

# Multi-Domain-Modell zur effizienten Simulation von Fliessgewässersystemen

*Patric Rousselot, Christian Volz, David Vetsch, Renata Müller und Roland Fäh*

## Zusammenfassung

Für die numerische Simulation von Fliessgewässern und Flusssystemen stehen dem Anwender für unterschiedliche Problemstellungen ein- oder zweidimensionale Ansätze zur Verfügung. Eindimensionale Modelle sind geeignet für die Berechnung von Abflüssen in Gerinnen und ermöglichen eine vergleichsweise kurze Simulationszeit in der praktischen Anwendung. Zweidimensionale Modelle bieten sich für Probleme an, bei denen die Strömungsrichtung oder Abflussaufteilung nicht a priori bekannt sein muss, etwa bei Überflutungen im flachen Gelände oder bei der Aufgabelung von Flüssen.

In der Praxis sind 2D-Simulationen ausgedehnter Flusssysteme aufgrund der beschränkten Rechenkapazität selten effizient durchführbar. Zudem haben tiefengemittelte 2D-Modelle oftmals numerische Probleme bei der korrekten Nachbildung von Gerinnen mit steilen seitlichen Böschungen. Im Extremfall eines Kanals mit rechtwinkligem Querschnitt resultieren im Bereich der Böschung sehr kleine Elemente im Rechengitter, was aufgrund numerischer Stabilitätskriterien einen entsprechend kleinen Zeitschritt zur Folge haben kann. In beiden Fällen bietet sich der Einsatz von eindimensionalen Modellen an – mit wiederum entsprechenden Nachteilen von 1D-Simulationen.

Ein Multi-Domain-Modell nutzt die Vorteile beider Modelle indem 1D- und 2D-Gebiete miteinander gekoppelt werden können. Das an der VAW entwickelte Programm BASEMENT erlaubt vielseitige Möglichkeiten zur Kopplung von Modellen. So lassen sich auf innovative Weise die erwähnten Probleme lösen indem 1D- und 2D-Modelle gezielt dort eingesetzt werden wo ihre jeweiligen Stärken liegen.

Der Beitrag erläutert die verschiedenen Kopplungsmöglichkeiten zwischen den Modellen und beschreibt ein Konzept zur Synchronisierung der Zeitschritte unter Einbehaltung der lokalen Stabilitätskriterien.

## 1 Hydraulische Modelle in einer und zwei Dimensionen

Die Software BASEMENT [1] besteht aus den zwei Modulen BASEchain (1D) und BASEplane (2D). Es werden für beide Module die Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls einer Flachwasserströmung in der jeweiligen Dimension berechnet. Als numerisches Verfahren wird eine Finite-Volumen-Methode verwendet. In diesem Kapitel werden die zu lösenden Gleichungen vorgestellt.

### 1.1 BASEchain (1D)

Das BASEchain Modul basiert auf den Gleichungen von de Saint-Venant für einen instationären Abfluss in einer Dimension [2]. Die beschreibenden Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls lauten wie folgt:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1 \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) = -gA \frac{\partial z_S}{\partial x} - gAS_f + q_1 u_x \quad (1.2)$$

Die unbekanntenen Variablen sind die benetzte Fläche eines Querschnitts  $A$  und der Abfluss  $Q$ . Die weiteren Variablen bezeichnen: spezifischer Zufluss einer lateralen Quelle  $q_1$ , Wasserspiegellage  $z_S$ , Reibungsgefälle  $S_f$  und Geschwindigkeit in Fließrichtung  $u_x$ .

Zur Lösung der beiden Gleichungen wird ein zellenzentriertes Schema verwendet. Die Topographie des Fließgewässers wird durch Querprofile beschrieben welche zugleich das Zentrum eines Elements darstellen. Die Berechnung der Flüsse über die Kanten eines Elements erfolgt mit dem häufig benutzten Riemann Löser nach Roe [3] und die zeitliche Integration wird durch ein explizites Eulerschema berechnet. Als Stabilitätskriterium wird die CFL-Bedingung angesetzt.

Um Gleichung (1.2) zu schliessen, wird zusätzlich eine Gleichung für  $S_f$  benötigt. Das Reibungsgefälle kann wahlweise mit einem Manning-Strickler Ansatz oder der äquivalenten Sandrauigkeit nach Nikuradse ermittelt werden.

Am Zu- und Abflussrand werden die Erhaltungsgleichungen durch bekannte Modelle der Flussberechnung, wie etwa Normalabfluss gemäss Strickler oder überströmtes Wehr nach Poleni, ersetzt. Die Abflussrandbedingungen Wehr und Schütze können explizit vorgegeben oder durch Definition eines beliebigen Zieles wie z.B. Abfluss oder Pegel dynamisch geregelt werden.

## 1.2 BASEplane (2D)

Das BASEplane Modul löst die zweidimensionalen tiefengemittelten Flachwassergleichungen in konservativer Form. Die drei unbekanntenen Variablen sind die Wassertiefe  $h$  sowie die tiefengemittelten Abflüsse in  $x$ - und  $y$ -Richtung,  $uh$  und  $vh$ . Die drei entsprechenden Gleichungen gewährleisten die Erhaltung von Masse und Impuls [4].

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} = q_{\text{ext}} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (hu) + \frac{\partial}{\partial x} \left( hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} (huv) &= -gh \frac{\partial z_B}{\partial x} - \frac{\tau_{Bx}}{\rho} \\ \frac{\partial}{\partial t} (hv) + \frac{\partial}{\partial x} (huv) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) &= -gh \frac{\partial z_B}{\partial y} - \frac{\tau_{By}}{\rho} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Dabei bezeichnen  $q_{\text{ext}}$  eine externe Zugabe von Fluid,  $g$  die Erdbeschleunigung,  $z_B$  die Sohlenlage,  $\rho$  die Dichte und  $\tau_B$  die Schubspannung. Die diffusiven Terme für innere und turbulente Viskosität wurden für den vorliegenden Beitrag vernachlässigt.

Die Erhaltungsgleichungen werden auf einem unstrukturierten Gitter mit einem zellzentrierten Finite-Volumen-Verfahren gelöst. Die Flüsse über die Kanten werden mit dem exakten Löser nach Toro [5] berechnet. Die zeitliche Integration wird wiederum mit einem expliziten Eulerschema behandelt und als Stabilitätskriterium wird analog zum 1D-Modell eine CFL-Bedingung verwendet.

Erneut müssen die Impulsgleichungen mit einem Reibungsgesetz wie z.B. Manning-Strickler geschlossen werden. Der Quellterm mit dem Reibungsgefälle wird semi-implizit gelöst. Die konservative Eigenschaft der Impulsgleichung (C-Property) wird gewährleistet durch die Behandlung der Druck-Fluss-Terme mit einem Ansatz nach Komaei [6].

Als Randbedingungen stehen diverse Ersatzmodelle für die Flussberechnung über die Kante zur Verfügung. Als Zuflussbedingung wird ein Hydrograph mit entsprechendem Normalabfluss verwendet. Für den Abfluss aus dem Gebiet können Pegel-Abflussbeziehungen oder hydraulische Strukturen wie Wehr oder Schütze definiert werden. Diese können analog zu einer Dimension explizit vorgegeben oder aber dynamisch geregelt werden indem ein beliebiges Ziel festgelegt wird.

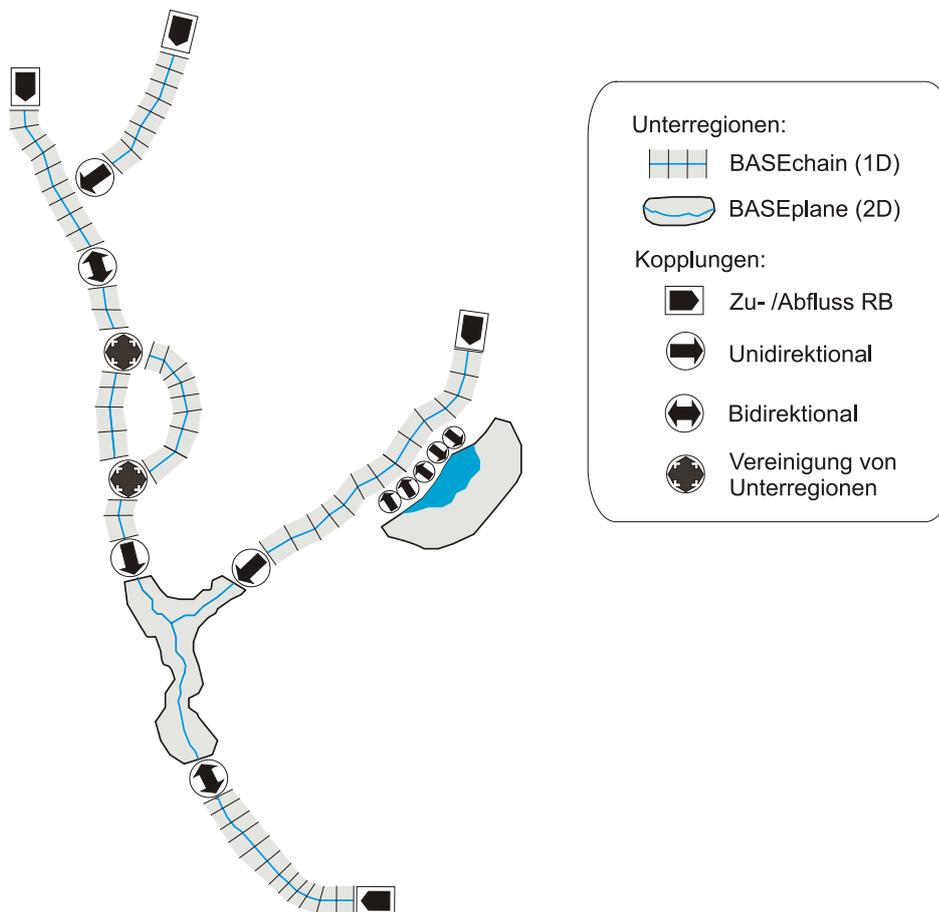
## 2 Kopplung zwischen den Modulen

Die Submodule BASEplane und BASEchain können beliebig miteinander gekoppelt werden. Das übergeordnete Modell besteht dann aus verschiedenen sogenannten Untergebieten, respektive Unterregionen.

Das gekoppelte Vorgehen ist hilfreich für Modelle mit unterschiedlichen Längen- und Zeitskalen und erlaubt primär eine Verkürzung der Rechenzeit indem gross-skalige Vorgänge in einer Dimension und komplexere Geometrien in zwei Dimensionen modelliert werden. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit einer schrittweisen Modellierung von komplizierten Flusssystemen unter Verwendung kleiner Teilprobleme. Dies reduziert die Komplexität und erlaubt die einfache Erweiterung von bestehenden kalibrierten Modellen. Mögliche Anwendungsfälle sind auch Problemstellungen mit hydraulischen Strukturen wie Wehre oder Schützen innerhalb des Gebiets. Anstelle dieser inneren Randbedingungen können Untergebiete eingesetzt werden.

Abb. 1 zeigt schematisch die verschiedenen Kopplungsarten auf. Allen Ansätzen gemein ist eine Schnittstelle an welcher die Kopplung über Randbedingungen stattfindet. Die Querschnitte in 1D und die Kanten der Elemente in 2D bei der Schnittstelle sollten idealerweise dieselbe Geometrie aufweisen und sich an derselben Stelle befinden um Diskontinuitäten aufgrund von abrupten Änderungen in der Geometrie zu verhindern.

Allgemein wird unterschieden zwischen unidirektionaler und bidirektionaler Kopplung. Im ersten Fall ist die Fliessrichtung a priori bekannt und die Randbedingung bekommt ausschliesslich Information von den Elementen stromaufwärts. Das ist beispielsweise der Fall bei einem Wehr bei welchem immer ein vollkommener Überfall angenommen wird. Bei bidirektionaler Kopplung wird auch die Information stromabwärts der Randbedingung verwendet. Dies ermöglicht es, einen Aufstau innerhalb der Unterregion flussabwärts in das stromaufwärts liegende Untergebiet weiterzuleiten.



**Abb. 1** Flusssystem mit mehreren BASEchain (1D) und BASEplane (2D) Untergebieten und den entsprechenden Schnittstellen für die Kopplung

Eine spezielle Form der Kopplung ist die laterale Verknüpfung einer 1D-Unterregion mit einem 2D-Untergebiet. Über eine definierte Nahtstelle zwischen den Elementen in 1D und den Kanten der Randelemente in 2D wird der Fluss als seitliche Entlastung berechnet.

Ein generelles Problem stellen die unterschiedlichen Zeitschritte der einzelnen Untergebiete dar. An den Kopplungsstellen müssen Informationen zwischen den Unterregionen ausgetauscht werden. Um einen einfachen Datenaustausch zwischen den gekoppelten Randbedingungen zu erzielen, wird eine zeitliche Synchronisation realisiert welche dennoch die unterschiedlichen Zeitschritte berücksichtigt.

Auf die verschiedenen Kopplungsarten sowie die Behandlung der zeitlichen Synchronisation wird in den nächsten Unterkapiteln näher eingegangen.

## 2.1 Unidirektionale Kopplung

Die unidirektionale Kopplung ist eine einfache Methode um zwei Unterregionen zu koppeln. Dabei werden Daten ausschliesslich in Fließrichtung ausgetauscht. Dies hat den Vorteil, dass die Unterregion flussaufwärts unabhängig von der flussabwärtigen Unterregion sequenziell berechnet werden kann und die Massenerhaltung gewährleistet wird. Die Daten für die gekoppelte Randbedingung werden dann der flussabwärtigen Unterregion zu einem gemeinsamen Zeitpunkt übergeben. Allerdings kann damit keine Information gegen die Fließrichtung übertragen werden. Darum ist diese Art der Kopplung auf Fälle beschränkt bei

denen kein Aufstau auftritt, respektive ein solcher Einfluss vernachlässigt werden kann. Dies ist z.B. der Fall bei einem vollkommenen Überfall oder einem vom Hauptstrom nicht beeinflussten Zufluss.

## 2.2 Bidirektionale Kopplung

Der allgemeine Fall für die Verknüpfung von zwei Unterregionen ist die bidirektionale Kopplung. Dabei wird einer Abfluss-Randbedingung eine Zufluss-Randbedingung gegenübergestellt. Beispielsweise kann ein Abflussrand ein Wehr und der dazugehörige Zuflussrand der gekoppelten Unterregion einen Hydrographen enthalten. Die bidirektionale Kopplung ermöglicht eine beidseitige Interaktion zwischen den beteiligten Unterregionen. Somit kann ein Aufstau in der flussabwärtigen Unterregion das Untergebiet stromaufwärts beeinflussen. Allerdings können die Unterregionen nicht wie bei der unidirektionalen Kopplung sequenziell gelöst werden.

Die Schwierigkeit besteht nun darin, dass für die Randbedingungen kein eindeutiger Zustand bekannt ist, da die Wasserspiegellagen ober- und unterhalb der Kopplungsstelle für einen bestimmten Zeitpunkt unterschiedlich sein können. Theoretisch müsste für die Berechnung der Randbedingung eine Iteration der Lösung stattfinden bis sich die Wasserspiegellagen auf beiden Seiten der gekoppelten Randbedingungen nicht mehr weiter verändern. Solche Iterationen sind allerdings rechnerisch aufwändig. Bei kleinen Zeitschritten unterscheiden sich die Abflussbedingungen vor und nach den Randbedingungen normalerweise nicht stark, womit die Iteration ohne nennenswerten Verlust der Genauigkeit vernachlässigt werden kann. Allerdings können abrupte Wechsel in den Variablen zu Oszillationen führen.

Gekoppelte Randbedingungen in 2D tauschen ausschliesslich über den Querschnitt gemittelte Daten aus. Dieser Ansatz vereinfacht das Aufsetzen von gekoppelten Modellen, da damit keine Restriktionen an die Geometrie und die Anzahl Elemente pro Randbedingung geknüpft sind.

## 2.3 Laterale Ausuferungen in 1D

Eine 1D-Unterregion kann lateral mit einer 2D-Unterregion verbunden werden. Für die Kopplung müssen dabei die einzelnen Elemente in 1D (Querschnitte) mit entsprechenden Kanten der Elemente in 2D assoziiert werden. Diese Kopplung eines 1D-Fliessgewässers mit einer 2D-Flutungsfläche basiert auf dem Ansatz von Beffa [7]. Abb. 2 illustriert eine konzeptuelle Übersicht der Kopplung von Fliessquerschnitten der 1D-Unterregion mit dem Gitter der 2D-Unterregion.

Die laterale Kopplung ist unidirektional implementiert. Auf Basis des Wasserstandes wird eine Wehrformel für ein Streichwehr verwendet.

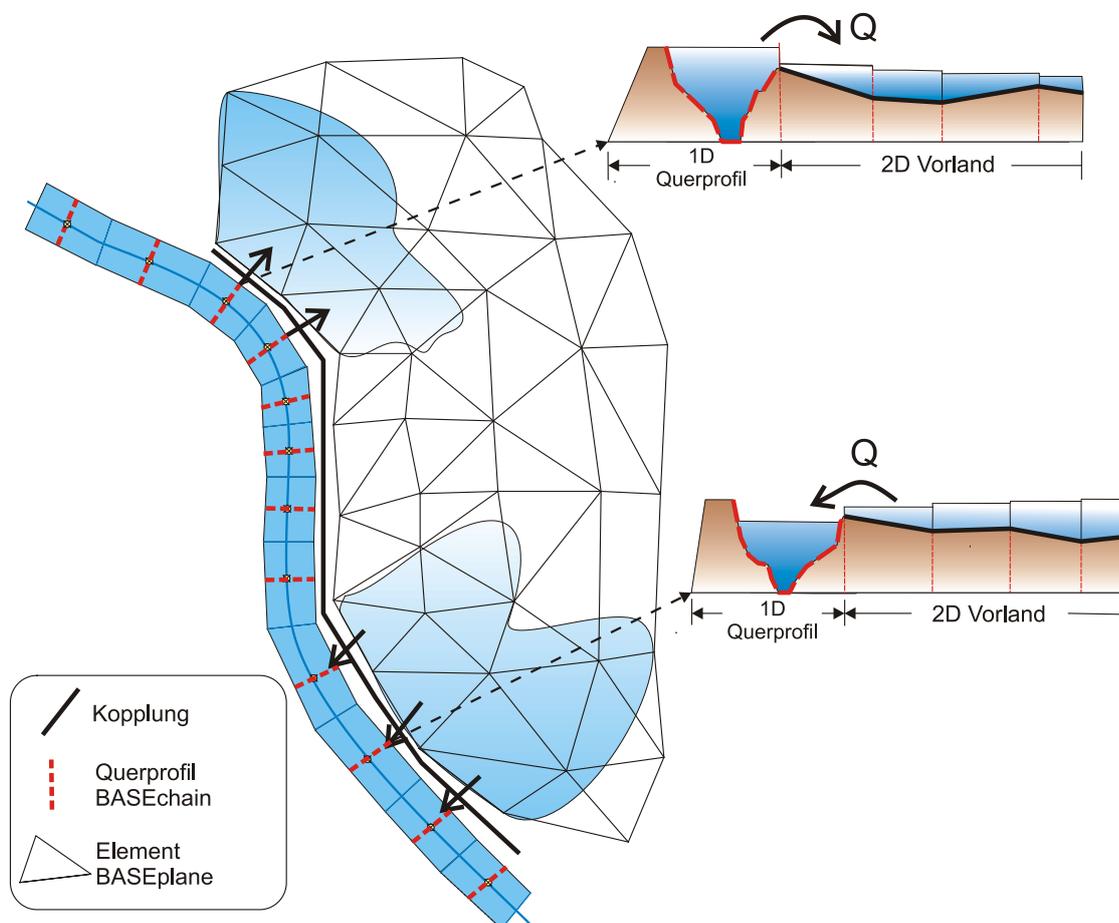
$$Q = \delta \mu \frac{2}{3} b_{\text{wehr}} \sqrt{2gh^2}^{\frac{3}{2}} \quad (1.5)$$

Dabei bezeichnet  $\delta$  den Reduktionsfaktor für ein Streichwehr und  $\mu$  den Polenifaktor. Als Wehrbreite  $b_{\text{wehr}}$  wird jeweils die Länge der Kante im 2D-Modell übernommen. Im Falle einer Ausuferung vom 1D-Gerinne in das 2D-Gebiet wird der Reduktionsfaktor verwendet. Beim

umgekehrten Prozess - dem Rückfließen vom 2D-Gebiet in das 1D-Gerinne – wird der Reduktionsfaktor zu 1 gesetzt.

Somit wird nur der Abfluss ausgetauscht und der Impuls vernachlässigt. Der Austausch entspricht dem Einfluss von Quelltermen in der Kontinuitätsgleichung. Je nach Wasserstand wird der laterale Abfluss des 1D-Querschnitts oder der Abfluss über die Kante des 2D-Elements berechnet. Damit ist ein Austausch in beide Richtungen möglich.

Üblicherweise ist die örtliche Diskretisierung in 1D gröber als in 2D. Im Idealfall wird die geometrische Datenbasis in 1D so verdichtet, dass pro 2D-Element ein Querschnitt, d.h. ein 1D-Element, existiert. Um eine flexible Kopplung zu ermöglichen, kann ein 1D-Querschnitt auch mit mehreren 2D-Elementen verknüpft werden. Die Verknüpfung zwischen den einzelnen Elementen erfolgt manuell beim Aufsetzen des Problems.



**Abb. 2** Übersicht der lateralen Kopplung zwischen BASEchain (1D) und BASEplane (2D)

## 2.4 Zeitschritt-Synchronisation

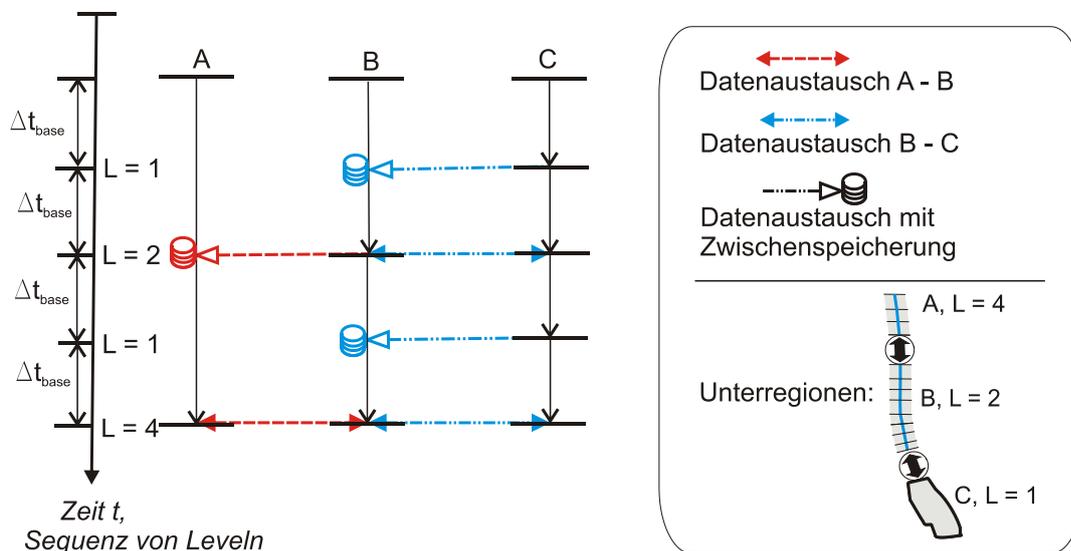
Für die Kopplung der einzelnen Unterregionen ist eine zeitliche Synchronisation notwendig, damit die Daten für die Randbedingungen zu denselben Zeitpunkten ausgetauscht werden können. Für den Fall von kombinierten 1D- und 2D-Simulationen unterscheiden sich die Zeitschritte der einzelnen Unterregionen teilweise beträchtlich. Damit existiert ein Konflikt zwischen lokal unterschiedlichen Zeitschritten und einer erwünschten globalen Gleichzeitigkeit für einen einfachen Datenaustausch.

Generell wird zwischen zwei Ansätzen für die Behandlung der Zeitschritte der einzelnen Unterregionen unterschieden.

Im ersten Fall werden alle Unterregionen synchron mit demselben Zeitschritt gerechnet. Um die Stabilität aller Untergebiete zu gewährleisten, wird als globaler Zeitschritt der minimale Zeitschritt aller Unterregionen anhand der CFL-Bedingung gewählt. Eine solche Einschränkung führt allerdings meist zu ineffizienten kleinen Zeitschritten welche die Simulation unnötig verlangsamen.

Für den zweiten Ansatz werden alle Unterregionen asynchron mit unterschiedlichen Zeitschritten berechnet. Die lokalen Zeitschritte erfüllen erneut die CFL-Bedingung um die Stabilität zu gewährleisten. Für die Synchronisation der gekoppelten Randbedingungen müssen die Daten am Rand zeitlich auf denselben Zeitpunkt hin interpoliert werden. Dies wird für komplexe Kopplungen wie Zusammenflüsse oder Verzweigungen umständlich und kann zu kleinen Abweichungen in der Massenerhaltung führen.

Im vorliegenden Fall wird eine Mischung der beiden Konzepte angewendet, welche sich an der Methode der lokalen Zeitschritte orientiert [8]. Jede Unterregion besitzt ihren eigenen lokalen Zeitschritt. Dies ermöglicht effiziente Simulationen da ein kleiner Zeitschritt einer einzelnen Unterregion nicht den globalen Zeitschritt dominieren kann. Der jeweilige lokale Zeitschritt muss dennoch einer globalen Vorgabe nachkommen, so dass alle Unterregionen zu definierten gemeinsamen Zeitpunkten berechnet werden. An diesen gemeinsamen Zeitpunkten können die Daten für die Kopplung in einfacher Weise ohne Interpolation ausgetauscht werden.



**Abb. 3** Zeitschritt-Synchronisation von drei Unterregionen mit unterschiedlichen lokalen Zeitschritten. Unterregion C mit dem kleinsten Zeitschritt definiert den gemeinsamen Basis-Zeitschritt. Unterregionen A und B benutzen das zwei- und vierfache des gemeinsamen Basis-Zeitschritts.

Zu Beginn eines gemeinsamen Zeitpunkts wird für jede Unterregion  $i$  der lokale Zeitschritt  $\Delta t_i$  anhand eines Stabilitätskriteriums berechnet. Der kleinste dieser Zeitschritte aller Untergebiete wird nun als globaler Basis-Zeitschritt  $\Delta t_{base} = \min(\Delta t_i)$  bezeichnet. Für jede Unterregion wird

dann ein synchronisierter, lokaler Zeitschritt  $\Delta t_{i, sync}$  gesucht, so dass  $\Delta t_{i, sync} = L_i \Delta t_{base}$  wobei  $L_i$  eine natürliche Potenz von 2 darstellt. Der hierarchische Level  $L_i$  einer Unterregion hängt vom Verhältnis des lokalen Zeitschritt  $\Delta t_i$  zum globalen Basis-Zeitschritt  $\Delta t_{base}$  ab.

$$2^k \leq \frac{\Delta t_i}{\Delta t_{base}} < 2^{k+1} \Rightarrow L_i = 2^k, k = 0..n \quad (1.6)$$

Untergebiete mit demselben hierarchischen Level  $L_i$  haben nun denselben Zeitschritt  $\Delta t_{i, sync}$  welcher für jede Unterregion einerseits das lokale Stabilitätskriterium einhält und gleichzeitig einen einfachen Datenaustausch zu einer gemeinsamen synchronisierten Zeit erlaubt.

Die Berechnung der einzelnen Untergebiete erfolgt wie im Beispiel in Abb. 3 skizziert für drei Unterregionen mit unterschiedlichen lokalen Zeitschritten  $\Delta t_A > \Delta t_B > \Delta t_C$  und entsprechenden Levels  $L_i$ . Im Fall einer totalen Anzahl Level  $L_i = 4$  wird beispielsweise die Sequenz  $m = [1, 2, 1, 4]$  ausgeführt. Eine Unterregion wird nur berechnet falls ihr Level  $L_i$  kleiner oder gleich dem aktuellen Level  $m$  ist. Danach werden die Untergebiete um den synchronisierten Zeitschritt  $\Delta t_i = L_i \Delta t_{base}$  weitergerückt. Ein Datenaustausch zwischen gekoppelten Unterregionen findet statt wenn die beiden Unterdomains denselben Level erreicht haben. Falls die gekoppelten Untergebiete unterschiedliche Level besitzen, müssen die Daten für den Austausch gespeichert werden bis die beiden Unterregionen denselben Level erreichen um die Erhaltungseigenschaften von Masse und Impuls zu gewährleisten. Nach dem vollständigen Durchgang einer Sequenz haben alle Untergebiete einen gemeinsamen Zeitpunkt erreicht und die Prozedur wird für den nächsten globalen Zeitschritt wiederholt.

Probleme können auftreten falls der Basiszeitschritt  $\Delta t_{base}$  innerhalb der Sequenz von einer Unterregion aufgrund veränderter Fließbedingungen unterschritten wird und somit die Stabilität nicht mehr gewährleistet sein könnte. Ein Reduktionsfaktor von  $F \leq 1$  kann den Basiszeitschritt weiter verringern um dieses Problem zu entschärfen.

### 3 Praktische Anwendung

Die verschiedenen Kopplungstypen wurden anhand von exemplarischen Testfällen validiert. Diese Testfälle sind auf der Webseite [www.basement.ethz.ch](http://www.basement.ethz.ch) dokumentiert und stehen als Referenzbeispiele zur freien Verfügung. Im Folgenden wird ein einfacher Testfall für eine bidirektionale Kopplung von zwei 1D-Unterregionen diskutiert.

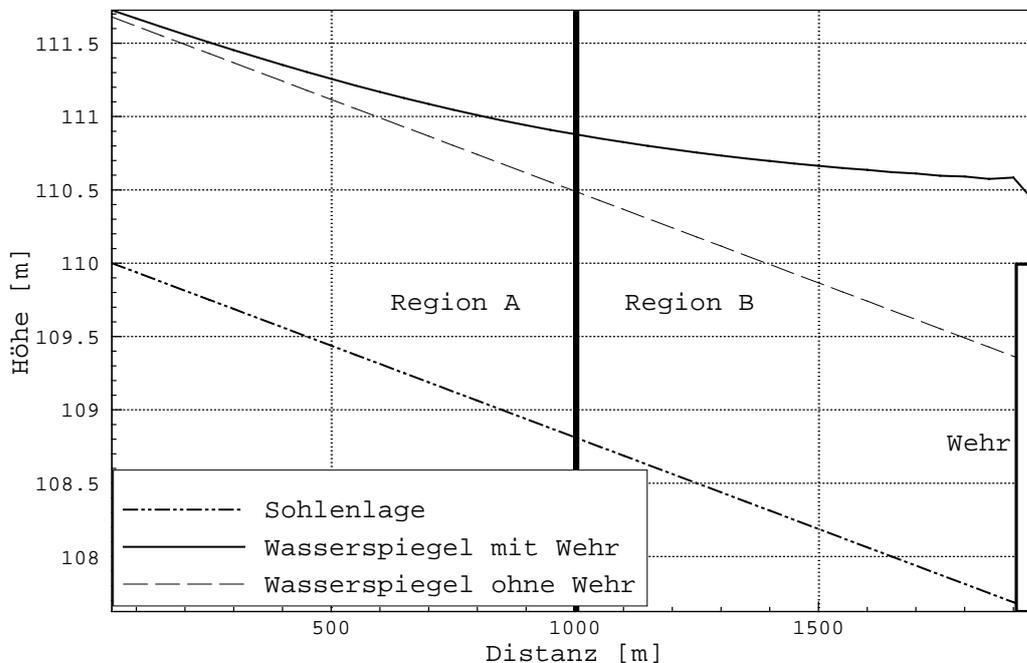
#### 3.1 Bidirektionale Kopplung mit Aufstau

Zwei Unterregionen A und B werden durch eine bidirektionale Kopplung verbunden. Region A liegt flussaufwärts von Region B. Für die Kopplung wird als Abflussrandbedingung von Region A ein Z-Hydrograph verwendet. Diese Randbedingung berechnet einen Abfluss so, dass eine vorgegebene Wasserspiegellage resultiert. Als Zuflussrandbedingung der Region B wird ein Hydrograph definiert. Dementsprechend wird der berechnete Abfluss aus Region A der Randbedingung von Region B übergeben. In der umgekehrten Richtung bekommt Region A von Region B die Information über die Wasserspiegellage an der Stelle der gekoppelten Randbedingung.

Am unteren Ende der Region B wird ein Wehr als Abflussrandbedingung angenommen. Dies bewirkt gegenüber dem Zustand ohne Wehr (Normalabfluss) einen Aufstau gegen die Fließrichtung, welcher sich auch in die Region A fortsetzt. Eine bidirektionale Kopplung muss diesen Effekt reproduzieren können.

Die Simulation wurde ausgehend von einem trockenen Gebiet gestartet. Nach einiger Zeit stellt sich ein stationärer Zustand in beiden Unterregionen ein (siehe Abb. 4). Die Wasserspiegellage an der Kopplungs-Randbedingung zwischen den beiden Untergebieten verläuft glatt ohne Oszillationen. Ein Z-Hydrograph gekoppelt mit einem Hydrographen ist die beste Wahl für eine bidirektionale Kopplung zwischen zwei 1D-Untergebieten.

Andere Kombinationen von gekoppelten Randbedingungen wie beispielsweise eine Pegel-Abfluss-Beziehung verbunden mit einem Hydrographen sind auch möglich. Dabei müssen allerdings heuristische Ansätze zur Abbildung des Aufstaus berücksichtigt werden. Solche Modelle können zu kleinen Unstetigkeiten an der Kopplungsstelle führen.



**Abb. 4** Wasserspiegellagen zweier gekoppelter 1D-Unterregionen mit einem Aufstau im Oberwasser aufgrund einer Wehrabfluss-Randbedingung.

#### 4 Fazit

Die Möglichkeit zur Kopplung von 1D- und 2D-Gebieten erlaubt eine effiziente Simulation von komplexen Fließgewässersystemen. Für die Modellierung von Gerinneabflüssen mit der Möglichkeit zu Ausuferungen bietet sich ein gekoppeltes Vorgehen an. Der Abfluss im Gerinne wird dabei in einer Dimension berechnet und eventuelle Überflutungen des Vorlands werden zweidimensional simuliert. Somit kann die Rechenkapazität gezielt dort eingesetzt werden wo der Modellierer eine hohe räumliche Auflösung der Resultate wünscht.

Neben der zeitlichen Einsparung bezüglich der Rechenzeit erlaubt die gekoppelte Vorgehensweise auch eine schrittweise Erweiterung des Gesamtmodells. Dadurch können bereits kalibrierte Systeme mit minimalem Aufwand in einen grösseren Kontext eingebunden werden. Dies vereinfacht die Modellierung von Problemen mit grossen Unterschieden in der Längenskala wie zum Beispiel ein Flusssystem und der Mündungsbereich in einen See.

### **Anmerkung**

Die Software BASEMENT wurde mit finanzieller Unterstützung des schweizerischen Bundesamts für Umwelt (BAFU) entwickelt und ist frei erhältlich unter [www.basement.ethz.ch](http://www.basement.ethz.ch).

### **Literatur**

- [1] Faeh R, Mueller R, Rousselot P, Veprek R, Vetsch D und Volz C: „BASEMENT – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation“. VAW, ETH Zürich, 2006-2010 ([www.basement.ethz.ch](http://www.basement.ethz.ch))
- [2] Cunge J A, Holly F M J et al.: “Practical aspects of computational river hydraulics”. Pitman, London, 2008
- [3] Roe P L: “Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes”. Journal of Computational Physics, 43(2), S. 357-372, 1981
- [4] Beffa C J: “Praktische Lösung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen”. Mitteilung Nr. 133 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH, Zürich, 1994
- [5] Toro E F: “Shock-Capturing Methods for Free Surface Shallow Flows“. John Wiley & Sons, Ltd., U.K., 2001
- [6] Komaei S und Bechteler W: “An Improved, Robust Implicit Solution for the Two Dimensional Shallow Water Equations on Unstructured Grids“. River Flow, Napoli, Italien, 2004
- [7] Beffa C: “Integration ein- und zweidimensionaler Modelle zur hydrodynamischen Simulation von Gewässersystemen“. Int. Symposium Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau, Zürich, 2002
- [8] Sanders B: “Integration of a shallow water model with a local time step“. Journal of Hydraulic Research, 46(4), S. 466-475, 2008

### **Anschrift der Verfasser**

Patric Rousselot, Christian Volz, Renata Müller, David Vetsch und Roland Fäh  
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)  
ETH Zürich  
8092 Zürich, Switzerland  
[rousselot@vaw.baug.ethz.ch](mailto:rousselot@vaw.baug.ethz.ch)