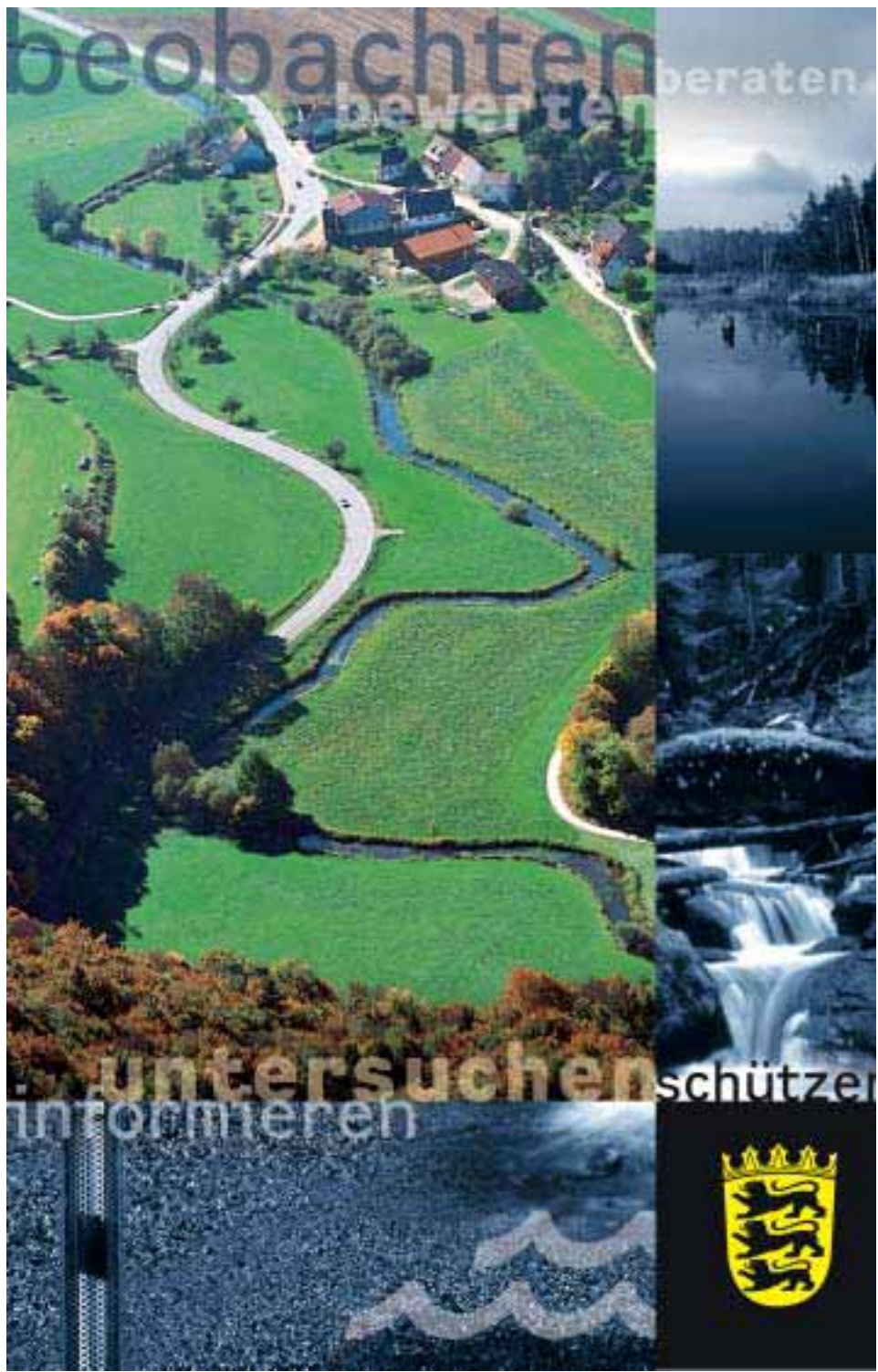


Hydraulik naturnaher Fließgewässer

Teil 4 – Numerische Modelle zur
Strömungssimulation



Hydraulik naturnaher Fließgewässer

Teil 4 – Numerische Modelle zur
Strömungssimulation



Herausgegeben von der
Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
1. Auflage
Karlsruhe 2003

IMPRESSUM

Herausgeber	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 76157 Karlsruhe · Postfach 21 07 52, http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de
ISSN	1436-7882 (Bd.79, 2003)
Bearbeitung	Universität Karlsruhe (TH), Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik
Redaktion	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Abteilung 4 – Wasser und Altlasten Heinz Daucher, Bernd Karolus
Umschlaglayout	Stefan May • Grafik-Design, 76227 Karlsruhe
Titelbild	Jutta Ruloff • Dipl. Designerin, 76275 Ettlingen
Druck	Stork Druckerei GmbH, 76646 Bruchsal
Umwelthinweis	gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier
Bezug über	Verlagsauslieferung der LfU bei JVA Mannheim - Druckerei, Herzogenriedstr. 111, 68169 Mannheim Telefax 0621/398-370
Preis	9 €

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

1 Hinweise zum Leitfaden	6
2 Modelleinsatz in der Wasserwirtschaft.....	12
2.1 Modellarten.....	12
2.1.1 Hydrologische Flussmodelle.....	13
2.1.2 Physikalische – oder hydrodynamisch-numerische Modelle	13
2.1.3 Stofftransportmodelle, Stoffhaushaltsmodelle, Geschiebemodelle, Schwebstoffmodelle, Gewässergütemodelle	14
2.1.4 Kombination der Modelle	15
2.2 Hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modelle).....	17
2.2.1 Begriffsbestimmung / Merkmale	17
2.2.2 Einsatzbereiche	18
3 Mathematische Beschreibung von Fließgewässern	20
3.1 Beschreibung der Prozesse	20
3.2 Modellgleichungen	21
3.2.1 3D-Modellgleichungen.....	22
3.2.2 2D-Modellgleichung (tiefengemittelt).....	23
3.2.3 1D-Modellgleichung.....	23
3.2.4 Anfangsbedingungen.....	23
3.2.5 Randbedingungen	23
3.3 Numerische Lösungsverfahren	24
4 HN-Simulation von Fließgewässern.....	27
4.1 Auswahl der Modellierungsmethode	27
4.1.1 Dreidimensionale (3D-) Modelle	27
4.1.2 Zweidimensionale (2D-) Modelle	28
4.1.3 Eindimensionale (1D-) Modelle	28
4.2 Modellaufbau / Modellerstellung.....	29
4.3 Modellkalibrierung / Modellgüte.....	30
4.3.1 Modellgenauigkeit und Fehlerquellen.....	31
4.3.2 Verifikation.....	31
4.3.3 Kalibrierung	31
4.3.4 Validierung.....	32

5 Praktische Beispiele	33
5.1 3D-Modellanwendungen	33
5.2 2D-Modellanwendungen	36
5.3 1D-Modellanwendungen	37
6 Übersicht zu kommerziellen numerischen Softwarepaketen	40
6.1 HEC-RAS River Analysis Package	40
6.2 WSPWIN	41
6.3 FLUSS	41
6.4 Jabron	41
6.5 CFX	41
6.6 MIKE11	41
6.7 FLOWMASTER	41
7 Kopplung von GIS mit hydronumerischen Programmen	42
8 Testdatensatz mit Naturmessdaten	47
9 Excel Programm „Hydraulische Berechnung von Fließgewässern“	54
10 Literatur	55

Hydraulik naturnaher Fließgewässer

Teil 1: Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren

- Hydraulische Grundlagen; allgemeines Fließgesetz
- Ansatz zur Abflussberechnung nach Gauckler-Manning-Strickler; Definition des Rauheitsbeiwertes k_{st}
- Literaturangaben für den Rauheitsbeiwert k_{st} (tabellarischer Vergleich)
- Erfassen und Bewerten von Bewuchs, Geschwemmsellinien, Hochwassermarken und Gerinnegeometrien für eine empirische hydraulische Berechnung
- Vorgehensweise bei der Berechnung; Erfassen der hydraulischen Situation; richtiges Anwenden der Verfahren
- Beispiele

Teil 2: Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen

- Theoretische Grundlagen; Gültigkeitsbereich der analytischen Ansätze
- Praktisches Vorgehen; Berechnungsverfahren naturnaher Fließgewässer unter Berücksichtigung von Grobstrukturen

Teil 3: Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg

- Bedeutung der Beiwerte für eine hydraulische Berechnung
- Dokumentation und Vergleich verschiedener Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für ausgewählte Gewässerteilstrecken in Baden-Württemberg
- Katalogisierter Aufbau mit Fortschreibungs- und Übertragungsmöglichkeit auf DV-Systeme

Teil 4: Numerische Modelle zur Strömungssimulation

- Erläuterung der numerischen Verfahren (1-D bis 3-D), deren Grundlagen und Anwendungsbereiche sowie Anwendungsgrenzen
- Erfahrungssammlung aus Ingenieurbüros und Universitäten des Landes
- Testdatensatz für kommerzielle numerische Programme
- Sonderfall: vereinfachtes Excel-Modul „Pegelhydraulik“

Zusammenfassung

Der vorliegende Leitfadenteil „Hydraulik naturnaher Fließgewässer, Teil 4 –Numerische Modelle zur Strömungssimulation“ ist Bestandteil der Schriftenreihe „Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie“. In dieser Schriftenreihe werden Arbeitshilfen zur naturnahen Gewässerentwicklung und –unterhaltung sowie zum naturnahen Wasserbau herausgegeben.

Mit dem vorliegenden Leitfaden, der sich gleichermaßen an Behörden, Planer und Lehrinstitutionen richtet, sollen dem Anwender neue Methoden zur hydraulischen Berechnung naturnaher Fließgewässer vermittelt werden.

Die einzelnen Teile des Leitfadens (siehe Übersicht) bauen thematisch aufeinander auf, sind jedoch in sich abgeschlossen. In jedem Teil wird ein Themenbereich der „Hydraulik naturnaher Fließgewässer“ für sich verständlich dargestellt. Weitere Themen wie z.B. die „Morphodynamik der Fließgewässer“ können bei Bedarf, bei weiterentwickelten praktikablen Berechnungsverfahren und neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen aufgenommen werden.

Der vorliegende Teil 4 gibt Erläuterungen zu den numerischen Verfahren (1-D bis 3-D), deren Grundlagen sowie Anwendungsgrenzen.

1 Hinweise zum Leitfaden

Die Wiederherstellung und Erhaltung einer intakten Umwelt stellt eine wichtige Aufgabe der Wasserwirtschaft dar. Eine Voraussetzung hierfür sind Gewässer, die möglichst viele natürliche Elemente enthalten, über eine gute Wasserqualität verfügen und somit als Lebensraum für eine artenreiche Flora und Fauna dienen.

Deshalb sind in den verschiedensten Bereichen des Wasserbaus, im Flussbau, bei der Sicherstellung der Vorflut urbaner und landwirtschaftlich genutzter Gebiete, bei Maßnahmen des Hochwasserschutzes und der Wildbachverbauung sowie beim Energie- und Verkehrswasserbau Gewässer naturnah zu erhalten oder herzustellen [4].

Mit dem vorliegenden Leitfaden sollen dem Anwender verschiedene Methoden zur hydraulischen Berechnung naturnaher Fließgewässer erläutert werden.

Der Leitfaden besteht derzeit aus vier Teilen, die schwerpunktmäßig jeweils ein bestimmtes Themengebiet bearbeiten. Die Gliederung der auf-

einander aufbauenden Teile ist der Abbildung „Hydraulik naturnaher Fließgewässer“ (Seite 4) zu entnehmen. Weitere Themen wie z.B. die „Morphodynamik der Fließgewässer“ können zukünftig aufgenommen werden.

„Schon bisher war die hydraulische Bemessung der Abflussquerschnitte von Fließgewässern schwierig und mit vagen Annahmen verbunden. [...] Keine großen Schwierigkeiten im Umgang mit Zahlen, hydraulischen Tafeln und Tabellen hat nur der Anfänger. Wer dagegen Gelegenheit hatte zu beobachten, wie sich ausgebaute Gewässer im Laufe von Jahrzehnten mannigfaltig verändern und damit ursprüngliche Berechnungsrundlagen hinfällig werden, der wird die Berechnung wohl nicht ganz in Frage stellen, ihre Bedeutung aber entsprechend gewichten. Wie in der Natur eine Normung unmöglich ist, so entzieht sich auch ein Fließgewässer aufgrund seiner natürlichen und im Voraus nicht bestimm- baren Eigendynamik allen Berechnungsregeln.“
Zitat von G. SCHADE, entnommen aus [14].



Abb. 1.1: Natürlicher Gewässerverlauf eines Baches mit Uferbewuchs

Um einen inhaltlichen Überblick zu geben, wird nachfolgend jeder Teil des Leitfadens kurz beschrieben.

Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Teil 1 „Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren“

Teil 1 beschäftigt sich mit den Grundlagen und den empirischen hydraulischen Berechnungsverfahren. Ziel dieses Leitfadens ist es, dem Anwender einen Einblick in die hydraulischen Gesetzmäßigkeiten von Fließvorgängen zu geben. Dabei wird schwerpunktmäßig auf einfache und anwenderfreundliche Formeln und Verfahren eingegangen, um dem Leser die Grundlagen der angewandten Fließgewässerhydraulik verständlich zu machen.

Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Teil 2 „Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen“

Im **Teil 2** wird auf Grundlage von eindimensionalen Berechnungsverfahren in übersichtlicher Form für jede Grobstrukturen jeweils ein geeignetes Berechnungsverfahren vorgestellt.

Dieser Teil des Leitfadens ermöglicht es dem Anwender, das Widerstandsverhalten lokaler naturnaher Fließgewässerstrukturen abzuschätzen. Erstmals sind die Berechnungsverfahren mit Ablaufdiagrammen und praktischen Beispielen erläutert.

Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Teil 3 „Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg“

Der **Teil 3** des Leitfadens dient als Ergänzung von Teil 1.

In katalogisierter und übersichtlicher Form wird eine Dokumentation von Rauheits- und Wider-

standsbeiwerten für ausgewählte naturnahe Gewässerteilstrecken in Baden-Württemberg aufgezeigt. Neu hierbei ist, dass neben den empirischen Rauheits-Beiwerten auch die Widerstandsbeiwerte für Bewuchs- und Sohlstruktur angegeben werden.

Damit wird es dem Anwender ermöglicht, einerseits ein Gefühl für die empirischen Rauheitsbeiwerte zu entwickeln und andererseits direkt einen Bezug zu den analytischen Berechnungsverfahren, wie sie im Teil 2 beschrieben werden, zu bekommen.

Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Teil 4 „Numerische Modelle zur Strömungssimulation“

Teil 4 des Leitfadens beschreibt gegenwärtig angewandte, numerische Berechnungsverfahren. Grundlage hierfür ist eine von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) durchgeführte Umfrage bei Ingenieurbüros in Baden-Württemberg.

Die einzelnen Berechnungsverfahren werden dabei prinzipiell erläutert, ohne dass auf mathematisch-theoretische Details näher eingegangen wird. Es soll gezeigt werden, auf welcher numerischen Grundlage DV-gestützte Berechnungsverfahren aufbauen, wie sie prinzipiell arbeiten und wo deren Anwendungsbereiche und -grenzen liegen. Dabei werden eindimensionale, zweidimensionale und dreidimensionale Verfahren erläutert und typische Einsatzmöglichkeiten genannt.

Zusätzlich wird ein Datensatz zum Testen kommerzieller EDV-Programme angeboten. Die Daten stammen von einer LfU Pilot-Gewässerstrecke an der Murr. Zur Durchführung hydraulischer Berechnungen an Pegeln für Planung und Plausibilisierung wird auf ein Excel-Modul mit Benutzeranleitung bei der LfU hingewiesen.



Abb. 1.2: Jungweiden an der Pilotstrecke Murr im Bereich Steinheim, die sich infolge eines Hochwassers umgelegt haben.

Wie die Bewuchscharakteristik vor Ort aufgenommen werden sollte, damit der abflussreduzierende Bewuchseinfluss in einer Berechnung simuliert werden kann, wird im Teil 1 und 2 des Hydraulik-Leitfadens beschrieben.

Abb. 1.3: Mäandrierende Mittelwasserläufe stellen bei einer hydraulischen Berechnung einen schwierigen Fall dar.

Welche Reibungsverluste treten infolge der Krümmungen auf? Wie wirkt sich der Uferbewuchs auf die Abflussleistung aus?

Besonders aufwändig wird eine Berechnung ab Wasserständen, bei denen das Wasser aus dem Mittelwasserbett austritt und zusätzlich über die Vorländer strömt.

In solchen Fällen muss die hydraulische Situation sehr sorgfältig abgeschätzt und durch entsprechende Berechnungsannahmen umgesetzt werden.

Arbeitshilfen dazu werden in den Teilen 1, 2 und 4 gegeben.



Abb. 1.4: Im Strömungsschatten eines Brückenpfeilers hat sich durch Sedimentation eine Insel gebildet.

Mit Hilfe von Teil 1 kann abgeschätzt werden, wie sich die Ablagerung auf die Abflussleistung des Gerinnes auswirkt.



Abb.1.5: Extrem dichter Uferbewuchs hat meistens starke Auswirkungen auf den Wasserstand und Abfluss bei Hochwasserereignissen.

Gerade bei Weichhölzern kommt es ab einem bestimmten Wasserstand infolge der Strömungskraft zu einem plötzlichen „Umlegen“ des Bewuchses. Damit verringert sich dann das Widerstandsverhalten der Ufergehölze schlagartig.

All diese Einwirkungen müssen bei einer hydraulischen Berechnung berücksichtigt werden. Wie das durch vereinfachte Annahmen möglich ist, wird im Teil 1 beschrieben. Im Teil 2 werden dazu analytische Berechnungsverfahren erläutert.



Abb. 1.6: Aufweitung des Flussschlauches durch eingebaute Inseln bei der renaturierten Gewässerstrecke in der Ortslage Pforzheim (Enz) bei Mittelwasserabfluss. Welchen Einfluss haben die Inselstrukturen bei Hochwasser und wie wird dadurch die Abflussleistung beeinträchtigt? Ansätze zur hydraulischen Berechnung werden im Leitfaden Teil 1 und Teil 2 gegeben.

2 Modelleinsatz in der Wasserwirtschaft

2.1 Modellarten

Als „**Modell**“ wird in der Wissenschaft ein vereinfachendes, aber die wesentlichen interessierenden Merkmale bewahrendes Abbild eines realen Systems und der in ihm ablaufenden Prozesse bezeichnet.

Es kann sich dabei um ein rein geistiges (mentales) Modell (z.B. Gedankenexperiment, Vorstellung) handeln, um ein physikalisches Analogiemodell (z.B. ein hydraulisches Modell) oder um eine Beschreibung mit Hilfe mathematischer Gleichungen (z.B. ein numerisches Modell).

Unter dem Begriff **numerisches Modell** wird in der Praxis jedoch nicht nur die mathematische Beschreibung von Systemprozessen verstanden. Vielmehr schließt man bei der Verwendung des Begriffes die zugehörigen im Computer installierten DV-Programme (Software) und die Daten mit ein.

Das numerische Modell eines Gewässers ist demnach das unmittelbar einsatzfähige Werkzeug, um die gewünschten zahlenmäßigen und graphischen Ergebnisse im konkreten Anwendungsfall zu generieren. In der wasserwirtschaftlichen Anwendung beziehen sich numerische Modelle auf räumliche und zeitliche Ausschnitte der Natur – das zu modellierende reale System.

Die Beschreibung des realen Systems im Modell geschieht über geometrische und stoffliche Systemparameter. Dabei werden in der praktischen Anwendung stets zusätzliche Vereinfachungen getroffen, die ein besseres Handling des Modells ermöglichen. Im realen System laufen vielschichtige Prozesse ab, wie Strömung, Stofftransport etc.. Das Modell bezieht sich nur auf diejenigen Prozesse, welche für den jeweiligen Anwendungsfall bedeutsam sind.

Das modellierte System ist „offen“, da es mit der Umgebung in Wechselwirkung steht, und zwar durch die über die Systemgrenzen wirkenden Ein- und Ausgangsgrößen (sog. Randbedingungen). Der Systemzustand zu Beginn der Berechnungen wird durch die sog. Anfangsbedingungen festgelegt.

Der Aufgabenbereich des planenden Wasserbauingenieurs hat innerhalb der letzten 20 Jahre eine weitgehende Veränderung erfahren.

Die **frühere Zielsetzung** bei der Planung und Bauausführung einer wasserwirtschaftlichen Maßnahme unterlag einer möglichst ökonomischen Baudurchführung unter Einhaltung der Erfordernisse für den Hochwasserschutz von Siedlungsraum und landwirtschaftlichen Produktionsflächen. In der Umsetzung dieser Zielsetzung mit meist strukturarmen, linearen Ausbaumaßnahmen an den Gewässern wurden zwar die Hochwasserschutzanforderungen weitestgehend erfüllt, die vielschichtigen ökologischen Zusammenhänge wurden allerdings oftmals nur unzureichend berücksichtigt.

Die **heutige Zielsetzung** ist geprägt vom Bestreben den Hochwasserschutz, die Gewässerökologie und multifunktionale Nutzungen im Gewässerraum ganzheitlich und nachhaltig zu berücksichtigen. Für Konfliktpotential ist reichlich gesorgt, da auf der einen Seite der ökologische Nachholbedarf sehr dringlich ist (vgl. Wasserrahmenrichtlinie der EU), auf der anderen Seite die Ressourcen (wie z.B. Erweiterungsflächen für den Gewässerraum, Finanzmittel etc.) sowie die Nutzungsansprüche (z.B. Mensch und Gewässer) die weiteren Planungen im Wasserbau schwierig gestalten.

Für die Planung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen unter Einhaltung der o.g. Zielsetzung stehen dem Wasserbauer neben seinen erworbenen Erfahrungen umfangreiche computergestützte Berechnungsverfahren zur Verfügung.

Der Modelleinsatz im Wasserbau umfasst dabei die mathematische Nachbildung von Strömungsvorgängen. Der wesentliche Vorteil der Berechnungsmodelle besteht jedoch in der Möglichkeit der Simulation unterschiedlicher Szenarien und Zustände sowie in der Prognose möglicher zukünftiger Verhältnisse.

In der Projektabwicklung kommen im Wesentlichen mehrere Modellgruppen zur Anwendung:

2.1.1 Hydrologische Flussgebietsmodelle

Darunter werden Niederschlags-Abfluss-Modelle, Floodrouting, Speichermodellierung und Wasserhaushaltsmodelle verstanden.

Nach den anfänglich einfacheren Vorgängerversionen in Form von Niederschlags-Abfluss-Modellen (NA-Modellen) ist mit den derzeit vorhandenen Modellen eine Bearbeitung nahezu aller Fragestellungen eines Abflussgebietes möglich, wobei im ersten Schritt die

- Darstellung des Abflussgebietes,
- Erfassung des Gewässersystems und seiner Zusammenhänge und
- Simulation von Wellenabläufen erfolgt.

Die Planungsgrundlagen hierfür sind Gebietskarten sowie hydrographische und topographische Daten. Nach Aufbereitung, Kalibrierung und Berechnung des Einzugsgebietes liegt der derzeitige Zustand als Ausgangszustand im Modell vor. Mit dem Modell können nun folgende Planungsergebnisse erzielt werden:

- Hydrologische Daten für jeden Berechnungspunkt.
- Luftbilder mit kartierten Abflussräumen.
- Gewässerlängsschnitte und Talprofile mit kartierten Wasserständen.
- Kenntnis der Gewässerdynamik, der Schwachstellen, der Leistungsreserven, der Wirkung der Überflutungsräume und Speicherbecken, etc..

Für die interdisziplinäre Planung bieten diese Flussgebietsmodelle die Möglichkeiten weitläufiger Szenarienuntersuchungen für umfangreiche Fragestellungen wie z.B.:

- Wie verändert die Flächennutzung den Abfluss (z.B. bei Entseigelung von Flächen)?
- Wie wirkt sich das Wegfallen von Retentionsraum aus?
- Wie groß ist die Wirkung natürlicher Retentionsräume?
- An welchen Stellen sollten Hochwasserschutzmaßnahmen getroffen werden?
- Welche Kombination von Maßnahmen erzielt den optimalen Nutzen?

Aufgrund der Ergebnisse des Flussgebietsmodells liegen damit als Grundlage

- die hydrologischen Grundlagen,
- die Bewertung und Abgrenzung des Abflussraumes,
- die Vorbemessung von Ausbau- bzw. Renaturierungsmaßnahmen und
- die örtliche Fixierung und Größenbemessung von Retentionsanlagen.

2.1.2 Physikalische und hydrodynamisch-numerische Modelle

In dieser Phase erfolgt die Konkretisierung der wasserbaulichen Maßnahmen für bestimmte Abschnitte des Gewässers unter Zugrundelegung der Zielsetzungen.

Im Normalfall kommen hier die sog. **hydrodynamisch-numerischen Modelle** (im Folgenden **HN-Modelle**) zum Einsatz. Auch bei dieser Modellgruppe hat sich in den letzten Jahren und nicht zuletzt durch die Entwicklung der Rechnerkapazitäten aus den Anfängen der Durchfluss- und Wasserspiegellagenberechnungsmodelle ein Standard entwickelt, der von der Erstellung der Planungsgrundlagen über die eigentliche hydraulische Modellrechnung bis hin zur (georeferenzierten) Plandarstellung reicht.

Die HN-Modelle ermöglichen eine gezielte Bearbeitung nachstehender Fragestellungen:

- Erfassung und Darstellung des Gewässersystems,
- Erfassung und Darstellung der Gerinnemorphologie,
- Simulation des Ist-Zustandes und

- Simulation von Veränderungen des Abflussgeschehens infolge einer Variation der Gerinnemorphologie, der Gerinnerauheit (z.B. Bewuchs), der Durchflussmengen (Variantenstudium).

Die Planungs- und Berechnungsgrundlagen bei diesen Modellen bilden:

- Topographische Daten der Gerinnemorphologie (Lage- und Höhenpläne, digitale Geländemodelle).
- Hydrologische Daten (gemessene Wasserstände und Abflüsse sowie Auftretenswahrscheinlichkeiten).
- Daten über Gerinnerauheit und Bewuchs (z.B. entnommen aus Orthofotos).
- Daten über Fließwege, Vorlandströmungen, Vorlandgrenzen, etc..

Mit HN-Modellen lassen sich folgende Ergebnisse erzielen:

- Plandarstellungen des Bestandes im Grundriss, Längs- und Querprofil.
- Darstellung der Berechnungswasserspiegel im Längs- und Querprofil mit Listen und Diagrammen aller hydraulischer Daten.
- Ergebnisse aus instationären Berechnungen.

Im Zuge einer interdisziplinären Planung können diese Daten dem Landschaftsplaner zur Verfügung gestellt werden. Die daraus resultierenden geplanten ökologischen Maßnahmen werden im Modell als Simulation berechnet und erlauben somit die Prognose von hydraulischen Auswirkungen.

Die Anwendung **instationärer** HN-Modelle ist aufgrund der rasanten Entwicklung der Rechnerkapazitäten mittlerweile auf PC-Stationen möglich. Die Anwendungsgebiete solcher Modelle sind wie folgt:

- Ermittlung der Retentionswirkung von Überflutungsräumen auf Hochwasserwellen.
- Durchführung von Wellenberechnungen aller Arten (z.B. bei Kraftwerksstauregelungen) und Optimierung im Sinne von Stauraubewirtschaftungen.

Bei instationären Berechnungen sind ggf. auch die Betriebsregeln von Regulierungsbauwerken

zu berücksichtigen. Als Ergebnisse einer instationären hydrodynamisch-numerischen Berechnung sind detaillierte Aussagen über den zeitlichen Ablauf der stattfindenden Füllungs- und Entleerungsvorgänge im betrachteten Gerinneabschnitt einschließlich aller damit verbundenen Nebenräume möglich.

2.1.3 Stofftransportmodelle, Stoffhaushaltsmodelle, Geschiebemodelle, Schwebstoffmodelle, Gewässergütemodelle

Diese Modelle kommen nur bei besonderen Fragestellungen zum Einsatz. Die Gewässerökologie ist sehr eng mit dem im Gewässer stattfindenden Stofftransport bzw. davon abhängigen Stoffhaushalt verknüpft. In einem von menschlicher Nutzung unbelasteten, natürlichen Gewässer erfolgt von selbst eine Abstimmung zwischen Stoffhaushalt, Gerinnemorphologie und Gewässerökologie. Je größer die Beeinflussung des Stoffhaushaltes im Gewässer durch die Emissionen aus der menschlichen Nutzung ist, umso wichtiger ist die Untersuchung und Quantifizierung der dadurch verursachten Wirkungen.

Je nach Stoffgruppe bestehen im Wesentlichen zwei Modellarten von **Stofftransport-** bzw. **Stoffhaushaltsmodellen**:

- ungelöste Stoffe: Geschiebemodelle, Schwebstoffmodelle
- gelöste Stoffe: Emissionsmodelle, Immissionsmodelle, Gewässergütemodelle

Für beide Modellgruppen gibt es Berechnungsverfahren mit stationären (zeitlich unveränderlichem) bzw. instationären (zeitlich veränderlichem) Ansatz.

Bei den **Geschiebe-** und **Schwebstoffmodellen** kommen stochastische oder physikalische Ansätze zum Einsatz – je nachdem, ob der Gesamtfeststoffhaushalt eines Einzugsgebietes oder einer bestimmten Fließstrecke im Detail untersucht wird. Es werden morphologische Daten, hydrologische Daten sowie Daten bezüglich der Geschiebebildung und Geschiebecharakteristik benötigt. Als Berechnungsergebnisse können die stattfindenden

Anlandungs- und Abtragungstendenzen für die gewählte Flussbettmorphologie simuliert werden.

Die **Gewässergütemodelle** werden oftmals bei Gewässern in Ballungsräumen, die in der Regel durch verschiedenste Einleitungen wie Kanalnetzentlastungen, Kläranlagenabläufe, Abwärme oder diffuse Schadstoffquellen dauernd oder stoßartig belastet werden, eingesetzt. Diese Emissionen erzeugen Verhältnisse, die zu ökologischen Schäden für die Gewässerlebensgemeinschaft führen.

Die Gewässergütemodelle können für die Beurteilung von Sanierungsprojekten zur Erreichung ökologisch verträglicher Immissionswerte eine wertvolle Hilfestellung geben.

Die am weitesten entwickelten Modelle simulieren die hydrologischen und hydraulischen Verhältnisse des Einzugsgebietes, des Kanalnetzes, der Kläranlage sowie insbesondere nachstehende Stoff-Flüsse:

- gelöster Sauerstoff
- biochemischer Sauerstoffbedarf
- Temperatur
- Phytoplankton
- organisch gebundener Phosphor
- gelöster Phosphor
- Ammonium
- Nitrit
- Nitrat
- Coliforme Keime.

Die hydrologische und hydraulische Belastung wird über eine Langzeitserien- bzw. Langzeitkontinuumsimulation berechnet und ermöglicht eine Ermittlung auf Basis beobachteter Ereignisse. Als Ergebnis der Berechnungen kann für obenstehende Stoffe eine immissionsbezogene Bewertung erfolgen und somit die Festlegung der erforderlichen Baumaßnahmen im Kanalnetz, an der Kläranlage bzw. bei den Abwasser- und Schadstoffproduzenten festgelegt werden.

2.1.4 Kombination der Modelle

In der folgenden Abbildung ist eine Verknüpfung der erläuterten Modellarten und -typen sowie deren Einsatzmöglichkeiten bildlich dargestellt.

Der vorliegende Leitfaden behandelt nur die in der zweiten Planungsphase genannten HN-Modelle.



Abb. 2.1: Anwendung DV-unterstützter Berechnungsmodelle.

2.2 Hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modelle)

2.1.1 Begriffsbestimmung / Merkmale

Die Begriffsbestimmung erfolgt in Anlehnung an die DVWK Schriften Heft 127 (DVWK 1999).

- **hydrodynamisch**

Dieses Wort bezeichnet im engeren Sinne (stationäre oder instationäre) Fließvorgänge im Gerinne. Im erweiterten Sinne charakterisiert es jedoch auch die dynamische Veränderung einer Vielzahl von Transportprozessen, welche mit hydrodynamisch-numerischen Modellen beschrieben werden können.

- **empirisch**

Ein empirisches Modell ist ein Formalismus, von dem nur gefordert wird, dass für bestimmte, in der Natur eingemessene Eingangsgrößen errechnete Ausgangsgrößen erzeugt werden, die hinreichend mit tatsächlich gemessenen Größen übereinstimmen.

- **konzeptionell**

Dieser Begriff steht im Gegensatz zum Begriff empirisch. Sind die bestimmenden Gesetzmäßigkeiten eines Prozesses bekannt und mathematisch formulierbar, so ist das Modell konzeptionell.

Wegen der Verwendung der Bilanzgleichungen von Masse, Impuls und Energie in HN-Modellen entsteht der oft formulierte Anspruch, dass sie konzeptionell seien, dass also die im Gewässer ablaufenden Prozesse streng in den Gleichungen formuliert sind. Dieser Anspruch ist jedoch nur teilweise berechtigt.

Zum einen lassen sich bestimmte Phänomene nicht physikalisch fundiert, sondern bisweilen nur durch empirische Gleichungen beschreiben (z.B. Turbulenz, Windschub an der Oberfläche, Sohlenreibung). Zum anderen gehen durch die sog. **Diskretisierung** Details verloren. Die Berechnung dieser Phänomene erfolgt durch zusätzliche Parameter.

Weitere Merkmale von Modellen sind:

- **deterministisch**

Die in deterministischen Modellen verwendeten Grundgleichungen setzen Kausalität voraus. Dies bedeutet, dass ein späterer Zustand eindeutig aus einem vorangegangenen Zustand bestimmt wird.

- **nichtlinear**

Die Linearität einer Modellbildung bietet die Möglichkeit der getrennten Berechnung der Systemantwort auf unterschiedliche Eingangsgrößen und nachfolgende Überlagerungen. Die meisten in der Praxis angewandten Strömungs- und Transportmodelle sind nichtlinear.

- **numerisch**

Eine lineare Modellbildung würde in vielen Fällen und vor allem bei geometrisch einfachen Systemen die Möglichkeit der Prozessbeschreibung durch (analytisch) lösbare Gleichungen ermöglichen. Durch die vorhandene Nichtlinearität der in der Praxis angewandten Modelle entfällt diese Möglichkeit und die Notwendigkeit numerischer Lösungen entsteht. Dies bedeutet, dass numerische Gewässermodelle mit einer Vielzahl von Stützstellen arbeiten, um die komplexen nichtlinearen Prozessgleichungen diskretisiert zu beschreiben.

- **räumliche Merkmale: Drei-, zwei- oder eindimensional**

Die räumliche oder flächenhafte Ausdehnung natürlicher Gewässer und die starke Veränderlichkeit von Strömungen und Konzentrationen in ihnen erfordert eine dreidimensionale oder zweidimensionale, mindestens aber eine eindimensionale Modellierung. Diese Begriffe geben an, wie viel räumliche Dimensionen bei der Berechnung der maßgebenden Zustandsgrößen des Modells (z.B. Fließgeschwindigkeit, Konzentrationen, etc.) berücksichtigt werden.

Ein **dreidimensionales Modell** erfasst die räumliche Verteilung der zu berechnenden Größen.

Ein **zweidimensionales Modell** beschreibt die ebene Verteilung (in der vertikalen oder in der horizontalen Ebene) und arbeitet mit Mittelwerten senkrecht dazu.

Ein **eindimensionales Modell** beinhaltet die Querschnittsmittelung, berücksichtigt jedoch aber ebenfalls die Änderungen längs einer ggf. gekrümmten Koordinate (z.B. der Flussachse).

Folgende **zeitliche Merkmale** treten bei Modellen auf:

- **stationär**
In der Natur sind alle Prozesse zeitabhängig. Oft genug sind die Änderungen jedoch so langsam, dass sie mit Hilfe eines zeitunabhängigen (sog. stationären) Modell ausreichend genau beschrieben werden können. Das gilt z.B., wenn die Geschwindigkeitsverteilungen in einem Fluss-Vorland-System von wenigen Kilometern Ausdehnung berechnet wird. Mathematisch bedeutet eine stationäre Rechnung, dass in den Grundgleichungen alle partiellen Ableitungen nach der Zeit vernachlässigt werden.
- **quasistationär**
Quasistationäre Modelle berechnen eine Aufeinanderfolge stationärer Zustände. Im Beispiel Fluss würde man von Zustand zu Zustand den Durchfluss und eine Wasserstandsrandbedingung ändern, und somit die sich langsam ändernden Fließverhältnisse reproduzieren. Jeder Zustand ist dabei jedoch identisch mit dem stationär berechneten. Dadurch ist in der quasistationären Berechnung das Ergebnis unabhängig vom Zeitschritt, nur die zeitliche Dichte der gewonnenen Informationen ändert sich mit ihm.
- **instationär**
Instationäre Modelle bewahren die Zeitabhängigkeit der Prozesse und damit die kompletten Grundgleichungen.

2.2.1 Einsatzbereiche

Die **Einsatzmöglichkeiten von HN-Modellen** wurden bereits in Kapitel 2.1 erläutert. Demnach können mit deren Hilfe die folgenden drei Aufgabenstellungen bearbeitet werden:

- **Simulation des Ist-Zustandes**
z.B. eines Gewässers unter Verwendung gemessener Ein- und Ausgangsgrößen sowie bekannter Systemparameter (z.B. Geometrie, Morphologie, Rauheiten). In diesem Fall liefert das Modell detailliertere Informationen in Raum (stationäre Verfahren) und Zeit (instationäre Verfahren), als diese durch punktuelle Naturmessungen erreicht werden können. Das Modell kann hier auch zur Planung von Messaktionen dienen.
- **Variantenstudium bei veränderten hydrologischen Randbedingungen**
Dieser Fall liegt vor, wenn z.B. mit einem Flussmodell nach erfolgter Kalibrierung mit einer vermessenen Hochwasserwelle eine andere gerechnet wird, ohne dass dabei die Geometrie und Rauheit des Gewässers und ggf. der überfluteten Vorlandbereiche verändert werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Kalibrierung des Modells den zu untersuchenden Abflussbereich abdeckt.
- **Variantenstudium bei veränderter Systemgeometrie**
mit oder ohne Veränderung der hydrologischen Größen. Dieser Fall liegt beispielsweise vor, wenn flussbauliche Maßnahmen in einem Fluss vorgenommen werden sollen (z.B. Fahrwasservertiefungen, Errichtung von Querbauwerken). Hierbei ändern sich auch die Geometrie und Rauheiten.

In der wasserbaulichen praktischen Anwendung kommen – je nach Aufgabenstellung – HN-Modelle mit unterschiedlichen

- Merkmalen,
 - numerischen Methoden und
 - Güteeigenschaften
- zum Einsatz.

Dabei unterliegt die praktische Anwendung jedes HN-Modells der folgenden Ablaufkette:

1) Modellerstellung

Zur Modellerstellung werden umfangreiche Daten und Parameter benötigt. Darauf wird in einem separaten Kapitel eingegangen.

2) Modellkalibrierung und –validierung anhand von historischen- und/oder Naturmessdaten

Die Modellsimulation historischer Ereignisse erfolgt i.d.R. im Rahmen der Modellkalibrierung durch die Nachrechnung von datenmäßig gut dokumentierten Abflussereignissen. Aber auch die Nachrechnung eines datenmäßig unzureichend erfassten Abflussereignisses kann aufgrund der Datenfülle aus der Modellrechnung zum besseren Verständnis der hydraulischen Gegebenheiten beitragen.

3) Analyse des Ist-Zustandes

Die Berechnung des Ist-Zustandes beinhaltet die Simulation eines gewählten Bemessungsabflusses für das heutige (aktuelle) Erscheinungsbild des untersuchten Flussabschnittes. Diese Berechnung ist die Grundlage für die Ermittlung und Bewertung der durch die Planungsmaßnahme zu erwartenden Veränderungen.

4) Entwicklung von Lösungsvarianten

5) Festlegung auf eine optimierte Lösungsvariante

6) Ermittlung von Bemessungsdaten zur Lösungsvariante

7) Ermittlung der Auswirkungen der Lösungsvariante auf die nähere und ggf. weitere Umgebung

Mit hydrodynamisch-numerischen Modellen können die Wirkungen von Planungsvarianten vergleichend bewertet werden. Die bestmögliche Variante kann somit ausgewählt und deren Bemessungsgrößen (z.B. max. Wasserstand, max. Fließgeschwindigkeiten, Abflussverteilung, etc.) bestimmt werden.

8) Ableiten von erforderlichen Ausgleichs- und Sicherungsmaßnahmen

9) Vereinfachte Prognose von zukünftigen Entwicklungen aufgrund der Lösungsvariante und/oder wegen sich ändernder Umweltbedingungen

Wird – wie beispielsweise bei Renaturierungsmaßnahmen – dem Fließgewässer eine dynamische Entwicklung ermöglicht, können tatsächliche Entwicklungen mit Modellprognosen verglichen und die Planung ggf. modifiziert werden.

Für Fragen der Wasserqualität, der Ausbreitung von Schadstoffen und des Geschiebe- und Schwebstofftransportes liefern Transportmodelle Antworten auf die Einhaltung von Grenzwerten, für die Stoffverteilung im Fernfeld und für morphologische Veränderungen des Flussbettes.

3 Mathematische Beschreibung von Fließgewässern

3.1 Beschreibung der Prozesse

Ein in der wasserwirtschaftlichen Praxis verwendetes HN-Modell auf 1D-, 2D- oder 3D-Basis ist die mathematische Nachbildung des Strömungsverhaltens eines natürlichen Fluss- und Geländeausschnittes aus einer weiteren Umgebung.

Über seine Grenzen hinaus steht damit das betrachtete Modellgebiet in Wechselwirkung mit dem Austausch von Masse, Impuls und Energie. Somit darf keines der grundlegenden Axiome, die sich in den Erhaltungssätzen widerspiegeln, verletzt werden (z.B. Energieerhaltungssatz; d.h. in einem geschlossenen System kann keine Energie verloren gehen).

Die Festlegung der **Systemgrenzen** des Modellgebietes ist somit ein erster wesentlicher Modellierungsschritt.

- Feste Modellgrenzen sind durch die geometrischen Daten (Flussbett, Geländekanten, Ufermauern, Deiche, ...) gegeben.
- Bewegliche Modellgrenzen (z.B. die freie Wasserspiegeloberfläche) werden durch die hydraulischen Prozesse im System selbst bestimmt.
- Die Lage durchströmter Modellgrenzen bestimmt der Modellierer und hat dadurch die Möglichkeit, die Größe des Modellgebietes zu optimieren.

Die **Wechselwirkung von inneren und äußeren Kräften** auf den Wasserkörper in einem Modellgebiet bestimmt das Fließgeschehen im Fluss.

- Zu den inneren Kräften zählen die Schwerkraft bzw. der Druckgradient, die Schubspannung sowie die i.d.R. zu vernachlässigende Corioliskraft.
- Äußere Kräfte sind die Reibung des Wasserkörpers an den Flussbettwandungen und die Windschubspannung an der Gewässeroberfläche.

Die **turbulente Bewegung** eines natürlichen Fließgewässers wird durch die Erhaltungssätze für Masse und Impuls allgemeingültig beschrieben. Weitere Informationen zur mathematischen Beschreibung der Turbulenz sind der Fachliteratur zu entnehmen.

Die Formulierung von Erhaltungssätzen für den Massen- und Impulsstrom erfolgt an einem sehr kleinen (infinitesimalen) Raumelement und führt unter Zugrundelegung eines ortsfesten Koordinatensystems auf die Kontinuitätsgleichung und die Navier-Stokes-Gleichungen für die x-, y- und z-Richtung in einem dreidimensionalen Koordinatensystem (hier nur für die x-Richtung dargestellt).

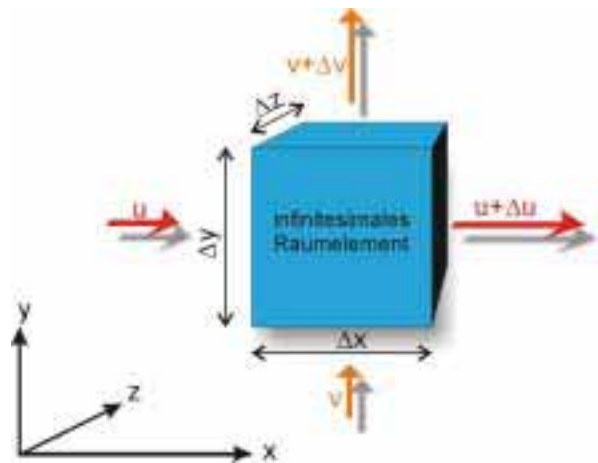


Abb. 3.1: Infinitesimales Raumelement.

Zur Verdeutlichung dieser grundlegenden mathematischen Formulierungen soll die Ableitung der Kontinuitätsgleichung für ein aus zwei Richtungen durchströmtes infinitesimales Raumelement vereinfacht erläutert werden. Auf Grundlage der Erhaltungssätze muss die Differenz zwischen den in das Raumelement ein- und ausströmenden Wasservolumen gleich null sein.

Aus der Bedingung, dass das einströmende Wasservolumen gleich dem ausströmenden Wasservolumen sein muss, ergibt sich die Kontinuitätsgleichung für ein infinitesimales Raumelement:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{3.1}$$

u, v, w Geschwindigkeit in Richtung x,y oder z
 x, y, z. Richtungskomponente in Strömungsrichtung

Die Bewegungsgleichung nach Navier-Stokes basiert auf dem Newtonschen Gesetz:

(3.2)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \left[\frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + f_i$$

lokale konvektive Beschleunigung Druck Schubspannung Massenkräfte

u_i..... Geschwindigkeit in Richtung der Koordinate
 x_j..... Richtungskomponente der Strömung
 ρ Dichte des Fluid
 p hydrostatischer Druck
 ν kinematische Viskosität
 f Massenkräfte (z.B. Schwerkraft, Corioliskraft)

Mit Hilfe dieser Gleichungen kann man ein Gleichungssystem für den dreidimensionalen Strömungsvektor u_i (i steht dabei für x,y oder z) und den Druck p aufstellen. Mit Hilfe von Zustandsgleichungen, die z.B. die Dichte in Abhängigkeit von Temperatur festlegen, werden die Gleichungen 3.1 und 3.2 geschlossen.

Bei der praktischen Anwendung ist für die Lösbarkeit des Gleichungssystems trotz Einsatz numerischer Methoden ein mehr oder weniger hoher Grad der Parametrisierung der turbulenten Austauschprozesse erforderlich. Je kleinskaliger die **turbulenten Teilprozesse** parametrisiert werden, desto allgemeingültiger und übertragbarer sind die darin enthaltenen Konstanten auch auf andere Gewässer(abschnitte) und Abflussereignisse anwendbar.

Ein Beispiel hierfür ist das sog. **k-ε-Modell**, welches die zeitliche Änderung der turbulenten kinetischen Energie und ihre räumliche Umverteilung und Dissipation parametrisiert.

Die aus der **Sohlschubspannung** resultierenden äußeren Kräfte werden durch die Eigenschaften der bodennahen Strömungsgrenzschicht bestimmt. Dieser Fließbereich ist aufgrund der dort auftretenden vielfältigen Rau-

heitselemente (z.B. Riffel, Steine unterschiedlicher Größe, sohlnahe aquatische Vegetation, etc.) äußerst komplex und in einem Modell nicht auflösbar. Deshalb wird die Sohlschubspannung durch einen weiteren parametrisierten Ansatz – i.d.R. ein quadratisches Geschwindigkeitsgesetz – beschrieben. Die darin enthaltene Konstante – der sog. **Rauheitsbeiwert** – ist die wesentliche Kalibrierungsgröße für Flussmodelle. Orientierungswerte aus Labor- und Naturmessungen sind in der Literatur zahlreich veröffentlicht (vgl. Leitfaden Hydraulik naturnaher Fließgewässer Teil 1, Teil 2 und Teil 3).

Die maßgeblichen dimensionslosen Kennzahlen für eine Flusströmung sind die Froude-Zahl Fr (bei Freispiegelabfluss) und die Reynolds-Zahl Re (für Druckabfluss und bei Rohrströmungen)

$$Fr = \frac{v_m}{\sqrt{g \cdot h}} \tag{3.3}$$

FrFroude-Zahl [-]
 v_m.....mittlere Fließgeschwindigkeit
 g.....Erdbeschleunigung
 h.....(mittlere) Wassertiefe

$$Re = \frac{v_m \cdot r_{hy}}{\nu} \tag{3.4}$$

ReReynolds-Zahl [-]
 v_m.....mittlere Fließgeschwindigkeit
 r_{hy}.....hydraulischer Radius (vgl. LF Teil 1)
 ν.....kinematische Viskosität

Die Reynoldszahl liegt bei Fließgewässern i.d.R. bei Werten über 10⁵, die Strömung wird damit als „**voll turbulent**“ bezeichnet. Die Froude-Zahl kann Werte kleiner oder größer eins annehmen, je nachdem „strömende“ oder „schießende“ Abflussverhältnisse vorliegen (vgl. Leitfaden Teil 1).

3.2 Modellgleichungen

Die Verhältnisse der geometrischen Skalen in einem Fließgewässer (z << y ≤ x) kennzeichnen als Koordinaten im Grundriss, Querschnitt und Längsschnitt die Integrationsgrenzen für HN-Modelle.

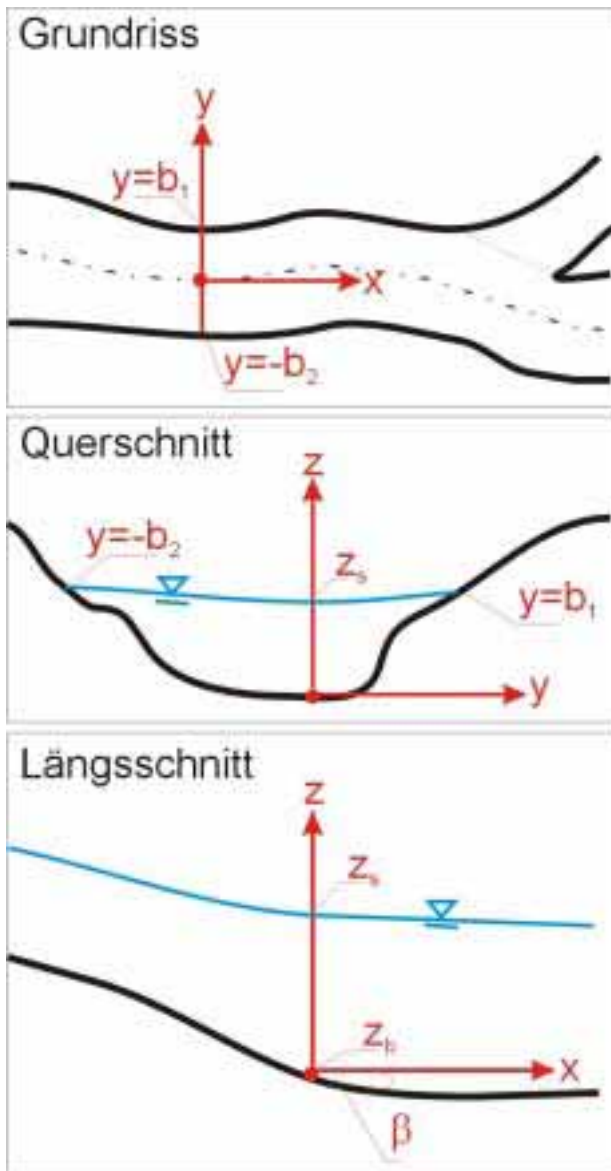


Abb. 3.2: Koordinaten und Integrationsgrenzen für HN-Modelle.

Modellgleichungen niedriger Dimensionalität erhält man aus den dreidimensionalen Grundgleichungen durch Integration quer zur Hauptfließrichtung, d.h. vertikal und/oder horizontal zwischen den jeweiligen Rändern.

In den folgenden drei Unterkapiteln werden – ausgehend von einer dreidimensionalen Beschreibung – die sich ergebenden 3D-, 2D- und 1D-Modellgleichungen zusammengestellt und die wesentlichen Vereinfachungen bzw. Vernachlässigungen sowie deren Konsequenzen auf die Aussagekraft des jeweiligen Modells beschrieben.

3.2.1 3D-Modellgleichungen

Zur dreidimensionalen Strömungsberechnung werden i.d.R. die vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen verwendet. Durch Aufsplitten des Geschwindigkeitsvektors in eine mittlere Komponente und eine turbulente Schwankungsgröße lassen sich die Gleichungen in die sog. Reynolds-Gleichungen überführen.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_1}{\partial x_i} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_1} + \Omega u_2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial u_1}{\partial x_i} + \frac{\tau_{1i}}{\rho} \right)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_2}{\partial x_i} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_2} - \Omega u_1 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial u_2}{\partial x_i} + \frac{\tau_{2i}}{\rho} \right)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho g$$

- u_i Geschwindigkeit in Richtung der Koordinate
- x_i Richtungskomponente der Strömung
- i 1,2,3 mögliche Komponenten
- ρ Dichte des Fluids
- p hydrostatischer Druck
- ν kinematische Viskosität
- τ_i Schubspannung
- Ω Beiwert der Turbulenzverluste
- g Schwerebeschleunigung
- t Zeit

Das wesentliche Problem bei der Lösung dieser komplexen Gleichungssysteme besteht in der Ermittlung der freien Oberfläche als bewegliche Systemgrenze.

Das 3D-Gleichungssystem bietet gegenüber den 2D-Modellgleichungen einen erhöhten Informationsgehalt. Durch die detaillierte Berechnung der bodennahen Geschwindigkeitsverteilungen als Voraussetzung für eine genaue Transportsimulation bei Sedimentation oder Erosion oder durch die Möglichkeit der direkten Simulation von Sekundärströmungen in Wechselwirkung mit der Hauptströmung sind die Ergebnisse i.d.R. höher aufgelöst als bei einer 2D- oder 1D-Berechnung. Typische Anwendungsbeispiele sind die numerische Simulation von Bauwerks-umströmungen oder Seedurchströmung.

3.2.2 2D-Modellgleichung (tiefengemittelt)

Wegen der in Abb. 3.2 aufgezeigten geometrischen Größenverhältnisse ($z \ll x, y$) ist für viele Anwendungsfälle eine weitere Vereinfachung der genannten Reynolds-Gleichungen durch Integration über die Gewässertiefe möglich (sog. Tiefenmittelung). Dies führt dann zu den **Flachwassergleichungen**, die zur zweidimensionalen Strömungsberechnung bei Flüssen in der Praxis zum Einsatz kommen.

3.2.3 1D-Modellgleichung

Liegt eine überwiegend eindimensionale Strömungscharakteristik des zu modellierenden Flussabschnittes vor (z.B. Flusslauf mit mäßiger Krümmung und regelmäßigem Querschnitt), so können 1D-Verfahren zum Einsatz gebracht werden. Als Ergebnis erhält man über den Profilquerschnitt gemittelte Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten. Um Veränderungen quer zur Fließrichtung berücksichtigen zu können, wie sie beim Hochwasserabfluss in weiten Talauen oder in naturbelassenen Gewässern auftreten, sind 1D-Modelle mit gegliederten Querschnitten entwickelt worden. Durch simultane Lösungsmethoden können auch vermaschte bzw. vernetzte Systeme modelliert werden. Die eindimensionale Betrachtungsweise ermöglicht auch bei der Untersuchung großer Flussabschnitte eine hohe Effektivität bezüglich Datenhandhabung, Modellerstellung, Modellkalibrierung sowie Sensitivitätsanalysen bzw. Variantenstudien.

Die Ableitung der eindimensionalen, sog. Saint-Venant-Gleichungen erfolgt durch vertikale und horizontale Integration der 3D-Gleichungen. Hierbei wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass alle Geschwindigkeitskomponenten quer zur Hauptfließrichtung im Vergleich zur Geschwindigkeitskomponente in Hauptfließrichtung vernachlässigbar gering sind. Der Fluss wird damit als eine einzige Stromröhre angenommen, die eine horizontale Oberfläche quer zur Fließrichtung und einem sich allmählich veränderbaren Querschnitt in Fließrichtung besitzt.

3.2.4 Anfangsbedingungen

Zur mathematischen Lösung der instationären Differentialgleichungen sind immer Anfangsbedingungen erforderlich. Die Anfangsbedingungen geben Informationen über die räumliche Verteilung des Wasserstandes und der Geschwindigkeiten (ggf. auch der turbulenten Schwankungsgrößen und deren Parametrisierungskennwerte) zu Beginn der Berechnungszeitraumes.

Zur numerischen Lösung von instationären Problemen ist eine Anfangsbelegung aller Rechenknoten zur Zeit $t = 0$ erforderlich.

Bei (natürlichen) Fließgewässern liegen häufig keine flächendeckende Messdaten für einen bestimmten Zustand vor. Mögliche Annahmen für Anfangsbedingungen sind in diesem Fall dann beispielsweise die Vorgabe

- eines horizontalen Wasserspiegels im Querschnitt,
- eines Wasserspiegelgefälles entlang des Fließwegs oder
- die Annahme von Normalabflussbedingungen an einer Stelle im Modellgebiet.

Viele Berechnungsprogramme bieten diese Optionen und weitere Optionen (z.B. Grenztiefe, bekannter Wasserstand) routinemäßig an.

3.2.5 Randbedingungen

Physikalisch sind die Modellränder die Schnittstellen des modellierten Flussabschnittes zur umgebenden Welt. Dort müssen deshalb dem Modellsystem die durch die Umwelt vorgegebenen Zustandsgrößen direkt vorgegeben werden oder als Wechselwirkung zwischen System und Umwelt spezifiziert werden.

Physikalisch wird dabei zwischen offenen (d.h. durchströmten) und geschlossenen Rändern unterschieden. Geschlossene Ränder können dabei fest (z.B. Sohle, Boden, Ufermauer, Dämme, Brückenpfeiler) oder beweglich (z.B. Wasserspiegel, Überschwemmungslinie) sein. Allen geschlossenen Rändern ist gemeinsam, dass über sie kein Massentransport stattfindet.

Für **festen Ränder** wird die Bedingung gesetzt, dass die Geschwindigkeitskomponente senkrecht (normal) zum Rand verschwindet. Zusätzlich muss am festen Rand die tangentiale Geschwindigkeitsrichtung vorgeschrieben werden.

Bewegliche Ränder sind ebenfalls für Masse undurchlässig, allerdings verschwindet die Normalkomponente der Geschwindigkeit dort nicht. Vielmehr definiert sie die Bewegung dieser Randtyps (kinematische Randbedingung).

Über **offene Ränder** strömt Masse in das System hinein oder aus ihm heraus. Die Auswahl der richtigen Randbedingungen hängt hierbei vom Strömungszustand (strömend oder schießend) ab. Am Einströmrand wird bei strömendem Abfluss i.d.R. der Durchfluss bzw. die Geschwindigkeitsverteilung vorgegeben. Bei schießendem Abfluss sind Geschwindigkeit und Wasserspiegel zusätzlich vorzugeben.

Am Ausströmrand genügt bei strömendem Abfluss die Vorgabe der Wasserspiegelverteilung. Bei schießendem Abfluss brauchen nur die tangentialen Schubspannungen spezifiziert zu werden, die in der praktischen Anwendung jedoch meistens zu null angenommen werden.

Da die offenen Ränder vom Modellanwender selbst festgelegt werden, hat er die Möglichkeit, ihre Position zu optimieren. Er sollte hierfür Flussbereiche auswählen, für die eindeutig definierte Strömungszustände und – bei mehrdimensionalen Modellen – möglichst einfache Geschwindigkeits- und Wasserspiegelverteilungen vorliegen.

3.3 Numerische Lösungsverfahren

Die Lösung der verwendeten komplexen Strömungs- und Transportgleichungen ist nur mit numerischen Verfahren möglich.

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

Zur Simulation des Abflusses natürlicher Fließgewässer werden in der Praxis eindimensionale (1D), zweidimensionale (2D) und dreidimensionale (3D) Strömungsmodelle eingesetzt. Je nach Aufgabenstellung kann die Berücksichtigung von Retentionseffekten und Wellenausbreitungsvorgängen, z.B. zur Beurteilung der Auswirkungen von Baumaßnahmen auf den Hochwasserabfluss (Nachweis der Hochwasserneutralität) erforderlich sein. Hierzu kommen instationäre Werkzeuge zum Einsatz.

Lösungsmethoden zu 1D-Modellen sind im Leitfaden „Hydraulik naturnaher Fließgewässer“ Teil 1 beschrieben.

Alle numerischen Methoden für instationäre Modelle machen es erforderlich, bei jedem Zeitschritt und für jedes Gitterstrukturelement algebraische Gleichungen oder sogar ein ganzes Gleichungssystem zu lösen. Hierbei kommen zwei Verfahren zum Einsatz: Explizite Verfahren und Implizite Verfahren.

▪ Explizite Verfahren

Bei Verwendung expliziter Lösungsverfahren werden die Unbekannten an einem Gitterknoten (z.B. Fließgeschwindigkeit, Wasserstand, Konzentration) jeweils einzeln aus den Werten der Nachbarknoten nur der vorhergehenden Zeitebenen berechnet. Auf einen Zeitschritt bezogen ist deshalb der Rechenaufwand für dieses Verfahren sehr klein.

Explizite Verfahren haben eine Zeitschrittbegrenzung, die sich aus dem **Courant-Kriterium** ergibt. Nach diesem Kriterium darf der Zeitschritt nicht größer sein als die Zeit, die ein Wasserpartikel benötigt, um von einem Gitterknoten zum nächsten zu wandern.

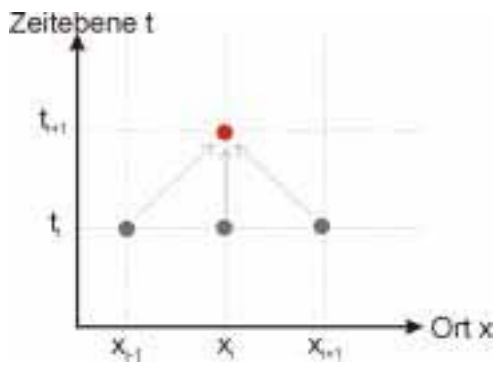


Abb. 3.3: Veranschaulichung der Lösungsbedingungen expliziter Verfahren im Zeit-Ort-Gitternetz.

▪ **Implizite Verfahren**

Im Gegensatz zu den expliziten Verfahren führen implizite Verfahren zu Gleichungssystemen, mit deren Hilfe alle Unbekannten der neuen Zeitebene durch ein Gleichungssystem aus allen Werten der aktuellen und alten Zeitebene berechnet werden. Diese Verfahren können daher mit den expliziten nur konkurrieren, wenn sie größere Zeitschritte erlauben oder wenn sie bei gleichem Zeitschritt genauere Ergebnisse liefern. Beides ist in der wasserbaulichen Praxis häufig der Fall.

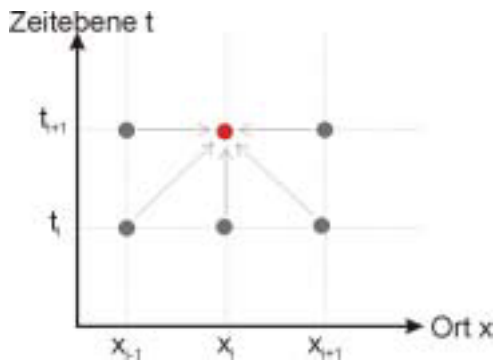


Abb. 3.4: Veranschaulichung der Lösungsbedingungen impliziter Verfahren im Zeit-Ort-Gitternetz.

Die 2D-Modellierung von natürlichen Gewässerlandschaften findet durch Transformation der Geometrie- bzw. Geländedaten in eine punktuelle bzw. diskrete Gitterstruktur statt.

In der Praxis kommen folgende drei numerische Methoden zum Einsatz:

- Finite-Differenzen-Methode (FDM)
- Finite-Elemente-Methode (FEM)
- Finite-Volumen-Methode (FVM).

▪ **Finite-Differenzen-Methode (FDM)**

Die FDM ist das älteste Verfahren und wurde lange Zeit nur in Verbindung mit kartesischen Gitterstrukturen angewandt.

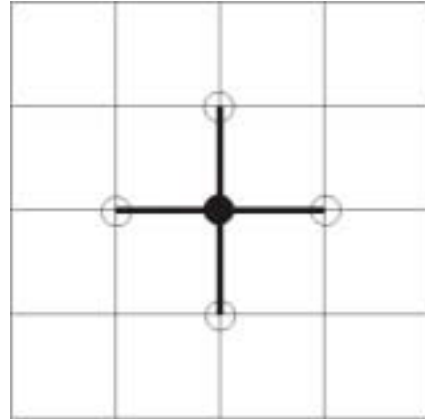


Abb.: 3.5: Skizze eines "5-Punkte-Differenzensternes" in einer kartesischen Gitterstruktur. Mit der FDM werden die Lösungswerte des mittleren Knotens explizit aus den Lösungswerten der benachbarten Knoten berechnet.

Durch die Verwendung von strukturierten, i.d.R. äquidistanten Berechnungsgittern werden insbesondere bei expliziten Lösungsverfahren sehr schnelle Algorithmen und Rechenzeiten möglich. Eine starre Gitterstruktur erlaubt bei (natürlichen) Flussläufen nur eine grobe Anpassung des Gitternetzes an die Topographie des Modellgebietes. In der Praxis kommen zur besseren Anpassung deshalb auch gekrümmte Koordinatensysteme zum Einsatz.

Nimmt man eine Erhöhung des Rechenaufwandes in Kauf, so kann mit einer globalen (telescoping) oder lokalen (nesting) Gitternetzverfeinerung eine bessere Anpassung erzielt werden.

Die FDM ist für die Modellierung von Flüssen dann geeignet, wenn relativ regelmäßige Geometrien vorliegen (z.B. bei wasserbaulich überprägten Gewässerläufen) und die Problemstellung zumindest im mesoskaligen Bereich eine dreidimensionale Auflösung erfordert. Solche Problemstellungen sind z.B. die Umströmung von Bauwerken oder die Ausbreitung von Einleitungen, somit also Vorgänge im Übergangsbereich zum Nahfeld.

Für großräumige Strömungs- und Transportvorgänge im gesamten Bereich einer Talaue ist die Finite-Elemente-Methode in Verbindung mit einer zweidimensionalen Strömungssimulation geeigneter.

- **Finite-Elemente-Methode (FEM)**

In der Praxis wird die FEM häufig auf unstrukturierte Gitterstrukturen angewandt. Dadurch entsteht für den Modellierer eine große Flexibilität bei der Anpassung der Gitterstruktur an natürliche Areale. Eine Besonderheit der FEM ist jedoch, dass sie zwar die Masse des Wassers und der transportierten Stoffe für das gesamte Lösungsgebiet streng erhält (sog. Konservativität für das Gebiet), nicht aber für jedes einzelne Element.

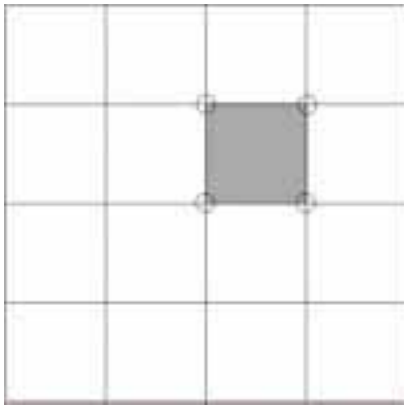


Abb.: 3.6: Finites Element mit vier durch Knoten begrenzte Seiten in einer kartesischen Gitterstruktur.

Bei der FEM wird das Modellgebiet i.d.R. auf ein Netz von Drei- oder Vierecken abgebildet. Obwohl für die Elementformen gewisse Grenzen bezüglich Seitenlängenverhältnis und Winkel einzuhalten sind, ist ein solches Gitternetz sehr flexibel und erlaubt eine gute Anpassung des Rechengitters an die topographischen und geometrischen Verhältnisse im Fluss-Vorlandbereich sowie an die lokalen Rauheitsverhältnisse.

Das unstrukturierte Gitternetz führt bei Verwendung der FEM i.d.R. aufgrund einer größeren Bandbreite von Gleichungsmatrizen zu längeren Rechenzeiten als bei der FDM. Durch Algorithmen zur automatischen Gittergenerierung und Knotennummerierung und

zur Bandbreitenoptimierung lässt sich die Rechenzeit jedoch deutlich reduzieren.

Für praktische Problemlösungen ist dabei neben der Flexibilität des Rechengitters ein weiterer Vorteil von Bedeutung: Zur Untersuchung von bauwerksbezogenen Nahfeldströmungen innerhalb des Untersuchungsgebietes (z.B. an einem Straßendurchlass oder einer Wehranlage) lassen sich durch die Verknüpfung der im Bauwerksbereich liegenden Knoten mit empirischen Ab- oder Durchflussformeln gezielte Aussagen zur Abflusscharakteristik machen.

- **Finite-Volumen-Methode (FVM)**

Als Nachfolger der FDM und FEM wurde aufgrund der einzelementbezogenen Nachteile die FVM entwickelt. Bei dieser Methode ist die Konservativität für das gesamte Gebiet und auch für das Einzelement a priori gegeben. Hierbei werden Kontrollvolumina um einzelne Gitterknoten herum gebildet, für die eine Bilanzierung aller Flüsse erfolgt, welche bei der nachfolgenden Bildung von Differenzen bewahrt wird.

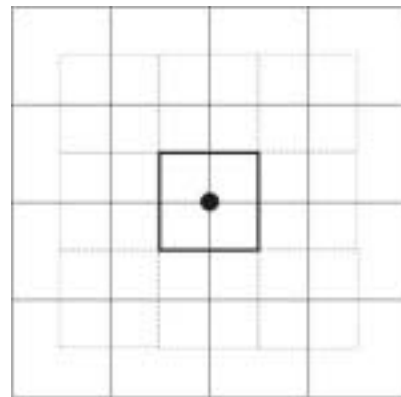


Abb.: 3.7: Kontrollvolumen um einen zentralen Gitterknoten.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die aufgezählten numerischen Methoden und Verfahren eine ähnliche Leistungsfähigkeit aufweisen. Auch in der theoretischen Klassifizierung sind die Methoden nicht immer streng voneinander zu trennen. Dadurch ist eine Charakterisierung eines Lösungsansatzes als FDM, FEM oder FVM nur von begrenzter Aussagefähigkeit.

4 HN-Simulation von Fließgewässern

4.1 Auswahl der Modellierungsmethode

Zur optimalen Modellwahl und zur Modellgenauigkeit können keine pauschalen Aussagen gemacht werden. 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.)

Liegt eine überwiegend eindimensionale Strömungscharakteristik des zu modellierenden Flussabschnittes vor, so können 1D-Verfahren zum Einsatz gebracht werden. Als Ergebnis erhält man über den Profilquerschnitt gemittelte Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten. Durch simultane Lösungsmethoden können auch vermaschte bzw. vernetzte Systeme modelliert werden.

Die **eindimensionale Betrachtungsweise** ermöglicht auch bei der Untersuchung großer Flussabschnitte eine hohe Effektivität bezüglich Datenhandhabung, Modellerstellung, Modellkalibrierung sowie Sensitivitätsanalysen bzw. Variantenstudien.

Falls sich die Strömung nicht auf 1-D Verhältnisse reduzieren lässt, oder wenn z.B. detaillierte Kenntnisse der Fließgeschwindigkeiten auf ausgedehnten Vorlandflächen gewonnen werden sollen, ist der Einsatz **zweidimensionaler Modelle** erforderlich. 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.

Als weiteres Einsatzkriterium wird gelegentlich die zu untersuchende Gebietsgröße genannt. Hierbei ist jedoch zu betonen, dass die Gebietsgröße als Auswahlkriterium hinter den Kriterien 'Strömungscharakteristik' und 'Zielgröße' steht.

Als wesentlich ist festzuhalten, dass die Modellgüte, abgesehen von der fachlichen Kompetenz und Erfahrung des Modellierers, in erster Linie von der Genauigkeit und Menge der Geometriedaten sowie der zur Kalibrierung und Validierung des Modells zur Verfügung stehenden Wasserspiegelfixierungen und zugehörigen Abflussmessungen abhängig ist.

4.1.1 Dreidimensionale (3D-) Modelle

Der praktische Einsatz von 3D-Modellen, die im Forschungsbereich bereits zur Verfügung stehen, kann für kleinskalige Nahfeldberechnungen sinnvoll sein. Eine Tendenz zur Vergrößerung der Modellgebiete ist erkennbar, jedoch durch die Rechnerkapazität beschränkt.

Ein 3D-Modell ist in der Lage, in jedem räumlich vorhandenen Punkt innerhalb des Modellgebietes die wichtigsten strömungscharakterisierenden Größen anzugeben. Im Gegensatz zu 2D-Modellen wird hier nicht tiefen- bzw. lateral gemittelt und im Gegensatz zu 1D-Modellen nicht querschnittsgemittelt berechnet.

Der Aufwand zur Erstellung eines 3D-Modells ist enorm (Netzgenerierung, Erzeugung von Anfangs- und Randbedingungen, Parameterbestimmung, Rechenaufwand, Visualisierung dreidimensionaler Ergebnisdaten); deshalb sollte geprüft werden, ob die Problemstellung dies rechtfertigt.

4.1.2 Zweidimensionale (2D-) Modelle

Tiefengemittelte 2D-Modelle sind in den vergangenen Jahrzehnten von zahlreichen Forschungseinrichtungen entwickelt worden. Tiefengemittelt bedeutet hierbei, dass die Strömung an jeder Stelle im Untersuchungsgebiet als über die Fließtiefe gemittelter Wert ausgegeben werden kann. Der Einsatz erfolgt i.d.R. bei Fließgewässern.

2D-Modelle erlauben insbesondere bei komplexen Strömungsverhältnissen bzw. Flussbettgeometrien mit Bauwerken und/oder mit vegetationsreichen überfluteten Vorländern eine relativ genaue Berechnung der Strömungskennwerte.

4.1.3 Eindimensionale (1D-) Modelle

1D-Modelle betrachten Wasserspiegellinie und Durchfluss nur in Hauptfließrichtung. Sie sind daher für regelmäßige Flussgeometrien ausreichend. Eindimensionale Berechnungsverfahren reduzieren das Abflussverhalten auf über den Querschnitt gemittelte hydraulische Kennwerte (wie z.B. Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegelhöhe, Sohlschubspannung).

Um auch Veränderungen quer zur Fließrichtung berücksichtigen zu können, wie sie beim Hochwasserabfluss in weiten Talauen oder in naturbelassenen Gewässern auftreten, sind 1D-Modelle mit gegliederten Querschnitten (Hauptbett, Vorländer, Uferzonen, Verzweigungen) entwickelt worden.

Moderne Verfahren und Programme erlauben eine Zonierung komplexer Fließquerschnitte in Bereiche unterschiedlicher Eigenschaften (z.B. Rauheiten). Durch Überlagerungs- oder durch getrennt-segmentierte Berechnungsalgorithmen kann dann auch z.B. zwischen Fließgeschwindigkeiten auf den Vorländern und im Hauptgerinne differenziert werden. Grundlage dieser Berechnungsalgorithmen ist eine Kopplung zwischen Wasserspiegel- und Energielinienbilanz an jeweils benachbarten Querschnitten.

Über simultane Lösungsmethoden können auch verzweigte und vermaschte Systeme simuliert werden.

4.2 Modellaufbau / Modellerstellung

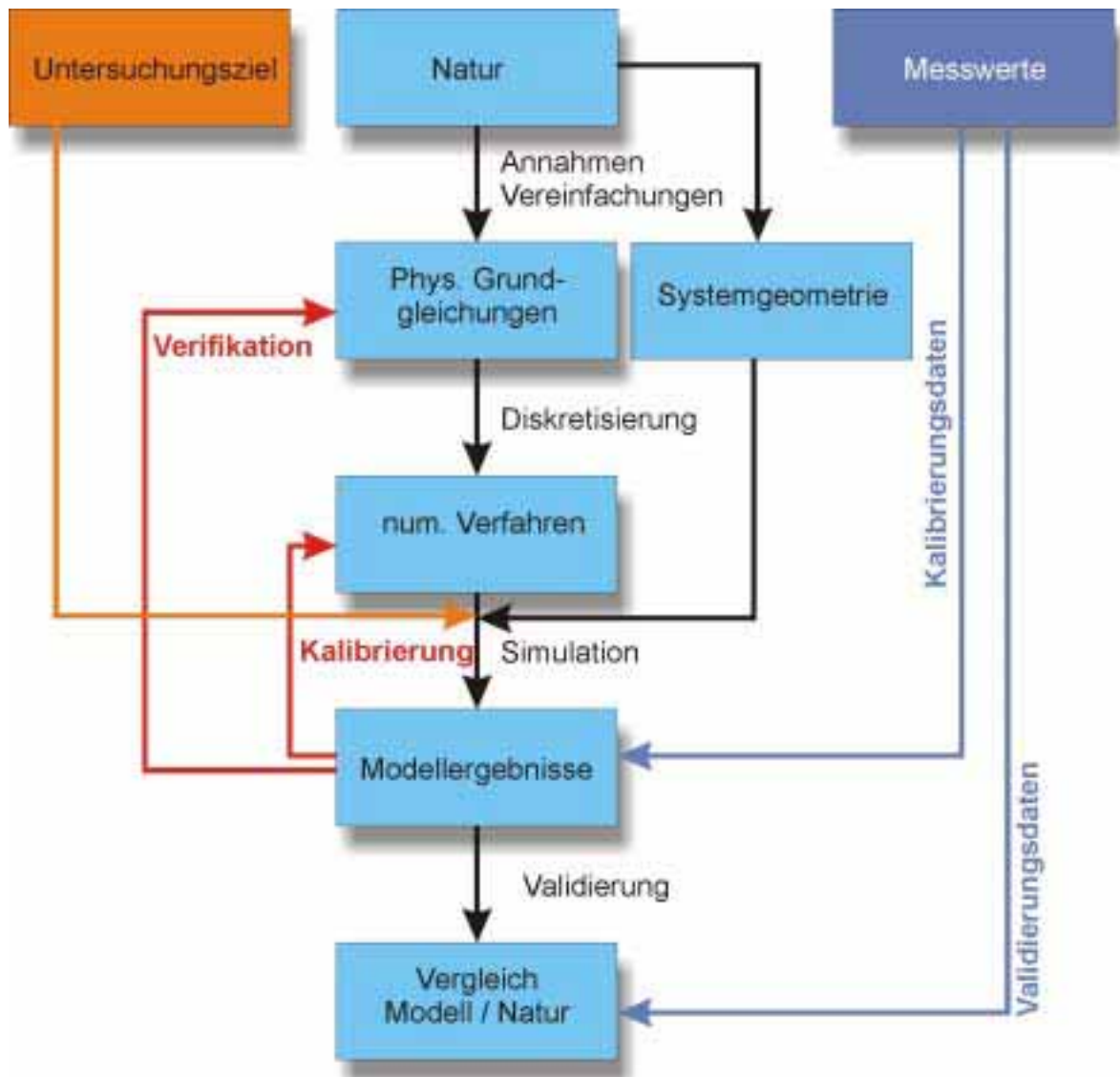


Abb. 4.1: Ablaufdiagramm zur Bildung von hydronumerischen Modellen.

Aus Abbildung 4.1 werden die einzelnen Arbeitsschritte, die bei einer Modellbildung erforderlich sind, ersichtlich. Die blauen Kästen stellen den Arbeitsablauf zur Modellerstellung dar.

Zur Beschreibung von Naturprozessen bedient man sich physikalischer Grundgleichungen. In der Regel handelt es sich dabei um Differentialgleichungen, die durch Diskretisierung gelöst werden können.

Mit der Verifikation werden die physikalischen Grundgleichungen und Ihre Verwendung im Modell überprüft. Die Kalibrierung hingegen

überprüft die numerischen Verfahren, die zum Lösen der Grundgleichungen eingesetzt werden.

4.3 Modellkalibrierung / Modellgüte

Die mit einem numerischen Modell erzeugten Ergebnisse sind in der Praxis oftmals Grundlage für weitreichende Entscheidungen. Aus diesem Grund ist die Kenntnis der Genauigkeit der Modellergebnisse für den Modellentwickler, den Modellbetreiber, den Auftraggeber und dem Anwender der Ergebnisse von erstrangiger Bedeutung.

An dieser Stelle muss jedoch mit Nachdruck darauf aufmerksam gemacht werden, dass numerische Modelle keine „**Black-Box-Systeme**“ sind, die von unerfahrenen Anwendern ohne Einschränkung benutzt werden können.

Der unsachgemäße Aufbau eines Modells sowie das unterlassen von ständigen Plausibilitätsprüfungen während des Modellbetriebs

kann zu Fehlinterpretationen der Simulationsergebnisse führen, die weitreichende Folgen haben können. Aus diesen Gründen sollten nur eingearbeitete Fachleute, die sich auch mit den mathematisch-numerischen Modellhintergründen befasst haben, bei der Erstellung eines Modells tätig sein.

Als Qualitätsmerkmale für den Einsatz eines HN-Modells gelten folgende Modellcharakteristika:

- Umfang und Genauigkeit der Eingangsparameter,
- getroffene Vereinfachungen und daraus resultierende eingesetzte Lösungsverfahren,
- Genauigkeit der Ergebnisse und weiterhin
- Arbeitsaufwand sowie
- einzusetzende Computerressourcen

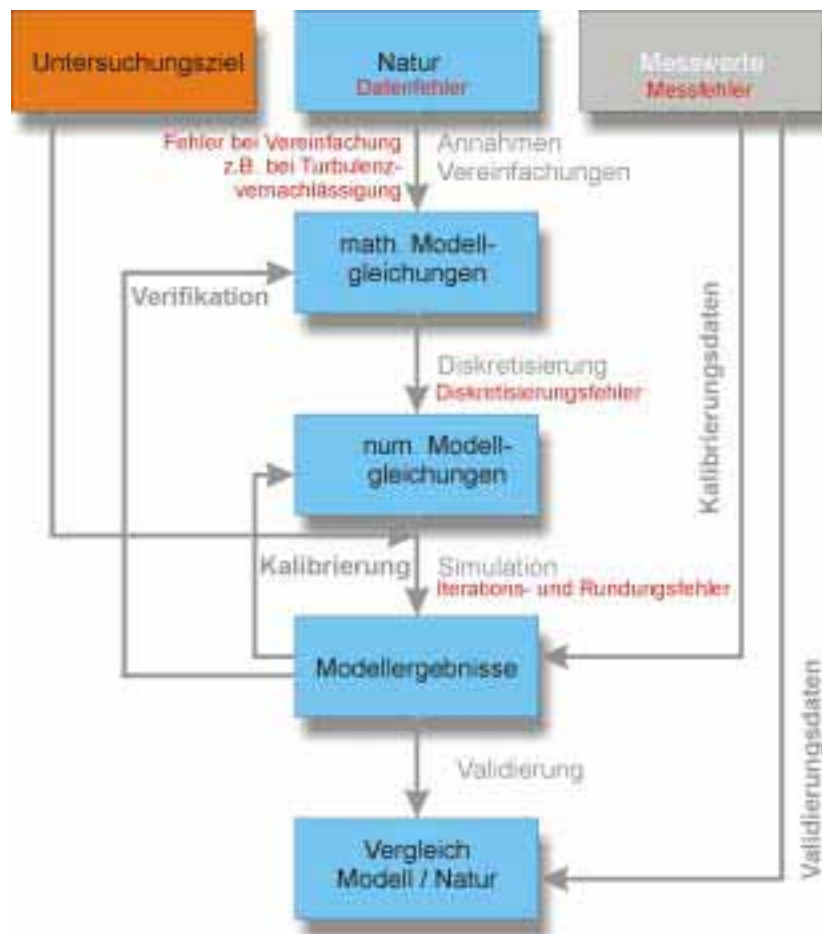


Abb. 4.2: Fehlerquellen bei numerischen Modellen. Die Abläufe sind grau dargestellt, die dabei möglichen Fehler sind rot dargestellt.

4.3.1 Modellgenauigkeit und Fehlerquellen

Nur der Vergleich mit der Natur kann als entscheidender Maßstab für die Genauigkeit eines Modells angenommen werden. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass in diesen Vergleich auch Fehler eingehen, die nicht dem Modell anzulasten sind. Führt man den Vergleich der Modellergebnisse mit Naturmessungen durch, so sollte stets darauf geachtet werden, dass nur vergleichbare Größen verwendet werden.

Ein eindimensionales Flussmodell liefert beispielsweise nur eine querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeit. Diese berechnete Fließgeschwindigkeit kann deshalb nur bedingt mit der an einem Punkt des Querschnittes gemessenen Fließgeschwindigkeit verglichen werden. Trotzdem kann ein derartiger Vergleich sinnvoll sein, wenn er mit Sorgfalt interpretiert wird.

Des Weiteren sind auch Fehler in den Modellergebnissen sehr bedeutsam. Die wichtigsten Fehler sind dabei diejenigen, die bei der Modellbildung durch die vielen zu treffenden **Annahmen** und **Vereinfachungen** entstehen.

Hinzu kommen **Messfehler** in der Natur sowie Fehler bei der geometrischen Beschreibung des Systems und bei der Annahme der Randbedingungen (z.B. hydrologische Randbedingungen).

Ferner können numerische Programme noch **mathematische Fehler** erzeugen, die z.B. bei Iterationsprozessen oder durch Diskretisierungsvorgänge entstehen. Durch das Rechnen mit einer beschränkten Anzahl von Dezimalstellen entstehen **Rundungsfehler**.

Ein Vergleich zwischen Modellergebnis und Naturdaten lässt nicht immer einen Rückschluss auf den Fehlertyp zu.

4.3.2 Verifikation

Der Nachweis der Richtigkeit einer Aussage oder eines Verfahrens wird Verifikation bezeichnet.

Der Begriff erlaubt nur eine Unterscheidung zwischen richtig oder falsch.

Eine Verifikation der Modellbildung gibt es demnach nicht, da sich beim Modell immer die Frage nach Gültigkeit und Anwendbarkeit für bestimmte Problemklassen stellt. Wohl aber kann man von der Verifikation der numerischen Lösungsmethoden und der Programmierung sprechen.

Damit erbringt die Verifikation den Beweis, dass die gewählten Modellgleichungen und die gewählte numerische Lösung korrekt sind (d.h. Diskretisierungs- und Abbruchfehler sind vernachlässigbar klein und die Programmierung ist fehlerfrei). Daraus ist erkennbar, wie eine Verifikation durchgeführt wird: einerseits durch laufend neue Plausibilitätstests und andererseits durch den Vergleich der numerischen Berechnungsergebnisse mit denen analytischer Lösungen (falls überhaupt möglich).

Zu den **Plausibilitätstests** gehört z.B. die Überprüfung der Massenerhaltung: In ein Modellgebiet muss bei einem stationären Problem der eintretende Volumenstrom gleich dem aus tretenden sein.

4.3.3 Kalibrierung

In der Umgangssprache der Ingenieure wird anstelle des Begriffes Kalibrierung oftmals der Ausdruck **Modelleichung** verwendet. Der Sprachgebrauch geht auf die physikalischen Modelle zurück und steht im Widerspruch zu der eigentlichen Bedeutung des Wortes „Eichung“, das eine Anpassung an gesetzliche Maße und Normen beschreibt.

Da ein numerisches Modell neben konzeptionellen auch empirische Ansätze enthält, muss man bei der benötigten Datenmenge zwischen sehr gut bekannten Daten (sog. **harte Daten** wie z.B. Geometriedaten) und solche, die mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind (sog. **weiche Daten** wie z.B. Reibungsbeiwerte) unterscheiden.

Dabei ist zu beachten, woher die weichen Daten genommen werden. Hierzu gibt es i.d.R. nur zwei Möglichkeiten:

- Übernahme aus Büchern und Tabellen, wenn keine brauchbaren Naturmessdaten vorliegen oder
- Ermittlung der weichen Daten durch Kalibrierung.

Am Beispiel des Reibungsbeiwertes in einem HN-Modell soll die Kalibrierung verdeutlicht werden. Variiert man den Reibungsbeiwert in einer Folge von Simulationen derart, dass berechnete Wasserstände und nach Möglichkeit auch Fließgeschwindigkeiten ausreichend genau mit gemessenen übereinstimmen, so bedeutet dies, dass die spezifische Information, die für das Gewässer durch Messung zur Verfügung steht, auch in das Modell eingeht.

In einem ein- oder zweidimensionalen Modell spiegeln sich in dem Reibungsbeiwert auch viele Einflüsse wieder, die bei der Modellbildung nicht erfasst wurden (z.B. vernachlässigte Geschwindigkeitsverteilung über Querschnitt oder Tiefe). Findet die Kalibrierung nur mit einem Parameter statt (wie z.B. dem Reibungsbeiwert), so schlagen sich in ihm auch die Unsicherheiten aller anderen Parameter nieder.

4.3.4 Validierung

Die Validierung ist der Beweis dafür, dass ein Modell für ein bestimmtes Gewässer und eine bestimmte Fragestellung Ergebnisse liefert, die in der Genauigkeit den gestellten Anforderungen entsprechen.

Die Verifikation ist dabei eine notwendige Voraussetzung für die Validierung. Ebenso sind Messungen im Labor (zur Parametrisierung der Methoden) und Messungen in der Natur (zur Beschreibung der Wechselwirkung natürlicher Variabilität) hierfür unumgänglich.

Es empfiehlt sich bei veränderlichen geometrischen Randbedingungen (z.B. Bewuchsentwicklung) eine erneute Validierung mit neu aufgenommenen Naturdaten durchzuführen.

5. Praktische Beispiele

In diesem Kapitel soll anhand von Beispielen aus der Praxis die Anwendung von 1D-, 2D- und 3D-Modellen dokumentiert werden. Dabei kann nicht auf alle Details eingegangen werden – vielmehr soll ein Überblick über das Anwendungsspektrum vermittelt werden

5.1 3D-Modellanwendungen

Die Strömungsvorgänge in Gewässern sind hochgradig dreidimensional und turbulent. Laborexperimente gestalten sich aufgrund der Maßstäbe oftmals schwierig und zeitaufwendig.

Die dreidimensionale numerische Simulation ist heute – aufgrund der rapide gewachsenen Rechnerleistung - zu einem wichtigen Hilfsmittel geworden. Da 1D- und 2D-Verfahren für Ablösezone und Sekundärströmungen oftmals nicht hinreichend genaue Aussagen treffen und die Eigenschaft der Turbulenzströmung auf die Veränderung der freien Wasseroberfläche und/oder dem Sedimenttransport bzw. der Mehrphasenströmung numerisch mit den bisherigen Verfahren nicht exakt simuliert werden können, erschließt sich hier der Anwendungsbereich von 3D-Modellen.

Am Beispiel der Main-Staustufe Kostheim soll demonstriert werden, wie hochaufgelöste 3D-Modelle zur Nahbereichsuntersuchung von über- und/oder umströmten Bauwerken eingesetzt werden können.



Abb. 5.1: Ansicht der Staustufe Kostheim in der Natur.

Durch die Modellierung der Geometriedaten in einem räumlichen Netz erhält man die Modellgeometrie der Staustufe.

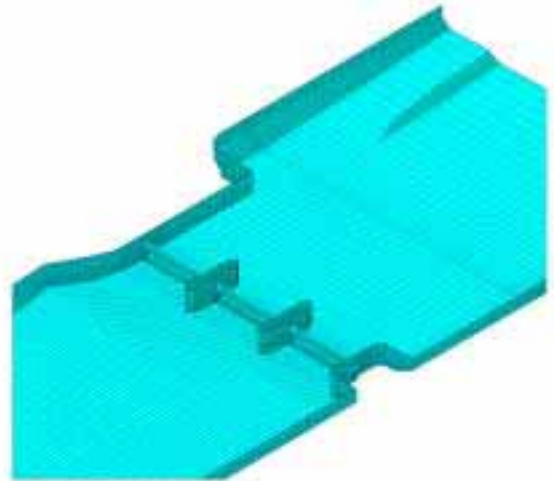


Abb. 5.2: Gitternetzmodell der Staustufe Kostheim

Im Falle des hier gezeigten Fallbeispiels wurde an diesem Modell zunächst die Unterströmung der drei Wehrwalzen simuliert. Durch die dreidimensionale Berechnung kann hier die Bauwerksumströmung berechnet und dargestellt werden.

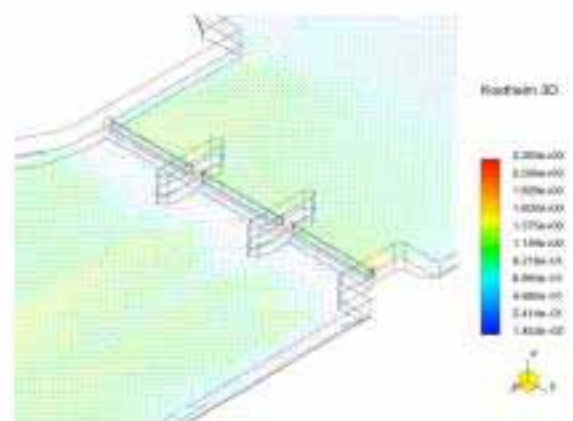


Abb. 5.3: Geschwindigkeitsverteilung am Querbauwerk bei Unterströmung der Wehrwalzen.

Neben der Geschwindigkeitsverteilung kann auch die freie Wasseroberfläche simuliert werden.

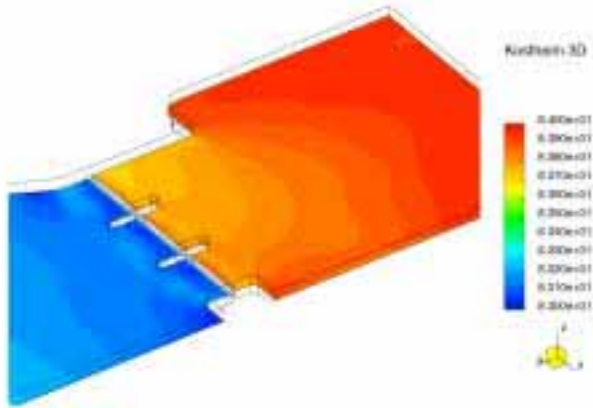


Abb. 5.4: Lage der freien Wasseroberfläche infolge der unterströmten Wehrwalzen.

Neben der Unterströmung der Walzen können auch alle anderen Betriebsarten der Wehranlage im Modell simuliert werden.

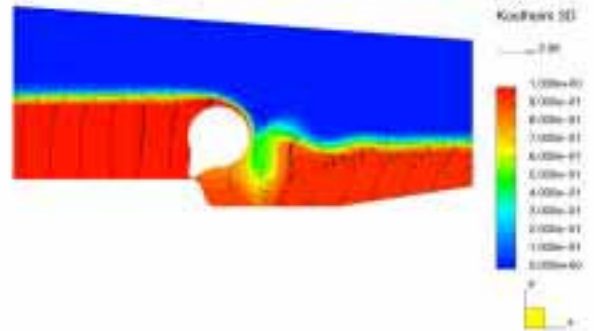


Abb. 5.6: Überströmung der mittleren Wehrwalze.

Eine weitere Möglichkeit des Einsatzes von 3D-Modellen besteht in der Simulation von Gewässerabschnitten zur Darstellung der Auswirkung von Sekundärströmungen.

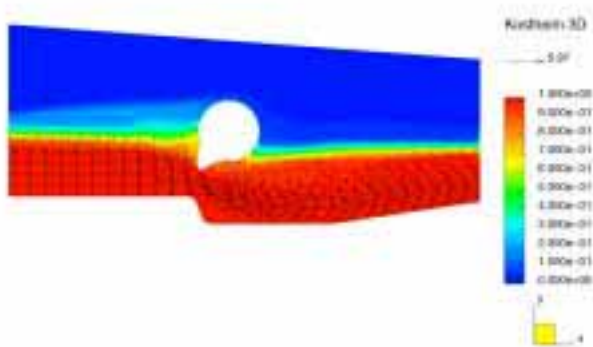


Abb. 5.5: Längsschnitt mit Lage der Wasseroberfläche.

Am Beispiel der Main-Staustufe Lengfurth wird im Folgenden diese Einsatzmöglichkeit aufgezeigt.

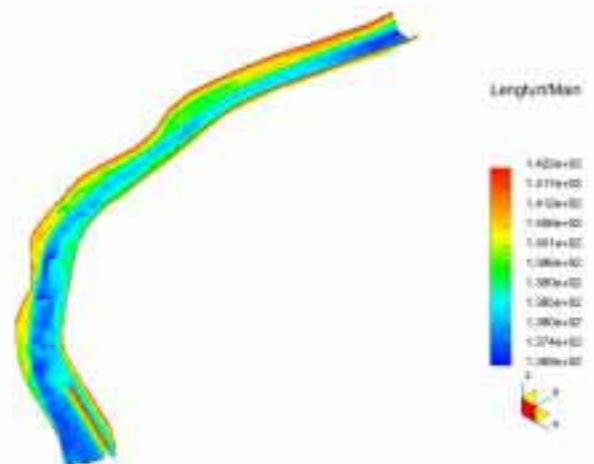


Abb. 5.7: Digitales Geländemodell des Gewässerabschnittes.

Aus dem digitalen Geländemodell wird die natürliche Geometrie des Gewässerabschnittes in ein Berechnungsgitter übertragen.



Abb. 5.8: Modellgitter des Gewässerabschnittes.

Mit Hilfe des numerischen Modells können sämtliche strömungsspezifischen Parameter entlang des Gewässerabschnittes rechnerisch simuliert und dargestellt werden.

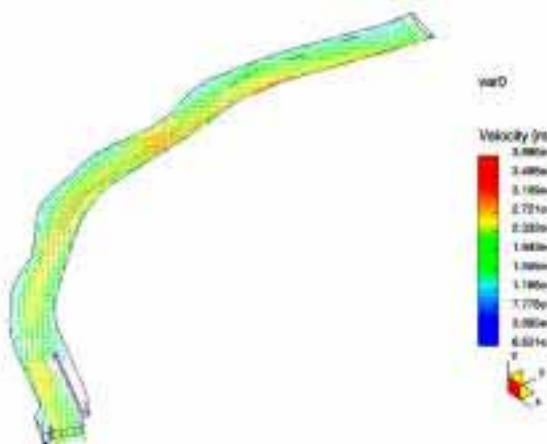


Abb. 5.9: Geschwindigkeitsverteilungen entlang der Oberfläche.

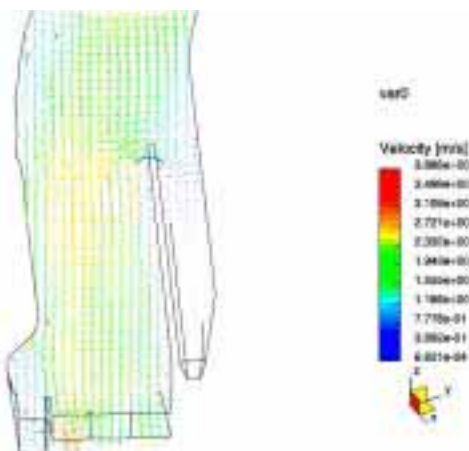


Abb. 5.10: Ausschnittsvergrößerung im Bereich der Stauanlage.

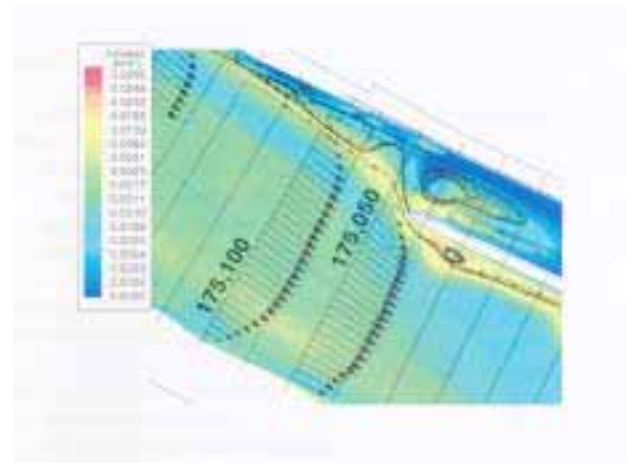


Abb. 5.11: Strömungsrichtungen über dem Gewässerquerschnitt.

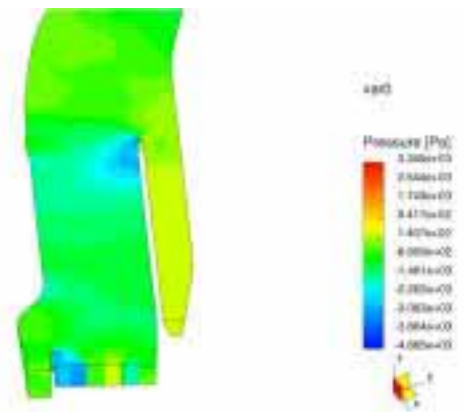


Abb. 5.12: Druckverteilungen im Bereich der Staustufe.

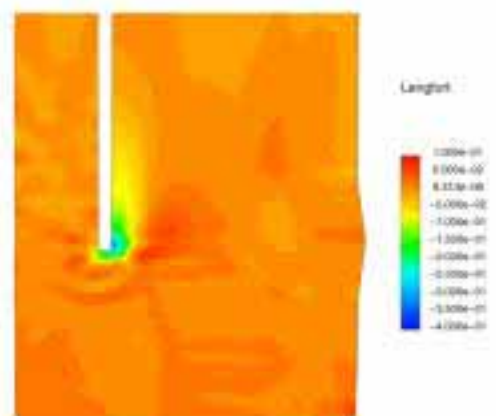


Abb. 5.13: Freie Wasseroberfläche infolge Sekundärströmungseinflüsse.

5.2 2D-Modellanwendungen

Der Einsatz von 2D-Modellen soll hier exemplarisch am Beispiel der Kochermündung in den Neckar aufgezeigt werden.

Die Ortslage Kochendorf der Stadt Bad Friedrichshall liegt am Kocher unmittelbar bei seiner Mündung in den Neckar und gehört aus hydraulischer Sicht zur Stauhaltung Gundelsheim, in die auch ein weiterer großer Nebenfluss des Neckars, die Jagst, einmündet.

Für den Hochwasserschutz der überflutungsgefährdeten Ortslage werden Angaben über Wasserstände in Abhängigkeit der Zuflüsse Neckar, Kocher und Jagst sowie der Steuerung des Wehres Gundelsheim benötigt. Die komplexe Strömungscharakteristik im Mündungsbereich machte den Einsatz eines zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modells erforderlich.



Abb. 5.14: Situation im Bereich von Kochendorf.

Zur Modellerstellung werden alle zur Verfügung stehenden Daten hinsichtlich Aktualität und Genauigkeit bewertet und diesbezüglich selektiv zusammengeführt, so dass ein digitales Geländemodell mit ca. 200.000 Rasterzellen (4x4 Meter) entsteht.

Als Randbedingungen gelten die Zuflüsse des Neckar und des Kocher als obere Randbedingung und der Wasserstand am unteren Rand, der von der Einstauwirkung des Zuflusses der Jagst, sowie der Wehrsteuerung Gundelsheim abhängig ist.

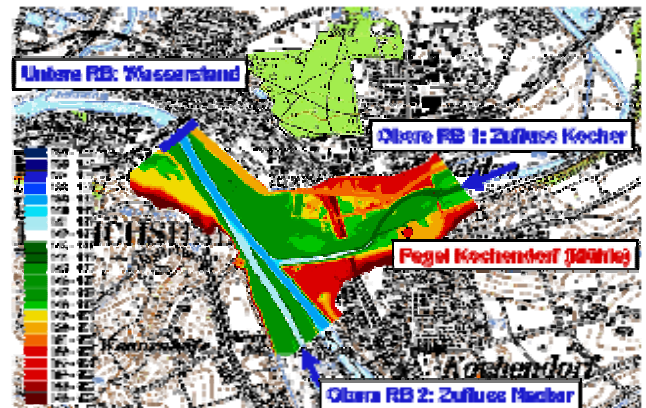


Abb. 5.15: Randbedingungen bei der Modellerstellung.

Zur Kalibrierung des hydrodynamisch-numerischen Modells werden berechnete Wasserspiegellagen mit gemessenen Wasserspiegelfixierungen abgelaufener Hochwasserereignisse verglichen und eine Anpassung der Gerinnerrauheit über die Variation des Strickler-Beiwertes vorgenommen.

Modellgrundlagen

Das in diesem Fall angewandte Modell löst die tiefengemittelte Flachwassergleichungen mittels eines Finite-Volumen-Verfahrens auf einem strukturierten Rechteckgitter. Das Programm garantiert hohe Stabilität und die volle Einhaltung der Erhaltungsgleichungen von Impuls und Kontinuität. Es verfügt über ein Zeitschrittverfahren mit expliziter Zeitdiskretisierung.

Die Turbulenzmodellierung erfolgt durch ein Nullgleichungsmodell. Die Möglichkeit des Benetzens und Trockenfallens von Modellbereichen ist gegeben. Damit können komplexe Topografien bearbeitet werden.

Ergebnisse

Das Programm liefert detaillierte Aussagen über die lokalen Verteilungen von Fließgeschwindigkeit, Wasserstand, Sohlschubspannung und weiterer abhängiger hydraulischer Größen. Diese Ergebnisse lassen sich über Geo-Informationssysteme darstellen und weiterverarbeiten.

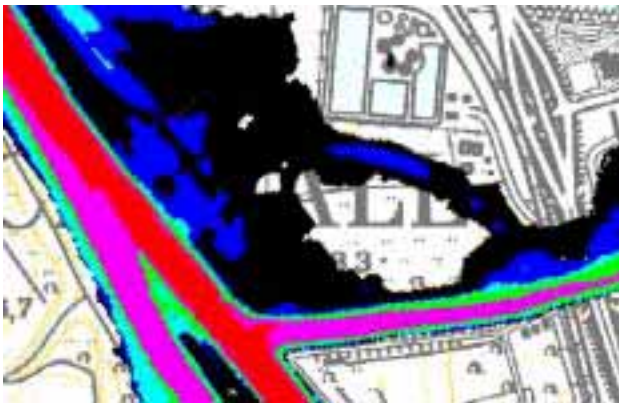


Abb. 5.16: Darstellung von Fließtiefen.

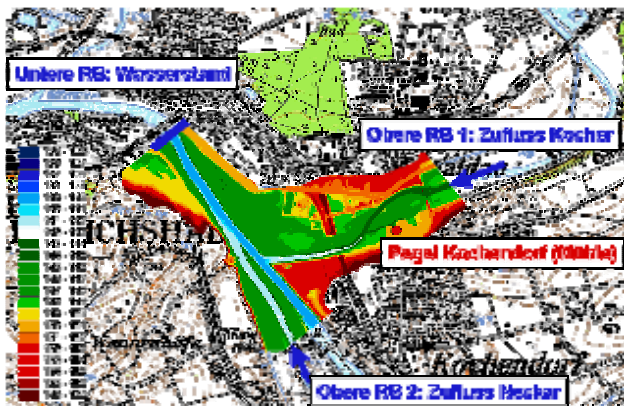


Abb. 5.17: Darstellung von Fließgeschwindigkeiten.

5.3 1D-Modellanwendungen

Der Einsatz von 1D-Modellen soll im Folgenden am Beispiel des HN-Modells Neckar, welches im Rahmen des IkoNE-Projektes erstellt wurde, aufgezeigt werden.

Veranlassung / Zielsetzung

Im Rahmen der Integrierenden Konzeption Neckar-Einzugsgebiet (IKoNE) erstellt das Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK) der Universität Karlsruhe im Auftrag der Wasserwirtschaftsverwaltung Baden-Württemberg ein GIS-gestütztes Hochwassermodell für den schiffbaren Neckar.

Daten und Modelle werden sukzessive an die Landesverwaltung übergeben und zur Unterstützung des Hochwassermanagements (Überarbeitung rechtskräftiger Überschwemmungsgebiete, Variantenstudien, Gefahrenkar-

tierungen, Risikobewertungen, Aufklärung der Bevölkerung etc.) eingesetzt.

Das Modell ermöglicht u.a. die Simulation der Strömungsverhältnisse für verschiedene Hochwasserszenarien und die Ermittlung von Überflutungsflächen.



Abb. 5.18: Modellbereich des schiffbaren Neckar (ca. 200 km Fließstrecke).

Modellauswahl

Zur Simulation der Strömungsverhältnisse des Neckars im Hochwasserfall wird aufgrund der primär eindimensionalen Strömungscharakteristik des Neckars der geforderten Zielgrößen (Wasserstand, Abfluss) und der Größe des Untersuchungsgebietes (200 Flusskilometer) ein eindimensionales Strömungsmodell (instationär) verwendet.

Hierbei spielt die Möglichkeit der instationären Betrachtungsweise des Abflussgeschehens eine entscheidende Rolle, um Auswirkungen von Baumaßnahmen im gesamten strömungswie retentionswirksamen Bereich der Neckar-talaue sowie von Maßnahmen in den Nebengewässern auf die Hochwasserganglinie des Neckars quantifizieren zu können.

Durch eine Reduzierung des Rückhaltevolumens der Flussstrecke (z.B. infolge einer Eindeichung der Talau) kommt es zu einer Aufsteilung der Hochwasserganglinie. Der Scheitelwert vergrößert sich und die Welle läuft schneller flussabwärts.

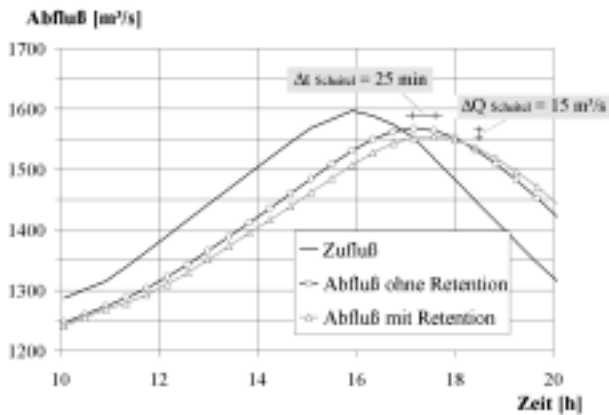


Abb. 5.19: Exemplarischer Vergleich der Entwicklung einer Hochwasserganglinie mit und ohne Retentionswirkung.

Modellierbar sind neben verzweigten bzw. vermaschten Flusssystemen (Altarme, Ausleitungen etc.) u.a. auch Bauwerke (z.B. Wehre, Schütze, Wasserkraftanlagen). In Bereichen mit stark mehrdimensionaler Strömungscharakteristik (Mündungsbereiche etc.) wird das großräumige 1D-Modell durch lokale 2D-Modelle ergänzt.

Modellerstellung

Das Berechnungsverfahren basiert auf der Lösung der Saint-Venant-Gleichungen durch ein implizites Differenzenverfahren (Preissmann – Schema).

Zur Erstellung der Systemgeometrie der 1D-HN-Modelle werden die abflusswirksamen Bereiche des Flussschlauchs und der Vorländer in Form von Querprofilen (100m-Abstand und Sonderprofile) modelliert. Die im Hochwasserfall retentionswirksamen Bereiche der Neckartalau werden über eine Funktion des Speichervolumens in Abhängigkeit des Wasserstandes berücksichtigt. Die Volumenfunktionen $V(y)$ der Retentionsräume und die Erweiterungen der Querprofile in die Vorländer werden mittels GIS aus einem Digitalen Geländemodell (DGM) bestimmt. Zur DGM-Erstellung werden

topographische Informationen aus unterschiedlichen Datenquellen (DGK5, Befliegungsdaten, digitales Kanalkataster etc.) zusammengeführt.

Für die meisten Stauhaltungen des Neckars liegen Wasserspiegelfixierungen von mehreren HW-Ereignissen vor, so dass eine Kalibrierung über ein größeres Abflussspektrum möglich ist. Als Kalibrierungsgröße dient der Strickler-Beiwert, über welchen die Strömungsverluste pauschal berücksichtigt werden. Dieser Parameter wird entweder innerhalb der Querprofile variierend (z.B. Unterteilung Flussschlauch / Vorländer) oder in Abhängigkeit der Fließtiefe angepasst. Durch Validierung der Modelle (Berücksichtigung zukünftiger HW-Ereignisse) und eventuelle „Nachkalibrierung“ kann die Modellgüte weiter gesteigert bzw. das Modell aktualisiert werden.

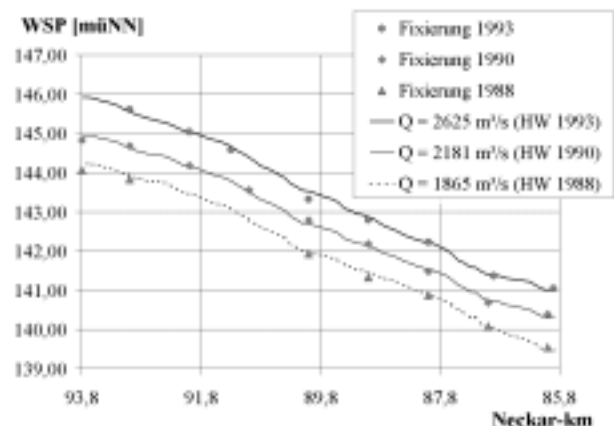


Abb. 5.20: Ergebnis einer stationären Kalibrierung am Beispiel der Stauhaltung Neckarzimern.

Zur Ermittlung von Überflutungsflächen und -tiefen werden die eindimensional berechneten Wasserstände über GIS-Funktionalitäten an vordefinierte „Linien gleicher Wasserstände“ gekoppelt und zu einem flächendeckenden Raster interpoliert.

Dieses Raster der Gewässeroberfläche wird mit dem Digitalen Geländemodell des Untersuchungsgebietes verschnitten. Hierdurch werden die Gefahrenzonen erkannt, welche durch Verknüpfung mit der statistischen Auftretenswahrscheinlichkeit der HW-Abflüsse und Schadensfunktionen einer Risikoanalyse unterzogen werden können.

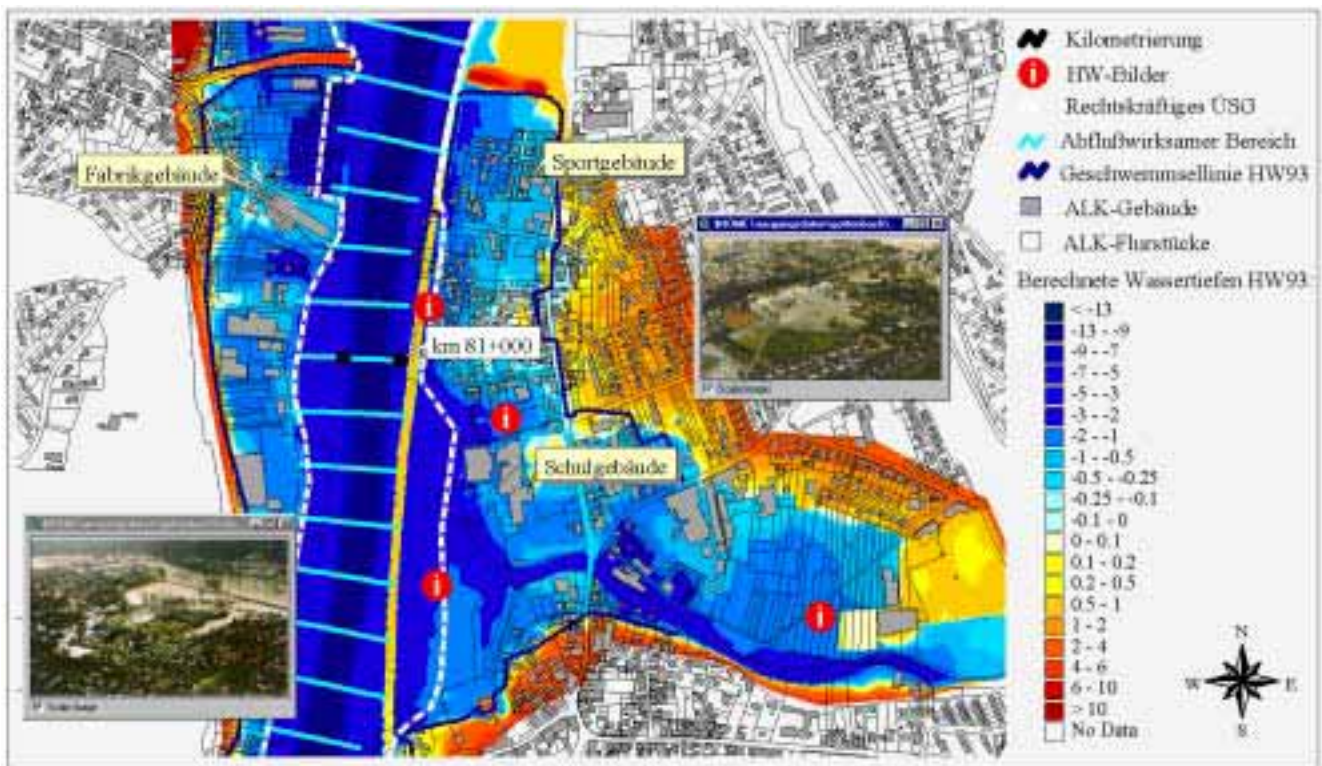


Abb. 5.21: Exemplarische Darstellung der Überlagerung hochwasserrelevanter Geodaten. Quelle: Oberle/IWK.

6 Übersicht zu kommerziellen numerischen Softwarepaketen

In den neunziger Jahren führte die LfU bei Ingenieurbüros im Land Baden-Württemberg eine Umfrage durch. Es wurden Informationen darüber gesammelt, mit welchen HN-Modellen in der Praxis gearbeitet wird und welche Vor- und Nachteile die einzelnen Produkte bei der Anwendung aufzeigen.

Das Ergebnis der Umfrage führte zu folgenden Feststellungen:

- Viele Büros und auch die Universitäten führen einen Großteil der HN-Berechnungen mit selbst erstellten Programmen durch.
- In einigen Fällen bildet ein kommerzielles Produkt den Kern der Berechnungsmodule. Durch Weiterentwicklung und individuelle Fragestellungen wurden aber seitens der Anwender Programmerweiterungen oder Applikationen in Eigenarbeit erstellt.
- Die Anwendungsbereiche der HN-Modelle hängen von den Vorgaben der Auftraggeber ab. Je nach Randbedingungen werden von Büros und Universitäten verschiedene Typen der HN-Modelle angeboten und zur Bearbeitung der Fragestellung eingesetzt.
- Die Behörden arbeiten im Gegensatz zu den Büros und Universitäten vorwiegend mit kommerziellen HN-Programmpaketen. Aus diesem Grund bieten viele Auftragnehmer auch den Einsatz bzw. die Konvertierung der eigenen HN-Programme zu kommerziellen HN-Programmen an. Die gängigsten Programmpakete sind in der folgenden Darstellung aufgeführt.

Das Kapitel vermittelt auf Grundlage der o.g. Umfrage eine Auswahl von kommerziellen HN-Programmen. **An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass seitens der Autoren dieses Leitfadens keinerlei Wertung und Empfehlung für spezielle Produkte gegeben wird.** Eine stets aktualisierte und umfangreichere Liste findet man auf der Internetseite der Technischen Universität Dresden / Institut für Wasserbau und Technische Hydro-mechanik.

(<http://rscwww.urz.tu-dresden.de/~daigner/uebersic.htm>)

6.1 HEC-RAS River Analysis Package

Internet: www.hec.usace.army.mil/software

Das Programmsystem HEC-RAS wird vom US Army Corps of Engineers fortlaufend entwickelt und über das Internet kostenlos weltweit angeboten (Download). HECRAS bietet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten der 1 - dimensionalen Berechnung und zahlreiche Optionen der Ergebnisdarstellung. Das Programmsystem erlaubt stationäre und instationäre Berechnungen auf Grundlage der Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler. Dabei können einzelne Gewässerabschnitte bis hin zu gesamten Gewässersystemen simuliert werden. Durch einzelne Module, die im Programm implementiert sind, besteht die Möglichkeit, hydraulische Kontrollbauwerke (z.B. Wehranlagen, Brücken, Durchlässe) zu integrieren.

HEC-RAS ist komplett auf das Betriebssystem Windows 95,98,2000,NT angepasst und unterstützt sämtliche Windows-Funktionen (z.B. können Querprofilaten durch Copy & Paste aus anderen Windows-Anwendungen eingelesen werden). Ferner besitzt HEC-RAS mehrere Import und Exportfunktionen in andere, gängige Datenformate sowie eine integrierte Schnittstelle zu GIS-Programmen. Auf der o.g. Homepage können neben den Programmfiles noch umfangreiche Benutzerhandbücher und Beispiele herunter geladen werden. Das Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH) bietet auch eine deutschsprachige Kompaktanleitung zum freien Herunterladen an (www.uni-karlsruhe.de/~iwk/).

Zur HEC-Familie gehören neben dem River-Analyses-System noch weitere umfangreiche Programme, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Weitere Informationen dazu finden sich im Internet auf zahlreichen Seiten (www.waterengr.com/hecprog2.htm).

6.2 WSPWIN

Internet: www.bjoernsen.de

Von der Björnsen Beratende Ingenieure GmbH wurde ein Programmsystem zur eindimensionalen Wasserspiegellagenberechnung entwickelt. Es umfasst ein Programmpaket, das sich aus einem Preprocessing-Programm, einem Berechnungsmodul und Postprocessing-Elementen zusammensetzt. Das Programm ermöglicht eindimensionale stationäre Berechnungen auf Grundlage der Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler oder der Fließformel nach Darcy-Weisbach mit dem Verfahren nach Mertens. Seitens des Anbieters werden noch weitere Applikationen und Schulungen angeboten.

6.3 FLUSS

Internet: www.rehm.de

Das Programmpaket FLUSS wird vom Ingenieurbüro Rehm entwickelt und vertrieben. Mit dem Programmpaket können Stau- und Senkungslinien für beliebig gegliederte Flussprofile berechnet werden. Bei der eindimensionalen Berechnung wird von einem stationär ungleichförmigen Abfluss ausgegangen. Dem Programm liegen die Berechnungsverfahren nach Manning-Strickler oder Darcy-Weisbach mit der Definition der Trennflächenrauheit nach Mertens oder Pasche zugrunde. Der Fließzustand kann entweder nach dem Verfahren von Knauf/Könemann oder nach der Grundformel ermittelt werden. Es ist möglich, den Gehölzbewuchs durch einen Bepflanzungsparameter nach Felkel zu berücksichtigen. Das Programm berechnet offene Normalprofile, offene Profile mit Einbauten (z.B. Brückenpfeiler) sowie geschlossene Profile (Durchlass). Der Brückenstau wird nach Rehbock berechnet.

6.4 Jabron

Internet: www.hydrotec.de

Das eindimensionale Wasserspiegellagenprogramm Jabron wird vom Büro Hydrotec vertrieben. Das Programmsystem Jabron ist für die Berechnung von Wasserspiegellinien in natür-

lich oder naturnah ausgebauten Gewässer konzipiert worden. Die Berechnung der Gerinnkapazität kann wahlweise stationär gleichförmig oder stationär ungleichförmig erfolgen. Weitere Zusatzmodule ermöglichen u.a. einen Datenaustausch zu Geo-Informationssystemen.

6.5 CFX

Internet: www.software.aeat.com/cfx

Die Produktpalette der AEA Technology umfasst die gesamte CFX-Familie. Mit Hilfe dieser Programme können 1D-, 2D- und auch 3D-Strömungsberechnungen durchgeführt werden. Je nach Hauptanwendung kommen dafür die entsprechenden Module der CFX-Familie in Frage.

6.6 MIKE11

Internet: www.bossintl.com

Dieses Programmpaket, das von der Firma Boss International unter der Rubrik Surfacewater Modeling Software angeboten wird, besteht aus mehreren Modulen. Das Programm MIKE11 basiert auf 1D-Berechnungsansätzen, liefert aber auch die Möglichkeit, Sedimenttransport zu simulieren. Das Ergänzungsprogramm MIKE11 Reservoir ist eine Aufrüstung zu einem 2D-Simulationsprogramm.

6.7 FLOWMASTER

Internet: www.flowmaster.com

Das Programmpaket wird von Flowmaster International vertrieben und konzentriert sich auf die Simulation von vernetzten Gewässersystemen, insbesondere auf Rohrleitungen. Für den Einsatz im Bereich naturnaher Fließgewässer ist es daher nicht unbedingt geeignet.

7 Kopplung von GIS mit hydronumerischen Programmen

GIS (**Geo-Informationssysteme**) hielten seit den neunziger Jahren Einzug in der wasserwirtschaftlichen Praxis und gelten heute als Standard. Besonders zur Visualisierung von Planungsvarianten und deren hydraulischen Auswirkungen im Nah- und Fernfeld eignen sich sog. georeferenzierte Darstellungen (z.B. Darstellung eines Überschwemmungsgebietes auf einer TK25 o.ä.).

Als Standard bei den kommerziellen Programmen haben sich im deutschsprachigen Raum vor allem zwei Softwareprodukte etabliert.

ESRI ArcView / ArcInfo

Internet: www.esri.com

Das Programmpaket ArcView der Firma ESRI bietet zahlreiche Möglichkeiten der Visualisierung, Verschneidung, Selektion und Überlagerung georeferenzierter Daten (wie z.B. ATKIS-Daten, Topographische Karten, Orthophotos, Digitale Geländemodelle, Digitale Höhenmodelle,...). Durch ein breites Angebot von Applikationen (Ergänzungsprogrammen) wird auch die gezielte Bearbeitung von Daten möglich. Hier kommen in der Wasserwirtschaft insbesondere die Ergänzungen 3D-Analyst und Spatial-Analyst zum Einsatz.

Autodesk: AUTO-CAD

Internet: www.autodesk.de

Das Programm AUTO-CAD kommt ursprünglich aus dem Bereich der Architektur und des technischen Zeichnens. Es ist durch eine Vielzahl von Funktionen gekennzeichnet, die das Entwerfen von klassischen technischen Zeichnungen vereinfachen.

Im Laufe der Jahre wurde dieses Programm durch Applikationen auch zur Darstellung und Bearbeitung von georeferenzierten Daten ausgebaut. Hier hat sich in der wasserwirtschaftli-

chen Praxis vor allem die Applikation AUTO-MAP bewährt.

Geographische Informationssysteme sind Softwaresysteme mit deren Hilfe raumbezogene Daten digital erfasst, editiert, verschnitten, verknüpft, analysiert, attribuiert und verwaltet sowie graphisch präsentiert werden können. Grundsätzlich kann zwischen Vektor- und Rasterdaten sowie den mit ihnen verknüpften Sachdaten (Attributen) unterschieden werden.

- **Vektordaten** sind lagebekannte Punkte, Linien und Polygone (Flächen). Punkte sind über ihre Koordinaten (x;y) definiert, Linien und Polygone über die Koordinaten ihrer Basispunkte. Vektordaten können als Attribut eine Höhenkomponente (z) zugewiesen bekommen, aber auch mit beliebigen Sachdaten verknüpft werden, so dass diese wiederum einen Raumbezug erfahren.
- **Rasterdaten** sind in einer Zeilen/Spalten-Struktur organisiert. Die Lage eines jeden Rasterpunktes ist über seine Zeilen- und Spaltenzugehörigkeit bestimmt. Jeder Rasterpunkt besitzt als Attribut eine bestimmte Wertigkeit, z.B. Farb- bzw. Grauwert (Scanner) oder Höhenwert (Digitale Geländemodelle).

Es bestehen zudem Transformierungsmöglichkeiten der beiden Formate. So kann eine Linie auch als eine Reihe von Rasterpunkten dargestellt werden oder aus einem Höhenraster Höhenlinien im Vektorformat abgeleitet werden.

In der HN-Simulation von Gewässern können Geographische Informationssysteme als effektives Hilfsmittel für das Pre- und Postprocessing der hydrodynamisch-numerischen (HN-) Strömungssimulation genutzt werden.

So unterstützen sie den Modellierer u.a. bei der

- Festlegung der Modellgrenzen,

- Aufbereitung und Zusammenführung topographischer Informationen des Untersuchungsbereiches,
- Erstellung der Systemgeometrie des Modells,
- Bestimmung von abfluss- und retentionswirksamen Bereichen sowie Kontrollquerschnitten,
- Definition von Fließwiderständen (z.B. durch Analyse digitaler Orthofotos),
- Aufbereitung und Visualisierung von Kalibrierungsdaten (Geschwemmsellinien, HW-Fixierungen, etc.),
- Ermittlung von Überflutungsflächen (Fließtiefen, Überschwemmungsgrenzen)
- sowie Visualisierung und Analyse der Berechnungsergebnisse

Die Ergebnisse der GIS-gestützten Hochwassermodellierung dienen der Unterstützung der Entscheidungsträger (z.B. Landes- und Kommunalverwaltungen) bei der Bearbeitung wasserwirtschaftlicher Aufgaben im Rahmen des HW-Managements wie z.B. der

- Überprüfung des HW-Schutzgrades von Objekten,
- Ermittlung von HW-Schutzdefiziten und Entscheidungsgrundlagen für die konkrete Festlegung des Handlungsbedarfs,
- Überprüfung und Überarbeitung rechtskräftiger Überschwemmungsgebiete,
- Beurteilung der Auswirkungen von Baumaßnahmen auf den HW-Abfluss (Ober- und Unterlieger),
- Erarbeitung und Aktualisierung örtlicher und gemeindeübergreifender Hochwasseralarm- und –Einsatzpläne (operationelle Beratung),
- Erhebung und Prognostizierung von HW-Schäden in gefährdeten Gebieten als Grundlage für die HW-Vorsorge (Risikoanalyse),
- Erarbeitung und Bewertung von Hochwasserschutzkonzepten (Kosten-Nutzen-Analyse).

Nicht zuletzt trägt der Einsatz moderner GIS-Softwareprodukte im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit dazu bei, über realitätsnahe Visualisierungsmöglichkeiten eine potenzielle Gefähr-

dung durch Hochwasser in das Bewusstsein der betroffenen Bevölkerung zu rücken. Hierdurch kann ein weiterer wichtiger Beitrag zur Hochwasservorsorge durch Verringerung des Schadenspotenziales geleistet werden.

Die derzeitigen kommerziell erhältlichen hydronumerischen Softwarepakete beinhalten mittlerweile fast alle die entsprechenden Schnittstellen zu den gängigsten GIS-Programmen. Damit wird es dem Anwender im Idealfall (und bei ausreichender Datenlage) ermöglicht, komplette Modellierungen GIS-unterstützt durchzuführen, das erstellte Modell in das hydronumerische Programm zu überführen, dort die hydraulischen Berechnungen durchzuführen und die Ergebnisse wieder in die GIS-Oberfläche zu exportieren und zu visualisieren.

Die Grundlegenden Verfahrensabläufe bei der Kopplung von HN-Modellen mit GIS sollen im Folgenden exemplarisch erläutert werden.

1. Ausgangssituation

Für eine Bebauungsplanung sollen für ein bestimmtes Fluss-Quellgebiet die Überflutungsflächen für ein Hochwasserereignis mit einem HN-Modell ermittelt werden. Man entscheidet sich dabei für den Einsatz eines stationären 1D-Modelles, da aufgrund von Erfahrungen in diesem Gebiet weder Quer- noch Sekundärströmungen erwartet werden.

Für das Quellgebiet liegen aus einer Laser-Scanning-Befliegung zahlreiche georeferenzierte Messpunkte vor, die lage- und höhenmäßig erfasst wurden sind. Nach einer Filterung unbrauchbarer Daten kann das Gebiet als Punktwolke im GIS dargestellt werden. Jeder Punkt hat dabei einen Rechts- und einen Hochwert sowie eine Höhe über NN.

Auf der folgenden Seite ist die Punktwolke mit einer Ausschnittsvergrößerung abgebildet (vgl. Abb. 7.1).

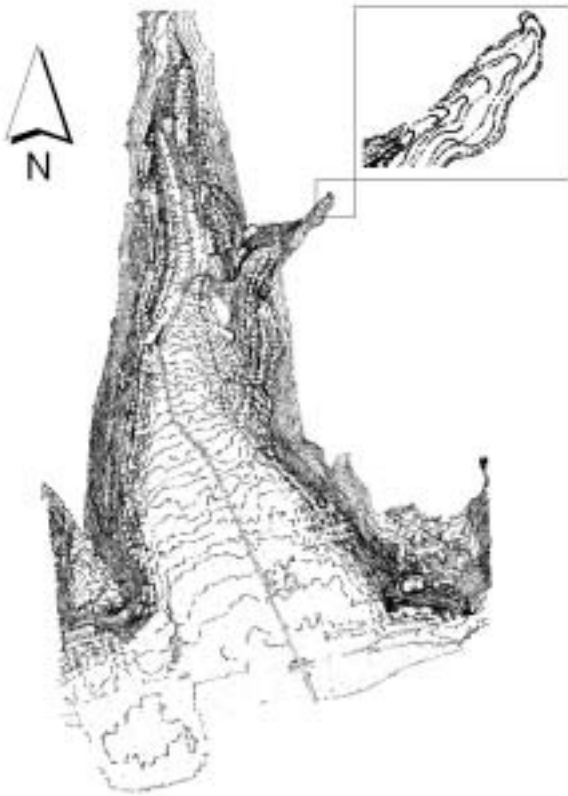


Abb. 7.1: Punktwolke aus georeferenzierten Punkten des zu modellierenden Quellgebietes.

2. Erstellen eines digitalen Geländemodells (DGM)

Das Gelände kann nun aus der Punktwolke im GIS modelliert werden, indem sämtliche Punkte durch Finite Elemente (Dreiecke oder Vierecke) verbunden werden.

Das so entstandene digitale Geländemodell (DGM) kann dann als Finite Elemente Netz dargestellt werden. Alternativ können verschiedene Geländehöhen des DGM unterschiedlich farblich gekennzeichnet werden. Durch die Möglichkeit einer Reliefdarstellung erhält man ein sehr anschauliches Bild des zu untersuchenden Quellgebietes (vgl. Abb. 8.2).

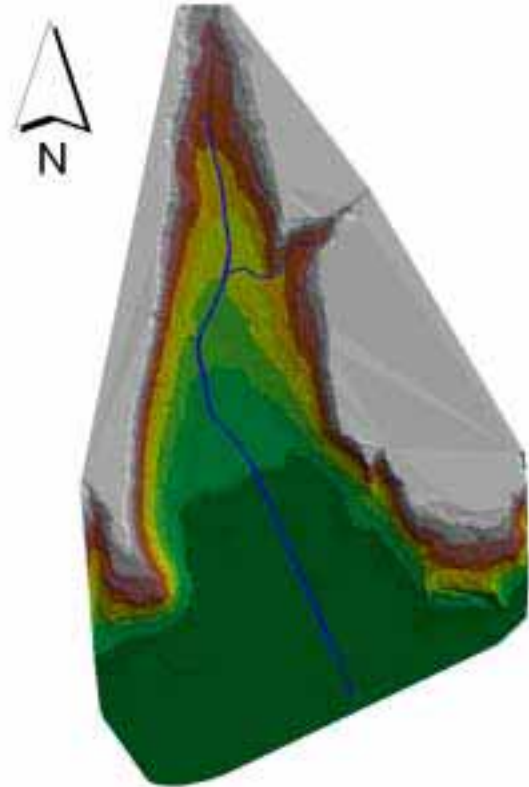


Abb. 7.2: Digitales Geländemodell (DGM) des zu modellierenden Quellgebietes.

3. Festlegen der hydraulisch-geographischen Modellränder im DGM

Als Schnittstelle zwischen dem GIS und dem HN-Programm bündelt, konvertiert und überträgt ein Applikationsmodul die zur Durchführung der hydraulischen Berechnung benötigten geographischen Daten in das HN-Modell.

Mit den speziellen Werkzeugen der Applikation zeichnet der Anwender zunächst die Gewässerrläufe, Uferränder und Vorlandgrenzen in das DGM ein. Ferner können verschiedenen Flächen des DGM über eine Flächennutzungsdatei die entsprechenden resultierenden hydraulischen Rauheitsbeiwerte zugeordnet werden.

In der folgenden Abbildung ist das fertig eingetragene zu modellierende Gewässersystem im GIS dargestellt (vgl. Abb. 7.3).

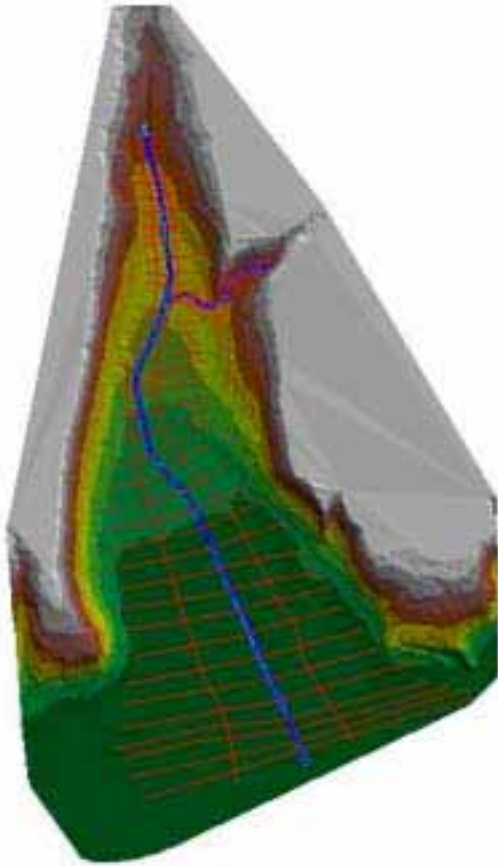


Abb.7.3: DGM mit eingezeichneten Flussläufen, Querprofilen, Böschungs- und Vorlandgrenzen.

4. Transfer der geographischen Modelldaten

Geographische Modelldaten werden aus dem GIS in das hydronumerische Programm (1D-Verfahren) transferiert. Bei 2D-Verfahren werden hierbei die Bruchkanten definiert, was i.d.R. sehr zeitaufwendig ist.

In diesem Bearbeitungsschritt überträgt der Anwender die geographischen Daten mit Hilfe der genannten Applikation in das hydronumerische Modell. Bei diesem Beispiel soll das Flussquellgebiet mit einer 1D-Berechnung simuliert werden. Deshalb erhält der Anwender nach dem Datentransfer ein vorgefertigtes Modell, das bereits sämtliche Querprofildaten aus dem DGM enthält. Die Eingabe weiterer wichtiger Modellkennwerte (z.B. Brückengeometrien, Festlegung der zu untersuchenden Abflüsse und deren Randbedingungen) erfolgt im Anschluss an den Datenimport und findet direkt

auf der Benutzeroberfläche des HN-Modells statt.

In der folgenden Abbildung ist das 1D-Modell, welches aus den DGM erzeugt wurde, dargestellt (vgl. Abb. 7.4).

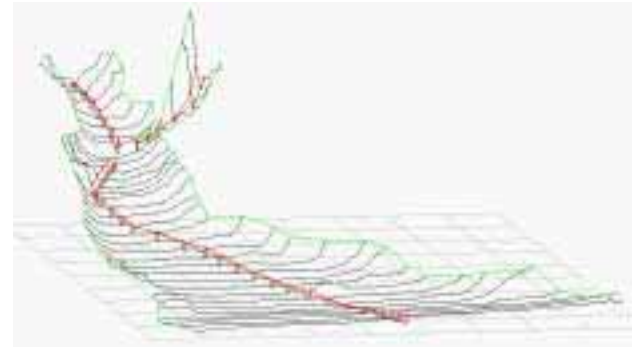


Abb.7.4: Darstellung des aus den DGM-Daten erzeugten 1D-Modells perspektivisch (oben) und als Draufsicht im Ansichtsfenster des HN-Programms (unten).

5. Durchführung der Berechnungen

Der nun folgende Arbeitsschritt findet vollständig im HN-Programm statt. Auf gewohnte Weise führt der Anwender nun alle Berechnungen durch. Dabei kann er am Modell auch Ände-

rungen in der Gewässergeometrie bzw. den Randbedingungen vornehmen.

In der Abbildung auf der folgenden Seite sind die Berechnungsergebnisse vereinfacht perspektivisch dargestellt (vgl. Abb. 7.5).

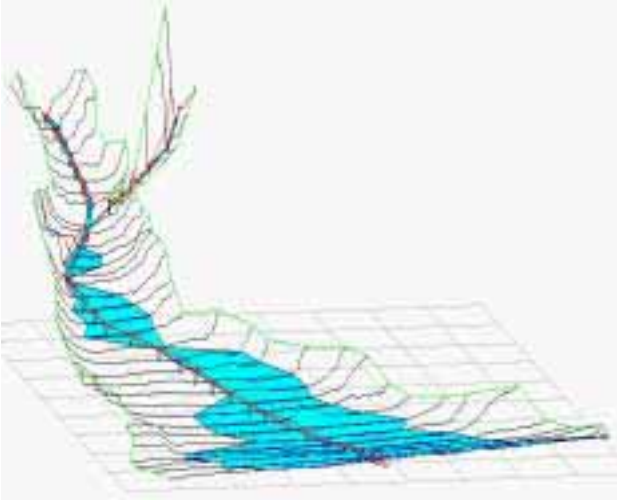


Abb. 7.5: Vereinfachte perspektivische Darstellung der Berechnungsergebnisse. Blau ist dabei der Wasserstand beim Bemessungshochwasser dargestellt.

6. Export der Berechnungsergebnisse vom HN-Modell in das GIS

Die berechneten Wasserstände werden so aufbereitet, dass sie in georeferenzierter Form in das DGM im GIS übertragen werden können. Durch eine Überlagerung der importierten Daten mit den DGM-Daten und den eingetragenen Modelldaten können beispielsweise sehr detaillierte und anschauliche Überschwemmungskarten angefertigt werden.

Die folgende Abbildung zeigt die zu erwartenden Ausuferungen beim Bemessungshochwasser (vgl. Abb. 7.6). Durch eine farbliche Abstufung können sogar die unterschiedlichen Wassertiefen dokumentiert werden.

Hätte man anstelle eines 1D-Modells, welches nur mit querschnittsgemittelten Fließgeschwindigkeiten rechnet, ein 2D-Modell angewandt, so könnte man die damit gewonnenen flächenhaften Daten noch detaillierter anzeigen.

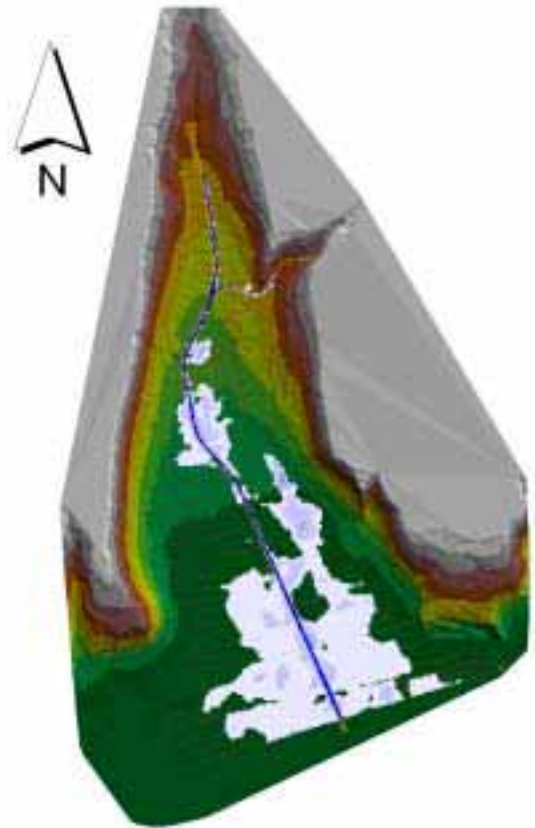


Abb. 7.6: DGM des Quellgebietes mit eingetragenen Modelldaten und den überlagerten berechneten Wasserspiegellagen und Wassertiefen. Je dunkler das Blau, desto tiefer ist an dieser Stelle das Wasser.

8 Testdatensatz mit Naturmessdaten

Das Untersuchungsgebiet entlang der unteren Murr erstreckt sich über eine Länge von ca. 5 km von der Mündung in den Neckar stromaufwärts.

Die Einzugsgebietsgröße der Murr beträgt ca. 500 km². Die Murr wird als Karbonat-Berglandfluss eingestuft und durch die geologischen Formationen des oberen Muschelkalks und Auensedimente beeinflusst. Das Sohlenprofil der Murr setzt sich überwiegend aus Grobsand, Kies, Schluff und Auelehm zusammen.

Ausführliche Informationen über die Murr im Untersuchungsgebiet und über bisher durchgeführte ökologische und biologischen Untersuchungen während des Beobachtungszeitraumes seit 1990 sind im Handbuch Wasser 2: Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern (LfU 1995) nachzulesen.

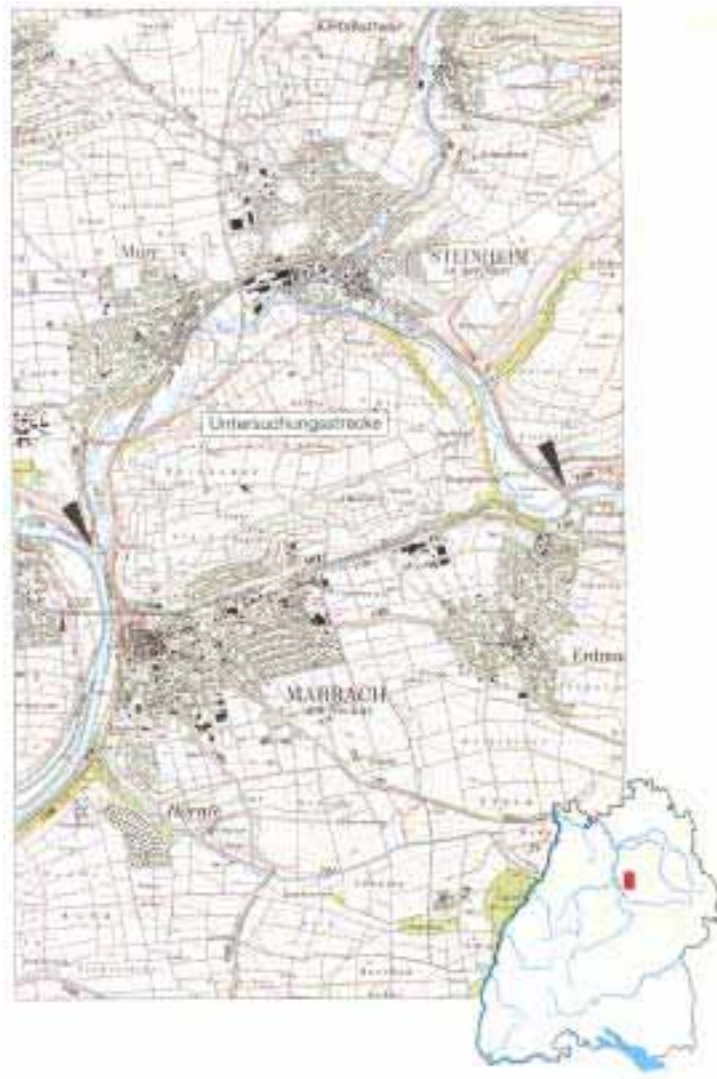


Abb. 8.1: Lage der Naturmessstrecke Murr bei Steinheim.

Im Leitfaden „**Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Teil 3: Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg**“ wurden die Messdaten von diesem Gewässerabschnitt dazu benutzt, Informationen über die Rauheits- und Widerstandsbeiwerte zu bekommen. Im Rahmen des vorliegenden Leitfadens werden die durch die LfU in den letzten 10 Jahren erhobenen Daten in aufbereiteter Form zur Verfügung gestellt, um da-

mit eindimensionale hydrodynamisch-numerische Modelle erstellen zu können.

Zum Kalibrieren des Modells sind in Tabelle 8.1 die Wassertiefen im Bereich der eingerichteten Sonderpegel in Abhängigkeit von denen am Landespegel Murr/Murr gemessenen Abflussereignissen angegeben.

Lage des Profils (Murr-Station)	Abflussereignis in m ³ /s	Wassertiefe in m	Bemerkung
2+200	1,91	0,98	LF Hydraulik Teil 3: Murr
	8,40	1,23	
	24,00	1,62	
	66,30	2,33	
	79,11	2,50	
	196,60	3,81	
	266,20	4,46	
3+200	1,64	1,34	LF Hydraulik Teil 3: Murr
	7,61	1,49	
	22,75	1,90	
	63,30	2,84	
	75,96	30,4	
	173,50	4,53	
	249,57	5,13	
4+600	1,64	0,90	LF Hydraulik Teil 3: Murr
	7,61	1,43	
	22,75	1,89	
	63,30	2,76	
	75,96	2,97	
	173,50	4,29	
	249,57	4,92	
4+800	1,64	0,98	LF Hydraulik Teil 3: Murr
	7,61	1,43	
	22,75	1,89	
	63,30	2,76	
	75,96	2,99	
	173,50	4,31	
	249,57	4,96	
5+100	1,64	1,58	LF Hydraulik Teil 3: Murr
	7,61	1,88	
	22,75	2,35	
	63,30	3,12	
	75,96	3,27	
	173,50	4,58	
	249,57	5,12	

Tabelle 8.1: Kalibrierungswerte Murr.

Die Geometrie der Murr im untersuchten Bereich wird durch Querprofile beschrieben. Die Querprofilaten sind als Gauß-Krüger-Koordinaten georeferenziert. Sie stehen in einer Excel-Tabelle (vgl. Abb. 8.2) und in einer Textdatei im Format DA66 (vgl. Abb. 8.3) zur Verfügung.

Auf den folgenden vier Seiten ist die Lage der vorhandenen Querprofile relativ zum Gewässerlauf dargestellt. Ebenso werden aus den Abbildungen die Lagen der Sonderpegel ersichtlich.

Die Datensätze können bei der Landesanstalt für Umweltschutz

Abteilung4-LfU.post@lfuka.lfu.bwl.de

angefordert und dann in das hydrodynamisch-numerische Programm importiert werden.

1	A	B	C		D	E	F	G	H
	Murr-km	Pkt.-Nr.	Profilpunktkoordinaten in m		Hoch (x)	Seite	Hoehe in NN+m	Feldmarkierung	s
2		Rechts (y)							
3	2+200	32898220	3519262.803	5424976.608		links	197.499	PE-Stein	2.455
4			3519262.009	5424976.975			197.361		3.330
5			3519260.818	5424977.526			196.756		4.642
6			3519259.544	5424978.116			196.660		6.046
7			3519258.016	5424978.822			195.918		7.729
8			3519256.256	5424979.637			195.025		9.669
9			3519253.070	5424980.604			194.160		12.187

Abb. 8.2: Querprofilaten zum Testdatensatz Murr – abgelegt als Gauß-Krüger-Koordinaten in einer Excel-Tabelle.

66	2200000	1	0	197383	1762	197405	3330	197361	4642	196756
66	2200000	2	6046	196660	7729	195918	9669	195025	12187	194150
66	2200000	3	13203	193962	15275	193801	17329	193524	18213	193066
66	2200000	4	18906	192772	18949	192721	19163	192438	19359	192257
66	2200000	5	19474	192203	19915	192059	20324	192171	20616	191791
66	2200000	6	21139	191507	21860	191385	22533	191373	23349	191330
66	2200000	7	24237	191305	24902	191244	25603	191284	26310	191218
66	2200000	8	27283	191190	27863	191179	28466	191136	29002	191100
66	2200000	9	29727	191114	30101	191068	30389	191067	30681	191081
66	2200000	10	30763	191076	30954	191146	31782	191156	32138	191110
66	2200000	11	32338	191323	32938	191724	33735	192029	34114	192257
66	2200000	12	34614	192497	35885	192982	36653	193313	38071	193664
66	2200000	13	40334	193818	43163	194303	45654	195000	46103	197552
66	2200000	14	46171	197550	46198	197397	48704	197187		
66	2370000	1	0	197562	1992	197578	2025	197592	4017	197611
66	2370000	2	5530	196913	7152	196047	8766	195240	10834	194401
66	2370000	3	12900	193925	15441	193868	18325	193852	21383	193396

Abb. 8.3: Querprofilaten zum Testdatensatz Murr – abgelegt in der Datenart DA66 in einer ASCII-Datei.

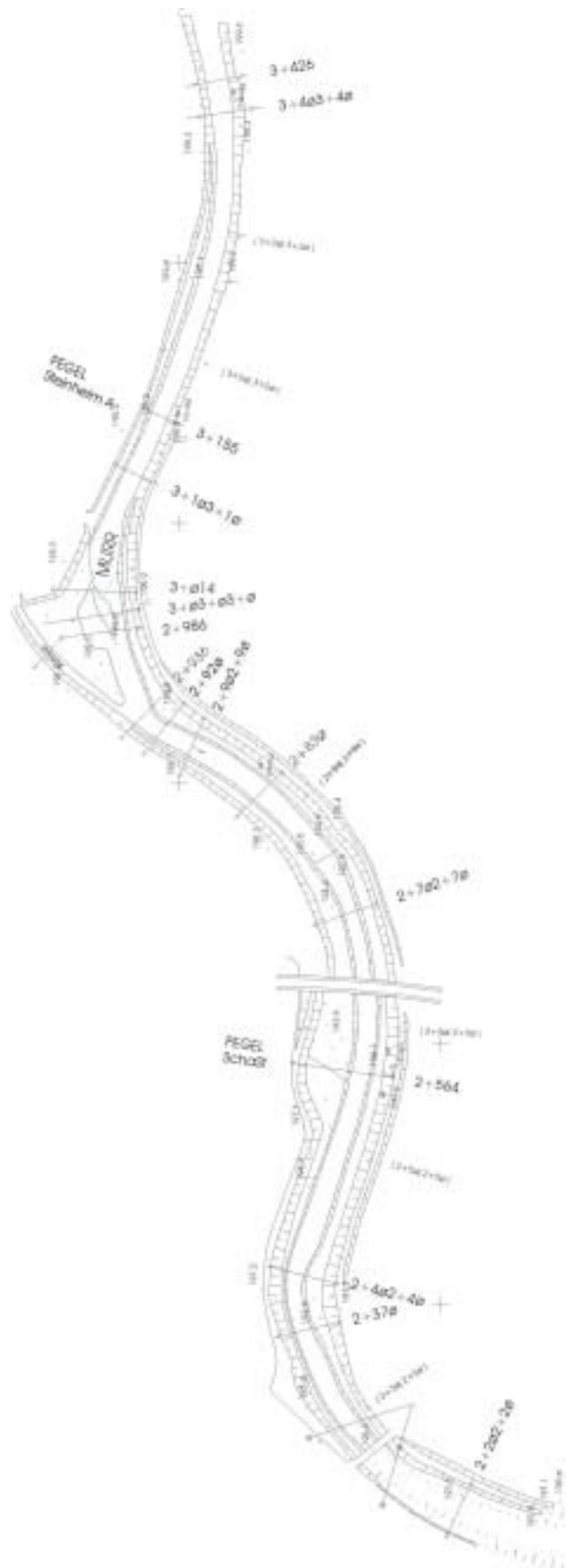


Abb. 8.4: Lage der Profile und Sondermessstellen. Murr-km 2+200 bis Murr-km 3+400.

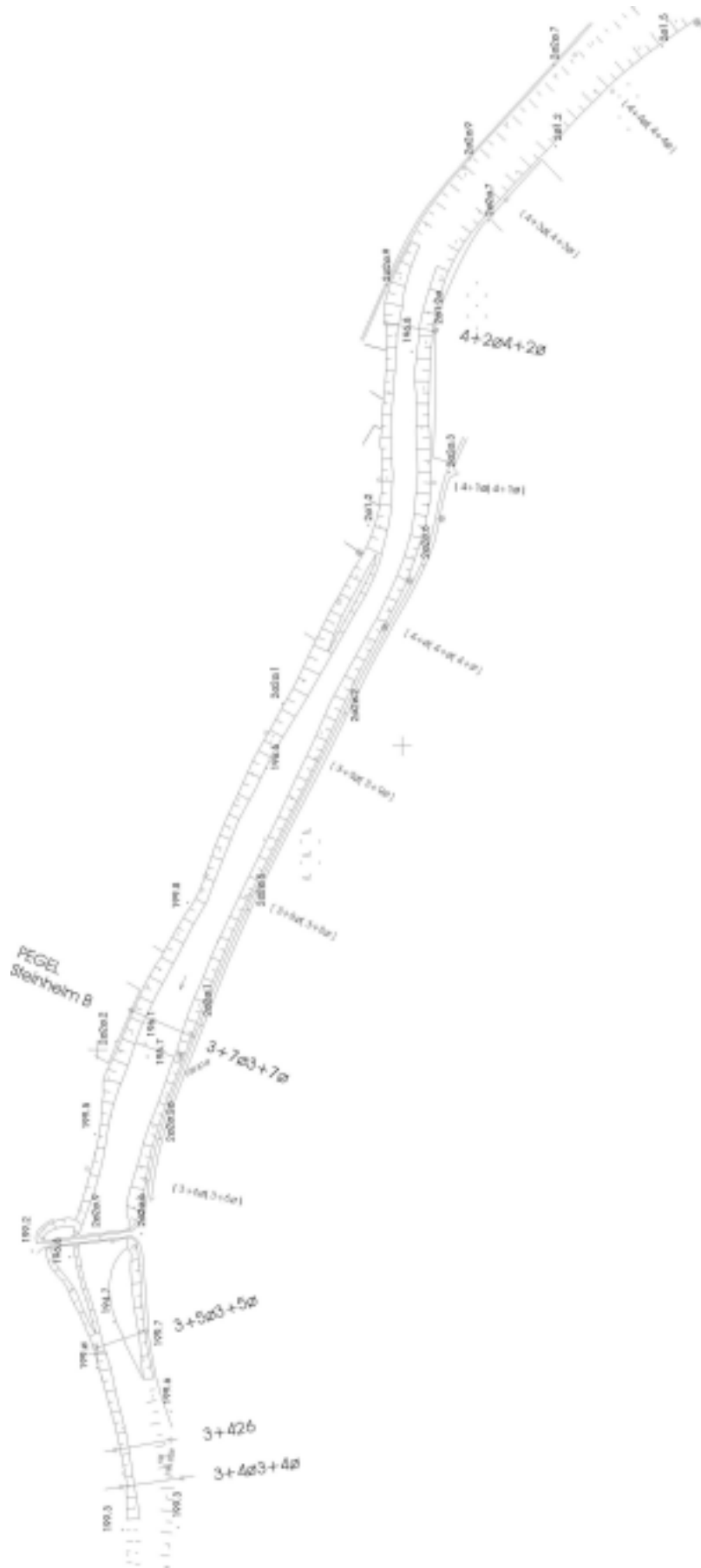


Abb. 8.5: Lage der Profile und Sondermessstellen. Murr-km 3+400 bis Murr-km 4+400.

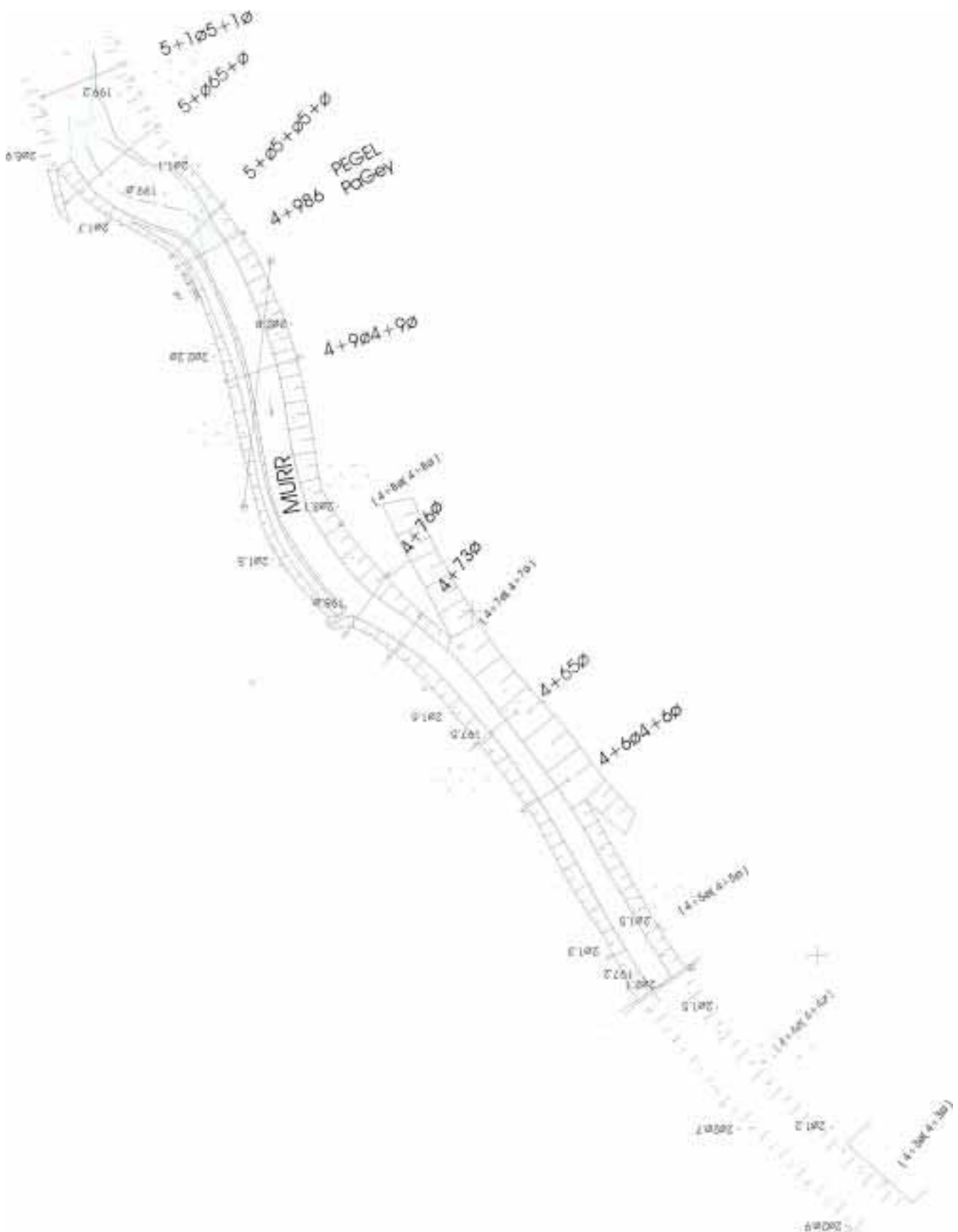


Abb. 8.6: Lage der Profile und Sondermessstellen. Murr-km 4+300 bis Murr-km 5+100.

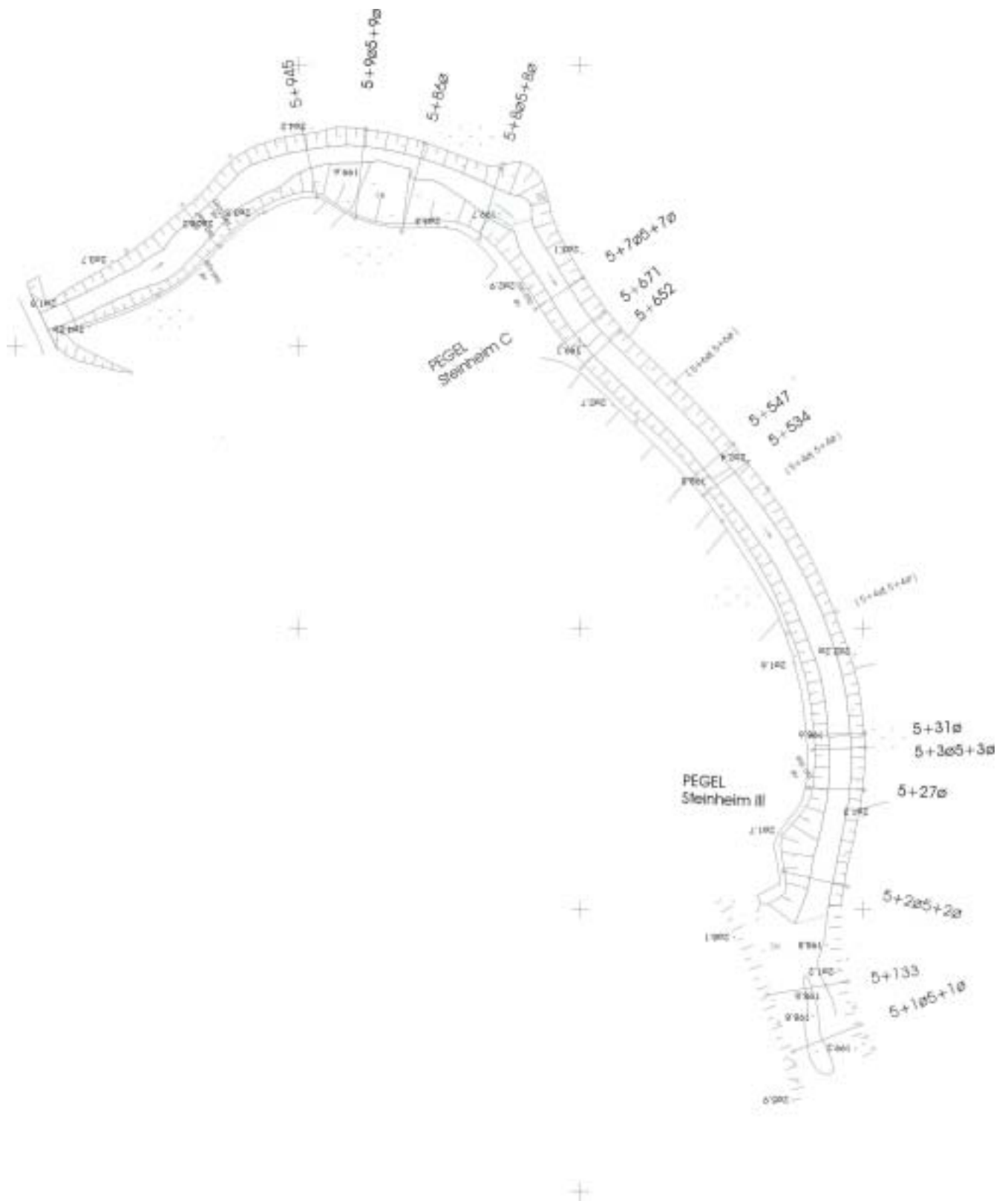


Abb. 8.7: Lage der Profile und Sondermessstellen. Murr-km 5+100 bis Murr-km 6+000.

9. Excel Programm „Hydraulische Berechnung von Fließgewässern“

Die in der Arbeitsanleitung beschriebenen Hydraulikprogramme erlauben mit vergleichsweise geringem Aufwand einfache hydraulische Berechnungen. Sie nutzen hierzu das Microsoft Programm Excel und bieten somit die Möglichkeit, Eingangsdaten und Ergebnisse mit anderen unter Windows lauffähigen Programmen auszutauschen. Die weit verbreiteten Kenntnisse des Programms Excel erleichtern außerdem die Anwendung der Programme.

Die Programme wurden für Aufgaben im Pegelwesen bei der Pegelplanung und für die Berechnung von Abflusskurven entwickelt. Sie können auch bei Planungen zum Gewässer ausbau und von Bauvorhaben in und am Gewässer sowie zur Beurteilung derartiger Maßnahmen verwendet werden. Ihrem Anwendungsbereich entsprechend beschränken sie sich auf die Berechnung offener Gerinne sowie von Anlagen in und am Gewässer, welche die Wasserstände der Fließgewässer nachhaltig beeinflussen können (Stauanlagen, Schwellen, Raue Rampen und Brückendurchlässe).

Die Excel-Programme wurden im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) erstellt. Die Programme besitzen einen Passwortschutz und sind somit grundsätzlich nicht veränderbar. Sie werden in ihren ersten Teilen seit Mitte des Jahres 2000, d. h. nunmehr zwei Jahre verwendet und laufen stabil. Sollten Fehler auftreten ist die LfU zu informieren. Die LfU ist für entsprechende Hinweise und Anregungen zur Verbesserung der Programme dankbar.

Die Programme können gegen eine Bereitstellungsgebühr von der LfU bezogen werden. Im Anhang der Arbeitsanleitung ist ein Formular beigefügt, mit dem die Programme bei der LfU bestellt werden können. In ihm sind die mit der Überlassung der Programme verbundenen Bedingungen genannt.

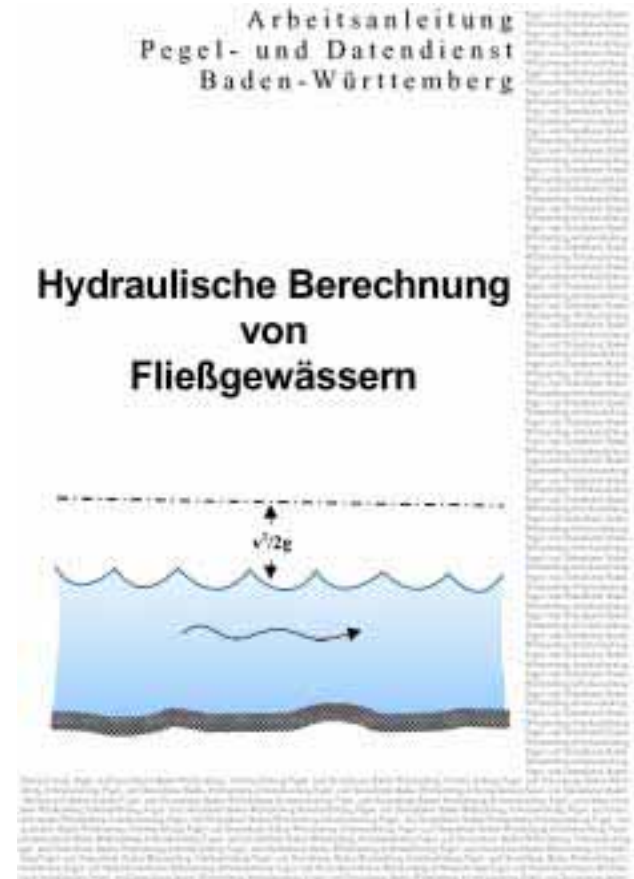


Abb. 9.1: Deckblatt der Arbeitsanleitung

10 Literatur

BJÖRNSEN, 1999: Anwenderbeschreibung WSPWIN, Koblenz

BWK = Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e. V. (1998): Merk Nr. 1/BWK „Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern, Teil 1, Stationäre Berechnung der Wasserspiegellinien unter besonderer Berücksichtigung von Bewuchs- und Bauwerkseinflüssen“

CHONGJIANG, D., 1998: Ein Finite-Punkte-Verfahren für stationäre zweidimensionale Strömungen mit freier Oberfläche, Karlsruhe (Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), Heft 197).

DVWK, 1996: Einführung in die Simulation von Flüssen, Begeleitmaterialien anlässlich des DVWK-Workshop Numerische Modell von Flüssen, Seen und Küstengewässern, Hannover.

DVWK, 1999: Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, Bonn (DVWK Schriften, Heft 127).

ENVIROMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 1996: ArcView GIS Benutzerhandbuch.

ENVIROMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 1998: ArcView Spatial Analyst Users Guide.

Göbel, N., 1999: Hydraulisch-Numerische Werkzeuge. Vortrag beim Workshop „Ermittlung von Überflutungsflächen an Fließgewässern“ am 16./17. September in Karlsruhe.

HAUSPERGER, M., 1993: Wasserbautechnische Planung – Rechenmodelle, Erhebungen, Projekt, Abstimmung mit anderen Planungsdisziplinen. In: Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Abt. für Landschaftswasserbau der Technischen Universität Wien: Stand der Technik im Landschaftswasserbau, Wien, 191-217 (Landschaftswasserbau, Band 15).

KEUTNER, C. (1931): „Abflussuntersuchungen und –Berechnungen für Überfälle an scharfkantigen Wehren“, Mitteilungen aus dem Gebiete des Wasserbaues und der Baugrundforschung Heft 4, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin

KNAPP, F. H. (1960): „Ausfluß, Überfall und Durchfluß im Wasserbau“, Verlag G. Braun, Karlsruhe

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BW, 2003: Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Teil 3: Dokumentation von Rauheits- und Widerstandsbeiwerten, Karlsruhe (Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie).

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BW, 2001: Arbeitsanleitung für den Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg, Hydraulische Berechnung von Fließgewässern, Karlsruhe.

LANGE, G; LECHER, K (1993): „Gewässerregelung, Gewässerpflege“, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin

LEHRSTUHL UND INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT RWTH AACHEN, 1996: Eindimensionale Berechnung allmählich instationärer Fließvorgänge in offenen Gerinnen.

Stand: September 2001 <http://www.rwth-aachen.de/iww/German/Forschung/Gerinnestroemungen/Gerinne.htm>

- LFU (2000): Leitfaden „Anlagen zur Herstellung der Durchgängigkeit von Fließgewässern – Raue Rampen und Verbindungsgewässer“; Karlsruhe
- NAUDASCHER, E (1987): „Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke“, Springer-Verlag, Wien, New York
- NESTMANN, F (1992): „Vorlesungsmanuskript, Institut für Wasserbau“, Universität Karlsruhe
- OBERLE, P. (2002): „Modelle zur Problembehandlung in der Hochwasserhydraulik - Einsatz Geographischer Informationssysteme“, in DVWK-Merkblatt „Hochwasserhydraulik“, Veröffentlichung in Bearbeitung
- OBERLE, P., THEOBALD, S., NESTMANN, F. (2000): „GIS-gestützte Hochwassermodellierung am Beispiel des Neckars“ Wasserwirtschaft, Jhrg. 90 (2000), Heft 7-8, S. 368-373.
- RÖMISCH, K. (2000): „Strömungsstabilität vergossener Steinschüttungen“, Wasserwirtschaft – Zeitschrift für Wasser und Umwelt, Jhrg. 90 (2000), Heft 7-8
- THEOBALD, S., 1999: Numerische Simulation von Staustufenketten mit automatisiertem Betrieb, Karlsruhe (Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), Heft 201).
- TIMM, J (1962): „Hydromechanisches Berechnen“, Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2000: HEC GeoRAS, An extension for support of HEC-RAS using ArcView, Users Manual, Davis.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2001: HEC-RAS River Analyses System, Users Manual, Davis.
- VAN THINH NGUYEN, LAUSEN, R., NESTMANN, F. (2001): “3D Numerical Comutation of Free Surface Flow in Open Channels and Rivers”, Paper-Number FEDSM2001-18129, ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, May 29-June 1, 2001, New Orleans, Louisiana, USA.

**Veröffentlichungen der Reihe
Handbuch Wasser 2
ISSN 0946-0675**

Titel	Band	Jahr der Herausgabe	Preis (falls lieferbar)	Titel	Band	Jahr der Herausgabe	Preis (falls lieferbar)
Gewässerkundliche Beschreibung Abflußjahr 1990	1	1991	vergriffen	Umweltverträglichkeitsprüfung bei Wasserbauvorhaben nach § 31 WHG Leitfaden Teil I: Verfahren	16	1994	vergriffen
Bauweisen des naturnahen Wasserbaus Umgestaltung der Enz in Pforzheim	2	1991	15 €	Morphologischer Zustand der Fließgewässer in Baden-Württemberg Auswertung und Interpretation der Ergebnisse der Übersichtskartierung 1992/93	17	1995	13 €
Gewässerentwicklungsplanung - Leitlinien -	3	1992	15 €	Kontrolle des Japan-Knöterichs an Fließgewässern II. Untersuchungen zu Biologie und Ökologie der neophytischen Knöterich-Arten	18	1995	15 €
Übersichtskartierung der morphologischen Naturnähe von Fließgewässern (Methode) - Vorinformation -	4	1992	vergriffen	Gesamtkonzept Naturnahe Unterhaltung von Fließgewässern Möglichkeiten, Techniken Perspektiven	19	1995	8 €
Regionalisierung hydrologischer Parameter für Niederschlag-Abfluß-Berechnungen - Grundlagenbericht - - Programmdiskette -	5	1992	vergriffen	Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern Teil III: Dokumentation der Entwicklung ausgewählter Pilotvorhaben, erste Zwischenberichte der Erfolgskontrolle	20	1995	15 €
Ökologie der Fließgewässer Niedrigwasser 1991	6	1992	20 €	Umweltverträglichkeitsprüfung bei Wasserbauvorhaben nach § 31 WHG Leitfaden Teil III: Bestimmung des Untersuchungsrahmens, Untersuchungsmethoden	21	1995	12 €
Biologisch-ökologische Gewässeruntersuchung - Arbeitsanleitung - - Programmdiskette -	7	1992	vergriffen	Schadstoffdatei Rhein Dokumentation	22	1996	vergriffen
Verkrautung von Fließgewässern Einflußfaktoren, Wechselwirkungen, Kontrollmaßnahmen - Literaturstudie -	8	1993	vergriffen	Schadstofftransport bei Hochwasser Neckar, Rhein und Donau im Januar 1995	23	1996	15 €
Gewässerkundliche Beschreibung Abflußjahr 1992	9	1993	15 €	Schwermetalle in den Sedimenten der Fließgewässer Baden-Württembergs	24	1996	11 €
Kontrolle des Japan-Knöterichs an Fließgewässern I. Erprobung ausgewählter Methoden	10	1994	15 €	Bauweisen des naturnahen Wasserbaus Dokumentation und Bewertung am Pilotprojekt Enz/Pforzheim 1990 - 1995	25	1996	11 €
Gewässerrandstreifen Voraussetzung für die naturnahe Entwicklung der Gewässer	11	1994	15 €	Entwicklung der Fließgewässerbeschaffenheit - chemisch, physikalisch, biologisch - Stand 1995	26	1996	11 €
Gewässerkundliche Beschreibung Hochwasser Dezember 1993	12	1994	13 €	Das Abflußjahr 1994 - ein Hochwasserjahr	27	1996	vergriffen
Handbuch der stehenden Gewässer in Baden-Württemberg Regierungsbezirke Freiburg, Karlsruhe und Stuttgart	13	1994	vergriffen	Pilotprojekt "Konfliktarme Baggerseen (KaBa)" - Statusbericht -	28	1997	6 €
Handbuch der stehenden Gewässer in Baden-Württemberg Regierungsbezirk Tübingen	14	1994	vergriffen	Meßnetz-Zentrale Meßnetzprogramm	29	1996	vergriffen
Übersichtskartierung des morphologischen Zustands der Fließgewässer in Baden-Württemberg 1992/1993	15	1994	13 €				

Titel	Band	Jahr der Herausgabe	Preis (falls lieferbar)
Pappeln an Fließgewässern	30	1996	15 €
Rechtsgrundlagen der Gewässerunterhaltung Teil I Überblick	31	1996	8 €
Baggerseeuntersuchungen in der Oberrheinebene Auswertung der Sommerbeprobung 1994 und Frühjahrsbeprobung 1995	32	1997	vergriffen
Nährstoff- und Schadstoffeinträge in Baggerseen (Literaturstudie)	33	1996	15 €
Biologische Freiwasseruntersuchungen Rhein-Neckar-Donau - Planktonentwicklung - Bioaktivitäten - Stoffumsätze - 1994	34	1997	vergriffen
Untersuchung der gentoxischen Wirkung von Gewässern und Abwässern	35	1997	vergriffen
Dammscharten in Lockerbauweise bei Hochwasserrückhaltebecken	36	1997	12 €
Ökologische Bewertung von Fließgewässern in der Europäischen Union und anderen Ländern (Literaturstudie)	37	1997	8 €
Saisonale, horizontale und vertikale Zooplankton-verteilungsmuster Eine Fallstudie für den Grötzingen Baggersee	38	1997	vergriffen
Methodologische Untersuchungen zur Ermittlung des Biochemischen Sauerstoffbedarfs des Sediments und des Wasserkörpers in den Baggerseen der Oberrheinebene	39	1997	vergriffen
Biologische Freiwasseruntersuchungen in Rhein, Neckar, Donau. Berichtsjahr 1995-1996	40	1997	6 €
Regionale Bachtypen in Baden-Württemberg Arbeitsweisen und exemplarische Ergebnisse an Keuper- und Gneisbächen	41	1997	18 €
Statistische Untersuchung langfristiger Veränderungen des Niederschlags in Baden-Württemberg	42	1997	14 €
Studie über ökohydraulische Durchlaßbauwerke für regulierbare Hochwasserrückhalteräume	43	1998	vergriffen
Gewässerentwicklung in Baden-Württemberg Teil II Gewässerentwicklungskonzept - Loseblattsammlung -	44	1998	vergriffen
Rauhe Rampen in Fließgewässern	45	1998	vergriffen
Gewässergeometrie	46	1998	vergriffen

Titel	Band	Jahr der Herausgabe	Preis (falls lieferbar)
Die Reihe „Handbuch Wasser 2“ wird unter der Bezeichnung „Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie“ fortgesetzt ISSN 1436-7882			
Naturgemäße Bauweisen Unterhaltungsmaßnahmen nach Hochwasserereignissen	47	1998	12 €
Gewässerentwicklungsplanung Teil I Grundlagen und Faltblatt	48	1998	11 €
Gewässergütekarte Baden-Württemberg	49	1998	21 €
Beschaffenheit der Fließgewässer Jahreskatalog 1997 CD-ROM	50	1998	vergriffen
Fließgewässerversauerung im Schwarzwald Ökologische Bewertung auf der Basis des Diatomeenbenthons	51	1999	vergriffen
Ab- und Umbauprozesse in Baggerseen und deren Einfluß auf das Grundwasser Literaturauswertung	52	1999	vergriffen
Die Gewässerlandschaften Baden-Württembergs	53	1999	vergriffen
Hochwasserabfluss-Wahrscheinlichkeit in Baden-Württemberg	54	1999	41 €
Unterhaltung und Pflege von Gräben	55	1999	11 €
Hydrochemische und biologische Merkmale regionaler Bachtypen in Baden-Württemberg	56	1999	30 €
Die heutige potentielle natürliche Vegetation an Fließgewässern in Baden-Württemberg	57	1999	vergriffen
Überwachung der Fließgewässerbeschaffenheit in Baden-Württemberg - Vorgehenskonzept -	58	1991	kostenfrei
Beschaffenheit der Fließgewässer Jahresdaten-katalog 1998 CD-ROM	59	2000	31 €
Niederschlagsdaten Baden-Württemberg	60	2000	8 €
Zustand der Baggerseen in der Oberrheinebene	61	2000	9 €

Titel	Band	Jahr der Heraus- gabe	Preis (falls lieferbar)
Seenphysikalische Prozesse in Baggerseen Modellgestützte Bewertungen – und Entscheidungshilfen -	62	2000	15 €
Anlagen zur Herstellung der Durchgängigkeit von Fließgewässern	63	2000	16 €
Beschaffenheit der Fließgewässer Jahresdatenkatalog 1999 CD-ROM	64	2001	30 €
Das Hochwasser vom Oktober/ November 1998	65	2000	12 €
Fließgewässer in Baden-Württemberg als Lebensraum ausgewählter Artengruppen	66	2001	9 €
Untersuchungen zum Vorkommen von Xenobiotika in Schwebstoffen und Sedimenten Baden-Württembergs	67	2001	9 €
Schadstoff-Informationssystem-Wasser (SIWAS) CD-ROM	68	2001	15 €
Hochwasserabfluss-Wahrscheinlichkeiten in Baden-Württemberg CD-ROM	69	2001	30 €
Gewässerstruktur- gütekartierung in Baden-Württemberg	70	2001	11 €
Beschaffenheit der Fließgewässer Jahresdatenkatalog 2000 CD-ROM	71	2002	10 €
Gewässerentwicklung in Baden-Württemberg Leitfaden Teil 3 Arbeitsanleitung zur Erstellung von Gewässerentwicklungsplänen	72	2002	12 €
Aromatische Sulfonate in Oberflächengewässern, Schwebstoffen und Sedimenten Baden-Württembergs	73	2002	9 €
Hydraulik naturnaher Fließgewässer Teil 1 Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren	74	2002	11 €
Hydraulik naturnaher naturnaher Fließgewässer Teil 2 – Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen	75	2002	12 €
Beschaffenheit der Fließgewässer Jahresdatenkatalog 2001	76	2003	10 €
Erfahrungsaustausch und Zusammenarbeit der Länder zur Verbesserung der Hochwasservorhersage für große Flussgebiete am 14. und 15. Januar 2003 in Karlsruhe	77	2003	kostenfrei
Hydraulik naturnaher Fließgewässer Teil 3 — Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg	78	2003	11 €