lebensministerium.at

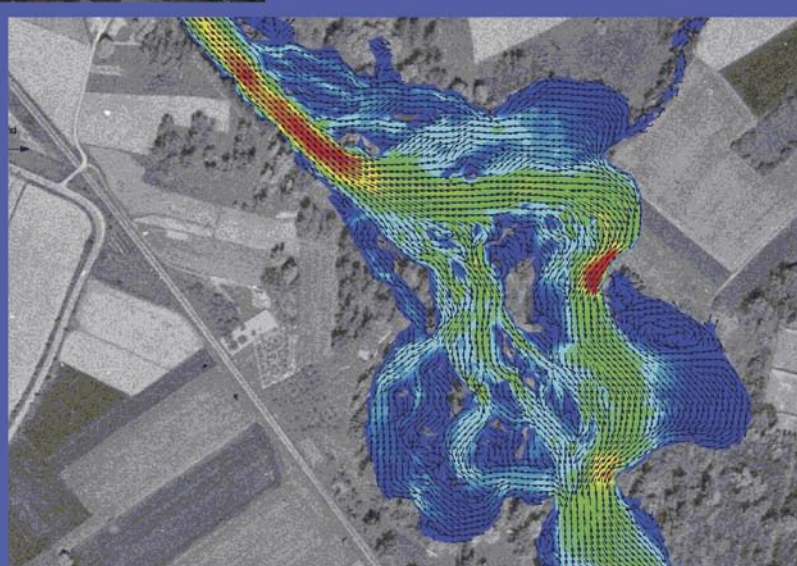
Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Hydrodynamik

Grundlagen, Anwendung und Modelle für die Praxis

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial x}+\frac{\partial r}{\partial y}=0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}q+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{q^2}{h}+\frac{gh^2}{2}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q\cdot r}{h}\right)=gh(I_{Sx}-I_{Ex})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}r+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q\cdot r}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{r^2}{h}+\frac{gh^2}{2}\right)=gh(I_{Sy}-I_{Ey})$$



Unser Leitbild

lebensministerium.at

NACHHALTIG FÜR NATUR UND MENSCH

SUSTAINABLE FOR NATURE AND MANKIND

Lebensqualität / *Quality of Life*

Wir schaffen und sichern die Voraussetzungen für eine hohe Qualität des Lebens in Österreich.

We create and we safeguard the prerequisites for a high quality of life in Austria.

Lebensgrundlagen / *Bases of life*

Wir stehen für vorsorgende Verwaltung und verantwortungsvolle Nutzung der Lebensgrundlagen Boden, Wasser, Luft, Energie und biologische Vielfalt.

Indispensable bases of life are clean air, pure water, unpolluted soil and intact ecosystems.

Lebensraum / *Living environment*

Wir setzen uns für eine umweltgerechte Entwicklung und den Schutz der Lebensräume in Stadt und Land ein.

We support an effective protection against natural hazards as well as an ecological orientation of the riverine landscapes of Austria.

Lebensmittel / *Food*

Wir sorgen für die nachhaltige Produktion insbesondere sicherer und hochwertiger Lebensmittel und nachwachsender Rohstoffe.

We are shaping for our farmers and consumers a sustainable and environmentally benign agricultural and food policy.

IMPRESSUM

Medieninhaber und Herausgeber
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Stubenring 1, 1012 Wien
Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Marc-Aurel-Straße 5, 1010 Wien

Redaktionsteam
Ao. Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Habersack, DI Dr. Michael Hengl, Ass.-Prof. DI Dr. Helmut Knoblauch, DI Dr. Michael Tritthart

Redaktion, Layout und Satz
Mag. Fritz Randl (ÖWAV)

Titelbild
Überflutungsflächen und Fließgeschwindigkeitsverteilung, Tullner Feld, Kamp (ARGE Kamp/IWHW BOKU/Tichy)

Die Abbildungen wurden zur Verfügung gestellt von
Ao. Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Habersack, DI Dr. Christoph Hauer, DI Dr. Michael Hengl, Ass.-Prof. DI Dr. Helmut Knoblauch, DI Günther Reichel, Univ.-Prof. DI Dr. Peter Rutschmann, DI Dr. Bernhard Sackl und DI Dr. Michael Tritthart

Druck
Gugler GmbH, Melk

Es wird darauf hingewiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen.

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verbandes unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier.

Vorwort

Durch das Extremhochwasser 2002 wurde das Problembewusstsein für die Vulnerabilität der Gesellschaft in Bezug auf Naturkatastrophen deutlich geschärft. Einerseits zeigten sich die Grenzen des technischen Hochwasserschutzes, andererseits die Notwendigkeit, moderne Simulationstechniken einzusetzen, um die komplexen Abflussprozesse bei Ausuferungen abzubilden und auch eine Prognose des verbleibenden Restrisikos durchzuführen.

Gleichzeitig gab es in der Praxis eine Zunahme der Verfügbarkeit von hydrodynamisch-numerischen Modellen, welche sich in der Dimensionalität, den verwendeten numerischen Verfahren, der implementierten Diskretisierung in Raum und Zeit bis zu den Kosten deutlich unterscheiden.

Daher wurde im Jahr 2003 der Arbeitsausschuss „Fließgewässermodellierung" beim ÖWAV gegründet. Im Ausschuss sind fachkundige Personen aus Universitäten und Praxis vertreten.

Die Ziele des Ausschusses liegen in der Analyse der Entwicklung der Fließgewässermodellierung in Hinblick auf praktische Fragestellungen, der Diskussion der Übertragbarkeit des Stands der Wissenschaft auf den Stand der Technik und der Hilfestellung für die Praxis von den Grundlagen bis hin zur Modellauswahl. Um diese Ziele zu erreichen, ist die Erarbeitung von Arbeitsbehelfen als Unterstützung für die praktische Tätigkeit im Bereich der Fließgewässermodellierung eine der zentralen Aufgaben des Ausschusses.

Der Arbeitsausschuss Fließgewässermodellierung hat sich drei Themen vorgenommen:

- Hydrodynamik,
- Sedimenttransport und Flussmorphologie und
- Habitatmodellierung.

Das Ergebnis der Bearbeitung des ersten Themas liegt nun in Form des ÖWAV-Arbeitsbehelfs 37 „Hydrodynamik" vor. In den Arbeitsbehelf wurden sowohl wissenschaftliche Grundlagen als auch praktische Beispiele und ein Modellvergleich einbezogen. Dabei erfolgte ein umfangreiches schriftliches Stellungnahmeverfahren mit der Praxis.

Nach der Vorlage des Arbeitsbehelfs „Hydrodynamik" liegt der Schwerpunkt der kommenden Tätigkeit des Arbeitsausschusses „Fließgewässermodellierung" auf dem Thema Modellierung des Sedimenttransports und der Flussmorphologie.

An dieser Stelle möchte ich mich sehr herzlich bei allen Ausschussmitgliedern für die engagierte und ehrenamtliche Mitarbeit bei der Erstellung des vorliegenden Arbeitsbehelfs bedanken. Dank gebührt all jenen, die sich am Stellungnahmeverfahren beteiligten und wertvolle Beiträge zur Erstellung des Arbeitsbehelfs lieferten. Dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft möchte ich für die Drucklegung danken.

Ao. Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Habersack
Vorsitzender des ÖWAV-Arbeitsausschusses „Fließgewässermodellierung"

An der Erstellung des ÖWAV-Arbeitsbehelfs 37 haben mitgewirkt:

Ausschussvorsitzender:

Ao.Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Habersack, BOKU Wien

Ausschussmitglieder:

O.Univ.-Prof. DI Dr. Dieter GUTKNECHT, Technische Universität Wien
DI Dr. Michael HENGL, BAW – Institut für Wasserbau und hydrometrische Prüfung
DI Hubert HONSOWITZ, Technische Universität Wien
Ass.-Prof. DI Dr. Helmut KNOBLAUCH, Technische Universität Graz
DI Günther REICHEL, SCIETEC Kompetenzzentrum für Flussmanagement
Univ.-Prof. DI Dr. Peter RUTSCHMANN, Universität Innsbruck (dzt. TU München)
DI Dr. Bernhard SACKL, Hydroconsult GmbH
DI Dr. Michael TRITTHART, BOKU Wien (vormals Technische Universität Wien)

Autoren (* Koordination des Kapitels):

Ao.Univ.-Prof. DI Dr. Helmut HABERSACK (Kapitel 1*, 8*, 9 und 10*)
DI Dr. Michael HENGL (Kapitel 6*)
Ass.-Prof. DI Dr. Helmut KNOBLAUCH (Kapitel 7*)
DI Günther REICHEL (Kapitel 4* und 9)
Univ.-Prof. DI Dr. Peter RUTSCHMANN (Kapitel 2* und 3*)
DI Dr. Bernhard SACKL (Kapitel 5*)
DI Dr. Michael TRITTHART (Kapitel 4 und 9*)

Unter weiterer Mitwirkung von:

DI Dr. Christoph HAUER, BOKU Wien

Für den ÖWAV:

Andreas GAUL, Referent des Fachbereichs Wasserwirtschaft im ÖWAV

Inhaltsverzeichnis

Vorwort **1**

1 Einleitung **7**

2 Grundlagen der Hydrodynamik **9**

2.1 Die Erhaltungsgleichungen der Physik **9**

2.2 Die Gleichungen von Navier-Stokes **10**

2.3 Modellieren der Turbulenz **10**

2.4 Vereinfachungen der Gleichungen von Navier-Stokes **11**

2.4.1 Schwierigkeiten bei der Lösung der Ausgangsgleichungen 11

2.4.2 Möglichkeiten der Vereinfachung 11

2.5 Die Flachwassergleichungen **12**

2.5.1 Die eindimensionalen Flachwassergleichungen 12

2.5.2 Die zweidimensionalen Flachwassergleichungen 13

2.6 Praktische Anwendbarkeit vereinfachter Gleichungen **13**

2.7 Zusammenfassung **14**

3 Numerische Methoden **16**

3.1 Einführung **16**

3.2 Die Raumdiskretisierung **16**

3.2.1 Strukturierte Netze 17

3.2.2 Multiblock-Gitter 18

3.2.3 Unstrukturierte Gitter 18

3.2.4 Gittergenerierung 19

3.3 Rand- und Anfangsbedingungen **19**

3.4 Numerische Verfahren **20**

3.4.1 Grundlagen 20

3.4.2 Methode der finiten Differenzen 20

3.4.3 Methode der finiten Volumen 20

3.4.4 Methode der finiten Elemente 21

3.5 Zeitdiskretisierung **21**

3.6 Eignung numerischer Verfahren **22**

3.6.1 Wahl der Diskretisierungsmethode 22

4 Modellauswahl **23**

4.1 Numerische Modelle im Überblick **23**

4.1.1 Vorbemerkung 23

4.1.2 Konzeptive Modelle 23

4.1.3 Numerische 1-D-Modelle 24

4.1.4 2-D-Modelle 24

4.1.5 3-D-Modelle 24

4.1.6 Kombinierte Modelle und Modellketten 25

4.2 Modellannahmen und Konsequenzen **25**

4.2.1 Konzeptive Modelle 25

4.2.2 1-D-Modelle 25

4.2.3 2-D-Modelle 27

4.2.4 3-D-Modelle mit hydrostatischer Druckannahme 28

4.2.5 3-D-Modelle ... 28
4.2.6 Turbulenzmodelle (Bestandteile von 2-D- und 3-D-Modellen) ... 29
4.2.7 Direkte Numerische Simulation und Large Eddy-Simulation ... 29
4.3 Entscheidungskriterien und Entscheidungsfindung ... 30
4.3.1 Aufgabenstellung – Fragestellung ... 30
4.3.2 Stationäre – instationäre Betrachtungen ... 30
4.3.3 Größe des Untersuchungsgebiets ... 30
4.3.4 Verfügbare Datengrundlage ... 31
4.3.5 Verfügbare Zusatzinformationen ... 31
4.3.6 Besondere Rahmenbedingungen ... 31
4.3.7 Anforderungen an den Bearbeiter ... 31
4.3.8 Verfügbarkeit und Wiederverwendbarkeit ... 32
4.3.9 Rechenzeiten ... 32
4.3.10 Hardware-Anforderungen ... 32
4.3.11 Visualisierung: Geplantes „Ergebnis“ (Studie, Plan etc.), Zielgruppe ... 33
4.4 Zusammenschau ... 33
5 Daten ... 35
5.1 Hydrologische Grundlagen ... 35
5.1.1 Allgemeines ... 35
5.1.2 Stationäre Abflussberechnung ... 35
5.1.3 Instationäre Modellierung ... 36
5.1.4 Historische Ereignisse, Kalibrierung ... 36
5.2 Daten zur Modellerstellung ... 37
5.2.1 Vermessungsgrundlagen ... 37
5.2.2 Oberflächenrauigkeit ... 40
5.2.3 Bauwerke ... 41
5.2.4 Sonstige Basis-Informationen ... 42
5.2.5 Datenbedarfsunterschiede 1-D, 2-D, 3-D ... 42
5.2.6 Datenbedarfsunterschiede je nach Fragestellung ... 43
5.3 Datenqualität ... 44
5.3.1 Datenqualität – Morphologie ... 44
5.3.2 Datenqualität – Hydrologie ... 45
5.3.3 Datenqualität – Rauigkeiten ... 45
6 Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Validierung ... 47
6.1 Kalibrierung ... 47
6.1.1 Kalibrierparameter ... 47
6.1.2 Messdaten ... 49
6.1.3 Anpassungsqualität ... 50
6.1.4 Methodik ... 55
6.2 Sensitivitätsanalyse ... 56
6.2.1 Parametervariation ... 57
6.2.2 Variation der Eingangsdaten (Randbedingungen) ... 57
6.3 Validierung ... 57
6.3.1 Durchführung ... 57
6.3.2 Gültigkeit des validierten Modells ... 58

6.4 **Beispiele** ... 59
6.5 **Literatur** ... 60
7 Visualisierung und Präsentation ... 62
7.1 **Einleitung** ... 62
7.2 **Strömungsvisualisierung (Flow Visualization)** ... 62
7.2.1 Überblick ... 62
7.2.2 Direkte bzw. indirekte Strömungsvisualisierung ... 63
7.2.3 Strömungsvisualisierung unter Verwendung integrierter Objekte ... 63
7.2.4 Strömungsvisualisierung auf der Grundlage von abgeleiteten Daten ... 63
7.3 **Darstellungsbeispiele** ... 64
7.3.1 Allgemeines ... 64
7.3.2 Tabellen ... 64
7.3.3 Diagramme ... 66
7.3.4 Lagepläne ... 66
7.3.5 Querprofile ... 68
7.3.6 Längsprofile ... 69
7.3.7 Hydrologisches Längsprofil ... 70
7.3.8 Darstellung in axonometrischer Ansicht ... 70
7.3.9 Gitternetze ... 70
7.3.10 Konturen ... 71
7.3.11 Vektoren ... 73
7.3.12 Punktwolken ... 74
7.3.13 Kombinierte Darstellungen ... 74
7.4 **Verwendete Literatur** ... 76
8 Praktische Anwendung: Hintergründe – Anforderungen – Beispiele ... 77
8.1 **Überblick** ... 77
8.2 **Hochwasserschutz und Risikobetrachtung** ... 77
8.3 **Ausweisung von Überflutungsflächen** ... 79
8.3.1 Hintergründe ... 79
8.3.2 Anforderungen ... 79
8.3.3 Beispiele ... 80
8.4 **Gefahrenzonenausweisung** ... 82
8.4.1 Hintergründe ... 82
8.4.2 Anforderungen ... 85
8.4.3 Beispiel Gefahrenzonenplan Gemeinde Langenlois / Kamp (Werner Consult, 2005) ... 85
8.5 **Machbarkeitsstudien für Hochwasserschutzmaßnahmen** ... 88
8.5.1 Hintergründe ... 88
8.5.2 Anforderungen ... 88
8.5.3 Beispiel ... 89
8.6 **Detailplanungen im Bereich Hochwasserschutz** ... 89
8.6.1 Hintergründe ... 89
8.6.2 Anforderungen ... 89
8.7 **Retentionsberechnungen** ... 90
8.7.1 Hintergründe ... 90
8.7.2 Anforderungen ... 90
8.7.3 Beispiel ... 90

8.8 Analyse der Auswirkungen von baulichen Maßnahmen auf den Abfluss ... 91
8.8.1 Hintergründe ... 91
8.8.2 Anforderungen ... 91
8.8.3 Beispiele ... 91
8.9 Planung von flussbaulichen Maßnahmen, Stauanlagen ... 92
8.9.1 Hintergründe ... 92
8.9.2 Anforderungen ... 92
8.9.3 Beispiel ... 92
8.10 Grundlagenberechnungen für Simulation des Sedimenttransports, Habitatmodellierung ... 94
8.10.1 Hintergründe ... 94
8.10.2 Anforderungen ... 94
8.10.3 Beispiele ... 94
8.11 Flussgebietsplanung ... 97
8.12 Hydrodynamische Simulation und Partizipation ... 98
8.13 Literatur ... 98
9 Modelle, Hersteller und weitere Informationen ... 99
9.1 Einleitung ... 99
9.2 1-D-Modelle ... 102
9.3 2-D-Modelle ... 107
9.4 3-D-Modelle ... 116
9.5 Literatur ... 130
10 Zusammenfassung ... 134

1 Einleitung

Das Thema Fließgewässermodellierung hat seit den jüngsten extremen Hochwässern stark an Bedeutung gewonnen. Insbesondere nach dem Hochwasser 2002 entstand der Bedarf an flächendeckend vorhandenen Ausweisungen von Überflutungsflächen bei zumindest dreißig- und hundertjährlichen Abflüssen. Waren davor schwerpunktmäßig eindimensionale hydrodynamische Modelle im Einsatz, so ist anschließend ein Trend zur mehrdimensionalen Simulation zu beobachten.

Mit der Orientierung zur Mehrdimensionalität traten auch erhöhte Anforderungen an die Datengrundlagen und die Kalibrierung sowie den Rechenaufwand auf. Moderne Vermessungsmethoden, wie z. B. Laserscanning, gesteigerte Rechnerleistungen und die Kopplung von Modellen mit diversen „Pre- und Postprocessing"-Programmen sowie Geografischen Informationssystemen führten zum mittlerweile weit verbreiteten Ansatz mehrdimensionaler Modelle in der Praxis. Für die Entscheidung, welches Modell zum Einsatz kommt, ist es wichtig, die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren abzuwägen und darauf aufbauend eine Entscheidung zu treffen.

Gleichzeitig ermöglichte die Entwicklung von Programmen mit grafischer Benutzeroberfläche die einfachere Bedienung der Modelle. Damit entstand jedoch die Gefahr, dass ohne vertiefte Beschäftigung mit den hydrodynamischen numerischen Grundlagen, aber auch wichtigen Themen wie Modellkalibrierung, Simulationen vorgenommen werden. Ein praxisorientierter Überblick über die Grundlagen und Anwendungen der Modelle erscheint daher sinnvoll.

Im Lauf der Zeit entstanden viele Programmpakete, die sich einerseits in den verwendeten hydrodynamischen Grundlagen (z. B. Fließformeln), numerischen Ansätzen (z. B. finite Elemente oder finite Volumenansätze), andererseits in der „Bedienerfreundlichkeit", dem vorgesehenen Betriebssystem, den Pre- und Postprocessing-Möglichkeiten oder den Kosten unterscheiden. Die Auswahl eines für den entsprechenden Anwendungsfall optimalen Programms setzt einen Vergleich der Produkte voraus, der bislang nicht leicht durchzuführen war.

Weiters zeigen Hochwasserereignisse, dass neben dem Wassertransport Fragen des Sedimenttransports und der Flussmorphologie verstärkt Bedeutung erlangen werden. Dies ist auch in Zusammenhang mit der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie und des österreichischen Wasserrechtsgesetzes zu sehen, wo bis 2015 u. a. ein guter ökologischer Zustand der Oberflächengewässer zu erreichen ist. Dabei kommt der sogenannten Habitatmodellierung eine große Bedeutung zu, die biologische Parameter einschließt und mit den abiotischen hydrodynamischen Grundlagen verknüpft. Für alle diese Anwendungen stellt eine gute hydrodynamische Modellierung die Grundvoraussetzung dar. Die Themenbereiche Sedimenttransport und Habitatmodellierung werden Gegenstand der künftigen Tätigkeit des Arbeitsausschusses sein. Dieser Arbeitsbehelf umfasst ausschließlich die hydrodynamische Modellierung.

Aufgrund dieser Überlegungen wurde der Arbeitsausschuss „Fließgewässermodellierung" der Fachgruppe Wasserbau, Ingenieurbiologie und Ökologie des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbands gegründet. Ein erstes Ergebnis dieses Arbeitsausschusses stellt der nunmehr vorliegende Arbeitsbehelf „Fließgewässermodellierung" dar.

Folgende Ziele werden damit verfolgt:

- Praxisorientierte, kurze Darstellung der Grundlagen für die Fließgewässermodellierung
- Darstellung der Möglichkeiten, Vor- und Nachteile einzelner Verfahren
- Beschreibung des Modellaufbaus und der Datengrundlagen
- Darlegung von Pre- und Postprocessing-Möglichkeiten
- Diskussion des praxisnahen Einsatzes der Fließgewässermodellierung
- Vergleich von verfügbaren Modellen als Grundlage für die Modellauswahl.

Der Arbeitsbehelf ist in folgende Großkapitel gegliedert:

- Grundlagen der Hydrodynamik
- Numerische Methoden
- Modellauswahl
- Daten
- Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Validierung
- Visualisierung und Präsentation
- Praktische Anwendung: Hintergründe – Anforderungen – Beispiele
- Modelle, Hersteller und weitere Information.

2 Grundlagen der Hydrodynamik

Strömungsberechnungen beruhen auf den Erhaltungsgleichungen der Physik, nämlich auf der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung. In der allgemeinen Form resultieren aus diesen Gleichungen die sogenannten Gleichungen von Navier-Stokes, die ein nicht-lineares, partielles Differenzialgleichungssystem darstellen, das im allgemeinen Fall nur durch numerische Methoden näherungsweise gelöst werden kann. Um den Rechenaufwand gering zu halten, können die Ausgangsgleichungen vereinfacht werden, indem Terme mit geringem Einfluss vernachlässigt werden. Eine andere Möglichkeit der Vereinfachung besteht darin, die Dimension des Problems zu verringern. Bei all diesen Vereinfachungen sollte man sich bewusst sein, dass die vernachlässigten Terme und Dimensionen in der numerischen Lösung logischerweise nicht enthalten sind.

2.1 Die Erhaltungsgleichungen der Physik

Die Grundgleichungen der Hydrodynamik beruhen auf den Erhaltungsgleichungen der Physik, nämlich auf der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung. Eine allgemeine Herleitung dieser Gleichungen, die einen engen Bezug zu numerischen Verfahren hat, kann anhand einer Kontrollvolumenbetrachtung durchgeführt werden. Wir können sagen *(siehe Abb. 1),* dass die zeitliche Änderung einer Größe im betrachteten Volumen der Summe aller Zu- bzw. Abflüsse über die Berandung entspricht, plus der Bilanz aus Quellen und Senken im Innern des Volumens. Falls wir alle Größen auf das Volumen des Elements beziehen, so bedeutet diese Aussage in mathematischer Form:

$$-\int_{\Gamma} \vec{j} \cdot \vec{n} d\Gamma + \int_{\Omega} s d\Omega = \frac{\partial}{\partial t} \cdot \int_{\Omega} \phi d\Omega \tag{1}$$

In volumenspezifischen Größen bedeutet ϕ immer die betrachtete Quantität, s eine Quelle bzw. Senke dieser Größe und $\vec{j}$ den Fluss der Größe durch die Berandung.

Mit dem Integralsatz von Gauss ($-\int_{\Gamma} \vec{j} \cdot \vec{n} d\Gamma = -\int_{\Omega} \nabla \cdot \vec{j} d\Omega$) folgt:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{j} = s \tag{2}$$

Die in der Hydromechanik wichtigen Gleichungen folgen alle aus (2) durch geeignete Wahl der Größen ϕ, s und $\vec{j}$.

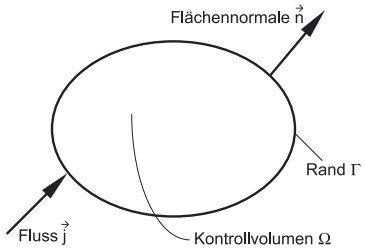


Abb. 1: Kontrollvolumen mit verwendeten Bezeichnungen

Wählt man $\phi = \rho$ = Dichte und $\vec{j} = \vec{u}\rho$ = Massenfluss, so ergibt sich die Kontinuitätsgleichung für die Masse:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\vec{u}\rho) = 0 \tag{3}$$

Für inkompressible Fluide (ρ = konstant) vereinfacht sich obige Gleichung zu:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{4}$$

In gleicher Art und Weise kann die Erhaltung von Impuls und Energie hergeleitet werden. Üblicherweise wird die Energiegleichung vernachlässigt. Bei der Impulsgleichung führt eine Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen Spannung und Verformung auf die nachfolgende Darstellung der Gleichungen, die man auch als die Gleichungen von Navier-Stokes bezeichnet:

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{u} \bullet \vec{u}) = -\nabla p + \rho\vec{g} + \eta\Delta\vec{u} \tag{5}$$

Die Impuls- bzw. Navier-Stokes-Gleichungen bilden zusammen mit der Kontinuitätsgleichung ein System von Gleichungen, das ausreicht, 3-D-Strömungen unter Vernachlässigung thermischer Energie zu berechnen.

2.2 Die Gleichungen von Navier-Stokes

Falls man in die obige Bilanzgleichung den Impuls als extensive, die Impulsdichte als intensive Größe, den Impulsfluss als Produkt aus Geschwindigkeit und Impulsdichte und die pro Volumen angreifenden Kräfte als Quellen und Senken definiert, so resultieren die Gleichungen von Navier-Stokes für kompressible Fluide:

$$\rho\frac{D\vec{u}}{Dt} = \frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{u} \cdot \vec{u}) = -\nabla p + \rho\vec{g} + \eta\Delta\vec{u} + \frac{1}{3}\eta(\nabla(\nabla\vec{u})) \tag{6}$$

Oder für inkompressible Fluide:

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{u} \bullet \vec{u}) = -\nabla p + \rho\vec{g} + \eta\Delta\vec{u} \tag{7}$$

2.3 Modellieren der Turbulenz

Die Gleichungen von Navier-Stokes beinhalten in obiger Form keine Vereinfachungen, d. h., falls durch die numerische Lösung keine Fehler eingeführt werden, könnten selbst komplexeste Strömungen bis ins letzte Detail korrekt berechnet werden. Die Schwierigkeit liegt darin, dass für diesen Fall die kleinsten räumlichen und zeitlichen Skalen durch die Numerik aufgelöst werden müssten. Außer für sehr kleine Rechengebiete und niedere Reynoldszahlen ist eine solche Lösung

vom Rechenaufwand ausgeschlossen, weswegen Vereinfachungen vorgenommen werden müssen. Nach Reynolds werden die Strömungsgrößen in einen Mittelwert und einen Schwankungsterm unterteilt, wodurch ein symmetrischer, viskoser Spannungstensor mit zusätzlichen sechs Unbekannten entsteht. Man spricht dann von den Reynolds-Gleichungen. Da keine neuen Gleichungen zur Auflösung der zusätzlichen Unbekannten zur Verfügung stehen, kann keine geschlossene Lösung gefunden werden, was man auch als „Schließungsproblem" bezeichnet. Das „Schließungsproblem" ist der Grund für die sogenannte Turbulenzmodellierung, bei der die unbekannten Komponenten des viskosen Spannungstensors mit den primären Variablen korreliert werden. Je nach Komplexität der entsprechenden Korrelationen spricht man von Null-, Ein- oder Zweigleichungsmodellen bzw. von Reynoldsspannungsmodellen, bei denen jeder der sechs Terme über eine zusätzliche partielle Differenzialgleichung mit den primären Unbekannten modelliert wird. Bekannte Turbulenzmodelle für Fließgewässer sind der Prandtl'sche Mischungsweglänge-Ansatz oder das k-ε-Turbulenzmodell mit seinen Abwandlungen.

2.4 Vereinfachungen der Gleichungen von Navier-Stokes

2.4.1 Schwierigkeiten bei der Lösung der Ausgangsgleichungen

Die vollständigen Ausgangsgleichungen (Reynolds-Gleichungen) stellen ein komplexes System nicht-linearer, partieller Differenzialgleichungen dar, das nur durch numerische Verfahren näherungsweise gelöst werden kann. Die numerische Lösung ist umso besser, je feiner das Rechengebiet in Untergebiete (Zellen/Elemente) unterteilt wird. Diesen Schritt nennt man Diskretisierung. Eine feine Unterteilung im Falle von dreidimensionalen Rechengebieten führt zu einer hohen Zellenzahl und zu langen Rechenzeiten.

Eine weitere Schwierigkeit im Falle von Freispiegelströmungen besteht darin, dass die Lage der freien Wasseroberfläche nicht bekannt, sondern Teil der Lösung ist, weswegen die Diskretisierung eigentlich nicht vorgenommen werden kann. Spezielle Lösungsansätze sind für die Überwindung dieser Schwierigkeit anwendbar. Vielfach wird jedoch ein vereinfachter Ansatz (Flachwasseransatz) gewählt, mit dem entsprechende Probleme nicht auftreten.

2.4.2 Möglichkeiten der Vereinfachung

Die Gleichungen von Navier-Stokes bzw. die Reynolds-Gleichungen können auf verschiedene Art und Weise vereinfacht werden, nämlich durch eine Reduktion der Dimensionalität bzw. durch die Vernachlässigung oder Vereinfachung von Termen der Ausgangsgleichungen. Es ist selbstredend, dass eine Dimension nur vernachlässigt werden darf, falls die Strömungskomponenten in der entsprechenden Richtung vernachlässigbar sind. Ebenso sollte es klar sein, dass vereinfachende Annahmen oder die Vernachlässigung von ganzen Termen der Ausgangsgleichungen nur dann möglich sind, falls die entsprechenden Vereinfachungen in guter Näherung zutreffend sind bzw. die vernachlässigten Terme sehr klein sind.

2.5 Die Flachwassergleichungen

2.5.1 Die eindimensionalen Flachwassergleichungen

Den Flachwassergleichungen liegen die nachfolgenden vereinfachenden Annahmen zugrunde:

1. Die Wellenlänge ist sehr viel größer als die Wellenhöhe (Flachwasserannahme).

2. Die Geschwindigkeiten und damit der Impuls in der vertikalen Richtung können deshalb vernachlässigt werden.

3. Der Druck kann als hydrostatisch angenommen werden, da die Stromlinienkrümmungen gering sind.

4. Die Geschwindigkeiten in Querrichtung sind klein verglichen mit denjenigen in Hauptströmungsrichtung. Sie können deshalb vernachlässigt werden.

5. Die Strömungsgrößen verändern sich im betrachteten Querschnitt nicht, d. h., wir sprechen von einer mittleren Wassertiefe bzw. einer mittleren Geschwindigkeit.

Mit diesen Annahmen können die 1-D-Flachwassergleichungen aus den allgemeinen Gleichungen von Navier-Stokes hergeleitet werden. Dies führt auf:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v\frac{\partial h}{\partial x} + h\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial x} = g(I_S - I_E) - g\frac{\partial h}{\partial x} \tag{9}$$

wobei h der Wassertiefe, v der Geschwindigkeit, g der Erdbeschleunigung und I dem Gefälle der Sohle (Index S) bzw. der Energielinie (Index E) entspricht.

Eine Schwierigkeit der Flachwassergleichungen besteht darin, dass es sehr wichtig ist, mit den richtigen Variablen zu arbeiten. Bei der Berechnung eines Dammbruchproblems ergeben sich unterschiedliche Lösungen, je nachdem ob man die Geschwindigkeiten oder die spezifischen Abflüsse als Unbekannte verwendet. Der Grund liegt darin, dass bei einem Fließwechsel sowohl die Wassertiefen als auch die Geschwindigkeiten nicht stetig differenzierbar sind, sondern einen Sprung aufweisen. Demgegenüber ist der spezifische Abfluss auch über Sprünge stetig differenzierbar, und die Lösung mit diesen Variablen daher näher bei der physikalischen Realität. In sogenannten konservativen Variablen formuliert – der spezifische Abfluss q ersetzt die Fließgeschwindigkeit v – lauten die 1-D-Flachwassergleichungen:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \\ &\frac{\partial}{\partial t}q + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2}\right) = gh(I_S - I_E) \end{aligned} \tag{10}$$

2.5.2 Die zweidimensionalen Flachwassergleichungen

Die im obigen Abschnitt dargestellten Vereinfachungen 1 bis 3 gelten auch für die 2-D-Flachwassergleichungen. Anstelle von 4 und 5 treten die Annahmen

4. Die Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung werden berücksichtigt.

5. Die Geschwindigkeiten werden über die Wassertiefe gemittelt.

Damit gilt:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial x}+\frac{\partial r}{\partial y}=0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}q+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{q^2}{h}+\frac{gh^2}{2}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q\cdot r}{h}\right)=gh\left(I_{Sx}-I_{Ex}\right) \tag{11}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}r+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q\cdot r}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{r^2}{h}+\frac{gh^2}{2}\right)=gh\left(I_{Sy}-I_{Ey}\right)$$

wobei r dem spezifischen Abfluss in y-Richtung entspricht und die Indices x bzw. y jeweils die Richtung angeben.

2.6 Praktische Anwendbarkeit vereinfachter Gleichungen

Wenn man vereinfachte Gleichungen anwendet, sollte man sich der vorgenommenen Vereinfachungen immer bewusst sein. Strömungseffekte, für welche die vernachlässigten Terme von Bedeutung sind, können in einer numerischen Simulation mit den vereinfachten Gleichungen nicht korrekt abgebildet werden. Beispielhaft und als Denkanstoß seien die nachfolgenden Fälle angeführt und erläutert, wo vereinfachte Gleichungen zu inkorrekten Resultaten führen müssen:

1. *Verwendung der 1-D-Flachwassergleichung für Überflutungsberechnungen*

   Die 1-D-Flachwassergleichungen gehen vereinfachend davon aus, dass nur Geschwindigkeiten und Impuls in Hauptströmungsrichtung berücksichtigt werden müssen, und dass die Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung über den Querschnitt gemittelt werden kann. Im Falle von Überflutungsrechnungen sind beide Annahmen verletzt. Strömung tritt aus einem Gerinne in seitliche Überflutungsflächen aus, d. h., es existiert eine nicht zu vernachlässigende laterale Strömungsgeschwindigkeit. Zudem sind die Geschwindigkeiten im überfluteten Bereich infolge der kleinen Abflusstiefe gering, d. h., es existiert ein beträchtlicher Unterschied zwischen querschnittsgemittelter Geschwindigkeit und wirklicher Geschwindigkeit.

2. *Berechnung von Geschiebetransport mit Sohlverformungen mittels eines 2-D-Flachwassermodells*

   In einem 2-D-Flachwassermodell werden die Geschwindigkeiten in der Vertikalen vernachlässigt, außerdem werden die Geschwindigkeiten über die Abflusstiefe gemittelt und ein hydrostatischer Druck angenommen. Diese Vereinfachungen sind lokal nicht zutreffend, wenn sich infolge der Strömung die Sohle verändert. Beim Erodieren der Sohle können Kolke entstehen, wo die Geschwindigkeit eine große Komponente in der Vertikalen aufweist. Die Stromlinien sind gekrümmt, die hydrostatische Druckannahme deshalb nicht mehr zutreffend und der Transport von Sohlenmaterial ist nicht eine Funktion der mittleren, sondern einer lokal an der Sohle wirkenden Geschwindigkeit.

3. *Berechnung des Geschwindigkeitsmaximums in einer Gerinneströmung mittels eines 2-D-Navier-Stokes-Programms*

   Ein 2-D-Navier-Stokes-Programm rechnet in einer vertikalen Schnittebene und vernachlässigt die Geschwindigkeiten senkrecht zu dieser Ebene. Es ist bekannt, dass Sekundärströmungen dafür verantwortlich sind, dass das Maximum der Geschwindigkeiten nicht an der Strömungsoberfläche, sondern leicht darunter auftritt. Da Sekundärströmungen im verwendeten Ansatz nicht enthalten sind, wird das berechnete Maximum an der Wasseroberfläche auftreten.

Die angeführten Beispiele stellen nicht den Anspruch, umfassend zu sein. Sie sollen den Leser sensibilisieren, die von ihm durchgeführten Modellrechnungen auf deren Verlässlichkeit zu überdenken. Gerade im Falle des zweiten Beispiels sollte man sich auch die Frage stellen, ob das globale Geschiebeverhalten in einem größeren Flussabschnitt betrachtet werden soll. In diesem Falle wäre ein 2-D-Ansatz mit lokaler Verletzung der zugrunde liegenden Annahmen akzeptierbar. Soll aber eine Aussage über Kolktiefen, d. h. ein lokales Phänomen, wo die Annahmen verletzt sind, gemacht werden, so sind die Vereinfachungen nicht mehr zu rechtfertigen.

2.7 Zusammenfassung

Die Grundgleichungen der Hydromechanik sind Transportgleichungen von Masse, Impuls und Energie. Die dreidimensionalen Gleichungen benötigen zur numerischen Lösung ein relativ feines Rechennetz, was zu großen Rechenzeiten führt. Ein weiteres Problem der dreidimensionalen Lösung ist die Tatsache, dass die Position des Wasserspiegels nicht bekannt ist, zur Erstellung eines Rechennetzes aber benötigt würde. Um dieser Schwierigkeit zu begegnen, wurden spezielle Verfahren entwickelt. Sie funktionieren normalerweise befriedigend bis gut, bedeuten im Endeffekt aber doch eine zusätzliche Nichtlinearität, die aufgelöst werden muss, was zu einer erhöhten Rechenzeit und allenfalls Konvergenzproblemen führen kann.

In vielen Fällen kann es durchaus Sinn machen, die 3-D-Gleichungen um eine Dimension zu reduzieren. Wenn Randeffekte vernachlässigt werden können, so kann in einer 2-D-Vertikalebene mit den Gleichungen von Navier-Stokes gearbeitet werden. Der Vorteil eines solchen Ansatzes liegt darin, dass die Anzahl der Zellen reduziert werden kann. Die Probleme um die Lage der freien Wasseroberfläche bleiben identisch dem 3-D-Ansatz.

Den Flachwassergleichungen liegt die hydrostatische Druckannahme zugrunde, die es erlaubt, den Druck über die Wassertiefe aufzuintegrieren und damit den unbekannten Druck durch die Wassertiefe zu ersetzen. Obige Probleme mit der unbekannten Position der freien Wasserspiegeloberfläche entfallen deshalb. Für die Flachwassergleichungen wird üblicherweise auch von gemittelten Wassergeschwindigkeiten ausgegangen. Eine Tiefenmittlung führt auf die 2-D-Flachwassergleichungen, eine Querschnittsmittelung auf die 1-D-Gleichungen. Damit reduziert sich die Dimensionalität des Problems, was zu kürzeren Rechenzeiten führt. Rechnungen mit einem 2-D-Flachwasserprogramm beinhalten ein 2-D-Diskretisierungsnetz im 3-D-Raum, Rechnungen mit einem 1-D-Ansatz ein 1-D-Rechennetz im 2-D-Raum.

3 Numerische Methoden

Die Erhaltungssätze der Physik führen auf ein nicht-lineares System von partiellen Differenzialgleichungen, das nur mittels numerischer Verfahren gelöst werden kann. Es gibt verschiedene Verfahren, die oft eng mit den verwendeten Rechennetzen gekoppelt sind. Man unterscheidet strukturierte oder unstrukturierte Netze. Strukturierte Netze werden häufig bei finiten Differenzen Verfahren verwendet. Sie sind dadurch charakterisiert, dass jede Zelle bzw. jeder Knoten durch eine endliche Anzahl von Zeigern, die der Dimensionalität des Problems entspricht, eindeutig festgelegt werden kann. Unstrukturierte Netze, wie sie bei finiten Elementen verbreitet sind, erlauben die Nachbildung komplexer Geometrien.

In Fließgewässermodellierungen dominieren konvektive Prozesse, wodurch sich numerische Probleme ergeben, falls Informationen aus allen Richtungen gleich gewichtet werden (Zentrale Schemen). Durch physikalische Gewichtung der Informationsrichtung (Upwind-Schemen) können diese Probleme umgangen werden.

Bei Navier-Stokes-basierten Ansätzen sind spezielle Ansätze für die Modellierung von Freispiegelströmungen nötig. Man kann solche mit festen Netzen, die nur in Teilen mit Wasser gefüllt sind, und solche mit flexiblen Netzen, die sich der Lage der freien Oberfläche in Lagrange'scher Art anpassen, unterscheiden.

3.1 Einführung

Durch die rasante Entwicklung auf dem Gebiet der Computertechnik stehen heute dem gewöhnlichen Anwender Rechenkapazitäten zur Verfügung, die noch vor Jahren nur auf einem Superrechner denkbar waren. Diese Rechenleistung erlaubt es, numerische Verfahren anzuwenden, wo vielleicht früher mit vereinfachten Ansätzen Abschätzungen gemacht werden mussten. Im Bereich der Strömungsberechnungen wird oft der englische Begriff „computational fluid dynamics" gebraucht, abgekürzt CFD. CFD befasst sich mit der numerischen Lösung von partiellen Differenzialgleichungen (PDG) aus dem Bereich der Strömungen, d. h. mit den Navier-Stokes-, Euler- oder Flachwassergleichungen o. Ä. Zur Lösung dieser Differenzialgleichungen stehen drei Methoden im Vordergrund: die Methode der finiten Differenzen (FD-Methode), die Methode der finiten Volumen (FV-Methode) und die Methode der finiten Elemente (FE-Methode).

3.2 Die Raumdiskretisierung

Damit eine PDG numerisch gelöst werden kann, muss in einem ersten Schritt das Berechnungsgebiet in Teilgebiete unterteilt werden. Diesen Vorgang nennt man diskretisieren. Er dient dazu, dass die PDG auf kleinen Teilgebieten näherungsweise gelöst werden kann. Je feiner die Unterteilung des Berechnungsgebiets ist, desto geringer fallen die Näherungen auf den Untergebieten ins Gewicht. Es gibt verschiedene Wege, um ein Rechengebiet zu diskretisieren. Nicht notwendigerweise, aber in vielen Fällen, sind bestimmte Diskretisierungsmethoden auch eng mit den Lösungsverfahren verknüpft. Es geht im Folgenden nicht darum, die Diskretisierungsverfahren im Detail auszuführen, sondern vielmehr darum, die verschiedenen Ansätze kennen zu lernen und deren

Vor- und Nachteile zu verstehen. Eine Hauptunterteilung ist die Unterteilung in strukturierte und unstrukturierte Netze.

3.2.1 Strukturierte Netze

Strukturierte Netze sind die einfachsten Netze, die zur Unterteilung eines Rechengebiets verwendet werden können. Sie können dadurch charakterisiert werden, dass die Anzahl von Unterteilungen in eine Raumdimension immer konstant ist, d. h., ein 2-D-Netz hat eine bestimmte Anzahl Zellen n_x bzw. n_y in x- bzw. y-Richtung. Damit kann jede Zelle im Berechnungsgitter oder jeder Berechnungsknoten eindeutig mit zwei Zählern (für ein 2-D-Netz) identifiziert werden. Strukturierte Netze können weiter unterteilt werden in:

- Reguläre Netze, bei denen die Zellenlängen in die jeweiligen Raumrichtungen immer konstant sind,
- Orthogonale Netze, in denen die Netzlinien orthogonal aufeinander stehen, und
- Krummlinige Netze, bei denen die Netzlinien beliebigen Raumkurven folgen können.

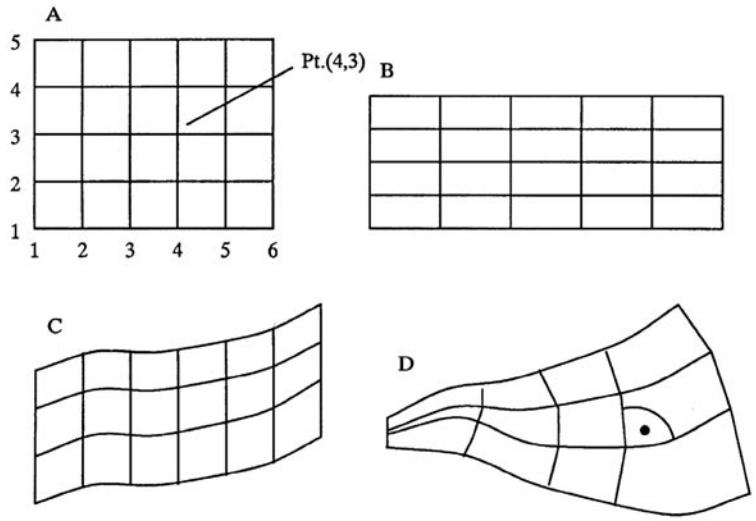


Abb. 2: Verschiedene Arten strukturierter Netze: Reguläre, orthogonale Gitter (A und B), krummliniges Gitter (C) und orthogonal, krummliniges Gitter (D)

Strukturierte und insbesondere strukturierte reguläre Gitter eignen sich ausgezeichnet für die FD-Methode. Dank der speziellen Gittereigenschaften können die Ableitungen in den Raumrichtungen einfach und schnell bestimmt werden, ohne dass eine Koordinatentransformation notwendig ist. Ein großer Vorteil der strukturierten Netze besteht darin, dass der Speicherbedarf auf dem Computer klein ist, da die zu einer Zelle gehörigen Knoten und die Nachbarzellen aufgrund der Zellenidentifikation bekannt sind. Dadurch ergibt sich eine einfache Struktur der zu lösenden Matrix und es können speziell schnelle Gleichungslöser verwendet werden. Der größte Nachteil von strukturierten Gittern besteht darin, dass sie geometrisch wenig flexibel sind. Es ist schwierig bis unmöglich, komplizierte Gebiete abzubilden.

3.2.2 Multiblock-Gitter

Multiblock-Gitter sind eine Kombination von mehreren Blöcken, die in sich selber strukturiert sind. Sie vereinigen damit die Vorteile von strukturierten Gittern, ohne deren rigide Einschränkungen aufzuweisen. In jedem einzelnen Block eines Multiblock-Gitters kann wie in einem strukturierten Netz gerechnet werden. Der Übergang von einem Block auf einen anderen muss allerdings numerisch speziell behandelt werden.

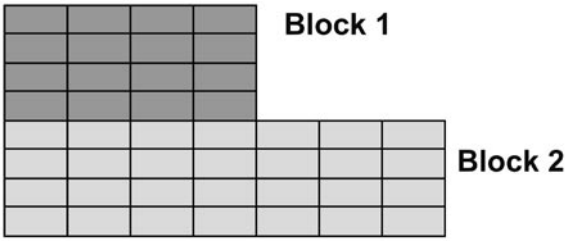


Abb. 3: Multiblock-Gitter, bestehend aus 2 Blöcken

3.2.3 Unstrukturierte Gitter

Unstrukturierte Netze sind am komplexesten zu generieren, weisen allerdings die höchste geometrische Flexibilität auf *(Abb. 4)*. Ein unstrukturiertes Netz kann so charakterisiert werden, dass die Anzahl der Nachbarn einer Zelle nicht definiert ist. Damit ist es nicht mehr möglich, eine bestimmte Zelle durch zwei bzw. drei Zeiger (2-D bzw. 3-D) zu identifizieren. Außerdem sind die Knoten, die eine Zelle bilden, nicht von Anfang gegeben sondern müssen definiert werden. Ein unstrukturiertes Netz muss mindestens zweierlei Informationen beinhalten:

- Sämtliche Knoten und deren Koordinaten und
- sämtliche Zellen und die Information, welche Knoten Bestandteil dieser Zelle sind.

Unstrukturierte Netze werden vor allem bei finiten Elementen verwendet. Auch für die Methode der FV werden teilweise unstrukturierte Gitter gebraucht, allerdings verbunden mit dem Nachteil, dass Rechengeschwindigkeit verloren geht.

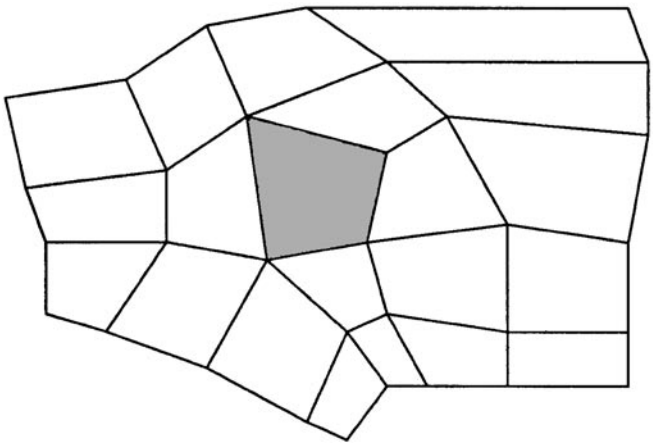


Abb. 4: Unstrukturiertes Gitter

3.2.4 Gittergenerierung

Für einfache Rechengebiete, die nur eine kleine Anzahl von Zellen aufweisen, lässt sich eine Gittergenerierung notfalls von Hand durchführen. Bei komplexeren Gebieten und einer großer Anzahl von Zellen wäre ein solches Vorgehen aber zu zeitaufwendig. Deshalb werden Werkzeuge eingesetzt, die ausgehend von einer Gebietsumrandung eine automatische Unterteilung in Zellen vornehmen. Solche Werkzeuge nennt man Gittergeneratoren.

Sogenannte algebraische Gittergeneratoren erzeugen die Zellen, indem sie algebraische Ausdrücke zur Generierung verwenden. Daneben gibt es auch Gittergeneratoren, die eine PDG auflösen und so die Unterteilung erzeugen. Gute Gittergeneratoren berücksichtigen bei der Netzerzeugung verschiedene Vorgaben, z. B. eine größtmögliche Fläche der Zellen, ein Winkelkriterium oder Ähnliches.

3.3 Rand- und Anfangsbedingungen

Wenn ein Problem numerisch angegangen wird, so muss das Gebiet zuerst diskretisiert werden, wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt. Auf dem diskretisierten Teilgebiet wird anschließend eine PDG mit einem numerischen Verfahren gelöst. Eine eindeutige Lösung der PDG ist aber nur möglich, wenn Randbedingungen definiert werden. Im Falle eines instationären Problems müssen zusätzlich die Randbedingungen in Zeitrichtung, die sogenannten Anfangsbedingungen vorgegeben werden.

Die numerische Lösung eines Problems wird durch die Rand- und Anfangsbedingungen maßgeblich beeinflusst. Der beste numerische Algorithmus hilft nicht viel, wenn die Randbedingungen schlecht gesetzt wurden, da diese die Lösung unmittelbar am Rand und fallweise bis weit ins Rechengebiet hinein beeinflussen. In mehreren sogenannten Blindtests, d. h. Wettbewerben, in denen Numeriker versuchten, eine Strömung ohne Kenntnis der Messresultate zu berechnen, wurden mit identischen Programmen sehr unterschiedliche Übereinstimmungen mit der Wirklichkeit erzielt, je nach Geschick des Programmanwenders beim Setzen der Randbedingungen.

Mit den Anfangsbedingungen verhält es sich etwas anders. Natürlich müssen diese korrekt gesetzt werden, falls die zeitliche Entwicklung einer Strömung wiedergegeben werden soll. Oftmals spielt die Zeit aber auch eine untergeordnete Rolle, wenn nur ein stationärer Endzustand interessiert. In diesen Fällen stellt sich die Frage eher so, dass physikalisch sinnvolle Anfangsbedingungen zu setzen sind, damit die Numerik im Falle nichtlinearer Probleme überhaupt konvergiert. Oftmals ist es dann sinnvoll, von einem bekannten Anfangszustand auszugehen, was unter Umständen die absolute Ruhe sein kann.

3.4 Numerische Verfahren

3.4.1 Grundlagen

Numerische Methoden zur Berechnung von Strömungen – unabhängig davon, um welche Methoden es sich handelt – können mit experimentellen Untersuchungen einer Strömung verglichen werden. In beiden Methoden kann nur eine begrenzte Anzahl von Strömungsgrößen zur Beschreibung der Strömung gemessen bzw. berechnet werden. Allerdings kann deren Anzahl beliebig hoch gewählt werden, sodass für praktische Fragestellungen keine Einschränkungen entstehen. Im Gegensatz zu den experimentellen Untersuchungen, bei welchen die primären Unbekannten an einer beschränkten Anzahl von Punkten mittels Sonden gemessen werden, schreiben die numerischen Methoden algebraische Gleichungen für diese Unbekannten vor und lösen sie mittels eines Lösungsalgorithmus. Indem wir uns auf eine knotenweise Betrachtung der Unbekannten konzentrieren, ersetzen wir eine kontinuierliche Verteilung der unbekannten Variablen durch eine diskontinuierliche. Diesen Vorgang nennt man Diskretisierungsmethode. Die algebraischen Ausdrücke werden so hergeleitet, dass zwischen den unbekannten Variablen eine Verteilung angenommen wird. Die Art dieser Verteilung ist je nach Methode unterschiedlich. Da die verwendeten algebraischen Verteilungen üblicherweise einfache Ausdrücke darstellen, ist deren Gültigkeit selbstverständlich nur auf ein kleines Teilgebiet beschränkt. Ein solches Teilgebiet nennt man Element, die Unterteilung, die zu solchen Elementen führt, Raumdiskretisierung, wie im vorhergehenden Kapitel dargestellt.

Bis hierhin wurde die Diskretisierungsmethode in sehr genereller Form behandelt. Wie gesagt hängen die Art der verwendeten Gleichungen und die Annäherung des Funktionsverlaufs in den Elementen von der verwendeten Methode ab. Ohne dies im Augenblick näher zu erläutern, kann gesagt werden, dass bei der Methode der finiten Differenzen von der Differenzialform der PDG, bei der finiten Volumen Methode von der Integralform und bei der finiten Elementmethode von der schwachen Integralform ausgegangen wird. Was dies genau bedeutet, soll im folgenden Kapitel anhand eines konkreten Beispiels dargestellt werden.

3.4.2 Methode der finiten Differenzen

Die Methode der finiten Differenzen (FD) geht von der Differenzialform der Gleichung aus. Bei den FD gehen die erste und zweite Ableitung der unbekannten Strömungsgrößen aus einer Taylor-Reihenentwicklung um einen betrachteten Punkt P hervor. Je nach Genauigkeitsansprüchen werden deren Glieder höherer Ableitungen vernachlässigt. Falls die Terme bis zu den quadratischen berücksichtigt werden, so spricht man von einer Genauigkeit zweiter Ordnung. Erste bzw. höhere Ableitungen lassen sich so als Differenzenquotienten benachbarter Knotenwerte darstellen. Die partielle Differenzialgleichung wird folglich durch eine Reihe von Differenzenquotienten approximiert.

3.4.3 Methode der finiten Volumen

Für die Methode der finiten Volumen transformiert man die partielle differenzielle Ausgangsgleichung in eine etwas andere Form, indem man sie über das betrachtete Gebiet integriert. In jeder Zelle werden die Flüsse, die Quellen/Senken bzw. die zeitlichen Änderungen der betrachteten

Größe bilanziert, was auf ein ähnliches Gleichungssystem mit Differenzenquotienten führt wie bei den FD.

Ein gewichtiger Vorteil der finiten-Volumen-Methode ergibt sich aus der Verwendung der Integralform, nämlich die unbedingte Erhaltung von Masse, Impuls und Energie, was bei FD nicht der Fall ist.

Die Bilanzierung der Flüsse für jedes Volumen ist im Prinzip unabhängig von der Form des Elements, d. h., dass die finite-Volumen-Methode geometrisch sehr viel flexibler ist, als die Methode der FD.

3.4.4 Methode der finiten Elemente

Die Finite-Elemente-Methode verwendet weder die Differenzialform noch die Integralform der Gleichung, sondern die sogenannte schwache Integralform. Dies geschieht dadurch, dass auf die Ausgangsgleichung die Methode der gewichteten Residuen angewendet wird. Bei jeder Diskretisierung tritt ein Fehler auf, d. h., dass die Lösung des diskreten Systems von der effektiven Lösung der Ausgangsgleichung verschieden ist. Die Methode der gewichteten Residuen verlangt nun, dass der Fehler der mit einer Gewichtsfunktion versehenen Ausgangsgleichung verschwindet, sofern über das Gebiet integriert wird. Die bei FV verwendete Bilanzgleichung wird nicht mehr streng in jedem einzelnen Element erfüllt, sondern nur mehr über das Gesamtgebiet. Das heißt, dass die Bilanz in einzelnen Elementen geringfügig verletzt werden kann. Während bei den FV die unbekannten Strömungsgrößen durch einen konstanten Wert pro Zelle dargestellt werden, so wird bei den FE eine Änderung derselben im Element durch einen linearen oder höherwertigen polynomialen Ansatz berücksichtigt. Es entsteht schlussendlich ein Gleichungssystem analog zu den FV oder FD, das aufzulösen ist. Lineare finite Elemente, welche die einfachste Form von Elementen darstellen, weisen eine höhere Genauigkeit auf, als entsprechende finite Volumenelemente. Der geringere Rechenaufwand von FV gegenüber FE bei einem identischen Netz führt zu einem Genauigkeitsverlust, der bei einem Vergleich der Rechengeschwindigkeiten berücksichtigt werden muss.

3.5 Zeitdiskretisierung

Zeit- und Raumdiskretisierungen werden normalerweise streng voneinander getrennt. Eine Ausnahme bilden Raum-/Zeitelemente bei der FE-Methode. Solche Elemente werden mit Erfolg bei Problemen angewandt, wo sich die Berandung des Rechengebiets mit der Zeit verändert (freie Wasseroberfläche, bewegliche Berandungen etc.).

Hier soll nicht auf die verschiedenen Arten der Zeitdiskretisierungen eingegangen, sondern nur die grundsätzlichen Möglichkeiten erläutert werden. Man unterscheidet bei der Zeitdiskretisierung zwischen expliziten und impliziten Verfahren. Als explizit bezeichnet man eine Zeitintegration, bei welcher die Werte der Variablen zum neuen Zeitpunkt nur von den Werten zum alten Zeitpunkt abhängen. Dies heißt, dass der Wert jeder Knotenvariablen zum neuen Zeitpunkt nur von den bekannten Werten zum Ausgangszeitpunkt und den Randbedingungen abhängt. Damit erübrigen sich Gleichungslöser, das Verfahren ist gut überschaubar und schnell programmierbar.

Demgegenüber hängen bei voll impliziten Verfahren die Werte zum neuen Zeitpunkt nur von den Werten der Nachbarknoten zum neuen Zeitpunkt ab, d. h., dass ein komplexes System von Gleichungen aufgestellt und gelöst werden muss. Dies ist auch der Fall bei sogenannten semi-impliziten Verfahren, wo die Variablen auf dem neuen Zeitniveau sowohl vom alten wie vom neuen Zeitpunkt abhängen. Durch semi-implizite Verfahren kann die Genauigkeit der Zeitintegration verbessert werden. Der große Vorteil von expliziten Verfahren, der Verzicht auf einen Gleichungslöser, entfällt dagegen ebenfalls. Explizite Verfahren haben den Nachteil, dass ein Stabilitätskriterium einzuhalten ist. Eine Störung darf sich innerhalb eines Zeitschritts nicht über ein Element hinaus ausbreiten. Da die Geschwindigkeit der Störung und die Elementgröße üblicherweise gegeben sind, kann nur der Zeitschritt variiert werden. Dies bedeutet, dass das kleinste Element die Zeitschrittlänge bestimmt, was unter Umständen sehr einschneidend für den Fortschritt der Lösung sein kann. Semi-implizite und implizite Verfahren kennen kein Stabilitätskriterium, was wiederum nicht heißen soll, dass beliebige Zeitschritte gewählt werden sollten. Falls zu große Zeitschritte gewählt werden, kann die Lösung zwar stabil, aber unphysikalisch gedämpft sein.

3.6 Eignung numerischer Verfahren

3.6.1 Wahl der Diskretisierungsmethode

Grundsätzlich eignen sich finite Differenzen, finite Volumen und finite Elemente zur Berechnung von Strömungen, sofern sie richtig und problemgerecht implementiert wurden. Falls die Strömungsgeschwindigkeiten groß sind bzw. ein Fließwechsel nicht ausgeschlossen werden kann, sind sogenannte stabilisierte Verfahren (z. B. Upwind-Verfahren) zu verwenden. Zentrale Verfahren können für solche Anwendungen nicht herangezogen werden. Stabilisierte Verfahren führen im Prinzip eine numerische Diffusion ins Rechenschema ein, mit welcher die Lösung stabilisiert wird. Je physikalischer der Informationsfluss berücksichtigt wird, desto lokaler ist der Einfluss der Stabilisierung und die „Verschmierung“ der Lösung. In gewissem Sinne widersprechen sich deshalb Stabilität und Genauigkeit der Lösung.

Upwind-Verfahren erster Ordnung sind bedingungslos stabil. Falls die Genauigkeit der Ortsdiskretisierung erhöht wird, so ist dies nicht mehr der Fall, wenn nicht Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Aus diesem Grund kann es im Sinne einer stabilen Rechnung vorteilhaft sein, zuerst mit einem Verfahren erster Ordnung zu starten, und bei konvergierender Lösung die Genauigkeit des Verfahrens zu erhöhen.

Sehr oft werden die jeweiligen Diskretisierungsmethoden mit strukturierten oder unstrukturierten Netzen in Verbindung gebracht. Dies muss nicht der Fall sein, aber finite Differenzen machen in einem unstrukturierten Netz wenig Sinn, genauso wie finite Elemente den vollen Vorteil nur im Fall unstrukturierter Netze entfalten können. Deshalb kann die Frage der Diskretisierungsmethode oft nur im Zusammenhang mit der erforderlichen geometrischen Flexibilität des Rechennetzes geklärt werden.

4 Modellauswahl

4.1 Numerische Modelle im Überblick

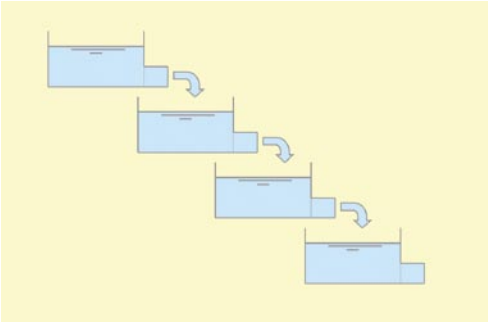
4.1.1 Vorbemerkung

Damit ein Modell für die Konsolidierung von Daten hilfreich sein kann, muss es die relevanten Vorgänge in Hinblick auf die Aufgabenstellung ausreichend abbilden. Bei Hochwässern müssen Ausuferungen und Retentionsvorgänge berücksichtigt und mit den Einflüssen von Managementmaßnahmen (z. B. Steuerung von Kraftwerksanlagen oder gesteuerte Nutzung von Retentionsräumen) überlagert werden.

Die für die Abflussmodellierung verfügbaren Modelle lassen sich in vier Gruppen einteilen:

- Konzeptive Modelle
- Numerische 1-D-Modelle
- Numerische 2-D-Modelle
- Numerische 3-D-Modelle.

4.1.2 Konzeptive Modelle

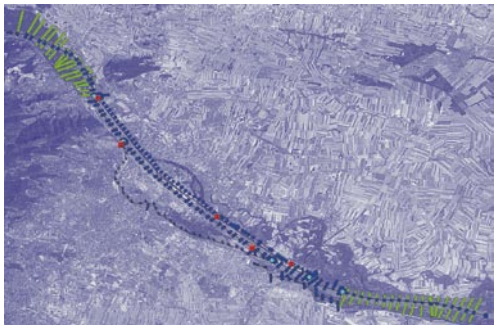


Konzeptive Modelle beschreiben die in der Natur auftretenden Prozesse meist sehr vereinfacht. Flüsse werden z. B. als eine Kaskade von Teilabschnitten mit bestimmten Eigenschaften (Speichervolumen; Laufzeit; Koeffizienten für Versickerung, Abflussbildung u. Ä.; etc.) abgebildet *(Abb. 5)*. Konzeptive Modelle rechnen in der Regel sehr schnell und stabil.

Abb. 5: Konzeptive Modelle

Der Nachteil konzeptiver Modelle liegt darin, dass die Koeffizienten und Modellparameter häufig durch Kalibrierung des Modells mit gemessenen Daten festgelegt werden müssen. Insbesondere zur Ermittlung von Parametern zur Beschreibung der Laufzeit liegen kaum empirische Ansätze vor, die eine Festlegung ohne Kalibrierung erlauben. Damit ist es in der Regel auch schwierig, die Auswirkungen von Änderungen im System (z. B. eine Veränderung von Querprofilen) ohne weiteres im Modell umzusetzen.

4.1.3 Numerische 1-D-Modelle

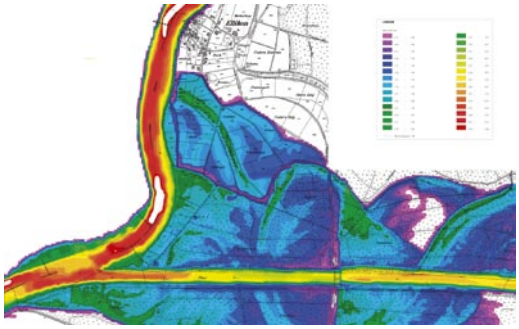


Numerische 1-D-Modelle bilden Gewässer als „Linien in der Landschaft“ ab, wobei in der Regel verzweigte Strukturen („Netze“) möglich sind. Der Vorteil der 1-D-Modelle liegt darin, dass sie bei hoher Performance die physikalischen Vorgänge besser und direkter abbilden als konzeptive Modelle.

Abb. 6: 1-D-Modelle (Beispiel: FLUX/FLORIS)

Numerische 1-D-Modelle können überall dort mit Erfolg angewendet werden, wo die Fließwege im Vorhinein bekannt sind, bzw. wo die Abweichungen von den angenommenen Fließwegen vernachlässigbar sind.

4.1.4 2-D-Modelle

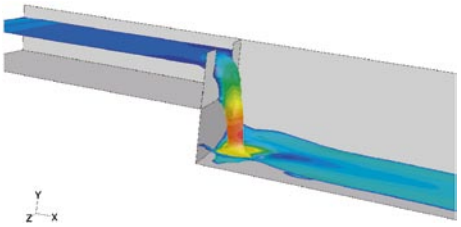


2-D-Modelle werden in den letzten Jahren verstärkt für die Ermittlung von Überflutungsflächen und für die Analyse von Vorlandüberflutungen verwendet. Der zentrale Vorteil ist, dass die Fließwege vom Modell ohne Zutun des Anwenders erkannt, respektive berechnet werden.

Abb. 7: 2-D-Modelle

2-D-Modelle sind zu bevorzugen, wenn die Fließwege stark verzweigt und unbekannt sind und wenn das für die gesuchten Aussagen von Bedeutung ist. Nachteile der 2-D-Modelle sind die wesentlich größere Rechenzeit (im Vergleich: 1-D : 2-D ca. 1 : 100 bis 1 : 500) sowie der meist wesentlich größere Aufwand für Modellerstellung und Modellpflege.

4.1.5 3-D-Modelle



3-D-Modelle werden zur Zeit wegen der großen Anforderungen bezüglich Modellerstellung und Rechenleistung im Wesentlichen nur für Detailuntersuchungen verwendet. Als Stand der Forschung können sie bei der Analyse von Vorgängen an Bauwerken (Brücken, Wehre, Turbinen etc.), von Sekundärströmungen in Flusskrümmungen und in Sonderfällen für die Modellierung von Dammbrüchen u. Ä. angesehen werden.

Abb. 8: 3-D-Modelle (Beispiel: FLOW-3D)

4.1.6 Kombinierte Modelle und Modellketten

Ansätze, die Modelle unterschiedlicher Dimension (1-D, 2-D, 3-D) verbinden, sind bisher relativ selten. Sie werden in Zukunft aber verstärkt von Bedeutung sein, weil sie die Vorteile aller Ansätze verbinden können.

Häufiger anzutreffen sind Modellketten, wo Modelle, die unterschiedliche Teilprozesse modellieren (Meteorologie – Niederschlagsbildung – Abflussbildung – Abfluss im Gerinne), verbunden werden. Modellketten haben vor allem dort große Vorteile, wo es darum geht, Teilprozesse mit hohem Detaillierungsgrad und/oder mit standardmäßigen Programmen abzubilden.

4.2 Modellannahmen und Konsequenzen

Nachfolgend werden die im Regelfall erforderlichen Datengrundlagen sowie die üblichen Modellannahmen konzeptiver und hydrodynamisch-numerischer Berechnungsmodelle und deren Konsequenzen für den Einsatz und die Aussagekraft der Berechnungsergebnisse erörtert.

4.2.1 Konzeptive Modelle

Dieser Modelltyp, der zur Hochwassermodellierung bzw. für Prognosezwecke eingesetzt wird, ist nicht der hydrodynamisch-numerischen Modellfamilie zuzuordnen. Die in der Natur auftretenden Prozesse werden darin sehr vereinfacht beschrieben:

- Flussstrecken als Kaskade von Teilabschnitten
- z. B. Speichervolumen und Laufzeit als bestimmende Parameter.

Zur reinen Abschätzung des Wellenablaufs ist lediglich die kontinuierliche Abflussganglinie über einen längeren Zeitraum oder für mehrere Ereignisse zwingend erforderlich. Es werden also keine Profildaten des Fließgewässers benötigt, allerdings können als direkte Konsequenz daraus auch nur Aussagen über den zu erwartenden Durchfluss Q an einem Ort zu verschiedenen Zeitpunkten getroffen werden. Aussagen über Wasserstände sind bei alleinigem Ansatz konzeptiver Modelle nicht möglich.

4.2.2 1-D-Modelle

Dieser Modelltyp basiert auf den St. Venant'schen Gleichungen, denen die St. Venant'schen Hypothesen zugrunde liegen:

- Fluss wird als Stromröhre aufgefasst, Strömungsgeschwindigkeit ist über den Querschnitt konstant, Wasserspiegel horizontal
- Krümmung der Stromlinien ist klein, vertikale Beschleunigungen sind vernachlässigbar, Druck stellt sich hydrostatisch ein

- Einfluss von Wandreibung und Turbulenz sind durch Widerstandsgesetze quantifizierbar
- Durchschnittliches Gefälle im Gerinne ist sehr klein, sodass gilt: $\cos \varphi \approx 1$.

Direkte Konsequenzen daraus sind:

- Variation der Profilgeometrien ist erlaubt, jedoch durch die geringe Krümmung der Stromlinien limitiert
- Konstante Dichte des Mediums wird vorausgesetzt
- Instationäre Fließvorgänge müssen sich in jedem Querschnitt durch zwei abhängige Variablen ausdrücken lassen: Wasserspiegel h, Durchfluss Q.

Lokale Verletzungen der St. Venant'schen Hypothesen (Diskontinuitäten) lassen sich oft über „innere Randbedingungen" beheben:

- Gerinnevereinigungen
- Plötzliche Querschnittsänderungen
- Plötzliche Rauheitsänderungen
- Wehrüberfallströmungen.

Erforderliche Datengrundlagen:

- Querprofile des Flusslaufs und der Vorländer in möglichst dichtem Abstand zueinander (z. B. durch Linienlotung im Fließgewässer und terrestrische Vermessung im Vorland)
- Abmessungen sowie hydraulische Parameter von Flussbauwerken
- Rauheiten (z. B. Strickler-Beiwert) bzw. Parameter zur Charakterisierung des Fließwiderstands der Gewässersohle sowie der Vorländer
- Durchflussganglinie am oberen Modellrand sowie Wasserstandsganglinie am unteren Modellrand (mit Blickrichtung gemäß Fließrichtung).

Nicht abbildbare Fließphänomene:

- Horizontale und vertikale Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt und alle damit in Zusammenhang stehenden Phänomene, wie etwa die Sekundärströmung in Krümmungen
- Neigung bzw. nicht horizontale Ausbildung der Gewässeroberfläche

- Strömungen mit Rezirkulationsbereichen oder gegen bzw. quer zur Fließrichtung des Hauptgewässers gerichtete Ausuferungsvorgänge
- Zeitlich und räumlich abrupte Änderungen der Strömungssituation
- Stehende Wellen.

Spezielle Modelle nutzen Informationen bzw. beinhalten Ansätze, um prinzipiell nicht abbildbare Fließphänomene zumindest abschätzen zu können (1-D-Modelle mit Ansätzen zur Berücksichtigung von Querströmungen für Austausch Fluss–Vorland bzw. 2-D-Modelle mit Ansätzen zur Berücksichtigung der Sekundärströmung in Krümmungen auf Basis der Grundriss- und Querprofilgeometrie).

4.2.3 2-D-Modelle

Diesem Modelltyp liegen die sogenannten Flachwassergleichungen zugrunde, d. h. tiefengemittelte Reynoldsgleichungen (Navier-Stokes-Gleichungen mit Turbulenzansatz), die auf den folgenden Annahmen basieren:

- Vertikale Skalen (etwa Fließtiefe) sind viel kleiner als horizontale Skalen (z. B. Ausdehnung des betrachteten Diskretisierungsgebiets)
- Mittelung der Strömungsgeschwindigkeiten über die Fließtiefe ist zulässig
- Druck stellt sich hydrostatisch ein.

Erforderliche Datengrundlagen:

- Digitales Geländemodell in hoher Genauigkeit inklusive Abbildung der Gewässersohle (mit geeigneter Software lassen sich im Bedarfsfall Querprofildaten mit DGM-Punktdaten zusammenführen)
- Strukturkanten als Polygonzüge (z. B. Dammkronen, Verkehrswege)
- Abmessungen und hydraulische Parameter von Flussbauwerken
- Detaillierte Kenntnis über Bewuchs und räumliche Rauheitsverteilungen (z. B. Strickler-Beiwert) im Strömungsquerschnitt (Sohle und Böschung) sowie in den Vorländern
- Örtliche Lage der Zuflussränder sowie die dort vorliegende Zuflussganglinie
- Örtliche Lage des Abflussrands und dortige Wasserstandsganglinie oder Energieliniengefälle
- Bei Anwendung eines Turbulenzmodells höherer Ordnung sind außerdem Messwerte (oder allenfalls begründete Annahmen) für die turbulente kinetische Energie k an den Modellrändern zum Ansatz zu bringen.

Nicht abbildbare Fließphänomene:

- Vertikale Geschwindigkeitsverteilung und alle damit in Zusammenhang stehenden Phänomene, etwa Sekundärströmungen
- Neigung der Wasseroberfläche aufgrund der durch Zentrifugelkräfte in Krümmungen des Gerinneverlaufs hervorgerufenen Sekundärströmung (die von 2-D-Modellen teilweise ausgewiesene Querneigung in Krümmungen steht in keinem ursächlichen Zusammenhang mit der Sekundärströmung und ist daher im Vergleich zur Realität zu gering)
- Stehende Wellen
- Vertikale Turbulenzwirbelstrukturen (horizontale werden – je nach Turbulenzmodell – erfasst, siehe dazu *Kapitel 4.2.6).*

4.2.4 3-D-Modelle mit hydrostatischer Druckannahme

Für diesen Modelltyp werden die 3-D-Reynoldsgleichungen zum Ansatz gebracht, jedoch wird das Gleichungssystem durch folgende Annahmen vereinfacht:

- Der vertikale Impulsaustausch ist vernachlässigbar
- Die hydrostatische Druckannahme $\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$ gilt.

Erforderliche Datengrundlagen:

- Identisch zu den 2-D-Modellen.

Nicht abbildbare Fließphänomene:

- Druckabnahme bzw. -zunahme bei konvexen bzw. konkaven Stromfäden und deren Interaktion mit den lokalen Strömungsgeschwindigkeiten über die Druckkorrekturgleichung (zu beobachten bei Strömungen über stark unregelmäßige Bettformen)
- Turbulenzwirbelstrukturen je nach Turbulenzmodell.

4.2.5 3-D-Modelle

Diesem Modelltyp liegen die vollständig dreidimensional formulierten Reynoldsgleichungen zugrunde, Vereinfachungen werden lediglich bei der Diskretisierung und Implementierung der Gleichungen zum Ansatz gebracht und sind daher vom jeweiligen Hersteller abhängig. Somit sind prinzipiell alle Fließphänomene abbildbar, Einschränkungen jedoch durch das jeweilige Turbulenzmodell gegeben.

Erforderliche Datengrundlagen:

- Wie bei den 2-D-Modellen erläutert, jedoch ist für eine gute Aussagekraft der Modellrechnungen insbesondere eine hohe Qualität des digitalen Geländemodells und der Flusssohlenaufnahme erforderlich (z. B. Laserscan in Verbindung mit Fächerecholotung).

4.2.6 Turbulenzmodelle (Bestandteile von 2-D- und 3-D-Modellen)

0- und 1-Gleichungsmodelle (etwa Ansatz von Smagorinsky oder Prandtl'scher Mischwegansatz)

- Konstante oder linearisierte Wirbelviskosität ν_T

- Dadurch kann kein Transport der turbulenten Strukturen mit der Strömung erfolgen und alle damit in Zusammenhang stehenden Phänomene werden vom Modell nicht abgebildet.

2-Gleichungsmodelle (etwa k-ε- oder k-ω-Modelle)

- Erhaltungsgleichungen für turbulente kinetische Energie k und Dissipation ε, dadurch Transport von Wirbelstrukturen möglich

- Isotrope Annahme der Wirbelviskosität ν_T, dadurch können beispielsweise turbulenzgetriebene Sekundärströmungen nicht abgebildet werden!

Reynolds-Stress (RSM)-Modelle

- Durch Ansatz einer anisotropen Größe für die Wirbelviskosität ($\vec{\nu}_T$ statt ν_T) werden prinzipiell alle durch die gewählte Diskretisierungsauflösung des Berechnungsgebiets darstellbaren Turbulenzphänomene abgebildet.

4.2.7 Direkte Numerische Simulation und Large Eddy-Simulation

Diese beiden Modelltypen werden aufgrund des mit ihrer Anwendung verbundenen hohen Rechenaufwands fast ausschließlich im akademischen Umfeld für Detailuntersuchungen verwendet. Selbst die Interpretation der Rechenergebnisse erfordert dabei großes Expertenwissen. Trotz ihrer größeren Ergebnisgenauigkeit sind diese Modelltypen für die ingenieurmäßige Praxis daher von untergeordneter Bedeutung.

Direkte Numerische Simulation (DNS)

- Bei der DNS werden sämtliche in der Strömung vorhandenen Bewegungen – insbesondere alle Turbulenzbewegungen – ohne Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen direkt am Rechennetz simuliert. Aus diesem Grund muss das Rechennetz fein genug sein, um selbst die kleinstskaligen Turbulenzbewegungen unmittelbar auflösen zu können, was unabhängig von der Aufgabenstellung im Regelfall Knotenabstände im Millimeterbereich erforderlich macht.

Large Eddy-Simulation (LES)

- Bei der LES werden die größeren Skalen der Turbulenzbewegung explizit am Rechennetz simuliert, während die kleineren Skalen abgeschätzt oder (im Regelfall) durch einfache Modellansätze erfasst werden. Dadurch muss das Rechengebiet nicht so fein diskretisiert werden wie bei der DNS, allerdings immer noch deutlich feiner als bei der Verwendung der in *Kapitel 4.2.6* beschriebenen Turbulenzmodelle.

4.3 Entscheidungskriterien und Entscheidungsfindung

Welches Modell bzw. Programmpaket für ein konkretes Projekt oder eine Aufgabe angewendet wird, kann naturgemäß nach unterschiedlichsten Kriterien entschieden werden. Es ist aber auch klar, dass zentrale Kriterien wie die Kosten eines Modells, die Frage, ob ein Programmpaket schon verfügbar (d. h. im Einsatz) ist, und ob es jemanden gibt, der in das Programm schon eingearbeitet ist, wesentliche Aspekte darstellen.

Die nachfolgende Darstellung von Entscheidungskriterien ist daher auch als Checkliste zu sehen, wenn es darum geht, ein Programm anzuschaffen.

4.3.1 Aufgabenstellung – Fragestellung

Ausgangspunkt sollten das Problem (Anwendungsfall) und die damit verbundenen Fragestellungen sein. Danach sollte die Auswahl eines geeigneten Modells (für die Praxis) stattfinden.

Wichtig ist, dass Fragen mit unterschiedlichen Modellen, d. h. auch mit unterschiedlich komplexen Modellansätzen untersucht werden können, und dass die Qualität des Modellierers eine wichtige Komponente neben der Qualität des Modells darstellt.

4.3.2 Stationäre – instationäre Betrachtungen

Die meisten Betrachtungen im Bereich des Flussbaus sowie der Ausweisung von Überflutungsflächen und Gefahrenzonen sind stationäre.

Insbesondere für Fragen der Bewirtschaftung von Gewässern (auch Stauräume und Hochwasserschutz), zur Untersuchung von Retentionsvorgängen, zur Hochwasserprognose und für diverse Sonderanwendungen (z. B. Trainingssimulatoren, Online-Modelle etc.) haben instationäre Modelle aber eine besondere Bedeutung.

4.3.3 Größe des Untersuchungsgebiets

Die Größe des Untersuchungsgebiets hat über die Rechenzeit, den Datenumfang und die Anforderungen einen Einfluss auf die Modellauswahl.

Es ist ein Unterschied, ob Modelle ein Gewässer mit einer Länge von mehreren hundert Kilometern abbilden (z. B. Modelle für Donau, Lech, Inn, Drau u. Ä.), oder ob Abschnitte von wenigen

bis wenigen -zig Kilometern zu untersuchen sind. Für Erstere sind 1-D-Modelle Stand der Technik, für Letztere werden häufig 2-D-Modelle erstellt.

Neben der Datenmenge und der möglichen Performance sind für große Modelle aber auch die Features des User-Interfaces ein wichtiger Aspekt: Für große Modelle ist es von besonderer Bedeutung, dass sowohl der Überblick gegeben wird als auch Details gut visualisiert werden.

4.3.4 Verfügbare Datengrundlage

In der Regel macht es wenig Sinn, detaillierte Modelle anzuwenden, wenn die erforderlichen Daten nicht verfügbar sind (z. B. digitale Geländemodelle für 2-D-Berechnungen).

Umgekehrt kann beim Vorliegen detaillierter Daten (z. B. Laserscan-Daten) der Einsatz von komplexeren Modellen (z. B. 2-D) einfacher und effizienter sein als die Verwendung von einfacheren Modellen (z. B. 1-D-Modell).

Auch die Verfügbarkeit von Daten für die Kalibrierung und Validierung kann ein Entscheidungskriterium darstellen, wobei nicht zwangsweise der Zusammenhang „mehr Daten, daher komplexeres Modell“ gilt.

4.3.5 Verfügbare Zusatzinformationen

Für eine effiziente Verwendung von Modellen ist von Bedeutung, dass verfügbare Informationen leicht in ein Modell eingebracht werden können (z. B. Bauwerke, geregelte Strukturen, Landnutzung etc.) und dass umgekehrt die vom Modell benötigten Daten auch vorliegen.

4.3.6 Besondere Rahmenbedingungen

Besondere Fragestellungen führen zwangsweise zu einer Reduktion der in Betracht zu ziehenden Modelle. Einige besondere Anforderungen bzw. Rahmenbedingungen können sein:

- Geforderte/mögliche Genauigkeit
  Wenn z. B. Aussagen über die räumliche Verteilung von Spiegellagen gefordert sind, scheiden 1-D-Modelle praktisch aus
- Geschiebetransport
- Steile Gerinne
- Abfluss auf Schwemmkegeln
- Instationäre Fragen
- Bewirtschaftung von Kraftwerken und Stauräumen nach Betriebsvorschriften.

4.3.7 Anforderungen an den Bearbeiter

Es darf nicht unterschätzt werden, dass für jedes Modell oder Programmpaket in Abhängigkeit von seiner Komplexität und Leistungsfähigkeit eine mehr oder weniger lange Einarbeitungszeit nötig ist. Die Anforderungen an den Bearbeiter betreffen die Numerik, die EDV-Technik allgemein, sowie Erfahrungen im Modellieren.

Verschiedene internationale Studien haben gezeigt, dass selbst lang etablierte Modelle wie HEC oder Mike 11 unter bestimmten Verhältnissen völlig falsche Ergebnisse liefern können. Entsprechend stellen die Erfahrung und das Know-how des Bearbeiters ein wesentliches Kriterium für die Auswahl eines Modells dar.

4.3.8 Verfügbarkeit und Wiederverwendbarkeit

Standard-Produkte versus „Wissenschaftlicher Code“:

Für die ingenieurmäßige Verwendung stellt die allgemeine Verfügbarkeit eines Modells als ausgereiftes, gut dokumentiertes Programmpaket eine wesentliche Anforderung dar. Neben der inhaltlichen Richtigkeit von Berechnungen – die i. d. R. vorausgesetzt werden kann – sind User-Interface sowie die Möglichkeiten für die Ausgabe von Ergebnissen besonders wichtig (Plots, Tabellen, Austausch mit CAD, GIS und Textverarbeitung bzw. Tabellenkalkulation).

Für universitäre Anwendungen oder Anwendungen von (Noch-)Nicht-Standard-Ansätzen ist die Verfügbarkeit und Offenlegung des Source-Codes wichtig. Insbesondere für wissenschaftliche Anwendungen kommen daher verstärkt sogenannte Open-Source-Anwendungen zum Tragen.

Support:

In diesem Zusammenhang sind auch die Möglichkeiten für Support und Unterstützung zu bewerten: Die zulässigen/gewünschten Kommunikationswege, die „zulässige Geduld“ von Anwendern und die Anforderungen in Hinblick auf offiziellen Support sind bei ingenieurmäßigen und wissenschaftlichen Anwendungen sicher unterschiedlich.

4.3.9 Rechenzeiten

Trotz der ständig steigenden Leistungsfähigkeit von Computern stellen die Rechenzeiten nach wie vor ein relevantes Kriterium für die Auswahl von Modellansätzen dar. Insbesondere wenn es darum geht, Abschätzungen durchzuführen oder viele Varianten zu berechnen, ist das Verhältnis in der Rechenzeit nicht zu vernachlässigen (z. B. konzeptive Modelle: 3 Sekunden, 1-D-Modell → 3 Minuten, 2-D-Modell → 3 Stunden bis 3 Tage).

4.3.10 Hardware-Anforderungen

Diese sind in Zusammenhang mit der Rechenzeit zu sehen.

In der Regel ist die real nutzbare Bandbreite in der Leistungsfähigkeit von Rechnern relativ gering, weil die Kosten für eine deutlich über dem Standard liegende Hardware überproportional steigen.

Die für die ingenieurmäßige Anwendung gedachten Programmpakete laufen daher i. d. R. auf jedem handelsüblichen PC.

4.3.11 Visualisierung: Geplantes „Ergebnis“ (Studie, Plan etc.), Zielgruppe

Insbesondere für die ingenieurmäßige Verwendung bestehen i. d. R. klare Erwartungen an die Ausgabe von Ergebnissen (grafische und tabellarische Darstellungen). Es wird daher vorausgesetzt, dass ein Software-Paket die dem Stand der Technik entsprechenden Ausgaben beherrscht.

Bei wissenschaftlichen Aufgaben werden Pre-Processing, Berechnung und Post-Processing häufig getrennt gesehen und mit getrennten Programmsystemen realisiert. Entsprechend liegt hier der Schwerpunkt eher auf weiterverarbeitbaren Dateien, wobei überall dort, wo Standards etabliert sind (z. B. GIS), naturgemäß ein Export von Daten im entsprechenden Format hilfreich und Zeit sparend sein kann.

4.4 Zusammenschau

In Hinblick auf die Antworten und Erkenntnisse, welche die in *Kapitel 4.2.1 bis 4.2.6* dargestellten Modelltypen zu hochwasserrelevanten Themen beitragen können, hat jeder Modelltyp seine spezifischen Stärken, Schwächen und Anwendungsbereiche. Entsprechend ist jeder der Typen hilfreich und grundsätzlich nach wie vor Stand der Technik. Als klare Tendenz ist zu erkennen, dass dort, wo sich die Anwendungsbereiche von Modellen überlagern, die komplexeren Modelle die weniger komplexen ablösen.

Konzeptive Modelle zeichnen sich durch eine extrem hohe Performance aus. Sie werden erfolgreich und effizient in Flussgebietsmodellen für langfristige Analysen und für die operative Hochwasserprognose eingesetzt.

Die numerischen 1-D-Modelle haben als wesentliche Vorteile auch die Performance und ihre langjährige Verwurzelung in der Fachwelt. Sie sind für Spiegellagenberechnungen nach wie vor das primäre Werkzeug für Ingenieurhydraulik, auch wenn in den letzten Jahren ein klarer Trend zu 2-D-Modellen gegeben ist. Bei operativen Hochwasserprognosen beginnen sie – insbesondere bei den Systemen für große Flüsse – konzeptive Modelle abzulösen.

2-D-Modelle haben als wesentlichen Vorteil, dass sie die Fließwege – im Gegensatz zu konzeptiven Modellen und 1-D-Modellen – automatisch aufgrund der Geländestruktur berechnen („erkennen“). Entsprechend haben sie sich in den letzten Jahren bei der Ermittlung von Überflutungsflächen und der Modellierung von Vorlandabflüssen etabliert. 2-D-Modelle sind wertvolle Werkzeuge für Studien und Analysen. Für Online-Modelle und/oder als entscheidungsunterstützende Systeme, mit welchen im Hochwasserfall Berechnungen spontan durchgeführt werden können, sind sie wegen der langen Rechenzeiten (noch) nicht einsetzbar.

3-D-Modelle werden derzeit fast ausschließlich für die Untersuchung von Detailfragen verwendet. Ist lediglich die Ermittlung von Überflutungsflächen Gegenstand der Untersuchungen, so bieten 3-D-Modelle im Vergleich zu 2-D-Modellen keine relevanten Vorteile. Sind jedoch im Untersuchungsgebiet Bereiche vorhanden, in denen dreidimensionale Prozesse mit vertikalen Geschwindigkeitskomponenten signifikante Bedeutung erlangen, so sind ausschließlich 3-D-Modelle in der Lage, dem Ingenieur ein realistisches Abbild der Strömungssituation zu vermitteln.

Bei der Auswahl und der Beurteilung von Modellen ist zu bedenken, dass die Güte der Ergebnisse nicht – bzw. insbesondere nicht nur – von den Vereinfachungen und Abstraktionen abhängt, die bei der Modellierung getroffen werden. In diesem Zusammenhang sei daran erinnert, dass der bei weitem überwiegende Teil der Modelle und Berechnungen eine feste Morphologie (Geometrie) annimmt.

Einfachere Modelle müssen nicht zu schlechteren Ergebnissen führen, komplexere Modelle müssen nicht immer aufwendiger sein. Die wesentliche Anforderung liegt darin, für jede Aufgabenstellung die angemessene Methodik zu wählen. Dabei sind neben der Technologie Fragen der Rechenzeit, der Effizienz, der Datennachführung und nicht zuletzt der verfügbaren Ressourcen von zentraler Bedeutung. Insgesamt ist wichtig, den Begriff der „Mehrdimensionalität“ nicht nur in Hinblick auf räumliche, sondern vielmehr auch auf inhaltliche Dimensionen zu sehen.

5 Daten

5.1 Hydrologische Grundlagen

5.1.1 Allgemeines

Naturgemäß ist die Genauigkeit des hydrologischen Inputs für die Fließgewässermodellierung von ausschlaggebender Bedeutung. Die Sicherheit der hydrologischen Bemessungsgrößen (Ganglinien oder Absolutwerte bestimmter Überschreitungswahrscheinlichkeit bzw. Jährlichkeit) ist in den letzten Jahrzehnten unverändert niedrig geblieben. Dies betrifft sowohl die Niederschlags- als auch die Abflussauswertungen. Umso mehr ist jedoch auf eine dem Stand der Wissenschaft und Technik entsprechende Flussgebietsanalyse Bedacht zu nehmen. Abflussmodellierungen sollten generell mit Niederschlag-Abfluss-Modellen kombiniert werden, ausgenommen bei Vorhandensein lokaler, langzeitig beobachteter Abflussmessstellen mit konsistenten und homogenen Messreihen. Diese Messreihen müssen den gesamten Bearbeitungsbereich abdecken.

Für eine Abflussmodellierung sind folgende Eingabegrößen erforderlich:

- Zufluss am flussauf gelegenen Bearbeitungsbeginn
- punktuelle Zubringerzuflüsse
- laterale diffuse Zuflüsse.

Die Zuflüsse können als stationäre Größe oder als Ganglinie vorliegen. Bei instationären Berechnungen ist auch die Kombination von Zuflussganglinien mit stationären Zuflüssen aus kleineren Zwischeneinzugsgebieten möglich.

5.1.2 Stationäre Abflussberechnung

Eine stationäre Berechnung liefert dann realistische Ergebnisse, wenn die Auswirkung der Fließretention im Gerinne bzw. im Talraum vernachlässigbar ist. Dies kann besonders bei engen, steilen Talräumen der Fall sein bzw. wenn nur ein kurzer Fließabschnitt betrachtet wird.

Die stationäre Berechnung stellt immer den „Worst Case“ dar. Die Überflutungsflächen sind immer größer oder gleich denen, die sich aus einer instationären Berechnung ergeben.

Liegt der hydrologische Längenschnitt für eine bestimmte Jährlichkeit entlang eines Gewässers fest, so wird am flussauf liegenden Bearbeitungsende der n-jährliche Zufluss zugegeben, bei den Zubringern jedoch nur jener Zufluss, der einschließlich Zubringer wiederum einen n-jährlichen Abfluss ergibt (T_n-Zubringer < T_n-Hauptgerinne). Soll im Bereich größerer Zubringer auch jenes Szenario untersucht werden, das sich bei einem n-jährlichen Zubringerzufluss ergibt, so sind mehrere Berechnungen erforderlich, deren Ergebnisse überlagert werden müssen (Einhüllende des Abflussraums). Dies betrifft sowohl 1-D- als auch 2-D-Berechnungen.

5.1.3 Instationäre Modellierung

Aus Pegelaufzeichnungen können n-jährliche Abflussganglinien nur dann direkt ermittelt und verwendet werden, wenn eine lokale instationäre Berechnung über eine kurze Laufstrecke durchzuführen ist. In allen anderen Fällen stellt die Anwendung eines Niederschlag-Abfluss-Modells den geeigneten Weg dar. Dabei werden für jede zu untersuchende Jährlichkeit verschiedene Regendauern untersucht. Aus dem Ganglinienspektrum ist die für eine bestimmte Gewässerstelle maßgebliche zu ermitteln.

Ist für einen längeren Gewässerabschnitt ein n-jährlicher Abflussraum zu ermitteln, so kann die Berechnung nicht in einem Schritt durchgehend erfolgen, sondern nur abschnittsweise. Für den Oberlauf eines Gewässers sind bei kleinem Einzugsgebiet kürzere Regendauern maßgeblich, die den maximalen Abfluss ergeben, während bei größer werdendem Einzugsgebiet längere Regendauern maßgeblich sind.

Die Berechnungen erfolgen daher immer für verschiedene Regendauern und die für das jeweils betrachtete Gesamtgebiet und die Dauern abgeminderter Punktniederschläge der Jährlichkeit T_n.

Diese Vorgangsweise ist insbesondere bei einer 2-D-Berechnung extrem aufwendig, da die zahlreichen erforderlichen Rechenläufe zur iterativen Ermittlung der jeweils maßgeblichen Regendauer sehr zeitaufwendig sind. Bei den im Vergleich dazu sehr kurzen Rechenzeiten für eine 1-D-Berechnung stellt sich dieses Problem nicht.

Fallweise ist zu prüfen, ob die maßgebliche Regendauer entlang des Bearbeitungsabschnitts mit einem (über das 2-D-Modell kalibrierten) hydrologischen Flood-Routing-Modell ermittelt werden kann. Ist dies möglich, so reduziert sich die Anzahl der erforderlichen 2-D-Berechnungen wesentlich auf die jeweils für einen Abschnitt maßgebliche Regendauer bzw. den für das betreffende Einzugsgebiet maßgeblichen Gebietsniederschlag.

5.1.4 Historische Ereignisse, Kalibrierung

Eine Kalibrierung bzw. Verifizierung des Modells ist von außerordentlicher Bedeutung. Bei einer 2-D-Berechnung beschränkt sich der Vorgang im Wesentlichen auf die Anpassung der Rauigkeitsbeiwerte und der Bauwerksparameter. Bei einer 1-D-Berechnung ist auch zu überprüfen, ob die verwendete Modellgeometrie die tatsächlichen hydraulischen Verhältnisse realistisch darstellt.

Bei Programmen, die eine automatische Kalibrierung ermöglichen, ist besondere Vorsicht geboten, da sich in Bereichen, wo der Rauigkeitsbeiwert eine untergeordnete Rolle spielt (z. B. in Rückstaubereichen), völlig unrealistische Werte ergeben können. Weiters ist zu beachten, ob das zur Kalibrierung herangezogene historische Ereignis wenigstens näherungsweise dem zu berechnenden Szenario entspricht, da sich Rauigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit vom Durchfluss bzw. vom Umfang der Ausuferungen wesentlich ändern können. Auch der beim betrachteten historischen Ereignis tatsächlich vorhandene Bewuchs ist zu beachten.

Nach Möglichkeit sollte die Kalibrierung bei einem geeigneten Hochwasserereignis erfolgen und die Parameterwahl bei weiteren Ereignissen verifiziert werden. Bei landwirtschaftlich genutzten

Flächen mit wechselnder Fruchtfolge kann entweder der ungünstigste oder ein mittlerer Rauigkeitsbeiwert gewählt werden, am ehesten jener, der in der Hochwassersaison am wahrscheinlichsten ist.

5.2 Daten zur Modellerstellung

5.2.1 Vermessungsgrundlagen

Es werden die folgenden Typen von Vermessungsdaten und ihre Bedeutung für die hydraulische Modellierung beschrieben. Dabei wird nicht auf die technischen Details der Vermessung selbst, sondern nur auf die Anwendung der Daten eingegangen.

- terrestrische Vermessung
- fotogrammetrische Vermessung
- Laserscan-Vermessung.

Die Daten können grundsätzlich in Form von Einzelpunkten, 2-D- oder 3-D-Profilen oder als 3-D-Geländemodell vorliegen. Bei einer Laserscanvermessung wird als Grundlage meist ein 1-m-Punktraster erstellt.

Der für die hydraulische Modellierung erforderliche Vermessungsumfang muss vom Bearbeiter des Fachbereichs Hydraulik festgelegt und genau dokumentiert werden. Da nicht alle Vermessungsbüros Erfahrungen im fachspezifischen Bereich aufweisen, sind Profil- und Punktabstände in den Bereichen der Flusssohle, Böschung, des Uferbords und der Vorländer detailliert zu definieren.

Ein Problem ist meist der Umstand, dass vor einer Hochwasserabflussberechnung der Abflussraum nicht bekannt ist und daher auch der Vermessungsumfang nur näherungsweise festgelegt werden kann. Fallweise kann hier eine stufenweise Vermessung zielführend sein, die nach einer ersten groben hydraulischen Berechnung ergänzt wird.

5.2.1.1 Terrestrische Vermessung

Die terrestrische Vermessung ist bezüglich Lage- und Höhengenauigkeit der Fotogrammetrie und dem Laserscan überlegen. Mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand ist jedoch nicht die Punktdichte eines Laserscans zu erreichen.

Flussschlauch:

Für den Flussschlauch selbst ist eine terrestrische Vermessung unbedingt erforderlich. Sowohl bei 1-D- als auch bei 2-D-Berechnungen werden oft Querprofile aufgenommen. Der Abstand richtet sich nach der Variabilität der Flussschlauchgeometrie und liegt im Freiland bei etwa 50 bis 150 m, im strukturierten Bereich bei 10 bis 50 m. Bei Sohlschwellen und Abstürzen sind Profile knapp flussauf, auf der Schwelle und knapp flussab aufzunehmen. Wehre, Brücken und Durchlässe sind durch Detailvermessungen zu erfassen. Alle hydraulisch relevanten Bauwerke sind vom Vermesser im Lageplan und als Ansicht darzustellen.

Für eine 2-D-Berechnung ist eine stetige Böschungsunterkante des Flussschlauchs erforderlich. Ist eine solche nicht zur Geländemodellierung vorhanden, besteht die Gefahr einer fehlerhaften Geländeinterpolation zwischen den Querprofilen. Es muss daher die Wasseranschlaglinie mit vermessen werden und wird in der Folge als Bruchkante für die Geländemodellierung verwendet.

Bei größeren Gewässern ist für eine 2-D-Modellierung eine flächige Sohlgrundaufnahme erforderlich, insbesondere, wenn die Strömungsverhältnisse im Gewässerbett von Interesse sind.

Sowohl für eine 2-D-, aber auch für eine 1-D-Modellierung ist neben den Flussquerprofilen eine Aufnahme der Uferborde im Längsprofil erforderlich. Im 1-D-Fall ist dies jedenfalls dann auch notwendig, wenn gegenüber den Vorländern erhöhte Uferborde vorliegen. Eine dem Stand der Technik entsprechende 1-D-Berechnung muss Ausuferungen in tiefer liegende Vorländer bzw. Rückströmungen als „Quasi-2-D-Modell“ berücksichtigen.

Die unmittelbare Böschungsoberkante des Flussbetts muss nicht zwangsweise der für den bordvollen Abfluss maßgeblichen „Ausuferungskante“ entsprechen (z. B. bei einem etwas in das Vorland zurückversetzten Damm). Fallweise sind also neben dem Uferbord weitere Bruchkanten entlang des Flussschlauchs zu vermessen.

Vorländer:

Während bei einer 1-D-Berechnung im Regelfall nur Querprofile als Modellgeometrie dienen, sind auch in diesem Fall Bruchkanten und zusätzliche Punkte vorteilhaft. Gräben, aufgedämmte Straßen, Durchlässe, Flutbrücken, Mauern, Anschüttungen können u. a. die Abflussverhältnisse wesentlich beeinflussen.

Zur Erstellung eines 3-D-Geländemodells sind bei einer 2-D-Berechnung alle wesentlichen Bruchkanten- und Geländeinformationen auch im Vorland erforderlich. Soll Vermessungsaufwand gespart werden, können unter Umständen auch nur die hydraulisch relevanten Bruchkanten aufgenommen werden. So ist bei einem Straßendamm für die großräumige Berechnung meist nur die Oberkante, jedoch weniger die Böschungsunterkante maßgeblich.

Als Grundlage für eine 2-D-Berechnung benötigt der Hydrauliker die Vermessungsdaten als 3-D-Punkte und 3-D-Bruchkanten im Lageplan sowie Ansichten und Schnitte der Bauwerke. Das Geländemodell wird vorteilhaft vom bearbeitenden Hydrauliker und nicht vom Vermessungsbüro erstellt.

5.2.1.2 Fotogrammetrie

Die fotogrammetrische Auswertung von Luftbildern ist auf bewuchsfreie Vorlandbereiche beschränkt. Die Genauigkeit ist wesentlich von der Art der Befliegung anhängig und liegt zwischen 15 und 20 cm. Die Extraktion von Bruchkanten ist möglich, jedoch aufwendig. Detailinformationen, wie kleinere Gräben oder Bauwerke müssen terrestrisch ergänzt werden. Diese Methode zur Erstellung von Geländemodellen für die hydrodynamische Modellierung wird heute in der Praxis kaum mehr eingesetzt.

5.2.1.3 Laserscan

Die Vermessung der Geländeoberfläche mittels Airborne Laserscanning wird vor allem für großflächige Untersuchungen angewendet und ist in den meisten Fällen weniger aufwendig als eine terrestrische Vermessung, sowohl Zeit als auch Kosten betreffend. Die Befliegung erfolgt mittels Flächenflugzeugen oder Hubschraubern. In alpinen Tälern ist die Befliegung mit Flächenflugzeugen teilweise schwierig bis unmöglich. Es sind unterschiedliche Scannertypen am Markt, die sich vor allem in der Frequenz unterscheiden (etwa 20 bis 100 kHz). Hochfrequente Scanner sind vorzuziehen, da sie eine höhere Punktdichte liefern (bis etwa 10 Punkte/m^2). Auch in Bereichen mit Bewuchs kann die Geländeoberfläche aus dem Rohmodell gefiltert werden, vorausgesetzt, dass einzelne Laserstrahlen durch Lücken in der Vegetationsdecke bis zum Gelände gelangen. Daher ist eine Laserscanbefliegung vorteilhaft in der vegetationsfreien Jahreszeit durchzuführen.

Die Laserscanvermessung liegt meist als gefiltertes Gelände (ohne Bewuchs, eventuell auch ohne Bauwerke) in Form eines 1-m-Rasters vor. Der Hydrauliker muss das Modell immer auf Plausibilität überprüfen, da trotz Sorgfalt beim Filtern Fehler auftreten können. Da der Datenumfang für eine 2-D-Berechnung zu groß ist, muss eine Ausdünnung der Punkte erfolgen. Dazu wird aus dem 1-m-Raster entweder ein gröberer Raster oder ein Dreiecks- oder Rechtecksnetz abgeleitet. Gröbere Raster können in ebenen Bereichen geringer Struktur eingesetzt werden, während Dreiecksnetze in gegliederten Bereichen besser geeignet sind. Zur Vermaschung werden wie bei der terrestrischen Vermessung Bruchkanten benötigt. Diese werden vorteilhaft anhand einer Höhenschichtendarstellung festgelegt, die aus dem 1-m-Raster erstellt wird. Darüber hinaus existieren auch bereits (semi-)automatische Verfahren zur Modellierung von Bruchkanten auf Basis der Laserscanner-Daten.

Auch bei der Laserscanvermessung sind terrestrische Ergänzungen erforderlich. Diese betreffen z. B. den Flussschlauch, Bauwerke, stehende Gewässer und kleinere Gräben im Vorland. Besonders zu beachten sind schmale Dämme, die – v. a. bei geringer Punktdichte – mit dem Laserscan oft nur unzureichend erfasst werden und ebenfalls terrestrisch aufzunehmen sind.

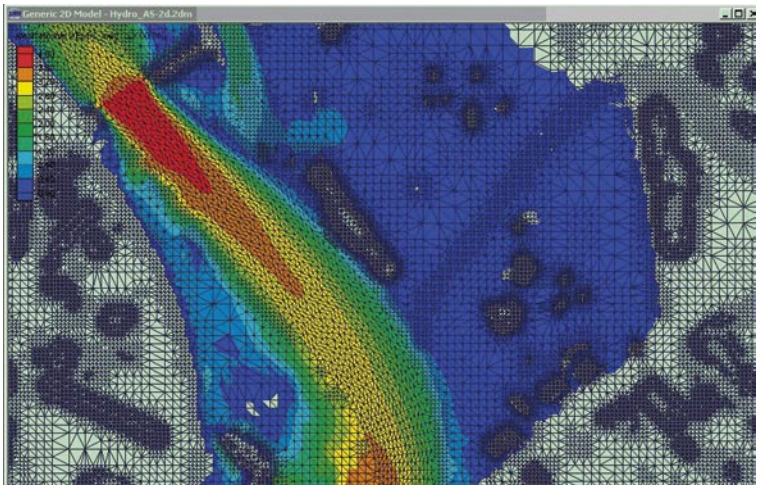


Abb. 9: Visualisierung (Fließgeschwindigkeiten) einer HQ_{100}-Berechnung im Bereich des Dungl-Zentrums/Gars am Kamp basierend auf einer höhenbasierten Ausdünnung der Laserscanner-Vermessung

5.2.1.4 Vorteile und Nachteile der Methoden

Der Vorteil einer Laserscanvermessung liegt in der flächendeckend gleich bleibend hohen Punktdichte. Weiters wird von vornherein ein größerer Bereich des Talraums beflogen, der den Abflussraum mit Sicherheit abdeckt. Terrestrische Ergänzungen bzw. auch Kontrollen sind jedoch immer notwendig.

Während bis heute die meisten 1-D-Berechnungen ausschließlich auf Querprofilen basierten, wird die Erstellung von Geländemodellen auch in diesem Bereich schon teilweise gefordert. Geländemodelle ermöglichen eine wesentlich höhere Flexibilität bei der Festlegung von Querprofilen, die oft erst nach ersten hydraulischen Durchrechnungen optimal situiert werden können.

Durch eine terrestrische Vermessung können alle Erfordernisse einer Abflussberechnung abgedeckt werden. Beispiele zeigen, dass auch größere Talabschnitte wirtschaftlich durch eine rein terrestrische Vermessung erfasst werden können. Dies ist besonders dann der Fall, wenn eine Vermessung in der laubfreien, vegetationsarmen Zeit nicht möglich ist, in engen alpinen Tälern oder wenn die ohnehin erforderlichen terrestrischen Ergänzungen einen hohen Anteil der Gesamtvermessung ausmachen.

5.2.2 Oberflächenrauigkeit

Sowohl in 1-D- als auch in 2-D-Modellen wird fast ausschließlich der Rauigkeitsbeiwert n nach Manning bzw. k_s [$m^{1/3}/s$] nach Strickler angewendet ($k_s = 1/n$). Daneben werden seltener absolute Rauigkeiten k oder ks [mm] verwendet. Weit wesentlicher als der physikalische Hintergrund des Ansatzes ist jedoch die Zuordnung in der Natur, die in beiden Fällen schwierig ist und bleibt. Dazu kommt das Problem, dass der Rauigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Wassertiefe variieren kann, sowohl in Richtung geringere Rauigkeit bei Abnahme des Einflusses der Sohlrauigkeit als auch in Richtung höhere Rauigkeit, z. B. beim Erreichen der dichteren Kronen eines Bewuchses. Saisonale Schwankungen durch die Vegetation schaffen eine zusätzliche Komplexität. Neben den Unsicherheiten in den hydrologischen Grundlagen ist die Festlegung der Rauigkeit eine der größten Fehlerquellen bei einer Abflussberechnung, insbesondere bei Fehlen einer Kalibrierung.

Besonders sei darauf hingewiesen, dass die aus wissenschaftlichen Gründen oft bevorzugte Definition der Rauigkeit als absoluter Rauigkeitsbeiwert in mm in der Praxis keine Vorteile ergibt, da das Gefühl für die Festlegung in der Natur beim Praktiker meist völlig fehlt. Das Rauigkeitsmaß hat keinerlei Bezug zur tatsächlichen Oberflächenrauheit.

Umso größere Bedeutung hat das Kalibrieren des Modells, vor allem in Hinblick auf eine realistische Festlegung der Rauigkeiten.

1-D-Modelle müssen die Eingabe zahlreicher unterschiedlicher Rauigkeiten über den Querschnitt erlauben. Programme, die nur mit 3 Rauigkeiten für das linke Vorland, den Flussschlauch und das rechte Vorland rechnen, entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik. Für die Berücksichtigung der Verluste in Trennflächen zwischen Bereichen unterschiedlicher Rauigkeit existieren unterschiedliche Ansätze, die jedoch teilweise in der Praxis nur schwierig anwendbar sind.

Liegen im Flussschlauch selbst unterschiedliche Rauigkeiten vor, so kann die Berechnung der einzelnen Bereiche getrennt erfolgen (ohne gegenseitige Beeinflussung) oder es kann ein gewichteter einheitlicher Rauigkeitsbeiwert ermittelt werden. Dies ist jedoch nur bei sehr steilen Böschungen und gedrungenen Querschnitten zielführend.

Im 2-D-Modell werden die Rauigkeiten flächig definiert, wobei zur Festlegung neben Begehungen meist Luftbilder und Fotodokumentationen heranzuziehen sind. Oft ist eine exakte Festlegung nicht möglich, z. B. in dicht bebautem Siedlungsbereich. Hier kann entweder ein mittlerer Rauigkeitsbeiwert angenommen werden, der Hindernisse wie Zäune, Hecken und Häuser berücksichtigt, oder es können Bauwerke auch als nicht abflusswirksame Fläche aus dem Modell ausgeschnitten („disabled“) werden.

Zu beachten ist, dass gleiche Rauigkeitswerte in einer 1-D-Berechnung nicht die gleichen Wasserspiegellagen ergeben wie in einer 2-D-Berechnung mit sonst gleichen Randbedingungen. Dies gilt insbesondere für den Flussschlauch.

5.2.3 Bauwerke

Sowohl in 1-D- als auch in 2-D-Modellen können Bauwerke wie Brücken, Durchlässe oder Wehre berücksichtigt werden. Oft haben diese Bauwerke und die Festlegung der damit verbundenen Beiwerte großen Einfluss auf die Wasserspiegellage. Bei instationären Berechnungen spielt bei Wehren die Regelung fallweise eine elementare Rolle.

5.2.3.1 Brücken und Durchlässe

Bei Brücken und Durchlässen ist der Geländeübergang zum Bauwerk hin entsprechend in der Modellgeometrie zu berücksichtigen. Dies betrifft sowohl 1-D- als auch 2-D-Modelle. Während dieser Übergang Einfluss auf den Freispiegelabfluss hat, so ist die Festlegung der Verlustbeiwerte für den Druckabfluss von großer Bedeutung. Meist werden die Bauwerke auch in 2-D-Modellen als 1-D-Elemente definiert. Vorsicht ist bei Programmen geboten, die die Druckabflussverluste nur in Form eines globalen Beiwerts berücksichtigen. Dabei wird die Länge des Durchlasses nicht berücksichtigt, die jedoch von großem Einfluss sein kann.

Weiters sind Einlaufverluste zu definieren, die je nach Einlaufsituation sehr variieren können und in der Praxis oft unterschätzt werden.

5.2.3.2 Wehre, Abstürze

Wehre können in den meisten 1-D-Programmen als Wehrprofil mit einem bestimmten Überfallbeiwert unter Berücksichtigung eines vollkommenen oder unvollkommenen Überfalls definiert werden. Die Eingabe des Überfallbeiwerts ist von geringerer Bedeutung als die realistische Eingabe von Verlustbeiwerten bei Durchlässen. Wird bei einem Absturz oder Wehr (bei vollkommenem Überfall) nur das Querprofil und kein „Wehr“ definiert, so ergibt sich auf dem Wehr bei Annahme „Strömen“ die Grenztiefe.

Bei 2-D-Programmen sind Wehre und Abstürze meist als 1-D-Element zu definieren. Der Nachteil besteht darin, dass lokal im direkten Wehrbereich keine Ergebnisse dargestellt werden können und sich kein kontinuierliches Strömungsbild ergibt. Auch muss die Strömungsrichtung auf dem Wehr durch die Definition der 1-D-Nodestrings vorgegeben werden, wie auch ein konstanter Überfallbeiwert. Bei manchen 2-D-Programmen treten bei einer 2-D-Abflussberechnung über einen Absturz Probleme auf und die Ergebnisse können maßgeblich von denen mit Berücksichtigung eines 1-D-Wehrs differieren. Ein Problem besteht weiters darin, wo ein „Wehr" zu definieren ist und in welchen Fällen noch eine durchgehende 2-D-Berechnung möglich ist.

5.2.4 Sonstige Basis-Informationen

Folgende Informationen sollen bei jeder Abflussberechnung als Grundlage verwendet werden:

- Begehungen, Fotodokumentationen (digital, georeferenziert)
- Luftbilder, Orthofotos (auch Schrägaufnahmen, möglichst farbig)
- Befragungen, Hochwasserdokumentationen (Archive, Fotos, Videos).

5.2.5 Datenbedarfsunterschiede 1-D, 2-D, 3-D

Auf die unterschiedlichen Anforderungen je nach Berechnungsart wurde in den vorangegangenen Kapiteln bereits eingegangen. Sie betreffen vor allem die Vermessungsgrundlagen, wobei ein flächendeckendes homogenes 3-D-Geländemodell selbst bei einer 1-D-Berechnung von Vorteil ist.

Andererseits ist beim Vorliegen eines 3-D-Modells eine 2-D-Berechnung anzustreben, die vor allem bei komplexeren Abflussverhältnissen und überfluteten Vorländern der 1-D-Berechnung deutlich überlegen ist.

3-D-Berechnungen kommen aufgrund der derzeit zur Verfügung stehenden Software nur für kleinräumige detaillierte Untersuchungen zur Anwendung. Leider sind die Eingabe und das Editieren der Oberfläche und der Rauigkeit bei vielen 3-D-Programmen noch äußerst aufwendig.

Welche Berechnungsart für die vorliegende Problemstellung geeignet ist, kann aus der folgenden groben Übersicht entnommen werden *(Tabelle 1).* Dabei reicht das Spektrum von einer stationär-gleichförmigen 1-D-Berechnung bis zu einer instationären 3-D-Berechnung, in Abhängigkeit von der Linienführung des Gewässers, der Profilform und -varianz und anderen Parametern.

Tabelle 1: Berechnungsart nach Problemstellung

Typ	Retentionseffekte	Ausuferungen, Strömungssituation	Modellart
1	NEIN	keine Ausuferungen oder einfache getrennte Abflüsse	1-D-stationär
2	JA	keine Ausuferungen oder einfache getrennte Abflüsse	1-D-instationär
3	NEIN	komplexe getrennte Abflüsse und Strömungen	2-D-stationär
4	JA	komplexe getrennte Abflüsse und Strömungen	2-D-instationär
5	–	deutlicher Einfluss der vertikalen Geschwindigkeitskomponente z. B. lokal bei Bauwerken	3-D-stationär (kleinräumig)

5.2.6 Datenbedarfsunterschiede je nach Fragestellung

Je nach Fragestellung besteht ein entsprechender Unterschied in Art und Umfang des Datenbedarfs.

Nach Abflussbereich:

Der Abflussbereich kann entweder nur den Flussschlauch, zusätzlich Vorländer mit oder ohne Siedlungsbereiche umfassen. Der Datenbedarf für Flussschlauch und Vorländer wurde bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben und betrifft im Wesentlichen die Vermessungsdaten und die Rauigkeitsangaben.

In Siedlungsbereichen bzw. allgemein in Bereichen mit Bauten ist zu entscheiden, ob mit einem mittleren, entsprechend niedrigen Rauigkeitsbeiwert gerechnet werden kann, oder ob etwa dichte Zäune, Mauern oder größere Gebäude detailliert berücksichtigt werden müssen. Diese Entscheidung ist abhängig davon, in welchem Maße hydraulisch relevant der betreffende Bereich ist.
Nach Abflussvorgängen:

Wie bereits ausgeführt, ist die Datengrundlage abhängig vom gewählten Berechnungsverfahren 1-D, 2-D oder 3-D.

Bei einer stationären Berechnung genügt als Grundlage der „hydrologische Längenschnitt" entlang des Berechnungsabschnitts. Bei der instationären Berechnung sind Zuflussganglinien am flussaufwärtigen Ende des Gewässers sowie bei den Zubringern erforderlich. Bei längeren Abschnitten ist ein Niederschlag-Abfluss-Modell erforderlich, um die für einzelne Abschnitte unterschiedlichen maßgeblichen Regendauern bzw. Zuflussganglinien ermitteln zu können. In diesem Fall ist eine instationäre Berechnung mit einem wesentlich höheren Aufwand verbunden als eine stationäre Berechnung.

Ohne Berücksichtigung von Sedimenttransportprozessen entspricht die Vorgangsweise den bisherigen Ausführungen. Wird der Geschiebetransport berücksichtigt, so sind umfangreiche Datengrundlagen erforderlich, wobei hier nur die Wichtigsten stichwortartig beschrieben sind:

- Kornverteilung in der Gerinnesohle (meist profilweise)
- Sedimentzufluss in Abhängigkeit vom Durchfluss für das flussauf liegende Bearbeitungsende und alle relevanten Zubringer
- fixe Untergrundsohle, bis zu der eine Geschiebebewegung möglich ist
- Transportparameter für Ton/Schluff bzw. größere Korngrößenklassen.

In der Gefahrenzonenplanung wird oft mit verschiedenen Verklausungsszenarien gerechnet, diese werden einander gegenübergestellt. Dies können teilweise oder vollständige Brückenverklausungen, teilweise oder vollständige Bachverlegungen im Bereich Geschiebe einstoßender Zubringer sein.

Interessant ist fallweise die Untersuchung der vollständigen Verlegung von Bachstrecken, um ein Gefühl für den Talraum zu bekommen, den der Bach maximal beanspruchen kann.

Die Annahme von Verklausungsszenarien ist mit dem Problem der nur schwierig oder überhaupt nicht zuzuordnenden Wahrscheinlichkeit eines solchen Gesamtereignisses verbunden.

Instationäre Langzeitsimulationen sind wegen des sich ergebenden Datenumfangs insbesondere als 2-D-Berechnung schwierig. Fallweise ist eine Diskretisierung der Ganglinie zu empfehlen. Bei 2-D-Langzeitsimulationen ist in einem ersten Schritt die Ermittlung eines durch stufenweise stationäre Berechnungen ermittelten flächigen „Pegelschlüssels" möglich. Die Langzeitdurchflusskurve kann somit für beliebige Punkte in Wasserstände umgerechnet werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass in vielen Fällen, insbesondere in Durchflussbereichen, wo es zu geringfügigen Ausuferungen in tiefere Vorländer kommt, die Ergebnisse der stationären Berechnung wesentlich von den tatsächlichen instationären Verhältnissen abweichen können.

Diese Problematik ergibt sich auch bei real-time-Prognoserechnungen, die derzeit zweidimensional wegen der langen Rechenzeiten praktisch nicht möglich sind. Es können zwar für verschiedene Durchflussstufen Vorausberechnungen durchgeführt werden, die sofort für eine Prognose zur Verfügung stehen, jedoch geben diese Vorausberechnungen hinsichtlich der Wasserspiegellagen – wie erwähnt – fallweise die tatsächlichen instationären Verhältnisse nur näherungsweise wieder.

5.3 Datenqualität

Die Datenqualität hat maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse einer Abflussmodellierung. Sie hat damit beispielsweise direkte Auswirkungen auf die Bemessung von Schutzwasserbauten oder auf die Ausweisung von Gefahrenzonen und damit raumplanerische Fragen.

Mit Daten minderer Qualität können auch die besten Modelle keine „richtigen" Ergebnisse liefern. Vielfach überlagern sich Fehler bzw. Unsicherheiten in verschiedenen Eingabedaten so, dass über die Qualität der Berechnungsergebnisse keine Aussage getroffen werden kann.

Die Qualität der Eingangsdaten ist daher einer eingehenden Prüfung zu unterziehen. Die Rechenungenauigkeit der Modelle ist in der Regel vernachlässigbar in Relation zur Unsicherheit in den Eingangsdaten.

5.3.1 Datenqualität – Morphologie

Bei der Modellgeometrie ist zu beachten, dass alle hydraulisch relevanten Elemente der Geländemorphologie erfasst werden. Der Vermessungsumfang ist daher vom Hydrauliker festzulegen. Bruchkanten sind dort genau zu berücksichtigen, wo sie in Lage und Höhe hydraulisch wirksam sind.

Fehlerquellen liegen somit einerseits in der Qualität der Vermessungsdaten selbst, andererseits in der im hydraulischen Modell verwendeten Geometrie.

Bei 2-D-Modellierung ist mit einer vollautomatischen Vermaschung der Vermessungsdaten zwar eine große Zeitersparnis verbunden, sie ist jedoch abzulehnen, da damit die hydraulischen Erfordernisse an das Geländemodell zu wenig berücksichtigt werden.

Allgemein ist bei 1-D- oder 2-D-Berechnungen gleichermaßen große Erfahrung des Hydraulikers erforderlich, um den Vermessungsumfang ausreichend festzulegen. Bei Laserscanvermessungen ist in Abhängigkeit von der Punktdichte, von der Bewuchsart etc. auf ausreichende terrestrische Ergänzungsvermessungen zu achten.

Die ausreichende Lage- und Höhengenauigkeit der Vermessungspunkte ist vorauszusetzen. Dabei sind stichwortartig folgende Punkte zu beachten:

- Anbindung an das amtliche Präzisionsnivellement
- Ausgleichsverfahren bei Vermessung über längere Abschnitte
- Qualitativ hochwertige Filterverfahren bei Laserscanvermessungen
- Beachtung von Fehlerquellen bei Echolotvermessungen
- Stichprobenartige Überprüfungen bei größeren Vermessungen.

5.3.2 Datenqualität – Hydrologie

Im Folgenden sind einige Fehlerquellen in der Hydrologie aufgeführt, die als eine der Hauptfehlerquellen in den Datengrundlagen zu bezeichnen sind.

- Fehler in den Niederschlagsmessdaten:
  Fehler durch falsche Standortwahl der Messstelle,
  Gerätefehler, Verschmutzung etc.,
  Zeitverschiebung
- Fehler in den Abflussmessdaten:
  Fehler in der Auswertung durch inkonsistente und inhomogene Messreihen,
  Fehler im Pegelschlüssel (meist ungenaue Extrapolation in den Hochwasserbereich)
- Fehler in der statistischen Auswertung (unsichere Extrapolation aus den beobachteten Daten)
- Fehler in der NA-Modellierung:
  unzureichende Kalibrierung (unzureichende Messnetzdichte, Fehlen von Niederschlagsschreibern, Abflusspegeln, Fehler in der Parameterwahl),
  Fehler in der Wahl der lokal maßgeblichen Abflussganglinie (bzw. Regendauer),
  Fehler durch unzureichende Berücksichtigung der Wellenverformung durch fließende bzw. stehende Retention im NA-Modell:

Die Kombination eines NA-Modells mit einer 2-D-Abflussmodellierung für einen längeren Gewässerabschnitt stellt eine besondere Herausforderung dar. Insbesondere bei dieser Fragestellung kann es durch Annahme falscher maßgeblicher Abflussganglinien zu Fehlern in der Modellierung kommen. Die Kombination NA-Modell/2-D-Modell stellt einen hohen Aufwand hinsichtlich der Anzahl der zu modellierenden Rechenläufe und der Rechenzeit dar.

5.3.3 Datenqualität – Rauigkeiten

Im Gegensatz zu den Vermessungsdaten und dem meist auch auf Messdaten beruhenden hydrologischen Input werden die Rauigkeiten in der Regel aufgrund von Begehungen oder Luftbildern festgelegt.

Ein Fehler in der Annahme der am häufigsten verwendeten Rauigkeit k_s nach Strickler ist ca. direkt proportional zum Fehler in der errechneten Fließgeschwindigkeit. Eine Kalibrierung ist daher unbedingt durchzuführen, wenn beobachtete Hochwässer vorliegen.

Eine direkte Rückrechnung im Flussschlauch, die manche Programme ermöglichen, ist mit Vorsicht anzuwenden. In Bereichen, wo die Rauigkeit keinen direkten hydraulischen Einflussfaktor bildet (z. B. durch Rückstau), können die Ergebnisse völlig unplausibel sein.

6 Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Validierung

6.1 Kalibrierung

Durch die Kalibrierung werden die Ergebnisse des Rechenmodells mit den vorhandenen Daten abgestimmt. Der oft verwendete Begriff Eichung ist unpassend, da eine Eichung sich nur auf Messgeräte beziehen kann, die Messgrößen des SI-Einheitensystems wie z. B. Masse oder Temperatur erfassen. Durch die Eichung ist gewährleistet, dass das Messgerät zum Zeitpunkt der Eichung international vergleichbare Ergebnisse liefert. Weiters ist die Messunsicherheit des Geräts über den Eichvorgang bekannt.

Warum Kalibrierung? Alle numerischen Modelle benötigen Daten (siehe *Kapitel 5).* Mit der Kalibrierung ist es möglich, Fehler in den Eingangsdaten des Modells zu erkennen. Parameter im Modell, wie z. B. die Rauheiten zur Erfassung der Fließwiderstände, können in der Regel nur geschätzt werden. In der Kalibrierung wird die erste Schätzung vom Modellaufbau überprüft und verbessert.

Mit der Kalibrierung, der Sensitivitätsanalyse (siehe *Kapitel 6.2)* und der Validierung (siehe *Kapitel 6.3)* ist der Nachweis zu erbringen, dass das Modell die maßgebenden Prozesse, für die es eingesetzt wird, richtig wiedergibt.

Mögliche Ergebnisse einer Modellkalibrierung:

- Die Anpassung des Modells an die Messdaten ist gelungen. Das Modell kann gemessene Ereignisse (z. B. Hochwasser oder Niederwasser) nachvollziehen. Es kann mit der Sensitivitätsanalyse und Modellvalidierung fortgesetzt werden.

- Die Anpassung des Modells an die Messdaten ist ungenügend. Mit weiteren Messdaten erscheint eine Anpassung möglich. In diesem Fall müssen die erforderlichen Messdaten, soweit möglich, erhoben bzw. ermittelt werden.

- Die Anpassung des Modells an die Messdaten ist ungenügend. Eine Anpassung mit weiteren Messdaten ist nicht möglich. Es ist entweder ein anderes Modell zu wählen, das für die gewählte Aufgabenstellung besser geeignet ist (die maßgebenden Prozesse besser nachbildet), oder die Genauigkeitsanforderungen an das Modell sind zu reduzieren. Beispielsweise muss die Erwartungshaltung von einer quantitativen Aussage auf eine rein qualitative Aussage reduziert werden.

6.1.1 Kalibrierparameter

Jedes Fließgewässermodell enthält Parameter (Steuerschrauben), die für die Kalibrierung verwendbar sind. Die Anzahl dieser Parameter hängt davon ab, wie das Modell aufgebaut ist und welche Parameter die Modellentwickler als veränderbar zulassen. Entwicklerversionen, wo der Programmcode des Modells zur Verfügung steht, bieten in der Regel mehr Möglichkeiten.

6.1.1.1 Modellparameter

Unter Modellparameter werden all jene Koeffizienten bzw. Zahlenwerte im Modell verstanden, die aus der Modellentwicklung stammen und damit primär für die Nachbildung bestimmter Prozesse erforderlich sind. In einem k-ε-Turbulenzmodell sind dies beispielsweise die Konstanten in den Gleichungen zur Ermittlung der Turbulenzenergie k und der Dissipation ε.

Im weiteren Sinn können unter diesem Begriff auch unterschiedliche Berechnungsmethoden (beispielsweise für Fließwiderstände oder verschiedene Turbulenzmodelle) verstanden werden, die das Programmpaket anbietet.

Für die Anwenderin bzw. den Anwender ist es wichtig, sich mit dem Modell vertraut zu machen und die verschiedenen Einstellmöglichkeiten im Berechnungsmodul zu hinterfragen.

1-D-Abflussmodell (stationär und instationär)

Üblicherweise stehen hier keine oder nur wenige Modellparameter für die Kalibrierung zur Verfügung. Häufig ist ein Ansatz für Erweiterungs- bzw. Verengungsverluste infolge Querschnittsänderung zu finden (z. B. HEC-RAS). Spezielle Modelle für ungleichförmige Strömungen erlauben es auch, die Gewichte bei der Integration der Grundgleichungen zu verändern (üblicherweise sind diese Gewichte fix mit 0,5 angesetzt – entspricht linearer Mittelwertbildung). Bei diesen Modellen sind damit größere Querprofilabstände und längere Zeitschritte möglich.

2-D- und 3-D-Strömungsmodell

In Abhängigkeit vom Modell sind die wesentlichen Parameter in der Regel die Wirbelviskosität (z. B. SMS, TELEMAC-2D) oder die sogenannten Schließungskoeffizienten in den Gleichungen zur Bestimmung der Turbulenzgrößen k-ε (z. B. TELEMAC-2D). Nähere Informationen zur Turbulenzmodellierung sind im *Kapitel 2* enthalten.

6.1.1.2 Fallspezifische Parameter

In dieser Gruppe sind all jene Parameter zusammengefasst, die in engem Zusammenhang mit dem konkreten Anwendungsfall stehen. Insbesondere sind dies alle Parameter, die für die Berechnung der Fließwiderstände erforderlich sind (Fließbeiwerte nach Manning bzw. Strickler, äquivalente Sandrauheiten, Formwiderstände etc.). Hinweis: Durch die unterschiedlichen Berechnungsmethoden bei 1-D- und 2-D-Modellen können sich aus der Kalibrierung für ein und denselben Fall, je nach Modellwahl, unterschiedliche Rauheitsparameter ergeben.

Bei instationären Berechnungen ist die zeitliche Diskretisierung des Vorgangs (Länge der Zeitschritte in der Berechnung) ein wesentlicher Faktor. Zeitlich stark ungleichförmige Strömungen (z. B. rasch ansteigende Hochwasserwellen, Schwallwellen) benötigen kürzere Zeitschritte in der Berechnung als langsam ablaufende Vorgänge. Die Berechnungsergebnisse müssen von der Länge des Zeitschritts unabhängig sein. Dies kann z. B. dadurch geprüft werden, dass ein Berechnungsfall mit der halben oder doppelten Zeitschrittlänge wiederholt wird und die beiden Ergebnisse gegenübergestellt werden. Anforderungen an die Zeitschrittlänge aus dem Modell heraus sind in

jedem Fall zu beachten (z. B. Courant-Zahl kleiner als 1 bei expliziten Modellen).

Im weiteren Sinn gehört zu dieser Gruppe auch die Ortsdiskretisierung (der Profilabstand bei 1-D-Modellen bzw. die Größe von Berechnungszellen bei 2-D- und 3-D-Modellen). Bereiche mit stark veränderlichen Strömungen (Beschleunigungen, Verzögerungen, gekrümmten Stromlinien) benötigen eine kleinere Ortsdiskretisierung des Berechnungsgebiets, um die Strömung richtig nachzubilden. D. h., die benötigte Ortsdiskretisierung ist nicht nur von der möglichst genauen Nachbildung der Geometrie, sondern auch von der Beschreibung der Strömungssituation abhängig. Analog zur Zeitschrittwahl kann auch hier durch eine Vergleichsrechnung mit zwei verschiedenen Ortsdiskretisierungen der Einfluss auf die Berechnungsergebnisse geprüft werden.

Ortsdiskretisierung und Zeitschrittlänge hängen zusammen. Eine feinere geometrische Auflösung des Berechnungsgebiets (kleinere Ortsdiskretisierung) erfordert kürzere Zeitschritte.

6.1.2 Messdaten

Alle vorhandenen Daten müssen in zwei unabhängige Datensätze geteilt werden. Der erste Satz dient für die Modellkalibrierung. Der zweite Satz ist für die Modellvalidierung (siehe *Kapitel 6.3)* erforderlich.

Folgende Daten werden üblicherweise für die Kalibrierung verwendet:

- Wasserspiegelhöhen: je nach Anwendungsbereich für verschiedene Durchflüsse von Niederwasser bis Hochwasser

- Ganglinien (Wasserstand und Durchfluss), wenn auch instationäre Berechnungen vorgesehen sind.

Falls verfügbar sollte auch auf Geschwindigkeitsmessungen (Größe und Richtung) zurückgegriffen werden. Dies gilt speziell für 2-D- und 3-D-Modelle.

Der Umfang der für eine Kalibrierung erforderlichen Messdaten hängt von den an das Modell gestellten Anforderungen für den praktischen Einsatz und vom Modell selbst (1-D, 2-D oder 3-D) ab. Während für ein 1-D-Modell in der Regel Angaben in den Querprofilen ausreichen (z. B. Wasserstand und Durchfluss), sind bei 2-D-Modellen auch Angaben in der Fläche (z. B. Hochwasseranschlaglinien) bzw. bei 3-D-Modellen unter Umständen auch höhendifferenzierte Angaben (z. B. vertikale Geschwindigkeitsverteilung) erforderlich.

Wenn für Querprofile nur eine Wasserstandsangabe vorliegt ist zu prüfen, für welche Stelle im Profil diese gilt. Bei Gewässerabschnitten mit breiten Vorländern und in Flusskrümmungen können die Wasserstände über das Querprofil beträchtlich variieren.

Als Quellen für Messdaten kommen in Frage:

- aktuelle Naturmessungen (Hochwasseranschlaglinien, Pegelaufzeichnungen, Wasserspiegelfixierungen bei verschiedenen Durchflüssen, flächige Wasserspiegelaufnahmen, Fließ-

geschwindigkeitsmessungen – Oberflächengeschwindigkeiten, Geschwindigkeiten im Wasserkörper).

- Messungen aus der Vergangenheit einschließlich historischer Aufzeichnungen wie Hochwassermarken an Gebäuden oder Chroniken. Wenn Daten aus der Vergangenheit verwendet werden, ist zu beachten, ob sich die Abflussverhältnisse in der Zwischenzeit verändert haben und dies im Modell berücksichtigt werden kann (z. B. Verwendung der damaligen Geometrie, Informationen zu den Fließwiderständen).

- Daten aus einem physikalischen Modell. Wenn im Planungsprozess für Teilbereiche des Bearbeitungsgebiets physikalische Modelle erstellt wurden, sollten diese Daten berücksichtigt werden. Daten aus der Vergangenheit sind analog zu historischen Naturdaten auf ihre Brauchbarkeit für die aktuelle Situation zu prüfen.

- Daten aus einem anderen Rechenmodell. In diesem Fall sind die Messdaten mittels eines numerischen Modells simuliert. Falls für das Bearbeitungsgebiet bereits geeignete numerische Berechnungen vorliegen, sollten diese genutzt werden. Beispielsweise können Daten aus einer lokalen 2-D- oder 3-D-Rechnung in ein großräumiges 1-D-Modell übernommen werden.

Alle Messdaten sind hinsichtlich Qualität nach folgender Checkliste zu prüfen:

- Wie groß ist die Messunsicherheit? Hier spielen Messverfahren und Messgeräte bzw. Rechenmethoden eine wichtige Rolle.

- Ist die Rückführbarkeit der Messdaten auf SI-Einheiten gegeben? Damit dieser Punkt erfüllt ist, müssten alle Messgeräte zur Gewinnung der Messdaten entweder kalibriert oder geeicht sein.

Bei Daten, wo weder die Rückführbarkeit noch Angaben zur Messunsicherheit vorliegen:

- Kann eine Messunsicherheit abgeschätzt werden und wie groß ist diese? Speziell bei historischen Aufzeichnungen und Aussagen betreffend Beobachtungen ist dieser Punkt wichtig.

Abweichungen zwischen Modell und Kalibrierdaten können nur dann richtig eingeschätzt werden, wenn zu allen Daten Angaben über die Messunsicherheit vorliegen.

6.1.3 Anpassungsqualität

Unter Anpassungsqualität versteht man die Abweichung der Modellergebnisse von den Kalibrierdaten (Messdaten).

Die Anpassungsqualität beeinflusst die Qualität aller auf dem Modell beruhenden Aussagen. Beispielsweise hängen die Sicherheit und die Baukosten für einen Hochwasserschutzdamm direkt mit der Genauigkeit und der Unsicherheit der Wasserspiegellagenberechnung zusammen.

Idealerweise liegen zum Abschluss der Kalibrierung alle Berechnungsergebnisse im Unsicherheitsband zu den Messdaten. Ist dies nicht der Fall, muss der Modellanwender entscheiden, ob das Modell den Ansprüchen für die praktische Anwendung genügt. Dafür ist es zweckmäßig, vor der Kalibrierung Anpassungsziele festzulegen. Während des Kalibriervorgangs erfolgt laufend der Vergleich zwischen dem Anpassungsziel und der tatsächlich erreichten Anpassung anhand von grafischen Vergleichen bzw. Maßzahlen.

6.1.3.1 Grafische Kontrolle der Anpassungsqualität

Grafische Vergleiche zwischen Messdaten und Berechnungsergebnissen geben einen raschen Überblick betreffend Güte der Modellanpassung. Dazu werden nachfolgend einige Beispiele gegeben.

Die in *Abb. 10* dargestellte Methodik zum Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Wasserspiegellagen kann auch bei 2-D- und 3-D-Modellen Verwendung finden, wenn entsprechende Schnitte durch das Untersuchungsgebiet gelegt werden. Um die Unterschiede besser hervorzuheben, kann auch eine Differenzendarstellung (Rechenergebnis minus Messergebnis) im Längsprofil gewählt werden.

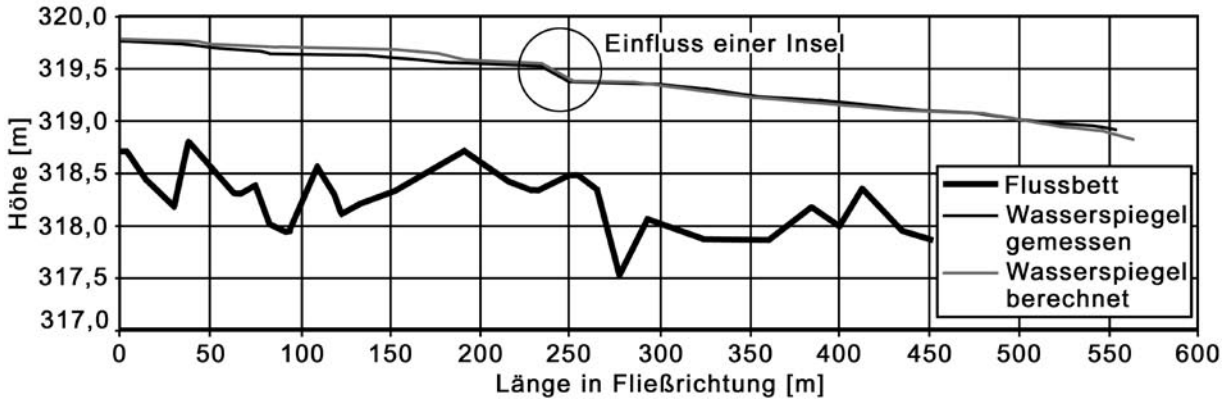


Abb. 10: Beispiel für den Vergleich zwischen gemessener und berechneter Wasserspiegellage im Längsprofil (Habersack et al., 2000)

Die Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Wasserspiegeln entsprechend *Abb. 11* ist ebenfalls unabhängig von der gewählten Modelldimension verwendbar. Im Idealfall sollten alle Punkte auf der Geraden liegen (Messung ist mit Rechnung identisch) bzw. im Unsicherheitsband der Messdaten um die Gerade streuen.

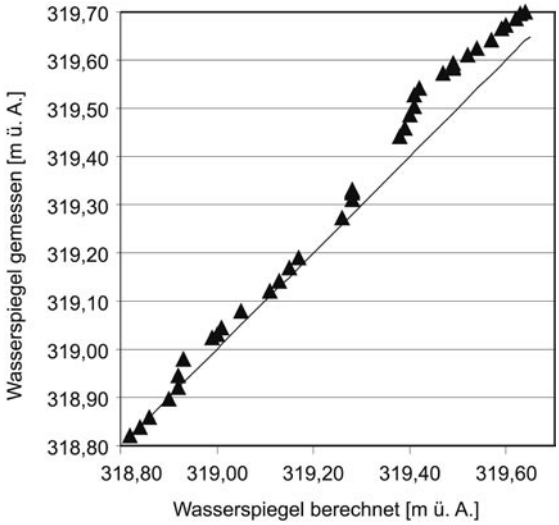


Abb. 11: Beispiel für den Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Wasserspiegelhöhen (Habersack et al., 2000)

Bei 2-D- und 3-D-Modellen sollten auch die Geschwindigkeitsverteilungen verglichen werden. Falls keine Messdaten vorliegen, ist auf jeden Fall zu empfehlen, die berechneten Fließgeschwindigkeitsverteilungen auf Plausibilität zu prüfen.

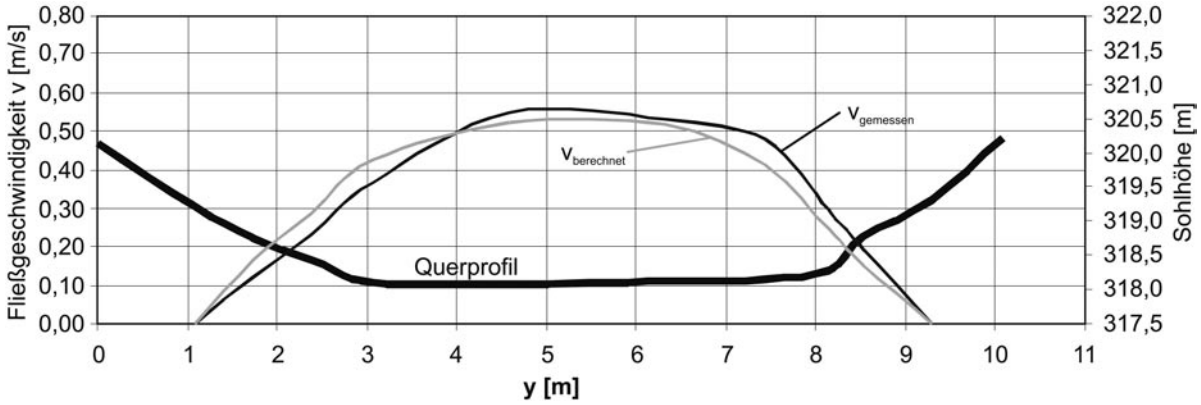


Abb. 12: Beispiel für den Vergleich zwischen gemessener und berechneter Fließgeschwindigkeitsverteilung (Habersack et al., 2000)

Eine wertvolle Hilfe bei der Kalibrierung ist der Vergleich zwischen berechneten und beobachteten Überflutungsflächen. Im Bereich von Straßen und Eisenbahnen fällt bei diesem Vergleich rasch auf, ob es Durchlässe gibt, die im Modell nicht berücksichtigt sind und die die Überflutungsfläche vergrößern. Bei einem Vergleich mit weiter zurückliegenden Hochwässern ist zu beachten, ob die im Rechenmodell verwendete Geometrie noch repräsentativ ist (z. B. Geländeveränderungen durch Bautätigkeit oder gewässermorphologische Entwicklung).

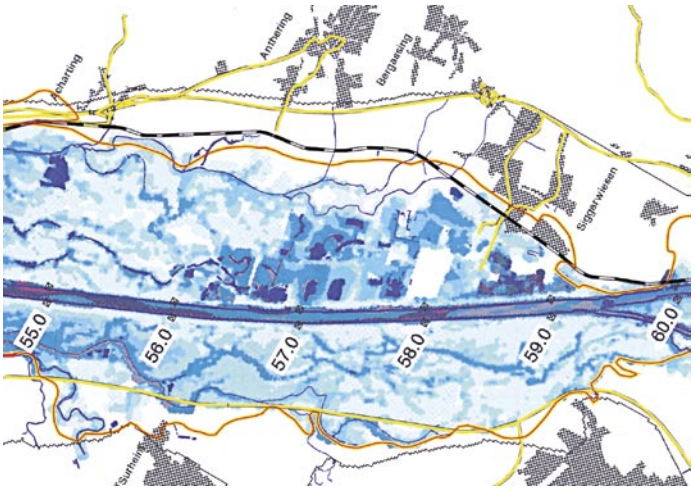


Abb. 13: Beispiel für den Vergleich zwischen beobachteter Hochwasseranschlaglinie (rot-gelbe Linie) und den mit einem 2-D-Abflussmodell berechneten Überflutungsflächen – Quelle WRS (2002)

6.1.3.2 Maßzahlen für die Anpassungsqualität

Um die Anpassungsqualität in Zahlen auszudrücken, können verschiedene Maßzahlen verwendet werden. Beispiele dafür sind:

- Absolute Differenzen zwischen Rechenwerten und Messwerten (z. B. Wasserstandsdifferenz an einem Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt oder flächige Darstellung von Wasserstandsdifferenzen in Klassen). Ein mögliches Anpassungsziel wäre z. B., dass alle Differenzen in einem Band von ± 20 cm liegen sollen.

- Relative Differenzen zwischen Rechenwerten und Messwerten (z. B. prozentuelle Abweichung des berechneten Durchflusses vom gemessenen).

- Statistische Maßzahlen wie mittlere Abweichungen und Standardabweichungen (z. B. mittlere Wasserstandsdifferenzen in einem betrachteten Gebiet). Bei statistischen Maßzahlen sind auch die maximalen Abweichungen und die Streuung der Abweichungen anzugeben. Eine mittlere Differenz von nahezu Null muss nicht unbedingt eine gute Anpassungsqualität bedeuten. Beispielsweise können die berechneten Werte in einer Hälfte des Gebiets deutlich über den Messwerten liegen und in der anderen Hälfte um die gleiche Größenordnung darunter.

Welche Maßzahlen angewendet werden, hängt zum einen von der Fragestellung und zum anderen von den vorhandenen Daten ab. Wenn nur wenige Messwerte zur Verfügung stehen, sind statistische Maßzahlen nicht anwendbar. Gilt es, ein Modell über ein Gebiet insgesamt anzupassen, wird man auf statistische Maßzahlen bzw. flächige Differenzendarstellungen zurückgreifen. Es ist auch eine Kombination von Maßzahlen denkbar, z. B. eine statistische Wasserstandsdifferenz für das Gebiet und lokale Differenzen an kritischen Punkten wie Brücken und Dämmen.

6.1.3.3 Ursachen für mangelnde Anpassungsqualität

Falls das Rechenmodell mit den zur Verfügung stehenden Messdaten nicht in Einklang zu bringen ist, kann das verschiedene Ursachen haben:

- Die verwendeten Daten sind fehlerbehaftet bzw. inkonsistent oder unvollständig (z. B. kann eine Wasserspiegelfixierung durch instationäre Abflussverhältnisse beeinflusst sein, Durchflüsse aus Zwischeneinzugsgebieten sind nicht angegeben, wären aber zu berücksichtigen). Das Beispiel in *Abb. 14* zeigt die Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Spiegellagen für drei Hochwasserereignisse an einem Teilabschnitt der Salzach. Die Rechnungen erfolgten mit konstanten Abflussscheitelangaben von einem Pegel, der weiter flussab liegt. Beim Hochwasser 1991 kam ein wesentlicher Teil des Abflusses aus dem Zwischeneinzugsgebiet. Aus diesem Grund sind die Wasserspiegeldifferenzen am Anfang größer (zu großer Abfluss in der Rechnung) und werden in Fließrichtung kleiner. Bei sorgfältiger Modellerstellung ist damit auch die Bestätigung bzw. Falsifizierung von Messdaten möglich.

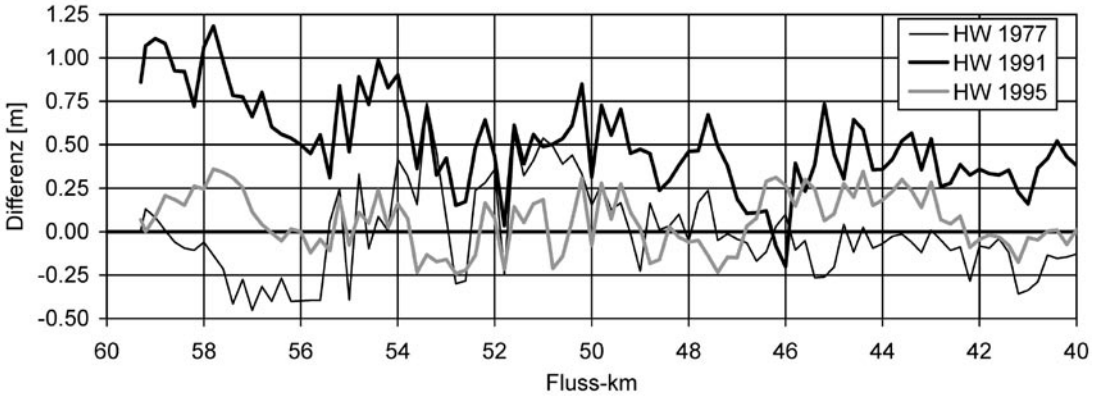


Abb. 14: Beispiel zur Auswirkung von fehlenden Abflussmengen aus dem Zwischeneinzugsgebiet auf die Modellkalibrierung – Quelle WRS (2002)

- Das Modell berücksichtigt maßgebliche Prozesse nicht (z. B. Sohlveränderungen während eines Hochwassers, zusätzliche Widerstände durch Sohlformen). Falls das Modell die Berücksichtigung dieser Prozesse, zumindest in vereinfachter Form erlaubt, sollten diese aufgenommen werden. Andernfalls ist ein besser geeignetes Modell zu wählen.

- Die Modellanwenderin bzw. der Modellanwender kennt die Möglichkeiten, die das Modell bietet zu wenig, und kann deshalb keine zufriedenstellende Kalibrierung erreichen. Der Ausbildungsstand der Modellanwenderin bzw. des Modellanwenders kann Modellergebnisse maßgeblich beeinflussen.

- Das Wissen der Modellanwenderin bzw. des Modellanwenders reicht nicht aus, um gute Schätzwerte für die Kalibrierparameter zu finden (z. B. Fließwiderstandsparameter).

Falls letztendlich eine ausreichende Anpassung nicht möglich ist, muss entweder auf die Modellanwendung verzichtet werden oder es sind bei den Modellaussagen die Einschränkungen in der Genauigkeit (Aussageunsicherheiten) extra anzuführen.

6.1.4 Methodik

Während des Kalibriervorgangs wird die Abweichung zwischen Modellergebnis und Messdaten, ausgedrückt durch Maßzahlen, minimiert. Für eine rasche und effektive Modellkalibrierung ist es wichtig, dass entweder das Modell selbst oder das verwendete Zubehör (z. B. GIS) geeignete Werkzeuge für den Vergleich zwischen Modellergebnis und Kalibrierdaten enthält (z. B. Differenzenkarten und zusammenfassende Analysen von Abweichungen). Ungeeignete Darstellungssysteme können den Aufwand und damit die Kalibrierkosten beträchtlich erhöhen.

Grundsätzlich sind zwei Methoden zu unterscheiden, um das Modell an die Messdaten bestmöglich anzupassen:

1. **Die Anpassung des Modells auf der Basis von Versuch und Irrtum**

In diesem Fall werden Modell- und fallspezifische Parameter so lange verändert, bis eine zufrieden stellende Übereinstimmung mit den Messdaten erzielt ist. Für diese Methode ist die Sensitivitätsanalyse (siehe *Kapitel 6.2)* hilfreich. Sie gibt Auskunft, wie das Modell auf die Veränderung von einzelnen Parametern reagiert. Wie rasch eine optimale Anpassung gefunden wird, hängt sowohl vom gestellten Problem als auch vom Wissen der Modellanwenderin bzw. des Modellanwenders ab.

Zwei Kalibrierphilosophien sind üblich:

a) Die Modellparameter bleiben unverändert, es werden nur die fallspezifischen Parameter in plausiblen Bandbreiten verändert (z. B. Anpassung der Rauheiten). Falls das Modell keine Veränderung der Modellparameter zulässt, muss auf diese Methode zurückgegriffen werden. Diese Methode wird auch gewählt, wenn alle Modellparameter theoretisch fundiert sind und eine Veränderung physikalisch nicht begründbar ist (z. B. Gravitätskonstante oder Zähigkeit des Wassers).

b) Modellparameter und fallspezifische Parameter werden in vorgegebenen Bandbreiten verändert. Falls das Modell eine Veränderung der Modellparameter erlaubt und diese physikalisch begründbar zu verändern sind (z. B. empirische Konstanten, die in einem Bereich schwanken können), sollte diese Methode gewählt werden.

Alle Parameter eines Modells dürfen bei der Kalibrierung nur in sinnvollen und damit begründbaren Bandbreiten variiert werden. Falls von diesem Grundsatz abgewichen wird, kann die Prognosefähigkeit des Modells massiv beeinträchtigt sein.

2. **Inverse Modellierung**

Diese Methode steht bei kommerziellen Programmen in der Regel nicht zur Verfügung. Das Modell passt Parameter automatisch an (automatische Kalibrierung), um eine möglichst gute Übereinstimmung mit vorgegebenen Messdaten zu erzielen (in der Regel Minimierung der Summe der Fehlerquadrate). Wenn es um die Anpassung vieler Parameter geht, ist diese Methode nicht nur sehr rechenaufwendig, sie muss auch nicht zur besten Anpassung führen. Der Rechenalgorithmus kann in Abhängigkeit von den Startwerten für die Parametersuche ein lokales Minimum liefern,

das von der optimalen Anpassung weit entfernt ist. D. h., für eine automatische Kalibrierung ist es wichtig, für jeden Parameter einen möglichst guten Anfangsschätzwert zu finden, der dann vom Rechenmodell über einen Optimierungsalgorithmus verbessert wird. Mit der Wahl verschiedener Schätzwerte als Ausgangsbasis für die automatische Kalibrierung können lokale Minima identifiziert werden (z. B. für die Rauheiten extrem glatt, extrem rau und einen Mittelwert ansetzen).

Die automatische Rückrechnung kann auch fiktive Parameter außerhalb der für das Modell sinnvollen Bandbreiten liefern. Beispielsweise kann ein inverses Modell Strickler-Werte als Rauheitsparameter zurückrechnen, die nicht unbedingt etwas mit der Realität zu tun haben. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse einer inversen Modellierung immer auf Plausibilität zu prüfen.

6.2 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse gibt Auskunft, wie sich die Ergebnisse des Modells bei Veränderung der Eingabegrößen in plausiblen Bandbreiten verändern und wo das Modell sehr empfindlich (mit großen Veränderungen) reagiert.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind notwendig für:

1. eine einfachere und bessere Kalibrierung. Man weiß, wie das Modell auf Veränderungen reagiert, und kann deshalb rascher eine gute Modellkalibrierung erzielen. Allen Parametern, die bei kleiner Veränderung zu großen Änderungen in den Ergebnissen führen, ist besonderes Augenmerk zu schenken.

2. die Beurteilung der Aussagequalität des kalibrierten Modells. Viele Parameter, wie z. B. die Fließwiderstände (zusammengesetzt aus Rauheiten und Formwiderständen), können nur in Bandbreiten geschätzt werden. Durch die Sensitivitätsanalyse wird klargestellt, wie sich Modellergebnisse durch Variation dieser Parameter verändern. Dies ist besonders für Bereiche wichtig, wo keine Messdaten zur Modellkalibrierung vorliegen (z. B. Extremereignisse) oder die Messdaten oft ungenügend sind (z. B. Fließwiderstand von Bewuchs, dessen Widerstandsverhalten sich mit der Vegetationsentwicklung verändert). Auch Eingangsdaten in das Modell, wie z. B. Durchflüsse, sind mit Messunsicherheiten behaftet.

3. die Beurteilung der Aussagequalität von Variantenuntersuchungen. Bei der Untersuchung von Maßnahmen im Untersuchungsgebiet wird das kalibrierte Modell mehr oder weniger verändert. Die Unsicherheiten in den Aussagen (z. B. Bandbreite der bei einem Durchfluss zu erwartenden Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten zur Beurteilung von Gefährdungen) können nur mittels Sensitivitätsanalyse erfasst werden. Besondere Bedeutung kommt hier variablen Sohlhöhen infolge morphologischer Veränderungen sowie Veränderungen der Vegetation in den Überflutungsbereichen zu.

6.2.1 Parametervariation

Bei der Sensitivitätsanalyse sind alle Parameter, die auch bei der Modellkalibrierung als veränderlich angesehen werden, in plausiblen Bandbreiten zu variieren. Für die Darstellung der Ergebnisse können dieselben Maßzahlen bzw. Grafiken wie bei der Modellkalibrierung verwendet werden.

Zusätzlich sollten noch zwei Punkte geprüft werden (sofern nicht bereits bei der Kalibrierung durchgeführt):

1. Verändert eine andere örtliche Diskretisierung das Ergebnis? In Bereichen mit starken Strömungsgradienten (z. B. nahe an einem Fließwechsel) ist eine kleinere örtliche Diskretisierung (Profilabstand bei 1-D-Modellen) erforderlich.

2. Verändert die Wahl des Zeitschritts bei instationären Berechnungen das Ergebnis? Falls das Modell keine automatische Zeitschrittwahl hat, ist dieser Punkt zu beachten. Am einfachsten erfolgt die Überprüfung mit einer Halbierung der zeitlichen Diskretisierung.

6.2.2 Variation der Eingangsdaten (Randbedingungen)

Alle Eingangsdaten in das Modell sind mit Unsicherheiten (Messunsicherheiten) behaftet. Beispiele dafür sind Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen, Durchflussangaben, aber auch Geländedaten. Aus diesem Teil der Sensitivitätsanalyse wird deutlich, wie sich Unsicherheiten in den Eingangsdaten auf die Modellaussagen auswirken. Beispielsweise wirkt sich eine Überschätzung von Geländehöhen weitgehend linear auf die Höhe der Wasserspiegel aus. Unsicherheiten in den Durchflussangaben wirken ebenfalls auf das gesamte Modellgebiet. Die Variation des Pegelschlüssels am unteren Modellrand bei strömenden Abflussbedingungen beeinflusst meist nur den Nahbereich. Falls der Pegelschlüssel am unteren Modellrand mit Unsicherheiten behaftet ist, hilft am einfachsten eine Verlängerung des Modells über den unmittelbar interessierenden Bereich hinaus.

6.3 Validierung

Mit der Validierung wird das kalibrierte Modell für gültig erklärt. Der Anwender weist damit nach, dass das Modell nicht nur für die kalibrierten Fälle anwendbar ist.

Der Begriff Verifikation (durch Überprüfung die Richtigkeit bestätigen) wird hier nicht verwendet, da man davon ausgehen kann, dass die Ergebnisse immer in irgendeiner Form von den Daten abweichen werden, also das Modell nie für alle Anwendungsfälle vollständig richtig sein kann.

6.3.1 Durchführung

Für die praktische Durchführung ist zumindest ein Satz von Messdaten erforderlich, der bei der Modellkalibrierung nicht verwendet wurde (unabhängiger Datensatz). Dieser Fall bzw. diese Fälle werden nun durchgerechnet und analog zur Kalibrierung die Differenzen zwischen Modellergebnis und Messdaten dargestellt. Die Differenzen müssen in der Bandbreite der Anpassungsqualität des Modells liegen.

Gelingt die Validierung nicht, sind folgende Schritte zu empfehlen:

1. Überprüfung der Daten auf ihre Plausibilität (soweit nicht bereits geschehen)

2. Analyse, ob die Validierungsdaten von bei der Kalibrierung nicht berücksichtigten Prozessen maßgeblich beeinflusst sind

3. Verbesserung der Kalibrierung und neuerliche Validierung.

Falls letztendlich eine Validierung mit den gewählten Anpassungszielen nicht möglich ist, muss entweder auf die Modellanwendung verzichtet werden (z. B. ein anderes Modell wählen) oder es sind bei den Modellaussagen die Einschränkungen in der Genauigkeit (Aussageunsicherheiten) extra anzuführen.

Anmerkung: In der Praxis ist es oft schwierig, einen unabhängigen Datensatz für die Modellvalidierung zur Verfügung zu haben. Aufgrund der meist geringen Datenlage ist die Versuchung groß, das Modell mit allen verfügbaren Daten zu kalibrieren, um eine möglichst gute Kalibrierung zu erzielen. Tatsächlich ist damit das Modell vielleicht nur für die vorhandenen Daten besser kalibriert. Die Zuverlässigkeit des Modells ist damit nicht unbedingt verbessert.

6.3.2 Gültigkeit des validierten Modells

Grundsätzlich gilt das validierte Modell nur für den durch die Kalibrierung und Validierung abgedeckten Bereich. Wenn mit der Modellanwendung dieser Bereich verlassen wird, ist zu prüfen, welche Auswirkungen auf die Modellaussagen damit verbunden sind. Bei der Untersuchung verschiedener Szenarien kann es leicht dazu kommen, dass der validierte Bereich verlassen wird.

Beispiel – Ermittlung des Abflusses für extreme Hochwässer, wo keine Kalibrierdaten vorliegen:

Es können Bereiche überflutet werden, für die eine Kalibrierung der Fließwiderstände wegen fehlender Messdaten nicht möglich war (Sohlrauheiten bzw. Formwiderstände). Andere Prozesse können maßgebend werden (z. B. morphologische Veränderungen im Abflussraum). Beides kann sich auf die Aussagegenauigkeit des Modells auswirken.

Beispiel – Anwendung des Modells für Flussbaumaßnahmen:

Durch Bauwerke wie z. B. Rampen können Fließwechsel auftreten und damit neue Prozesse bei der Modellanwendung maßgebend werden. Das Modell muss auch für diese Prozesse geeignet sein.

Falls im Zuge der Modellanwendung eine Schwerpunktverschiebung bei maßgeblichen Prozessen zu erwarten ist, die bei der Modellkalibrierung mangels Daten nicht zu berücksichtigen war, ist zumindest zu prüfen, ob das Modell für diese Prozesse geeignet ist (Bezug zu Modellauswahl). Die Validierung für diesen Bereich kann durch Testbeispiele bzw. Referenzprojekte erfolgen.

6.4 Beispiele

Anhand von zwei Beispielen soll exemplarisch die Sensitivität der Ortsdiskretisierung und wechselnder Fließwiderstände auf die Ergebnisse eines eindimensionalen Modells zur Berechnung von Wasserspiegellagen aufgezeigt werden. Die daraus zu ziehenden Schlüsse sind analog auf mehrdimensionale Modelle sowie andere Einflussgrößen zu übertragen.

Ortsdiskretisierung:

Ausgangsbasis bildet ein 50 m breites Gerinne mit Böschungsneigung von 1 : 3, Gefälle 2 ‰. Die Rauheit nach Strickler beträgt 30 $m^{1/3}/s$. Am unteren Ende des Kanals wird als Randbedingung eine Froude-Zahl von 0,8 angesetzt. *Abb. 15* zeigt die sich ergebenden Wasserspiegellagen in Abhängigkeit vom Profilabstand (a = 100 m, 50 m und 10 m bzw. 200 % bis 20 % der Sohlbreite) für die Durchflüsse 50 und 200 m^3/s. Wichtig ist die engere Diskretisierung im Bereich der starken Beschleunigung. Mit zunehmendem Durchfluss ist eine gröbere Diskretisierung möglich.

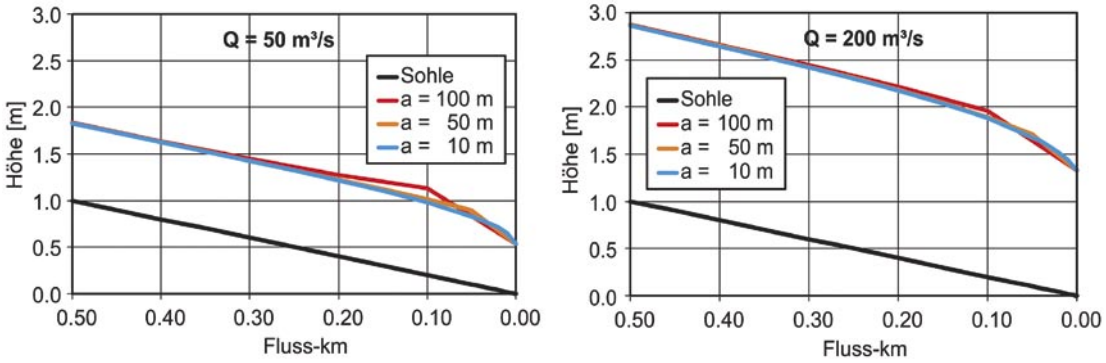


Abb. 15: Einfluss der Ortsdiskretisierung auf die Wasserspiegellagenrechnung im Bereich stark ungleichförmiger Strömungen

Nur bei entsprechend angepasster Ortsdiskretisierung kann das Modell die Wasserspiegellagen richtig wiedergeben. Der Einfluss einer falsch gewählten Diskretisierung kann sich auf weite Gebiete des Berechnungsgebiets auswirken.

Fließwiderstand:

Es wird der gleiche Querschnitt wie im vorherigen Beispiel verwendet. Die Veränderung des Stricklerbeiwerts um ± 20 % wirkt sich mit zunehmendem Durchfluss immer stärker auf den Wasserspiegel aus (siehe *Abb. 16, links).* Die äquivalente Sandrauheit k zur Berechnung des Fließwiderstands ist ein deutlich weniger sensitiver Parameter als der Stricklerbeiwert (siehe *Abb. 16, rechts).*

Setzt man an den Böschungen ab einer Höhe von 0,5 m dichten Bewuchs an, verändert sich das Rechenergebnis bei dieser Profilbreite kaum. Bei engeren Querschnitten mit maßgeblichem Abflussanteil auf der Böschung kann der Bewuchs aber deutlich Abfluss reduzierend wirken (vergl. *Abb. 16, rechts oben und unten,* s. auch Hofbauer und Habersack, 2005).

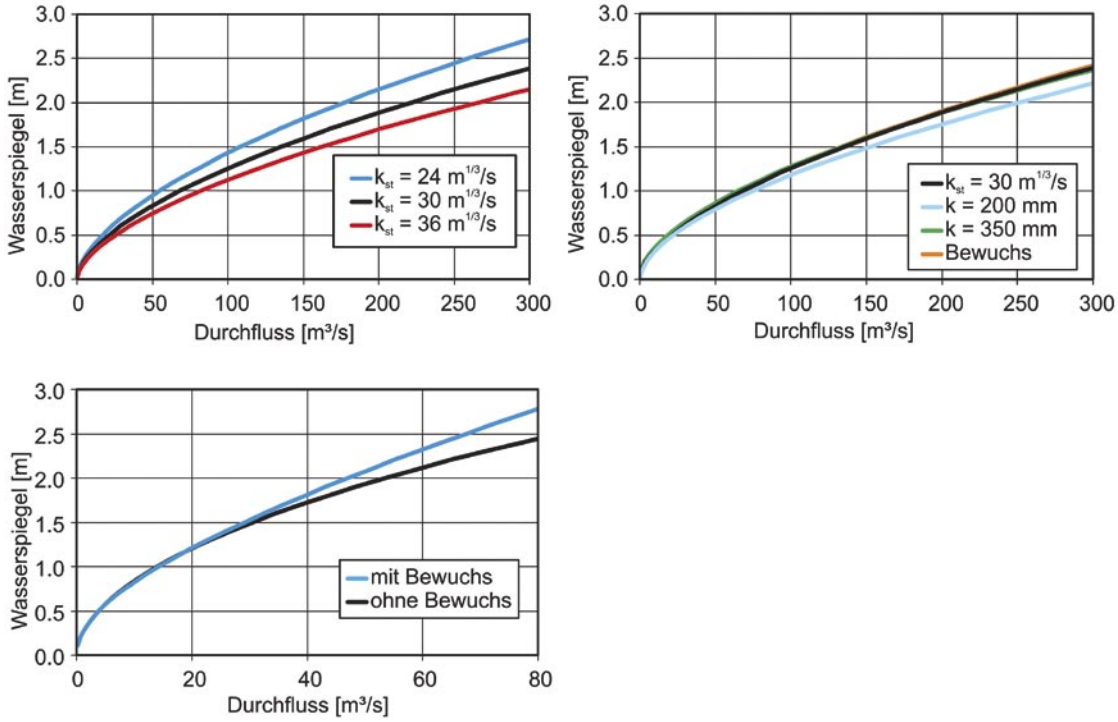


Abb. 16: Beispiel für den Einfluss des Fließwiderstands auf die Wasserspiegellagen (oben Trapezprofil b = 30 m, unten b =10 m)

Bei naturnahen Fließgewässern kann sich der Bewuchs an den Böschungen aber auch in den überströmten Vorlandbereichen mit der Zeit verändern. Dies kann sich maßgeblich auf die Wasserspiegellagen auswirken. Gleichzeitig werden auch die Sohlschubspannungen des Gewässers beeinflusst, was wiederum morphologische Veränderungen nach sich ziehen kann, die in der Planung zu berücksichtigen sind.

6.5 Literatur

Beard, Leo R. (1994): Anatomy of Best Estimate. *Journ. of Hydr. Eng.,* Vol. 120, No. 6, p. 679–692

Bürgisser, Martin (1999): Numerische Simulation der freien Wasseroberfläche bei Ingenieurbauten. VAW-Mitt. 162, ETH Zürich

Drobir et al. (Hrsg.) (1995): Mathematische Modelle offener Gerinne. ÖWAV-Seminar, Konstruktiver Wasserbau / Landschaftswasserbau, Band 17. TU Wien

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

Feist, Michael (1997): Entwurf eines Modellierungssystems zur Simulation von Oberflächengewässern. Inst. f. Strömungsmechanik u. elektron. Rechnen im Bauwesen, Univ. Hannover, Bericht Nr. 50

Habersack, H. M., Mayr, P., Gierlinger, R., Schneglberger, St. (2000): Mehrdimensionale Abflussmodellierung am Beispiel der Lafnitz, Wiener Mitteilungen, Bd. 165

Hengl, Michael (1988): Zur hydraulischen Modellierung des Abflusses in offenen Gerinnen als instationärer bzw. stationärer eindimensionaler Vorgang. Dissertation. Technische Universität Wien

Hofbauer, S., Habersack, H. (2005): Hochwasser und Vegetation – Wasserbaulicher Modellversuch Kamp. In: Heigerth, G.: Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft 43, 67–72; Verlag der Technischen Universität Graz, Graz

Januszewski, Ulrich (1980): Automatische Eichung für ein- und zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Flachwassermodelle. Fortschrittberichte der VDI, Reihe 4, Nr. 58. VDI-Verlag

Nobar, P. R., Stavropolou, D., Williams, J. J. R. (1993): Response Functions for River Model Calibration. XXV IAHR Congress Tokyo, Japan, Vol. I, p. 209–216

Nujic, Marinko (1998): Praktischer Einsatz eines hochgenauen Verfahrens für die Berechnung von tiefengemittelten Strömungen. Institut f. Wasserwesen, Univ. Bundeswehr München, Mitteilungen, Heft 62

Schindler, Manfred (2001): Mehrdimensionale Simulation von Freispiegelströmungen mit der Finiten-Element-Methode. Hydraulik und Gewässerkunde, TU München, Mitteilungen, Nr. 68

Sinha, S. K., Sotiropoulus, F., Odgaard, A. J. (1998): Three-Dimensional Numerical Model for Flow through Natural Rivers. *Journ. of Hydr. Eng.,* Vol. 124, No. 1, p. 13–24

WRS (2000): Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchung Salzach, Fachbericht 2. 2-D-Abfluss-Simulation. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München

WRS (2002): Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchung Salzach, Fachbericht 4. Geschiebetransportmodellierung. Amt der Salzburger Landesregierung, Fachabteilung Wasserwirtschaft

7 Visualisierung und Präsentation

7.1 Einleitung

Die Visualisierung soll die Verbindung zwischen den Daten und dem Benutzer ermöglichen. Sie hat sich in den letzten Jahren zu einem eigenständigen Forschungs- und Entwicklungsbereich in der Computerwissenschaft entwickelt. Sie unterstützt den Benutzer in der Analyse, Erforschung und Präsentation seiner Daten. Die Visualisierung von Strömungen erstreckt sich u. a. auf folgende Fachgebiete: Meteorologie (Wettervorhersage), medizinische Applikationen (Blutströmungen), Aerodynamik, Automobilindustrie, Hydraulik/Wasserbau etc. Die Optionen der Darstellungsmöglichkeiten sind vielfältig: 2-D, 3-D, stationär/instationär, zeitabhängige Größen etc., wobei der Datenursprung auf Strömungsmessungen (Labor, Prototyp) und den Ergebnissen von numerischen Modellen basiert.

Üblicherweise wird im Zuge einer Strömungsvisualisierung eine große Menge an multivariaten Datensätzen verarbeitet. Diese Datensätze bestehen aus einer Vielzahl an örtlichen Datensätzen und Zeitschritten. Die ständig steigende Leistung von Rechenanlagen wurde zu einem bestimmenden Faktor für eine neue Art der Strömungsvisualisierung, besonders bei den sogenannten strukturorientierten Techniken. Diese Technik ermöglicht eine engmaschige bzw. dichte Darstellung des Strömungsfelds mit einer großen zeitlich-räumlichen Übereinstimmung.

In den folgenden Kapiteln wird anfangs die eigentliche „Flow Visualization“ im Überblick dargestellt. Im Anschluss werden Beispiele für Anwendungen präsentiert.

7.2 Strömungsvisualisierung (Flow Visualization)

7.2.1 Überblick

Die Visualisierung von Strömungen beinhaltet ein breites Spektrum an technischen Möglichkeiten, wie z. B. 2-D- bzw. 3-D-Strömungen, stationäre Strömungen mit der ortsabhängigen Geschwindigkeit, instationäre Strömungen mit Orts- und Zeitabhängigkeit der Geschwindigkeit etc. In Abhängigkeit vom Anspruch des jeweiligen Benutzers präsentieren sich verschiedene Herangehensweisen an die Lösung.

Die direkte Übertragung des Strömungsfelds wäre die Darstellung der Geschwindigkeiten mittels Vektoren. Um das Langzeitverhalten der Strömung zu veranschaulichen, bieten sich Darstellungen in der Form von Strömungslinien an. Ein weiterer Schritt in Richtung einer komplexeren Darstellung wäre die Berücksichtigung einer Vielzahl von Zeitschritten für instationäre 3-D-Strömungen.

Im Folgenden werden prinzipiell die drei o. a. Möglichkeiten einer Strömungsvisualisierung (direkte bzw. indirekte Strömungsvisualisierung, unter Verwendung integrierter Objekte, auf der Grundlage abgeleiteter Daten) dargestellt.

7.2.2 Direkte bzw. indirekte Strömungsvisualisierung

Die direkte Strömungsvisualisierung beinhaltet einen Überblick über den Jetztzustand der Strömung, eine Visualisierung durch Vektoren, Pfeildarstellungen und sogenannte Verwischtechniken. Der Vorteil liegt in dem minimalen Berechnungsvorgang zwischen einer Datenübernahme und der Übertragung. Hauptanwendungsgebiete sind 2-D- bzw. 3-D-Darstellungen und Visualisierungen in Schnittflächen bzw. Berandungen, die auch transparent abgebildet werden können.

Die indirekte Strömungsvisualisierung beinhaltet die Vektorfeldintegration über die Zeit (Verwendung einer Zwischenrepräsentation), die Visualisierung der zeitlichen Entwicklung einer Strömung, die Darstellung von Strömungslinien und Strömungsflächen.

Im Allgemeinen werden die Abflussgrößen (Geschwindigkeit, Druck, Temperatur) mittels Iso-Farbflächen in einem geeigneten Maßstab farblich dargestellt. Konturen erweitern die Darstellung von Übergangsbereichen, die Geschwindigkeitsvektoren werden durch Pfeile dargestellt. Diese können entweder größennormiert zur Darstellung der Strömungsrichtung bzw. an die Abflussgröße angepasste Pfeillängen sein. In Ergänzung der oben angeführten Elemente dient die hybride Visualisierung zur simultanen Darstellung verschiedener Werte (z. B. Pfeile und Farbflächen).

7.2.3 Strömungsvisualisierung unter Verwendung integrierter Objekte

Diese Art der visuell komplexen Darstellung erfordert einen hohen Aufwand für Rechenleistungen und einen entsprechend großen Speicherplatz. Diese Technik eignet sich zur Darstellung einzelner Punkte im Strömungsfeld. Allerdings muss der größere Aufwand berücksichtigt werden, der für Punkte notwendig ist, die sich im Strömungsfeld innerhalb eines kleinen Zeitschritts bewegen (Darstellung über mehrere Zeitschritte).

Es handelt sich hierbei um 2-D- bzw. 3-D-Darstellungen von Strömungsstrichen, -linien bzw. -röhren, Zeitlinien, Strömungsvektoren, Strömungs-„Büscheln“, Strömungsspuren und Strömungspolygonen (Darstellung von Vektoren und Tensoren mittels eines Zylinders mit polygonalem Querschnitt). Strömungskugeln, geeignet für die Darstellung von z. B. Beschleunigungen und Zeitflächen für die volumenhafte Darstellung von Strömungen, ergänzen die o. a. Möglichkeiten. Die Darstellungen beinhalten darüber hinaus Vektorfelder, die mit sogenannten „Merkpunkten“ gefüllt sind, die Auflösung des Strömungsfelds in eine Vielzahl an einzelnen Punkten und bewegte Datenstrukturen (für flächenhafte Darstellungen).

7.2.4 Strömungsvisualisierung auf der Grundlage von abgeleiteten Daten

Diese Methodiken erfordern den größten Aufwand zwischen Datenherleitung und Auswertung seitens des Anwenders. Dafür bieten sie eine sehr anschauliche Darstellungsmöglichkeit, z. B. unter Verwendung der Strömungstopologie oder Ähnliches. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass sich diese Darstellungsart umso mehr eignet, je umfangreicher sich der Datenbereich einer Strömung darstellt.

Die Visualisierung kann dabei auf der Grundlage der Strömungsparameter oder etwa der Topologie dargestellt werden, wobei die benötigte Information maßgebend ist.

7.3 Darstellungsbeispiele

7.3.1 Allgemeines

Allgemein kann festgehalten werden, dass jedes Softwarepaket eigene Möglichkeiten mit mehr oder weniger umfangreichen Eigenschaften zur Visualisierung von Strömungen bietet. Die Möglichkeiten reichen dabei von tabellarischen und grafischen bis zu animierten Darstellungen. Darüber hinaus bieten einige Firmen eigene Visualisierungsprodukte an. Dabei ist darauf zu achten, dass die Komplexität der Darstellung die Aussage nicht überlagert. Zusätzliche Möglichkeiten liegen in der Weiterverarbeitung und -behandlung der erzielten Ergebnisse.

Bei der Auswahl eines bzw. mehrerer Produkte ist es daher notwendig, die Ziele der Aussage auf die Möglichkeiten abzustimmen bzw. gegebenenfalls eine entsprechende Zusatzsoftware zu verwenden.

7.3.2 Tabellen

Eingabedaten:

- Profil-Stationierung, Nummer
- Profilabstände linkes Vorland / Flussschlauch / rechtes Vorland
- Geländeprofil, Einbauten (Brücken, Wehre, Durchlässe), Lichtraumprofil
- Uferbord links / rechts
- Ausuferungspunkt links / rechts
- Hydraulische Grenzen links / rechts
- Rauigkeitsart, Rauigkeiten mit Grenzen.

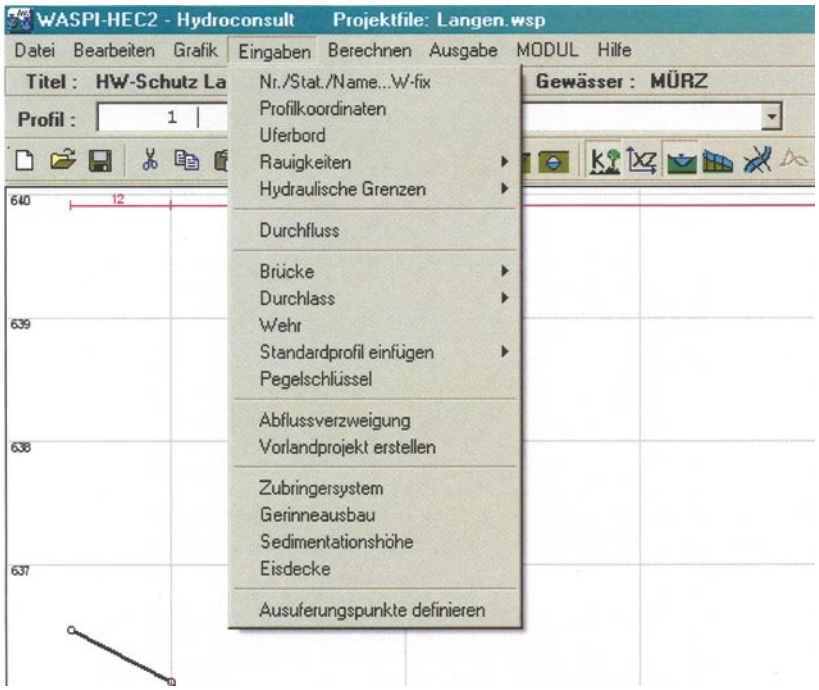


Abb. 17: Eingabemöglichkeiten (Beispiel WASPI 3.0)

Berechnungsergebnisse:

- Berechnungsart Strömen und/oder Schießen
- Wasserspiegelhöhe
- Energielinienhöhe
- Energieliniengefälle
- Grenzwasserspiegelhöhe
- Fließgeschwindigkeit, Mittel, linkes Vorland / Flussschlauch / rechtes Vorland
- Geschwindigkeitshöhe
- Froud'sche Zahl, gesamt, linkes Vorland / Flussschlauch / rechtes Vorland
- Wassertiefen Maximum, Mittel, linkes Vorland / Flussschlauch / rechtes Vorland
- Wasserspiegelbreite, gesamt, linkes Vorland / Flussschlauch / rechtes Vorland
- Stationierung der Anschlagpunkte
- Abfluss gesamt, linkes Vorland / Flussschlauch / rechtes Vorland mit Prozentanteilen
- Abflussaufteilung bei Brücken und Durchlässen (Überströmung, Druck, Freispiegel)
- Abflussquerschnitt, gesamt, linkes Vorland / Flussschlauch / rechtes Vorland
- Abflussfläche, Profilabschnitt, ab 1. Profil
- Abflussvolumen, Profilabschnitt, ab 1. Profil
- Sohlschleppspannungen, Mittel., maximal, linkes Vorland / Flussschlauch / rechtes Vorland
- Reibungsverluste, Übergangsverluste, Gesamtverluste für Profilabschnitt
- Verzweigungsabfluss bei seitlichen Überströmungen u. a. Verzweigungen
- Hydraulischer Radius, benetzter Umfang
- detaillierte Abflussverteilung, Geschwindigkeitsverteilung.

Ergebnisübersicht (Berechnung für Strömen)

Nummer km Bezeichnung	Wm Pro-Int ö/i/tgr	He[m] Wgr[m] dW[m]	v-li v-fl v-re	v-m [m/s] v2/2g	A-li A-fl A-re	Q[m3/s] gesamt A[m2]	Q-li Q-fl Q-re	R[m] U[m]	t[m] max.	Ie [o/oo] ks-fl	Fr-ges Fr-fl Alpha	S-m [N/m2]	X-li X-re Wsp-B
1	635.31	635.70	0.00	2.77	0.0	259	0	2.9	0	2.1	0.5	0	1.28
44.863		0.00	2.77		93.5		259	32.5	3.87		0.5	63.4	31.42
MBV5		0.00	0.00	0.39	0.0	93.5	0		0	30	1.0	0	30.14
Lauf_ 1													
2	635.54	635.76	0.00	2.10	0.0	259	0	3.2	0	1.2	0.4	0	1.83
44.892		0.00	2.10		123.6		259	38.8	4.04		0.4	38.9	37.99
MBV6		0.23	0.00	0.22	0.0	123.6	0		0	28.4	1.0	0	36.16
Lauf_ 1													
3	635.56	635.82	0.60	2.09	13.5	240.7	8.157	1.9	4.36	0.9	0.4	10.3	4.01
44.941		0.00	2.29		101.4		232.6	59.4	4.36		0.4	37.2	39.50
KW-Mitterber		0.02	0.00	0.26	0.0	114.9	0		0	40	1.2	0	35.49
Lauf_ 1													
4	635.56	635.83	0.60	2.15	10.8	240.7	6.455	1.7	4.36	0.9	0.4	10.3	6.12
44.946		0.00	2.31		101.3		234.3	64.6	4.36		0.4	37.8	39.50
KW-Mitterber		0.00	0.00	0.27	0.0	112.2	0		0	40	1.1	0	33.38
Lauf_ 1													
5	637.56	638.68	0.00	4.69	0.0	240.7	0	1.1	0	7.7	1.0	0	15.50
44.959	int-1	637.56	4.69		51.3		240.7	45.2	3.06		1.0	163	39.50
Wehr KW-Mitt	tgr	1.99	0.00	1.12	0.0	51.3	0		0	40	1.0	0	23.00
Lauf_ 1													
6	638.59	638.81	0.00	2.08	0.0	240.7	0	2.5	0	1.4	0.4	0	4.98
44.976	int-1	0.00	2.08		115.9		240.7	45.8	4.42		0.4	37.3	47.35
MB07		1.03	0.00	0.22	0.0	115.9	0		0	30	1.0	0	42.37
Lauf_ 1													
7	638.48	638.93	0.00	2.97	0.0	240.7	0	2.6	0	2.7	0.6	0	14.85
45.003		0.00	2.97		81.2		240.7	31.1	3.54		0.6	77.4	42.85
neu		-0.10	0.00	0.45	0.0	81.2	0		0	30	1.0	0	28.00
Lauf_ 1													
8	638.28	639.21	0.00	4.26	0.0	240.7	0	2.3	0	6.6	0.8	0	9.70
45.032		0.00	4.26		56.4		240.7	24.5	3.2		0.8	175	30.70
unter MB08		-0.20	0.00	0.93	0.0	56.4	0		0	30	1.0	0	21.00
Lauf_ 1													

Schließen | Hilfe | Drucken | Umsort. | Vol. | akt.Seite: 1/7 | Ergebnisübersicht

Abb. 18: Berechnungsergebnisse, WASPI 3.0

Die Standard-Ergebnistabelle kann optional um zahlreiche Werte erweitert werden, wie z. B. Abflussvolumina. Die Volumina werden allerdings im 1-D-Berechnungsfall nur durch Mittelung der Abflussquerschnitte zwischen jeweils aufeinander folgenden Profilen und deren Abstand näherungsweise berechnet.

7.3.3 Diagramme

Die Darstellungsmöglichkeiten beziehen sich auf: Punktwolken, Liniendarstellungen, Balkendiagramme, in logarithmischen/halb-logarithmischen und Polarkoordinaten-Darstellungen, Ausgleichskurven in jeder beliebigen Funktion.

Bei vielen 2-D-Programmen ist die tabellarische Ausgabe bzw. die Ausgabe von Diagrammen nur begrenzt möglich und die Ausgabe im Wesentlichen auf flächige Darstellungen beschränkt.

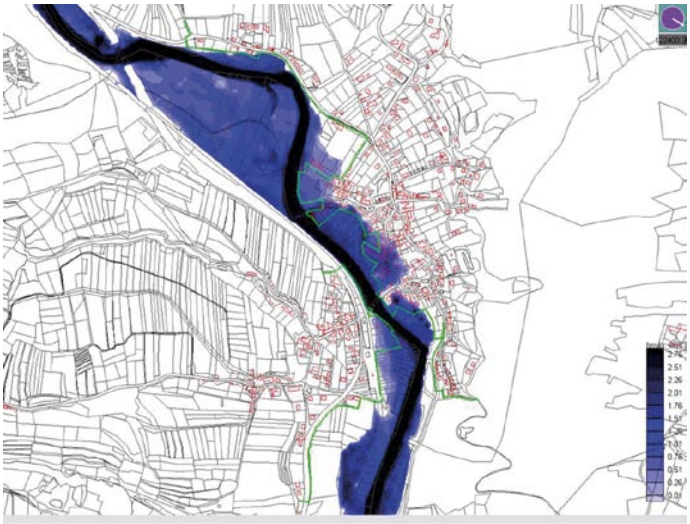


Abb. 19: Visualisierung der Wassertiefen einer HQ_{100}-Abflussmodellierung (507 m^3/s) mit Hydro-As_2D im Ortsgebiet von Schönberg am Kamp (Arge Kamp, 2005)

7.3.4 Lagepläne

- Kataster oder Luftbild, ev. Höhenschichtenlinien, Vermessungspunkte mit Höhen, vermessene Tal-/Flussprofile, Gewässerachse mit Stationierung, Zubringer
- Brücken, Durchlässe, Wehre, Schwellen, Pegel u. a. Bauwerke, Wasserrechte
- Anschlaglinien für HQ_n (meist HQ_{30}, HQ_{100}) mit flächiger Darstellung der Überflutungsflächen
- Gefahrenzonen (rote und gelbe Zone, sonstige Gefahren wie Verklausungen, Geschiebeeinstöße, Qualmwasseraustritte)
- Lage der Querprofile, Stationierung und Profilnummer mit Ergebnisblock für HW, HQ, Q-bordvoll links- und rechtsufrig
- Getrennte Ergebnisblöcke für Vorländer und Flussschlauch, falls erforderlich
- Abflussmengen in Vorländern, bei Verzweigungen und seitlichen Überströmungen
- Fließpfeile bei Ausuferungen und in Vorländern
- Fotostandpunkte mit Nummer, Aufnahmerichtung (mit Kataster oder Luftbild).

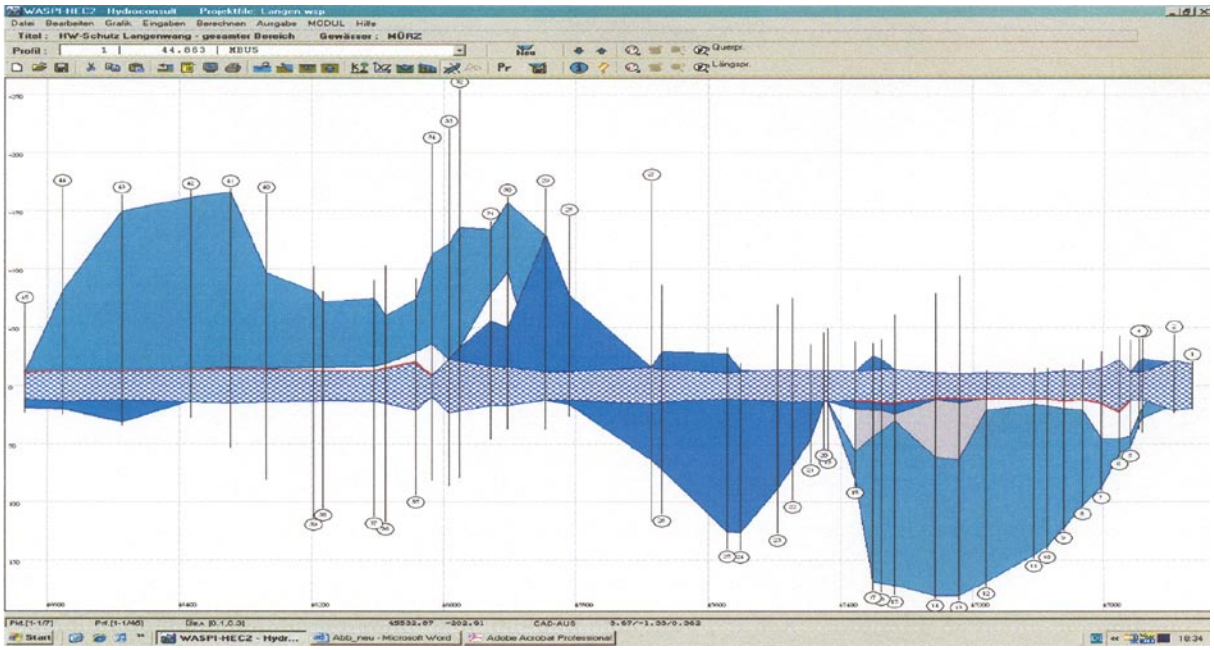


Abb. 20: Lageplan des Flusses mit Darstellung Vorlandabfluss, hydraulische Grenzen etc. aus WASPI 3.0

Die meisten 1-D-Programme bieten keine automatische Darstellung eines lagerichtigen Lageplans. Dies ist oft, wie z. B. in *Abb. 20* gezeigt, nur als schematischer Lageplan (gestreckte Darstellung des Flussschlauchs) möglich. In 2-D-Programmen wird der Lageplan jedoch meist direkt als Ergebnis erhalten. Vorsicht ist geboten bei der Darstellung der Anschlaglinien, da die Programmausgabe in den Randbereichen oft nicht den exakten Verschnitt der Wasserspiegelfläche mit dem Gelände wiedergibt, wie z. B. beim häufig verwendeten SMS (Surface Modeling Software, Brigham University, USA).

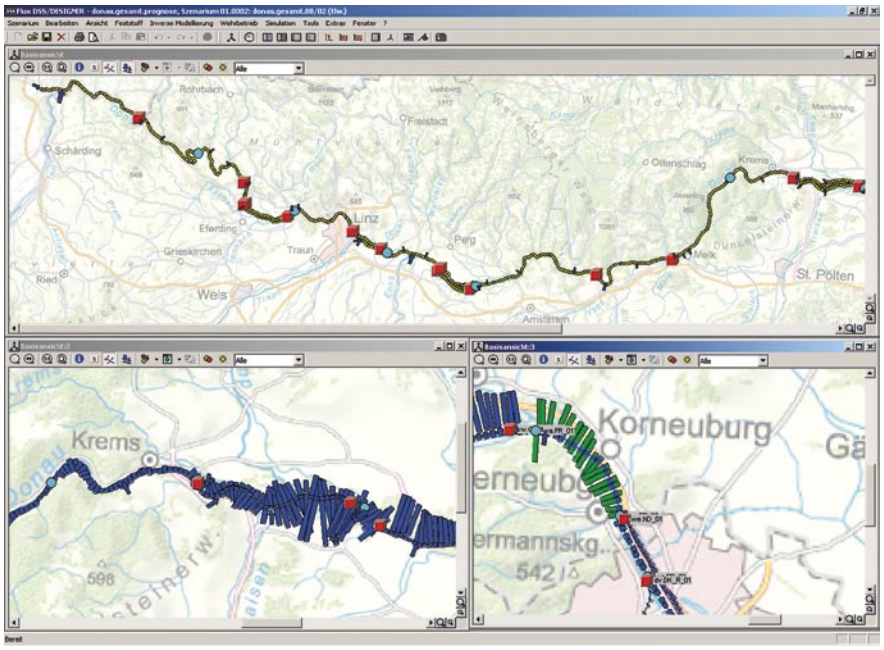


Abb. 21: Lageplan Donau bei Krems aus FLUX/DSS/Designer

7.3.5 Querprofile

- Geländeprofil mit (Quer-)Stationierungen der Punkte, Wasserspiegellagen, Uferborde, Ausuferungspunkte, hydraulische Grenzen, Rauigkeiten, ev. Tabelle der wichtigsten Ergebnisse (W_i, Q_i, v_i), Profilabstände
- Einbauten (Brücken, Durchlässe etc.).

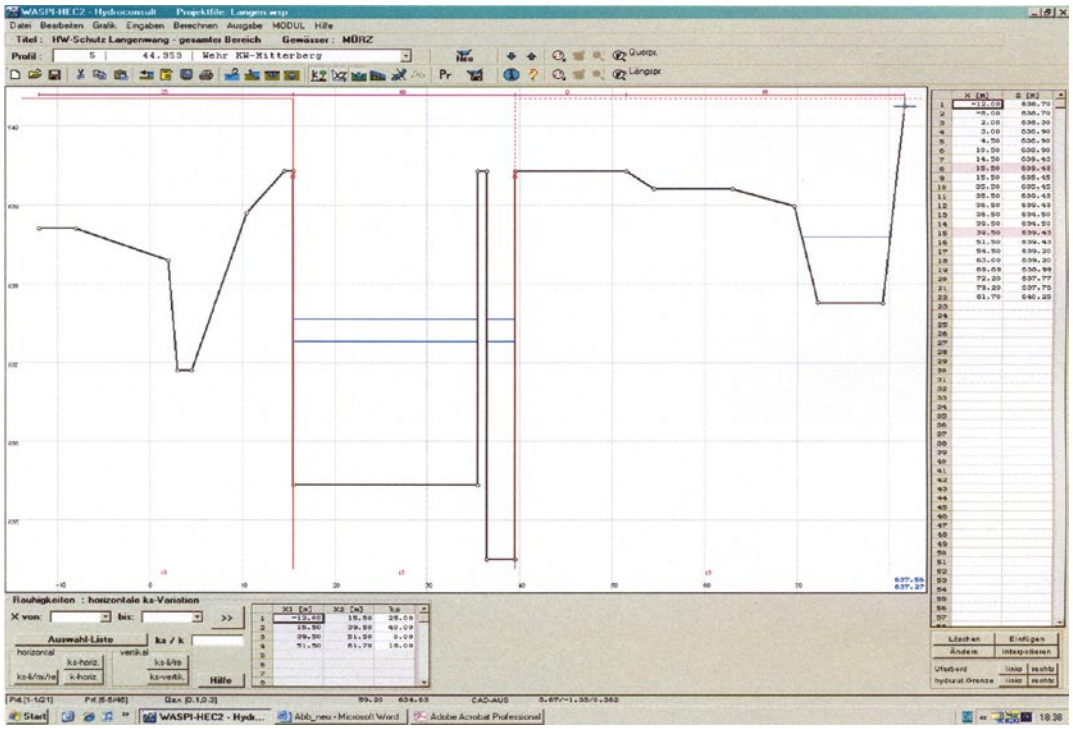


Abb. 22: Querprofil mit Darstellung Vorlandabfluss, hydraulische Grenzen etc. Beispiel Bildschirmdarstellung aus WASPI 3.0

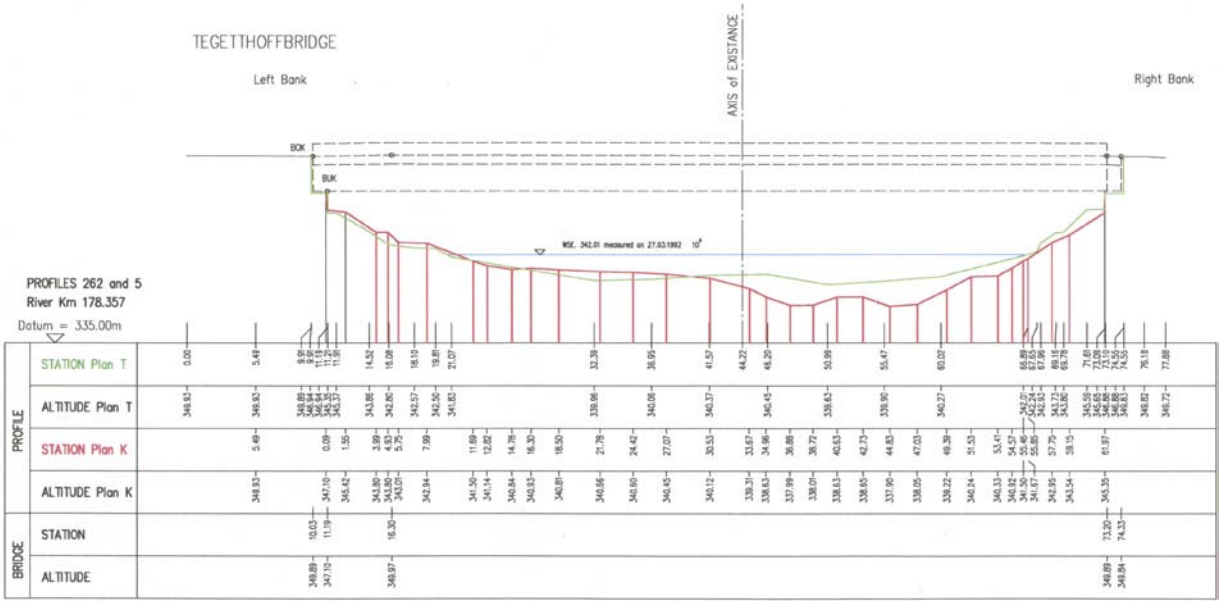


Abb. 23: Querprofil in einem Brückenprofil, Beispiel aus SMS

7.3.6 Längsprofile

- Tiefster Sohlpunkt (Thalweg), Uferborde bzw. Ausuferungspunkte, Wasserspiegellagen, Einbauten (Brücken, Durchlässe, Wehre, Schwellen) mit Bezeichnung, Sonderbauwerke, Zubringer
- Beschriftungsband mit Stationierung, Profilnummer, Wasserspiegel, Uferborde/Ausuferungspunkte
- Angaben für Flussschlauch: Sohlgefälle, Sohlschleppspannungen, Fließgeschwindigkeit, Durchfluss (Talabfluss und Abfluss im Flussschlauch).

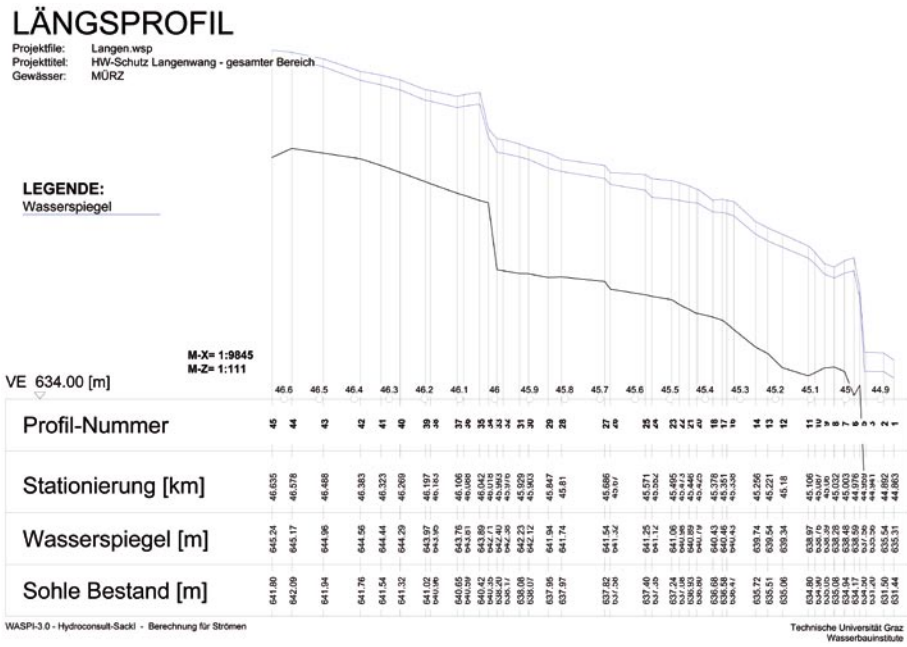


Abb. 24: Längsprofil, Darstellung der Sohle, der Wasserspiegellagen, Lage der Querprofile, Beispiel Bildschirmdarstellung aus WASPI 3.0

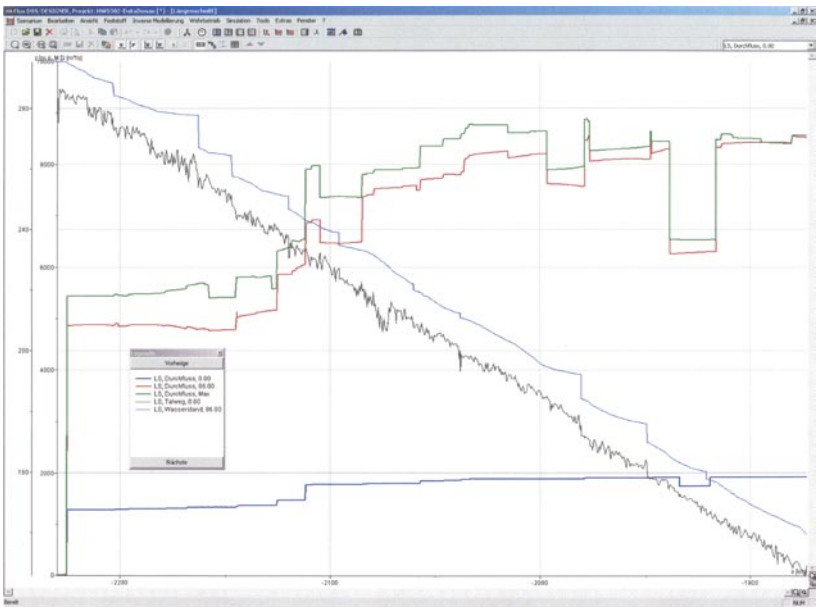


Abb. 25: Längenschnitt der Donau/Melk aus DSS/FLUX/Designer

7.3.7 Hydrologisches Längsprofil

- HQ_n-Verlauf entlang des Längsprofils, A_E-Entwicklung, Zubringer, Querprofile.

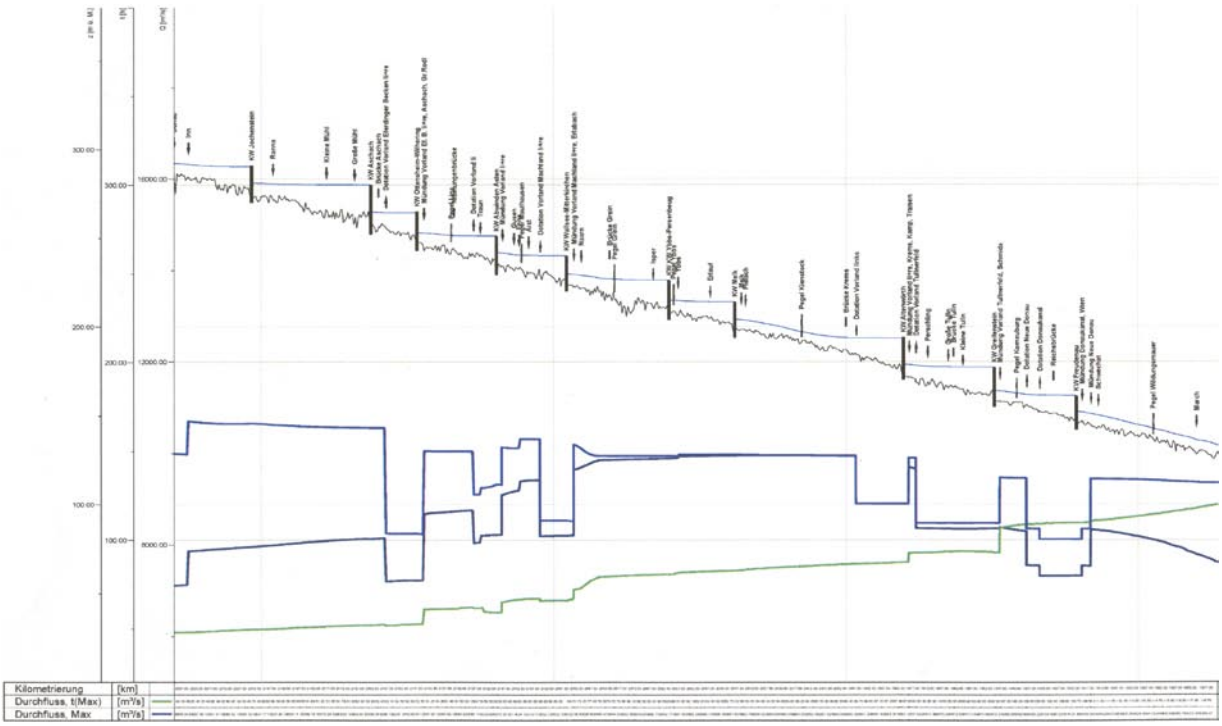


Abb. 26: Hydrologischer Längenschnitt Donau aus DSS/FLUX

7.3.8 Darstellung in axonometrischer Ansicht

- Geschwindigkeits- und Schleppspannungsverlauf, Rauigkeiten
- Wasserspiegellage, Sohle.

7.3.9 Gitternetze

- Darstellung von 1-D-, 2-D- und 3-D-Gitternetzen. Einfärbung, Darstellung (sichtbar/unsichtbar, Art und Form der Linie) der Gitternetzlinien in Abhängigkeit von ihrer Variabilität.

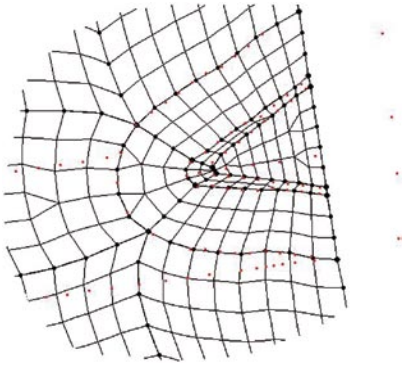


Abb. 27: Gitternetzlinien im Bereich einer Buhne, SMS

7.3.10 Konturen

Die Einstellungsmöglichkeiten beziehen sich auf eine Vielzahl an Parametern:

- Automatische oder definierte Bereiche bzw. Intervalle, Farbzuweisungen, Formate
- Flächenfüllung zwischen den Konturlinien
- Axonometrische Darstellung
- Unabhängige Skalierung in die x- und y-Richtung
- Überlagerung verschiedener Konturbereiche, Vektordarstellungen etc.
- Einbindung von Konturen in 3-D-Darstellungen.

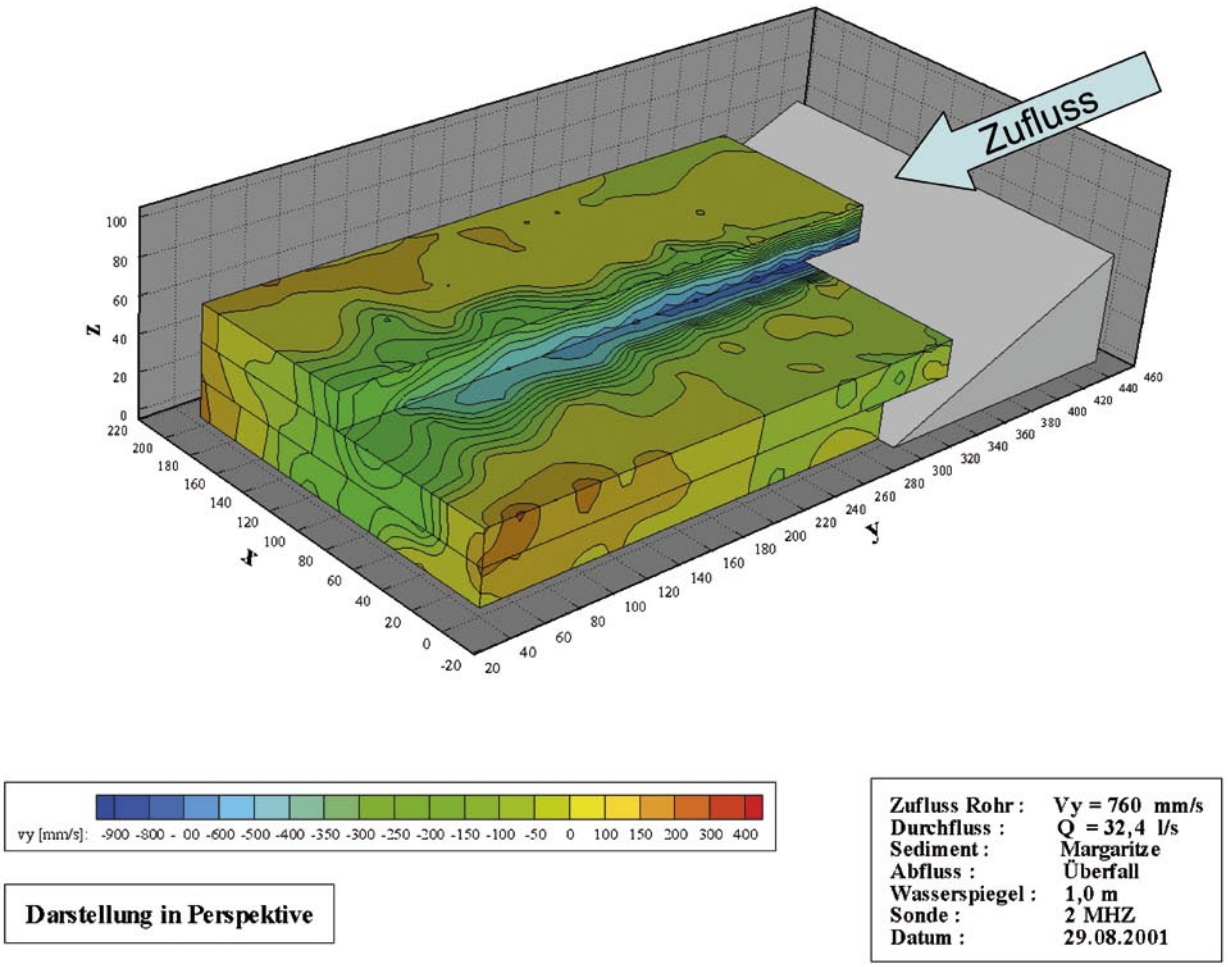


Abb. 28: Geschwindigkeitsfelder bei der Zuströmung in ein Speicherbecken, Darstellung in Perspektive, TECPLOT

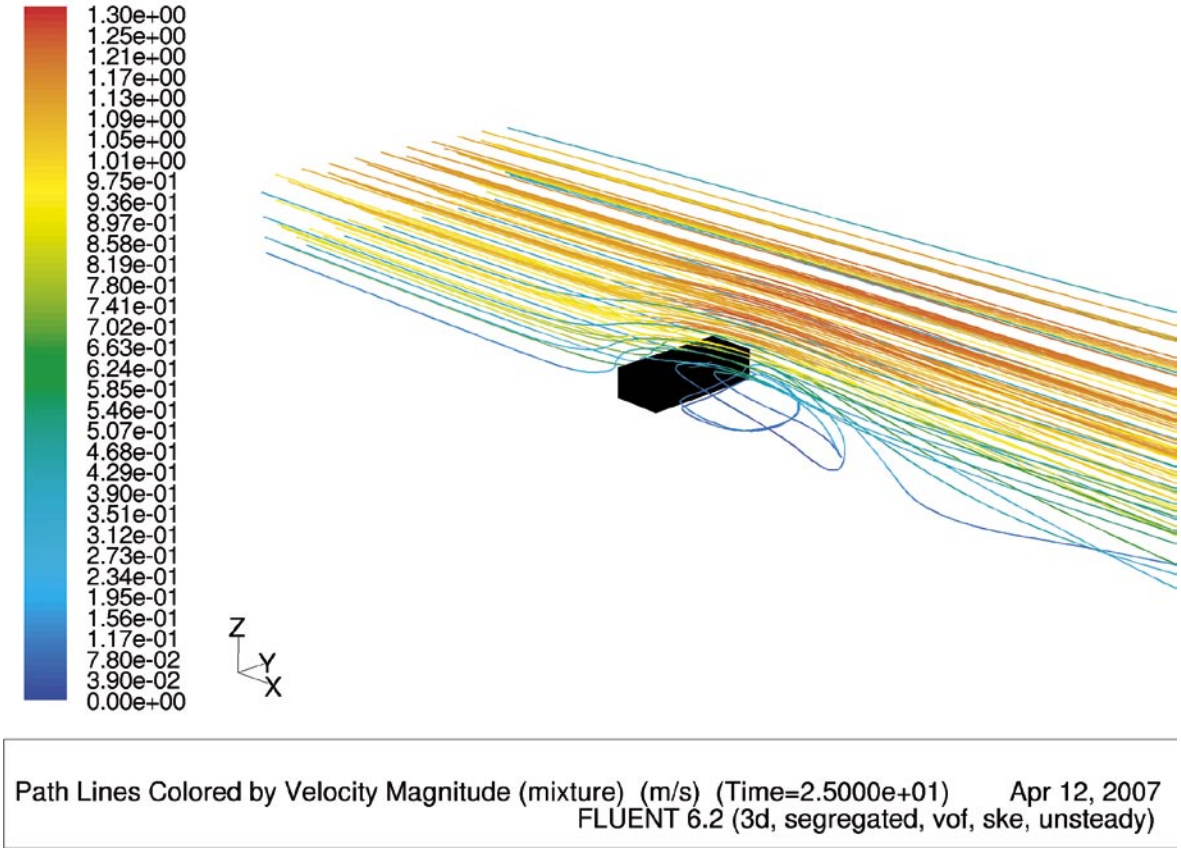


Abb. 29: Strömungslinien mit Darstellung der Geschwindigkeitswerte bei Überströmung einer Buhne, FLUENT 6.2

7.3.11 Vektoren

- Darstellung von 2-D- und 3-D-Vektoren in der Ebene, in 3-D-Flächen und Volumina; Strömungslinien im Vektorfeld.

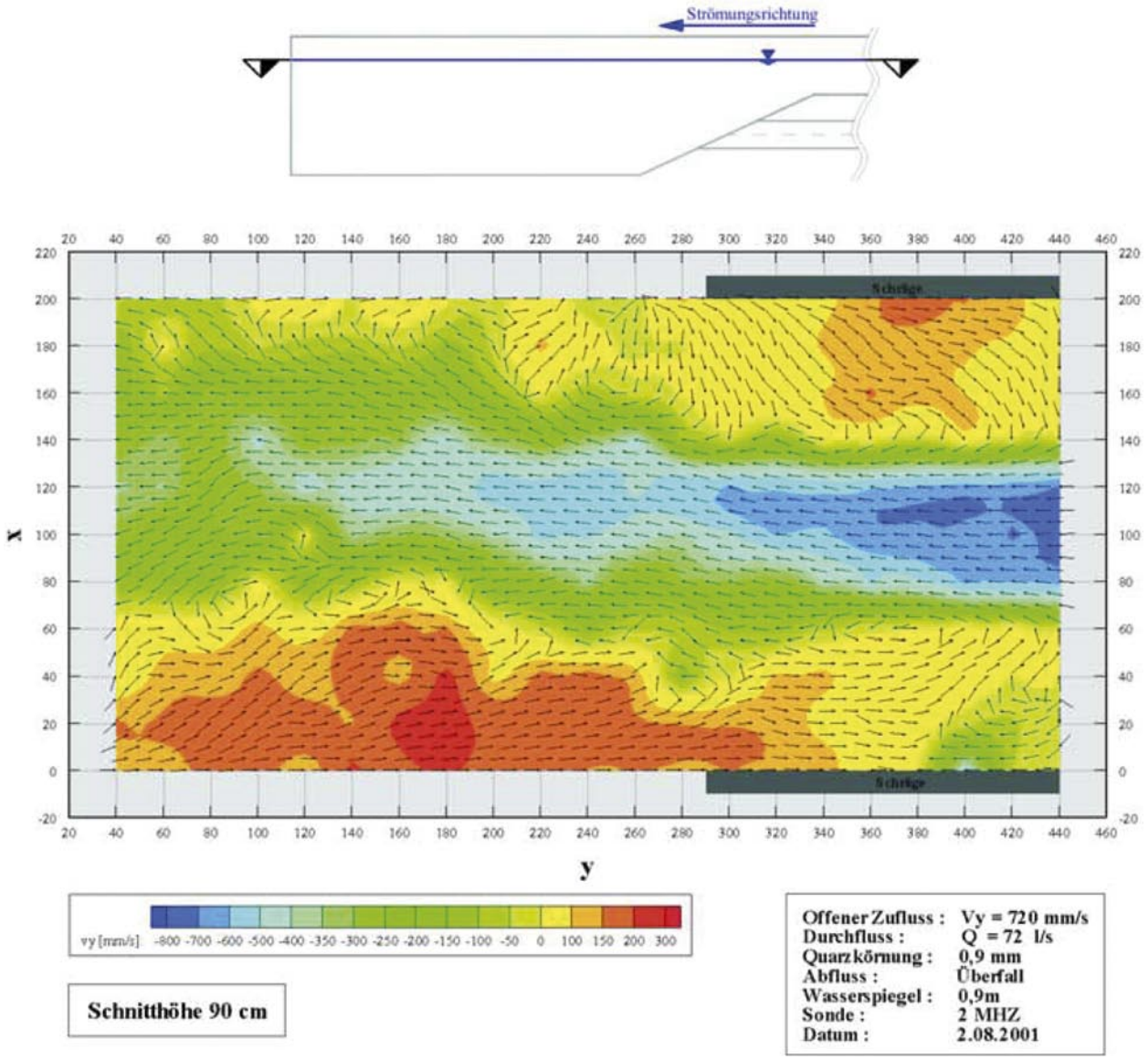


Abb. 30: Geschwindigkeitsvektoren und -felder bei der Zuströmung in ein Speicherbecken, TECPLOT

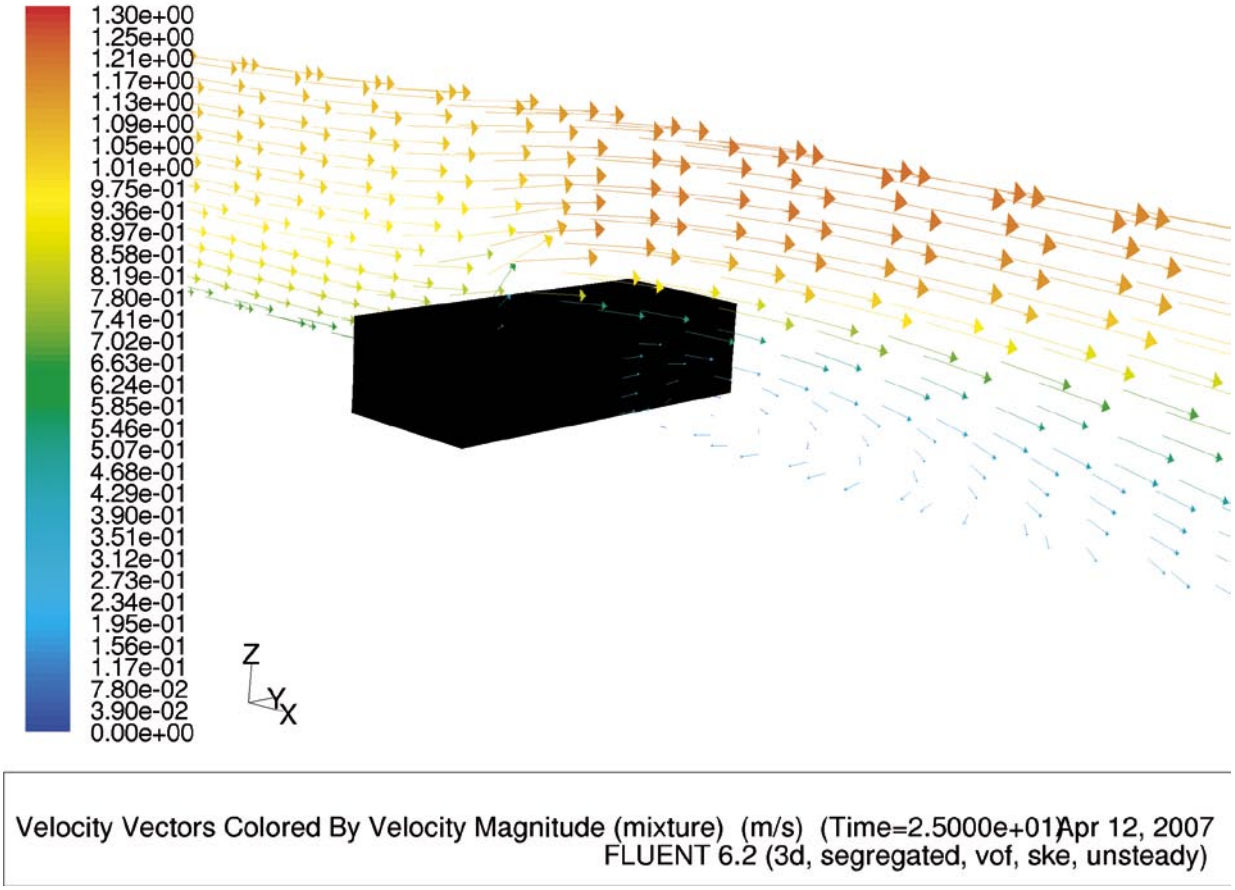


Abb. 31: Geschwindigkeitsvektoren mit farblicher Darstellung der Größen bei Überströmung einer Buhne, FLUENT 6.2

7.3.12 Punktwolken

- Darstellung von 2-D- und 3-D-Symbolen in den Datenpunkten.

7.3.13 Kombinierte Darstellungen

- Kombination diverser Darstellungsmöglichkeiten.

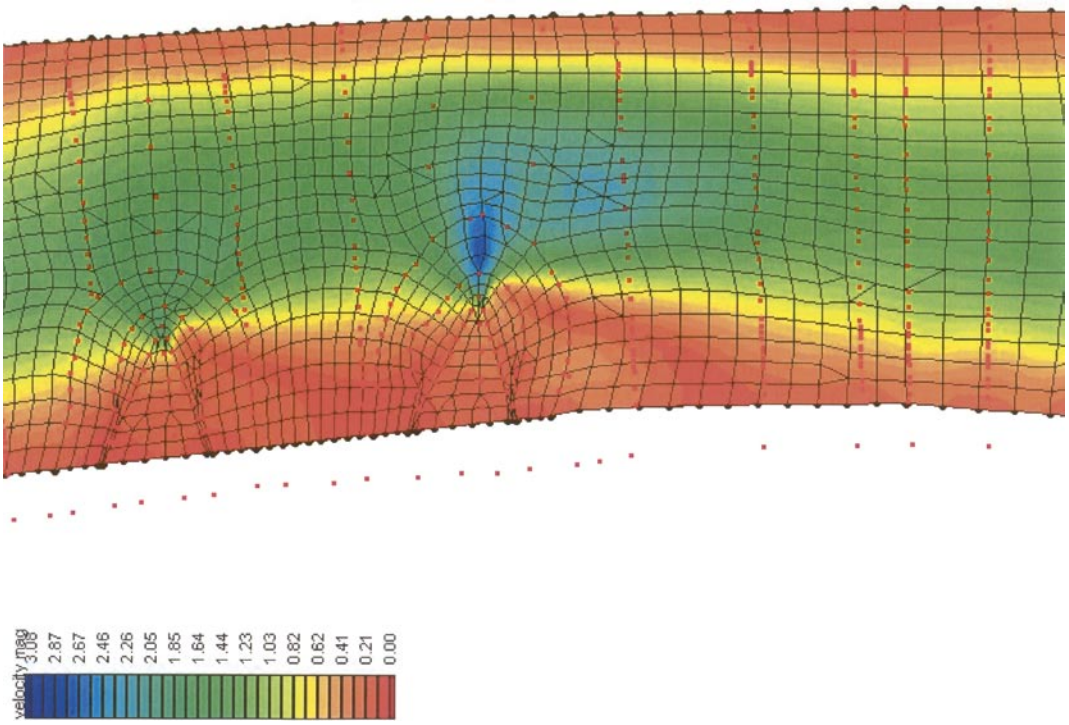


Abb. 32: Gitternetzlinien und Geschwindigkeitsfelder in einem Fluss mit umströmtem Pfeiler, SMS

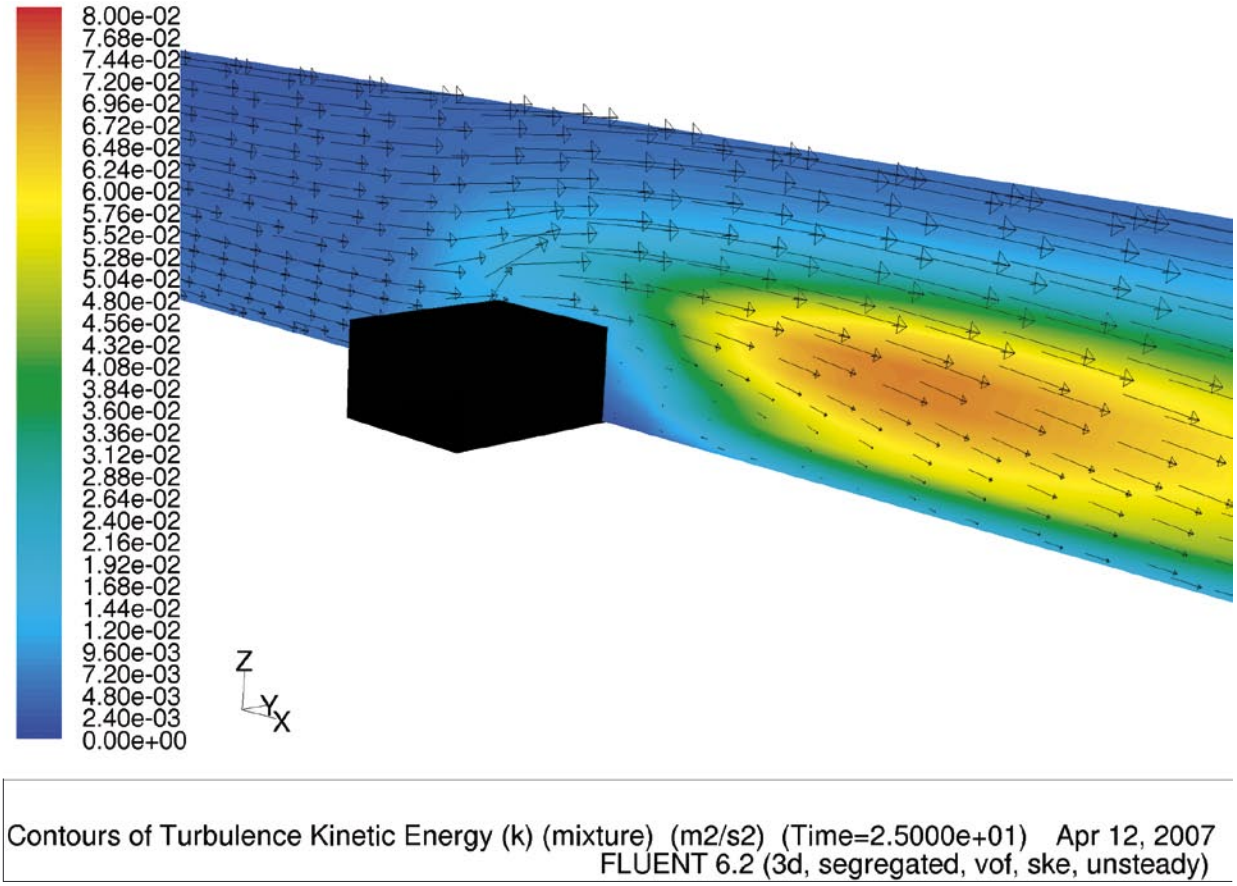


Abb. 33: Geschwindigkeitsvektoren und Konturdarstellung der turbulenten kinetischen Energie bei der Überströmung einer Buhne, FLUENT 6.2

7.4 Verwendete Literatur

Helwig Hauser, Robert S. Laramee, and Helmut Doleisch (2002): State-of-the-Art Report 2002 on Flow Visualization. Technical Report TR-VRVis-2002-003 at the VRVis Research Center in Vienna, Austria, Jan. 2002, www.VRVis.at

Frits H. Post, Benjamin Vrolijk, Helwig Hauser, Robert S. Laramee, Helmut Doleisch (2002): Feature Extraction and Visualization of Flow Fields. Published in the State-of-the-Art Proceedings of EUROGRAPHICS 2002 (EG 2002), Sept. 2–6, 2002, in Saarbrücken, Germany, pp. 69–100

Frits H. Post, Benjamin Vrolijk, Helwig Hauser, Robert S. Laramee, and Helmut Doleisch (2003): The State of the Art in Flow Visualization: Feature Extraction and Tracking. Published in Journal Computer Graphics Forum (Blackwell CGF), 22 (4), pp. 775–792

Robert S. Laramee, Bruno Jobard, and Helwig Hauser (2003): Image Space Based Visualization of Unsteady Flow On Surfaces in Proceedings of IEEE Visualization (Vis 2003), pp. 131–138, October 19–24, 2003, Seattle, Washington

Robert S. Laramee, Juergen Schneider, and Helwig Hauser (2004): Texture-Based Flow Visualization on Isosurfaces from Computational Fluid Dynamics, in Proceedings of the 6th Joint IEEE TCVG–EUROGRAPHICS Symposium on Visualization (VisSym 2004), May 19–21, 2004, Konstanz, Germany

8 Praktische Anwendung: Hintergründe – Anforderungen – Beispiele

8.1 Überblick

Der praktische Einsatz der hydrodynamischen Fließgewässermodellierung umfasst folgende Themenbereiche:

- Ausweisung von Überflutungsflächen
- Gefahrenzonenausweisung
- Machbarkeitsstudien für Hochwasserschutzmaßnahmen
- Detailplanungen im Bereich Hochwasserschutz
- Retentionsberechnungen
- Analyse der Auswirkungen von baulichen Maßnahmen auf den Abfluss
- Planung von flussbaulichen Maßnahmen, Stauanlagen
- Hydrodynamische Berechnungen als Grundlage für die Simulation des Sedimenttransports, Habitatmodellierung (weiterführende Tätigkeit des Arbeitsausschusses).

Die nachfolgenden Kapitel zeigen nach einer generellen Einordnung der Fließgewässermodellierung in den Hochwasserschutz und die Risikobetrachtung Beispiele aus den Bereichen Ausweisung von Überflutungsflächen, Gefahrenzonenplanung, Risikobetrachtung bis hin zur Planung von wasserbaulichen Maßnahmen.

8.2 Hochwasserschutz und Risikobetrachtung

Die Fließgewässermodellierung stellt für das integrierte Hochwassermanagement eine wesentliche Voraussetzung und Basis dar. Das integrierte Hochwassermanagement betrifft grundsätzlich die vorausschauende Entwicklung eines ganzheitlichen Handlungsinstrumentariums sowohl für die Hochwasservorsorge als auch die Bewältigung *(Abb. 34).* Integriertes Hochwassermanagement bedeutet, das Ziel einer möglichst hohen Sicherheit vor Hochwasser durch Zusammenarbeit aller Betroffenen mit verschiedenen Mitteln in verschiedenen Phasen des Risikokreislaufs zu erreichen. Es umfasst das komplexe Zusammenwirken der

- Prozessebene (Niederschlag – Abfluss – Geomorphologie),
- Maßnahmenebene (Vorsorge, Bewältigung),
- Schadensebene (sozioökonomische Aspekte) und
- rechtlichen Ebene.

Nicht auf Nachhaltigkeit ausgelegte Maßnahmen können zu negativen Entwicklungen/Trends in den Prozessen führen (z. B. Verschärfung der Hochwassergefahr durch Wegfall von Retentionsräumen). Durch Analyse des Risikos (Gefahren- und Schadenspotenzial), der Maßnahmen zur Gefahren- und Schadensminderung und der Maßnahmen zum Katastrophenschutz sowie im Notfall werden umfassende Grundlagen zur Umsetzung (Bemessung, Akzeptanz, Realisierung) von Hochwasserschutzmaßnahmen geschaffen *(Abb. 34).*

Die Fließgewässermodellierung liefert einerseits die Planungsgrundlage für den technischen Hochwasserschutz, andererseits dient sie als Informationsgrundlage für die Flächenvorsorge, Bauvorsorge, Risikovorsorge, Verhaltensvorsorge und Informationsvorsorge.

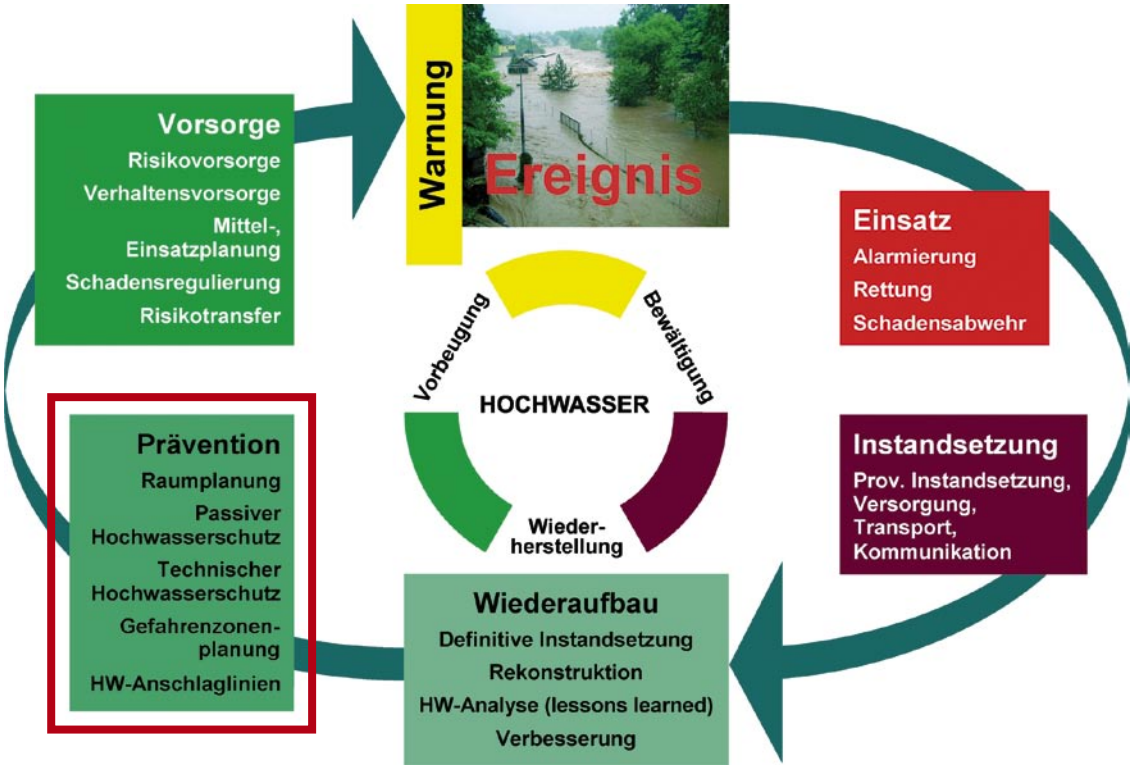


Abb. 34: Hochwassermanagement, ein sich wiederholender Kreislauf und Schwerpunkt Fließgewässermodellierung bei der Prävention (Habersack et al., 2005)

Generell ist festzustellen, dass das bisher international vorherrschende absolute Sicherheitsdenken auch in Österreich nach den Hochwasserereignissen 2002, 2005 und 2006 im Sinne des Projekts FloodRisk durch ein zunehmendes Risikobewusstsein (Risikokultur) abgelöst wird bzw. werden soll. Das integrale Risikomanagement bei Hochwässern beinhaltet dabei

- die Risikoanalyse („Was kann passieren?“: Gefährdung, Vulnerabilität)
- die Risikobewertung („Was darf nicht passieren?“, unter Berücksichtigung des Risikos als Resultat der Interaktion von Gefährdung und Vulnerabilität)
- den Risikoumgang („Wie kann das Hochwasserrisiko reduziert und wie kann mit dem verbleibenden Restrisiko bestmöglich umgegangen werden?“).

Übersicht über eine mögliche Einbeziehung von Risiko in die Fließgewässermodellierung

Folgende Möglichkeiten, Risiko in die Fließgewässermodellierung einzubeziehen, sind vorstellbar:

- Kombination der Modellierung der Überflutungsflächen mit Schadensfunktionen / Vulnerabilitätsparametern
- Szenariosimulation hinsichtlich Variabilität des Durchflusses und daraus folgender Überflutungen in Kombination mit Hochwasserschutzmaßnahmen (Szenarien)

- Nutzung der Fließgewässermodellierung zur aktiven Bewusstmachung von Risiko in der Bevölkerung (Partizipation) durch entsprechende Visualisierungstechniken (Postprocessing).

Restrisikoabschätzung mit Modellen

Die Restrisikoabschätzung mit Modellen kann prinzipiell die beiden folgenden Versagensfälle von Hochwasserschutzmaßnahmen umfassen:

a) Bauliches Versagen von Hochwasserwasserschutzmaßnahmen (z. B. Zerstörung von Dämmen infolge von Baumängeln)
b) Überschreiten der Bemessungsgrundlagen (Abfluss, Wasserstand etc.) mit darauf folgender Bauwerküberströmung sowie Überflutung des Hinterlands oder Zerstörung des Bauwerks durch Überströmen.

Die Abschätzung des Restrisikos mit Modellen beinhaltet einerseits die in der Folge von Dammbrüchen oder Überströmen entstehenden Überflutungen samt Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten in den relevanten Gebieten. Andererseits kann eine instationäre Simulation auch die raum-zeitliche Ausdehnung der Hochwasserwelle im Vorland darstellen, womit ggf. Evakuierungsmaßnahmen und sonstige Notfallmaßnahmen getätigt werden können. Im Sinne der Hochwasservorsorge sind im Vorhinein die entsprechenden Maßnahmen, von der Raumordnung bis zum Katastrophenschutz, zu planen und umzusetzen, und das verbleibende Restrisiko möglichst abschätzbar zu machen. Essenziell ist dabei die Flächenvorsorge, dass eben die notwendigen Freiräume für den Hochwasserabfluss zur Verfügung stehen. Dies ist auch in unmittelbarem Zusammenhang mit den als Folge der letzten Extremhochwässer vermehrt zu planenden und umzusetzenden Überströmstrecken zu sehen, wo eine sorgfältige Fließgewässermodellierung die notwendigen Planungsgrundlagen liefert (Wassertiefe, Durchflüsse, Fließgeschwindigkeiten, Sohlschubspannungen etc.).

8.3 Ausweisung von Überflutungsflächen

8.3.1 Hintergründe

Die Ermittlung von Überflutungsflächen stellt die Grundvoraussetzung für einen vorbeugenden Hochwasserschutz dar (aktiver Hochwasserschutz für gefährdete Siedlungsgebiete, passiver Hochwasserschutz durch Freihaltung oder/und Verbesserung der Retentionswirkung von Inundationsgebieten). Insbesondere die Raumordnung benötigt Anschlagslinien zur Ausweisung in Flächenwidmungsplänen, Berücksichtigung in Bebauungsplänen und Einarbeitung der wasserwirtschaftlichen Randbedingungen in regionalen Entwicklungsprogrammen.

8.3.2 Anforderungen

Bisher wurden zumeist Überflutungsflächen für 30- bzw. 100- jährliche Abflussereignisse ermittelt. Verstärkt durch die letzten Hochwasserereignisse gewinnt die Betrachtung des Restrisikos infolge höherer Bemessungsabflüsse (z. B. HQ_{300}) an Bedeutung. Die hydrologischen Grundlagendaten kommen zumeist von den hydrografischen Diensten der Bundesländer, selten über eigene hydrologische Untersuchungen (z. B. Niederschlags-Abflussmodellierungen). Generell ist dabei auf die

Aktualität der hydrologischen Daten bzw. der Veränderung derselben infolge neuer Hochwasserereignisse oder anthropogener Eingriffe in das Abflussregime zu achten. Es ist notwendig, einerseits aufgrund der raumplanerischen Notwendigkeiten die Überflutungsflächen genau abzugrenzen, zusätzlich aber auch die Unsicherheit im Ergebnis darzustellen, welche sich u. a. durch die Variabilität der Eingangsparameter, aber auch infolge der Ungenauigkeiten der geometrischen Daten oder Modellunsicherheiten ergibt.

Wie sich aus den Erfahrungen der letzten Hochwässer zeigt, treten während größerer Ereignisse signifikante morphologische Veränderungen der Gewässer auf, die zu Vergrößerungen (durch Erosion) oder Verminderungen des Abflussquerschnitts (durch Anlandungen) führen können, manchmal entsteht durch Laufverlagerungen sogar eine völlig veränderte Situation. Weiters beeinflusst der Feststofftransport selbst die hydraulischen Gegebenheiten für die Anwendung von Modellen. In Zukunft sollten insbesondere betreffend Restrisikofragen Modelle mit beweglicher Sohle und Szenariosimulationen eingesetzt werden (gilt insbesondere auch für die Gefahrenzonenplanung).

Grundlage für die Ermittlung der Überflutungsflächen sind digitale Geländemodelle, welche einerseits durch terrestrische Geometrieaufnahmen (Fluss- und Vorlandprofile) sowie durch Laserscanaufnahmen erstellt werden.

8.3.3 Beispiele

In einigen Bundesländern wurden bereits seit Jahren sogenannte Abflussuntersuchungen durchgeführt. Abflussuntersuchungen sind generelle Planungen, die das Hochwasserabflussgebiet bei einem 30-jährlichen und bei einem 100-jährlichen Hochwasser darstellen *(Abb. 35)*. Die Kenntnis der Hochwasseranschlagslinien ist Grundlage für einen aktiven (z. B. Schutz von bestehenden Siedlungsbereichen) und passiven Hochwasserschutz (z. B. Freihalten von Retentionsräumen) und ist in den Flächenwidmungsplänen der Gemeinden darzustellen.

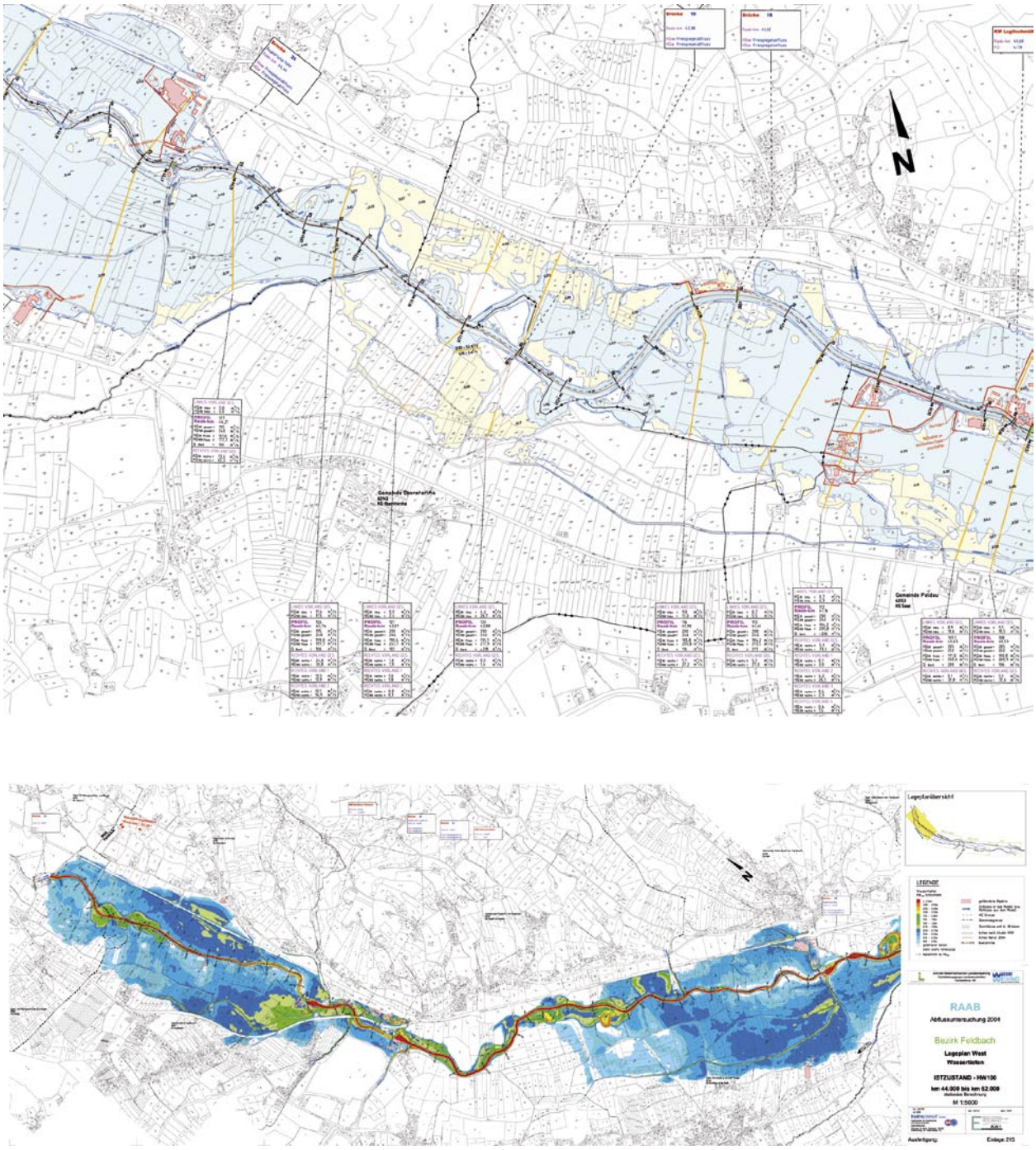


Abb. 35: Ausweisung von Überflutungsflächen bei HQ_{30} bzw. HQ_{100} an der Raab (Sackl, 2005)

8.4 Gefahrenzonenausweisung

8.4.1 Hintergründe

Grundsätzlich ist zwischen der Gefahrenzonenausweisung der Bundeswasserbauverwaltung (BWV) und der Gefahrenzonenplanung der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) zu unterscheiden.

Gefahrenzonenausweisung der BWV (Lebensministerium, 2006)

Gefahrenzonenausweisungen des Flussbaus gemäß WBFG sind fachliche Unterlagen über die durch Überflutungen, Vermurungen und Rutschungen gefährdeten Gebiete, insofern als sie durch die betrachteten Gewässer ausgelöst werden können, sowie über jene Bereiche, die für Schutzmaßnahmen freizuhalten oder für die eine besondere Art der Bewirtschaftung erforderlich sind. Sie dienen als Grundlagen für Alarmpläne sowie für Planungen, Projektierungen und Gutachten und können im Rahmen von Grundsatzkonzepten (RIWA-T) oder als eigenständige Arbeiten erstellt werden.

Veranlassung und Durchführung der Gefahrenzonenausweisung

- Die Erstellung und die Revision von Gefahrenzonenausweisungen sind von der BWV zu veranlassen.
- Zur Erstellung der Gefahrenzonenpläne sind hiezu befähigte und erfahrene Fachleute heranzuziehen.
- Die Berücksichtigung aller in Betracht kommenden öffentlichen Interessen ist anzustreben. Die Kontaktnahme mit den jeweiligen Gemeinden, mit den Dienststellen der Raumplanung, mit dem Hydrografischen Dienst und an den Berührungsstellen mit Wildbacheinzugsgebieten mit den Dienststellen des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) hat unmittelbar nach Einleitung der Gefahrenzonenausweisung zu erfolgen.

Als Bemessungsereignis sind Hochwasserabflüsse mit einer 100-jährlichen Eintrittswahrscheinlichkeit zu verstehen.

Hierbei sind Auswirkungen aus Gefahrenmomenten wie Flussverwerfungen, Ufer- und Dammbrüchen, Geschiebeeinstößen, Flächenerosionen und Erosionsrinnenbildungen, Rutschungen, Verklausungen, Wasserstauen, Grundeis- und Eisstoßbildungen, Qualmwasseraustritten usw. ersichtlich zu machen.

Hochwassergefährdungen aus derartigen Gefahrenmomenten sind auch dann auszuweisen, wenn sie nicht aus HQ_{100}-Abflüssen entstehen, aber vergleichbare oder größere Auswirkungen haben.

Darüber hinaus ist der Gefahrenbereich bei Überschreiten des Bemessungsereignisses bis HQ_{300} einschließlich des dadurch ausgelösten Versagens schutzwasserbaulicher Anlagen darzustellen. Gefahrenzonenausweisungen sind an den Berührungsstellen mit Wildbacheinzugsgebieten mit den Gefahrenzonenplänen der Wildbachverbauung abzustimmen.

Bei der Zonenabgrenzung ist von nachstehenden Kriterien auszugehen (Abweichungen sind in jedem Einzelfall zu begründen):

HQ_{30}-Zone (Zone wasserrechtlicher Bewilligungspflicht)

Die Anschlaglinie des HQ_{30} gemäß § 38 Abs. 3 WRG ist auszuweisen.

Rote Zone (Bauverbotszone)

Als Rote Zone werden Flächen ausgewiesen, die zur ständigen Benutzung für Siedlungs- und Verkehrszwecke wegen der voraussichtlichen Schadenswirkungen des Bemessungsereignisses nicht geeignet sind. Das sind Abflussbereiche und Uferzonen von Gewässern, in denen Zerstörungen oder schwere Beschädigungen von Bauobjekten, von Verkehrsanlagen sowie von beweglichen und unbeweglichen Gütern möglich sind und vor allem das Leben von Personen bedroht ist.

Als **Rote Zone** sind auszuweisen:

- Gewässerbett und Bereiche möglicher Uferanbrüche unter Berücksichtigung der zu erwartenden Nachböschungen und Verwerfungen (Umlagerungen) einschließlich dadurch ausgelöster Rutschungen
- Überflutungsbereiche, wo die Kombination von Wassertiefe t [m] und Fließgeschwindigkeit v [m/s] folgende Grenzwerte überschreitet (*Abb. 36):*
  $t \geq 1{,}5 - 0{,}5 * v$ oder
  $v \leq 3{,}0 - 2{,}0 * t$ für $0 \leq v \leq 2{,}0$

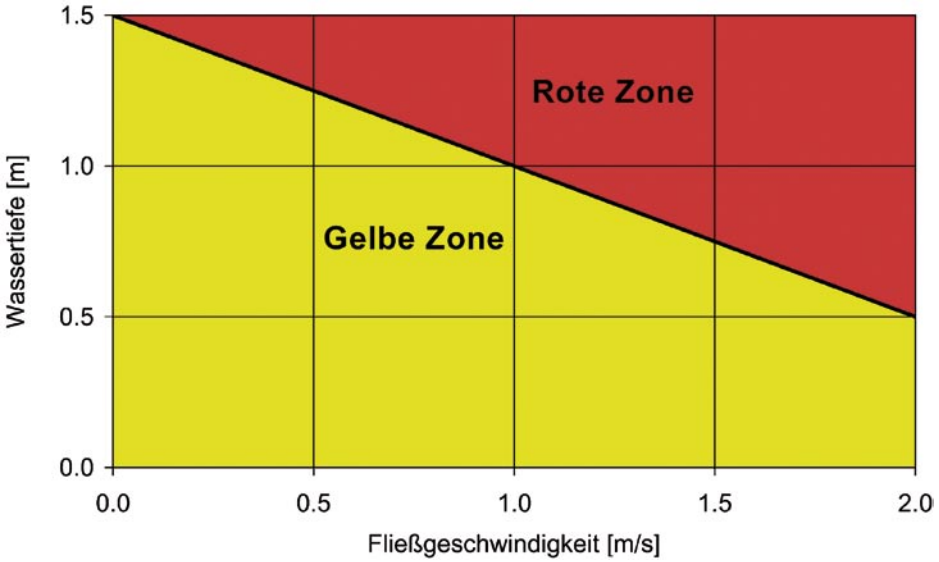


Abb. 36: Hydraulische Kriterien zur Ausweisung der gelben und roten Zone

- Bereiche mit Flächenerosion und Erosionsrinnenbildung bei Überschreitung der für die jeweiligen Boden- und Geländeverhältnisse zulässigen Grenzwerte für Fließgeschwindigkeit v [m/s] und Schleppspannung τ [N/m^2]

Rot-gelbe Zone (Retentions-, Abfluss- und wasserwirtschaftliche Vorrangzone)

Als Rot-gelbe Zone werden Flächen ausgewiesen, die für den Hochwasserabfluss notwendig sind oder aufgrund der zu erwartenden Auswirkungen bei Abfluss beeinträchtigenden Maßnahmen auf das Gefahrenpotenzial und das Abflussverhalten des Gewässers eine wesentliche Funktion für den Hochwasserrückhalt aufweisen.

Gelbe Zone (Gebots- und Vorsorgezone)

Als Gelbe Zone werden die verbleibenden Abflussbereiche von Gewässern zwischen der Abgrenzung der Roten bzw. Rot-gelben Zone und der Anschlaglinie des Bemessungsereignisses ausgewiesen, in denen unterschiedliche Gefahren geringeren Ausmaßes auftreten können. Beschädigungen von Bauobjekten und Verkehrsanlagen sowie die Behinderung des Verkehrs sind möglich. Die ständige Benützung für Siedlungs- und Verkehrszwecke ist in Folge dieser Gefährdung beeinträchtigt.

Blaue Zone (Wasserwirtschaftliche Bedarfszone)

Als Blaue Zone werden Flächen ausgewiesen, die für wasserwirtschaftliche Maßnahmen oder für die Aufrechterhaltung deren Funktion benötigt werden oder deshalb einer besonderen Art der Bewirtschaftung bedürfen.

Gefahrenbereich bei HQ_{300} (Hinweisbereich)

Restrisikogebiete im Versagensfall schutzwasserbaulicher Anlagen oder bei Überschreiten des Bemessungsereignisses bis HQ_{300} sind entsprechend obiger Kriterien rot schraffiert oder gelb schraffiert auszuweisen.

Die Gefahrenzonenpläne der Wildbach- und Lawinenverbauung

Im Gefahrenzonenplan des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung gemäß § 11 Abs. 2 FG 1975 sind die wildbach- und lawinengefährdeten Bereiche und deren Gefährdungsgrad sowie jene Bereiche darzustellen, für die eine besondere Art der Bewirtschaftung oder deren Freihaltung für spätere Schutzmaßnahmen erforderlich ist (Inno-GZP, 2004).

Grundsätze, Abgrenzungskriterien und andere spezielle Regelungen zur GZP der WLV sind in den GZP-Richtlinien der WLV festgelegt, deren Grundlagen im FG 1975 und der Gefahrenzonenplan-Verordnung vom 30. Juli 1976 zu finden sind. In *Tabelle 2* ist ein Vergleich zwischen Gefahrenzonenplanung der BWV und WLV dargestellt. Hinsichtlich der Fließgewässermodellierung muss betont werden, dass aufgrund der großen Gefälle, des starken Wechsels zwischen Schießen und Strömen sowie des Geschiebetriebs und Wildholzanfalls die hydrodynamische Modellierung oft an ihre Grenzen stößt.

8.4.2 Anforderungen

Die Anforderungen an die Fließgewässermodellierung sind grundsätzlich ähnlich jenen der Überflutungsflächenausweisung. Wesentliche Ergänzung ist die sich aus der Definition der Gefahrenzonen ergebende Notwendigkeit der Ermittlung der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten. Die Wassertiefen sind bei Annahme eines horizontalen Wasserspiegels aus den Modellergebnissen je nach Dimensionalität leicht ableitbar. Beim 1-D-Modell ergeben sich diese verteilt im Profil und beim 2-D-Modell aus den je nach Ansatz verwendeten Resultaten für einzelne Elemente. Die Fließgeschwindigkeiten liegen für das 1-D-Modell meist als Mittelwerte für den Hauptabflussbereich und jeweils für das linke und rechte Vorland vor. Indirekte Aufteilungen über das Querprofil mittels „conveyance“ sind problematisch. Beim 2-D-Modell liefert die Simulation räumlich verteilte Fließgeschwindigkeiten und abgeleitete Größen. Damit sind betreffend Gefahrenzonenplanung alle notwendigen Parameter bestimmt.

8.4.3 Beispiel Gefahrenzonenplan Gemeinde Langenlois / Kamp (Werner Consult, 2005)

Untersuchungsgebiet und Netzerstellung

Das zur Strömungsberechnung herangezogene digitale Geländemodell (Berechnungsnetz) basiert sowohl auf der Auswertung einer Laserscanbefliegung, als auch auf terrestrischen Erhebungen von Flussquerprofilen und anderen abflussrelevanten topografischen Gegebenheiten, wie etwa Wehranlagen und Brücken. Durch die Laserscanbefliegung werden topografische Informationen über die Form und Struktur des Geländes im Abflussbereich von Hochwässern im Raster 1 m x 1 m lagerichtig aufgenommen und mit einer Höhengenauigkeit von wenigen Zentimetern verfügbar. Aus rechentechnischen Gründen bezüglich der computerbasierten Strömungs- und Abflusssimulationen wurde aus diesen Informationen ein mehr oder weniger regelmäßiges netzartiges Geländemodell (Berechnungsnetz) mit einer durchschnittlichen Rastergröße zwischen 15 m x 15 m und 20 m x 20 m abgeleitet. In diesem ausgearbeiteten digitalen Höhenraster sind somit strömungsbeeinflussende Geländeformationen wie etwa „Bruchkanten“, Straßen und Wege integriert.

Außerdem wird im unmittelbaren Abflussbereich des Kamps das rasterförmige Höhenmodell durch detaillierte Flussquerprofilaufnahmen ersetzt – der Laserscan kann durch die Wasseroberfläche hindurch nicht die für das Strömungsgeschehen wichtige Form der Flusssohle erfassen. Das Einarbeiten von Wehranlagen, Brücken und Sohlstufen ergänzt die genaue digitale Darstellung des Flussschlauchs samt hydraulischer Vorlanderfassung (Berechnungsnetz).

Zweidimensionale Strömungsmodellierung

Für die hydrodynamische Simulation wurde ein instationäres, zweidimensionales numerisches Modell verwendet.

Rauheiten

Im Zuge der Modellkalibrierung wurde versucht, anhand tatsächlich aufgetretener Hochwässer eine Übereinstimmung zwischen dem Modellergebnis der Strömungsberechnung und der Natursituation zu erreichen.

Hydrologische Datengrundlage

Als Grundlage für die Modellkalibrierung wurde das Kamphochwasser vom Juni 1996 herangezogen. Es ist das jüngste Hochwasserereignis vor dem Extremhochwasser im August 2002, das mit seinen ca. 800 m^3/s im Bereich von Stiefern nicht typisch für eine Modellkalibrierung zur Berechnung von deutlich geringeren Hochwasserabflüssen ist.

Ausgehend sowohl von den amtlichen Abflusswerten mit den zugeordneten Jährlichkeiten, als auch dem Flächenverzeichnis wurde der hydrologische Längenschnitt für den Untersuchungsabschnitt erstellt.

Modellkalibrierung

Nach der Erstellung der rechentechnischen Grundlagen für die Strömungsberechnung – Aufbau des Rechennetzes und örtliche Zuordnung von Rauheiten aufgrund der Kenntnisse über Bewuchs und Beschaffung der abflussrelevanten Oberflächenverhältnisse, entweder aus den Orthofotos und/oder aus Felderhebungen vor Ort, wurde eine Modellkalibrierung vorgenommen.

Ergebnisse der hydraulischen Berechnungen, Postprocessing

Die Berechnungen wurden über das gesamte Modellgebiet für verschiedene, künstlich generierte Ablaufwellen für das HQ_{100} und das HQ_{30} durchgeführt. Die Ergebnisse der instationären Abflussberechnungen in Form von berechneten Werten für die Wasserspiegelhöhe, die Fließgeschwindigkeit u. v. m. an den einzelnen Modellelementen (Stützfunktionen) wurden im Zuge des „Postprocessings“ in eine grafische und eine parameterdefinierte Form ausgegeben. Für die Erstellung der Gefahrenzonenpläne waren die auszugebenden Daten definiert durch:

- Anschlagslinie HQ_{100}
- Anschlagslinie HQ_{30}
- Isolinien der Wassertiefen (0,5 m – 2,0 m) für die Zonenabgrenzung ROT/GELB
- Isolinien der Fließgeschwindigkeiten (0,5 m/s – 1,5 m/s) für die Zonenabgrenzung ROT/GELB
- Isolinien der Sohlschubspannungen
- Geschwindigkeitsvektoren der Fließgeschwindigkeit für die Darstellung von Rückströmräumen und Totwasserzonen.

Erstellung der Gefahrenzonenpläne, Zonenausweisung im Katasterplan, Anforderung an die Genauigkeit und Schärfe der Zonenabgrenzung

Die Erstellung der Gefahrenzonenpläne erfolgte auf der Grundlage des digitalen Katasters dargestellt im Maßstab 1 : 2000.

Die Darstellung der Hochwasseranschlagslinien für die Ereignisse HQ_{100} und HQ_{30} kann durch direkte Übernahme der genannten Linien aus dem Postprocessing der Berechnung im 2-D-Modell erfolgen. Die Genauigkeit und Schärfe dieser Anschlagslinie ist neben den Anforderungen an die

hydrologischen/hydraulischen Grundlagen, der Modelleichung und dem Berechnungsverfahren allgemein im Modellraster, dem digitalen Höhenmodell definiert.

Für die Zonenabgrenzung zwischen roter und gelber Zone sind die oben dargestellten Kriterien in Bezug auf Wassertiefen und Fließgeschwindigkeit heranzuziehen. Durch Abgleich der Isolinien der Wassertiefen und der Isolinien der Geschwindigkeiten kann eine Umhüllende gefunden werden, für welche die unter der roten Zone angeführten maßgeblichen Größen gelten. Diese Ausweisung erfolgt durch den Bearbeiter am Lageplan, wobei die Grenzbereiche bzw. Übergänge direkt eingetragen werden müssen. Dieses Verfahren erfordert wesentlichen Zeitaufwand und genaue Kenntnis über das Modellgebiet und das Abflussgeschehen, um die angeführten, objektiven Kriterien zur Zonenabgrenzung am Plan umsetzen zu können. Die Berücksichtigung der zulässigen Grenzwerte für die Geschwindigkeit und der zulässigen Schleppspannung für die jeweiligen Boden- und Geländeverhältnisse (Bereiche mit Erosion und Erosionsrinnenbildung) wird durch die Annahme der Kriterien aus Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit überlagert, d. h. Bereiche mit Erosion und Erosionsrinnenbildung sind durch die erstgenanten Kriterien bereits erfasst. Die Genauigkeit und Schärfe der Zonenabgrenzung zwischen roter und gelber Zone ist – neben den bereits vorher erwähnten Modellgrundlagen – wesentlich durch die Nachbearbeitung durch den Experten bestimmt. Die „objektiven" Parameter der Wassertiefe und der Fließgeschwindigkeit über das Bearbeitungsgebiet verteilt, sind vom Bearbeiter am Plan auszuweisen und darzustellen.

Die Darstellung der Gefahrenzonenausweisung erfolgt im Gefahrenzonenplan für die Gemeinde Langenlois innerhalb der Gemeindegrenzen im Lageplan 1 : 2000. Die Abgrenzung ist im Plan exakt an den Gemeindengrenzen gehalten und umfasst das gesamte Abflussgebiet am Kamp samt Zubringern.

Ausweisung der Gefahrenzonen

Ausgehend von der Gefahrenzonenausweisung im Projekt zum Hochwasserschutz Kamp wurde der erstellte Gefahrenzonenplan im Maßstab 1 : 2000 nach dem Richtlinienentwurf 2004 überarbeitet. Die Anschlagslinien des HQ_{100} und des HQ_{30}, die Flächen der roten und gelben Zone werden direkt übernommen. Für die Ausweisung von rot-gelben Zonen wurde folgende Vorgangsweise gewählt:

Generell wurden sämtliche Flächen von der roten Zone bis zur Anschlagslinie des HQ_{100} als abflussrelevant bzw. als Retentionsräume angenommen. Die Interpretation von „für den Hochwasserabfluss notwendig" und „wesentlichen Funktion für den Hochwasserrückhalt" schließt jedoch Flächen mit geringen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten, Auffüllungen von Toträumen, Rückströmungen in Räume, welche nicht abflussrelevant sind, aus. Diese Flächen verbleiben somit als gelbe Zonen, während die abflussrelevanten Flächen zur rot-gelben Zone umgefärbt werden.

Die Interpretation der Richtlinie durch den Bearbeiter erfordert die Kenntnis der Abflussverhältnisse auch in ihrer räumlichen Verteilung. Die Festlegung der rot-gelben Zone ist durch die Abtrennung von „nicht abflussrelevant" als gelbe Zone erfolgt. Die Festlegung dieser Flächen scheint nicht objektivierbar, sie bleibt dem subjektivem Urteil des Bearbeiters überlassen.

Der blauen Zone als wasserwirtschaftliche Bedarfszone werden die außerhalb der roten, rotgelben und gelben Zone gelegenen Flächen zugerechnet, welche laut Definition für wasserwirtschaftliche Maßnahmen oder für die Aufrechterhaltung deren Funktion benötigt werden oder deshalb einer besonderen Art der Bewirtschaftung bedürfen. Im gegenständlichen Fall am Beispiel des Gefahrenzonenplans in Langenlois, betrifft dies vor allem Zufahrtswege zu Wehren und Straßen sowie Brückenbauwerke, welche innerhalb der Gefahrenzonen als „Insel" verlaufen.

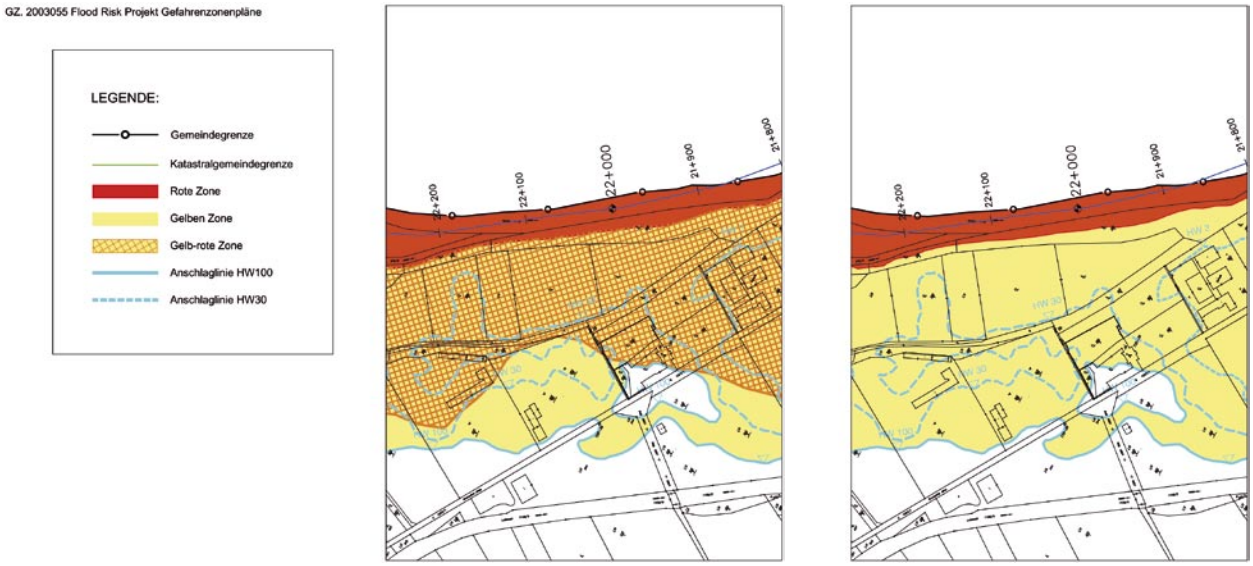


Abb. 37: Vergleich der Gefahrenzonenberechnung nach alter (links) und neuer RIWA-T (rechts) (Hinterleitner, 2004)

8.5 Machbarkeitsstudien für Hochwasserschutzmaßnahmen

8.5.1 Hintergründe

Auf Überflutungsflächenausweisungen und/oder Gefahrenzonenplanungen folgt zumeist eine Machbarkeitsstudie für Hochwasserschutzmaßnahmen. Dabei geht es um die grundsätzliche Abklärung der Möglichkeiten und Grenzen eines Hochwasserschutzes für bestimmte Gebiete. Damit können aufgrund der vorhandenen Simulationsergebnisse die gefährdeten Gebiete lokalisiert und damit ein Grundkonzept sowie verschiedene Szenarien eines Hochwasserschutzes definiert werden. Über die notwendige Einbindung der Bevölkerung (Partizipation) kommt es zu einer Vorauswahl geeigneter Varianten, die über die Fließgewässermodellierung hydraulisch überprüft werden, wonach in Summe eine optimale Variante für die Detailplanung vorgeschlagen wird.

8.5.2 Anforderungen

Die Grundvoraussetzung ist das Vorhandensein eines geeichten, hydrodynamischen Modells, womit die Gefahrenzonenplanung oder Ausweisung der Überflutungsflächen erfolgte. Im Zuge der Machbarkeitsstudie kommt es zu einer Anpassung der Inputfiles, wobei insbesondere die Geometrie gemäß den zu untersuchenden Varianten jeweils eine Adaption erfährt. Daneben sind ggf. die Rauigkeiten, Verlustparameter etc. zu modifizieren.

8.5.3 Beispiel

In *Abb. 38* ist ein Ausschnitt einer Machbarkeitsstudie für den Kamp dargestellt (ARGE Kamp, 2005). Die verschiedenen Varianten werden mithilfe der hydrodynamischen Modellierung gegenübergestellt, womit eine Entscheidungsgrundlage geschaffen wird.

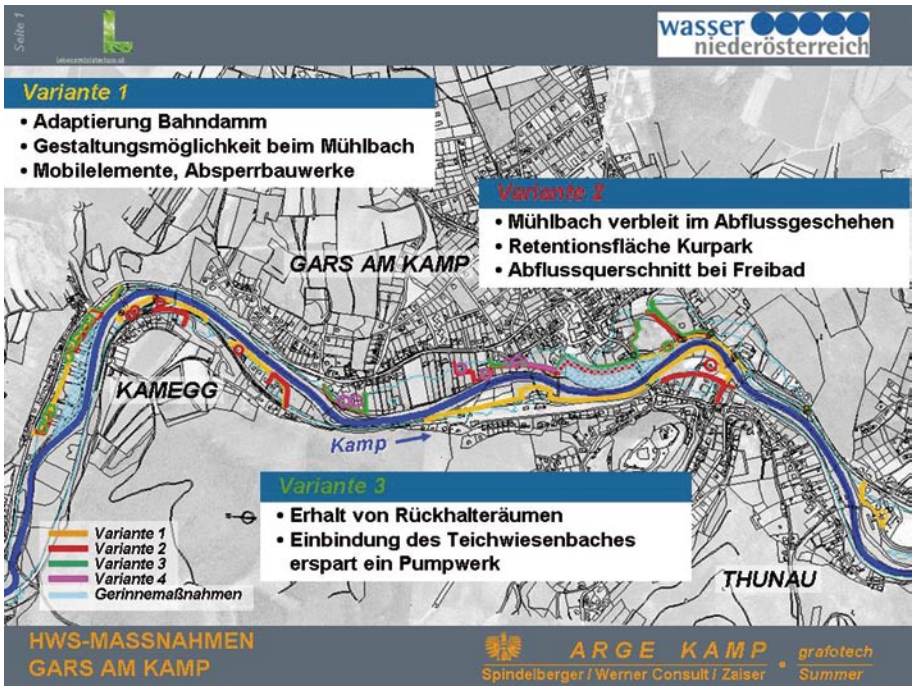


Abb. 38: Ausschnitt aus einer Machbarkeitsstudie für den Kamp (ARGE Kamp, 2005)

8.6 Detailplanungen im Bereich Hochwasserschutz

8.6.1 Hintergründe

Nach der Machbarkeitsstudie sind Detailplanungen im Bereich Hochwasserschutz durchzuführen. Diese bedingen einen anderen Maßstab und sind zumeist auf bestimmte Flussstrecken, Gemeinden etc. beschränkt. Dabei steht die konstruktive Planung der Maßnahmen im Vordergrund, welche hydraulisch optimiert werden. Neben der grundsätzlichen hydraulischen Wirkung besteht die Notwendigkeit der hydraulischen Dimensionierung von Detailbereichen (z. B. Überströmstrecken bei Dämmen).

8.6.2 Anforderungen

Ausgegangen wird grundsätzlich von dem in der Gefahrenzonenplanung und Machbarkeitsuntersuchung erstellten hydrodynamischen Modell. Aufgrund der stärkeren Detailliertheit der Planung ist meist eine Verfeinerung des Berechnungsnetzes sinnvoll.

8.7 Retentionsberechnungen

8.7.1 Hintergründe

Die Hochwässer 2002 und 2005 zeigten die Wirkung der fließenden Retention für den Hochwasserschutz auf. Dementsprechend stellen Retentionsberechnungen einen zentralen Teil künftiger Hochwasserschutzplanungen dar, insbesondere in Hinblick auf eine Flussgebietsplanung.

Bei folgenden Fragestellungen kommen instationäre Modelle als Voraussetzung für die Retentionsberechnung zur Anwendung:

- Abschätzung der Auswirkung der fließenden Retention
- Bedeutung der Retentionsräume für das Abflussgeschehen
- Bewegung, Verformung von Hochwasserwellen entlang von Flüssen
- Schwall- und Sunkerscheinungen
- Untersuchung der Auswirkung von Maßnahmen auf bestimmte Ereignisse.

8.7.2 Anforderungen

Während standardmäßig eine stationäre Berechnung der Überflutungsflächen für HQ_{30} und HQ_{100} erfolgt, wo die Abflusswerte vorgegeben sind, erfordert die Retentionsberechnung instationären Abfluss als Input. Diese Daten sind für die hydrodynamische Modellierung bereitzustellen. Die Anforderungen an die Modellierung steigen in mehreren Bereichen. Einerseits ist mehr Aufwand für die Kalibrierung einzurechnen, da neben der stationären Betrachtung (sollte nach wie vor gemacht werden – Vergleich gemessener und berechneter Wasserspiegellagen) eine instationäre Kalibrierung notwendig ist (Vergleich gemessener und berechneter Hochwasserwellen). Für die Ermittlung der Wirkung von Retentionsflächen ist eine Erfassung der Strömungsverhältnisse insbesondere im Vorland entscheidend, womit einerseits die Aus- und Einströmsituation (Fluss – Vorland) sowie die Fließverhältnisse im Vorland selbst von besonderer Bedeutung sind. Nachfolgend finden sich noch einige Detailpunkte, die zu berücksichtigen sind:

- das instationäre Modell ist mindestens an zwei bekannten Abflussereignissen zu kalibrieren bzw. zu kontrollieren
- die Kalibrierung wird am besten mit stationären Berechnungen begonnen
- bei Prognoseberechnungen ist den geänderten Abflussverhältnissen infolge von baulichen Veränderungen oder sonstigen Maßnahmen hinsichtlich der Abflussgeometrie und der Rauigkeitsbeiwerte etc. Rechnung zu tragen. Insbesondere ist auf einen genügend weit über den veränderten Abflussbereich hinaus sich erstreckenden Untersuchungsbereich zu achten
- wichtig ist die Voruntersuchung über seitliche Speicherwirkungen etc.
- von Bedeutung ist weiters die zeitliche und örtliche Diskretisierung.

8.7.3 Beispiel

An der Oberen Drau in Kärnten besteht nur eine teilweise Abtrennung von den Retentionsräumen. Über ein hydrodynamisches 1-D-Modell (Floris) erfolgte eine Abschätzung der Wirkung einer flussparallelen Dammführung (auf HQ_{30}).

Für das 15-jährliche Ereignis vom Juli 1987 ergibt die (nicht umgesetzte) Regulierung gegenüber dem IST-Zustand eine Erhöhung des Abflusses von 483 m^3/s auf 685 m^3/s *(Abb. 39).* Damit würde in Sachsenburg statt eines 3–4-jährlichen Hochwassers ein 10–11-jährliches Hochwasser auftreten, was einer eklatanten Veränderung der Hochwassersituation entspricht (Nachtnebel & Habersack, 1998). Hinsichtlich der Fließzeit ergibt sich eine deutliche Verkürzung durch die fehlende Retentionswirkung von 10 auf 3,5 Stunden.

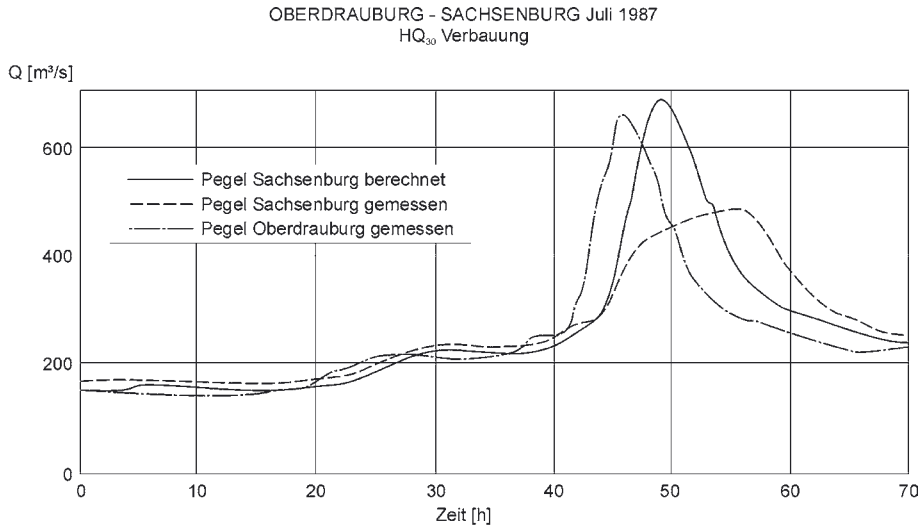


Abb. 39: Instationäre Simulation der Retentionswirkung im Oberen Drautal in Kärnten (Nachtnebel & Habersack, 1998)

8.8 Analyse der Auswirkungen von baulichen Maßnahmen auf den Abfluss

8.8.1 Hintergründe

Neben Hochwasserschutzmaßnahmen selbst ergeben sich durch andere bauliche Maßnahmen, insbesondere Siedlungstätigkeit, Errichtung von Gewerbe- und Industriegebieten und Infrastrukturmaßnahmen wie den Bau von Straßen, Brücken und Eisenbahnanlagen, Auswirkungen auf das Abflussgeschehen.

8.8.2 Anforderungen

Die Anforderungen entsprechen jenen der Detailplanung im Bereich Hochwasserschutz.

8.8.3 Beispiele

In *Abb. 40* ist der Einfluss einer Brückenfeldverklausung auf die Wasserspiegellage dargestellt (8 m x 2 m Verklausung). Brückenpfeiler sind häufig Auslöser dieser Verklausungen, womit die hydrodynamische Modellierung entsprechende Planungsgrundlagen für Infrastrukturmaßnahmen schafft. Im Vergleich zur damit hervorgerufenen Aufspiegelung tritt an derselben Stelle durch eine während des Hochwassers aufgetretene Verwerfung eine signifikante Absenkung des Wasserspiegels auf, wie sie auch beim Hochwasser 2002 zu beobachten war *(Abb. 40 (b)).*

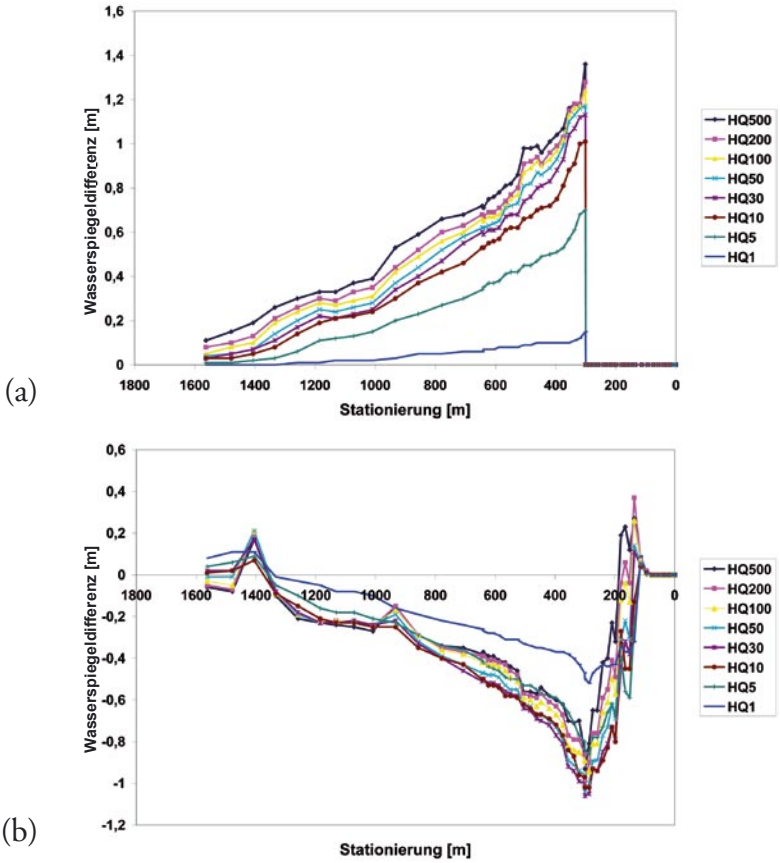


Abb. 40: Einfluss von (a) Verklausungen bei Brücken oder (b) Verwerfungen bei Brücken am Beispiel Kamp (Habersack & Hauer, 2006)

8.9 Planung von flussbaulichen Maßnahmen, Stauanlagen

8.9.1 Hintergründe

Neben Hochwasserschutzplanungen benötigen auch andere flussbauliche Maßnahmen (z. B. Aufweitungen) oder die Planung von Stauanlagen eine hydrodynamische Modellierung.

8.9.2 Anforderungen

Die Anforderungen an die hydrodynamische Modellierung ergeben sich aufgrund der hydraulischen Auswirkung der Maßnahme. Viele Maßnahmen wirken sich lokal aus, wie z. B. die Errichtung einer Sohlrampe oder beschränken sich auf einen bestimmten längeren Gewässerabschnitt (Stauanlage).

8.9.3 Beispiel

Im Rahmen des Hochwasserschutzes von Bruggen/Greifenburg wurde eine Aufweitung umgesetzt (Aufweitung von bis zu 95 m auf einer Länge von 1000 m, zusätzlich wurden für den Hochwasserschutz Begleitdämme errichtet). Zur Überprüfung der Wirkung wurden in *Abb. 41* die Wasserspie-

gellagen der Regulierungsstrecke vor Bauumsetzung für ein ca. 2-jährliches Ereignis (ca. 420 m^3/s) jener nach Durchführung der Aufweitung (einmal für die Sohle auf Höhe der Regulierung und einmal für die Sohle gemäß der tatsächlichen Baudurchführung gerechnet) gegenübergestellt. Es ergeben sich durch die Aufweitung Wasserspiegellagenabsenkungen von bis zu 0.55 m (0.3 m gemäß der tatsächlich durchgeführten Maßnahme), was den gewünschten Effekt (Hochwasserschutz) erbringt. Ein kurz nach Bauumsetzung eingetretenes Hochwasserereignis (8.10.1998, ca. 420 m^3/s) ist in *Abb. 41* zu erkennen und bestätigt die positive Wirkung. Dennoch gilt diese Annahme nur für den Fall einer fixen Sohle. Treten Anlandungen auf, wird der Abflussquerschnitt wieder reduziert und der positive Effekt für den Hochwasserschutz sinkt. Wasserspiegellagenberechnungen ergeben, dass für die Aufweitung Greifenburg eine mittlere Sohlanlandung von 0.5 m genügt, um im unteren Abschnitt der Aufweitung Hochwasserspiegellagen zu erhalten, die höher sind als bei der Regulierung *(Abb. 41)*. Daraus resultiert, dass zukünftig bei Planungen von Hochwasserschutzmaßnahmen auf Basis von Gerinneaufweitungen entweder mit mobiler Sohle gerechnet werden sollte bzw. die mobile Sohle über Szenarien auf Basis einer Abschätzung der zu erwartenden morphologischen Entwicklung auf jeden Fall zu berücksichtigen ist.

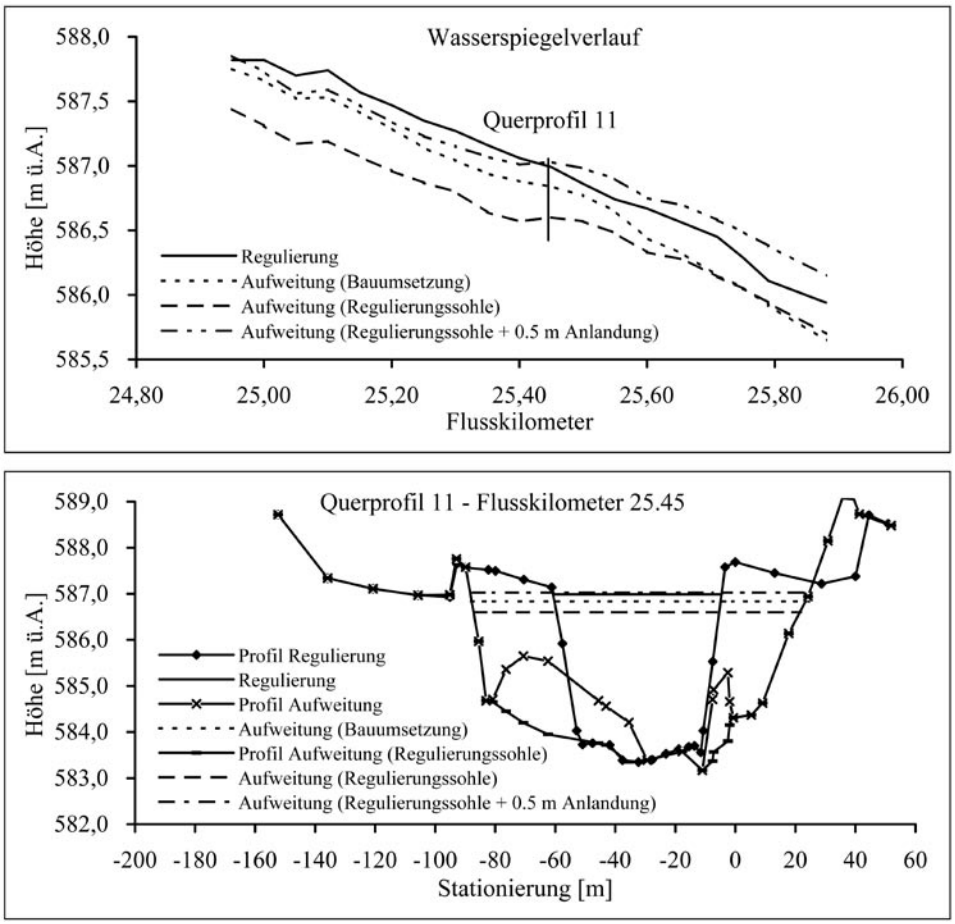


Abb. 41: Auswirkung der Aufweitung auf die Hochwasserspiegellage am Beispiel Greifenburg bei Hochwasserabfluss von ca. 420 m^3/s (8.10.1998) (nach Habersack et al., 2000)

8.10 Grundlagenberechnungen für Simulation des Sedimenttransports, Habitatmodellierung

8.10.1 Hintergründe

Die Simulation des Sedimenttransports gewinnt aufgrund der nachfolgend erwähnten Problembereiche zunehmend an Bedeutung:

- Sohleintiefungstendenzen an den meisten freien Fließstrecken größerer Flüsse
- Morphologische Änderungen in Zusammenhang mit Hochwasserereignissen (Auswirkung auf Wasserspiegellagenberechnung)
- Stauraumverlandungen mit technischen, ökologischen und ökonomischen Problemfeldern.

Im Zuge der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie bzw. des österreichischen Wasserrechtsgesetzes (Novelle 2003) ist die Planung und Umsetzung von Maßnahmen zur Erreichung eines guten ökologischen Zustands der Oberflächengewässer bis 2015 vorzusehen. Dabei bietet die Habitatmodellierung die Möglichkeit der Kombination abiotischer und biotischer Betrachtungen. Sowohl für die Simulation des Sedimenttransports als auch die Habitatmodellierung stellt die hydrodynamische Berechnung des Wassertransports und der daraus abgeleiteten Parameter die Grundvoraussetzung dar. Dieses Heft behandelt nur die hydrodynamischen Simulationen.

8.10.2 Anforderungen

Sowohl die zeitliche als auch räumliche Auflösung des hydrodynamischen Modells werden von den Anforderungen aus der Sedimenttransportmodellierung als auch der Habitatmodellierung bestimmt. Bei ungekoppelten Modellen (hydraulische und Sedimenttransportsimulation erfolgen getrennt) folgt bei jedem Zeitschritt der Berechnung der Wasserspiegellagen jene des Sedimenttransports und der Sohländerungen, wonach mit geänderter Gerinnegeometrie wiederum eine neue Simulation der Wasserspiegellagen etc. anschließt. Gekoppelte Modelle führen eine simultane Simulation der Wasserspiegellagen und des Sedimenttransports durch.

8.10.3 Beispiele

Simulation des Sedimenttransports

In *Abb. 42* ist die Prognose der Sohlhöhenentwicklung der Oberen Salzach dargestellt. Auffällig ist die Auflandung im unteren Abschnitt, welche durch eine Verringerung des Sohlgefälles entsteht und Baggerungen bedingt.

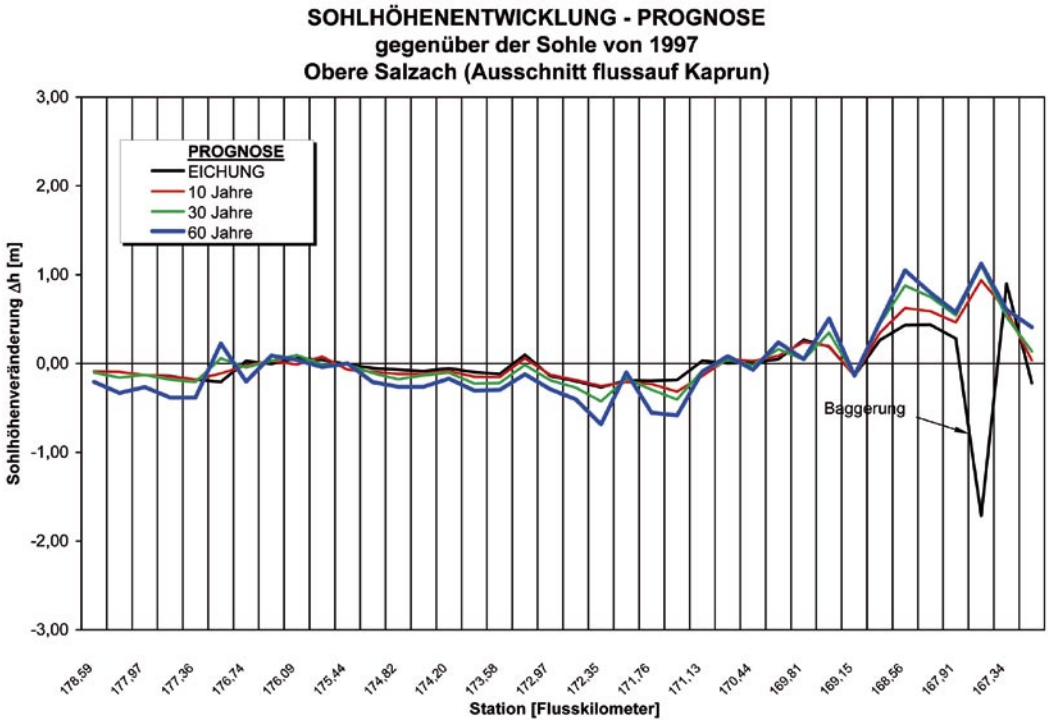


Abb. 42: Sohlhöhenentwicklung an der Oberen Salzach bei bestehender Profilbreite (Habersack et al., 1999)

Die Folgen für die Wasserspiegellagen sind in *Abb. 43* ersichtlich. Die genannten Auflandungen führen zu deutlichen Wasserspiegelanhebungen, womit klar wird, dass Sohländerungen (als Konsequenz flussbaulicher Maßnahmen) für den Hochwasserschutz essenziell sind.

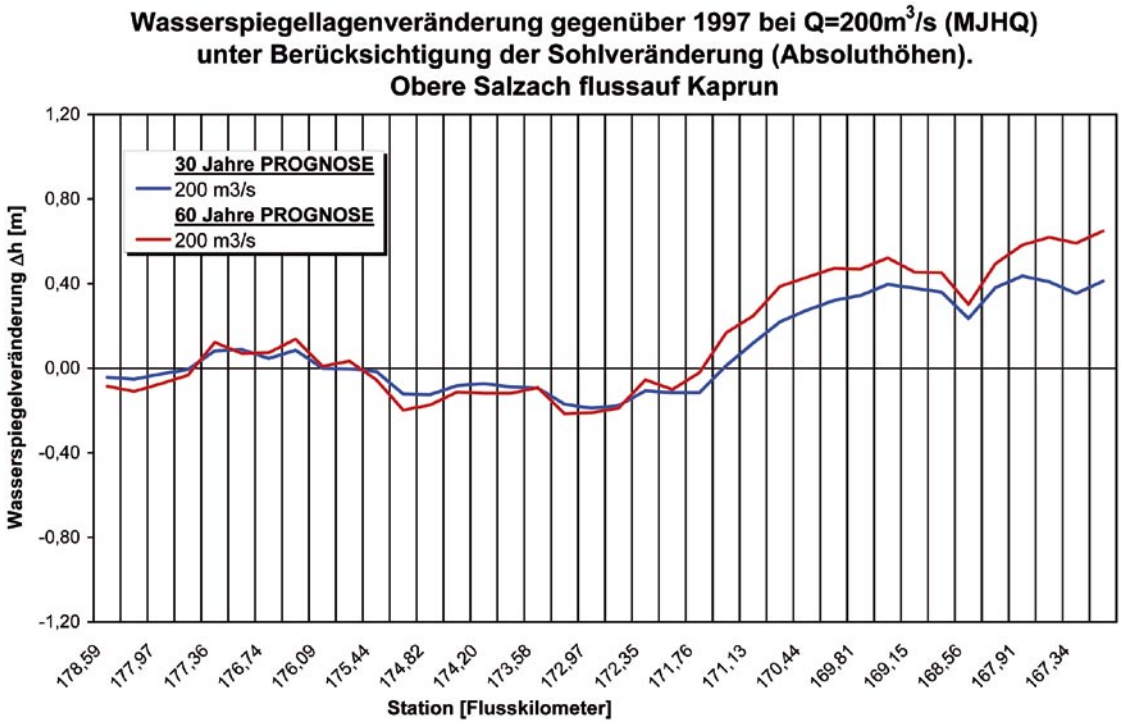


Abb. 43: Wasserspiegellagenveränderung gegenüber 1997 bei Q = 200 m³/s (MJHQ) unter Berücksichtigung der Sohlveränderung (Absoluthöhen) (Habersack et al., 1999)

Aufweitungen führen örtlich unterschiedlich zu verstärkten Anlandungen (sh. *Abb. 44)* und geänderten Wasserspiegellagen, was in *Abb. 45* ersichtlich wird.

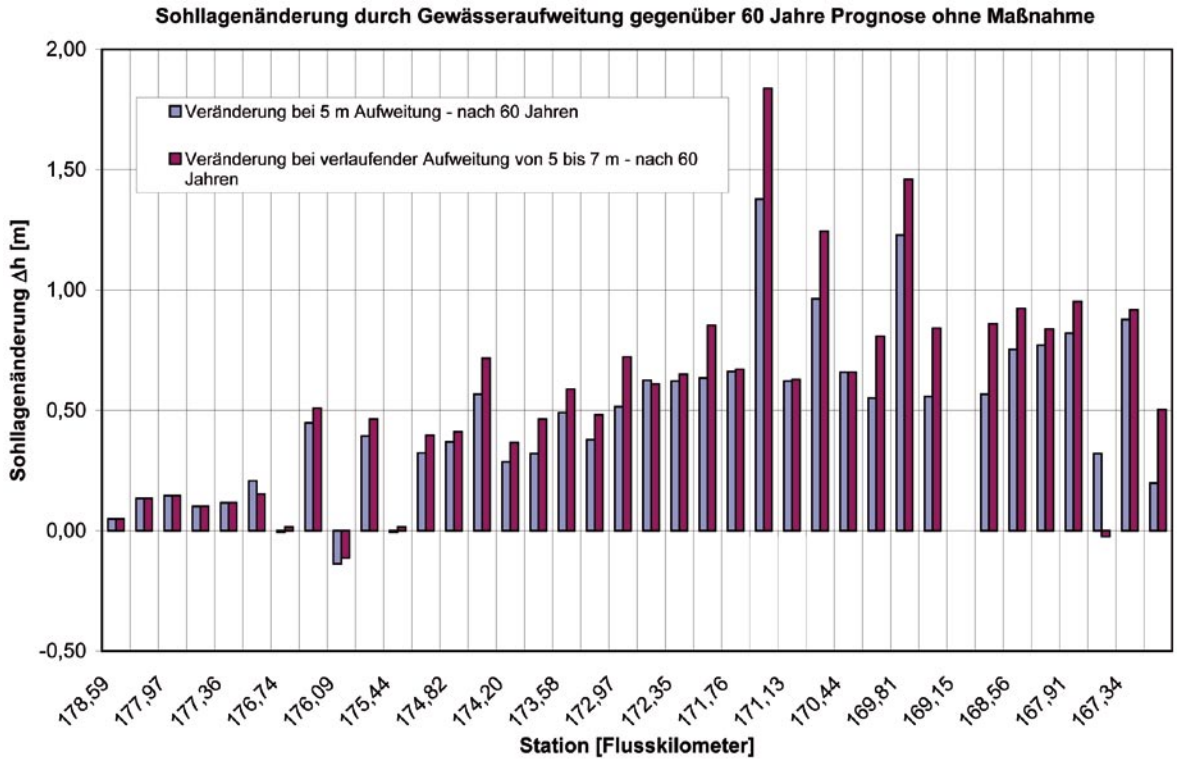


Abb. 44: Sohllagenänderung bei Aufweitungen an der Oberen Salzach (Habersack et al., 1999)

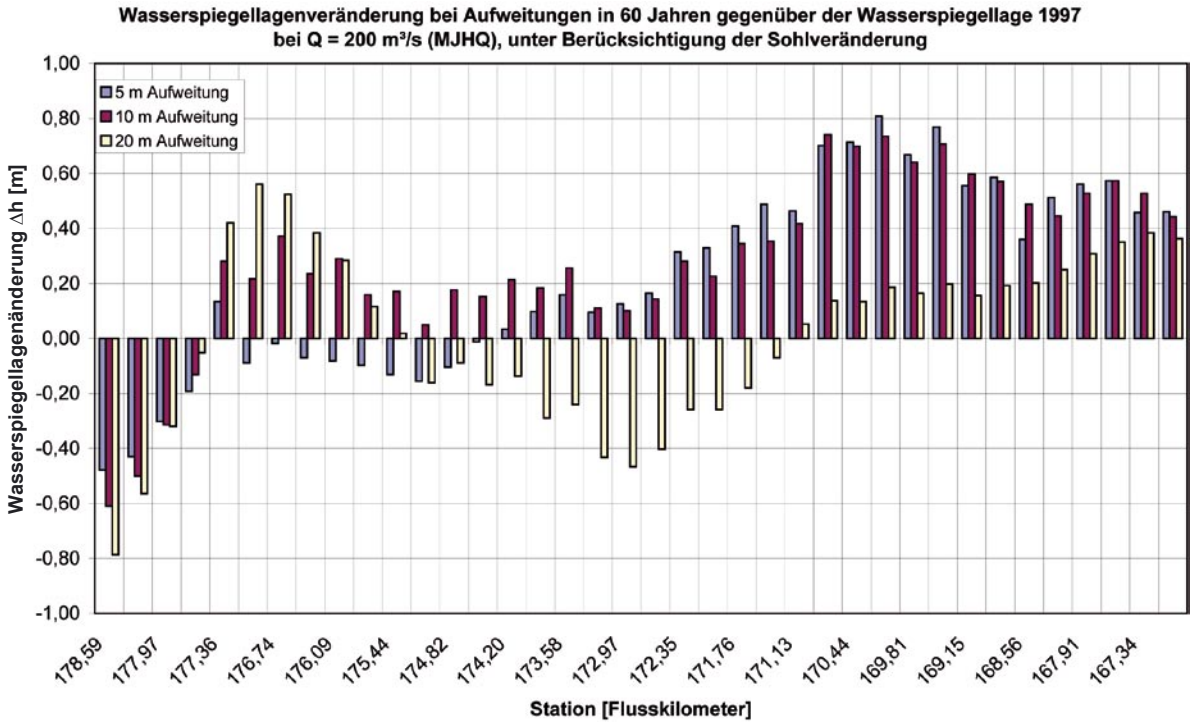


Abb. 45: Wasserspiegellagenänderung bei Aufweitungen an der Oberen Salzach (Habersack et al., 1999)

Habitatsimulation

In *Abb. 46* ist für die Sulm ein Beispiel einer Habitatmodellierung dargestellt. Wesentliche Grundlage bildet dabei die hydrodynamische Modellierung. Die Ergebnisse werden dann mit biologischen Parametern auf Basis von Eignungskurven verknüpft. An der Sulm wurde z. B. die Entwicklung der Habitatqualität für Nasenlaichplätze und juvenile Nasen über einen Zeitraum von drei Jahren untersucht. Dabei war eine Zunahme der nutzbaren Flächen betreffend Laichplätze und Abnahme betreffend juvenile Nasen festzustellen, was u. a. auf die morphodynamische Entwicklung zurückzuführen ist.

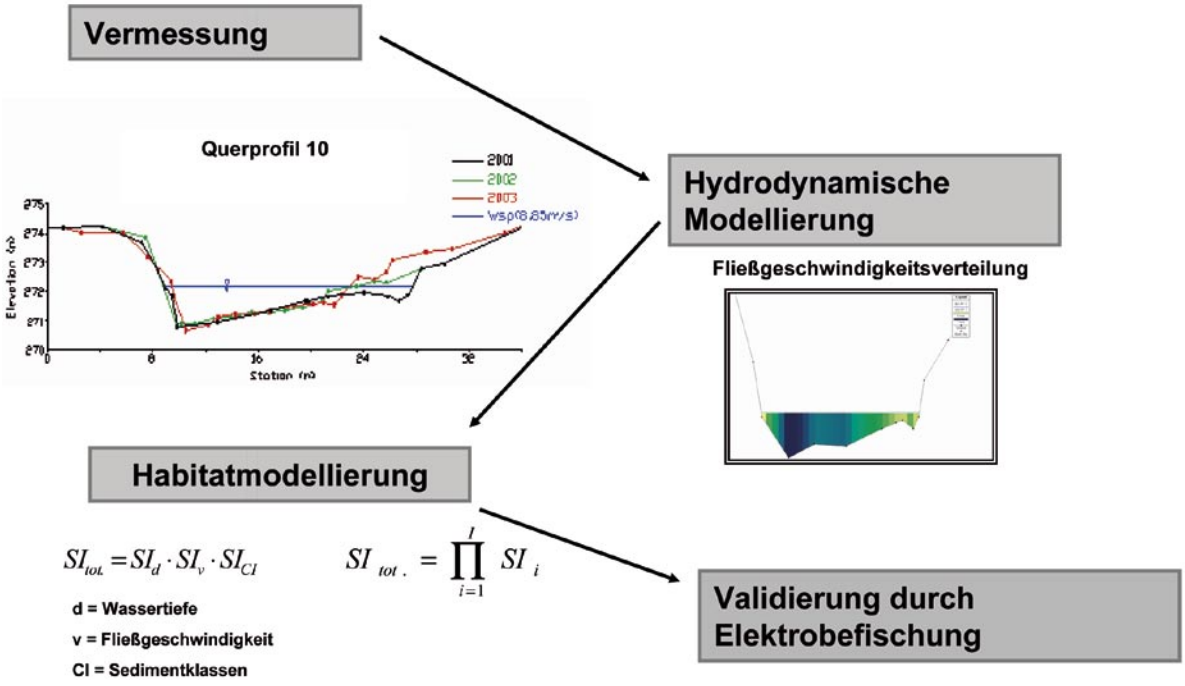


Abb. 46: Beispiel einer Habitatsimulation an der Sulm (Habersack & Hauer, 2006)

8.11 Flussgebietsplanung

Innerhalb der Flussgebietsplanung stellt die Fließgewässermodellierung in mehrfacher Weise eine wesentliche Komponente dar:

- Grundlage für alle großräumigen hochwasserschutzrelevanten Planungen (sollte möglichst auf Einzugsgebietsebene vorhanden sein: wichtig für „Summationseffekt“)
- Grundlage für Variantenuntersuchungen inklusive Auswirkungen von Maßnahmen auf übergeordneten Skalenebenen
- Grundlage für Restrisikoabschätzungen zumindest auf Streckenebene
- Grundlage für alle anderen wasserwirtschaftlichen Planungen
- Grundlage für alle anderen relevanten Planungen im Raum (Infrastruktur, Raumplanung, Ökologie etc.).

8.12 Hydrodynamische Simulation und Partizipation

Gemäß Wasserrahmenrichtlinie und österreichischem Wasserrechtsgesetz in der geltenden Fassung und der EU-Hochwasserrichtlinie nimmt die Partizipation bei künftigen wasserwirtschaftlichen Planungen einen wichtigen Stellenwert ein. Die hydrodynamische Modellierung kann dabei einen wertvollen Beitrag leisten. Einerseits erlauben „realitätsnahe" Visualisierungen z. B. eines Hochwasserablaufs einen unmittelbaren „Eindruck" der damit verbundenen Probleme, was zu einer Akzeptanzsteigerung des Hochwassermanagements führt. Andererseits dienen z. B. „Lamellenrechnungen" zur schrittweisen Darstellung des abfluss- und wasserstandsabhängigen Überflutungsrisikos und damit zur Optimierung der Aktionen der Einsatzkräfte während eines Ereignisses.

8.13 Literatur

ARGE Kamp (2005): Gefahrenzonenplanung und Machbarkeitsstudie für den Kamp, Endbericht im Auftrag der NÖ Landesregierung

Nachtnebel, H.-P., Habersack, H. (1998): Planung und Konzeption flussbaulicher Maßnahmen im Hinblick auf den Hochwasserschutz, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft,* Heft 1/2, Jg. 50, S. 32–40

Habersack, H., Sattler, S., Grupe, S., Porzer, W. (1999): Feststofftransport an der Oberen Salzach, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft,* Heft 7/8, Jg. 51, S. 212–222

Habersack, H. M., Koch, M., Nachtnebel, H.-P. (2000): Flussaufweitungen in Österreich: Entwicklung, Stand und Ausblick, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft,* Heft 7/8, Jg. 52, 143–153

Habersack, H. M., Mayr, P., Gierlinger, R., Schneglberger, St. (2000): Mehrdimensionale Abflussmodellierung am Beispiel der Lafnitz, Wiener Mitteilungen, Bd. 165, 206 S.

Habersack, H. M., Stiefelmeyer, H., Petraschek, A., Bürgel, J. (2005): Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002 – FloodRisk, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft,* Heft 5/6, Jg. 57, 88–94

Habersack, H., Hauer, C. (2006): Flussmorphologisches Monitoring an der Sulm, Endbericht, Amt der Stmk. Landesregierung

Hinterleitner, G. (2004): Vergleich der Gefahrenzonenplanung gemäß alter Richtlinie und Richtlinienentwurf am Beispiel Kamp, Teilbericht zu FloodRisk.

Land Steiermark (2005): Ausweisung von Überflutungsflächen in der Steiermark, FA19

Sackl, B. (2005): Beispiel einer Ausweisung von Überflutungsflächen

9 Modelle, Hersteller und weitere Informationen

9.1 Einleitung

Eine vom ÖWAV Ende des Jahres 2004 durchgeführte Umfrage unter den im Fließgewässerbereich tätigen österreichischen Ingenieurbüros ergab, dass ein großer Prozentsatz bereits 1-D- und 2-D-Modellierungssoftware anwendet. Während sich das Spektrum der eingesetzten 1-D-Modelle trotz einer Vielzahl von Anbietern im Wesentlichen auf drei verschiedene Softwarepakete konzentriert, herrscht bei den zum Einsatz gebrachten 2-D-Modellen eine größere Variabilität. 3-D-Modelle finden derzeit in österreichischen Ingenieurbüros noch kaum Anwendung, es wird jedoch nur eine Frage der Zeit sein, bis sich diese Modelltechnologie für bestimmte Detailuntersuchungen auch in der Praxis durchzusetzen beginnt.

Jüngste Entwicklungen in Wissenschaft und Praxis zeigen jedenfalls deutlich, dass ein Trend von der Ein- zur Mehrdimensionalität in Bereichen der Gewässermodellierung zu verzeichnen ist. Dies ist nicht nur auf die besseren Rechenleistungen der heute zur Verfügung stehenden EDV zurückzuführen, sondern folgt auch aus den komplexeren Fragestellungen des modernen Schutzwasserbaus. Innerhalb weniger Jahre hat sich so die 2-D-Modellierung praktisch zum Stand der Technik für Abflussuntersuchungen entwickelt.

Neben der für Gefahrenzonenpläne immer wichtiger werdenden lokalen Entwicklung von Fließgeschwindigkeiten erlangt auch aufgrund der Wasserrahmenrichtlinie der EU der ökologische Aspekt rechtlich immer mehr an Bedeutung. Für diese Fragestellungen muss die Auflösung der Gewässerhydraulik mindestens zweidimensional sein. Die tiefengemittelten 2-D-Modelle (durch Integration der Impuls- und Kontinuitätsgleichung über die Wassertiefe h) liefern jedoch keinerlei Information über vertikale Geschwindigkeitsgradienten: Obwohl die Geometrie dreidimensional (x, y, z) festgelegt ist, wird die Berechnung zweidimensional durchgeführt. Mit 2-D-Modellen soll ein grundlegendes Problem in der Hydraulik offener Gerinne mit Vorländern, nämlich die Berechnung der voll entwickelten Geschwindigkeitsverteilung in breiten Gerinnen, gelöst werden.

3-D-Modelle kommen derzeit noch vorwiegend im universitären Umfeld für Detailuntersuchungen zum Einsatz, etwa zur Simulation von Strömungsvorgängen und der Lage des Wasserspiegels in starken Krümmungen des Flusslaufs oder im Nahbereich von wasserbaulichen Anlagen, wo die vertikale Geschwindigkeitskomponente von Bedeutung ist. Die Analyse des Hochwasserereignisses vom August 2002 (Habersack [Hrsg.], 2004) hat jedoch deutlich aufgezeigt, dass nur die 3-D-Modellierung geeignet ist, bestimmte im Hochwasserfall besonders ausgeprägte Fließphänomene ausreichend zu erfassen.

Hinsichtlich des Umfangs der Programmpakete zur Fließgewässermodellierung ist festzustellen, dass 1-D-Modelle im Allgemeinen komplett mit Pre- und Postprocessingmodulen angeboten werden, während bei 2-D-Modellen häufig eine Trennung in Berechnungsmodule und Oberfläche erfolgt. Aus diesem Grund findet sich bei jenen Modellen, die allein noch kein vollständiges Programmpaket darstellen, eine entsprechende Anmerkung in der Detailzusammenstellung. 3-D-Modelle hingegen werden – aufgrund der sehr unterschiedlichen Methoden zur dreidimensionalen Netzgenerierung – zum weitaus überwiegenden Teil bereits komplett mit Pre- und Postprocessingmodulen geliefert, deren Grad an verfügbarer Funktionalität allerdings naturgemäß variiert.

Insbesondere bei Modellen, die nicht direkt zur Fließgewässermodellierung entwickelt wurden (siehe dazu die Angaben bei den einzelnen Softwarepaketen), sind die Möglichkeiten zur Eingabe von Randbedingungen sowie der Ergebnisdarstellung oft eher allgemein gehalten und nicht spezifisch auf das hier diskutierte Anwendungsgebiet bezogen.

Die im Folgenden zusammengestellten Informationen über 1-D-, 2-D- und 3-D-Modelle wurden der jeweils angegebenen Literatur, den Angaben der Softwarehersteller im Internet, sowie – falls verfügbar – den Handbüchern zur Software entnommen. Für manche Produkte war es jedoch nur schwer möglich, über diese Quellen präzise Spezifikationen der implementierten Methoden in Erfahrung zu bringen, da der Detaillierungsgrad der angebotenen Informationen zwischen den Herstellern stark schwankt. Dies gilt darüber hinaus vor allem auch für Informationen zu den Preisen der Softwarepakete, da hinsichtlich der Preisgestaltung eine Vielzahl von unterschiedlichen und oft auch nicht miteinander vergleichbaren Lizenzierungsmodellen zur Anwendung gelangt. Um dennoch einen groben Anhaltspunkt bezüglich der zu erwartenden Preise bieten zu können, wurde ein dreistufiges Referenzsystem eingeführt, bei dem die Kosten für ein Softwarepaket in *Freeware*, *Low-End* und *High-End* unterteilt werden.

Naturgemäß erfährt gerade der Bereich der numerischen Strömungsmodellierung derzeit viele Forschungs- und Entwicklungsimpulse, was sich auch in der schnellen Evolution der Softwarepakete widerspiegelt. Zudem gibt es gerade im Bereich der 1-D- und 2-D-Modelle eine sehr große Zahl von Anbietern, weshalb jede Auflistung zwangsläufig unvollständig sein muss. Insbesondere die Liste eindimensionaler Modelle wurde daher unter dem Gesichtspunkt eines hohen Verbreitungsgrads in Österreich erstellt, basierend auf der eingangs erwähnten Umfrage durch den ÖWAV. Aus diesem Grund erhebt die folgende Zusammenstellung keinen Anspruch auf Vollständigkeit, weder hinsichtlich der präsentierten Softwarepakete als auch deren zugrunde liegender Ansätze. Der Ausschuss plant, die nachfolgende Übersicht laufend zu aktualisieren und die Ergebnisse auf der Website des ÖWAV (www.oewav.at) zur Verfügung zu stellen.

Die folgenden Softwarepakete wurden in den Vergleich einbezogen (in alphabetischer Reihenfolge):

1-D-Modelle

- *FLUX/FLORIS* (VAW/ETH Zürich, Schweiz und SCIETEC, Österreich)
- *HEC-RAS* (US Army Corps of Engineers, USA)
- *MIKE 11* (DHI Water and Environment, Dänemark)
- *WASPI* (Hydroconsult, Österreich)

2-D-Modelle

- *AquaDyn* (Hydrosoft Energie Inc.)
- *CCHE2D* (Nat. Center for Comp. Hydroscience and Engineering, USA)
- *FLO-2D* (FLO-2D Software Inc., USA)
- *Flumen* (Beffa Hydrodynamik, Schweiz)
- *Hydro_As-2D* (Dr. Nujic, Deutschland) [reiner Rechenmodul ohne Oberfläche]
- *MIKE 21* und *MIKE Flood* (DHI Water and Environment, Dänemark)

- *SMS* (Scientific Software Group, USA) [reiner Pre- und Postprocessing-Modul]
- *TELEMAC-2D* (Electricité de France, Frankreich)

3-D-Modelle

- *CFX-5* (AEA Technology, UK)
- *Comet* (ICCM, Deutschland)
- *Delft3D* (WL | Delft Hydraulics, Niederlande)
- *FIDAP* (Fluent Inc., USA)
- *Flo++* (Softflo Corp., Südafrika)
- *FLOW-3D* (Flow Science Inc., USA)
- *FLUENT* (Fluent Inc., USA)
- *PHOENICS* (CHAM Ltd, UK)
- *RSim-3D* (Dr. Tritthart, Österreich)
- *SSIIM* (Norwegian University of Science and Technology, Norwegen)
- *STAR-CD* (CD adapco group, UK/USA)
- *SWIFT* (AVL List GmbH, Österreich)
- *TELEMAC-3D* (Electricité de France & HR Wallingford, Frankreich/UK)

Die angegebenen Links zu den Webpages der Softwarehersteller wurden zuletzt im August 2007 überprüft.

9.2 1-D-Modelle

Name der Software:	FLUX$^{DSS/DESIGNER}$ & FLORIS
Hersteller:	SCIETEC, Linz, Österreich; basierend auf dem numerischen Kern der VAW/ ETH Zürich, Schweiz
Webpage:	www.scietec.at
Kosten:	High-End
Betriebssysteme:	Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Differenzen und Finite Volumen (Benutzerauswahl)
Numer. Methoden:	• Finite Differenzen: Preissmann-Schema (implizit) zur Diskretisierung der Grundgleichungen inklusive instationärem Term, Lösung mittels Newton-Raphson-Verfahren • Finite Volumen: Upwind-Verfahren 1. Ordnung nach Roe zur Raumdiskretisierung, Zeitdiskretisierung implizit, 2. Ordnung
Projektreferenzen:	• Hochwasserschutzkonzept Lechtal (SCIETEC, Österreich) • Ermittlung von Pegelschlüsseln Kärntner Flüsse mittels numerischer Modellierung (SCIETEC, Österreich) • Hochwasserprognose für die niederösterreichische Donau (ZAMG, TU Wien und SCIETEC, Österreich) • Hochwasserprognose für den Tiroler Inn (alpS, Österreich) • Erstellung eines mathematischen Modells für die österreichische Draukette unter Berücksichtigung des Feststofftransports (SCIETEC, Österreich)
Literaturreferenzen:	Reichel und Fäh (1995), Reichel (2001)

Name der Software:	HEC-RAS
Hersteller:	US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California, USA
Webpage:	www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras
Kosten:	Freeware
Betriebssysteme:	Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Differenzen
Numer. Methoden:	• Preissmann-Schema (implizit) zur Diskretisierung der Grundgleichungen inklusive instationärem Term
Projektreferenzen:	• Hydrodynamische Untersuchung des Hochwasserereignisses vom August 2002 an Zwettl und oberem Kamp (TU Wien, Österreich) • Flussbauliches Gesamtprojekt Donau östlich von Wien (DonauConsult, Österreich) • Optimierung der Ab- und Aufstauvorgänge bei Stauraumspülungen der Oberen Mur (TU Graz, Österreich)
Literaturreferenzen:	USACE (2002)

Name der Software:	MIKE 11
Hersteller:	DHI Water and Environment, Hørsholm, Dänemark
Webpage:	www.dhigroup.com
Kosten:	High-End inkl. Oberfläche
Betriebssysteme:	Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Differenzen
Numer. Methoden:	• 6-Punkt-Abbot-Schema zur Lösung der Kontinuitäts- und Momentengleichung (Abbot & Ionescu, 1967)
Projektreferenzen:	• Alm, Österreich • Mur mit Nebenflüssen, Österreich • Enns, Österreich • Sulm, Österreich
Literaturreferenzen:	Abbot & Ionescu, 1967

Name der Software:	WASPI
Hersteller:	Hydroconsult, Graz, Österreich; basierend auf Software des US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California, USA
Webpage:	http://www.hydroconsult.net/software_de.htm
Kosten:	High-End
Betriebssysteme:	Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Differenzen
Numer. Methoden:	• Preissmann-Schema (implizit) zur Diskretisierung der Grundgleichungen inklusive instationärem Term
Projektreferenzen:	• GBK Glan / Kärnten (Hydroconsult, Österreich) • Enns / Oberösterreich (Hydroconsult, Österreich) • Donau, HWS Machland / OÖ (Hydroconsult, Österreich) • Grazer Bäche / Steiermark (Hydroconsult, Österreich)
Literaturreferenzen:	keine

Zusammenstellung der 1-D-Softwarepakete

	FLUX DSS/DESIGNER & FLORIS	HEC-RAS	MIKE 11	WASPI
Hersteller der Software				
Nichtkommerziell / Kommerziell	K	N	K	K
Unterstützte Betriebssysteme				
UNIX Linux Windows OS/2	x	x	x	x
Raumdiskretisierung				
FDM / FEM / FVM	D/V	D	D	D

9.3 2-D-Modelle

Name der Software:	AQUADYN
Hersteller:	HydroSoft Energie Inc.
Webpage:	www.technum.com
Kosten:	Low-End
Betriebssysteme:	Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Elemente
Gittertypen:	Unstrukturiertes Dreiecksgitter
Numer. Methoden:	Räumlich: Standard-Galerkin-Verfahren
Turbulenzmodelle:	keine Angaben
Projektreferenzen:	• Untersuchungen von Ausleitungsstrecken (Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart)
Literaturreferenzen:	keine

Name der Software:	CCHE2D
Hersteller:	National Center for Computational Hydroscience and Engineering, Mississippi, USA
Webpage:	www.ncche.olemiss.edu
Kosten:	Freeware
Betriebssysteme:	Windows
Raumdiskretisierung:	Efficient Element Method (spezielle FE-Methode)
Gittertypen:	Strukturiertes verschiebbares Gitter aus Vierecken
Numer. Methoden:	Zeitlich: Runge-Kutta-Verfahren
Turbulenzmodelle:	• Tiefengemitteltes parabolisches Wirbelviskositätsmodell • Tiefengemitteltes k-ε-Modell • Mischungswegmodell
Projektreferenzen:	• Simulation von Gerinnevereinigungen und Gerinneverzweigungen (Khan et al., 2000) • Strömungen in Gerinnekrümmungen (Khan & Barkdoll, 2000) • Strömungssimulation in Schleusen und Stauanlagen (Khan & Wang, 2000)
Literaturreferenzen:	Yafei & Wang (2001)

Name der Software:	FLO-2D
Hersteller:	FLO-2D Software, Inc., Nutrioso, Arizona, USA
Webpage:	www.flo-2d.com
Kosten:	Low-End
Betriebssysteme:	Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Differenzen
Gittertypen:	Strukturiertes Gitter aus Vierecken
Numer. Methoden:	keine Angaben
Turbulenzmodelle:	keine Angaben
Projektreferenzen:	• Simulation von Hochwasser und Murgängen im Cerro Grande River (Bello et al., 2004) • Abgrenzung von Gefahrenzonen auf urbanisierten Schuttkegeln (Garcia et al., 2004)
Literaturreferenzen:	keine

Name der Software:	FLUMEN
Hersteller:	Beffa Hydrodynamik, Schwyz, Schweiz
Webpage:	www.fluvial.ch
Kosten:	High-End
Betriebssysteme:	Linux, Solaris, DEC/UNIX, SGI
Raumdiskretisierung:	Finite Volumen
Gittertypen:	Unstrukturiertes Dreiecksnetz
Numer. Methoden:	Explizites, zellenzentriertes Verfahren Flux-Difference Splitting nach Roe
Turbulenzmodelle:	keine Angaben
Projektreferenzen:	• Simulation von Ausuferungen und Überflutungen zur Dimensionierung von Schutzbauten oder Notfallplanung (Beffa, 2002; Denoth, 2003) • Simulation von Flutwellen infolge des Dammbruchs von Talsperren oder Deichen (Beffa, 2001) • Habitatmodellierung und Beurteilung von Organismendurchgängigkeit (Beffa & Hürlimann, 2001) • Simulation von Schwall und Sunk in Flussstauhaltungen • Simulation von Sohlauflandungen und -erosionen in Flussaufweitungen
Literaturreferenzen:	Beffa (2003)

Name der Software:	Hydro_As-2D
Hersteller:	Dr. Marinko Nujic, Rosenheim, Deutschland
Webpage:	www2.hydrotec.de/vertrieb/hydro_as_2d
Kosten:	High-End (inkl. Oberfläche)
Betriebssysteme:	Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Volumen
Gittertypen:	Unstrukturierte Vierecks- und Dreieckselemente
Numer. Methoden:	Newton-Rhapson-Methode
Turbulenzmodelle:	k-ε-Modell
Projektreferenzen:	• Hochwasserschutz Machland Nord • Abflussuntersuchung Raab/Stmk. • Hochwasserschutz Enns-Altenmarkt/Salzburg • Hochwasserschutz Salzach/Golling, Kuchl, Hallein • GBK Glan/Kärnten
Literaturreferenzen:	keine
Anmerkung:	Hydro_As-2D ist ein reiner Rechenmodul, der SMS als Oberfläche benötigt

Name der Software:	MIKE 21 und MIKE Flood
Hersteller:	DHI Water and Environment, Hørsholm, Dänemark
Webpage:	www.dhigroup.com
Kosten:	High-End inkl. Oberfläche
Betriebssysteme:	Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Differenzen Methode / Finite Volumen Methode
Gittertypen:	Unstrukturiertes Gitter aus Dreiecken und Vierecken, Viereckssraster, curvelineare Grids
Numer. Methoden:	• Finite Differenzen 2. Ordnung • Zellenzentrierte Finite Volumen 1. und 2. Ordnung, explizites Upwind-Schema durch approximativen Riemann-Solver (Roe-Schema) • Zeitintegration: explizites Euler Schema (1. Ordnung), Runge-Kutta (2. Ordnung)
Turbulenzmodelle:	Konstantes Wirbelviskositätsmodell, variierendes Wirbelviskositätsmodell, k-ε Modell, Smagorinsky-Formel
Projektreferenzen:	• Beurteilung von Hochwassereinwirkungen (McCowan & Collins, 1999) • Abflussuntersuchung in Vorlandbereichen (McCowan et al., 2002) • Simulation von Wärme- und Salzströmungen • Berechnungen der Wasserqualität • Erosion, Transport und Ablagerung von Sediment
Literaturreferenzen:	DHI, 2007
Anmerkung:	MIKE 21 wird erst durch MIKE Flood zu einem vollwertigen Tool zur Modellierung von Abflussräumen einschließlich der Vorländer. MIKE 21 wurde ursprünglich zur Modellierung von Küstenbereichen bzw. küstennahen Gewässern entwickelt. MIKE Flood kombiniert die 1-D-Berechnung des Flussschlauchs mit der 2-D-Berechnung in den Vorländern.

Name der Software:	SMS
Hersteller:	Scientific Software Group, Sandy, Utah, USA
Webpage:	www.scisoftware.com/products/sms_details/sms_details.html
Kosten:	keine Angaben
Betriebssysteme:	Windows, UNIX
Raumdiskretisierung:	Finite Elemente
Gittertypen:	Unstrukturierte Dreiecks- und Viereckselemente
Numer. Methoden:	Newton-Raphson-Methode
Turbulenzmodelle:	k-ε-Modell
Projektreferenzen:	• Mehrdimensionale Abflussmodellierung am Beispiel der Lafnitz (Habersack et al., 2000) • Berechnungen des Transports von suspendiertem Sediment mit Hilfe des Moduls SED2-D
Literaturreferenzen:	BOSS (2002)
Anmerkung:	SMS ist ein reines Pre- und Postprocessingprogramm, die oben angeführten Angaben beziehen sich daher auf die angeschlossenen Rechenmodule, z. B. RMA2 bzw. RMA4, FESWMS, TUFLOW, Hydro_As-2D, SED-2d etc.

Name der Software:	TELEMAC-2D
Hersteller:	Laboratoire d'Hydraulique der EDF – DER, Chatou, Paris
Webpage:	www.telemacsystem.com
Kosten:	keine Angaben
Betriebssysteme:	UNIX, Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Elemente
Gittertypen:	Unstrukturiertes Dreiecksgitter
Numer. Methoden:	Streamline Upwind Petrov-Galerkin-Verfahren
Turbulenzmodelle:	• konstante Wirbelviskosität • k-ε-Modell • Ansatz von Elder
Projektreferenzen:	• Design von Hochwasserdurchlässen unter einer Autobahn (Sauvaget et al., 2002) • Modellierung von Dammbrüchen in urbanen Bereichen (Hervouet et al., 2000)
Literaturreferenzen:	Anderson et al. (2000)

Zusammenstellung der 2-D-Softwarepakete

	AQUADYN	CCHE2D	FLO-2D	FLUMEN	Hydro_As-2D	MIKE 21	SMS	TELEMAC-2D
Hersteller der Software								
Nichtkommerziell / Kommerziell	K	N	K	K	K	K	K	K
Unterstützte Betriebssysteme								
UNIX				x			x	x
Linux				x				
Windows	x	x	x		x	x	x	x
OS/2								
Raumdiskretisierung								
FDM / FEM / FVM	E	E	D	V	V	D/V	E	E
Gittertypen								
Strukturiert / Unstrukturiert	U	S	S	U	U	U	U	U
Zellformen								
Dreiecke	x			x	x	x	x	x
Vierecke		x	x		x	x	x	
Turbulenzmodelle								
Null-Gleichungs-Modell		x				x		x
k-ε-Modell		x			x	x	x	x
k-ω-Modell								
Andere		x				x		x

9.4 3-D-Modelle

Name der Software:	CFX-5
Hersteller:	AEA Technology, UK
Webpage:	www.cfx-germany.com
Kosten:	High-End
Betriebssysteme:	UNIX, Linux, Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Volumen
Gittertypen:	Unstrukturiertes Gitter aus Tetraedern und Hexaedern
Numer. Methoden:	• Upwind-Verfahren 1. Ordnung sowie ein Verfahren mit der Bezeichnung „numerical advection corrected scheme" zur Wahl • Approximation des Druckfelds über Eigenentwicklung • Zeitdiskretisierung mittels des Eulerschen Rückwärtsdifferenzverfahrens (1. Ordnung)
Turbulenzmodelle:	• Null-Gleichungs-Modell • zwei Arten von k-ε-Modellen • k-ω-Modell • Reynoldssches Spannungsmodell
Freie Oberfläche:	Über ein Flüssigkeits-Mischmodell sind beliebige Ausbildungen der freien Oberfläche möglich
Projektreferenzen:	• Studie der Kolkbildung unter einer Hochsee-Schiffsanlegestelle in Indien (HR Wallingford, UK) • Untersuchung von Strömungsvorgängen im Nahbereich von Einlaufbauwerken (Hydroplan, UK) • Studie zur Ausbildung von Renaturierungsmaßnahmen an Fließgewässern (Universität Nottingham, UK) • Analyse von Dichteströmungen in einem See (ETH Lausanne, Schweiz) [zit. in Olsen, 1999a].
Literaturreferenzen:	AEA (2002)

Name der Software:	Comet
Hersteller:	Institute of Computational Continuum Mechanics GmbH (Mitglied der CD adapco group), Hamburg, Deutschland
Webpage:	www.iccm.de
Kosten:	unbekannt
Betriebssysteme:	UNIX, Linux, Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Volumen
Gittertypen:	Unstrukturiertes Gitter aus Tetraedern und Hexaedern
Numer. Methoden:	• Upwind, Zentrale Differenzen, MINMOD- oder HRIC-Verfahren zur Wahl • Approximation des Druckfelds über SIMPLE-Algorithmus • Zeitdiskretisierung über implizite Verfahren 1. und 2. Ordnung
Turbulenzmodelle:	• Null-Gleichungs-Modell • Zahlreiche Varianten von k-ε-Modellen • Alle bekannten Varianten des k-ω-Modells • Reynoldsches Spannungsmodell
Freie Oberfläche:	Interface-Tracking-Verfahren
Projektreferenzen:	• Software in Verwendung bei: • Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH, Deutschland • Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, Deutschland
Literaturreferenzen:	keine

Name der Software:	Delft3D
Hersteller:	WL | Delft Hydraulics, Delft, Niederlande
Webpage:	www.wldelft.nl/d3d
Kosten:	High-End
Betriebssysteme:	Linux, Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Differenzen
Gittertypen:	Orthogonales, gekrümmtes Gitter
Numer. Methoden:	ADI-Verfahren zur Diskretisierung der zugrunde liegenden Gleichungen inklusive der instationären Terme
Turbulenzmodelle:	• Null-Gleichungs-Modell • k-L-Modell • k-ε-Modell
Freie Oberfläche:	Hydrostatische Druckannahme: Die Wasseroberfläche tritt als Unbekannte in den Grundgleichungen auf und wird direkt gelöst
Projektreferenzen:	• Hydrodynamik in Küstengewässern im Zusammenhang mit der Neuerrichtung des Flughafens von Hongkong • Studie morphologischer Vorgänge an der niederländischen Küste • Studien am Malawisee und Viktoriasee in Afrika
Literaturreferenzen:	Luijendijk (2001)

Name der Software:	FIDAP
Hersteller:	Fluent Inc., Lebanon, New Hampshire, USA
Webpage:	www.fluent.com
Kosten:	High-End
Betriebssysteme:	UNIX, Linux, Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Elemente
Gittertypen:	Unstrukturiertes Gitter aus Tetraedern und Hexaedern
Numer. Methoden:	• Finite-Elemente-Verfahren zur Raumdiskretisierung • Sowohl explizite (Eulersches Rückwärtsdifferenzverfahren (1. Ordnung), Trapezregel (2. Ordnung)) als auch implizite Verfahren zur Zeitdiskretisierung verfügbar
Turbulenzmodelle:	• Null-Gleichungs-Modell • Vier verschiedene k-ε-Modelle • k-ω-Modell
Freie Oberfläche:	• Volume of Fluid (VOF)-Verfahren für große Verschiebungen an der freien Oberfläche • Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)-Formulierung für kontinuierliche Änderungen der Oberfläche
Projektreferenzen:	siehe Webpage
Literaturreferenzen:	Fluent (1998)

Name der Software:	Flo++
Hersteller:	Softflo Corp., Potchefstroom, Südafrika
Webpage:	www.softflo.com
Kosten:	Low-End
Betriebssysteme:	Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Volumen
Gittertypen:	Unstrukturiertes Gitter aus Tetraedern und Hexaedern
Numer. Methoden:	• Upwind-Verfahren • SIMPLE- und PISO-Algorithmen zur Approximation des Druckfelds • Vollimplizite Zeitdiskretisierung
Turbulenzmodelle:	k-ε-Modell für hohe Reynoldszahlen
Freie Oberfläche:	Implementiert (Verfahren nicht näher spezifiziert)
Projektreferenzen:	siehe Webpage
Literaturreferenzen:	keine

Name der Software:	FLOW-3D
Hersteller:	Flow Science Inc., Santa Fe, New Mexico, USA
Webpage:	www.flow3d.com
Kosten:	High-End
Betriebssysteme:	UNIX, Linux, Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Differenzen
Gittertypen:	Strukturiertes Gitter aus Quaderelementen
Numer. Methoden:	• Normalfall: Einsatz von expliziten Verfahren sowohl zur Raum- als auch Zeitdiskretisierung • Optional: Implizite Verfahren verfügbar (keine näheren Details dazu spezifiziert)
Turbulenzmodelle:	• Null-Gleichungs-Modell • Ein-Gleichungs-Modell • Zwei Arten von k-ε-Modellen
Freie Oberfläche:	Volume of Fluid (VOF)-Verfahren
Projektreferenzen:	• Hydrodynamik am Scriber's Creek (INCA Engineers) • Studie der Strömungsverhältnisse im Nahbereich einer Straßenbrücke (INCA Engineers) • Schneedriftanalyse (Universität Narvik) • Schussrinnenkontraktion (Universität Innsbruck) • Unterströmung einer Brücke (Universität Innsbruck)
Literaturreferenzen:	keine

Name der Software:	FLUENT
Hersteller:	Fluent Inc., Lebanon, New Hampshire, USA
Webpage:	www.fluent.com
Kosten:	High-End
Betriebssysteme:	UNIX, Linux, Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Volumen
Gittertypen:	Unstrukturiertes Gitter aus Tetraedern und Hexaedern
Numer. Methoden:	• Zentrales Differenzenverfahren, Upwind-Verfahren 1. und 2. Ordnung, Exponentialgesetz, QUICK-Verfahren verfügbar • Zeitdiskretisierung über wahlweise explizite oder implizite Verfahren 1. und 2. Ordnung
Turbulenzmodelle:	• Spalart-Almaras-Modell (Ein-Gleichungs-Modell) • drei verschiedene k-ε-Modelle • zwei Arten von k-ω-Modellen
Freie Oberfläche:	Volume-of-Fluid (VOF)-Verfahren
Projektreferenzen:	• Überströmung einer Wehranlage • Analyse von Strömungen in Trinkwasserreservoirs
Literaturreferenzen:	Fluent (2001)

Name der Software:	PHOENICS
Hersteller:	Concentration, Heat & Momentum Ltd, London, UK
Webpage:	www.cham.co.uk
Kosten:	Low-End
Betriebssysteme:	UNIX, Linux, Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Volumen
Gittertypen:	Strukturiertes Gitter aus Hexaedern
Numer. Methoden:	• QUICK-Verfahren, alternativ dazu nichtlineare Verfahren (SMART, OSPRE) verfügbar • Approximation des Druckfelds über SIMPLE-Algorithmus
Turbulenzmodelle:	• Mehrere Null-Gleichungs-Modelle • zahlreiche unterschiedliche k-ε-Modelle • k-ω-Modell
Freie Oberfläche:	• Skalar-Gleichungs-Verfahren (Position der freien Oberfläche wird aus der Lösung der Erhaltungsgleichung abgeleitet) • Height-of-Liquid-Verfahren
Projektreferenzen:	• Strömungsuntersuchungen in unterschiedlich ausgebildeten Trinkwasserreservoirs • Strömungen in Hafenbecken • Ausbreitung einer Ölverschmutzung im Meer
Literaturreferenzen:	Spalding (1986) [zit. in JHR vol. 35 (1997) S. 488]

Name der Software:	RSim-3D
Hersteller:	Dr. Michael Tritthart (BOKU Wien, ursprünglich TU Wien)
Webpage:	keine
Kosten:	Individuelle Vereinbarung mit dem Hersteller je nach Nutzung
Betriebssysteme:	UNIX, Linux, Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Volumen
Gittertypen:	Unstrukturiertes Gitter aus vielflächigen dreidimensionalen Zellen in beliebiger Gestalt, basierend auf einer Voronoi-Zerlegung des Rechengebiets
Numer. Methoden:	• Verallgemeinertes Upwind-Verfahren 2. Ordnung • Approximation des Druckfelds mittels SIMPLE-Algorithmus • Implizites Verfahren zur Zeitdiskretisierung
Turbulenzmodelle:	• k-ε-Modell
Freie Oberfläche:	Kontinuierliche Ermittlung der Spiegellage aus Druckfeld an der freien Oberfläche
Projektreferenzen:	• Hochwasser 2002 im Greiner Donauknie (Tritthart, 2005; Tritthart, 2006) • Altarmanbindung an der Sulm/Stmk. (Hauer et al., 2007) • Laufverlängerung an der Raab/Stmk. • Naturversuchsstrecke Bad Deutsch-Altenburg im Rahmen des flussbaulichen Gesamtprojekts Donau östlich von Wien
Literaturreferenzen:	Tritthart (2005), Tritthart & Gutknecht (2005)

Name der Software:	SSIIM
Hersteller:	Norwegian University of Science and Technology, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Assoc. Prof. N. R. B. Olsen
Webpage:	www.bygg.ntnu.no/~nilsol/ssiimwin
Kosten:	Freeware
Betriebssysteme:	Linux, OS/2, Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Volumen
Gittertypen:	• Strukturiertes Gitter aus Hexaedern (Version 1.1) • Unstrukturiertes Gitter aus Hexaedern und keilförmigen Zellelementen (Version 2.0)
Numer. Methoden:	• Upwind 2. Ordnung und Exponentialgesetz zur Wahl • Approximation des Druckfelds mittels SIMPLE- bzw. SIMPLEC-Algorithmen • Implizites Verfahren zur Zeitdiskretisierung (Olsen et al., 1999b)
Turbulenzmodelle:	• k-ε-Modell
Freie Oberfläche:	• Transient-Free-Surface (TFS)-Algorithmus
Projektreferenzen:	• Analyse von Sekundärströmungen in gekrümmten Gerinneabschnitten • Berechnung der Kolkbildung hinter Einbauten in Gerinnen • Parameterstudien zu Stauraumspülungen (Olsen, 2000b; Tritthart, 2000) • Analyse der Wirkung überströmter Vegetation in Fließgewässern (Fischer-Antze et al., 2001) • Studien zur Entwicklung von mäandrierenden Flussläufen (Olsen, 2002)
Literaturreferenzen:	Olsen (1999a), Olsen (2000a)

Name der Software:	STAR-CD
Hersteller:	CD adapco Group (Computational Dynamics Ltd, London, UK und adapco, New York, USA)
Webpage:	www.cd-adapco.com
Kosten:	High-End
Betriebssysteme:	UNIX, Linux, Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Volumen
Gittertypen:	Unstrukturiertes Gitter aus Tetraedern und Hexaedern
Numer. Methoden:	• Automatische Wahl des zentralen Differenzenverfahrens oder des Upwind-Verfahrens 1. Ordnung, in Abhängigkeit von der Größe der auftretenden numerischen Dissipation • Approximation des Druckfelds mittels SIMPLE-Algorithmus • Implizites Verfahren zur Zeitdiskretisierung
Turbulenzmodelle:	• Null-Gleichungs-Modell • Fünf verschiedene Varianten des k-ε-Modells
Freie Oberfläche:	Volume-of-Fluid (VOF)-Verfahren
Projektreferenzen:	• Designstudien zu künstlichen Riffen (TU Berlin) • Designstudien zur Ausbildung von Wehrrücken (Universität Hannover) • Strömungsmodellierung im Nahbereich von Pfeilern in Fließgewässern • Entwicklung eines Fisch-Leitsystems am Bonneville Damm (US Army Corps of Engineers) • Studien zu Strömungen in Stauräumen (Arup Corp.)
Literaturreferenzen:	keine

Name der Software:	SWIFT
Hersteller:	AVL List GmbH, Graz, Österreich
Webpage:	www.avl.com
Kosten:	unbekannt
Betriebssysteme:	UNIX, Linux, Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Volumen
Gittertypen:	Unstrukturiertes Gitter aus beliebigen Zellformen
Numer. Methoden:	• Upwind-Verfahren 1. Ordnung, Zentrales Differenzenverfahren (2. Ordnung) sowie zwei Verfahren 3. Ordnung (MINMOD u. AVL-SMART) zur Auswahl • Approximation des Druckfelds mittels einer Variante des SIMPLE-Algorithmus • Implizites Verfahren zur Zeitdiskretisierung (1. bzw. 2. Ordnung zur Auswahl)
Turbulenzmodelle:	• k-ε-Modell • nichtlineares Reynolds-Stress-Modell (SSG) • Hybrides Turbulenzmodell (Eigenentwicklung)
Freie Oberfläche:	Volume-of-Fluid (VOF)-Verfahren
Projektreferenzen:	• Lawinensimulation (Forstliche Bundesversuchsanstalt Innsbruck) • Überflutungssimulation (VRVis – Zentrum für Virtual Reality und Visualisierung)
Literaturreferenzen:	Gouda et al. (2002)

Name der Software:	TELEMAC-3D
Hersteller:	Electricité de France (Laboratoire National d'Hydraulique), Clamart, Frankreich
Webpage:	www.telemacsystem.com
Kosten:	High-End
Betriebssysteme:	UNIX, Windows
Raumdiskretisierung:	Finite Elemente
Gittertypen:	Unstrukturiertes Gitter aus Tetraedern
Numer. Methoden:	Fractional-Step-Verfahren
Turbulenzmodelle:	• Null-Gleichungs-Modell • k-ε-Modell
Freie Oberfläche:	Hydrostatische Druckannahme: Die Wasseroberfläche tritt als Unbekannte in den Grundgleichungen auf und wird direkt gelöst
Projektreferenzen:	siehe Webpage
Literaturreferenzen:	Hervouet et al. (1994), Anderson (2000)

Zusammenstellung der 3-D-Softwarepakete

	CFX-5	Comet	Delft3D	FIDAP	Flo++	FLOW-3D	FLUENT	PHOENICS	RSim-3D	SSIIM	STAR-CD	SWIFT	TELEMAC-3D
Hersteller der Software													
Akademisch / Kommerziell	K	A/K	K	K	K	K	K	K	A	A	K	K	K
Unterstützte Betriebssysteme													
UNIX	x	x		x		x	x	x	x		x	x	x
Linux	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	
Windows	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
OS/2										x			
Raumdiskretisierung													
FDM / FEM / FVM	V	V	D	E	V	D	V	V	V	V	V	V	E
Gittertypen													
Strukturiert / Unstrukturiert	U	U	S	U	U	S	U	S	U	U	U	U	U
Zellformen													
Tetraeder	x	x		x			x		x		x	x	x
Hexaeder	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Numerische Methoden – Raum													
Zentrale Differenzen		x					x				x	x	
Upwind 1. Ordnung	x	x			x		x				x	x	
Upwind 2. Ordnung							x		x	x			
QUICK-Verfahren							x	x					
Andere	x	x	x	x		x	x	x		x		x	x
Numerische Methoden – Zeit													
Explizit 1. Ordnung				x		x	x						
Implizit 1. Ordnung	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x	
Implizit 2. Ordnung		x		x		x	x					x	
Andere			x					x					x
Approximation d. Druckfeldes													
SIMPLE-Algorithmus		x			x			x	x	x	x	x	
Andere Verfahren	x			x	x	x	x			x			
Hydrostatische Druckannahme			x										x
Turbulenzmodelle													
Null-Gleichungs-Modell	x	x	x	x		x		x			x		x
k-ε-Modell	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
k-ω -Modell	x	x		x			x	x					
Andere	x	x	x			x	x	x				x	
Freie Oberfläche													
Implementiert	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

9.5 Literatur

Abbot, M. B., Ionescu, F. (1967): On the numerical computation of nearly horizontal flows. *Journal of Hydraulic Research,* Vol. 5, pp. 97–117

AEA (2002): CFX-5 User Documentation Version 5.5.1, AEA Technology Engineering Software Limited, Waterloo, Ontario, Canada

Anderson, M. G. [ed.] (2000): Special Issue: The TELEMAC Modelling System. *Hydrological Processes,* Vol. 14, pp. 2207–2364

Beffa, C. (2001): Ein Parameterverfahren zur Bestimmung der flächigen Ausbreitung von Breschenabflüssen. *wasser, energie, luft,* Jg. 93, Heft 3/4, S. 73–80

Beffa, C., Hürlimann, J. (2001): Ermittlung von charakteristischen Strömungsparametern in verzweigten und unverzweigten Gerinnen. *Ingenieurbiologie / génie biologique* 04/01

Beffa, C. (2002): Integration von ein- und zweidimensionalen Modellen zur hydrodynamischen Simulation von Gewässersystemen. Int. Symposium „Moderne Methoden im Wasserbau“, ETH Zürich

Beffa, C. (2003): 2D-Strömungssimulation mit Flumen. ÖWAV-Seminar 26.-27.2.2003 „Fließgewässermodellierung – von der Ein- zur Mehrdimensionalität?!“, Wien

Bello, M. E., O’Brien, J. S., López, J. L., Garcia-Martínez, R. (2004): Simulation of Flooding and Debris Flows in the Cerro Grande River. ASCE and EWRI World Water & Environmental Congress, Salt Lake City, Utah, USA

BOSS Intl. (2002): SMS 8.0 Users Manual, Madison, Wisconsin, USA

Denoth, S. (2003): Zweidimensionale Hochwassersimulation der Elbe zwischen Torgau und Coswig. Diplomarbeit, Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH Zürich

DHI (2007): MIKE 21 & MIKE 3 flow model FM, Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation, DHI Water & Environment, Hørsholm, Denmark

Fischer-Antze, T., Stoesser, T., Bates, P., Olsen, N. R. B. (2001): 3D numerical modelling of open-channel flow with submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Research,* Vol. 39, pp. 303–310

Fluent (1998): FIDAP 8 Theory Manual. Fluent Inc., Lebanon, New Hampshire, USA

Fluent (2001): FLUENT 6.0 User’s Manual. Fluent Inc., Lebanon, New Hampshire, USA

García, R., Rodríguez, J. J., O’Brien, J. S. (2004): Hazard Zone Delineation for Urbanized Alluvial Fans. ASCE and EWRI World Water & Environmental Congress, Salt Lake City, Utah, USA

Gouda, M., Karner, K., Tatschl, R. (2002): Dam Flooding Simulation Using Advanced CFD Methods. Proc., WCCM V, Vienna, Austria

Habersack, H., Mayr, P., Gierlinger, R., Poppe, M., Schneglberger, St. (1999): Mehrdimensionale Abflussmodellierung am Beispiel der Lafnitz. Projektbericht für den Jubiläumsfond der Österreichischen Nationalbank, Projekt Nr. 6380

Habersack, H. [Hrsg.] (2004): Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002 – FloodRisk, Synthesebericht. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur, Wien

Hauer, Ch., Unfer, G., Schmutz, S., Tritthart, M., Habersack, H. (2007): The necessity of modelling the stability of rheophilous cyprinids spawning grounds including comparing 1D, 2D and 3D numerical models. Proc. 6th Ecohydraulics Symposium, 18.–23.2.2007, Christchurch, Neuseeland

Hervouet, J.-M., Hubert, J.-L., Janin, J.-M., Lepeintre, F., Peltier, E. (1994): The computation of free surface flows with TELEMAC: an example of evolution towards hydroinformatics. *Journal of Hydraulic Research,* Vol. 32, extra issue, pp. 45–64

Hervouet, J.-M., Samie, R., Moreau, B. (2000): Modelling urban areas in dam-break flood-wave numerical simulations. International Seminar and Workshop on Rescue Actions based on Dam-break Flood Analysis, October 1–6, Seinäjoki, Finland

Khan, A. A., Cadavid, R., Wang, S. S.-Y. (2000): Simulation of Channel Confluence and Bifurcation using CCHE2D Model. *Journal of Water and Maritime Engineering,* The Institution of Civil Engineers/IAHR, Vol. 142

Khan, A. A., Barkdoll, B. (2000): Two-Dimensional Depth-Averaged Models for Flow Simulation in River Bends. *International Journal of Computational Engineering Science,* Vol. 2, pp. 453–467

Khan, A. A., Wang, S. S.-Y. (2000): Application of CCHE2D Model to Flow Simulation in Lock and Dam. 7th International Sedimentation Conference, Reno, Nevada

Luijendijk, A. P. (2001): Validation, calibration and evaluation of Delft3D-FLOW model with ferry measurements. M.Sc. thesis, University of Utrecht, The Netherlands

McCowan, A. D., Collins, N. (1999): The use of MIKE21 for full two-dimensional flood impact assessment. www.dhi.dk/softcon/papers/030/DHIflood.html

McCowan, A. D., Rasmussen, E. B., Berg, P. (2002): Improving the performance of a two-dimensional hydraulic model for floodplain applications. Proc. Conf. on Hydraulics in Civil Engineering, The Institution of Civil Engineers, Australia

Olsen, N. R. B. (1999a): Computational Fluid Dynamics in Hydraulic and Sedimentation Engineering. Class Notes, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim

Olsen, N. R. B., Kjellesvig, H. M. (1999b): Three-dimensional numerical modeling of bed changes in a sand trap. *Journal of Hydraulic Research,* Vol. 37, pp. 189–198

Olsen, N. R. B. (2000a): A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option. User's Manual, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim

Olsen, N. R. B. (2000b): CFD modeling of bed changes during flushing of a reservoir. Proc., Hydroinformatics 2000, Iowa, USA

Olsen, N. R. B. (2002): Estimating meandering channel evolution using a 3D CFD model. Proc., Hydroinformatics 2002, Cardiff, pp. 52–57

Reichel, G., Fäh, R. (1995): Programmpaket FLORIS: Grundlagen und praktische Anwendungen. In: Mathematische Modelle offener Gerinne, Konstruktiver Wasserbau / Landschaftswasserbau 17, ÖWAV-Seminar 21.11.1995, Wien

Reichel, G. (2001): Flux^{DSS} und FLORIS^{2000} – ein leistungsfähiges Paket zur Modellierung der Fließvorgänge in komplexen Systemen. *Österreichische Wasserwirtschaft,* Jg. 53, Heft 5/6, S. 170–171

Sauvaget, P., David, E. Demmerle, D., Lefort, P. (2002): Optimum Design of Large Flood Relief Culverts under the A89 Motorway in the Dordogne-Isle Confluence Plan. www.telemacsystem.com/internat/publi/fluvial/a89/a89.pdf

Spalding, D. B. (1986): PHOENICS-Beginner's Guide and User Manual. CHAM, London

Tritthart, M. (2000): Anwendung von dreidimensionalen numerischen Methoden beim Sedimentmanagement in Talsperrenreservoirs. Diplomarbeit, Universität Innsbruck

Tritthart, M. (2005): Three-Dimensional Numerical Modelling of Turbulent River Flow using Polyhedral Finite Volumes. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 193, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien

Tritthart, M., Gutknecht, D. (2005): Validation of a three-dimensional numerical model for river flow based on polyhedral finite volumes. Proc. XXXI IAHR Congress, 11.-16. September 2005, Seoul, Korea, pp. 581–590

Tritthart, M. (2006): 3D-Fließgewässermodellierung mit vielflächigen finiten Volumen an der österreichischen Donau. Wasserbaukolloquium 2006 – Strömungssimulation im Wasserbau, 9.-10. März 2006, Dresden; Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Band 32, Technische Universität Dresden, S. 193–200

USACE (2002): HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual Version 3.1. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California, USA

Yafei, J., Khan, A. A. (2001): CCHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady Open Channel Flows over Loose Bed. Technical Report, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi, USA

10 Zusammenfassung

Im ÖWAV wurde nach dem Hochwasser 2002 der Arbeitsausschuss „Fließgewässermodellierung“ gegründet. Die Zielsetzung des Arbeitsausschusses lag in der Erstellung von Arbeitsbehelfen zur Fließgewässermodellierung für die Praxis. Als erster Schritt erfolgte die Bearbeitung der Wasserbewegung. Der vorliegende Arbeitsbehelf stellt in 9 Kapiteln die hydrodynamische Modellierung von Fließgewässern dar. Diese reichen von den Grundlagen der Hydrodynamik, numerischen Methoden, Modellauswahl, Datenbasis, Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Validierung bis zur Visualisierung, der praktischen Anwendung und einem Modellüberblick.

Strömungsberechnungen beruhen auf den Erhaltungsgleichungen der Physik, nämlich auf der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung. In der allgemeinen Form resultieren aus diesen Gleichungen die sogenannten Gleichungen von Navier-Stokes, die ein nicht-lineares, partielles Differenzialgleichungssystem darstellen, das im allgemeinen Fall nur durch numerische Methoden näherungsweise gelöst werden kann. Es gibt verschiedene Verfahren, die oft eng mit den verwendeten Rechennetzen gekoppelt sind.

Die für die Abflussmodellierung verfügbaren Modelle lassen sich in vier Gruppen einteilen:

- Konzeptive Modelle
- Numerische 1-D-Modelle
- Numerische 2-D-Modelle
- Numerische 3-D-Modelle.

Jeder Modelltyp hat seine spezifischen Stärken, Schwächen und Anwendungsbereiche. Entsprechend ist jeder der Typen hilfreich und grundsätzlich nach wie vor Stand der Technik. Als klare Tendenz ist zu erkennen, dass dort, wo sich die Anwendungsbereiche von Modellen überlagern, die komplexeren Modelle die weniger komplexen ablösen.

Konzeptive Modelle zeichnen sich durch eine extrem hohe Performance aus. Sie werden erfolgreich und effizient in Flussgebietsmodellen für langfristige Analysen und für die operative Hochwasserprognose eingesetzt.

Die numerischen 1-D-Modelle haben als wesentliche Vorteile auch die Performance und ihre langjährige Verwurzelung in der Fachwelt. Sie sind für Spiegellagenberechnungen nach wie vor das primäre Werkzeug der Ingenieurhydraulik, auch wenn in den letzten Jahren ein klarer Trend zu 2-D-Modellen gegeben ist. 2-D-Modelle haben als wesentlichen Vorteil, dass sie die Fließwege automatisch aufgrund der Geländestruktur berechnen. Entsprechend haben sie sich in den letzten Jahren bei der Ermittlung von Überflutungsflächen und der Modellierung von Vorlandabflüssen etabliert. 2-D-Modelle sind wertvolle Werkzeuge für Studien und Analysen. 3-D-Modelle werden derzeit fast ausschließlich für die Untersuchung von Detailfragen verwendet, etwa zur Simulation von Strömungsvorgängen und der Lage des Wasserspiegels in starken Krümmungen des Flusslaufs oder im Nahbereich von wasserbaulichen Anlagen, wo die vertikale Geschwindigkeitskomponente von Bedeutung ist. Die Analyse des Hochwasserereignisses vom August 2002 hat jedoch deutlich aufgezeigt, dass nur die 3-D-Modellierung geeignet ist, bestimmte, im Hochwasserfall besonders ausgeprägte Fließphänomene ausreichend zu erfassen.

Bei der Auswahl und der Beurteilung von Modellen ist zu bedenken, dass die Güte der Ergebnisse nicht – bzw. insbesondere nicht nur – von den Vereinfachungen und Abstraktionen abhängt, die bei der Modellierung getroffen werden. In diesem Zusammenhang sei daran erinnert, dass der bei weitem überwiegende Teil der Modelle und Berechnungen eine feste Morphologie (Geometrie) annimmt.

Einfachere Modelle müssen nicht zu schlechteren Ergebnissen führen, komplexere Modelle müssen nicht immer aufwendiger sein. Die wesentliche Anforderung liegt darin, für jede Aufgabenstellung die angemessene Methodik zu wählen. Dabei sind neben der Technologie Fragen der Rechenzeit, der Effizienz, der Datennachführung und nicht zuletzt der verfügbaren Ressourcen von zentraler Bedeutung. Insgesamt ist es wichtig, den Begriff der „Mehrdimensionalität" nicht nur in Hinblick auf räumliche, sondern vielmehr auch auf inhaltliche Dimensionen zu sehen.

Eine bestmögliche Datenbasis stellt bei der Fließgewässermodellierung die Grundvoraussetzung für ein qualitativ hochwertiges Ergebnis dar. Dies umfasst einerseits hydrologische Grundlagendaten, aber auch Daten zur Modellerstellung, Kalibrierung und Validierung. Ohne Kalibrierung und Validierung eines hydrodynamischen Modells ist das Ergebnis der Simulation mit großen Unsicherheiten behaftet. Daher sollte sowohl bei der Ausschreibung als auch Durchführung einer Fließgewässermodellierung der Kalibrierung und Validierung anhand von relevanten Parametern entsprechende Bedeutung beigemessen werden.

Visualisierung und Präsentation von Modellergebnissen dienen der besseren Verständlichkeit und Übersichtlichkeit. Im Zuge der an Bedeutung zunehmenden Partizipation der Bevölkerung steigt auch der Stellenwert der Visualisierung und Präsentation.

Hintergründe, Anforderungen und Beispiele zur Fließgewässermodellierung werden für die Themenbereiche Ausweisung von Überflutungsflächen, Gefahrenzonenausweisung, Machbarkeitsstudien für Hochwasserschutzmaßnahmen, Detailplanungen im Bereich Hochwasserschutz, Retentionsberechnungen, Analyse der Auswirkungen von baulichen Maßnahmen auf den Abfluss sowie die Planung von flussbaulichen Maßnahmen dargestellt.

Den Abschluss dieses Arbeitsbehelfs stellt ein Vergleich von Softwarepaketen betreffend 1-D-, 2-D- und 3-D-Modellen dar (s. *Kapitel 9)*. Dabei werden neben der Herkunft und den Kosten (qualitativ) auch das erforderliche Betriebssystem, die Raumdiskretisierung, die numerische Methodik, etwaige Projektreferenzen sowie einschlägige Literatur angeführt.

lebensministerium.at