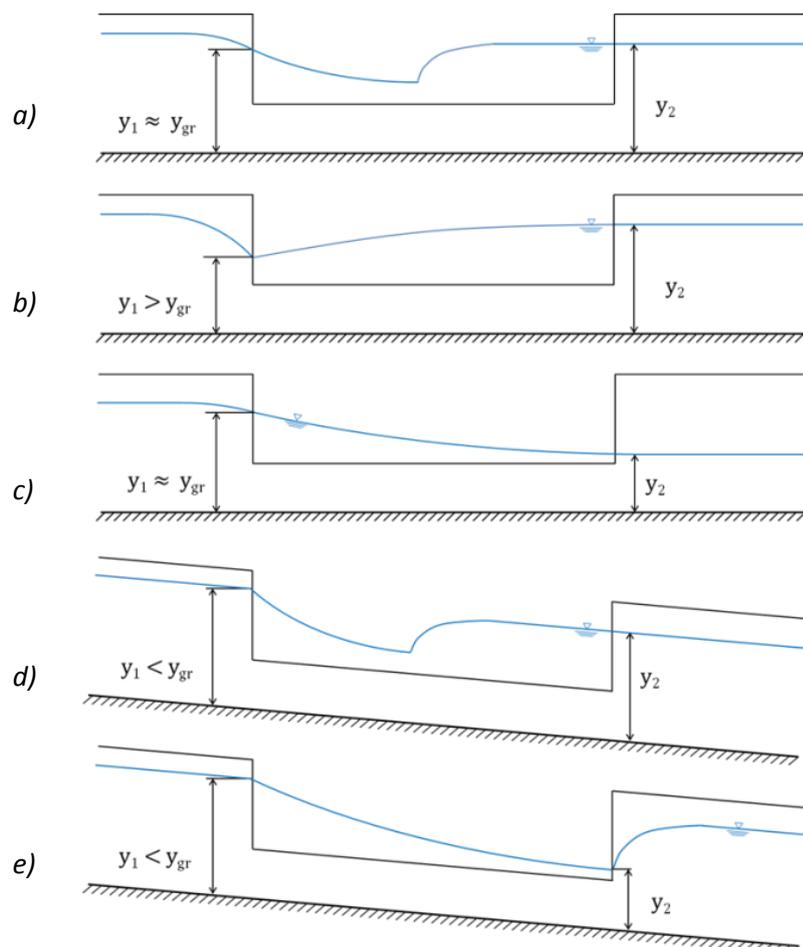


Abbildung 8.2: Strömungsfälle entlang der Streichwehre (Naudascher 1992)

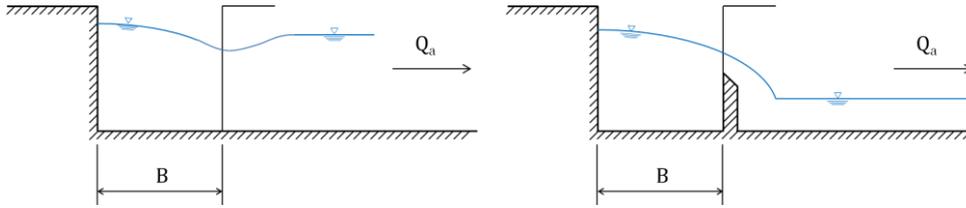


Abbildung 8.3: Darstellung einer Seitenentnahme (links) und eines Streichwehrs in diesem Fall mit einer scharfkantigen Krone (rechts)

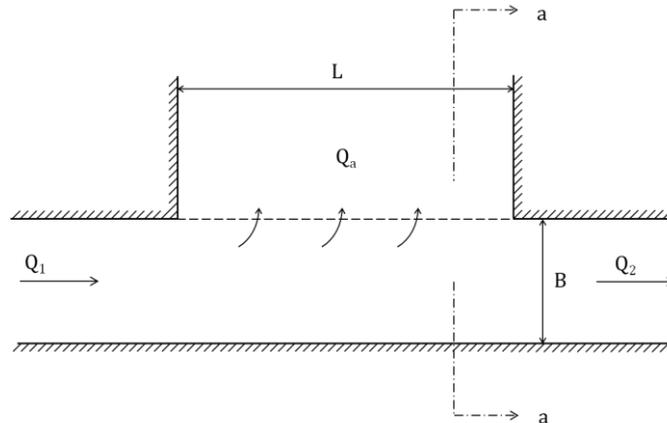


Abbildung 8.4: Grundriss eines Streichwehrs

Naudascher (1992) hat die Energiehöhe  $H_o$  als konstant angenommen sowie  $I_e = I_o$ . Dann ergibt sich die folgende Form aus der Gleichung 8.3 für ein Rechteckgerinne bei  $\alpha = 1$ :

$$\frac{dx}{dy} = -\frac{Qy}{gB^2y^3 - Q^2} \frac{dQ}{dx} \quad (\text{Gl. 8.4})$$

Der seitliche Abfluss pro Längeneinheit  $dQ_a/dx$  wird mit Hilfe vom Abflussbeiwert  $C_q$  berechnet. Dafür wird die Wehrform für eine Überströmung benutzt.

Für einen Abfluss kann folgende Gleichung geschrieben werden:

$$\frac{dQ_a}{dx} = -\frac{dQ}{dx} = C_q \sqrt{2g} (y - w)^{3/2} \quad (\text{Gl. 8.5})$$

wobei die beiden Gleichungen 8.5 und 8.6 in die o.g. Gleichung 8.4 eingesetzt werden. Daraus ergibt

$$Q = By \sqrt{2g(H_o - y)} \quad (\text{Gl. 8.6})$$

sich folgende Formel 8.7 für die Änderung der Wassertiefe  $dy/dx$ :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2C_q \sqrt{(H_o - y)(y - w)^3}}{B(3y - 2H_o)} \quad (\text{Gl. 8.7})$$

Diese Differentialgleichung wurde von De Marchi (1934) integriert und es ergibt sich für  $x$  bzw. eine Länge  $L$  des Streichwehrs:

$$x = \frac{2}{3} \frac{B}{C_q} (\Phi_i - \Phi_1) \quad L = \frac{2}{3} \frac{B}{C_q} (\Phi_2 - \Phi_1) \quad (\text{Gl. 8.8})$$

mit:

$$\Phi_i = \frac{2(H_o)_i - 3w}{(H_o)_i - w} \sqrt{\frac{(H_o)_i - y_i}{y_i - w}} - 3 \arcsin \sqrt{\frac{(H_o)_i - y_i}{(H_o)_i - w}} \quad (\text{Gl. 8.9})$$

Der Abflussbeiwert  $C_q$  der scharfkantigen Streichwehre wurde experimentell in Abhängigkeit der Froude-Zahl von der Anströmung (Ranga Raju 1979) ermittelt. Nach dieser Modelluntersuchung wurde eine etwa lineare Regressionsbeziehung zwischen der Froude-Zahl und dem Abflussbeiwert gefunden.

Für die Bestimmung der Länge  $L$  eines Streichwehrs stellt der gedrosselte Abfluss (in diesem Fall Schwellenabfluss  $Q_{\text{SCHW}}$ ) im Gerinne, der nicht überschritten werden soll, die Randbedingung für die Bemessung dar. Dieser Abfluss entspricht einem Wasserstand, der am Ende des Streichwehrs von einer Abflusskurve zu bestimmen ist, sowie einer Überfallhöhe. Als Eingangsgröße für die Bemessung ist der maximale Abfluss oberhalb des Streichwehrs mit ihrem Wasserstand bzw. ihrer Überfallhöhe einzusetzen.

Das Verfahren nach (Schmidt 1957) besteht aus der Gleichung, wo der seitliche Abfluss  $Q_a$  über ein Streichwehr mit der Überfallgleichung mit Hilfe vom Überfallbeiwert  $\mu$  und Abminderungsfaktor  $\sigma_{st}$  gerechnet wird, wie folgt:

$$Q_a = \sigma_{st} \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} L h_m^{3/2} \quad (\text{Gl. 8.10})$$

wobei die Formel eine mittlere Überfallhöhe  $h_m$  voraussetzt:

$$h_m = \frac{h_1 - h_2}{2} \quad (\text{Gl. 8.11})$$

Mit Hilfe von der Abbildung 8.5 kann die Bernoulli-Energiegleichung für den Anfangs- und Endquerschnitt des Streichwehrs bei dem bekannten Sohlgefälle  $I_o$  und der Rauheit geschrieben werden wie folgt (Bollrich 2007):

$$h_1 + w + I_o L + \alpha \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + w + \alpha \frac{v_2^2}{2g} + h_v \quad (\text{Gl. 8.12})$$

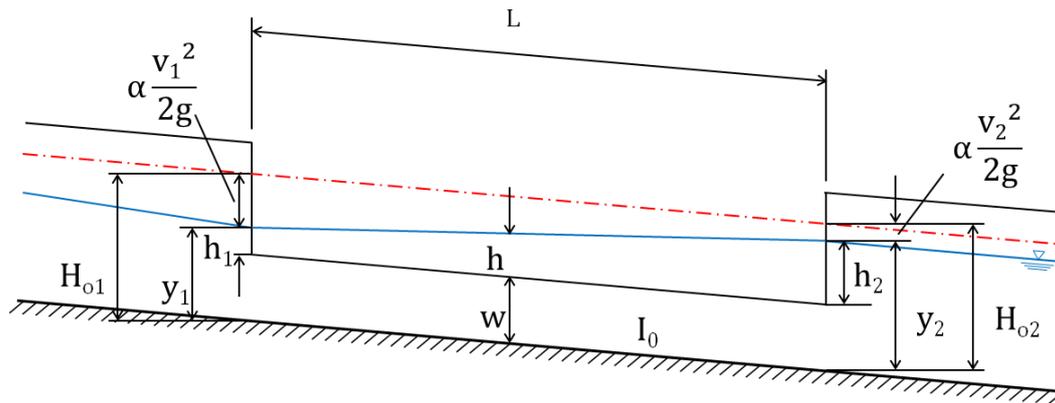


Abbildung 8.5: Schema für die Ableitung der Beziehungen des Wasserspiegels entlang eines Streichwehrs beim strömenden Abfluss

Hier wird die Reibungsverlusthöhe  $h_v$  entlang des Streichwehrs von der Manningformel durch die mittlere Geschwindigkeit  $v_m$ , den Manning-Strickler-Beiwert  $k_{St}$ , die Länge  $L$  und des hydraulischen Radius  $r_{hy}$  eingeführt:

$$h_v = \frac{v_m^2 L}{k_{St}^2 r_{hy}^{4/3}} \quad (\text{Gl. 8.13})$$

Schmidt hat in der Bernoulli-Gleichung noch den Korrekturbeiwert  $\zeta$  eingeführt, mit dem die Einflüsse der Strömunglenkung und Strömungsverzögerung entlang des Streichwehrs berücksichtigt werden. Dieses Verfahren nach Schmidt ist für Froude-Zahlen bis 0,75 gültig.

$$Fr_o = \frac{v_0}{\sqrt{gh_o}} < 0,75 \quad (\text{Gl. 8.14})$$

Für den Fall, dass die Strömung schießend ist, gelten andere Ansätze, die im Rahmen dieser Arbeit nicht angesprochen werden. Für die weiteren Informationen ist auf die hier zitierte Literatur zu verweisen.

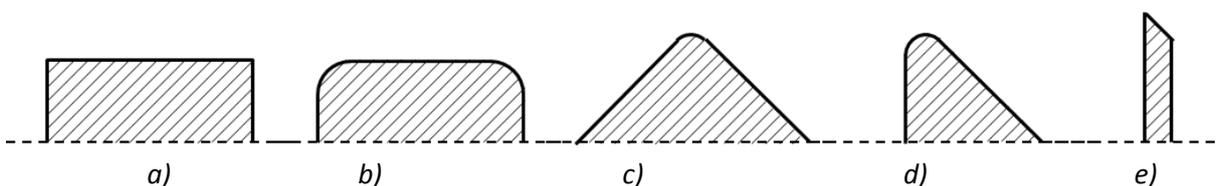


Abbildung 8.6: Die Kronenformen der Streichwehre

- a) breit, scharfkantig
- b) breit, mit abgerundeten Kanten
- c) dachförmig mit abgerundeter Krone
- d) rundkronig mit lotrechter und geneigter Seiten
- e) scharfkantig

## 8.2 Ungesteuerte Abflusssentnahme über ein festgelegtes Überfallbauwerk

Im Grunde genommen handelt es sich um eine ungesteuerte Notpolderfüllung über eine festgelegte Krone, deren Höhe im Hinblick auf das abflussmindernde Ziel definiert werden muss. Erst muss das erwünschte Hochwasserschutzziel, d.h. ein maximaler Abfluss unterhalb der Notpoldermaßnahmen definiert werden. Dieser Abfluss soll durch die betroffenen Orte mit erhöhtem Überflutungsrisiko unter der Voraussetzung, dass alle technischen Schutzmaßnahmen standfest halten, schadlos abgeführt werden. Da entlang der Elbe in Sachsen-Anhalt die Fläche mit Deichen gegen hohe Wasserstände geschützt ist, ist die aktuelle bzw. künftige Deichhöhe und damit zusammenhängende Kapazität der eingedeichten Elbe maßgeblich für die Bestimmung des maximalen schadlosen Abflusses, nach dem die Notpolderplanung gerichtet wird. Laut Informationen der zuständigen Behörde LHW wird angestrebt, die Deichhöhen auf den maximalen Wasserstand vom 2002 mit zusätzlich einem Meter Freibord auszubauen.

Im Allgemeinen ist ein Überfallbauwerk mit der festgelegten Krone bei jedem Notpolder vorgesehen. Dafür ist die Höhe der Überfallkrone, die Lage und die Länge eines Einlaufbauwerks in Abhängigkeit von der angestrebten Kapazität und von dem geforderten Kappungsziel zu definieren. Die im Kapitel 5 beschriebenen geplanten Notpolder sind ebenfalls geeignet situiert, da der Notpolder P1 mit dem größten Rückhalteraum gleich am Anfang des Landes Sachsen-Anhalt vorgesehen wird, dadurch kann das Volumen im Scheitelbereich relativ zuverlässig zurückgehalten werden und andererseits könnte die effizienteste Abflusskappung beispielsweise beim Ereignis 2002 bis zu  $810 \text{ m}^3/\text{s}$  erreicht werden. Demgegenüber können die kleineren Notpolder P2 und P6 nur eine vernachlässigbare Kappungswirkung mit je  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  beeinflussen, was einem Wasserstandsunterschied im Hochwasserbereich von nur etwa 1,5 cm entspricht. Trotz dieser Tatsache könnten diese Notpolder für die Reduzierung des restlichen Scheitelabflusses, der nicht über die ganze Zeit dauert, wirksam sein. Es ist nicht möglich eine konstante Abflusssentnahme über ein ungesteuertes Überfallbauwerk im Zusammenhang mit dem veränderten Wasserstand der Elbe und im Notpolder zu erreichen. Deshalb muss die Problematik der Abflusssentnahme mit den Instrumenten der zumindest vereinfachten hydraulischen Ansätze mit Hilfe von verfügbaren Daten analysiert werden. Dafür wurden die Daten von dem beobachteten und recht gut erfassten Ereignis 2002 herangezogen; zu den wichtigsten gehören die Abfluss- und Wasserstandsganglinien im 15-Minuten-Schritt von Torgau, Mauken, Wittenberg und Vockerode, sowie die maximalen Wasserstände der Elbescheitel in der Flussmitte alle 100 m. Bereits im Rahmen der lokalen Notpolderuntersuchung wurde angenommen, dass die (ungesteuerten und gesteuerten) Einlaufbauwerke möglichst in den oberen Notpolderbereichen eingerichtet werden sollen, um die rückstaufreie Wasserströmung sicherzustellen.

Folgende Bemessungsparameter eines festes Einlaufbauwerks müssen ermittelt werden, um die Abflusssentnahme (bzw. Zufluss) von der Elbe in den Notpolder rechnen zu können:

- die Art des Einlaufes (überströmbare Dämme, Überfallbauwerk)
- die Höhe der überströmbaren Krone eines Bauwerks oder eines Damms [m über NN], die von dem Kappungsziel abhängt
- die Länge L der Überfallkrone [m]

Als Einlaufbauwerke können oft diskutierte überströmbare Dämme in Betracht kommen, deren Einrichtung im Vergleich zu einem Betonbauwerk kostengünstiger wäre. Laut bisherigen Erfahrungen

und Informationen z.B. in (LfU 2004) soll ein maximaler spezifischer Zufluss pro ein Meter Breite über die Dammkrone  $1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  überschreiten. Bei den kleineren Notpoldern P2 und P6 wäre so eine Lösung denkbar. Bei den großen Notpoldern müsste ein überströmbarer Damm bis zu 800 m lang sein, weswegen diese Maßnahme nicht in Vordergrund gestellt wird. Im Allgemeinen ist ein überströmbarer Damm weniger kapazitätsfähig als ein Betonüberfallbauwerk, außerdem ist so ein Damm sehr erosionsanfällig.

Für die Bemessung eines seitlichen Überfallbauwerks wurde aus der bekannten Gleichung nach Poleni für einen vollkommenen Überfall ausgegangen, siehe Literatur (Bollrich 2007, Vischer 2002), wo die Abflussentnahme (Kapazität) von der Überfallhöhe  $h$  von dem aktuellen Elbewasserstand, von der Überfalllänge  $L$  und Überfallbeiwert  $\mu$  abhängt, siehe Gleichung 8.15 nach Poleni für den vollkommenen Überfall und die Abbildung 8.7.

$$Q_a = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} L h^{3/2} \quad (\text{Gl.8.15})$$

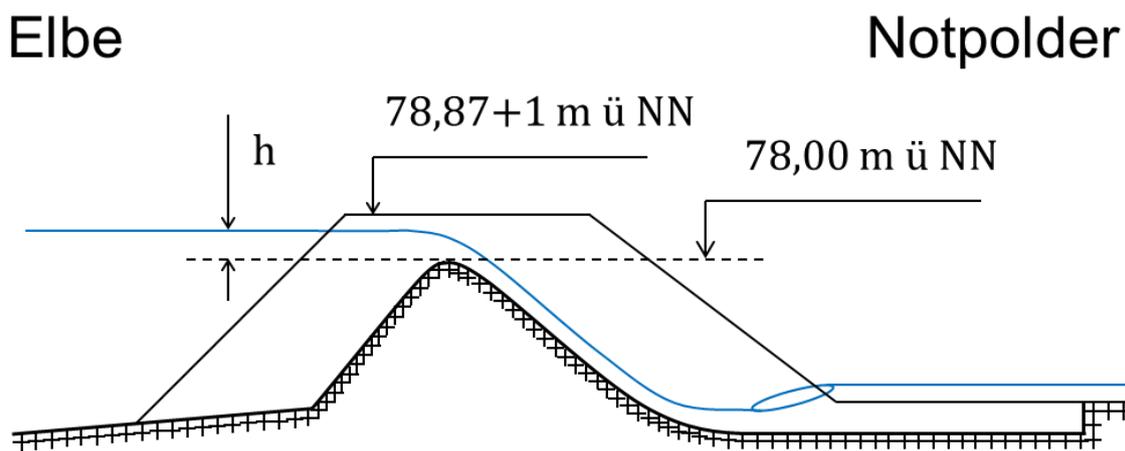


Abbildung 8.7: Überfallbauwerk bei der ungesteuerten Abflussentnahme, die Höhenangabe der Deichkrone gilt für P1 im oberen Bereich. Die Höhe und Breite der Überfallkante sind zu bestimmen.

Nach den ersten Berechnungen hat sich gezeigt, dass ein Zufluss (Abflussentnahme) bis zu  $740 \text{ m}^3/\text{s}$  über die Überfallkante auf der vorgeschlagenen Höhe  $78,00 \text{ m ü NN}$  und einer Länge von  $300 \text{ m}$  mit Überfallshöhe  $h$  bis  $0,93 \text{ m}$  bei dem Notpolder P1 sichergestellt werden kann. Um die aktuelle Überfallhöhe rechnen zu können, musste die Wasserstandsganglinie der Elbe am Einlaufbereich von der beobachteten Wasserstandsganglinie vom Pegel Mauken, die  $8,1 \text{ km}$  stromabwärts entfernt ist, abgeschätzt werden. Daraus ergibt sich die Frage der geeigneten Einlaufstelle, weil sich die maximale Bemessungseinstauhöhe im Notpolder P1 (bei Variante 4)  $77,00 \text{ m ü NN}$  auf die Deichhöhe im unteren Notpolderbereich bezieht. Eine ausführliche Untersuchung zur Bemessung von allen Überfallbauwerken würde genauere Kenntnisse über die räumlichen Wasserspiegelverläufe, die mit einem hydraulischen Modell gerechnet werden müssten, erfordern. Die Wasserspiegelverläufe sollten für jedes Abflusszenario und jeden Einlaufbereich ermittelt werden, dies ist aber kein Bestandteil dieser Arbeit. Aus diesem Grund kann die Höhe der Überfallkante nicht exakt definiert werden. Die Länge des Überfallsbauwerks jedes Notpolders, die für die Kapazität (Abflussentnahme) relevant ist, kann

abgeschätzt werden. Auf der Abbildung 8.8 ist eine Entnahmeganglinie und dadurch eine Scheitelkappung exemplarisch für das Ereignis vom 2002 für den Notpolder P1 gezeigt. Mit dem ersten Notpolder kann die größte Scheitelkappung erreicht werden, danach wird die restliche reduzierte Abflussganglinie der Elbe flacher. Nach der Erschöpfung des Rückhalteriums des ersten Notpolders können die von oben kommenden extremen Abflüsse mit unteren Notpoldern reduziert werden, z.B. mit dem Notpolder P7 Klieken.

Eine Scheitelreduzierung in ähnlicher Größenordnung kann bei den Ereignissen 1862 und 1890 erreicht werden, da die Formen dem Ereignis 2002 ähneln. Eine andere Situation könnte bei breiteren oder extremeren Ereignissen bzw. Szenarien vorkommen, deren Scheitelvolumen erheblich größer ist als beim Ereignis 2002, weil die Überfallkronen der Bauwerke festgelegt sind. Dadurch könnte nur ein Teil der extremen Abflüsse reduziert werden und die restlichen Abflüsse unterhalb der Notpolder würden deutlich über dem erwünschten Hochwasserschutzziel bleiben. Trotz dieser Tatsache könnte ein Scheitel von der restlichen Abflussganglinie, die mit einem steilen Wellenanstieg geformt werden könnte, indirekt durch die Beschleunigung des Flood-Routing-Prozesses geringfügig gedämpft werden. Vor allem würde eine solche Drosselung eines ansteigenden Astes zur Abflussreduzierung nach der Überlagerung mit der Mulde im Bereich der Stadt Dessau führen.

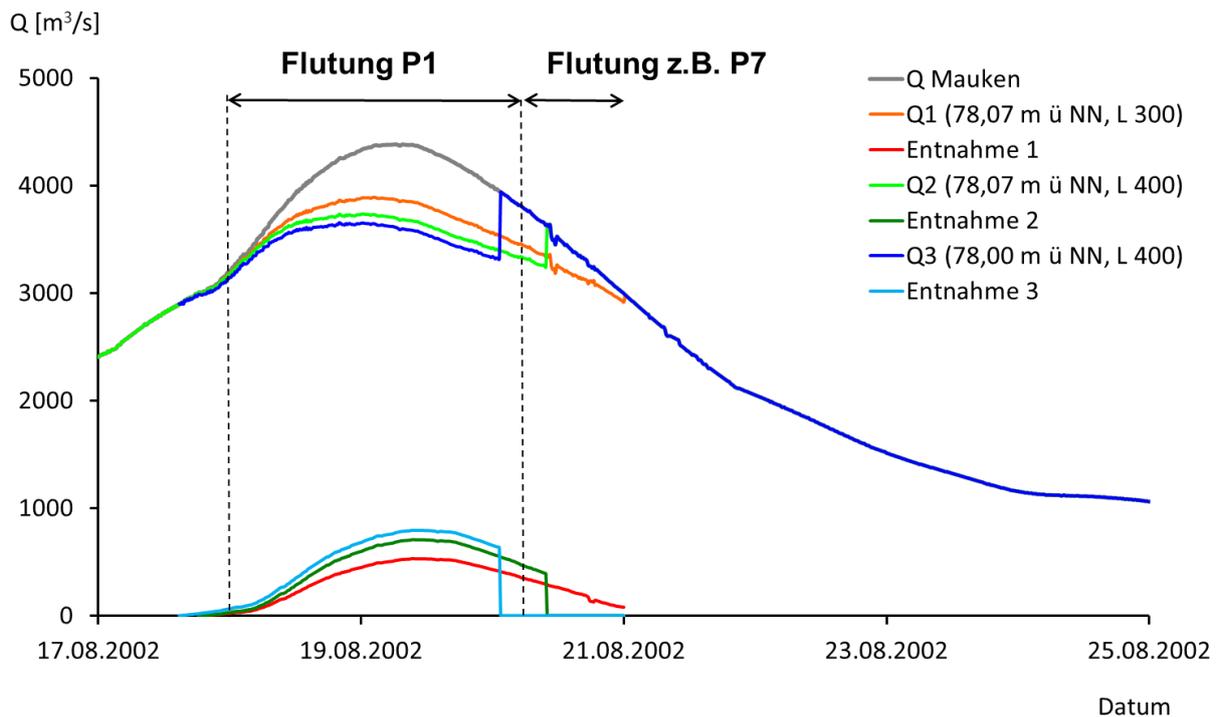


Abbildung 8.8: Die hochwasserdämpfende Wirkung der ungesteuerten Abflussentnahme über ein festgelegtes Überfallbauwerk mit gegebenen Bemessungsgrößen (Länge und Höhe der Überfallkrone) beim Ereignis 2002 für den Notpolder P1.

Der Vorteil der ungesteuerten Entnahme ist, dass dies keine kostenaufwändige bewegliche Öffnungseinrichtung einschließlich einer Bedienung sowie Wartung und keine Abflussvorhersage erfordern würde. Nachteilig scheint die Tatsache, dass bei künftigen, noch extremeren Ereignissen die Notpolder überlastet werden könnten und dadurch der Kappungseffekt nicht mehr erreicht würde. Damit würden Hochwasserschäden in den Notpoldern, sowie unterhalb dieser Maßnahmen, entste-

hen. Die ungesteuerte Entnahme ermöglicht keinen Eingriff in eine Hochwasserwelle mit der Ausnahme einer Deichsprengung. Die Planung der benötigten Bauwerke erfordert ein definiertes Bemessungshochwasser, welches nicht überschritten werden soll.

### 8.3 Steuerbare Abflussentnahme durch eine Öffnungskonstruktion

Eine Hochwasserbewältigung kann besser und effektiver erreicht werden, im Gegensatz zu der ungesteuerten Entnahme mit den steuerbaren Öffnungskonstruktionen, die bereits beispielsweise am Oberrhein oder an der Elbe im Havelmündungsbereich sowie an am unteren Mississippi (Morganza Wehr) eingerichtet wurden, erreicht werden. Die dafür vorgesehenen Rückhalteräume in den (Not)Poldern können unter der Voraussetzung einer verlässlichen Abflussvorhersage operationell und optimal im Hinblick auf die Bedürfnisse der betroffenen Unterlieger sowie möglicher Wellenüberlagerung von den Zuflüssen geflutet werden. Dieses erfordert ein Einlaufbauwerk mit steuerbaren beweglichen Konstruktionen, deren folgende Bemessungsparameter ermittelt werden müssen, um die Abflussentnahme (bzw. Zufluss) von der Elbe in den Notpolder rechnen zu können:

- die Art der steuerbaren Konstruktion (absenkbare Klappen, Schützen, Grundablässe)
- die Position eines Einlaufbauwerks
- die Kapazität/Leistungsfähigkeit eines Bauwerks (Breite und Anzahl der Felder), die von dem erwünschten Kappungsziel abhängt
- ein Steuerungsplan, nach dem die Entnahme geregelt werden muss

Als steuerbare Einlaufbauwerke wurden absenkbare Klappen für alle Notpolder ausgewählt und untersucht. Die Beschreibung der baulichen Ausführung ist in der Literatur (Bollmann 2005) zu finden. Hierbei ist eine oder mehrere gekrümmte Klappen – Fischbauchklappen – vorgesehen. So wurden bereits von der Firma HGN (Bollmann 2005) hydraulische Berechnungen von Einlaufbauwerken sowie von den beobachteten Elbewasserspiegellagen zum Teil durchgeführt. Damit wurden vier Einlauffelder mit den Fischbauchklappen je 12,5 m Breite für den größten Notpolder P1 vorgeschlagen.

Die Position des Einlaufbauwerks wurde im oberen Notpolderbereich vorgeschlagen, um die höhere Leistungsfähigkeit (Kapazität) durch möglichst vollkommenen Überfall über die abgesenkten Klappen sicherstellen zu können. Dies ist im Gegensatz zum zitierten Bericht (Bollmann 2005) anders, wo der Einlauf bzw. Überfall im unteren Notpolderbereich vorgesehen ist und er wäre relativ bald nach der Öffnung vom ansteigenden Wasserstand im Notpolder stark beeinflusst und die Kapazität würde schnell abnehmen.

Die Bemessung des Einlaufbauwerks wird aus dem maximalen Zufluss (Entnahme), welcher bereits im Kapitel 7 durch hydrologische Untersuchung ermittelt bzw. abgeschätzt wurde, ausgegangen. Die Leistungsfähigkeit beim Notpolder P1 soll bis zu 1000 m<sup>3</sup>/s sein, die Höhe der abgesenkten Klappe wurde auf 76,40 m ü NN gelegt. Dafür werden vereinfachte hydraulische Beziehungen angewendet und einige Prozesse wegen der mangelhaften oder nichtverfügbaren Daten vernachlässigt. Der Prozesslauf wurde am Beispiel des gut erfassten Ereignisses vom 2002 durchgeführt. Es wird vorausgesetzt, dass die Klappen erst nach dem Erreichen des bestimmten Abflussschwellenwerts, der im Kapitel 7 bereits angesprochen wurde, geöffnet werden. Die Berechnung des Zuflusses in den Notpolder wurde nur für voll abgesenkte Klappen durchgeführt, d.h. die Zwischenpositionen während des Klap-

penlegens wurden nicht berücksichtigt. Der Zufluss hängt am Anfang von der Überfallhöhe zwischen der abgesenkten Klappe und dem aktuellen Elbewasserstand ab.

$$Q_a = n \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} L h^{3/2} \quad (\text{Gl. 8.16})$$

Die Abschätzung der Wasserstandsganglinie der Elbe im Einlaufbereich vom August 2002 folgte von der 8,1 km entfernten Messstelle Mauken. Für den Zufluss wurde die Gleichung 8.16 des vollkommenen Überfalls bis zum Erreichen eines bestimmten Wasserstandes im Notpolder angewendet. Mit dem steigenden Wasserstand im Notpolder wird der Überfall von den Rückstauwirkungen beeinflusst, sodass die o.g. Gleichung 8.16 nicht mehr anwendbar ist und die Gleichung 8.17 des unvollkommenen Überfalls herangezogen werden muss, wo ein Abminderungsfaktor  $\sigma_{st}$  den zuflussverhindernden Einfluss vom ansteigenden Unterwasser darstellt. Mit der Größe  $n$  wird die Anzahl der Klappen berücksichtigt.

$$Q_a = n \sigma_{st} \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} L h^{3/2} \quad (\text{Gl. 8.17})$$

Der aktuelle Wasserstand im Notpolder wurde anhand der Speicherinhaltslinie und des in der Zeit aufsummierten zugeflossenen Volumens pro Zeiteinheit in den Notpolder ermittelt. Für die Zuflusssimulation wurde ein Zeitschritt 15 Minuten gewählt, da die beobachteten Ganglinien ebenfalls in gleichem Schritt zur Verfügung gestellt wurden. Durch die plötzliche Abflusentnahme von der Elbe (den Zufluss in den Notpolder) ändern sich die Strömungsverhältnisse und dadurch sinkt der Elbewasserstand. Dies erfordert eine Wasserstandsreduzierung nach der Wasserstand-Abfluss-Beziehung (Abflusskurve) von dem reduzierten Abfluss. Die Abflusskurve des Profils wurde vom Pegel Mauken an die Stelle des Einlaufbereichs schätzungsweise übertragen. Daraus folgt, dass der Zufluss in den Notpolder, der restliche (reduzierte) Elbeabfluss und Wasserstand iterativ ermittelt werden muss. Durch diese Analyse ergab sich, dass die dritte bis vierte Iteration hinsichtlich der Genauigkeit ausreichend zu sein scheint.

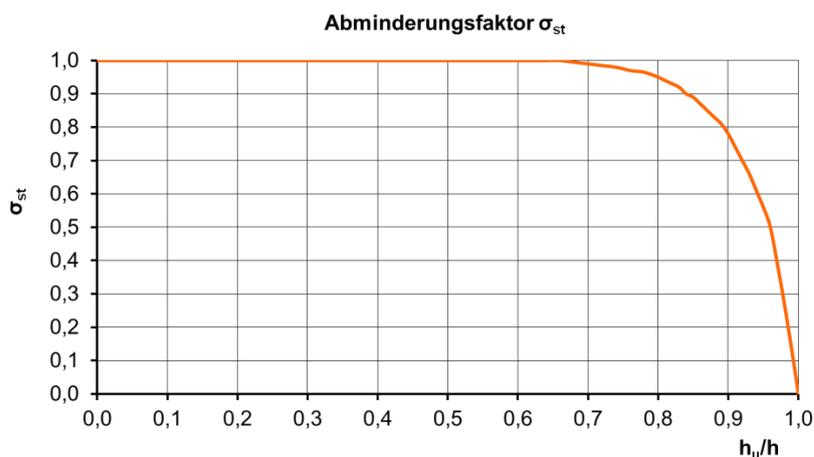


Abbildung 8.9: Abminderungsfaktor  $\sigma_{st}$  abhängig vom Verhältnis der Unter- und Oberwassertiefe für den unvollkommenen Überfall

Um diese Aufgaben einfacher und schneller sowie mehrere Durchläufe durchführen zu können, wurde für den ganzen Berechnungsprozess ein Programm mittels der Programmiersprache FORTRAN

geschrieben. Der Prozess beginnt mit dem Einlesen der Wasserstands- und Abflussganglinien, die von der Zeit abhängig sind, weiteres erfolgt das Einlesen der nichtveränderlichen Abflusskurve der Elbe und Speicherinhaltslinie des untersuchten Notpolders P1, sowie die Kurve des Abminderungsfaktors  $\sigma_{st}$  für den unvollkommenen Überfall. Im Laufe der ersten Iteration wird der Zufluss von dem aktuellen Wasserpiegelunterschied zwischen dem Elbewasserstand und dem Wasserstand im Notpolder bzw. über die Klappe ermittelt, weiter wird das reingeflossene Volumen pro einen Zeiteinschritt in den Notpolder und sein Wasserstand ermittelt, gleichzeitig wird der Elbeabfluss um den Zufluss in den Notpolder reduziert. Dem neuen reduzierten Elbeabfluss wird ein reduzierter Wasserstand zugeordnet, um den bei der nächsten Iteration einsetzen zu können. Die Iterationen verlaufen innerhalb von einem Zeitschritt 15 Minuten.

Zuerst wurde der Zufluss nur über ein Öffnungsfeld (Klappe) gerechnet, um die Modellfunktionsfähigkeit überprüfen zu können, danach wurde das Modell um andere Klappen erweitert. Das Modell rechnet den Zufluss erst nach dem Überschreiten eines Abflussschwellenwerts. Zwei Optionen der Steuerung wurden untersucht - alle Klappen werden gleichzeitig geöffnet oder sie werden schrittweise nacheinander abhängig von der aktuellen Situation der Elbe geöffnet. Die zweite Idee scheint effektiver zu sein, siehe Abbildung 8.12, wo die Entnahme über 4 Klappen dargestellt ist.

Bei der Berechnung wurden die Zwischenlagen der Klappen vernachlässigt, um den Prozess vereinfachen zu können. Beispielweise beim Polder Wörth / Jockgrim am Rhein in der Pfalz (3 m Höhe) dauert das Klappenlegen laut Angaben 20 Minuten (SGD 2001).

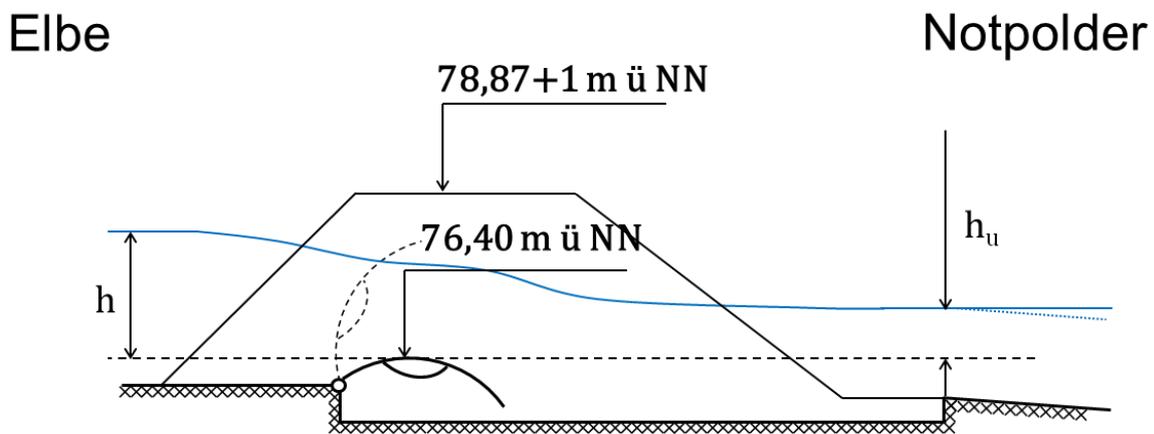


Abbildung 8.10: Schema eines steuerbaren Einlaufbauwerks mit Klappen

Die Berechnung des Zuflusses in den Notpolder ist mit vielen Unsicherheiten beeinträchtigt. Für eine zeitliche Wassermengenausbreitung im Notpolder wäre eine detaillierte numerische Lösung zu bestreben. Durch das Ausbreiten der Wassermenge im Notpolder könnte es zum Kapazitätsverlust im Einlaufbereich kommen und dadurch würde die bestrebte hochwasserdämpfende Polderwirksamkeit unterhalb solcher Maßnahmen nicht erreicht werden. Das System ist sehr sensitiv gegenüber den Eingangsparametern – vom Überfall- und Abminderungsbeiwert. Die Überprüfung einer konstruktiven Gestaltung des Einlaufbauwerks und der Funktionsfähigkeit des Systems erfordert eine Untersuchung mittels eines physikalischen Modells, um die o.g. Parameter und das Strömungsverhalten genauer analysieren zu können.

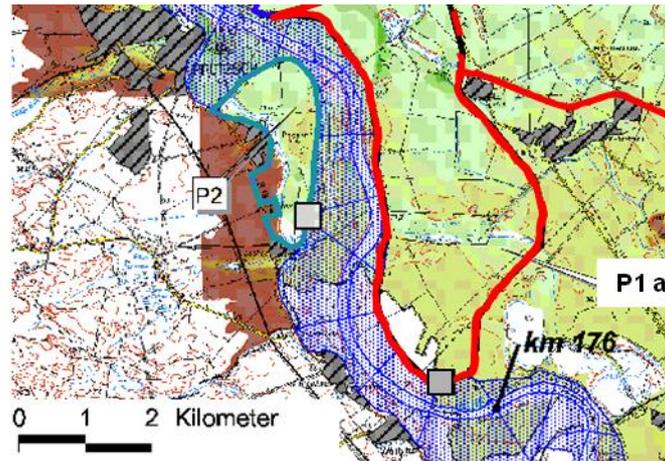


Abbildung 8.11: Einlaufbereich des Notpolders P1 im oberen Teil mit gekennzeichneten Ausuferungen vom August 2002, die Breite der Ausuferung am Elbe-km 177 betrug 800 bis 1000 m; ein Ausschnitt aus der Übersichtskarte von Abbildung 5.4.

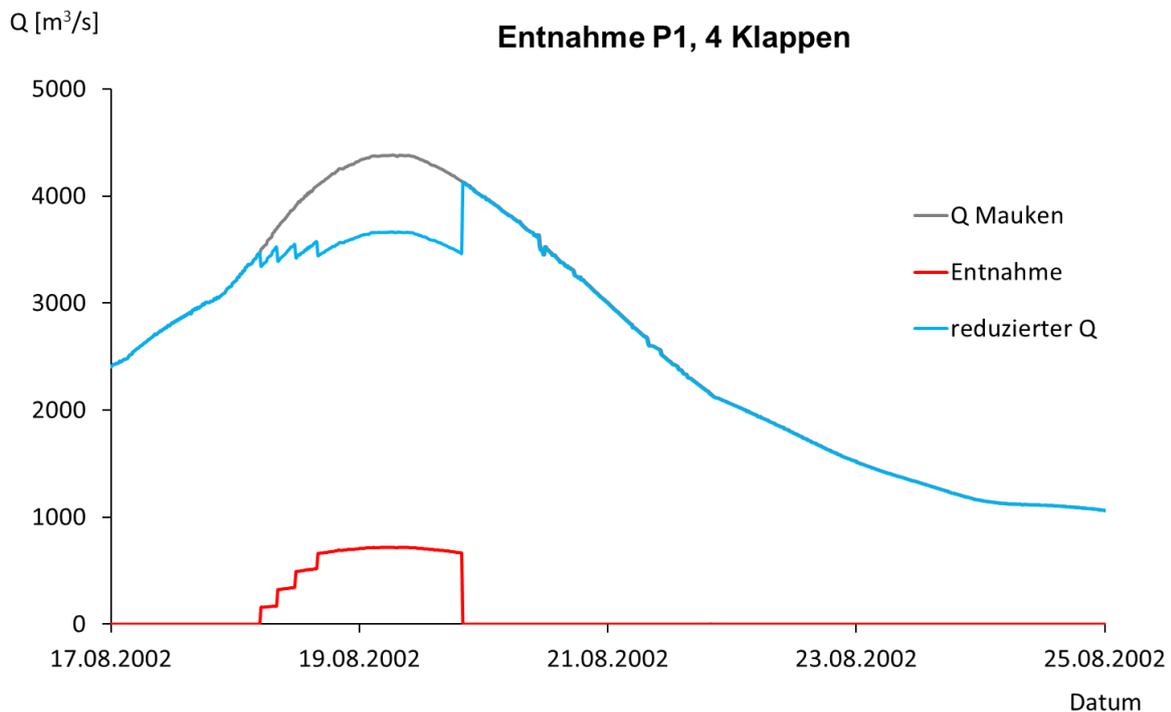


Abbildung 8.12: Die Abflussentnahme über 4 steuerbare Klappen des Notpolders P1 und die reduzierende Wirkung auf den Unterlauf für das Ereignis 2002. Die Zwischenlagen der Klappen wurden bei der Berechnung vernachlässigt.

Laut Informationen über die maximalen Überflutungen vom August 2002 betrug die Querschnittsbreite zwischen den rechten und linken Schutzdeichen am Elbe-km 176 – 177 etwa 800 bis 1000 m. Ein Einlaufbauwerk soll im Außenbogen der Elbe wegen besserer Strömungsverhältnisse und damit verbundenem Wasserspiegelanstieg (Querneigung des Wasserspiegels) eingerichtet werden. Eine Querneigung des Wasserspiegels hängt von dem Radius der Krümmung, der mittleren Geschwindigkeit, der Strombreite und dem Beiwert nach Mock ab (Mock 1960). Über die Formel und Rauheitsbeiwerte der Gerinne wird in der Literatur bspw. von (Nestmann 1991) berichtet.



*Abbildung 8.13: Bilder von der konstruktiven Gestaltung des Einlaufbauwerks mit Fischbauchklappen des Polders Wörth / Jockgrim in Rheinlad-Pfalz, links ist die Vorlandseite und rechts ist die Polderseite mit Tosbecken (Mikovec 2012) zu sehen.*

Die Entscheidung zur Steuerung des Polders Wörth / Jockgrim in Rheinlad-Pfalz wird anhand der aktuellen Hochwassersituation am Pegel Worms am Rhein (mit der Wirkung vom Neckar), der sich unterhalb der Maßnahmen befindet, getroffen. Dieser Polder kann ab einem 25-jährlichen Hochwasserereignis am Rhein in Worms gefüllt werden.

Jedenfalls erfolgt die Entscheidung zur Flutung der Notpolder aufgrund der aktuellen operationellen Abflussvorhersage am Rhein und Neckar. Eine konstruktive Gestaltung des Einlaufbauwerks mit Fischbauchklappen des erwähnten Polders ist auf der Abbildung 8.13 dargestellt. An der Elbe wurde im Rahmen dieser Arbeit 5 Klappen mit je 12,5 m Breite untersucht.

## 9 Zusammenfassung

Nach dem verheerenden Extremereignis vom August 2002 im Elbeeinzugsgebiet wurden Methoden untersucht, mit denen die Extremabflüsse gedämpft werden können. Dabei handelt es sich um steuerbare Notpolder, die nur im Falle einer Extremsituation eingesetzt werden sollen, bei der alle Hochwasserschutzmaßnahmen gegebener Bemessungsgrößen zuvor ausgeschöpft wurden. Um diese Herausforderung im Rahmen der vorliegenden Arbeit lösen zu können, stehen folgende Schwerpunkte bezüglich der hochwasserdämpfenden Notmaßnahmen im Vordergrund:

- Auswahl, Ermittlung der Kennwerte und hydrologische Effekte auf den Hochwasserverlauf solcher Maßnahmen – Notpolder – an der Elbe wurden untersucht, um die Bemessungsgrößen und optimale hochwasserdämpfende Wirksamkeit feststellen zu können.
- Im zweiten Schritt wurde auf den operationalen Betrieb unter den unsicheren Bedingungen der Vorhersage sowie der Auswertungen der aktuellen Abflüsse in der Extremsituation fokussiert, um die Steuerungsstrategie der Notpolderfüllung ableiten zu können. Das Ziel ist es, möglichst maximale Scheitelkappung bei maximaler Ausschöpfung der vorhandenen Notpoldervolumina zu erreichen.
- Um die o.g. Schwerpunkte durchsetzen zu können, musste der natürliche Abflussprozess großskalig im Hinblick auf die beobachteten sowie generierten Extremereignisse und deren Variabilität gründlich untersucht werden.

Im ersten Schritt wurden mögliche Notpolderflächen in Sachsen-Anhalt ausgewählt und unter Hinzunahme verfügbarer GIS-Daten (mit ArcGIS-Software) detailliert analysiert. Hierdurch wurden Speicherinhaltslinien aller Notpolder ermittelt. Insgesamt wurden 7 Flächen ausgewählt und in 4 Varianten untersucht. Die hochwasserdämpfenden Effekte durch die Flutung der Notpolder auf den Wellenablauf der Elbe wurden beim Ereignis vom August 2002 mit Hilfe eines Bilanzmodells und des Translations-Diffusions-Ansatzes rechnerisch bewiesen. Unter der Voraussetzung einer optimalen Steuerung ist je nach Variante und Extremereignis (vergleichbar zu dem vom 2002 und 1890) eine Wasserstandsreduzierung im Scheitelbereich von 20 bis 50 cm möglich. Aus den 4 Varianten der Notpolder wurde die Variante 3 mit den zuständigen Behörden (LHW) bevorzugt und weiter untersucht. Es handelt sich um die Notpolder P1+P3, die hydraulisch verbunden sein werden, und P7 mit einem Gesamtvolumen von etwa 138 Mio. m<sup>3</sup>, sodass nur zwei Einlaufbauwerke für die Realisation notwendig wären.

Mit einem einzelnen Extremereignis kann die Zuverlässigkeit und Funktionsfähigkeit eines solchen Systems nicht begründbar sein, aus diesem Grunde mussten zahlreiche, vielfältige und vor allem abgeleitete Extremszenarien herangezogen werden und durch den Flood-Routing-Prozess von dem tschechischen Gebiet bis zum Untersuchungsgebiet geroutet werden. Mittels Notpoldersimulationen der Szenarienganglinien wurden daraus die optimalen Steuerungsoptionen abgeleitet. Dabei wurden zwei Ziele verfolgt: im ersten Fall wurde die hochwasserverschärfende Wirkung der Mulde bei der Steuerung der Notpolder einbezogen, im zweiten Fall ohne Berücksichtigung der Mulde gesteuert. Die erste Option ist im Hinblick auf die Stadt Dessau effektiver. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden Ergebnisse der zahlreichen Studien und Projekte von der tschechischen sowie der deutschen Seite mit dem Flood-Routing-Modell gekoppelt und weiter für die Untersuchungen der Maßnahmen verwendet. Um diese Kopplung durchführen zu können, wurden die Parametersätze des Translations-

Diffusions-Ansatzes auch für tschechische Flussabschnitte iterativ ermittelt. Eine Instationarität der Parameter während des beobachteten Zeitraums wurde bei kleineren Hochwasserereignissen identifiziert. Aus dieser Simulation hat sich ergeben, dass die Beobachtungen im Tagesschritt nicht für die Parameterermittlung optimal sind aus diesem Grund wurden dafür die Beobachtungen (nur von einzelnen Ereignissen) im Stundenschritt herangezogen.

Die großskalige Überlagerung der vergangenen Ereignisse zweier Einzugsgebiete wurde anhand der offiziellen Abflussreihen und historischer Aufzeichnungen der Wasserstände, die über Abflusskurven die Abflussreihen ergänzen, ausgewertet. Daraus folgt, dass trotz der Tatsache dass der Muldescheitel wenigen Tage (in der Regel 2 bis 3) vor dem Elbescheitel eintrifft, die Mulde eine Hochwassersituation in Dessau stark beeinflussen kann. Aus dieser Untersuchung der vergangenen Ereignisse kann schlussgefolgert werden, dass vor allem die Moldau und Berounka (oberhalb Prag) zu hochwasser-auslösenden Gebieten gehören (bspw. Hochwasserereignisse vom 1890, 1954 und 2002), d.h. die Gebiete südlich und westlich von Prag vor allem im Böhmerwald. Eine ungünstige Ereignisüberlagerung der Moldau und der Kleinen Elbe oberhalb von Melk/Mělník wurde anhand der historischen Beobachtung nicht festgestellt.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden Schritte zur praktischen Umsetzung solcher Hochwasserschutzmaßnahmen gerade im operationellen Betrieb, d.h. unter der Einbeziehung der unsicheren und ungenauen Vorhersage und der ebenso unsicheren aktuellen Auswertung der Abflussdaten an den jeweilige Pegeln, skizziert. Es muss dabei betont werden, dass ein Hochwasserverlauf vorher nicht exakt bekannt ist. Ein Extremereignis ist spezifisch und einzigartig und vor allem sein Verlauf ist mit unvorhersehbaren Effekten (außergewöhnlichen Ausuferungen und Deichbrüchen) behaftet. Die Effekte der ungenauen Vorhersagen und Simulationen auf die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wurden aus diesem Grunde ermittelt und quantifiziert. Exemplarisch wurde dies für die Situation vom August 2002 mittels der damaligen offiziellen Vorhersagen für die nächsten 24 Stunden und den aktuellen Auswertungen am Pegel Ústí nad Labem (über 2 Tage oberstrom von dem Untersuchungsgebiet entfernt) durchgeführt. Eine Quantifizierung der datenbedingten Unsicherheit der aktuell ausgewerteten Daten stand in Vordergrund. Letztendlich wurde ein Konzept für die Entscheidung zur Flutung aufgrund der beobachteten Situation an den Pegeln Ústí nad Labem, Dresden, Torgau an der Elbe und am Pegel Bad Dübener Heide an der Mulde sowie der Vorhersage ausgearbeitet.

Die Ganglinien der Vorhersagen und des aktuell ausgewerteten Abflusses wurden von Ústí nad Labem bis nach Torgau geroutet, um die Größe und das zeitliche Auftreten des Scheitels ermitteln zu können. Danach wird mittels der Simulation der Kappungswirkung entschieden, wann die Klappen der ersten zwei Notpolder geöffnet werden müssen. Dies hängt von dem aktuellen beobachteten Wasserstand am Pegel Torgau ab. Am Beispiel vom August 2002 ergaben die Simulationen in Torgau einen höheren Abfluss, der dazu geführt hätte, die Notpolder später zu fluten.

Die Einrichtung solcher steuerbaren Retentionsmaßnahmen erfordert eine detaillierte hydrodynamische Untersuchung zum Ablauf der oben erwähnten Extremereignisse und –szenarien der Elbe, die von der kontrollierbaren Flutung beeinflusst wären. Damit werden die Wasserspiegellagen bei gegebenen Abflussganglinien lokal und weitläufig ermittelt. Eine hydrodynamische Modellierung ist neben den geometrischen Kennwerten des Gerinnes von den Rauheitsbeiwerten (Manning-Strickler) stark abhängig. Lokale Berechnungen zur Überprüfung der Bemessung von einem Einlaufbauwerk ist eine Randbedingung für eine nähere Untersuchung der Strömungsverhältnisse durch physikalische

Modellierung von solchen Objekten. Die Ermittlung des Abminderungsbeiwerts bei der Stromablenkung von der Elbe über einen Überfall muss mittels eines physikalischen Modells mit geeignetem Maßstab in einem Wasserbaulabor durchgeführt werden.

Die hier präsentierte Idee der möglichen Bewältigung von extremen Hochwasserereignissen am Beispiel der Elbe ist natürlich in anderen Einzugsgebieten verwendbar, wo die Überlagerung von Hochwasserereignissen eine wesentliche Verschärfung der Situation für die Unterliger verursachen könnte. Dafür müssen die gebiets- und abflussprozessspezifischen Gegebenheiten detailliert untersucht werden.

## Literatur

- America's Wetland Resource Centers (2011): Louisiana Old River Control Complex and Mississippi River Flood Protection, im Internet  
[http://www.americaswetlandresources.com/background\\_facts/detailedstory/LouisianaRiverControl.html](http://www.americaswetlandresources.com/background_facts/detailedstory/LouisianaRiverControl.html) letzter Zugang Januar 2012
- Anderson E. A. (1973): National Weather Service River Forecast System - Snow accumulation and ablation model. NOAA Tech. Memo. NWS Hydro-17, U.S. National weather Service.
- Anderson E. A. (2006): Snow accumulation and ablation model
- Arlai Phatcharasak, Koch Manfred (2010): Numerical Investigation of combined flood mitigation and groundwater recharge in the Chao Phraya River basin, presentation
- Batholmes J. C., Thielen J., Ramos M. H., Gentilini, S. (2009): The European Flood Alert System – Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts
- Beven K. (1993): Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modeling, *Advances in Water Resources* 16 (1993) 41 – 51
- BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde (2002): Das Augusthochwasser 2002 im Elbegebiet
- Bjarsch B. (2003): Hydrologisch-Hydraulische Untersuchungen mit dem Fließstrecken-Retentions-Modell zur Hochwassersituation der Elbe ab Deichbruch Dautzschen bis Aken, Ingenieurbüro Benno Bjarsch, Berlin,
- Björnsen Beratende Ingenieure (2010): KALYPSO Hydrology, Anwendungsbuch
- Bollmann J. (2005): Polderplanungen im Landkreis Wittenberg, Grundlagenuntersuchung zur Errichtung steuerbarer Polder im Landkreis Wittenberg HGN Ruiz Rodriguez und Zeisler
- Bollrich G. (2007): Technische Hydromechanik Band 1
- Bölte H. (1910): Die bisherige Entwicklung der Hochwasservorhersage für die Elbe. In: Jahrbuch für die Gewässerkunde Norddeutschlands / Besondere Mitteilungen
- Brazil L. E. (1989): Multilevel Calibration Strategy for Complex Hydrologic Simulation Models. NOAA Technical Report (Silver Spring, Maryland)
- Brázdil R., Dobrovolný P., Elleder L., Kaos V., Kotyza O., Květoň V., Macková J., Štekl V., Tolasz R., Valášek H. (2006): Historické a současné povodně v České republice, (Historische und gegenwärtige Hochwasserereignisse in Tschechischer Republik)
- Bremicker, M., Homagk, P., Ludwig, K. (2006): Hochwasserfrühwarnung und Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg, in *Wasserwirtschaft*
- Bronstert, A. (2004): Möglichkeiten zur Minderung des Hochwasserrisikos durch Nutzung von Flutpoldern an Havel und Oder.
- Bronstert A., Zehe E. (2008): OPAQUE – Operationelle Abfluss- und Hochwasservorhersage in Quellgebieten

- Bürger K., Seidel J., Imbery F., Dostal P. (2006), RIMAX-Projekt Xfloods - Analyse historischer Hochwasser für ein integratives Konzept zum vorbeugenden Hochwasserschutz
- Burnash R. J. C., (1995): The NWS River Forecast System – catchment modeling. In Computer Models of Watershed Hydrology (ed. Singh, VP.), 311-366. Water Resource Publications (Highland Ranch)
- Bushra Khan, Muhammad Jawed Iqbal, M. Ayub Khan Yosufzai (2010): Flood risk assessment of River Indus of Pakistan, in Saudi Society for Geosciences
- Chaiyuth Sukhsri (2011): Flood Mitigation and Management in the Chao Phraya Basin: Data/ Information on Existing System and Lesson Learned from the recent Flooding Events, Presentation
- Consortium for Small-scale Modeling COSMO (2011); Documentation. Im Internet: [<http://www.cosmo-model.org/-content/model/documentation/core/default.htm#p7>] letzter Zugang Juli 2011
- Daňhelka J. et al., (2003): Posouzení vhodnosti srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR.
- Daňhelka J., Krejčí J. (2006): Annual Report. In: Operationelles Hochwassermanagement in großräumigen Extremsituationen am Beispiel der Mittleren Elbe
- Daňhelka J. et kol., (2008): Hydrological model verification and scenarios simulation for the Czech part of Elbe river basin. In: Operationelles Hochwassermanagement in großräumigen Extremsituationen am Beispiel der Mittleren Elbe
- Dang Quang Tinh (1999): Participatory planning and management for flood mitigation and preparedness and trends in the river basin, Vietnam, Department of Dyke Management and Flood Control, Ministry of Agriculture and Rural Development
- De Marchi G. (1934): Essay on the Performance of Lateral Weirs. In: L'Energia Elettrica
- Disse M., Guckenberger K., Pakosch S., Yörük A. (2008): Entwicklung eines operationell einsetzbaren Expertensystems zum Hochwasserrisikomanagement unter Berücksichtigung der Vorhersageunsicherheit (HORIX)
- Duan Q. (1991): A Global Optimization Strategy for Efficient and Effective Calibration of Hydrologic Models (PhD. Dissertation)
- Dyck S. (1976): Angewandte Hydrologie Teil I: Berechnung und Regulierung des Durchflusses der Flüsse
- Dyck S., Peschke G. (1995): Grundlagen der Hydrologie
- Federal Flood Commission (FFC) (2010): Ministry of Water and Power, Government of Pakistan, Annual Flood Report 2010
- Göbel N. (1997): Numerische Simulation und Optimierung der Füllung und Entleerung des Polders Grietherbusch Niederrhein Strom-km 840 – 848 rechtsrheinisch, IWG und STAU Krefeld

- Grünwald U., Bartl S., Schümberg S., Deutsch M., Matz S., Fügner D. (2007): Integration von historischen und hydraulisch/hydrologischen Analysen zur Verbesserung der regionalen Gefährdungsabschätzung und zur Erhöhung des Hochwasserbewusstseins
- Güthlein, K., Burkhardt, P., Melcher, M., Pölte, B. (1980): Das Zentralmodell der Elbe – erstes kontinuierlich arbeitendes Wasserstands- und Durchflussvorhersagemodell in der DDR. – In: Wasserwirtschaft – Wassertechn. (10-1890); Verlag für Bauwesen; Berlin
- Gutknecht D. (2006): Vortrag: Integrierte Konzepte für eine Hochwasserrisikomanagement. In Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse (RIMAX), Potsdam
- Hartung J., Elpelt B., Klösner K.H. (1991): Statistik
- Heilig J. (2000): Auswirkungen der Eindeichungen im 20. Jahrhundert auf die Hochwasserkennwerte im Bereich der Unteren Mittelelbe, Vertieferarbeit am IWG
- Helms M., Ihringer J., Nestmann F. (2002): Analyse und Simulation des Abflussprozesses der Elbe. In: Nestmann F. und Büchele B. (Eds.) Morphodynamik der Elbe (2002)
- Helms M., Büchele B., Merkel U., Ihringer J. (2002): Statistical analysis of the flood situation and assessment of the impact of diking measures along the Elbe (Labe) river. *Journal of Hydrology*, 267(1-2): 94-114;
- Helms M., Mikovec R., Ihringer J., Büchele B. (2008): Methoden zur Erhebung und hydrologischen Auswertung historischer Hochwasserinformationen für große Flussgebiet am Beispiel der Elbe/Labe. In DWA-Bericht: Erschließung und Einbeziehung historischer Informationen für die Ermittlung extremer Hochwasserabflüsse – Fallbeispiele und Empfehlungen
- Helms M., Ihringer J., Mikovec R. (2009): Teilprojekt Hydrologie. In: Operationelles Hochwassermanagement in großräumigen Extremsituationen am Beispiel der Mittleren Elbe
- Helms M., Ihringer J., Mikovec R. (2013): Überarbeitung der HQ(a)-Reihen und Abflusstafeln der Elbepegel (1890-2006)
- Hess P., Brezowsky H. (2005): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2004)
- Huang, J. Rauberg, H. Apel, M. Disse, and Lindenschmidt K.E. (2007): The effectiveness of polder systems on peak discharge capping of floods along the middle reaches of the Elbe River in Germany, NHESS 2007
- Hogue T. S., Sorooshian S., Gupta H., Holz A., Braatz D. (2000): A Multistep Automatic Calibration Scheme for River Forecasting Models, in *Journal of hydrometeorology*
- Huth R., Metelka L., Kliegrová S., Sedlák P., Kyselý J., Mládek R., Halenka T., Kalvová J. (2001): Regional Climate Model ALADIN-CLIMATE – a tool for Regionalization of Climate Change Estimates in Central Europe: First Results
- Ihringer J., Büchele B., Mikovec R. (2003): Untersuchung von Hochwasserretentionsmaßnahmen entlang der Elbe im Bereich der Landkreise Wittenberg und Anhalt-Zerbst: Grundsatzstudie bezüglich der hydrologischen Wirkung. – Bericht, im Auftrag des Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), Universität Karlsruhe (TH), unveröff.

- Ihringer J. (1999): Softwarepaket für Hydrologie und Wasserwirtschaft – Anwenderhandbuch Band 2: Statistische Analyse geophysikalischer Zeitreihen
- IKSE Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2004): Dokumentation des Hochwassers vom August 2002 im Einzugsgebiet der Elbe
- IKSE Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2006): Erster Bericht über die Erfüllung des „Aktionsplans Hochwasserschutz der Elbe“ im Zeitraum 2003 bis 2005
- IKSE Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2009): Zweiter Bericht über die Erfüllung des „Aktionsplans Hochwasserschutz der Elbe“ im Zeitraum 2006 bis 2008
- Kašpárek L. (2004): Karte der Fließzeiten des tschechischen Netztes von Quellengebieten bis zum Pegel Děčín, unveröff.
- Kranawettreiser J. (2002): Hochwasserschutz durch Überschwemmungsflächen (Havel). In Hochwassermanagement
- Kron A., Nestmann F., Schlüter I., Schädler G., Kottmeier C., Helms M., Mikovec R., Ihringer J., Musall M., Oberle P., Saucke U., Bieberstein A., Daňhelka J., Krejčí J.(2010): Operational flood management under large-scale conditions, using the example of the Middle Elbe. In NHES
- Kron W. (1996): Stochastische Simulation des Geschiebetransports am Zusammenfluss zweier Gewässer. Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe, Heft 59, 1996
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (2004): Überströmbare Dämme und Dammscharten
- Laurent S., Hangen-Brodersen C., Ehret U., Meyer I., Moritz K., Vogelbacher A., Holle F. K. (2009): Dealing with forecast uncertainties within the operational flood forecast in the Bavarian Danube Catchment
- Macke E. (2001): Studien zur Bewertung von Zustand und Hochwasserschutzgrad der Elbe- und Muldedeiche Anlage-CD, Ingenieurgesellschaft Prof. Dr.-Ing. E. Macke mbH Braunschweig-Dessau
- Maidment D. R. (1993): Handbook of Hydrology
- Maniak U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft
- Merkel U., Helms M., Büchele B., Ihringer J., Nestmann F. (2002): Wirksamkeit von Deichrückverlegungs-massnahmen auf die Abflussverhältnisse entlang der Elbe. In: Nestmann F. und Büchele B. (Eds.) Morphodynamik der Elbe (2002)
- Meißner C. (2008): High-resolution sensitivity studies with regional climate model COSMO-CLM. Doctoral Thesis University of Karlsruhe,
- Meon G., Anhalt M., Ihringer J., Höfer J. (2007): Risikobasierte Verfahren zur Hochwasserbemessung von Stauanlagen – Übersicht zum laufenden RIMAX-Projekt. In Gutknecht, D. (Hrsg.): Extreme Abflussereignisse. Dokumentation - Bedeutung - Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien

- Meteorologische Zeitschrift (MZ) (2008), Volume 17, Number 4 August 2008: Regional Climate Modeling with COSMO-CLM (CCLM)
- Mikovec R. (2004): Flood Protection along the Elbe River: Simulation of the flow Process of the Elbe and its Main Tributaries Regarding the Operation of Flood Retention Measured. In: Malzahn, D., Plapp T., [Eds.]: Disasters and Society – From Hazard Assessment to Risk Reduction
- Monro J. C. (1971): Direct Search Optimization in Mathematical Modeling and a Watershed Model Application, NOAA Technical Memorandum, Silver Spring, Maryland
- Mock F. J. (1960): Strömungsvorgänge und Energieverluste in Verzweigungen von Rechteckgerinnen
- MŽP Ministerstvo životního prostředí (2005): Influence of large reservoirs in the Elbe river basin on reduction of flood flows
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models
- Naudascher E. (1992): Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke
- National Disaster Management Authority – United Nations Development Program (NDMA-UNDP), Training Workshop on „Flood Mitigation“ in Present Flood Control System in Pakistan, February 2010
- Nestmann F., Büchele B. (Hrsg.) (2002): „Morphodynamik der Elbe“. Schlussbericht des BMBF-Verbundprojektes mit Einzelbeiträgen der Partner und Anlagen-CD. – Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, ISBN 3-00-008977, Universität Karlsruhe, (vgl. <http://elise.bafg.de/?3804>)
- Nestmann F., Kron A., Schlüter I., Schädler G., Kottmeier C., Helms M., Mikovec R., Ihringer J., Musall M., Oberle P., Saucke U., Bieberstein A. (2009): Operationelles Hochwassermanagement in großräumigen Extremsituationen am Beispiel der Mittleren Elbe
- Nestmann F. (1991): Fließformeln, Rauheitsbeiwerte im Flussbau und Leistungssteigerung von Bundeswasserstraßen. In: Binnenschiffahrt Nr. 1,2.
- Noata Hanasaki, Shinjiro Kanae, Katumi Musiaki (2003): Simulating the discharge of the Chao Phraya River taking into account reservoir operation
- NWS National Weather Service River Forecast System (NWSRFS) (1999): User's Manual. [Available from NOAA/National Weather Service, Office of Hydrology, 1325 East-West Hwy, Silver Spring, MD 20910].
- NWS National Weather Service River Forecast System (NWSRFS) (2007): User's Manual. [[http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users\\_manual/htm/xrfsdocpdf.php](http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users_manual/htm/xrfsdocpdf.php)]. letzter Zugang Dezember 2011
- ONWCR The Working Group of the Office of Natural Water Resources Committee of Thailand 2004: Chao Phraya River Basin, Thailand
- Plate E. J. (1993): Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeit für Bauingenieure
- Povodí Vltavy, státní podnik, Vodohospodářský dispečink Povodí Vltavy, s.p. v Praze, (2003): Souhrnná zpráva o povodních v srpnu 2002

- Ranga Raju K.G, Prasad B., Gupta S. (1979): Side Weir in Rectangular Channel
- Royal Irrigation Department (RID): [http://water.rid.go.th/flood/plan\\_ew/plan\\_ew.html](http://water.rid.go.th/flood/plan_ew/plan_ew.html), letzter Zugang Januar 2012
- Rubin W. (1900): Die Canalisierung des Moldau- und Elbe-Flusses in Böhmen: ihre Entwicklung und ihr Stand zu Beginn des Jahres 1900
- Schlüter I., Schädler G. (2010): Sensitivity of Heavy Precipitation Forecast to Small Modifications of Large-Scale Weather Patterns for the Elbe River, in *Journal for Hydrometeorology*
- Schmidt M. (1957): Gerinnehydraulik
- Schuman A., Pahlow M., Klein B., Hundecha Hirpa Y., Gatke C., Petry., Kufeld M., Schüttrumpf H., Hirschfeld J., Petschow U., Nijssen D. (2008): Integrative Nutzung des technischen Hochwasserrückhalts in Poldern und Talsperren am Beispiel des Flutgebiets der Unstrut
- Schumann, A. (2009): Integrative Nutzung des technischen Hochwasserrückhalts in Poldern und Talsperren am Beispiel des Flussgebiets der Unstrut
- Šercl P., Kulasová B., Kessler J., Vrabec M., Řičiřová P., Kubát J. (2003): Hydrologické vyhodnocení katastrofální povodně v srpnu 2002, Aktualizace podle výsledků 3. etapy (Auswertung des katastrophalen Hochwasserereignisses vom August 2002, Aktualisierung nach den Ergebnissen von der dritten Projektphase)
- SGD Süd – Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd Rheinland-Pfalz (2001): Hochwasserschutz am rheinland-pfälzischen Oberrhein, Die Hochwasserrückhaltung Wörth/Jockgrim
- Somkiat Prajamwong, Pornsak Supparatarn (2009): Integrated Flood Mitigation in the Lower Chao Phraya River Basin
- Steinhart M.(2010); Application of rainfall-runoff model Boussmo, Diplomarbeit, CZU Prag
- Thielen J., Bartholmes J. C., Ramos M. H., de Roo A. (2009): The European Flood Alert System – Part 1: Concept and development
- Tomkins CD (2001): Application of the Multi-Step Automatic Calibration Scheme (MACS) to NWS River Forecast Center Basin. NOAA/NWS, Silver Spring 2001 Meeting
- Treiber B. (1975): Ein stochastisches Modell zur Simulation von Tagesabflüssen Treibermodell, Doktorarbeit, Institut Wasserbau III, Universität Karlsruhe
- US Army Corps of Engineers New Orleans District (2004): Project Flood „The Mississippi River and Tributaries Project“, im Internet <http://www.mvn.usace.army.mil/pao/bro/misstrib.htm> letzter Zugang Dezember 2011
- Van der Knijff J. M., Younis J., De Roo A.P.J. (2008): LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. In *International Journal of Geographical Information Science*
- Vischer D., Huber A. (2002): Wasserbau, Hydrologische Grundlage, Elemente des Wasserbau, Nutz- und Schutzbauten an Binnengewässern

- Vlasák T., Daňhelka J., (2009 und 2010): Vyhodnocení úspěšnosti hydrologických povodní v letech 2002 – 2010 (Evaluierung des Erfolgs der Hochwasserereignisse in den Jahren 2002 bis 2010): im Internet <http://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/vyhodnoceni.htm> letzter Zugang Dezember 2011
- WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH, IaG Institut für angewandte Gewässerökologie GmbH (2006): Gemeinsames Gutachten der Länder Brandenburg und Sachsen-Anhalt zur Flutung der Havelniederung bei Hochwasserereignissen (größer HQ100),
- Wagener T., McIntyre N., Lees M. J., Wheeler H.S., Gupta H.V. (2003): Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modeling: Dynamic identifiability analysis. In *Hydrological Processes* 17, 455 – 476 (2003)
- Wittenberg H. (2011): *Praktische Hydrologie, Grundlagen und Übungen*