Integration ein- und zweidimensionaler Modelle zur hydrodynamischen Simulation von Gewässersystemen

Autor(en): **Beffa, Cornel**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **95 (2003)**

Heft 11-12

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-939499

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Integration ein- und zweidimensionaler Modelle zur hydrodynamischen Simulation von Gewässersystemen

Cornel Beffa

Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt einen innovativen Ansatz, wie sich durch eine Kombination von ein- und zweidimensionalen Teilmodellen auch sehr komplexe Gewässersysteme gesamtheitlich abbilden lassen. Auf eine sorgfältige Definition der Nahtstellen zwischen den einzelnen Teilmodellen wird ein besonderes Augenmerk gelegt. Das neue Verfahren erweitert den Einsatzbereich von hydrodynamischen Modellen und erleichtert die Qualitätssicherung bei der Bearbeitung grosser Projekte.

1. Einleitung

Kenntnisse über die vielfältigen Funktionen eines Fliessgewässers sind für eine zeitgemässe wasserbauliche Planung unerlässlich (WBG 1991). Die bisher üblichen Berechnungsmethoden sind jedoch kaum geeignet, Prozesse ausserhalb des eigentlichen Gerinnebereiches zu beurteilen. Als Alternativen zu Normalabfluss- und Staukurvenrechnung bieten sich hydrodynamische Abflussmodelle an, welche auf den Erhaltungsgleichungen für Volumen und Impuls basieren.

Eindimensionale (1D-)Modelle haben sich zur Beschreibung von instationären Abflüssen in Gerinnen und Gerinnenetzen bewährt und stellen ein erprobtes, praxistaugliches Werkzeug dar (Cunge et al. 1980). Zweidimensionale (2D-)Modelle sind geeignet zur Simulation von flächigen Abflüssen mit unbekannter oder wechselnder Fliessrichtung, beispielsweise Strömungen in Vorländern, Überflutungsgebieten oder Ästuaren (Connell et al. 2001).

Zum Anwendungsgebiet zählen auch eher kleinskalige Simulationen von Strömungen in Gerinnekurven, Ablösungen bei Buhnen oder seitliche Einleitungen (DVWK 1999).

Längenskala	klein	gross
Gerinnebreite	1 m	100 m
Vorlandbreite	100 m	10 000 m
Gerinnelänge	1000 m	100 000 m

Tabelle 1. Typische Längenskalen für Gerinne- und Vorlandabfluss.

Bei simultaner Modellierung von Gerinne- und Vorlandabfluss stellt sich das Problem, wie sich unterschiedliche Längenskalen in einem Modell abbilden lassen (Tabelle 1).

Aus praktischen Gründen (Glattheit der Berechnungsnetze, Zeitschrittlängen) sind grossräumige 2D-Berechnungen bei Skalenverhältnissen über 100 kaum effizient durchzuführen. Eine getrennte Berechnung von Gerinneabfluss mittels Staukurven und die anschliessende 2D-Berechnung des Vorlandabflusses vermag der Wechselwirkung zwischen Gerinne- und Vorlandabfluss nur in den wenigsten Fällen gerecht zu werden. Bechteler et al. (1993) schlagen deshalb die Kopplung von 1D- und 2D-Modellen vor. Dabei folgt das 1D-Modell den Gitternetzlinien des 2D-Modells, was für praktische Anwendungen eine unbefriedigende Einschränkung darstellt. Laguzzi et al. (2001) ermöglichen mit ihrem Vorschlag eine flexiblere Anordnung der Gerinneachse, wobei die Querprofile des 1D-Modells automatisch mit benachbarten Gitterknoten des (strukturierten) 2D-Modells verknüpft werden. Beiden Ansätzen gemeinsam ist die direkte Einbindung des 1D- in das 2D-Modell. Ohne händische Korrektur wird der Gerinneschlauch somit doppelt abgebildet: Im 1D-Modell durch die Querprofile und zusätzlich im Geländemodell des 2D-Modells. Das Problem wird verschärft, indem auf Rechteckgitter basierende Modelle eine relativ hohe Auflösung aufweisen müssen, um diagonal verlaufende Geländestrukturen korrekt abbilden zu können.

Eine geometrisch einwandfreie Abbildung der Nahtstelle von 1D- und 2D-Modellen ist nur möglich durch flexible Berechnungsnetze, welche sich dem Gerinneschlauch anschmiegen können. Das hydrodynamische Programm FLUMEN[1] basiert auf einem solch flexiblen Dreiecksnetz (Beffa 2003). Im Folgenden werden wesentliche Teile dieses Programmsystems und dessen Modul zur Integration von verschiedenen Submodellen näher erläutert.

[1] FLUvial Modelling ENgine. Weitere Informationen unter http://www.fluvial.ch/p/flumen.html

2. Gerinneabfluss

Der 1D-Modul zur Abflussberechnung basiert auf den Erhaltungsgleichungen von De Saint-Venant (Cunge et al. 1980). Das Flussgerinne wird wie gewohnt mittels Querprofilen beschrieben, welche zugleich die Knoten des Berechnungsschemas darstellen. Zur Lösung der Erhaltungsgleichungen wird ein explizites, zellenzentriertes Finite-Volumen (FV) Verfahren verwendet mit Flux-Difference-Splitting nach Roe (Roe 1981). Das Verfahren zeichnet sich durch hohe numerische Stabilität auch für gemischt unter- und überkritische Abflussregimes aus (Beffa 1994). Für alpine und voralpine Gewässer ist diese Eigenschaft von erheblicher praktischer Bedeutung.

Variable Sohlenrauheiten werden mittels «Rauheitscodes» parametrisiert, wahlweise mit der empirischen Formel von Manning-Strickler (Strickler 1923) oder dem logarithmische Reibungsgesetz für glatte und raue Berandungen. Bei Wehren, Abstürzen oder Eindolungen wird die Impulsgleichung durch geeignete Abflussbeziehungen ersetzt, wobei auf bewährte Ansätze aus der Gerinne- und Rohrhydraulik zurückgegriffen wird.

Zur Berechnung von Gerinnesystemen werden die Querprofile zu «Flussästen» (engl. branches) zusammengefasst. Die beiden Enden eines Flussastes können dabei entweder einen Zu- oder Wegflussrand darstellen oder mit anderen Flussästen vernetzt werden. Auf diese Weise lassen sich Baumstrukturen (trees) und Schlaufen (loops) abbilden (vgl. Bild 1).

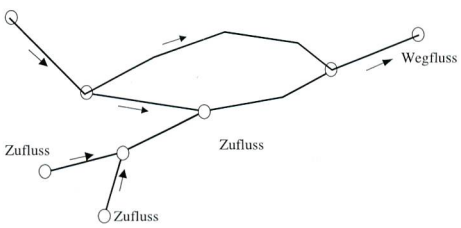

Bild 1. Flussäste und Gerinnesystem.

3. Flächiger Abfluss

Der 2D-Modul basiert auf den Erhaltungsgleichungen für Volumen und Impuls (in x- und y-Richtung), den sog. «tiefengemittelten Flachwassergleichungen» (Beffa 1994). Die-

se Gleichungen werden mit einem expliziten, zellenzentrierten FV-Verfahren und Flux-Difference Splitting nach Roe (analog dem 1D-Modul) gelöst. Zur Diskretisierung des Terrains wird ein unstrukturiertes Dreiecksnetz (TIN) verwendet, welches sich optimal an vorhandene Geländestrukturen (Dämme, Gräben) anpassen lässt. Numerische Konsistenz wird durch Verwendung von sog. «glatten Netzen» erreicht (Bild 2). Mittels Qualitätsverdichtung (Ruppert 1995) wird der Modellbereich durch immer feiner werdende Dreiecke aufgefüllt. Als Abbruchkriterien dienen die Mindestgrösse der Winkel zwischen den Dreieckseiten und die maximal zulässige Dreiecksfläche.

Hilfreich zur Simulation von Ausuferungen ist die Möglichkeit von «trockenen Starts». Das Berechnungsverfahren erkennt selbständig, welche Gebiete während der Simulation neu benetzt werden oder beim Rückgang eines Hochwassers wieder trockenfallen. Für die Berechnung eines Zeitschrittes relevant sind dabei lediglich die Zellen, welche benetzt sind oder benetzte Nachbarzellen aufweisen. Neben Sohlenrauheiten kann auch der Einfluss von durchströmtem Bewuchs modelliert werden (Lindner 1982). Ähnlich dem 1D-Modul lassen sich die Bestimmungsgleichungen für die Flüsse über die Zellenseiten an spezifische Abflusssituationen (z.B. Wehre) anpassen.

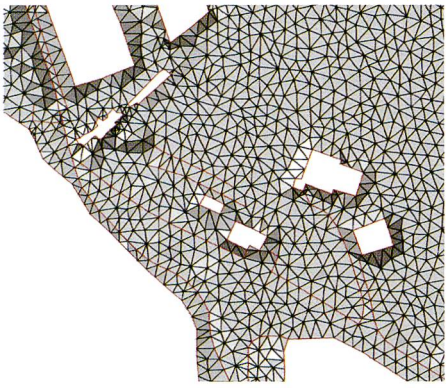

Bild 2. Abbildung von Bruchkanten und Gebäuden in einem Berechnungsnetz («quality mesh»).

4. Intergration 1D – 2D

Die Teilmodelle für Gerinne- und Vorlandabfluss können unabhängig voneinander erstellt, verifiziert und betrieben werden. Somit ist es möglich, komplexe Systeme in einzelne Submodelle aufzuteilen, was die Modellierung wesentlich erleichtert.

Die verifizierten Submodelle werden in einem separaten Arbeitsschritt in ein Gesamtmodell integriert. Daran schliesst sich die Verifikation der Nahtstellen und des Gesamtsystems an (vgl. Bild 3).

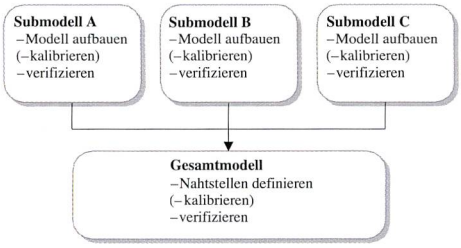

Bild 3. Integration von Teilmodellen.

4.1 Definition der Nahtstelle

Die topologische Beziehung zwischen den Querprofilen der 1D-Modelle und den Zellen der 2D-Modelle lässt sich weitgehend automatisch bestimmen. Dazu muss die Lage der Querprofile in Bezug auf das 2D-Netz bekannt sein. Das bedeutet, die oft in lokalen Koordinatensystemen definierten Querprofile müssen georeferenziert werden. Anschliessend lassen sich für jedes Querprofil die Abstände zu den Rändern der 2D-Netze bestimmen. Alle Randkanten innerhalb eines vorgegebenen Fangkreises stellen mögliche Kandidaten für eine Nahtstelle dar. Davon werden diejenigen Kanten ausgewählt, welche links und rechts der Gerinneachse den kleinsten Abstand zum betrachteten Querprofil aufweisen (vgl. Bild 4). Finden sich innerhalb des Fangkreises keine Randkanten, so ist das Querprofil ohne Verbindung zum 2D-Netz. Liegen die möglichen Kandidaten alle auf der gleichen Gerinneseite, so besteht nur eine Verbindung zum 2D-Netz.

Idealerweise existiert pro Querprofil *eine* zugehörige Randzelle auf jeder Gerinneseite. Dies ist dann der Fall, wenn die Querprofilabstände mit den Kantenlängen des Berechnungsnetzes übereinstimmen. Häufig sind die Abstände der vorhandenen Querprofile jedoch grösser, und es empfiehlt sich eine Verdichtung der Querprofile. Dies lässt sich in GIS-Systemen oder in eigens dafür entwickelten Präprozessoren[2] erledigen. Liegen die Gerinnedaten bereits in der Form eines Geländemodelles vor, ist lediglich ein Profilabgriff nötig.

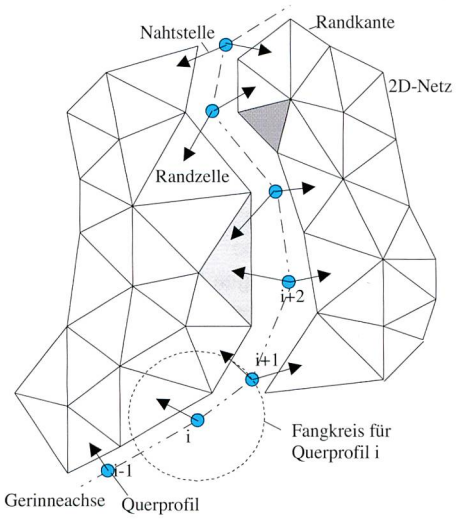

Bild 4. Automatisches Bestimmen der Nahtstelle zwischen 1D- und 2D-Modellen.

Aus Sicht der Randzellen ist die Anzahl Verbindungen zu Querprofilen beliebig. In der Prinzipskizze (Bild 4) variiert die Zahl zwischen null (dunkelgraue Zelle) und zwei (hellgraue Zelle).

4.2 Abfluss über die Nahtstelle

Bechteler et al. (1993) verwenden zur Bestimmung der Austauschwassermenge zwischen 1D- und 2D-Modellen eine Wehrformel vom Typ Poleni. Laguzzi et al. (2001) lösen bei der Schnittstelle zwischen 1D- und 2D-Modell eine Volumenbilanzgleichung, machen jedoch keine expliziten Angaben, wie die Flüsse über die Nahtstellen bestimmt werden.

Aus hydraulischer Sicht erscheint es sinnvoll, den lateralen Austausch zwischen Gerinne- und Vorlandabfluss als eine Art «Streichwehr» zu betrachten. Die Wehrhöhe entspricht dabei der Dammhöhe im Querprofil oder der Terrainhöhe in der zugehörigen Randzelle (massgebend ist der Maximalwert). Die Wehrbreite ergibt sich aus der Breite der Randkante oder dem Abstand zwischen den Querprofilen (massgebend ist der Minimalwert). Die Austauschwassermenge pro Zeiteinheit lässt sich somit durch eine Poleni-artige Überfallformel abschätzen (z.B. Vischer und Huber 1993)

$$Q = \frac{2}{3}\mu\varphi B\sqrt{2g}h^{3/2} \qquad (1)$$

mit μ = Überfallbeiwert (für breitkronige Wehre μ = 0,58), B = Wehrbreite, g = Erdbeschleunigung und h = Überfallhöhe (= Abflusshöhe beim Querprofil bezogen auf die Wehrhöhe). Der Einstaufaktor kann nach Hager (1986) abgeschätzt werden zu

$$\varphi = \left[1 - \left(\frac{H_u}{H_o}\right)^a\right]^{1/a} \qquad (2)$$

mit H = Energiehöhe im Oberwasser (Index o) und Unterwasser (Index u) jeweils bezogen auf die Wehrhöhe sowie dem Potenzfaktor a (für breitkronige Wehre a = 4,0). Damit wird ein vorhandener Einstau vom Unterwasser berücksichtigt und verhindert, dass ein Abfluss entgegen dem Energiegefälle auftritt (bei Gleichstand von H_o und H_u wird der Einstaufaktor zu Null).

[2] vgl. http://www.fluvial.ch/p/fluviz.html

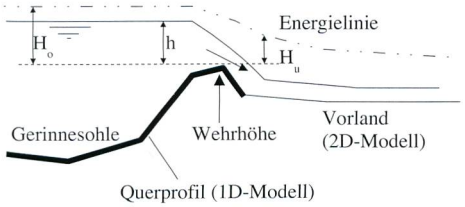

Bild 5. Abfluss über die Nahtstelle «Gerinne – Vorland».

5. Anwendung Chisebach

Die oben vorgestellte Integration von 1D- und 2D-Modellen ist erstmals im Rahmen der Studie «Hochwasserschutzkonzept Chisebach» (Kt. Bern) eingesetzt worden.

Der Chisebach ist ein eher unscheinbares Gewässer mit einer Gerinnebreite zwischen 1,5 m und 6 m, das zusammen mit seinen Zuflüssen ein Einzugsgebiet von 66 km^2 entwässert (Bild 6). Bis zu seiner Mündung in die Aare in Kiesen unterhalb von Thun durchquert der Chisebach neun politische Gemeinden und legt dabei eine Strecke von 16 km zurück. Charakteristisch für das Einzugsgebiet ist die stark abflussdämpfende Wirkung durch die Überflutungen von Landwirtschaftsland und Siedlungsgebieten bei relativ häufig auftretenden Abflussmengen (Bild 7).

Die hydrodynamische Modellierung des Chisebaches dient u.a. folgenden Fragestellungen:

- Wie gross ist die aktuelle Hochwassergefährdung (Gefahrenbeurteilung, Gefahrenkarte)?
- Welche Auswirkungen hätte ein Gerinneausbau auf die Hochwasserspitzen und die Hochwassergefährdung der Unterlieger (Gefahrenverlagerung durch Massnahmen)?
- Wie verändert sich die Gefahrensituation nach Schaffung zusätzlichen Retentionsraumes (Gefahrenreduktion durch Massnahmen)?

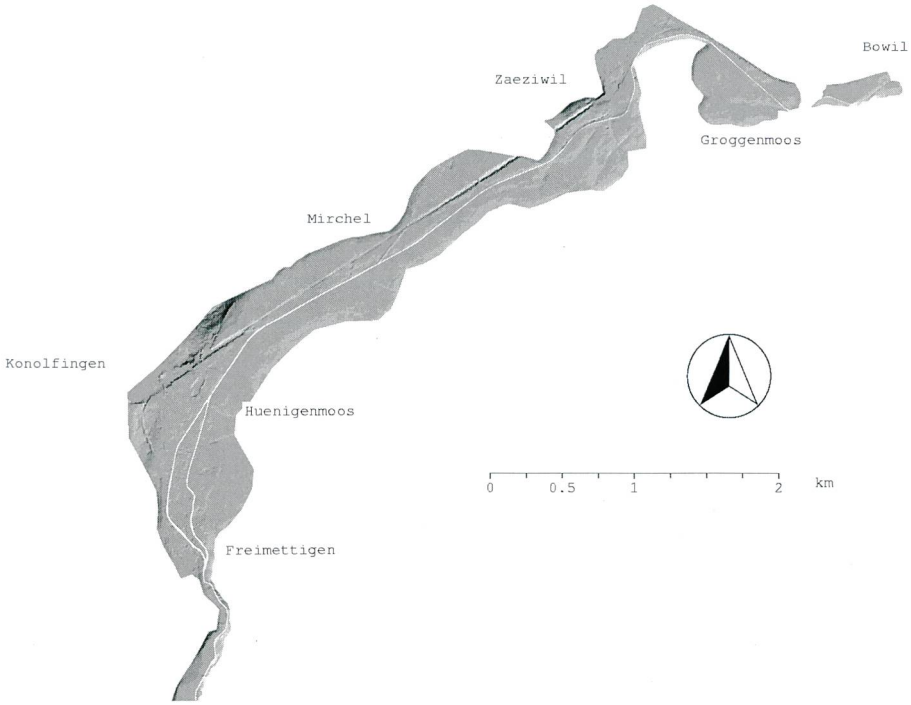

Bild 6. Nördlicher Modellperimeter HWSK Chisebach.

Bild 7. Überflutete Flächen eingangs Konolfingen während Hochwasser der Chise und des Mühlebaches (Datum: 3. September 2002, Aufnahme: C. Beffa).

5.1 Modellaufbau

Als Grundlagen für die Modellierung standen aus der amtlichen Vermessung und ergänzenden fotogrammetrischen Aufnahmen detaillierte Terrainmodelle des Perimeters zur Verfügung. Nach Anpassungen der Sohlenlage konnten die Querprofile des Gerinneschlauches in Abständen von 20 m abgegriffen werden. Das solchermassen erzeugte Gerinnemodell der Chise und des parallel laufenden Gewerbekanals enthält rund 900 Querprofile. Eine vollständige 2D-Modellierung des Gerinneschlauches hätte bei einem Längen-Breiten-Verhältnis von 10000 zu unrealistisch langen Berechnungszeiten geführt.

Die angrenzenden Überflutungsgebiete sind mit insgesamt neun 2D-Modellen abgebildet worden (Bild 8). Die Berechnungsnetze mit maximalen Zellengrössen zwischen 50 m^2 (Siedlungsgebiet) und 150 m^2 (übriges Gebiet) weisen insgesamt 68000 Zellen auf. Lineare Geländestrukturen (beispielsweise Strassen, Feldwege, Eisenbahnlinien) sind in der Delaunay-Triangulation als Zwangslinien berücksichtigt worden. Kleinräumige Strukturen wie Gebäude oder lokale Aufschüttungen sind nur so weit erfasst worden, als sie die Abflussausbreitung wesentlich beeinflussen.

Die automatische Verknüpfung von 1D- und 2D-Modellen führt auf über 1400 topologische Verbindungen, welche den Austausch zwischen den Teilmodellen beschreiben.

5.2 Randbedingungen

Die Abflussganglinien der Seitenzuflüsse und der Zwischeneinzugsgebiete sind mittels Niederschlags-Abflussmodellierung gene-

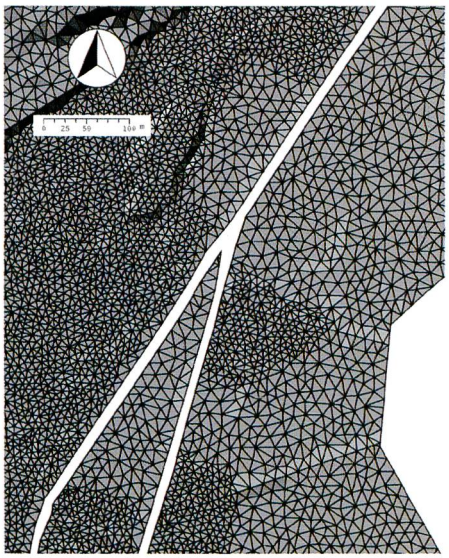

Bild 8. Modell Chisebach (Ausschnitt Konolfingen mit Abzweiger Gewerbekanal): Berechnungsnetze des 2D-Modells mit Aussparung für den Gerinneschlauch und Netzverdichtung im Siedlungsgebiet.

riert worden (Scherrer AG 2002). Dabei sind kurze, mittlere und lange Niederschlagsereignisse mit jeweils unterschiedlichen Wiederkehrperioden (10, 30, 100, 300 und 1000 Jahre) zugrunde gelegt worden. Dies führt auf insgesamt 3 × 5 = 15 Szenarien, welche für jede der untersuchten Massnahmenvarianten simuliert worden sind.

Zur Verifizierung des Modells standen Angaben über ein Hochwasserereignis aus dem Jahre 1988 zur Verfügung. Neben der Simulation des Ist-Zustandes konnte der hypothetische Fall eines vollständigen Gerinneausbaus sehr einfach modelliert werden. Hierzu wurden ausschliesslich die Flussäste des 1D-Modelles in das Gesamtmodell eingebunden und die Ausuferungen in das Vorland unterdrückt.

5.3 Massnahmenwirkung

Weiter wurde der Einfluss von verschiedenen Rückhaltemassnahmen (Retentionsräume in Haupt- und Nebenschluss) modelliert (Bild 9). Die Resultate der Modellierung erlauben die flächige Darstellung von Abflussintensitäten (Fliesstiefen und -geschwindigkeiten, Bild 10). Mittels Aggregierung der Szenarien lassen sich daraus Intensitätskarten und Gefahrenkarten gemäss Empfehlung BWW/BRP/Buwal (1997) erstellen. Karten der Überflutungshäufigkeit dienen als Grundlage, um die Nutzungsausfälle in den untersuchten Retentionsräumen zu bestimmen.

5.4 Erfahrungen mit dem Modelleinsatz

Durch die Integration von 1D- und 2D-Modellen konnte die Berechnungszeit für ein einzelnes Szenario auf unter eine Stunde verkürzt werden (PC mit 866 MHz CPU). Im Vergleich zu einer vollständigen 2D-Simulation (geschätzte Simulationszeit über 40 h) ist dies ein sehr guter Wert und ermöglicht die Modellierung einer Massnahmenvariante in rund einem Tag.

Die gesammelten Erfahrungen im praktischen Einsatz zeigen, dass die gesamtheitliche hydrodynamische Modellierung die in sie gesetzten Erwartungen erfüllt. Fragen über das Ausmass der Hochwasserverlagerung resp. Hochwasserdämpfung können nun zuverlässig beantwortet werden. Die erhaltenen Resultate erlauben es, den Einfluss der Niederschlagsdauer auf die Rückhaltewirkung und die Wirkung verschiedener Massnahmenvarianten anschaulich darzustellen und daraus Folgerungen für das weitere Vorgehen abzuleiten. Bereits auf Konzeptstufe konnten erste Überlegungen hinsichtlich der optimalen Anordnung und Bewirtschaftung der Rückhalteräume angestellt werden.

Neben der erhöhten Zuverlässigkeit der Aussagen wird durch die Modellierung auch die Nachvollziehbarkeit der Resultate verbessert. Das Aufzeigen der Massnahmenwirkungen, insbesondere die positiven Auswirkungen der Rückhaltemassnahmen auf die Unterlieger, hat den Wunsch nach einem Gemeindeverband bestärkt und die regionale Zusammenarbeit gefördert. Die Modellresultate können eine wesentliche Grundlage bilden, wenn Fragen bezüglich der finanziellen Abgeltung zwischen den Gemeinden aktuell werden.

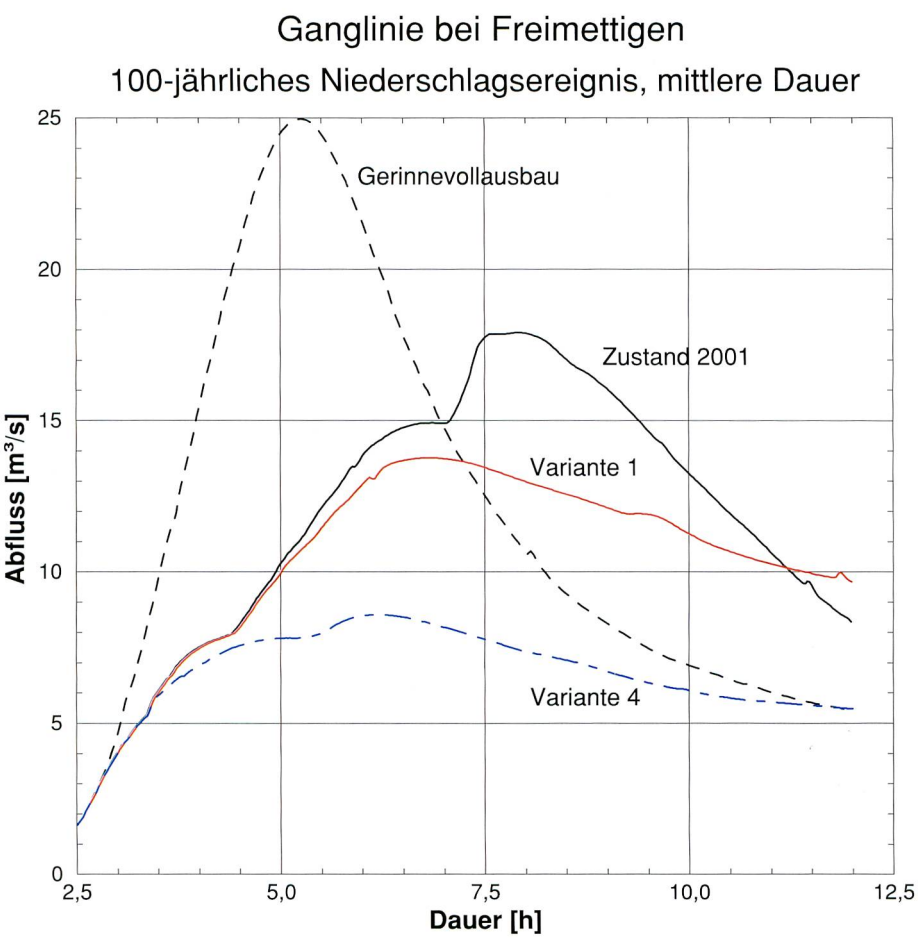

Bild 9. Abflussganglinien Chise in Freimettigen für 100-jährliches Niederschlagsereignis mittlerer Dauer für unterschiedliche Massnahmenvarianten (Variante 1: Aktivierung Rückhalt Groggenmoos; Variante 4: Aktivierung Rückhalt Groggenmoos und Chonolfingermoos).

6. Weitere Fesstellungen

6.1 Vorteile des Verfahrens

Die Kombination verschiedener Modelltypen ermöglicht es, Gewässersysteme mit sehr unterschiedlichen Längenskalen zu modellieren. Dadurch wird das Verständnis für die hydrologisch/hydraulischen Zusammenhänge gefördert, was die Suche nach optimalen Lösungen erleichtert und mithilft, die Kommunikation zwischen den Beteiligten (Fachleute und Betroffene) zu versachlichen.

6.2 Grenzen des Verfahrens

Die Streichwehr-Betrachtung vernachlässigt den Impulsaustausch und stellt gegenüber den oftmals komplexen Strömungsverhältnissen an der Nahtstelle zwischen Gerinne- und Vorlandabfluss eine Vereinfachung dar. Für kleinskalige Betrachtungen, wo Aussagen über die Strömungsverhältnisse in diesem Übergangsbereich zu machen sind, ist eine vollständig zweidimensionale Modellierung nötig. In solchen Fällen tritt jedoch das Problem der unterschiedlichen Längenskalen in den Hintergrund.

6.3 Mögliche Erweiterungen

Das Verfahren zur Beschreibung der Nahtstelle geht von einem lateralen Austausch zwischen den Teilmodellen aus. Bei einer seriellen Anordnung – wenn beispielsweise der Gerinneschlauch abschnittsweise mit 1D- und 2D-Modellen beschrieben wird – stellt die Nahtstelle für das 1D-Modell einen Modellrand dar. In einem solchen Fall ist es sinnvoll, das Querprofil am Rand des 1D-Modells direkt mit einer Randzelle des 2D-Netzes zu verknüpfen und den Wasserstand in der Randzelle als Randbedingung für das 1D-Modell zu benutzen. Gleichung (1) ist durch eine Bewegungsgleichung zu ersetzen, wel-

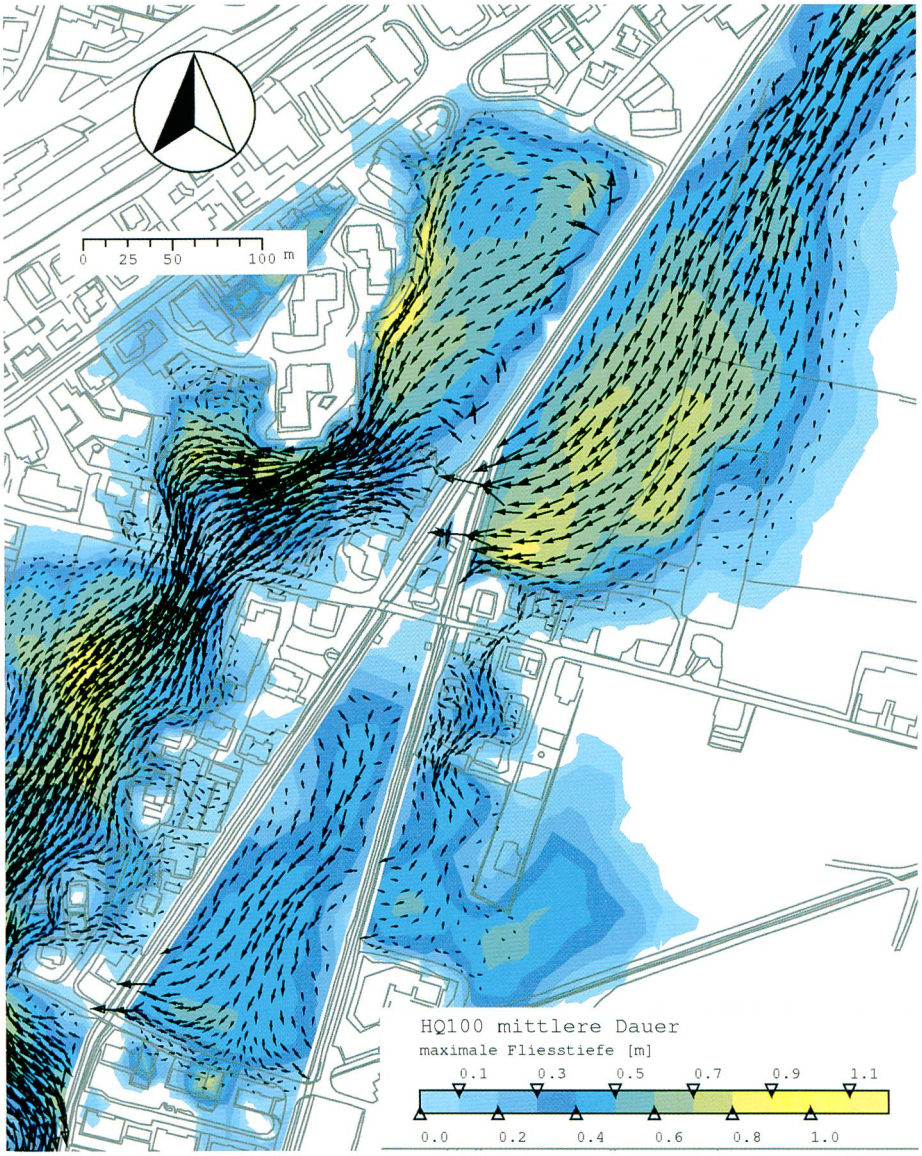

Bild 10. Berechnete Flussvektoren und maximale Fliesstiefen für ein 100-jährliches Niederschlagsereignis mittlerer Dauer.

che den Impulsaustausch zwischen den Modellen beschreibt.

7. Folgerungen

Die Integration von 1D- und 2D-Modulen zu einem Gesamtmodell stellt einen wesentlichen Fortschritt in der Modellierung von Gewässersystemen dar. Die freie Wahl des jeweils optimalen Modelltyps und die Möglichkeit der schrittweisen Einbindung von Teilmodellen in ein Gesamtmodell stellen für den Modellierer eine wesentliche Erleichterung und Beschleunigung der Arbeit dar. Die Übersicht bleibt auch beim Aufbau komplexer Systeme gewahrt, was sich positiv auf die Qualitätssicherung auswirkt.

Die bisherige Erfahrung mit der Modellanwendung im Rahmen des Hochwasserschutzkonzeptes Chisebach zeigt: Die Modellergebnisse tragen zu einem besseren Verständnis der hydraulischen Prozesse bei und sind eine wertvolle Hilfe bei der Kommunikation zwischen den Beteiligten. Situationsanalyse, Zielformulierung und Massnahmenstudium profitieren gleichermassen von der gesamtheitlichen Modellierung des Systems.

Die gesetzlichen Grundlagen im Wasserbau verlangen eine gesamtheitliche Bewertung der Auswirkungen von baulichen Massnahmen. Mit der Integration von ein- und zweidimensionalen Modellansätzen steht ein effizientes Hilfsmittel zur Verfügung, um dieser Forderung auch bei komplexen Gewässersystemen nachzukommen.

Dank

Dem Tiefbauamt des Kantons Bern für die Erlaubnis zur Veröffentlichung von Resultaten aus der Studie «Hochwasserschutzkonzept Chisebach». Den Herren H. Andres (Schmalz Ingenieur AG, Langnau), A. Fahrni (Oberingenieurkreis II, Kt. Bern), H. Roth (Fachstelle Hochwasserschutz Kt. Bern), P. Horat und Dr. S. Scherrer (Scherrer AG, Reinach) für die konstruktiven Diskussionen im Rahmen des erwähnten Projektes.

Literaturhinweise

Bechteler W., Hartmann S., Otto A. J., 1993: Coupling of 2D- and 1D-models and integration into geographic information systems. Advances in Hydro-Science and -Engineering, Volume I.

Beffa C., 1994: Praktische Lösung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen. Mitteilung 133 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. ETH Zürich.

Beffa C., 2003: 2D-Strömungssimulation mit FLUMEN. Wiener Mitteilungen. Inst. für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau. BOKU Wien.

BWW/BRP/Buwal, 1997: Empfehlung: Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Wasserwirtschaft, Bundesamt für Raumplanung, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, Bestellnummer: 804.201 d.

Connell R. J., Painter D. J., Beffa C., 2001: Two-dimensional flood plain flow. II: Model validation. J. Hydrol. Engrg. ASCE, 6 (5).

Cunge J. A., Holly F. M. Jr., Verwey A., 1980: Practical aspects of computational river hydraulics. Pitman Publishing.

DVWK, 1999: Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., Heft 127.

Hager W. H., 1986: Discharge Measurement Structures. Communication 1, Chaire de Construction Hydrauliques. EPFL Lausanne.

Laguzzi M. M., Stelling G. S., Brujin K., 2001: A fully coupled 1D & 2D system specially suited for flooding simulation. Proc. IAHR Congress, Bejing.

Lindner K., 1982: Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen. Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen, TU Braunschweig.

Roe P. L., 1981: Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes. J. Comp. Physics, Vol. 43.

Ruppert J., 1995: A Delaunay refinement algorithm for quality 2-dimensional mesh generation. J. Algorithms, 18 (3).

Scherrer AG (2002): Hochwasserschutzkonzept Chisebach: Hydrologische Grundlagen. Bericht zuhanden des Tiefbauamtes des Kantons Bern (unveröffentlicht).

Strickler A., 1923: Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauhigkeitszahl für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Mitteilungen des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft, Bern.

Vischer D., Huber A., 1993: Wasserbau. 5. Auflage. Springer Verlag, Berlin.

WBG, 1991: Bundesgesetz über den Wasserbau vom 21. Juni 1991. 721.100.

Anschrift des Verfassers

Dr. *Cornel Beffa,* Hydrodynamik, Postfach 28, CH-6431 Schwyz, E-Mail: cbeffa@fluvial.ch