

Integrales Hochwassersimulationssystem Neckar - Verfahren, Werkzeuge, Anwendungen und Übertragung -

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Peter A. Oberle

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 16.06.2004

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Günter Schmitt

Karlsruhe 2004

Vorwort

Die intensive anthropogene Nutzung und Beeinflussung der Fließgewässer und Flussauen wirft vielfältige Problemstellungen hinsichtlich wasserwirtschaftlicher, ökologischer und sozioökonomischer Belange auf. Die Hochwasserproblematik stellt hierbei ein zentrales Thema dar, welches durch die Extremereignisse der vergangenen Jahre mit ihren katastrophalen Auswirkungen verstärkt in das Bewusstsein von Politik und Öffentlichkeit getragen wurde. Ziel eines nachhaltigen Hochwassermanagements im Sinne der EU-Wasserrahmenrichtlinie ist eine integrale Maßnahmenplanung mit durchgängiger Quantifizierung der Prozesskette vom Niederschlagsereignis im Einzugsgebiet bis hin zur Beurteilung der lokalen Gefährdungssituation.

In der vorliegenden Arbeit wird die Modellierung der komplexen physikalischen Prozesse des Hochwasserabflusses im Gewässer und den angrenzenden Vorländern sowohl in Bezug auf die theoretischen Grundlagen als auch auf deren Umsetzung in praxisgerechte Anwendungen detailliert behandelt. Dabei werden verschiedene Simulationsverfahren diskutiert, um den unterschiedlichen Anforderungen Rechnung zu tragen, die einerseits eine möglichst hohe Genauigkeit und Auflösung der Berechnungsergebnisse, andererseits eine schnelle Verfügbarkeit und Robustheit der Modellanwendung fordern. Als Pilotgebiet wurde der gesamte schiffbare Neckar auf einer Länge von über 200 Flusskilometern in einem hochaufgelösten Modell abgebildet. Für den Einsatz in der Wasserwirtschaftsverwaltung wurden die hydraulischen Modelle zusammen mit weiteren Fachinformationen in einer GIS-basierten Fachschale zusammengeführt, die über nutzerangepasste Schnittstellen und Eingabemasken eine teilautomatisierte Gefährdungsanalyse ermöglicht.

Herr Dr. Oberle hat es in herausragender Weise verstanden, die hydrodynamisch-numerischen Simulationsverfahren mit modernen Informationstechnologien zu einem praxisgerechten Planungsinstrument zusammenzuführen, welches speziell an die Anforderungen der Entscheidungsträger auf verschiedenen administrativen Ebenen (Bund, Land, Kommunen) angepasst ist. Das Simulationsmodell ermöglicht neben der Planung von Vorsorgemaßnahmen und technisch-infrastrukturellen Schutzeinrichtungen auch eine kurzfristige Analyse der Gefährdungssituation und somit eine Initiierung und Koordinierung von Maßnahmen für den operationellen Hochwasserschutz.

Der erfolgreiche Einsatz des Systems in der Wasserwirtschaftsverwaltung Baden-Württemberg zu Schulungs- und Analysezwecken unterstreicht die Relevanz der Arbeit und ist ein hervorragendes Beispiel für den Wissenstransfer von universitärer Forschung in die praktische Anwendung.

Kurzfassung

Extreme Hochwasserereignisse mit ihren katastrophalen Auswirkungen auf die betroffene Bevölkerung führen uns immer wieder die Dringlichkeit der Umsetzung wirksamer Schutzkonzepte vor Augen. Diese umfassen neben technisch-infrastrukturellen Schutzeinrichtungen vor allem die konsequente Umsetzung von Vorsorgemaßnahmen in gefährdeten Bereichen sowie Strategien des operationellen Managements während eines Hochwasserereignisses.

Zur fachübergreifenden Bewertung, Optimierung und Umsetzung nachhaltiger Schutzkonzepte bedarf es Werkzeuge, die es den Entscheidungsträgern ermöglichen, den Ablauf eines Hochwassers mitsamt seinen Auswirkungen in Abhängigkeit der spezifischen Randbedingungen im Flusstal zu simulieren bzw. zu prognostizieren. Im Wesentlichen ergeben sich folgende Systemanforderungen an ein integrierendes Planungsinstrument:

- Erfassung des Fließgewässers als Gesamtsystem
- hohe Daten- und Modellauflösung
- Möglichkeit der Simulation beliebiger Abflussszenarien
- Identifikation von Risikobereichen
- realitätsnahe Visualisierung der Hochwassergefahr
- einfache Handhabung und robuste Performance

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde am Beispiel des Neckars ein Modell zur Simulation von Hochwasserabflüssen entwickelt, welches das Fließgewässersystem in seiner gesamten Ausdehnung von über 200 Flusskilometern mitsamt den angrenzenden Talräumen erfasst. Das Modell wurde in die Softwareumgebung eines Geographischen Informationssystems (GIS) eingebettet und ermöglicht dem Anwender über den Einsatz eines eindimensionalen hydrodynamisch-numerischen (HN-) Verfahrens in Verbindung mit speziell angepassten GIS-Technologien u.a. die Simulation beliebiger Abflüsse bzw. Abflusskonstellationen und Quantifizierung der Überflutungsintensitäten in den potenziell gefährdeten Bereichen.

Die Methodik zur Abgrenzung von Gefahrenflächen wurde an einem ausgewählten Streckenabschnitt des Neckars über vergleichende Berechnungen mit einem tiefengemittelten zweidimensionalen HN-Verfahren validiert. Hierbei wurden die verfahrensspezifischen Unsicherheiten sowie die Genauigkeiten der Eingangsgrößen bewertet und deren Auswirkungen auf die maßgebenden Zielgrößen Wasserstand bzw. Überflutungstiefe quantifiziert.

Die Analyse kam zu dem Ergebnis, dass die Anwendung des gewählten eindimensionalen HN-Verfahrens in Verbindung mit GIS bei den am Neckar vorhandenen Strömungsverhältnissen angesichts der geforderten Zielgrößen (Wasserstand, Abfluss) zulässig ist. Zudem unterstützten die Größe des Untersuchungsgebietes sowie die Zielvorgabe, das Modell in der täglichen Arbeitspraxis sowie im operationellen Betrieb bei den Gewässerdirektionen zu implementieren, die Verfahrensauswahl. So

liegen die Berechnungszeiten zur Ermittlung von Überflutungsflächen einer Stauhaltung auf Basis eines hochaufgelösten Digitalen Geländemodells (1x1 m-Raster) im Minutenbereich, wohingegen eine stationäre Berechnung auf Basis eines zweidimensionalen HN-Verfahrens auch auf leistungsstarken Computern einige Stunden in Anspruch nimmt. Einige wenige Bereiche mit sehr komplexer Strömungssituation (z.B. Mündungsbereiche größerer Zuflüsse) konnten jedoch mit der eindimensionalen Methodik nur unzureichend erfasst werden. Hier war der zusätzliche Einsatz lokaler zweidimensionaler HN-Modelle erforderlich.

Für den Einsatz des Systems in der Arbeitspraxis der Wasserwirtschaftsverwaltung wurde eine modular strukturierte GIS-Fachschale konzipiert, welche die Modell-, Daten- und Dialogkomponenten des Hochwassersimulationssystems zusammenführt und dem Anwender ermöglicht, über logisch-strukturierte Eingabemasken komplexe Funktionsabläufe automatisiert durchzuführen. Die dem System zugrunde liegenden Verfahren und Benutzerschnittstellen konnten während der mittlerweile mehrjährigen Modellanwendung intensiv bzgl. ihrer Praxistauglichkeit getestet und entsprechend optimiert werden.

Die Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der eingesetzten Verfahren ermöglichen in Verbindung mit vorhergesagten Pegelwerten der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) Baden-Württemberg prinzipiell auch den operationellen Modellbetrieb zur Entscheidungsunterstützung während Hochwasserereignissen. Modifikationen des Modells (Variantenstudium zu Flutungen eingedeichter Gebiete, Staustufensteuerung etc.) sind allerdings aufgrund der begrenzten Retentionsvolumina im Neckartal und der geringen Eingriffsmöglichkeiten auf das Abflussverhalten während eines Hochwasserereignisses im operationellen Betrieb nicht notwendig. Für den Einsatz im Hochwasserfall ist es ausreichend, verschiedene Abflusskonstellationen im Vorfeld zu berechnen und in Form von Gefahrenkarten mit Pegelbezug bzw. Szenarienkarten den Anliegergemeinden bzw. dem Katastrophenschutz zur Verfügung zu stellen. Exemplarisch wurden diesbezüglich Vorschläge für eine ländliche Anliegergemeinde sowie die Stadt Heilbronn erarbeitet.

Die im Rahmen der Systementwicklung erarbeiteten Methoden sowie die beim Modelleinsatz gewonnenen Erfahrungen unterstützen zukünftige Programme zur Umsetzung eines effektiven Hochwassermanagements und den Aufbau weiterer fließgewässerbezogener Informationssysteme im Sinne der EU-Wasserrahmenrichtlinie - nicht nur zum Thema ‚Hochwasser‘.

Abstract

Extreme flood events with catastrophic effects on the affected population keep reminding us of the urgent need for the implementation of effective protection concepts. These comprise, apart from infrastructural protection facilities, especially the consistent implementation of precautionary measures in flood-plain areas as well as strategies for operational management during a flood event.

The interdisciplinary assessment, optimisation and implementation of lasting protection concepts require tools that enable the decision-makers to simulate the course of a flood event, including its effects, as a function of the specific conditions of the river valley. Essentially, the following requirements on the system arise:

- comprehensive determination of the river system
- high resolution of input data and model results
- simulation possibility for any discharge scenario
- identification of areas at risk
- realistic visualisation of flood danger
- simple operation and robust performance

In the context of this dissertation, a flood simulation system was developed as a case study for the Neckar River along its entire extent of more than 200 river kilometres including the adjoining flood-plain. The model was integrated into the software environment of a Geographic Information System (GIS) and enables the user via a one-dimensional hydrodynamic-numerical model, together with specially adapted GIS technologies, amongst other things to simulate any discharge constellations (Neckar and linked tributaries) and to quantify the intensity of the inundation in the potentially endangered areas.

The methodology for GIS-supported flood simulation has been validated for a chosen section of the Neckar River by means of comparing calculations using a two-dimensional depth-averaged numerical model. So, the procedure-specific uncertainties as well as the accuracy of the input data were assessed and their effects on the decisive parameters (water level and inundation depth) were quantified.

The analysis draws the conclusion that it is, with respect to the required parameters, permissible to apply the chosen approach to flow characteristics like those exhibited by the Neckar River. Furthermore, both the size of the study area and the goal of integrating the model into routine management by the authorities and operational application (real-time modelling and faster) supported the choice of procedure. The identification of the inundation areas on the basis of a high-resolution digital terrain model (1x1-m grid) only takes minutes, while a steady calculation on the basis of a two-dimensional numerical method requires several hours even when using a powerful personal computer. However, a few areas with a very complex flow situation (e.g. mouths of larger tributaries) could be recorded only insufficiently by means of the

one-dimensional method. Here the additional application of local multi-dimensional numerical models was necessary.

In order for the system to be applied by the water-management administration, a modular GIS-expert shell, adapted to the authorities' special requirements, was developed. It enables the user to carry out complex functional processes by means of logically structured user interfaces. The system's handling and performance could be intensely tested and accordingly optimised over the course of several years during which the model was applied.

Speed and reliability of the processes employed, together with the water-level predictions of the Flood Forecasting Centre Baden-Württemberg, in principle can also make an operational application of the model possible in order to support decision-making during flood events. However, in operational mode there is no necessity to modify the model (study of variations concerning the flooding of diked areas, the control of dam levels, etc.) due to the restricted retention volume of the Neckar valley and the limited possibilities of influencing the stream-flow behaviour during a flood event. To use the model results for decision-making during a flood event it is sufficient to calculate different discharge scenarios in advance and to make the results available to the adjoining municipalities or the disaster-control organisation in the form of flood risk maps with reference to forecast gauges or via scenario maps. With respect to this, as an example, recommendations were developed for a rural adjoining municipality as well as for the city of Heilbronn.

The flood simulation system for the Neckar River and the experience gained during its deployment by the water management administration can also be adapted to other rivers as a basis for the development of comprehensive information systems in accordance with the EU Water Framework Directive.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann, auf dessen Initiative hin die Rahmenbedingungen für meine Forschungsaktivitäten geschaffen wurden. Mit seiner vielseitigen wissenschaftlichen Kompetenz und seinem großen Engagement für die wasserwirtschaftliche Praxis war er mir Vorbild und gab mir die entsprechende Motivation, diese Arbeit umzusetzen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Günter Schmitt, Universität Karlsruhe, möchte ich herzlich für die Übernahme des Korreferates danken, ebenso für seine fachliche Unterstützung insbesondere auf dem Gebiet der Geodäsie und Geoinformatik.

Mein Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. Stephan Theobald, Universität Karlsruhe, der meine Arbeit von Anbeginn begleitet hat und durch die vielen Fachgespräche und Anregungen wertvolle Impulse einbrachte.

Zudem gebührt mein Dank Herrn Dr.-Ing. Norbert Göbel, Universität Karlsruhe, der mich bereits während meiner Zeit als Hilfswissenschaftler für wasserwirtschaftliche Themen begeisterte und mir viele Jahre mit Rat und Tat zur Seite stand.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut danke ich für den intensiven Austausch und das freundschaftliche Umfeld. Besonderer Dank gilt hierbei Herrn Dipl.-Ing. Oleg Evdakov, der mich bei der programmiertechnischen Umsetzung unterstützte und hierdurch einen wichtigen Beitrag für den Transfer der Entwicklungsarbeiten in die Praxis leistete.

Auch den vielen Kollegen aus den Wasserwirtschaftsbehörden des Landes Baden-Württemberg, welche das IKoNE-Projekt „HN-Flussmodell Neckar“ begleiteten, möchte ich meinen herzlichen Dank für die langjährige Zusammenarbeit und ihre vielen konstruktiven Anregungen aussprechen.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau, Nele Wibke Strahl, die in all den Jahren an meiner Seite stand und mir die Kraft und die Ausdauer zum erfolgreichen Abschluss der Promotion gab.

Karlsruhe, im April 2004

Peter Oberle

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Inhalt der Arbeit.....	3
2	Aspekte zum Hochwassermanagement	7
2.1	Hochwasser – Vom Naturereignis zur Katastrophe.....	7
2.2	Strategien zur Schadensminderung	9
2.3	Integrale Konzeptionen / EU-Wasserrahmenrichtlinie	12
2.4	Anforderungen an die Wasserwirtschaft	13
3	Aufbau eines integralen Hochwassersimulationssystems	15
3.1	Existierende Informationssysteme für die Wasserwirtschaft	15
3.2	Systembausteine zur Hochwassermodellierung.....	16
3.3	Systemanforderungen	18
3.3.1	Variation der Randbedingungen	18
3.3.2	Modellauflösung / Genauigkeit.....	18
3.3.3	Datenmanagement	19
3.3.4	Benutzerschnittstelle.....	19
3.3.5	Operationeller Einsatz	20
3.4	IKoNE-Projekt „HN-Flussmodell Neckar“	21
3.4.1	Hintergrund	21
3.4.2	Zielsetzung und Aufbau der IKoNE.....	21
3.4.3	Hochwassersimulationssystem Neckar	22
4	Ausgangssysteme	23
4.1	Hydrodynamisch-numerische Strömungssimulation	23
4.1.1	Einflussfaktoren auf das Strömungsfeld	24
4.1.2	Die physikalischen Grundgleichungen.....	26
4.1.3	Statistische Beschreibung der Turbulenz	30
4.1.4	Vereinfachungen bei dreidimensionalen Modellansätzen.....	31
4.1.5	Zweidimensionale tiefengemittelte Flachwassergleichungen.....	31

4.1.6	Eindimensionales Gleichungssystem nach Saint-Venant	32
4.1.7	Parametrisierung der Energieverluste	33
4.1.8	Numerische Lösungsverfahren	44
4.1.9	Modellkalibrierung und -validierung	54
4.2	Geographische Informationssysteme (GIS)	57
4.2.1	Definition	57
4.2.2	Strukturkonzepte zur Abstraktion der realen Welt.....	57
4.2.3	Standardfunktionen und Fachschalen	65
4.2.4	Auswahl einer GIS-Software	66
4.2.5	Die ESRI-Produkte ArcView und ARC/INFO	66
5	Zusammenführung der Datenbasis	69
5.1	Raumbezogene Daten zur Hochwassersimulation.....	69
5.1.1	Geländetopographie (Flussschlauch / Vorland)	69
5.1.2	Wasserstandsinformationen	72
5.1.3	Überflutungsgrenzen	73
5.1.4	Digitale Karten und Orthofotos.....	75
5.1.5	Nicht georeferenzierte Daten	77
5.2	Bezugssysteme zur Georeferenzierung	77
5.2.1	Ersatzflächen zur Abbildung der Erdoberfläche.....	78
5.2.2	Zweidimensionale Lagesysteme	79
5.2.3	Höhensysteme.....	82
5.2.4	Globales dreidimensionales Bezugssystem.....	83
5.2.5	Einführung eines einheitlichen Standards.....	84
5.2.6	Transformation von Koordinaten und Höhen	85
5.3	Datenverwaltung in GIS	87
5.3.1	Objektorientierte Behandlung von Geo-Daten	87
5.3.2	Datenbankmodelle.....	87
5.3.3	Koppelung objektorientierter und relationaler Ansätze	88
6	GIS-Technologien zur Hochwassersimulation	91
6.1	Pre- und Postprocessing der HN-Modellierung.....	91
6.2	Modellierung der Geländeoberfläche	92
6.2.1	Aufbereitung der topographischen Datenbasis	93
6.2.2	Räumliche Interpolation diskreter Höhenwerte	95

6.3	Erstellung der Systemgeometrie des hydraulischen Modells	105
6.3.1	Eindimensionale Modelle	105
6.3.2	Zweidimensionale Modelle	108
6.4	Verarbeitung der Berechnungsergebnisse	112
6.4.1	Erzeugung flächendeckender Wasserstandsinformationen	112
6.4.2	Differenzenraster und Überflutungspolygone	117
6.4.3	Geschwindigkeitsfelder	118
6.4.4	Hinweise zur Ergebnisvisualisierung	119
6.5	Weiterführende Anwendungsmöglichkeiten	120
6.5.1	Gefahren- und Risikokarten	120
7	Praxisbezogene Strömungsmodellierung zur Hochwassersimulation.....	123
7.1	Gedanken zur Modellbildung	123
7.2	Verfahrensübersicht	125
7.3	Studie zum Einsatz 1D- und 2D-HN-Verfahren	127
7.3.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	127
7.3.2	Datengrundlagen	129
7.3.3	Beschreibung der numerischen Verfahren	129
7.3.4	Modellerstellung	132
7.3.5	Modellkalibrierung	133
7.3.6	Modellsensitivitäten	135
7.3.7	Verfahrensvergleich (1D, 2D)	145
7.3.8	Berücksichtigung der Querneigung in Flusskrümmungen	149
7.3.9	Sensitivität der Überflutungsfläche	152
7.4	Zusammenfassung der Ergebnisse und Fazit	153
8	Hochwassersimulationssystem Neckar im Rahmen der IKoNE.....	157
8.1	Hydrologische Charakteristik und Schadenspotenziale	157
8.2	Datenpool topographischer Informationen / DGM-Erstellung	161
8.3	Hydrodynamisch-numerisches Modell	163
8.3.1	Auswahl der Modellierungsmethode	163
8.3.2	Modellerstellung	165
8.3.3	Stationäre Modellkalibrierung	169
8.3.4	Validierung des instationären Gesamtmodells	175

8.3.5	Wahl der unteren Randbedingungen zur Modellanwendung	178
8.3.6	Berechnungsergebnisse	180
8.4	Überflutungsflächen	182
8.4.1	Definition der Linien gleicher Wasserstände.....	182
8.4.2	Differenzenraster und Polygone	183
8.4.3	Validierung der Überflutungsflächen.....	184
8.5	Übersicht über den Geodatenbestand	185
8.6	Laser-Scanner-Daten des Landesvermessungsamtes B.-W.....	187
8.7	GIS-Werkzeuge für die Wasserwirtschaftsverwaltung	189
8.7.1	Systemübersicht	189
8.7.2	Datenverwaltung und –zugriff	191
8.7.3	Programmstruktur und -einsatz.....	192
8.8	Dreidimensionale Visualisierung der Berechnungsergebnisse.....	195
8.8.1	Hintergrund und Zielsetzung.....	195
8.8.2	Werkzeug zur 3D-Echtzeit-Navigation	196
8.8.3	Verfahren zur Datenreduktion.....	198
9	Systemübergabe an die Wasserwirtschaftsverwaltung	201
9.1	Zuständigkeitsbereiche am Neckar	201
9.2	Zentraler Arbeitsplatz – Dezentrale Arbeitsplätze	202
9.3	Anwenderschulungen.....	203
9.4	Beispiele zum Systemeinsatz.....	204
9.4.1	Allgemeines	204
9.4.2	Flächenmanagement	206
9.4.3	Variantenstudien zu Baumaßnahmen im Flusstal und EZG	208
9.4.4	Hochwassergefahrenkarten / Szenarienkarten	209
9.5	Vernetzung mit anderen Systemen	217
9.6	Allgemeine Systemversion für GIS-GwD Baden-Württemberg	220
10	Zusammenfassung und Ausblick	225
	Literatur- und Quellennachweis	229
	Abbildungsverzeichnis.....	237

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die in den letzten Jahren aufgetretenen Hochwasserereignisse mit teilweise katastrophalen Auswirkungen für die betroffene Bevölkerung verdeutlichen in drastischer Weise die Verletzbarkeit der menschlichen Gesellschaft durch Naturgewalten. Durch die immer intensivere Nutzung flussnaher Bereiche und den enormen Anstieg der Schadenspotenziale in den Talauen ist das Risiko einer Katastrophe erheblich angestiegen. Als herausragende Ereignisse auf deutschem Territorium in den letzten 10 Jahren sind die Hochwasser von 1993 und 1995 im Rheineinzugsgebiet, das Oderhochwasser von 1997 sowie die Flutkatastrophe im August 2002 im Elbe- und Donaeinzugsgebiet zu nennen. Letztere verursachte die schwersten Schäden in der deutschen Nachkriegsgeschichte. In Abb. 1-1 ist eine Übersicht über die in Deutschland seit 1970 von größeren Hochwasserereignissen betroffenen Regionen dargestellt.



Abb. 1-1 Übersicht der seit 1970 von größeren Flutkatastrophen betroffenen Regionen [Kenntemich, 2002]

Ein nachhaltiges Hochwassermanagement muss parallel mehrere Strategien zur Verhinderung von Hochwasserschäden verfolgen. Diese umfassen neben technisch-infrastrukturellen Schutzeinrichtungen vor allem die konsequente Umsetzung von Vorsorgemaßnahmen in gefährdeten Bereichen wie beispielsweise die Durchsetzung angepasster Flächennutzungen und Bauweisen. Des Weiteren trägt der Aufbau eines zuverlässigen Frühwarn- und Vorhersagesystems gekoppelt mit einer effektiven Alarmierungs- und Einsatzplanung entscheidend zur Begrenzung des Schadensausmaßes von Hochwasserereignissen bei. Grundlage aller Teilstrategien ist jedoch die kontinuierliche Aufklärung der Bevölkerung über die Hochwassergefahr.

Hochwasserschutz und Hochwasservorsorge in Deutschland sind Aufgaben der Länder und Kommunen sowie der potenziell betroffenen Bevölkerung. In den vergangenen Jahren haben die Bundesländer ihre Empfehlungen, Maßnahmen und Aktionspläne auf die o.g. Strategien ausgerichtet. Es wird angestrebt, den Hochwasserschutz im Einklang mit einer von den EU-Wasserrahmenrichtlinien geforderten ganzheitlichen Planungskonzeption bezogen auf einen nachhaltigen Gewässerschutz auszurichten. Auch wenn die Zielsetzungen klar definiert sind, so ist die Realisierung eines integralen Hochwasserschutzes in der Praxis aufgrund der vielfältigen Nutzungsanforderungen der Talauen und bestehenden Interessenskonflikte schwierig. Oft sind es wirtschaftliche Hintergründe, ökologische Leitbilder aber auch ganz persönliche Motive, welche die Umsetzung von Maßnahmen aufhalten oder gar verhindern. Eines der Hauptprobleme ist hierbei, dass längere hochwasserfreie Zeiten zu einem sorglosen Umgang mit dem Hochwasserrisiko führen und die Notwendigkeit von Schutz- bzw. Vorsorgemaßnahmen nicht erkannt wird. Hinzu kommt, dass die Wirkung einer Maßnahme in vielen Fällen nicht direkt ersichtlich bzw. quantifizierbar und damit schwer vermittelbar ist.

Zur Bewertung, Optimierung und Umsetzung nachhaltiger Schutzkonzepte bedarf es daher Werkzeuge, die es den Entscheidungsträgern ermöglichen, die Entstehung und den Ablauf eines Hochwasserereignisses mitsamt seinen Auswirkungen in Abhängigkeit der spezifischen Randbedingungen im Flusstal und Einzugsgebiet zu simulieren bzw. zu prognostizieren. Um Risiken zu erfassen und Kosten-Nutzen-Analysen für Schutzmaßnahmen durchführen zu können, sind Aussagen über die Auftretenswahrscheinlichkeit möglicher Schäden zu machen. Als umfassendes Hochwasserinformationssystem kann ein System bezeichnet werden, welches diese Simulationswerkzeuge als Modellkomponente mit einem an die Anforderungen der Benutzer angepassten Datenhaltungskonzept (Datenkomponente) sowie entsprechenden Benutzeroberflächen (Dialogkomponente) verbindet und die Ergebnisse fachübergreifend einer breiten Interessensgruppe verfügbar macht. Um ein solches Informationssystem auch für den operationellen Einsatz (Echtzeitbetrieb) zur Entscheidungsunterstützung während Hochwasserereignissen nutzbar zu machen, ist zudem die Schnelligkeit und Zuverlässigkeit sowie die Bedienfreundlichkeit der Systemkomponenten für die Nutzbarkeit auch unter extremen Bedingungen (z.B. hoher Zeitdruck, gestörte Kommunikation, Ausfall von Daten) ausschlaggebend. Im Echt-

zeitbetrieb muss die gesamte Wirkungskette von der Hochwasservorhersage (Meteorologie und Hydrologie) über die hydraulische Strömungssimulation bis hin zur Abgrenzung der Gefahrenbereiche entlang des Gewässernetzes erfasst und die Weitergabe der Informationen gesichert sein.

Prinzipiell stehen zur Simulation der das Hochwasserabflussgeschehen bestimmenden hydrologischen und hydraulischen Prozesse eine Vielzahl z.T. auch kommerziell verfügbarer Verfahren und Softwaresysteme bereit. Zur Aufbereitung und Visualisierung der notwendigen Datengrundlagen haben zudem Geographische Informationssysteme (GIS) eine weite Verbreitung gefunden. In der gegenwärtigen Praxis werden computergestützte Hochwassersimulationen als Grundlage wasserwirtschaftlicher Planungen (z.B. zum Nachweis der Hochwasserneutralität einer Baumaßnahme, der Wirksamkeit eines Polderbauwerkes oder der Ausweisung von Überschwemmungsflächen) von den zuständigen Verwaltungsbehörden an spezialisierte Fachleute in Universitäten und Planungsbüros in Auftrag gegeben. Untersuchungen mit hoher Auflösung konzentrieren sich hierbei auf räumlich begrenzte Einzugsgebiete bzw. Flussabschnitte. Die Untersuchungsergebnisse werden zumeist problemspezifisch in Berichten und analogen Planunterlagen dokumentiert und an die Entscheidungsträger übergeben. Die Simulationssysteme hingegen werden nicht verfügbar gemacht. Dies liegt zumeist darin begründet, dass die Anwendung der Modelle und die verantwortungsvolle Interpretation der Ergebnisse ein umfangreiches und fundiertes Verständnis für die dem Modell zugrunde liegenden Verfahren und Grundlagen sowie der Softwareumgebung voraussetzt, welches in der Regel nur bei erfahrenen Experten vorhanden ist. Diese Vorgehensweise kann jedoch den genannten und in den EU-Wasserrahmenrichtlinien festgelegten Anforderungen an ein integrierendes Planungsinstrument nicht genügen.

1.2 Zielsetzung und Inhalt der Arbeit

Als Grundlage eines nachhaltigen Hochwassermanagements müssen flussgebietsbezogene Informations- bzw. Entscheidungshilfesysteme bereitgestellt werden, welche kontinuierlich auf einen aktuellen Daten- und Modellbestand zugreifen und den Verantwortlichen in der Verwaltung eine individuelle und fachübergreifende Analyse der Hochwassergefahr durch Anwendung wissenschaftlich fundierter Verfahren über praxisgerechte Instrumente ermöglichen und die Ergebnisse fachübergreifend einer breiten Interessensgruppe verfügbar machen. Die Anforderungen an ein integrales Hochwassersimulationssystem liegen im Wesentlichen in der

- Erfassung des Fließgewässers als Gesamtsystem bei gleichzeitig hoher Daten- und Modellauflösung (flurstücksscharfe Betrachtungsweise im Flusstal),
- Transparenz bezüglich Datengrundlagen und Modellierungsmethoden,
- Möglichkeit der Simulation beliebiger Szenarien und Variantenstudien,

- Identifikation von Risikobereichen und realitätsnahe Visualisierung des Gefahrenpotenzials,
- Zugriff auf einen umfangreichen Datenpool hochwasserrelevanter Daten (z.B. Dokumentationen zurückliegender Ereignisse),
- effektives Datenmanagement (regelmäßige Updates, Gewährleistung der Konsistenz),
- Möglichkeit des operationellen Einsatzes (Echtzeitbetrieb) in Verbindung mit einem Vorhersagesystem,
- effektive Benutzerschnittstellen bei heterogenen Anwenderprofilen sowie
- Spezifikation von Schnittstellen zur fachübergreifenden Problembehandlung.

Gegenstand der hier vorliegenden Arbeit ist die pilothafte Entwicklung eines Hochwassersimulationssystems für den Neckar im Rahmen der Integrierenden Konzeption Neckar-Einzugsgebiet (IKoNE) und dessen Implementierung bei den zuständigen Wasserwirtschaftsbehörden sowie der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV). Das System erfasst das gesamte Neckartal auf einer Strecke von über 200 Flusskilometern und ermöglicht die Simulation des Hochwasserabflusses und dessen Auswirkungen u.a. in Verbindung mit den hydrologischen Eingangsdaten der für Baden-Württemberg (B.-W.) flächendeckend vorliegenden regionalisierten Hochwasserkennwerte HQ_T der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) sowie der operationell agierenden Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) B.-W.. Hierdurch wird den Entscheidungsträgern der Landesbehörden, aber auch den Akteuren aus anderen Fachbereichen erstmals ermöglicht, die gesamte Wirkungskette eines Hochwasserereignisses entlang des Gewässerlaufes gesamtheitlich nachzubilden. Die mögliche Nutzergruppe des Systems sortiert sich aus den in Abb. 1-2 aufgeführten Akteuren aus zuständigen Wasserwirtschaftsbehörden und Kommunalverwaltungen, Alarmierungs- und Einsatzleitungen, Katastrophenschutz, Raumplanern und Ökologen, Versicherungswirtschaft sowie der Öffentlichkeit.

Wesentliche Zielsetzungen bzw. Einsatzgebiete des Systems sind bspw. die

- Überprüfung des HW-Schutzgrades von Objekten und Ermittlung von Schutzdefiziten,
- Überprüfung und Überarbeitung rechtskräftiger Überschwemmungsgebiete,
- Beurteilung der Auswirkungen von Baumaßnahmen auf den HW-Abfluss (Nachweis der HW-Neutralität),
- Erhebung und Prognostizierung von HW-Schäden in gefährdeten Gebieten als Grundlage der HW-Vorsorge (Risikoanalyse),
- Erarbeitung und Bewertung von Hochwasserschutzkonzepten (Kosten-Nutzen-Analyse),
- Erarbeitung und Aktualisierung örtlicher und gemeindeübergreifender Hochwasseralarmierungs- und –Einsatzpläne,

- Entscheidungshilfe im operationellen Einsatz sowie
- öffentlichkeitswirksame Visualisierung hochwasserrelevanter Daten und hierdurch die Erhöhung des Gefahrenbewusstseins in den potenziell gefährdeten Gebieten.

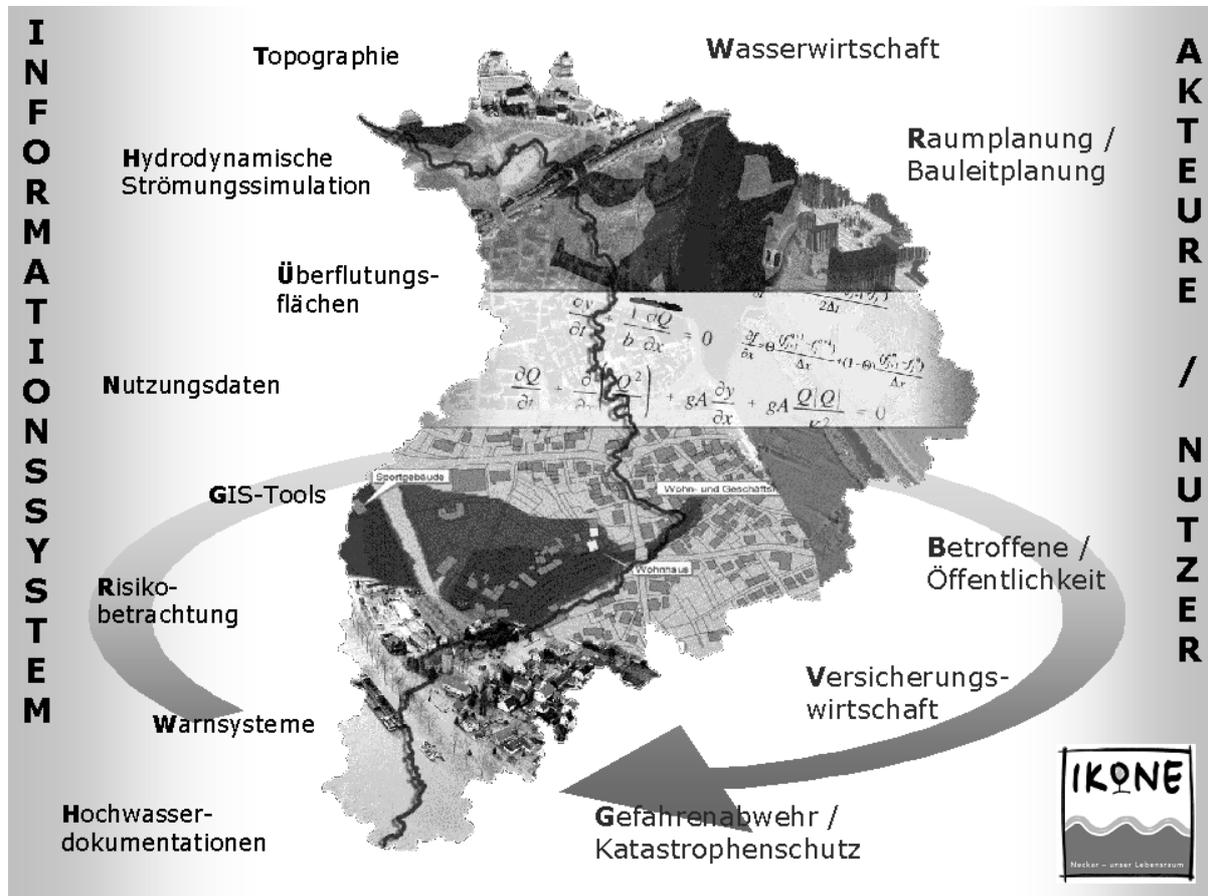


Abb. 1-2 Akteure im Hochwassermanagement – Nutznießer des Hochwasserinformationssystems Neckar

In den nachfolgenden Kapiteln 2 und 3 werden zunächst die Aspekte eines nachhaltigen Hochwassermanagements erörtert und hieraus die Anforderungen an die Bausteine eines integralen Simulationssystems abgeleitet.

Die Kapitel 4, 5 und 6 befassen sich mit den technischen Grundlagen zum Aufbau eines Hochwassersimulationssystems. Vor dem Hintergrund der charakteristischen strömungsrelevanten Einflussfaktoren auf Hochwasserabflüsse wird ein Überblick über hydrodynamisch-numerische (HN-) Verfahren und die ihnen zugrunde liegenden Annahmen bzw. Vereinfachungen sowie die erforderlichen Fluss-Vorland-Informationen gegeben. Es werden effektive Methoden zur Erfassung und Verwaltung modellrelevanter Daten mittels Geoinformationssystemen (GIS) vorgestellt. Im Weiteren werden Möglichkeiten der Koppelung von GIS-Techniken und HN-Modellierung insbesondere zur Erstellung der Systemgeometrie von HN-Modellen und Ermittlung von Überflutungsflächen aufgezeigt.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse einer umfassenden Sensitivitätsanalyse ein- und zweidimensionaler HN-Verfahren zur Strömungssimulation in Verbindung mit GIS-Techniken zur Ermittlung von Überflutungsflächen am Beispiel eines ausgewählten Neckarabschnittes dokumentiert. Die Studie zeigt exemplarisch die Möglichkeiten und Grenzen der Hochwassersimulation auf und verdeutlicht die Abhängigkeit der Modellgüte (Genauigkeit der Berechnungsergebnisse, Prognosefähigkeit) von den Eingangs- bzw. Kalibrierungsdaten. Es werden Kriterien zur Auswahl der Modellierungsmethode erarbeitet, unrealistische Erwartungen an die Genauigkeiten von Hochwassersimulationen relativiert und der Handlungsbedarf zur Verbesserung der Modellgüte deutlich gemacht.

In Kapitel 8 und 9 werden aufbauend auf den vorangegangenen Kapiteln die Entwicklungsarbeiten zum Hochwassersimulationssystem Neckar dargelegt sowie konkrete Anwendungsbeispiele aus der Arbeitspraxis der Wasserwirtschafts- und Kommunalverwaltung am Neckar aufgezeigt. Die im Rahmen der Systementwicklung erarbeiteten Methoden sowie die beim Modelleinsatz gewonnenen Erfahrungen unterstützen zukünftige Programme zur Umsetzung eines effektiven Hochwassermanagements und den Aufbau weiterer fließgewässerbezogener Informationssysteme im Sinne der EU-Wasserrahmenrichtlinien - nicht nur zum Thema ‚Hochwasser‘.

2 Aspekte zum Hochwassermanagement

2.1 Hochwasser – Vom Naturereignis zur Katastrophe

Seit jeher sucht der Mensch die Nähe zu Flüssen, Seen oder dem Meer, um sich dort sesshaft zu machen. Die Wasserläufe garantieren ihm Trink- und Brauchwasser und er nutzt sie zur Bewässerung seiner Felder. Die fruchtbaren Böden der Flusstäler sichern ihm reiche Ernten und die Fischerei wurde für viele zur unverzichtbaren Lebensgrundlage. Zudem wurde das Wasser durch die Flößerei und Schifffahrt zum wichtigen Transportweg. Dies ermöglicht regen Handel mit anderen Siedlungen, Städten und bei Verbindung zum Meer sogar Kontinenten. Über Mühlräder bis hin zu gigantischen Wasserkraftanlagen macht er sich die Energie des Wassers zunutze. Somit wurde die Wassernähe für den Menschen zum Synonym für Überleben, Wohlstand und Fortschritt. Auch in den heute hochentwickelten Industriestaaten ist die Nähe zum Wasserlauf wirtschaftlich gesehen ein entscheidender Standortfaktor und für den Einzelnen häufig ein bedeutender Beitrag zur Lebensqualität.

Wasserläufe unterliegen jedoch den dynamischen, auf Veränderung und Wandel basierenden Gesetzen der Natur. Gerade die Dynamik eines Fließgewässers mit dem ständigen Wechsel zwischen Überschwemmung und Trockenfallen ist die Grundlage für die Entstehung und den Erhalt eines der artenreichsten Biotope unserer Erde: der Flussaue. Für den im Flusstal siedelnden Menschen jedoch stellt diese natürliche Dynamik eine lebensbedrohliche Gefahr dar. Anmutig dahinplätschernde Bäche können sich bei starken Regenfällen oder Schneeschmelze in tosende, alles mit sich reißende Wassermassen verwandeln. Flüsse treten über ihre Ufer und überschwemmen ganze Landstriche.

Die in den letzten Jahren aufgetretenen Hochwasserereignisse mit teilweise katastrophalen Auswirkungen für die betroffene Bevölkerung verdeutlichen in drastischer Weise die Verletzbarkeit der menschlichen Gesellschaft durch Naturgewalten. Als herausragende Ereignisse auf deutschem Territorium in den letzten 10 Jahren sind die Hochwasser von 1993 und 1995 im Rheineinzugsgebiet (geschätzte Schadenssumme: 1,8 Mrd. DM [Engel, 1999; Kron, 2001]), das Oderhochwasser von 1997 (Schaden in Brandenburg: ca. 650 Mio. DM [Kujajewski, 1999]) sowie die Flutkatastrophe im August 2002 im Elbe- und Donaeinzugsgebiet zu nennen. Letztere verursachte die schwersten Schäden in der deutschen Nachkriegsgeschichte: Überschwemmungen auf 800 Flusskilometern von Elbe, Donau und Mulde; Katastrophenalarm in 49 Landkreisen und kreisfreien Städten; 180.000 beschädigte oder unbewohnbar gewordene Häuser und Wohnungen; Zerstörung von 740 Straßenkilometern, 580 Kilometer Bahnstrecke und Brücken; Geschätztes Schadensvolumen auf deutschem Gebiet: über 9 Milliarden Euro [Becker & Grünwald, 2003]. Die dramatischen Auswirkungen von Hochwasserereignissen auf Infrastruktur und Wohngebäude werden anhand zweier Bilddokumente der Elbe-Flut in Abb. 2-1 veranschaulicht.



Abb. 2-1 Auswirkungen der Flutkatastrophe 2002 (links: zerstörte Straße bei Bitterfeld; rechts: zerstörtes Wohnhaus in Pirna) (Quelle: dpa)

Für den einzelnen Betroffenen kann die Zerstörung von Hab und Gut zur existenziellen Bedrohung werden. Dies trifft vor allem für wirtschaftlich weniger entwickelte Länder zu. Bei den o.g. Ereignissen im Oder- und Elbeeinzugsgebiet waren Polen und Tschechien besonders stark betroffen. Überschwemmungen in Ländern wie China, Bangladesh, Äthiopien, Mozambique, Somalia und Südafrika forderten in den letzten Jahren viele Tausende von Menschenleben.

Es sind aber nicht nur die großen Flutkatastrophen, die für die Betroffenen neben wirtschaftlichen Verlusten auch enorme psychische Belastungen und z.T. sogar lebensbedrohliche Situationen zur Folge haben können. Lokal begrenzte Extremereignisse in kleinen Einzugsgebieten kommen oft unerwartet und mit verheerender Wirkung, wie nachfolgende Meldung eindrucksvoll schildert:

„Rekordniederschläge im Schwarzwald ließen das Flüsschen Oos bei Baden-Baden in der Nacht zum 29. Oktober 1998 schlagartig ansteigen. In wenigen Stunden wurden zahlreiche Flächen im Stadtgebiet überflutet. Insgesamt kämpften ca. 950 Frauen und Männer des THW aus ganz Baden-Württemberg zusammen mit Feuerwehr, Bergwacht, DLRG, DRK und Soldaten der Bundeswehr und der französischen Streitkräfte gegen die Fluten aus Schlamm, Wasser und Geröll. 131 Liter Regen pro Quadratmeter, die im schmalen Flussbett der Oos ins Tal schossen, spülten 50 Meter der Geroldsauer Straße einfach weg. Versorgungsleitungen wurden schwer beschädigt, Brücken mitgerissen. Am Morgen des 29. Oktober waren die Stadtteile Oberbeuern und Geroldsau völlig von der Außenwelt abgeschnitten (...)!“ [Winterfeldt & Claus, 2002]

Neben monetär bewertbaren Schäden, wie z.B. Gebäudeschäden, Inventarschäden oder Wertschöpfungsverlusten, stehen gerade bei der Betrachtung von Extremereignissen auch weitergehende Risiken im Vordergrund: Verlust von Menschenleben, psychische Belastungen durch Stress und Traumata (z.B. Vertrauensverlust in die Sicherheit der eigenen Lebensumstände), persönliche Verluste mit ideeller Bedeutung (Erinnerungsstücke etc.) oder Kulturschäden (Denkmäler, Sammlungen, Biblio-

theiken u.a.) sind nicht ersetzbar und monetär kaum zu bewerten. Hinzu kommt die Gefahr ökologischer Schäden (z.B. durch ausgelaufenes Heizöl oder freigesetzte Chemikalien aus Produktionsanlagen) mit oft unabsehbaren Folgewirkungen und kaum quantifizierbaren volkswirtschaftlichen Langzeitschäden (regional / überregional), z.B. durch Verunsicherung der Entscheidungsträger in der Wirtschaft [Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen, 2000].



Abb. 2-2 Nicht monetär bewertbare Folgen eines Hochwasserereignisses: Psychische Belastung und direkte Gefahren für Leib und Leben

2.2 Strategien zur Schadensminderung

Über die Ursache der Anhäufung von Flutkatastrophen in den letzten Jahren wird vielfach diskutiert. Auch wenn Hochwasser natürliche Ereignisse sind, so sind die Ausprägungen vom Menschen beeinflussbar. Beispielsweise tragen neben flussbaulichen Maßnahmen (z.B. Begradigungen, Reduzierung des Retentionsvolumens - siehe Abb. 2-3) auch weitere anthropogene Einwirkungen auf die Charakteristik des Einzugsgebietes (z.B. Verringerung der Waldflächen, Wintertourismus, Flächenversiegelung) zur Verschärfung der Situation im Hochwasserfall bei. Zudem kann sich die Veränderung globaler und regionaler Klimaparameter auf den ersten und initiativen Teil eines Abflussereignisses, den Niederschlag bzw. die Schneeschmelze, auswirken.

Zur Katastrophe werden extreme Hochwasserstände jedoch erst durch ihre Auswirkungen auf eine betroffene Gesellschaftsgruppe. Durch die immer intensivere Nutzung flussnaher Bereiche und den enormen Anstieg der Schadenspotenziale in den Talauen ist das Risiko einer Katastrophe erheblich angestiegen. In Abb. 2-4 ist die Siedlungsentwicklung in ehemaligen Überschwemmungsgebieten am Beispiel des Neckars bei Bad Cannstatt (Stuttgart) dargestellt.

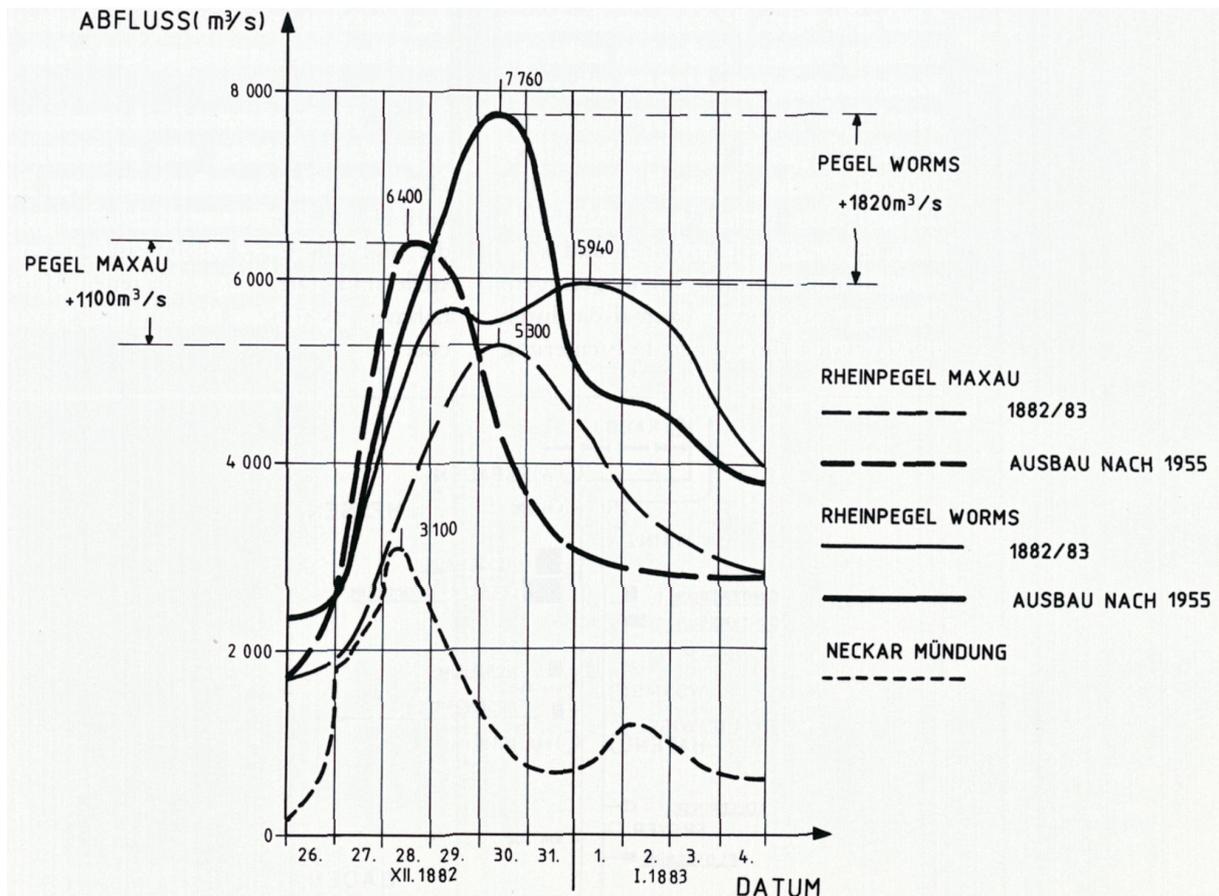


Abb. 2-3 Rechnerische Veränderungen der Hochwasserwelle 1882/83 durch Ausbau des Oberrheins nach 1955 (Quelle: KHR, 1993)

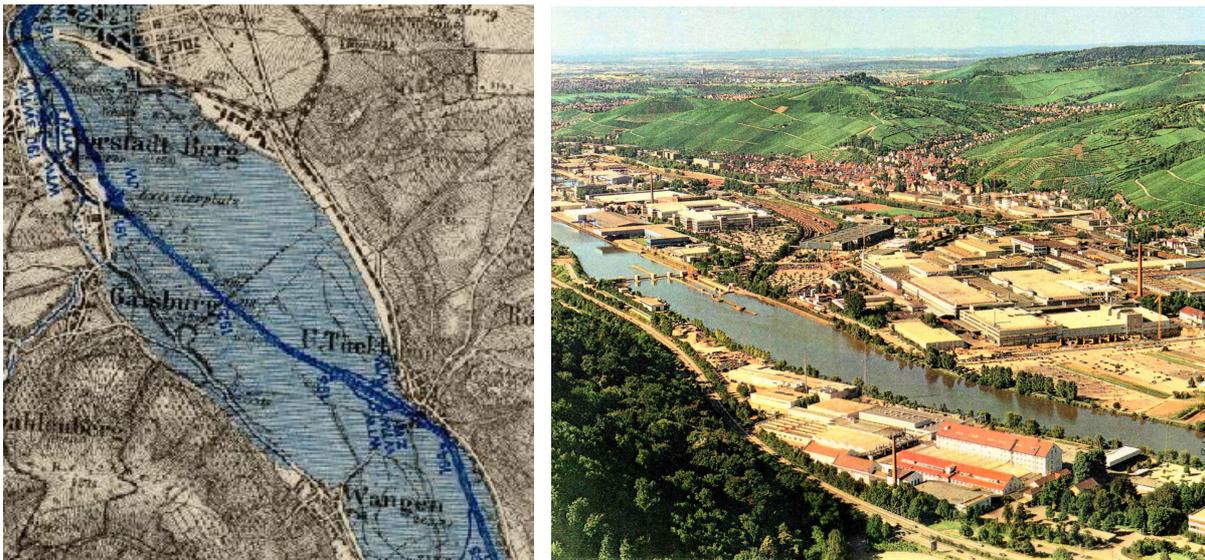


Abb. 2-4 Flussbau und Siedlungsentwicklung in hochwassergefährdeten Talzonen bei Unter-/Obertürkheim (Stuttgart) seit Mitte des 19. Jahrhunderts (links: 1896; rechts: 1988)

Technisch-infrastrukturelle Maßnahmen, wie der Bau von Dämmen, Deichen oder Hochwasserrückhalteräumen können dazu beitragen, Hochwasserabflüsse bis zu einer vorgegebenen Grenze schadenfrei abzuführen. Maßnahmen im Flusstal und Einzugsgebiet, die als Zielsetzung einzig die Verringerung der Hochwassergefährdung (maximaler Wasserstand, Auftretenswahrscheinlichkeit) verfolgen, sind zur Gewährleistung einer nachhaltigen Reduzierung von Hochwasserschäden jedoch nicht ausreichend. Sie können sogar zu einer Vergrößerung der Verletzbarkeit (Vulnerabilität) und damit zu einem erhöhten Hochwasserrisiko führen. So verringert beispielsweise in vielen Fällen der Bau von technischen Schutzeinrichtungen das Risikobewusstsein in den gefährdeten Bereichen und die Fläche hinter der Schutzeinrichtung wird einer höherwertigen Nutzung zugeführt. Dies hat die Anhäufung von zusätzlichem Schadenspotenzial und die Vernachlässigung von Vorsorgemaßnahmen zur Folge, sodass durch einen vermeintlich verbesserten Hochwasserschutz das Risiko einer Katastrophe sogar vergrößert werden kann.

Bestehende Siedlungen zurückzubauen wäre sicherlich der nachhaltigste Beitrag zum Hochwasserschutz. Dies wird aber zumindest mittelfristig nur sehr vereinzelt zu realisieren sein. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass durch die Sensibilisierung der Bevölkerung und entsprechende private und administrative Vorsorgemaßnahmen die Auswirkungen extremer Wasserstände deutlich beeinflusst werden können. So fiel beispielsweise der Schaden in Köln durch das Hochwasser im Januar 1995 trotz des höheren Pegelstands und der gleichen Anzahl an Betroffenen um die Hälfte geringer aus als bei den Überschwemmungen zur Jahreswende ein Jahr zuvor [Engel, 1999; Bismuth, 1998].

Es wird deutlich, dass ein nachhaltiges Hochwassermanagement parallel mehrere Strategien zur Verhinderung von Hochwasserschäden verfolgen muss. Diese umfassen Maßnahmen der Hochwasservorsorge (z.B. durch angepasste Flächennutzungen und Bauweisen) und des technisch-infrastrukturellen Hochwasserschutzes (z.B. durch Deichbau, Gewässerausbau, Rückhaltemaßnahmen) aber auch den Aufbau eines zuverlässigen operationellen Vorhersage- bzw. Frühwarnsystems gekoppelt mit einer effektiven Alarmierungs- und Einsatzplanung. Zum Hochwassermanagement gehören hierbei sämtliche Aspekte von der Beobachtung bzw. Messung relevanter Daten über die Planung und Bemessung von Maßnahmen bis hin zur kontinuierlichen Aufklärung der Bevölkerung um die (verbleibende) Hochwassergefahr.

Diese Erkenntnis ist selbstverständlich nicht neu. Sie rückte jedoch in Zeiten ausbleibender Schadensereignisse und starker Technik-Gläubigkeit in den Hintergrund und wurde nach den sich in den letzten Jahren häufenden Katastrophen – terminologisch modernisiert – wieder in das Bewusstsein von Politik und Öffentlichkeit getragen. In Abb. 2-5 sind die Teilkomponenten eines nachhaltigen Hochwassermanagements in Anlehnung an das 3-Säulen-Konzept der „Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz“ der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1995) aufgetragen.

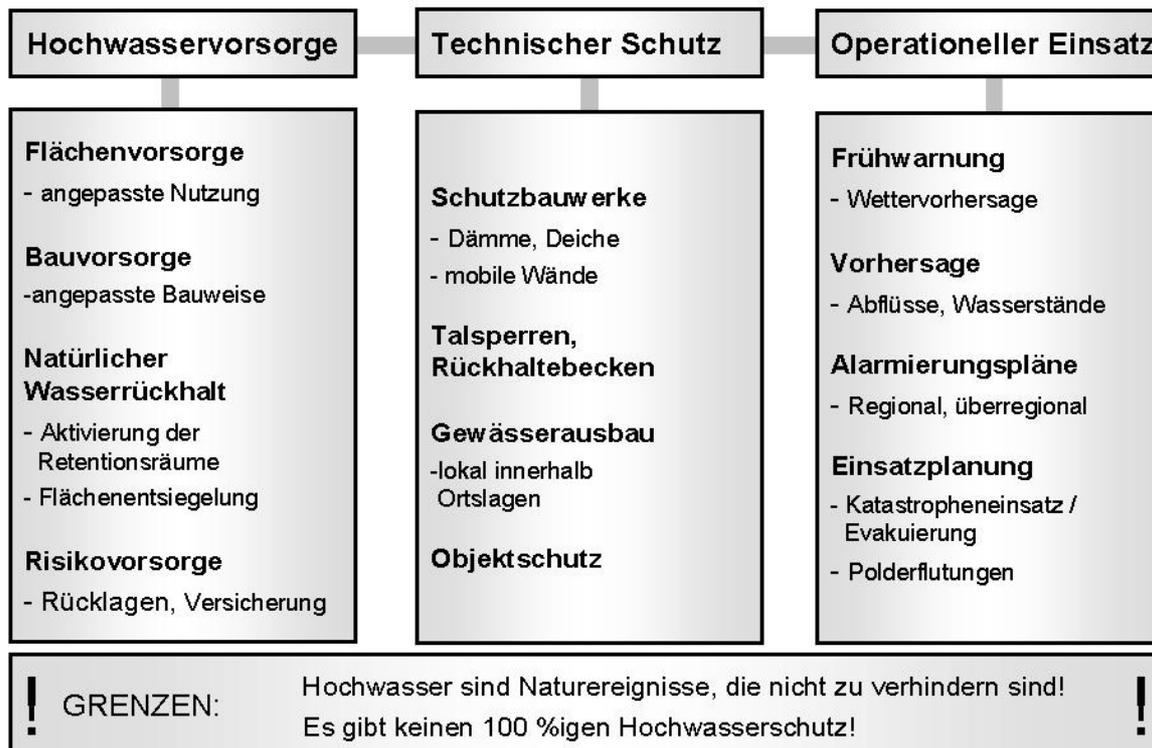


Abb. 2-5 Teilstrategien eines nachhaltigen Hochwassermanagements

2.3 Integrale Konzeptionen / EU-Wasserrahmenrichtlinie

Zur effektiven Reduzierung des Schadenrisikos reicht allein die Betrachtung eines begrenzten Flussabschnittes nicht aus. Vielmehr muss zur Optimierung und Umsetzung geeigneter Schutzstrategien die Entstehungsgeschichte möglicher Schadenergebnisse in ihrer Gesamtheit berücksichtigt werden: Die Niederschlags- und Abflussbildung im Einzugsgebiet und deren Auftretenswahrscheinlichkeit, der Wellenablauf in den Zuflüssen und dem Hauptgewässer bis hin zu den schadenrelevanten Größen in den Überschwemmungsgebieten (Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten, Vulnerabilitäten). Dies umso mehr, da lokale technische Schutzmaßnahmen bekanntermaßen auch Auswirkungen auf die Oberlieger (z.B. Rückstauwirkung eines Dammbauwerks) und Unterlieger (Aufsteilung des Wellenablaufes durch Wegnahme von Retentionsvolumen) haben können.

Auch die Behandlung der Problematik allein unter Berücksichtigung hochwasserrelevanter Aspekte wird nicht zielführend sein. Die intensive anthropogene Nutzung und Beeinflussung der Fließgewässer einschließlich ihrer Auen und Einzugsgebiete wirft vielfältige Problemstellungen hinsichtlich wasserwirtschaftlicher, ökologischer und sozioökonomischer Belange auf. Diese stehen in komplexen Beziehungen zueinander, charakterisiert durch ein hohes Konfliktpotential unterschiedlicher Interessensgruppen. Die Hochwasserproblematik stellt hierbei lediglich eine Facette dar, die nicht gesondert betrachtet werden kann. Zu ihrer Lösung ist eine gesamtheitliche Anschauung und ein interdisziplinäres Vorgehen unumgänglich.

Die Komplexität der Interessensfelder, die geforderte Nachhaltigkeit der Maßnahmen und nicht zuletzt der hohe monetäre Einsatz erfordern eine Planungskonzeption, die eine Integration und Koordination aller fließgewässerrelevanter Programme ermöglicht. Ein derartiger ganzheitlicher Anspruch liegt z.B. dem *Integrierten Rheinprogramm* (IRP), dem *Integrierten Donauprogramm* (IDP) und der *Integrierenden Konzeption Neckar-Einzugsgebiet* (IKoNE) zugrunde. Eine entsprechende Flussgebietsplanung wird auch von den im Dezember 2000 in Kraft getretenen EU-Wasserrahmenrichtlinien (EU-WRRL) aufgegriffen, die als Zielsetzung neben der nachhaltigen Verbesserung von Gewässergüte und Gewässerstruktur u.a. auch die Verbesserung des Hochwasserschutzes anstrebt und alle Mitgliedstaaten auffordert,

„... einen zumindest guten Zustand ihrer Gewässer zu erreichen, indem sie unter Berücksichtigung vorhandener Anforderungen auf Gemeinschaftsebene die erforderlichen Maßnahmen im Rahmen integrierter Maßnahmenprogramme festlegen und in die Praxis umsetzen.“

2.4 Anforderungen an die Wasserwirtschaft

Hochwasserschutz und Hochwasservorsorge in Deutschland sind Aufgaben der Länder und Kommunen sowie der potenziell betroffenen Bevölkerung. In den vergangenen Jahren haben die Bundesländer ihre Empfehlungen, Maßnahmen und Aktionspläne auf die in Kap. 2.2 und 2.3 aufgeführten Strategien ausgerichtet. Die Zielsetzungen werden in einer Vielzahl von Veröffentlichungen und Broschüren zum Thema Hochwasser dokumentiert, welche sich sowohl an Fachleute als auch die Allgemeinheit richten. Allen gemeinsam ist der Hinweis auf das immer verbleibende Restrisiko („100-jähriger HW-Schutz ist kein 100%-iger HW-Schutz!“), die dringende Empfehlung, Vorsorgemaßnahmen umzusetzen und Alarm- und Einsatzpläne auszubauen sowie die Forderung, den Hochwasserschutz im Einklang mit einer ganzheitlichen Planungskonzeption bezogen auf einen nachhaltigen Gewässerschutz auszurichten.

Auch wenn der Auftrag an die Verwaltung und Verbände klar definiert ist und die raumordnerischen und wasserrechtlichen Grundlagen auf Bundes-, Landes- und kommunaler Ebene vorhanden sind (siehe z.B.: [Renner & Wille, 2001; Knopp, 2002; Fröhlich, 2001]), so ist die Realisierung eines nachhaltigen Hochwasserschutzes in der Praxis aufgrund der vielfältigen Nutzungsanforderungen der Talauen schwierig. Oft sind es wirtschaftliche Hintergründe (z.B. kommunale Einnahmen durch Gewerbesteuer oder Ausweisung von Bauland in gefährdeten Bereichen), ökologische Leitbilder (z.B. Erhalt des Rückstau verursachenden Bewuchses entlang einer Gewässerstrecke), aber auch ganz persönliche Motive (z.B. Attraktivität der Flussnähe), welche die Umsetzung von Maßnahmen aufhalten oder gar verhindern. Eines der Hauptprobleme ist hierbei, dass längere hochwasserfreie Zeiten zu einem sorglosen Umgang mit dem Hochwasserrisiko führen und die Notwendigkeit von Schutz- bzw. Vorsorgemaßnahmen nicht erkannt wird.

„Ohne jeglichen Hinweis auf die Hochwassergefahr ist bereits 7 Jahre nach einem Ereignis das Gefahrenbewusstsein auf ein minimales Niveau abgesunken. Die Betroffenen werden von einem neuen Ereignis wiederum unvorbereitet überrascht.“ [IKSR, 2002]

Zudem ist die Wirkung einer Maßnahme auf einen potenziellen Hochwasserabfluss (z.B. Rückgewinnung von Retentionsraum, Rückstau einfluss eines Bauwerkes) in vielen Fällen nicht direkt ersichtlich und damit schwer vermittelbar. Nachhaltiges Hochwassermanagement kann jedoch nur unter aktiver Einbeziehung und Beteiligung der Anliegerkommunen bzw. der Bevölkerung realisiert werden.

„Die Nutzungskonflikte in der täglichen Planungspraxis nehmen ständig zu. Die Anforderungen an Raumplanung, Naturschutz, Umweltüberwachung wachsen ebenfalls stetig. Grundlegende Planungsdaten bzw. Zustandsinformationen müssen aktuell und in möglichst guter Auflösung zur Verfügung stehen. GIS und Computersysteme allgemein sind nicht die Ursache des enorm steigenden Datenbedarfs, vielmehr sind es die gesellschaftlichen Ansprüche an die nicht vermehrbare Ressource Boden bzw. Standort.“ [Blaschke, 1998]

3 Aufbau eines integralen Hochwassersimulationssystems

3.1 Existierende Informationssysteme für die Wasserwirtschaft

War früher der Einsatz Geographischer Informationssysteme (GIS) primär Spezialisten in Ingenieurbüros und Forschungseinrichtungen vorbehalten, halten sie als vielseitiges Arbeitswerkzeug und Planungsinstrument mehr und mehr Einzug in die tägliche Arbeitspraxis amtlicher Stellen. Nachfolgendes Zitat verdeutlicht die Bedeutung von GIS zur Bewältigung der zukünftigen Anforderungen an die Wasserwirtschaft:

„Die wasserwirtschaftliche Planung von Fließgewässern muss heute anderen Ansprüchen genügen als noch vor einigen Jahren. So sollen Ergebnisse hydraulischer Berechnungen nicht nur die Abflussleistung technischer Gerinne darstellen, sondern auch die hydraulisch relevanten Aspekte einbeziehen, die sich aus den Forderungen des Natur- und Landschaftschutzes an die Gestaltung von Fließgewässern ergeben. ... Grundlage hydraulischer Untersuchungen sind daher u.a. aktuelle Kenntnisse über Topographie, Ökologie sowie Flächen- und Bodennutzungen. Diese lassen sich nur unter Verwendung von Geo-Informationssystemen rationell verwalten, fortschreiben sowie fachübergreifend analysieren und darstellen.“ [Lange, 1995]

Bereits in den 80-er Jahren begann der Aufbau verschiedener Raum- und Umweltinformationssysteme [Schwaller, 2000]. Als herausragendes Beispiel kann das fach- und ressortübergreifende Umweltinformationssystem (UIS) Baden-Württemberg genannt werden, welches seit 1984 Daten zu verschiedenen Umweltthemen wie Wasser, Luftqualität, Abfall oder Natur und Landschaft erfasst und verwaltet. Mit Hilfe des UIS kann von allen weiteren Ministerien des Landes mit Umweltaufgaben sowie ihren Fachbehörden auf diese unterschiedlichen Daten- und Metadatenbestände zugegriffen werden. Zum Teil werden die Daten auch über das Internet der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Die Integration einer Vielzahl von UIS-Komponenten mit Bezeichnungen wie „*Informationssystem Wasser, Abfall, Altlasten, Boden*“ (WAABIS), „*Arten-, Landschafts- und Biotop-Informationssystem*“ (ALBIS) oder „*Technosphäre- und Luft-Informationssystem*“ (TULIS) macht das enorme Spektrum an landesweit digital vorgehaltenen Informationen deutlich. Aber auch andere Bundesländer haben in den vergangenen Jahren Umweltinformationssysteme aufgebaut. So zum Beispiel das *Niedersächsische Umweltinformationssystem* NUMIS, das *Hamburger Umweltinformationssystem* HUIS oder das *Daten- und Informationssystem* DIM des Landes Nordrhein-Westfalen. Diese Daten- und Informationsdienste setzen in der Regel auf Geographische Informationssysteme auf bzw. sind mit GIS-ähnlichen Komponenten ausgestattet. Raumbezogene Daten verschiedener Aggregationsstufen können hierdurch entsprechend dargestellt und verarbeitet werden. Das Anwendungspotenzial dieser Daten- und Informationsdienste für die Wasserwirtschaftsbehörden ist enorm [Heinrich & Kern, 2000; Kugele et al., 2002].

Im Rahmen der UIS vorrangig ausgebaut sind die Daten- sowie Kommunikations- bzw. Dialogkomponenten. Dies bedeutet, dass es primär um die Integration und Be-

reitstellung von Geodaten, deren Sachattribute sowie Metadatenbestände geht, nicht aber um den Zugriff auf die den Dateninput bestimmenden Verfahren und Modelle. Nur vereinzelt werden auch Simulationsmodelle (z.B. atmosphärische Ausbreitungsmodelle und Grundwassermodelle als Grundkomponenten des UIS B.-W.) verfügbar gemacht. Dies liegt vor allem darin begründet, dass die Anwendung von Simulationsmodellen und die verantwortungsvolle Interpretation der Ergebnisse ein umfangreiches und fundiertes Verständnis für die dem Modell zugrunde liegenden Verfahren (numerische Algorithmen, vereinfachende Annahmen, Abstraktionsgrad) und Grundlagen (Eingangsdaten, Randbedingungen) voraussetzt, welches in der Regel nur bei erfahrenen Experten vorhanden ist. Wie später gezeigt wird, trifft dies in besonderem Maße auf Modelle zur Simulation von Hochwasserabflüssen zu.

3.2 Systembausteine zur Hochwassermodellierung

Zur Simulation von Hochwasserereignissen einschließlich ihrer Auswirkungen grundlegend ist die Modellierung der Strömungsverhältnisse in den gefährdeten Fluss-Vorland-Bereichen. Hierzu stehen seit einigen Jahren hydrodynamisch-numerische Verfahren basierend auf den physikalischen Grundgleichungen (Erhaltungssätze für Masse und Impuls) zur Verfügung. Zielgrößen der numerischen Strömungssimulation sind die Ermittlung von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Abflussmenge sowie die Nachbildung des Wellenablaufes unter Berücksichtigung von Retentionseffekten und Wellenüberlagerungen. Ferner können mit ihrer Hilfe Erosions- und Verlandungsprozesse sowie die Ausbreitung von Schadstoffen analysiert werden. Über Methoden zur Quantifizierung der Auswirkungen der Hochwasserintensitäten in den gefährdeten Bereichen (Überflutungshöhe und -dauer, Fließgeschwindigkeit) lassen sich die zu erwartenden Schäden in Abhängigkeit der Flächennutzung bestimmen. Neben der Auswahl der Modellierungsmethode (räumliche Diskretisierung, Zeitabhängigkeit, etc.) und der Modellauflösung kommt gerade in der Hochwasserhydraulik aufgrund der Unsicherheiten der Eingangsdaten der Modellkalibrierung eine besondere Bedeutung zu.

Durch die Zusammenführung dieser Modelle mit Instrumenten zur Modellierung der hydrologischen Prozesse (Abflussbildung infolge von Niederschlag und Schneeschmelze, Wellentransformation) und Bestimmung der einzugsgebietsspezifischen statistischen Hochwasser-Kennwerte (Auftrittswahrscheinlichkeit von Scheitelabflüssen) können Auftretenswahrscheinlichkeiten bestimmter Hochwasserstände bzw. Schadenereignisse entlang des Gewässers ermittelt werden. Somit wird ermöglicht, Risikobewertungen durchzuführen, Prioritätenlisten bei der Umsetzung von Schutzkonzepten aufzustellen, Kosten-Nutzen-Verhältnisse zu analysieren sowie Bemessungsgrößen für Baumaßnahmen zu bestimmen. Des Weiteren können die Ergebnisse zur Erarbeitung von Alarmierungs- und Einsatzplänen genutzt werden und durch Zusammenwirken mit einem operationellen System zur Abflussvorhersage

(Hochwassermeldedienst auf Basis meteorologischer Eingangsdaten) die Koordinierung von Katastropheneinsätzen entscheidend verbessern.

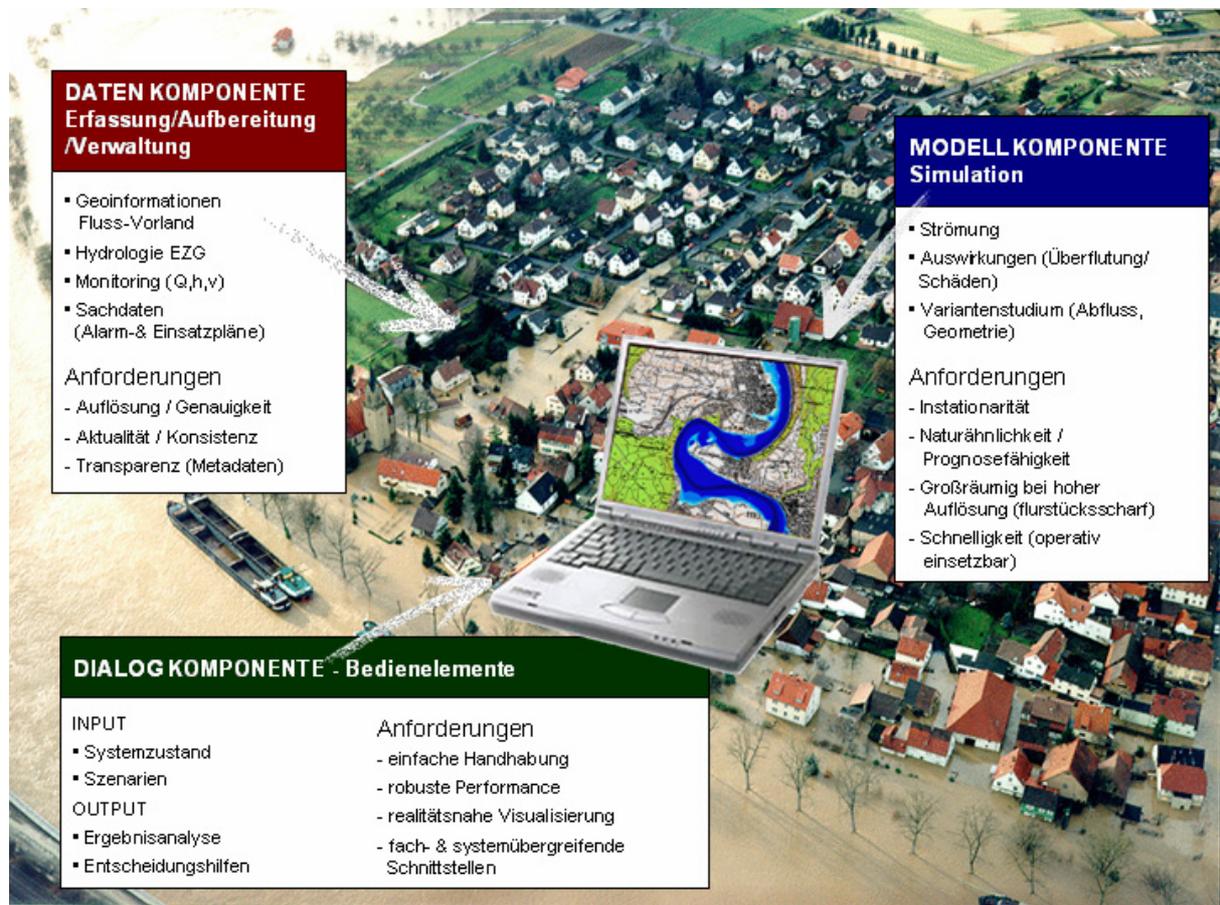


Abb. 3-1 Systemkomponenten eines Informations- und Planungsinstrumentes für das Hochwassermanagement

Für das Pre- und Postprozessing der Modellkomponenten lassen sich u.a. Geographische Informationssysteme (GIS) einsetzen. Diese dienen der Erfassung, Verwaltung, Visualisierung und Analyse der raumbezogenen Ein- und Ausgangsdaten. Moderne GIS-Softwaresysteme können jedoch bedeutend weitreichender genutzt werden, integrieren sie doch ein umfangreiches – komponentenübergreifendes - Potenzial an Funktionalitäten. Einige Geo-Informationssysteme lassen sich zudem über interne Programmierumgebungen um zusätzliche Funktionen bzw. Algorithmen erweitern. Hierdurch begrenzt sich ihr Einsatzgebiet nicht auf die Datenkomponente, sondern umfasst auch Bereiche der Modellkomponente.

Neben den Einsatzgebieten der Daten- und Modellkomponente ermöglichen einige GIS auch die Entwicklung speziell an die Anforderungen der Anwender angepasster Benutzeroberflächen und können im Rahmen eines Hochwasserinformationssystems als effektive Dialogkomponente eingesetzt werden. Die modularen Teilkomponenten eines integralen Informations- und Planungsinstrumentes sind in Abb. 3-1 zusammengeführt.

3.3 Systemanforderungen

3.3.1 Variation der hydrologischen und geometrischen Randbedingungen

Das System soll den Anwender in die Lage versetzen, unter Einsatz an die Strömungscharakteristik angepasster Verfahren beliebige Abflussszenarien innerhalb des großräumigen Modellgebietes (Ist-Zustand) simulieren zu können. Hierbei sind neben unterschiedlichen Abflusskonstellationen der Haupt- und Nebengewässer auch die hydraulisch maßgebenden Randbedingungen an Wasserbauwerken (Wehre, Kraftwerke, Ein- und Auslaufbauwerke etc.) zu berücksichtigen. Zudem ist zur Quantifizierung der Auswirkungen von Baumaßnahmen eine entsprechende Eingriffsmöglichkeit in die Systemgeometrie zu gewährleisten (Variantenstudium).

Bei Vorhandensein eingedeichter Gebiete stellt bzgl. der Simulation von Versagensszenarien die Größe der vorhandenen Retentionsvolumina hinter den Schutzanlagen ein wesentliches Kriterium zur Spezifikation der erforderlichen Systemeigenschaften dar. Bei im Vergleich zur Abflussmenge geringer Ausdehnung der Rückhalteräume (wie bspw. am Neckar) findet bei Überströmen/Versagen von Schutzdämmen keine maßgebliche Verformung der Hochwasserganglinie statt. Bei großen Retentionsflächen und -volumina (wie bspw. an Rhein und Elbe) wird durch Überströmen bzw. Versagen von Dämmen das Abflussgeschehen im Fluss maßgeblich beeinflusst. Die zeitabhängige Simulation der Zuflussmenge in ein Poldergebiet und gegebenenfalls die Rückströmung in das Fließgewässer sind für das Katastrophenmanagement maßgebende Größen und müssen in angemessener Weise simuliert werden.

Bei der Analyse der Ausbreitung von Überflutungen innerhalb eines eingedeichten Gebietes ist zu prüfen, inwieweit die Zeitabhängigkeit des Füllvorganges in Abhängigkeit der geometrischen Situation an der Versagensstelle (Breschenbreite, -tiefe) eine für die Modellanwendung maßgebende Größe darstellt. Für kleinere Gebiete ist es i.d.R. ausreichend, die sich aus den errechneten Wasserständen an der Versagensstelle ergebenden maximal möglichen Überflutungsgrenzen und -tiefen zu ermitteln. Da die Gefährdungssituation im Deichhinterland je nach topographischer Situation maßgeblich von der Lage der Versagensstelle beeinflusst ist, muss zudem geprüft werden, inwieweit auch diesbzgl. in der Anwendungsumgebung ein individuelles Variantenstudium ermöglicht werden muss, oder ob die als maßgebend erachteten Szenarien bestimmt und im Modell entsprechend vordefiniert werden können.

3.3.2 Modellauflösung / Genauigkeit

Für die effektive Umsetzung von Vorsorgestrategien ist zumeist eine objektbezogene Betrachtung der Hochwassergefahr bzw. die flurstücksscharfe Abgrenzung von Überflutungsflächen Voraussetzung; so z.B. für die Ausweisung rechtskräftiger Überschwemmungsgebiete, die Realisierung eines technischen Objektschutzes, das Aufstellen von Evakuierungsplänen.

Eine hohe Auflösung des Modells geht nicht zwangsläufig mit einer entsprechend hohen Modellgenauigkeit einher. Ausschlaggebend für die Genauigkeit der berechneten Überflutungsflächen bzw. -tiefen sind die Genauigkeiten der topographischen Datengrundlagen (Digitales Geländemodell), der berechneten zeit- bzw. abflussabhängigen Wasserstände (Strömungssimulation) sowie, im operationellen Einsatz, der Abflussvorhersage.

Die Ableitung der Genauigkeit eines Digitalen Geländemodells kann über eine Analyse des originären Datenbestandes (Massenpunkte, Isolinien, Bruchkanten) bezüglich Dichte und Messverfahren sowie der eingesetzten Interpolationsmethode relativ problemlos erfolgen. Deutlich schwieriger ist es jedoch, Aussagen zur Genauigkeit der berechneten Wasserstände zu treffen. Die zur Kalibrierung bzw. Validierung eines Modells zur Verfügung stehenden Messdaten (Scheitelwasserstände, Pegelaufzeichnungen, Abflussangaben, Überflutungsgrenzen) weisen gerade bei Extremereignissen große Unsicherheiten auf und decken nur einen Teil des möglichen Abflussspektrums ab. Zudem sind die hydraulischen Einflussgrößen ‚Topographie‘ und ‚Fließwiderstandsverhalten‘ der überströmten Vorländer aufgrund der Vielzahl von Strukturobjekten (Straßen, Dämme, Gebäude, Zäune etc.) und veränderlichen Vegetationszuständen modelltechnisch schwer erfassbar. Die in den Eingangsparameter enthaltenen Unsicherheiten wirken sich jedoch in direkter Linie auf die Modellgüte (Prognosefähigkeit) aus und müssen bei der Bewertung der Aussagefähigkeit der Untersuchungsergebnisse berücksichtigt werden [Matheja, 2000].

3.3.3 Datenmanagement

Die dynamische Veränderung der

- das Hochwasserabflussverhalten bestimmenden Einflussgrößen (Topographie, Bewuchssituation, Bauwerke u.a.),
- Verfügbarkeit von Messwerten (z.B. Scheitelfixierungen)
- sowie statistischen Eingangsgrößen HQ_T

erfordern eine kontinuierliche Aktualisierung der Modelle (Systemgeometrie und Parametrisierungen) und Ergebnisdarstellungen (z.B. Gefahrenkarten mit Überflutungsflächen HQ_T). Zudem ist für ein regelmäßiges Update der Datenkomponente zu sorgen, welche externe Geoinformationen z.B. zu Analyse und Visualisierungszwecken bereitstellen soll. Die Modell- und Datenaktualisierung muss i.d.R. zentral gesteuert werden und erfordert gerade bei einem vielschichtigen Anwenderkreis ein hohes Maß an Konsistenz und Transparenz.

3.3.4 Benutzerschnittstelle

Für den erfolgreichen Einsatz des Systems ist, neben der Qualität der Daten- und Modellkomponente, auch die Dialogkomponente ausschlaggebend: Die Herausforderung besteht darin, den Zugriff auf die Daten sowie die Anwendbarkeit der Modelle und Funktionalitäten über interaktive Benutzeroberflächen an die individuellen Mög-

lichkeiten und Grenzen der Systemanwender anzupassen und somit das verfügbare Bearbeitungspotenzial effektiv zu nutzen. Hierbei stellen vor allem die Heterogenität der Anwenderprofile sowie die Unregelmäßigkeit des Systemeinsatzes eine Schwierigkeit dar. Über logisch-strukturierte Eingabemasken kann jedoch auch Anwendern mit wenig Systemerfahrung die Möglichkeit gegeben werden, komplexe Funktionsabläufe automatisiert durchzuführen. Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit kommt zudem einer realitätsnahen Visualisierung der Grundlegendaten und Modellergebnisse eine besondere Bedeutung zu.

3.3.5 Operationeller Einsatz

Hinsichtlich der Simulationswerkzeuge sind die Einsatzbereiche ‚HW-Vorsorge‘ und ‚Technischer Schutz‘ prinzipiell vom Bereich ‚Operationeller Einsatz‘ zu unterscheiden, da dieser zusätzliche Anforderungen an die eingesetzten Verfahren stellt. So müssen die Entscheidungsträger im operationellen Einsatz während eines Hochwasserereignisses

- ⇒ drohende Gefahren rechtzeitig erkennen,
- ⇒ die Gesamtsituation zuverlässig bewerten,
- ⇒ und mit angemessenen Maßnahmen zielführend eingreifen.

Simulationswerkzeuge für den operationellen Einsatz müssen daher ermöglichen, neben der Erfassung des Ist-Zustandes des Modellgebietes auch die Auswirkungen

- ⇒ des gezielten Einsatzes von Rückhaltmaßnahmen (z.B. Polder),
- ⇒ des optimierten Betriebes von Kontrollbauwerken (Staustufen),
- ⇒ möglicher Versagensszenarien von Schutzanlagen,
- ⇒ sowie kontrollierter Eingriffe (Deichsprengungen, Notflutungen)

entsprechend der individuellen Ausprägungen eines Ereignisses schnell und zuverlässig zu quantifizieren. Dies auch unter extremen Bedingungen, wie z.B. hoher Zeitdruck, gestörter Kommunikation, Ausfall von Daten.

Hieraus ergeben sich besondere Anforderungen an die Effektivität und Robustheit der zugrunde gelegten Simulationsverfahren sowie der Benutzerschnittstellen zur Systemanwendung und Weitergabe der Simulationsergebnisse an Einsatzkräfte und Öffentlichkeit. So müssen die eingesetzten Verfahren gewährleisten, dass in Minuten, max. in wenigen Stunden Simulationen durchgeführt und entsprechende Daten zur Analyse der gesamten Hochwassersituation einschließlich verschiedener Eingriffsmöglichkeiten in das Abflussgeschehen bereitgestellt werden. Während zur effektiven Umsetzung von Vorsorgestrategien zumeist eine flurstücksscharfe bzw. objektbezogene Betrachtung der Hochwassergefahr Voraussetzung ist, kann für den operationellen Modelleinsatz im Katastrophenfall eine deutlich gröbere Auflösung der Ergebnisse zur Koordinierung der notwendigen Maßnahmen ausreichen, so z.B. bei Festlegung der zu evakuierenden Ortslagen.

3.4 IKoNE-Projekt „HN-Flussmodell Neckar“

3.4.1 Hintergrund

Das Einzugsgebiet des Neckars umfasst mit seinen 14.000 Quadratkilometern knapp 40% der Landesfläche des Landes Baden-Württemberg (B.-W.) und mit etwa 5 Mio. Einwohnern die Hälfte seiner Wohnbevölkerung. Aufgrund des hohen Besiedlungsgrades und der intensiven Nutzung der Talräume als Gewerbe- und Verkehrsflächen kommt dem Lebensraum Neckar eine zentrale Bedeutung für die wirtschaftliche Prosperität und die Lebensqualität im Land Baden-Württemberg zu. In Anlehnung an integrierte Programme am Rhein (IRP) und an der Donau (IDP) wurde im April 1999 die „Integrierende Konzeption Neckar-Einzugsgebiet (IKoNE)“ vom Ministerium für Umwelt und Verkehr B.-W. ins Leben gerufen. Anders als die Programme IRP und IDP beschränkt sich die IKoNE nicht auf das Hauptgerinne, sondern stellt einen flussgebietsbezogenen wasserwirtschaftlichen Handlungsrahmen für das gesamte Neckar-Einzugsgebiet einschließlich der Nebenflüsse dar. Hierdurch sollen wasserwirtschaftliches Planen und Handeln im Einzugsgebiet des Neckars, auch im Sinne der Vorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie, gesamtschaulich gestaltet werden. [Ministerium für Umwelt und Verkehr B.-W., 1999; Renschler, 2000]

3.4.2 Zielsetzung und Aufbau der IKoNE

Die Zielsetzungen der IKoNE sind im Wesentlichen die

- Verbesserung des Hochwasserschutzes und der Hochwasservorsorge,
- Verbesserung des ökologischen Zustandes der Gewässer,
- Verbesserung der Gewässergüte,
- Verbesserung der Datengrundlage und Instrumente.

Um eine breite Handlungsakzeptanz zu erreichen, ist ein langfristiger und tragfähiger Konsens der Interessenten und Verantwortlichen erforderlich. Daher wird als wichtige Voraussetzung zur Erreichung der Ziele das partnerschaftliche Zusammenwirken aller Beteiligten formuliert. Neben Behörden, Verbänden, Wirtschaft und Kommunen sollen auch die einzelnen Bürger angesprochen und zum verantwortlichen Handeln aufgerufen werden. Dies gilt in besonderem Maße für die Hochwasservorsorge.

Zur Bündelung der Aufgaben umfasst IKoNE eine Vielzahl von Aktionsprogrammen mit unterschiedlichen Aufgabenschwerpunkten. Während die maßnahmenbezogenen Aktionsprogramme auf umsetzbare Maßnahmen abzielen, sollen im Rahmen der grundlagenorientierten Programme „Daten“ und „Instrumente“ einheitliche Datenbanken und wirksame Arbeitsinstrumente zur rationellen Bearbeitung und Umsetzung von Maßnahmen geschaffen werden.

Das Aktionsprogramm Hochwasser bildet einen Rahmen, in dem die wasserwirtschaftlichen Aufgaben im Hinblick auf Hochwasserschutz zusammengestellt sind. Die wesentlichen Zielsetzungen des Aktionsprogramms Hochwasser sind:

- Initiierung, Koordinierung und Optimierung von Maßnahmen am Gewässer und im Einzugsgebiet zum Hochwasserschutz
- Minderung des Hochwasserschadens durch Beeinflussung der Nutzungen in den überschwemmungsgefährdeten Bereichen
- Beratung der vom Hochwasser gefährdeten Kommunen, Bevölkerung und Betrieben vor und während Hochwasserereignissen
- Bereitstellung von Grundlagen zur fachtechnischen Abgrenzung von Überschwemmungsgebieten und überschwemmungsgefährdeten Bereichen

3.4.3 Hochwassersimulationssystem Neckar

Bereits Ende 1997 wurde von der Landesregierung gemeinsam mit dem Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe das Projekt „Hydrodynamisch-numerisches (HN-) Flussmodell Neckar“ initiiert. Im Rahmen der ersten Projektdefinitionsphase ging es zunächst um die Erfassung einer topographischen Basis für den Fluss und die angrenzenden bei Hochwasser überfluteten Talauen in einem EDV-Modell und darauf aufbauend die Erstellung eines numerischen Abflussmodells zur Simulation von Hochwasserständen. Zur Ermittlung und Visualisierung von Überflutungsflächen sollte ein Geographisches Informationssystem eingesetzt werden. Daten und Modelle sollten lauffähig an die Landesverwaltung zur Unterstützung des Hochwassermanagements übergeben werden. Das „Testgebiet“ umfasste eine Strecke von ca. 40 Flusskilometern. Die damalige Vision war es, ein Fließgewässersystem in seiner vollen Ausdehnung modellhaft im „Laptop verfügbar“ zu haben und in hoher Auflösung analysierbar zu machen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Entwicklungsarbeiten zum „HN-Flussmodell Neckar“ und dessen Implementierung bei den zuständigen Wasserwirtschaftsbehörden dokumentiert. Es werden sowohl die technischen Grundlagen (numerische Strömungssimulation, GIS-Techniken, Datenmanagement etc.) erläutert als auch Anwendungsbeispiele und Erfahrungen aus der Arbeitspraxis der Gewässerdirektionen gegeben. Hierbei wird vertieft auf die Auswahl der Modellierungsmethode sowie die praxisrelevanten Genauigkeitsanforderungen bezüglich Grundlagendaten und Berechnungsergebnissen eingegangen.

4 Ausgangssysteme

4.1 Hydrodynamisch-numerische Strömungssimulation

Zur Simulation von Hochwasserereignissen einschließlich ihrer Auswirkungen grundlegend ist die Modellierung der Strömungsverhältnisse in den gefährdeten Fluss-Vorland-Bereichen. Während früher die Untersuchung strömungsmechanischer Fragestellungen an Fließgewässern grundsätzlich den Aufbau physikalischer Maßstabsmodelle (Laborversuche) erforderlich machte, lassen sich im Zeitalter leistungsstarker Prozessoren die Strömungsprozesse eines Fließgewässers auch mathematisch über hydrodynamisch-numerische (HN-) Modelle nachbilden.

Wesentliche strömungsmechanische Grundlage der Entwicklung von HN-Modellen bilden die Transportgleichungen zur räumlich dreidimensionalen und zeitabhängigen Beschreibung reibungsbehafteter Strömungen in Flüssigkeiten und Gasgemischen, welche bereits in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts von dem Franzosen Claude Louis Navier sowie dem Briten George Gabriel Stokes unabhängig voneinander entwickelt wurden. Dieses System nicht-linearer partieller Differentialgleichungen war lange Zeit für die Praxis weitgehend unbrauchbar, da es (bis heute) nicht analytisch gelöst werden konnte. Erst mit den steigenden Rechnerkapazitäten der letzten Jahrzehnte und der Entwicklung effektiver numerischer Algorithmen eröffneten sich zunehmend Möglichkeiten ihrer näherungsweise Lösung über räumliche und zeitliche Diskretisierung.

Eine vollständige Erfassung realer turbulenter Strömungsvorgänge über die Navier-Stokes-Gleichungen ist jedoch nur für Sonderfälle mittels hochaufgelöster Diskretisierung im mm-Bereich [Malcherek, 2002a] möglich und angesichts der derzeitigen Rechnerleistungen auf Grundlagenuntersuchungen zur numerischen Hydromechanik begrenzt. Da in der Praxis die exakte kleinskalige Nachbildung der turbulenten Strömung für die meisten Fragestellungen ohnehin nicht von Bedeutung ist, wird die Turbulenz über zeitliche Mittelung und empirische Turbulenzmodelle beschrieben oder lediglich ihr Einfluss auf das Energiegefälle der Hauptströmung über pauschale Energieverlustbeiwerte mitberücksichtigt.

Während reale Strömungsphänomene in technischen Bauwerken bei klar definierbaren geometrischen Randbedingungen sowie Material- und Fluideigenschaften heutzutage relativ präzise simuliert werden können, sind zur Simulation der Strömungsverhältnisse in natürlichen bzw. naturähnlichen Fließgewässerstrecken eine Vielzahl vereinfachender Annahmen bzw. Generalisierungen und empirische Parametrisierungen notwendig, dies vor allem aufgrund

- der topographischen Strukturvielfalt (Fluss-/Vorland-Geometrie),
- der unregelmäßigen Sohl- bzw. Oberflächenbeschaffenheit,
- des Einflusses der freien Oberfläche sowie

- der zeitlichen Dynamik der Einflussgrößen.

Als wesentliche Vereinfachungen sind hierbei die

- Annahme hydrostatischer Druckverteilung,
- Annahme konstanter Dichte und Viskosität sowie die
- Berücksichtigung der Energieverluste aufgrund innerer und äußerer Reibungskräfte über empirische Parameter

zu nennen. Zudem werden in vielen Anwendungsfällen die dreidimensional instationären Strömungsgleichungen über

- Dimensionsreduzierung durch vertikale bzw. vertikale und horizontale Integration sowie
- Annahme stationärer (zeitunabhängiger) Strömungsverhältnisse

weiter vereinfacht.

Aufgabe des Modellierers ist es, die Zulässigkeit dieser Vereinfachungen in den mathematischen Grundgleichungen vor dem Hintergrund der Charakteristik des Untersuchungsgebietes, der Problemstellung sowie der Anforderungen an die Zielgrößen zu prüfen. Als Maß für die Modellgüte kann i.A. die Übereinstimmung der berechneten Größen (z.B. Fließgeschwindigkeiten, Wasserstände) mit den in der Gewässerstrecke (z.B. bei bestimmten Abflussmengen) tatsächlich auftretenden Strömungszuständen gesehen werden. Aufgrund der Unsicherheiten in der Beschreibung des natürlichen Systemzustandes über Messdaten und der allgemeinen Zielsetzung, das Modell für Prognoseberechnungen¹ einzusetzen, ist die Bewertung der Modellgüte in der Praxis jedoch alles andere als trivial.

4.1.1 Einflussfaktoren auf das Strömungsfeld

Die Strömungsverhältnisse eines Fließgewässers werden bestimmt durch das komplexe Wirkungsgefüge innerer und äußerer Kräfte auf den Wasserkörper. Zu den inneren Kräften zählen die Schwerkraftkomponente, Druckgradienten und innere Schubspannungen sowie ferner die durch die Erdrotation verursachte Corioliskraft. Als äußere Kräfte wirken die Reibungskräfte an den Grenzflächen des Wasserkörpers zur festen Berandung des Flussbettes und der Vorländer sowie die Windschubspannung an der freien Oberfläche.

Alle Kräfte wirken beschleunigend bzw. verzögernd auf das Massensystem und verursachen ein turbulentes Strömungsfeld², welches durch die Überlagerung verschiedener Bewegungsskalen geprägt ist. Eine relativ stabile mittlere Strömung in Haupt-

¹ Simulation eines Systemzustandes mit geometrischen und/oder hydrologischen Randbedingungen, für die keine Messwerte vorliegen

² Laminare, also turbulenzfreie Strömungen kommen außer im Grenzschichtbereich in Fließgewässerstrecken praktisch nicht vor.

fließrichtung (z.B. in Richtung des Sohlgefälles) wird von räumlich und zeitlich irregulären Wirbelstrukturen überlagert. Die größten Wirbel haben die Größenordnung des Strömungsgebietes und entziehen der mittleren Strömung kinetische Energie. Sie zerfallen in immer kleinere Wirbelstrukturen, bis am Ende der Wirbelkaskade die kleinsten Wirbel die kinetische Energie auf der molekularen Ebene und somit die Temperatur erhöhen (Dissipation).

Durch die Bewegungen des Wasserkörpers entstehen Geschwindigkeitsunterschiede benachbarter Fluidschichten bzw. Fluidpakete. Hierdurch entstehen Scherspannungen, deren Größe vom Geschwindigkeitsgradienten zwischen den Schichten abhängig ist. Diese inneren Spannungen sind verbunden mit Reibungskräften, welche sich verzögernd (bremsend) auf die Strömung auswirken. Hohe Geschwindigkeitsgradienten, die wiederum hohe Tangentialspannungen und damit Energieverluste initiieren, entstehen u.a. aufgrund der Stokes'schen Haftbedingung³ an der Grenzschicht zur festen Berandung. Nach dem Newton'schen Ansatz, der allerdings nur für laminare⁴, also turbulenzfreie Strömungsverhältnisse Gültigkeit besitzt, ist die Schubspannung τ , die durch molekularen Impulsaustausch zwischen den Schichten verursacht wird, direkt proportional zum Geschwindigkeitsgradienten, wobei sich als Proportionalitätskonstante die dynamische Viskosität μ ergibt. Diese molekulare Zähigkeit ist eine Stoffeigenschaft und Funktion der Temperatur. Das Newton'sche Zähigkeitsgesetz ist für viele Fluide (Newton'sche Fluide) zutreffend. Es gilt

$$\tau = \mu \frac{dv}{ds} \quad (4-1)$$

mit	τ	[N/m ²]	Schubspannung
	μ	[Ns/m ²]	dynamische Viskosität
	v	[m/s]	Geschwindigkeit
	s	[m]	Abstand zwischen den Fluidschichten

Auch bei turbulenten Strömungsverhältnissen wird durch die Wirbelbewegungen und durch Oberflächenwellen eine innere Reibung erzeugt, die als Funktion des Gradienten der (mittleren) Strömungsgeschwindigkeit dargestellt werden kann. Die mit Turbulenz einhergehenden räumlichen und zeitlichen Irregularitäten des Strömungsfeldes charakterisieren das Widerstandsverhalten der Fließgewässerstrecke. Wesentliche Faktoren sind neben der Sohlbeschaffenheit bzw. der Oberflächenrauheit (Korngröße, Bewuchs etc.) die Querschnittsform und Linienführung (Formrauheiten) des Fließgewässers.

³ An der Gewässerberandung ist die Geschwindigkeit des Fluids gleich null (Stokes'sche Wandhaftbedingung)

⁴ Strömung reibungsbehafteter Flüssigkeiten, deren Schichten ohne Wirbelbildung aneinander vorbeigleiten

4.1.2 Die physikalischen Grundgleichungen

Die vier Grundgleichungen zur Beschreibung des Strömungsfeldes und des Druckfeldes im dreidimensionalen Raum setzen sich aus den drei Bewegungsgleichungen sowie der Kontinuitätsgleichung zusammen. Diese beruhen auf den Erhaltungssätzen für den Massen- und Impulsstrom und lassen sich wie folgt darstellen:

4.1.2.1 Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung)

Bilanziert man unter Zugrundelegung eines ortsfesten kartesischen Koordinatensystems den Volumen- bzw. Massenstrom durch die Oberflächen eines elementaren Kontrollvolumens (siehe Abb. 4-1), so ergibt sich die Differenz zwischen ein- und ausströmender Masse pro Zeiteinheit in x-Richtung (analog y- und z-Richtung) zu:

$$\left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z - (\rho u) \Delta y \Delta z = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (4-2)$$

Geht man von einem konstanten Volumen des Kontrollelements ($dV/dt=0$) aus, so muss ein Ungleichgewicht im Massenstrom zu einer Veränderung der Fluidichte im Kontrollvolumen führen. Bei Division durch das Volumen $\Delta x \Delta y \Delta z$ gilt:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \quad (4-3)$$

mit	t	[s]	Zeit
	ρ	[kg/m ³]	Fluidichte
	u, v, w	[m/s]	Geschwindigkeitskomponenten in den drei Koordinatenrichtungen x,y und z

Durch Anwendung der Kettenregel und Umformung erhält man:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (4-4)$$

Unter Annahme eines inkompressiblen Fluids ($\rho = \text{const.}$) jedoch ist zu jedem Zeitpunkt die über die Oberflächen des Kontrollelements einströmende Masse gleich der ausströmenden Masse und das Prinzip der Massenerhaltung ($dM/dt = 0$) lässt sich über die Kontinuitätsgleichung in ihrer reduzierten Form

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4-5)$$

ausdrücken.

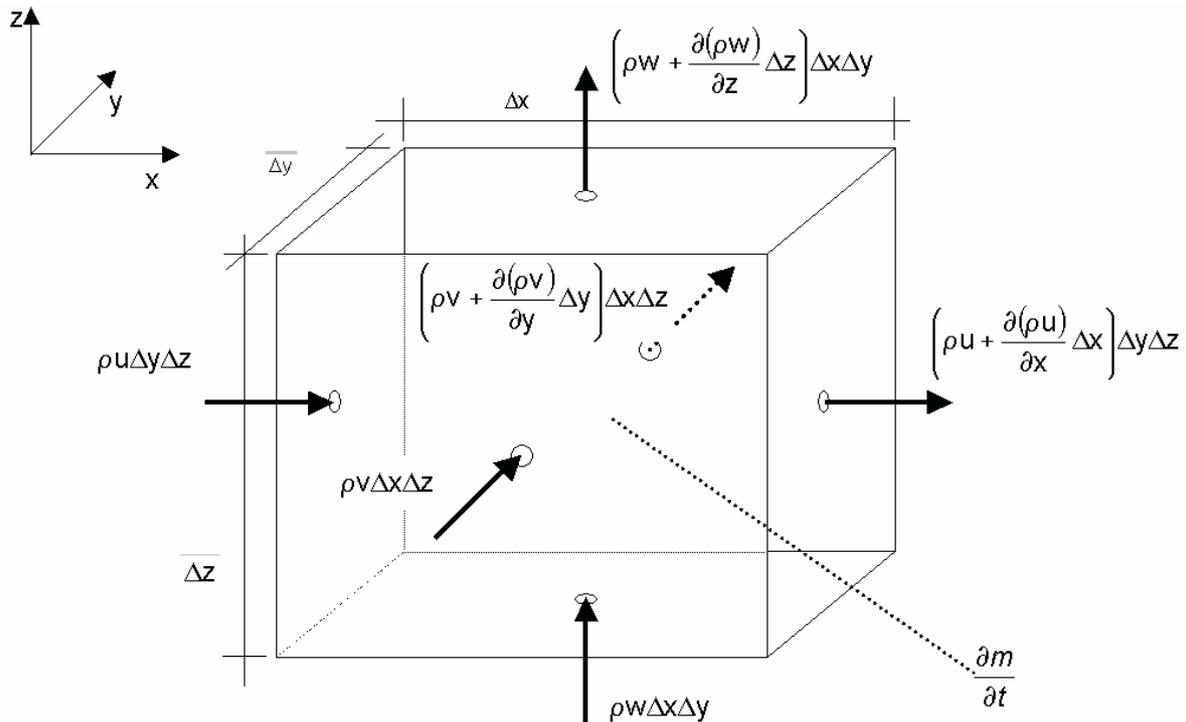


Abb. 4-1 Massenflüsse durch die Oberflächen eines elementaren Kontrollvolumens

4.1.2.2 Impulserhaltung (Bewegungsgleichungen)

Unter Voraussetzung einer Lagrange'schen Betrachtungsweise⁵ einer Strömung gilt für die Beschleunigung a_i eines Wasserpartikels auf seinem Weg durch den Raum bezogen auf ein kartesisches Koordinatensystem:

$$a_x = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4-6)$$

$$a_y = u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (4-7)$$

$$a_z = u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} \quad (4-8)$$

Nach dem dynamischen Grundgesetz wird die Beschleunigung eines Massensystems bzw. die zeitliche Veränderung des Impulses \vec{I} verursacht über die vektorielle Summe der einwirkenden Kräfte \vec{F}_i . Es gilt

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad \text{bzw.} \quad \sum \vec{F} = \frac{d\vec{I}}{dt} \quad (4-9)$$

⁵ Bei der Lagrange'schen Betrachtungsweise bewegt sich der Beobachter mit dem Strömungsfeld mit, woraus sich zusätzlich zur Euler'schen Beschleunigung $\partial u_i / \partial t$ die advektiven Beschleunigungsterme $u_j (\partial u_i / \partial x_j)$ ergeben.

Unter der vereinfachten Annahme einer reibungsfreien Strömung und Vernachlässigung der Corioliskraft wirken auf ein infinitesimales Kontrollvolumen im Wasserkörper neben der Schwerkraft (Massenkraft) nur Druckkräfte (Oberflächenkräfte).

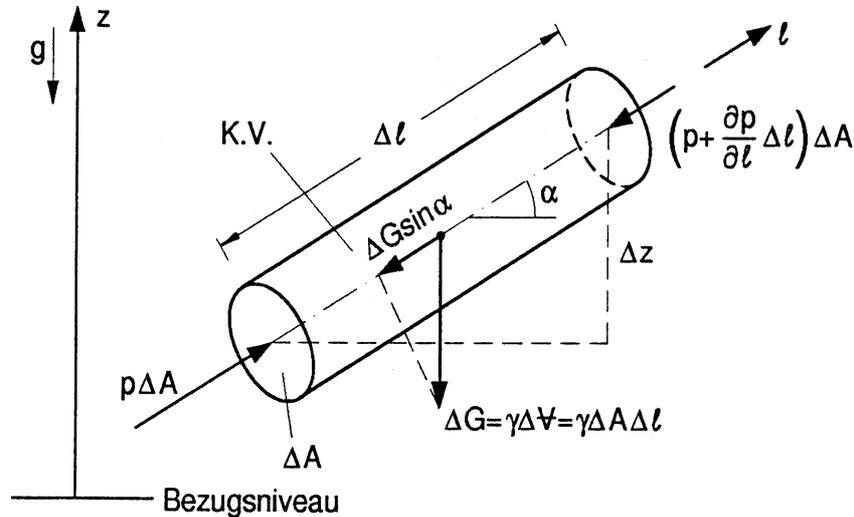


Abb. 4-2 Kraftansätze bezogen auf ein elementares Kontrollvolumen mit Zylindergeometrie unter Annahme einer reibungsfreien Strömung [Jirka, 1998]

Über die Bilanzierung dieser in Abb. 4-2 am Beispiel eines elementaren zylindrischen Kontrollvolumens veranschaulichten Kräfte lassen sich die nachfolgend aufgeführten Euler'schen Bewegungsgleichungen (Impulserhaltungsgleichung für reibungsfreie Strömungen) herleiten:

$$\rho \Delta A \Delta l a_l = -\gamma \Delta A \Delta l \sin \alpha - \frac{\partial p}{\partial l} \Delta l \Delta A \quad (4-10)$$

mit p [N/m²] Druck
 A [m²] Fläche
 l [m] Strecke in Achsrichtung

Durch Division mit der Masse $\rho \Delta A \Delta l$ und Substitution $\sin \alpha = \partial z / \partial l$ erhält man die Beschleunigung a des Kontrollvolumens in Achsrichtung l :

$$a_l = -g \frac{\partial z}{\partial l} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial l} \quad (4-11)$$

Überträgt man nun dieses Ergebnis auf ein Kontrollelement im kartesischen Koordinatensystem ($\partial z / \partial x = 0$, $\partial z / \partial y = 0$, $\partial z / \partial z = 1$), so ergeben sich die Euler'schen Bewegungsgleichungen für die Lagrange'sche Betrachtungsweise zu:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4-12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (4-13)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (4-14)$$

Als Erweiterung ergeben sich unter Berücksichtigung der in einer realen Strömung auftretenden Reibungskräfte unter Annahme der Inkompressibilität des Fluids die vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen. Hierbei werden neben den Druckkräften und Schwerkraften (angesetzt in der allgemeinen Form für alle Koordinatenrichtungen f_x, f_y, f_z) auch die durch Wandreibung und Turbulenz verursachten Normalspannungen σ und Tangentialspannungen τ an den Oberflächen des Kontrollvolumens bilanziert. Da diese in Zusammenhang mit der molekularen Viskosität stehen, werden die zusätzlichen Terme auch als viskose Spannungsterme bezeichnet.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + f_x \quad (4-15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + f_y \quad (4-16)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right) + f_z \quad (4-17)$$

Nach dem Stokes'schen Ansatz⁶, wonach (analog dem Newton'schen Zähigkeitsgesetz für Couette-Strömungen) die auftretenden Spannungen proportional zu den Geschwindigkeitsänderungen eines Fluidelements sind und eine volumentreue Formveränderung verursachen, gilt:

$$\sigma_x = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{und} \quad \tau_{yx} = \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (\text{analog } \sigma_y, \sigma_z \text{ und } \tau_{zx}, \tau_{xz}, \tau_{zy}, \tau_{yz}) \quad (4-18)$$

Durch Einsetzen in die obigen Impulsgleichungen erhält man nach Umformung:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (4-19)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (4-20)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (4-21)$$

mit $\nu = \mu/\rho$ [m²/s] kinematische Viskosität

⁶ Der Stokes'sche Ansatz gilt für Inkompressibilität und den laminaren Fall, wird jedoch in Approximation auch für turbulente Verhältnisse angewendet.

Die Navier-Stokes'schen Bewegungsgleichungen sind partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung und nichtlinear, die nur näherungsweise über numerische Methoden gelöst werden können.

4.1.3 Statistische Beschreibung der Turbulenz

Die kleinsten turbulenten Wirbelstrukturen in einem Fließgewässer haben einen sehr kurzen Zeit- und Längenmaßstab. Ihre direkte numerische Simulation (DNS) wäre für größere Modellgebiete schon allein aufgrund der benötigten Rechnerleistungen nicht realisierbar. Über statistische (zeitliche) Mittelung der Strömungsgleichungen lassen sich für die orts- und zeitabhängigen Größen u_i, v_i, w_i und p zeitliche Mittelwerte (\bar{u}_i, \dots) und Schwankungsgrößen (u_i', \dots) definieren.

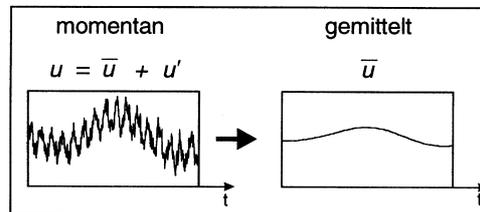


Abb. 4-3 Zeitliche Mittelung eines Strömungsparameters [Schröder, 2003]

Hieraus ergeben sich die dreidimensionalen Reynoldsgleichungen, die im Vergleich zu den Navier-Stokes-Gleichungen zusätzliche Spannungsterme (Terme korrelierter Geschwindigkeitsfluktuationen) beinhalten, die den Impulsaustausch der Strömung infolge der turbulenten Bewegungen beschreiben.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) \right] + \bar{f}_i \quad (4-22)$$

Die Reynoldsspannungen $\overline{\rho u_i' u_j'}$, auch Scheinspannungen genannt, erscheinen zusätzlich zu den viskosen Spannungen der gemittelten Größen und wirken in ähnlicher Weise auf den Bewegungsablauf. Da für die zusätzlichen Terme keine exakten Bestimmungsgleichungen existieren, werden sie über Turbulenzmodelle beschrieben, die auf empirische Annahmen zurückgreifen. Sie basieren zumeist auf dem Prinzip der (scheinbaren) Wirbelviskosität ν_t nach *Boussinesq (1877)*, wodurch die Reynoldsspannungen an die Gradienten der mittleren Strömungsgeschwindigkeit geknüpft werden. Der Faktor ν_t stellt keine Stoffeigenschaft dar, sondern variiert mit dem Strömungsfeld und ist von der Strömungsgeometrie und Parametern wie der Reynolds-Zahl abhängig. [Malcherek, 2002a; Schröder & Forkel, 1999]

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4-23)$$

mit ν_t [m²/s] Wirbelviskosität

Die Turbulenzmodelle lassen sich gemäß der Anzahl der partiellen Differentialgleichungen einordnen, die zur Modellierung der turbulenten Viskosität ν_t eingesetzt werden. Man unterscheidet hierbei Null-Gleichungsmodelle (algebraische Turbulenzmodelle) sowie Ein- und Zwei-Gleichungsmodelle, welche jedoch hier nicht weiter ausgeführt werden sollen. Eine eingehende Erläuterung der den genannten Verfahren zugrunde liegenden Ansätze und Diskussion ihrer Anwendungsmöglichkeiten findet sich u.a. in [DVWK-Schrift, 1999; Malcherek, 2002a].

4.1.4 Vereinfachungen bei dreidimensionalen Modellansätzen

Eine Vereinfachung der dreidimensionalen Modellansätze ergibt sich z.B. durch die Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung (Vernachlässigung der vertikalen Impulsbilanz). Diese lässt sich wie folgt darstellen:

$$p(x,y,z,t) = p_0 + \rho g (z_s - z) \quad (4-24)$$

mit p_0 [N/m²] Atmosphärendruck
 z_s [m] geodätische Höhe des Wasserspiegels

Des Weiteren existieren sogenannte $2\frac{1}{2}$ -dimensionale Verfahren, die auf tiefengemittelten Gleichungen (siehe Kap.4.1.5) basieren. Die vertikale Ungleichförmigkeit der horizontalen Fließgeschwindigkeitskomponenten erfolgt hierbei entweder durch eine Lösung der Gleichungen in mehreren horizontalen Schichten oder durch Formfunktionen. [Schröder & Forkel, 1999]

4.1.5 Zweidimensionale tiefengemittelte Flachwassergleichungen

Die Integration der dreidimensionalen Kontinuitäts- und Bewegungsgleichungen in vertikaler Richtung unter Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung, einer gleichförmigen vertikalen Geschwindigkeitsverteilung sowie eines geringen Wasserspiegel- bzw. Sohlgefälles führt auf die zweidimensionalen tiefengemittelten Flachwassergleichungen:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (4-25)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{1}{h\rho} \frac{\partial \sigma_x h}{\partial x} + \frac{1}{h\rho} \frac{\partial \tau_{yx} h}{\partial y} - \frac{1}{h} \frac{\tau_{Bx}}{\rho} + \frac{1}{h} \frac{\tau_{Wx}}{\rho} \quad (4-26)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{1}{h\rho} \frac{\partial \sigma_y h}{\partial y} + \frac{1}{h\rho} \frac{\partial \tau_{xy} h}{\partial x} - \frac{1}{h} \frac{\tau_{By}}{\rho} + \frac{1}{h} \frac{\tau_{Wy}}{\rho} \quad (4-27)$$

mit h [m] Wassertiefe

z_B	[m]	Sohlhöhe
z_S	[m]	Wasserstand
τ_B	[N/m ²]	Sohlschubspannung
τ_W	[N/m ²]	Windschubspannung

Über die Tiefenmittelung wird der Berechnungsaufwand drastisch reduziert. Ihr Einsatz eignet sich für Strömungsgebiete, deren Wassertiefen im Vergleich zur horizontalen Ausdehnung gering sind.

Die Kontinuitätsgleichung besagt in diesem Fall, dass eine Unausgewogenheit der Durchflussbilanzierung an einem Berechnungspunkt die Änderung des Wasserstandes zur Folge hat. Zur Bestimmung der zeitlichen Änderung der freien Oberfläche werden also nur die tiefengemittelten Geschwindigkeiten u und v bzw. Durchflüsse benötigt, die sich aus den beiden horizontalen Impulsgleichungen ergeben. [Malcherek, 2002a]

Über die Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung lässt sich der Druckgradient in den Impulsgleichungen als Funktion des Wasserstandes ausdrücken, wodurch der Druck als unbekannte Variable aus den Strömungsgleichungen eliminiert wird.

Die Spannungsterme $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yx}$ werden analog den Ausführungen in Kap.4.1.2.2 über den Stokes'schen Ansatz abgebildet. Zur Modellierung der Wirkung der (dreidimensionalen) Turbulenz auf die tiefenintegrierte Strömung finden wiederum die in Kap.4.1.3 erwähnten Modellansätze auf Basis des Prinzips der Wirbelviskosität Verwendung. Die Sohl- bzw. Windschubspannungen τ_B, τ_W werden als äußere Kräfte approximiert. In den meisten Anwendungsfällen der Fließgewässermodellierung stellt die Sohlschubspannung die maßgebende Einflussgröße (z.B. zur Berechnung von Wasserständen, Sedimenttransport etc.) dar. Ihrer Modellierung kommt daher eine besondere Aufgabe zu und wird in Kap.4.1.7 vertieft behandelt.

4.1.6 Eindimensionales Gleichungssystem nach Saint-Venant

Über eine weitere Integration der tiefengemittelten Flachwassergleichungen in horizontaler Richtung unter Annahme einer vernachlässigbaren Transversalgeschwindigkeit v und Windschubspannung⁷ erhält man:

$$\frac{\partial hB}{\partial t} + \frac{\partial huB}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial uhB}{\partial t} + u \frac{\partial uhB}{\partial x} = -ghB \frac{\partial z_s}{\partial x} - B \frac{\tau_{Bx}}{\rho} \quad (4-28)$$

⁷ Für die Windschubspannung kann in 1D-Modellen nur die in bzw. entgegen der Fließrichtung wirkende Komponente erfasst werden. Sie wird in vielen Fällen vernachlässigt.

h stellt die über die Breite B des Querschnittes gemittelte Wassertiefe dar und kann somit erheblich von der Haupttrinntiefe abweichen. u ist die über den Querschnitt gemittelte Fließgeschwindigkeit.

Mit $A=h \cdot B$ und $Q=A \cdot u$ sowie über Einbindung der als Schleppkraftformel [Naudascher, 1987] bekannten Gleichung $\tau_B = \rho g r_{hy} I_E$ unter Approximation des hydraulischen Radius $r_{hy}=A/U=h$ (U =benetzter Umfang) erhält man die Darstellung der eindimensionalen querschnittsgemittelten Gleichungen nach Saint Venant. [Schröder & Forkel, 1999]

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4-29)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(uQ)}{\partial x} = -gA \frac{\partial z_s}{\partial x} - gA I_E \quad (4-30)$$

Hierbei wird die Strömung nur in Hauptfließrichtung betrachtet, die Fließgeschwindigkeit und die Wasserspiegellage werden über den Fließquerschnitt bzw. Teile des Querschnittes gemittelt. Es können jedoch auch Veränderungen der Modellparameter quer zur Hauptströmungsrichtung über gegliederte Querschnitte berücksichtigt werden (siehe Kap.4.1.7). Zudem ist die Modellierung verzweigter und vermaschter Systeme über Netzwerkrechnungen möglich.

In der eindimensionalen Impulsgleichung ist aufgrund der Annahme vernachlässigbarer Geschwindigkeitskomponenten v und w ($v, w \ll u$) eine Modellierung der inneren Spannungen und Turbulenz nicht vorgesehen. Die Wirkung der inneren und äußeren Schubspannungskomponenten auf die eindimensional abstrahierte Strömung wird über die Sohlreibung mittels (halb-)empirischer Rauheitsbeiwerte pauschal berücksichtigt. Es existieren zudem Ansätze zur Berücksichtigung des lateralen Impulsaustausches über zusätzliche Trennflächenrauheiten (siehe Kap.4.1.7).

Eine ausführliche Herleitung der Saint-Venant-Gleichungen und deren Anwendungs- bzw. Lösungsmöglichkeit für nicht-prismatische Gerinne findet sich in [Dorer, 1972].

4.1.7 Parametrisierung der Energieverluste

In Kap.4.1.1 wurde qualitativ deutlich gemacht, dass die durch Geschwindigkeitsgradienten hervorgerufenen inneren Spannungen in einer Strömung mit einem Impulsverlust bzw. einer Dissipation der kinetischen Energie einhergehen. Da sich die in einer turbulenten Strömung auftretenden Spannungen in der Praxis nicht direkt simulieren lassen, ist man auf empirische Ansätze angewiesen, die den Einfluss dieser physikalischen Teilprozesse auf die Zielgrößen der Simulation parametrisieren. Dieser Umstand wurde bereits in den vorangegangenen Abschnitten bei der Herleitung der dynamischen Grundgleichungen über die Einführung der Wirbelviskosität sowie der Darstellung der Sohl Schubspannung aufgegriffen.

Die in einer Strömung auftretenden Spannungen werden im Wesentlichen durch den Impulsaustausch an der festen Berandung hervorgerufen. Zum einen sind hier die Geschwindigkeitsgradienten aufgrund der Wandhaftungsbedingung besonders hoch, zum anderen initiieren die aus der viskosen Unterschicht in die turbulente Strömung herausragenden Rauheitselemente eine lokale Ablösung der Strömung, Wirbelbildungen und damit zusätzliche Energieverluste. Nach *Naudascher (1987)*, *Dittrich (1998)* und *Webel (1982)* hängen die Strömungsverluste in Folge von Oberflächenrauheit (Sohlenreibung und Formwiderstand der Elemente) wesentlich von der Höhe, der Anordnung und Dichte der Rauheitselemente sowie deren Form ab.

Die durch die Grenzschicht bzw. Rauheitselemente der Berandungsfläche verursachten Spannungen werden zudem überlagert durch Wirbelbildung und damit Energieverluste infolge makroskaliger Strukturen wie Riffel und Dünen, Form des durchströmten Querschnittes, Krümmungen bzw. Linienführung, wechselnde Rauheiten, Vegetation etc.. Die differenzierte Behandlung der einzelnen Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen wird umso schwieriger, je komplexer das Strömungsfeld bzw. je höher die Strukturvielfalt des Strömungsgebietes ist.

Vor diesem Hintergrund ist leicht ersichtlich, dass die Quantifizierung der Energieverluste in naturnahen Fließgewässerstrecken, insbesondere von Hochwasserabflüssen, mit der hierfür typischen heterogenen Strukturvielfalt eine besondere Schwierigkeit darstellt. Der Sohlschubspannung kommt hierbei als wesentlicher dissipativer Term⁸ in den Impulsgleichungen eine besondere Bedeutung zu. Während der Einfluss der Grobstrukturen in den 2D-tiefenintegrierten Gleichungen zusätzlich über die inneren Spannungsterme modelliert wird, ist das Widerstandsverhalten des Fließgewässers in der eindimensionalen Darstellung allein über den Sohlreibungsterm bzw. die Definition zusätzlicher Scheinschubspannungen (Trennflächenrauheit τ_T) zu parametrisieren.

Zur Bewertung der Anwendungs- und Gültigkeitsbereiche existierender empirischer Ansätze zur Berechnung der Sohlschubspannung bzw. Energieverluste sind, neben den modelltheoretischen Grundlagen, die bei der experimentellen Datenerhebung zugrunde gelegten Randbedingungen zu berücksichtigen. Im Folgenden wird daher ein kurzer Überblick über die verfügbaren Ansätze zur Rauheitsparametrisierung turbulenter Strömungen gegeben. Hierbei wird Bezug zur Rohrhydraulik genommen, da die physikalischen Prozesse für Rohrströmungen zwar am umfassendsten erforscht sind, die Gesetzmäßigkeiten sich aber nur bedingt auf die Strömungsverhältnisse in Fließgewässern übertragen lassen.

4.1.7.1 Reibungsverluste

Die Wandschubspannung τ_0 einer stationären gleichförmigen Strömung in einer Rohrleitung ergibt sich aus einer Gleichgewichtsbetrachtung von Druck- und Schwe-

⁸ Durch die Tiefenintegration ist die Sohlschubspannung modelltechnisch nicht nur indirekt über die Beeinflussung der Turbulenz (3D) sondern direkt für die Dissipation kinetischer Energie verantwortlich.

rekräften sowie der Schubspannungskraft. Für eine Rohrleitung (Achsrichtung s) mit dem Umfang U und der Neigung dz/ds ergibt sich

$$\tau_0 \cdot U \cdot \Delta s = -\gamma \cdot A \cdot \Delta s \cdot \frac{dz}{ds} - \frac{dp}{ds} \cdot \Delta s \cdot A \quad \text{bzw.} \quad \tau_0 = \frac{A}{U} \left(-\gamma \frac{dz}{ds} - \frac{dp}{ds} \right) \quad (4-31)$$

Die Energieverluste in der Rohrleitung gehen mit einer Abnahme der piezometrischen Druckhöhe einher. Unter Einführung der Energieverlusthöhe $h_v = p/\gamma + z$, der Rohrlänge L und der Annahme eines kreisförmigen Querschnittes ergibt sich

$$\tau_0 = \gamma \cdot \frac{r}{2} \cdot \frac{h_v}{L} \quad \text{bzw.} \quad \tau_0 = \gamma \cdot \frac{r}{2} \cdot I_E \quad (4-32)$$

mit I_E [-] Energieliniengefälle der gleichförmigen Strömung
 r [m] Rohrradius

Analog ergibt sich in der Gerinnehydraulik die Sohlschubspannung für eine stationäre gleichförmige Gerinneströmung über die bereits in Abschnitt 4.1.6 dargestellte Gleichung

$$\tau_0 = \gamma \cdot \frac{A}{U} \cdot I_E \quad \text{bzw.} \quad \tau_0 = \gamma \cdot r_{hy} \cdot I_E \quad (4-33)$$

mit $r_{hy} = A/U$ [m] hydraulischer Radius

Die Gleichungen sind exakt gültig, wenn man berücksichtigt, dass τ_0 die über die Fläche gemittelte Schubspannung $(\tau_0)_m$ darstellt und sich die Schubspannungskraft F_B erst aus der Integration der Schubspannungsverteilung über die Fläche $A=U \cdot s$ ergibt:

$$F_B = \iint_{(A)} \tau_0(U, s) dA \quad (4-34)$$

Während in Kreisrohren mit homogener Oberflächenbeschaffenheit die Schubspannungen entlang der Wandungen gleichmäßig verteilt sind, führen Abweichungen der Querschnittsform und heterogene Oberflächenstrukturen zu ungleichmäßigen Geschwindigkeitsfeldern und Spannungsverteilungen. Zudem ist zu beachten, dass der Einfluss von Querschnittsform und Grobstrukturen auf die Energiedissipation (Formverluste; siehe oben) in den obigen Gleichungen auch über die Einführung des hydraulischen Radius r_{hy} nicht erfasst wird. In Abb. 4-4 sind Schubspannungsverteilungen für technische Querschnittsformen denen eines naturnahen Fließgewässers schematisch gegenübergestellt.

Die Verbindung der Wandreibung zur mittleren Fließgeschwindigkeit v ergibt sich in der allgemeinen Form über das quadratische Wandreibungsgesetz $\tau_0 = f(v^2)$ für turbulente Strömungen. So gehen die meisten gebräuchlichen Fließformeln auf das von *Chezy (1775)* für den gleichförmigen Abfluss formulierte Gesetz

$$v_m = C \sqrt{r_{hy} I} \quad (4-35)$$

mit C [m^{1/2}/s] Chezy-Beiwert
 I [-] Sohlneigung

zurück, wobei der Beiwert C alle Einflüsse auf den Fließwiderstand zu erfassen hat. Mit der Bestimmung dieses empirischen Faktors beschäftigten sich zahlreiche Autoren. Am bekanntesten sind die Formeln von *Darcy-Weisbach (1845)* und *Gauckler-Manning-Strickler (1923)*, deren Grundlagen und Anwendungsbezüge im Folgenden dargelegt werden.

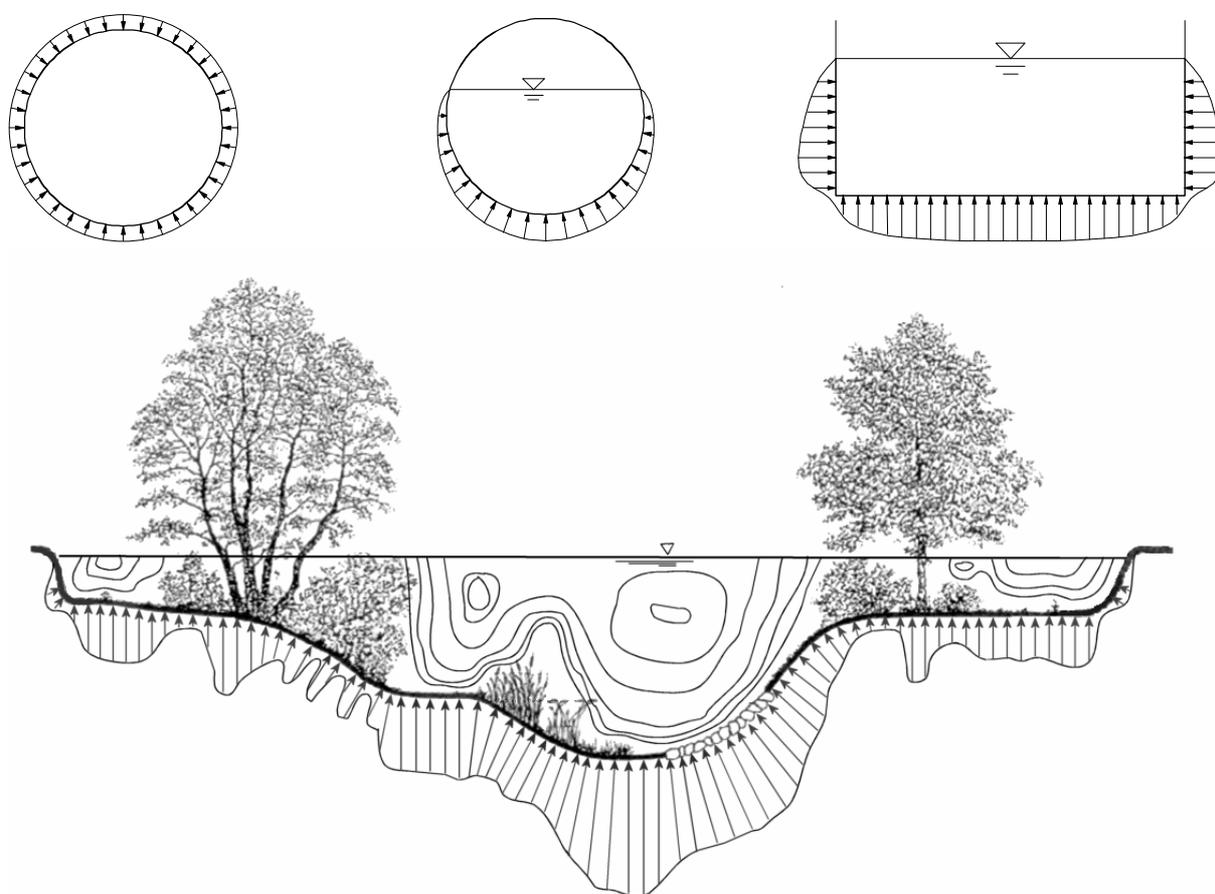


Abb. 4-4 Schematische Darstellung der Schubspannungsverteilungen in technischen Querschnittsformen (oben) sowie der Schubspannungs- und Geschwindigkeitsverteilungen eines naturnahen Fließgewässerquerschnittes (unten)

4.1.7.2 Logarithmisches Widerstandsgesetz

Es liegt auf der Hand, dass sich für einfache Querschnitte und klar definierbare (künstliche) Oberflächenstrukturen durch experimentelle Untersuchungen relativ allgemeingültige Aussagen über die auftretenden Energieverlusthöhen entwickeln lie-

ßen. Nach der Formel von *Darcy-Weisbach* ergeben sich die Energieverlusthöhen h_v in Rohrleitungen zu

$$h_v = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{bzw.} \quad I_E = \lambda \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4-36)$$

mit	λ	[-]	Widerstandsbeiwert
	L	[m]	Rohrlänge
	D	[m]	Rohrdurchmesser
	v	[m/s]	Geschwindigkeit

Die Bestimmung des dimensionslosen Widerstandsbeiwertes λ basiert auf turbulenztheoretischen Ansätzen unter der Voraussetzung einer bekannten Geschwindigkeitsverteilung im Fließquerschnitt. Er wurde durch zahlreiche Versuche über einen breiten Parameterbereich evaluiert, so z.B. über die ausführlichen Versuche von *Nikuradse (1926)*, der im Rahmen seiner Versuchsreihen Rohrwandungen mit Sandkörnern bestimmter Korngröße beklebte [Jirka, 1998; Dittrich, 1998]. Die Auswertung der verschiedenen experimentellen Untersuchungen wurden im Diagramm nach *Moody (1944)* zusammengefasst, welches in der Praxis der Rohrhydraulik breite Anwendung gefunden hat. Nach *Colebrook & White (1938)* ergibt sich der Reibungsbeiwert für turbulente Verhältnisse, bei welchen die Rauheitselemente aus der viskosen, d.h. laminaren Unterschicht herausragen, zu

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s}{3,71 \cdot D} \right) \quad (4-37)$$

$$\text{mit} \quad \lambda = f \left(\text{Re} = \frac{vD}{\nu}, \frac{k_s}{D} \right) \quad [-] \quad (4-38)$$

k_s [mm] „äquivalente Sandrauheit“ (Rauheitsmaß für die Rohrwandung)

Bei vollturbulenten Strömungsverhältnissen (gekennzeichnet durch große Reynoldszahlen $\text{Re} \gg 2000$) mit hydraulisch rauer Wandbeschaffenheit (d.h. gleichzeitig großer relativer Rauheit k_s/D) sind die Rauheitselemente der turbulenten Strömung voll ausgesetzt und die Dicke der viskosen Unterschicht ist verschwindend klein [Dittrich, 1998]. Hierdurch ist der Einfluss der Zähigkeit ν des Fluids auf die Energieverluste vernachlässigbar und der Reibungsbeiwert nur noch von der relativen Rauheit abhängig und damit über die geometrischen Eigenschaften des Rohres bestimmbar. Es gilt

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log \left(\frac{3,71 \cdot D}{k_s} \right) \quad (4-39)$$

Zur Bestimmung der Sandrauheit k_s ist jedoch nicht allein die Höhe der Rauheitselemente maßgebend, sondern auch deren Anordnung und Dichte. Nach *Dittrich (1998)*

sind die natürlichen Rauheitsdichten i.d.R. wesentlich kleiner als bei den Oberflächen, die den Experimenten zugrunde gelegt wurden. Die in der Literatur verfügbaren k_s -Werte für charakteristische Werkstoffe und Oberflächenstrukturen wurden experimentell über Messung von Energieverlusthöhen und Vergleich mit den u.a. von *Nikuradse* gemessenen Verlusten ermittelt und daher als „äquivalente Sandrauheiten“ bezeichnet.

Zur Übertragung der *Darcy-Weisbach*-Gleichung und der Bestimmungsgleichungen für den Widerstandsbeiwert λ auf andere Querschnittsformen von Rohren und Gerinnen wird statt des Durchmessers D der hydraulische Radius r_{hy} eingeführt. Die Substitution ergibt sich über die Beziehung:

$$D = 4 \frac{A_{Kreis}}{U_{Kreis}} = 4r_{hy} \quad (4-40)$$

Das universelle Fließgesetz nach *Darcy-Weisbach* lässt sich nun in folgender Form darstellen:

$$v_m = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \sqrt{r_{hy} I} \quad (4-41)$$

Wie bereits erwähnt, wird durch die Einführung von r_{hy} jedoch nicht der Einfluss der Querschnittsform auf die Geschwindigkeits- und Schubspannungsverteilungen und damit die Energieverlusthöhen berücksichtigt. Selbst für ein sehr breites technisches Rechteckgerinne, für welches sich analog zur Kreisrohrströmung ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil einstellt und exakt integrieren lässt, ergeben sich nach *Naudascher (1987)* geringfügig abweichende Widerstandswerte.

4.1.7.3 Einfluss der Querschnittsform

Bereits frühzeitig wurde versucht, den Einfluss der Querschnittsform für eindimensionale Betrachtungsweisen über rein geometrieabhängige Formbeiwerte zu approximieren [Naudascher, 1987; Dittrich, 1998]. Für turbulente Strömungen in hydraulisch rauen Gerinnen konzentrierten sich die Untersuchungen jedoch i.A. auf Rechteckgerinne. *Söhngen (1987)* führte die Messungen zahlreicher Autoren zusammen, woraus sich nach *Dittrich (1998)* für den Formbeiwert f als Funktion von Wassertiefe h und Sohlenbreite B folgende Ausgleichskurve ermitteln lässt:

$$f = 0,90 - 0,38e^{-5h/B} \quad (4-42)$$

Für praktische Anwendungen empfiehlt *Dittrich (1998)* unter Einbeziehung der Ergebnisse neuerer Untersuchungen an großen deutschen Flüssen [Söhngen & Koll, 1997] die Verwendung konstanter Formverlust-Werte von $f = 0,74$ (breite Rechteck- und Trapezgerinne ($B/h \geq 25$)) bzw. $f = 0,83$ (kompakte Rechteck- und Trapezgerinne ($B/h < 25$)).

Der Beiwert f lässt sich in obigen Gleichungen über die Einführung des wirksamen hydraulischen Durchmessers D_{eff} berücksichtigen, für welchen gilt:

$$D_{eff} = f \cdot D = f \cdot (4r_{hy}) \quad (4-43)$$

4.1.7.4 Empirische Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler

Nach der Fließformel von *Gauckler-Manning-Strickler (1923)* gilt für den stationären gleichförmigen Abfluss in einem Gerinne die Beziehung

$$v_m = k_{st} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad \text{bzw.} \quad v_m = k_{st} \cdot r_{hy}^{1/6} \cdot \sqrt{r_{hy} I} \quad (4-44)$$

mit	v_m	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit
	k_{st}	[m ^{1/3} /s]	Strickler-Beiwert
	$r_{hy}=A/U$	[m]	Hydraulischer Radius
	I	[-]	Sohlneigung

Die GMS-Formel ist auf experimentellem Weg entstanden. Der gravierendste Nachteil der Formel ist die mangelnde Dimensionsreinheit des Strickler-Beiwertes. Streng genommen können Zahlenwerte von k_{st} , da vom hydraulischen Radius r_{hy} abhängig, nur für eine Gerinnegröße bzw. -form und einen Abfluss verwendet werden. Ein Vergleich mit der *Darcy-Weisbach*-Gleichung verdeutlicht diesen Zusammenhang:

$$k_{st} r_{hy}^{1/6} = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \quad (4-45)$$

Hinzu kommt, dass die GMS-Formel den Einfluss der Zähigkeit nicht berücksichtigt. Für voll ausgebildete Rauheitsströmung, d.h. bei großen Reynoldszahlen, stellt sie jedoch eine gute Approximation des universellen Widerstandsgesetzes dar [Dittrich, 1998]. Als akzeptablen Bereich für die Verwendung von k_{st} als Abflussbeiwert gibt *Naudascher (1987)* folgende Grenzen an:

$$Re > 4 \cdot 10^4 \quad \text{und} \quad 20 < 4r_{hy}/k < 400 \quad \text{bzw.} \quad Re > 2 \cdot 10^5 \quad \text{und} \quad 20 < 4r_{hy}/k < 1000 \quad (4-46)$$

Diese Voraussetzung ist für die meisten Abflusszustände in natürlichen Fließgewässern erfüllt. *Bloß (2003)* gibt zudem zu bedenken, dass im Gegensatz zum logarithmischen Widerstandsgesetz die Beiwerte nach *Strickler* empirisch aus der integralen Betrachtung eines Gerinnes mit natürlichem Querschnitt gewonnen wurden und somit die Verwendung der GMS-Formel für einen unregelmäßigen Flussquerschnitt durchaus adäquat sein kann.

Die Vorzüge der GMS-Formel liegen vor allem in ihrer einfachen Handhabung. Außerdem kann bei der notwendigen Schätzung der k_{st} -Beiwerte auf zahlreiche Erfahrungen zurückgegriffen werden. So existieren heutzutage zahlreiche Literaturquellen, in denen auf Basis von Naturmessungen k_{st} -Werte ermittelt und die entsprechenden

Flussabschnitte bzw. Überflutungsräume verbal beschrieben und/oder durch Fotografien belegt sind.⁹

Durch Übertragung der (eindimensional ermittelten) GMS-Formel auf die mehrdimensionalen hydrodynamischen Bewegungsgleichungen ergibt sich in Verbindung mit der Schleppkraftformel die Sohlschubspannung $\tau_{B,i}$ zu:

$$\tau_{B,i} = \rho g \frac{u_i^2}{k_{st}^2 r_{hy}^{1/3}} \quad (4-47)$$

mit u_i [m/s] Geschwindigkeit in Koordinatenrichtung i

Durch Approximation des hydraulischen Radius r_{hy} über die Wassertiefe h erhält man:

$$\tau_{B,i} = \rho g \frac{u_i^2}{k_{st}^2 h^{1/3}} \quad (4-48)$$

Die Sohlschubspannung wird demnach mit größerer Fließtiefe kleiner, vorausgesetzt die Fließgeschwindigkeit und die Rauheit bleiben konstant.

4.1.7.5 Verluste durch unterschiedliche Oberflächenrauheiten

In der Natur variiert die Oberflächenbeschaffenheit der Gewässersohle bzw. Uferböschung i.d.R. sowohl in longitudinaler als auch in lateraler Richtung. Bei mehrdimensionalen Modellen wird eine Variation der Rauheit bzw. Schubspannungsverteilung in beiden Richtungen über die unterschiedliche Parameterbelegung der einzelnen Gitterelemente erfasst. Bei eindimensionalen Verfahren wird der Fließquerschnitt eines Berechnungspunktes in einzelne Teilflächen gegliedert und der Gesamtwiderstand über gewichtete Summation der Teilwiderstände ermittelt. Der Widerstandsbeiwert λ ergibt sich hiermit zu:

$$\lambda = \frac{\sum \lambda_i U_i}{U} \quad (4-49)$$

mit U_i [m] benetzter Umfang der Teilfläche i
 λ_i [-] Widerstandsbeiwert der Teilfläche i

Da zur Bestimmung der Teilwiderstände λ_i als Funktion von $k_s/4r_{hy}$ die jeweiligen Teilflächen A_i bekannt sein müssen, kann dies in der Anwendung zu einem langwierigen Iterationsprozess mit erheblichem Rechenaufwand führen [Dittrich, 1998].

⁹ Eine umfassende Zusammenstellung findet sich bspw. im Internet unter <http://www.psw-knauf.de>.

Bei Anwendung der GMS-Formel lässt sich nach *Einstein (1934)* in *Naudascher (1987)* ein äquivalenter Widerstandsbeiwert k_{st} ohne Kenntnis der Teilflächen A_i über die gewichtete Mittelung

$$k_{st} = \left[\frac{U}{\sum (U_i / k_{st,i}^{2/3})} \right]^{2/3} \quad (4-50)$$

berechnen.

Zu beachten ist, dass beide Vorgehensweisen nur Gültigkeit besitzen, wenn die mittleren Fließgeschwindigkeiten v_m und das Energieliniengefälle I_E in den Teilquerschnitten und dem Gesamtquerschnitt als gleich groß angenommen werden („kompaktes Gerinne“). Diese Vereinfachung ist in vielen Fällen (z.B. bei Gewässern mit Uferbewuchs und Hochwasserabflüssen mit überströmten Vorländern) nicht mehr oder nur bedingt haltbar. [Naudascher, 1987; Dittrich, 1998]

4.1.7.6 Gegliederte Querschnitte und Abgrenzung abflussunwirksamer Bereiche

Bei unregelmäßigen Gewässerprofilen und bei Hochwasserabflüssen mit überströmten Vorländern können aufgrund der unterschiedlichen Fließtiefen und Rauheiten erhebliche Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den einzelnen Teilquerschnitten des Fließgewässers entstehen. Dies führt zu einer ausgeprägten Wirbelbildung und einem verstärkten Impulsaustausch zwischen den Teilströmen, der wiederum mit einer Erhöhung der Energiedissipation einhergeht.

Zur Behandlung gegliederter Querschnitte mit unterschiedlichen mittleren Fließgeschwindigkeiten auf Basis eindimensionaler Verfahren existieren eine Vielzahl an Berechnungsansätzen. Der Gesamtquerschnitt wird hierbei in hydraulisch homogene Teilquerschnitte unterteilt, auf welche die oben beschriebenen Fließformeln (*GMS*, *Colebrook & White*) angewendet werden. Der Gesamtabfluss ergibt sich über Summation der Einzelabflüsse. Abflussunwirksame Bereiche, wie z.B. Rückströmzonen und Retentionsflächen, werden in der Querprofilgeometrie ausgegrenzt.

Die Verfahren unterscheiden sich im Wesentlichen durch die jeweils verwendeten Ansätze zur Approximation der dissipativen Interaktion zwischen den Teilströmen. Zumeist wird zwischen den Teilquerschnitten eine fiktive Trennfläche angesetzt, für welche eine Scheinschubspannung τ_T angenommen wird. Die Trennflächenrauheit k_T ergibt sich wiederum als rein empirischer Beiwert (analog dem Strickler-Beiwert k_{St}) oder wird bei Anwendung des logarithmischen Fließgesetzes als „äquivalente Rauheitshöhe“ (analog k_s) zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes λ eingesetzt. Je nach Verfahren wird sie in unterschiedlicher Weise dem benetzten Umfang des Hauptgerinnes und/oder den Vorlandquerschnitten zugerechnet (*Posey 1957*, *Sellin 1964*, *Wright & Carstens 1970*). Einige Verfahren führen zusätzliche geometrische Parameter ein, welche die Abflusswirksamkeit der Vorländer berücksichtigen sollen (*Nicollet & Uan 1979*, *Könemann 1980*). *Wormleaton & Merret (1990)* bewerten die Interaktion zwischen den Gerinneteilen über die Differenz der mittleren Geschwindig-

keiten, welche auf Basis der GMS-Formel bestimmt werden, sowie Breite und Höhe der Teilgerinne. Ackers (1993) führt hierzu eine Klassifizierung in vier geometrie- und wasserstandsabhängige Regionen mit unterschiedlichen Interaktionseigenschaften ein, für die spezifische Berechnungsansätze vorgeschlagen werden. [Dittrich, 1998]

Zu beachten ist, dass die genannten Verfahren zur Approximation der Interaktionseffekte zwischen den Teilquerschnitten eines Fließgewässers auf experimentellen Untersuchungen an klar strukturierten Modellgerinnen basieren. Bei naturnahen Fließgewässern differieren die geometrischen Randbedingungen entlang der Gewässerstrecke z.T. stark. Hinzu kommen die Einflüsse von Uferbewuchs und Vorlandvegetation, welche im Rahmen der genannten Untersuchungen nicht berücksichtigt wurden. Da die Abhängigkeit der empirischen Größen von den geometrischen Randbedingungen und den Rauheitsverhältnissen noch nicht ausreichend erforscht ist [Naudascher, 1987], ist unklar, inwieweit die unter Laborbedingungen gemachten Erfahrungen auf komplexe Naturverhältnisse übertragbar sind.

Bei instationären 1D-HN-Berechnungen sind die abflussunwirksamen Bereiche zur Erfassung ihrer Retentionswirkung über eine wasserstandsabhängige Volumenfunktion im Simulationsverfahren zu berücksichtigen. Die Definition der Grenzlinie zwischen abflusswirksamen und –unwirksamen Teilquerschnitten ist der Erfahrung bzw. Intuition des Modellierers überlassen.

4.1.7.7 Einfluss der Vegetation

Bei Hochwasserabfluss kann die am Ufer und auf den Vorländern vorhandene Vegetation (Gehölz, Büsche etc.) wesentlich zur Erhöhung der Energieverlustrate beitragen und die Abflussleistung des Gewässers herabsetzen. Dies ist zum einen auf die zur Sohlrauheit hinzukommende Rauheit des Bewuchses zurückzuführen. Zum anderen entsteht aufgrund der großen Fließgeschwindigkeitsdifferenzen zwischen dem Bewuchsquerschnitt und den bewuchsfreien Zonen analog den Ausführungen im vorangegangenen Abschnitt ein intensiver makroturbulenter Massen- und Impulsaustausch [Naudascher, 1987; Mertens, 1989/1994].

Der Widerstand in den Teilquerschnitten mit durchströmtem Bewuchs setzt sich aus dem Reibungswiderstand λ_S der Sohle und dem Formwiderstand λ_{Pf} der Vegetation zusammen. Für den Strömungswiderstand F_{Pf} eines Vegetationselements mit der angeströmten Fläche A_{Pf} gilt allgemein

$$F_{Pf} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{Pf} \cdot u_i^2 \cdot c_{w,Pf} \quad (4-51)$$

mit: $c_{w,Pf}$ [-] Formwiderstand der Pflanze bzw. Bewuchsgruppe
 u_i [m/s] Geschwindigkeit in Koordinatenrichtung i

Bei einer Anzahl von $(a_x \cdot a_y)^{-1}$ Vegetationselementen pro Flächeneinheit ergibt sich die resultierende Schubspannung zu:

$$\tau_{Pf,i} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{A_{Pf}}{a_x a_y} \cdot u_i^2 \cdot c_{W,Pf} \quad \text{bzw.} \quad \tau_{Pf,i} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{d_{Pf} h_{(Pf)}}{a_x a_y} \cdot u_i^2 \cdot c_{W,Pf} \quad (4-52)$$

mit a_x, a_y [m] Abstand der Bewuchselemente

Bei Anwendung des universellen Fließgesetzes gilt für den Darcy-Weißbach-Koeffizient somit:

$$\lambda_{Pf} = 4 \frac{A_{Pf}}{a_x a_y} c_{W,Pf} \quad (4-53)$$

Der Formwiderstand $c_{W,Pf}$ ist stark von der relativen Dichte und Anordnung der einzelnen Elemente abhängig [Naudascher, 1987]. Die über Laborversuche (z.B. *Lindner 1982*) ermittelten Angaben variieren nach *Dittrich (1998)* zwischen $0,6 < c_{W,Pf} < 2,4$. In *DVWK (1991)* wird die Verwendung eines Wertes von $c_{W,Pf} = 1,5$ empfohlen.

Ein Vorteil der Integration dieses zusätzlichen Spannungsterms in den hydrodynamischen Bewegungsgleichungen liegt darin, dass die errechnete Schubspannung im Gegensatz zum Sohlreibungsansatz mit der Fließtiefe zunimmt. Durch die Kombination beider Ansätze lässt sich das Strömungsmodell flexibler an die hydraulischen Gegebenheiten eines Untersuchungsgebietes anpassen. Angesichts der Unsicherheiten in der Wahl der geometrischen Größen und der Formwiderstände für natürliche Bewuchscharakteristiken lässt sich dies jedoch in vielen Fällen mit ähnlicher Aussagekraft über die wasserstandsabhängige Definition pauschaler Rauheitswerte k_{st} realisieren.

Zur Berücksichtigung des Einflusses des bewuchsabhängigen lateralen Impulsaustausches zwischen den Teilquerschnitten lassen sich wiederum Trennflächen definieren, die mit einem eigenen Rauheitsmaß k_T beaufschlagt werden (vgl. Kap.4.1.7.6). Die in der Literatur angegebenen empirischen $k_{St,T}$ -Beiwerte unterliegen jedoch einer enormen Streuung, sodass ohne zusätzliche Kalibrierungswerte ihr Einsatz mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Bei Anwendung des logarithmischen Fließgesetzes wird k_T über geometrische Größen zur Bewuchscharakteristik ermittelt. Hierbei haben sich die Verfahren nach *Pasche (1984)* und *Mertens (1989,1994)* durchgesetzt. Einzelheiten hierzu finden sich u.a. in *DVWK (1991)*.

In der praktischen Anwendung ist zu beachten, dass die Verfahren mit einem erheblichen Mehraufwand zur Erfassung der geometrischen Bewuchsgrößen verbunden sind. In Naturversuchen [Winzen, 1996] und großmaßstäblichen Modellversuchen [u.a. Schuhmacher, 1995] wurden zudem deutliche Abweichungen zwischen gemessenen und nach dem Verfahren von *Mertens* berechneten Werten festgestellt. Dies wird darauf zurückgeführt, dass das Berechnungsverfahren rein empirische Zusammenhänge beinhaltet, welche unter spezifischen Laborbedingungen ermittelt wurden und hierdurch nur bedingt auf andere Gerinnekonfigurationen übertragen werden können [Dittrich, 1998; Schumacher, 1995]. Das Verfahren nach *Pasche* hingegen erfasst die tatsächlichen physikalischen Vorgänge besser und ist zur Berechnung

des durchflussbestimmenden Interaktionswiderstandes auf Naturverhältnisse übertragbar [Schumacher, 1995]. Hierzu wird jedoch die Kenntnis der Nachlaufängen- und -breiten a_{NL} , a_{NB} bei der Pflanzenumströmung vorausgesetzt, welche nur mit großem Aufwand zu ermitteln sind und das Verfahren aus anwendungsbezogener Sicht wiederum weniger praktikabel macht [Dittrich, 1998].

Gerade bei großräumigen Untersuchungsgebieten ist zu prüfen, ob eine differenzierte Erfassung der in der Natur vorzufindenden komplexen Bewuchsgeometrien überhaupt machbar ist. Neben den ökonomischen Gesichtspunkten ist zudem kritisch zu hinterfragen, ob die gesonderte Simulation des Vegetationseinflusses gegenüber dessen Berücksichtigung über einen pauschalen Widerstandsbeiwert k_{St} einen Zugewinn an Genauigkeit der Modellergebnisse, also eine Verbesserung der Modellgüte verspricht. Dies ist u.a. auch von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Kalibrierungsdaten abhängig.

4.1.7.8 Einfluss von Kontrollbauwerken

Im Bereich von Bauwerken, wie Brücken, Wehre, Schütze, Durchlässe, ist die Strömung hochgradig dreidimensional. Zur Berücksichtigung der Auswirkungen dieser Abflusssituationen auf tiefenintegrierte oder querschnittsgemittelte Strömungsbeobachtungen existieren zahlreiche algebraische Beziehungen. Diese parametrisieren die auftretenden Energieverluste über bauwerksspezifische Kenngrößen (z.B. lokale Verlustbeiwerte, Überfallbeiwerte) sowie hydraulische Zustandsgrößen (Q , v , y) im Ober- und Unterwasser des Kontrollquerschnittes und ermöglichen so die pauschale Erfassung lokal dreidimensionaler Prozesse [Bloß, 2003]. Bzgl. ihrer Darstellung wird auf die Standardwerke zur Hydraulik und die Handbücher der Simulationsprogramme verwiesen.

4.1.8 Numerische Lösungsverfahren

Die Strömungsverhältnisse einer Fließgewässerstrecke lassen sich über die in den vorangegangenen Abschnitten dargelegten physikalischen Grundgleichungen beschreiben. Eine analytische Lösung dieser nicht-linearen partiellen Differentialgleichungssysteme ist jedoch nur für wenige idealisierte Fälle möglich. Für praktische Anwendungen werden daher numerische Verfahren eingesetzt, deren Ziel es ist, eine Approximation der Lösung für die abhängigen Variablen an bestimmten Punkten in einer definierten Raum-Zeit-Ebene zu finden.

Dabei werden die in den kontinuierlichen Grundgleichungen auftretenden Differentialquotienten (Ableitungen in die einzelnen Raumrichtungen bzw. entlang der Zeitachse) diskretisiert. Hierzu wird das Untersuchungsgebiet in eine endliche Anzahl von Punkten (auch Knoten genannt), Flächen- oder Volumenelementen zerlegt (vgl. Abb. 4-5) und der Untersuchungszeitraum in eine endliche Anzahl von Zeitschritten aufgeteilt. Die Differentialgleichungen werden, bezogen auf die diskreten Berechnungsstützpunkte, zu algebraischen Gleichungen reduziert, welche sich (u.U. lineari-

siert) mittels effizienter Gleichungslöser lösen lassen. Bei der Diskretisierung der Ableitungen sind sowohl zeitliche als auch räumliche Wichtungen möglich, je nachdem welche benachbarten Knoten zu welchem Anteil berücksichtigt werden sollen. Als Ergebnis der numerischen Modellierung ergeben sich schließlich die orts- und zeitabhängigen hydraulischen Kenngrößen an den Berechnungstützpunkten im gesamten Untersuchungsgebiet. Abb. 4-6 umfasst ein generelles Ablaufschema der hydrodynamisch-numerischen Simulation.

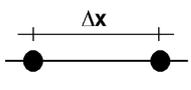
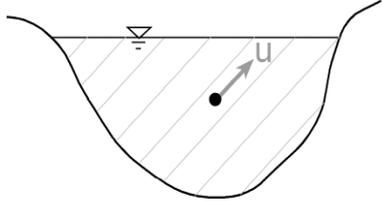
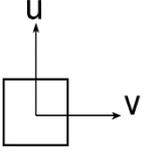
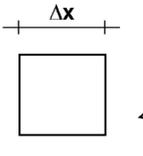
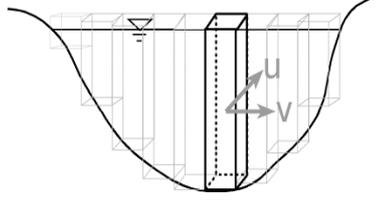
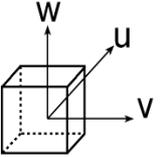
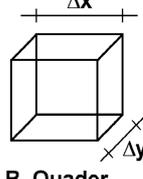
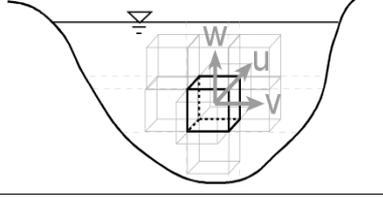
Dimension	Verteilungsart	Prinzip	Einzelelement	Lage im Raum
1D	punktuell Berechnungspunkte	Hauptströmung 	Punkte 	
2D	flächig Berechnungssäulen	ebene Strömung 	 z.B. Rechteck Dreieck	
3D	räumlich Berechnungszellen	3D-Strömung 	 z.B. Quader	

Abb. 4-5 Schematische Darstellung der Diskretisierungsmethoden nach Dimensionen

Zur Diskretisierung und Lösung der Strömungsgleichungen existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze, die sich in drei Hauptgruppen aufteilen lassen:

- Finite-Differenzen (FD)
- Finite-Elemente (FE)
- Finite-Volumen (FV)

Die früher zur Strömungssimulation häufiger eingesetzten Charakteristikenverfahren sind aufgrund ihrer komplizierten Anwendung und ihres hohen Berechnungsaufwandes in den Hintergrund getreten. Nach *Cunge (1980)* lag ihre Stärke in der Behandlung von Unstetigkeiten bzw. Störungen (z.B. Fließwechsel) im Untersuchungsgebiet und zur Bestimmung komplizierter Randwerte. Mittlerweile wurden die wesentlichen Elemente der Charakteristiken-Verfahren auf verschiedene Arten auch in moderne FD/FV- sowie FE-Verfahren integriert [Bechteler & Nujic, 2001].

Neben der Auswahl eines geeigneten numerischen Verfahrens kommt im Rahmen der Modellerstellung vor allem der hydraulisch sinnvollen Festlegung der Berech-

nungsstützpunkte bzw. Gitterauflösung sowie Auswahl der Zeitschritte eine für die Güte der Berechnungsergebnisse und Wirtschaftlichkeit der Untersuchung entscheidende Bedeutung zu.

Eine umfassende Darstellung und eingehende Erläuterung der Vielfalt unterschiedlicher Diskretisierungsverfahren ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. In den folgenden Abschnitten soll jedoch ein Einblick in die Grundprinzipien der gängigen Methoden zur Lösung der physikalischen Grundgleichungen als Grundlage für die Beschreibung der im Rahmen dieser Dissertation eingesetzten HN-Verfahren in Kap.7 und Kap.8 gegeben werden. Die Ausführungen stützen sich im Wesentlichen auf die übersichtlichen und umfangreichen Herleitungen numerischer Methoden der Strömungsmechanik in [Malcherek, 2002b].

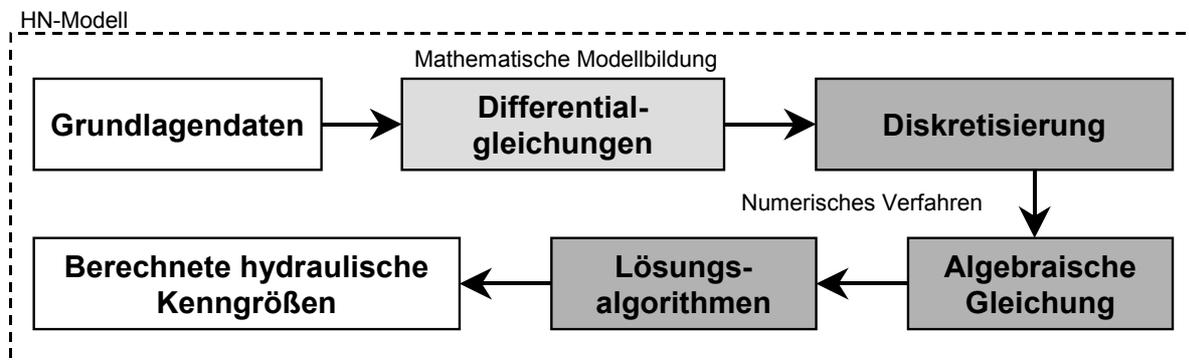


Abb. 4-6 Generelles Ablaufschema der hydrodynamisch-numerischen Simulation

4.1.8.1 Zeitschrittverfahren

Die Zeitdiskretisierung sei am Beispiel einer beliebigen zeitabhängigen Differentialgleichung der Form

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f(u) \quad (4-54)$$

erläutert. Zur Lösung des instationären Problems wird die Zeit in einzelne Zeitpunkte

$$t^n = t^0 + n\Delta t \quad (4-55)$$

zerlegt, wobei alle gesuchten Werte zur Zeit t^0 (Anfangsbedingung) und der Zeitschritt n bekannt sind. Beim sogenannten Einschrittverfahren wird die Zeitableitung durch

$$\frac{\partial u}{\partial t} \cong \frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} \quad (4-56)$$

approximiert. Die rechte Seite kann als gewichtete Linearkombination der bekannten Lösung zum Zeitschritt t^n und der gesuchten Lösung t^{n+1} angesetzt werden. Hierzu wird der Wichtungsfaktor θ (Crank-Nicolson-Faktor) eingeführt, für welchen gilt $0 \leq \theta \leq 1$:

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} = \theta f(u^{n+1}) + (1 - \theta) f(u^n) \quad (4-57)$$

Für $\theta = 0$ ergibt sich die explizite Darstellung (Eulerverfahren):

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} = f(u^n) \quad (4-58)$$

Explizite Verfahren benötigen zur Berechnung der gesuchten Parameter zum Zeitpunkt t^{n+1} ausschließlich bekannte Größen zum Zeitpunkt t^n . Die Unbekannten können somit für jeden Knoten separat berechnet werden. Der Rechenaufwand pro Zeitschritt ist daher entsprechend gering, allerdings entstehen Stabilitätsprobleme bei Wahl zu hoher Zeitschritte.

Für $\theta = 1$ ergibt sich das implizite Verfahren:

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} = f(u^{n+1}) \quad (4-59)$$

Da die rechte Seite weiterhin Differentialausdrücke der unbekanntenen Funktion $f(u^{n+1})$ enthält, sind implizite Verfahren weitaus rechenintensiver als explizite Verfahren. Implizite Verfahren verhalten sich jedoch auch bei größeren Zeitschritten stabiler, wodurch der Nachteil des erhöhten Berechnungsaufwandes wieder kompensiert wird.

Mehrschrittverfahren verwenden zur Berechnung der Strömung zum Zeitpunkt t^{n+1} nicht nur den direkt vergangenen Zeitschritt t^n . Nach *Malcherek (2002b)* können hierdurch im Vergleich zu den Einzschrittverfahren höhere zeitliche Genauigkeiten erzielt werden. Zur Klasse der Mehrschrittverfahren gehört bspw. das Leap-Frog-Verfahren, welches auch Funktionswerte des Zeitpunktes t^{n-1} einbezieht:

$$\frac{u^{n+1} - u^{n-1}}{2\Delta t} = f(u^n) \quad (4-60)$$

4.1.8.2 Finite-Differenzen-Verfahren

Bei Finite-Differenzen- (FD-) Verfahren werden die in den Strömungsgleichungen auftretenden partiellen Ortsableitungen durch finite Differenzenquotienten ersetzt. Diese können durch Umformung bzw. Kombination von Taylor-Reihenentwicklungen unter Vernachlässigung von Gliedern höherer Ordnung hergeleitet werden [Noll, 1993]. In Anlehnung an die Stützpunktverteilung einer 2D-Finite-Differenzen-

Geometrie in Abb. 4-7 lassen sich die ersten Ableitungen als Vorwärts-, Rückwärts- oder zentrale Differenzen

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \cong \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x}, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \cong \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \cong \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (4-61)$$

darstellen. Zweite Ableitungen werden durch zentrale Differenzen der Form

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} \cong \frac{u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}}{\Delta x^2} \quad (4-62)$$

approximiert. Durch Taylorentwicklung kann der durch die Approximation entstehende Fehler abgeschätzt werden. Eine Verringerung des Diskretisierungsfehlers wird durch Berücksichtigung von Termen höherer Ordnung in der Reihenentwicklung erreicht [Beffa, 1994].

FD-Verfahren eignen sich besonders gut für äquidistante kartesische Berechnungsgitter, lassen sich aber prinzipiell auch auf nicht äquidistante bzw. krummlinige Gitterstrukturen verallgemeinern. Hierdurch ist es möglich, das Untersuchungsgebiet mit unterschiedlichen, an die geometrischen bzw. hydraulischen Gegebenheiten angepassten Auflösungen zu erfassen.

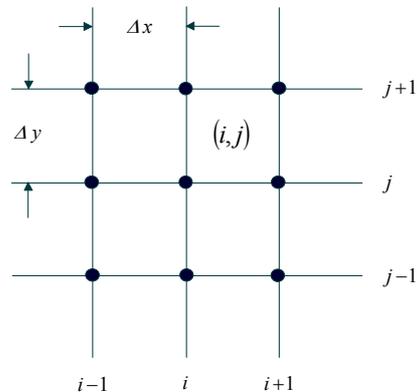


Abb. 4-7 2D-Finite-Differenzen-Geometrie [Malcherek, 2002b]

Zur Diskretisierung der Strömungsgleichungen werden die unterschiedlichen Verfahren zur Behandlung der Zeitableitung mit den dargestellten Approximationen der Ortsableitungen kombiniert. Neben der gewichteten Kombination der Ortsdiskretisierung verschiedener Zeitebenen n (Wichtungsfaktor θ) kann im Rahmen der Zeitdiskretisierung zusätzlich eine gewichtete Kombination der Zeitableitungen benachbarter Stützpunkte i,j über einen zweiten Wichtungsfaktor ψ eingeführt werden.

Die Variation verschiedener Approximationsmöglichkeiten und Wichtungsfaktoren führt auf eine Vielzahl von unterschiedlichen Finite-Differenzen-Verfahren. Exemplarisch sei hier das implizite Differenzenverfahren nach A. Preissmann, welches in den 60-er Jahren entwickelt wurde, für den eindimensionalen Fall dargestellt.

Als Wichtungsfaktor für die Ableitung nach der Zeitkoordinate wird beim Preissmann-Verfahren der konstante Wert $\psi = 0,5$ vorgegeben und man erhält für die Zeitableitung:

$$\frac{\partial u}{\partial t} \cong \psi \frac{u_{i+1}^{n+1} - u_{i+1}^n}{\Delta t} + (1 - \psi) \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = \frac{u_{i+1}^{n+1} - u_{i+1}^n}{2\Delta t} + \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{2\Delta t} \quad (4-63)$$

Die Ableitung nach der Ortskoordinate x wird über

$$\frac{\partial u}{\partial x} \cong \theta \frac{u_{i+1}^{n+1} - u_i^{n+1}}{\Delta x} + (1 - \theta) \frac{u_{i+1}^n - u_i^n}{\Delta x} \quad (4-64)$$

approximiert. Für $0,5 \leq \theta \leq 1$ ist das Verfahren stabil.

Das Preissmann-Schema wurde bspw. zur Diskretisierung der Saint-Venant-Gleichungen in das HN-Verfahren *CARIMA* implementiert, welches im Rahmen dieser Arbeit zur eindimensionalen Strömungsmodellierung eingesetzt wurde (siehe Kap.7).

4.1.8.3 Finite-Elemente-Verfahren

Im Gegensatz zu den FD-Verfahren, bei denen die Differentialoperatoren durch (finite) Differenzenoperatoren angenähert werden, wird bei Anwendung der Finite-Elemente- (FE-) Methode die Lösung der Differentialgleichung zunächst unter Beibehaltung der ursprünglichen Differentialoperatoren angenähert [Celan, 2002]. Die gesuchte Lösungsfunktion wird zwischen den Knoten bzw. innerhalb eines Finite Elements (i.d.R. ein Dreieck) über endliche Polynome (Linearkombination unabhängiger Ansatzfunktionen) approximiert.

Die unbekannt Koeffizienten müssen nun so bestimmt werden, dass eine möglichst gute Näherungslösung resultiert. Die Methode der gewichteten Residuen verlangt z.B., dass die Elementintegrale der gewichteten Abweichungen zwischen exakter und Näherungslösung minimal werden. Durch die Auswertung der Integrale entsteht ein algebraisches Gleichungssystem für die gesuchten Koeffizienten. Die verschiedenen FE-Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Ansatz- und Wichtungsfunktionen. [Beffa, 1994]

Die Überführung der Differentialgleichungen in ein algebraisches Gleichungssystem erfordert bei der FE-Methode einen erheblich höheren Rechenaufwand als bei der FD- und FV-Methode. Gegenüber FD-Verfahren haben FE-Verfahren jedoch den Vorteil, dass sie prinzipiell auf beliebig strukturierte Gitter angesetzt werden können, wodurch eine problemspezifische Anpassung der Ortsdiskretisierung an die geometrischen Randbedingungen möglich wird.

4.1.8.4 Finite-Volumen-Verfahren

Finite-Volumen- (FV-) Verfahren basieren auf der Zerlegung des Strömungsgebietes in einzelne Kontrollvolumina Ω_i und Bilanzierung von Flüssen auf diesen Volumina. Die physikalischen Grundgleichungen der Massen- und Impulserhaltung werden hierzu bezogen auf die Kontrollvolumen integriert. Somit bleiben nur noch die Oberflächenintegrale, bestehend aus den konvektiven und diffusiven Flüssen durch die Hüllflächen des Kontrollvolumens, zu ermitteln. Zur Approximation der Integralterme existieren verschiedene Ansätze.

Zur Erläuterung der prinzipiellen Vorgehensweise sei die Divergenzform der hydrodynamischen Grundgleichungen dargestellt:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{\Phi}_f = q_f \quad (4-65)$$

Durch Integration der Divergenzform über das Kontrollvolumen (der Divergenzterm wird unter Verwendung des Gauß'schen Integralsatzes integriert) ergibt sich die Gleichung:

$$\int_{\Omega_i} \frac{\partial f}{\partial t} d\Omega + \oint_{\partial\Omega_i} \vec{\Phi}_f d\vec{S} = \int_{\Omega_i} q_f d\Omega \quad (4-66)$$

Diese besagt, dass die zeitliche Änderung einer Zustandsgröße f im Volumen Ω der vektoriellen Summe der Flüsse $\vec{\Phi}_f$ über die Hüllfläche \vec{S} sowie der Quellen und Senken q_f im Kontrollvolumen entspricht.

Die Diskretisierung des Strömungsgebietes erfolgt bei der Anwendung von FV-Verfahren in vielen Fällen über äquidistant strukturierte Rechteckgitter (Abb. 4-8 links). Prinzipiell ist es aber auch möglich, FV-Verfahren auf andere orthogonal strukturierte Berechnungsgitter anzuwenden. Hierbei ist die Anzahl der Polygonecken einzelner Kontrollvolumina beliebig, wodurch ideale Anpassungsmöglichkeiten an das Untersuchungsgebiet gegeben sind. Voraussetzung ist jedoch, dass die Verbindungslinien zweier Polygonzentren die Berührungskante der Polygone rechtwinklig und mittig schneiden. Dieses Gitterkriterium ist dann erfüllt, wenn alle Ecken eines jeden Polygons jeweils auf einem Kreis liegen (siehe Abb. 4-8 rechts).

Die Kontrollvolumina Ω_i werden i.A. durch einen Knoten i in ihrem Inneren repräsentiert (Zellenmittelpunkt-Verfahren¹⁰). Die diskreten Werte der unbekanntenen Variablen liegen somit im Zentrum der Gitterzelle. Die diskreten Flüsse über die Zellenränder müssen also interpoliert werden. Die orthogonal strukturierten Berechnungsgitter ermöglichen eine direkte Interpolation der Kantenwerte durch eine den Abständen entsprechende Wichtung.

¹⁰ In *Beffa (1994)* wird dargelegt, warum sich die Zelleneckpunkt-FV-Methode bei kritischen Strömungszuständen weniger stabil verhält als die der Zellenmittelpunkte

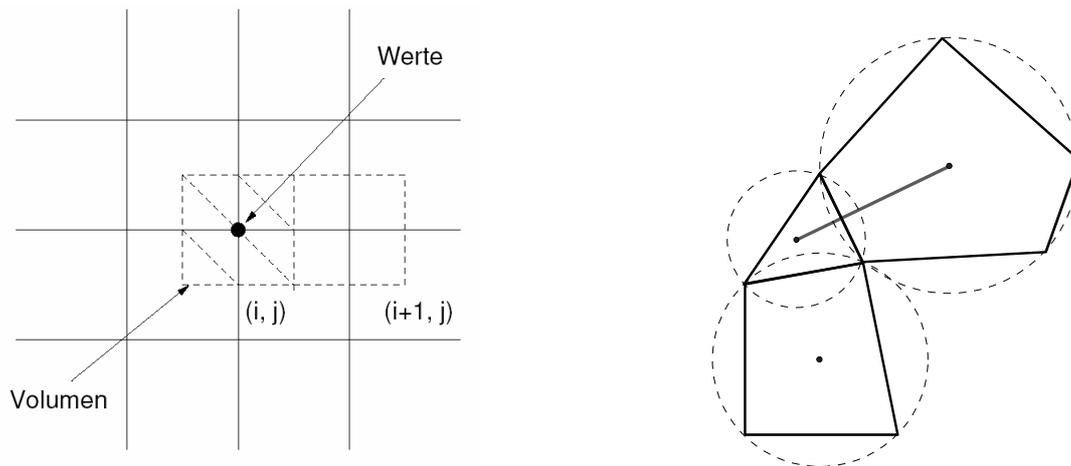


Abb. 4-8 Äquidistante (links [Seume et al., 2003]) und orthogonal strukturierte (rechts [Malcherek, 2002b]) 2D-Finite-Volumen-Geometrien

Die Zeitableitung lässt sich in Analogie zu den in Kap.4.1.8.1 beschriebenen Zeitschrittverfahren approximieren. Bezogen auf eine zweidimensionale Polygonfläche A_i ergibt sich bspw. in Anlehnung an das Einschrittverfahren:

$$\int_{\Omega_i} \frac{\partial f}{\partial t} d\Omega \cong A_i \frac{\partial f}{\partial t} \cong A_i \frac{f_i^{n+1} - f_i^n}{\Delta t} \quad (4-67)$$

Für den Quellterm gilt entsprechend:

$$\int_{\Omega_i} q_f d\Omega \cong A_i q_{fi} \quad (4-68)$$

Die Behandlung der Flussterme erfolgt über Aufsummation der Flüsse $\bar{\Phi}_f$ über alle Ränder k eines Polygons i . Dies führt schließlich zur diskretisierten Form, im Folgenden dargestellt als implizite Variante:

$$A_i \frac{f_i^{n+1} - f_i^n}{\Delta t} + \sum_k \bar{\Phi}_{i(k)}^{n+1} l_{i(k)} = A_i q_f \quad (4-69)$$

Bei der FV-Methode fällt die Lage der Rechenpunkte nicht mit den Flüssen über die Zellenseiten zusammen. Daher müssen die Flüsse an den Zellrändern aus benachbarten Knoten berechnet werden. Die einfachste Möglichkeit stellt das arithmetische Mittel (zentrales Verfahren) dar. Dies führt für den Fluss $\bar{\Phi}_f$ an einem Gitterzellenrand zweier äquidistanter Gitterzellen $i,j \rightarrow i+1,j$ zu:

$$\bar{\Phi}_{i+1/2,j} = \frac{1}{2} (\bar{\Phi}_{i,j} + \bar{\Phi}_{i+1,j}) \quad (4-70)$$

Allerdings weist die Anwendung zentraler Verfahren auf die advektiven Terme ungünstige Stabilitätseigenschaften auf. Eine stabilere Lösung ergeben sogenannte

Upwind-Verfahren (Upwind Differencing Scheme). Hierbei erfolgt eine Wichtung der Knotenwerte in Abhängigkeit der Strömungsrichtung [Seume et al., 2003]. *Quick-Verfahren (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics)* wiederum interpolieren den Fluss auf dem Rand eines Kontrollvolumens mit Hilfe eines quadratischen Polynoms und sind mit einer geringeren numerischen Diffusion behaftet [Malcherek, 2002b].

Nach *Malcherek (2002b)* ist bei mehrdimensionalen Modellen ein Trend zu den sehr leistungsfähigen Finite-Volumen-Verfahren zu verzeichnen, da diese im Vergleich zu den FD-Verfahren eine bessere Anpassung der Systemgeometrie an die topographischen Strukturen des Untersuchungsgebietes erlauben und im Vergleich zu FE-Verfahren wesentlich kürzere Berechnungszeiten ermöglichen. Beide Kriterien kommen gerade bei der Simulation von Hochwasserabflüssen (großräumige Untersuchungsgebiete, unregelmäßige Fluss-/Vorland-Geometrie) deutlich zum Tragen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zweidimensionale HN-Verfahren (Hydro2de, Flumen) basierend auf der Finite-Volumen-Methode eingesetzt (siehe Kap.7 und Kap.8).

In Abb. 4-9 sind die wesentlichen Merkmale der hier behandelten Diskretisierungsmethoden zusammengefasst.

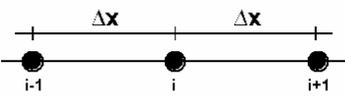
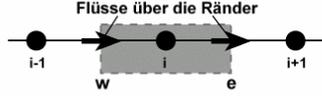
Finite Differenzen	Finite Volumen	Finite Elemente
Ableitungen werden zu Differenzenquotienten (Taylorentwicklungen)	Bilanzierung der Flüsse über die Ränder des Kontrollvolumens	Stützfunktionen an Knoten Lösung ist gewichtete Linearkombination der Stützfunktionen
gleichmäßige Gitter	relativ gleichförmige Gitter	völlig unstrukturierte Gitter
		
<u>Vorteile:</u> einfache Programmierung gut zu analysieren	<u>Vorteile:</u> Erhaltungssätze immer erfüllt Geometrieanpassung möglich	<u>Vorteile:</u> beliebige Geometrie Netzverfeinerung problemlos
<u>Nachteile:</u> überall einheitliches Netz Netzverfeinerung schwierig	<u>Nachteile:</u> weniger flexibel als FEM noch Entwicklungsbedarf	<u>Nachteile:</u> Erhaltungssätze nicht respektiert riesiges Gleichungssystem für Wichtungsfaktoren

Abb. 4-9 Gegenüberstellung der wesentlichen Merkmale von FD-,FV- und FE-Verfahren

4.1.8.5 Gütekriterien

Zur Bestimmung der Güte eines Diskretisierungsverfahrens sind im Wesentlichen folgende numerische Eigenschaften maßgebend:

- Konsistenzordnung (Genauigkeit)
- Gewährleistung der Stabilität
- Auftreten numerischer Diffusion
- Gewährleistung konservativer Eigenschaften

Die Konsistenzordnung gibt an, mit welcher Potenz der lokale Verfahrensfehler bei Verfeinerung der Zeit- bzw. Ortsdiskretisierung gegen Null strebt [Malcherek, 2002b]. Das im vorangegangenen Abschnitt beschriebene FD-Verfahren nach Preissmann weist bspw. eine Konsistenzordnung von $O(\Delta t^2, \Delta x^2)$ auf, was bedeutet, dass bei einer Halbierung des Zeit- oder Ortsschrittes der Verfahrensfehler auf ein Viertel reduziert wird.

Aussagen zur Stabilität eines Verfahrens besagen, unter welchen Bedingungen sichergestellt wird, dass der Verfahrensfehler mit zunehmender Anzahl von Gitterpunkten und/oder Zeitschritten eingegrenzt bleibt. Um eine stabile Berechnung zu gewährleisten, muss bspw. bei expliziten Verfahren die *Courant*-Bedingung

$$Cr = u \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (4-71)$$

eingehalten werden, die besagt, dass ein sich mit der Geschwindigkeit u bewegendes Fluidteilchen innerhalb eines Zeitschrittes Δt nicht mehr als eine Gitterweite Δx zurücklegen darf. Bei z.B. durch die topographischen Randbedingungen eines Untersuchungsgebietes vorgegebener Gitterauflösung müssen u.U. sehr kleine Zeitschritte gewählt werden, was einen Anstieg an Rechenzeit bedeutet.

Die rechenaufwendigeren impliziten Zeitschrittverfahren verhalten sich grundsätzlich stabiler als die expliziten Verfahren. Die Einhaltung der *Courant*-Bedingung ist nicht erforderlich, wodurch die Möglichkeit der Wahl größerer Zeitschritte gegeben ist. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass zu groß gewählte Zeitschritte wiederum eine abnehmende Genauigkeit mit sich bringen [Celan, 2002]. So kann ein explizites Verfahren bei kleineren Zeitschritten durchaus schneller und genauer sein als ein implizites Verfahren bei größeren Zeitschritten.

Numerische Diffusion verursacht einen auf das numerische Diskretisierungsverfahren zurückzuführenden, aber physikalisch „ungewollten“ Konzentrationsausgleich benachbarter Gitterpunkte. Die numerische Diffusion ist umso geringer, je höher die Konsistenzordnung des numerischen Verfahrens ist [Malcherek, 2002b].

Die zu lösenden Strömungsgleichungen basieren auf den Erhaltungssätzen für Masse und Impuls. Ein Gütekriterium für das numerische Verfahren stellt daher auch die Gewährleistung der Konservativität (Erhaltungseigenschaft) dar. Bei Finite-Volumen-Verfahren ist diese automatisch erfüllt [Beffa, 1994].

4.1.9 Modellkalibrierung und -validierung

4.1.9.1 Allgemeines

Unter Kalibrierung versteht man den Vergleich der Modellergebnisse mit in der Natur gemessenen Daten (z.B. Wasserspiegelfixierungen) mit entsprechender Anpassung der Modellparameter und/oder der mit Unsicherheiten belegten hydrologischen und geometrischen Eingangsdaten. Findet die Kalibrierung nur mit einem Parameter statt, so schlagen sich in ihr auch die Unsicherheiten aller anderen Parameter bzw. Eingangsgrößen nieder. Als Validierung wird die nachträgliche Überprüfung eines kalibrierten Modells an einem in natura vermessenen Strömungszustand bezeichnet.

Die dissipativen Prozesse einer Strömung werden in der Praxis der Fließgewässermodellierung im Wesentlichen über Sohlreibungsbeiwerte erfasst. Diese basieren auf experimentellen bzw. empirischen Untersuchungen und sind je nach Komplexität der Strömung mit z.T. erheblichen Unsicherheiten belastet (vgl. Kap.4.1.7). In den meisten Fällen sind sie daher die ausschlaggebende Kalibrierungsgröße. Hierbei kann es erforderlich sein, für unterschiedliche Abflusszustände verschiedene Parametersätze zu verwenden. Dies gilt aufgrund der fehlenden Dimensionsreinheit des Reibungsbeiwertes k_{st} insbesondere bei Verwendung des Ansatzes nach *Gauckler-Manning-Strickler*.

Bei 2D-Modellen werden die Energieverluste verursachenden Ungleichförmigkeiten des Gewässerlaufs z.T. explizit erfasst und müssen im Vergleich zum 1D-Modell weniger stark über einen „Mischparameter“ berücksichtigt werden. Eine Übertragung von Reibungsbeiwerten zwischen 1D und 2D Modellen ist daher nicht ohne weiteres zulässig.

Bei Berücksichtigung des turbulenten Impulsaustausches über Trennflächenansätze (1D) bzw. die turbulente Wirbelviskosität (2D) treten zusätzliche empirische Parametrisierungen auf, die in den Kalibrierungsprozess mit einbezogen werden können. Zur sinnvollen Kalibrierung des Strömungsfeldes (z.B. Lage und Ausprägung von Rückströmzonen) über die Wirbelviskosität sind jedoch Geschwindigkeitsmessungen notwendig, die in den seltensten Fällen verfügbar sind. Zu bedenken ist weiterhin, dass in dimensionsreduzierten Modellen der Einfluss der Sekundärströmung auf Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten im Rahmen der Kalibrierung über den Sohlreibungsansatz oder das Turbulenzmodell mit abgedeckt wird, ohne dass die Auswirkungen der Sekundärströmung denselben Abhängigkeiten unterliegt, wie Sohlreibung oder Turbulenz.

4.1.9.2 Schwierigkeiten der Kalibrierung eines Hochwassermodells

Die Kalibrierung eines Strömungsmodells zur Simulation des Hochwasserabflusses unterliegt besonderen Schwierigkeiten. Dies vor allem aufgrund

- oftmals fehlender oder ungenauer Messdaten im Untersuchungsgebiet (y,v) ,
- den Unsicherheiten in den (hydrologischen) Randbedingungen (y,Q) ,
- der nicht eindeutigen räumlichen Zuordnung der empirischen Parameter,
- dem Zeitbezug der Zustandsbeschreibung sowie
- dem i.d.R. großen geforderten Prognoseradius der Zielgrößen.

Das Kernproblem bei der Kalibrierung und Validierung von Hochwassermodellen ist das Fehlen einer genügenden Anzahl genügend genauer Messwerte. Die i.d.R. wenigen zur Verfügung stehenden Messdaten basieren zumeist auf Aufnahme der Geschwemmsellinien oder Anwohnerbefragungen und weisen vor allem bei Extremereignissen dementsprechend große Höhenunsicherheiten im Dezimeterbereich auf. Zudem ist der Lagebezug der Messstelle z.B. über die Gewässerstationierung nicht immer eindeutig dokumentiert. Hinzu kommt die Schwierigkeit in der Bestimmung der zugehörigen Abflussmenge bei Scheiteldurchgang. Die Ungenauigkeiten der Randbedingungen führen dazu, dass die empirischen Parameter verstellt werden, um eine Anpassung der Berechnungsergebnisse an die zu einer anderen Abflussmenge gehörenden Messwerte zu erreichen.

Eine weiteres Problem stellt die Tatsache dar, dass die hydraulischen Einflussgrößen Topographie und Fließwiderstandsverhalten der überströmten Vorländer aufgrund der Vielzahl von Strukturobjekten (Straßen, Dämme, Gebäude, Zäune etc.) und zeitlich veränderlichen (Vegetations-)Zuständen modelltechnisch schwer erfassbar sind. Bei erosionsgefährdeten Gewässerstrecken, die durch Strömungsangriff während eines zu simulierenden Hochwasserereignisses u.U. extremen morphologischen Umbildungsprozessen ausgesetzt sind, ist bereits die Festlegung des maßgebenden Geometriezustandes äußerst problematisch.

Eine eindeutige räumliche Zuordnung der empirischen Parameter (z.B. Rauheitsbeiwerte für Flussschlauch, Vorländer, Trennflächen) ist auch unter Annahme eines zeitlich konstanten äußeren Systemzustandes i.d.R. nicht möglich. So lassen sich Messwerte mit verschiedenen Parametersätzen bzw. -kombinationen reproduzieren. Die Wahl der „richtigen“ Kombination kann jedoch für die Prognosefähigkeit des Modells entscheidend sein. Eine starke jahreszeitliche Abhängigkeit der durch den Vorlandbewuchs verursachten Fließwiderstände lässt sich unter Umständen nur über unterschiedliche Parametersätze bzw. unterschiedliche Modellzustände nachbilden.

Aufgrund der u.a. in Kap.4.1.7 beschriebenen Abhängigkeit der empirischen Parameter von der jeweiligen Abflussmenge und/oder der Veränderlichkeit der Strömungscharakteristik (Abflussaufteilung bzw. Hauptströmungsrichtung) ist es für die Prognosefähigkeit des Modells entscheidend, ob sich die geforderten Zielgrößen auf Abflussmengen bzw. -konstellationen in ähnlicher Größenordnung beziehen wie die zur Kalibrierung herangezogenen Ereignisse. Beim Einsatz von Hochwassermodellen geht es jedoch in vielen Fällen um die Berechnung der Strömungsverhältnisse für (Extrem-) Ereignisse, die außerhalb des kalibrierten Bereichs liegen.

Pauschale Aussagen zum Prognoseradius (Extrapolationsspektrum), für welchen ein Hochwassermodell zuverlässige Aussagen zu den Zielgrößen erlaubt, sind nicht möglich, da dieser stark von den individuellen hydraulischen Randbedingungen (Topographie, Bewuchscharakteristik) des Untersuchungsgebietes abhängig ist. Zudem wird er von der Auswahl der Modellierungsmethode (Dimensionalität, Detaillierungsgrad zugrunde gelegter Verlustansatz) beeinflusst.

Es wird deutlich, dass die Kalibrierung eines Modells zur Simulation des Hochwasserabflusses ein höchst diffiziler und entsprechende Erfahrung voraussetzender Arbeitsschritt bei der Modellerstellung ist. Aufgrund der Vielzahl an Unsicherheiten sieht sich der Modellierer zwangsläufig mit dem Fakt zu vieler Freiheitsgrade konfrontiert. Die Festlegung der Parameter und Randbedingungen muss dann gestützt auf Modelliererfahrung und Plausibilitätsüberlegungen erfolgen. Sensitivitätsanalysen helfen, den Einfluss dieser Unsicherheiten auf die Modellaussage einzugrenzen. Eine eingehende Diskussion der Zuverlässigkeit von Hochwasserfixierungen und Interpretation der Kalibrierungsergebnisse wird in Kap.8.3.3 anhand exemplarischer Beispiele gegeben.

4.2 Geographische Informationssysteme (GIS)

4.2.1 Definition

Raumbezogene Phänomene der realen Welt können formal als räumlich abgrenzbare Objekte („Entitäten“; z.B. Haus, Fluss) oder als kontinuierliche Eigenschaft des Raumes („kontinuierliche Felder“; z.B. Geländeoberfläche) über Geo-Datenmodelle beschrieben werden.

Geographische Informationssysteme (GIS) sind Softwaresysteme, die der Erfassung, Speicherung und Analyse raumbezogener Daten dienen. Sie zeichnen sich durch eine gemeinsame Behandlung von topographischen Daten (Geometrie) und sachbezogenen Attributen (Sachdaten) aus und unterscheiden sich durch die Analysefähigkeit von reinen Kartographie-Werkzeugen und CAD¹¹-Systemen. Während Entitäten i.A. als Vektormodelle abgebildet werden, können kontinuierliche Informationen durch räumliche Diskretisierung über regelmäßige Rastermodelle oder unregelmäßige Dreiecksnetze („TIN“) näherungsweise dargestellt werden.

Im GIS werden die Geodatenätze nach Datentyp getrennt als Ebene mit festem Raumbezug behandelt und können zur Visualisierung mit anderen Raumdaten überlagert werden (Layertechnik). Zudem können die einzelnen Ebenen (Themen) analysiert sowie miteinander verschnitten bzw. verknüpft werden. Entscheidend hierfür ist die Übereinstimmung des Bezugssystems.

Häufig wird mit dem Begriff „GIS“ auch ein „GIS-Projekt“ bezeichnet. Ein GIS-Projekt umfasst neben der Software auch die Hardware und vor allem Daten und Organisationsformen. Oftmals werden bereits Datensammlungen wie z.B. das ATKIS (Amtliches Topographisch Kartographisches Informationssystem der Landesvermessungsämter) als GIS bezeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff „GIS“ ausschließlich als Synonym für entsprechende Softwaresysteme verwendet.

4.2.2 Strukturkonzepte zur Abstraktion der realen Welt

Nachfolgend wird ein Überblick über Strukturkonzepte zur Verwaltung raumbezogener Informationen in GIS mit Hinweisen zu Anwendungsmöglichkeiten im Rahmen der Hochwassersimulation gegeben. Nähere Ausführungen beziehen sich auf die kommerziellen GIS-Softwaresysteme ArcView und ARC/INFO der Firma ESRI, welche mittlerweile weite Verbreitung gefunden haben und auch im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wurden (siehe Kap.6).

4.2.2.1 Vektordaten und deren Verknüpfung mit Sachdaten

Vektordaten sind lagebekannte Punkte, Linien und Polygone (hier: Flächen). Punkte sind über ihre Koordinaten (x;y) definiert, Linien und Polygone über die Koordinaten ihrer Stützpunkte. Vektordaten können als Attribut z.B. eine Höhenkomponente (z)

¹¹ Computer Aided Design

zugewiesen bekommen aber auch mit beliebigen Sachdaten verknüpft werden, so dass diese wiederum einen Raumbezug erfahren.

Nachfolgend werden einige Beispiele des Einsatzes von Vektordaten im Rahmen der Hochwassermodellierung aufgeführt:

- Ein Gewässerlauf kann als Linie abstrahiert werden und erhält als Attribut den Gewässernamen und die Gewässerkennzahl.
- Die Geländetopographie kann über diskrete Höhenpunkte, Höhenlinien (Isohypsen) oder Bruchkanten in Vektorform lagemäßig erfasst werden. Die Information der Höhe (z.B. in müNN) wird als Eigenschaft dieser Geometriedaten in einer Attributstabelle abgelegt und ist über eine Bezugsnummer (ID) an die entsprechenden Punkte oder Linien gekoppelt.
- Überflutungsflächen können als Polygon dargestellt werden, welche als Attribut die zugehörige Abflussmenge oder das entsprechende hydrologische Risiko zugewiesen bekommen.
- Die Art der Flächenutzung der gefährdeten Bereiche wird über Polygone mit entsprechender Attributierung abgelegt.

Vektordaten und deren Attribute werden im ArcView-Format als sogenannte „Shape“-Dateien gespeichert. Eine Shape-Datei kann beliebig viele Objekte sowie Sachdaten beinhalten, ist jedoch auf einen Objekt-Typ („Feature“) beschränkt. ArcView unterscheidet primär zwischen den Objekt-Typen „Point“-„Line“- bzw. „PolyLine¹²“- und „Polygon“-Feature. Die zugehörigen Sachdaten werden getrennt von der geometrischen Beschreibung tabellarisch im „dBase¹³“-Format abgelegt. Die Verknüpfung zu den Geometriedaten wird über eine ID-Nummer umgesetzt.

Für die meisten Anwendungen ist dieses Konzept durchaus effektiv. Problematisch gestaltet sich diese Reduzierung der Geometrie auf eine Ebene (XY-Koordinaten) z.B. bei der Erfassung linearer Strukturobjekte mit veränderlicher Höhe (z.B. Dammverläufe, Gewässertalwege). So können bestimmte Höhenwerte zwar einer Linie als Eigenschaft (Attribut) zugewiesen werden, nicht aber den einzelnen Stützpunkten, welche die Linie geometrisch beschreiben. Dieses Problem wurde von der Firma ESRI mittlerweile über die Integration des Konzeptes der 3D-Vektoren (Objekt-Typen: „PointZ“, „PolyLineZ“, „PolygonZ“) gelöst. Hierbei werden alle Stützpunkte der Vektorobjekte über Koordinaten-Triplets (x,y,z) geometrisch beschrieben, sodass eine vollständige dreidimensionale topologische Behandlung von Vektorstrukturen möglich ist.

Beispiel für den Einsatz von 3D-Vektordaten im Rahmen der Hochwassermodellierung:

- Der Verlauf eines Hochwasserschutzdammes mit in Längsrichtung veränderlicher Kronenhöhe wird als PolyLineZ in Vektorform räumlich beschrieben. Mittels GIS kann die

¹² Eine Linie mit mehr als 2 Stützpunkten wird als „PolyLine“ bezeichnet.

¹³ Das dBase-Format ist universell einsetzbar. Es wird vor allem von Datenbank-Softwaresystemen genutzt, kann aber auch beispielsweise in MS-Excel eingelesen werden.

Überströmungsgefährdung durch dreidimensionale Verschneidung der Linie mit einem Raster der Wasseroberfläche ausgewiesen werden (siehe Abb. 6-2).

- Zur Erstellung eines Digitalen Geländemodells können Bruchkanten (Geländekanten) mit Lage und veränderlicher Höhenkote verwaltet und über Interpolationsverfahren dreidimensional behandelt werden.

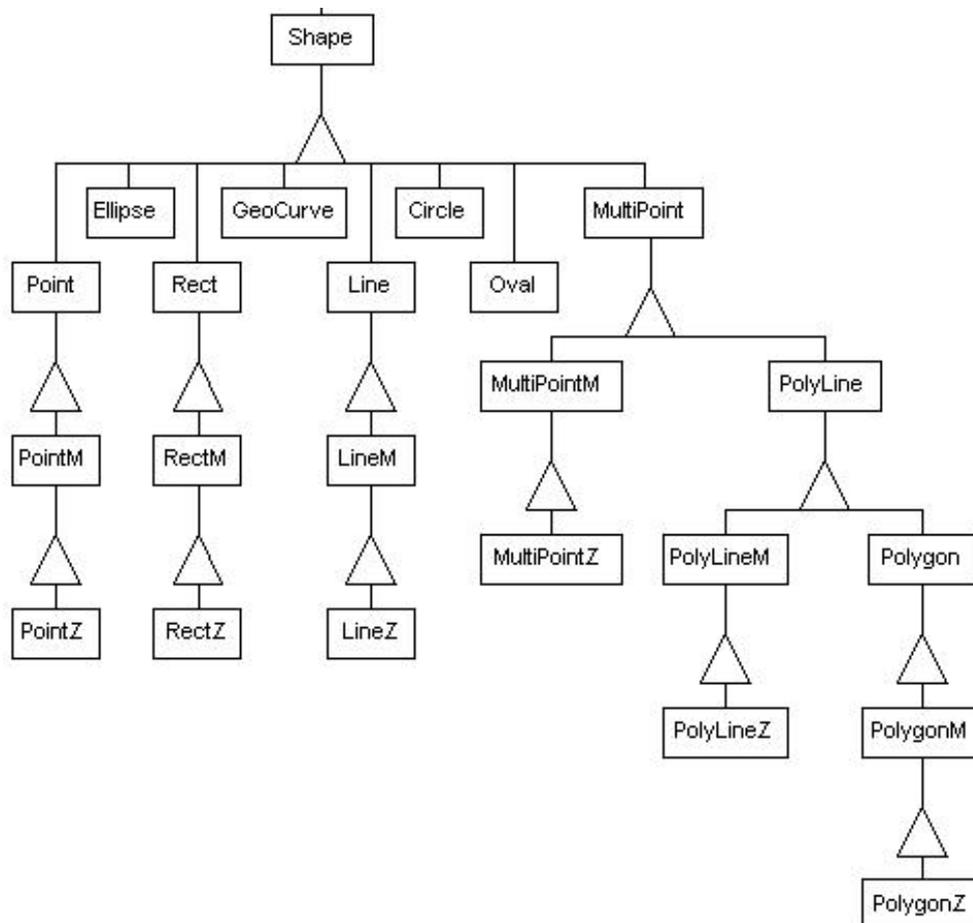


Abb. 4-10 Strukturkonzepte für Vektordaten in ArcView (ESRI) (Quelle: Arc-View 3.2 User Manual)

Neben den oben beschriebenen zwei- und dreidimensionalen Shape-Formaten wird u.a. auch das „Measured-Shape“-Format angeboten. Neben den XY-Koordinaten kann ein beliebiger Messwert als interne Information gespeichert werden. Räumliche Verschneidungen im GIS werden hierbei allerdings nur in der XY-Ebene behandelt.

Beispiel für den Einsatz des „Measured-Shape“-Konzepts im Rahmen der Hochwassermodellierung:

- Der Verlauf einer Gewässerlinie wird als „PolyLineM“ erfasst: Neben den Sachdaten in der (externen) Attributstabelle (Gewässername etc.) werden auch Informationen zur Streckenmessung vorgehalten. Mittels GIS wird somit die Abfrage z.B. nach der Lage einer Bahnüberquerung (Bahnlinie als PolyLine) bezogen auf den Flusskilometer der Gewässerlinie oder die automatische Auswahl von Streckenabschnitten des Gewässers in Abhängigkeit von Gemarkungsgrenzen (Gemarkungsflächen als Polygone) möglich.

In Abb. 4-10 ist eine Übersicht der verschiedenen Objektarten im GIS ArcView gegeben.

4.2.2.2 Rasterdaten (GRID)

Das Konzept der Rasterdaten basiert auf der Einteilung des Raumes bzw. einer Fläche in diskrete Einheiten (quadratische Zellen). Rasterdaten lassen sich somit in einer Zeilen/Spalten-Struktur organisieren. Die Lage eines jeden Rasterpunktes ist intern über seine Zeilen- und Spaltenzugehörigkeit und bezogen auf ein übergeordnetes Koordinatensystem über die Lagekoordinaten des Rasterursprungs (z.B. linke obere Ecke) sowie die Zellengröße bestimmt. Jede Rasterzelle (Pixel) besitzt eine bestimmte Wertigkeit. Über eine Legende kann die Rastermatrix in bestimmte Klassen aufgeteilt werden (Rasterklassifizierung), wodurch sich Flächen gleicher Klassen bilden.

Beispiele für Rasterdaten in GIS:

- Die Geländetopographie einer Flussstrecke wird über Höhenpunkte mit äquidistanten Abständen rasterförmig verwaltet. Jedem Rasterfeld wird als Wertigkeit die Geländehöhe in [müNN] zugewiesen. Über eine Legende wird das DGM in Höhenklassen unterteilt und eine entsprechende Farbabstufung definiert. Mittels GIS können die Höheninformationen des DGM analysiert werden (z.B. Ermittlung der Geländegradien und Talwege). Verschneidungen mit anderen Rasterdaten sowie Vektordaten sind möglich.
- Zur rasterförmigen Verwaltung der Flächennutzung wird der Untersuchungsbereich über eine Rastermatrix erfasst und mit entsprechenden Zahlenwerten belegt. Über eine Legende werden alle Pixel einer bestimmten Wertigkeit z.B. als Ackerfläche, Bauland oder Waldfläche ausgewiesen. Diese Daten können beispielsweise Eingangsgrößen für hydrologische Niederschlags-Abfluss- (NA-)Modelle oder für Schadenspotenzialanalysen in hochwassergefährdeten Bereichen darstellen.

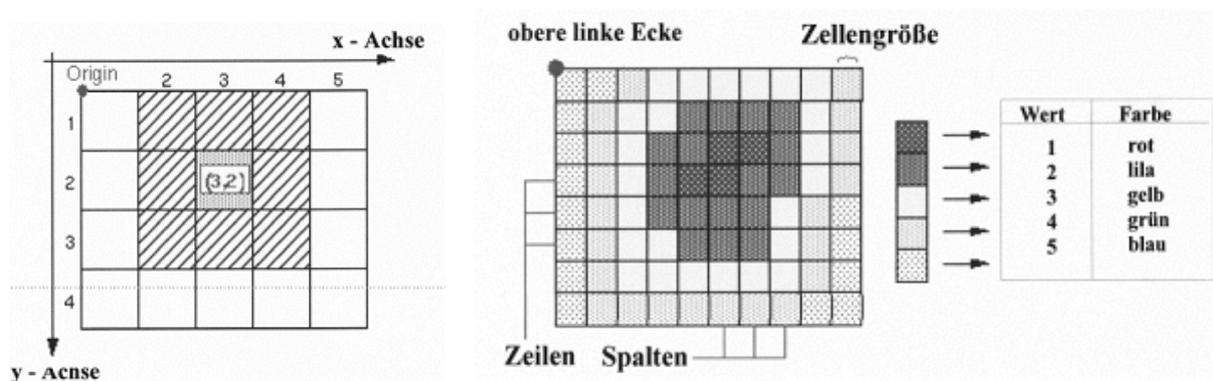


Abb. 4-11 Rasterkonzept in GIS (Quelle: ESRI)

Rasterdaten werden im „GRID“-Format in ArcView über die Erweiterung „Spatial Analyst“ und in ARC/INFO über das GRID-Modul behandelt. Die Wertematrix kann entweder als „Integer“- oder „Floating-Point“-Grid gespeichert werden und lässt sich

auf zwei verschiedene Arten interpretieren: Entweder gilt der Wert einer Zelle für die gesamte Fläche oder nur für den Mittelpunkt des Rasterfeldes. Im zweiten Fall werden zur Durchführung von Raster-Operationen die Werte der Nachbarzellen zur Interpolation einbezogen.

Die ASCII-Schnittstelle für Rasterdaten enthält eine Wertematrix und einen Dateikopf („Header“) mit Angaben zur Anzahl der Zeilen und Spalten, der Breite einer Rasterzelle sowie den Koordinaten der linken oberen Ecke des Rasters. Zudem wird ein sogenannter „NODATA“-Wert angegeben (z.B. -9999), über welchen alle Rasterzellen ohne Wertzuordnung als solche ausgewiesen werden. Dieser NODATA-Wert entspricht somit nicht „0“. Über spezielle Kompressions- und Analyseverfahren (z.B. Lauflängenkodierung¹⁴, Quadrees¹⁵) können auch große Mengen an Rasterdaten über die GRID-Module der ESRI-Produkte effektiv bearbeitet werden:

Digitale Bilder („Images“; z.B. Orthofotos, gescannte topographische Karten) basieren ebenfalls auf dem Rastermodell, wobei jeder Rasterzelle („Pixel“) ein Farb- bzw. Grauwert zugeordnet wird. Die Anzahl der verwendeten Speichereinheiten pro Zelle wird als Farbtiefe bezeichnet. Soll eine Bilddatei als eine Ebene im GIS dargestellt werden, muss das Bild zunächst georeferenziert werden. Die Bildinformationen werden hierzu auf das Bezugssystem ausgerichtet (entzerrt) und erhalten über die Angabe der geographischen Koordinaten des Ursprungs und der Auflösung einen Lagebezug. In den meisten GIS lassen sich gängige Graphik-Formate, wie z.B. TIFF und JPEG, darstellen. Die Transformationsparameter zur Georeferenzierung werden in einer getrennten Datei abgelegt.

4.2.2.3 Triangulierte irreguläre Netzwerke (TIN)

Eine Sonderkonzept in GIS stellen Dreiecksvermaschungen, sogenannte „Triangulated Irregular Networks“ (TIN), dar. Diese dienen der Erzeugung und Weiterverarbeitung flächendeckender Informationen und ergeben sich aus der zweidimensionalen Vernetzung unregelmäßig verteilter Raumpunkte über ein definiertes Kriterium. Zur Beeinflussung der Vermaschung können i.d.R. zusätzlich lineare Informationen als Bruchkanten berücksichtigt werden. Die an die Punkte bzw. Linien gekoppelten numerischen Werte bzw. Attribute (z.B. Geländehöhen, Niederschlagswerte, Grundwasserpegelstände) werden über die ebenen Dreiecksflächen interpoliert und sind stetig abgreifbar. Die Stützpunktdichte bzw. Elementgröße kann an die Variabilität des kontinuierlichen Feldes angepasst werden.

Ein bewährtes und in vielen GI-Systemen implementiertes Verfahren zur Netzerzeugung ist die „Delaunay“-Triangulation. Hierbei werden jeweils 3 Punkte so verbunden, dass der kleinste Winkel im dabei entstehenden Dreieck maximal wird. Somit entstehen möglichst kompakte Dreiecksstrukturen - extreme Seitenverhältnisse wer-

¹⁴ Serien von gleichen Werten werden durch Anfangskolonnen, Endkolonnen und Wert beschrieben

¹⁵ Zusammenführung homogener Rasterfelder zu Quadranten

den soweit möglich vermieden. Die Dreiecke haben außerdem die Eigenschaft, dass innerhalb der Umkreise ausschließlich die 3 Eckpunkte des Dreiecks liegen (siehe Abb. 4-12, links). Die mathematische Definition eines Delaunay-generierten Netzes lautet [DVWK, 1999]:

Es sei N eine Menge von einzelnen, beliebig verteilten Punkten im n -dimensionalen Raum. Dann existiert für jeden Punkt $P_i \in N$ eine Region V_i , für die gilt:

$$V_i = \{X : |X - P_i| < |X - P_j|\} \text{ für alle } j \neq i \quad (4-72)$$

Die Menge aller Regionen $V = \{V_i, i = 1, \dots, m\}$ werden auch *Dirichlet-Tessalation* oder *Voronoi-Regionen* genannt.

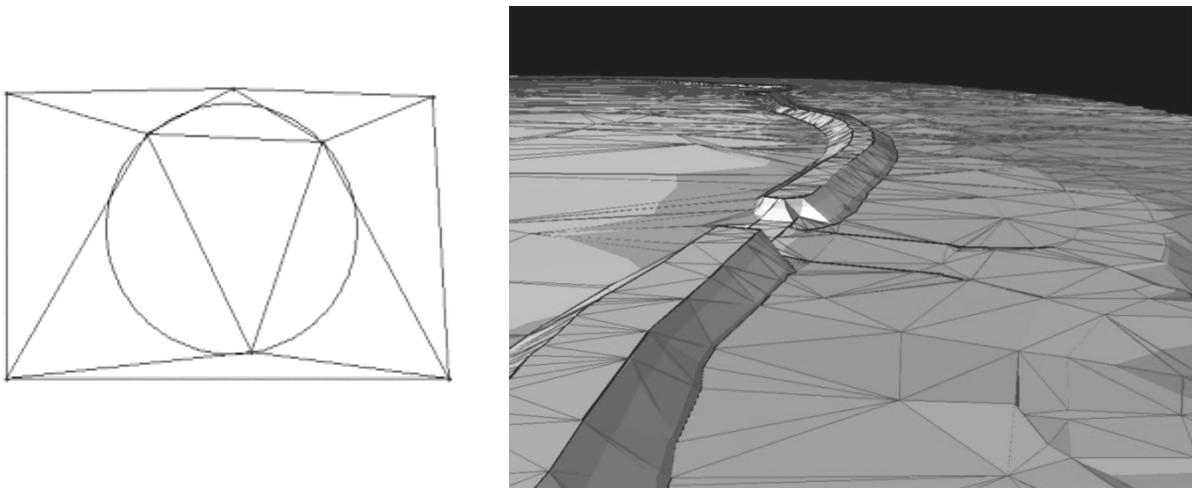


Abb. 4-12 Delaunay-Kriterium zur Triangulation¹⁶ und Anwendungsbeispiel

Im Rahmen der GIS-gestützten Hochwassermodellierung wird das TIN-Konzept in erster Linie zur Approximation von Geländeoberflächen (DGM-Erzeugung, siehe Kap.6.2.2) und Interpolation hydrologischer und hydraulischer Messwerte bzw. Berechnungsergebnisse (siehe Kap.6.3.1) genutzt. Das Delaunay-Kriterium hat sich zudem zur Generierung unstrukturierter Finite-Elemente-Netze zur mehrdimensionalen hydrodynamisch-numerischen Strömungssimulation aufgrund der Erzeugung einer numerisch geeigneten Elementcharakteristik bewährt. Über die Vorgabe von Bruchkanten lassen sich die topographisch bedeutenden bzw. hydraulisch relevanten Strukturen (Tallinien, Geländesprünge, Uferkanten, Dammbauwerke etc.) mit hoher Genauigkeit und technisch effektiv modellieren.

Der Einsatz der ESRI-Softwaresysteme ermöglicht die Behandlung von TINs über das TIN-Modul von ARC/INFO bzw. die ArcView-Erweiterung „3D-Analyst“. Es werden umfangreiche Funktionalitäten zur Erzeugung, Editierung, Analyse und (3D) Vi-

¹⁶ Eine ausführliche Beschreibung des Winkelkriteriums nach Delaunay mit interaktiver Anwendung zur Veranschaulichung der Funktionsweise findet sich unter <http://cage.rug.ac.be/~dc/alhtml/Delaunay.html>

sualisierung von TINs sowie Export-Import-Schnittstellen zu Vektor- und Rastermodulen angeboten.

4.2.2.4 Topologie

Im Gegensatz zu einem reinen Graphik- oder CAD-Programm kann die Vektor-Datenstruktur in GIS als „intelligent“ bezeichnet werden: Die räumliche Beziehung der einzelnen Objekte zueinander, die „Topologie“, ist bekannt und damit analysierbar. Diese Eigenschaft kann auch als „Raumlogik“ bezeichnet werden.

Bei Flächennetzen (z.B. Liegenschaftskataster, Bebauungsplan, Flächennutzungskartierungen etc.) bedeutet dies, dass neben den Entfernungen zwischen den Objekten auch Nachbarschaftsbeziehungen bekannt sind und in räumliche Abfragen („Spatial Query“) einbezogen werden können. So könnte eine Abfrage bspw. lauten, welche Flurstücke einer Gemeinde an ein ausgewiesenes Überschwemmungsgebiet grenzen, um hier vor Ort eine gezielte Untersuchung bezüglich der Überflutungsfährdung durchzuführen. Mittels GIS könnten als Ergebnis die betroffenen Flurstücke dargestellt und die Besitzeranschriften aus dem Adressenkatalog der Attributstabelle aufgelistet werden.

Der Aufbau topologisch strukturierter Liniennetze basiert auf der Graphen-Theorie. Linienobjekte und deren Verbindungen werden mit dem Knoten-Kanten-Modell erfasst.

„Der Graph ist die Gesamtmenge von Knoten und Kanten in strukturierter Anordnung. Er definiert die möglichen Verbindungen zwischen allen Kanten. Nicht an jedem Kreuzungspunkt müssen nämlich Verbindungen bestehen. So können etwa Versorgungsleitungen sich in unterschiedlicher Höhe überqueren oder eine Landstraße kann als Brücke über eine Autobahn führen, ohne dass man von der Straße auf die Autobahn oder von der Autobahn auf die Straße wechseln könnte. Zusätzlich ist die Richtung des Graphen von Bedeutung (gerichteter Graph), um die Fließrichtung von Wasser, Gas, Strom oder Verkehr längs der Kante zu definieren.“ (Quelle: www.gis-tutor.de)

Obwohl sich in der Fachliteratur die Beschreibung topologischer Eigenschaften raumbezogener Strukturkonzepte i.d.R. nur auf Vektorstrukturen bezieht, so verfügen moderne Geoinformationssysteme mittlerweile über eine umfangreiche Palette rasterbasierter Funktionalitäten, die ebenfalls ein topologisches Grundkonzept erfordern. Bei Rasterdaten ist die Topologie implizit über die Nachbarschaft der Zellen (definiert durch den Zeilen- und Spaltenindex) gegeben. Dies ist die Grundlage für rasterbasierte Analysefunktionalitäten wie z.B. die Berechnung von Hangneigungen, Talllinien, Einzugsgebieten und potenziellen Fließwegen auf Basis digitaler Geländeeraster sowie Interpolationsfunktionen zur Schließung von Datenlücken über Abschätzung der räumlichen Verteilung der vorhandenen Rasterwerte. Grundsätzlich kann hierbei zwischen *lokalen Funktionen* (Ergebnis hängt nur vom Wert der Input-Grids an derselben Stelle ab), *fokalen und zonalen Funktionen* (zusätzliche Einbeziehung der Rasterwerte einer definierten Umgebung) und *globalen Funktionen* (Ergebniswert

einer Zelle ist abhängig von allen Rasterwerten der Input-Grids) unterschieden werden.

4.2.2.5 Auswahl des Strukturkonzeptes

Prinzipiell bestehen zwischen Raster- und Vektorformaten Transformationsmöglichkeiten. So kann eine Linie oder Fläche auch als eine Aneinanderreihung von Rasterzellen dargestellt werden oder ein Raster über Klassifizierung in Flächen unterteilt werden. Generell ist eine Transformation jedoch mit Informationsverlust verbunden.

Die Auswahl eines geeigneten Strukturkonzeptes zur Speicherung und Weiterverarbeitung bestimmter Phänomene bzw. Objekte hängt von folgenden Faktoren ab:

- Charakteristik der Erscheinung (kontinuierlich, flächenhaft / diskret, abgrenzbar)
- zugrunde liegendes Aufnahme- bzw. Messverfahren
- Verwendungszweck bzw. Analyseziel
- Maßstab, Skalierung
- Speicherkapazität

Grundsätzlich lassen sich kontinuierlich im Raum verteilte Informationen (z.B. Höheninformationen der Geländeoberfläche, Niederschlags- oder Temperaturverteilungen) am besten in Rasterform abbilden, während diskrete, abgrenzbare bzw. unregelmäßig verteilte Informationen (z.B. geologische Bohrdaten, hydrologische Pegel-daten) und Objekte (z.B. Straßen, Gebäude, Seen) als Vektordaten mit höchstmöglicher Genauigkeit behandelt werden können. Der Informationsgehalt eines Datensatzes hängt jedoch in erster Linie vom zur originären Datenerfassung eingesetzten Verfahren ab. So kann ein Höhenraster, welches über Interpolation der Höhenlinien und Massenpunkte einer photogrammetrischen Bildflugauswertung erzeugt wurde, die originären Daten nur mit einem Verlust an Genauigkeit repräsentieren. Umgekehrt werden Höhenlinien, die aus einem Rasterdatensatz einer Laser-Scanner-Befliegung abgeleitet wurden, den Informationsgehalt der Originaldaten nur bedingt wiedergeben. Das Gleiche gilt beispielsweise für Niederschlagsdaten basierend auf punktuellen Niederschlagsmessstellen bzw. flächenhaften radargestützten Fernerkundungsverfahren. Im Rahmen der Weiterverarbeitung der Geodaten bestimmen zudem der Verwendungszweck bzw. die einzusetzenden Analysefunktionen die Auswahl der geeigneten Strukturform (vergleiche Kap.5.1).

Ferner können je nach Maßstab bzw. Skalierung der Darstellung unterschiedliche Strukturarten relevant werden. Während bei Rasterdaten die Frage des Maßstabes i.d.R. über die Anpassung der Modellauflösung (Zellgröße) geregelt wird, können bei Vektordaten unterschiedliche Strukturkonzepte sinnvoll sein. So kann beispielsweise eine Straßenfläche in sehr kleinem Darstellungsmaßstab nur noch als Linie abgebildet werden, deren Breite keinen Zusammenhang mit der realen Straßenbreite hat.

Als weiteres Auswahlkriterium ist die vorhandene Speicherkapazität zu nennen. Prinzipiell verfügen Rasterdaten über einen deutlich höheren Speicherbedarf als Vektordaten, da Letztere nur die zur Beschreibung von Objekten tatsächlich notwendigen Geometriedaten vorhalten und die zugehörigen Sachdaten weitgehend redundantfrei abgelegt werden können. Unter Umständen kann sich jedoch aus Sicht der Speicheroptimierung die dem Vektorkonzept zugrunde liegende Notwendigkeit der Vorhaltung der Lagekoordinaten aller Stützpunkte als nachteilig gegenüber dem Rasterkonzept darstellen.

4.2.3 Standardfunktionen und Fachschalen

Durch Erweiterung kommerzieller GIS-Softwareprodukte mit Zusatzfunktionalitäten und –benutzeroberflächen können komplexe systeminterne Bedienungsschritte vereinfacht und mit externen Routinen gekoppelt werden. Hierdurch kann ein hohes Maß an Automatisierung erreicht werden, was zum einen dem Spezialisten eine effektivere Projektbearbeitung ermöglicht; zum anderen werden hierdurch bestimmte Anwendungen über sogenannte „Fachschalen“ auch weniger GIS-erfahrenen Anwendern erst zugänglich gemacht. [Schwaller, 2000; Heinrich & Kerner, 2000; Kugeler et al., 2002; Oberle et al., 2000]

In Anlehnung an die in Kap.3.2 definierten Teilkomponenten eines Decision-Support-Systems (DSS) kann eine Fachschale sowohl die Daten- als auch die Modell- und Dialogkomponenten integrieren. Dies ermöglicht die Entwicklung speziell an die Anforderungen der Anwender angepasster Informations- und Simulationstools innerhalb einer GIS-Umgebung. War früher der Einsatz Geographischer Informationssysteme primär Spezialisten in Ingenieurbüros und Forschungseinrichtungen vorbehalten, halten sie hierdurch als vielseitiges Arbeitswerkzeug mehr und mehr Einzug in die tägliche Arbeitspraxis der Wasserwirtschaftsverwaltung.

Der Einsatz von Fachschalen bzw. DSS birgt jedoch auch eine Gefahr: Um zu einem Ergebnis zu kommen, ist der Anwender (im Gegensatz zum Modellierer) nicht gezwungen, sich mit den zugrunde liegenden Daten und Methoden vertieft auseinander zu setzen. Bei der Simulation eines Hochwasserereignisses beispielsweise hängt die Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit des Ergebnisses primär von der Qualität der topographischen Datenbasis sowie der Güte der Strömungssimulation ab. Diese zu bewerten setzt die Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflussfaktoren bzw. Modellparametern voraus, welche ohne eingehende Fachkenntnis nicht zu leisten ist. Der verantwortungsbewusste Umgang mit einem HW-Simulationswerkzeug setzt die Auswahl bzw. Entwicklung möglichst einfacher, verständlicher Verfahren voraus, die sowohl die geforderte Genauigkeit des Ergebnisses erbringen als auch auf die Möglichkeiten und Grenzen der Anwender ausgelegt sind. Eine umfassende Schulung und kontinuierliche Betreuung der Anwender bleibt jedoch unerlässlich.

4.2.4 Auswahl einer GIS-Software

Auf dem GIS-Markt wird eine Vielzahl verschiedener Softwaresysteme in allen Preisklassen angeboten. Mittlerweile integrieren auch einige PC-fähige „Desktop-GIS“ eine umfangreiche Palette an Standardfunktionalitäten und sind zur Behandlung wasserwirtschaftlicher Aufgabenstellungen ein unentbehrliches Arbeitsmittel nicht nur für GIS-Spezialisten geworden.

Bei der Auswahl eines bestimmten Produktes als Softwarebasis eines umfassenden DSS muss neben den integrierten Funktionalitäten auf die effektiv bearbeitbare Datenmenge, die Datenverwaltungsstruktur, die Schnittstellen, die Systemstabilität und die Anwenderfreundlichkeit (Einarbeitungszeit) geachtet werden. Je nach Anwendungsziel ist zu prüfen, welche Möglichkeiten einer individuellen Systemanpassung (siehe vorangegangenes Kapitel) existieren. In Abhängigkeit der Verwaltungsstruktur und Editiermöglichkeit der Attributdaten im GIS sowie den zu verarbeitenden Datenmengen kann die Anbindung eines externen Datenbankmanagementsystems sinnvoll sein.

4.2.5 Die ESRI-Produkte ArcView und ARC/INFO

Im Rahmen dieser Arbeit wurden als GIS-Plattform die kommerziellen GIS-Softwareprodukte ArcView und ARC/INFO der Firma ESRI eingesetzt. Die Auswahl erfolgte aufgrund der Vielzahl an integrierten Standardfunktionalitäten und Schnittstellen zu anderen Systemen sowie der weiten Verbreitung von ArcView bei den amtlichen Stellen des Landes Baden-Württemberg (siehe nachfolgendes Zitat). Ein weiteres Auswahlkriterium war die Möglichkeit, die Standardsoftware mit zusätzlichen Funktionalitäten und graphischen Benutzeroberflächen zu erweitern.

„Insbesondere im Bereich der Wasserwirtschaft besteht eine Vielzahl von problemspezifischen Lösungsansätzen für die unterschiedlichen kommerziellen GIS (Haase et al. 1999 a). Ein wesentlicher Nachteil dieser Module ist, dass die Module z.T. für unterschiedliche GIS implementiert wurden bzw. nicht kompatibel sind. Vor diesem Hintergrund hat sich das Ministerium für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg (UVM) dazu entschieden, landesweit das Produkt ArcView der Firma ESRI einzusetzen (Mayer-Föll et al. 1998).“ [Haase et al., 2002]

Zur Erfassung und Aufbereitung der Neckardaten wurde ARC/INFO eingesetzt. Dieses umfangreiche Softwarepaket kann auf Unix-Workstations installiert werden und weist auch bei der Verarbeitung sehr großer Datenmengen eine hohe Programmstabilität auf. Es verfügt über ein effektives Datenverwaltungskonzept und erlaubt eine individuelle Programmierung durch den Anwender über die Programmiersprache AML (Arc Macro Language). Hierdurch ist es möglich, ein hohes Maß an Automatisierung bei der Modellerstellung zu erreichen, was angesichts vieler sehr komplexer bzw. sich ständig wiederholender Funktionsabläufe Grundlage einer dynamischen Projektbearbeitung ist.

Vorteile:
Reduzierung des Entwicklungsaufwandes aufgrund vorhandener Grundfunktionen
Gewährleistung der Kompatibilität zu gängigen Schnittstellen
Effektive Entwicklungsumgebung über objektorientierte Programmiersprache
Geringere Einarbeitungszeiten der Anwender bei bereits vorliegender Erfahrung mit dem Basis-Programm
Schnellere Annahme der Entwicklung in der Fachwelt bei guter Reputation des Basis-Programms
Möglichkeit der selektiven Bereitstellung von Standardfunktionalitäten in Abhängigkeit der Erfahrung des Anwenders
Support durch Hersteller
Nachteile:
Abhängigkeit von der mittelfristigen Entwicklungspolitik der Herstellerfirma
Hohe Kosten (Basisprogramm, Updates, Lizenzen etc.)
Interne Programmiersprache kein Standard (Spezialkenntnisse erforderlich bzw. lange Einarbeitungszeiten seitens der Programmierer)
Eingeschränkte Entwicklungsmöglichkeiten
Keine eigenständige Behebung von Fehlern des Basisprogramms
Schwächen des Basisprogramms (z.B. der Oberfläche, Benutzerführung usw.) übertragen sich auf die Eigenentwicklungen

Tabelle 4-1 Einsatz kommerzieller Softwareprodukte als Basis zur Systementwicklung

Die Entwicklungsarbeit zur Implementierung des Simulationssystems Neckar auf GIS-Arbeitsplätzen wurde auf das kostengünstigere Desktop-GIS ArcView ausgerichtet. Diese ehemals als reines Visualisierungswerkzeug für Geodaten entwickelte PC-Software ist aufgrund der rasanten Entwicklung der Leistungsfähigkeit heutiger Rechner mittlerweile als eigenständiges PC-fähiges GIS mit vielfältigen Funktionen zur Behandlung von Raster- und Vektordaten verfügbar. Eine interne Programmierweiterung und Koppelung mit externen Routinen ist über die objektorientierte Programmiersprache AVENUE möglich.

Der Einsatz kommerzieller Softwareprodukte als Basis zur Systementwicklung hat neben dem Vorteil der Bereitstellung von Programmarchitektur und Grundfunktionalitäten auch gewisse Nachteile, wie z.B. die Abhängigkeit von der Entwicklungspolitik der Herstellerfirma. Aufgrund der Kontinuität der ArcView- und ARC/INFO-Entwicklung und der bestehenden Marktführung der Firma ESRI hat sich die Auswahl dieser Produktpalette bisher bewährt. Zukünftige Entwicklungen auf dem GIS-

Markt sind jedoch schwer vorhersehbar. So wird mittlerweile über die Ablösung von ArcView und ARC/INFO durch das ESRI-Konzept Arc-GIS diskutiert.

In Tabelle 4-1 sind Vor- und Nachteile des Einsatzes kommerzieller Software aufgeführt.

5 Zusammenführung der Datenbasis

Zum Aufbau und beim Betrieb eines Hochwassersimulationssystems werden Geodaten unterschiedlichster thematischer Identität und verfahrensbezogener Herkunft verarbeitet. In den nachfolgenden Kapiteln wird eine Übersicht über die wesentlichen raumbezogenen Themen im Rahmen der Hochwassersimulation gegeben sowie die Voraussetzungen ihrer Georeferenzierung und Anwendbarkeit erörtert.

5.1 Raumbezogene Daten zur Hochwassersimulation

5.1.1 Geländetopographie (Flussschlauch / Vorland)

Die diskrete Beschreibung der Geländetopographie eines Untersuchungsgebietes erfolgt in Vektorform über ausgewählte Massenpunkte, Höhenlinien und Bruchkanten oder als Rastermatrix. Zur originären Erfassung der topographischen Basisdaten kommen folgende Vermessungsverfahren in Betracht:

Gewässersohle:

- Schiffspeilung mittels (Fächer-) Echlot (bei schiffbaren Gewässern)
- tachymetrische Vermessung (kleinere Gewässer)

Flussvorland [Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 1998; Brockmann, 1999]:

- tachymetrische Vermessung (terrestrisch)
- GPS-RealTimeKinematic (terrestrisch)
- Aerophotogrammetrie (flugzeuggestützt)
- Laser-Scanner-Technik (flugzeuggestützt)
- Radar (flugzeuggestützt)

Eine sekundäre Erfassungsmethode der Vorlandgeometrie stellt das Digitalisieren von Höheninformationen aus georeferenzierten topographischen Karten dar. Diese Methode rückt aufgrund der unvermeidlichen Fehlerfortpflanzung sowie der zunehmenden Verfügbarkeit und Verarbeitbarkeit digitaler Vermessungsdaten in den Hintergrund.

Die Verfahren zur Erfassung der räumlichen Flussvorlanddaten unterscheiden sich hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Genauigkeit der Messergebnisse und kommen dementsprechend bei unterschiedlichen Vorgaben bzw. Anforderungen zum Einsatz. Verfahrensbezogene Unsicherheiten für Höhendaten der Vorlandbereiche sind in Abb. 5-1 aufgeführt.

Zu beachten ist, dass über eine terrestrische Vermessung die Geländestrukturen bei entsprechender Auswahl der Messpunkte und Polygonzüge auch mit Hilfe einer relativ geringen Datenmenge in großer Präzision nachgebildet werden können. Eine Bewertung und Selektion der topographischen Information erfolgt auch bei der photo-

grammetrischen Auswertung von Stereo-Luftbildern, wobei der im Vergleich zur terrestrischen Vermessung verringerten Genauigkeit die Effizienz einer großräumigen Datenerfassung gegenübersteht. Die Laser-Scanner-Technik liefert Höheninformationen der Erdoberfläche in Rasterform mit beliebiger Auflösung. Die Genauigkeit der Einzelpunkte ist primär abhängig von der Flughöhe, der Vegetationsdichte sowie dem Geländegradienten. Aus den Rohdatensätzen lassen sich Informationen zur Geländeoberfläche, der Bewuchssituation [v. Hansen & Vögtle, 1999] sowie zu Strukturobjekten (z.B. Gebäuden) extrahieren [Vögtle & Steinle, 2001]. Die zuverlässige Dateninterpretation unter Berücksichtigung hydraulischer bzw. hydrologischer Anforderungen und Reduzierung der enormen Informationsdichte auf die maßgebenden (Gelände-) Strukturen wird jedoch auch zukünftig Themenstellung von Forschungsaktivitäten sein. Die Genauigkeit von Radardaten wiederum ist stark abhängig von den topographischen Begebenheiten und liefert wenig Möglichkeiten zur strukturbezogenen Datenfilterung bzw. -interpretation. Sie liefern für die Hochwasserhydraulik nur auf ebenen unbewachsenen Flächen nutzbare Informationen zur Geländeoberfläche.

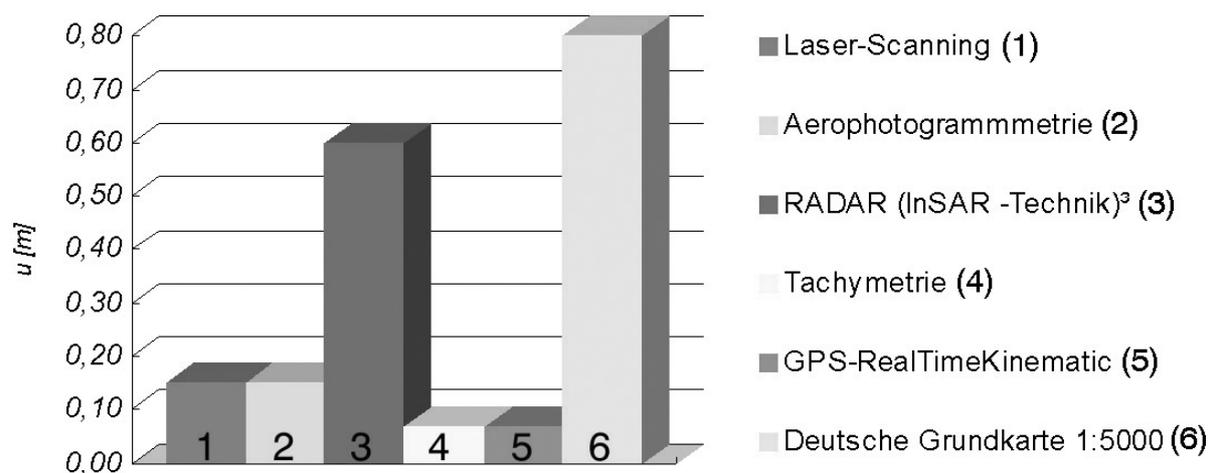


Abb. 5-1 Verfahrensbezogene DGM-Höhenunsicherheiten u ($S=95\%$), Geländeoberfläche (Werte aus: [Dtsch. Gewässerkundl. Mittlg., 1998; Brockmann, 1999]; InSAR⁽³⁾ = interferometrisches Synthetic Aperture Radar)

Die Geometriedaten des Gewässerbettes und der Vorländer dienen zum einen zur Beschreibung der Systemberandung des HN-Modells; zum anderen können sie zur Erstellung eines digitalen Geländemodells zur Ermittlung von Überflutungstiefen bzw. -grenzen herangezogen werden. Hieraus ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Lagegenauigkeit, Lageverteilung und Aktualität der topographischen Informationen: Während zur Erstellung der Systemgeometrie eines HN-Modells vor allem die hydraulisch relevanten Geometrien (Böschungskanten, Dammhöhen, Fließhindernisse etc.) erkannt und mit möglichst hoher Genauigkeit im Modell abgebildet werden müssen, können bei der Ermittlung von Überflutungstiefen die Genau-

igkeitsanforderungen an die topographischen Basisdaten z.B. im Bereich gefährdeter Ortslagen außerhalb des abflusswirksamen Bereiches besonders hoch sein.

Bevor eine Neuerfassung der topographischen Daten in Auftrag gegeben wird, sollte geprüft werden, inwiefern bereits existierende Datenbestände in Bezug auf Aktualität und Genauigkeit den Anforderungen genügen und genutzt werden können. Beispielfolgend seien folgende Datenquellen genannt:

- **Gewässer-Querprofile:** Die Profillinien sind i.d.R. definiert durch S- und Z-Werte (relative Lage zum Profil-Nullpunkt und Höhenwert). Den räumlichen Bezug erhalten sie z.B. durch die X- und Y-Koordinaten zweier Punkte auf dem Profil (z.B. Gauß-Krüger-Koordinaten der Hektometerpunkte von Bundeswasserstraßen). Über diese geometrische Beziehung können allen Profilpunkten räumliche Koordinaten (X,Y,Z) zugewiesen werden. Querprofildaten werden i.d.R. von den Gewässer-Unterhaltungspflichtigen erfasst und verwaltet (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Wasserwirtschaftsverwaltung der Länder, Kommunalverwaltungen).
- **ATKIS-Daten:** Das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem der Landesvermessungsämter stellt u.a. Geländehöhen in digitaler Form als Punktdaten im Gauß-Krüger-Koordinatensystem bereit. Punktdichte, Genauigkeit und Aktualität der Daten sind bereichsweise unterschiedlich. Bisher werden Höhendaten im Genauigkeitsbereich von bis zu +/- 0,5 m (DGM5) angeboten. DGM5-Daten sind daher als Geometrieinformation für Hochwassersimulationen nur bedingt geeignet. Zukünftig ist jedoch mit einer deutlichen Erhöhung der Genauigkeiten und Auflösungen der von den Landesvermessungsämtern vorgehaltenen Geländemodelle zu rechnen.
- **Topographische Karten:** Diese werden von den Landesvermessungsämtern analog und zum Teil auch digital als Rasterdaten vorgehalten und können zur manuellen Erhebung von Höhenlinien (Digitalisierung) herangezogen werden. Während Höhenflurkarten (M 1:1000-2500) und Deutsche Grundkarten (M 1:5000) als Grundlage zur Geländemodellierung genutzt werden können, eignen sich digitale Karten mit kleineren Maßstäben eher als Kartenhintergrund zu Visualisierungszwecken.
- **Kommunale Datenbestände:** Mittlerweile verfügen viele Kommunen und Verbände bzw. die von ihnen beauftragten Ingenieurbüros über aktuelle Vermessungsdaten hoher Genauigkeit, wie z.B. digitale Kanalisationskataster, CAD-Dateien von Hochwasserschutzeinrichtungen, Straßenaufrißdaten, lokale Befliegungsdaten.

Die Plausibilisierung und gegebenenfalls Nachbearbeitung der topographischen Datenbasis (Fehlererkennung, Interpolation von Datenlücken, Definition von Bruchkanten, Optimierung der Datendichte etc.) stellen einen unerlässlichen und häufig zeitaufwendigen Bestandteil der Modellerstellung dar. Häufig können bzw. müssen eine Vielzahl unterschiedlicher Datenquellen zusammengeführt werden, um die gesamten (hochwasser-) relevanten Geometrien zu erfassen. Hierzu stellen Geographische Informationssysteme ein effektives Hilfsmittel dar.

5.1.2 Wasserstandsinformationen

Zur Kalibrierung eines HN-Modells werden gemessene Strömungskenngrößen benötigt. Bei Fließgewässermodellen erfolgt die Kalibrierung in der Praxis über den Vergleich berechneter und gemessener Wasserspiegellagen. Vor allem in Bereichen komplexer Strömungsverhältnisse sind zur Kalibrierung mehrdimensionaler HN-Modelle gemessene Wasserstände auch in lateraler Verteilung zur Flussachse notwendig. Herkömmlich liegen jedoch nur vereinzelt Wasserspiegelfixierungen vor, die vor allem bei Hochwasserwerten zudem mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Räumlichen Bezug erhalten sie durch die Verknüpfung mit dem entsprechenden Flusskilometer bzw. der Gewässerstationierung und evtl. der jeweiligen Uferseite. Vor allem bei weiträumigen Überflutungsflächen und verzweigten Flusssystemen lässt die Zuordnung des Wasserstandes an eine senkrecht zur Flussachse verlaufende Linie im Nachhinein häufig keine eindeutige Lagebestimmung zu. Eine Ablage von Messwerten in 3D-Raumkoordinaten mit Angabe des Zeitpunktes und des Bezuges zur Abflussmenge sollte zukünftig zu einer Selbstverständlichkeit werden.

Die zur flächenhaften Erfassung der Wasseroberfläche (DWM) zur Verfügung stehenden Vermessungsmethoden mit ihren verfahrensbezogenen Unsicherheiten sind in Abb. 5-2 aufgeführt.

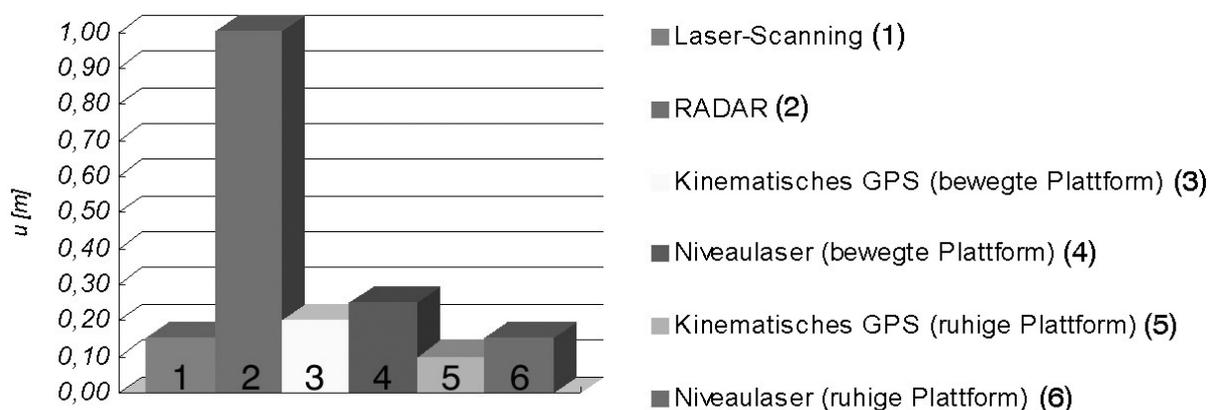


Abb. 5-2 Verfahrensbezogene DWM-Höhenunsicherheiten u ($S=95\%$), Wasserspiegel (Werte aus: [Dtsch. Gewässerkundl. Mittlg., 1998; Brockmann, 1999])

Während die Radar-Messung aufgrund der großen Unsicherheiten zur Modellkalibrierung nur unzureichende Aussagekraft besitzt, bringen die Laser-Scanner-Technik und die terrestrischen Verfahren (Treibboot) brauchbare Ergebnisse. Die Einsatzmöglichkeiten sind abhängig von der Größe des zu erfassenden Gebietes, der erforderlichen Messpunktdichte, der zur Verfügung stehenden Erfassungszeitspanne und der Zugänglichkeit bzw. Befahrbarkeit der überfluteten Flächen.

Vor allem bei größeren Untersuchungsgebieten stellen zur flächenhaften Erfassung des Hochwasserscheitels vor allem die zeitliche und räumliche Abstimmung der Messkampagne auf den Scheiteldurchgang eine besondere Herausforderung dar. Bei der Formulierung einer realistischen Genauigkeitsanforderung an gemessene Hochwasserstände zur Modellkalibrierung müssen zudem auch Aspekte wie Wellengang und Windstau sowie die Unsicherheiten der Abflusszuordnung berücksichtigt werden.

Die aufbereitete Datenstruktur der lagebezogenen Wasserspiegelhöhen gleicht der von Geländehöhen. Man erhält bei unregelmäßiger Messpunktverteilung Koordinatentripel mit Rechts- und Hochwert und einer Z-Koordinate, die in einer Vektorstruktur (2D/3D) oder als kontinuierliches Feld über das TIN-Konzept gespeichert werden können, und bei äquidistanten Abständen eine Rastermatrix der Gewässeroberfläche. Bei Höhenmodellen, welche die Wasseroberfläche mit Geländehöhen der nicht überfluteten Bereiche in einem Datensatz zusammenführen, kann die Erfassung bzw. Definition der Wasser-Land-Grenzlinien als (3D-) Bruchkanten notwendig werden. Bruchkanten oder sogenannte „Barriers“¹⁷ können auch an sprunghaften Änderungen der Wasseroberfläche (z.B. an Absturzbauwerken) die Qualität des Oberflächenmodells verbessern.

Analog zu den gemessenen Wasserspiegellagen können natürlich auch berechnete Wasserstände mittels GIS verwaltet und weiterverarbeitet werden. Bei der zweidimensionalen Strömungssimulation erhält man als Ergebnis für jeden Knoten des unstrukturierten Berechnungsnetzes bzw. strukturierten Gitters einen Wasserstand ($y(Q,t)$), so dass auch hier wiederum eine Verknüpfung von Geometriedaten und Sachdaten (Wasserstände, Abflussmenge, Zeitpunkt) und die Erzeugung eines 3D-Oberflächenmodells möglich ist. Eindimensional ermittelte Wasserstände beziehen sich auf die Lage der Querprofile (Berechnungstützpunkte) des HN-Modells. Die Speicherung eines WSP-Längsprofils erfolgt i.d.R. zunächst tabellarisch in Abhängigkeit der Gewässerstationierung. Möglichkeiten ihrer flächenhaften Behandlung in GIS werden in Kap.6.4 erörtert.

5.1.3 Überflutungsgrenzen

Ein vorrangiges Ziel des GIS-Einsatzes im Rahmen der Hochwassermodellierung ist die Ermittlung bzw. Visualisierung von Überflutungsgrenzen. Liegen Dokumentationen zur Überflutungsgrenze zurückliegender Hochwasserereignisse vor, kann eine Validierung der Modellergebnisse mittels GIS erfolgen. Hierbei ist jedoch die Zuverlässigkeit der Grenzlinien-Dokumentation kritisch zu hinterfragen. So ist neben der Kenntnis des Aufnahmeverfahrens auch die gewissenhafte Dokumentation des Zeit-

¹⁷ Bei der Erzeugung kontinuierlicher Datenfelder durch Interpolation diskreter Verteilungen können bei einigen Interpolationsalgorithmen Linienstrukturen als räumliche Interpolationsgrenze („Barrier“) definiert werden.

punktes der Aufnahmen unbedingte Voraussetzung für eine spätere Interpretation im Rahmen der Modellvalidierung. Die zur originären Erfassung von Wasser-Land-Grenzlinien prinzipiell zur Verfügung stehenden Vermessungsmethoden mit ihren verfahrensbezogenen Unsicherheiten sind in Abb. 5-3 aufgeführt.

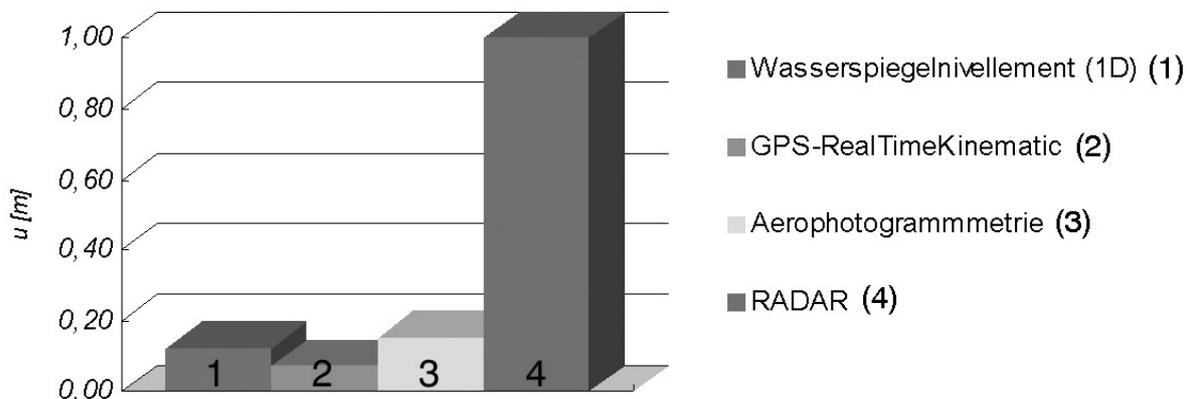


Abb. 5-3 Verfahrensbezogene 3D-Linien-Höhenunsicherheiten u ($S=95\%$), Wasser-Land-Grenzlinie (Werte: [Dtsch. Gewässerkundl. Mittlg., 1998; Brockmann, 1999])

Nach [Brockmann, 1999] ist zur direkten dreidimensionalen Grenzlinienerfassung für klein- bis mittelräumige Bereiche GPS-RealTimeKinematic (3D-Linien-Höhenungenauigkeit $u < 0,1$ m) das wirtschaftlichste Verfahren, sofern alle Voraussetzungen für die Anwendbarkeit erfüllt sind (Horizontfreiheit etc.). Für großräumige Gebiete erzielen photogrammetrische Bildflugauswertungen gute Ergebnisse ($u < 0,2$ m). Eine sinnvolle Alternative zur originären dreidimensionalen Grenzlinienerfassung stellt die Verknüpfung zweidimensionaler Grenzlinien auf Grundlage von Orthofotos mit Höhenmodellen zur Gelände- und/oder Wasseroberfläche dar.

Aufgrund der Schwierigkeit, eine flächendeckende Erfassung der Überschwemmungsgrenze zeitlich auf den Scheiteldurchgang einer Hochwasserwelle abzustimmen, basieren die Dokumentationen von Überschwemmungsgrenzen i.d.R. auf Eintragungen zur Geschwemmsellinie und den Angaben von Anwohnern in analogem Kartenmaterial. Diese Informationsquellen sind häufig mit großen Unsicherheiten behaftet. Zudem werden punktuelle Angaben in den Karten oft zu einer Linie verbunden, ohne die originären Daten entsprechend zu kennzeichnen. Eine Diskussion der Unsicherheiten von Hochwasserfixierungen und ihrer Auswirkung auf die Interpretation der Simulationsergebnisse wird in Kap.7.3.5 in allgemeiner Form und in Kap.8.3.3 anhand ausgewählter Beispiele gegeben.

Gemessene und berechnete Wasser-Land-Grenzlinien können im GIS als Linien (2D/3D) oder Polygone (Überflutungsflächen) verwaltet werden.

5.1.4 Digitale Karten und Orthofotos

Topographische Karten werden zur Voranalyse des Untersuchungsbereiches, zur Datenerfassung (Digitalisierung von Höheninformationen) bzw. -plausibilisierung sowie zur Analyse und Präsentation von Berechnungsergebnissen genutzt.

Bei den Landesvermessungsämtern sind topographische Karten in verschiedenen Maßstäben zu beziehen. Größtenteils können diese bereits in digitaler georeferenzierter Form geliefert und über einfache Formatanpassungen als Rasterbild in GIS importiert werden. Oftmals verfügen die Anliegerkommunen über nutzbares Kartenmaterial in großen Maßstäben. Analoge Karten können eingescannt und mittels GIS georeferenziert werden.

Neben georeferenzierten Karten stellen auch die digitalen Geodatenbestände des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) sowie der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) der Landesvermessungsämter eine hervorragende Informationsquelle zur Beschreibung von Objekten und Flächennutzungen im Untersuchungsgebiet dar. Die Vektordaten des Digitalen Landschaftsmodells (ATKIS-DLM) beruhen auf der blattschnittfreien Digitalisierung der im amtlichen Kartenwerk abgebildeten Themen u.a. aus den Objektbereichen Siedlung, Verkehr, Vegetation und Gewässer (z.B. Deiche, Wasseroberflächen, Flächennutzungen, Verkehrswege) und weisen eine Lagegenauigkeit von bis zu +/- 2 m auf. Die Grundrissdaten zu Gebäuden und Flurstücken der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) basieren zum großen Teil auf vermessungstechnischen Berechnungen und weisen hierdurch eine entsprechend höhere Lagegenauigkeit auf.

Die Geodatensätze der Landesvermessungsämter werden in GIS-kompatiblen Formaten geliefert. Über die Vektordaten kann im GIS der Zugriff auf ein umfassendes objektbezogenes Sachdatenregister (z.B. Angaben zur Gebäudenutzung) erfolgen. In Abb. 5-4 sind einige Überlagerungsmöglichkeiten errechneter Überflutungsflächen mit Raster- und Vektordaten in GIS exemplarisch dargestellt.

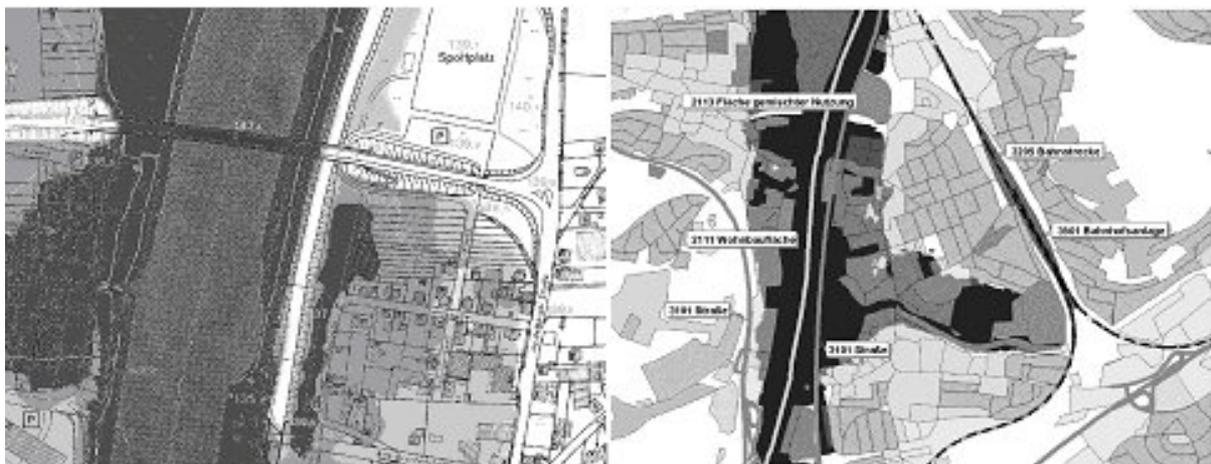


Abb. 5-4 Exemplarische Überlagerung errechneter Überflutungsflächen mit georeferenzierter DGK5 (links) sowie Vektordatensätzen des ATKIS-DLM (rechts)

Aktuelle Luftbilder des Untersuchungsbereiches bieten die Möglichkeit, Rückschlüsse auf die Oberflächenbeschaffenheit (Bewuchs) der Vorländer zu ziehen und geben somit wichtige Hinweise zur Definition bzw. Plausibilisierung von Fließwiderständen (Rauheitsparameter). Über den Vergleich historischer Bilddokumente mit aktuellen Aufnahmen können die hydraulisch relevanten Veränderungen (morphologische Strukturen, Vegetation, anthropogene Eingriffe) innerhalb des Modellgebietes analysiert und zur Verbesserung der Prognosefähigkeit des Modells berücksichtigt werden. Luftbilddokumentationen von Hochwasserereignissen stellen zudem ein sinnvolles Hilfsmittel dar, um Aussagen über abflusswirksame und retentionsrelevante Bereiche zu treffen. Zudem können mit ihrer Hilfe die berechneten Überschwemmungsgrenzen bezüglich ihrer Lagegenauigkeit validiert werden.

Besonders praktikabel sind hierbei digitale Orthofotos (entzerrte Luftbilder), die georeferenziert als Hintergrundebene im GIS zur manuellen Digitalisierung von Flächen mit Bewuchs- bzw. Rauheitsattributen oder Wasser-Land-Grenzlinien dienen können (siehe Abb. 5-5). Orthofotos können bei den Landesvermessungsämtern in unterschiedlichen Maßstäben und Aktualitäten bezogen werden. Luftbilddokumentationen von Hochwasserereignissen liegen z.T. bei den zuständigen Stellen des Bundes, der Länder oder der Kommunen vor.

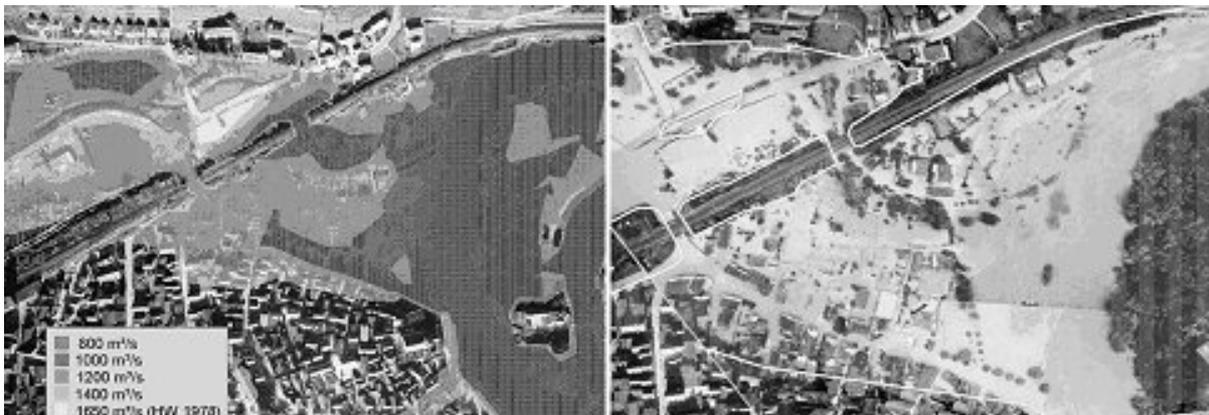


Abb. 5-5 Überlagerung georeferenzierter Luftbildaufnahmen (vor und während eines Hochwasserereignisses) mit errechneten Überflutungsflächen sowie der digitalisierten Überflutungsgrenze (exemplarisch)

Die Satellitenfernerkundung dringt mittlerweile in Maßstäbe vor, die bisher dem Luftbild vorbehalten waren [Blaschke, 1998]. In der Hydrologie schon seit längerem genutzt, könnten Satellitenbilder in Zukunft auch für die Hochwasserhydraulik nutzbare Informationen liefern.

5.1.5 Nicht georeferenzierte Daten

Eine für Modellersteller und Modellanwender äußerst praktikable GIS-Applikation¹⁸ stellt die Möglichkeit der Koppelung von nicht georeferenzierten digitalen Daten (z.B. Bild- oder Textdateien) an Vektordaten dar. Hierbei wird der Pfad zur jeweiligen Datei in der Attributstabelle gespeichert. Über Anklicken eines Vektorpunktes in GIS kann nun der direkte Zugriff z.B. auf Fotodokumentationen, Bauwerkspläne, Brückenprofile etc., erfolgen. Hierdurch kann eine raumbezogene Datenarchivierung mit interaktiver Zugriffsmöglichkeit realisiert werden.

5.2 Bezugssysteme zur Georeferenzierung

Grundlage der Behandlung von topographischen bzw. geometrischen Vermessungsdaten ist die Definition von Bezugsflächen zur Bestimmung von Lagekoordinaten und zugehörigen Höhenkoten. Aufgrund der Unregelmäßigkeit der Erdoberfläche und unterschiedlichen Massenverteilung im Erdkörper lässt sich die wahre geometrische Gestalt der Erde jedoch nur näherungsweise abbilden. Hieraus existieren zahlreiche geodätische Bezugssysteme, die je nach Problemstellung und darzustellenden Bereichen auf individuellen Festlegungen bzw. Modellannahmen beruhen. Voraussetzung für die Darstellung und Verschneidung mehrerer Geodatensätze ist die Übereinstimmung der Bezugssysteme. Im Rahmen der Fließgewässermodellierung ist der Anspruch bezüglich Systemkonsistenz und -genauigkeit besonders hoch, da die Datenerfassung, -verarbeitung und Ergebnisanalyse in Lagemaßstäben größer M 1:5000 und mit Höhenauflösungen im Zentimeterbereich erfolgen.

Beim Aufbau eines integralen Simulationssystems für Fließgewässer müssen Daten unterschiedlichster Herkunft zusammengeführt werden, deren Bezugssysteme nicht immer übereinstimmen. Gerade bei der gesamtheitlichen Erfassung grenzüberschreitender Fließgewässernetze, wie sie von den EU-WRRRL gefordert wird, können verschiedene landesspezifische geodätische Referenzsysteme zur Angabe von Lagekoordinaten und/oder Höhenwerten aufeinandertreffen und aufwendige Koordinatentransformationen erforderlich werden.

„Durch die vielen unterschiedlichen Koordinaten- und Bezugssysteme der einzelnen Länder wurden und werden länderübergreifende raumbezogene Projekte erheblich erschwert. Andererseits werden durch die Verbreitung der GIS-Technologien, durch den vermehrten Einsatz von GPS und durch die Internationalisierung von Handel, Politik und Umweltschutz immer mehr staatsübergreifende Geodaten benötigt. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist ein einheitliches Koordinatensystem mit einem einheitlichen Bezugssystem.“ [Killet, 1999]

Dieses Kapitel erläutert die Grundprinzipien verschiedener Verfahren zur Abbildung der unregelmäßigen Erdoberfläche auf eine Ebene und der Definition bzw. Ermittlung

¹⁸ „Hot-Link“-Funktion im GIS ArcView der Firma ESRI

von Höhenwerten. Hierbei werden die in unserem Raum gängigen Bezugssysteme näher beschrieben und Hinweise zur Datentransformation gegeben.

5.2.1 Ersatzflächen zur Abbildung der Erdoberfläche

Infolge ihrer Rotation um die Nord-Süd-Achse und der damit verbundenen Zentrifugalkraft weist die Erde am Äquator eine Aufwölbung und an den Polen Abflachungen auf. Zur mathematisch-geometrischen Bestimmung von Lagekoordinaten kann die Erdoberfläche näherungsweise als Rotationsellipsoid beschrieben werden. Um Abweichungen zwischen der wahren Form und der Approximation gering zu halten, basieren die unterschiedlichen nationalen und globalen Koordinatensysteme auf Ellipsoiden, die sich an den jeweiligen Geltungsbereich möglichst gut anpassen (vgl. Abb. 5-6). Ihre spezifischen Kennwerte, wie Größe, Ursprung und Ausrichtung, werden in ihrer Gesamtheit als „Geodätisches Datum“ bezeichnet. Für kleinere Länder kann u.U. auch die Wahl einer Kugel als Ersatzfläche adäquat sein. Messgebiete mit einer Ausdehnung von nur wenigen Kilometern werden zur Lagebestimmung i.d.R. als Ebene erfasst. [Witte & Schmidt, 2000]

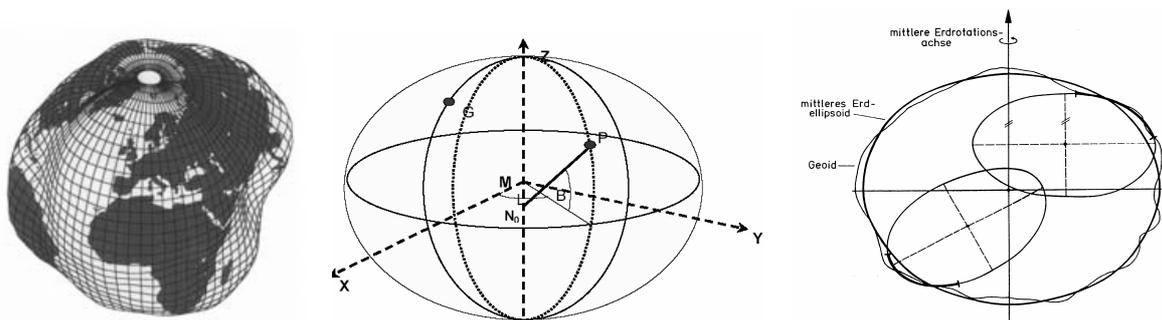


Abb. 5-6 Approximation der Erdform (links: in 15.000-facher Überhöhung) als Umdrehungsellipsoide (Quellen: LV B.-W.; [Heck, 1995])

Die unregelmäßige Verteilung der Masse im Erdkörper bzw. der daraus resultierenden Gravitationskräfte verursacht in Verbindung mit der Zentrifugalkraft ein unregelmäßiges Schwerfeld [Heck, 1995]. Die aus dem Schwerfeld abgeleitete Erdfigur, deren Oberfläche senkrecht zu den Feldlinien, d.h. orthogonal zur Richtung der Erdschwerebeschleunigung, läuft und mit den mittleren Meereshöhen zusammenfällt, wird als „Geoid“ bezeichnet. Die Abweichungen zwischen den Modellen Ellipsoid und Geoid sind zur Bestimmung von Lagekoordinaten praktisch vernachlässigbar. Die Berücksichtigung des Schwerfeldes hat jedoch Einfluss auf die geodätische Höhenmessung, welche gerade bei der Behandlung hydrologischer und hydraulischer Phänomene von großer Bedeutung ist. So hat der Einfluss des unregelmäßigen Schwerfeldes zur Folge, dass Höhennivellements mit gleichem Anfangs- und Endwert, die entlang verschiedener Wege geführt werden, zu unterschiedlichen Ergebnissen mit Differenzen im Meterbereich führen können (siehe Abb. 5-7).

„In der Praxis sollen Höhenangaben meist relativ zu einer „waagrechten“ Fläche angegeben werden. Die Wasserspiegelhöhe eines in Ruhe befindlichen Sees soll überall gleich sein. Eine solche Fläche verläuft senkrecht zu den Lotlinien, die aber durch das Geoid bestimmt sind. Es treten also Lotabweichungen (von den Senkrechten zum Ellipsoid) auf, die beispielsweise in Deutschland zwischen 0 und 20 Sekunden betragen können (Bauer, 1997). Wenn innerhalb eines 10 km langen Sees Unterschiede der Lotabweichungen von 20“ auftreten, so ergeben sich in einem System ellipsoidischer Höhen Höhendifferenzen von 0.97 m. Dem entspricht ein Gefälle von immerhin 0.1 ‰, also durchaus das Gefälle eines Tieflandflusses!“ [Fürst, 2002]

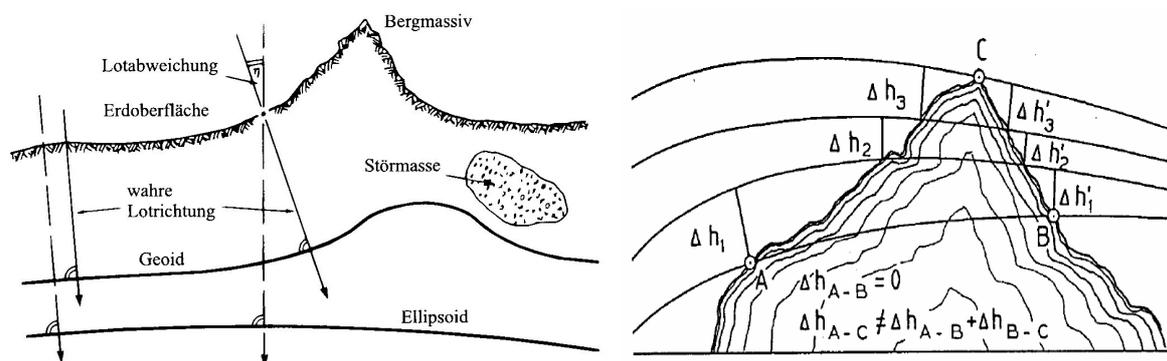


Abb. 5-7 Links: Höhenbezugsflächen (Quelle:[Witte & Schmidt, 2000]); Rechts: Die Nichtparallelität der Potentialflächen führt zu unterschiedlichen Höhendifferenzen beim geometrischen Nivellement (Quelle: [Bauer, 1997])

In den Landesvermessungen wird in konventioneller Weise zwischen dem Bezugssystem zur Lagebestimmung (Bezugsfläche: Ellipsoid) und dem der Höhenbestimmung (Bezugsfläche: Geoid) unterschieden. Moderne satellitengestützte Beobachtungsverfahren liefern hingegen direkt dreidimensionale Positionen, die wiederum in die Bezugssysteme der terrestrischen Netze transformiert bzw. integriert werden. Zielsetzung ist es, langfristig die verwirrende Vielzahl unterschiedlicher terrestrischer Referenzsysteme der Landesvermessungen durch ein einheitliches satellitengestütztes Bezugssystem zu ersetzen [DVW-Mitteilung, 1991].

5.2.2 Zweidimensionale Lagesysteme

5.2.2.1 Klassifizierung von Abbildungen

Die Definition der Lage eines Punktes auf der Erdoberfläche erfolgt über Koordinaten (Winkel und/oder metrische Längenmaße), die sich auf die gewählte Ersatzfläche (Rotationsellipsoid, Kugel) beziehen. Zur Abbildung der gekrümmten Oberfläche auf die Ebene müssen die ellipsoidischen bzw. sphärischen Koordinaten über mathematische Abbildungsgleichungen in ebene rechtwinklige oder polare Koordinaten umgeformt werden. Hierbei können nicht alle geometrischen Eigenschaften, wie Winkel,

Strecke oder Flächengröße, erhalten bleiben. Die Art und der Grad der Verzerrungen ist verfahrensabhängig und ihr Einfluss umso gravierender, je größer das abzubildende Gebiet ist. Entweder wird die Erhaltung einzelner Eigenschaften auf Kosten anderer optimiert oder eine mäßige Verfälschung aller Kenngrößen angestrebt. Die Auswahl einer geeigneten Abbildung hängt von der Lage und Größe des Untersuchungsgebietes sowie den Zielgrößen ab, die aus der Kartendarstellung abgeleitet werden sollen.

Die meisten Abbildungsverfahren lassen sich über die Vorstellung der Projektion der Netzlinsen des Ausgangskörpers auf geometrische Hilfsflächen, die auf eine Ebene „abgewickelt“ werden, veranschaulichen. Es existieren drei unterschiedliche Grundvarianten: Die azimutale Projektion auf eine Ebene, die Kegelprojektion sowie die Zylinderprojektion. Die Abbildungsflächen können jeweils normal, transversal oder schiefachsig die Kugel tangential berühren oder als Sekante schneiden.

5.2.2.2 Gauß-Krüger-System

Das Bezugssystem „Gauss-Krüger“ (GK) beruht auf einer ellipsoidischen Abbildung der Erdoberfläche in einem ebenen rechtwinkligen Koordinatensystem. Die Abbildungsart kann näherungsweise geometrisch als transversale Zylinderprojektion gedeutet werden. Sie ist winkeltreu (konform) und entlang der Bezugsmeridiane¹⁹ auch längentreu. Um die mit zunehmendem West/Ost-Abstand größer werdenden Längen- und Flächenverzerrungen möglichst gering zu halten, beziehen sich die Abbildungen immer nur auf einen wenige Grad breiten Meridianstreifen. Als Bezugsfläche finden verschiedene Ellipsoide mit jeweils spezifischen Kennwerten Verwendung.

1927 wurde das Gauss-Krüger-Meridianstreifensystem in Deutschland amtlich eingeführt. Die kartesischen Koordinatenangaben beziehen sich auf ca. 3° breite, sich um ca. 0,5° überlappende Streifen um die Hauptmeridiane 6°, 9°, 12° und 15° östlich von Greenwich (siehe Abb. 5-8). Jeder der GK-Meridianstreifen hat eine Kennziffer, die sich aus der Division der Gradzahl des Hauptmeridians durch drei ergibt. Zur Definition der geographischen Lage eines Punktes ist die Kennziffer des jeweiligen Meridianstreifens sowie ein Hochwert und ein Rechtswert anzugeben. Der Hochwert beschreibt den Nord-Süd-Abstand des Punktes vom Äquator in Metern (Abszisse). Über den Rechtswert lässt sich der Ost-West-Abstand zum Hauptmeridian bestimmen (Ordinate), wobei dieser, um negative Rechtswerte zu vermeiden, einen Ausgangswert von 500.000 m zugewiesen bekommt („false-easting“). Als Bezugsfläche wird in Deutschland das Erdellipsoid von *Bessel (1841)* mit dem in der Nähe der Berliner Sternwarte gelegenen Zentralpunkt²⁰ „Rauenberg“ zugrunde gelegt.

¹⁹ Meridian: Längengrad. Die sich von Pol zu Pol erstreckenden Meridiane sind die Hälfte von Großkreisen, die sich in beiden Polen schneiden. Bezugsmeridian: Längengrad, an welchem der Zylinder tangential anliegt bzw. als Sekante schneidet.

²⁰ Als Zentralpunkt bezeichnet man den Ausgangspunkt einer Landestriangulation, für den durch astronomische Messungen die geographischen Koordinaten bestimmt wurden [Witte & Schmidt, 2000]

In den Überlappungsbereichen der GK-Meridianstreifen beträgt die maximale Längenverzerrung ca. 12 cm pro Kilometer [Witte & Schmidt, 2000]. Neben den auf die Projektionsverzerrung zurückzuführenden Spannungen zwischen direkter Messung und Koordinatenberechnung entstehen zusätzliche Differenzen aufgrund der sogenannten Höhenreduktion. Diese ist darauf zurückzuführen, dass alle Lagemessungen (mathematisch) auf die Oberfläche des Bezugsellipsoides projiziert werden. Die Differenz beträgt bei einem Höhenunterschied zwischen Messgebiet und Ellipsoid von $\Delta h = 500$ m jedoch weniger als 0,1 Promille [Witte & Schmidt, 2000]. Für wasserwirtschaftliche Fragestellungen sind die Verzerrungen i.d.R. irrelevant.

Die Realisierung des geodätischen Referenzsystems in der Landesvermessung erfolgt über das Deutsche Hauptdreiecksnetz DHDN, welches über verschiedene Verdichtungsstufen durch vermarktete trigonometrische Festpunkte (TP) mit einem Punktabstand von 1-3 km [Witte & Schmidt, 2000] eine ausreichende Anzahl zugänglicher Anschlusspunkte für lokale Vermessungen zur Verfügung stellt.

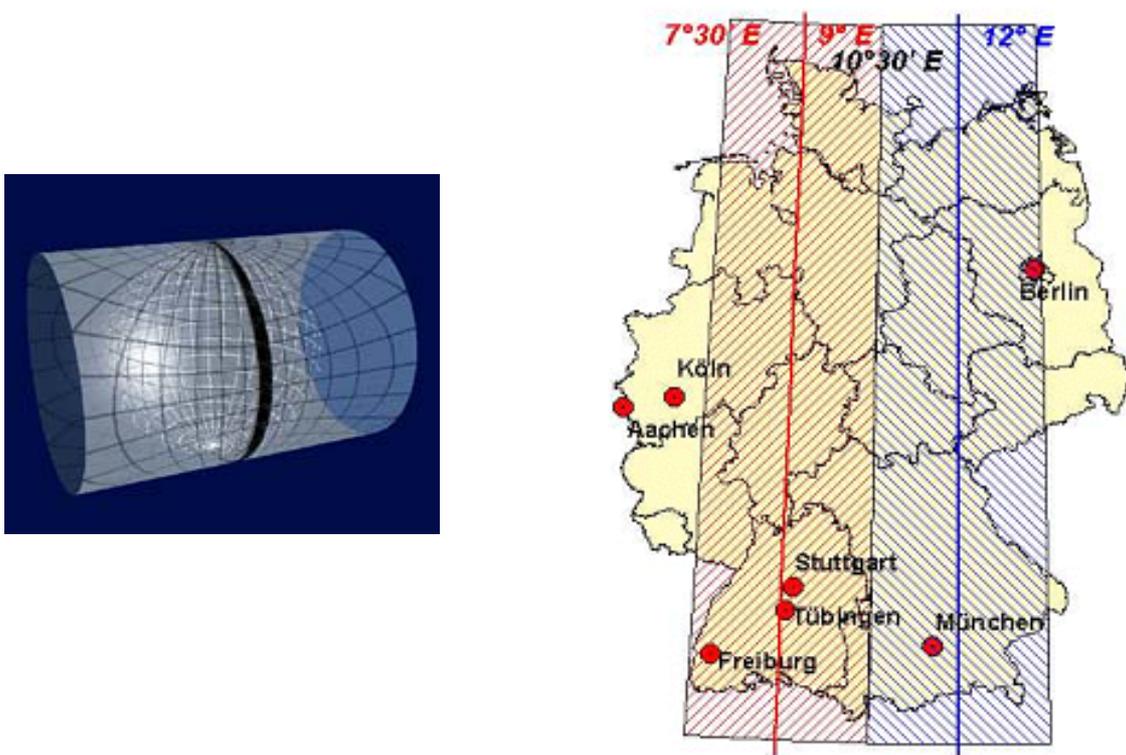


Abb. 5-8 Schema der transversalen Zylinderprojektion und Darstellung der Gauss-Krüger-Meridianstreifen (Zonen 3 und 4) [Quelle: www.kowoma.de]

5.2.2.3 Universal Transverse Mercator –System

Das „Universal Transverse Mercator“ (UTM) –System, welches nahezu die gesamte Erde erfasst, definiert insgesamt 60 Meridianstreifen (Zonen) mit einer Breite von jeweils 6° . Im Gegensatz zum GK-System werden 2 parallele Schnittkurven im Ab-

stand von 180 km beiderseits des Mittelmeridians längentreu abgebildet. Zwischen den Schnittkurven wird die Abbildung verkleinert, die Außenbereiche hingegen vergrößert. In der geometrischen Anschauung entspricht dies einem Schnittzylinder. Trotz im Vergleich zum GK-System verdoppelter Streifenbreite kann hierdurch auch beim UTM-System die Verzerrung in Grenzen gehalten werden. So wird für den Mittelmeridian ein Verjüngungsfaktor von 0,9996 zur Anwendung gebracht, die Längenverzerrung der Grenzmeridiane beträgt lediglich 1,00015 [Werner v. & Krywkow 1998,1999; Witte & Schmidt, 2000; Hake & Grünreich 1994]. Das UTM-System wird für unterschiedliche Bezugsellipsoide verwendet. In Europa beruht es i.d.R. auf dem Internationalen Erdellipsoid nach Hayford [Witte & Schmidt, 2000], so z.B. als europäischer Nato-Standard im militärischen Geowesen [Killet, 1999].

5.2.3 Höhensysteme

Zur Behandlung hydrologischer und hydraulischer Fragestellungen ist die Präzision von Höhenangaben bzw. die Übereinstimmung der gewählten Bezugssysteme entscheidend. Gerade bei der Simulation eines Hochwasserabflusses und den hieraus abzuleitenden Entscheidungen liegt die Modellsensitivität bzw. Genauigkeitsanforderung bezogen auf die Höhenwerte in einer deutlich feineren Skalierung als die der Lagebestimmung. Dies kommt schon durch die üblicherweise überhöhte Darstellung von Fluss-Vorland-Querprofilen zum Ausdruck. Während eine Lageverzerrung der Geodatenbasis eines Untersuchungsgebietes um mehrere Meter im Toleranzbereich liegen kann, wirken sich Unstimmigkeiten in den Höhenangaben u.U. bereits im Dezimeterbereich folgeschwer aus.

Analog zu den nationalen Lagefestpunktnetzen existieren zur Anbindung örtlicher Höhenmessungen offizielle flächendeckende Höhenfestpunktnetze (Nivellementpunktfelder oder „NivP-Felder“). In Deutschland basieren die NivP-Felder der Landesvermessungsämter auf dem Deutschen Haupthöhennetz (DHHN) und beziehen sich auf den Pegel Amsterdam. Die Bezugsfläche (Normalnull-Fläche (NN)) für alle Höhenmessungen in Deutschland fällt somit ungefähr mit dem Mittelwasser an der deutschen Nordseeküste zusammen. Der mittlere Durchmesser der Maschen beträgt beim NivP-Feld 3.Ordnung 2-10 km. [Witte & Schmidt, 2000]

Das Schwerefeld wurde ursprünglich nur über eine normalorthometrische Höhenreduktion, d.h. den Einfluss der Abplattung der Erde und Abnahme der Zentrifugalkraft zum Pol hin, berücksichtigt. Das DHHN12 von 1912 wurde in den 80er Jahren durch das DHHN85 auf den neuesten Stand der Technik gebracht. Dieses wurde jedoch nicht in allen (alten) Bundesländern eingeführt. In den neuen Bundesländern arbeitete man seit 1979 mit den Normalhöhen des Staatlichen Nivellementnetzes 1976 (SNN76). Als Bezugspunkt diente der Pegel Kronstadt bei St. Petersburg mit einem ca. 15 cm höher als in Amsterdam liegenden mittleren Meeresspiegel. Nach der Wiedervereinigung wurde für alle Bundesländer die Einführung des DHHN92 beschlossen, welches im Gegensatz zu den Vorgängersystemen die ungleichmäßige

Verteilung des Schwerefeldes (siehe Kap.5.2.1) berücksichtigen wird. Laut Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) können nun Gebrauchshöhen im DHHN92 direkt aus GPS-Höhen (ETRS89; siehe Kap.5.2.5) im Genauigkeitsbereich von 1-2 cm abgeleitet werden. Zwischen den Höhensysteme DHHN12 und DHHN92 können, abhängig vom lokalen Schwerefeld, Unterschiede von $\Delta h > 1$ dm auftreten. Die Umstellung auf das neue Höhensystem wurde bisher noch nicht abgeschlossen.

Wesentlich gravierender als die Unterschiede zwischen DHHN12 und DHHN92 wirkt sich die Tatsache aus, dass neben den Haupthöhennetzen eine Vielzahl von unterschiedlichen landesteil- und fachbereichspezifischen Höhennetzen existiert. So kursieren in Baden-Württemberg beispielsweise bei vielen Gemeinden bzw. städtischen Vermessungsämtern Höhenangaben mit Bezug zum alten badischen bzw. alten württembergischen Höhennetz, welche im Lauf des letzten Jahrhunderts keine Anbindung an das DHHN erfahren haben. Im ehemaligen württembergischen Landesteil betragen die Horizontdifferenzen zwischen dem Haupthöhennetz und den alten Systemen ca. - 6 cm im Norden und bis ca. + 40 cm im Süden. Im Stuttgarter Raum von ca. + 12 cm bis ca. + 18 cm; im ehemaligen badischen Landesteil von ca. + 3 cm im Norden bis ca. + 12 cm im Süden²¹.

Bei der Zusammenführung von Höhendaten und deren Weiterverarbeitung ist daher auf die Konsistenz des Bezugssystems zu achten. Eine exakte Umrechnung großräumiger Datensätze (z.B. Querprofilaufnahmen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung) ist nur unter Berücksichtigung des ungleichmäßig verteilten Schwerefeldes²² möglich. Die Entscheidung, ob und mit welchem Aufwand eine Höhenanpassung erfolgen soll, muss unter Berücksichtigung der ursprünglichen vermessungstechnischen Aufnahmegenaugigkeit und der Modellanforderungen getroffen werden. Genaue Informationen und Empfehlungen zu den Umrechnungsmöglichkeiten können bei den Landesvermessungsämtern eingeholt werden. Bei grenzüberschreitender Modellierung ist die Kompatibilität des Bezugssystems zum Nachbarland zu überprüfen²³.

5.2.4 Globales dreidimensionales Bezugssystem (World Geodetic System)

Bereits seit 1960 wurden im Zusammenhang mit dem amerikanischen Satellitennavigationssystem vom U.S. Department of Defense verschiedene globale terrestrische Referenzsysteme (World Geodetic System) eingeführt, welche nicht nur rein geometrische Parameter (z.B. Kenngrößen eines Referenzellipsoides, Koordinaten der Zentralpunkte) enthalten, sondern auch eine Fülle physikalischer Parameter zur Berech-

²¹ Quelle: Meichle, Helmut; Referatsleiter „Höhen- und Schwerefestpunktfeld“ des Landesvermessungsamtes B.-W.; telef. Mittlg. vom 19.02.03

²² In den neuen Bundesländern liegen Schwerewerte mit einer mittleren Dichte von einem Schwerewert pro 2 km² vor. In den alten Bundesländern ist die Dichte geringer und weniger homogen.

²³ Laut Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) wurde im Bereich der Staatsgrenzen ein Austausch von mittleren Schwereanomalien (2 x 2 km) mit den Nachbarstaaten zur Stabilisierung des Modells im Randbereich durchgeführt.

nung von Erdrotation und –deformation sowie Satellitenbahnen [Heck, 1991]. Durch die mittlerweile vielseitige Verwendung des Satellitennavigationsverfahrens GPS²⁴ mit relativen Genauigkeiten im Zentimeter- bis Subzentimeterbereich gewann international (und natürlich auch in Deutschland) das 1984 festgelegte „World Geodetic System WGS84“ als globales Bezugssystem an Bedeutung [Witte & Schmidt, 2000].

Beim WGS84 handelt es sich um ein mit der Erde rotierendes, geozentrisch (im Erdschwerpunkt) gelagertes dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem. Für praktische Zwecke werden die geozentrisch-dreidimensionalen Koordinaten X, Y, Z in geographische Koordinaten mit ellipsoidischer Höhe (B, L, h_{ell}) umgerechnet (Abb. 5-9). Als Bezugsfläche wird das geozentrisch gelagerte Erdellipsoid des „Geodetic Reference System GRS80“ eingesetzt. Hieraus lassen sich wiederum zweidimensionale Koordinaten, wie man sie für Anschluss- bzw. Stützpunkte benötigt (z.B. in Gauss-Krüger, UTM), ermitteln [Witte & Schmidt, 2000] (vgl. Kap.5.2.6).

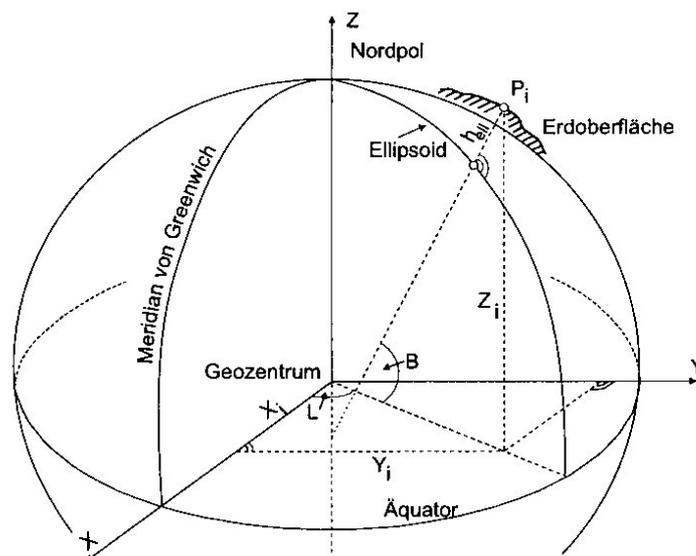


Abb. 5-9 Dreidimensionale kartesische Koordinaten (X, Y, Z), geographische Koordinaten (B, L) und ellipsoidische Höhe (h_{ell}) eines Punktes auf der Erdoberfläche (Quelle: [Witte & Schmidt, 2000])

5.2.5 Einführung eines einheitlichen Standards

Um eine staaten- und länderübergreifende Nutzung von Geodaten zu vereinfachen, wird die Einführung eines weltweit einheitlichen Bezugssystems über das IERS-Terrestrial Reference Frame (ITRF; IERS = International Earth Rotation Service) angestrebt. Die Koordinatenermittlung der Primärpunkte des ITRF basieren auf hochgenauen satellitengestützten Beobachtungsverfahren. Als europäisches Datum wurde hierzu das „European Terrestrial Reference Datum 1989“ (ETRF89) bestimmt,

²⁴ GPS = Global Positioning System

dessen interne Genauigkeit mit 1-2 Zentimetern angegeben wird [Heck, 1991]. Als Bezugsellipsoid dient das „Geodetic Reference System GRS80“ und als Abbildungssystem UTM. Das System hat u.a. den Vorteil, dass GPS-Daten im WGS84 mit Abweichungen $< 1\text{m}$ übernommen werden können [AdV, 1998].

Die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsämter der Bundesrepublik (AdV) hat 1991 beschlossen, das ETRS89 für alle Aufgabenbereiche des Vermessungs- und Katasterwesens einzuführen. Der Zeitpunkt der Einführung ist in Deutschland Ländersache. Die Umstellung wird noch einige Jahre in Anspruch nehmen, wobei in dieser Zeit die bisher verwendeten Bezugssysteme neben den neuen verwendet werden müssen [Killet, 1999]. Mittelfristig wird man also weiterhin mit unterschiedlichen Referenzsystemen für die Positionsbestimmung leben müssen und dadurch auch mit dem Problem der Koordinatentransformation und Netzintegration [Heck, 1991].

5.2.6 Transformation von Koordinaten und Höhen

Unter Transformation versteht man die rechnerische Umwandlung von Koordinaten und Höhen aus einem Startsystem in ein Zielsystem. Die mathematischen Beziehungen zwischen beiden Systemen werden durch Transformationsgleichungen beschrieben. Gleichartige Koordinaten und Höhen lassen sich direkt und eindeutig über algebraische Berechnung ineinander überführen, ohne dass Restklaffungen zwischen den ursprünglichen und umgerechneten Punkten auftreten. Dies ist i.d.R. dann der Fall, wenn beide Koordinatensysteme das gleiche Bezugsellipsoid zugrunde legen. Als Beispiel kann die Überführung kartesischer Koordinaten X, Y, Z in das B, L, h -System eines Bezugsellipsoids oder die Transformation benachbarter GK-Meridianstreifen genannt werden.

Kartesische Koordinaten lassen sich nach folgenden Beziehungen eindeutig aus ellipsoidischen herleiten [Heck, 1995; DVW, 1991]:

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cos B \cos L \\ Y &= (N + h) \cos B \sin L \\ Z &= ((1 - e^2) N + h) \sin B \end{aligned} \quad (5-1)$$

mit $e^2 = (a^2 - b^2)/a^2$ erste numerische Exzentrizität
 (a große Halbachse, b kleine Halbachse)
 $N = a/(1 - e^2 \sin^2 B)^{1/2}$ Querkrümmungsradius

Für die Umkehrung besteht allerdings nur eine iterative Lösung:

$$\begin{aligned} L &= \arctan (Y/X) \\ B &= \arctan \{Z/(X^2 + Y^2)^{1/2} ((1 - e^2)N / (N + h))^{-1}\} \\ H &= (X^2 + Y^2)^{1/2} / \cos B - N \end{aligned} \quad (5-2)$$

Bei ungleichartigen Koordinaten und Höhen haben die betreffenden Bezugssysteme keine unmittelbare geodätisch-mathematische Beziehung zueinander. Die Transformation von einem lokalen ellipsoidischen in ein globales System erfolgt über räumliche Ähnlichkeitstransformation bzgl. kartesischer Koordinaten (i.allg. mit 7 Parametern für räumliche Translation, Rotation und Maßstab) sowie (differentielle) Änderung der Ellipsoidparameter. Die vereinfachte Beziehung zwischen den lokalen Systemkoordinaten (x_L, y_L, z_L) und den globalen Koordinaten (x_G, y_G, z_G) lautet nach [Heck, 1991]:

$$\begin{pmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta a_x \\ \delta a_y \\ \delta a_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & z_L & -y_L \\ -z_L & 0 & x_L \\ y_L & -x_L & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{pmatrix} \cdot \delta m \quad (5-3)$$

mit ε Drehwinkel
 δa Translationsparameter
 δm Maßstabsfaktor

Da die Transformationsparameter i.A. nicht mit ausreichender Genauigkeit bekannt sind, erfolgt die Umformung näherungsweise mit Hilfe von Stützpunkten, die in beiden Systemen bereits bestimmt vorliegen. Die Transformationsparameter werden hierbei i.d.R. durch Ausgleichungsverfahren ermittelt. Als Beispiel für die Zusammenführung ungleichartiger Koordinaten kann die Integration von GPS-Daten (WGS84) in terrestrische Landesvermessungsnetze (z.B. GK-System mit Bessel-Ellipsoid) genannt werden. Eine ausführliche Abhandlung der hierbei auftretenden Transformationsprobleme sowie eine vergleichende Bewertung verschiedener Integrationsansätze und Ausgleichungsverfahren finden sich in *Schmitt et al. (1991)* und *Jäger & Mierlo v. (1991)*.

Zur Transformation wurden eine Vielzahl von Programmen entwickelt und z.T. auch in GIS-Umgebungen integriert. Die genaue Kenntnis über die jeweiligen Ein- und Ausgangssysteme, ihre spezifischen Verabredungen und eventuell die entsprechenden Transformationsparameter ist jedoch Voraussetzung für ihre Anwendung. Zu beachten ist jedoch, dass die offiziellen Referenznetze²⁵ der amtlichen Vermessungsdienste über lange Zeiträume gewachsen und daher in sich nicht immer widerspruchsfrei sind [Fürst, 2002; Heck, 1991]. Gerade bei einer großmaßstäblichen Systembehandlung, wie sie im Rahmen der Hochwassermodellierung zugrunde gelegt wird, kann daher eine Einpassung von Geodaten in das amtliche Koordinatensystem über die Vorgabe lagebekannter trigonometrischer Festpunkte (TP) erforderlich werden. Auch hierfür wurden spezielle GIS-Applikationen entwickelt. Festpunkte

²⁵ Trigonometrisches Festpunktfeld (TP-Feld) der Landesvermessungsämter auf Basis des Deutschen Hauptdreiecksnetzes (DHDN)

oder Passpunkte können bezogen auf die amtlichen Referenzsysteme bei den Vermessungsämtern erworben werden.

Zur übersichtlichen Darstellung und Erläuterung der verschiedenen ebenen und räumlichen Transformationsverfahren für gleichartige und ungleichartige Koordinaten und Höhen wird auf [Landesvermessungsamt NRW, 1999] verwiesen.

5.3 Datenverwaltung in GIS

5.3.1 Objektorientierte Behandlung von Geo-Daten

Während anfänglich zur GIS-gestützten Erfassung und Analyse raumbezogener Daten aufgrund ihrer strukturellen Einfachheit rein analytische Modelle eingesetzt wurden, integrieren moderne Geo-Informationssysteme zunehmend objektorientierte Ansätze, die neben den geometrischen Informationen auch die sie charakterisierenden thematischen, strukturellen und räumlichen (topologischen) Eigenschaften sowie objektspezifische Behandlungsweisen bzw. Verhaltensregeln vorhalten. Dies kommt der menschlichen Denkweise deutlich näher, da es beim Einsatz von GIS nicht um die Abbildung geometrischer Formen (z.B. Linien, Flächen) sondern um die Behandlung realer Objekte (z.B. Straßen, Dämme, Flurstücke) geht. Bezüglich des Terminus „objektorientiert“ gibt es jedoch keine verbindliche Norm, sodass der Gebrauch in der Fachliteratur unterschiedlich erfolgt. Grundsätzlich kann hierbei in Zusammenhang mit GIS zwischen

- objektorientierter Programmiersprache,
- objektorientierter Datenverwaltung und
- objektbezogenem Arbeiten mit Realweltobjekten

differenziert werden. Ein vollständig objektorientiertes GIS, welches alle drei Komponenten verbindet wurde bisher (zumindest für den Praxisgebrauch) nicht realisiert.

5.3.2 Datenbankmodelle

Die vielfältigen Verknüpfungen raumbezogener Informationen sowie die z.T. großen Datenmengen und komplexen Analysefunktionen stellen hohe Ansprüche an die Datenorganisation im GIS. Moderne GIS-Software greift hierzu auf Datenbank (DB) - Modelle zurück, die entweder in das System integriert sind oder extern vorgehalten und über Schnittstellen gekoppelt werden. Hierdurch können die

- Konsistenz und Integrität der Daten gewährleistet,
- Redundanz vermieden und
- Zugriffsmöglichkeiten geregelt werden.

Die früher gängigen hierarchisch aufgebauten und netzwerk-strukturierten Modelle wurden von „relationalen Datenbank-Managementsystemen (RDBMS)“ abgelöst.

Hierbei werden die Objekte (Entitäten) bzw. deren Aggregationen (z.B. Objekt-Typ) sowie die Beziehungen (Relationen) in zweidimensionaler tabellarischer Form abgelegt. Die Zugriffsmechanismen basieren im Wesentlichen auf Selektion bzw. Projektion²⁶, Umbenennung und Mengenoperationen der relationalen Algebra. [Roesch, 1998; Heuer, 1997]

Dieses universell einsetzbare Konzept hat den Nachteil, dass es sich primär an den Datensätzen und nicht an den Objekten der realen Welt orientiert. Eine Weiterentwicklung stellen sogenannte objektorientierte Datenbankmodelle (ODBMS) dar. Die Definition eines „Objektes“ umfasst hierbei neben den Entitäten im relationalen Modell auch Eigenschaften, Beziehungen und spezifische Operationen (Methoden).

Der Entwurf eines ODBMS ist jedoch deutlich aufwendiger, da neben der Struktur auch das Verhalten der Objekte spezifiziert werden muss, und für den Anwender schwerer nachzuvollziehen [Heuer, 1997]. Derzeit befindet sich dieser Modellansatz noch am Anfang seiner Entwicklung und ist in kommerziell verfügbaren GI-Systemen bisher kaum zu finden.

5.3.3 Koppelung objektorientierter und relationaler Ansätze

Die kommerziellen GIS-Softwareprodukte ArcView und ARC/INFO verfügen über interne objektorientierte Programmiersprachen (AML, Avenue) und eine vom Anwender fachspezifisch erweiterbare Palette objektbezogener Funktionalitäten²⁷. Die Datenverwaltung und Abfragemethoden basieren jedoch auf dem klassischen „Entity-Relationship“-Modell. Die Geometrie-Daten eines Objektes werden getrennt von den tabellarisch organisierten Sachdaten in Dateistrukturen vorgehalten. Über die Softwaremodule „TABLES“ in ArcView bzw. „INFO“ in ARC/INFO können Datenmanipulationen und Abfragen (Queries) ausgeführt werden, die mit externen Datenbanksystemen vergleichbar sind. Die relationale Sachdaten-Organisation ermöglicht auch die Anbindung externer relationaler Datenbanken über bewährte und mächtige SQL- (Structured Query Language) und ODBC- (Open DataBase Connectivity) Schnittstellen. Von großem Vorteil ist auch die weite Verbreitung relationaler Datenstrukturen bei den Datenzulieferern (z.B. Landesbehörden).

Für die in der wasserwirtschaftlichen Arbeitspraxis gängigen Anwendungsfelder ist die GIS-interne Koppelung objektbezogener Funktionalitäten mit einem relationalen Datenhaltungsmodell durchaus effektiv und zielführend. Die dateibasierte Datenverwaltung in den o.g. GI-Systemen erfordert jedoch beim Aufbau eines anwendungsorientierten Decision-Support-Systems für eine größere (heterogene) Nutzergruppe

²⁶ Selektion: Auswahl eines Tupels (Zeile) aus einer Relation; Projektion: Auswahl von Spalten

²⁷ Als problematisch stellt sich bei flächenbezogenen Anwendungen in ArcView das Fehlen der Flächentopologie heraus. Zur topologischen Behandlung von Flächenthemen ist die Einbindung des deutlich mächtigeren „Muttersystems“ ARC/INFO erforderlich.

eine effektive, strikt organisierte Ablagestruktur (Verzeichnisbaum) mit der Möglichkeit der Vergabe individueller Zugriffsrechte.

Der Aufbau (Entwurf) und die Pflege eines externen Datenbank-Managementsystem erfordert einen erheblichen Mehraufwand, der bei der langfristigen Planung berücksichtigt werden muss. Voraussetzung hierzu ist die kontinuierliche Betreuung durch einen gut ausgebildeten DB-Administrator und die Einarbeitung der Anwender in die DB-Software und Anfragesprache (zusätzlich zur GIS-Schulung) bzw. die zusätzliche Programmierung entsprechend angepasster Benutzeroberflächen. Zukünftig wird der Einsatz zentral (landesweit) vorgehaltener und administrierter Geo-Datenbanken im Client-Server-Betrieb auch zur Bereitstellung von Daten und Modellen zur Hochwassersimulation eine immer größere Rolle einnehmen. Dies unter der Voraussetzung einer stabilen Netzperformance der zuständigen behördlichen Einrichtungen und entsprechender EDV-Versiertheit der Anwender.

6 GIS-Technologien zur Hochwassersimulation

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die technischen Grundlagen Geographischer Informationssysteme (GIS) und hydrodynamisch-numerischer (HN-) Verfahren erläutert sowie die Datengrundlagen zur Hochwassersimulation dargelegt. In den folgenden Abschnitten werden nun Möglichkeiten vorgestellt, die Basissysteme GIS und HN-Modell in effektiver Weise miteinander zu koppeln. Hierbei wird die Funktionspalette eines GIS bezüglich der Anwendbarkeit zum Aufbau eines Hochwassersimulationssystems unter Berücksichtigung der vorhandenen Datenlage sowie des eingesetzten HN-Verfahrens analysiert und anhand praktischer Beispiele bewertet.

6.1 Pre- und Postprocessing der HN-Modellierung

Die Besonderheit der Simulation von Hochwasserabflüssen (im Vergleich zu anderen hydraulischen Problemstellungen) liegt aus modelltechnischer Sicht u.a. darin begründet, dass hier eine flächenhafte Behandlung eines komplexen Fluss-Vorland-Systems gefordert ist, einhergehend mit der Notwendigkeit der Verarbeitung einer Vielzahl unterschiedlicher Datensätze zur Modellerstellung und Analyse der Berechnungsergebnisse. Zur Lagebestimmung der Ein- und Ausgangsdaten ist das in der Gerinnehydraulik gebräuchliche lineare Bezugssystem der Gewässerstationierung nicht ausreichend. Hierdurch kommen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten eines GIS bei der raumbezogenen Datenverarbeitung des Pre- und Postprozessing der Strömungssimulation voll zum Tragen. So unterstützen sie den Modellierer bzw. Modell Anwender u.a. bei der

- Voranalyse des Untersuchungsgebietes (Auswahl der Modellierungsmethode, Festlegung der Modellgrenzen etc.),
- Erfassung bzw. Aufbereitung topographischer Informationen und Zusammenführung zu einem Digitalen Geländemodell (DGM),
- Erstellung der Systemgeometrie des HN-Modells,
- Bestimmung von abfluss- und retentionswirksamen Bereichen sowie Kontrollquerschnitten,
- Definition von Fließwiderständen (z.B. über Analyse digitaler Orthofotos) und Geocodierung der Modellparameter,
- Aufbereitung und Visualisierung von Kalibrierungsdaten (HW-Fixierungen, Geschwemmsellinien, etc.),
- Ermittlung und Validierung von Überflutungsflächen und überflutungsgefährdeten Bereichen (z.B. hinter Schutzanlagen),
- Visualisierung und Analyse der Berechnungsergebnisse (z.B. Fließvektoren einer 2D-HW-Simulation, Wasserstandsdifferenzen bei Variantenstudien),

- sowie als Datenbank bzw. als Schnittstelle zu externen Datenbankmanagementsystemen.

Nicht zuletzt trägt der Einsatz moderner GIS-Software im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit dazu bei, über realitätsnahe Visualisierungsmöglichkeiten eine potenzielle Gefährdung durch Hochwasser in das Bewusstsein der betroffenen Bevölkerung zu rücken. Hierdurch kann ein weiterer wichtiger Beitrag zur Hochwasservorsorge (Verstärkung des eigenverantwortlichen Handelns, Verringerung der Schadenspotenziale etc.) geleistet werden.

Eine der bedeutendsten Aufgaben liegt jedoch in der Modellierung der Geländetopographie des Flusstales als Grundlage der Systemgeometrie des HN-Modells sowie der Ermittlung von Überflutungsflächen und wird daher im Folgenden eingehend behandelt.

6.2 Modellierung der Geländeoberfläche

Digitale Geländemodelle basieren auf der Erzeugung einer kontinuierlichen Oberfläche über Interpolation diskreter Höhenwerte und gegebenenfalls weiterer Strukturinformationen²⁸. Sie werden zur Behandlung vielfältiger Fragestellungen in geo- und umweltwissenschaftlichen sowie ingenieurtechnischen und militärischen Bereichen eingesetzt. Im wasserwirtschaftlichen Sektor umfassen ihre Einsatzgebiete z.B. hydrologische Themenstellungen, wie die Abgrenzung von Teileinzugsgebieten, Ermittlung von Gebietsparametern (Gefälle, Exposition etc.) und synthetischer Gewässernetze. Je nach Aufgabenbereich werden unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit, Dichte und Strukturinhalte der topographischen Datenbasis sowie die Auswahl der Interpolationsmethode gestellt.

Die Modellierung der Geländeoberfläche eines Fluss-Vorland-Abschnittes zur Simulation von Hochwasserereignissen kann folgende Zielsetzungen verfolgen:

- (1) Qualitätskontrolle der topographischen Basisdaten (Fehlererkennung und Filterung)
- (2) Erstellung der Systemgeometrie des hydrodynamisch-numerischen Modells
- (3) Ermittlung von Überflutungsflächen auf Basis berechneter oder gemessener Wasserstände

Die sich aus (2) und (3) ergebenden Anforderungen an die zugrunde liegenden Geometriedaten wurden bereits in Kap.5.1.1 erörtert. Das Anwendungsgebiet der Hochwassersimulation bringt aber auch spezifische Anforderungen an die eingesetzten Interpolationsmethoden mit sich. Die Besonderheiten der Geländemodellierung eines Fluss-Vorland-Systems liegen in der

²⁸ Geländekanten, Gerippelinien, Kuppen-, Mulden-, Sattelpunkte etc.

- starken Heterogenität der räumlichen Verteilung der Datenbasis (z.B. Zusammenführung von Querprofil Datensätzen mit Höhenlinien oder äquidistanten Gitterpunkten) bzw.
- stark differierenden Strukturcharakteristik der zu erfassenden Geometrien (Zusammenführung technischer Geometriedaten von Dammbauwerken mit unregelmäßig verteilten Kanaldeckelhöhen)
- bei einer gleichzeitig hohen Genauigkeitsanforderung bzgl. der Nachbildung der (hydraulisch) maßgebenden Strukturen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für über 200 Flusskilometer des Neckartals eine Vielzahl unterschiedlicher topographischer Datengrundlagen aufbereitet und zu einem Digitalen Geländemodell zusammengeführt. Hierbei wurden verschiedene gängige Verfahren auf ihre Anwendbarkeit getestet und speziell an die o.g. Randbedingungen angepasste Methoden erarbeitet. Die technischen Grundlagen und Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln anhand exemplarischer Beispiele dargestellt.

6.2.1 Aufbereitung der topographischen Datenbasis

Geometriedaten²⁹ können über Digitalisierungsfunktionen mittels GIS erfasst oder über Standard-Schnittstellen (z.B. DXF-Format, ASCII-Datei der Koordinatentripel bzw. Rastermatrix) importiert werden. In GIS werden die Datensätze nach Datentyp getrennt in einer oder mehreren Ebenen gespeichert. Vektordaten können durch Attributzuweisung (Datenquelle, Aktualität, Genauigkeit, Eingabedatum etc.) gekennzeichnet und über Selektier- bzw. Analysefunktionen behandelt werden. Hierdurch ist eine langfristige Verwaltung und übersichtliche Archivierung der Geometriedaten möglich. In Abb. 6-1 sind exemplarisch Geometriedaten unterschiedlicher Datenquellen mit der Attributstabelle der selektierten Vektordaten für einen Fluss-Vorland-Abschnitt des Neckars dargestellt.

Üblicherweise werden in GIS die geometrischen Beschreibungen von Vektordaten über zweidimensionale Koordinatenpaare (X,Y) und topologische Objekt-Beziehungen gespeichert. Die Höhenwerte (Z) werden als Sachinformation gemeinsam mit den sonstigen Attributen getrennt in tabellarischer Form vorgehalten und über ein i.d.R. relationales Datenbanksystem verwaltet.

Für die meisten Anwendungen ist dieses Konzept durchaus effektiv. Problematisch gestaltet sich die Reduzierung der Geometrie auf eine Ebene (X,Y-Koordinaten) allerdings bei der Erfassung linearer Strukturobjekte mit veränderlicher Höhe (z.B. Dammverläufe, Gewässertalwege). So können zwar einer Linie bestimmte Höhenwerte als Eigenschaft (Attribut) zugewiesen werden, nicht aber den einzelnen Stützpunkten, welche die Linie geometrisch beschreiben. Dieses Problem wurde in Arc-

²⁹ Eine Zusammenfassung möglicher Datenquellen findet sich in Kap.5.1.1

View (ESRI) über die Integration des Konzeptes der 3D-Vektoren gelöst. Hierbei werden alle Stützpunkte der Vektorobjekte über Koordinatentripel (X,Y,Z) geometrisch beschrieben, so dass die Datenerfassung sowie topologische Analysen und Verschneidungen auch dreidimensional durchgeführt werden können (vergleiche Kap.4.2.2.1). In Abb. 6-2 ist die geometrische Erfassung eines Schutzdammes über 3D-Bruchkanten als Grundlage zur Geländemodellierung dargestellt. Die Bruchkanten wurden mittels GIS aus einem CAD-Datensatz zur Baumaßnahme (links) generiert.

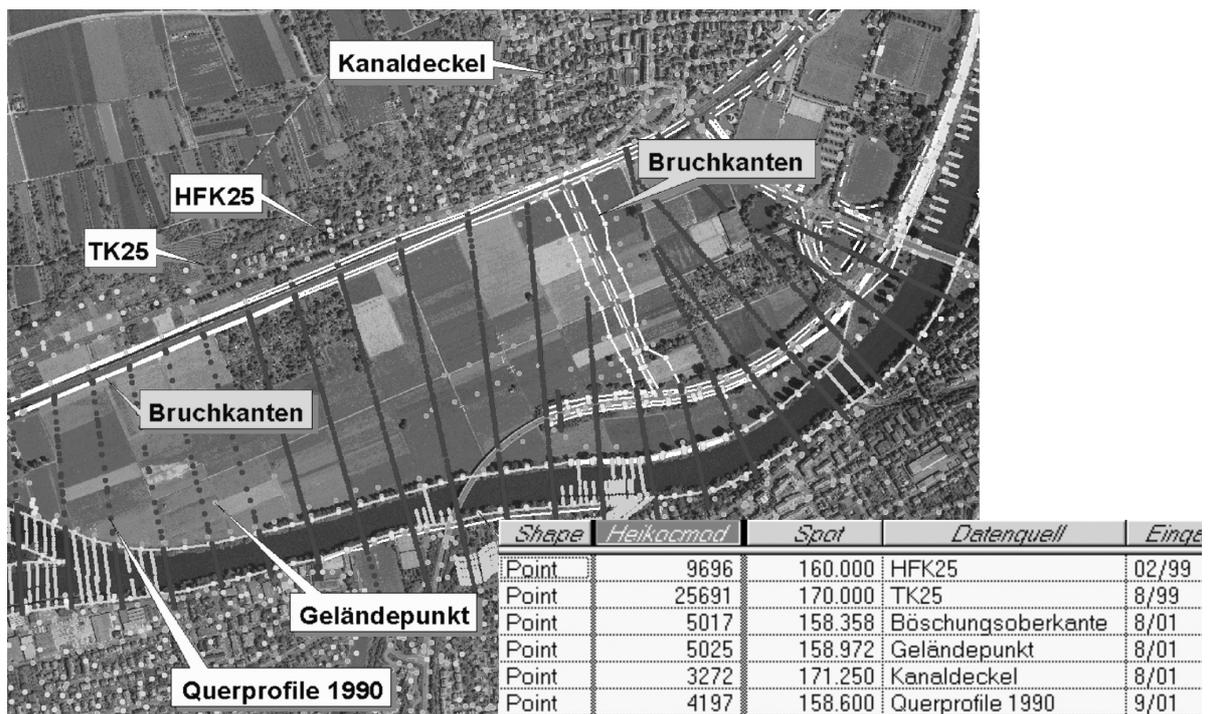


Abb. 6-1 Darstellung der Überlagerung eines Orthofotos mit den topog. Inform. (Höhenpunkte, Bruchkanten) sowie der Attributstabelle einiger selektierter Punkte

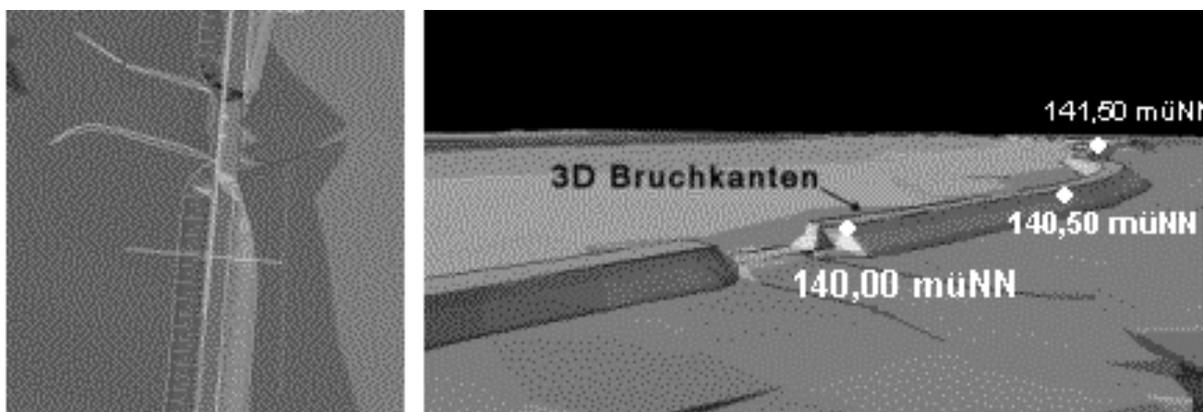


Abb. 6-2 3D-Bruchkanten zur Modellierung eines Hochwasserdammes in GIS (rechts); die Bruchkanten wurden mittels GIS aus einem CAD-Datensatz zur Baumaßnahme (links) generiert

6.2.2 Räumliche Interpolation diskreter Höhenwerte

Aus punktuellen bzw. linienhaften Höheninformationen kann über unterschiedliche Interpolationsmethoden eine kontinuierliche Oberfläche errechnet werden. Grundsätzlich wird zwischen deterministischen und stochastischen Interpolationsmethoden unterschieden. Über deterministische Verfahren wird versucht eine Fläche an die vorhandenen Stützstellen anzupassen, wobei die Stützstellen entweder exakt übernommen werden oder über Glättungs- bzw. Filterfunktionen ungewünschte Variationen in den Basisdaten eliminiert werden. Hierzu zählen rasterbasierte Methoden, wie distanzabhängige Verfahren (z.B. „Nächster Nachbar“, „Inverse Distanzwichtung“) und Polynome bzw. Spline-Funktionen, sowie die vektorbasierte Dreiecksvermaschung (Triangulation). Bei stochastischen bzw. geostatistischen Verfahren (z.B. „Kriging“) werden neben der Lage und den Wertigkeiten der Stützstellen auch deren räumliche Zusammenhänge über statistische Verteilungsfunktionen interpretiert. Eine Übersicht der genannten Interpolationsverfahren sowie deren Anwendungsbereiche zur Behandlung wasserwirtschaftlicher Problemstellungen wird u.a. in *Fürst (2002)* gegeben.

Zur Analyse der Einsatzfähigkeit der im GIS ARC/INFO (ESRI) implementierten Interpolationsmethoden wurde ein charakteristischer Fluss-Vorland-Abschnitt des Neckars bei Heilbronn ausgewählt, welcher typische Strukturen anthropogen genutzter Flusstäler mit ihren unterschiedlichsten topographischen Ausprägungen vereint. Neben weiten ebenen Vorlandflächen existieren Bereiche mit starken Gefällegradienten entlang der Uferböschungen und den Talhängen. Zudem existieren mehrere Dammbauwerke (Bahndamm, Hochwasserschutzdamm, Straßendamm), deren exakte Nachbildung für die spätere Bewertung der Hochwassergefährdung maßgebend ist. Hinzu kommt die komplexe Topographie im Mündungsbereich des Neckarzuflusses Schozach. Als Datengrundlage standen neben den Querprofilaufnahmen (100m-Abstand) der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung tachymetrisch erfasste Geländepunkte, Kanaldeckelhöhen und Bruchkanteninformationen der Stadt Heilbronn sowie topographisches Kartenwerk (HFK25, TK25) zur Verfügung.

6.2.2.1 Delaunay-Triangulation

Das Konzept der Dreiecksvermaschung (Triangulation) diskret verteilter Rauminformationen unter Berücksichtigung des Winkelkriteriums nach Delaunay wurde bereits in Kap.4.2 vorgestellt. Nachfolgend werden die Eigenschaften dieses Interpolationsverfahrens zur Erzeugung einer kontinuierlichen Geländeoberfläche auf Basis anisotroper topographischer Daten herausgestellt.

Eine für die Erzeugung hochwertiger Geländemodelle wesentliche Eigenschaft der TIN-Interpolation ist die Option zur Berücksichtigung linearer Geländestrukturen (z.B. Böschungskanten von Dammbauwerken) bzw. Bruchkanten. Im Bereich der vorgegebenen Zwangskanten werden neue Dreiecke erzeugt, sodass die Dreiecksseiten

mit den Bruchkanten zusammenfallen. Die Höhenwerte entlang einer Bruchkante können bei 2D-Linien (PolyLine) entweder über separat definierte Raumpunkte oder bei konstanter Höhe als Sachattribut der Linie vorgegeben werden. In der Praxis stellt sich jedoch die Beschreibung der Geländekante als 3D-Vektor über Koordinatentripel als praktikabler heraus (siehe Kap.6.2.1). 3D-Vektorinformationen erhält man beispielsweise als Ergebnis photogrammetrischer Bildflugauswertungen und (bei entsprechender Vorgabe) aus tachymetrischen Messkampagnen.

In Abb. 6-3 ist das Ergebnis der TIN-Interpolation für das oben beschriebene Untersuchungsgebiet bei Heilbronn dargestellt. Hierbei wurde die Dreiecksvermaschung zunächst ohne Berücksichtigung der Bruchkanteninformationen durchgeführt (I). Lediglich die den Linien zugrunde liegenden Höhenpunkte wurden in die Vermaschung einbezogen, nicht jedoch die Interpolationsrichtung. Es zeigte sich, dass trotz einer relativ hohen Punktdichte entlang der Dammbauwerke diese nicht adäquat nachgebildet werden. Die Dammkrone wird mehrfach aufgrund unerwünschter Vermaschungen von Böschungfußpunkten durch Senken unterbrochen, kontinuierliche Strecken erscheinen eher zufällig. Auch wird das Gewässerbett von Neckar und Schozach nur bereichsweise als solches nachgebildet: Durch die Zusammenführung von Querprofilen und Geländepunkten entlang den Ufern bilden sich keilförmige Erhebungen und sogar Brücken. Eine synthetische Verdichtung der Gewässerprofile (II) erwirkt zwar eine deutlich realistischere Darstellung des Flussschlauches, dennoch entstehen entlang den Ufern unplausible Keilstrukturen. Über die Berücksichtigung von Bruchkanten an den maßgebenden Böschungslinien (III) lässt sich die Interpolation der Vektorpunkte in der Art beeinflussen, dass die Dammstrukturen und der Gewässerverlauf in der gewünschten Weise modelliert werden.

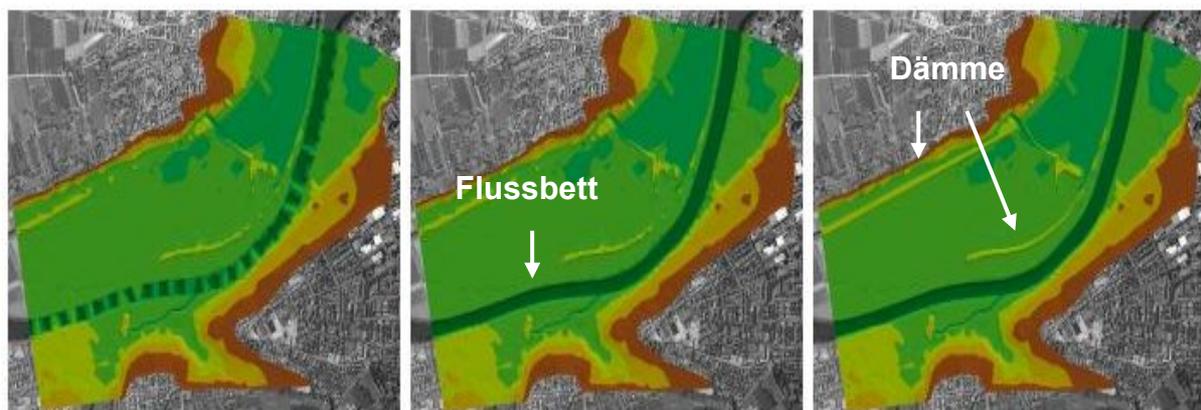


Abb. 6-3 Ergebnis der TIN-Interpolation (Links: Originaldaten ohne Bruchkanten (I); Mitte: Verdichtete Gewässerprofile ohne Bruchkanten (II); Rechts: Mit Bruchkanten (III))

Die kontinuierliche Geländeoberfläche eines TINs kann für weitere Anwendungen in ein diskretes Höhenraster überführt werden. Die Zellwerte ergeben sich durch lineare Interpolation entlang den Dreiecksflächen des TINs und liegen somit immer zwischen den ursprünglichen Maximal- und Minimalwerten der originären Höhen an den Eck-

punkten der Dreieckselemente. Die Wahl der Rasterzellengröße hängt von der Dichte der Basisdaten und dem vertretbaren Speicherbedarf ab. Bei der Konvertierung ist zu prüfen, inwieweit die maßgebenden Strukturen, z.B. Dammkronen oder Überfallkanten, auch im Raster in der geforderten Genauigkeit bzw. Auflösung repräsentiert werden.

Um eine signifikante Abflachung der Maximalwerte (z.B. entlang der Dammkronen) oder auch eine Anhebung von Geländeeintiefungen (z.B. in Gräben) zu vermeiden, muss die Auflösung des Rasters entsprechend hoch sein. Zur Sicherstellung der exakten Abbildung einer hydraulisch relevanten Dammkrone bzw. Überfallkante, welche über zwei Bruchkanten im TIN repräsentiert wird, ergibt sich bspw. der Maximalwert der Rasterweite w in Abhängigkeit der Kronenbreite b zu:

$$w \leq b\sqrt{2} \quad (6-1)$$

Voraussetzung hierbei ist jedoch, dass die Zuweisung der Zellenwertigkeit linear bezogen auf den Mittelpunkt des Rasterfeldes erfolgt und nicht durch Mittelung über die Zellenfläche oder polynomische Glättungsfunktionen „verwischt“ wird. In Abb. 6-4 sind die Prinzipien der linearen Methode sowie der Interpolation über einen polynomischen Ansatz veranschaulicht. Eine Diskussion der Anwendung von Glättungsfunktionen ist in Kap.6.2.2.3 gegeben.

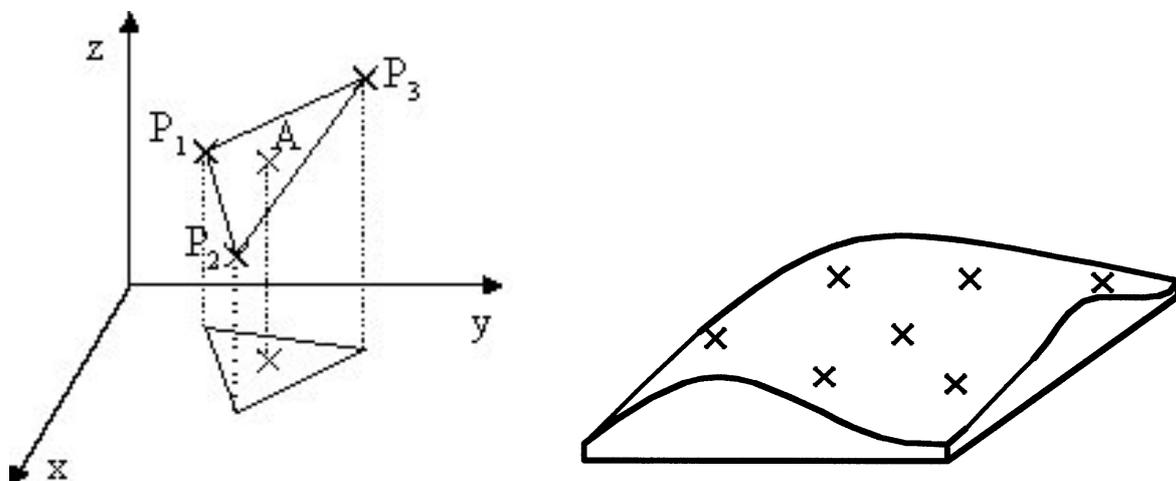


Abb. 6-4 Überführung einer TIN-Oberfläche in ein Raster über lineare Interpolation (links) und polynomische Glättungsfunktion (rechts)

Eine Alternative zur Erhöhung der Rasterauflösung (z.B. zur Optimierung von Rechenzeiten und Speicherbedarf) kann die künstliche Verbreiterung der maßgebenden Strukturen sein (z.B. zur Berücksichtigung von Schutzmauern o.ä. im DGM-Raster).

6.2.2.2 Inverse Distanzwichtung (IDW)

Bei der IDW-Interpolation wird aus gegebenen Höhenpunkten direkt ein regelmäßiges Rechteck-Raster erzeugt. Dabei wird der jeweilige Zellwert einer Rasterzelle mit

Hilfe der Gewichtung umliegender Höhenpunkte umgekehrt proportional zu ihrer Entfernung interpoliert. Die interpolierten Werte liegen hierbei immer zwischen den ursprünglichen Maximal- und Minimalwerten. Die allgemeine Formulierung der IDW-Methode lautet:

$$\hat{z}(x_0, y_0) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{z(x_i, y_i)}{h_{i,0}^c}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{h_{i,0}^c}} \quad \text{und} \quad h_{i,0} = \sqrt{d_{i,0}^2 + c^2} \quad (6-2)$$

mit:

$\hat{z}(x_0, y_0)$	=	interpolierter Wert an der Stelle (x_0, y_0)
$z(x_i, y_i)$	=	beobachtete Werte an den Punkten (x_i, y_i)
N	=	Anzahl der Stützstellen
$d_{i,0}$	=	Distanz zwischen (x_0, y_0) und Stützpunkt i
c	=	Glättungsparameter

Das IDW-Verfahren ist vermutlich aufgrund seiner Einfachheit und Schnelligkeit in vielen GI-Systemen integriert. Als Parameter kann die Anzahl der zu berücksichtigenden Punkte und/oder der maximale Erfassungsradius vorgegeben werden. Das Interpolationsergebnis lässt sich zudem über den Exponenten steuern. Bei Exponenten < 1 tendiert die Interpolation zum globalen Mittelwert, wobei an den Stützstellen lokale Spitzen erzeugt werden. Für sehr niedrige Exponenten entstehen sogar Senken zwischen dicht beieinander liegenden Hochpunkten, bedingt durch den großen Einfluss entfernter Punkte. Eine Möglichkeit um dies einzuschränken ist die Reduzierung der maximal berücksichtigten Nachbarpunkte. Dadurch wird der Einfluss von wenigen hoch bzw. tief gelegenen Punkten z.B. bei Dammober- bzw. unterkanten nicht durch viele weiter entfernte Punkte gestört.

Wird der Exponent erhöht, vergrößert sich der Einfluss der nächstgelegenen Stützstelle. Dies führt jedoch durch den relativ geringen Einfluss der unmittelbar benachbarten Punkte oft zu einer Inselbildung um besonders hoch bzw. tief gelegene Punkte, was auch als „Fettaugeneffekt“ bezeichnet wird [Fürst, 2002]. Bei großen Exponenten ähnelt das Ergebnis einer Thiessen-Polygonisierung und entspricht dem „Nearest Neighbour“-Verfahren. In Abb. 6-5 wird der Einfluss der Auswahl des Exponenten auf die Oberflächengestalt verdeutlicht.

Im Rahmen eines Variantenstudiums wurden die o.g. Parameter zur Modellierung des Geländeausschnittes bei Heilbronn optimiert. In Abb. 6-6 (links) ist das mit IDW-Interpolation (Exponent = 4; Nachbarpunktanzahl = 6) erzeugte Geländeaster mit verdichteten Gewässerprofilen abgebildet. Es zeigt sich, dass die Dammstrukturen nur unzureichend nachgebildet werden. Entlang den Talhängen entstehen zudem unrealistische Ausrundungen mit treppenartigen Oberflächenstrukturen und starken

Geländesprüngen. Eine Verbesserung des Ergebnisses könnte prinzipiell durch die Definition von sogenannten „barriers“ als räumliche Interpolationsgrenze erwirkt werden. Hierzu wäre jedoch ein unangemessen großer Digitalisierungsaufwand erforderlich und enorme Berechnungszeiten die Folge, sodass diese Variante im Rahmen der Studie nicht weiter verfolgt wurde.

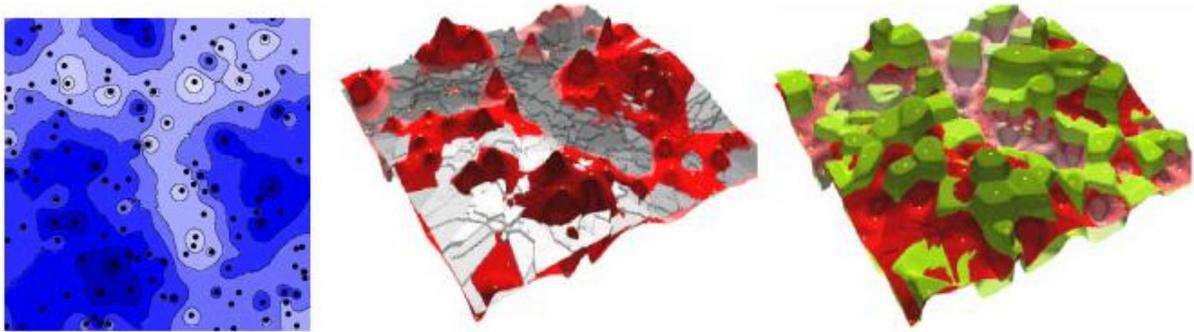


Abb. 6-5 Exemplarischer Vergleich der Ergebnisse einer IDW-Interpolation (Quelle: [Fürst, 2002]) (vgl. auch Abb. 6-9)

Ein Vergleich der IDW-Interpolation mit dem Ergebnis der TIN-Interpolation (jeweils mit verdichteten Querprofilen) verdeutlicht die unterschiedliche Interpretation der topographischen Basisdaten. In Abb. 6-6 (rechts) sind qualitativ die Differenzen der Geländehöhen in der Fläche dargestellt. 80% der Differenzen betragen weniger als 50 cm, 60% sogar weniger als 20 cm. Größere Differenzen treten in Bereichen starker Geländegradien und an den Modellrändern auf. Die räumliche Verteilung der Differenzen wird für zwei Ausschnitte des Untersuchungsgebietes (Ausschnitt 1 mit geringen, Ausschnitt 2 mit größeren Geländegradien) separat dargestellt.

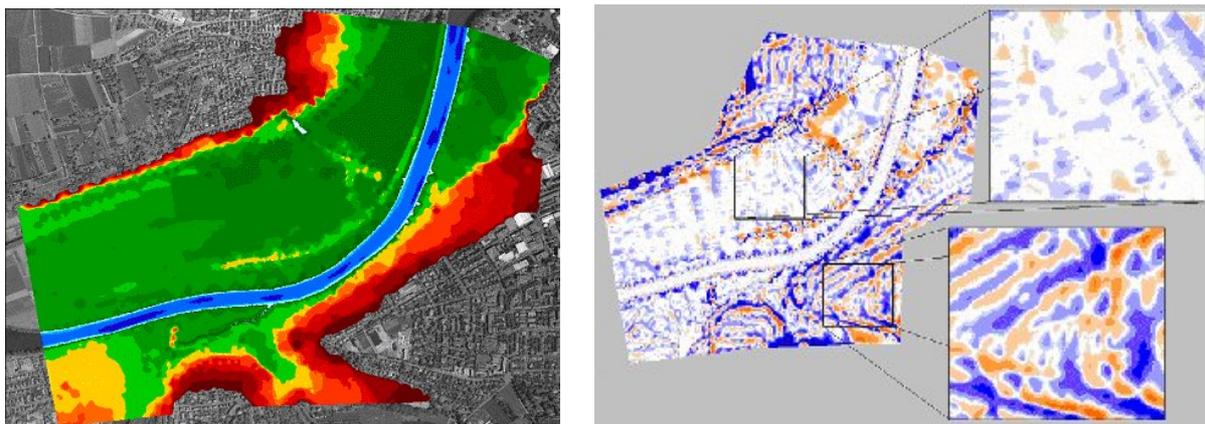


Abb. 6-6 Ergebnis IDW-Interpolation (links); räumliche Verteilung der Differenzen zur TIN-Interpolation (ohne Bruchkanten) (vgl. auch Abb. 6-9)

6.2.2.3 Polynomische Funktionen

Eine häufig eingesetzte Methodik zur Erzeugung visuell ansprechender kontinuierlicher Geländeoberflächen auf Basis diskreter Höhenwerte ist der Einsatz polynomiel-
ler Funktionen. Hierdurch kann ein glatter Kurvenverlauf bzw. eine ausgerundete
Fläche erzeugt werden. Die allgemeine Gleichung für zwei- bzw. dreidimensionale
Polynome lautet:

$$f(x) = \sum_{i=0}^n c_i x^i \quad \text{bzw.} \quad f(x) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x^i y^j \quad (6-3)$$

Darin sind c_{ij} die Koeffizienten und n der Grad oder die Ordnung des Polynoms. Die
Anzahl der Koeffizienten bzw. erforderlichen Stützpunkte ergibt sich nach dem Grad
der Funktion zu:

$$n_k = \frac{n(n+3)}{2} + 1 \quad (6-4)$$

mit: n_k = Anzahl der Koeffizienten

Die Ordnung des Polynoms wird umso höher, je mehr Stützpunkte über das Interpo-
lationspolynom zu berücksichtigen sind. Als problematisch wirkt sich dabei aus, dass
Polynome höherer Ordnung zu starkem Über- bzw. Unterschwingen neigen und
hierdurch lokale Extremwerte erzeugt werden, die deutlich außerhalb des Bereiches
der Messdaten liegen. Dem kann entgegengewirkt werden, indem die Polynome nur
abschnittsweise angepasst werden (Spline-Interpolation) und/oder über ein Polynom
niedrigerer Ordnung eine näherungsweise Anpassung der interpolierten Oberfläche
an die Stützstellen vorgenommen wird. Letztere Variante führt jedoch wiederum zu
einer Vergleichmäßigung der zugrunde gelegten Höhenwerte an den Stützpunkten.

Zur Spline-Interpolation werden überwiegend Polynome dritter Ordnung (kubisch)
gewählt. An den Knotenstellen müssen die jeweiligen Ableitungen erster und zweiter
Ordnung kontinuierlich sein. Gleichzeitig wird auf Anpassungen mit möglichst gerin-
ger Krümmung geachtet.

Für alle Splines $s(x)$ mit $x_0 < x_1 < \dots < x_n$ gilt:

- ⇒ $s(x_i) = y_i$ für $i=0, 1, \dots, n$ (³⁰)
- ⇒ s ist in $[x_0, x_n]$ zweimal stetig differenzierbar
- ⇒ die Gesamtkrümmung von s ist minimal, so dass für jede Funktion s gilt

³⁰ Ausnahme sind hierbei die B-Splines, bei welchen nicht alle Stützwerte durch die Ergebnisfunktion
erfasst sondern lediglich approximiert werden.

$$\int_{t_0}^{t_n} s^n(t)^2 dt \leq \int_{t_0}^{t_n} \bar{s}^n(t)^2 dt \quad (6-5)$$

In Abb. 6-7 ist eine lineare Verbindung mehrerer Stützpunkte den Ergebnissen einer Polynominterpolation sowie einem kubischen Spline gegenübergestellt.

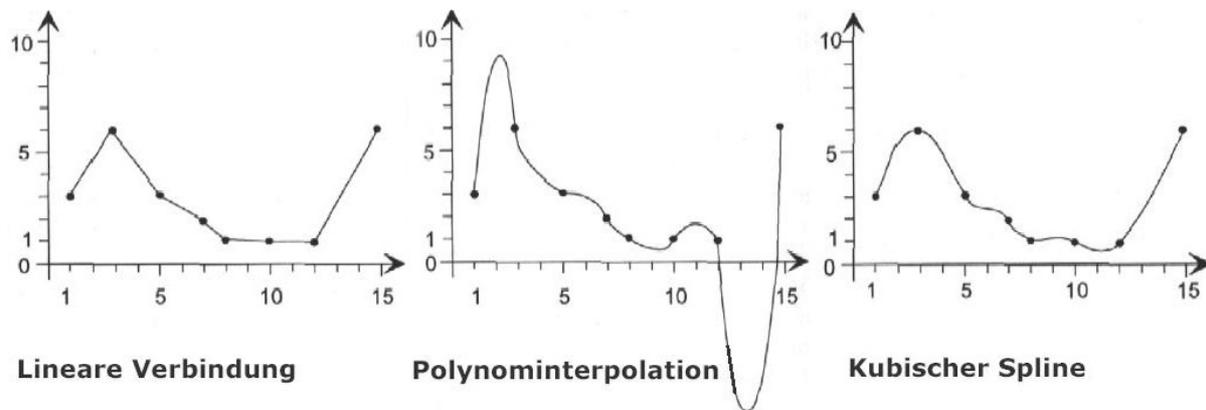


Abb. 6-7 Exemplarischer Vergleich verschiedener Interpolationsverfahren

Die Methode der Spline-Interpolation wurde auch auf den topographischen Datensatz des Fluss-Vorland-Abschnittes bei Heilbronn (mit verdichteten Querprofilen) angewendet. Bei der Erzeugung eines Rasters über die in ARC/INFO implementierten Spline-Algorithmen lässt sich das Interpolationsergebnis über verschiedene Parametrisierungen benutzerdefiniert beeinflussen: So lassen sich die Interpolationskriterien (z.B. *regularized*, *tension*) sowie die Anzahl der maximal zur Interpolation berücksichtigten Nachbarhöhenpunkte variieren. Über die Auswahl der Parametereinstellung *tension* mit entsprechend großen Werten für den „Spannungsfaktor“ *weight* kann die Entstehung von unplausiblen Senken und Hügeln bei der Interpolation der Geländeoberfläche reduziert werden.

In Abb. 6-8 ist ein charakteristischer Ausschnitt des Ergebnisses dargestellt. Als Parametrisierung wurden folgende Einstellungen gewählt: *tension* (*weight* = 10), *Nachbarpunktanzahl* = 6. Es zeigt sich, dass bei der vorgegebenen Verteilung der Höhenpunkte die Charakteristik der interpolierten Geländeoberfläche zu Ausrundungen und Inselbildungen tendiert und diesbezüglich dem Ergebnis der IDW-Interpolation ähnelt. Zudem liegen trotz einer Optimierung der Parametereinstellungen die berechneten Zellwerte stellenweise deutlich ($\Delta z > 1$ m) außerhalb der Streuung der umliegenden Ausgangshöhen, wodurch unrealistische Erhebungen und Senken erscheinen.

In Abb. 6-9 ist eine Gegenüberstellung der Spline-Interpolation mit anderen Interpolationsverfahren am Beispiel eines ausgewählten Geländequerschnittes gegeben.

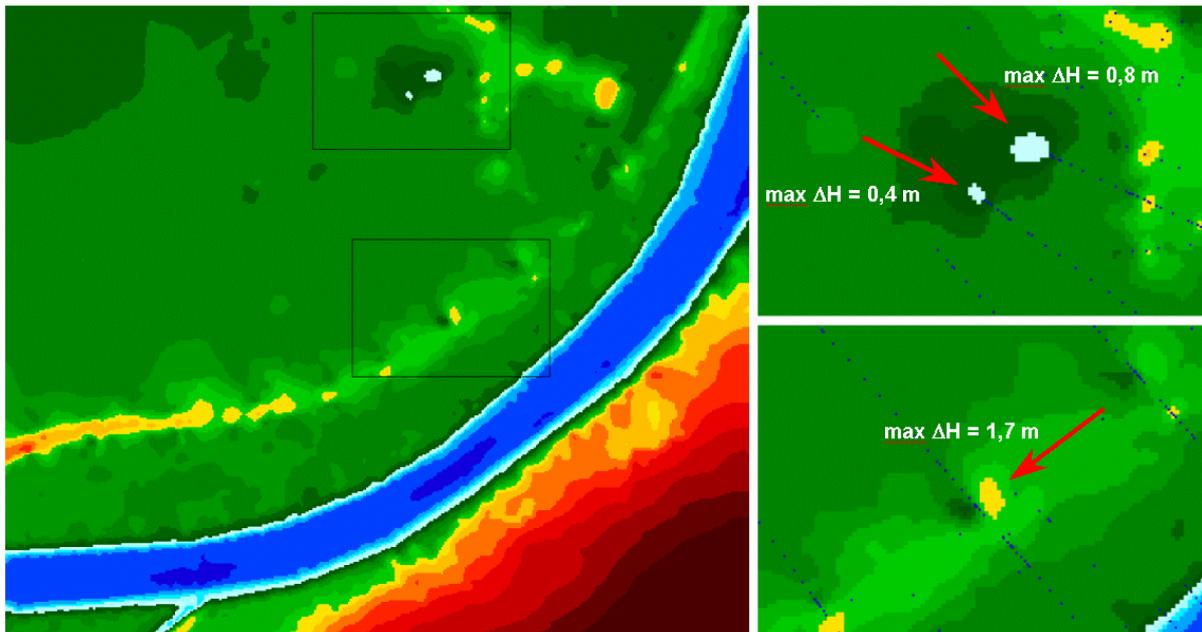


Abb. 6-8 Ergebnis der Spline-Interpolation mit exemplarischer Darstellung von Bereichen außerhalb des originären Höhenspektrums

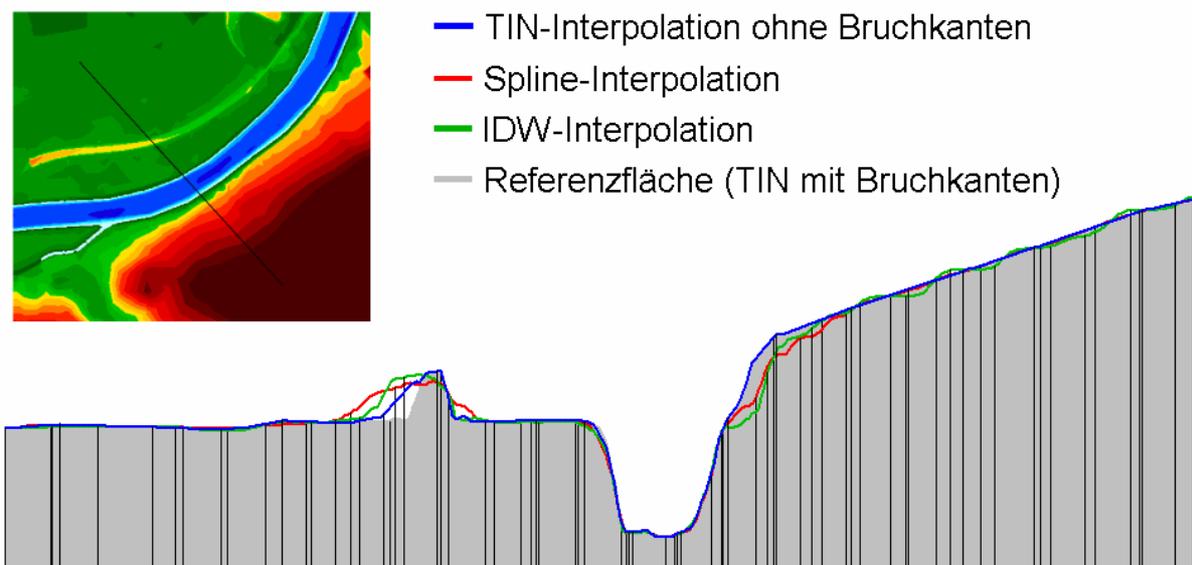


Abb. 6-9 Qualitative Darstellung der Ergebnisse unterschiedlicher Verfahren zur Interpolation heterogen verteilter Massenpunkte am Beispiel eines ausgewählten Geländequerschnittes

6.2.2.4 Interpolation von Querprofilaten

Eine besondere Schwierigkeit bei der DGM-Erzeugung von Flussvorlandbereichen stellen die zumeist großen Abstände (in Richtung Flussachse) zwischen den Querprofilaufnahmen der Gewässersohle dar. Hierbei treten unplausible Interpolationser-

gebnisse vor allem in Flusskrümmungen und bei der Zusammenführung der Vorlanddaten mit den Querprofilaten auf (siehe Kap.6.2.2.1).

Eine effektive Lösung des Problems liegt z.B. in der Verringerung des Querprofilabstandes durch Generierung zusätzlicher interpolierter Profildaten zwischen den Originaldaten. Hierzu wurde am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe das Programm FAINT³¹ entwickelt, welches in benutzerdefinierten Abständen generalisierte Profile interpoliert. Die Richtung der Interpolation wird durch die aufeinanderfolgende Lage der Hektometersteine und gegebenenfalls der Deichverläufe auf den Vorländern vorgegeben. Als Interpolationsmethode stehen ein lineares Verfahren sowie die Spline-Interpolation zur Auswahl. Aus den im vorangegangenen Abschnitt dargelegten Gründen neigt die Spline-Interpolation dazu, zwischen den Querprofilen unrealistische Senken bzw. Erhebungen zu erzeugen, die als Systemgeometrie des HN-Modells u.U. eine Auswirkung auf die hydraulischen Berechnungsergebnisse haben können. Bei der Verschneidung errechneter Wasserstände mit dem DGM zur Ermittlung von Überflutungsflächen besteht hierdurch die Gefahr der Fehlinterpretation der Berechnungsergebnisse.

Die Verdichtung kann zur Berücksichtigung zusätzlicher Vorlanddaten auf das Gewässerbett beschränkt bleiben. Liegt bereits ein hochaufgelöstes Geländerraster der Vorländer vor (z.B. als Ergebnis einer Laser-Scanner-Befliegung), ist es zur Vermeidung von Interpolationsfehlern an den Uferkanten zweckmäßig, zunächst ein separates Raster des Gewässerbettes zu erzeugen und dieses in einem weiteren Schritt mit dem bestehenden Raster zusammenzuführen.

In Bereichen mit sehr komplexer Flussbett-Topographie (Inselstrukturen, Verzweigungen) ist die manuelle Nachbearbeitung der Interpolationsergebnisse notwendig. Zur Digitalisierung von Bruchkanten entlang den Uferböschungen können der Einsatz von CAD-Programmen sowie dreidimensionale Visualisierungen hilfreich sein (Abb. 6-10).

Auch bei der Erzeugung der Systemgeometrie eines 2D-HN-Modells können Bruchkanten in Längsrichtung des Gewässerbettes und entlang den Uferböschungen die Erzeugung künstlicher Rauheiten (und die hierdurch induzierten überhöhten Energieverluste, unrealistische Geschwindigkeitsverteilungen und numerische Instabilitäten) reduzieren (siehe Kap.6.3 und 7.3).

In *Fioole, 2000* wird ein Interpolationsalgorithmus auf Basis eines geostatistischen Ansatzes vorgestellt, der aus den Höhendaten einer Gerinnegeometrie (unabhängig ihrer räumlichen Verteilung) unter Berücksichtigung der Hauptfließrichtung den Talweg nachbildet und plausible Rasterdaten des Flussbettes erzeugt. Die Auswirkung dieses Interpolationsverfahrens auf die Berechnungsergebnisse einer 2D-HN-Modellierung wurde bisher nicht untersucht.

³¹ Eine ausführliche Abhandlung der zugrunde liegenden Algorithmen findet sich in [Pfefferle, 1997], weitere Anwendungsbeispiele in [Ritzert & Nestmann, 1999].

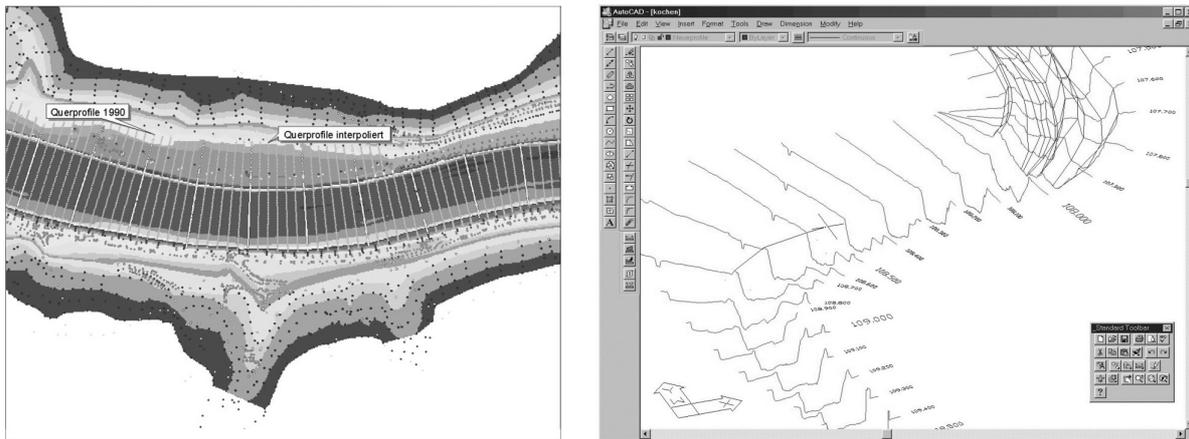


Abb. 6-10 Interpolation zusätzlicher Querprofile zur Verdichtung der Flussbettdaten (links) und manuelle Definition von Bruchkanten mittels CAD (rechts)

6.2.2.5 Fazit

In den vorangegangenen Kapiteln wurden verschiedene Interpolationsverfahren anhand praktischer Anwendungsbeispiele auf ihre Einsatzfähigkeit zur Hochwassersimulation analysiert. Es konnte festgestellt werden, dass zur Interpolation unregelmäßig verteilter topographischer Fluss-Vorland-Informationen das Konzept der Triangulation mit linearer Interpolation gegenüber anderen Verfahren wesentliche Vorteile bietet. So liegt die Herausforderung bei der Erzeugung hochwertiger Geländemodelle zur HN-Simulation in der möglichst exakten Abbildung der (hydraulisch) maßgebenden Geländestrukturen (Geländesprünge, Dammkronen, Böschungsoberkanten etc.). Über die Dreiecksvermaschung können diese über Zwangskanten, welche entweder originär erfasst oder mittels GIS zur Beeinflussung des Interpolationsergebnisses manuell definiert wurden, exakt nachgebildet werden. Zwischen den Stützstellen wird über die Dreiecksflächen linear interpoliert, wobei die Höhenwerte immer zwischen den ursprünglichen Maximal- und Minimalwerten liegen. Hierdurch werden unrealistische Anhebungen bzw. Senken (wie sie z.B. bei Polynomen höherer Ordnung durch Über- bzw. Unterschwingung entstehen), Abflachungen charakteristischer Strukturen (wie sie durch Glättungsalgorithmen verursacht werden) sowie sprunghafte Übergänge (wie sie u.U. bei distanzabhängigen Verfahren entstehen) vermieden. Zur Zusammenführung von Querprofilen der Gewässersohle mit topographischen Vorlandinformationen kann im Vorfeld der Interpolation eine Profilverdichtung über (teil-) automatisierte Routinen erfolgen. Durch die Nachvollziehbarkeit des eindeutigen Vermaschkriteriums besteht die Möglichkeit einer visuellen Kontrolle des Dreiecksnetzes (TIN) mit entsprechender manueller Nachbearbeitung der Basisdaten. Die Transparenz der Methodik unterstützt zudem die Modellakzeptanz bei Entscheidungsträgern und Öffentlichkeit. Eine Zusammenfassung der genannten Vorteile ist in Tabelle 6-1 gegeben.

Interpolation diskreter Geländeinformationen über Triangulation

- Exakte Reproduktion der Höhenwerte an den Stützstellen
- Vermeidung unrealistischer Anhebungen und Senken (interpolierte Höhenwerte liegen immer zwischen den ursprünglichen Max.- und Min.-Werten der Elemente)
- Vermeidung ungewollter sprunghafter Übergänge
- Möglichkeit der exakten Abbildung linearer Strukturen über Zwangskanten
- Gute Nachbildung flusstal-typischer Morphologien (Optimierung durch Profilverdichtung)
- Einfache Nachvollziehbarkeit des Vermaschkriteriums durch den Modellierer
- Förderung der Modellakzeptanz bei Entscheidungsträgern und Öffentlichkeit

Tabelle 6-1 Vorteile der Anwendung der Delaunay-Triangulation zur DGM-Erstellung im Rahmen der Hochwassermodellierung

6.3 Erstellung der Systemgeometrie des hydraulischen Modells

6.3.1 Eindimensionale Modelle

Zur Erstellung der Systemgeometrie eindimensionaler HN-Modelle werden die abflusswirksamen Bereiche des Gewässerbettes und der Vorländer in Form von Querprofilen modelliert. Bei instationärer Simulation einer Hochwasserwelle sind zur Berücksichtigung der Retentionswirkung des Fluss-Vorland-Systems zudem die wasserstandsabhängigen Volumina der retentionswirksamen Bereiche zu bestimmen und als „Retentionszelle“ an die entsprechenden Berechnungstützpunkte (Querprofile) im HN-Modell zu koppeln. Sowohl die Querprofil Datensätze als auch die Volumenfunktionen können mittels GIS aus einem Oberflächenmodell des Untersuchungsbereiches gewonnen werden. Eine schematische Darstellung hierzu ist in Abb. 6-11 gegeben.

6.3.1.1 Querprofil Datensätze

Zur Erfassung des gesamten im Hochwasserfall abflusswirksamen Bereiches eines Flusstales müssen die originären Querprofil aufnahmen, welche in vielen Fällen nur das Gewässerbett beschreiben, erweitert werden. Die Extrahierung der Höhenwerte aus einem Gelände raster kann mit Hilfe von Standardfunktionen automatisiert in äquidistanten Schritten entlang einer vorgegebenen Profillage (2D-Linie) erfolgen. Zur Vermeidung einer Abflachung der hydraulisch relevanten Geometrie muss jedoch eine entsprechend hohe Profildichte gewählt werden. Eine nachträgliche selektive Reduzierung der Datenmenge kann über einen externen Glättungsalgorithmus erfolgen. Üblicherweise wird hierzu als Schwellenwert zur Profilausdünnung eine Einebnungshöhe (Abstand eines Profilstützpunktes B zur Geraden zwischen

den Punkten A und C) verwendet. Aus hydraulischer Sicht darf die Ausdünnung jedoch nicht zu einer Veränderung der Wasserstand-Flächen-Funktion $A(y)$ führen. Zu beachten ist hierbei, dass bei großen Abständen zwischen den Profilstützpunkten bereits eine geringe Einebnungshöhe zu einer signifikanten Flächenänderung führen kann.

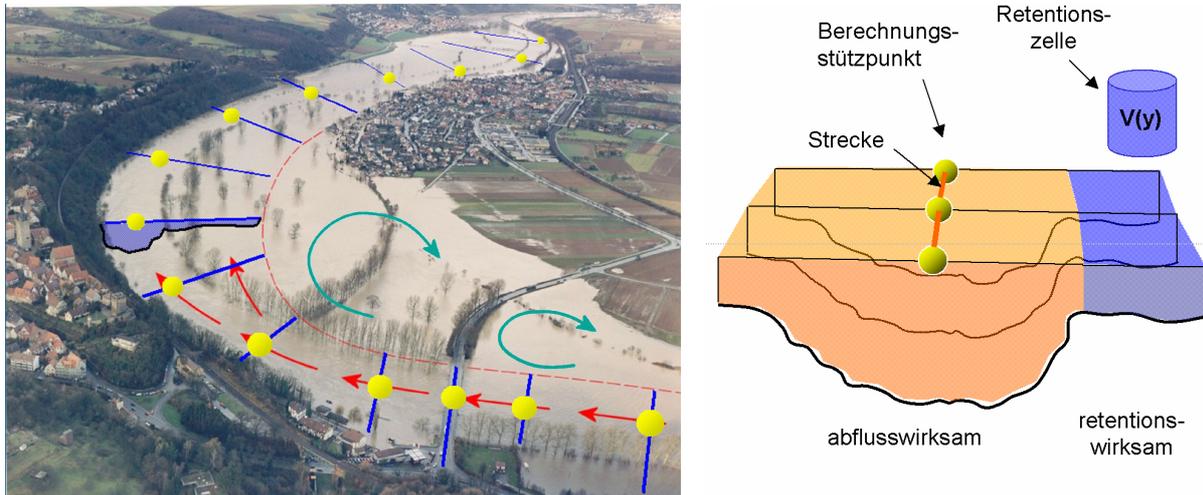


Abb. 6-11 Darstellung der Systemtopologie eines 1D-HN-Modells am Beispiel eines Streckenabschnittes des Neckars bei Offenau

Bei der Definition der erforderlichen Stützpunktdichte bzw. Genauigkeitsanforderungen ist zu bedenken, dass ein Querprofil in der Systemgeometrie des HN-Modells die geometrischen Verhältnisse der Geländeoberfläche zwischen zwei Profillagen repräsentiert und somit der Nutzen einer exakten Abbildung der Topographie entlang einer Profillage relativiert wird. Die Modellgüte wird zudem weniger durch eine möglichst hohe Auflösung der topographischen Basisdaten bestimmt, als vielmehr durch die sinnvolle Auswahl von Profillagen und präzise Erfassung der hydraulisch wirksamen Geometrien (Uferböschungen, Kontrollquerschnitte) bzw. deren mathematische Umsetzung als Funktion der durchströmten Fläche und des hydraulischen Radius in Abhängigkeit des Wasserstandes. (Eine Analyse des Einflusses der Auflösung der topographischen Basisdaten auf die Ergebnisse einer Wasserspiegellagen-berechnung findet sich in Kap.7.3.6.1.)

Sinnvoller kann es daher sein, die hydraulisch maßgebenden Stützpunkte ausgewählter Profillagen über manuelle Digitalisierung zu erfassen. Die Extrahierung der Höhenwerte aus dem Oberflächenmodell (Erzeugung einer 3D-Linie) kann wiederum automatisiert erfolgen. Zur Unterstützung der Digitalisierarbeiten bzw. der Überprüfung der Stützpunktauswahl können 3D-Ansichten sowie „Snapping“-Funktionen hilfreich sein. Liegt dem DGM eine Dreiecksvermaschung zugrunde, kann als automatisierbare Alternative zur manuellen Digitalisierarbeit nach den Schnittpunkten der vorgegebenen Profillinie mit den Kanten des Dreiecksnetzes gesucht werden. Die

Höhenwerte ergeben sich hierbei aus der linearen Interpolation zwischen den topographischen Basispunkten der Dreiecksseite, wodurch Geländekanten in Talrichtung relativ genau erfasst werden.

Des Weiteren existieren GIS-gestützte Verfahren zur Erzeugung sogenannter „repräsentativer Profile“, deren Stützpunkthöhen auf einer (gewichteten) Mittelung der topographischen Datenbasis des Fluss-Vorland-Abschnittes zwischen zwei Nachbarprofilen beruhen. Es ist jedoch fraglich, ob hierdurch die hydraulisch relevante Charakteristik des Untersuchungsgebietes realistischer nachgebildet wird oder die aus strömungstechnischer Sicht entscheidenden Strukturen eher „verwischt“ werden. An dieser Stelle sei betont, dass eine fachkundige Beurteilung der Strömungssituation im zu modellierenden Gewässerabschnitt und die angepasste (und leider auch zeitaufwendige) Erstellung der Systemgeometrie durch einen erfahrenen Modellierer nicht durch Automatisierungsroutinen ersetzbar sind.

Zur Integration der Querprofilaten in das HN-Verfahren müssen Schnittstellen programmiert werden, um die aus dem DGM gewonnenen Höhenpunkte in das Eingangsformat des Simulationsprogramms zu konvertieren. In *Kugele et al. (2002)* wird ein Standardformat vorgeschlagen, welches neben S- und Z-Werten auch die X,Y-Koordinaten eines jeden Profilpunktes speichert. Zudem werden GIS-Werkzeuge zur Gewinnung von Gewässerquerprofilen aus einem DGM vorgestellt.

6.3.1.2 Retentionsvolumina

Die im Hochwasserfall retentionswirksamen Bereiche können bei instationären 1D-HN-Verfahren über eine Funktion des Speichervolumens in Abhängigkeit des Wasserstandes berücksichtigt werden. Die Volumenfunktionen $V(y)$ der Retentionsräume können mittels „Cut&Fill“-Funktionalitäten aus einem Digitalen Geländemodell (Raster/TIN) bestimmt werden.

Zur automatisierten Funktionsermittlung $V(y)$ wurde im Rahmen dieser Arbeit das Programm RETVOL auf Basis der systeminternen objektorientierten Skriptsprache AML³² für ARC/INFO entwickelt. Über eine interaktive Benutzerführung wird der Anwender aufgefordert, die retentionswirksamen Bereiche vor dem Hintergrund stationär errechneter Überflutungsflächen zu markieren, den Bezugskilometer der „Retentionszelle“ zu definieren und die Anzahl der Diskretisierungsschritte vorzugeben. Das Programm errechnet nun auf Basis des DGM die Wasserstands-Flächen-Beziehung³³ für die entsprechenden Höhenintervalle und gibt diese im Eingabeformat des HN-Modells aus. Zur visuellen Kontrolle des jeweiligen Füllungszustandes werden die errechneten Ebenen bzw. Flächen im GIS dargestellt.

³² AML = Arc Macro Language

³³ Die Volumenfunktion wird im eingesetzten HN-Verfahren über lineare Interpolation aus einer Wasserstands-Flächen-Beziehung ermittelt.

6.3.2 Zweidimensionale Modelle

Die Systemgeometrie zweidimensionaler Strömungsmodelle basiert auf einer Anordnung von Berechnungstützpunkten, die zu Gittern bzw. Netzen verbunden sind. Prinzipiell kann zwischen strukturierten und unstrukturierten Berechnungsgittern unterschieden werden. Erfolgt die Aufteilung in strukturierter Form, ergeben sich ausschließlich Rechteckelemente bzw. -zellen auf der Basis von geradlinigen oder i.A. randangepassten, krummlinigen Netzen. Unstrukturierte Gitter unterteilen das Berechnungsgebiet in Dreiecks- oder Vierecksflächen auf Basis unregelmäßig angeordneter Eckpunkte. [Krauter, 2002]

In den folgenden Abschnitten werden GIS-Techniken zur Unterstützung der Geometrierstellung vorgestellt und bzgl. ihrer Anwendbarkeit bewertet. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die topographischen Informationen des Untersuchungsgebietes bereits zu einem Digitalen Geländeeraster zusammengeführt wurden. Der Einfluss der Netzgenerierung auf die Berechnungsergebnisse einer 2D-HN-Simulation wird anhand praxisorientierter Rechenexempel in Kap.7.3.6.2 behandelt.

6.3.2.1 Strukturierte Gitter

Zur Definition eines strukturierten Gitters mit äquidistanten Stützpunkten können die Höhenwerte eines Geländeerasters zumeist über eine ASCII-Schnittstelle als Höhenmatrix in das Programmpaket zur Strömungssimulation eingelesen werden. Eine Änderung der Auflösung des DGM und/oder des Koordinatensystems kann jedoch aus folgenden Gründen erforderlich werden:

- Optimierung der Rechenzeit (Verringerung der Auflösung)
- Adäquate Abbildung hydraulisch relevanter Strukturen (Vergrößerung der Auflösung)
- Verringerung künstlicher Rauheiten sowie numerischer Fehler (Vergrößerung der Auflösung)
- Veränderung des Koordinatensystems (z.B. Rotation) aus programmtechnischen Gründen (evtl. ähnliche Auflösung)
- Keine Äquidistanz des Berechnungsgitters (evtl. ähnliche Auflösung)

Zur technischen Umsetzung werden in GIS Interpolationsmethoden angeboten, die unter dem Fachbegriff „resampling“ zusammengefasst werden können. Als Verfahren kommen wiederum distanzabhängige, lineare sowie polynomische Interpolationen in Betracht. Ihre rein rasterbezogene Anwendbarkeit unterscheidet sich jedoch von der in Kap.6.2 behandelten Verarbeitung anisotroper Geländeinformationen. Eine Zusammenfassung der in ARC/INFO implementierten Resampling-Methoden sowie die qualitative Bewertung ihrer Einsatzspektren sind in Tabelle 6-2 aufgeführt. Die Bewertung stützt sich auf detaillierte Untersuchungen im Rahmen der Neckarmodellierung. Eine Erläuterung der Verfahren und Darstellung von Interpolationsergebnissen bezogen auf einen Gerinnequerschnitt findet sich in *Bergmann (2002)*.

Gruppe	Verfahren	Einsatzgebiete / Bewertung
Distanzabhängige Verfahren	IDW	Verringerung der Auflösung
	Nearest Neighbour, Search Method	Ähnliche Auflösung von Ist- und Sollzustand
Lineare Verfahren	Bilinear Method, Triangulation	Vergrößerung der Auflösung & Ähnliche Auflösung von Ist- und Sollzustand
Polynomische Interpolation	Cubic Convolution Method	Aufgrund von Ergebnissen außerhalb des Höhenspektrums der Ausgangsdaten nicht empfehlenswert (vergleiche Kap.6.2.2)

Tabelle 6-2 Qualitative Bewertung verschiedener Verfahren zur Veränderung der Auflösung bzw. Koordinatensysteme strukturierter Gitter („Resampling“)³⁴

Es bleibt anzumerken, dass die Berechnungsergebnisse einer 2D-HN-Simulation wesentlich weniger sensitiv auf die Methode des „Resampling“ als vielmehr auf das Maß der Gitterauflösung reagieren. Dies wurde im Rahmen umfangreicher Analysen an mehreren Teilabschnitten des Neckars belegt. Die Dokumentationen der Studien finden sich in *Niesler (2001)* und *Kappler (2003)*, Ergebnisse werden in Kap.7.3.6 diskutiert. Für die Praxis ist festzuhalten, dass im Anwendungsfall eine Veränderung der Gitterauflösung mit der Überprüfung der hydraulisch relevanten Strukturen sowie einer Sensitivitätsanalyse der Simulationsergebnisse einhergehen muss.

6.3.2.2 Unstrukturierte Netze

Durch die Aufteilung des Modellgebietes in unstrukturierter Form lässt sich die Topographie über variable strukturangepasste Auflösung mit wesentlich weniger Zellen bzw. Elementen abbilden als über strukturierte Gitter³⁵. Unstrukturierte Modelle kommen daher vor allem zur Simulation größerer Untersuchungsgebiete sowie bei Erforderung eines möglichst geringen Rechenaufwandes (z.B. im operationellen Einsatz) zur Anwendung.

Die Generierung eines optimal an Topographie, Strömungscharakteristik, Zielgrößen und Simulationsverfahren angepassten unstrukturierten Gitters erfordert trotz der Entwicklung von Automatisierungsmethoden noch einen beträchtlichen Aufwand an manueller Arbeit. Geographische Informationssysteme stellen zwar Algorithmen zur Erzeugung unstrukturierter Netze zur Verfügung (siehe Kap.4.2.2.3 und 6.2.2), hierbei ist jedoch zu beachten, dass ein Gitter, welches zwar die Geländestrukturen op-

³⁴ Die Methoden „IDW“ und „Triangulation“ werden in ARC/INFO nicht unter der Rasterfunktion „Resample“ geführt, können jedoch ebenso als solche eingesetzt werden.

³⁵ Der Nachteil einer theoretisch geringeren Genauigkeit der Variableninterpolation des numerischen Verfahrens wird nach *Krauter (2002)* hierdurch kompensiert.

timal nachbildet, zur Definition der Berechnungsknoten eines HN-Verfahrens völlig ungeeignet sein kann. Dies z.B. aufgrund

- langgezogener Dreieckselemente,
- sprunghafter Änderung der Elementgrößen
- und/oder zu geringer Auflösung in Bereichen starker Zielgrößengradienten.

Im Rahmen der Neckarmodellierung wurde für mehrere Teilstrecken ein zweidimensionales HN-Verfahren³⁶ auf Basis unstrukturierter Gitter zur Strömungssimulation (z.B. Teststrecke Guttenbach, Wehrumströmung bei Neckarsulm, Altarm bei Horkheim) eingesetzt. Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei der Simulation von Hochwasserabflüssen die Auflösung und Gestalt der Gitterstruktur im Bereich der Uferböschungen einen besonders signifikanten Einfluss auf die Stabilität und Genauigkeit der Berechnungsergebnisse hat. Durch gezielte höhere Auflösung und die Definition von Bruchkanten in Bereichen starker topographischer Steigungsgradienten lassen sich künstliche Rauheiten und numerische Fehler sowie die hierauf zurückzuführenden Ungenauigkeiten in den berechneten Zielgrößen vermeiden (siehe Kap.7.3.6). Eine gute Voraussetzung für die Genauigkeit und Stabilität des Lösungsverfahrens bieten Berechnungsgitter, deren Elemente ein Seitenverhältnis größer 1:6 aufweisen und deren Elementverteilung einen Wechsel des Gitterabstandes von Zelle zu Zelle um einen Faktor nicht größer 2 gewährleisten.

Es ist daher sinnvoll, die Netzstruktur zunächst mit einem an das Simulationsprogramm angepassten Netzgenerator unter Berücksichtigung der entsprechenden Zwangsgrößen zu erzeugen. GI-Systeme bieten dennoch über Visualisierungs- und Digitalisierungsfunktionen umfangreiche Möglichkeiten, das Preprocessing der 2D-HN-Simulation zu unterstützen³⁷. Im Wesentlichen sind hierbei zu nennen:

- Voranalyse des Untersuchungsgebietes bzgl. Gradientenwechsel etc.
- Digitalisierung von Bruchkanten (siehe Kap.6.2)
- Digitalisierung von Polygonen zur bereichsweisen Definition der Elementgröße
- Digitalisierung von Polygonen zur bereichsweisen Definition von Rauheitswerten
- Belegung der Knotenpunkte mit den Höhenwerten aus dem DGM („Mapping“)

In Abb. 6-12 ist der Vergleich eines unstrukturierten Netzes zur DGM-Erstellung mit der Zellstruktur eines 2D-HN-Modells für einen Fluss-Vorland-Abschnitt des Neckars dargestellt. Die Gegenüberstellung macht deutlich, dass die Delaunay-Vermaschung der topographischen Vermessungspunkte, welche ein plausibles Oberflächenmodell erzeugt, den oben beschriebenen Anforderungen an ein unstrukturiertes Berechnungsnetz zur Strömungssimulation nicht genügt. Ein Ablaufschema zur Interaktion zwischen GIS, Netzgenerator und HN-Simulationsprogramm findet sich in Abb. 6-13.

³⁶ FLUMEN (FLUvial Modelling ENgine) der Firma Beffa Hydrodynamics

³⁷ Der Datenexport und -import sollte z.B. über ASCII-Schnittstellen möglich sein.

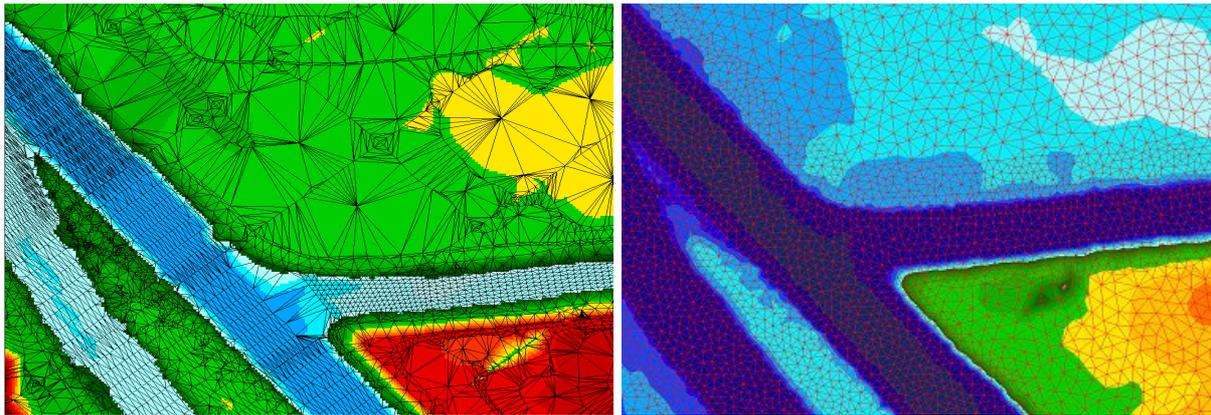


Abb. 6-12 Links: Dreiecksvermaschung zur DGM-Erstellung; Rechts: Zellstruktur eines 2D-HN-Modells

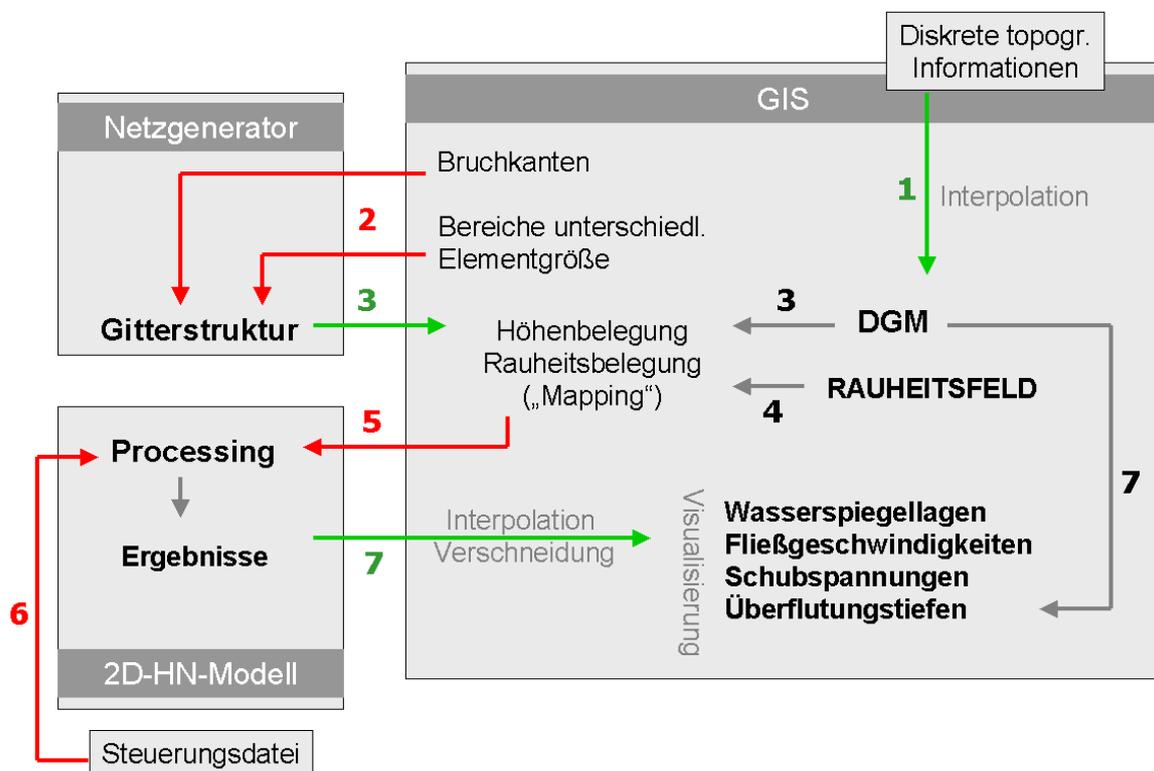


Abb. 6-13 Interaktion GIS – Netzgenerator – HN-Programm zur 2D-HN-Simulation auf Basis unstrukturierter Gitter

6.4 Verarbeitung der Berechnungsergebnisse

Eine wesentliche Zielsetzung dieser Arbeit ist es, praxisorientierte Methoden zur Ermittlung abflussabhängiger Hochwasserintensitäten in gefährdeten Bereichen vor und hinter Schutzanlagen zu entwickeln. Grundlage hierbei ist die flächenhafte Behandlung diskret verteilter Wasserstände und deren Verschneidung mit digitalen Geländeinformationen. Die nachfolgend vorgestellten Techniken wurden im Rahmen der Neckarmodellierung entwickelt und in die Werkzeugpalette des IKoNE-Modells integriert (siehe Kap.8.7). Die Anwendungen wurden in der Arbeitspraxis der Wasserwirtschaftsverwaltung am Neckar intensiv getestet und entsprechend optimiert. Zudem wurden sie als landesweit einsetzbare Version für das Projekt „GIS-GwD Baden-Württemberg“ realisiert (siehe Kap.9.6).

6.4.1 Erzeugung flächendeckender Wasserstandsinformationen

6.4.1.1 Eindimensionale Berechnungsergebnisse

Eindimensional berechnete Wasserstände beziehen sich auf die Lage der Querprofile (Berechnungstützpunkte) des HN-Modells. Die Speicherung eines WSP-Längsprofils erfolgt i.d.R. zunächst tabellarisch in Abhängigkeit der Gewässerstationierung. Zur Behandlung in GIS (z.B. zur Ermittlung von Überflutungsflächen) müssen diese punktuellen Wasserstandsinformationen (entlang der Hauptfließrichtung) zunächst in die Fläche gebracht werden.

Wie Untersuchungen im Rahmen der Neckarmodellierung gezeigt haben, eignen sich distanzabhängige Verfahren, wie sie in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellt wurden, lediglich bei geraden Flussverläufen und einfachen topographischen Fluss-Vorland-Strukturen. Daher wurde nach einer Möglichkeit gesucht, die Berechnungsergebnisse einer eindimensionalen Strömungssimulation gezielt und unter Berücksichtigung der hydraulischen Gegebenheiten flächenhaft mit dem Untersuchungsgebiet zu verschneiden.

Als eine effektive und flexible Methode stellte sich die Koppelung der errechneten Wasserstände an vordefinierte „Linien gleicher Wasserstände“ (i.d.R. senkrecht zur Flussachse bzw. Hauptfließrichtung) heraus. Zur Behandlung großer Flussabschnitte wurde eine GIS-basierte Automatisierungsroutine entwickelt, welche 2D-Linien (PolyLine) in benutzerdefinierten Abständen senkrecht zu einer (generalisierten) Gewässerlinie³⁸ (Flussachse) erzeugt. Um ein automatisiertes Einlesen eines Wasserspiegellängsprofils in die Attributstabelle der Liniendatei zu ermöglichen, werden jeder Linie als Attribut die zugehörige Gewässerstationierung bzw. der Name des entsprechenden Stützpunktes im HN-Modell zugewiesen.

³⁸ Die Gewässerverläufe Baden-Württembergs werden als PolyLineM im WAABIS-Datenpool flächendeckend vorgehalten.

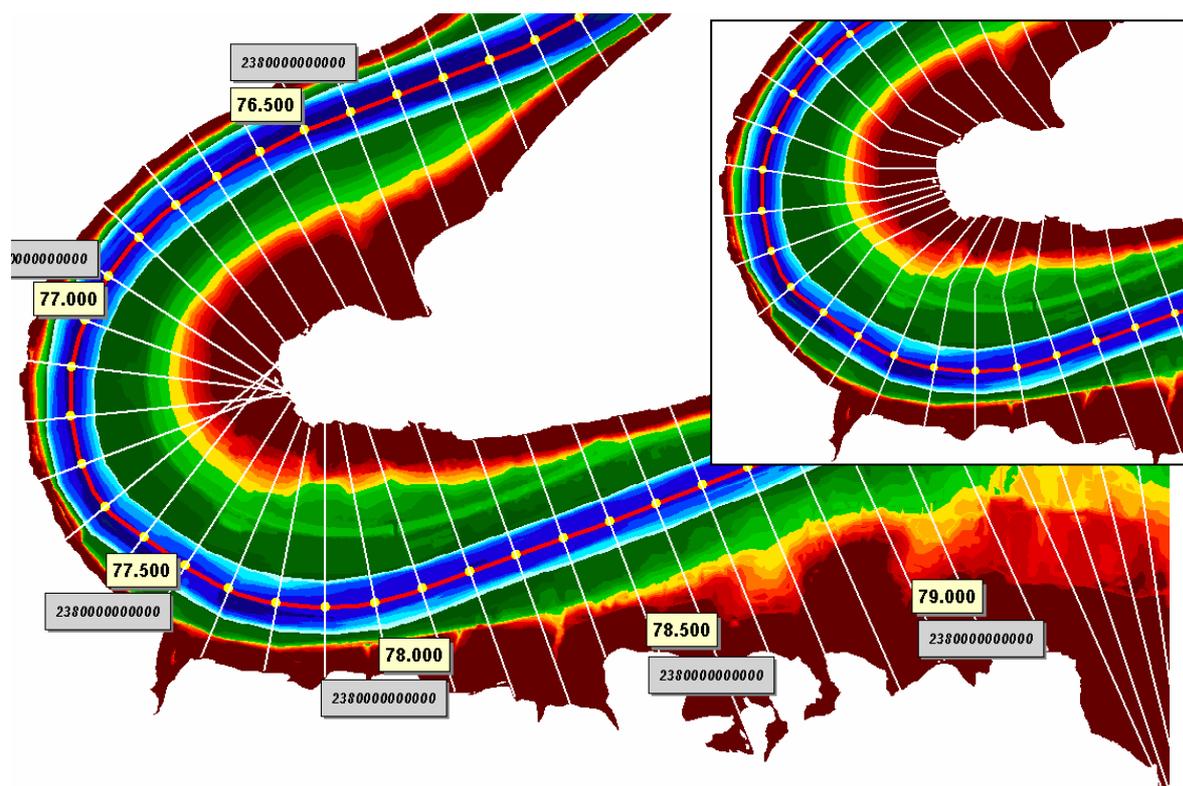


Abb. 6-14 Automatisierte Erzeugung attributierter Linien orthogonal zur Gewässerlinie (links) und manuelle Anpassung in starken Krümmungen (rechts)

Bei komplexeren Vorlandgeometrien (verzweigte Systeme, Flächen hinter Dammbauwerken etc.) ist jedoch eine manuelle Lagekorrektur unter Berücksichtigung der hydraulischen Gegebenheiten notwendig. In Abb. 6-15 (links) ist die Zuweisung eindimensional errechneter Hochwasserstände entlang dem Neckar in Bereichen vor und hinter Schutzbauwerken exemplarisch dargestellt. Während die Dammstrukturen zur Ermittlung des Schutzgrades mit den gewässerseitigen Wasserständen verschnitten werden, korrespondieren die Wasserstände in den geschützten Bereichen mit der potenziellen Versagensstelle (hier beispielhaft bei Fluss-km 115+200 und 117+935).

Bei stark gekrümmten Gewässerverläufen kann die durch die Zentrifugalkraft verursachte Wasserspiegelquerneigung auf Basis eindimensionaler Berechnungsergebnisse in Abhängigkeit der mittleren Fließgeschwindigkeit, des Kurvenradius und der Gewässerbreite sowie eines empirischen Beiwertes abgeschätzt werden (vgl. [Mock & Theune, 1988]). Bei der Berechnung von Fließtiefen bzw. Überflutungsflächen im GIS lässt sich die Querneigung über das Konzept der 3D-Linien berücksichtigen, wobei der gemittelte Wasserstand (1D) für die jeweilige Vorlandseite entsprechend erhöht bzw. verringert wird. Eine Teilautomatisierung dieser Vorgehensweise kann durch die zusätzliche Attributierung der Linien bezüglich ‚Kurvenradius‘ und ‚Gewässerbreite‘ erreicht werden: Neben den errechneten Wasserständen wird auch die mittlere Fließgeschwindigkeit eines jeden Stützpunktes des 1D-HN-Modells über das

Attribut der ‚Gewässerstationierung‘ übergeben. Nun können die Querneigungen berechnet und über die 3D-Linien flächenhaft umgesetzt werden. In den Übergangsbereichen zwischen maximalen und minimalen Kurvenradien wird interpoliert.

Einsatzmöglichkeiten hierzu bieten sich prinzipiell bei großräumigen Untersuchungsgebieten mit eindimensional abstrahierbarer Hauptströmung und ausgeprägten Flusskrümmungen. Im Einzelfall ist zu prüfen, ob vor dem Hintergrund einer gesamtheitlichen Betrachtung der Modellunsicherheiten der zusätzliche Aufwand bei der Ermittlung von Überflutungsflächen gerechtfertigt ist. U.U. kann es angemessen sein, die Wasserspiegelquerneigung nur zur Festlegung von Bemessungswasserständen zu berücksichtigen, ohne sie zusätzlich mittels GIS-Technologie flächenhaft umzusetzen.

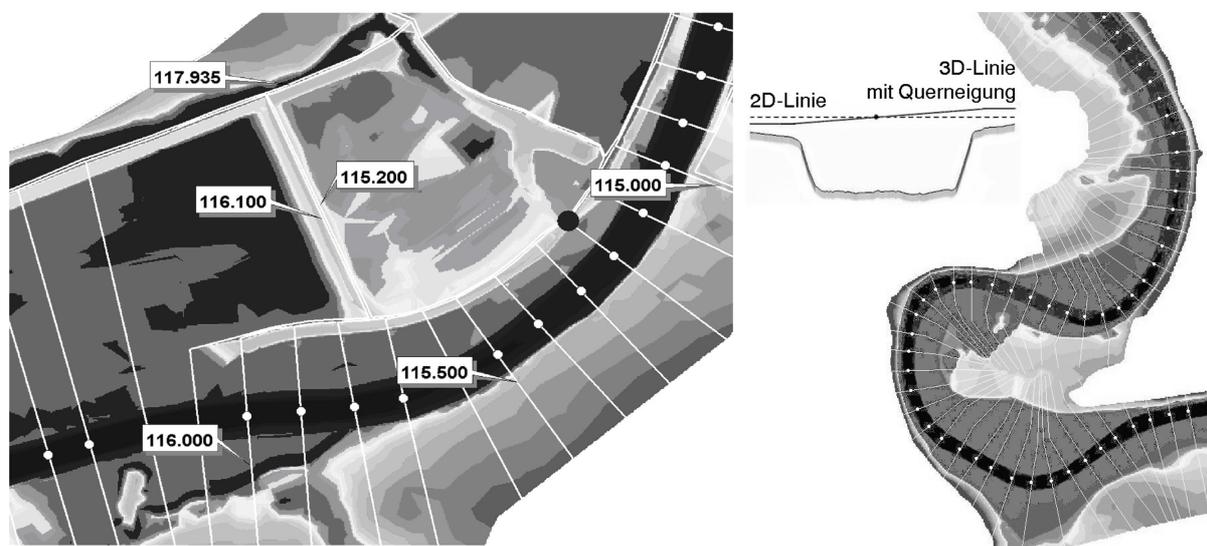


Abb. 6-15 Beispiel einer manuellen Anpassung von „Linien gleicher Wasserstände“ zur Hochwasser-Gefährdungsanalyse vor und hinter Schutzbauwerken (links); Berücksichtigung der Querneigung über 3D-Linien (rechts)

Zur Erzeugung des Rasters der Gewässeroberfläche werden die Höhenwerte analog zur Geländemodellierung zwischen den Linien interpoliert. Die Auswahl des Interpolationsverfahrens ist bei relativ gleichmäßigem Wasserspiegelgefälle von untergeordneter Bedeutung. Lediglich polynomische Verfahren sind aufgrund der Berechnung von Interpolationswerten außerhalb des Höhenspektrums der Ausgangsdaten ungünstig. Bruchkanten oder sogenannte „Barriers“ können an sprunghaften Änderungen der Wasseroberfläche (z.B. an Absturzbauwerken) die Qualität des Oberflächenmodells verbessern. Für das Simulationssystem Neckar wurde das Verfahren der Triangulation gewählt.

Ein Ablaufschema zur (teil-)automatisierten Erzeugung eines kontinuierlichen Modells einer Wasserspiegellage auf Basis eindimensionaler Berechnungsergebnisse ist in Abb. 6-16 dargestellt. Eine im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte umfassende

Analyse zur Anwendbarkeit der Methodik im Vergleich zu zweidimensional errechneten Wasserspiegellagen wird in Kap.7 dokumentiert.

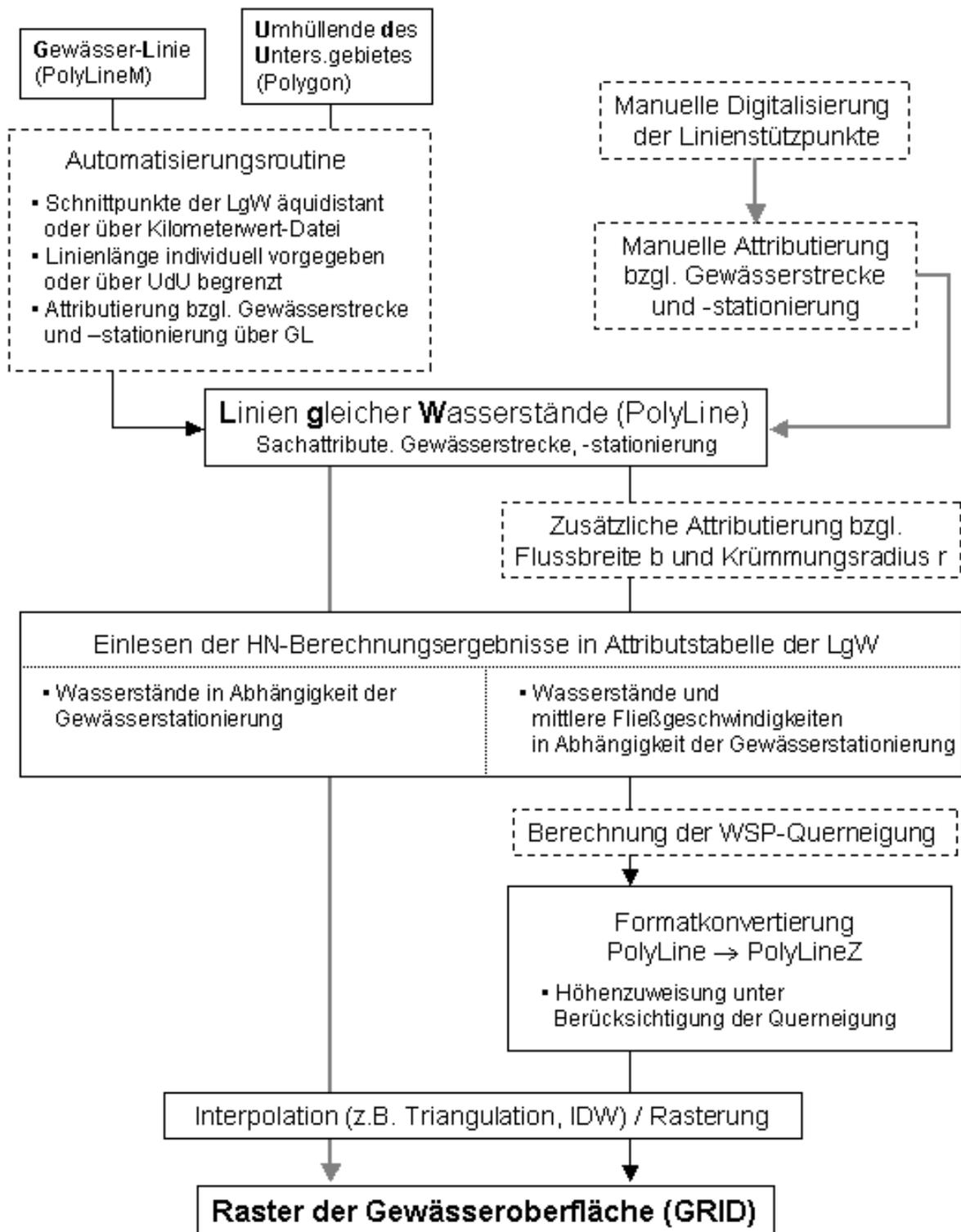


Abb. 6-16 Ablaufschema zur Erzeugung eines kontinuierlichen Oberflächenmodells der Wasserspiegellage auf Basis eindimensionaler Berechnungsergebnisse

6.4.1.2 Zweidimensionale Berechnungsergebnisse

Bei der zweidimensionalen Strömungssimulation erhält man als Ergebnis für jeden Berechnungstützpunkt einen Wasserstand ($y(Q,t)$), sodass auch hier wiederum eine Verknüpfung von Geodaten (Vektorpunkte) und Sachdaten (Wasserstände, Abflussmenge, Zeitpunkt) und die Erzeugung eines Oberflächenmodells über Interpolation möglich ist. Eine flächenhafte Extrapolation der Berechnungsergebnisse in Gebiete, die rechnerisch nicht überflutet sind, kann sinnvoll sein, um z.B. im Hochwasserfall potenziell gefährdete Bereiche hinter Schutzanlagen oder Senken auszuweisen. Außerdem können hierdurch auch die topographisch höher gelegenen Flächen bzgl. ihrer „Sicherheitsreserven“ klassifiziert werden.

Zur Extrapolation zweidimensional errechneter Wasserspiegellagen wurden im Rahmen dieser Arbeit die in Kap.6.2.2 und 6.3.2 erläuterten Interpolationsmethoden bzgl. ihrer Anwendbarkeit für die Praxis getestet. Als geeignet stellte sich lediglich das rasterbasierte distanzabhängige Verfahren „Search Method“ heraus. Bei der Anwendung dieses simplen Algorithmus wird analog zur „Nearest Neighbour Method (NNM)“ davon ausgegangen, dass eine zunächst unbenetzte Zelle als Bezugswasserstand den am nächsten gelegenen benetzten Stützpunkt des HN-Modells zugewiesen bekommt. (Im Gegensatz zur NNM werden jedoch NODATA-Werte ignoriert.) Das Ergebnis dieser sehr pragmatischen Vorgehensweise muss natürlich in Abhängigkeit der topographischen Gegebenheiten hinsichtlich der hydraulischen Plausibilität überprüft und gegebenenfalls manuell über GRID-Editierfunktionen korrigiert werden.

Bei höherer Komplexibilität der topographischen Situation (z.B. bei stark mäandrierendem Gewässerverlauf, Umströmung von Längsbauwerken) kann jedoch auch die im vorangegangenen Abschnitt erläuterte Methode der „Linien gleicher Wasserstände“ in Verbindung mit den diskreten Stützpunkten des 2D-HN-Modells eingesetzt werden.

Gruppe	Verfahren	Einsatzgebiete / Bewertung
Distanzabhängige Verfahren	Search Method	Gute Eignung bei einfacher Topographie
	Nearest Neighbour	Berücksichtigung von NODATA-Werten nicht sinnvoll
	IDW	Mittelung der verbundenen Stützpunktwerte nicht sinnvoll
Lineare Verfahren	Bilinear Method, Triangulation	Ergebnisse nur in konkaven Bereichen; Mittelung der verbundenen Stützpunktwerte nicht sinnvoll

Polynomische Interpolation	Spline-Funktionen	Aufgrund von Ergebnissen außerhalb des Höhengenspektrums der Ausgangsdaten nicht empfehlenswert (vergleiche Kap.6.2.2)	–
Manuelle Verfahren	Linien gleicher Wasserstände	Gute Eignung bei komplexer Topographie aber manueller Editieraufwand	+

Tabelle 6-3 Qualitative Bewertung verschiedener Verfahren zur Extrapolation zweidimensional ermittelter Wasserstände in rechnerisch nicht überflutete Bereiche

6.4.2 Differenzenraster und Überflutungspolygone

Durch Differenzenbildung zwischen dem Geländeeraster und dem Raster der Gewässer Oberfläche erhält man ein Raster, dessen Zellenwerte die jeweilige Differenz zwischen Geländehöhe und Wasserspiegellage darstellen. Alle Rasterzellen mit positivem Wert liegen über dem Wasserspiegel, alle negativen Felder sind rechnerisch überstaut (siehe Abb. 6-17). Zur farblichen Klassifizierung des Rasters ist es empfehlenswert im 'kritischen Bereich' der Null-Lage eine feinere Abstufung zu wählen. Zusätzlich sind im GIS die genauen Wertigkeiten der einzelnen Rasterzellen abrufbar.

Aus dem Differenzenraster eines Abflusszustandes lassen sich Polygone einer bestimmten Differenz zur errechneten Gewässer Oberfläche erzeugen, indem alle Rasterzellen mit Werten größer als die vorgegebene Differenz zu NODATA gesetzt und aus den Umhüllenden der verbleibenden Rasterzellen Polygone gebildet werden. Hierbei geht die Information der Wassertiefe verloren. Es werden somit alle Rasterzellen erfasst, deren Wert kleiner oder gleich der vorgegebenen Differenz ist. Wird die Differenz zu Null gewählt, stellt das Polygon die errechnete Überflutungsfläche dar, wobei auch solche Geländebereiche als überflutet angezeigt werden, die zwar tiefer als die Gewässer Oberfläche liegen, jedoch keine offene Verbindung zum Wasserkörper des Flusses haben. Die Praxis zeigt jedoch, dass in vielen Fällen auch solche Bereiche durch Sickerwasser oder versteckte Durchlässe überschwemmt werden. Zudem ist es in vielen Fällen durchaus zweckmäßig, auch potentiell gefährdete Flächen zu erfassen (Risikokartierung). Die Lagegenauigkeit der ermittelten Grenzlinie hängt von der Genauigkeit der errechneten Wasserstände an den Berechnungspunkten des HN-Modells, der Übertragung der berechneten Wasserstände in die Fläche (Inter- bzw. Extrapolation) sowie der Genauigkeit bzw. Auflösung des zugrunde gelegten Höhenmodells ab. Eine detaillierte Analyse der berechneten Überschwemmungsgrenzen unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Unsicherheiten ist nur über das Differenzenraster möglich.

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit wurden GIS-Funktionalitäten entwickelt, welche die potenziell gefährdeten Bereiche ohne offene Verbindung zum Wasserkörper des Flussschlauches erkennen und entsprechend klassifizieren. Zudem kann eine Überprüfung der Überflutungsgefährdung von Hochwasserschutzmaßnahmen, welche nicht im Geländemodell erfasst sind (z.B. mobile Wände), jedoch als 3D-Linien in digitalisierter Form vorliegen, durchgeführt werden (siehe Kap.8.7). In Abb.

6-18 ist ein Differenzenraster dem errechneten Überflutungspolygon mit Klassifizierung bezüglich der rechnerisch überfluteten und potenziell gefährdeten Bereiche hinter einer (mobilen) Schutzeinrichtung gegenübergestellt.

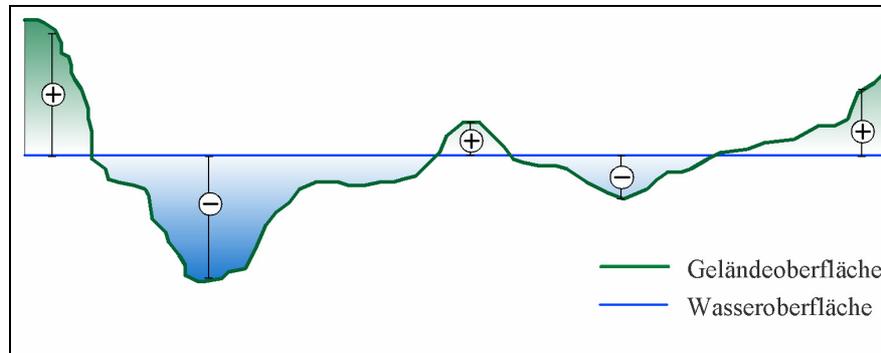


Abb. 6-17 Erzeugung eines Rasters der Differenzen zwischen Geländehöhen und Wasserspiegellage

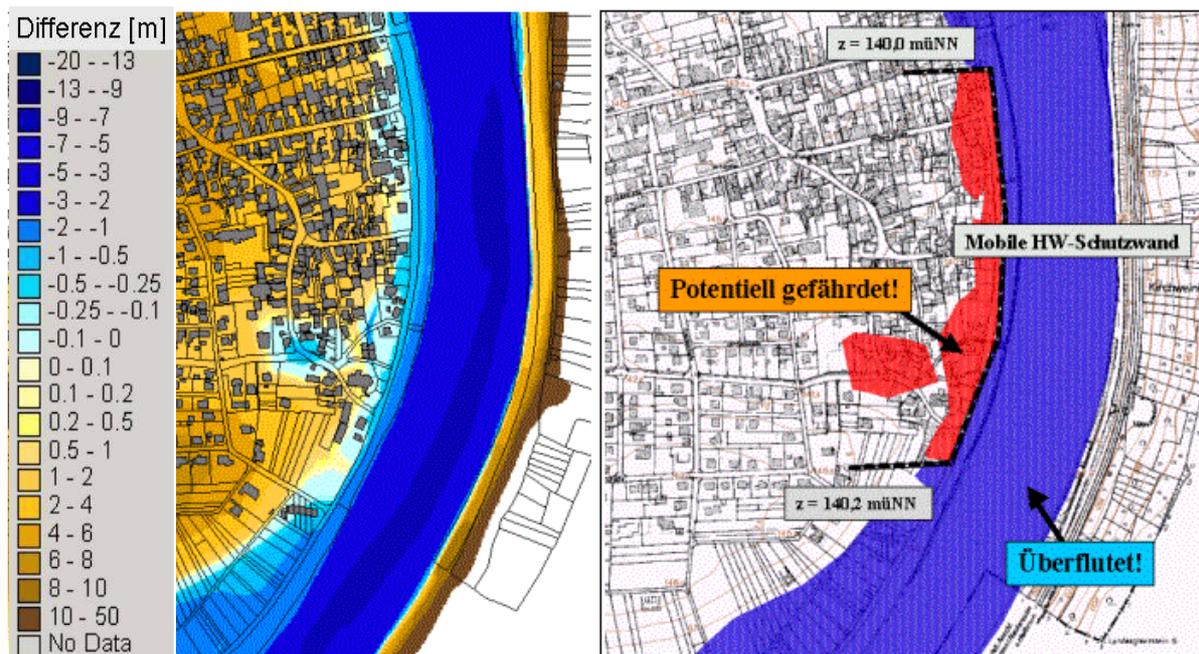


Abb. 6-18 Differenzenraster (links) und Überflutungspolygon mit Klassifizierung der rechnerisch überfluteten sowie potenziell gefährdeten Bereiche (rechts)

6.4.3 Geschwindigkeitsfelder

Neben der Berechnung und Darstellung von Überflutungsflächen lassen sich mittels GIS auch Fließvektoren (Fließgeschwindigkeit, Fließrichtung) und Geschwindigkeitsfelder (interpoliertes Raster) z.B. als Ergebnis einer zweidimensionalen Strömungssimulation zu Analyse- und Präsentationszwecken verarbeiten. Als Schnittstelle zur HN-Software dienen i.A. die ASCII-Daten der Anfangs- und Endkoordinaten errech-

netter Richtungsvektoren. Die Fließgeschwindigkeiten können prinzipiell entweder über die Länge des Vektors oder als Sachattribut übergeben werden. Eine Ausdünnung der Vektorfelder kann zur übersichtlicheren Darstellung sinnvoll sein. Rasterbasierte Geschwindigkeitsfelder eignen sich z.B. zur Differenzenbildung im Rahmen der vergleichenden Analyse eines Variantenstudiums. In Abb. 6-19 sind beispielhaft berechnete Geschwindigkeitsvektoren aus lokalen zweidimensionalen Hochwassersimulationen am Neckar abgebildet. Die Topographie des Untersuchungsgebietes der Kochermündung wurde über ein strukturiertes Gitter, das der Neckarkurve bei Heilbronn über ein unstrukturiertes Gitter als Systemgeometrie berücksichtigt.

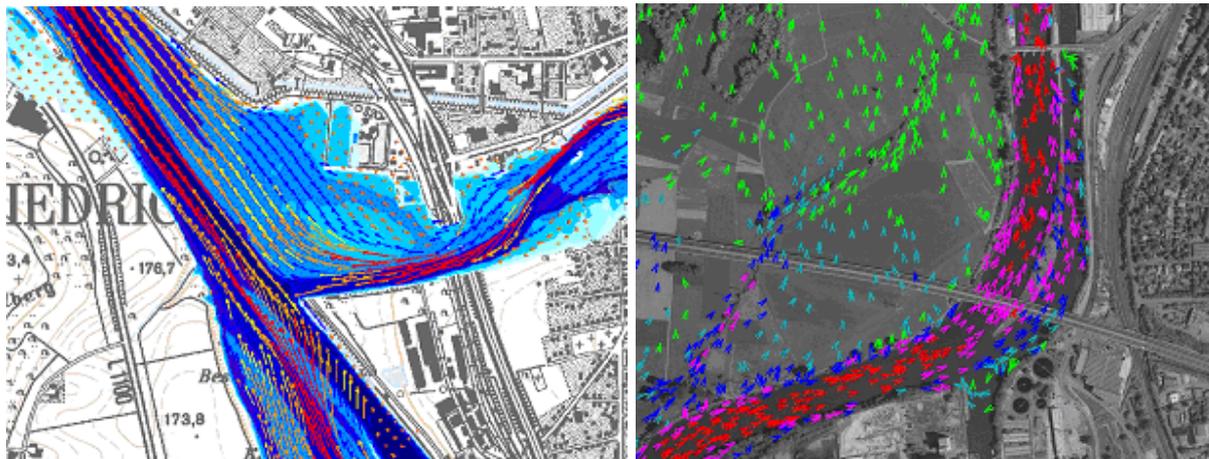


Abb. 6-19 Exemplarische Darstellung errechneter Fließgeschwindigkeitsvektoren am Beispiel der Kochermündung (links) sowie der Neckarkurve bei Heilbronn (rechts)

6.4.4 Hinweise zur Ergebnisvisualisierung

Bei der visuellen Überlagerung sowie funktionalen Verschneidung verschiedener Geodatensätze sind die unterschiedlichen Maßstäbe bzw. Auflösungen und die unterschiedlichen Genauigkeiten zu berücksichtigen. Beispielsweise lassen sich als Ergebnis einer Hochwassersimulation unabhängig von der zugrunde liegenden Datenbasis Überflutungsraster in beliebig hoher Auflösung generieren, ohne hierdurch einen Zugewinn an Genauigkeit zu erreichen. Die Überlagerung eines „feinpixeligen“ Tiefenrasters mit hochgenauen (Vektor-) Daten z.B. der ALK kann zu einer falschen Erwartungshaltung bei der Interpretation der Ergebnisse führen. So sind gerade bei einer flurstücksscharfen Betrachtungsweise (z.B. zur Ausweisung rechtskräftiger Überschwemmungsgebiete) die Unsicherheiten der errechneten Überflutungsflächen eingehend zu analysieren.

Grundsätzlich ist also darauf zu achten, dass die Auflösungen und Maßstäbe der Darstellungen entsprechend den zugrunde liegenden Datengenauigkeiten ausgewählt werden. Es liegt in der Verantwortung des Modellierers, die Transparenz der Datengrundlagen und Verfahren zu gewährleisten. Hierdurch können die Möglichkeiten und die Grenzen der numerischen Simulation vor Auftraggebern und der Öffentlichkeit deutlich gemacht und einer oftmals anzutreffenden skeptischen Grundhaltung

gegenüber Modellen, aber auch überzogenen Erwartungshaltungen entgegen gewirkt werden. Mit ihrer uneingeschränkten „Zoom“-Funktion, also der frei wählbaren Vergrößerung des Bildausschnittes, birgt der Einsatz Geographischer Informationssysteme zwar einerseits die Gefahr einer unangemessenen Ergebnisinterpretation, auf der anderen Seite bietet der einfache und schnelle Zugriff auf Basisdaten und Informationsverknüpfungen (z.B. Metadaten zugrunde gelegter topographischer Informationen) eine hervorragende Möglichkeit der transparenten Datenbereitstellung und umfassenden (Sensitivitäts-) Analyse der Ergebnisse.

6.5 Weiterführende Anwendungsmöglichkeiten

6.5.1 Gefahren- und Risikokarten

Die Ermittlung von Schadens erwartungswerten und Erstellung von Gefährdungs- und Risikokarten auf Basis hydrodynamisch-numerischer Berechnungsergebnisse stellen einen zentralen Bestandteil eines zielgerichteten Hochwassermanagements dar. GIS-Technologien liefern hier auf meso- und mikroskaliger Ebene die funktionale Grundlage zur Erfassung von flächen- oder objektbezogenen Informationen zur Landnutzung und deren Verschneidung mit Hochwasserintensitäten bestimmter Auftretenswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung von nutzungsabhängigen Intensitäts-Schadens-Funktionen.

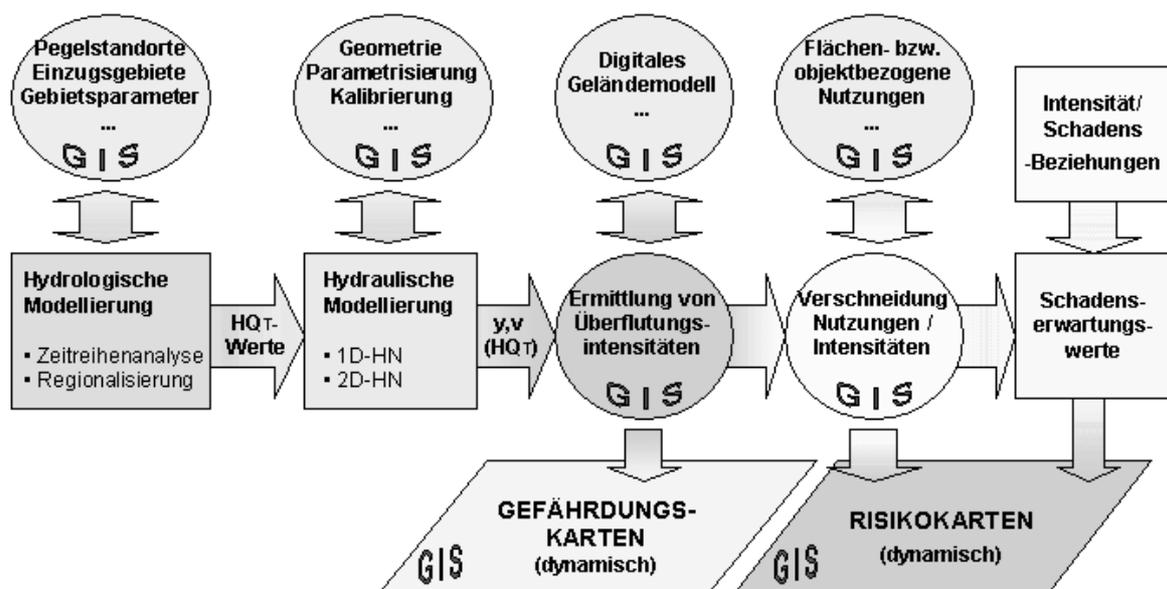


Abb. 6-20 Grundbausteine der Risikoanalyse mit Darstellung der GIS-gestützten Teilkomponenten

Die Ergebnisse einer Gefährdungs- bzw. Risikoanalyse lassen sich in digitalen „dynamischen Kartenwerken“ aggregieren und z.B. über das Internet zur kontinuierlichen Aufklärung der Bevölkerung bereitstellen. In Abb. 6-20 ist eine schematische Darstellung der Grundbausteine der Risikoanalyse mit Ausweisung ihrer GIS-gestützten Teilkomponenten gegeben.

7 Praxisbezogene Strömungsmodellierung zur Hochwassersimulation

7.1 Gedanken zur Modellbildung

Unter „Modell“ kann im wissenschaftlichen Sinne ein „vereinfachendes, aber die wesentlichen Merkmale bewahrendes Abbild eines realen Systems und der in ihm ablaufenden Prozesse“ verstanden werden. [Zielke, 1999]

Zur Simulation von Hochwasserereignissen einschließlich ihrer Auswirkungen grundlegend ist die Modellierung der Strömungsverhältnisse in den gefährdeten Fluss-Vorland-Bereichen. Primäre Zielgrößen sind hierbei die flächenhafte Ermittlung von Wasserstands-Abfluss-Beziehungen sowie die Nachbildung des Wellenablaufes unter Berücksichtigung von Retentionseffekten und Wellenüberlagerungen. Die in Kap.3 aufgeführten Einsatzgebiete des Simulationswerkzeuges als Decision-Support-System erfordern sowohl die Erfassung des stark instationären und räumlich verteilten Systemverhaltens im Ist-Zustand, als auch die Möglichkeit der Analyse bzw. Prognose der Auswirkungen z.B. topographischer Veränderungen im Modellgebiet; dies unter Vorgabe beliebiger Zuflussszenarien.

Hieraus ergibt sich, dass das einzusetzende Verfahren die physikalischen Strömungsprozesse beschreiben muss. Allein über hydrologische oder stochastische Methoden, die das Systemverhalten auf Basis gemessener Pegelwerte nachzubilden versuchen, sind die genannten Anforderungen nicht zu erfüllen. Hydrodynamisch-numerische (HN-)Modelle hingegen sind in der Lage, die physikalischen Strömungsprozesse eines Fließgewässers zur Berechnung der o.g. Zielgrößen mathematisch nachzubilden.

HN-Modelle basieren auf den hydrodynamischen Grundgleichungen (Erhaltungssätze für Masse und Impuls bzw. Energie) und deren Lösung über numerische Algorithmen (siehe Kap.4.1). Über die dreidimensionalen³⁹ Navier-Stokes-Gleichungen lässt sich die nichtlineare Systemdynamik eines Fließgewässers einschließlich ihrer turbulenten Ausprägungen prinzipiell vollständig beschreiben. Dieser konzeptionelle⁴⁰ Anspruch wird in der Praxis selbst beim Einsatz hochaufgelöster dreidimensionaler Modelle jedoch nur teilweise umgesetzt, da die Simulation der in der Realität hochkomplexen und kleinskaligen Strömungsphänomene die Einbeziehung statistischer Turbulenzmodelle und empirischer Gleichungen (z.B. zur Erfassung der Energieverluste) sowie eine räumliche und zeitliche Integration bzw. Diskretisierung erfor-

³⁹ Unter Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit handelt es sich genau genommen um die Auflösung in vier Dimensionen. Die im Folgenden benutzten Definitionen beziehen sich jeweils nur auf die Anzahl der Raumdimensionen.

⁴⁰ Der Begriff „konzeptionell“ steht hier im Gegensatz zu „empirisch“ und setzt nach [Zielke, 1999] die detaillierte Bekanntheit der Gesetzmäßigkeiten eines Prozesses und deren mathematische Formulierbarkeit voraus.

dert. Das Modell erreicht somit nicht den Informationsgehalt von Naturgesetzen, was sich genau genommen begrenzend auf die Güte des Modells, d.h. dessen Prognosefähigkeit und Übertragbarkeit auswirkt. An dieser Stelle wird allerdings auch darauf hingewiesen, dass turbulente Strömungen chaotisch sind. Dies bedeutet, dass sich eine Strömung in ihrer höchsten Auflösung in der Natur selbst unter identischen Rand- bzw. Anfangsbedingungen nicht exakt wiederholen wird. Selbst eine exakte Nachbildung des dynamischen Strömungsverhaltens (direkte numerische Simulation DNS⁴¹) „liefert also einen Strömungszustand, den die Natur zwar prinzipiell verwirklichen kann, aber so mit allerhöchster Wahrscheinlichkeit nie annehmen wird“ [Malcherek, 2002a].

Dieser Hinweis soll jedoch nicht die grundsätzliche Aussagefähigkeit numerischer Strömungsmodelle in Frage stellen. Er soll nur den Fokus auf das entscheidende Bewertungskriterium lenken, nämlich die anwendungsbezogenen Zielgrößen. Beim Einsatz des Modells in der wasserwirtschaftlichen Praxis (z.B. im Rahmen des Hochwassermanagements) kommt es nämlich nicht darauf an, die realen Strömungsprozesse einschließlich der turbulenten Fluktuationen in größtmöglicher räumlicher und zeitlicher Auflösung möglichst exakt nachzubilden. Ein dem Anwendungsziel angepasstes Modell muss die für die Entscheidungsfindung notwendigen und wesentlichen Größen unter Berücksichtigung der vorgegebenen Anforderungen an Genauigkeit und Prognosefähigkeit sowie Erstellungsaufwand und Modell-Handling (Schnittstellen, Rechenzeit) extrahieren.

Bei der Simulation eines Hochwasserereignisses ist zu beachten, dass man es nicht mit einem geometrisch exakt zu beschreibenden Modellgebiet zu tun hat, sondern mit einem bezüglich Topographie und Oberflächenbeschaffenheit äußerst heterogenen System, welches zudem zeitlichen Veränderungen (Morphodynamik, jahreszeitabhängige Vegetationszustände, anthropogene Eingriffe) unterworfen ist. Hierdurch stellt bereits die Definition des zu analysierenden Systemzustandes eine Herausforderung dar. Zudem sind die durch die Vorlandüberströmung entstehenden Energieverluste aufgrund der komplexen Geometrien, der veränderlichen Bewuchssituationen und der auftretenden Fließgeschwindigkeitsgradienten schwer zu quantifizieren. Außerdem erschweren die Ungenauigkeiten der gemessenen (Scheitel-) Wasserstände (z.B. durch Aufnahme von Geschwemmsellinien) und der Abflusspegelmessungen sowie die schwer abzuschätzenden seitlichen Zuflüsse (Einleitungen, Oberflächenabfluss etc.) die Kalibrierung des Modells.

Aufgrund dieser Schwierigkeiten können - eine fachlich fundierte Auswahl der numerischen Modellierungsmethode und gewissenhafter Modellaufbau sowie Kalibrierung vorausgesetzt - die auf das Berechnungsverfahren zurückzuführenden Fehler u.U. gering sein im Vergleich zu den Unsicherheiten der Eingangsgrößen. Eine umfassende Sensitivitätsanalyse bezüglich aller Eingangsgrößen ist daher die entschei-

⁴¹ DNS = direkte numerische Simulation / Unter DNS wird nach [Malcherek, 2002a] die „exakte Nachbildung eines dynamischen Verhaltens in einem Ersatzsystem“ bezeichnet.

dende Grundlage, um Aussagen zu den zu erwartenden Modellgenauigkeiten treffen zu können. In Abb. 7-1 sind die Anforderungen an das Modell zur Simulation des Hochwasserabflusses den potenziellen Fehlerquellen gegenübergestellt.

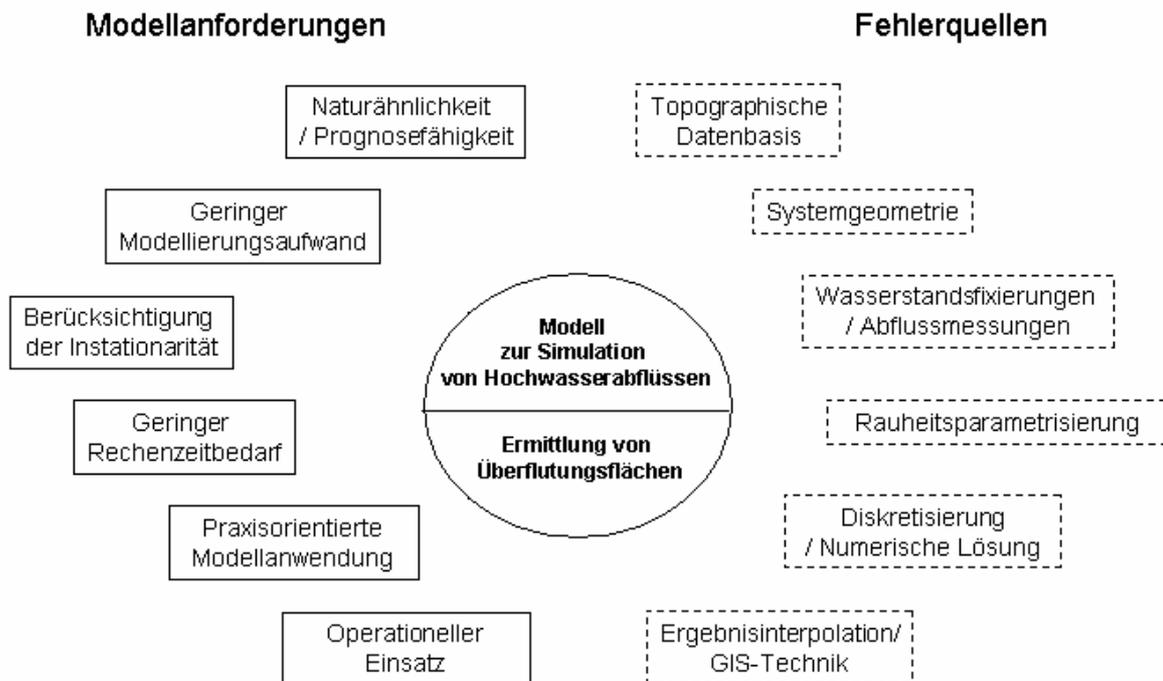


Abb. 7-1 Gegenüberstellung der Anforderungen und Fehlerquellen der Simulation von Hochwasserabflüssen

7.2 Verfahrensübersicht

Numerische Modelle zur Simulation von Strömungen mit freier Oberfläche lassen sich zum einen nach ihrer Erfassung der räumlichen Dimensionen und zum anderen nach der Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit des Abflussgeschehens (stationär / instationär) unterscheiden (siehe Kap.4.1).

Durch den Einsatz eines instationären Werkzeuges können die beim Durchgang einer Hochwasserwelle auftretenden Retentionseffekte und Wellenausbreitungsvorgänge berücksichtigt werden. Dies ist notwendig, um z.B. Auswirkungen von Baumaßnahmen auf den Hochwasserabfluss im gesamten Bereich der Talaue, insbesondere nach unterstrom, beurteilen zu können (Nachweis der Hochwasserneutralität). Betrachtet man die Strömungsverhältnisse während eines Hochwasserabflusses mit überströmten Vorländern, so ist zwischen abflusswirksamen und retentionswirksamen Bereichen zu unterscheiden. Eine Veränderung der Volumenfunktion der Retentionsräume hat auf das Ergebnis einer stationären Berechnung ($Q(t) = \text{const.}$) keinen Einfluss. Bei einer instationären Betrachtungsweise erkennt man jedoch ihre Auswirkung auf die Entwicklung einer Abflussganglinie. Durch Reduzierung des

Rückhaltevolumens der Flussstrecke (z.B. infolge einer Eindeichung der Talauflage) kommt es, bezogen auf einen Berechnungsstützpunkt im Modellgebiet, zu einer Aufsteilung der Hochwasserganglinie. Der Scheitelwert vergrößert sich und erreicht den Berechnungsstützpunkt zu einem früheren Zeitpunkt.

Während zur Bearbeitung einer Vielzahl von Fragestellungen, welche im Rahmen des HW-Managements auftreten, die Erforderung einer instationären Betrachtungsweise klar auf der Hand liegt, gestaltet sich die Frage nach der notwendigen räumlichen Diskretisierung eines Hochwassersimulationsmodells in vielen Fällen als weniger leicht zu beantworten.

Eindimensionale (1D) Modelle betrachten die Strömung nur in Hauptfließrichtung und liefern über den Strömungsquerschnitt bzw. über Teile des Querschnittes gemittelte Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten. Über simultane Lösungsmethoden lassen sich auch verzweigte und vermaschte Flusssysteme simulieren. Zudem lassen sich Kontrollelemente wie Kraftwerke, Wehre, Brücken und Polder berücksichtigen. Aus der Ingenieurspraxis liegen seit geraumer Zeit umfangreiche Erfahrungen in der Anwendung eindimensionaler HN-Modelle zur Simulation von Fließgewässerströmungen vor.

Zweidimensional tiefengemittelte Verfahren⁴² lösen das Modellgebiet auch in lateraler Ausdehnung auf. War früher der Einsatz zweidimensionaler (2D) HN-Modelle für großräumige Untersuchungen an Fließgewässern aufgrund begrenzter Rechnerleistung von vornherein ausgeschlossen, rücken sie durch die rasante Leistungssteigerung der zur Verfügung stehenden Prozessoren seit einigen Jahren immer weiter in das Blickfeld der praxisorientierten Modellanwendung. Hinzu kommt die steigende Verfügbarkeit hochaufgelöster Informationen zur Geländetopographie und Bewuchssituation über flugzeuggestützte Aufnahmeverfahren, die eine höherdimensionierte Simulationsmethode aufgrund der verbesserten Datenlage und der hierdurch gewonnenen Erkenntnisse über die Strömungscharakteristik in lateraler Ausdehnung sinnvoll erscheinen lassen.

Dreidimensionale Verfahren erfassen die Strömung räumlich in allen drei Dimensionen. In den meisten Anwendungsfällen der Hochwasserhydraulik sind sie weiterhin mit einem nicht vertretbaren numerischen Aufwand verbunden. Ihre praktischen Einsatzgebiete sind zurzeit auf kleinräumige Betrachtungen und technische Geometrien (z.B. Bauwerksumströmungen) beschränkt.

⁴² Neben den tiefengemittelten 2D-Verfahren existieren auch horizontal gemittelte Modelle (z.B. zur Modellierung von Seen), die jedoch zur Fließgewässermodellierung nicht relevant sind.

7.3 Studie zum Einsatz 1D- und 2D-HN-Verfahren

7.3.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im Rahmen der nachfolgend dokumentierten Studie wurde am Beispiel eines ausgewählten repräsentativen Streckenabschnittes des Modellgebietes Neckar untersucht, inwieweit sich die Auswahl des HN-Verfahrens (1D, 2D) auf die primäre Zielgröße Wasserstand bzw. die errechneten Überflutungsflächen auswirkt und ob bzw. unter welchen Voraussetzungen durch die Anwendung eines zweidimensionalen Modells eine erhöhte Genauigkeit bzw. Aussagefähigkeit der Berechnungsergebnisse zu erwarten sind. Zu berücksichtigen war hierbei der Einfluss der Eingangsgrößen und Randbedingungen sowie, den Zielsetzungen einer integralen Flussgebietsbetrachtung entsprechend, die Anwendbarkeit des Verfahrens auf große Untersuchungsgebiete.

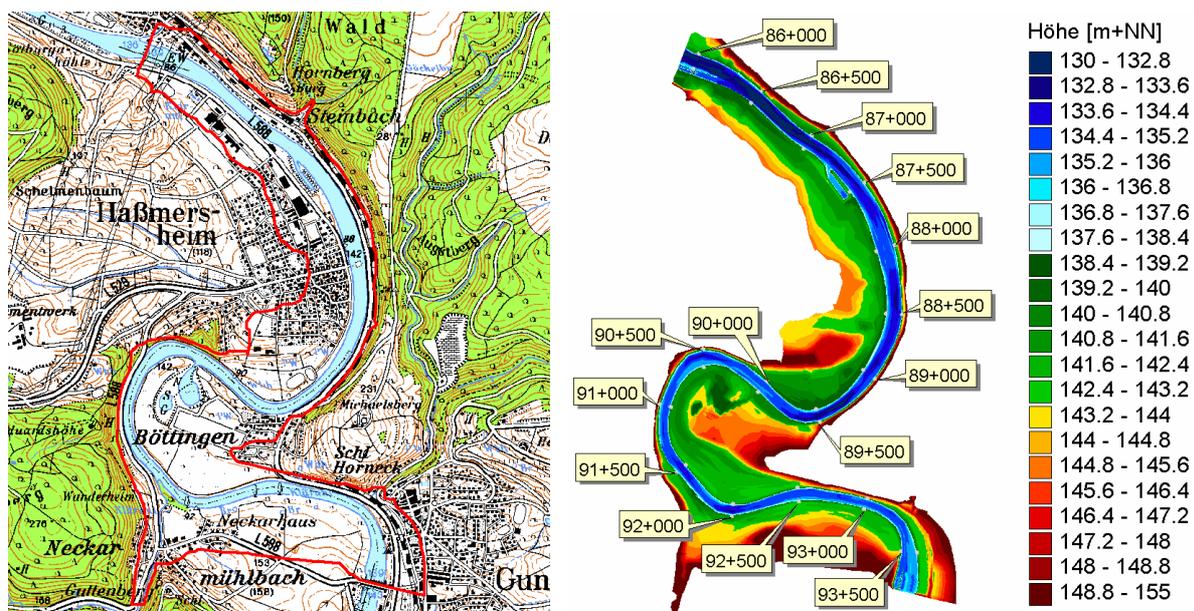


Abb. 7-2 Lageplan zum Untersuchungsgebiet und Darstellung des Digitalen Geländemodells mit Flusskilometrierung

Als Teststrecke wurde die Stauhaltung Neckarzimmern der Neckar-Staustufenkette zwischen Fluss-km 85+900 und 93+800 ausgewählt. Die untere Randbedingung des Modells stellt das Wehr Neckarzimmern dar, als obere Randbedingung wird ein Zufluss am Wehr Gundelsheim vorgegeben. Die Strecke weist keine signifikanten seitlichen Zuflüsse aus. Der Flussabschnitt ist gekennzeichnet durch starke Flusskrümmungen im Bereich des Böttinger Bogens. Im Hochwasserfall werden weite Bereiche der Vorländer (bis zu 350 m) überströmt. Daher ist mit Querneigungseffekten und vergleichsweise hohen Fließgeschwindigkeitsgradienten in lateraler Ausdehnung zu rechnen, was die Aussagekraft der eindimensionalen Abstrahierung in Frage stellen

könnte und einen Vergleich mit den Ergebnissen einer zweidimensionalen Modellierung interessant werden lässt.

Die Ortslage Haßmersheim bei km 88+000 ist stark hochwassergefährdet. Innerhalb der Ortslage verläuft das Gelände über mehrere hundert Meter mit geringer Steigung, so dass die Ausbreitung einer Überflutungsfläche und somit die Betroffenheit in diesem Bereich sehr stark auf eine Veränderung der Wasserspiegellage reagiert. Hierdurch ist eine prägnante exemplarische Darstellung möglicher Auswirkungen der Modellsensitivitäten auf die errechneten Überflutungsgrenzen möglich. In Abb. 7-2 ist ein Lageplan zum Untersuchungsgebiet gegeben. Kenngrößen zur Versuchsstrecke sind in Tabelle 7-1 zusammengestellt.

Kenngrößen der Versuchsstrecke Stauhaltung Neckarzimmern			
Länge:	7900 m	Abflussmenge HQ_{100} :	2610 m ³ /s
Breite des Fluss-schlauchs:	ca. 80 m	Fließgefälle bei HQ_{100} :	0,06 %
Breite der Vorländer:	bis zu 350 m	Fließtiefen bei HQ_{100} :	Flussbett: 8–11 m Vorländer: ≤ 4 m

Tabelle 7-1 Kenngrößen der Versuchsstrecke

Zunächst wurde mit beiden Verfahren (1D, 2D) eine Grundversion auf Basis aller zur Verfügung stehenden topographischen Daten erstellt. Die HN-Modelle wurden unabhängig voneinander mit Hilfe der gemessenen Scheitelwasserstände verschiedener HW-Ereignisse kalibriert. Der Vergleich der Kalibrierungsergebnisse erfolgte sowohl als Längsschnitt (hierzu wurden die 2D-ermittelten Wasserstände in Flussmitte abgegriffen) als auch flächenhaft (hierzu wurden die 1D ermittelten Wasserstände über Vektorlinien in die Fläche gebracht). Daran anschließend wurden die kalibrierten Modelle einer eingehenden Sensitivitätsanalyse über Variation folgender Eingangsgrößen bzw. Randbedingungen und Modellparameter unterzogen:

- Systemgeometrie:
 - Festlegung des abflusswirksamen Bereichs (1D)
 - Gitterstruktur und - auflösung (2D)
- Parametrisierung der Energieverluste
 - Rauheitsbeiwerte (1D, 2D)
 - turbulente Spannungen (2D)
- Hydrologische Eingangsgrößen
 - Abflussmenge (1D, 2D)

Des Weiteren wurde analysiert, welche Auswirkungen der Einsatz der GIS-gestützte Methode zur Interpolation eindimensional errechneter Wasserstände auf die berech-

neten Überflutungsflächen im Vergleich zu den zweidimensionalen Berechnungsergebnissen hat und inwieweit sich eine Berücksichtigung der Querneigungseffekte über vereinfachte Ansätze auf Basis eindimensionaler Ergebnisse auswirkt:

- Weiterverarbeitung der Berechnungsergebnisse
 - Interpolation der Wasserstände (1D)
 - Berücksichtigung von Querneigungseffekten (1D)

Die Ergebnisse der Variantenrechnungen wurden jeweils mit denen der Ausgangsmodelle verglichen. Die Differenzen wurden mit Hilfe statistischer Methoden ausgewertet und grafisch aufbereitet. Im Rahmen der Studie wurden ausschließlich stationäre Berechnungen durchgeführt.

7.3.2 Datengrundlagen

Die Datengrundlagen zur Erstellung eines Digitalen Geländemodells und der Systemgeometrien der HN-Modelle sowie die hydrologischen Eingangsdaten und Kalibrierungsgrundlagen sind in Tabelle 7-2 aufgeführt.

Topographische Datengrundlagen	Quelle
Querprofilaufnahmen im Abstand von 100 m	WSA Heidelberg
Höhenlinien der topographischen Karte DGK5	Landesvermessungsamt B.-W.
Digitales Kanalkataster (Kanaldeckelhöhen)	Gemeinde Haßmersheim
Hydrologische Eingangsdaten	Quelle
Ganglinien der Neckar-Bundespegel Rockenau, Lauffen für die HW-Ereignisse 1988/90/93	Fachstelle Gewässerkunde der Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Südwest
Hochwasser-Abflusslängsschnitt HQ _T Neckar	Landesanstalt für Umweltschutz (LfU)
Kalibrierungsdaten	Quelle
WSP-Fixierungen der HW-Ereignisse 1988/90/93	WSA Heidelberg
Luftbildaufnahmen des HW-Ereignisses 1993	Fa. Luftbild Schwab / GwD Neckar

Tabelle 7-2 Datengrundlagen zur Modellierung der Stauhaltung Neckarzimmern

7.3.3 Beschreibung der numerischen Verfahren

7.3.3.1 CARIMA / STReAM

Das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte eindimensionale hydrodynamisch-numerische Verfahren *CARIMA* wurde von *SOGREAH (1978)*, Grenoble, entwickelt. Es basiert auf der Lösung der eindimensionalen Strömungsgleichungen (Kontinui-

täts- und Impulsgleichung) nach Saint-Venant (siehe Kap.4.1.6) durch das implizite Differenzenverfahren nach Preissmann. Das Diskretisierungsschema nach Preissmann wurde in Kap.4.1 dargestellt.

Eingangsgrößen für das mathematische Modell sind zum einen die Topographie der zu untersuchenden Flussstrecke (Querprofile) und zum anderen die Abflusskurven bzw. Wasserstände über die Dauer der zu simulierenden Zeit an den Modellgrenzen (Randbedingungen). Des Weiteren kann als Anfangszustand (zur Zeit $t=0$) ein Wasserspiegellängsprofil (und somit das Wasservolumen) vorgegeben werden. Die Randbedingungen (RB) und der Anfangszustand sind zur Lösung des Saint-Venant-Gleichungssystems erforderlich. Als Ergebnis erhält man die Durchflüsse und Wasserstände an den Berechnungspunkten als Funktion der Zeit ($Q(t)$, $y(t)$). Bei einer „stationären“ Vorgabe (RB = const.) wird die Berechnung abgebrochen sobald sich gleich bleibende Abflussverhältnisse eingestellt haben.

Das Programm ermöglicht die Modellierung verzweigter und vermaschter Flusssysteme (Zuflüsse, Altarme, Ausleitungen etc.) und die programmtechnische Berücksichtigung von Bauwerken, wie z.B. Wehre, Schütze und Wasserkraftanlagen. Hierbei gewährleistet die implizite Lösungsmethode eine hohe Effizienz und numerische Stabilität. Die Quantifizierung der Energieverluste erfolgt über den Ansatz nach Gauckler-Manning-Strickler (siehe Kap.4.1.7). Der Rauheitsparameter k_{st} kann entweder innerhalb der Querprofile variierend (z.B. Unterteilung Flussschlauch / Vorländer) oder in Abhängigkeit der Fließtiefe definiert werden und dient als maßgebliche Kalibrierungsgröße. Zudem ist die Zuweisung zusätzlicher lokaler Energieverluste möglich.

Das Verfahren *CARIMA* wird am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK) der Universität Karlsruhe seit vielen Jahren zur Simulation von Fließgewässerströmungen eingesetzt und hat sich im praktischen Einsatz bei einer Vielzahl von Untersuchungen und Projekten bewährt [Theobald, 1999]. Mittlerweile wurde das mathematische Verfahren, welches in *CARIMA* in der nicht mehr zeitgemäßen Programmiersprache Fortran 77 implementiert ist, am IWK mit der objektorientierten Programmiersprache ANSI C++ neu umgesetzt und in das neue Simulationswerkzeug *STReAM* integriert. *STReAM* zeichnet sich durch eine modulare Programmstruktur aus und stellt effiziente Schnittstellen zur Anbindung externer Module und Bibliotheken zur Verfügung. Das System wird derzeit am IWK weiterentwickelt und erweitert. Gegenstand der Weiterentwicklung ist die Integration beliebig vermaschter Flusssysteme mit hydraulischen Sonderelementen wie auch die Entwicklung von Pre- und Postprozessoren.

Eine ausführliche Beschreibung und Bewertung der in *CARIMA* bzw. *STReAM* implementierten Methodik zur Diskretisierung und Linearisierung der eindimensionalen Kontinuitäts- und Impulsgleichung sowie zur Lösung des linearisierten Gleichungssystems des Lösungsverfahrens findet sich in *Cunge (1980)* und *Celan (2002)*.

7.3.3.2 *Hydro2de* / *FLUMEN*

Zur zweidimensionalen Modellierung wurde das Programm *Hydro2de* basierend auf einem strukturierten orthogonalen Rechteckraster mit quadratischen Zellen eingesetzt. Einige Vergleichsrechnungen mit unstrukturierten Dreiecksnetzen erfolgten zudem mit dem Softwarepaket *FLUMEN* (Fluvial Modelling Engine).

Beide Programme wurden von *Betta Hydrodynamics* entwickelt und lösen die tiefengemittelten Flachwassergleichungen (siehe Kap.4.1.5) unter Einsatz der Finite Volumen Methode (FVM). Die Kontrollvolumina der diskreten Berechnungsgitter werden durch die Mittelpunkte der Gitterzellen repräsentiert (Zellenmittelpunkt-Verfahren). Die Lösung des Differentialgleichungssystems erfolgt über Integration der Flüsse über die Oberflächen der Kontrollvolumina. Um die numerische Lösung bei der Interpolation zu glätten bzw. stabil zu halten, wird zur Interpolation der Flüsse zwischen benachbarten Zellen der *Upwind*-Ansatz verwendet, wobei mit einem sogenannten Limiter die numerische Genauigkeit auf 2.Ordnung gesteigert wird. Die Zeitdiskretisierung erfolgt explizit, sodass die Einhaltung der *Courant*-Bedingung erforderlich ist.

Die Sohlreibung wird über die empirische Fließformelnach Manning-Strickler berücksichtigt und geht als Sohlschubspannung $\tau_{B,i}$ in die Spannungsterme der tiefengemittelten Flachwassergleichungen ein. Das Verfahren erlaubt zudem eine separate Berücksichtigung von Bewuchswiderständen nach Gleichung (4-52), was jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Anwendung kam.

Hydro2de bietet als Option die Möglichkeit zur Berücksichtigung der turbulenten Spannungen über ein algebraisches Turbulenzmodell (Nullgleichungsmodell). Das Programm berechnet hierzu die turbulenten Spannungen nach dem Ansatz von *Boussinesq*, wonach diese in Abhängigkeit zum Gradienten der Fließgeschwindigkeit gesetzt werden (vgl. Kap.4.1.3). Für eine Strömung in x-Richtung ergibt sich die turbulente Spannung aufgrund des Geschwindigkeitsgradienten in y-Richtung zu:

$$\tau_{xy} = \rho v_t \frac{\partial u}{\partial y} \quad (7-1)$$

Die Wirbelviskosität v_t wird bei dem eingesetzten Verfahren über eine algebraische Beziehung als Funktion der Sohlschubspannung ausgedrückt:

$$v_t = c_v u^* h \quad (7-2)$$

mit u^* = Reibungsgeschwindigkeit bzw. Sohlschubspannungsgeschwindigkeit
 h = Fließtiefe
 c_v = Proportionalitätsfaktor

Zum Betrieb der Modelle sind als Eingangsgrößen die Randbedingungen an den offenen Modellrändern⁴³ sowie optional eine Anfangsfüllung des Modellgebiets (An-

⁴³ Für den gesamten Modellrand werden offene (Zu- und Abflussrand) und geschlossene Bereiche (Sohle, feste Berandung ohne Durchfluss) definiert.

fangsbedingung) zu definieren. Letzteres kann das Erreichen eines stationären Zustands beschleunigen. Für den hier betrachteten strömenden Abflusszustand müssen am Zuflussrand zwei Randbedingungen (z.B. die beiden Komponenten des spezifischen Abflusses) und am Abflussrand eine Randbedingung (z.B. der Wasserstand) angegeben werden. Um nicht für jede einzelne Zelle des Zuflussrandes eine eigene Randbedingung vorgeben zu müssen, bieten *Hydro2de* und *FLUMEN* die Möglichkeit, die Abflussaufteilung auf Basis einer Normalabfluss-Berechnung nach Manning-Strickler zu bestimmen. Hierfür müssen die Gesamtzuflussmenge, die Zuströmrichtung sowie das Energieliniengefälle im Zuflussrand vorgegeben werden.

Die Berechnung liefert für jeden Zeitschritt den Geschwindigkeitsvektor und den Wasserstand an jedem Gitterelement. Für eine stationäre Berechnung ($RB = \text{const.}$) wird das Modell so lange betrieben, bis sich gleich bleibende Abflussverhältnisse eingestellt haben. Eine weitergehende Erläuterung der Verfahrensgrundlagen von *Hydro2de* und *FLUMEN* findet sich in *Beffa (1997/2002/1994)*.

7.3.4 Modellerstellung

Grundlage der Systemgeometrie des 1D-HN-Modells waren die Querprofile der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung im Abstand von 100 m, welche den Flussschlauch und die Vorländer erfassen. Die Aufnahme der Querprofile erfolgte im Flussschlauch durch Echolotmessung und in den Vorländern terrestrisch. Die Grenze zwischen der im Hochwasserfall abflusswirksamen und retentionswirksamen Querschnittsfläche wurde über Analyse der topographischen Gegebenheiten und Auswertung von Luftbildaufnahmen abgelaufener Hochwasserereignisse abgeschätzt.

Die Geometriedaten der abflusswirksamen Bereiche wurden querprofilbezogen als diskrete Berechnungsstützpunkte in das Modell integriert und im Rahmen der Simulation zur Bestimmung der Funktion der durchströmten Fläche A sowie des hydraulischen Radius R in Abhängigkeit des über den Querschnitt gemittelten Wasserstandes berücksichtigt. In der Eingabedatei des Simulationsprogramms werden die benachbarten Stützpunkte über den mittleren Profilabstand zu Strecken verbunden. Zur Zuweisung des empirischen Rauheitsparameters k_{st} wurde eine Unterteilung innerhalb eines Querprofiles (Flussschlauch, Vorland) vorgenommen.

Die Systemgeometrie des 2D-Modells (strukturiert orthogonal) basiert ebenfalls im Wesentlichen auf den Querprofilaufnahmen des Flussschlauches und der Vorländer. Zur Erzeugung eines Digitalen Geländemodells wurden die Profildaten verdichtet und um zusätzliche Geländeinformationen (siehe Tabelle 7-2) erweitert. Die Interpolation einer kontinuierlichen Oberfläche erfolgte über eine Delaunay-Triangulation, die Überführung in ein diskretes Raster (2×2 m) über einen linearen Ansatz (vergleiche Kap.6.2).

Vor dem Hintergrund der großen Anzahl im Rahmen des Variantenstudiums durchzuführender Simulationen musste die Berechnungszeit über eine Optimierung der

Gitterauflösung verringert werden. Aufgrund des Einflusses der Gitterweite auf das Ergebnis einer zweidimensionalen Berechnung wurden Vergleichsrechnungen mit Modellauflösungen von $\Delta x = 4, 5, 7$ und 10 m durchgeführt. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse werden in Kap.7.3.6.1 dargelegt. Aufgrund der ermittelten Zusammenhänge zwischen Zellgröße, Rechenaufwand und zu erwartender Genauigkeit wurde eine Gitterweite von $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ gewählt.

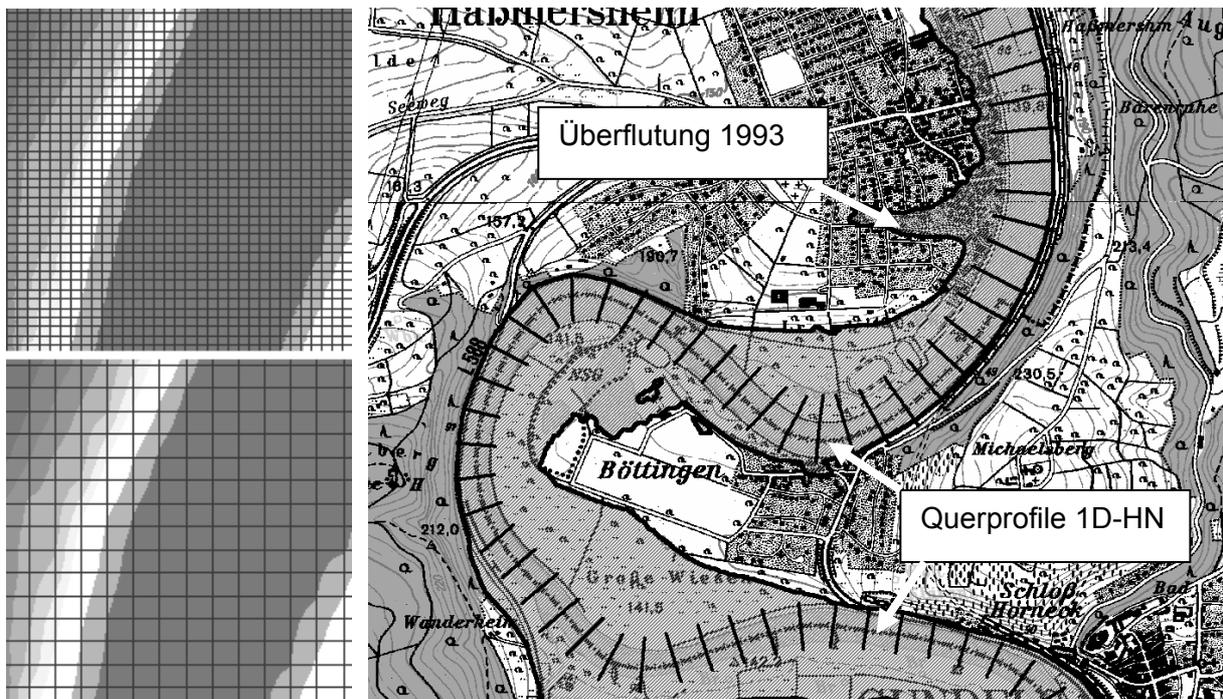


Abb. 7-3 Gitterstruktur des 2D-HN-Modells ($4 \times 4 / 10 \times 10\text{ m}$) und Lage der Querprofile des 1D-HN-Modells im Vergleich zur Überflutungsgrenze des Hochwassers 1993

7.3.5 Modellkalibrierung

Für die Versuchsstrecke lagen gemessene Scheitelwasserstände der Hochwasserereignisse 1988, 1990 und 1993 vor. Zur Kalibrierung der Modelle wurden die stationär berechneten Wasserstände mit den gemessenen Werten verglichen und eine Anpassung der Gerinnerauheit über die Variation des Stricklerbeiwertes k_{st} vorgenommen. Da als Information zum Lagebezug der HW-Fixierungen lediglich der jeweilige Bezugskilometer vorlag, wurden zur Kalibrierung des 2D-HN-Modells die Wasserstände in Flussmitte abgegriffen. Die Zuweisung von Rauheitsparametern erfolgte bereichsweise für Flussbett und Vorländer getrennt. Die Plausibilisierung der gewählten Stricklerbeiwerte erfolgte über Bewertung der Oberflächenstruktur anhand von Ortsbegehungen und Bilddokumentationen. Als untere Randbedingung wurden die Wasserstände am Wehr Neckarzimmern aus den Wasserspiegelfixierungen abgeleitet. Die gewählten Randbedingungen sind in Tabelle 7-3, die gewählten Stricklerbeiwerte in Tabelle 7-4 aufgeführt.

Modellgrenze	Randbedingungen		
	HW 1988	HW 1990	HW 1993
Wasserstand Wehr Neckarzimmern	$y = 139.48 \text{ mÜNN}$	$y = 140.33 \text{ mÜNN}$	$y = 141.04 \text{ mÜNN}$
Zufluss Wehr Gundelsheim	$Q = 1865 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 2181 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 2625 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabelle 7-3 Gewählte Randbedingungen zur Kalibrierung des 1D-HN-Modells

Bereich	gewählte Parameter	Rauheitsklassifizierung nach <i>Heinemann & Paul (1998)</i>
Vorländer	1D: $23 \leq k_{st} \leq 29$ 2D: $20 \leq k_{st} \leq 24$	15-30: Überflutungsflächen: hochstehendes Gras, Gestrüpp
Flussbett	1D: $30 \leq k_{st} \leq 36$ 2D: $28 \leq k_{st} \leq 36$	30 –35: Flussbett: stark verkrautet

Tabelle 7-4 Gewählte Stricklerbeiwerte k_{st} für Flussschlauch und Vorländer

Der Vergleich der 1D und 2D Kalibrierungsergebnisse in Abb. 7-4 zeigt bei ähnlichen Rauheitsbeiwerten eine gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Wasserstände für das gesamte Abflussspektrum. Signifikante Unterschiede von $\Delta y > 10 \text{ cm}$ zwischen den eindimensional gemittelten Wasserständen und den zweidimensional errechneten Wasserständen in Flussmitte sind lediglich zwischen Flusskilometer 90+000 und 91+000 im Bereich der stärksten Flusskrümmung sowie bei geringeren Abflüssen im Einflussbereich der oberstromigen Zuflussbedingung festzustellen.

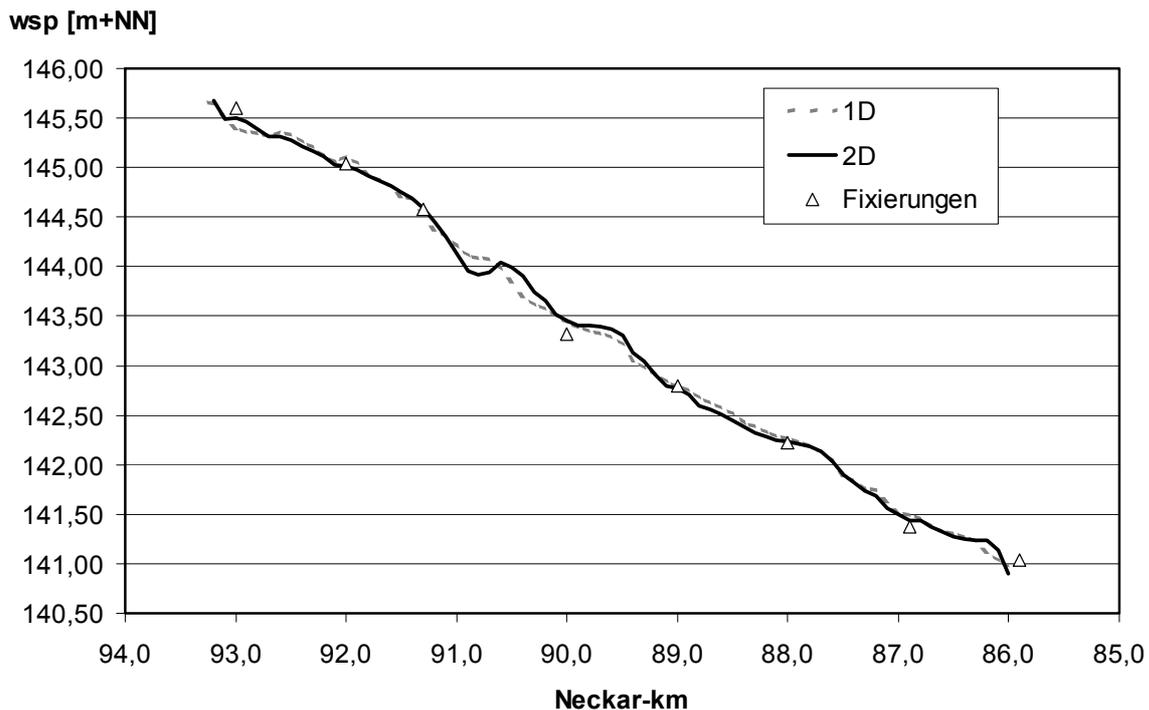


Abb. 7-4 Vergleich der kalibrierten Wasserspiegellängsprofile für $HQ_{100} = 2610 \text{ m}^3/\text{s}$ für die Basismodelle 1D und 2D (in Flussmitte)

7.3.6 Modellsensitivitäten

7.3.6.1 Einfluss der Systemgeometrie (1D)

Grundvoraussetzung zur Erstellung eines Modells zur Simulation von Hochwasserabflüssen sind topographische Informationen des Fluss-Vorland-Systems. In Kap.5.1.1 wurden mögliche Datenquellen genannt und verschiedene Aufnahmeverfahren bzgl. ihrer Genauigkeit vergleichend bewertet. In Kap.6.2 und 6.3 wurden Verfahren zur Interpolation diskreter Höhendaten analysiert und GIS-gestützte Methoden zur Extrahierung der Systemgeometrie ein- und zweidimensionaler Modelle auf DGM-Basis vorgestellt. Hierbei wurden bereits Hinweise zu den unterschiedlichen Anforderungen an die Informationsdichte gegeben.

Bei eindimensionalen Modellen wird die Systemgeometrie des abflusswirksamen Bereichs (Querprofile) lediglich zur Ermittlung der Funktion der durchströmten Fläche in Abhängigkeit des Wasserstandes ($A(y)$) genutzt⁴⁴, sodass eine starke Abstrahierung des Profilverlaufs über charakteristische Stützpunkte zur Beschreibung der Topographie ausreicht. Die Naturähnlichkeit des Modells wird also weniger durch eine möglichst hohe Auflösung der topographischen Datenbasis bestimmt, als vielmehr durch die sinnvolle Auswahl von Profillagen und präzise Beschreibung der hydraulisch

⁴⁴ Bei den im Rahmen der Hochwassermodellierung i.A. vorliegenden großen Breiten-Tiefen-Verhältnissen ($B/y > 10$) wird der hydraulische Radius $R=A/U$ über die Wassertiefe y approximiert.

wirksamen Geometrien an Querschnittsverengungen bzw. -aufweitungen sowie Kontrollbauwerken.

Im Rahmen der Hochwassermodellierung kann jedoch die Festlegung der Grenzen zwischen abflusswirksamen und retentionswirksamen Bereichen eine Schwierigkeit darstellen. Sie ergeben sich nicht wie bei 2D-Berechnungen automatisch, sondern müssen im Vorfeld vom Anwender festgelegt werden. Unterstützende Hinweise hierzu können Bilddokumentationen zurückliegender Hochwasserereignisse (Geschwemmselansammlungen, Wellenschlag, Wasserfärbungen) geben. Liegen keine aussagekräftigen Bilddokumentationen zur Strömungssituation vor, bleibt es der Erfahrung und Intuition des Modellierers überlassen, Totwasserzonen und Rückströmzonen mit vernachlässigbaren Fließgeschwindigkeiten abzuschätzen. Hierbei ist zu beachten, dass die Situation bei verschiedenen Abflusssituationen variieren kann. Im Extremfall kann dies dazu führen, dass ein Modell lediglich für ein stark begrenztes Abflussspektrum die realen Verhältnisse mit ausreichender Genauigkeit abbildet. In derlei Fällen kann es notwendig werden, mehrere 1D-Modelle zu erstellen oder zweidimensionale Verfahren einzusetzen.

Am Beispiel der Staustufe bei Neckarzimmern wurde der Einfluss der Festlegung der abflusswirksamen Bereiche auf die eindimensionalen Berechnungsergebnisse exemplarisch untersucht. Hierzu wurden die Querprofillagen des kalibrierten Ausgangsmodells auf den Vorländern ab Neckar-km 88+000 um ca. 20 % erweitert. Diese zum Ausgangsmodell abweichende Interpretation der Strömungsverhältnisse liegt aus hydraulischer Sicht noch immer durchaus im plausiblen Bereich. In Abb. 7-5 sind die durch die Profilerweiterung verursachten Änderungen der durchströmten Flächen bezogen auf die Wasserspiegellagen bei HQ_{100} über die Strecke aufgetragen. Es zeigt sich, dass bei den vorliegenden topographischen Gegebenheiten bei einer HQ_{100} entsprechenden Abflussmenge eine Flächenänderung von ca. 10 % initiiert wird.

Die Differenzen der Vergleichsrechnungen der beiden Modelle für ein Abflussspektrum von HQ_5 bis HQ_{100} ($1390 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $2610 \text{ m}^3/\text{s}$) sind in Abb. 7-6 dokumentiert. Wie zu erwarten, nimmt der Einfluss der Profilerweiterung mit zunehmendem Abfluss zu (dies aufgrund der zunehmenden prozentualen Flächenänderung) und strebt mit zunehmender Entfernung von der unteren Randbedingung einem konstanten Mittelwert zu. Am oberstromigen Ende der Versuchsstrecke beträgt bei HQ_{100} die Wasserspiegelabsenkung $\Delta y = \text{ca. } 20 \text{ cm}$. Eine statistische Auswertung der Differenzen (Mittelwertbildung, Standardabweichung) erfolgte nur im Bereich weiter Vorländer von km 90+400 bis 93+300. Die Ergebnisse werden in Kap.7.4 (Abb. 7-19) dargestellt.

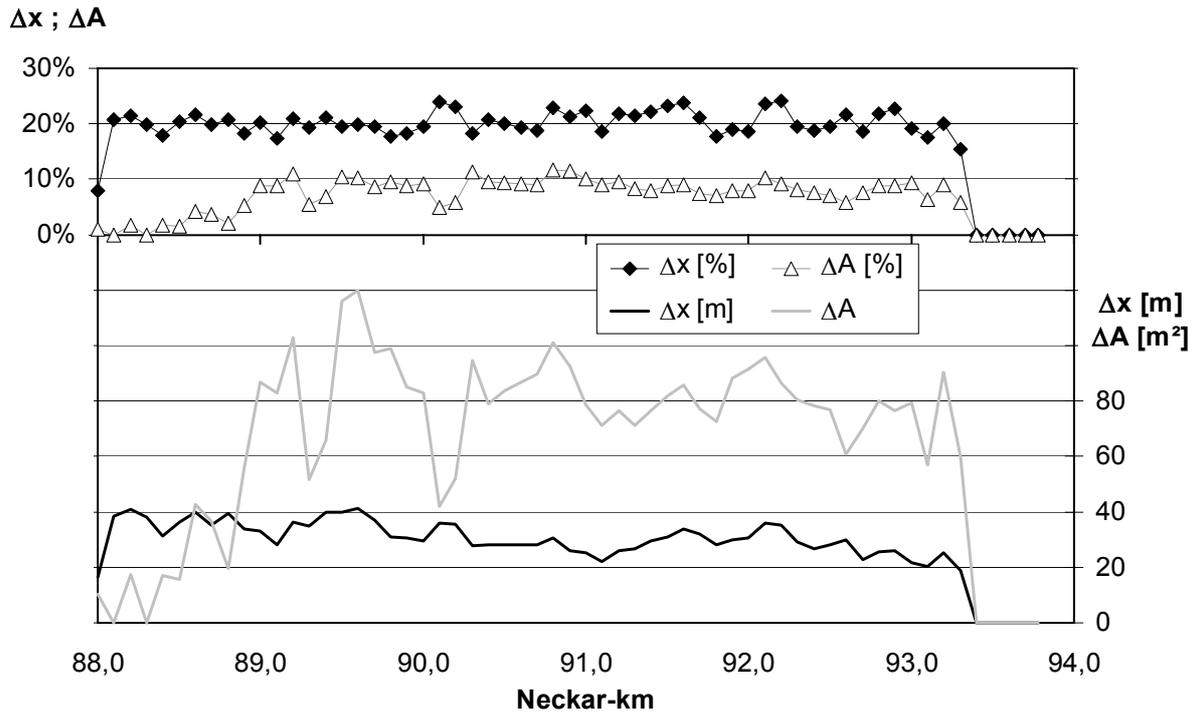


Abb. 7-5 Auswirkungen der Profilerweiterung Δx auf die durchströmte Fläche ΔA bei HQ_{100}

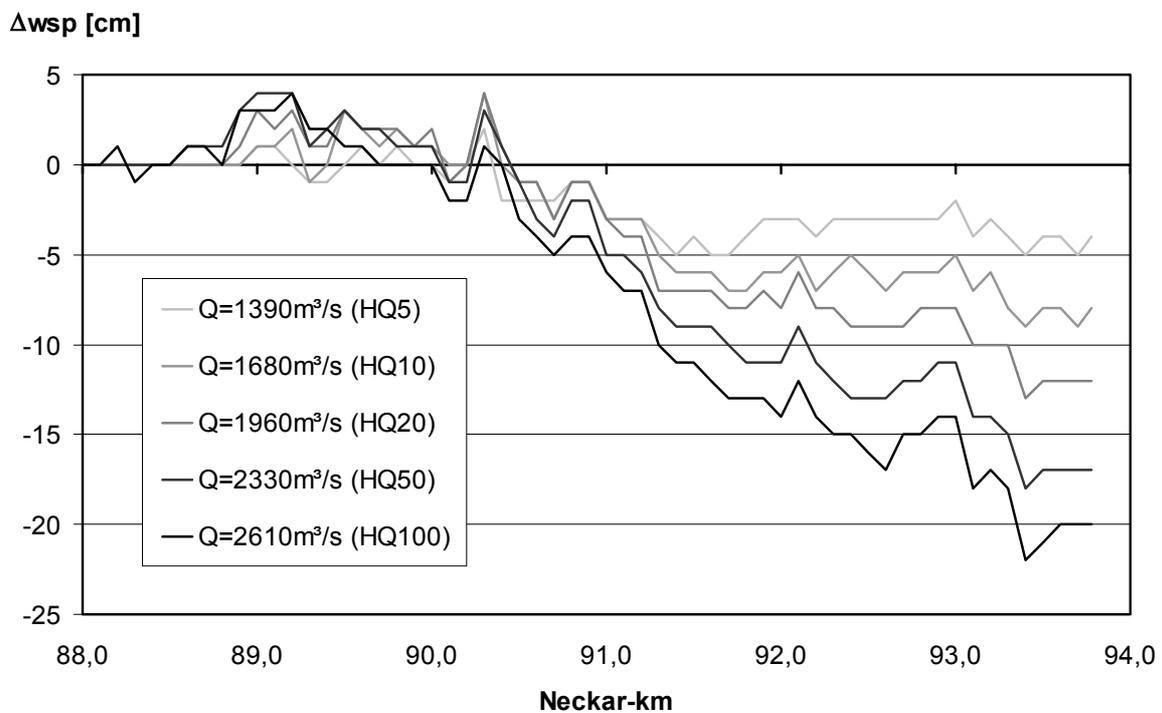


Abb. 7-6 Auswirkungen der Profilerweiterung auf die berechneten Wasserstände $HQ_5 - HQ_{100}$

7.3.6.2 Einfluss der Gitterstruktur (2D)

Die Optimierung der Gitterauflösung hat bei der zweidimensionalen Modellierung größerer Fließgewässerabschnitte aufgrund der (trotz leistungsfähiger Prozessoren) relativ langen Rechenzeiten einen bedeutenden Stellenwert. Zielsetzung hierbei ist es, die Unabhängigkeit der Berechnungsergebnisse bzgl. der Gitterauflösung bei Minimierung der Anzahl an Berechnungspunkten zu erreichen.

Die Analyse des Einflusses der räumlichen Diskretisierung auf die zweidimensionale Simulation erfolgte zunächst bezogen auf die Auflösung eines strukturierten orthogonalen Berechnungsgitters. Hierzu wurden Vergleichsrechnungen für einen Abfluss von $Q = 2610 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ_{100}) mit Modellauflösungen von $\Delta x = 4, 5, 7$ und 10 m durchgeführt. Der Turbulenzansatz (Nullgleichungsmodell) kam zunächst nicht zum Einsatz. Die Berechnungen wurden unter dem Betriebssystem Linux mit einem Pentium III Prozessor (1,0 GHz) durchgeführt.

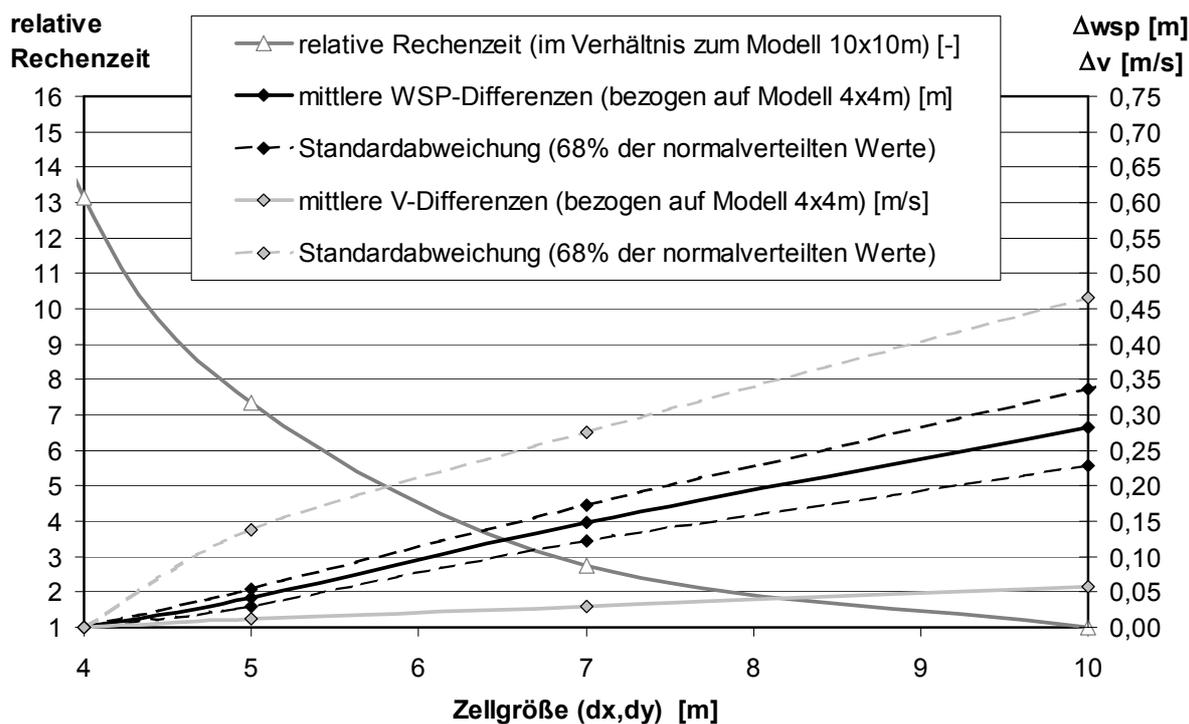


Abb. 7-7 Einfluss der Gitterweite der 2D-Systemgeometrie auf die Berechnungsergebnisse sowie die Berechnungsdauer eines Simulationsdurchgangs

Zum Vergleich der Modellvarianten wurden die Differenzen der errechneten Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten bezogen auf das 4x4m-Modell flächenhaft ermittelt und statistisch ausgewertet. In Abb. 7-7 sind die Mittelwerte der Differenzen und

die Bereiche der einfachen Standardabweichung⁴⁵ dargestellt. Dem gegenüber steht die benötigte Berechnungsdauer für eine stationäre Simulation. Diese Zeit ist relativ im Verhältnis zur kürzesten Berechnung angegeben, da die absolute Rechenzeit von der jeweiligen Prozessorleistung abhängt. Als Bezugszeit diente die Berechnungsdauer des Modells mit einer Gitterweite von $dx, dy = 10$ m. Sie betrug bei Einsatz eines Pentium III- Prozessors (1,0 GHz) ca. 2,5 Stunden.

Es zeigt sich, dass die Berechnungsdauer mit zunehmender Zellengröße exponentiell abnimmt. Allerdings hat die Gittergröße auch einen maßgebenden Einfluss auf das Berechnungsergebnis. Die Vergrößerung des Stützpunktgitters wirkt wie eine zusätzliche Rauheit und verursacht bei gleichbleibender Verteilung der Stricklerbeiwerte eine über das Modellgebiet relativ gleichmäßige Anhebung der berechneten Wasserstände. So liegen die Wasserstände bei einer Gitterweite von $dx, dy = 10$ m um durchschnittlich ca. 30 cm höher als bei einer Modellauflösung von $dx, dy = 4$ m. Die Standardabweichung σ der Normalverteilung beträgt in diesem Fall lediglich ca. 5 cm. Die Geschwindigkeitsdifferenzen zeigen eine deutliche Varianz um einen Mittelwert von 0,05 m/s bei einer Standardabweichung von ca. 0,5 m/s ($dx, dy = 10$ m). Der Einfluss der Gitterweite auf das Berechnungsergebnis geht bei Verfeinerung des Gitters gegen Null. Abb. 7-8 zeigt die Überlagerung repräsentativer Geschwindigkeitsprofile quer zur Flussachse.

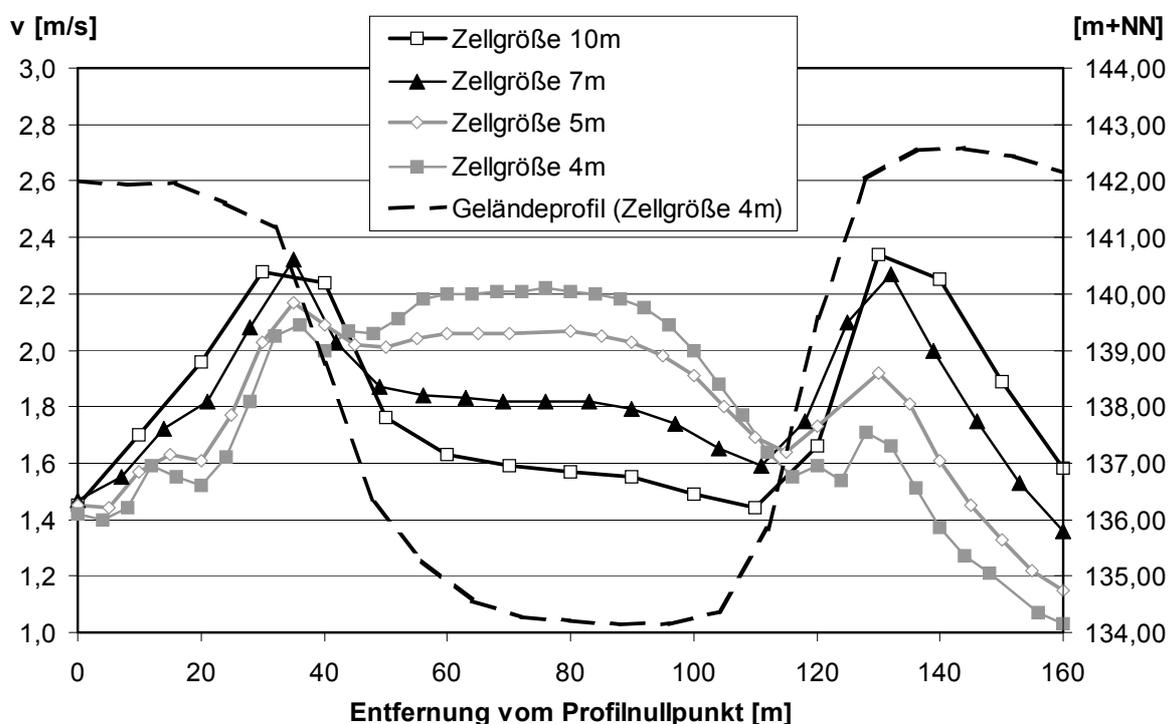


Abb. 7-8 Repräsentative Geschwindigkeitsprofile quer zur Flussachse bei km 91,5

⁴⁵ Im Bereich der einfachen Standardabweichung ($\mu \pm \sigma$) liegen bei einer Normalverteilung 68,3% der Werte.

Die vergleichende Darstellung zeigt, dass die Diskretisierung der zweidimensionalen Systemgeometrie starken Einfluss auf die berechneten Geschwindigkeitsverteilungen im Fluss-Vorland-System hat. Bei hoher Modellauflösung werden die größten Fließgeschwindigkeiten erwartungsgemäß in der Mitte des Hauptgerinnes errechnet. Bei grober Diskretisierung sind die errechneten Geschwindigkeiten im Hauptgerinne deutlich geringer, in den Böschungsbereichen hingegen extrem groß und über den Vorländern etwas größer. Vor dem Hintergrund der Naturähnlichkeit sind die hohen Geschwindigkeitsgradienten in den Böschungsbereichen besonders augenfällig und unplausibel.

Die hier am Beispiel der Versuchsstrecke Neckarzimmern dokumentierten Ergebnisse zum Einfluss der Auflösung eines strukturierten Gitters konnten bei Vergleichsrechnungen mit dem Programm Hydro2de an einer geraden Naturstrecke in der Stauhaltung Guttenbach bestätigt werden (vgl. [Niesler, 2001]). Eine signifikante Auswirkung des stark mäandrierenden Verlaufs und der Geschwindigkeitskomponenten quer zur Flussachse kann somit ausgeschlossen werden.

Die Ergebnisse lassen den Rückschluss zu, dass die Anhebung der errechneten WSP-Lage bei grober Diskretisierung im Wesentlichen auf die unnatürlich hohen Geschwindigkeitsspitzen bzw. -gradienten an den Uferböschungen und die hierdurch induzierten zusätzlichen Energieverluste zurückzuführen sind. Für eine weitergehende Analyse mit variierender Gitterauflösung innerhalb des Modellgebietes wurden daher Untersuchungen auf Basis eines unstrukturierten Gitters durchgeführt. Hierbei kam das Verfahren *FLUMEN* (*Beffa Hydrodynamics*) zum Einsatz. Als Modellgebiet diente eine gerade trapezförmige „Versuchsstrecke“, deren geometrische Abmessungen in Anlehnung an das Fluss-Vorland-System des Neckars gewählt wurden (siehe Abb. 7-9).

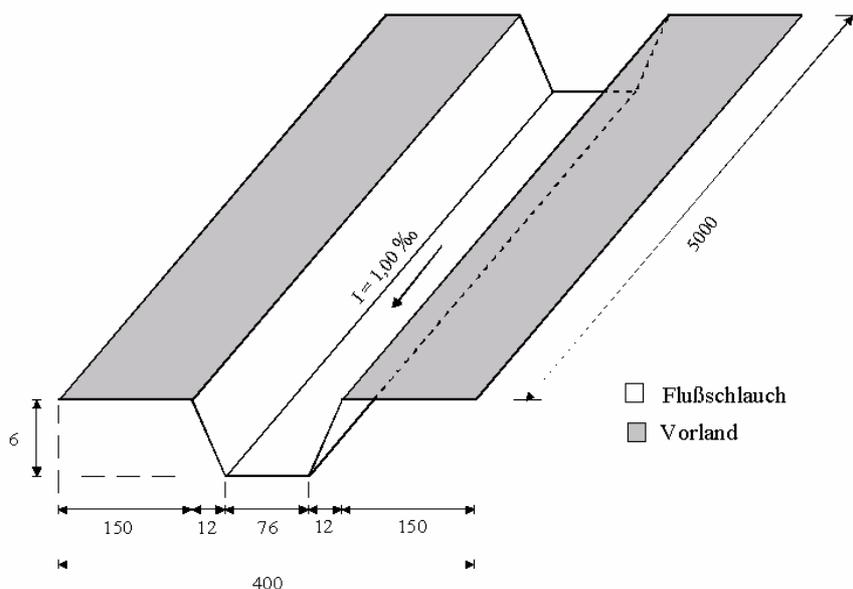


Abb. 7-9 Geometrie der Versuchsstrecke zur Analyse des Einflusses der Auflösung eines unstrukturierten 2D-Berechnungsgitters

Für dieses synthetische Modellgebiet wurden unstrukturierte Gitter mit unterschiedlichen Auflösungen von $A_{\text{Element}} = 25 - 300 \text{ m}^2$ erstellt. Zudem wurde untersucht, inwieweit sich die Berechnungsergebnisse durch die Einführung von Bruchkanten entlang den Böschungskanten beeinflussen lassen. Wie bereits in Kap.6.3.2.2 dargestellt, lassen sich über Bruchkanten die Interpolationsfehler an den Böschungen minimieren und die Topographie der (glatten) Uferverläufe besser nachbilden.

In Abb. 7-10 sind die für einen Abfluss von $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ und eine konstante Rauheitsbelegung von $k_{\text{st}} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ errechneten Wasserstände als Längsprofile aufgetragen sowie die Querverteilung der Fließgeschwindigkeiten dargestellt. Als Wasserstandsreferenz wurde das von der Gitterauflösung unabhängige Ergebnis einer Berechnung mit *Hydro2de* mit einer Auflösung von $2 \times 2 \text{ m}$ vorgegeben.

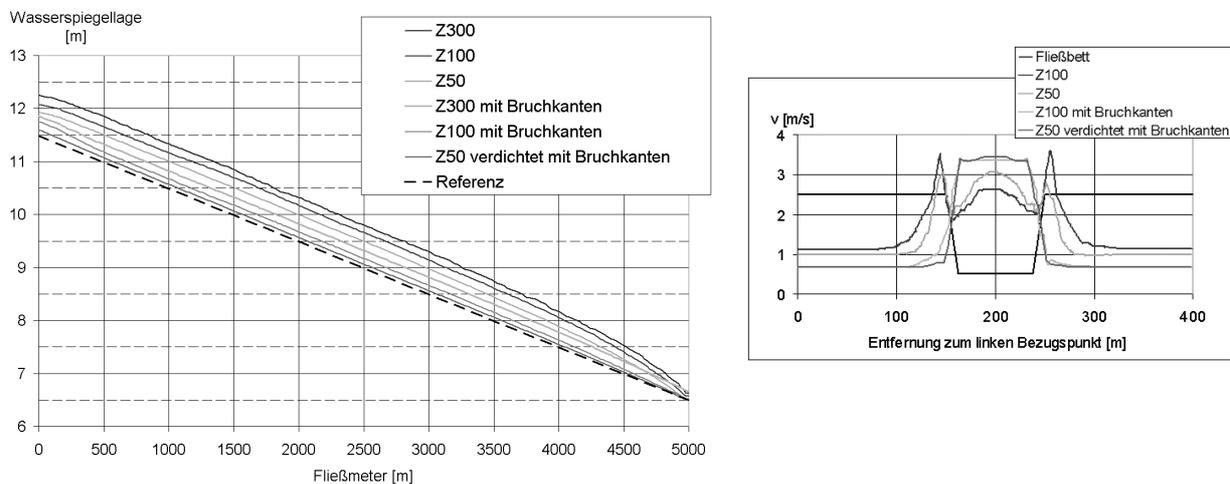


Abb. 7-10 Einfluss der Gitterstruktur auf die berechneten Wasserstände und Fließgeschwindigkeitsverteilungen (Zuordnung v.o.n.u.)

Der Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Auflösungen zeigte analog den Resultaten mit strukturiertem Gitter, dass eine Verfeinerung der Modellauflösung mit einem Absinken der errechneten Wasserspiegellage einhergeht. An den Böschungen treten unrealistische Geschwindigkeitsverteilungen auf, deren Spitzenwerte bei höherer Auflösung geringer ausfallen, sich jedoch selbst bei einer Elementgröße von $A_E = 25 \text{ m}^2$ nicht eliminieren lassen. Erst durch die Berücksichtigung von Bruchkanten bei der Netzgenerierung entstehen realistische Querverteilungen der Fließgeschwindigkeit. Zudem zeigt sich, dass über die Bruchkanten entlang den Uferböschungen, selbst bei Vorgabe größerer Elementflächen auf den Vorländern und in der Mitte des Flussbettes, eine deutliche Annäherung der berechneten Wasserstände an den Referenzwasserspiegel erwirkt wird und somit die Gitterunabhängigkeit der Berechnungsergebnisse gewährleistet werden kann. Eine umfassende Dokumentation der im Rahmen der Studie durchgeführten Analysen mit in Lage und Dichte unterschiedlichen Bruchkantenbelegungen findet sich in *Bergmann (2002)*.

Die Studien belegen, dass die räumliche Diskretisierung der hydraulisch relevanten Geometrien eines Fluss-Vorland-Systems einen entscheidenden Einfluss auf die zweidimensional errechneten Wasserstände hat. Hierbei kommt der Modellierung der Uferböschungen eine besondere Bedeutung zu, da hier große Geländegradien mit vergleichsweise hohen Geschwindigkeitskomponenten im stark abflusswirksamen Querschnitt zusammentreffen. Eine zu grobe Auflösung des Stützpunktgitters sowie topographische Interpolationsfehler in den Böschungsbereichen führen zu starken Höhenunterschieden benachbarter Zellen in Fließrichtung, unrealistischen Geschwindigkeitsspitzen und –gradienten und bewirken hierdurch erhebliche Energieverluste. Sie induzieren also eine künstliche (numerische) Rauheit, die eine signifikante Anhebung der errechneten Wasserstände im gesamten Modellgebiet zur Folge haben kann.

7.3.6.3 Einfluss der Rauheitsparametrisierung

Die Quantifizierung der Energieverluste erfolgt bei den im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten HN-Verfahren auf Basis der in der Praxis am weitesten verbreiteten Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler. Hierbei werden alle durch die auf die Strömung wirkenden inneren und äußeren Spannungen bzw. Reibungskräfte verursachten Energieverluste pauschal über den empirischen Rauheitsbeiwert k_{st} berücksichtigt. Die Abschätzung dieses dimensionsbehafteten Rauheitsbeiwertes stützt sich auf Erfahrungswerte und orientiert sich i.d.R. an der Oberflächenbeschaffenheit der überströmten Gerinnesohle bzw. der Böschungs- und Vorlandbereiche. Hierbei ergeben sich gerade bei der Modellierung des Hochwasserabflussspektrums aufgrund

- der räumlichen Heterogenität und zeitlichen Dynamik der Oberflächenbeschaffenheit (z.B. durch jahreszeitabhängige Bewuchssituation),
- des nicht explizit parametrisierten Einflusses von Grobstrukturelementen wie Querschnittsform und Linienführung und der Strukturgradienten auf das Widerstandsverhalten des Systems,
- sowie der Abhängigkeit des Rauheitsparameters von der Fließtiefe (mangelnde Dimensionsreinheit)

erhebliche Unsicherheiten in der physikalischen Bewertung der Parameterwahl; dies umso stärker, je komplexer das Strömungsfeld bzw. je höher die Strukturvielfalt des Fließgewässers sind. Vor diesem Hintergrund wird der Rauheitsparameter zumeist als die ausschlaggebende Kalibrierungsgröße eingesetzt (vergleiche Kap.4.1.7).

Zur Sensitivitätsanalyse der ein- und zweidimensionalen Modelle der Stauhaltung Neckarzimmern bzgl. des Einflusses der Rauheitsparametrisierung auf die errechneten Wasserstände wurden die im Rahmen der Kalibrierung gewählten Verteilungen des Stricklerbeiwertes k_{st} in einem Spektrum von $\Delta k_{st} = \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ variiert. Als Abflussmenge wurde bei der zweidimensionalen Untersuchung ein HQ_{100} vorgegeben. Bei der eindimensionalen Berechnung wurde die Analyse auf unterschiedliche Ab-

flussmengen (HQ_5 und HQ_{100}) bezogen, um somit wiederum die Abflussabhängigkeit der Sensitivität zu quantifizieren. Die Ergebnisse einer statistischen Auswertung der durch die k_{st} -Variation induzierten Differenzen zur Ausgangswasserspiegellage sind in Abb. 7-11 zusammengefasst.

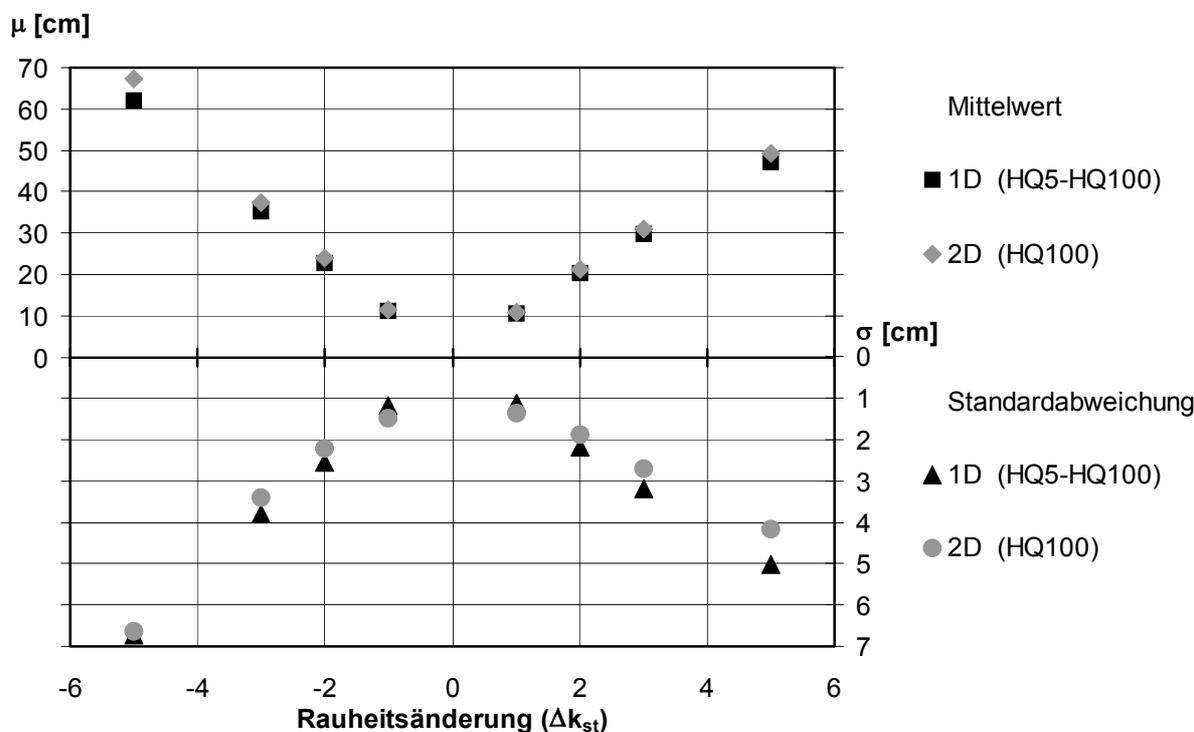


Abb. 7-11 Einfluss der Variation des Rauheitsparameters k_{st} auf die 1D und 2D errechneten Wasserstände

Es zeigt sich, dass bei den sich im Hochwasserfall einstellenden Fließtiefen bereits eine geringfügige Veränderung des Rauheitsparameters innerhalb des physikalisch vertretbaren Bereiches eine Änderung der errechneten Wasserstände um mehrere Dezimeter verursacht. Die Varianz der durch eine konstante Veränderung des k_{st} -Wertes auftretenden Differenzen liegt hierbei im Bereich weniger Zentimeter.

Die starke mathematische Abhängigkeit der Absolutwerte der errechneten Wasserstandsdifferenzen von der Definition der Rauheitsbelegung lässt sich auf die großen Fließtiefen (Flussbett: $y > 9$ m / Vorländer: $y = \text{ca. } 2\text{--}3$ m) bzw. die prozentuale Abhängigkeit von Δy und Δk_{st} in der den Verfahren zugrunde liegenden Beziehung nach Gauckler-Manning-Strickler zurückführen.

Interessant ist die deutliche Übereinstimmung der Sensitivitäten der eindimensionalen und zweidimensionalen Berechnung bzgl. der Variation der Rauheit.

7.3.6.4 Einfluss der Turbulenzmodellierung

Zur Analyse des Einflusses der Modellierung der turbulenten Spannungen über das in Hydro2de verfügbare Nullgleichungsmodell wurden Sensitivitätsanalysen zur Parameterwahl sowie Vergleichsrechnungen mit und ohne Aktivierung des Turbulenzansatzes durchgeführt. Es zeigte sich, dass der Einfluss der Turbulenzmodellierung auf die errechneten Wasserspiegellagen $HQ_5 - HQ_{200}$ in der untersuchten Gewässerstrecke vernachlässigbar gering ist. Das Ergebnis der statistischen Auswertung der Differenzen wird in Kap.7.4 (Abb. 7-19) dargestellt.

7.3.6.5 Einfluss der hydrologischen Eingangsdaten

Zielsetzung der numerischen Strömungssimulation ist die Ermittlung von Strömungskenngrößen in Abhängigkeit einer als Randbedingung vorgegebenen gemessenen, vorhergesagten oder statistisch ermittelten Abflussmenge Q . Zur Bewertung der Genauigkeiten der errechneten Zielgrößen bzw. der Prognosefähigkeit des Modells dürfen neben allen anderen Einflussgrößen bzw. Modellparametern auch die Unsicherheiten der primären Eingangsgröße Q keinesfalls unberücksichtigt bleiben, ist doch die Abflussmengenbestimmung an Fließgewässern gerade im Hochwasserfall mit großen Schwierigkeiten behaftet. So werden die Messungenauigkeiten selbst bei „zuverlässigen“ Abflusspegeln bei Hochwasser auf 5 - 10 % der abfließenden Wassermenge geschätzt.

Diese Unsicherheiten wirken sich bereits im Rahmen der Kalibrierung in direkter Linie auf die Zuverlässigkeit der Parametrisierung aus, da die zu den gemessenen (Scheitel-) Wasserständen eines Ereignisses zugehörige Abflussmenge nicht exakt bekannt ist. In der Praxis der Hochwasserhydraulik werden jedoch weniger die (offiziell) vorgegebenen Abflussangaben angezweifelt und als variable Größe in den Kalibrierungsprozess aufgenommen, sondern vornehmlich die Rauheitsparameter manipuliert. Mit diesem womöglich auf die falsche Größe kalibrierten Modell werden dann Abflüsse simuliert, die wiederum mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind.

Zur exemplarischen Analyse der Sensitivität der Modelle der Stauhaltung Neckarzimmern bzgl. der Abflussmenge wurde ausgehend von den offiziellen Abflusskennwerten HQ_T eine Abflussänderung von $\Delta Q = \pm 1\%$, 2% , 5% und 10% bei entsprechender Anpassung der unteren Randbedingungen (Schlüsselkurve Wehranlage) vorgenommen. In Abb. 7-12 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der sich ergebenden Wasserstandsdifferenzen für $HQ_5 - HQ_{100}$ aufgetragen.

Es zeigt sich, dass sich für das gesamte Hochwasserabflussspektrum bereits eine im Vergleich zu den Unsicherheiten geringe Variation der Abflussmenge um $\Delta Q > \pm 2\%$ eine Veränderung der Wasserspiegellage im Dezimeterbereich bewirkt. Hierbei verhalten sich das eindimensionale und zweidimensionale Modell sowohl im Mittelwert als auch in der Varianz praktisch identisch.

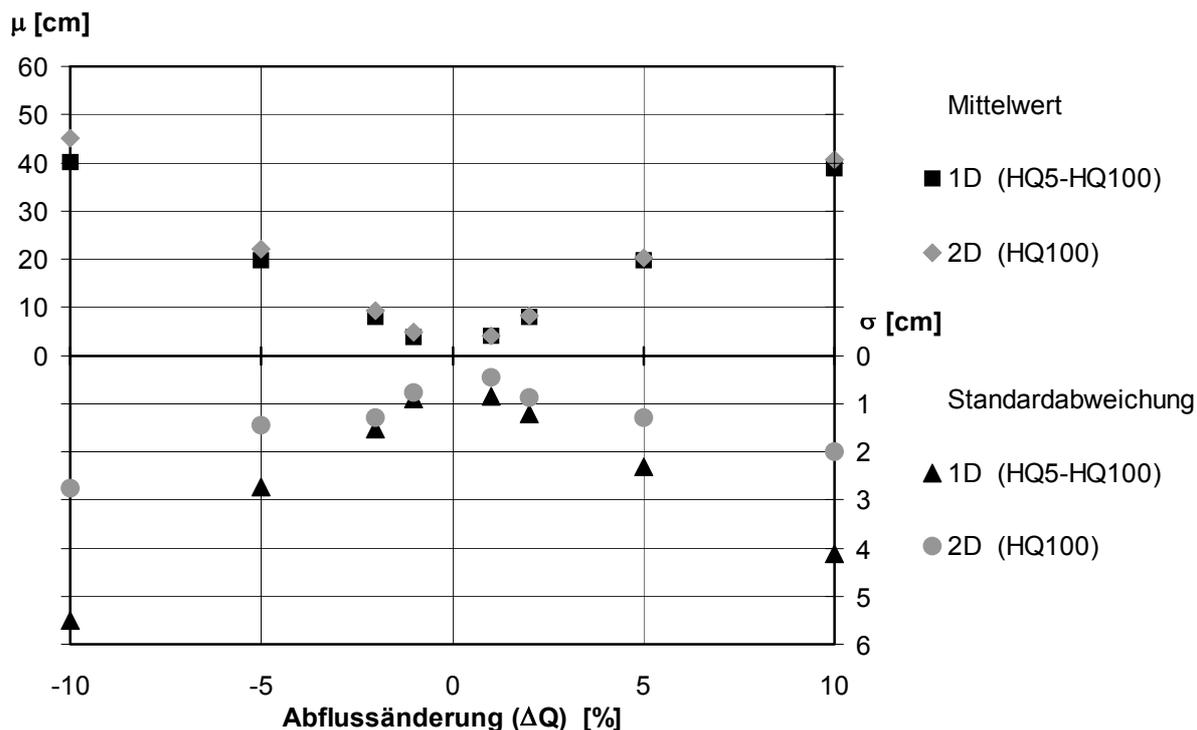


Abb. 7-12 Einfluss der Variation der Abflussmenge Q auf die 1D und 2D errechneten Wasserstände

7.3.7 Verfahrensvergleich (1D, 2D) zur Ermittlung von Überflutungsflächen

Der nachfolgende Vergleich der ein- und zweidimensionalen Berechnungsergebnisse zur Ermittlung von Überflutungsflächen bezieht sich auf die Abflussmenge eines HQ_{100} mit $Q = 2610 \text{ m}^3/\text{s}$ und liegt somit in der Größenordnung des Hochwassers von 1993.

Zur Bewertung der Aussagefähigkeit der eindimensionalen Abstrahierung als Grundlage zur Ermittlung von Überflutungsflächen wurden die querprofilbezogenen gemittelten Wasserstände über „Linien gleicher Wasserstände“ in die Fläche projiziert. Diese wurden zunächst senkrecht zur Flussachse definiert und zur Vermeidung von Überschneidungen in den Kurvenbereichen abgewinkelt. Durch Interpolation zwischen den Linien wurde ein Raster der Wasseroberfläche (Zellgröße $5 \times 5 \text{ m}$) erzeugt, welches mit den 2D-Ergebnissen zur Differenz gebracht werden konnte. Ein Vergleich der Isohypsen der über die ‚Linien gleicher Wasserstände‘ erzeugten bzw. originär zweidimensional berechneten Wasseroberfläche ist in Abb. 7-13 veranschaulicht.

Der Vergleich der Isohypsen ($\Delta y = 0,2 \text{ m}$) zeigt einen ähnlichen Verlauf der manuell definierten ‚Linien gleicher Wasserstände‘ sowie der zweidimensional errechneten WSP-Verteilung. Deutliche Abweichungen sind in erster Linie im Bereich der starken Flusskrümmung zu erkennen.

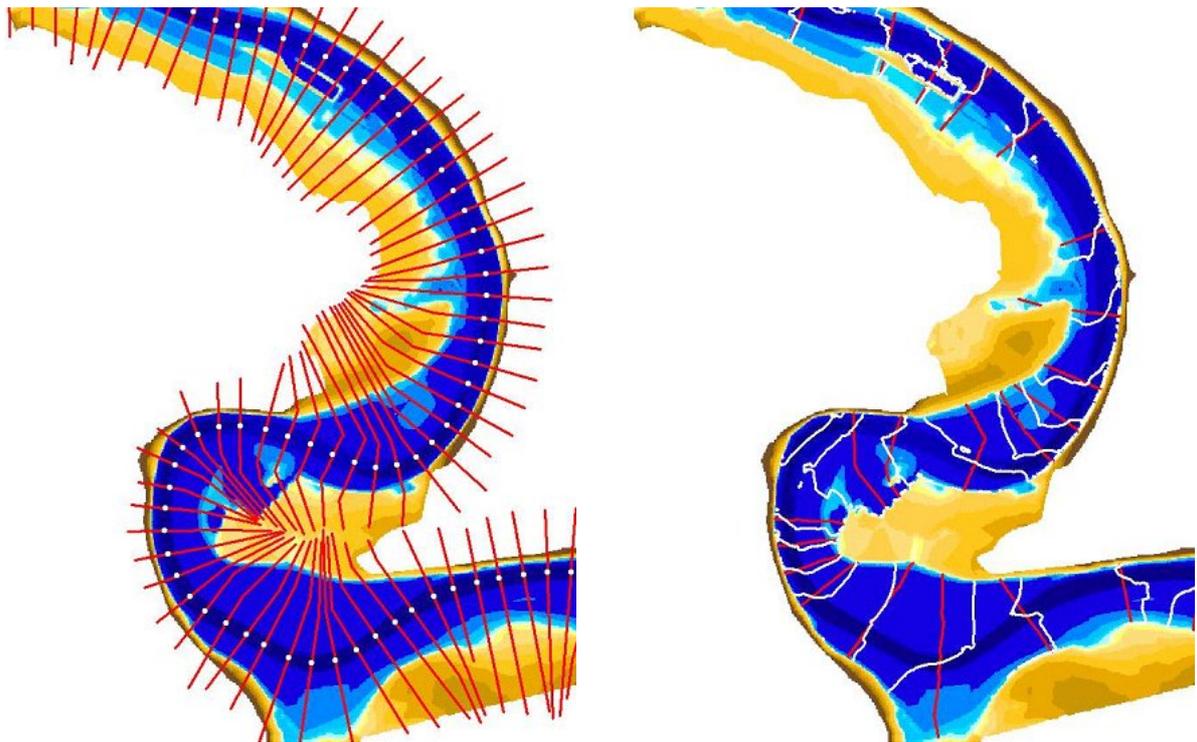


Abb. 7-13 Linien gleicher Wasserstände (links) und Vergleich der Isohypsen (rot:1D,weiß:2D) bei HQ_{100} mit einer Äquidistanz von $\Delta y = 0,2 \text{ m}$ (rechts)

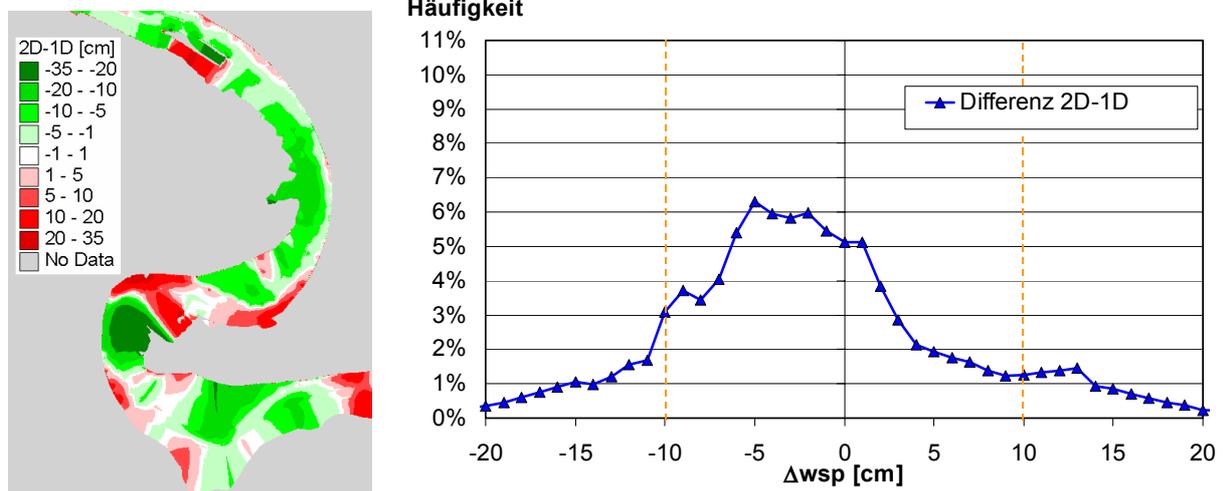


Abb. 7-14 Differenzen zwischen den 1D und 2D ermittelten Wasserspiegellagen bei $Q = 2610 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ_{100})

Aussagekräftigere Informationen erhält man über die flächenhafte Auswertung der WSP-Lagen als Differenzenraster (siehe Abb. 7-14). Diese zeigt, dass ca. die Hälfte (51 %) der Werte Abweichungen von weniger als 5 cm aufweisen. 78 % der Wasser-

standsdifferenzen liegen in einem Intervall von $\Delta y < \pm 10$ cm. Größere Differenzen sind lokal begrenzt und im Wesentlichen auf folgende Ursachen zurückzuführen:

- (1) Hydraulisch unplausible Lagedefinition der ‚Linien gleicher Wasserstände‘
- (2) Querneigungseinflüsse im Bereich starker Flusskrümmungen
- (3) Einflüsse der ober- und unterstromigen Randbedingungen
- (4) Individuelle Parametrisierung im Rahmen der Kalibrierung

Nachfolgend wird eine Diskussion der verschiedenen Einflussfaktoren gegeben:

Zu (1): Die deutlichen WSP-Differenzen im Bereich der Hafenanlage Hassmersheim sind auf die aus hydraulischer Sicht unplausible Lage der ‚Linien gleicher Wasserstände‘ (LgW) zur Extrapolation der 1D-Ergebnisse zurückzuführen. Die Hafenanlage wird durch einen Schutzdamm umschlossen, welcher auch bei HQ_{100} nicht überströmt wird. Über die senkrecht zum Flussschlauch digitalisierten ‚LgW‘ korrespondieren die Wasserstände im Hafenbecken und landeinwärts hinter dem Schutzdamm mit den jeweils nächstgelegenen Berechnungstützpunkten des 1D-Modells. Tatsächlich ist jedoch der Wasserspiegel im Hafenbecken über die offene Hafeneinfahrt mit dem dortigen Wasserstand gekoppelt und wird somit im Modell überschätzt. Hinter dem umströmten Schutzdamm verursachen die topographischen Begebenheiten einen Einstau, sodass die dortigen Wasserstände eher mit dem Berechnungstützpunkt am oberstromigen Ende des Hafens korrespondieren. Die Höhe der Wasserstände wird in diesem Bereich also unterschätzt.

Über eine Voranalyse der hydraulischen bzw. topographischen Situation und entsprechend angepasster Lagedefinition der ‚Linien gleicher Wasserstände‘ lassen sich derartige Fehler bei der Ermittlung von Überflutungsflächen bzw. -tiefen vermeiden. Das Beispiel verdeutlicht die Notwendigkeit einer gewissenhaften und detaillierten Auseinandersetzung mit dem zu modellierenden Untersuchungsgebiet gerade bei der Erstellung eines 1D Modells mit entsprechend hohem Abstrahierungsgrad. Auch werden die Grenzen eines Automatismus zur Definition der ‚LgW‘ deutlich. In der Praxis sollte die Durchführung einer sorgfältigen Voranalyse der Strömungssituation bereits im Rahmen der HN-Modellerstellung vorausgesetzt werden können.

Zu (2): Eine der wesentlichsten Ursachen für die Differenzen zwischen den 1D und 2D Berechnungsergebnissen ist die durch die Zentrifugalkraft hervorgerufene laterale Neigung des Wasserspiegels (Querneigung) in den Flusskrümmungen.

In der eindimensionalen Simulation wird das über Querprofile abstrahierte Fluss-Vorland-System als gerade Strecke betrachtet und die Zielgrößen Wasserstand bzw. Fließgeschwindigkeit über den Querschnitt als konstant angenommen. Die laterale Neigung des Wasserspiegels in einer Krümmung bleibt somit unberücksichtigt. Bei der zweidimensionalen Betrachtungsweise hingegen werden die zur Querneigung führenden Effekte im Kurvenbereich über die Impulsbilanzierung näherungsweise nachgebildet. Zur hydrodynamisch-numerischen Modellierung der durch die Zentrifu-

galkraft initiierten (und die Ausprägung der Wasserspiegelneigung beeinflussenden) Sekundärströmung ist der Einsatz eines dreidimensionalen Modellansatzes notwendig. Dies kann zum Beispiel zur Quantifizierung von Sedimentbewegungen sinnvoll sein, zur Berechnung von Wasserständen im Rahmen der Hochwassermodellierung sind dreidimensionale Verfahren jedoch aufgrund der Unsicherheiten in den Eingangsgrößen und dem geringen zu erwartenden Genauigkeitszugewinn mit einem unangemessen großen Erstellungs- und Rechenaufwand verbunden.

Für die Praxis wurden algebraische Ansätze entwickelt, welche auf Basis eindimensional gemittelter Strömungskenngrößen und empirischer Parametrisierung die Wasserspiegelquerneigung abschätzen. In Kap.7.3.8 wird der Einsatz des halbempirischen Querneigungsansatzes nach *Mock & Theune (1988)* zur Optimierung der Ermittlung von Überflutungsflächen getestet und bzgl. der zweidimensionalen Ergebnisse vergleichend bewertet.

Zu (3): Zur Definition der hydraulischen Randbedingungen an den ober- und unterstromigen Modellgrenzen werden Kenntnisse über die dortige Strömungssituation vorausgesetzt. Während beim 1D-HN-Modell bei strömenden Fließverhältnissen als untere Randbedingung lediglich eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung und am oberstromigen Rand die Zuflussmenge vorgegeben werden, muss beim 2D-HN-Modell auch die laterale Verteilung der Variablen sowie die Zuströmrichtung bekannt sein. In der Praxis sind die abflussabhängigen Wasserstände sowie Querverteilungen und Zuströmrichtungen jedoch unbekannt oder zumindest mit größeren Unsicherheiten behaftet. Der Einfluss dieser Randbedingungen nimmt mit zunehmender Entfernung zum Modellrand ab. Im Rahmen der Modellierung sind die Einflussbereiche der mit Unsicherheiten behafteten Randbedingungen räumlich abzugrenzen und das Modellgebiet so weit auszudehnen, dass die maßgebenden Untersuchungsgebiete außerhalb dieses Einflussbereiches liegen. Der Vergleich zwischen den 1D und 2D Ergebnissen innerhalb des Einflussbereiches ist daher nicht zulässig.

Zu (4): Die Ergebnisse der Strömungssimulation sind aufgrund der Vereinfachungen in der Modellbildung sowie ihrer diskreten Eingangs- und Kalibrierungsgrößen mit Unsicherheiten behaftet und stellen lediglich eine Approximation der tatsächlichen in der Natur ablaufenden physikalischen Prozesse dar. Die Erstellung und Kalibrierung eines Modells ist bei gleicher Datengrundlage abhängig von der individuellen Interpretation der Eingangs- bzw. Kalibrierungsdaten durch den Modellierer. Durch Variation der mit Unsicherheiten belegten Parameter wird versucht, für ein bestimmtes Abflussspektrum eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen berechneten Wasserständen und Vergleichswasserständen, die z.B. aus HW-Dokumentationen abgeleitet werden, zu erreichen. Eine exakte Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse zweier unabhängig voneinander aufgebauter und kalibrierter Modelle ist eher zufällig. Abweichungen der Zielgrößen im Bereich der Modellunsicherheiten (siehe Kap.7.3.6) lassen daher keinen zuverlässigen Vergleich der Modellgüte zu.

Die Kalibrierung der Modelle des hier dargelegten Untersuchungsgebietes erfolgte bezogen auf die Flussmitte. Die beim Vergleich der 1D und 2D Kalibrierungsergebnisse (siehe Abb. 7-4) entlang der Flussachse ermittelten WSP-Differenzen liegen in der Größenordnung der Modellunsicherheiten. Eine Bewertung der Modellgenauigkeit bzw. Modellgüte über den direkten Vergleich der Kalibrierungsergebnisse entlang der Flussachse ist demnach nicht zulässig. Auch die etwas stärkeren Abweichungen von $\Delta y > 1$ dm zwischen Fluss-km 90+000 und 91+000 lassen sich aus physikalischer Sicht und mangels Kalibrierungsdaten nur unzureichend erklären.

7.3.8 Berücksichtigung der Querneigung in Flusskrümmungen

Aufgrund der auf die Strömung wirkenden Zentrifugalkraft und der durch sie initiierten Sekundärströmung stellt sich in Flusskrümmungen ein laterales Wasserspiegelgefälle ein, welches in Richtung der Innenkurve geneigt ist. Die Ausprägung der Querneigung wird bei zweidimensionalen Modellen näherungsweise nachgebildet. Die kinetische Energie der Strömung wird an der Berandung der Außenkurve zum Teil in potentielle Energie umgewandelt. Die erhöhten Wasserstände bilden eine dem Strömungsimpuls entgegenwirkende Stützkraft, die die Umlenkung der Strömung bewirkt.

Die Wasserspiegelquerneigung in Flusskrümmungen lässt sich in Abhängigkeit der mittleren Fließgeschwindigkeit, des Kurvenradius und der Gewässerbite sowie eines empirischen Beiwertes abschätzen. Die Querneigung in Krümmungsmitte Δh ergibt sich zu:

$$\Delta h = \frac{b}{r_c} \frac{v_m^2}{2g} C \quad (7-3)$$

mit: v_m = mittlere Fließgeschwindigkeit
 b = Gewässerbite
 r_c = Achsradius der Krümmung
 C = empirischer Faktor nach [Mock & Theune, 1988]

Im Rahmen der nachfolgend dokumentierten Studie wurde untersucht, inwieweit durch die Berücksichtigung der Querneigung über diesen Ansatz eine Annäherung der auf Extrapolation eindimensionaler errechneter Wasserstände beruhenden Überflutungsanalyse an die zweidimensionalen Modellergebnisse bewirkt werden kann. Als Versuchsstrecke wurde wiederum die Stauhaltung Neckarzimmern mit ihren ausgeprägten Flusskrümmungen gewählt.

Um die Einflüsse der unterschiedlichen Kalibrierungen der beiden Modelle (1D, 2D) auszuschließen und lediglich die Ausprägungen der lateralen Wasserspiegelverteilung zu analysieren, wurden zunächst die in Flussmitte abgegriffenen Wasserstände der 2D-HN-Modellierung analog der in Kap.6.4.1.1 beschriebenen Vorgehensweise an die ‚Linien gleicher Wasserstände‘ gekoppelt und in die Fläche projiziert. Die Differenzen der über Interpolation zwischen den Linien erzeugten Wasseroberfläche

und der originären zweidimensionalen Berechnungsergebnisse sind in Abb. 7-15 dargestellt. Der graphische Vergleich nach Eliminierung der Kalibrierungsunterschiede zeigt deutlich, dass die zweidimensionale HN-Simulation im Außenbereich von Krümmungen höhere, im Innenbereich niedrigere Wasserstände liefert. Insgesamt liegen 67 % der Differenzen im Bereich $\Delta y < \pm 5$ cm und 89 % in einem Intervall von ± 10 cm.

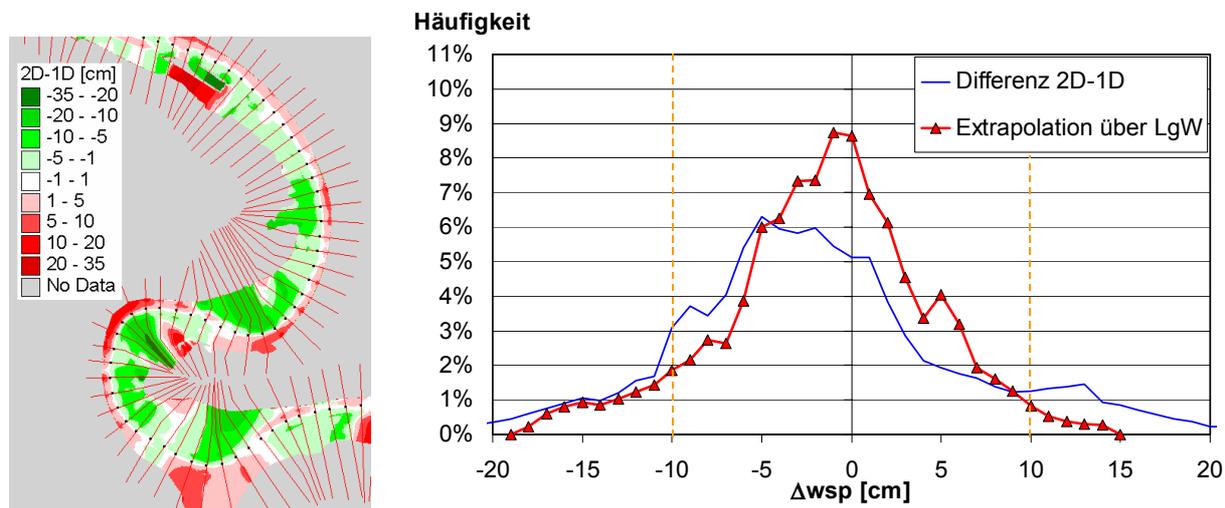


Abb. 7-15 Differenzen zwischen der über ‚Linien gleicher Wasserstände‘ interpolierten Wasseroberfläche und den originären zweidimensionalen Berechnungsergebnissen

Krümmung	km-Bereich	Stützpunkt	Radius [m]	Breite [m]	v_m [m/s]	$v_m^2 / 2g$	Δh [m]
Nr. 1	87,0 - 87,9	87,5	1170	115	3,0	0,459	0,113
Nr. 2	88,3 - 89,2	88,7	930	120	2,6	0,345	0,111
Nr. 3	89,3 - 89,8	89,5	355	120	2,3	0,270	0,228
Nr. 4	90,3 - 90,8	90,5	320	110	2,9	0,429	0,368
Nr. 5	91,0 - 91,5	91,2	555	80	3,2	0,522	0,188
Nr. 6	91,8 - 92,2	92,0	380	85	2,3	0,270	0,151
Nr. 7	92,4 - 93,2	92,8	1050	80	3,0	0,459	0,087

Tabelle 7-5 Stützpunktbezogene Ermittlung der WSP-Querneigung

Um nun den o.g. Ansatz zur Abschätzung der Querneigung anzuwenden, wurden zunächst an charakteristischen Stellen des Flusslaufes die Kurvenradien bestimmt und bezogen auf die Berechnungsstützpunkte des 1D-HN-Modells bzw. deren Bezugskilometer tabellarisch geordnet. Der empirische Faktor C wurde mit 2,5 angenommen und stützt sich auf die Hinweise zur Gewässercharakterisierung in den Ausführungen von [Mock & Theune, 1988]. Nach Gl.(7-1) konnte nun für jeden Stützpunkt die Querneigung über die eindimensional berechnete mittlere Fließgeschwin-

digkeit ermittelt werden (siehe Tabelle 7-5). Zwischenwerte wurden anschließend linear interpoliert.

Zur Berücksichtigung der Querneigung im GIS wurden die ‚Linien gleicher Wasserstände‘ in 3D-Vektoren (PolyLineZ) konvertiert und Stützpunkte an den Uferkanten hinzugefügt. Hierdurch war es möglich der Linie einen veränderlichen Höhenverlauf zuzuweisen und somit die Querneigung durch Interpolation flächenhaft abzubilden. Das auf diese Weise erzeugte Raster der Wasseroberfläche wurde wiederum mit den originären zweidimensionalen Berechnungsergebnissen verschnitten. Die Differenzen sind in Abb. 7-16 dargestellt. Die graphische Darstellung zeigt, dass im Vergleich zur 2D-HN-Berechnung über den vereinfachten Querneigungsansatz eine tendenziell stärkere Querneigung errechnet wurde. Eine weitergehende Interpretation der flächenhaften Differenzenverteilung ist kaum möglich. Der Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Differenzen zeigt jedoch eine in der Gesamtbetrachtung verbesserte Übereinstimmung der ermittelten Wasserspiegellagen. 93 % der Wasserstandsunterschiede liegen in einem Intervall von $\Delta y = \pm 10$ cm und 73 % der Werte stimmen sogar auf ± 5 cm überein.

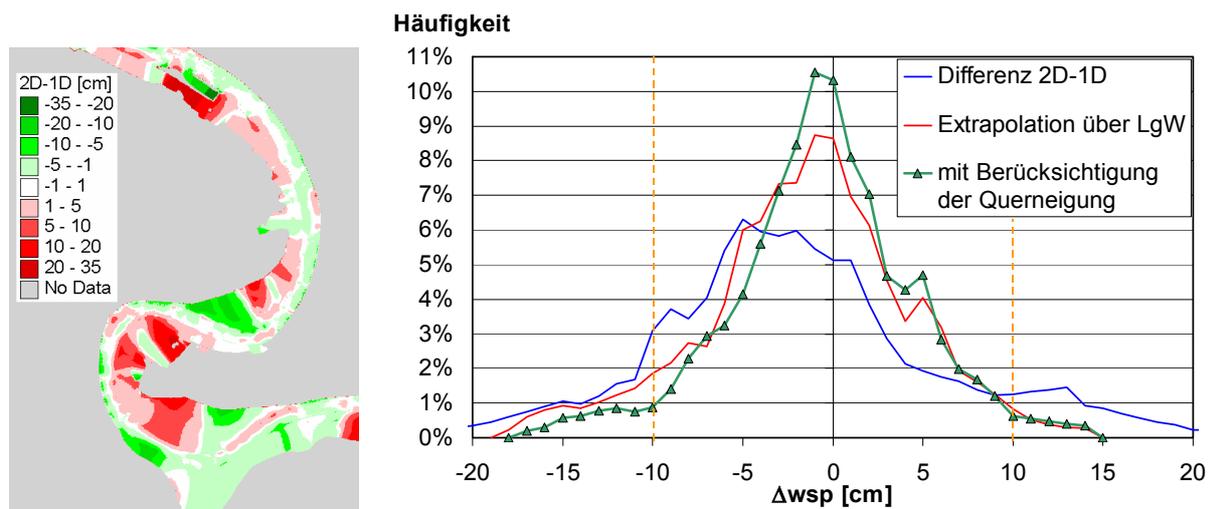


Abb. 7-16 Differenzen zwischen der über ‚3D-Linien‘ unter Berücksichtigung der Querneigung interpolierten Wasseroberfläche und den originären zweidimensionalen Berechnungsergebnissen

Die Arbeitsschritte zur Erzeugung von Überflutungsflächen unter Berücksichtigung der Querneigung auf Basis eindimensionaler Berechnungsergebnisse lässt sich über GIS-Funktionalitäten weitgehend automatisieren. Ein Verfahren zur automatisierten Erzeugung der ‚Linien gleicher Wasserstände‘ senkrecht zur Flussachse und Attributierung bzgl. der Gewässerstation auf Basis der landesweit verfügbaren Gewässerlinien wird in Kap.9.6 vorgestellt. Liegen auch die Uferlinien in digitaler Form vor (z.B. als Ergebnis einer photogrammetrischen Bildflugauswertung), können die Linienstützpunkte an den Uferkanten über GIS-Funktionalität automatisch erzeugt werden. Neben der Gewässerstationierung werden auch die Informationen zum Bezugskurvenradius und der Flussbreite an die 3D-Linien gekoppelt. Die gemittelten Wasser-

stände und Fließgeschwindigkeiten einer eindimensionalen Berechnung können bezogen auf die jeweilige Gewässerstation über eine ASCII-Schnittstelle eingelesen werden. Die Zuweisung der jeweiligen Höhenwerte innerhalb einer Linie erfolgt stützpunktweise. Die Erkennung der Stützpunkte bzgl. ihrer Zugehörigkeit zur Innen- und Außenkurve kann beispielsweise über eine zusätzliche Sachattributierung mit Informationen zum Startpunkt der Linie und der Anzahl der Stützpunkte zum Ufer gelöst werden.

7.3.9 Sensitivität der Überflutungsfläche

Da die Sensitivität der auf Basis flächenhafter Wasserspiegellagen errechneten Überflutungsgrenzen einzig und allein von den im Untersuchungsbereich vorliegenden Geländegradien abhängig ist, hat ihre Quantifizierung lediglich exemplarischen Charakter. In Abb. 7-17 ist die prozentuale Änderung der errechneten Überflutungsfläche in Abhängigkeit einer gleichmäßigen Wasserspiegelanhebung bezogen auf HQ_{100} für das ca. 8 Flusskilometer lange Untersuchungsgebiet der Stauhaltung Neckarzimmern dargestellt.

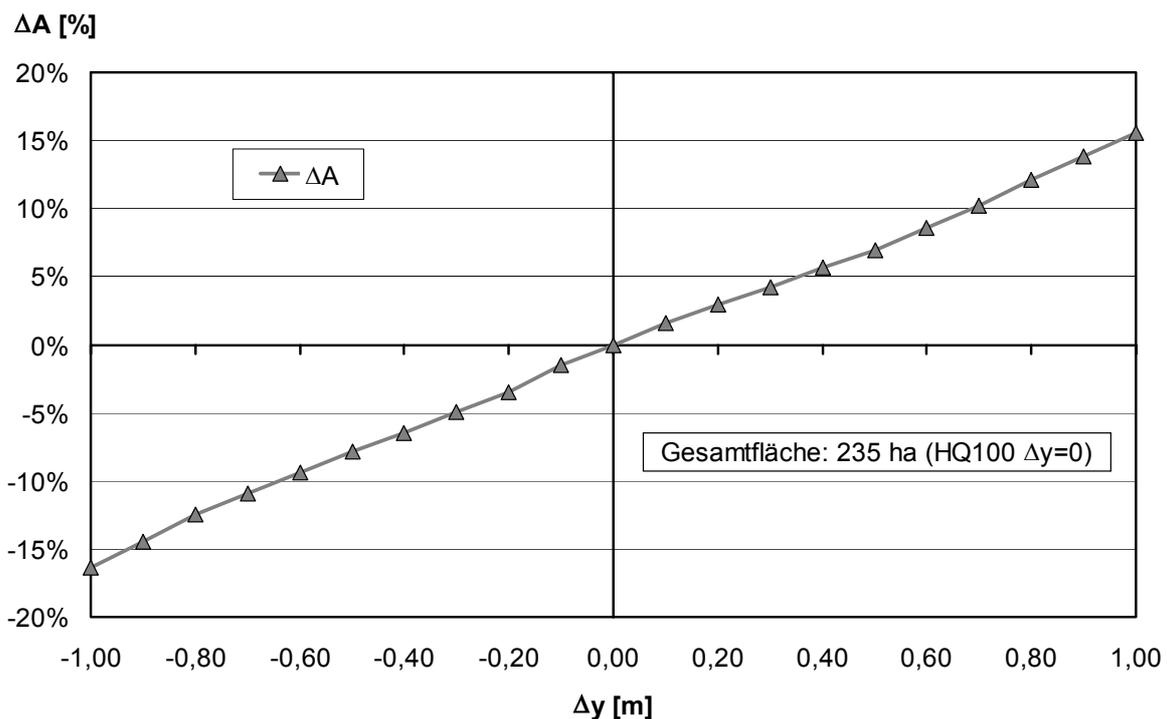


Abb. 7-17 Sensitivität der Überflutungsfläche der Stauhaltung Neckarzimmern in Abhängigkeit der Wasserspiegellage

Bei der Genauigkeitsbewertung der Kartierung errechneter Überflutungsgrenzen in Planunterlagen sind das Zusammenwirken

- der Unsicherheiten der Wasserspiegellage bzw. topographischen Höheninformationen (DGM),
- des Geländegradien,

- des Darstellungsmaßstabes
- sowie der Strichstärke bzw. Zeichengenauigkeit zur Markierung der Grenzlinie maßgebend.

Zur Verdeutlichung möglicher Konsequenzen der Unsicherheiten in Eingangsdaten und Modellparametern sind in Abb. 7-18 die im Rahmen des Variantenstudiums errechneten Überflutungsflächen im Bereich der Ortslage Hassmersheim vor dem Hintergrund der DGK5 aufgetragen. Als Vergleich ist eine Luftbildaufnahme des Hochwasserereignisses 1993 bei einer dem HQ_{100} entsprechenden Abflussmenge gegenübergestellt.



Abb. 7-18 Darstellung der Auswirkungen von Unsicherheiten in Eingangsdaten und Modellparametern auf die errechneten Überschwemmungsflächen innerhalb der Ortslage Hassmersheim (links); Luftbildaufnahme Hochwasser 1993 (rechts)

7.4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Fazit

Die Ergebnisse der im Rahmen des vorangegangenen Kapitels dargelegten Untersuchung zur Modellsensitivität und dem Vergleich ein- und zweidimensionaler Berechnungsergebnisse sind in Abb. 7-19 zusammengefasst. Zur Quantifizierung der Auswirkungen unterschiedlich verteilter Wasserstandsdifferenzen zweier Modelle bzw. Modellzustände auf die errechnete Überflutungsfläche wurde zunächst die Schnittmenge der Überflutungszellen beider Varianten (A_S) ermittelt. Die Flächenänderung $\Delta A_{\text{üfl}}$ ergibt sich aus der Summe des Betrages der Differenzen beider Flächen zur gemeinsamen Überflutungsfläche $\Delta A_i = |A_i - A_S|$:

$$\Delta A_{\text{üfl}} = \Delta A_{1D} + \Delta A_{2D} \quad [\text{ha}] \quad \text{bzw.} \quad \Delta A_{\text{üfl}} = \frac{\Delta A_{1D} + \Delta A_{2D}}{A_S} \cdot 100\% \quad (7-4)$$

Es wird deutlich, dass die Güte des Hochwassermodells in erster Linie von der Genauigkeit und Menge der zur Kalibrierung des Modells zur Verfügung stehenden Wasserspiegelfixierungen und Zuverlässigkeit der zugehörigen Abflussmessungen

abhängig ist. Selbst bei Verfügbarkeit einer hohen Informationsdichte bzgl. Geometrie und Oberflächenstruktur lassen sich die primär durch Sohlreibung und Strukturgradienten induzierten Energieverluste des komplexen Fluss-Vorland-Systems nur sehr grob über empirische Parameter bzw. Erfahrungswerte abschätzen. Erschwerend kommt die zeitliche Variabilität des realen Systemzustandes hinzu, durch welche die Prognosefähigkeit des Modells weiter relativiert wird.

Die Unsicherheit der in Abhängigkeit eines vorgegebenen Abflusses errechneten Wasserstände liegt ohne zuverlässige Kalibrierungsdaten (d.h. geschätzten k_{St} -Werten) bei den am Neckar vorliegenden Randbedingungen im Bereich $> \pm 0,5$ m. Diese Unsicherheiten lassen sich auch durch den Einsatz eines hochaufgelösten zweidimensionalen Verfahrens nicht eo ipso abmindern, da die Sensitivität der Berechnungsergebnisse im Wesentlichen von der weiterhin unsicheren Rauheitsparametrisierung und den hydrologischen Eingangsgrößen dominiert wird.

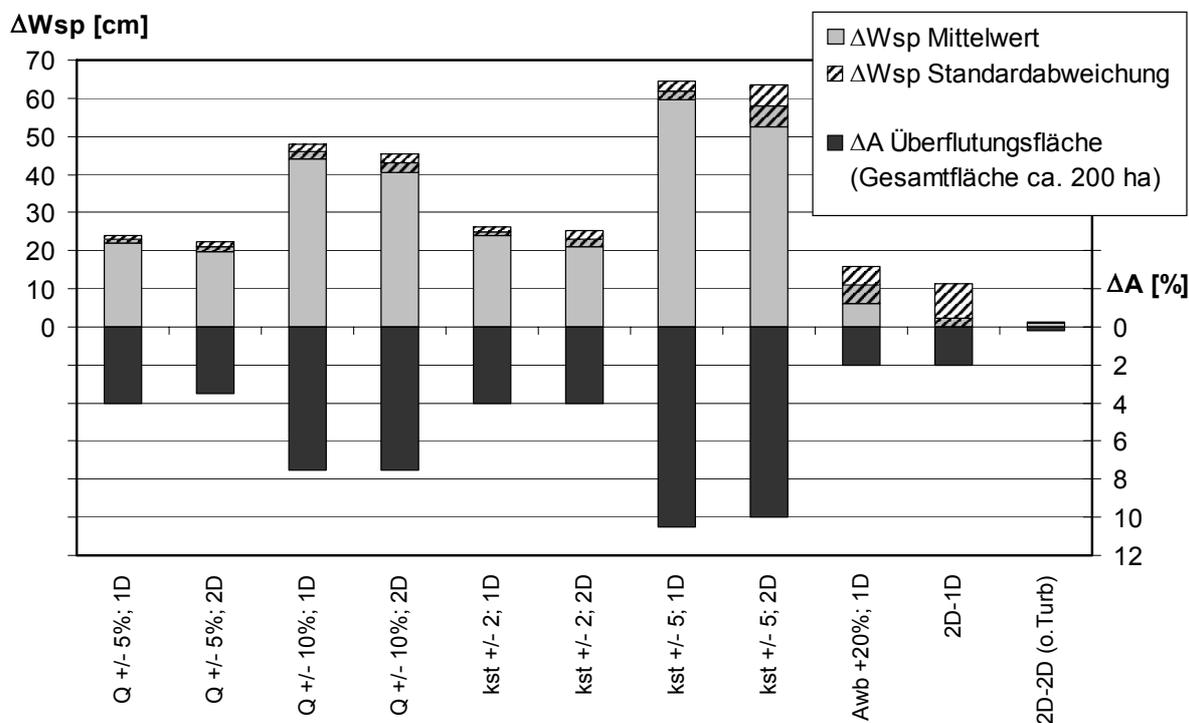


Abb. 7-19 Zusammenfassung charakteristischer Ergebnisse der vergleichenden Sensitivitätsanalyse zur Stauhaltung Neckarzimmern bezogen auf HQ_{100}

Bei der Kalibrierung eines Hochwassermodells anhand beobachteter Scheitelwasserstände stellen die z.T. großen Ungenauigkeiten in den Wasserstandsmessungen sowie die Unsicherheiten in der Zuordnung der zugehörigen Abflussmenge eine potenzielle Fehlerquelle dar. Lediglich durch

- das Heranziehen einer Vielzahl von Fixierungen mehrerer Hochwasserereignisse,
- die Auswertung aller relevanten Abflussmesspegel,

- die Berücksichtigung zusätzlicher seitlicher Zuflüsse (Einleitungen, Oberflächenabfluss etc.)
- die detaillierte Analyse der hydraulisch relevanten Charakteristik des Untersuchungsgebietes
- und die gesamtheitliche Bewertung dieser Faktoren

lassen sich die gemessenen Werte zuverlässig plausibilisieren und die Entscheidung zur Parameterwahl validieren. Bezogen auf das Abflussspektrum der Kalibrierung kann hierdurch die Unsicherheit der berechneten Wasserstände bei den am Neckar vorliegenden Randbedingungen auf ein Maß $< \pm 0,2$ m reduziert werden. Mögliche Einflüsse von Windstau und Wellenaufschlag sind hierbei allerdings nicht berücksichtigt. In Kap.8.3.3 werden die Unsicherheiten der am Neckar vorliegenden Hochwasserfixierungen anhand ausgewählter Beispiele erörtert.

Die Bedeutung der Dichte und Genauigkeit der topographischen Informationen kommt weniger bei der Berechnung der Wasserstände zum Tragen als vielmehr bei der Verschneidung dieser Wasserstände mit dem DGM. Die Erkennung und adäquate Nachbildung der hydraulisch relevanten Geometrien im HN-Modell sind jedoch Voraussetzung für die Naturähnlichkeit des Modells. Zu grobe Diskretisierungen und Interpolationsfehler (z.B. entlang den Uferböschungen) können vor allem bei der zweidimensionalen Modellierung zu numerischer Diffusion bzw. künstlichen Rauheiten führen, welche die berechneten Wasserstände signifikant beeinflussen.

Die Ergebnisse der Studie verdeutlichen, dass zur optimalen Modellwahl sowie zur Modellgenauigkeit keine pauschalen Aussagen gemacht werden können. Eine zielführende Auswahl der Modellierungsmethode ist nur durch eine fachlich fundierte Betrachtung der individuellen Rahmenbedingungen möglich und basiert auf folgenden Kriterien:

- Strömungscharakteristik des Untersuchungsgebietes (überwiegend eindimensionale oder mehrdimensionale Strömungsverhältnisse)
- Zielgröße (Wasserstand und/oder Fließgeschwindigkeit; Abfluss)
- Gebietsgröße
- vorhandene Datengrundlagen (Topographie, Hochwasserfixierungen etc.)

Unter der Voraussetzung einer eindeutigen Hauptfließrichtung lassen sich über die GIS-gestützte Anwendung eines 1D-HN-Verfahrens Überflutungsflächen ermitteln, deren Genauigkeit bzw. Aussagefähigkeit der einer 2D-HN-Simulation entspricht. Bei stark gekrümmten Flussverläufen kann hierbei der Einsatz eines Ansatzes zur Abschätzung der WSP-Querneigung auf Basis lateral gemittelter Fließgeschwindigkeiten und geometrischer Kenngrößen sinnvoll sein. Die eindimensionale Betrachtungsweise ermöglicht auch bei der Untersuchung großer Flussabschnitte eine hohe Effektivität bezüglich Datenhandhabung, Modellerstellung, Modellkalibrierung sowie Sensitivitätsanalysen bzw. Variantenstudien.

Der Einsatz eines zweidimensionalen Verfahrens ist dann notwendig, wenn sich die Strömung nicht auf 1D-Verhältnisse reduzieren lässt, oder wenn z.B. detaillierte Kenntnisse der Fließgeschwindigkeiten auf ausgedehnten Vorlandflächen gewonnen werden sollen. Diese sind in der Regel mit einem höheren Modellierungsaufwand verbunden. Eine Ergänzung großräumiger 1D-Modelle durch lokale 2D-Modelle für Bereiche mit stark mehrdimensionaler Strömungscharakteristik (Mündungsbereiche etc.) kann sinnvoll sein.

Das Kriterium ‚Gebietsgröße‘ ist nicht physikalisch begründet, sondern beruht auf Faktoren wie ‚Modellierungsaufwand‘, ‚Kosten-Nutzen-Verhältnis‘, ‚Datenmenge‘ und ‚Rechnerkapazität‘. Des Weiteren kann auch die vorhandene Datengrundlage die Verfahrensauswahl beeinflussen, so zum Beispiel wenn aus Mangel an flächenhaften HW-Fixierungen und Dokumentationen zur Oberflächenbeschaffenheit die Modellunsicherheiten den Informationszugewinn eines 2D-Modells in Frage stellen würden. Es ist jedoch zu betonen, dass die beiden letztgenannten Faktoren als Auswahlkriterium hinter den Kriterien ‚Strömungscharakteristik‘ und ‚Zielgröße‘ stehen.

8 Hochwassersimulationssystem Neckar im Rahmen der IKoNE

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die hydrodynamisch-numerischen und GIS-technologischen Grundlagen zum Aufbau eines Hochwassersimulationssystems für großräumige Untersuchungsgebiete erörtert. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse wurden im Rahmen der Entwicklungsarbeiten eines Simulationssystems für den schiffbaren Neckar umgesetzt. Das Projekt „HN-Flussmodell Neckar“ ist zentraler Bestandteil der „Integrierenden Konzeption Neckar-Einzugsgebiet IKoNE“. Hintergrundinformationen hierzu wurden in Kap.3 dargelegt.

Das Modell wird bereits seit mehreren Jahren in der täglichen Arbeitspraxis der Wasserwirtschaftsverwaltung (WWV) Baden-Württemberg erfolgreich eingesetzt. In den nachfolgenden Abschnitten werden die modelltechnischen Entwicklungsarbeiten dokumentiert. Kap.9 befasst sich in Ergänzung mit der Implementierung und Anwendung des Modells an dezentralen GIS-Arbeitsplätzen der WWV.

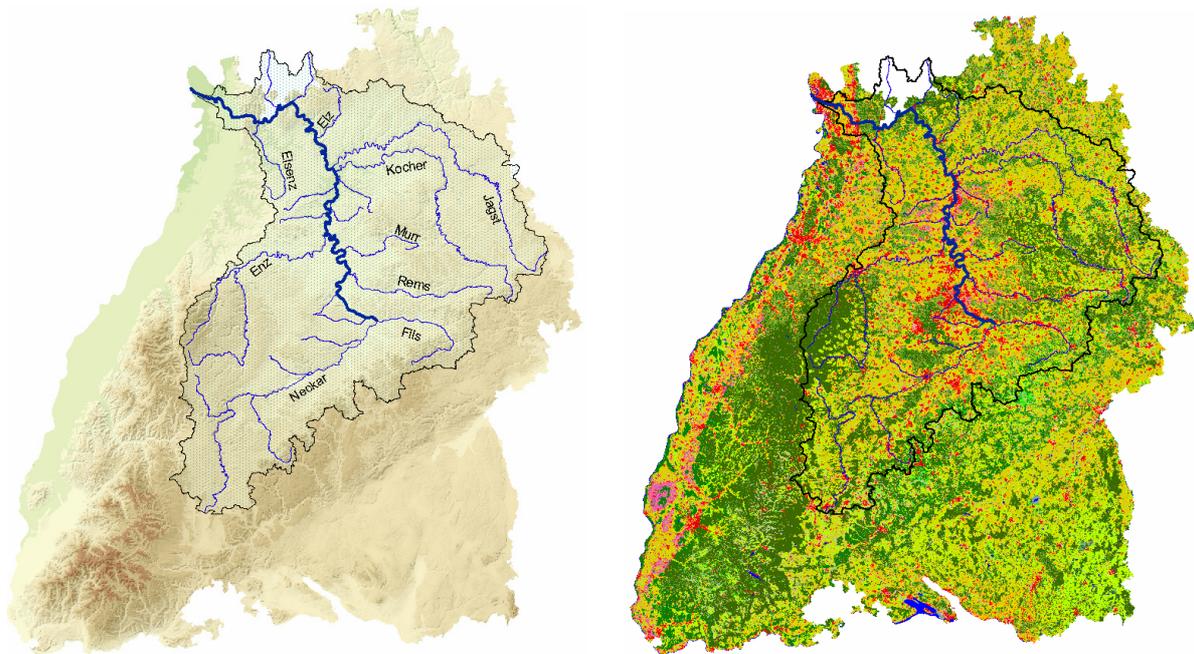


Abb. 8-1 Der schiffbare Neckar und seine wichtigsten Zuflüsse (links); Verteilung der Landnutzung (rot: Ballungsgebiete; gelb: Siedlungsflächen; grün: Wald- und Wiesenflächen) im Neckareinzugsgebiet (rechts)

8.1 Hydrologische Charakteristik und Schadenspotenziale

Das Einzugsgebiet des Neckars umfasst 14.000 km² und liegt zu 98 % in Baden-Württemberg; lediglich am nördlichen Ende entwässert auch ein kleiner Teil der hessischen Landesoberfläche in den Neckar. Es wird umschlossen von den Einzugsgebieten der Donau, des Rheins und des Mains. Der insgesamt 367 Kilometer lange

Fluss hat seinen Ursprung im Schwarzwald südlich von Rottweil und berührt neben einer Vielzahl kleinerer Anliegergemeinden u.a. die Städte Tübingen, Stuttgart, Heilbronn und Heidelberg, bevor er bei Mannheim in den Rhein mündet. Zu den größeren Nebenflüssen zählen Fils, Rems, Murr, Enz, Kocher, Jagst und Elsenz. Das Einzugsgebiet des Neckars mit Darstellung der größeren Zuflüsse sowie Klassifizierung der Landnutzungen ist in Abb. 8-1 abgebildet.

1968 wurde der Ausbau der Neckarstrecke von Plochingen bis Mannheim zu einer Kaskade von 27 Stauhaltungen fertiggestellt. Diese als Bundeswasserstraße und Kraftwerkskette genutzte Strecke von 203 Flusskilometern überwindet bis zur Mündung einen Höhenunterschied von ca. 160 m bei einem durchschnittlichen Gefälle von 0,8 Promille. Ein Längsprofil der Staustufenkaskade mit Angabe der Stauzielhöhen ist in Abb. 8-2 dargestellt.

Aufgrund der wenig durchlässigen Bodenbeschaffenheit und der steilen Topographie des Einzugsgebietes sowie des Mangels an größeren Retentionsräumen im Neckartal (siehe Kap.8.3.6.2) ist der Ablauf von Hochwasserwellen im Vergleich zu anderen deutschen Flüssen mit ähnlicher Einzugsgebietsgröße von einer ausgesprochen steilen Charakteristik geprägt, welche nur mit dem Abflussregime der Mosel zu vergleichen ist. Nach momentaner Statistik liegt das HQ_{100} am Pegel Rockenau (km 60+700) bei $2640 \text{ m}^3/\text{s}$, also dem 20-fachen der mittleren Abflussmenge von $MQ^{46} = 135 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Auftretenswahrscheinlichkeiten bestimmter Abflussmengen entlang dem Neckar können dem Hochwasserabflusslängsschnitt HQ_T der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) entnommen werden. Eine Übersicht über die höchsten Scheitelwasserstände im Unterlauf des Neckars befindet sich in Abb. 8-3. Ein Vergleich charakteristischer Hochwasserganglinien ist in Abb. 8-4 dargelegt.

Die hydrologische Charakteristik des Neckar-Einzugsgebietes in Kombination mit den enormen Schadenspotenzialen in den dicht besiedelten Flusstälern führt zu einem hohen Schadensrisiko. Nach [GWD Neckar Besigheim, 2002] wurden im Neckar-Einzugsgebiet seit 1977 Hochwasserschäden in der Größenordnung von ca. 360 Mio € (nach heutigen Preisen) von der Gebäudeversicherung Baden-Württemberg abgerechnet. Die tatsächlich entstandene Schadenssumme unter Einbeziehung kommunaler Schäden, Folgeschäden (z.B. durch Produktionsausfall und EDV-Schäden) und Mobilien (Hausrat etc.) liegt jedoch weitaus höher. Zu den großen Schadensereignissen am unteren Neckar seit Fertigstellung der Ausbauarbeiten zählen die Hochwasser im Mai 1978, Februar 1990, Dezember 1993 und April 1994. 1993 betrug die Scheitelabflussmenge am Pegel Heidelberg Karlstor (km 26+06) $Q_S = \text{ca. } 2750 \text{ m}^3/\text{s}$ und lag somit in der Größenordnung eines HQ_{100} .

⁴⁶ Zeitreihe 1951-2000 [Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2000]



Neckar-Aktiengesellschaft
Stuttgart

Neckarwasserstraße Mannheim – Plochingen
Erweiterungsprogramm Wasserkraft

Stand: 1. 10. 89
Anlage 1

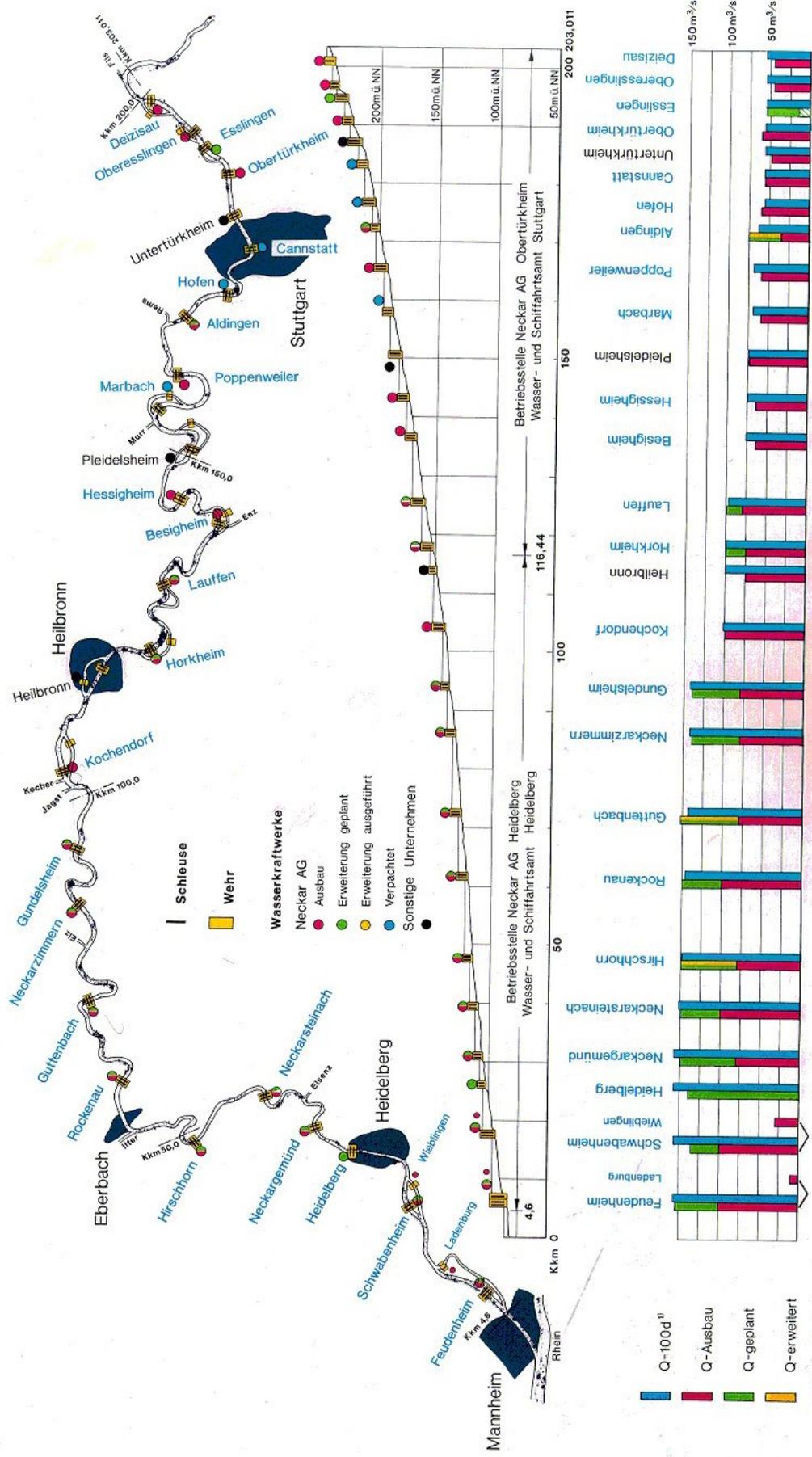


Abb. 8-2 Übersichtsplan zur Staustufenkaskade (Quelle: Neckar AG)

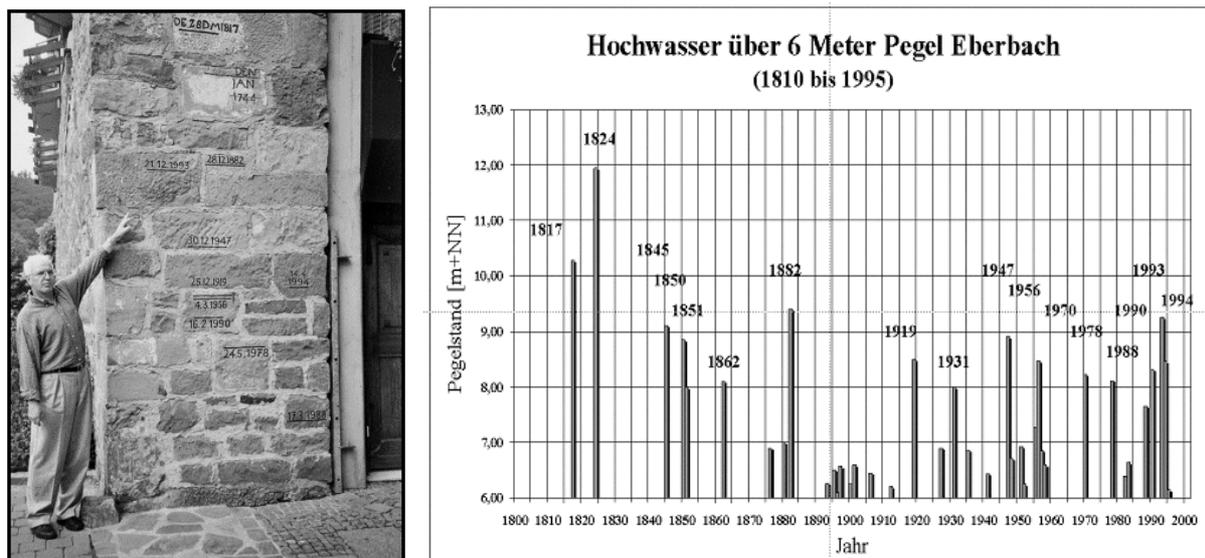


Abb. 8-3 Historische Neckar-Hochwasser dokumentiert in Eberbach

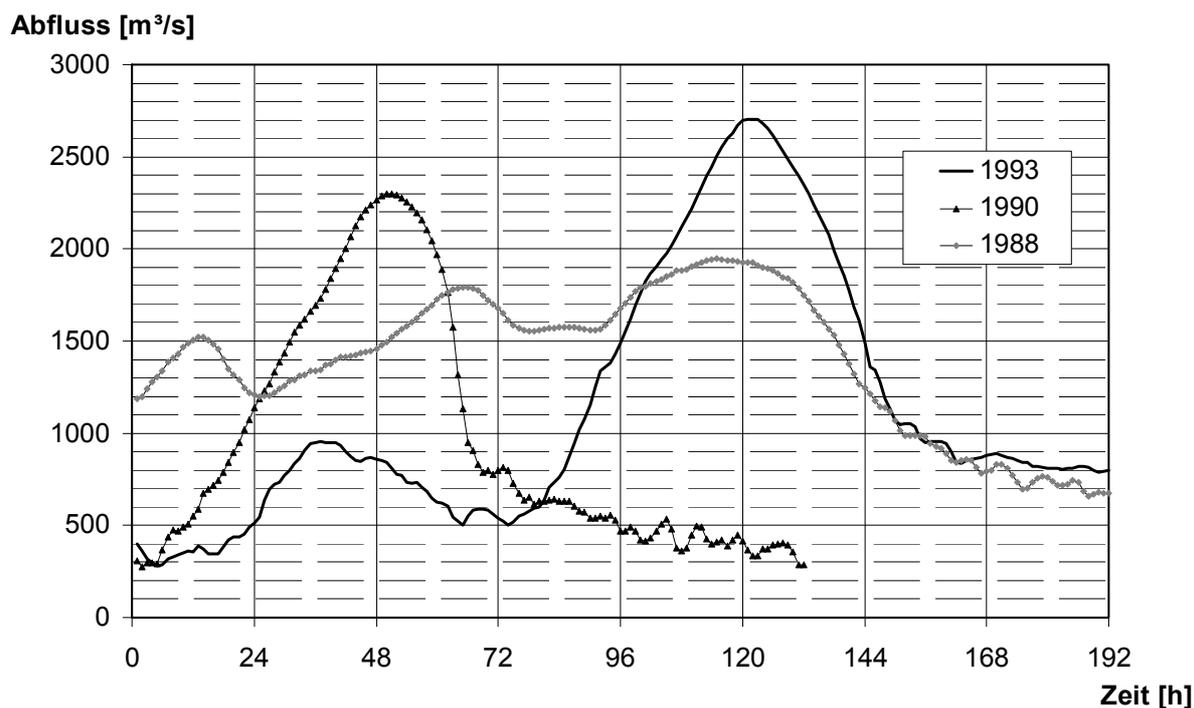


Abb. 8-4 Gemessene Hochwasserabfluss-Ganglinien am Pegel Heidelberg für die Ereignisse 1988, 1990 und 1993

Im Vergleich zu den höchsten am Neckar dokumentierten Ereignissen wird das Ausmaß dieser Katastrophen jedoch relativiert. So weist beispielsweise die historische Hochwassermarke vom Oktober 1824 am Stadttor von Eberbach (km 57+40) einen Scheitelwasserstand aus, der über 2,5 m über dem von 1993 lag. Die damalige Abflussmenge wird auf über 4000 m³/s geschätzt. 1993 betragen nach Röckel (1995)

allein in Eberbach die von der Gebäudeversicherung ausbezahlten Entschädigungen über 8,5 Mio. €. Ein flächendeckendes Extremereignis im Neckar-Einzugsgebiet wie das von 1824 würde mittlerweile Schäden von mehreren Milliarden Euro verursachen [GWD Neckar Besigheim, 2002]. Betroffen wären dann auch die Städte Mannheim, Neckarsulm, Heilbronn und Stuttgart mit ihren riesigen Industrieanlagen, deren Schutzbauwerke nicht auf ein solches Extremereignis ausgelegt sind. In Kap.9.4.4.3 werden die Simulationsergebnisse für ein solches Katastrophenszenario am Beispiel der Stadt Heilbronn vorgestellt.

8.2 Datenpool topographischer Informationen / DGM-Erstellung

Grundlage zur Simulation von Hochwasserabflüssen sind die zur Verfügung stehenden topographischen Informationen über die geomorphologischen Strukturen des Gewässerbettes und der Flussvorländer. Zielsetzung war es, für das über 200 Fluss-km umfassende Untersuchungsgebiet des schiffbaren Neckars alle bei Bund, Land oder Kommunen vorhandenen topographischen Daten zusammenzuführen.

Als Basisdaten wurden die Querprofilaufnahmen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes im Abstand von 100 Metern genutzt. Sie weisen eine hohe Genauigkeit auf, werden regelmäßig aktualisiert und decken große Bereiche des hochwasserrelevanten Bereichs der Neckartalaue ab. Die originären Höhenwerte wurden über die Gauß-Krüger-Koordinaten der Hektometerpunkte georeferenziert und über mehrere Konvertierungsschritte als Punktdaten mit Höhenattribut im GIS abgelegt. Um ein plausibles Rasterbild zu erzeugen, wurden zwischen den Originalquerprofilen zusätzliche Profile interpoliert. Hierzu wurde am IWK das Programm FAINT entwickelt (siehe Kap.6.2.2.4). Zur Erfassung des gesamten potenziell hochwassergefährdeten Auebereichs wurden Höhenlinien der topographischen Grundkarten (DGK5 bzw. HFK25) und ferner der topographischen Karte TK25 des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg digitalisiert und in das DGM integriert. Um die Höhengenaugigkeit bzw. Informationsdichte des DGM weiter zu steigern, wurden zusätzlich alle zur Verfügung stehenden Datenquellen der Landes- und Kommunalbehörden, wie z.B. Laser-Scanner-Daten, photogrammetrische Bildflugauswertungen, Kanalisationskataster, Straßenaufrißdaten, terrestrisch aufgenommene Höhenpläne, CAD-Pläne von Hochwasserschutzmaßnahmen etc., hinsichtlich Aktualität und Genauigkeit bzw. Plausibilität bewertet und selektiv dem DGM-Basisdatensatz hinzugefügt. Bereits digital vorliegende Daten konnten über die Schnittstellenpalette von ARC/INFO bzw. ArcView in das entsprechende Format konvertiert werden. Analoge Pläne wurden eingescannt, georeferenziert und Höhenangaben als Vektordaten digitalisiert. Durch die Datenzusammenführung entstand ein „Patchwork“ unterschiedlicher Genauigkeit, Aktualität und Dichte der Basisdaten des DGM. Die jeweilige Datenherkunft wurde in einer Attributstabelle dokumentiert und im GIS abrufbar vorgehalten. In Tabelle 8-1 ist eine Übersicht über die verwendeten Datenquellen der topographischen Informationen gegeben.

Um aus den punktuellen bzw. linienhaften Höheninformationen und Bruchkanten ein flächendeckendes Raster zu erstellen, wurde zunächst mit Hilfe des Triangulation-Algorithmus nach Delaunay eine Dreiecksvermaschung ('triangulated irregular network') erzeugt. Die hierdurch ermittelte Oberfläche konnte nun über lineare Interpolation in ein Raster übergeführt werden, wobei jeder Rasterzelle ein Höhenwert zugeordnet wird. Die Rasterzellengröße wurde aufgrund der stellenweise hohen Dichte der Basisdaten und der später zu erzielenden flurstücksscharfen Analysefähigkeit auf 2x2 m festgelegt.

Die Zusammenführung von Höheninformationen aus bestehenden Datenquellen ermöglichte eine kostengünstige DGM-Erstellung. Da nicht in allen Bereichen der Talauflage gleich hohe Anforderungen an die Genauigkeit errechneter Überflutungsgrenzen gestellt werden, kann das Kosten-Nutzen-Verhältnis der weiteren Aufnahme und Aufbereitung topographischer Daten entsprechend optimiert werden. Durch Attributierung der Vektordaten (Höhenpunkte) bezüglich Datenquelle, Eingabedatum und Bearbeiter ist langfristig eine übersichtliche Datenhaltung und sukzessive Erweiterung bzw. Aktualisierung des Datenbestandes möglich. Zudem kann hierdurch eine rasche Analyse der topographischen Datenbasis im GIS zur Bewertung der errechneten Überflutungsflächen erfolgen.

Stauhaltung/ Strecke	Stützpunkte - Datenquellen [Anzahl der Punkte]						
	Querprofile	DGK5	TK25	Digitales Kanalkataster	Sonstige terr. Daten	Photogr. BF-Ausw.	Summe
Mündung	6.945	5.768	-	-	418	-	13.131
Ladenburg	10.864	5.411	-	309	3.035	-	19.607
Wieblingen	8.340	4.308	-	1.043	10.320	-	24.011
Heidelberg	5.660	2.900	-	888	5.822	-	15.270
Neckargemünd	10.896	1.605	10	1.651	-	-	14.162
Neckarsteinach	10.275	532	749	1.631	46	-	13.233
Hirschhorn	16.343	1.581	-	1.024	236	-	19.184
Rockenau	14.101	1.046	-	-	-	-	15.147
Guttenbach	1.153	-	4.623	-	-	6.984	12.760
Neckarzimmern	10.615	1.976	942	11	-	-	13.544
Gundelsheim	22.880	1.110	945	207	6.935	31.252	63.329
Neckarsulm	13.894	410	563	15	-	-	14.882
Heilbronn	8.440	474	654	-	147	-	9.715
Horkheim	7.285	-	950	1.185	-	433	9.853
Lauffen	15.648	-	1.548	2.355	-	20	19.571
Besigheim	6.488	-	343	1.116	-	-	7.947
Hessigheim	8.490	-	698	1.094	437	-	10.719
Pleidelsheim	3.305	-	3.123	1.181	1.739	-	9.348
Marbach	3.546	-	-	1.034	45	-	4.625

Poppenweiler	67.321	-	1.982	-	10.586	-	79.889
Aldingen	18.494	-	1.023	-	9.438	-	28.955
Hofen	18.827	-	-	-	-	-	18.827
Cannstatt	10.650	-	-	-	-	-	10.650
Untertürkheim	10.636	-	-	-	-	-	10.636
Obertürkheim	13.002	-	-	2.978	66	-	16.046
Esslingen	3.164	-	-	1.574	-	-	4.738
Oberesslingen	14.876	-	-	6.617	6	-	21.499
Deizisau	10.816	-	-	-	60.304	-	71.120
Summe	337.639	27.121	18.153	14.744	109.580	38.689	572.398

⇒ Zusätzlich: Laser-Scanner-Daten der Städte Mannheim & Stuttgart (1x1m) für 26 Fluss-km

Tabelle 8-1 Topographische Datengrundlage des Hochwasserinformationssystems Neckar (Stand 12/2003)

8.3 Hydrodynamisch-numerisches Modell

8.3.1 Auswahl der Modellierungsmethode

Zur Simulation der Strömungsverhältnisse des Neckars im Hochwasserfall wurde ein eindimensionales, instationäres Verfahren eingesetzt. Die eindimensionale Betrachtungsweise ist bei den am Neckar vorhandenen überwiegend eindimensionalen Strömungsverhältnissen sowie den geforderten Zielgrößen (Wasserstand, Abfluss) zulässig. Ferner unterstützte auch die Größe des Untersuchungsgebietes mit einer Gesamtlänge von über 200 Flusskilometern sowie die Zielvorgabe, das Modell in der täglichen Arbeitspraxis sowie den operationellen Betrieb bei den Gewässerdirektionen zu implementieren, die Verfahrensauswahl (vergleiche Kap.7.4).

Zur Bewertung der Aussagefähigkeit der auf Basis des eindimensionalen Verfahrens ermittelten Wasserstände und Überflutungsflächen, z.B. in Bereichen mit ausgeprägten Flusskrümmungen, wurden für einen ausgewählten Streckenabschnitt eine umfassende Sensitivitätsanalyse sowie ein Vergleich mit den Ergebnissen eines zweidimensionalen Strömungsmodells durchgeführt. Die Ergebnisse wurden im vorangegangenen Kapitel dargelegt.

Grundsätzlich ist bezüglich des Betriebes der hydrodynamisch-numerischen Modelle darauf hinzuweisen, dass

- zur Berechnung von Wasserständen in Abhängigkeit des Durchflusses (z.B. zur Festlegung von Bemessungswasserständen, Ermittlung von Überflutungsflächen) die stationären Modelle der Stauhaltungen herangezogen werden. Der stationäre Einsatz der Modelle ermöglicht zudem die Quantifizierung des Rückstaeinflusses durch Baumaßnahmen im hochwasserabflusswirksamen Querschnitt durch Variation der Profilgeometrien.

- das instationäre Gesamtmodell der Staustufenkette in erster Linie der Quantifizierung der Auswirkungen von Baumaßnahmen auf das Retentionsverhalten des Neckars im Hochwasserfall sowie dem Variantenstudium von Zuflussganglinien dient. Als Ergebnis erhält man die zeitliche Verzögerung bzw. Beschleunigung sowie die Dämpfung bzw. Aufsteilung der HW-Welle (Abfluss- und Wasserstands-differenzen). Das instationäre Modell wird nicht zur Vorhersage von Hochwasserabflüssen eingesetzt. Hierzu ist die Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) der LfU Karlsruhe zuständig.

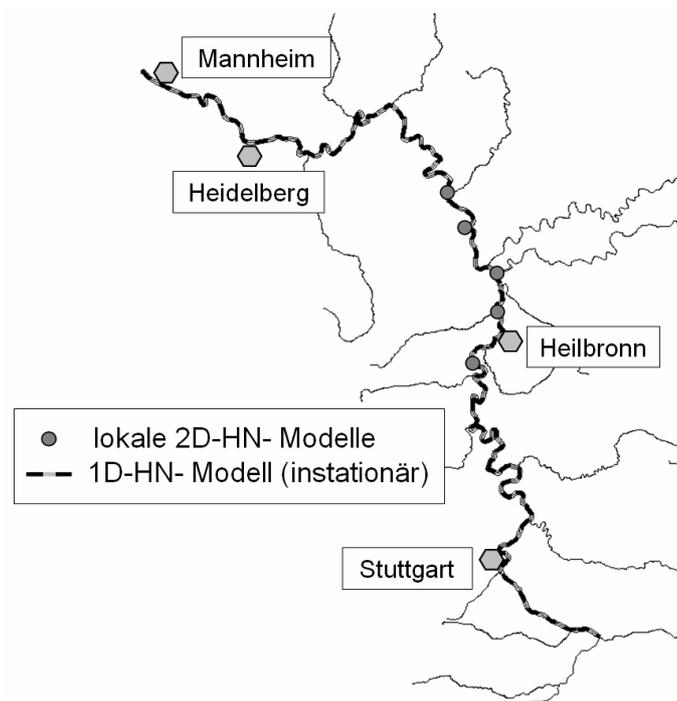


Abb. 8-5 Ergänzung des eindimensional instationären Gesamtmodells Neckar mit lokalen zweidimensionalen Modellen (links: Übersicht; rechts: Beispiel 2D-HN-Modell Kochermündung)

In einigen wenigen Bereichen mit sehr komplexer Strömungssituation, welche mit der eindimensionalen Methodik für weitergehende Analysen nur unzureichend bzw. mit nicht vertretbarem Aufwand zu erfassen waren, wurde der zusätzliche Aufbau lokaler zweidimensionaler HN-Modelle erforderlich. So verändert sich beispielsweise im Mündungsgebiet des Kochers (km 103) bei Kochendorf (siehe Abb. 8-5) sowie im Bereich der Neckarkurve bei Heilbronn (km 108) die Strömungssituation bei unterschiedlichen Abflussmengen bzw. –konstellationen so grundlegend, dass zur adäquaten Simulation des gesamten Hochwasserspektrums mehrere 1D-HN-Modelle parallel betrieben werden müssten. Die zweidimensionalen Berechnungsergebnisse lieferten wichtige Erkenntnisse über die strömungsrelevanten Prozesse, was wiederum eine bessere Interpretation der 1D-Ergebnisse ermöglichte.

8.3.2 Modellerstellung

8.3.2.1 Festlegung der Modellgrenzen

Zur eindimensionalen hydrodynamisch-numerischen Simulation der Neckarkaskade wurde das in Kap.7.3.3 beschriebene Programm *CARIMA* eingesetzt.

Zunächst wurde für jede Stauhaltung ein Modell erstellt, welches unabhängig von den Modellen der angrenzenden Stauhaltungen lauffähig ist. Als Randbedingungen werden an den unteren Modellgrenzen (Wehranlagen) ein Wasserstand ($y(t)$) zur Berücksichtigung des Rückstauinflusses und an den oberen Modellgrenzen (Wehranlagen der oberhalb liegenden Stauhaltungen, Kraftwerke, Seitengewässer) die entsprechenden Zu- bzw. Ausflüsse ($Q(t)$) vorgegeben. Bei einer stationären Berechnung werden $Q(t)$ und $y(t)$ als konstant angenommen.

In einem weiteren Schritt wurden die Einzelmodelle zu einem Gesamtmodell der Staustufenkette gekoppelt. Im Hochwasserfall wird bei Überschreitung einer bestimmten Abflussmenge das Stauziel aufgehoben. Die Schütze werden komplett gezogen und es findet keine Wehrsteuerung mehr statt. Der Wasserstand im Oberwasser der Wehranlagen wird nur noch von der Bauwerksgeometrie der Wehranlage bzw. dem durchströmten Querschnitt sowie vom Unterwasserstand (rückgestaute Strömungsverhältnisse) kontrolliert. Unter Berücksichtigung dieser hydraulischen Situation erfolgte die Koppelung der Einzelmodelle über die Geometrien der Wehranlagen. Zur Überprüfung der errechneten Wasserstände an den Schnittstellen wurden Wehrkennlinien sowie Abflusskurven der Unterwasserpegel der Wehranlagen (Neckar AG) herangezogen.

Als untere Randbedingung wird bei instationären Untersuchungen mit dem Gesamtmodell der Wasserstand $y(t)$ an der Wehranlage der untersten Stauhaltung vorgegeben. Als Randbedingung an den oberen Modellgrenzen werden die seitlichen Zu- bzw. Abflüsse $Q(t)$ auf der gesamten Modellstrecke (Nebengewässer, Kraftwerke, Einleitungen) sowie der Neckarzustrom in die oberste Stauhaltung definiert.

8.3.2.2 Systemgeometrie und -topologie

Zur Erstellung der Systemgeometrie der HN-Modelle wurde ein Regelabstand von 100 m zwischen den Berechnungsstützpunkten vorgegeben. Für Kontrollquerschnitte (Brückenbauwerke etc.) wurden zusätzliche Profile integriert. Die abflusswirksamen Bereiche des Flussschlauchs und der Vorländer gingen über die Querprofilaten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) in die Systemgeometrie des 1D-HN-Modells ein. Hierüber können für jeden Berechnungsstützpunkt die zur Lösung des Differentialgleichungssystems notwendigen ortsspezifischen Größen der Durchflussfläche A sowie des benetzten Umfangs U in Abhängigkeit der gemittelten Wassertiefe h errechnet werden.

In der Geometriedatei des HN-Modells muss neben den Profilinformationen der einzelnen Berechnungsstützpunkte auch deren räumliche Beziehung (Topologie) zueinander beschrieben werden. Dies erfolgt über die Definition der Abfolge der einzelnen Stützpunkte mit Angabe der mittleren Profilabstände über Strecken (Abb. 8-6). Über die dem Verfahren zugrunde liegende simultane Lösungsmethode ließen sich auch Verzweigungen und Vermaschungen eindimensional modellieren. Als zusätzliches topologisches Element wurden hierzu Knoten eingeführt, über welche die Endpunkte verschiedener Zweige („branches“), die räumlich zusammenfallen, zusammengeführt werden (siehe Abb. 8-6, Mitte links). Größere seitliche Zuflüsse wurden über eine Verzweigung zu einem zusätzlichen Zweig, für welchen eine obere Randbedingung $Q(t)$ zu definieren ist, modelliert. Hierzu wurden die Seitengewässer über eine vorgegebene Länge über Querprofilaten erfasst. Kleinere seitliche Zuflüsse wurden hingegen nicht geometrisch erfasst, sondern lediglich als zusätzliche Zu- bzw. Ausflussmenge $Q(t)$ zwischen zwei Berechnungsstützpunkten modelliert, welche im Rahmen des Processing für jeden Zeitschritt in die Bilanzierung eingeht. In Abb. 8-6 (Mitte rechts) ist die Modellierung seitlicher Zuflüsse mit und ohne Berücksichtigung der Gewässertopographie eines Seitengewässers schematisiert.

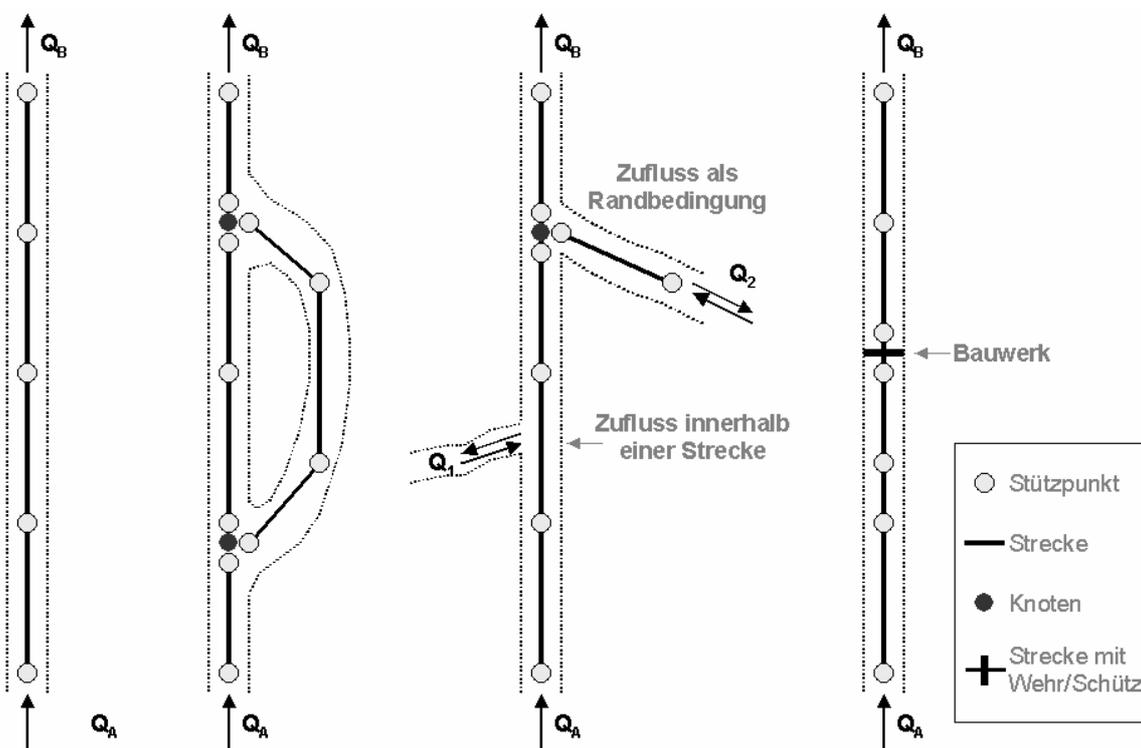


Abb. 8-6 Aufbau der Modelltopologie eines 1D-Flussabschnittes (v.l.n.r.): Stützpunkte und Strecken, vernetzte Systeme, seilt. Zuflüsse, Kontrollbauwerke

An einzelnen Streckenabschnitten war die Integration zusätzlicher Abflusskontrollen erforderlich. Das Verfahren erlaubt, Kontrollbauwerke wie Wehranlagen und Schütze als zusätzliche Elemente in die Systemtopologie zu integrieren (Abb. 8-6, rechts).

Ihre Kontrollwirkung wird über die bekannten Abflussformeln berechnet. Die erforderlichen Bauwerksgrößen bzw. -parameter (Wehrbreite, Schützöffnung, Abflussbeiwerte c_q etc.) wurden in der Geometriedatei definiert.

Die im Hochwasserfall retentionswirksamen Bereiche der Neckartalaue wurden über eine Funktion des Speichervolumens in Abhängigkeit des Wasserstandes berücksichtigt. Die diskrete Volumenfunktion $V(y)$ bzw. Flächenfunktion $A(y)$ der Retentionsräume wurde aus dem Digitalen Geländemodell mit Hilfe mehrerer GIS-Funktionalitäten bestimmt und in die Geometriedatei integriert. Zur automatisierten Funktionsermittlung $V(y)$ interaktiv definierter Retentionsräume wurde das Programm RETVOL entwickelt (siehe Kap.6.3.1.2). Die Strömungsverhältnisse (Beschleunigungs- und Trägheitskräfte) innerhalb des Retentionsraumes bleiben unberücksichtigt (reine Volumenbilanzierung).

Modelltechnisch werden die sogenannten Retentionszellen an ausgewählte Modellabschnitte über die Definition einer virtuellen Strecke zwischen zwei Stützpunkten angekoppelt. Hierzu gibt es grundsätzlich zwei Varianten:

Ungesteuerte Anbindung:

Der Füll- bzw. Entleerungsvorgang des Retentionsraumes Q_R hängt ausschließlich von der Änderung der Wasserspiegellage Δy pro Zeitschritt Δt und der Oberflächenfunktion $A(y)$ der Retentionszelle ab. In Anlehnung an die Darstellung in Abb. 8-7 (rechts) gilt:

$$\begin{aligned}
 Q_{i+1} &= Q_i + Q_R \\
 Q_R &= 0 & y_i \leq y_s \\
 Q_R &= A(y_i) * \frac{\Delta y_i}{\Delta t} & y_i > y_s
 \end{aligned} \tag{8-1}$$

mit $y_i = y_{i+1}$ (horizontaler Wasserspiegel an den die virtuelle Strecke begrenzenden Stützpunkten)

y_s [m] Sohlhöhe der Retentionszelle
 $A(y_i)$ [m²] Oberfläche der Retentionszelle in Abhängigkeit der Wassertiefe

Gesteuerte Anbindung:

Der Füll- bzw. Entleerungsvorgang des Retentionsraumes Q_R wird über ein Kontrollbauwerk (Wehr, Schütz etc.) beeinflusst. In Anlehnung an die Darstellung in Abb. 8-7 (rechts) gilt für den Wasserstand in der Retentionszelle zum Zeitpunkt t :

$$y_t = \left(\frac{Q_R * \Delta t}{A(y_{t-1})} \right) + y_{t-1} \tag{8-2}$$

Q_R wird mit Hilfe der entsprechenden Formeln für die Kontrollbauwerke errechnet. Hierzu müssen die jeweiligen Bauwerkparameter (Wehrbreite, Schützöffnung, Abflussbeiwerte c_q etc.) in der Geometriedatei definiert werden (s.o.). Bei rückgestautem Abfluss wird Q_R mit den entsprechenden Formeln unter Berücksichtigung des Wasserstandes in der Zelle errechnet.

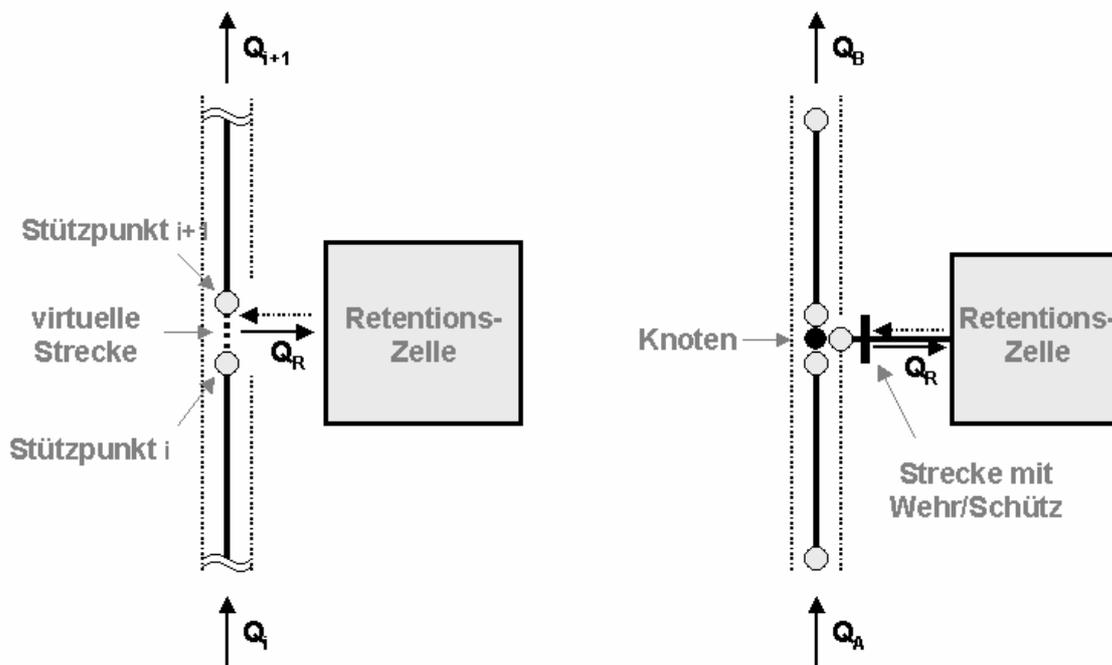


Abb. 8-7 Aufbau der Modelltopologie eines 1D-Flussabschnittes mit Anbindung von Retentionszellen (links: ungesteuert; rechts: gesteuert)

Die im Hochwasserfall retentionswirksamen Vorländer im Neckartal wurden im instationären Basismodell als ungesteuerte Zellen modelliert.⁴⁷ Zur Bestimmung der Trennungslinien zwischen den abflusswirksamen und den retentionswirksamen Bereichen wurden Ortsbegehungen (z.T. auch während Hochwasserereignissen) durchgeführt. Zudem liegen für große Teile des Neckars Orthofotos (entzerrte Luftbilder) und Luftbildaufnahmen von z.T. mehreren Hochwasserereignissen vor. Diese lieferten in vielen Fällen nutzbare Hinweise zu den Strömungsverhältnissen im Hochwasserfall. Des Weiteren wurden zur Modellerstellung Stromkarten des Neckars im Maßstab 1:2500 und topographisches Kartenmaterial herangezogen.

⁴⁷ Lediglich für Einzeluntersuchungen zu Dammbuchsenzenarien wurden die Volumina hinter den Schutzrichtungen über eine definierte Kontrollbedingung gesteuert gekoppelt.

8.3.3 Stationäre Modellkalibrierung

8.3.3.1 Vorgehensweise

Die Kalibrierung der Einzelmodelle erfolgte über den Vergleich stationär errechneter Wasserspiegellängsprofile mit gemessenen Scheitelwasserständen abgelaufener Hochwasserereignisse. Für die meisten Stauhaltungen des Neckars konnten von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung Wasserspiegelfixierungen von mehreren HW-Ereignissen zur Verfügung gestellt werden, so dass die Kalibrierung der Modelle über ein größeres Abflussspektrum erfolgen konnte⁴⁸. Insgesamt wurden für die Strecke von 203 Fluss-km über 900 Angaben zu Hochwasserständen übergeben. Durch Validierung der Modelle anhand gemessener Wasserspiegellagen zukünftiger HW-Ereignisse und eventuelle „Nachkalibrierung“ kann die Modellgüte weiter gesteigert bzw. das Modell aktualisiert werden.

Als Kalibrierungsgröße diente der Stricklerbeiwert k_{st} , über welchen die Strömungsverluste pauschal berücksichtigt werden (siehe Kap.4.1.9). Dieser Parameter wurde entweder innerhalb der Querprofile variierend (z.B. Unterteilung Flussschlauch / Vorländer) oder in Abhängigkeit der Fließtiefe (Abb. 8-8) durch den Vergleich errechneter Wasserspiegellängsprofile mit in Natur gemessenen Wasserspiegelfixierungen unter Berücksichtigung nachfolgender Kriterien angepasst.

- Plausibilität der beobachteten bzw. gemessenen Wasserstände
- Plausibilität des Stricklerbeiwertes k_{st}
- Breite des abflusswirksamen Querschnittes
- Plausibilität der hydraulischen Randbedingungen an den Modellgrenzen

Die Plausibilisierung erfolgte über Ortsbegehungen und Luftbildaufnahmen. In Bereichen starker Flusskrümmungen, plötzlicher Querschnittsänderungen und von Bauwerken wurde z.T. die Definition zusätzlicher lokaler Energieverluste erforderlich. Diese werden in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit über

$$H_{v\ddot{o}} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{bzw.} \quad H_{v\ddot{o}} = c \cdot \frac{|v_1^2 - v_2^2|}{2g} \quad (8-3)$$

mit	$H_{v\ddot{o}}$	[m]	örtliche Verlusthöhe
	ζ	[-]	Verlustbeiwert einer örtlichen Störung
	v	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit
	c	[-]	Formverlustbeiwert für Querschnittsänderung

ermittelt.

Der Wasserstand am unteren Modellrand (Oberwasser der Wehranlage) wurde durch Bewertung der Wasserspiegelfixierungen im Bereich der Wehranlage sowie

⁴⁸ An dieser Stelle wird daran erinnert, dass die Prognosefähigkeit errechneter Wasserstände u.a. davon abhängt, ob die vorgegebene Abflussmenge im Spektrum der zur Kalibrierung herangezogenen HW-Ereignisse liegt.

der Berechnungsergebnisse des HN-Modells der unterhalb liegenden Stauhaltung (Unterwasser Wehranlage) abgeschätzt. Ferner wurden Informationen bezüglich Verringerung des abflusswirksamen Querschnittes im Nahbereich der Wehranlage während der Hochwasserereignisse (Revision eines Wehrfeldes, Treibgut, vor Anker liegende Schiffe etc.) herangezogen.

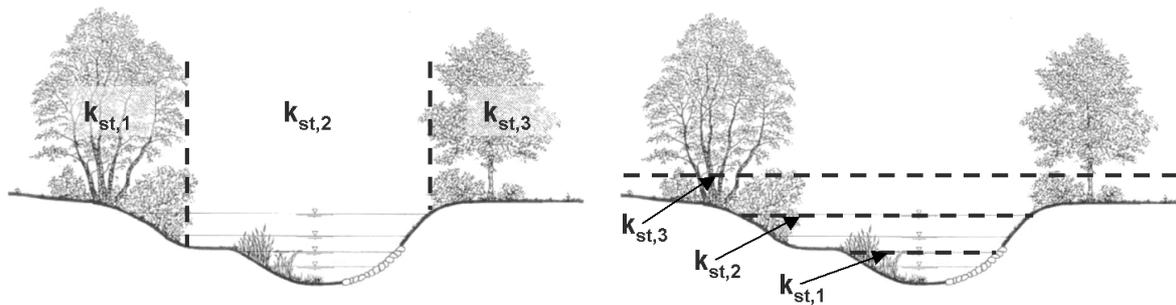


Abb. 8-8 Profilbezogene Zuweisung von Widerstandsbeiwerten: Bereichsweise (links), wasserstandsabhängig (rechts)

8.3.3.2 Interpretation der Ergebnisse

Die Auswertung der Kalibrierungsergebnisse in Abb. 8-9 macht deutlich, dass trotz sorgfältiger Modellanalyse unter Berücksichtigung o.g. Kalibrierungskriterien in vielen Fällen deutliche Diskrepanzen zwischen den berechneten Wasserständen und den vorgegebenen Fixierungen auftraten. Prinzipiell könnte dies auf eine oder mehrere der folgenden Ursachen zurückzuführen sein:

- Veränderung der hydraulisch relevanten Charakteristik (Geometrie, Oberflächenbeschaffenheit, Wehrsteuerung) des Untersuchungsgebietes
- Querneigungseffekte in Flusskrümmungen
- Ungünstige Lage der Messung (lokal begrenzter Aufstau bzw. Senke z.B. im Bereich von Bebauungen, Wellenschlag etc.)
- Falsche Zuordnung der Gewässerstationierung (vor allem in Krümmungsbereichen und verzweigten Gewässerstrecken ist diese nicht immer eindeutig)
- Zeitlicher Versatz der Fixierung bzw. Messung zum Scheiteldurchgang
- Ungenauigkeiten bei der Datenerhebung (Fixierung des Scheitelwasserstandes, Messfehler) bzw. Fehler bei der Datenarchivierung (Digitalisierung der analogen Messprotokolle)

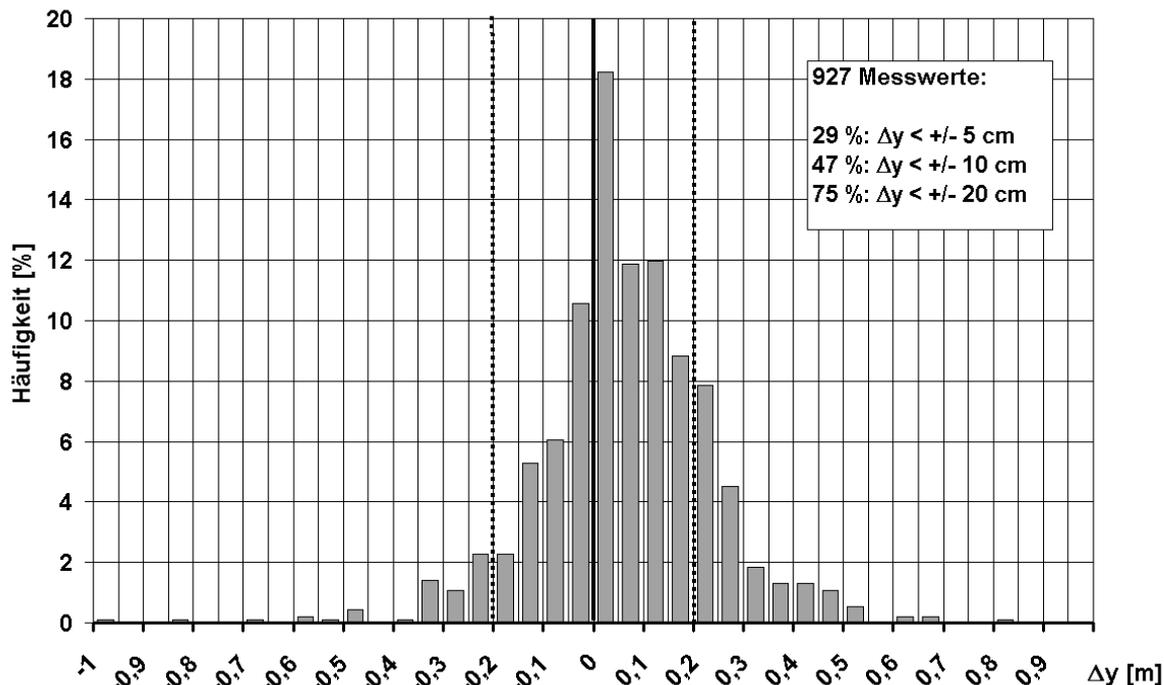


Abb. 8-9 Statistische Auswertung der Kalibrierungsergebnisse (Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Scheitelwasserständen)

Die Interpretation von Differenzen in der Kalibrierung erfolgte i.d.R. chronologisch nach der obigen Auflistung. So gaben Bilddokumentationen oder topographische Datenarchive z.T. Aufschluss über die individuellen Randbedingungen zur Zeit des Kalibrierungsereignisses. Über den Vergleich der Fixierungen mit dem Verlauf der Gewässerstrecke und (falls vorhanden) anhand der protokollierten Angaben zur jeweiligen Uferseite der Aufnahme konnte eine mögliche Korrelation der WSP-Differenzen mit den Krümmungsradien untersucht werden. Zudem wurden die lokal begrenzten Einflüsse der Messstelle und der Bezug zur Gewässerstationierung hinterfragt sowie eine gesamtheitliche (vergleichende) Bewertung der vorliegenden Messdaten durchgeführt.

Die Fehleranalyse gestaltete sich in vielen Fällen als schwieriges, zeitaufwendiges Unterfangen und nicht immer eindeutig lösbar. Besonders problematisch war hierbei die Bewertung der Hochwasserfixierungen bzgl. ihrer Zuverlässigkeit. Abgesehen von den Pegelmessstellen an den Wehranlagen werden die Scheitelwasserstände entlang dem Flusslauf nach Ablauf der Hochwasserwelle über die vermessungstechnische Aufnahme von Wasserstandsmarkierungen und Geschwemmsellinien sowie die Rekonstruktion von Wasserständen über Auswertung von Anwohnerbeobachtungen und Bilddokumentationen (terrestrische Aufnahme, Luftbilder⁴⁹) ermittelt. Die Genauigkeit der Beobachtung ist hierbei individuell abhängig von

⁴⁹ Neben flugzeuggestützten Bildaufnahmen kann heutzutage auch die satellitengestützte Fernerkundung eine authentische Rekonstruktion von Hochwasserständen ermöglichen.

- der Übereinstimmung von Geschwemmselrückständen sowie Durchfeuchtungs- und Schmutzstreifen (u.a. beeinflusst durch Wellenschlag bzw. Feuchtettransport aufgrund Kapillarwirkung) mit dem tatsächlichen Scheitelwasserstand,
- der Genauigkeit der Scheitelmarkierungen (Pflockmarken in freiem Gelände, Strichmarken an Mauerwänden, etc.) bzw. Bildokumentation,
- der Genauigkeit des Höhennivellements sowie
- der Zuverlässigkeit von Anwohnerbefragungen.

Hinzu kommt die häufig fehlende oder nicht eindeutig Dokumentation zu Lage der Messstelle und Aufnahmeverfahren. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Kalibrierung anhand zweier ausgewählter Streckenabschnitte dokumentiert und diskutiert.

Abb. 8-10 (oben) zeigt das Ergebnis der stationären Kalibrierung des HN-Modells der Stauhaltung Neckarzimmern für die Hochwasserereignisse 1988, 1990 und 1993. Außer dem Bezugskilometer lagen keine weiteren Informationen zur Lage der Messstellen vor. Der Vergleich zeigt für alle drei Ereignisse eine gute Übereinstimmung berechneter und gemessener Wasserstände. Die maximale Abweichung beträgt $\Delta y = 20$ cm. 77 % der Differenzen liegen in einem Intervall von $\Delta y < \pm 10$ cm.

In Abb. 8-10 (unten) ist ein Vergleich berechneter WSP-Längsprofile der Stauhaltung Poppenweiler mit den für diese Strecke vorliegenden Fixierungen von 1978 und 1990 dargestellt. Im Gegensatz zur Stauhaltung Neckarzimmern sind hier deutlich größere Differenzen zu verzeichnen. Die maximale Abweichung beträgt hier $\Delta y = 60$ cm. Lediglich 42 % der Differenzen liegen in einem Intervall von $\Delta y < \pm 10$ cm und 62 % in einem Intervall von $\Delta y < \pm 20$ cm. 26 % der Fixierungen weichen zwischen 20 und 60 cm von den berechneten Wasserständen ab.

Die Abbildung verdeutlicht, dass bereits die gemessenen Werte untereinander große Unstimmigkeiten aufweisen. In Abb. 8-11 ist ein Vergleich der Fixierungen mit Bezug zur Uferseite⁵⁰ und einer groben Klassifizierung des Flusslaufes dargestellt. Es zeigt sich, dass die Differenzen nicht über die in Flusskrümmungen auftretenden Querneigungseffekte erklärbar sind. So liegen die Messwerte in der Innenkurve z.T. um mehrere Dezimeter höher als in der Außenkurve, was höchstens lokal begrenzt im Bereich der Remseimündung bei km 170+500 auf die in Richtung Innenkurve wirkende Querströmung physikalisch erklärbar wäre. Zudem sind auch auf geraden Streckenabschnitten signifikante Höhenunterschiede in den Werteverteilungen vorhanden.

Zur fortführenden Bewertung der Zuverlässigkeit gemessener Hochwasserfixierungen wurde die Korrelation der Höhenunterschiede von auf beiden Uferseiten aufgenommenen Scheitelwerten mit einer auf den Krümmungsradius bezogenen Klassifizierung untersucht. In die Auswertung wurden insgesamt 87 Stationen mit Fixierungswerten auf jeder Uferseite einbezogen. Hydraulisch komplexe Bereiche (Mündungsbereiche, Verzweigungen etc.) wurden nicht berücksichtigt. Der Flussschlauch

⁵⁰ Für das Hochwasser 1990 wurden die Messwerte mit Angabe der Uferseite protokolliert.

wurde anhand visueller Beurteilung in vier grobe Kategorien unterteilt: Nicht, leicht, mäßig und stark gekrümmt. Die Fixierungspaare wurden diesen Kategorien zugeordnet und zur Differenz gebracht ($\Delta y = y_{\text{Außenufer}} - y_{\text{Innenufer}}$). Für die Auswertung wurden die Ergebnisse in 10 cm-Klassen diskretisiert und als Häufigkeitsverteilung aufgetragen (siehe Abb. 8-12).

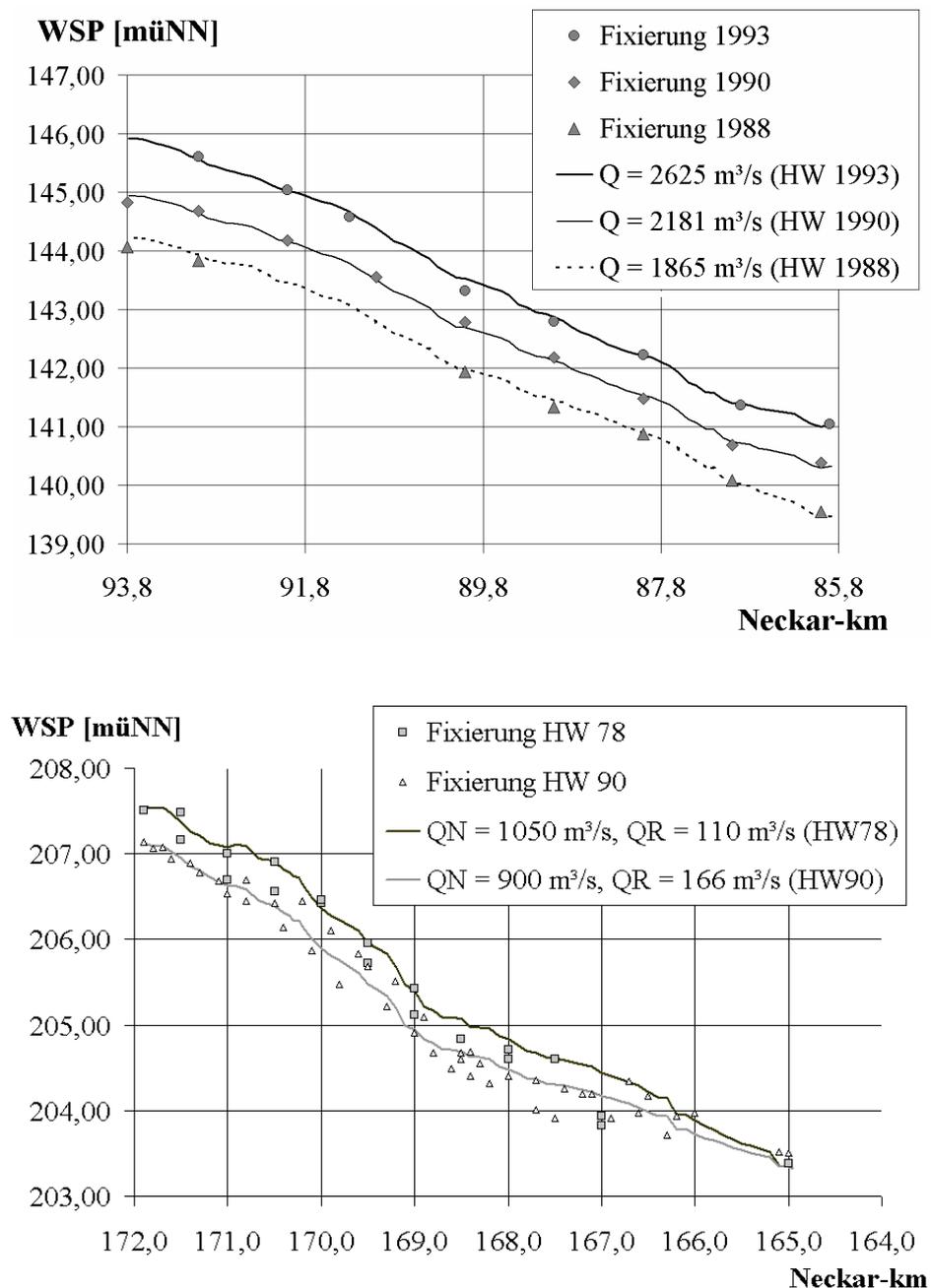


Abb. 8-10 Stationäre Kalibrierung der HN-Modelle der Stauhaltungen Neckarzimmern (oben) und Poppenweiler (unten)

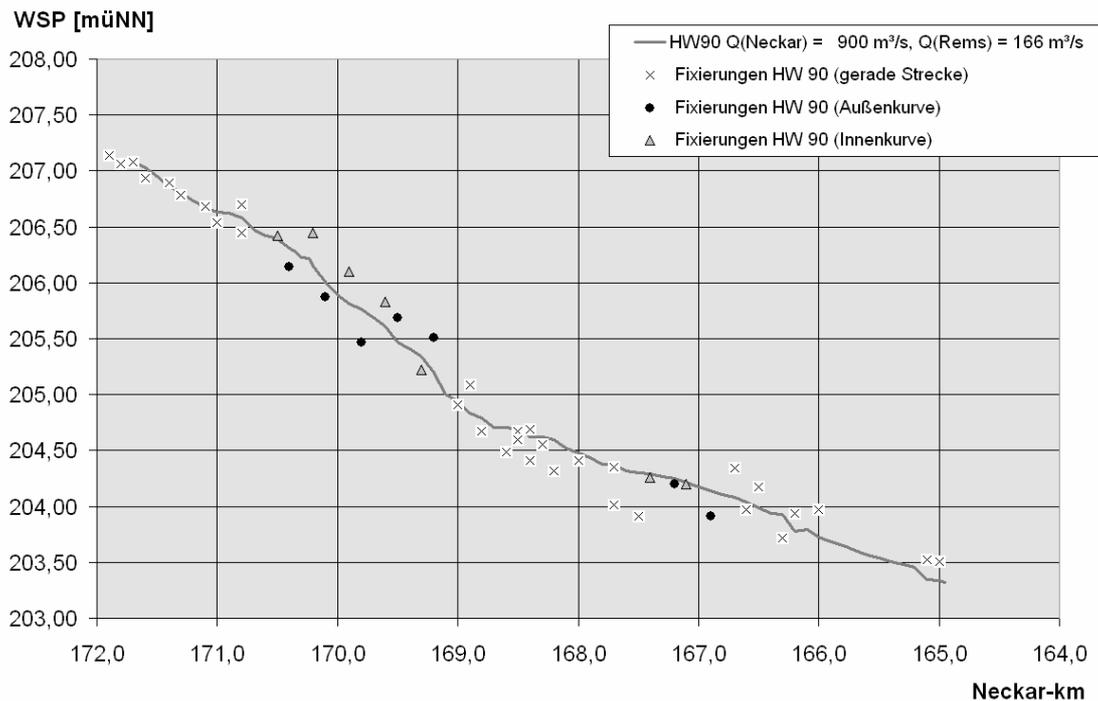


Abb. 8-11 Vergleich der Messwerte mit Bezug zur jeweiligen Krümmungseigenschaft der Untersuchungsstrecke

Aus physikalischer Sicht wäre als Ergebnis der Auswertung zu erwarten, dass die Differenzen $\Delta y = y_A - y_I$ im positiven Wertebereich liegen und mit wachsender Ausprägung der Flusskrümmung (d.h. kleinerem Kurvenradius) zunehmen. Tendenziell wird diese Erwartung auch bestätigt. In vielen Fällen sind jedoch erhebliche Unstimmigkeiten festzustellen, die physikalisch nicht begründbar sind und somit Zweifel an der Zuverlässigkeit der Wasserstandsinformationen bzw. deren zeitlicher und räumlicher Zuordnung aufkommen lassen. So liegen, wie auch schon exemplarisch an der Strecke Poppenweiler dokumentiert, einige auf die Innenufer bezogenen Werte um mehrere Dezimeter höher als die für die Kurvenaußenseite angegebenen Werte. Zudem wurden auch für die Fixierungen gerader Streckenabschnitte WSP-Differenzen von bis zu $\Delta y = 60 \text{ cm}$ festgestellt.

Über die Analyse der Häufigkeitsverteilungen der Differenzen können demnach Rückschlüsse auf die den Kalibrierungsdaten zugrunde liegenden Unsicherheiten gezogen werden. Es wird deutlich, dass eine exakte Nachbildung der Hochwasserfixierungen in vielen Fällen nicht nur unmöglich ist (zumindest unter Gewährleistung plausibler Parametrisierungen), sondern hinsichtlich der Naturähnlichkeit des Modells auch nicht zielführend wäre. Vielmehr ist eine gesamtheitliche und fachlich fundierte Bewertung aller hydraulisch relevanten Aspekte zur Modellbildung (Charakteristik des Untersuchungsbereiches, eingesetztes Verfahren, Eingangsdaten, Parametrisierung) erforderlich. Eine eingehende Diskussion zur Schwierigkeit der Kalibrierung von Hochwassermodellen wurde als allgemeine Abhandlung in Kap.4.1.9 gegeben.

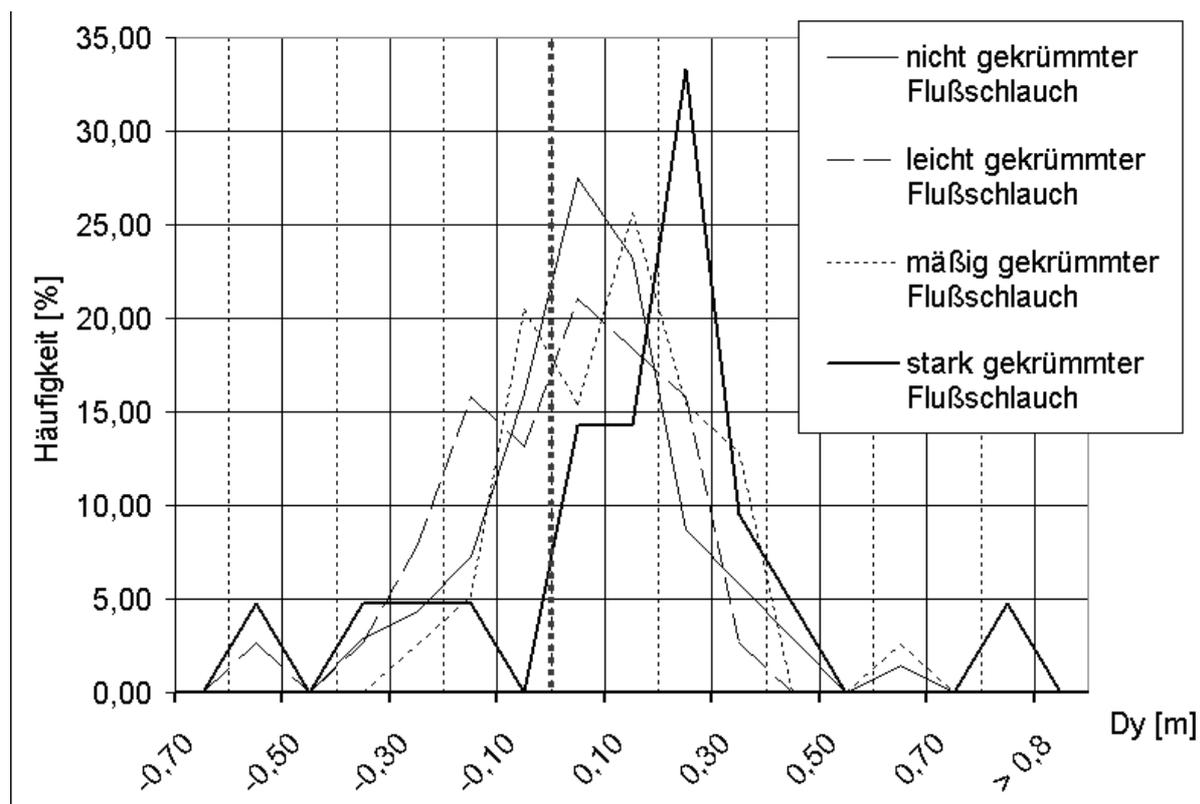


Abb. 8-12 Häufigkeitsverteilungen der Wasserstandsdifferenzen ($\Delta y = y_{\text{Außen}} - y_{\text{Innen}}$) in Abhängigkeit der Krümmungsklassifizierung des Flusslaufes

8.3.4 Validierung des instationären Gesamtmodells

Zur Validierung des Systemverhaltens des instationären Gesamtmodells wurden Wellenabläufe abgelaufener Hochwasserereignisse simuliert und die errechneten Ganglinien mit gemessenen Pegelaufzeichnungen verglichen. Da nicht für die gesamte Strecke von 200 Flusskilometern dieselben Hochwasserereignisse als maßgebend zu betrachten sind und die zur Verfügung stehenden Messdaten an den Neckarpegeln sowie den Pegelstellen der Zuflüsse ereignisabhängig unterschiedlich vorlagen, wurde die Validierung bereichsweise durchgeführt. Der im Folgenden dokumentierte Prozess der Modellvalidierung bezieht sich auf die Strecke Neckar-km 47,65 (Wehr Hirschhorn) bis Neckar-km 125,0 (Wehr Lauffen).

Aufgrund der vorhandenen Datenlage wurden die Ereignisse 1990 und 1993 als Validierungsgrundlage für die Strecke herangezogen. Bei den ersten Nachrechnungen wurden als Randbedingungen (Zuflüsse) die gemessenen Abflussganglinien an den Pegeln Lauffen, Stein, Untergriesheim und Elzmündung direkt übernommen. Zeitliche Verzögerungen zwischen Pegelmessstellen und Modellrändern wurden zunächst nicht berücksichtigt. Zur Bewertung der Berechnung wurde ein Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Abflussganglinien am Pegel Rockenau (Bereich Modellende) durchgeführt. Hierbei ist ein zeitlicher Versatz der Scheitelwerte um $\Delta t =$

2,5 h (1990) bzw. $\Delta t = -1$ h (1993) festzustellen. Ohne zusätzliche Modellzuflüsse (zur Berücksichtigung kleinerer Seitengewässer bzw. lateraler Zuflüsse) zu definieren, liegen zudem die berechneten Scheitelabflusswerte am Pegel Rockenau deutlich unter den gemessenen Pegelwerten ($\Delta Q_{S,1990} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$; $\Delta Q_{S,1993} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$).

Pegel	Scheiteldurchgang am 21.12.1993	Scheitelabfluss
Lauffen (Neckar)	15.00 Uhr	1306 m^3/s
Stein (Kocher)	13.00 Uhr	610 m^3/s
Untergriesheim (Jagst)	11.00 Uhr	590 m^3/s
Elzmündung	3.00 Uhr	187 m^3/s
Rockenau (Neckar)	22.00 Uhr	2682 m^3/s

Tabelle 8-2 Scheiteldurchgänge und Scheitelabflusswerte HW 1993

Addiert man die gemessenen Scheitelabflusswerte des Hochwasserereignisses 1993 der Pegel Lauffen, Stein und Untergriesheim und nimmt für die Elz einen Zufluss von $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (bei Scheiteldurchgang Neckar – sichere Seite) an, so erhält man im Vergleich zum gemessenen Scheitelabfluss Rockenau selbst ohne Berücksichtigung zeitlicher Versätze und Retentionswirkungen ein Defizit von $\Delta Q = 126 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabelle 8-2). Berücksichtigt man die Zeitpunkte der Scheiteldurchgänge, so wird sich das Defizit der gemessenen Zuflüsse zum gemessenen Abfluss Rockenau nochmals erhöhen ($\Delta Q = \text{ca. } 250\text{-}300 \text{ m}^3/\text{s}$). Hieraus ist zu folgern, dass weitere bedeutende Zuflüsse vorhanden sein müssen bzw. die Abflussermittlung an den Pegeln Ungenauigkeiten aufweist.

Aufgrund genannter Unstimmigkeiten wurde eine umfangreiche Sensitivitäts- und Variantenstudie bezüglich des instationären Gesamtmodells durchgeführt. Untersucht wurde u.a. der Einfluss der hydrologischen Eingangsdaten (Randbedingungen) auf die berechneten Hochwasserganglinien an den Pegeln Gundelsheim und Rockenau. Hierbei ging es darum, die zusätzlichen seitlichen Zuflüsse sowie die Distanzen der Pegelmeßstellen zu den Modellrändern einzubeziehen. Folgende Berechnungsvarianten wurden mit den gemessenen Pegel-Ganglinien Rockenau und Gundelsheim verglichen:

- (1) Als obere Randbedingungen wurden die an den Pegeln Lauffen (Neckar), Stein (Kocher), Untergriesheim (Jagst) und dem Mündungspegel der Elz gemessenen Ganglinien vorgegeben, ohne weitere Zuflüsse und Zeitversätze zu definieren.
- (2) Es wurde für jede Stauhaltung ein konstanter Zufluss (Größenordnung: $0\text{-}50 \text{ m}^3/\text{s}$) definiert, durch welchen kleinere Zuflüsse und Einleitungen pauschal berücksichtigt werden sollen.
- (3) Die „pauschalen“ Zuflüsse wurden (mit der Neckarwelle korrespondierend) instationär vorgegeben.

- (4) Die Ganglinien der Modellzuflüsse Kocher und Jagst wurden um 1.5 bzw. 1 Stunde versetzt. Hierdurch wird die räumliche Distanz zwischen den Pegelmessstellen und den Einmündungen in den Neckar berücksichtigt.
- (5) Für das Hochwasser 1993 wurde die gemessene Ganglinie des Pegels Lauffen, dessen Abflusskurve nach Aussagen der zuständigen Behörden (siehe unten) größere Unsicherheiten aufweist, um 100 bis 160 m³/s erhöht.

Es konnte festgestellt werden, dass durch die Vorgaben (3),(4) und (5) eine gute Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Ganglinien erreicht wurde (siehe Abb. 8-13).

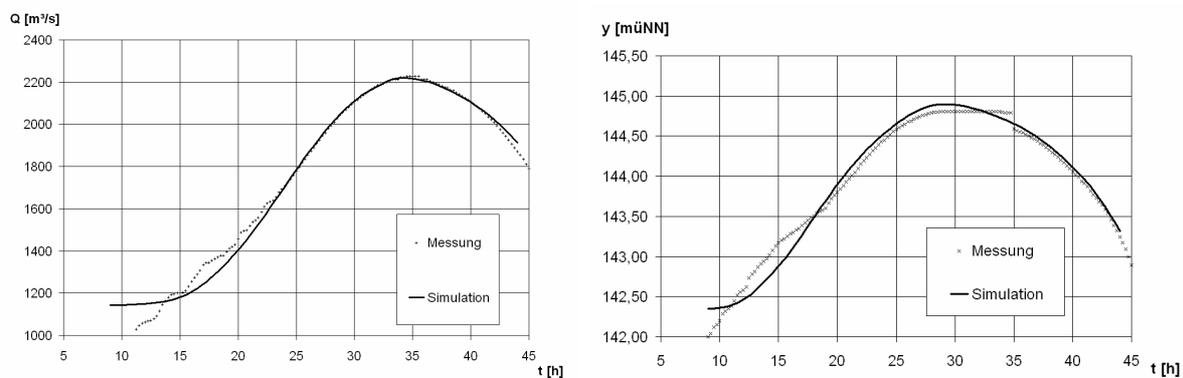


Abb. 8-13 Hochwasser 1990: Vergleich gemessener und berechneter Abflussganglinien am Pegel Rockenau (km 60,7; links) bzw. Wasserstandsganglinien am Pegel Gundelsheim (km 93,8; rechts)

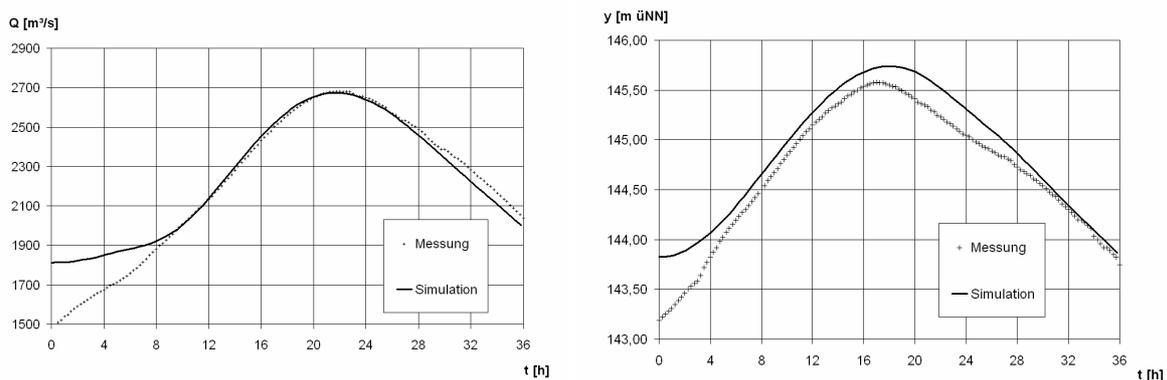


Abb. 8-14 Hochwasser 1993: Vergleich gemessener und berechneter Abflussganglinien am Pegel Rockenau (km 60,7; links) bzw. Wasserstandsganglinien am Pegel Gundelsheim (km 93,8; rechts)

Zur Beurteilung der Zulässigkeit der in Kap. 3.2 aufgeführten Veränderungen der hydrologischen Randbedingungen bei der Nachrechnung historischer HW-Ereignisse kann zunächst festgehalten werden, dass

- gerade bei Hochwasserereignissen die ermittelten Abflusskurven (Wasserstands-Abfluss-Beziehungen) an den Pegeln mit Unsicherheiten behaftet sind. Dies gilt insbesondere für den Pegel Lauffen.
- die gemessenen Ganglinien der Pegel Stein und Untergriesheim nicht identisch sind mit den Zuflussganglinien im Mündungsbereich von Kocher und Jagst (zeitl. Verzögerung, Abflusserhöhung zwischen Pegelmessstelle und Mündung, Rückstau einfluss Neckar).
- die Abflussganglinie des Pegels Lauffen nicht am Wehr Lauffen (km 125) sondern unterhalb der Enzmündung (km 136) gemessen wird und somit eine Erhöhung der Abflusswerte bis zum Wehr Lauffen wahrscheinlich ist.
- neben Kocher, Jagst und Elz weitere Zuflüsse und Einleitungen entlang dem Neckar vorhanden sind und den HW-Abfluss erhöhen. Diese Zuflüsse sind instationärer Natur.

Aufgrund dieser Feststellungen sind die beschriebenen Veränderungen der Eingangsdaten mit Berücksichtigung weiterer seitlicher Zuflüsse nicht nur zulässig, sondern vielmehr physikalisch notwendig, da ansonsten wesentliche hydrologische Bedingungen unberücksichtigt bleiben. Ein Heranziehen weiterer historischer Hochwasserereignisse zur Modellkalibrierung wird als nicht notwendig erachtet, da die Abweichungen zwischen errechneten und gemessenen Ganglinien nicht auf die Modellierung, sondern auf Ungenauigkeiten der Zuflussganglinien bzw. auf fehlende Zuflussinformationen zurückzuführen sind. Auch eine Modellierung der Zuflüsse bis zu den Pegelmessstellen wird zur Erhöhung der Modellgenauigkeit als nicht zielführend beurteilt. An dieser Stelle wird nochmals darauf hingewiesen, dass der Anforderungskatalog des Modells nicht die Vorhersage von Hochwasserabflüssen bzw. Pegelständen umfasst (siehe Kap.3.4 und Kap.8.3.1). Hierzu ist der Einsatz hydrologischer Verfahren, wie sie z.B. von der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) B.-W. eingesetzt werden, sinnvoll. Die instationäre hydrodynamisch-numerische Modellierung dient primär zu Prognoserechnungen u.a. zur Beurteilung der Auswirkungen von Baumaßnahmen auf die Hochwasserganglinie (Relativbetrachtungen) und ist hierfür zielführend.

8.3.5 Wahl der unteren Randbedingungen zur Modellanwendung

Entscheidend für die Wasserstandsermittlung bei rückgestauten Abflussverhältnissen ist der Wasserstand an der unteren Modellgrenze (Kontrollquerschnitt). Der Einfluss dieser Randbedingung auf den errechneten Wasserstand eines Berechnungspunktes wird umso geringer, je größer dessen Entfernung zum unteren Modellrand ist. Im Falle der Einzelmodelle der Stauhaltungen stellen die Wehranlagen die unteren Modell-

grenzen dar. Zur Durchführung einer hydraulischen Berechnung muss also neben den Zu- bzw. Abflüssen an den oberen Modellgrenzen zur Berücksichtigung des Rückstauinflusses ein Wasserstand am Wehr definiert werden. Dieser Wasserstand kann prinzipiell von folgenden Faktoren abhängen:

- Abflussmenge, die über das Wehr geleitet wird
- Unterwasserstand der Wehranlage
- Schützstellungen
- Verringerung des abflusswirksamen Querschnittes im Bereich der Wehranlage (Wehrfeld in Revision, Treibgut, vor Anker liegende Schiffe etc.)

Wie bereits in Kap.8.3.2 beschrieben wurde, werden im Hochwasserfall bei Überschreitung einer bestimmten Abflussmenge die Schütze komplett gezogen und es findet keine Wehrsteuerung mehr statt. Für den Fall der Stauaufhebung existieren keine offiziellen Abflusskurven (Wasserstands-Abfluss-Beziehungen) für das Wehroberwasser. Die Abflusskurven der Unterwasserpegel der ‚Neckar AG‘ für die Wehranlagen des Neckars beziehen sich auf die nächstgelegenen Bundespegel und können nur bedingt zur Abschätzung der Oberwasserstände herangezogen werden, da die Abflusszunahme auf der Strecke Wehranlage - Bundespegel z.T. unberücksichtigt bleibt. Zudem decken die Kurven nur den Abflussbereich bis maximal HQ_{10} ab.

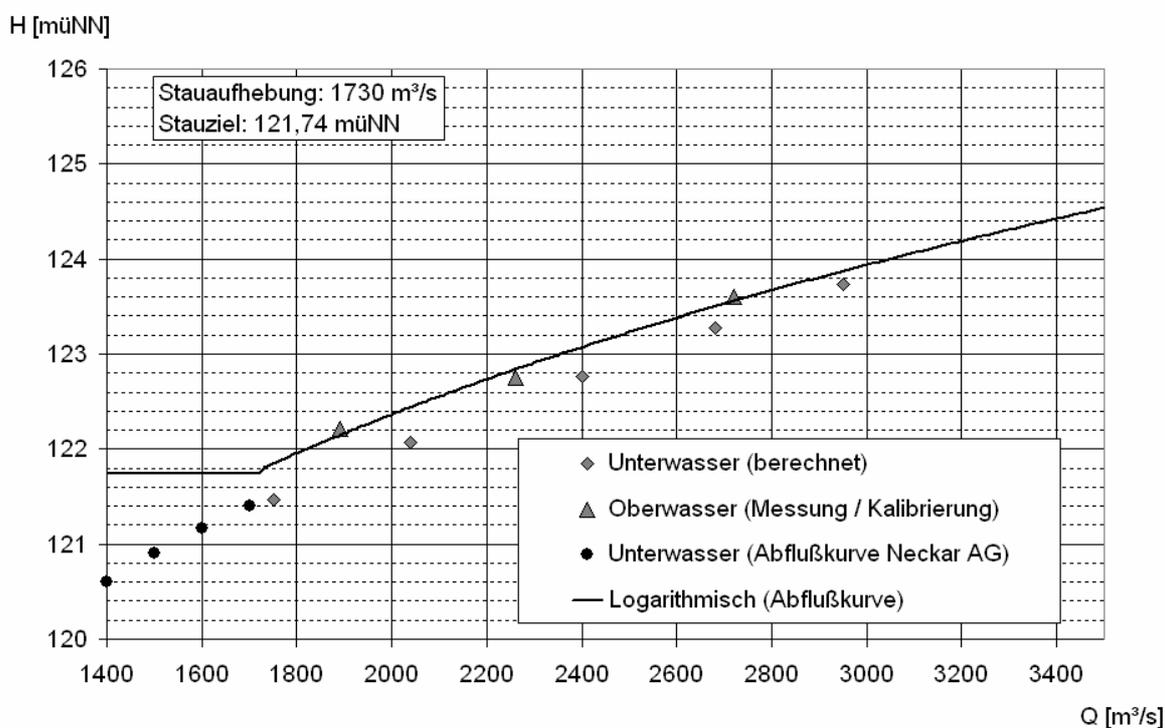


Abb. 8-15 Ermittlung der Abflusskurven für das Oberwasser der Wehranlagen am Beispiel der Wehranlage Hirschhorn

Zur Abschätzung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung an den unteren Modellrändern der HN-Modelle wurden unter Berücksichtigung nachfolgender Größen Abflusskurven für das Oberwasser der Wehranlagen ermittelt (siehe Abb. 8-15):

- Angaben der WSV zur Stauaufhebung
- UW-Abflusskurven der ‚Neckar AG‘
- mit den HN-Modellen für Abflüsse bestimmter Jährlichkeit berechnete Wasserstände unterhalb der Wehranlagen
- gemessene HW-Scheitelwasserstände (HW-Fixierungen) im Bereich der Wehranlage

Da zur stationären Kalibrierung der HN-Modelle die Wahl des Wasserstandes an der unteren Modellgrenze sich primär an den gemessenen HW-Scheitelwasserständen und damit an den individuellen Bedingungen während des jeweiligen HW-Ereignisses orientiert, ist eine Abweichung zwischen den unteren Randbedingungen der im Rahmen der Modellkalibrierung durchgeführten Berechnungen und den Werten aus der Abflusskurve möglich.

8.3.6 Berechnungsergebnisse

Mit den HN-Modellen der Stauhaltungen des Neckars sowie dem instationären Gesamtmodell der Staustufenkette kann das Hochwasserabflussverhalten für den derzeitigen hydraulischen Zustand des Fluss-Vorland-Systems Neckar (Ist-Zustand des Gewässerausbaus) auf einer Strecke von über 200 Flusskilometern für beliebige Abflussmengen bzw. Abflusskonstellationen sowohl stationär als auch instationär simuliert werden. Zudem lassen sich durch Variation der Systemgeometrie des HN-Modells (Querprofile, Retentionsvolumina) die Auswirkungen von Baumaßnahmen im abfluss- und retentionswirksamen Bereich des Neckars (Rückstau, Wellenverformung) sowie in den Nebengewässern (Variation Zuflussganglinien) quantifizieren. Nachfolgend werden einige maßgebenden Berechnungsergebnisse vorgestellt, weitere Anwendungsbeispiele finden sich in Kap.9.4.

8.3.6.1 Wasserstände bestimmter Auftretenswahrscheinlichkeit

Mit den HN-Modellen der Stauhaltungen wurden stationäre Berechnungen u.a. für Abflüsse mit einer Wiederholungszeitspanne von $T = 5, 10, 20, 50, 100$ und 200 Jahren durchgeführt, deren Ergebnisse als Grundlage zur Ermittlung flächenbezogener Überflutungsintensitäten im Rahmen der Gefährdungsanalyse Neckar dienen.

Zur Bestimmung der Scheitelabflusswerte HQ_T für Hochwasserereignisse bestimmter Jährlichkeiten wurde der Hochwasserabfluss-Längsschnitt der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) Karlsruhe für den Neckar zugrunde gelegt. Dieser wurde durch lineare Mehrfachregression anhand von Gebietsparametern im Rahmen des Projektes „HW-Regionalisierung Baden-Württemberg“ in Zusammenarbeit der LfU und des

IWK (Abteilung Hydrologie) erstellt. [Ihringer et al., 1999] Es ist zu beachten, dass die im HW-Längsschnitt aufgeführten Abflusszunahmen infolge der seitlichen Zuflüsse sich nur auf die T_n -jährlichen Abflüsse des Neckars beziehen. Das bedeutet beispielsweise, dass die für den Abflusslängsschnitt des Neckars mit einer Wiederholungszeitspanne von $T = 100$ ermittelte Zuflussmenge eines Seitengewässers nicht der Abflussgröße HQ_{100} dieses Seitengewässers im Mündungsbereich entspricht.

Die Wasserstände an den Wehranlagen, welche als untere Randbedingung zur Berechnung der Längsprofile HQ_T mit den Einzelmodellen der Stauhaltungen vorgegeben sind, entsprechen den Werten aus den OW-Abflusskurven, deren Grundlagen im vorangegangenen Kapitel beschrieben stehen.

8.3.6.2 Analyse des Einflusses der Retentionsräume

Zur Untersuchung des Einflusses der vorhandenen Retentionsräume im Neckartal auf die Entwicklung einer Hochwasserganglinie wurde u.a. ein Variantenstudium auf Grundlage des instationären Modells der Staustufenkette Neckargemünd bis Lauffen (km 30,8 bis 125,0) durchgeführt. Hierzu wurde neben dem validierten Modell des Ist-Zustandes ein zweiter Modellzustand ohne Berücksichtigung der Retentionsvolumina erzeugt. Durch den Vergleich berechneter Abflussganglinien beider Modellzustände bei Neckar-km 32,0 konnten die Auswirkungen der noch vorhandenen Rückhalteräume entlang dem Neckar quantifiziert werden.

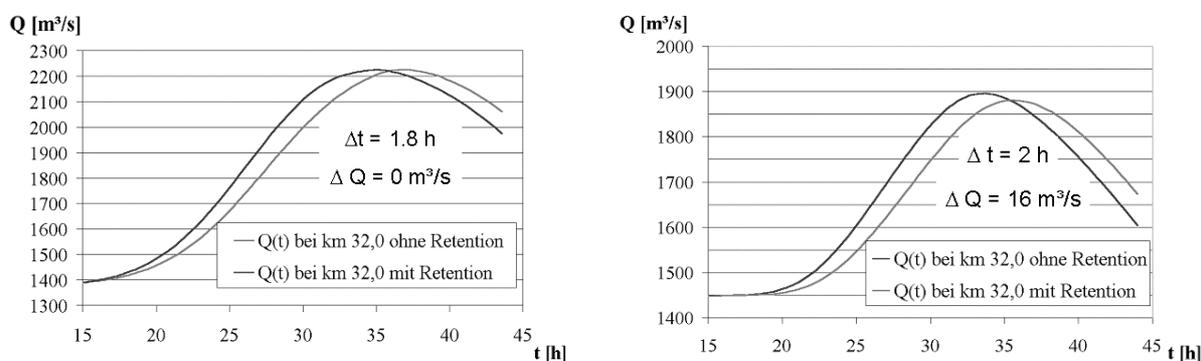


Abb. 8-16 Simulationsergebnisse bei Neckar-km 32+0 mit und ohne Berücksichtigung der Retentionsvolumina: Links: Laterale Modellzuflüsse entsprechend HW 1990; Rechts: $Q(t)$ der seitlichen Zuflüsse konstant

Als Randbedingungen wurden im ersten Schritt die Modellzuflussganglinien entsprechend dem Hochwasserereignis 1990 (vergleiche Kapitel 3.2) vorgegeben. Eine Gegenüberstellung der berechneten Abflussganglinien bei Neckar-km 32+0 zeigte eine zeitliche Verzögerung des Scheiteldurchgangs um $\Delta t = 1,8$ Stunden bei Berücksichtigung aller vorhandenen Retentionsvolumina im Flusstal. Eine Dämpfung des Scheitelabflusses wurde bei der vorgegebenen Konstellation der Zuflussganglinien nicht festgestellt (siehe Abb. 8-16 (links)).

In einem weiteren Schritt wurden die seitlichen Modellzuflüsse als konstant angenommen, um ein von der Wirkung der Wellenüberlagerung unabhängiges Ergebnis zu erhalten. Als obere Randbedingung am Wehr Lauffen wurde weiterhin die Zuflussganglinie gemäß Modellvalidierung definiert. Die auf die Retentionswirkung der Neckarvorländer zurückzuführende zeitliche Verzögerung der Hochwasserwelle beträgt in diesem Fall $\Delta t = 2$ Stunden. Die Dämpfung des Hochwasserscheitels betrug rechnerisch $\Delta Q = 16 \text{ m}^3/\text{s}$ (siehe Abb. 8-16 (rechts)).

8.4 Überflutungsflächen

8.4.1 Definition der Linien gleicher Wasserstände

Zur Ermittlung von Überflutungsflächen aus gemessenen bzw. berechneten Wasserspiegellängsprofilen müssen die punktuellen Wasserstandsdaten zunächst in die Fläche gebracht werden. Hierzu wurden mittels GIS für jeden Berechnungspunkt im HN-Modell (ca. alle 100 m) unter Berücksichtigung der hydraulischen Gegebenheiten „Linien gleicher Wasserstände“ digitalisiert, denen als temporäres Attribut die entsprechenden Wasserstände eines beliebigen Abflusszustandes zugewiesen werden können. Um das Einlesen von Wasserspiegellängsprofilen zu automatisieren, wurde jeder Linie als festes Attribut der zugehörige Flusskilometer bzw. die Stützpunktkennung im HN-Modell zugewiesen.

Im einfachsten Fall wurden die „Linien gleicher Wasserstände“ senkrecht zur Hauptfließrichtung bis zu den Rändern des Untersuchungsbereiches mittels GIS manuell digitalisiert. Diese Vorgehensweise war für den überwiegenden Teil der Modellstrecke aufgrund der eindimensionalen Strömungscharakteristik zulässig. Zur Vermeidung von Überschneidungen wurden in Bereichen mit gekrümmtem Gewässerverlauf und vergleichsweise weiten Vorländern die Linien etwas abgewinkelt. Die individuell unterschiedliche Interpretation der hydraulischen Situation und hierdurch entstehenden unterschiedlichen Ergebnisse der Digitalisierungsarbeit wirken sich aufgrund des geringen Wasserspiegelgefälles von < 1 Promille nur geringfügig auf die errechneten Überflutungsflächen aus.

Als aufwendiger gestaltet sich die Abgrenzung von potenziellen Gefahrenflächen hinter Schutzanlagen: Prinzipiell ist es bei der relativ geringen Ausdehnung der eingedeichten Flächen im Untersuchungsgebiet des Neckartals (geschlossene Systeme) zumeist ausreichend, für Abflussmengen kleiner dem Bemessungsabfluss ($Q < BHQ$) den Bereich hinter dem Schutzbauwerk mit dem eindimensional errechneten Wasserstand an der möglichen Versagensstelle zu verschneiden und somit einen stationären Zustand bzw. „Füllgrad“ mit horizontalem Wasserstand im geschlossenen System anzunehmen. Dieser ist jedoch zumeist stark von der jeweiligen Versagensstelle abhängig, so dass verschiedene Szenarien zu berücksichtigen sind. Hinzu kommt, dass für Abflusszustände $Q > BHQ$ und die Annahme einer horizontalen Wasserspiegellage hinter den Schutzbauwerken oftmals nicht mehr gerechtfertigt ist, da das

eindringende Wasser weiter unterstrom aus dem eingedeichten Bereich wieder in den Neckar zurückfließt und die Gefahrenflächen hierdurch unverhältnismäßig stark überschätzt werden würden.

Aus diesen Gründen wurden im ersten Schritt die „Linien gleicher Wasserstände“ so definiert, dass diejenigen Bereiche hinter Schutzanlagen, die nicht eindeutig an einen bestimmten Stützpunkt im hydraulischen Modell gekoppelt werden können, dem räumlich nächstgelegenen Stützpunkt zugeordnet werden. Während sich der vorhandene Schutzgrad bei guter topographischer Erfassung der Dammbauwerke mit hoher Genauigkeit feststellen lässt, sind die ausgewiesenen Überflutungsflächen hinter den Anlagen als Voranalyse der gefährdeten Bereiche zu interpretieren. Gegebenenfalls kann diese als Grundlage für eine weitergehende Gefährdungsanalyse des geschlossenen Systems unter Berücksichtigung verschiedener Versagensmöglichkeiten dienen.

So wurde beispielsweise im Auftrag des Tiefbauamtes Heilbronn auf Basis des IKONE-Modells eine umfangreiche flächenhafte Analyse der Hochwassergefährdung hinter den Dammbauwerken der Stadt Heilbronn durchgeführt. Neben unterschiedlichen Versagensfällen wurden auch die Auswirkungen des Revisionsfalles an den Wehranlagen Neckarsulm, Heilbronn und Horkheim zum Zeitpunkt eines Hochwasserereignisses quantifiziert. Eine eingehende Dokumentation der Vorgehensweise und Ergebnisse findet sich in *Oberle (2002)* (siehe auch Kap.9.4.4.3).

Die Zuordnung von Wasserständen über „Linien gleicher Wasserstände“ wurde exemplarisch in Abb. 6-15 am Beispiel des Böckinger Dammes bei Heilbronn dargestellt. Während die Höhendaten der Dammbauwerke mit den korrespondierenden Wasserständen im Flussschlauch verschnitten werden, ist innerhalb des eingedeichten Bereiches der errechnete Wasserstand an der vorgegebenen Versagensstelle (hier bei Neckar-km 114+500) maßgebend.

In Bereichen mit starken Flusskrümmungen lässt sich prinzipiell auch die Querneigung (z.B. in Abhängigkeit der mittleren Fließgeschwindigkeit und des Kurvenradius) berücksichtigen, indem die „Linien gleicher Wasserstände“ in 3D-Linien (PolyLineZ) überführt werden. Ein Konzeptvorschlag zur technischen Umsetzung wurde in Kap.6.4.1 ausgearbeitet, eine Validierung der Methodik anhand einer exemplarischen Versuchsstrecke in Kap.7.3.8 dargelegt.

8.4.2 Differenzenraster und Polygone

Zur Ermittlung einer kontinuierlichen Gewässeroberfläche für einen bestimmten Abflusszustand wird zwischen den „Linien gleicher Wasserstände“ eine Dreiecksvermaschung (Triangulation) auf Basis des Delaunay-Kriteriums durchgeführt und über lineare Interpolation ein Raster der Gewässeroberfläche erzeugt, wobei letztendlich jeder Rasterzelle als Wertigkeit ein Wasserstand zugewiesen wird. Dieses Raster

deckt den gesamten vordefinierten Fluss-Vorland-Bereich (Umhüllende des digitalen Geländemodells) einer Stauhaltung ab.

Wie bereits in Kap.6.4.2 (graphisch) erläutert wurde, lassen sich durch Differenzbildung zwischen dem Raster der Gewässeroberfläche und dem Geländeaster die überfluteten Bereiche mit Angabe der Überflutungstiefe ausweisen. Von großer Bedeutung ist hierbei auch die Erfassung der potenziell gefährdeten Bereiche, die im Geländemodell zwar keine offene Verbindung zum Wasserkörper des Flusses haben, jedoch durch Sickerwasser, versteckte Durchlässe oder Versagen von Schutzbauwerken überschwemmt werden können. Zudem sind quantitative Aussagen über die „Sicherheitsreserven“ höher gelegener Bereiche für die Entscheidungsfindung im Rahmen des Hochwassermanagements notwendig und können aus dem Differenzenraster direkt abgeleitet werden. Aus dem Differenzenraster eines Abflusszustandes lassen sich Überflutungspolygone erzeugen, wobei die flächenhafte Information der Überflutungstiefe bzw. Differenz zur Wasserspiegellage verloren geht.

8.4.3 Validierung der Überflutungsflächen

Soweit Dokumentationen zu den Überflutungsgrenzen vergangener Hochwasserereignisse vorlagen, wurden diese zur Validierung der errechneten Überflutungsflächen herangezogen. So wurden z.B. neben einer Vielzahl von Luftbildern auch etliche Planunterlagen der Gewässerdirektionen und Kommunen mit Eintragungen zu Geschwemmsellinien (insgesamt über 33 km) ausgewertet. Hierbei musste berücksichtigt werden, dass die Bilddokumentationen nicht immer zeitlich auf den Scheiteldurchgang der Hochwasserwelle abgestimmt und die Eintragungen zur Geschwemmsellinie z.T. mit großen Unsicherheiten behaftet waren.

In Abb. 8-17 ist der Vergleich eines berechneten Überflutungsrasters mit einer historischen Dokumentation zur Überschwemmungsgrenze 1993 und der auf Grundlage eines Luftbildes zum Zeitpunkt des Scheiteldurchgangs nachdigitalisierten Grenzlinie für die Ortslage Offenau dargestellt. Das Digitale Geländemodell basierte innerhalb der Ortslage auf Informationen des Kanalisationskatasters (Deckelhöhen).

Es zeigt sich, dass die Simulation des Hochwassers 1993 eine gute Übereinstimmung mit den über das Luftbild nachgewiesenen Überflutungsflächen aufweist. Die relativ großen Abweichungen zur Dokumentation der Geschwemmsellinie sind somit auf die Ungenauigkeiten dieser Informationsquelle zurückzuführen.



Abb. 8-17 Vergleich eines berechneten Überflutungspolygons mit Scheiteldokumentationen unterschiedlicher Herkunft (weiß: historische Dokumentation zur Geschwemmsellinie; weiß gestrichelt: auf Grundlage eines Luftbildes zum Zeitpunkt des Scheiteldurchgangs digitalisierte Grenzlinie)

8.5 Übersicht über den Geodatenbestand

Im Rahmen der Neckarmodellierung wurde neben den topographischen Basisdaten, Digitalen Geländemodellen und Überflutungsflächen ausgewählter Ereignisse ein umfangreicher Datenpool weiterer (hochwasserrelevanter) Geodaten aufgebaut. Der gesamte Datenbestand für die 27 Stauhaltungen und die Mündungsstrecke umfasst trotz Einsatz effektiver Komprimierungsmethoden und Vermeidung von Redundanz ein Speichervolumen von insgesamt 3,5 Gigabyte. Alle Geodaten wurden stauhaltungsbezogen im Gauss-Krüger-Koordinatensystem erfasst und in einer festgelegten Datenhaltungsstruktur (siehe Kap.8.7.2) abgelegt.

So wurden für die Bereiche der Neckartalaue des früher badischen Landesteils (Neckar-km 0,0 bis 97,0) die topographischen Grundkarten DGK5 im Maßstab 1:5000 des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg eingescannt und georeferenziert. Die digitalen Rasterdaten der TK25 (M 1:25000) lagen bereits flächendeckend für das gesamte Modellgebiet in georeferenzierter Form vor. Sie entstammen dem Datenpool des 'Räumlichen Informations- und Planungssystems' (RIPS) der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) und wurden stauhaltungsweise zurechtgeschnitten und sortiert. Zudem wurden, u.a. zur flurstücksscharfen Ausweisung von Überschwemmungsgebieten, Daten der automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg für die hochwassergefährdeten Bereiche des Neckartals ebenfalls stauhaltungsweise sortiert und in den Datenpool integriert.

Zur Überprüfung des Digitalen Geländemodells bzw. der errechneten Überschwemmungsgrenzen wurden Geschwemmsellinien abgelaufener Hochwasserwellen aus analogen Stromkarten der Wasserwirtschaftsverwaltung digitalisiert und im GIS vorgehalten. Zudem wurden Orthofotos der Hochwasserereignisse 1978 und 1993 eingescannt und georeferenziert. Um auch perspektivische Bilddokumente zu Hochwasserereignissen im GIS verfügbar zu machen, wurden diese eingescannt und mit Vektordaten, die neben den Gauß-Krüger-Koordinaten auch den entsprechenden Pfad zur Bilddatei als Attribut zugewiesen bekommen, verknüpft. Durch Anklicken der Vektordaten in GIS erscheinen die zugehörigen Luftbildaufnahmen auf dem Bildschirm. Hierzu wird die ArcView-Standardfunktion 'Hot Link' genutzt.

Zur Darstellung des im Hochwasserfall abflusswirksamen Bereiches der Neckartal- aue im GIS wird die Lage der Querprofile des hydrodynamischen Modells als 2D-Vektorlinien (PolyLine) vorgehalten. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Grenze zwischen dem abflusswirksamen Querschnitt und dem retentionswirksamen Bereich bei verschiedenen Abflusszuständen unterschiedlich verlaufen kann. Zudem wird bei der Modellierung des abflusswirksamen Bereiches die Lage der Querprofile zueinander berücksichtigt, um die Genauigkeit der errechneten Wasservolumina zu maximieren. In Flusskrümmungen muss die Breite des Querprofiles entsprechend angepasst werden. Die Vektorlinien sind daher als grobe Richtlinie z.B. für das Flächenmanagement zu sehen. Zusätzlich werden die originären Querprofillagen der WSV vorgehalten.

Des Weiteren wurden das aktuelle rechtskräftige Überschwemmungsgebiet auf der Basis von Planunterlagen der Gewässerdirektionen flurstücksscharf digitalisiert und die Flusskilometrierung über die Hektometerpunkte abrufbar gemacht. Eine Übersicht über den Geodatenbestand ist in Tabelle 8-3 gegeben.

Stauhaltung/ Strecke	Topogr. Punkte	Höhen- linien	ÜSG*	GSL**	TOP-Karten		Ortho- fotos	Persp. Bilder
					DGK5	TK25		
	Anzahl	Länge [m]	Länge [m]	Länge [m]	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl
Mündung	13.131	-	22.255	-	9	2	16	23
Ladenburg	19.619	-	8.755	1.926	9	2	30	0
Wieblingen	24.011	-	12.108	11.196	6	2	31	0
Heidelberg	15.270	-	6.043	10.752	5	1	25	0
Neckargemünd	14.162	-	12.028	7.218	8	4	23	10
Neckarsteinach	13.233	-	17.169	4.792	6	2	14	6
Hirschhorn	19.184	-	26.758	-	11	2	28	14
Rockenau	15.147	-	20.084	-	8	2	19	0
Guttenbach	23.137	-	26.821	36.803	9	1	30	9
Neckarzimmern	13.544	-	14.916	17.466	6	2	15	16
Gundelsheim	63.329	-	30.330	2.098	1	4	7	9
Neckarsulm	14.882	-	36.558	-	-	2	4	3
Heilbronn	9.715	-	24.268	-	-	4	5	0

Horkheim	9.853	-	12.720	2.912	-	4	12	0
Lauffen	19.571	-	411	2.334	-	4	0	5
Besigheim	7.947	-	4.779		-	4	0	7
Hessigheim	10.719	-	3.907	7.161	-	2	0	6
Pleidelsheim	9.348	-	9.331	-	-	1	0	12
Marbach	4.625	-	7.963	-	-	1	0	0
Poppenweiler	79.889	-	2.649	-	-	2	2	1
Aldingen	28.955	210.735	-	-	-	1	7	0
Hofen	18.827	790.689	-	-	-	1	4	0
Cannstatt	10.650	715.997	-	-	-	2	4	0
Untertürkheim	10.636	708.517	-	-	-	1	5	0
Obertürkheim	16.046	278.866	-	-	-	1	0	3
Esslingen	4.738	-	-	-	-	1	0	0
Oberesslingen	21.499	-	-	-	-	1	0	0
Deizisau	71.120	-	-	-	-	1	0	0
Summe	582.787	2.704.805	299.856	104.657	78	57	281	124

Tabelle 8-3 Übersicht über den Geodatenbestand für die ICoNE-GIS-Arbeitsplätze (ÜSG* = rechtskräftiges Überschwemmungsgebiet; GSL** = Geschwemmsellinie)

Datenspezifikation	Speicherbedarf [GB]
ALK – Daten (Vektordaten)	0,5
DGK5 (georeferenzierte Images)	0,34
TK25 (georeferenzierte Images)	0,15
Karten / Orthobilder (georeferenzierte Images)	1,8
Topographische Basisdaten (Vektordaten) / DGM (Rasterdaten)	1,1
Überflutungsflächen (Raster- und Vektordaten)	1,2
Kilometrierung, ÜSG, GSL, abflusswirksame Bereiche (Vektordaten)	0,01
Bilddokumentationen (Images, Hot-Link-Verknüpfung)	0,15
Hydraulische Modell- und Ergebnisdaten (ASCII-Dateien)	0,03
Geodatenbestand	5,28 Gigabyte

Tabelle 8-4 Speicherbedarf der Datenbestände

8.6 Laser-Scanner-Daten des Landesvermessungsamtes B.-W.

Zur DGM-Erstellung wurden im Zuge der mehrjährigen Projektbearbeitung Höheninformationen aus unterschiedlichsten Datenquellen zusammengeführt. Neben den Querprofilen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (Abstand 50-100 m) wurden u.a. digitale Kanaldeckelhöhen und terrestrische Vermessungsdaten der Kommunen

(> 120.000 Punkte) sowie digitalisierte Höhenlinien der DGK5 (> 30.000 Stützpunkte) über Interpolation in ein flächendeckendes Raster (2x2 m) übergeführt.

Vom Landesvermessungsamt (LV) B.-W. werden nun aktuelle Laser-Scanner- (LS-) Daten auf Basis einer in den Jahren 2000-2003 durchgeführten landesweiten Befliegung zur Verfügung gestellt. Die originären Stützpunkte mit einem mittleren Abstand von 1,5 m und einem mittleren Lage- und Höhenfehler von +/- 30 cm wurden hinsichtlich First-/Last-Pulse-Signale, Gelände- und Vegetationsoberfläche sowie Bauwerke gefiltert. Hieraus entstand ein interpoliertes Geländehöhenmodell in einer Auflösung von 1x1m, welches nun in den DGM-Basisdatenbestand des IKoNE-Modells aufgenommen werden soll.

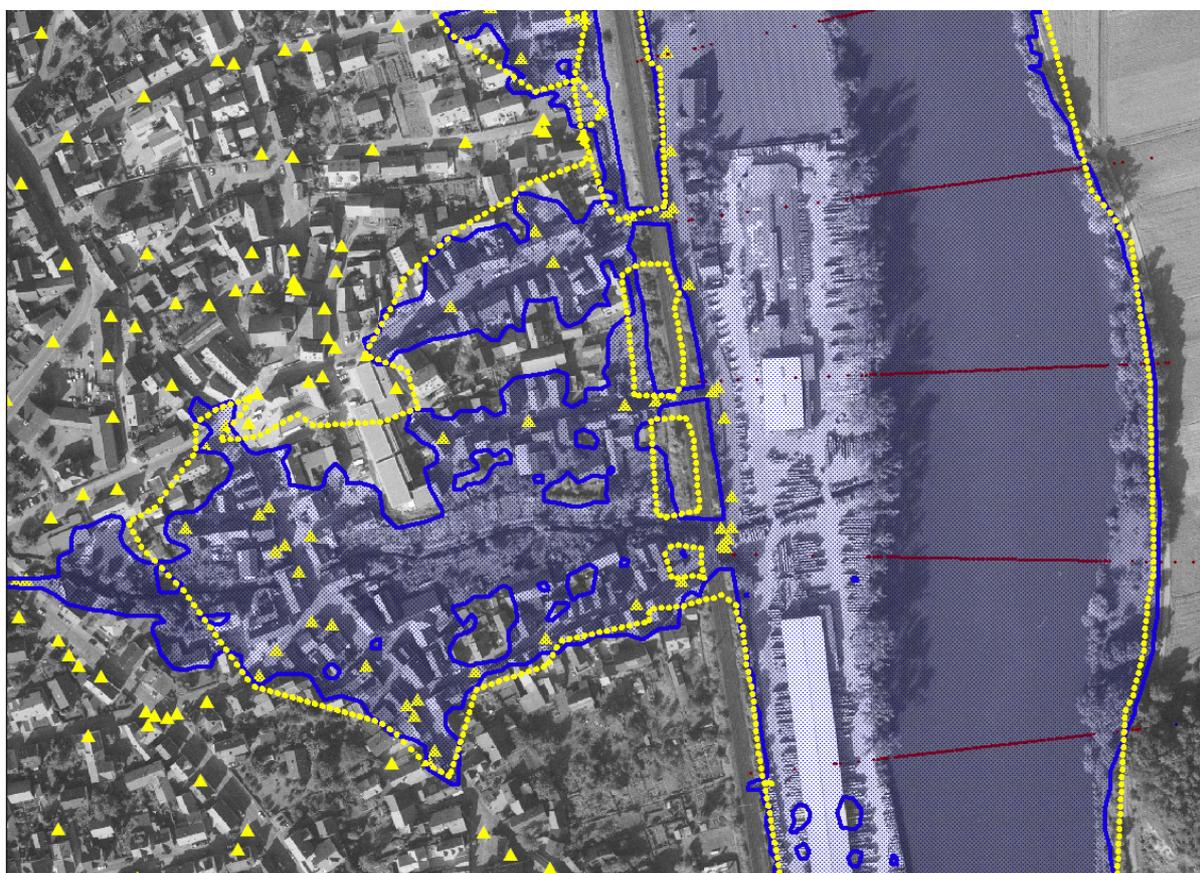


Abb. 8-18 Exemplarische Darstellung der räuml. Verteilung von Kanaldeckelhöhen innerhalb einer Ortslage sowie Vergleich der auf Basis der terrestr. Vermessungsdaten (gelb) und Laser-Scannerdaten (blau) errechneten Überflutungsfläche HQ_{100}

Ein exemplarischer Höhenvergleich der Laser-Scanner-Daten mit einer Stichprobe von 2285 tachymetrisch erfassten Kanaldeckelhöhen zweier Anliegergemeinden ergab bei 75 % der Stützpunkte eine Abweichung von +/- 10 cm. 91 % der Differenzen lagen in einem Intervall von +/- 20 cm. Ein systematischer Fehler war aus der Stichprobenanalyse nicht abzuleiten. Wie angesichts dieser guten Übereinstimmung der Höheninformationen zu erwarten, ist die Auswirkung auf die errechnete Überflutungsgrenze innerhalb von Ortslagen mit gleichmäßig verteilten Kanaldeckelhöhen in

einem Abstand von 20 –50 m relativ gering. Jedoch haben die auf Basis der Laser-Scanner-Daten erzeugten Differenzenraster (Überflutungstiefen) einen weitaus höheren Informationsgehalt und lassen auch eine detaillierte flurstücksscharfe Analyse zu, was mit den interpolierten Überflutungstiefen auf Basis der Kanaldeckelhöhen nur bedingt zulässig ist. In Abb. 8-18 ist ein Vergleich der Punktdichte zwischen Laser-Scanner-Daten (1x1 m) und Kanaldeckelhöhen sowie die Auswirkung auf die berechnete Überflutungsgrenze dargestellt. Die Abbildung hat selbstverständlich nur exemplarischen Charakter.

Das Hochwassersimulationssystem Neckar wird durch die Aktualisierung mit den Laser-Scanner-Daten des LV B.-W. einen deutlichen Zugewinn an Informationsgehalt erfahren. Durch die Homogenisierung der topographischen Datenbasis wird zudem die Interpretation der Modellergebnisse an den dezentralen Arbeitsplätzen vereinfacht und die Modellakzeptanz in der Öffentlichkeit weiter verbessert.

8.7 GIS-Werkzeuge für die Wasserwirtschaftsverwaltung

8.7.1 Systemübersicht

Über die objektorientierte Skriptsprache ‚Avenue‘ ist es möglich, die Standardversion der PC-fähigen GIS-Software ArcView mit zusätzlichen Funktionalitäten und graphischen Benutzeroberflächen zu erweitern, die speziell an die individuellen Anforderungen der Anwender angepasst sind. Hiermit wurden im Rahmen des Modellaufbaus für die Wasserwirtschaftsverwaltung am Neckar GIS-Werkzeuge bzw. Dialogkomponenten geschaffen, die auch Anwendern mit wenig GIS-Erfahrung die Möglichkeit geben, über logisch-strukturierte Eingabemasken komplexe Funktionsabläufe automatisiert durchzuführen. Dem Spezialisten bzw. Modellersteller ermöglichen sie eine effektivere Projektbearbeitung.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Programmierung der eigentlichen GIS-Zusatzfunktionalitäten nur den kleineren Anteil am Arbeits- bzw. Zeitaufwand der Entwicklungsarbeiten ausmacht. Als wesentlich arbeitsintensiver gestaltete sich die Gewährleistung der Robustheit der Programme bezüglich fehlerhafter Datenablagen und -formate sowie Bedienungsfehlern. Hierbei war eine Vielzahl von Testläufen auch bei den zukünftigen Anwendern erforderlich, um alle denkbaren Fehlerquellen zu erkennen und diese über umfangreiche Routinen abzufangen bzw. mit Ausgabe von Fehlerhinweisen zu korrigieren. Tabelle 8-5 enthält eine Übersicht über den „Werkzeugkasten“ (Toolbox) der GIS-Fachschale des Hochwassersimulationssystems Neckar.

Nachfolgend werden die wesentlichen Merkmale und wichtigsten Funktionalitäten der „Toolbox“ beschrieben. Eine ausführliche Erläuterung der programmtechnischen Details wird in [Oberle & Theobald, 2000] behandelt.

LADEN

Das Werkzeug LADEN ermöglicht einen schnellen und einfachen Zugriff auf die in der Verzeichnisstruktur der dezentralen Arbeitsplätze abgelegten Geodatenbestände (Geländeraaster, Überflutungspolygone für verschiedene HW-Ereignisse, Geschwemmsellinien, rechtskräftiges ÜSG, Verknüpfungen zu Hochwasserbildern, georeferenzierte Karten, ALK-Daten etc.).

WSP STAT

Das Werkzeug WSP STAT ermöglicht die Durchführung einer stationären Wasserspiegellängenberechnung mit einem bestehenden HN-Modell eines Gewässerabschnittes (hier: Neckar-Stauhaltung). Der Anwender muß hierzu die ArcView-Umgebung nicht verlassen. Die hydraulische Berechnung wird im Hintergrund von ArcView durchgeführt. Als Ergebnis erhält der Anwender die Wasserstände in Abhängigkeit des Flusskilometers als ASCII-Datei. Das Berechnungsergebnis kann als Excel-Diagramm dargestellt werden (Zusatzwerkzeug LPRO DIAG). Mit den Werkzeugen LPRO DIFF und DIFF POLY können die zugehörigen Überflutungsflächen generiert werden.

KM LPRO

Das Werkzeug KM LPRO dient der Erzeugung eines Wasserspiegellängsprofils bezogen auf die Kilometer-Werte des Shapefiles der Linien gleicher Wasserstände (z.B. aus einzelnen Wasserspiegelfixierungen) über lineare Interpolation. Das Ergebnis kann als Excel-Diagramm dargestellt werden (Zusatzwerkzeug LPRO DIAG). Mit den Werkzeugen LPRO DIFF und DIFF POLY können die zugehörigen Überflutungsflächen generiert werden.

LPRO DIFF

Das Werkzeug LPRO DIFF ermöglicht die automatisierte Erzeugung eines Differenzenmodells aus einem Wasserspiegellängsprofil (ASCII) und dem DGM. Hierzu werden im Hintergrund automatisch die Wasserstände aus der Längsprofildatei an die Linien gleicher Wasserstände gekoppelt und durch Interpolation zwischen den Linien ein Raster der Gewässeroberfläche erzeugt. Dieses wird mit dem Geländeraaster zu einem Differenzenraster „verschnitten“ (Differenzenbildung), welches mit einer vorgegebenen Klassifizierung farblich abgestimmt auf dem Bildschirm dargestellt wird.

DIFF POLY

Das Werkzeug DIFF POLY ermöglicht dem Anwender, aus einem Differenzenraster ein Polygon einer bestimmten Differenz zur Wasserspiegellage zu erzeugen. Flächen, die keine offene Verbindung zum Wasserkörper des Flusslaufes haben, werden in einer unterschiedlichen Schattierung dargestellt. Zudem kann eine Überprüfung der Überflutungsgefährdung von Hochwasserschutzmaßnahmen (z.B. mobilen Wänden), welche als PolyLineZ vorliegen, durchgeführt werden.

LPRO DIAG

Die Zusatzfunktion LPRO DIAG ermöglicht die automatisierte Erstellung von Excel-Diagrammen für Längsprofildateien (<...>.km) im ASCII-Format (Flusskilometer, Wasserstand).

PROFIL
Das Werkzeug PROFIL dient der Erzeugung von Querprofilardarstellungen aus Rasterthemen. Hierzu wurden vom IWK Teile der Programmversion des Moduls „Profilverwaltung“ der FAW auf die Erfordernisse der dezentralen Arbeitsplätze angepasst.
SHAPE EDIT
Die Funktion SHAPE EDIT unterstützt die Erzeugung einer Shape-Datei sowie die Bearbeitung bestehender Shape-Dateien, z.B. bei der Überarbeitung des rechtskräftigen ÜSG, unter Berücksichtigung der Verzeichnisstruktur der dezentralen Arbeitsplätze.

Tabelle 8-5 „Werkzeugkasten“ der GIS-Fachschale HW-Simulationssystem Neckar

8.7.2 Datenverwaltung und –zugriff

Voraussetzung für ein langfristiges Datenmanagement und die Automatisierung komplexer Programmabläufe ist eine einheitliche Namensspezifikation und Ablagestruktur der Modelldaten und Geodatenbestände. Hierzu wurde als Grundlage des Hochwassersimulationssystems Neckar eine dateibasierte Ablagestruktur entworfen, die das GIS-interne Datenverwaltungskonzept von ArcView aufgreift, Redundanzen vermeidet und die Konsistenz der Datensätze gewährleistet. Da das GIS bereits intern Sachdaten über ein, wenn auch vereinfachtes, relationales Datenbankkonzept (RDMS) verwaltet, welches den bisherigen Anforderungen bezüglich räumlicher und inhaltlicher Abfragen genügt, konnte auf die Anbindung eines zusätzlichen externen Datenbankmanagementsystems verzichtet und der damit verbundene erhöhte administrative Aufwand vermieden werden. Die Ablagestruktur ist in Tabelle 8-6 dargestellt.

Im Ordner *Ausgangsdaten* werden alle modellrelevanten Datensätze (z.B. Digitales Geländemodell, abflusswirksame Bereiche, hydraulische Basisdaten) nach Stauhaltungen geordnet abgelegt. Georeferenzierte *Karten* und *ALK-Daten*, die u.U. bereits über ein anderes Informationssystem bzw. einen anderen Datenpool bereitgestellt werden, können in getrennten Verzeichnissen abgelegt werden und sind für den Modellbetrieb optional. Alle dem Simulationssystem zugrunde liegenden Programmierungen (GIS-Applikationen, hydrodynamisch-numerisches Modell, Excel-Makros) befinden sich im Ordner *Programme*. Die genannten Verzeichnisse sind über die Verteilung entsprechender Zugriffsrechte geschützt, so dass die Anwender ihren Inhalt zwar nutzen, jedoch nicht verändern können. Nur hierdurch konnte die langfristige Konsistenz der Daten sowie eine zuverlässige und stabile Modellperformance auf „Stand-Alone“-Rechnern garantiert werden. Alle Ergebnisdaten, die der Anwender über das Simulationssystem neu erzeugt (z.B. berechnete Wasserspiegellängsprofile und Überflutungsflächen), werden im Verzeichnis *Projektdateien* verwaltet und können

vom Anwender jederzeit editiert bzw. gelöscht werden. Im Ordner *Projekte* werden die Bearbeitungskonfigurationen von ArcView gespeichert und können ebenfalls eigenständig verwaltet werden.

Neckarprojekt	Ausgangsdaten	Stauhaltung_1-n Fotos Geodaten Hydraulik	Vom zentralen AP erzeugte Datensätze: * Images (Hot-Links / georeferenziert) * hw-relevante Vektor- und Rasterdaten * HN-Modelle, WSP-Längsprofile (ASCII)
	Projektdaten	Stauhaltung_1-n Fotos Geodaten Hydraulik	Vom dezentralen AP erzeugte Datensätze * Images * Vektor- und Rasterdaten * WSP-Längsprofile (ASCII)
	ALK-Daten	Stauhaltung_1-n	Daten des LV B.-W.: * Gebäude- und Flurstücke
	Karten	Stauhaltung_1-n DGK5 TK25 Sonstige	* Images (vom zAP georeferenziert) * Images (RIPS-Pool)
	Programme Projekte Temp	Hilfe	* Programmcodes und -beschreibung * vom Anwender erzeugte AV-Projekte

Tabelle 8-6 Dateibasierte Ablagestruktur für Modellgrundlagen und Geodatensätze

Zur regelmäßigen Aktualisierung der Programmversion (Update) sowie der Datenbestände an den GIS-Arbeitsplätzen der Gewässerdirektionen wurde ein Installationsprogramm entwickelt, welches automatisiert den Bestand auf Vollständigkeit und Aktualität überprüft und entsprechend anpasst. Bisher wird das Programm gemeinsam mit den aktuellen Neckardaten per CD-Rom verteilt. Eine permanente Bereitstellung über das Internet ist angedacht.

8.7.3 Programmstruktur und -einsatz

Von großem Interesse für die Wasserwirtschaftsverwaltung ist u.a. die einfache Bedienung des HN-Modells und die Visualisierung der hydrodynamisch-numerischen Berechnungsergebnisse als Überflutungsflächen im GIS. Hierzu wurde eine Eingabemaske entwickelt, über welche die hydraulischen Randbedingungen (Modellzuflüsse, Wasserstand am unteren Modellrand) festgelegt und stationäre Wasserspiegellagenberechnungen durchgeführt werden können, ohne hierzu die ArcView-Oberfläche verlassen zu müssen. Das HN-Modell wird hierbei im Hintergrund aktiviert und man erhält als Ergebnis ein Wasserspiegellängsprofil, welches über weitere Zusatzfunktionen automatisiert in Diagrammform (MS Excel) dargestellt sowie mit den Geländehöhen zu einem Differenzenraster verschnitten werden kann.

Hierzu werden im Hintergrund alle notwendigen Dateien zum Betrieb des HN-Modells der jeweiligen Stauhaltung aus den Ordnern *Ausgangsdaten* und *Programme* temporär nach *Projektdaten* kopiert, die Randbedingungen in der Steuerungsda-

tei (ASCII) editiert, die Berechnung durchgeführt und die Ergebnisdatei unter der entsprechenden Kennung gespeichert.

Die Eingabe der hydraulischen Randbedingungen unterliegt Beschränkungen, um hydraulisch unsinnige Werte zu den unteren Randbedingungen sowie Zuflussmengen, die deutlich außerhalb des Kalibrierungsspektrums liegen, zu vermeiden. So wird für jede Stauhaltung eine minimale und eine maximale Abflussmenge als Eingabebeschränkung der oberen Randbedingungen vorgegeben. Für die Abflussmengen des Neckars liegen diese im Bereich um $Q_{\min} \sim HQ_5$ bzw. $Q_{\max} \sim (HQ_{200} + 500 \text{ m}^3/\text{s})$. Als Richtlinie zur Definition der unteren Randbedingung kann die in Kap.8.3.5 beschriebene Abflusskurve für das Oberwasser der Wehranlagen über eine Schaltfläche als Graphik geladen werden. Stark abweichende Werte werden nicht akzeptiert.

Die Berechnung des Differenzenrasters erfolgt automatisch durch temporäres Einlesen des WSP-Längsprofils in die Attributstabelle der „Linien gleicher Wasserstände“ und den in Kap.6.4.1.1 und Kap.6.4.2 aufgeführten GIS-Techniken. Neben einem mit dem HN-Modell berechneten Längsprofil können auch über die Anwendung *KM LPRO* manuell definierte Wasserstände (z.B. Hochwasserfixierungen) zugrunde gelegt werden. Die Oberflächen der Applikationen *WSP STAT* und *LPRO DIFF* sind in Abb. 8-19 dargestellt.

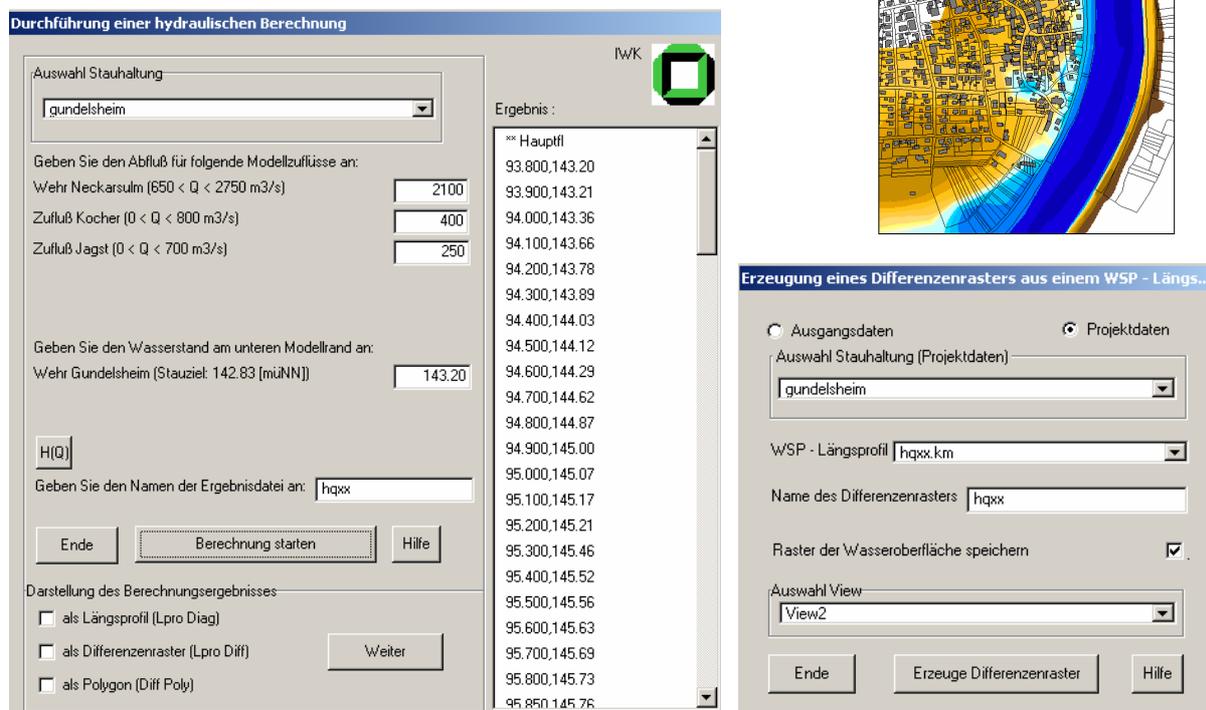


Abb. 8-19 Benutzeroberflächen *WSP STAT* und *LPRO DIFF* zur Durchführung einer hydraulischen Berechnung und Ermittlung abflussbezogener Überflutungsflächen

Aus dem Differenzenraster eines Abflusszustandes lassen sich über ein weiteres Werkzeug Polygone einer bestimmten Differenz zur errechneten Gewässeroberfläche erzeugen (vergleiche Kap.6.4.2). Hierbei werden potenziell gefährdete Bereiche ohne offene Verbindung zum Wasserkörper des Flussschlauches automatisch erkannt, mit entsprechenden Attributen belegt und in einer unterschiedlichen Schattierung ausgewiesen. Programmtechnisch wird hierzu ein Vergleich der Polygonflächen durchgeführt und davon ausgegangen, dass das größte der errechneten Polygone den tatsächlich überfluteten Bereich und die kleineren Polygone außerhalb liegende Senken markieren. Dieser einfache Algorithmus bringt fast überall die gewünschten Ergebnisse. Lediglich im Bereich der Stadtstrecke Stuttgart muss die Attributierung der Polygone nachträglich manuell angepasst werden, da bis $Q \approx HQ_{200}$ die tieferliegenden Bereiche hinter den Schutzanlagen eine größere Fläche aufweisen als die tatsächlich überfluteten Bereiche entlang dem Kanal.

Optional kann über das Werkzeug eine Überprüfung der Überflutungsgefährdung von Hochwasserschutzmaßnahmen, welche nicht im Geländemodell erfasst sind (z.B. mobile Wände), durchgeführt werden. Hierzu müssen die Schutzbauwerke in Lage und Höhe über eine 3D-Linie (PolyLineZ) digitalisiert vorliegen. Es wird nun ein Höhenvergleich mit dem Raster der Wasseroberfläche, welches dem Differenzenraster zugrunde liegt, durchgeführt und dementsprechend das Polygon geschnitten und attribuiert. Bei Überströmung erscheint zusätzlich ein Warnhinweis. Die Funktionsweise der Applikation (DIFF POLY) wird schematisch in Abb. 8-20 erläutert.

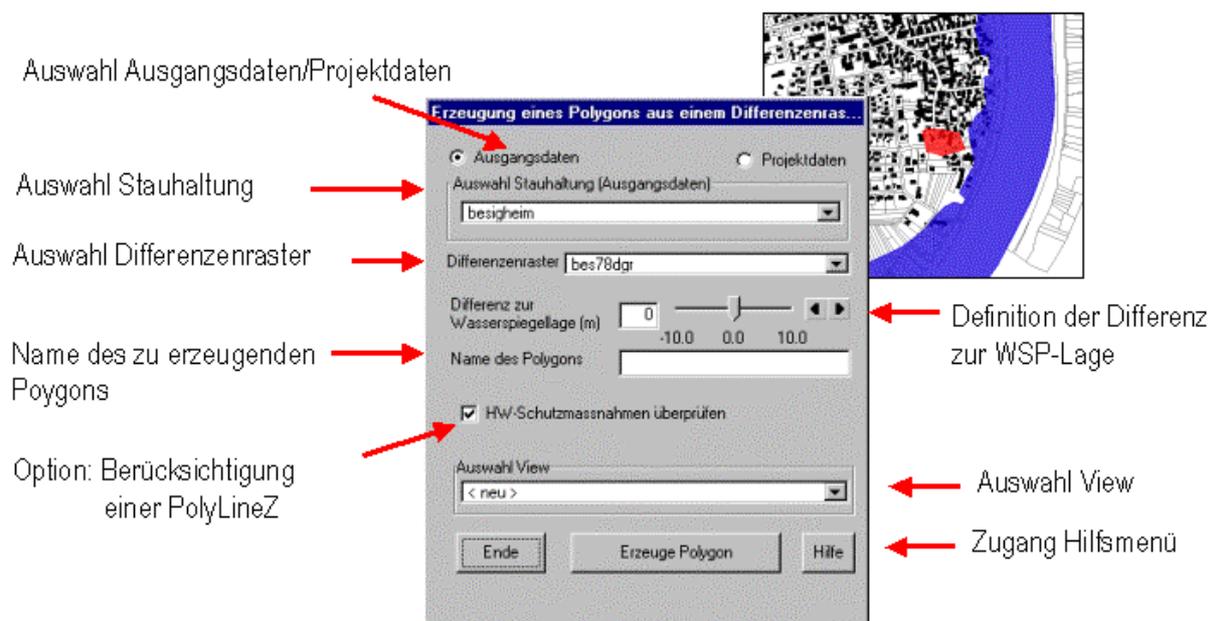


Abb. 8-20 Benutzeroberfläche *DIFF POLY* zur autom. Erzeugung von Überflutungspolygonen mit Klassifizierung der überfluteten und potenziell gefährdeten Flächen

Zur weitergehenden Analyse der ermittelten Überflutungsflächen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten des zugrunde liegenden Geländemodells ist es sinnvoll, die

topographischen Basisdaten (Höhenpunkte, Höhenlinien, Bruchkanten) als Vektordatensätze mit Attributierung bezüglich Datenquelle bzw. –genauigkeit, Aktualität etc. zu überlagern. Hierdurch kann auch der Bedarf zusätzlicher Vermessungen festgelegt werden.

Die Toolbox für die ICoNE-GIS-Arbeitsplätze integriert weitere Anwendungen, die hier nicht eingehender behandelt werden. Eine Kurzbeschreibung der Werkzeuge *LADEN*, *KM LPRO*, *LPRO DIAG*, *PROFIL* und *SHAPE EDIT* wurde in Tabelle 8-5 gegeben, graphische Erläuterungen finden sich in *Oberle & Theobald (2000)*.

8.8 Dreidimensionale Visualisierung der Berechnungsergebnisse

8.8.1 Hintergrund und Zielsetzung

Zur Verringerung des Risikos von Hochwasserschäden (Schadenspotenzial) ist die kontinuierliche Aufklärung der Bevölkerung über die Hochwassergefahr ein wichtiges Ziel der Behörden. Die Erfahrung hat gezeigt, dass der Einsatz moderner Visualisierungstechniken die Wirksamkeit der Öffentlichkeitsarbeit nachhaltig unterstützt und somit einen wichtigen Beitrag zur Hochwasservorsorge leisten kann. Neben zweidimensionalen Darstellungen bieten dreidimensionale Ansichten und Animationen eine hervorragende Möglichkeit, z.B. die Ausbreitung einer Hochwasserwelle innerhalb einer Ortslage eindrucksvoll und realitätsnah zu visualisieren und somit die von einem zukünftigen Hochwasserereignis ausgehende Gefahr bewusst zu machen. Aber auch für die Modellersteller kann die Möglichkeit des dreidimensionalen Navigierens durch die Geodatenbestände hilfreich sein: So unterstützen frei wählbare 3D-Ansichten die Datenüberprüfung z.B. bei der Plausibilisierung der topographischen Fluss-Vorland-Daten und der Bewertung von Interpolationsverfahren.

Zur Erstellung realitätsnaher 3D-Visualisierungen von Überflutungssimulationen wurden bisher Softwaresysteme mit hochkomplexen Benutzeroberflächen eingesetzt, die vom Anwender ein hohes Maß an technischem Know-how und eine erhebliche Einarbeitungs- und Bearbeitungszeit erfordern. Auf dem GIS-Markt wurde der Bedarf an einfachen dreidimensionalen Visualisierungsmöglichkeiten erkannt und Module zur 3D-Darstellung von Vektordaten und Oberflächenmodellen in einige kommerzielle Programme integriert. Diese sind jedoch bezüglich der effektiv bearbeitbaren Datenmenge bzw. Modellauflösung sowie der Darstellungs- und Animationsoptionen („Rendering“) für o.g. Zielsetzungen nur beschränkt einsetzbar.

Um auch Anwendern mit weniger Spezialkenntnis die Erzeugung von 3D-animierten Darstellungen mit vertretbarem Zeitaufwand zu ermöglichen, sind Visualisierungswerkzeuge zu entwickeln, welche auf standardisierte raumbezogene Daten (Digitales Geländemodell, berechnete Wasserspiegellagen, Texturdaten etc.) zugreifen und die komplexen Parametrierungen sowie Funktionsabläufe weitgehend automatisiert durchführen. Hierbei sind Optimierungsalgorithmen einzusetzen, die die Bearbeitung bzw. Visualisierung sehr umfangreicher Datenbestände hochaufgelöster Fließge-

wässermodelle in Echtzeit ermöglichen, ohne die Genauigkeit der zugrunde liegenden Geodaten zu verringern.

8.8.2 Werkzeug zur 3D-Echtzeit-Navigation

Vor diesem Hintergrund wurde in der vorliegenden Arbeit ein Konzept zur Entwicklung eines GIS-kompatiblen Werkzeuges erarbeitet, welches dem Anwender (z.B. in der Wasserwirtschaftsverwaltung) die Möglichkeit einer interaktiven 3D-Navigation durch beliebig große Geodatenbestände sowie der Erstellung realitätsnaher Hochwasseranimationen gibt. Die zugrunde liegenden komplexen Automatisierungsroutinen sind über einfach strukturierte Bedienoberflächen ohne größere Einarbeitungszeiten zu steuern. Als Grundlage werden die Basisdaten und Berechnungsergebnisse des Hochwassersimulationssystems Neckar und andere landesweit verfügbare Geodaten⁵¹ zur Texturdefinition⁵² und zur Ergänzung des Digitalen Geländemodells durch zusätzliche Raumobjekte (Gebäude, Dämme,...) genutzt. Das Konzept wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Betriebs- und Dialogsysteme der Universität Karlsruhe umgesetzt und bei der Wasserwirtschaftsverwaltung zu Testzwecken implementiert. Im Folgenden wird eine Übersicht über die grundlegenden Funktionen der Anwendung gegeben:

- Über das Programm werden die digitalen Geländemodelle der Neckarstauhaltungen mit den Höheninformationen eines oder mehrerer Wasserspiegelraster stationär oder instationär berechneter Abflusszustände verschnitten. Als Metadaten zu den WSP-Rastern können beim Einlesen der entsprechende Zeitpunkt und die Durchflussmenge vorgegeben werden. Zwischen den einzelnen Abflusszuständen wird linear interpoliert und somit das Ansteigen und Abschwellen eines Hochwassers simuliert. Die zeitliche Skalierung der Simulation einer Hochwasserwelle ist beliebig anpassbar, Zwischenzustände können „eingefroren“ werden. Zur Darstellung kann ein Überhöhungsfaktor vorgegeben werden.
- Als Geländetextur können georeferenziertes Kartenmaterial, Orthofotos oder Landnutzungspolygone vorgegeben werden. Zur Visualisierung der Wasseroberfläche wird diese mit unendlich fortsetzbaren Texturkacheln belegt. Die Wassertextur bewegt sich während der Laufzeit, um die Wellen des Wassers zu simulieren. Um die überfluteten Bereiche über die Textur der Geländeoberfläche analysierbar zu machen, kann die Wasseroberfläche auch transparent dargestellt werden.
- Zur Analyse der gefährdeten Objekte werden auf Grundlage der ALK-Daten Gebäudemodelle generiert und lagegenau auf die Geländeoberfläche platziert. Ihre Oberflächen-textur bzw. Erscheinung wird in Abhängigkeit der jeweiligen Nutzungsattribute gewählt. Zusätzlich lassen sich während der Navigation die Sachdaten der Geodaten analog zum GIS interaktiv abrufen.

⁵¹ Strukturobjekte aus ATKIS- und ALK-Datenpool, Orthofotos, georeferenziertes Kartenmaterial

⁵² Landnutzung, Verkehrswege, Siedlungsflächen,...

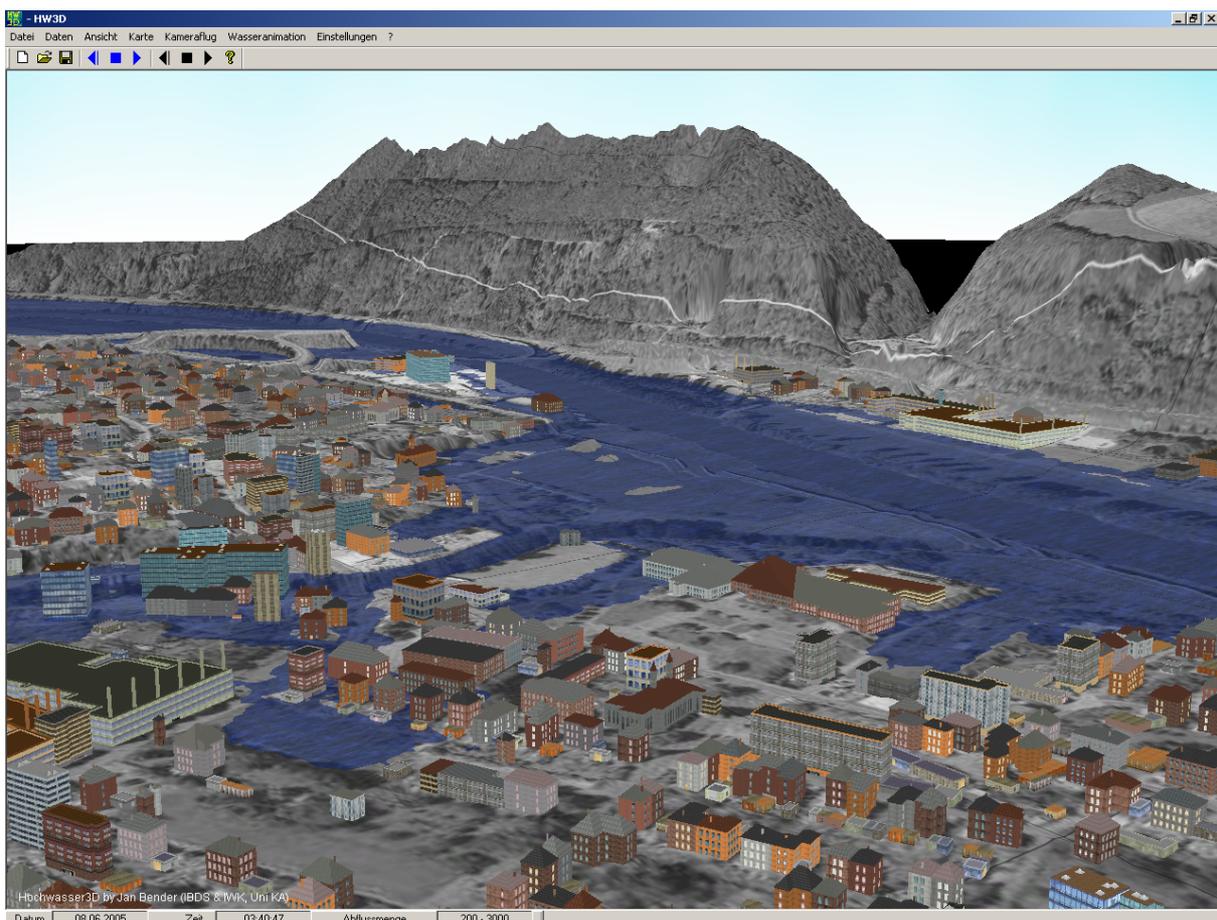


Abb. 8-21 Interaktive 3D-Echtzeit-Navigation durch Geodatenbestände zur Hochwassersimulation (Beispiel: Neckarhochwasser 1990 bei Mosbach)

- In einer zweidimensionalen Ansicht werden die aktuelle Position des Betrachters sowie dessen Blickrichtung über einen Pfeil angezeigt. Als Hintergrund kann hierzu jedes beliebige georeferenzierte Image (topographische Karte, Orthofoto) des Untersuchungsgebietes ausgewählt werden. Der Anwender hat dadurch die Möglichkeit, sich frei in der Szene zu bewegen und die Bewegungen gleichzeitig auf der Übersichtskarte mitzuverfolgen. In einer Menüleiste werden zudem der aktuelle Zeitpunkt sowie die jeweilige Durchflussmenge angezeigt.
- Zur Unterstützung des Realismus und des dreidimensionalen Eindrucks wird ein Lichtmodell verwendet, welches die Geländeoberfläche in Abhängigkeit der Position der Lichtquelle sowie der Normalenvektoren und Materialeigenschaften der Oberfläche in unterschiedlichen Schattierungen darstellt. Außerdem werden Himmel, Sonne und Wolken über eine „Himmelshalbkugel“ animiert.

8.8.3 Verfahren zur Datenreduktion

8.8.3.1 Adaptive Dreiecksnetze

Voraussetzung für die Qualität der Echtzeitdarstellung ist die Frequenz der Neuberechnung einer Überflutungssituation sowie dem Bildaufbau (Zeichnung) der perspektivischen Ansichten. Hierbei ist eine Bildwiederholrate („frame-rate“) von mindestens 25 Bildern pro Sekunde einzuhalten. Aufgrund der enormen Menge an zu verarbeitenden hochaufgelösten Geoinformationen (Geländeoberfläche, Wasserspiegellagen, Texturdaten) müssen dynamische Reduktionsalgorithmen eingesetzt werden, die den Datenumfang vor der Darstellung unter Berücksichtigung bestimmter Optimierungskriterien reduzieren. Approximationsfehler können sich jedoch gerade bei der Hochwassersimulation stark auf die Lage und damit Genauigkeit der dargestellten Überflutungsgrenzen auswirken.

In *Bender (2002)* werden verschiedene Optimierungsalgorithmen zur Darstellung kontinuierlicher Oberflächen vergleichend bewertet. Die Animation von Hochwasserszenarios erfolgt auf adaptiven Dreiecksnetzen mit lokaler Optimierung, wobei die Reduktion der Daten bzw. die Auflösung (Detailliertheitsgrad) der Darstellung u.a. in Abhängigkeit

- des Betrachterabstandes
- sowie der Heterogenität (Steigungsgradienten) der Oberfläche

für jeden Zeitschritt neu angepasst werden. Als Grundlage hierzu wurde eine angepasste Version des C-LOD⁵³-Algorithmus von *Röttger et al. (1998)* entwickelt: Die Geländeoberfläche und Wasserspiegellagen werden zunächst in voller Auflösung in Rasterform eingelesen. Zur Optimierung wird eine Quadtree-Struktur angelegt, über welche das Höhenraster ausgehend von einem Viereck rekursiv verfeinert wird. Zur Beschleunigung des Verfahrens werden neben der Berücksichtigung der Parameter

⁵³ C-LOD = „Continuous Level Of Detail“

des aktuellen Betrachterabstandes und der Höhenunterschiede der Gitterknoten auch

- die Bereiche außerhalb des Untersuchungsgebietes (NODATA-Werte),
- sowie die aktuell nicht sichtbaren Bereiche

als solche ausgewiesen und aus der weiteren Verfeinerung bzw. Zeichnung ausgeschlossen. In Abb. 8-22 werden die vollständig hochaufgelösten Basisdaten dem Dreiecksnetz nach Durchlaufen der Optimierungsfunktionen gegenübergestellt. Zur weitergehenden Erläuterung der Reduktionsalgorithmen wird auf [Bender, 2002] verwiesen.

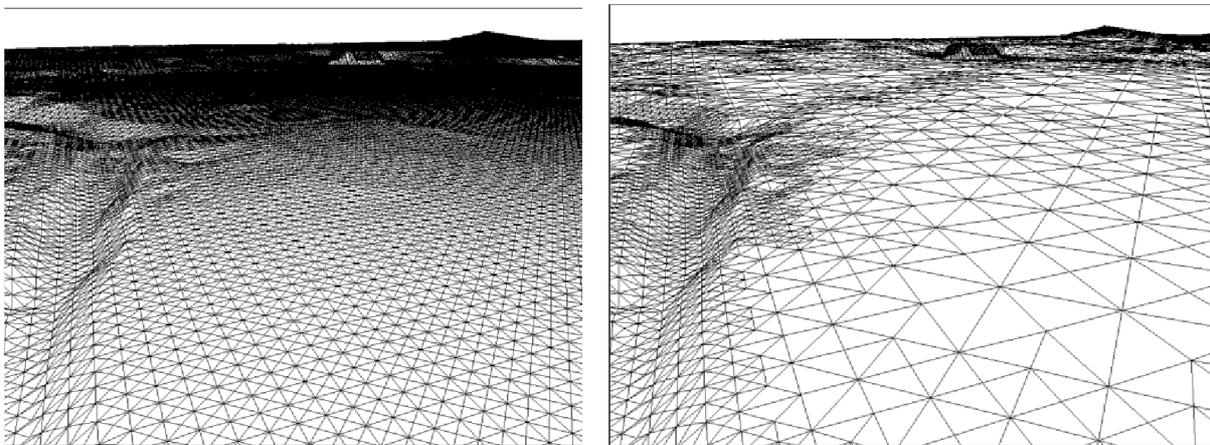


Abb. 8-22 Vergleich der Netzauflösung vor (links) und nach (rechts) der Reduktion [Bender & Oberle, 2003]

Durch die Implementierung der Reduktionsalgorithmen konnte die Anzahl der zu zeichnenden Dreiecke um ein Vielfaches verringert werden. In einem repräsentativen Testgebiet im Bereich der Elzmündung bei Mosbach erhöhte sich hierdurch unter bestimmten Hardware-Voraussetzungen⁵⁴ die Bildwiederholrate um ca. Faktor 20 auf 85 Bilder pro Sekunde.

8.8.3.2 Kachelmanager

Eine Echtzeitdarstellung für größere Untersuchungsgebiete ist bei den gegebenen Anforderungen bezüglich Informationsgehalt und Genauigkeit der berechneten Darstellungen allein über die Verwendung der in Kap.8.8.3.1 beschriebenen Optimierungsverfahren nicht möglich⁵⁵.

⁵⁴ Prozessor: AMD Athlon mit 1400 MHz; RAM: 512 MB; Graphikkarte: ELSA Gladiac mit NVIDIA GeForce2 MX Chipsatz und 32 MB Speicher

⁵⁵ So umfasst beispielsweise das Höhenraster der Stauhaltung Gundelsheim mit einer Gesamtlänge von ca. 15 Flusskilometern und einer Rasterauflösung von 2x2 Metern insgesamt 10 Millionen Höhenwerte.

Zur weiteren Datenreduktion wurde daher ein sogenannter „Kachelmanager“ entwickelt, der die Eingangsdaten (Geländeraster, WSP-Lagen, Textur und Gebäude) in gleich große quadratische Kacheln unterteilt und zunächst als temporäre Dateien ablegt. Während der Navigation wird lediglich ein Feld von $4 \times 4 = 16$ Kacheln um den Standort des Betrachters zur Darstellung geladen. Überschreitet der Betrachter eine bestimmte Grenzlinie in der Mitte des Bereichs, dann wird eine neue Reihe bzw. Spalte von Kacheln nachgeladen und auf der gegenüberliegenden Seite wird eine Reihe bzw. Spalte von Kacheln gelöscht. Hierdurch wird ermöglicht, durch beliebig große Datenbestände navigieren zu können. Das Prinzip des Kachelmanagers wird in Abb. 8-15 illustriert, weitere Erläuterungen hierzu finden sich in *Bender (2002)*.

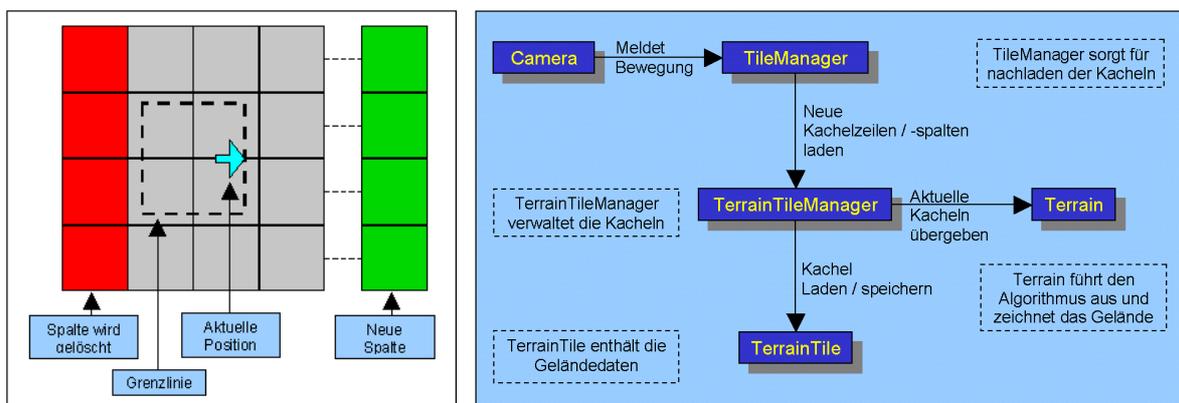


Abb. 8-23 Prinzip des Kachelmanagers zur 3D-Echtzeitnavigation durch beliebig große Datenbestände [Bender & Oberle, 2003]

9 Systemübergabe an die Wasserwirtschaftsverwaltung

9.1 Zuständigkeitsbereiche am Neckar

Der Neckar ist auf der Strecke von Plochingen bis Mannheim (203 Fluss-km) zur Schifffahrtsstraße ausgebaut und wird juristisch als Bundeswasserstraße (Klasse Va) behandelt. Eigentümerin der Bundeswasserstraßen ist nach Artikel 89 des Grundgesetzes die Bundesrepublik Deutschland, welche diese durch eigene Behörden verwaltet. Als Mittelinstanz der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes unterstehen sieben Wasser- und Schifffahrtsdirektionen (WSD) dem Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW). Die WSD'n nehmen primär regionale, konzeptionelle, koordinierende sowie dienst- und fachaufsichtliche Aufgaben wahr. Ihnen nachgeordnet sind bundesweit insgesamt 39 Wasser- und Schifffahrtsämter (WSÄ), welche als ausführende Ortsinstanz für den Aufgabenvollzug verantwortlich sind. Die Bundeswasserstraße Neckar liegt im Zuständigkeitsbereich der WSD Südwest bzw. der WSÄ Mannheim (Mündung bis km 4+60), Heidelberg (km 4+60 bis km 116+44) und Stuttgart (km 116+44 bis km 203+01).

Eine der wesentlichen Hoheitsaufgaben der WSV ist die Unterhaltung der Bundeswasserstraße. Diese umfasst nach §8 (Abs 1) des Bundeswasserstraßengesetzes (WaStrG) „die *Erhaltung eines ordnungsgemäßen Zustandes für den Wasserabfluss und die Erhaltung der Schifffbarkeit*“. Die Unterhaltungspflicht bezieht sich hierbei auf das Gewässerbett und die Uferbereiche sowie die bundeseigenen Schifffahrtsanlagen, wie Schleusen, Wehre und Hafenanlagen. Die hochwassergefährdeten Vorlandbereiche fallen i.d.R. nicht in den Zuständigkeitsbereich der WSV. Die Unterhaltungspflicht von Dammbauwerken bei Stauhaltungen vor dem Hintergrund des Hochwasserschutzes ist Gegenstand oftmals kontroverser Diskussion zwischen Bund, Land und Kommunen.

Hochwasserschutz und Hochwasservorsorge in den Flusstälern sind Aufgaben der Wasserwirtschaftsverwaltungen (WWV) der Länder sowie der Anliegerkommunen. Rechtliche Regelungen hierzu finden sich im Raumordnungsgesetz (ROG), Baugesetzbuch (BauGB), Wasserhaushaltsgesetz (WHG) sowie in den Landeswassergesetzen (LWG) und den Landesbauordnungen (LBO). Eine übersichtliche Zusammenfassung und Diskussion der Rechtsbestimmungen zum Thema Hochwasserschutz ist in *Fröhlich, 2001* gegeben.

In Baden-Württemberg sind neben dem Ministerium für Umwelt und Verkehr (UVM) und den Regierungspräsidien (RP) als obere bzw. höhere Wasserbehörden vor allem die operative Ebene der vier Gewässerdirektionen (GwD'n) mit insgesamt 13 Bereichen gefordert. Sie sind technische Fachbehörden für die unteren Verwaltungsbehörden (Stadt- und Landkreise) sowie Träger öffentlicher Belange bei Planungsvorhaben, wie z.B. in der Bauleitplanung und der Raumordnung. Im Rahmen des Hochwassermanagements sind sie z.B. in die Festlegung rechtskräftiger Überschwem-

mungsgebiete, Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen, Bearbeitung von Baugesuchen sowie die Öffentlichkeitsarbeit maßgeblich eingebunden. Als weitere Aufgabengebiete der GwD'n sind die Themen ökologische Gewässerentwicklung, Gewässerunterhaltung, Grundwasserschutz und Gewässermonitoring zu nennen.

Die Strecke des schiffbaren Neckars fällt in den Zuständigkeitsbereich der GwD Nördlicher Oberrhein - Bereich Heidelberg (Mündung bis km 93+80) sowie der GwD Neckar - Bereich Besigheim (km 93+80 bis 189+50) bzw. Bereich Kirchheim (km 189+50 bis 203+01).

9.2 Zentraler Arbeitsplatz – Dezentrale Arbeitsplätze

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Hochwassersimulationssystem Neckar wurde an die Wasserwirtschaftsverwaltung (WWV) des Landes Baden-Württemberg sowie der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes lauffähig übergeben. Hierzu wurden bei den in Tabelle 9-1 aufgeführten Dienststellen dezentrale GIS-Arbeitsplätze auf PC-Ebene eingerichtet. Als kommerzielle GIS-Software kommt das Desktop-GIS *ArcView3.2a* mit den Erweiterungen *Spatial Analyst* und *3D Analyst* zum Einsatz. Parallel wurde ein zentraler Arbeitsplatz eingerichtet, welcher derzeit noch beim Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe implementiert ist. Neben der PC-Plattform werden hierbei *Unix-Workstations* und das GIS *ARC/INFO* eingesetzt.

IKoNE-GIS-Arbeitsplätze
Gewässerdirektion Neckar – Bereich Besigheim
Gewässerdirektion Nördlicher Oberrhein – Bereich Heidelberg
Regierungspräsidium Stuttgart
Wasser- und Schifffahrtsamt Heidelberg
Wasser- und Schifffahrtsamt Stuttgart
Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest (Mainz)
Bundesanstalt für Wasserbau (Karlsruhe)

Tabelle 9-1 Dienststellen mit dezentralen IKoNE-GIS-Arbeitsplätzen

Ziel des Modelleinsatzes bei der WWV ist die Unterstützung der Nutzer bei der Bearbeitung ihrer vielfältigen Dienstaufgaben (siehe Kap. 2.4). Der Erfolg des Einsatzes des Simulationssystems hängt ganz entscheidend davon ab, inwieweit das Potenzial der sachverständigen Erfahrung eines qualifizierten Bearbeiters effektiv genutzt wird und ihm eine angemessene Auswahl an Anwendungsmöglichkeiten verfügbar gemacht wird, ohne ihn hierbei mit allzu komplexen Benutzeroberflächen und einer

Überzahl an Funktionalitäten zu überfordern und zu demotivieren. Zu berücksichtigen sind hierbei

- die Art, Häufigkeit und Dringlichkeit der im Rahmen der Dienstaufgaben anfallenden Problemstellungen,
- die individuell unterschiedlichen „Fähigkeiten“ der Anwender,
- sowie die Personalkapazitäten der jeweiligen Dienststellen.

Vor diesem Hintergrund wurden bereits in der konzeptionellen Phase der Entwicklungsarbeiten neben dem Entwicklungsbedarf auch das Bearbeitungspotenzial der zukünftigen Anwender und Dienststellen eingehend erörtert. Als Ergebnis wurde bezüglich Modelleinsatz und -pflege folgende grundsätzliche Aufgabenteilung zwischen dem zentralen Arbeitsplatz und den dezentralen GIS-Arbeitsplätzen festgelegt:

Das Anforderungsprofil der dezentralen Arbeitsplätze beinhaltet u.a. die Durchführung stationärer hydrodynamisch-numerischer Berechnungen und die Ermittlung von Überflutungsflächen unter Einsatz der bestehenden Einzelmodelle der Stauhaltungen (Ist-Zustand). Der zentrale Arbeitsplatz hingegen ist für den Betrieb des instationären Gesamtmodells der Staustufenkette sowie für die Durchführung von Variantenstudien (Modifizierung der Systemgeometrie und Parametrisierung der HN-Modelle) zuständig. Als weitere Aufgabenschwerpunkte sind die Datenverwaltung und –bereitstellung, die Aktualisierung der Modelle und Geodatenbestände sowie die kontinuierliche Betreuung der dezentralen Arbeitsplätze zu nennen.

Die Bedienung des zentralen Arbeitsplatzes setzt umfassende Kenntnisse der hydrodynamisch-numerischen Modellgrundlagen sowie langjährige Erfahrungen mit dem Einsatz komplexer Geo-Informationssysteme voraus. Vom Anwender der GIS-Fachschale an den dezentralen Arbeitsplätzen wird aus programmtechnischer Sicht zunächst lediglich Basiswissen im Umgang mit Windows-Standardprogrammen und die entsprechende Motivation zum „learning by doing“ verlangt.

9.3 Anwenderschulungen

Die Anwender der dezentralen GIS-Arbeitsplätze bei den Gewässerdirektionen und den Wasser- und Schifffahrtsämtern wurden von Anbeginn in die Entwurfs- und Entwicklungsarbeiten zur IKoNE-GIS-Fachschale einbezogen. Im Rahmen mehrerer Anwenderschulungen wurde Ihnen Hintergrundwissen zur hydrodynamisch-numerischen Modellerstellung und zum Aufbau Geographischer Informationssysteme sowie Grundkenntnisse im Umgang mit den Standardfunktionen des Desktop-GIS ArcView vermittelt. Die Anwender wurden über Übungsaufgaben, die während der Schulungen direkt am PC unter Anleitung bearbeitet wurden, mit den Benutzeroberflächen und Zusatzfunktionalitäten des Systems vertraut gemacht. Während der Schulungsphase konnten konstruktive Anregungen seitens der Anwender aufgenommen und die Toolpalette den Anforderungen entsprechend ausgebaut bzw. anwenderfreundlicher gestaltet werden.

Insgesamt wurden innerhalb des ersten Jahres sechs eintägige Schulungen abgehalten. Seither werden jährliche Anwendertreffen zum Erfahrungsaustausch organisiert. Des Weiteren wurde eine „Hot-Line“ eingerichtet, über welche eine kontinuierliche Betreuung via email und Telefon erfolgt. Ein übersichtlich aufbereitetes Anwenderhandbuch mit graphischen Darstellungen, Bedienhinweisen und Übungsaufgaben sowie eine Online-Systemhilfe unterstützen den Anwender in der Systemanwendung.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass die regelmäßigen Anwendertreffen und der offene Dialog zwischen Programmanwendern und Programmentwicklern einen entscheidenden Beitrag zur praxisbezogenen Programmentwicklung und Effektivität der Arbeit an den dezentralen Arbeitsplätzen geleistet haben: Selbst Anwender ohne jegliche GIS-Erfahrung werden durch 'learning by doing' sehr schnell mit den Applikationen vertraut und können über die Zusatzfunktionalitäten auch komplexe Programmabläufe durchführen. Voraussetzung hierzu ist jedoch, dass die Sachbearbeiter gerade in der Einlernphase von ihren Dienststellen zur Systemanwendung motiviert werden. Ihnen müssen frühzeitig systembezogene Aufgaben gestellt und entsprechende Einarbeitungszeiten gewährt werden. Nur hierdurch wird sichergestellt, dass sich das in den Schulungen erlernte Wissen und die antrainierten Fähigkeiten nachhaltig einprägen können und auch nach einer längeren Nutzungspause abrufbar bleiben.

Als problematisch stellte sich z.T. die Benutzung der PC's an den Dienststellen durch unterschiedliche Bearbeitergruppen und Systemadministratoren heraus. So kam es zumindest in der Anfangsphase des Öfteren zu Programmfehlern, die ihre Ursache in der Änderung der Systemkonfiguration oder Veränderung der Ablagestruktur hatten. Für den Anwender kann hierdurch rasch eine unnötige Verunsicherung im Umgang mit den Instrumenten entstehen. Eine Lösung für den ‚Stand-Alone‘ -Betrieb stellt das in Kap.8.7.2 erwähnte Installationsprogramm dar, welches neben der Aktualisierung der Datenbank auch die Überprüfung und Anpassung der Systemkonfigurationen in automatisierter Weise übernimmt. Bei Verfügbarkeit einer entsprechend leistungsfähigen Netzperformance können über eine Server-Client-Architektur Probleme dieser Art ausgeschlossen werden.

9.4 Beispiele zum Systemeinsatz

9.4.1 Allgemeines

Der Einsatz des Hochwassersimulationssystems Neckar dient der Unterstützung der Entscheidungsträger bei der Bearbeitung wasserwirtschaftlicher Aufgaben im Rahmen des HW-Managements. Die wesentlichen Aspekte der Anwendung wurden bereits in Kap.1.2 dargelegt und seien im Folgenden nochmals aufgeführt:

- Überprüfung des HW-Schutzgrades von Objekten und Ermittlung von Schutzdefiziten
- Überprüfung und Überarbeitung rechtskräftiger Überschwemmungsgebiete

- Beurteilung der Auswirkungen von Baumaßnahmen auf den HW-Abfluss (Nachweis der HW-Neutralität)
- Erhebung und Prognostizierung von HW-Schäden in gefährdeten Gebieten als Grundlage der HW-Vorsorge (Risikoanalyse)
- Erarbeitung und Bewertung von Hochwasserschutzkonzepten (Kosten-Nutzen-Analyse)
- Erarbeitung und Aktualisierung örtlicher und gemeindeübergreifender Hochwasseralarmierungs- und –Einsatzpläne
- Entscheidungshilfe im operationellen Einsatz

Nicht zuletzt trägt der Einsatz moderner GIS-Software im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit dazu bei, über realitätsnahe Visualisierungsmöglichkeiten (2D, 3D) eine potenzielle Gefährdung durch Hochwasser in das Bewusstsein der betroffenen Bevölkerung zu rücken, wodurch ein weiterer wichtiger Beitrag zur Hochwasservorsorge (Verstärkung des eigenverantwortlichen Handelns, Verringerung der Schadenspotenziale etc.) geleistet wird. Abb. 9-1 zeigt exemplarisch die Überlagerungsmöglichkeit hochwasserrelevanter Daten an einem der GIS-Arbeitsplätze der Wasserwirtschaftsverwaltung am Neckar. Nachfolgend werden die Einsatzmöglichkeiten des Systems anhand einiger exemplarischer Beispiele aufgezeigt.

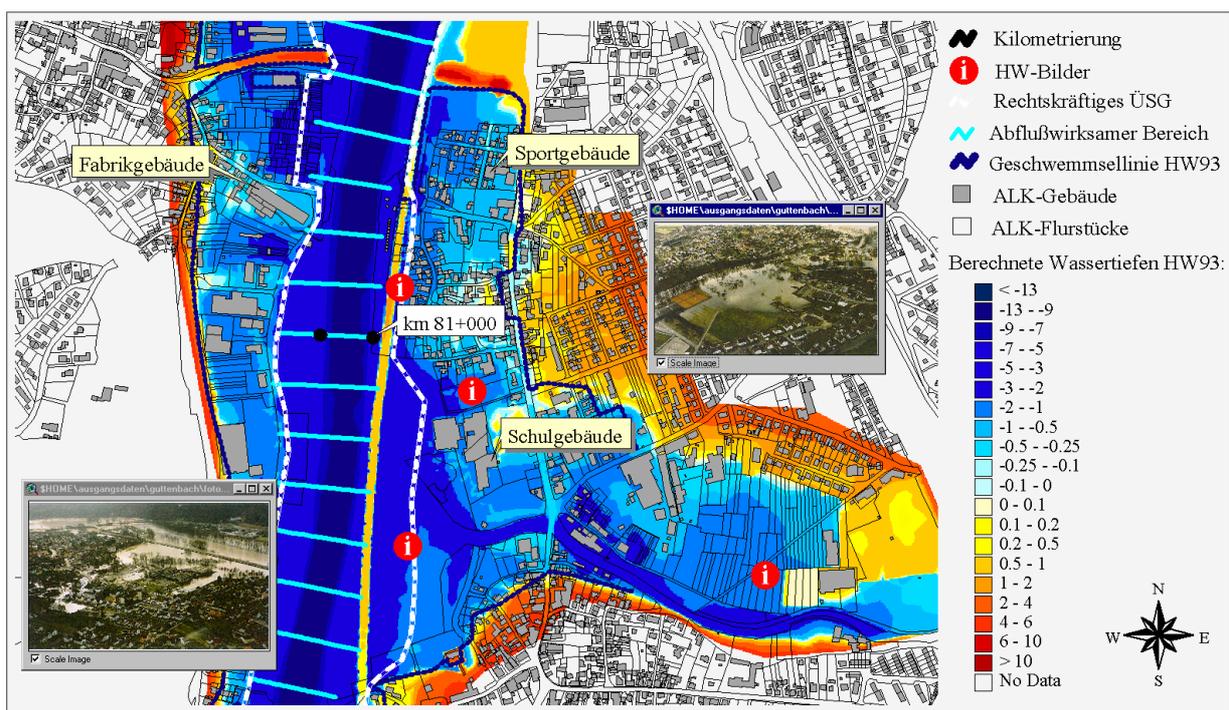


Abb. 9-1 Exemplarische Überlagerung hochwasserrelevanter Daten im GIS am Beispiel des Neckars [Oberle et al., 2000]

9.4.2 Flächenmanagement

Die sicherlich nachhaltigste Strategie zur Reduktion zukünftiger Hochwasserschäden ist die Flächenvorsorge mit dem Ziel der Verringerung der Schadenspotenziale in den Talräumen durch standort- bzw. hochwasserangepasste Flächennutzung (siehe Kap.2.2). Voraussetzung für die effektive Umsetzung der Flächenvorsorge sowie der planerischen und rechtlichen Sicherung der Gefahrenflächen sind

- flächenhafte Kartengrundlagen zur Hochwassergefährdung,
- Instrumente der Raumordnung (Landesplanung, Regionalplanung) sowie der kommunalen Bauleitplanung und
- wasserrechtliche Instrumente des Hochwasserschutzes⁵⁶.

Zur Flächensicherung für den vorbeugenden Hochwasserschutz im Sinne des ROG bzw. zur Flächenvorsorge im Sinne der LAWA-Leitlinie 1995 sollen in Baden-Württemberg folgende Gebietskategorien in den Regionalplänen ausgewiesen werden:

- **Vorranggebiete für den vorbeugenden Hochwasserschutz**
Diese sind gem. §7 Abs.4 ROG Ziele der Raumordnung und lösen Bindewirkungen nach §4 ROG aus. Innerhalb dieser Gebiete ist eine Bebauung im Sinne des §5 Abs.2 BauGB in der Regel nicht zulässig. Siedlungsnahе Teilflächen können jedoch unter bestimmten Voraussetzungen von der Ausweisung als Vorranggebiet ausgenommen werden. Die Abgrenzung erfolgt bezogen auf die Überschwemmungsfläche bei HQ_{100} unter Berücksichtigung der Schutzwirkung von Anlagen zum technisch-infrastrukturellen HW-Schutz.
- **Vorbehaltsgebiete für den vorbeugenden Hochwasserschutz**
In ‚Vorbehaltsgebieten‘ ist die Bebauung zwar prinzipiell zulässig, durch geeignete Flächenauswahl sowie durch hochwasserkompatibles Bauen sind jedoch Verschärfungen des HW-Abflusses zu vermeiden und Schadensrisiken zu minimieren. Die Abgrenzung der Vorbehaltsgebiete erfolgt bei offenen Systemen bezogen auf das HQ_{100} mit einem örtlich angepassten Extremwertzuschlag. ‚Vorbehaltsgebiete‘ können auch innerhalb besiedelter Gebiete ausgewiesen werden und so entsprechende Vorgaben für die Bauleitplanung schaffen.
- **Gebiete, die mit Hinweisen belegt sind**
Bei mit Hinweisen belegten Gebieten ist keine regionalplanerische Aussage im Sinne eines Zieles (Vorranggebiete) oder Grundsatzes (Vorbehaltsgebiete) verbunden; der Hinweis hat aus raumplanerischer Sicht vielmehr den Rang eines Vorschlages. So werden bei HQ_{100+x} gefährdete Flächen hinter Schutzanlagen, sofern sie nicht als Vorbehaltsgebiete ausgewiesen sind, mit einem Gefahrenhinweis versehen, um somit das Gefahrenbewusstsein der Kommunen bzw. der Öffentlichkeit zu verbessern. Eine weiterführende Erläuterung der Gebietskategorien ist in [GWD Neckar Besigheim, 2002] zusammengestellt.

⁵⁶ Rechtliche Regelungen hierzu finden sich im Raumordnungsgesetz (ROG), Baugesetzbuch (BauGB), Wasserhaushaltsgesetz (WHG) sowie in den Landeswassergesetzen (LWG) und den Landesbauordnungen (LBO)

Als wasserrechtliches Instrumentarium sind nach §32 WHG hochwassergefährdete Landflächen als „Überschwemmungsgebiete“ (ÜSG) auszuweisen und Vorschriften zum Hochwasserschutz zu erlassen. Die näheren Bestimmungen zu den Flächen ergeben sich aus den jeweiligen Landesgesetzen.

In Baden-Württemberg orientiert sich die Abgrenzung der ÜSG an einem 50 - 100-jährlichen Ereignis oder einem abgelaufenen Extremereignis. In Verbindung mit den §§77 bis 80 LWG BW verfolgt die Abgrenzung der ÜSG

- den Erhalt bzw. die Verbesserung der ökologischen Strukturen,
- die Verhinderung erosionsgefährdeter Eingriffe,
- den Erhalt bzw. die Rückgewinnung natürlicher Rückhalteflächen und
- die Regelung des Hochwasserabflusses.

Flächennutzungs- und Bebauungspläne haben zu berücksichtigen, dass Überschwemmungsgebiete grundsätzlich kein Bauland sind. Für eine Inanspruchnahme sind Ausgleichsmaßnahmen zu schaffen. Zudem werden von Landesseite keine Zuwendungen für HW-Schutzmaßnahmen gewährt, wenn die technische Fachbehörde (hier: Gewässerdirektion) im Rahmen des Bauleitverfahrens auf die Überschwemmungsgefährdung hingewiesen hat. [GWD Neckar, 2002]

Angesichts der großen Bedeutung der Überschwemmungsgebiete wird ihrer Festlegung von Seiten der Wasserwirtschaftsverwaltung seit Jahren eine hohe Priorität zugewiesen. Die flächenhafte Umsetzung einer flurstücksscharfen und statistisch zugeordneten Ausweisung der ÜSG scheiterte bisher aus Mangel an

- entsprechend hochaufgelösten Geländemodellen,
- statistischen Hochwasserkennwerten HQ_T ,
- hydraulischen WSP-Längsschnitten für HQ_T ,
- Tools zur Ermittlung der Überflutungsgrenzen und/oder
- dem hohen Aufwand an entsprechenden Personalkapazitäten resp. Finanzmitteln.

Im Rahmen der Entwicklung des IKoNE-Modells wurden Daten- und Modellgrundlagen sowie GIS-Werkzeuge geschaffen, mit denen eine großräumige und dennoch hochaufgelöste Überarbeitung bzw. Neufestlegung des ÜSG (bzw. der Vorrang- und Vorbehaltsgebiete) ermöglicht wird. Dem Bearbeiter stehen hierzu folgende Geodaten mit Metainformationen flächendeckend zur Verfügung:

- aktuelles ÜSG als PolyLine
- topographische Basisdaten mit Hinweisen zu Aktualität und Genauigkeit
- abflusswirksame Bereiche (Rückstaugefahr durch bauliche Maßnahmen)
- ATKIS- und ALK-Vektordaten mit Informationen zur Flächennutzung
- regionalisierte HW-Kennwerte HQ_T für den Neckar

Zudem werden die notwendigen praxisorientierten Tools zur Entscheidungsfindung (Bewertung der Unsicherheiten) und zur technischen Umsetzung bereitgestellt:

- Streckenbezogener Zugriff auf räumliche Datenbank,
- Ermittlung von Überflutungsflächen für beliebige HW-Abflüsse vor und hinter Schutzanlagen
- Analyse von Unsicherheiten über Differenzenraster und Definition frei wählbarer Sicherheitszuschläge HQ_T+x
- Digitalisierung bzw. Editierung der Vorranggebiete bzw. des ÜSG (optional einsetzbar: Snap-Funktion an ALK- bzw. ATKIS- Vektoren)
- Aktualisierung der zentralen Datenbank und –archivierung
- Erstellung von Kartengrundlagen

Die für den Neckar pilothaft entwickelten GIS-Techniken sind auch auf andere Fließgewässer übertragbar. Zur flächenhaften Bearbeitung aller relevanten Fließgewässerstrecken in B.-W. wurden die IKoNE-GIS-Werkzeuge in eine landesweit einsetzbare Version überführt. Zur Ausweisung rechtskräftiger Überschwemmungsgebiete stehen als hydrologische Eingangsgrößen die regionalisierten Hochwasserkennwerte HQ_T der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) B.-W. zur Verfügung. Als einheitliche topographische Datengrundlage können zukünftig die aktuell aufgenommenen hochaufgelösten Laser-Scanner-Daten im 1x1 m Raster des Landesvermessungsamtes B.-W. genutzt werden. Die Information zur Flächennutzung ist ebenfalls bei der Landesvermessung in adäquater Skalierung im ATKIS- bzw. ALK- Datenpool digital verfügbar. Bzgl. der abflussabhängigen Wasserstände kann bei einer Vielzahl von Gewässern bereits auf vorliegende WSP- Lagenberechnungen zurückgegriffen werden. Alternativ können zumindest als vorläufige Grundlage dokumentierte Hochwasserstände abgelaufener Ereignisse Berücksichtigung finden. In Kap.9.6 werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten GIS- Applikationen als landesweite Version vorgestellt.

9.4.3 Variantenstudien zu Baumaßnahmen im Flusstal und EZG

Durch Modifikation des Ist-Zustandes der Systemgeometrie des HN-Modells lassen sich bestehende Bebauungen und geplante Baumaßnahmen im abfluss- und retentionswirksamen Bereich des Neckartals bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Hochwasserscheitelwasserstände (z.B. Rückstauwirkung nach oberstrom) sowie ihres Einflusses auf den Ablauf einer Hochwasserwelle (Aufsteilung, Dämpfung) quantifizieren. Das Variantenstudium kann je nach Zielgröße sowohl auf Basis stationärer Berechnungen mit den Einzelmodellen der Stauhaltungen, als auch instationärer Analysen mit dem Gesamtmodell der Stauhaltungskette durchgeführt werden. Die Auswirkungen von Baumaßnahmen in den Nebengewässern (z.B. Bau von Talsperren und Rückhaltebecken) auf den HW-Abfluss im Neckartal lassen sich über Variation der oberen Randbedingungen (Ganglinien der Modellzuflüsse) analysieren.

Seit Inbetriebnahme des Modells wurden am zentralen Arbeitsplatz bereits zahlreiche Untersuchungen zu Baumaßnahmen im Neckartal durchgeführt. Hierbei kommt den privaten und öffentlichen Auftraggebern (Bauunternehmen, Gewerbetreibenden, Bundes- und Landesbehörden) die Existenz des vom Land B.-W. finanzierten Ist-Zustand-Modells sowohl monetär als auch terminlich zugute, da durch die bereits aufbereiteten Daten- und Modellgrundlagen die Variantenstudien mit vergleichsweise wenig Aufwand verbunden sind. Nachfolgend werden die bisher auf Basis des IKONE-Modells Neckar durchgeführten Untersuchungen zusammengestellt:

Neckar-km	Nachweis der HW-Neutralität	Stationär/Instat.
8+500A	Umbau einer Autobahnbrücke bei Mannheim	S
55+000	Erweiterung einer Kläranlage	S + I
56+000	Neubau eines Verwaltungsgebäudes	S
60+500	Ausweisung eines Gewerbegebietes	S + I
80+000	Konzessionsverlängerung für einen Kiesumschlagsplatz	S
81+300	Hochwasserschutzmaßnahme*	S + I
81+500	Renaturierungsmaßnahme*	S
87+300	Konzessionsverlängerung für eine Hafenanlage	S
91+000	Veränderung der Uferführung des Neckars*	S
108+000	Hochwasserschutzmaßnahme*	S
113+500	Rückstauwirkung einer Wehranlage im (n-1)-Fall	S
114+100	Versagen eines Hochwassersperrtores	S
125+000A	Hochwasserschutzmaßnahme	S + I
182+750	Rückstauwirkung einer Wehranlage im (n-1)-Fall	S

Tabelle 9-2 Beispiele bisher durchgeführter Variantenstudien auf Basis des HN-Flussmodells Neckar (* = in Verbindung mit einem lokalen zweidimensionalen HN-Modell)

9.4.4 Hochwassergefahrenkarten / Szenarienkarten

9.4.4.1 Karten für die Öffentlichkeitsarbeit und den Katastrophenschutz

Die Kenntnis über die bestehende Hochwassergefahr ist zur Beurteilung der erforderlichen Maßnahmen einer zielgerichteten Hochwasservorsorge sowohl für die Entscheidungsträger der Landes- und Kommunalbehörden als auch die betroffene Bevölkerung unerlässlich. Hierbei sind auch Flächen hinter Schutzanlagen zu berücksichtigen, da diese durch Versagen der Schutzeinrichtung sowie durch Überströmung bei $Q > BHQ$ potenziell gefährdet sind und gerade in diesen Bereichen das Katastrophenrisiko durch die Anhäufung großer Schadenspotenziale bei vergleichs-

weise geringem Gefahrenbewusstsein verschärft wird. Die Simulation extremer Hochwasserabflüsse ($Q > HQ_{200}$) spielt eine entscheidende Rolle, um die bei einem Katastrophenereignis (vergleichbar z.B. mit dem an der Elbe im August 2002) betroffenen Gebiete frühzeitig zu identifizieren und entsprechende Schutz- bzw. Rettungsstrategien (Informationswege, Fluchtwege, Deichverteidigung, Evakuierungen) ausarbeiten zu können.

Das GIS-gestützte Simulationssystem Neckar bietet die Möglichkeit, Hochwasser-szenarien vor und hinter Schutzanlagen zu simulieren und die Ergebnisse in beliebiger Skalierung in Form von Hochwassergefahrenkarten bzw. Szenarienkarten graphisch aufzubereiten. Über den Transfer der Informationen zur Hochwassergefährdung an Kommunen und Öffentlichkeit können Bürger (z.B. als Bauherr oder Anwohner) sowie ansässige Industrie und Gewerbebetriebe bzgl. der Gefahr durch Hochwasser sensibilisiert und zu eigenverantwortlichem Handeln motiviert werden. Sie erhalten die notwendigen Informationen, um ihrerseits Vorsorge bei der Bauplanung, dem Objektschutz sowie der Risikovorsorge mittels Hochwasserversicherung durchführen zu können. Zudem dienen die Gefahrenkarten in Verbindung mit den Diensten der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) des Landes B.-W. als präzise Grundlage zur Ausarbeitung von Alarm- und Einsatzplänen sowie zur Organisation von Einsatzkräften während eines Ereignisses.

Im Folgenden werden die Einsatzmöglichkeiten des Hochwassersimulationssystems Neckar zur Erstellung von Gefahren- bzw. Szenarienkarten anhand zweier exemplarischer Beispiele erörtert. Zum einen werden die Ergebnisse einer Pilotstudie zu den Inhalten und der graphischen Aufbereitung von Hochwassergefahrenkarten am Beispiel der Anliegergemeinde Offenau (2.700 Einwohner) vorgestellt. Zum anderen wird die Möglichkeit der Behandlung auch großräumiger komplexer Systeme am Beispiel der Gefährdungsanalyse der Stadt Heilbronn dargelegt.

9.4.4.2 Beispiel Gemeinde Offenau

Die Gemeinde Offenau liegt im Neckartal bei Fluss-km 98 (unterstrom Kocher- und Jagst-Mündung). Aufgrund der topographischen Randbedingungen werden die flussnahen Bebauungen bereits ab einem 10-jährlichen Hochwasserereignis überschwemmt. Zum Schutz gegen die regelmäßigen Überflutungen wurde nun als technische Lösung ein Dammbauwerk realisiert. Als Bemessungsabfluss wurde ein Abflussmenge von $Q = 2610 \text{ m}^3/\text{s}$ vorgegeben. Dies entspricht nach aktueller hydrologischer Statistik einem HQ_{100} . Die erforderlichen Dammhöhen (unter Berücksichtigung eines Freibordes von $\Delta y = 50 \text{ cm}$) wurden am dezentralen ICoNE-GIS-Arbeitsplatz der GwD-Neckar (Bereich Besigheim) errechnet. Der Schutzdamm wird von vier Dammscharten unterbrochen, die im HW-Fall mit mobilen Elementen geschlossen werden sollen. Als Basis der Alarm- und Einsatzplanung wurde in Zusammenarbeit mit der HVZ B.-W. ein Vorhersagepegel eingerichtet. Die Abflusskurve des Pegels wurde ebenfalls mit dem HN-Modell Neckar ermittelt.

Parallel zur technischen Schutzlösung bis HQ₁₀₀ setzt die Gemeinde auf Aufklärung der Bevölkerung über das verbleibende Restrisiko durch Versagen der Schutzeinrichtung bzw. Dammüberströmung. Durch Veröffentlichung detaillierter Hochwassergefahrenkarten soll das Gefahrenbewusstsein der Bürger geschärft und die Reduktion von Schadenspotenzialen gefördert bzw. deren Anhäufung verhindert werden. Gleichzeitig sollen die Karten der örtlichen Feuerwehr als Grundlage ihrer Einsatzplanung im Katastrophenfall dienen.

Die Herausforderung beim Kartenentwurf liegt in der Integration aller für diese Zielanwendungen notwendigen Informationen in einer praxisbezogenen übersichtlichen Darstellungsform. Bei der Auswahl der Inhalte und graphischen Gestaltung muss beachtet werden, dass auch dem „fachfremden“ Bürger (mit wenig Erfahrung in der Interpretation einer „abstrakten“ Kartendarstellung) ermöglicht wird, die für ihn wichtigen Informationen problemlos zu extrahieren. Auch ist zu bedenken, dass die Einsatzkräfte die Karten u.U. in extremen Situationen (mobiler Einsatz bei extremer Wetterlage und Dunkelheit) nutzen müssen.

In enger Zusammenarbeit mit der Gemeinde und der Gewässerdirektion wurden folgende Anforderungen an die Karteninhalte bzw. das Kartenformat erarbeitet:

- Ausweisung potenzieller Überschwemmungsflächen mit Angabe der Überflutungstiefen und Auftretenswahrscheinlichkeit des Neckarabflusses (HQ₁₀-HQ₂₀₀) unter Berücksichtigung der Szenarien
 - mobile Elemente können nicht rechtzeitig verschlossen werden
 - Dambruch oberstrom
- Klassifizierung der Überflutungstiefe in 5 Intervallen mit blauer Farbabstufung
- Darstellung der nicht überfluteten Bereiche mit Angabe der Höhendifferenzen zur Wasserspiegellage zur Identifikation geeigneter Standorte für Leitzentrale, Notzelt Lagerplätze, Bürgerinformation etc. im Katastrophenfall
- Einbeziehung des Vorhersagepegels der HVZ als Bezugssystem
- Integration der Überschwemmungsgrenze des Hochwassers von 1824 (ermittelt auf Basis historischer HW-Marken und des aktuellen DGM)
- Verweis auf die Scheitelwasserstände abgelaufener HW-Ereignisse
- Darstellung der Bebauungen und Straßenzüge auf ALK-Basis
- Ausweisung neuralgischer Punkte (Trafostation, Pumpwerke, Pegelstandort etc.)
- Kartenmaßstab M > 1:5000 (Flurstücksschärfe)
- Kartenformat DIN A2 - laminiert (für den mobilen Einsatz geeignet)

Zur Ermittlung der potenziellen Überflutungsflächen bei Versagen der Schutzeinrichtung wurden die Flächen hinter der Schutzanlage mit den auf Grundlage des HN-Modells stationär errechneten Wasserstände an der Versagensstelle verschnitten. Diese Vorgehensweise ist aufgrund der vorliegenden topographischen Begebenhei-

ten und des geringen Füllvolumens zulässig. In Abb. 9-3 sind zwei der insgesamt neun Gefahrenkarten als Ergebnis der Bedarfsanalyse exemplarisch dargestellt.

In Kartentyp I sind die Differenzenraster der jeweiligen Abfluss-/Versagens-Szenarien in einer auf die wesentlichen Tiefenintervalle reduzierten Klassifizierung abgebildet. Die rechnerisch überströmten Bereiche sind blau, die „trockenen“ Flächen ockerfarben dargestellt. Die zugehörigen Intervallgrenzen können der Legende entnommen werden. Der Bezug zu den Wasserständen am Vorhersagepegel wurde graphisch über die Darstellung einer Pegellatte umgesetzt. Diese wurde farblich in zwei Bereiche unterteilt: Der Pegelbereich bis zum BHQ (ohne Berücksichtigung des Freibordes) ist ‚gelb‘ hinterlegt, der Bereich größer BHQ hingegen ‚rot‘ markiert. Neben dem jeweiligen Bezugswasserstand sind als Referenz die Scheitelwasserstände der Schadensereignisse von 1988, 1990 und 1993 ersichtlich. Zudem sind in der Karte die Anschlaglinie des Hochwassers 1824, Standorte historischer HW-Marken und die Lage des Vorhersagepegels eingetragen.

In Kartentyp II sind die Überflutungsflächen bzw. deren Anschlaglinien für HQ_{10} bis HQ_{200} jeweils bezogen auf ein Versagensszenario als Polygone aufgetragen. Um eine Verwechslung mit den Tiefenrastern zu vermeiden, wurde eine gelb-rote Farb-Abstufung gewählt. Die Darstellungen ermöglichen auch einem ungeübten Betrachter sowie den Einsatzkräften im Katastrophenfall ohne zusätzliche textliche Erläuterungen die Beantwortung u.a. folgender Fragestellungen:

- Auf welches Szenario bezieht sich die Darstellung? (Pegelwasserstand, Abflussmenge, Jährlichkeit, Versagensstelle)
- In welcher Relation steht das Ereignis zu den vergangenen (bekannten) Hochwässern?
- Muss mit einer Überströmung der Anlage gerechnet werden?
- Welche Bebauungen und Infrastrukturen sind mit welcher Intensität gefährdet?
- An welchen neuralgischen Stellen kann eine Ausbreitung der Überflutung (z.B. durch Sandsackbarrieren) verhindert werden?
- Welche Bereiche sind mit Fahrzeugen erreichbar? Wo ist der Einsatz von Booten erforderlich?
- Welche Flächen liegen deutlich über Wasserspiegelniveau und können z.B. als Lagerplatz für die Güterräumung genutzt werden?

Die Karten wurden in DIN A2 im Maßstab M 1:3000 gedruckt und in laminiertes Format an die Gemeinde übergeben. Das kompakte Format und die wasserfeste Druckform ermöglichen die Nutzung im mobilen Einsatz.

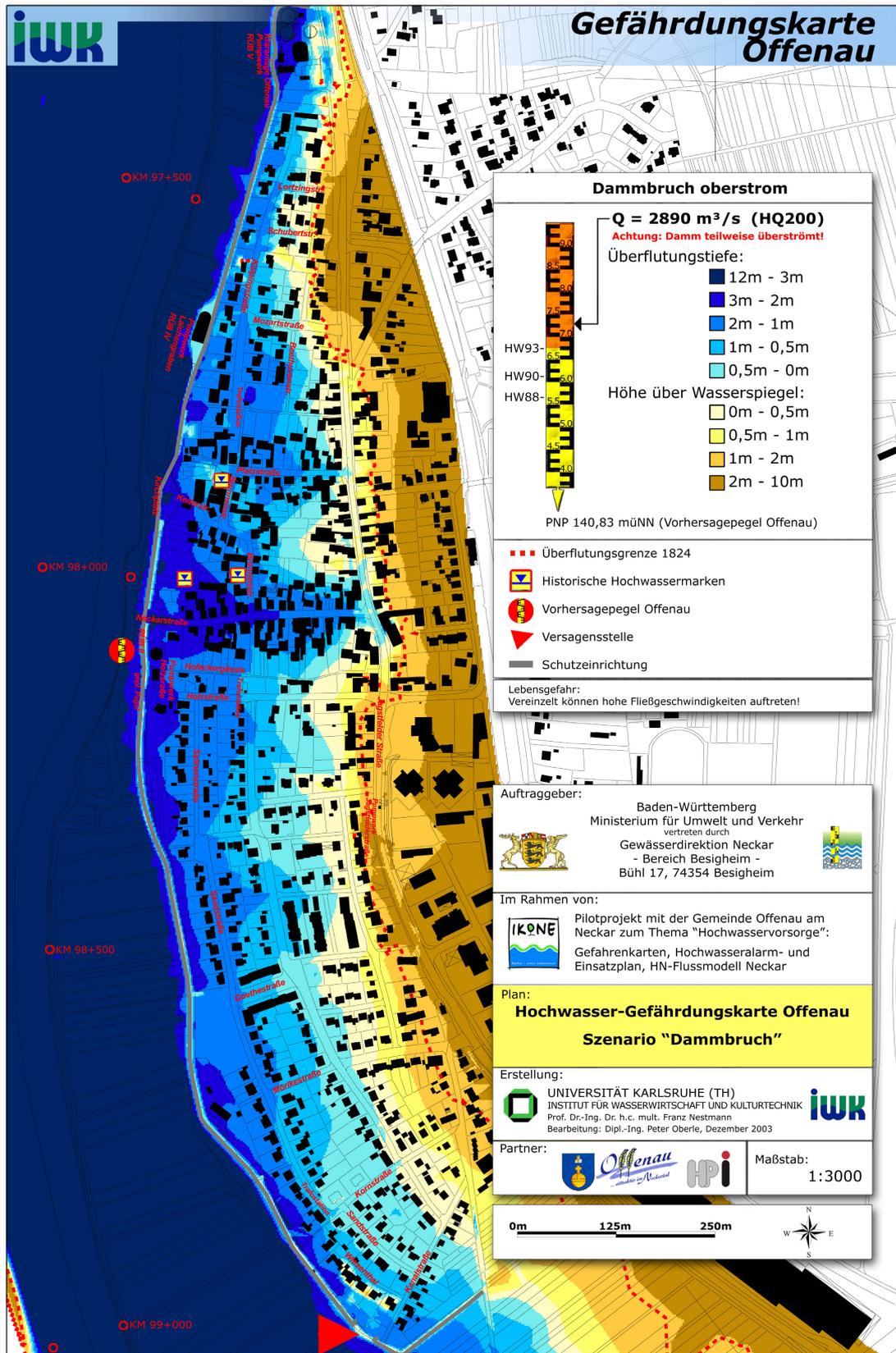


Abb. 9-2 Ergebnis der Studie zum Entwurf einer Hochwasser-Szenarienkarte (Typ I)

9.4.4.3 Beispiel Stadt Heilbronn

Die Stadt Heilbronn ist durch Schutzbauwerke (Hochwasserdämme und Sperrtore) bis ca. HQ₂₀₀ vor Hochwasser durch den Neckar geschützt. Bislang lagen nur unzureichende Kenntnisse bzgl. der Hochwassergefährdung der hinter den Schutzanlagen liegenden Industrie- und Gewerbeflächen sowie Wohnbebauungen vor. Um nun die Grundlage zur Verbesserung des Schutzgrades, Initiierung nachhaltiger Vorsorgemaßnahmen sowie Ausarbeitung von Alarm- und Einsatzplänen im Katastrophenfall zu schaffen, wurde auf Basis des IKoNE-Modells eine detaillierte Gefährdungsanalyse durchgeführt. Primäre Zielsetzung war es

- den bestehenden Schutzgrad zu überprüfen und die Schwachstellen im Schutzsystem zu lokalisieren,
- verschiedene Versagensszenarien und deren unterschiedliche Auswirkungen zu simulieren,
- potenzielle Fließwege (Möglichkeiten der Ausbreitung von Hochwasserwellen) hinter den Schutzanlagen zu erkennen,
- sowie neuralgische Punkte (Unterführungen, Durchlässe etc.) zur Minimierung der Ausbreitung der Überflutung innerhalb der geschützten Bereiche und damit des Schadensausmaßes zu identifizieren.

Das Untersuchungsgebiet erstreckte sich auf die gefährdeten Bereiche von Neckar-km 107+200 bis 119+800 einschließlich des Stadtneckars.

Als Ergebnis einer Voranalyse mit dem Basismodell konnten mit vergleichsweise geringem Aufwand die wesentlichen Gefahrenstellen eruiert und die zu untersuchenden Szenarien festgelegt werden. Neben diversen Damnbrüchen wurden auch die Auswirkungen der Durchströmung einer Bahnunterführung sowie das Versagen der Hochwassersperrtore an der Stadtstrecke sowie der Ausleitungsstrecke Horkheim als maßgebende Untersuchungsvarianten festgestellt. Hierbei sollten auch die zusätzlichen Rückstauwirkungen der Wehranlagen Neckarsulm, Heilbronn und Horkheim im Revisionsfall quantifiziert und bei der Bewertung der Gefährdungssituation berücksichtigt werden.

Auf Basis des HN-Modells Neckar konnte durch Modifikation der Systemgeometrie an den Wehranlagen deren abflussabhängige Rückstauwirkung im Revisionsfall quantifiziert werden. Die errechneten Wasserstände wurden zur Abgrenzung der Gefahrenflächen über die Methode der ‚Linien gleicher Wasserstände‘ in die Fläche gebracht. Hierbei wurde zunächst davon ausgegangen, dass der Wasserstand hinter der Schutzanlage mit der flussseitigen Wasserspiegelhöhe an der Versagensstelle korrespondiert (sichere Seite). Da jedoch bei Ereignissen mit geringerer Auftretenswahrscheinlichkeit die oberstrom errechneten Wasserstände höher liegen als die Dammkrone unterstrom, würde das eindringende Wasser unterstrom über den Damm zurück in den Neckarflussschlauch fließen. Die hieraus resultierende Entlas-

tungswirkung wurde gegebenenfalls über die hydraulisch plausible Annahme eines Fließgefälles innerhalb des Stadtgebietes berücksichtigt. Es wird darauf hingewiesen, dass die sich im Versagensfall einstellenden zeitabhängigen Überflutungstiefen und – grenzen u.a. von der Breite und Tiefe der Versagensstelle, der komplexen und dynamischen geometrischen Situation innerhalb des Stadtgebietes (Mauern, Gebäude, Fahrzeuge, Lagerstätten, etc.) sowie der Rückkoppelung auf die Abflussganglinie im Neckar (Wellendämpfung) abhängig sind. Die im Rahmen dieser Untersuchung abgegrenzten Gefahrenzonen liegen bezüglich der genannten Einflussfaktoren auf der sicheren Seite.

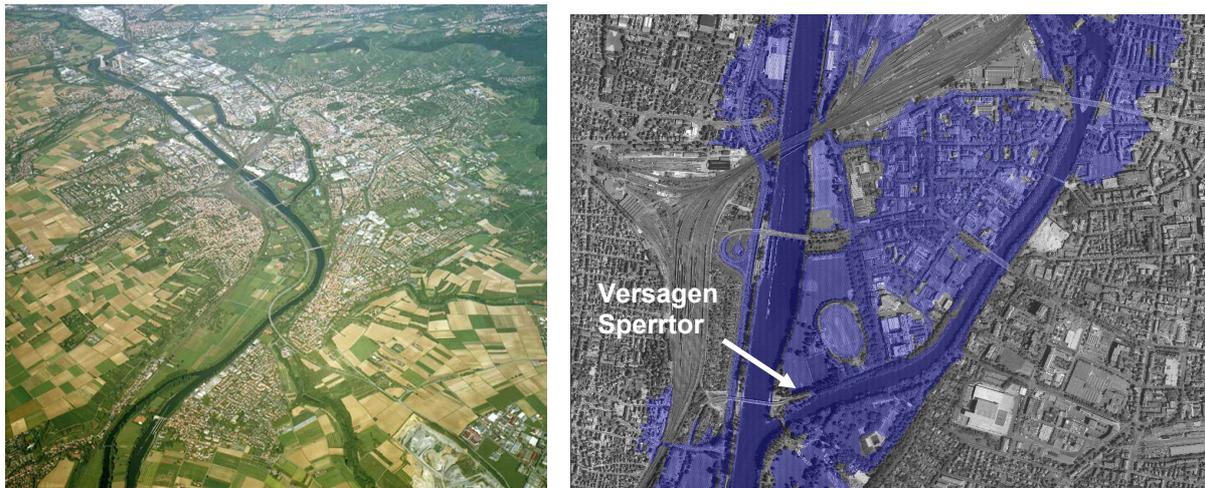


Abb. 9-4 Luftbild des urban geprägten Untersuchungsgebietes der Stadt Heilbronn (links; Quelle: Stadt Heilbronn) und Analyse der Auswirkungen eines Versagens des Sperrtores (rechts)

Als Ergebnis der Studie wurden für insgesamt 18 Szenarien die errechneten Überflutungsflächen als Differenzraster und Polygone an die Stadt Heilbronn übergeben. Aufgrund der Größe des Untersuchungsgebietes war der Ausdruck als Gefahrenkarten analog der Studie zur Gemeinde Offenau nicht sinnvoll. Stattdessen wurden die digitalen Daten in einem mit der CAD-Software der Stadtverwaltung kompatiblen Format sowie entsprechenden Benutzerhinweisen zur Verfügung gestellt und können dort in beliebigen Maßstäben durch Überlagerung mit georeferenzierten Karten, ALK-Daten und Orthofotos analysiert sowie anschaulich präsentiert werden.

Die Auswertung der Gefährdungsanalyse zeigte, dass bei Versagen bzw. Überströmen der Schutzeinrichtungen große Bereiche der Industrieflächen sowie des Citybereiches mit ihren enormen Schadenspotenzialen z.T. um mehrere Meter überstaut werden. Die detaillierte Analyse der Tiefenraster macht aber auch deutlich, dass zumindest bis HQ_{200} im Versagensfall durch gezielte Maßnahmen an neuralgischen Stellen (z.B. Dammbalkenverschlüsse an Unterführungen) die Ausbreitung der in das Stadtgebiet eindringenden Wassermassen und somit das Ausmaß der Schäden deutlich reduziert werden kann. Außerdem ist es möglich, den Schutzgrad des Ge-

samtgebietes durch lokal begrenzte Maßnahmen (Erhöhung der Uferböschung, Dammertüchtigung etc.) deutlich zu erhöhen.

9.5 Vernetzung mit anderen Systemen

Das Hochwassersimulationssystem Neckar wird von den Bearbeitern der Gewässerdirektionen an den dezentralen IKoNE-GIS-Arbeitsplätzen auch in Verbindung mit anderen Informationssystemen und fachspezifischen GIS-Applikationen genutzt. Aufgrund der Vorgabe des Ministeriums für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg (UVM), die GIS-Software ArcView als landesweites Standardsystem zur Erhebung und Verarbeitung von Umweltinformationen bei den Verwaltungsbehörden festzulegen, wurden die Entwicklungen fast ausnahmslos entweder direkt als ArcView-Erweiterung programmiert oder es wurden ArcView-spezifische Formate bzw. entsprechende Schnittstellen zugrunde gelegt. Diese Kompatibilität der Basisysteme erbringt große Vorteile bezüglich der zusammenführenden Darstellung und Weiterverarbeitung der verschiedenen Geodatenbestände und unterstützt somit auch die effektive Bearbeitung der fachübergreifenden Aufgabenfelder der Wasserwirtschaftsverwaltung.

So lassen sich die Ausgangsdaten und Ergebnisse des Simulationssystems Neckar zu weitergehenden Analyse- und Präsentationszwecken problemlos mit Geodaten und GIS-Applikationen des fach- und ressortübergreifenden Umweltinformationssystems Baden-Württemberg (UIS) verbinden, ohne hierbei die gewohnte (virtuelle) Arbeitsumgebung verlassen und/oder aufwendige Umformatierungen durchführen zu müssen.

Einen zentralen Bestandteil des UIS zur Bearbeitung der Aufgabenfelder der operativen Ebene der Gewässerdirektionen stellt das „Wasser, Abfall, Altlasten, Boden Informationssystem (WAABIS)“ dar. Seine Systemstruktur basiert, wie auch die gesamte UIS-Rahmenkonzeption, auf einem modularen Ansatz und integriert u.a. das Modul „Gewässerinformationssystem (GewIS)“. Die Untergliederung des UIS in verschiedene Teilkomponenten ist in Abb. 9-5 dargestellt.

Das Projekt „GIS-Arbeitsplatz für die Gewässerdirektionen“ (GIS-GwD) ist in das Modul GewIS eingebunden und dient der Bereitstellung von praxisgerechten GIS-Funktionalitäten, welche sich folgendermaßen klassifizieren lassen:

- „Werkzeuge zur Unterstützung von Planungsprozessen“ (1)
- „Werkzeuge zur kartografischen Präsentation“ (2) sowie
- „Datenbanken, Schnittstellen und Auskunftssysteme“ (3)

Zu Kategorie (1) gehören beispielsweise GIS-Tools zur Erstellung von Gewässerentwicklungskonzepten sowie der Visualisierung von Gewässerkilometrierung und Gewässerprofilen. Zudem lassen sich die aus den Entwicklungsarbeiten am Neckar entstandenen „GIS-Werkzeuge zur Ermittlung von Überflutungsflächen“ in diese

Gruppe einordnen. Kategorie (2) stellt den Sachbearbeitern Werkzeuge zur Vereinfachung bzw. qualitativen Verbesserung bei der Erstellung von Karten zur Verfügung. Kategorie (3) dient als Schnittstelle zu landesweiten Fachdatenbanken (z.B. Profildatenbank, Dammkataster, ALK) und organisiert hierbei vor allem den Datenimport und -export.

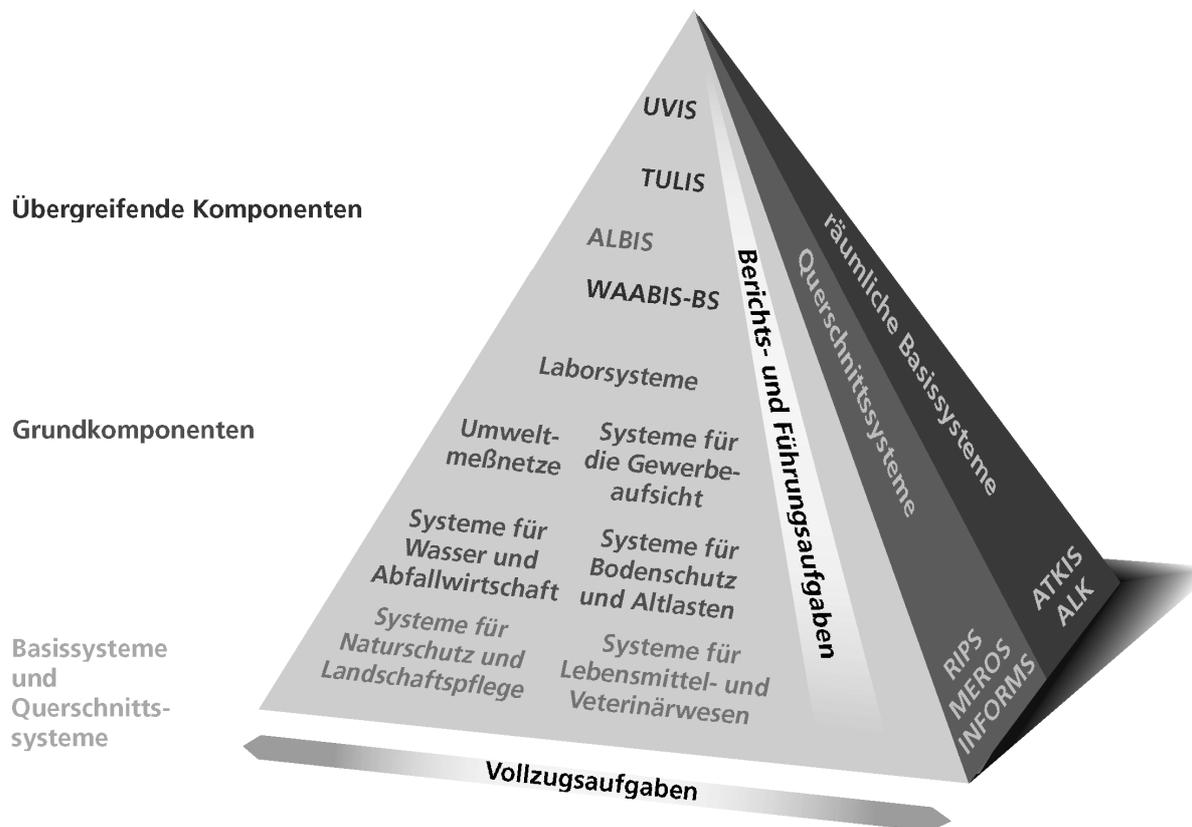


Abb. 9-5 UIS-Pyramide Baden-Württemberg (Quelle: LfU B.-W.)

Ein Regelwerk zur Datenerhebung und Datenpflege soll eine einheitliche Vorgehensweise und damit eine vergleichbare Datenqualität für eine spätere Zusammenführung dieser Geodaten und damit deren weitergehende Nutzung sicherstellen. Als weiterer wichtiger „Werkzeugkasten“ ist das WAABIS-Modul „ArcWaWiBo“⁵⁷ zu nennen, welches neben einem kartografischen Arbeitsplatz zahlreiche Analysewerkzeuge und die Möglichkeit der Geodatenpflege bietet. [Haase et al. 2002]

Die Datengrundlagen werden in einer landesweiten Geodatenbank (WAABIS-Referenzdatenbank) zentral bei der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) in Karlsruhe vorgehalten. Neben den WAABIS-Daten pflegt die LfU auch das UIS-Basissystem „Räumliche Informations- und Planungssystem Informationssystem“ (RIPS). Der RIPS-Datenpool wird den Landesdienststellen über einen Geodatenserver (ORACLE) bzw. per CD-Rom samt einem GIS-ähnlichen Datenviewer ausgeliefert und umfasst Geodatenbestände und dazugehörige Sachinformationen zu Schutzgebieten,

⁵⁷ ArcWaWiBo = ArcView Wasserwirtschaft-Bodenschutz

Biotopen, Altlasten, Gewässern, Einzugsgebieten, Messnetzen etc.. Zudem werden ATKIS- und ALK-Komponenten als Basisdaten zur Verfügung gestellt. [Müller, 2000]

Für die tägliche Arbeitspraxis der Sachbearbeiter der Gewässerdirektionen am Neckar lassen sich die enormen Datenbestände und Informationsdichte des UIS in idealer Weise mit den Ausgangsdaten und Simulationstools des IKoNE-GIS-Arbeitsplatzes verbinden, um die komplexen Anforderungen im Rahmen einer integrierten Bewirtschaftung des Fließgewässersystems und insbesondere des Hochwassermanagements zu erfüllen:

So sind beispielsweise die Flächennutzungsdaten des RIPS-Datenpools in Verbindung mit errechneten Überflutungstiefen einer bestimmten Auftretenswahrscheinlichkeit die entscheidende Grundlage für

- das Flächenmanagement (z.B. Gefahrenkarten, Festlegung ÜSG, Bearbeitung von Baugesuchen, Durchsetzung risikoangepasster Nutzungen),
- die Planung technischer Schutzmaßnahmen (z.B. Festlegung von Bemessungswasserständen)
- sowie die Hochwasservorsorge (z.B. Öffentlichkeitsarbeit, Alarm- und Einsatzplanung).

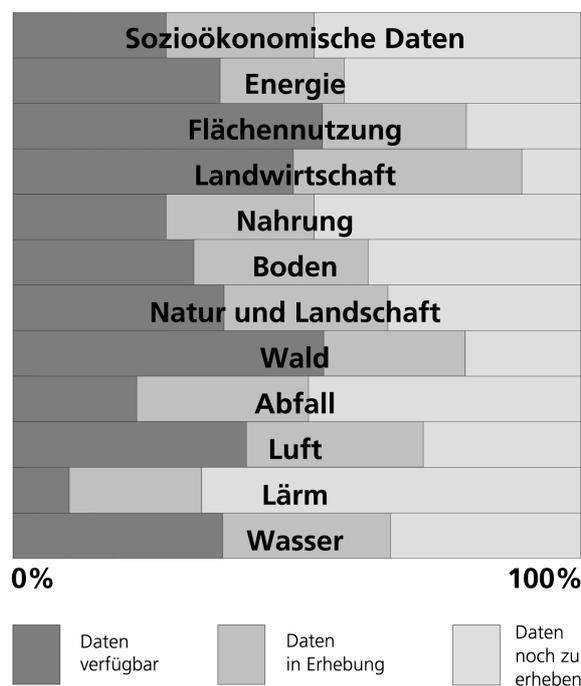


Abb. 9-6 Sachstand zur Erhebung von Umweltdaten in Baden-Württemberg (Quelle: LfU B.-W., 2003)

Die Simulationsergebnisse und Geodatenbestände des Hochwasserinformationssystems fließen wiederum in die gesamtheitliche Bearbeitung der Aufgabenfeldern der Gewässerdirektionen ein und können hierbei in Ergänzung zu den oben genannten Werkzeugkästen ArcWaWiBo und GISGwD die Bereiche

- Baumaßnahmen/Unterhaltung an Gewässern und Anlagen,
- Erarbeitung naturnaher Gewässerentwicklungskonzepten und -pläne (z.B. Auswahl standortgerechter Bepflanzungen),
- Gewährleistung des Grundwasserschutzes (z.B. Lokalisierung von Altlasten im Überflutungsbereich),
- sowie Raumplanung, Bauleitplanungen, Genehmigungsverfahren (z.B. Nachweis der Hochwasserneutralität)

unterstützen. In Abb. 9-6 ist eine Übersicht über den Umweltdatenbestand in Baden-Württemberg (Stand 2003) gegeben.

9.6 Allgemeine Systemversion für GIS-GwD Baden-Württemberg

Zielsetzung des Landes Baden-Württemberg ist der flächendeckende Aufbau GIS-gestützter Hochwassersimulationssysteme, die die Arbeit der Gewässerdirektionen im Rahmen des Hochwassermanagements unterstützen und somit einen nachhaltigen Beitrag zur Reduzierung zukünftiger Hochwasserschäden liefern.

Das im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit entwickelte Hochwassersimulationssystem wurde pilothaft für die Wasserwirtschaftsverwaltung des Neckars entwickelt und ist an die neckarspezifischen Randbedingungen angepasst. So werden die Einzelmodelle und Daten (hydraulische Daten, Geodaten, Kartenmaterial etc.) nach Stauhaltungen geordnet und in einer fest vorgegebenen Verzeichnisstruktur auf den Anwender-PC's abgelegt (siehe Kap.8.7.2). Zur Anwendung der Modelle an den GIS-Arbeitsplätzen ist das Vorhandensein des in dieser Arbeit eingesetzten hydrodynamisch-numerischen Berechnungsprogrammes Voraussetzung. Prinzipiell sind jedoch die im Rahmen der Neckarmodellierung entwickelten Funktionsabläufe zur Ermittlung von Überschwemmungsflächen auf beliebige andere Fließgewässer übertragbar. Auch ist die Koppelung unterschiedlicher WSP-Berechnungsprogramme möglich.

Die Vermessungsämter des Landes und der Kommunen verfügen flächendeckend über topographische Informationen der Flussvorländer, die zukünftig in immer höherer Auflösung und Genauigkeit bereitgestellt werden können⁵⁸. An fast allen Fließgewässern liegen bereits Wasserspiegellagenberechnungen vor oder können in Auftrag gegeben werden. Georeferenzierte Karten und Vektorinformationen zur Flächennutzung sind über die UIS-Komponenten ebenfalls zugänglich.

Als Teilkomponente der UIS-Pyramide Baden-Württemberg wurde im Rahmen des bereits in Kap.9.5 erwähnten Projektes „GIS-Arbeitsplatz für die Gewässerdirektionen“ (GIS-GwD) eine landesweit einheitliche dateibasierte Ablagestruktur für wasserwirtschaftlich relevante Geodaten entworfen, die u.a. die Transparenz der Daten-

⁵⁸ Bis Ende 2004 werden in Baden-Württemberg flächendeckend Laser-Scannerdaten im 1x1m-Raster verfügbar sein. Testdaten für den Neckar wurden bereits im Juni 2003 übergeben.

bestände innerhalb der Dienststellen verbessert [Haase et al., 2002]. Um nun die am Neckar pilothaft entwickelten ICoNE-GIS-Werkzeuge zur Ermittlung von Überflutungsflächen für alle Bereiche der Gewässerdirektionen verfügbar zu machen, wurden diese an das Datenhaltungskonzept von GIS-GwD angepasst und um zusätzliche Optionen erweitert. So wurde beispielsweise eine Funktion entwickelt, welche die teilautomatisierte Erzeugung von ‚Linien gleicher Wasserstände‘ und deren Attributierung (Fluß-km, Gewässername bzw. Gewässerkennzahl) unterstützt. Diese Linien stellen die Grundlage zur Ermittlung eines Rasters der Gewässeroberfläche aus einem Wasserspiegellängsprofil unter Berücksichtigung der Strömungssituation dar.

Das System besteht aus insgesamt fünf Grundfunktionen, die auf die landesweit festgelegte Ablagestruktur von GIS-GwD zugreifen. Die zur Systemanwendung erforderlichen Basisdaten sowie die Ergebnisdaten unterliegen zur Gewährleistung der Konsistenz und Vermeidung von Redundanzen strikten Formatvorgaben und Namenskonventionen. Sie werden entweder bezogen auf das Gewässer, eine Gewässerstrecke, eine Stauhaltung oder kachelweise behandelt.

Eine Auflistung der Basisdaten findet sich in Tabelle 9-3. Eine zusammenfassende Übersicht des Werkzeugkastens mit Kurzbeschreibung der wichtigsten Features ist in Tabelle 9-4 gegeben.

Thema	Format	Eigenschaften	obligator. (X) / optional (O)
Digitales Geländerraster	GRID („Floating Point“)	Auflösung: beliebig	X
Referenzdatei zum DGM	Textdatei (ASCII) mit Metadaten in Kopfzeile	Führt DGM-Kacheln abschnittsweise zusammen	X (bei Kacheln)
Umhüllende des Untersuchungsbereiches	SHAPE (Polygon)	Gebietsbegrenzung	O
Linien gleicher Wasserstände	SHAPE (PolyLine)	Attributierung bzgl. Stationierung und Gewässerkennzahl	O
Wasserspiegellängsprofil	Textdatei (ASCII) mit Metadaten in Kopfzeile	Wasserstände in Abhängigkeit der Gewässerstationierung	X
HW-Schutzmaßnahme	SHAPE (PolyLineZ)	HW-Schutzmaßnahme als 3D-Linie	O
Gewässerlinie	SHAPE (PolyLineM)	Zur Erzeugung der Linien gleicher Wasserstände	X
Referenzdatei zur Gewässerstationierung	Textdatei (ASCII) mit Metadaten in Kopfzeile	Zur stationsbezogenen Erzeugung der Linien gleicher Wasserstände	O

Tabelle 9-3 Basisdaten zur Systemanwendung

LADEN

Das Werkzeug LADEN ermöglicht einen schnellen und einfachen Zugriff auf die in der Verzeichnisstruktur von GIS-GwD abgelegten Geodatenbestände und integriert folgende Features:

- Die Auswahl erfolgt über
 - das Gewässer (wahlweise über den Namen oder die Gewässerkennzahl),
 - den Gewässerabschnitt (<von km bis km> bzw. <stauhaltung>),
 - den Modell-Zustand (Ist-Zustand; Planung Anlage; Planung Gewässer)
 - Auswahl der Planungskennung (anl_01, anl_02, ... bzw. km0-10, km10-20, ...)
 - Auswahl von Planungsvarianten (var_01, var-02, ...)
- Bei kachelweiser Ablage von DGM-Daten können die Kacheln automatisch bezogen auf den gewählten Gewässerabschnitt zusammengeführt („Merging“) werden.
- Die bei der Erzeugung eines Differenzrasters erstellte Referenzdatei mit Metainformationen (Erstellungsdatum, DGM-Grundlage, WSP-Datei) ist einsehbar.
- Um bei großem Datenumfang den Zugriff unter *Windows* zu optimieren, wird automatisch eine Referenzdatei abgelegt, die regelmäßig aktualisiert werden muss.

WSP LIN

Das Werkzeug WSP LIN ermöglicht die Erstellung eines Shapefiles der „Linien gleicher Wasserstände“ (LgW) auf Grundlage einer Gewässerlinie (PolyLineM). Features:

- Schnittpunkte zur Gewässerlinie können wahlweise über die in einer Referenzdatei zur Gewässerstationierung aufgelisteten Kilometerwerte oder über die Definition der Äquidistanz vorgegeben werden.
- LgW werden automatisch orthogonal zur Gewässerlinie erzeugt. Die Gewässerlinie wird hierbei einem Glättungsverfahren unterzogen. Die Länge der Linie (bzw. Vorlandbreite) kann benutzerdefiniert vorgegeben werden.
- Automatische Attributierung bzgl. Gewässernamen, -kennzahl und -stationierung
- Sich überkreuzende Linien werden als solche erkannt und angezeigt

LPRO DIFF

Das Werkzeug LPRO DIFF ermöglicht die automatisierte Erzeugung eines Differenzmodells auf Basis eindimensionaler WSP-Längsprofile und einem DGM. Features:

- Vorgabe der stationsbezogenen Wasserstände wahlweise über
 - Auswahl einer bestehenden Längsprofildatei (analog dem ICoNE-Werkzeug LPRO DIFF)
 - Erzeugung einer Längsprofildatei über interaktive Eingabe von Wasserständen und automatischer linearer Interpolation (analog dem ICoNE-Werkzeug KM LPRO)
- Automatische Erstellung und Archivierung einer Referenzdatei mit Metainformationen zu Erstellungszeitpunkt und Datengrundlagen
- Möglichkeit der interaktiven Editierung der Referenzdatei
- Integriertes Speicherplatz-Management: Temporäre Zwischenspeicherung der Ergebnisse. Falls keine Speicherung durch den Nutzer erfolgt, werden Daten bei Beendigung der Arbeitssession gelöscht.
- Optional: Speicherung des Rasters der Gewässeroberfläche

DIFF POLY (analog ICoNE-Tool)

Das Werkzeug DIFF POLY ermöglicht dem Anwender, aus einem Differenzenraster ein Polygon einer bestimmten Differenz zur Wasserspiegellage zu erzeugen. Features:

- Flächen, die keine offene Verbindung zum Wasserkörper des Flussschlauches haben, werden in einer unterschiedlichen Schattierung dargestellt.
- Überprüfung der Überflutungsgefährdung von Hochwasserschutzmaßnahmen (z.B. mobilen Wänden), welche als PolyLineZ vorliegen

SPEICHERN

Über die Aktivierung der Zusatzfunktion SPEICHERN werden temporär zwischengespeicherte Berechnungsergebnisse in die dateibasierte Ablagestruktur eingegliedert.

Tabelle 9-4 Kurzbeschreibung der landesweit einsetzbaren Version des Werkzeugkastens zur GIS-gestützten Ermittlung von Überflutungsflächen

10 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Angesichts der rasant ansteigenden Schadenpotentiale in den Flusstälern und den weltweit immer häufiger auftretenden Hochwasserkatastrophen ist der Bedarf an räumlich und zeitlich hochaufgelösten Simulationsmodellen als Grundlage der Entscheidungsfindung im Rahmen der Hochwasservorsorge, aber auch im operationellen Einsatz während eines Katastrophenereignisses enorm. Praxistaugliche, an die Anforderungen der Entscheidungsträger angepasste Decision-Support-Systeme sind jedoch trotz der immer größer werdenden Datenverfügbarkeit moderner Monitoring-Systeme erst ansatzweise verfügbar.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde am Beispiel des Neckars ein Modell zur Simulation von Hochwasserabflüssen entwickelt, welches das Fließgewässersystem in seiner gesamten Ausdehnung von über 200 Flusskilometern mitsamt den angrenzenden Talräumen erfasst. Das Modell wurde in die Softwareumgebung eines Geographischen Informationssystems eingebettet und ermöglicht dem Anwender über den Einsatz hydrodynamisch-numerischer Verfahren in Verbindung mit speziell angepassten GIS-Technologien die Simulation beliebiger Abflüsse bzw. Abflusskonstellationen und Quantifizierung der Überflutungsintensitäten in den potenziell gefährdeten Bereichen vor und hinter Schutzanlagen.

In Verbindung mit den regionalisierten Hochwasserkennwerten HQ_T der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) B.-W. können Aussagen zu den Auftretenswahrscheinlichkeiten von Wasserständen und Überschwemmungen gemacht werden, wodurch unter Einbeziehung von Informationen zur Flächennutzung eine wesentliche Grundlage für Risikobetrachtungen und Vorsorgemaßnahmen bereitgestellt wird. Über Modifikation der Systemgeometrie bzw. Parametrisierung der HN-Modelle lassen sich die Auswirkungen von Baumaßnahmen auf den Hochwasserabfluss prognostizieren und Versagensszenarien simulieren. Hierbei spielt die Möglichkeit der instationären Betrachtungsweise des Abflussgeschehens eine entscheidende Rolle, um auch eine Beeinflussung der Entwicklung einer Hochwasserganglinie durch Veränderung der Retentionsvolumina (Nachweis der Hochwasserneutralität) quantifizieren zu können.

Zur Simulation der Strömungsverhältnisse des Neckars wurde ein eindimensionales instationäres HN-Verfahren eingesetzt. Die eindimensionale Betrachtungsweise ist bei den am Neckar vorhandenen überwiegend eindimensionalen Strömungsverhältnissen sowie den geforderten Zielgrößen (Wasserstand, Abfluss) zulässig. Ferner unterstützte auch die Größe des Untersuchungsgebietes mit einer Gesamtlänge von über 200 Flusskilometern sowie die Zielvorgabe, das Modell für die tägliche Arbeitspraxis sowie den operationellen Betrieb bei den Gewässerdirektionen zu implementieren, die Verfahrensauswahl. In einigen wenigen Bereichen mit komplexer Strö-

mungssituation, welche mit der eindimensionalen Methodik für weitergehende Analysen nur unzureichend zu erfassen waren, wurde der zusätzliche Einsatz lokaler zweidimensionaler HN-Modelle erforderlich.

Das Modell basiert des Weiteren auf einem sukzessive aufbereiteten fachspezifischen Geodatenbestand, welcher neben topographischen Daten aus unterschiedlichen Datenquellen (Querprofile, Kanalkataster, topographische Karten etc.) u.a. auch Dokumentationen vergangener Hochwasserereignisse sowie umfangreiches georeferenziertes Kartenmaterial und Orthofotos integriert. Zudem wurden Schnittstellen zu bestehenden Umwelt-Informationssystemen realisiert, so dass die Voraussetzungen für eine gesamtheitliche und interdisziplinäre Betrachtungsweise des Flusssystems im Sinne der EU-Wasserrahmenrichtlinie gegeben sind.

Für den Einsatz des Modells in der Arbeitspraxis der Wasserwirtschaftsverwaltung wurde eine modular strukturierte GIS-Fachschale konzipiert, welche die Modell-, Daten- und Dialogkomponenten des Hochwassersimulationssystems zusammenführt und dem Anwender ermöglicht, über logisch-strukturierte Eingabemasken komplexe Funktionsabläufe automatisiert durchzuführen. Im Rahmen der Entwicklungsphase wurde vor dem Hintergrund der starken Heterogenität der Anwenderprofile darauf geachtet, das verfügbare Bearbeitungspotenzial der Dienststellen effektiv nutzbar zu machen. Die dem System zugrunde liegenden Verfahren und Funktionsabläufe konnten während der mittlerweile mehrjährigen Modellanwendung intensiv bzgl. ihrer Praxistauglichkeit getestet und entsprechend optimiert werden.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass das System auch von weniger erfahrenen Anwendern als vielseitiges Arbeitswerkzeug und Planungsinstrument zur Umsetzung von Hochwasserschutzstrategien genutzt wird. Selbst hochkomplexe dreidimensionale Visualisierungstechniken mit der Option zur Echtzeitnavigation konnten derart in das System implementiert werden, dass diese zukünftig neben Gefahren- und Risikokarten ein gängiges Medium zur Aufklärung der Bevölkerung um die Hochwassergefahr darstellen werden und somit die Motivation zu eigenverantwortlichen Vorsorgemaßnahmen in effektiver Weise fördern können.

Die Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der eingesetzten Verfahren ermöglichen prinzipiell auch den operationellen Modellbetrieb zur Entscheidungsunterstützung während Hochwasserereignissen. So können für jedwede Abflüsse, die von der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) B.-W. vorhergesagt werden, kurzfristig Berechnungen durchgeführt und die zu erwartenden Überflutungen bzw. Gefährdungen ermittelt werden. Modifikationen des Modells (Variantenstudium zu Flutungen, Staustufensteuerung etc.) sind allerdings aufgrund der begrenzten Retentionsvolumina im Neckartal und der geringen Eingriffsmöglichkeiten auf das Abflussverhalten während eines Hochwasserereignisses im operationellen Betrieb nicht notwendig. Für den Einsatz im Hochwasserfall ist es auch schon ausreichend, verschiedene Abflusskonstellationen im Vorfeld zu berechnen und in Form von Gefahrenkarten mit Pegel-

bezug bzw. Szenarienkarten den Anliegergemeinden bzw. dem Katastrophenschutz zur Verfügung zu stellen.

Über eine detaillierte Systemanalyse an einem ausgewählten Streckenabschnitt des Neckars wurden die spezifischen Randbedingungen der Simulation von Hochwasserabflüssen aufgezeigt, Unsicherheiten in Eingangsgrößen sowie Verfahren bewertet sowie deren Auswirkungen auf die maßgebenden Zielgrößen Wasserstand bzw. Überflutungstiefe quantifiziert. Darauf aufbauend wurden Empfehlungen zur Auswahl der Modellierungsmethode erarbeitet und der Handlungsbedarf zur Verbesserung der Modellgüte deutlich gemacht.

Ausblick

Aufgrund der heterogenen topographischen Datengrundlage des Modells ist zur Bewertung der Genauigkeit der errechneten Überflutungsflächen die lagespezifische Analyse der DGM-Basisdaten erforderlich. Vom Landesvermessungsamt (LV) B.-W. werden nun aktuelle Laser-Scanner-Daten für das gesamte Neckartal zur Verfügung gestellt. Die hochgenauen Rasterdaten werden mit einer Auflösung von 1x1 m die bisherigen Geländemodelle ergänzen. Hierdurch wird das Hochwassersimulationssystem Neckar einen deutlichen Zugewinn an Informationsgehalt erfahren. Durch die Homogenisierung der topographischen Datenbasis wird zudem die Interpretation der Modellergebnisse an den dezentralen Arbeitsplätzen vereinfacht und die Modellakzeptanz in der Öffentlichkeit weiter verbessert.

Neben der Aktualisierung der Datengrundlage werden die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Simulationsbausteine um Funktionen zur mikroskaligen Ermittlung der Schadenspotenziale (Vulnerabilitäten) bzw. Schadenserwartungswerte in den gefährdeten Bereichen erweitert. Laufende Forschungsaktivitäten am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik beschäftigen sich mit der Ermittlung zuverlässiger Schädigungsfunktionen (prozentualer Schädigungsgrad in Abhängigkeit der Wassertiefe) und den hierzu erforderlichen Basisdaten für einzelne Objekte bzw. Flurstücke.

Das Hochwassersimulationssystem Neckar und die beim Einsatz in der Arbeitspraxis der Wasserwirtschaftsverwaltung gewonnenen Erfahrungen können auch an anderen Flüssen als Grundlage für den Aufbau fließgewässerbezogener Informationssysteme im Sinne der EU-Wasserrahmenrichtlinie dienen. Für Flusssysteme, bei denen im Gegensatz zum Neckar über kontrollierte Eingriffe während eines Ereignisses (z.B. Polderaktivierung, Staustufensteuerung, Notflutungen) bzw. durch Versagen von Schutzanlagen (Deichbrüche) der Wellenablauf beeinflussbar ist, sind zusätzliche Module zu entwickeln. Diese sollen auch im operationellen Systemeinsatz u.a. den Katastrophenstäben und Einsatzleitungen die Simulation möglicher Eingriffsszenarien ermöglichen und hierdurch die für ein zielgerichtetes Agieren notwendigen Entscheidungsgrößen schnell und zuverlässig liefern.

Langfristig werden derlei Informations- bzw. Decision-Support-Systeme für alle Fließgewässer flächendeckend und in hoher Auflösung verfügbar sein. Inwieweit jedoch das große Potenzial der Simulationssysteme genutzt und letztendlich zu einer nachhaltigen Verringerung der Schadenspotenziale in den Flussgebieten führen wird, hängt von der Ein- und Weitsichtigkeit der politischen Entscheidungsträger und Flussanlieger ab.

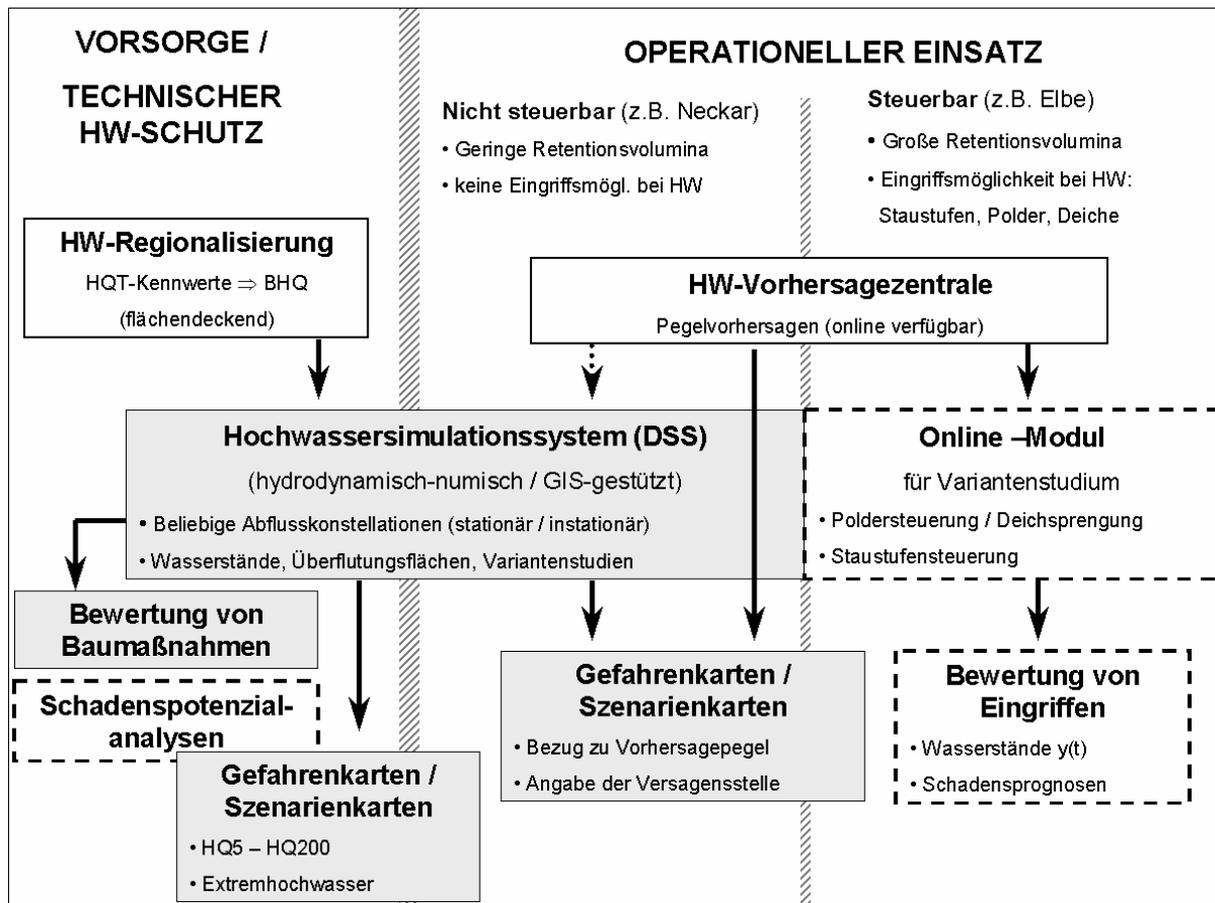


Abb. 10-1 Erweiterung der bestehenden Systembausteine des ICoNE-Modells mit Modulen zur Ermittlung monetärer Schadenerwartungswerte (z.B. Neckar) sowie zur operationellen Simulation und Bewertung möglicher Eingriffe in das Abflussgeschehen (z.B. Elbe)

Literatur- und Quellennachweis

AdV (1998): Informationen der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland unter <http://www.adv-online.de>

Bauer, M. (1997): Vermessung und Ortung mit Satelliten, 4. völlig neu bearb. u. erw. Aufl. Heidelberg: Wichmann

Bechteler, W.; Nujic, M. (2001): Hydraulische und wasserbauliche Grundlagen. In: Patt, H.: Hochwasser-Handbuch – Auswirkungen und Schutz. Berlin: Springer, S. 59 - 168

Becker, A.; Grünewald, U. (2003): Flood Risk in Central Europe. In: Science Vol. 300, 2003, No. 5622, p. 1099

Beffa, C. (1994): Praktische Lösung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen. Mitteilungen 133, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich

Beffa, C. (1997): Benutzerhandbuch zur Software Hydro2de (Version 1.4), Beffa Hydrodynamics, Schwyz

Beffa, C. (2002): Benutzerhandbuch zur Software Flumen (Version 1.1), Beffa Hydrodynamics, Schwyz

Bender, J. (2002): Erstellung von 3D-Ansichten und 3D-Animationen numerischer Hochwassersimulationen am Neckar. Diplomarbeit am Institut für Betriebs- und Dialogsysteme in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH)

Bender, J.; Oberle, P. (2003): Entwicklung von Werkzeugen zur 3D-Visualisierung (Echtzeitnavigation) - Schlussbericht zu Phase ‚Prototyp‘. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik in Zusammenarbeit mit dem Institut für Betriebs- und Dialogsysteme der Universität Karlsruhe (TH) im Auftrag der GwD Neckar, Besigheim

Bergmann, C. (2002): Einfluss diskreter Gitterstruktur auf die Ergebnisse zweidimensionaler HN-Modelle. Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH)

Bertram, H.U. (1985): Über den Abfluss in Trapezgerinnen mit extremer Böschungrauheit. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Mitteilungen 86, TU Braunschweig

Beyene, M. (1992): Ein Informationssystem für die Abschätzung von Hochwasserschadenspotentialen. Mitteilungen 83, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen

Beyene M.; Rubin, C.; Dörr, M. (2000): Flood Plain Mapping with Cellular Algorithms for One-dimensional Water Level Profile Models. In: F. Tönsmann, M. Koch (eds.): River Flood Defence, Vol. 1, Kassel Reports of Hydraulic Engineering No. 9/2000, S. F-107 – F-120

Bismuth, C. (1998): Landnutzung und Hochwasserschutz. In: Dörfler, E.P. (Hrsg.): Ökologie und Hochwasserschutz an der Elbe. 46-56, Dessau

Blaschke, T. (1998): GIS und Fernerkundung wachsen zusammen: Aspekte für den Naturschutz. Proceedings Alfred Töpfer Akademie Geographische Informationssysteme im Naturschutz, 8.-9. Okt. 1998, Schneverdingen

- Bloß, S. (1999):** Flüsse. In: Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, Zusammengest. Von W. Zielke, DVWK Schriften 127, 1999, S. 205 - 251
- Bloß, S. (2003):** Anwendungsbereich 1D-Modelle. In: Bloß, S.; Kleeberg, H.-B. (Hrsg.): Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer : Beitr. Seminar Mai 2003, Stein b. Nürnberg, Hennef : ATV-DVWK, 2003, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; H. 03/2003, S. 135 - 154
- Bloß, S.; Kleeberg, H.-B. (Hrsg.) (2003):** Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer. Beiträge zum Seminar am 12./13.Mai 2003 in Stein bei Nürnberg, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 03.2003; Hennef: ATV-DVWK
- Brockmann, H. (1999):** Einsatz flugzeuggestützter Fernerkundungstechniken zur Bearbeitung hydrologischer Fragestellungen. In: Beiträge und Unterlagen zum Workshop Ermittlung von Überflutungsflächen an Fließgewässern, Karlsruhe 16. - 17. 06. 1999, Verant.: Univ. Karlsruhe , Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik im Auftrag des Min. f. Umwelt u. Verkehr Baden-Württemberg
- Brockmann, H (1998):** Einsatzmöglichkeiten der fluggestützten Laser-Scanner-Technik zur Erfassung räumlich-hydrologischer Informationen an Fließgewässern. In: Deutsche Gewässerkundlichen Mitteilungen Jg. 42, 1998, H. 2, S. 68-75
- Bronstert, A. (2000):** Global Change and Floods: An Introduction; In: European Conference on Advances in Flood Research, Proc., Vol. 1, Eds.: A. Bronstert et al., PIK Report No. 65, (Potsdam Institute for Climate Impact Research)
- BWK (2000):** Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern. Grundlagen für stationäre, eindimensionale Wasserspiegellagenberechnungen. Berichte 1/2000, März 2000
- Caspary, H. (2000):** Increased risk of river flooding in Southwest Germany caused by changes of the atmospheric circulation across Europe. In: European Conference on Advances in Flood Research, Proc., Vol. 1, Eds.: A. Bronstert et al., PIK Report No. 65, (Potsdam Institute for Climate Impact Research), pp. 212 - 223
- Celan, A. (2002):** Simulationswerkzeuge zur Bewirtschaftung von Staustufenketten. Dissertation, Mitteilungen H. 216, Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe
- Cunge, J.A.; Holly, F.M.; Jr.; Verwey, A. (1980):** Practical Aspects of Computational River Hydraulics. Boston: Pitman
- Dapp, K. (2002):** Informationsmanagement in der Planung am Beispiel des vorsorgenden Hochwasserschutzes; Diss., TU Darmstadt; WAR Schriftenreihe Bd. 144
- Disse, M.; Assmann, A. (2003):** Bestimmung der Überflutungsflächen infolge von Deichbrüchen mit GIS-basierten Werkzeugen. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Jg. 47, H. 6, S. 228-233
- Disse, M.; Kamrath, P.; Wilhelmi, J.; Köngeter, J. (2003):** Simulation des Hochwasserwellenablaufes und der Ausbreitung von Überflutungsflächen unter Berücksichtigung von Deichbrüchen. In: Wasserwirtschaft Jg. 93, H. 5, S. 24-29
- Dittrich, A. (1998):** Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer. Mitteilungen 198, Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe

- Dittrich, A. et al. (1996):** Widerstandsverhalten geradliniger gegliederter Gerinne. In: Wasserwirtschaft Jg. 86, H. 10, S. 502-507
- Dorer, H. (1972):** Berechnung des instationären Abflusses in nicht-prismatischen offenen Gerinnen. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Mitteilungsblatt 31, S. 33 - 77
- DVW (Hrsg.) (1991):** GPS und Integration von GPS in bestehende geodätische Netze. Deutscher Verein für Vermessungswesen – Landesverein B.-W. e.V., Sonderheft, 38. Jahrgang
- DVWK (1991):** Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. DVWK Merkblätter 220
- DVWK (1999):** Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern. Zusammen-
gest. von W. Zielke. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Schriften 127
- Engel, H. (1999):** Eine Hochwasserperiode im Rheingebiet – Extremereignisse zwischen
Dez. 1993 und Feb. 1995. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes,
Bericht Nr.I-17
- Engel, H. (2002):** Anthropogene Einflüsse auf extreme Hochwasser in Europa. In: Hydrolo-
gie und Wasserbewirtschaftung Jg. 46, H. 1, S. 34-35
- Fioole, A. (2000):** Spatial interpolation of geographic data with prediction of the random error
– “SURFIS, easy but good. In: Modellierung von Höhendaten für hydrologische Fragestellungen,
Kolloquium, Mai 2000, Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Veranstaltungen
3/2000
- Flood Area.** User manual FloodArea-Extension for ArcView GIS 3.X, geomer GmbH, Geoin-
formatik & Ressourcenmanagement, Heidelberg
- Fröhlich K.-D. (2001):** Rechtliche Grundlagen des Hochwasserschutzes. In: Patt, H.: Hoch-
wasser-Handbuch – Auswirkungen und Schutz. Berlin: Springer, S. 505 - 529
- Fürst, J. (1991):** Entwicklung von Decision-Support-Systemen für die Grundwasserwirtschaft
unter Verwendung geographischer Informationssysteme. Österreichische Wasserwirtschaft
Jg. 43, H. 11/12, S. 271-280
- Fürst, J. (2002):** Anwendung von GIS in Hydrologie und Wasserwirtschaft. In: Studienunter-
lagen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau der Uni-
versität für Bodenkultur Wien
- Gewässerdirektion Neckar (2001):** Dokumentation von Hochwasserständen. IKoNE-
Informationsbroschüre Heft 3, Besigheim
- Gewässerdirektion Neckar (2002):** Hochwassermanagement – Partnerschaft für Hochwas-
serschutz und Hochwasservorsorge. IKoNE-Informationsbroschüre Heft 4, Besigheim
- Haase, M. et al. (1999):** GIS-GwD: GIS-basierte Aufgabenbearbeitung für die Fließgewäs-
serbewirtschaftung. In: Rautenstrauch, C. et al. (Hrsg.): Umweltinformatik '99, Umweltinfor-
matik zwischen Theorie und Industrieanwendung, Marburg: Metropolis-Verlag, Umwelt-
Informatik aktuell Bd. 23
- Haase, M. et al. (2002):** GIS-Arbeitsplatz für die Gewässerdirektionen (GIS-GwD). Ab-
schlussbericht des Forschungsinstituts für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung
(FAW) an der Universität Ulm im Auftrag des Landes Baden-Württemberg

- Hake, G.; Grünreich, D. (1994):** Kartographie, 7. Aufl. Berlin: DeGruyter
- Hansen, W. v.; Vögtle, T. (1999):** Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laser-Scanner-Aufnahmen. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 1999, H. 4, S. 229-236
- Heck, B. et al. (1991):** GPS und Integration von GPS in bestehende geodätische Netze. Deutscher Verein für Vermessungswesen – Landesverein Baden-Württemberg e.V., Mitteilungen, Jg. 38, Sonderheft
- Heck, B. (1991):** Referenzsysteme. In: Heck, B. et al. (1991): GPS und Integration von GPS in bestehende geodätische Netze. Deutscher Verein für Vermessungswesen – Landesverein Baden-Württemberg e.V., Mitteilungen, Jg. 38, Sonderheft
- Heck, B. (1995):** Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung, 2. Aufl., Heidelberg: Wichmann
- Heinemann, E.; Paul, R. (1998):** Hydraulik für Bauingenieure. Stuttgart: Teubner
- Heinrich, B.; Kern, F.-J. (2000):** Hydrologische Informationssysteme für Umweltverwaltung, Wasserwirtschaft und Forschung auf Bundes- und Länderebene. In: Wasser & Boden, Jg. 52, H. 3, S. 4-8
- Heuer, A. (1997):** Objektorientierte Datenbanken. 2. Aufl., Bonn: Addison-Wesley-Longman
- Ihringer, J. et al. (Bearb.), (1999):** Hochwasserabfluss-Wahrscheinlichkeiten in Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Oberirdische Gewässer / Gewässerökologie, H. 54
- Internationale Kommission zum Schutz der Rheins (2001):** Rhein-Atlas. Atlas der Überschwemmungsgefährdung und möglichen Schäden bei Extremhochwasser am Rhein
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (Hrsg.) (2002):** Hochwasservorsorge – Maßnahmen und Ihre Wirksamkeit. Broschüre der IKSR, Koblenz
- Jäger, S. (2002):** Ein neuer Rheinatlas - hydrodynamische Modellierung für eine bessere Hochwasservorsorge. In: arcaktuell Ausgabe 2/2002, S. 38 - 39 2002, Essen
- Jäger, R.; Mierlo, J. v. (1991):** Mathematische Modellbildung bei der Integration von GPS-Konfigurationen in bestehende Netze. In: Heck, B. et al. (1991): GPS und Integration von GPS in bestehende geodätische Netze. Deutscher Verein für Vermessungswesen – Landesverein Baden-Württemberg e.V., Mitteilungen, Jg. 38, Sonderheft
- Jirka, G.H. (1998):** Hydromechanik. Vorlesungen Inst. f. Hydromechanik, Univ. Karlsruhe
- Kappler, J. (2002):** Analyse und Vergleich des Einsatzes hydrodynamisch-numerischer Berechnungsverfahren (1D,2D) zur Simulation des Hochwasserabflusses am Beispiel der Stauhaltung Neckarzimmern (Neckar). Diplomarbeit, Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe
- Kenntemich, W. (2002):** Die Jahrhundertflut. ISBN 3-570-00731-6 München: Bertelsmann Verlag
- Killet, C. (1999):** Einführung eines neuen geodätischen Bezugssystems. AVN 1/1999
- Kleeberg, H.-B., Rother, K.-H. (1996):** Hochwasserflächenmanagement in Flusseinzugsgebieten. In: Wasser und Boden Jg. 48, H. 2, 24-32

- Knopp, G.-M. (2002):** Auswirkungen der EU-WRRRL auf das Wasserrecht in Deutschland. In: Internationales Symposium Flussgebietsmanagement: die neue Herausforderung für die Wasserwirtschaft, München, Jan. 2002, Landesverband Bayern ATV-DVWK
- Kofalk, S. et al. (Bearb.), (2001):** Machbarkeitsstudie zum Aufbau eines Decision Support Systems (DSS). Zusammenfassung des im Auftrag der BfG erstellten Berichts Towards a Generic Tool for River Basin Management -Feasibility Study- . BfG/Projektgruppe ElbeÖkologie, Mitteilung Nr. 8
- Krauter, G. E. (2002):** Ein zweidimensionales Strömungsmodell für die Überflutung größerer Gebiete durch Deichbruch. In: Wasserwirtschaft Jg. 92, H. 11-12, S. 9-20
- Kron, W. (2001):** Versicherung von Hochwasserschäden. In: Patt, H.; Hochwasser-Handbuch, Berlin: Springer, S. 461 - 503
- Kron, W. (2003):** Überschwemmungsschäden und Versicherung. In: Wasserwirtschaft Jg. 93, H. 10, S. 8-12
- Kugele, H. et al. (2002):** GIS-GwD: Praxisgerechte GIS-Anwendungen für die Gewässerdiagnosen in Baden-Württemberg. In: Wasserwirtschaft Jg. 92, H. 10, S. 31-36
- Kujajewski, D. (1999):** Vergleichende Untersuchungen zu den Ursachen und Auswirkungen des Saalehochwassers im April 1994 und des Oderhochwassers im Juli/August 1997
- Kuntz, E. (1983):** Kartennetzentwurfslehre - Grundlagen und Anwendungen. Heidelberg: Wichmann, (Sammlung Wichmann: Buchreihe Band 15)
- Landesanstalt für Umweltschutz B.-W. (2000):** Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch 2000, Rheingebiet, Teil I, Hoch- und Oberrhein
- Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (1999):** Transformation von Koordinaten und Höhen in der Landesvermessung – Teil I: Theoretische Grundlagen. Transformationsrichtlinien; 2. Auflage
- Lange, C. (1995):** Der zukünftige Einsatz von Geo-Informationssystemen in der Fließgewässerplanung. In: Buziek, G. (Hrsg.): GIS in Forschung & Praxis, Stuttgart: Wittwer, S. 277-285
- Liebermann, N. v.; Mai, S. (2001):** Entscheidungsunterstützung im Sturmflutschutz durch Risikoanalyse. In: Wasser & Boden Jg. 53, H.12, S. 1 - 16
- Lindner, K. (1982):** Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen. Mitteilungen H. 75, Leichtweiß-Inst. f. Wasserbau, TU Braunschweig
- LAWA (Hrsg.) (1995):** Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
- Malcherek, A. (2002a):** Hydromechanik der Fließgewässer. Habilitationsschrift, Bericht Nr. 61, Institut für Strömungsmechanik und Elektron. Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, 2001
- Malcherek, A. (2002b):** Numerische Methoden der Strömungsmechanik. Internetskriptum, <http://www.hamburg.baw.de/hnm/nummeth/numerik.pdf>, Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Hamburg
- Matheja, A. (2000a):** GIS-Technologie - Einsatzmöglichkeiten in Wasserbau und Küsteningenieurwesen. HANSA Jg. 137, Nr.3, S.77-81

- Matheja, A. (2000b):** Hochwasserhydraulik - Wahl der Bemessungs- und Einflussgrößen. Unveröffentlicht
- Mertens, W. (1989):** Zur Frage der hydraulischen Berechnung naturnaher Fließgewässer. In: Wasserwirtschaft Jg. 79, H. 4, S.170-179
- Mertens, W. (1994):** Zum Strömungswiderstand naturnaher Fließgewässer. In: Wasserwirtschaft Jg. 84, H. 3, S.138-141
- Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (1999):** Hochwasserfibel - Bauvorsorge in hochwassergefährdeten Gebieten
- Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (2000):** Hochwasserschadenspotenziale am Rhein in Nordrhein-Westfalen
- Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (1999):** Integrierende Konzeption Neckar-Einzugsgebiet. IKoNE-Informationsbroschüre, Stuttgart
- Mock, J.; Theune C. (1988):** Untersuchung über gleichwertige Freibordhöhen der Rheinhauptdeiche im gemeinsamen Rheinabschnitt zwischen Hessen und Rheinland-Pfalz. In: Berichtsband I, Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz, Darmstadt
- Müller, M. (2000):** Umweltinformationen im Räumlichen Informations- und Planungssystem (RIPS). In: Seminar „Öffentliches Digitales Datenangebot in Baden-Württemberg, Veröffentlichung Fachhochschule Stuttgart Hochschule für Technik Band 49
- Naudascher, E. (1987):** Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke. Berlin: Springer
- Nestmann, F. (1996):** Eigenschaften und Nutzungen von Fließgewässern. In: Wasserwirtschaft, Jg. 86, 1996, H. 7/8, S.378-383
- Niekamp, O. (2001):** Hochwasserschäden. In: Patt, H.: Hochwasser-Handbuch, Berlin: Springer, S. 441 - 459
- Niesler, H. (2001):** Parameter- und Sensitivitätsanalyse eines zweidimensionalen numerischen Simulationsprogramms. Diplomarbeit, Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe
- Noll, B. (1993):** Numerische Strömungsmechanik. Berlin: Springer
- Oberle, P. (2002):** Abgrenzung von Hochwassergefahrenflächen für die Stadt Heilbronn. Abschlussbericht im Auftrag des Tiefbauamtes der Stadt Heilbronn, Inst. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe, unveröffentlicht
- Oberle, P. et al. (2000):** GIS-gestützte Hochwassermodellierung am Beispiel des Neckars. In: Wasserwirtschaft Jg. 90, H. 7/8, S. 368-373
- Oberle, P.; Evdakov, O. (2001):** Anpassung der IKoNE-GIS-Werkzeuge zur Ermittlung von Überflutungsflächen an das Datenhaltungskonzept von GIS-GwD Baden-Württemberg. Anwenderhandbuch, Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe, unveröffentlicht
- Oberle, P.; Theobald, S. (2000):** Hydrodynamisches Flussmodell Neckar – Zielsetzungen/Vorgehensweise/ Methoden. Gesamtbericht zur Modellierung der Neckarkaskade im Auftrag der Landesregierung Baden-Württemberg, Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe, unveröffentlicht

- Pasche, E. (1984):** Turbulenzmechanismen in natürlichen Fließgewässern und die Möglichkeit ihrer mathematischen Erfassung. Diss. RWTH Aachen, Mitteilungen, Inst. f. Wasserbau u. Wasserwirtschaft, RWTH Aachen Bd. 52
- Pfefferle, A. (1997):** Interpolation von Querprofilaufnahmen zur Erzeugung digitaler Geländemodelle. Diplomarbeit, Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik / Inst. f. Fördertechnik, Univ. Karlsruhe
- Reich, J. (2004):** Hochwasserschutzstrategie des Landes Baden-Württemberg. In: Wasserwirtschaft Jg. 94, H. 9, S. 13-15
- Renner, J.; Wille, B. (2001):** Die EU-Wasserrahmenrichtlinie – Bedeutung für die Wasserwirtschaft im Wuppergebiet. In: Wasserwirtschaft Jg. 91, H. 11, S. 552 - 557
- Renschler, H. (2000):** IKoNE - Integrierende Konzeption Neckar-Einzugsgebiet: Schlüssel zur Konsensfindung bei der nachhaltigen Bewirtschaftung und Entwicklung der Gewässer im Lebensraum Neckar. In: Wasserwirtschaft Jg. 90, H. 9, S. 434 - 437
- Ritzert, F.; Nestmann, F. (1999):** Nutzen eines digitalen Geländemodells zur Prognose biotischer Entwicklungen am Beispiel von Weich- und Hartholzauenverteilungen. In: Dynamik und Interaktion von Fluss und Aue, Fachtagung Elbe, Mai 1999, Wittenberge, Tagungsbd. Zusammengest. S. Kiene et al.. Karlsruhe : Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe, S. 49
- Röckel, D. (1995):** Der Neckar und seine Hochwasser am Beispiel von Eberbach; Eberbach: Krauth
- Röttger, S.; Heidrich, W.; Slusallek, P.; Seidel, H.-P. (1998):** Real-Time Generation of Continuous Levels of Detail for Height Fields. In: V. Skala (ed.) Proc. WSCG'98, 6th Int. Conf. Cent. Europe on Computer Graphics/Visualization, 2/1998, Plzen, Czech Rep, pp. 315 - 322
- Roesch, N. (1998):** Topologische Beziehungen in Geo-Informationssystemen. Diss., Univ. Karlsruhe
- Schiffler, G.R. (1997):** Abgrenzung von Überschwemmungsgebieten. Studie des Ingenieurbüros Wald & Corbe (Hügelsheim) im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, unveröffentlicht
- Schmidtke, R. (1995):** Sozio-ökonomische Schäden von Hochwasserkatastrophen. In: Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1995 „Hochwassergefahren am Oberrhein“, Wasserbau-Mitteilungen 40, TH Darmstadt, S. 143 - 156
- Schmitt, G. et al. (1991):** Transformationsprobleme. In: Heck, B. et al. (1991): GPS und Integration von GPS in bestehende geodätische Netze. Deutscher Verein für Vermessungswesen – Landesverein Baden-Württemberg e.V., Mitteilungen, Jg. 38, Sonderheft
- Schröder, P.-M. (2003):** Mathematische Formulierung der physikalischen Strömungsprozesse. In: Bloß, S.; Kleeberg, H.-B. (Hrsg.): Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer : Beitr. Seminar Mai 2003, Stein b. Nürnberg, Hennef : ATV-DVWK, 2003, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; H. 03/2003, S. 31 - 55
- Schröder, P.-M.; Forkel, C. (1999):** Math. Beschreibung der physik. Prozesse. In: DVWK (1999): Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern. Zusammengest. von W. Zielke. Dtsch. Verb. f. Wasserwirtschaft und Kulturbau, Schriften 127, S.47 - 81

- Schumacher, F. (1995):** Zur Durchflussberechnung gegliederter, naturnah gestalteter Fließgewässer. Mitteilung Nr. 127, Inst. f. Wasserbau u. Wasserwirtschaft, TU Berlin
- Schwaller, G. (2000):** Das Geographische Informationssystem als Werkzeug für wasserwirtschaftliche Planungsaufgaben. Innsbrucker Geographische Studien Bd. 30, Inst. f. Geographie, Univ. Innsbruck
- Seume, J.R. et al. (2003):** Numerische Strömungsmechanik. Vorlesungsskriptum des Instituts für Strömungsmaschinen der Universität Hannover
- Skriptum ‚Geographische Informationssysteme‘.** Studienunterlagen, Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe (TH)
- Skriptum ‚GIS in der Wasserwirtschaft‘.** Studienunterlagen, Arbeitsbereich Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg
- SOBEK.** Software User Manual, WL | delft hydraulics in cooperation with Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment (RIZA), Netherlands
- Söhngen, B. (1987):** Das Formbeiwertkonzept zur Berechnung des Fließwiderstandes in Rohren und Gerinnen. Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, TH Darmstadt, Nr.39
- Söhngen, B; Koll, K. (1997):** Bemessung von Sohlendeckwerken (künstlich) unter starkem Strömungsangriff. In: Maßnahmen zur naturnahen Gewässerstabilisierung, DVWK Schriften 118, S. 106-134
- SOGREAH Consulting Engineers (1978):** Modelling of unsteady flow in river and flood plain networks using the Carima system
- Theobald, S. (1999):** Numerische Simulation von Staustufenketten mit automatisiertem Betrieb; Mitteilungen 201, Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe
- Vögtle, T.; Steinle, E. (2001):** Erfahrungen mit Laser-Scanner-Daten zur automatisierten 3D-Modellierung von Gebäuden. In: Deutscher Verein für Vermessungswesen (DVW), Landesverein Baden-Württemberg, Mitteilungen H. 2, 48 Jg., Oktober 2001
- Webel, G. (1982):** Turbulente Quervermischung in Gerinneströmungen; Mitteilungen 21, Inst. für Wasserbau III, Univ. Karlsruhe
- Werner, M. v.; Krywkow, J. (WS 1998/1999):** Seminar: Räumlich-digitale Analyse eines mittleren Einzugsgebietes. Inst. f. Geographische Wissenschaften, FU Berlin
- Winterfeldt, F.; Claus, M. (2002):** Hochwasser überschwemmt Baden-Baden; Einsatzbericht zum Helfereinsatz des THW Baden-Baden vom 28.10.1998. <http://www.thw-baden-baden.de>
- Winzen, K. (1996):** Einfluss der Vegetation auf das Widerstandsverhalten eines Gewässerabschnittes an der Murr. Vertiefearbeit, Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe
- Witte, B.; Schmidt, H. (2000):** Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen, 4. Aufl. Stuttgart: Wittwer, (Vermessungswesen bei Konrad Wittwer Bd. 17)

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1-1** Übersicht der seit 1970 von größeren Flutkatastrophen betroffenen Regionen
- Abb. 1-2** Akteure im Hochwassermanagement – Nutznießer des Hochwasserinformationssystems Neckar
- Abb. 2-1** Auswirkungen der Flutkatastrophe 2002
- Abb. 2-2** Nicht monetär bewertbare Folgen eines Hochwasserereignisses
- Abb. 2-3** Rechnerische Veränderungen der Hochwasserwelle 1882/83 durch Ausbau des Oberrheins nach 1955
- Abb. 2-4** Flussbau und Siedlungsentwicklung in hochwassergefährdeten Talzonen bei Unter-/Obertürkheim (Stuttgart) seit Mitte des 19. Jahrhunderts
- Abb. 2-5** Teilstrategien eines nachhaltigen Hochwassermanagements
- Abb. 3-1** Systemkomponenten eines Informations- und Planungsinstrumentes für das Hochwassermanagement
- Abb. 4-1** Massenflüsse durch die Oberflächen eines elementaren Kontrollvolumen
- Abb. 4-2** Kraftansätze bezogen auf ein elementares Kontrollvolumen mit Zylindergeometrie unter Annahme einer reibungsfreien Strömung
- Abb. 4-3** Zeitliche Mittelung eines Strömungsparameters
- Abb. 4-4** Schematische Darstellung der Schubspannungsverteilungen in technischen Querschnittsformen sowie der Schubspannungs- und Geschwindigkeitsverteilungen eines naturnahen Fließgewässerquerschnittes
- Abb. 4-5** Schematische Darstellung der Diskretisierungsmethoden nach Dimensionen
- Abb. 4-6** Generelles Ablaufschema der hydrodynamisch-numerischen Simulation
- Abb. 4-7** 2D-Finite-Differenzen-Geometrie
- Abb. 4-8** Äquidistante und orthogonal strukturierte 2D-Finite-Volumen-Geometrien
- Abb. 4-9** Gegenüberstellung der wesentlichen Merkmale von FD-, FV- und FE-Verfahren
- Abb. 4-10** Strukturkonzepte für Vektordaten in ArcView (ESRI)
- Abb. 4-11** Rasterkonzept in GIS
- Abb. 4-12** Delaunay-Kriterium zur Triangulation und Anwendungsbeispiel
- Abb. 5-1** Verfahrensbezogene DGM-Höhenunsicherheiten u ($S=95\%$), Geländeoberfläche

- Abb. 5-2** Verfahrensbegogene DWM-Höhenunsicherheiten u ($S=95\%$), Wasserspiegel
- Abb. 5-3** Verfahrensbegogene 3D-Linien-Höhenunsicherheiten u ($S=95\%$), Wasser-Land-Grenzlinie
- Abb. 5-4** Exemplarische Überlagerung errechneter Überflutungsflächen mit georeferenzierter DGK5 sowie Vektordatensätzen des ATKIS-DLM
- Abb. 5-5** Überlagerung georeferenzierter Luftbildaufnahmen (vor und während eines Hochwasserereignisses) mit errechneten Überflutungsflächen sowie der digitalisierten Überflutungsgrenze
- Abb. 5-6** Approximation der Erdform als Umdrehungsellipsoide
- Abb. 5-7** Höhenbezugsflächen; Die Nichtparallelität der Potentialflächen führt zu unterschiedlichen Höhendifferenzen beim geometrischen Nivellement
- Abb. 5-8** Schema der transversalen Zylinder-Projektion und Darstellung der Gauss-Krüger-Meridianstreifen
- Abb. 5-9** Dreidimensionale kartesische Koordinaten (X,Y,Z) , geographische Koordinaten (B,L) und ellipsoidische Höhe (h_{ell}) eines Punktes auf der Erdoberfläche
- Abb. 6-1** Darstellung der Überlagerung eines Orthofotos mit den topog. Inform. (Höhenpunkte, Bruchkanten) sowie der Attributstabelle einiger selektierter Punkte
- Abb. 6-2** 3D-Bruchkanten zur Modellierung eines Hochwasserdammes in GIS; die Bruchkanten wurden mittels GIS aus einem CAD-Datensatz zur Baumaßnahme generiert
- Abb. 6-3** Ergebnis der TIN-Interpolation (Originaldaten ohne Bruchkanten (I); Verdichtete Gewässerprofile ohne Bruchkanten (II); Mit Bruchkanten (III))
- Abb. 6-4** Überführung einer TIN-Oberfläche in ein Raster über lineare Interpolation und polynomische Glättungsfunktion
- Abb. 6-5** Exemplarischer Vergleich der Ergebnisse einer IDW-Interpolation
- Abb. 6-6** Ergebnis IDW-Interpolation; räumliche Verteilung der Differenzen zur TIN-Interpolation
- Abb. 6-7** Exemplarischer Vergleich verschiedener Interpolationsverfahren
- Abb. 6-8** Ergebnis der Spline-Interpolation mit exemplarischer Darstellung von Bereichen außerhalb des originären Höhenspektrums
- Abb. 6-9** Qualitative Darstellung der Ergebnisse unterschiedlicher Verfahren zur Interpolation heterogen verteilter Massenpunkte am Beispiel eines ausgewählten Geländequerschnittes
- Abb. 6-10** Interpolation zusätzlicher Querprofile zur Verdichtung der Flussbettdaten und manuelle Definition von Bruchkanten mittels CAD
- Abb. 6-11** Darstellung der Systemtopologie eines 1D-HN-Modells am Beispiel eines Streckenabschnittes des Neckars bei Offenau

- Abb. 6-12** Dreiecksvermaschung zur DGM-Erstellung; Zellstruktur eines 2D-HN-Modells
- Abb. 6-13** Interaktion GIS – Netzgenerator – HN-Programm zur 2D-HN-Simulation auf Basis unstrukturierter Gitter
- Abb. 6-14** Automatisierte Erzeugung attributierter Linien orthogonal zur Gewässerlinie und manuelle Anpassung in starken Krümmungen
- Abb. 6-15** Beispiel einer manuellen Anpassung von „Linien gleicher Wasserstände“ zur Hochwasser-Gefährdungsanalyse vor und hinter Schutzbauwerken; Berücksichtigung der Querneigung über 3D-Linien
- Abb. 6-16** Ablaufschema zur Erzeugung eines kontinuierlichen Oberflächenmodells der Wasserspiegellage auf Basis eindimensionaler Berechnungsergebnisse
- Abb. 6-17** Erzeugung eines Rasters der Differenzen zwischen Geländehöhen und Wasserspiegellage
- Abb. 6-18** Differenzenraster und Überflutungspolygon mit Klassifizierung der rechnerisch überfluteten sowie potenziell gefährdeten Bereiche
- Abb. 6-19** Exemplarische Darstellung errechneter Fließgeschwindigkeitsvektoren am Beispiel der Kochermündung sowie der Neckarkurve bei Heilbronn
- Abb. 6-20** Grundbausteine der Risikoanalyse mit Darstellung der GIS-gestützten Teilkomponenten
- Abb. 7-1** Gegenüberstellung der Anforderungen und Fehlerquellen der Simulation von Hochwasserabflüssen
- Abb. 7-2** Lageplan zum Untersuchungsgebiet und Darstellung des Digitalen Geländemodells mit Flusskilometrierung
- Abb. 7-3** Gitterstruktur des 2D-HN-Modells (4x4 / 10x10m) und Lage der Querprofile des 1D-HN-Modells im Vergleich zur Überflutungsgrenze des Hochwassers 1993
- Abb. 7-4** Vergleich der kalibrierten Wasserspiegellängsprofile für $HQ_{100} = 2610 \text{ m}^3/\text{s}$ für die Basismodelle 1D und 2D (in Flussmitte)
- Abb. 7-5** Auswirkungen der Profilerweiterung Δx auf die durchströmte Fläche ΔA bei HQ_{100}
- Abb. 7-6** Auswirkungen der Profilerweiterung auf die berechneten Wasserstände $HQ_5 - HQ_{100}$
- Abb. 7-7** Einfluss der Gitterweite der 2D-Systemgeometrie auf die Berechnungsergebnisse sowie die Berechnungsdauer eines Simulationsdurchgangs
- Abb. 7-8** Repräsentative Geschwindigkeitsprofile quer zur Flussachse bei km 91,5
- Abb. 7-9** Geometrie der Versuchsstrecke zur Analyse des Einflusses der Auflösung eines unstrukturierten 2D-Berechnungsgitters

- Abb. 7-10** Einfluss der Gitterstruktur auf die berechneten Wasserstände und Fließgeschwindigkeitsverteilungen
- Abb. 7-11** Einfluss der Variation des Rauheitsparameters k_{st} auf die 1D und 2D errechneten Wasserstände
- Abb. 7-12** Einfluss der Variation der Abflussmenge Q auf die 1D und 2D errechneten Wasserstände
- Abb. 7-13** Linien gleicher Wasserstände und Vergleich der Isohypsen (rot:1D,weiß:2D) bei HQ_{100} mit einer Äquidistanz von $\Delta y = 0,2$ m
- Abb.7-14** Differenzen zwischen den 1D und 2D ermittelten Wasserspiegellagen bei $Q = 2610$ m³/s (HQ_{100})
- Abb. 7-15** Differenzen zwischen der über ‚Linien gleicher Wasserstände‘ interpolierten Wasseroberfläche und den originären zweidimensionalen Berechnungsergebnissen
- Abb. 7-16** Differenzen zwischen der über ‚3D-Linien‘ unter Berücksichtigung der Querneigung interpolierten Wasseroberfläche und den originären zweidimensionalen Berechnungsergebnissen
- Abb. 7-17** Sensitivität der Überflutungsfläche der Stauhaltung Neckarzimmern in Abhängigkeit der Wasserspiegellage
- Abb. 7-18** Darstellung der Auswirkungen von Unsicherheiten in Eingangsdaten und Modellparametern auf die errechneten Überschwemmungsflächen innerhalb der Ortslage Hassmersheim; Luftbildaufnahme Hochwasser 1993
- Abb. 7-19** Zusammenfassung charakteristischer Ergebnisse der vergleichenden Sensitivitätsanalyse zur Stauhaltung Neckarzimmern bezogen auf HQ_{100}
- Abb. 8-1** Der schiffbare Neckar und seine wichtigsten Zuflüsse; Verteilung der Landnutzung (rot: Ballungsgebiete; gelb: Siedlungsflächen; grün: Wald- und Wiesenflächen) im Neckareinzugsgebiet
- Abb. 8-2** Übersichtsplan zur Staustufenkaskade
- Abb. 8-3** Historische Neckar-Hochwasser dokumentiert in Eberbach
- Abb. 8-4** Gemessene Hochwasserabfluss-Ganglinien am Pegel Heidelberg für die Ereignisse 1988, 1990 und 1993
- Abb. 8-5** Ergänzung des eindimensional instationären Gesamtmodells Neckar mit lokalen zweidimensionalen Modellen
- Abb. 8-6** Aufbau der Modelltopologie eines 1D-Flussabschnittes: Stützpunkte und Strecken, vernetzte Systeme, seith. Zuflüsse, Brückenbauwerke
- Abb. 8-7** Aufbau der Modelltopologie eines 1D-Flussabschnittes mit Anbindung von Retentionszellen (ungesteuert / gesteuert)

- Abb. 8-8** Profilbezogene Zuweisung von Widerstandsbeiwerten: Bereichsweise / wasserstandsabhängig
- Abb. 8-9** Statistische Auswertung der Kalibrierungsergebnisse (Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Scheitelwasserständen)
- Abb. 8-10** Stationäre Kalibrierung der HN-Modelle der Stauhaltungen Neckarzimmern und Poppenweiler
- Abb. 8-11** Vergleich der Messwerte mit Bezug zur jeweiligen Krümmungseigenschaft der Untersuchungsstrecke
- Abb. 8-12** Häufigkeitsverteilungen der Wasserstandsdifferenzen ($\Delta y = y_{\text{Außen}} - y_{\text{Innen}}$) in Abhängigkeit der Krümmungsklassifizierung des Flusslaufes
- Abb. 8-13** Hochwasser 1990: Vergleich gemessener und berechneter Abflussganglinien am Pegel Rockenau bzw. Wasserstandsganglinien am Pegel Gundelsheim
- Abb. 8-14** Hochwasser 1993: Vergleich gemessener und berechneter Abflussganglinien am Pegel Rockenau bzw. Wasserstandsganglinien am Pegel Gundelsheim
- Abb. 8-15** Ermittlung der Abflusskurven für das Oberwasser der Wehranlagen am Beispiel der Wehranlage Hirschhorn
- Abb. 8-16** Simulationsergebnisse bei Neckar-km 32+0 mit und ohne Berücksichtigung der Retentionsvolumina: Laterale Modellzuflüsse entsprechend HW 1990; $Q(t)$ der seitlichen Zuflüsse konstant
- Abb. 8-17** Vergleich eines berechneten Überflutungspolygons mit Scheiteldokumentationen unterschiedlicher Herkunft
- Abb. 8-18** Exemplarische Darstellung der räuml. Verteilung von Kanaldeckelhöhen innerhalb einer Ortslage sowie Vergleich der auf Basis der terrestr. Vermessungsdaten und Laser-Scannerdaten errechneten Überflutungsfläche HQ_{100}
- Abb. 8-19** Benutzeroberflächen *WSP STAT* und *LPRO DIFF* zur Durchführung einer hydraulischen Berechnung und Ermittlung abflussbezogener Überflutungsflächen
- Abb. 8-20** Benutzeroberfläche *DIFF POLY* zur autom. Erzeugung von Überflutungspolygonen mit Klassifizierung der überfluteten und potenziell gefährdeten Flächen
- Abb. 8-21** Interaktive 3D-Echtzeit-Navigation durch Geodatenbestände zur Hochwassersimulation (Beispiel: Neckarhochwasser 1993 bei Mosbach)
- Abb. 8-22** Vergleich der Netzauflösung vor und nach der Reduktion
- Abb. 8-23** Prinzip des Kachelmanagers zur 3D-Echtzeitnavigation durch beliebig große Datenbestände
- Abb. 9-1** Exemplarische Überlagerung hochwasserrelevanter Daten im GIS am Beispiel des Neckars
- Abb. 9-2** Ergebnis der Studie zum Entwurf einer Hochwasser-Szenarienkarte (Typ I)
- Abb. 9-3** Ergebnis der Studie zum Entwurf einer Hochwasser-Szenarienkarte (Typ II)

- Abb. 9-4** Luftbild des urban geprägten Untersuchungsgebietes der Stadt Heilbronn und Analyse der Auswirkungen eines Versagens des Sperrtores
- Abb. 9-5** UIS-Pyramide Baden-Württemberg
- Abb. 9-6** Sachstand zur Erhebung von Umweltdaten in Baden-Württemberg
- Abb. 10-1** Erweiterung der bestehenden Systembausteine des IKoNE-Modells mit Modulen zur Ermittlung monetärer Schadenerwartungswerte (z.B. Neckar) sowie zur operationellen Simulation und Bewertung möglicher Eingriffe in das Abflussgeschehen (z.B. Elbe)

LEBENS LAUF

Name: Oberle
Vorname: Peter Alexander
Familienstand: verheiratet, 2 Kinder
Geburtsdatum: 01. Mai 1969
Geburtsort: Karlsruhe

Schul Ausbildung:

1975 – 1979 Grundschule in Karlsruhe-Durlach
1979 – 1988 Markgrafen-Gymnasium in Karlsruhe-Durlach
1988 Abitur in den Leistungskursen Physik / Englisch

Zivildienst:

1988 – 1990 Alten- und Schwerstbehindertenbetreuung in Karlsruhe

Studium:

1990 – 1997 Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Karlsruhe (TH)
1997: Diplomabschluss in der Vertieferrichtung Wasserbau

Beruf:

seit 1997 Wissenschaftler Angestellter am Institut für Wasser und Gewässer-
entwicklung der Universität Karlsruhe (TH)
seit 2003 Stellv. Leiter der Abteilung „Numerische Modelle im Wasserbau“

Karlsruhe, im April 2004

*Bisher erschienene Mitteilungen aus dem
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung
-Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik-*

***Bisher erschienene Mitteilungen aus dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung,
Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik***

- Heft 154/1968* *Ein Beitrag zur Erforschung von örtlichen Auskolkungen hinter geneigten Befestigungsstrecken in Abhängigkeit der Zeit; E. Mosonyi, B.Schoppmann
Institutsberichte über die Modellversuche seit 1962
Institutsberichte über die Exkursionen des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft seit 1965; E. Mosonyi, B. Schoppmann*
- Heft 155/1969* *Kolkbildung in feinen oder leichten Sohlmaterialien bei strömendem Abfluß; J.W. Dietz*
- Heft 156/1969* *Widerstandskräfte und Energiedissipation bei Verteilerklötzen im Wechselsprung; R. Muser
Schwebstoffführung feinsandiger Wasserläufe; St. Bruk*
- Heft 157/1969 °* *Widerstand schräg angeströmter Rechengitter; J. Zimmermann
Untersuchungen zur Durchströmung des Kraghammer Sattels an der Biggetalsperre nach neuentwickelten Methoden der Felshydraulik;
W.Wittke, Cl. Louis*
- Heft 158/1970 °* *Hydrodynamik der nichtstationären Dränung; G. Karadi, J. Gyuk, R.A.Williams
An Experimental Study of Thin-Sheet Flow over Inclined Surfaces; O.N Wakhlu
Schiffsträgheitskräfte als Indikator für die Güte von Schleusenfüllsystemen; E. Mosonyi, R. Muser
Schwall- und Sunkerscheinungen aus Schleusenbetrieb in Schiffahrtskanälen; Maßnahmen zur Sicherung des Schiffahrtsbetriebes; R. Muser, G. Meder
Beitrag zur Berechnung von Schleusenfüllungen; H.H. Bernhart
Spitzenmaßstab und L-O-Integrator, ein Gerät zur genauen Messung des Wasserspiegels in Modellversuchen; W. Götz, K. Schwedes
Turbulenzmessungen in Wasser mit Heißfilmanemometer;
B. Schoppmann
Messung von Größe und Richtung der mittleren Geschwindigkeit in einem zweidimensionalen Strömungsfeld; K. Schwedes
Parameterfreie statistische Methoden zur Analyse von Datenreihen;
H. Eggers
Dreidimensionale, anisotrope Kluftwasserströmung; W. Wittke*
- Heft 159/1972 °* *Ein Verfahren zur Richtungs- und Betragsbestimmung von Vektoren mittlerer Strömungsgeschwindigkeit einer turbulenten Strömung;
K.Schwedes, H. Weiher
Hydraulische Stabilität bei Wasserkraftanlagen; H. Berge
Land Reclamation Projects as Essential Elements of Economic Development Programmes; G.E. Papadopoulos
Institutsberichte über Modellversuche u. Forschungsarbeiten seit 1969
Institutsberichte über die Exkursionen des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft seit 1969*

- Heft 160/1973 *Das Widerstands-Kapazitätsnetzwerk zur Simulation instationärer Grundwasserströmungen; A. Widmer*
Der elektrolytische Trog zur Lösung stationärer dreidimensionaler Grundwasserströmungsfälle; U. Stentzel, K. Schwedes
Standfiltermodelle mit und ohne Überströmung zur Untersuchung von Selbstdichtungsmechanismen an Gewässersohlen; S.G. van Riesen
Anhang: Veröffentlichungen, Vorträge, Dissertationen der Abteilung für Kulturtechnische Untersuchungen (Lehrgebiet Landwirtschaftlicher Wasserbau) auf dem Gebiet der Grundwasserforschung
- Heft 161/1974 *Strömungs- und Transportmechanismen einer fortschreitenden Auskolkung; B. Schoppmann*
Water Resources Development in the U.A.R.; F. Nicola
- Heft 162/1974 ° *Dünnschichtabfluß auf stark geneigter Ebene; G. Karantounias*
Die Entwicklung der Sparschleusen des Main-Donau-Verbindungskanals mit besonderer Betrachtung der Sparschleuse Leerstetten; R. Muser
Neuere Methoden für die Analyse hydrologischer Systeme; G.M. Karadi
Die Impedanz eines axial oszillierenden Sphäroids in einem nicht zusammendrückbaren Medium; R.Y.S. Lai, G.M. Karadi
- Heft 163/1975 ° *Sekundärströmungen in aufeinanderfolgenden Gerinnekrümmungen; W. Götz*
Darstellung von skalaren Zustandsfeldern in beliebigen Kontrollräumen und ihre Nutzungsanwendung in der Hydrostatik mit Hilfe eines neuen Verfahrens der Vektoranalysis; M. Spielbauer
Die Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit für deutsche Flußgebiete; D. Koberg, H. Eggers, W. Buck
Drei Jahrzehnte operationelle Hydrologie; E. Walser
- Heft 164/1976 *Einfluß der Schließzeit auf die Druckstoßtransmission durch Wasserschläsler; H.H. Bernhart*
Verstärkung und Erhöhung von Betonstaumauern; E. Vallarino
- Heft 165/1976 *Die Auswahl des Bemessungshochwassers als ein Entscheidungsproblem unter Risiko und Ungewißheit; W. Buck*
- Heft 166/1977 *Einfluß von Sickerströmungen auf den Geschiebetransport; K.E. Wedemann*
- Heft 167/1979 *Der Einfluß seltener Ereignisse bei der Bestimmung der Hochwasserwahrscheinlichkeit; H. Eggers*
Statistisch erzeugte Serien von Hochwasserwellen; S. Weingärtner
- Heft 168/1982 *Strömungscharakteristiken in einem Kanal mit 180°-Krümmungen; W. Siebert*
Bestimmung des Bemessungshochwassers mit Hilfe der Clusteranalyse; W. Kiefer

- Heft 169/1982 Entwurfskriterien zur Schleusenplanung; H.H. Bernhart*
- Heft 170/1984 Druckerhöhungen durch instationäre Vorgänge in Schiffsschleusen mit großen Stufenhöhen; P.M. Schmelzle*
- Heft 171/1984 Beitrag zur Hydromechanik von Schwall- und Sunkwellen; N. Göbel*
- Heft 172/1985 Abschiedskolloquium zu Ehren von Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.rer.techn., Dr.sc.h.c., Dr.-Ing. E.h., Dr.sc.h.c., Dr.sc.h.c. E. Mosonyi*
- Heft 173/1986 ° Vor- und Nachteile des naturnahen Gewässerlaufes im Vergleich zu kanalisierten Fließgewässern; H. Willy*
- Heft 174/1986 Naturnahe Umgestaltung ausgebauter Fließgewässer. Beiträge zum Wasserbaulichen Kolloquium am 14.02.1986 in Karlsruhe*
- Heft 175/1986 ° Naturnahe Umgestaltung ausgebauter Fließgewässer Projektstudie; K. Kern, I. Nadolny*
- Heft 176/1987 ° Der Einfluß von Querströmungen auf ein Schiff bei beschränkten Fahrwassertiefen; F. Bakowies*
- Heft 177/1988 Zur Bemessung von Geschiebeabzügen; G.M. Kley*
- Heft 178/1988 Hydraulik der kontinuierlichen und intermittierenden Furchenbewässerung: ein hydrodynamisches Modell; M. Awwad*
- Heft 179/1990 Sturzwasserbewässerung. Bewässerung mit Niederschlagswasser ohne Zwischenspeicherung im Sahel; W. Klemm*
- Heft 180/1991 Beiträge zur naturnahen Umgestaltung von Fließgewässern*
- Heft 181/1991 ° Naturgemäße Bauweisen von Sohlenbauwerken und Fischaufstiegen zur Vernetzung der Fließgewässer; R.-J. Gebler*
- Heft 182/1991 Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten von Gerinnesohlen; A.Dittrich, M. Rosport, O. Badde*
- Heft 183/1993 Der Einfluß der Belüftung auf die Kavitationserosion; N. Eisenhauer*
- Heft 184/1993 nur als Buch erhältlich bei Springer Verlag: Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung. Geomorphol. Entwicklung von Fließgewässern; K. Kern*
- Heft 185/1993 Ausbauoptimierung dezentraler Wasserkraftsysteme; H. Hildebrand*
- Heft 186/1994 Turbulente, abgelöste Zweischichtenströmung über Sohlschwellen in einem offenen Rechteckgerinne; U. Kertzcher*
- Heft 187/1994 Untersuchung des Niederschlags- und Abflußgeschehens im westafrikanischen Sahel. Abschätzung des Wasserdargebots aus kleinen*

- Einzugsgebieten mittels stochastischer Methoden unter Verwendung von Satellitenbilddaten; W. Tauer*
- Heft 188/1994 Bedarfsprognosen als Basis der Steuerungsoptimierung von Wasserversorgungssystemen; S. Ates*
- Heft 189/1994 Morphologie und Hydrologie naturnaher Flachlandbäche unter gewässertypologischen Gesichtspunkten - Gewässermorphologische und hydrologische Grundlagen für naturgemäßen Wasserbau und ökologische Gewässerentwicklung; I. Nadolny*
- Heft 190/1994 Ein Erosionsmodell mit räumlich und zeitlich veränderlicher Rillenmorphologie; M. Schramm*
- Heft 191/1995 Oberflächenabfluß und Bodenerosion in Kleineinzugsgebieten mit Mergelböden unter einem semiariden mediterranen Klima; D. Gomer*
- Heft 192/1995 Typologische und morphologische Untersuchungen an Bergbächen im Buntsandstein-Odenwald; G. Humborg*
- Heft 193/1997 Die Oberrheinkorrektion in Baden - Zur Umweltgeschichte des 19. Jahrhunderts; T. Löbert*
- Heft 194/1997 Erosionsprozesse auf Lößböden: Experimente und Modellierung; K. Gerlinger*
- Heft 195/1997 Synthese von biologischer und wasserbaulicher Analyse zur Bewertung von renaturierten Fließgewässern der Oberrheinebene; S. Kiene*
- Heft 196/1997 Fließwiderstand und Sohlstabilität steiler Fließgewässer unter Berücksichtigung gebirgsbachtypischer Sohlstrukturen; M. Rosport*
- Heft 197/1997 Ein Finite-Punkte-Verfahren für stationäre zweidimensionale Strömungen mit freier Oberfläche; C.J. Du*
- Heft 198/1998 Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer; A. Dittrich*
- Heft 199/1999 Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen - Grundlagen, Leitbilder, Planung; J. Scherle*
- Heft 200/1999 Zwei-Schichtenströmungen über Sohlenschwellen bei intern überkritischer Strömung; Y. Wang
Hydraulic Design Considerations for Low- and High-Head Gates; E. Naudascher*
- Heft 201/1999 Numerische Simulation von Staustufenketten mit automatisiertem Betrieb; S. Theobald*
- Heft 202/1999 Der Einfluß von kurzen Gehölzstreifen auf den Hochwasserabfluß in Flüssen mit gegliedertem Querschnitt; K. Becker*

- Heft 203/1999* *Typisierungskonzept zur Festlegung einer ökologisch begründeten Mindestwasser menge; M. Scherer*
- Heft 204/1999* *Inseln und deren Widerstandsverhalten in Fließgewässern; A. Maryono*
- Heft 205/1999* *Boden- und Wasserschutz in landwirtschaftlich genutzten Gebieten der Mata Atlântica Brasiliens; M. Kunzmann*
- Heft 206/2000* *Nutzung von Landsat Thematic Mapper Daten zur Ermittlung hydrologischer Parameter; S. Belz (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 207/2000* *Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluß; J. Aberle (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 208/2000°* *Three Dimensional Computation of Turbulent Flow in Meandering Channels; V. T. Nguyen*
- Heft 209/2001* *Sedimenttransportprozesse im Himalaya-Karakorum und ihre Bedeutung für Wasserkraftanlagen; S. Palt (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 210/2002* *Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald); M. Casper (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 211/2001* *Einfluß von Regelungsbauwerken auf die Wasserspiegellagen in Flüssen; F. Ritzert (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 212/2001* *Konzept für einen ganzheitlichen Gewässerschutz; W. Hauck*
- Heft 213/2002* *A Hydrodynamic-Numerical Model of the River Rhine; P. T. Minh Thu (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 214/2002* *Zur hydraulischen Systemanalyse von Wasserversorgungsnetzen; J. Deuerlein (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 215/2002* *Feststofftransport und Geschwindigkeitsverteilung in Raugerinnen; K. Koll (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 216/2002* *Simulationswerkzeuge zur Bewirtschaftung von Staustufenketten; A. Celan*
- Heft 217/2002* *Deutsch-Russisches Wörterbuch für Wasserwirtschaft; R. Krohmer,*

I.S. Rumjanzev

- Heft 218/2002 Entwurfsoptimierung städtischer Abwasserentsorgungsnetze; I. V. Domínguez Talavera (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 219/2002 Kontrolle von Barrieren: Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit an Hand des Bodenwassergehaltes; R. Schuhmann (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 220/2003 Langfristige, hydrologische Betrachtung der Grundwasserdynamik am Beispiel der Mittleren Elbe; P.-A. Burek (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 221/2003 Wassermengenbewirtschaftung im Einzugsgebiet der Ruhr: Simulation und Echtzeitbetrieb; T. Brudy-Zippelius (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 222/2004 Russisch-Deutsches Wörterbuch für Wasserwirtschaft; R. Krohmer, I.S.Rumjanzev*
- Heft 223/2004 Mobilisierung und Immobilisierung von mineralischen Feinstkornaggregaten an Gewässersohlen; J.-W. Kim (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 224/2004 Strömungsstruktur und Impulsaustausch in gegliederten Gerinnen mit Vorlandvegetation; I. Schnauder (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 225/2004 Towards Decision Support Models for Un-gauged Catchment in India, The Case of Anas Catchment; A. K. Singh (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 226/2004 Integrales Hochwasser-Simulationssystem Neckar – Verfahren, Werkzeuge, Anwendungen und Übertragung; P. Oberle (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 227/2004 Small Hydropower Plants Based Power Systems for Remote Regions; R. K. Maskey (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 228/2004 Spatial Time Domain Reflectometry and its Application for Monitoring Transient Soil Moisture Profile; R. Becker (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 229/2005 River Flood Prediction Systems: Towards Complementary Hydrodynamic, Hydrological and Data Driven Models with Uncertainty Analysis; R. Shrestha (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*

Heft 230/2005 *Empfehlungen zur naturnahen Gewässerentwicklung im urbanen Raum
–unter Berücksichtigung der Hochwassersicherheit–; B. Lehmann (auch
elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*

Heft 231/2005 *Einfluß der Oberflächenströmung auf die permeable Gewässersohle; S.
Vollmer (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*

Heft 232/2005 *Optimization of Internal Hydraulics and of System Design for PUMPS
AS TURBINES with Field Implementation and Evaluation; P. Singh
(auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*

Bestellungen an: *Institut für Wasser und Gewässerentwicklung
-Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik-
Bibliothek
Universität Karlsruhe
Kaiserstr. 12
D-76131 Karlsruhe
Tel.: (0721) 608 6389
Fax: (0721) 60 60 46
e-mail: raskob@iwg.uka.de*

° vergriffen