

7 > Numerische Fließgewässer-Modellierung

Patric Rousselot, David Vetsch, Roland Fähr

Bei Gewässern treffen unterschiedliche Nutzungs- und Schutzinteressen aufeinander; umso wichtiger ist eine gesamtheitliche Sicht im Wasserbau. Numerische Simulationen helfen, Varianten flussbaulicher Massnahmen und ihre Folgen für Fließgewässer zu bewerten. Das vorliegende Merkblatt beschreibt das Vorgehen beim Aufsetzen von numerischen Modellen, stellt die Simulationssoftware BASEMENT vor und zeigt mögliche Anwendungen anhand praktischer Beispiele.

Simulationen helfen dem Hochwasserschutz

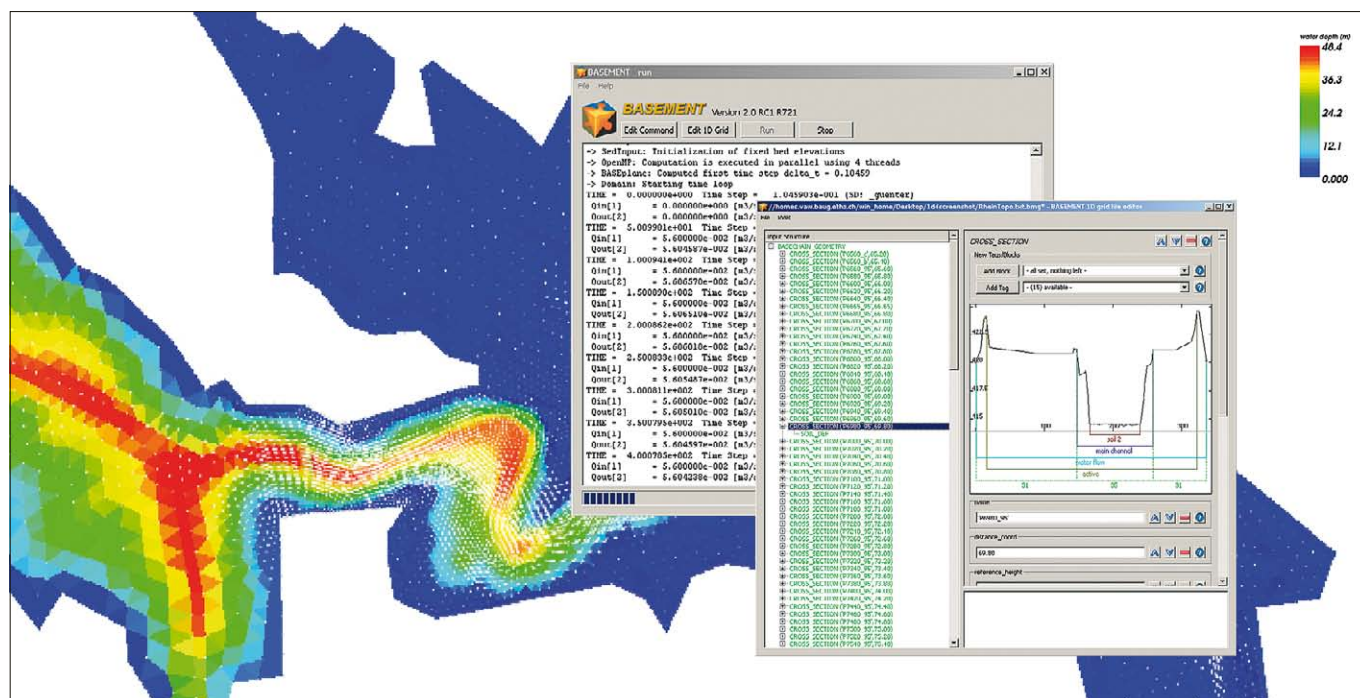
In der Schweiz werden seit einigen Jahren Fließgewässer revitalisiert und ökologisch aufgewertet. Eine gängige Massnahme, um die morphologische Vielfalt und die Habitatsvielfalt in einem Gewässer zu erhöhen, sind Aufweitungen. Diese stellen neue Anforderungen an den Hochwasserschutz. Numerische Simulationen können die Planung baulicher Massnahmen unterstützen, indem sie helfen, die Folgen eines solchen Eingriffs zu analysieren und die unterschiedlichen Nutzungsinteressen besser aufeinander abzustimmen.

Numerische Simulationen eignen sich insbesondere für die Hochwasservorsorge, die Erstellung von Gefahrenkarten, die Regelung von Flüssen und Seen sowie zur Dimensionie-

rung von Fließgewässern. Zudem können morphologische Entwicklungen untersucht werden, und mittels geeigneter Indizes lässt sich die Habitatsvielfalt eines Gewässers bestimmen. Im Vergleich zu physikalischen Experimenten erlauben numerische Simulationen Varianten kostengünstig zu vergleichen, indem Parameter verändert werden.

Modelle für die Ingenieur-Anwendung

Der Einsatz numerischer Modelle für die Simulation von Fließgewässern hängt von der Fragestellung und der Grösse des Berechnungsgebiets ab. Die Anwendung ist hauptsächlich durch die Leistungsfähigkeit der Computer begrenzt. Modelle mit einer hohen räumlichen Auflösung oder grossen Berech-



Beispiel der Benutzeroberfläche von BASEMENT: Visualisierung von Abflusstiefe und Abflussgeschwindigkeit.

Illustration: VAW, ETH Zürich

nungsgebieten benötigen lange Rechenzeiten. Der Aufwand für rechenintensive Aufgaben kann vermindert werden, wenn das Modell vereinfacht oder die räumliche Dimension reduziert wird.

1-D-Modelle

Für Fragestellungen mit beschränktem Detaillierungsgrad sowie für grossräumige Fließgewässer eignen sich 1-D-Modelle, die auf Querprofilen basieren (Abb. 1). Diese Modelle eignen sich auch für die Simulation langer Zeitspannen und liefern als Resultat die zeitliche Variation der Wasserspiegel- und Gewässersohlenlage sowie die mittlere Abflussgeschwindigkeit pro Querprofil.

2-D-Modelle

Wenn lokale Prozesse simuliert werden sollen, sind 2-D-Modelle zu empfehlen. Dafür braucht es Daten zur Topografie, und diese basieren auf einem digitalen Geländemodell (Abb. 2). Als Resultat liefern diese Modelle Wasserspiegel- und Gewässersohlenlagen sowie eine tiefengemittelte Abflussgeschwindigkeit für jedes Rechenelement. 2-D-Modelle sind beispielsweise geeignet für die Berechnung von Ausuferungen ausserhalb des eigentlichen Fließgewässers, zur Gefahrenkartierung oder für die Dimensionierung von Rückhalteräumen und Aufweitungen.

3-D-Modelle

3-D-Modelle eignen sich für die Lösung kleinräumiger Aufgaben, in denen turbulente vertikale Strömungen eine wesentliche Rolle spielen. Beispiele für Anwendungen sind die Optimierung der Anströmbedingungen eines Wasserkraftwerks oder lokale Kolkvorgänge bei Wehranlagen sowie Brückenpfeilern.

Ergänzend zur Berechnung der Strömung kann auch der Sedimenttransport simuliert werden, um eine Aussage über die morphologische Veränderung der Gewässersohle zu machen. Die Berechnungen des Sedimenttransports basieren auf empirischen Formeln, die Resultate hängen von der gewählten Methode ab. Eine Alternative zu numerischen Simulationen sind physikalische Modelle. Diese werden angewendet, wenn eine Skalierung des Massstabs von der Realität zum Modell das Fließverhalten des Wassers nicht verändert. Die Vorteile physikalischer Modelle gegenüber numerischen Simulationen liegen in der Qualität der Resultate. Numerische Simulationen ergeben abhängig vom gewählten Verfahren unterschiedliche Resultate, wobei die Wahl eines spezifischen Verfahrens im Ermessen des Anwenders liegt. Bei den physikalischen Modellen gibt es keine solchen Unsicherheiten. Komplexe Strömungsverhältnisse mit turbulenten Eigenschaften können numerisch nur mit hoch aufgelösten Modellen genau berech-

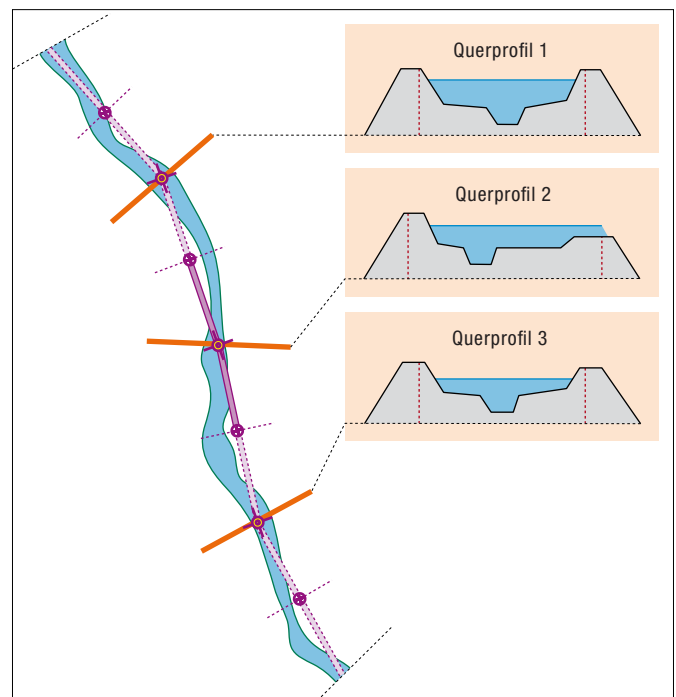


Abb. 1 Schematische Darstellung des Berechnungsgitters für eine 1-D-Simulation. Das Fließgewässer wird für die Berechnung in einzelne Querprofile unterteilt. Illustration nach VAW, ETH Zürich

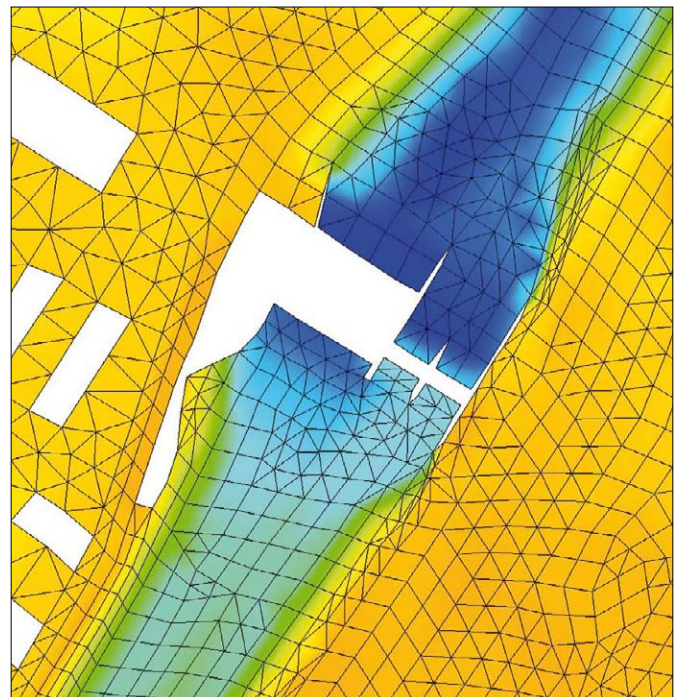


Abb. 2 Beispiel eines 2-D-Berechnungsgitters, das aus Dreiecks- und Viereckselementen besteht. Die Farbe widerspiegelt die Topografie. Gebäude werden aus dem Gitter ausgespart. Der Abfluss über ein Wehr wird als innere Randbedingung modelliert. Illustration: VAW, ETH Zürich

net werden. Solche numerischen Simulationen sind aufwendig und benötigen ein fundiertes Fachwissen. Allerdings haben auch physikalische Modelle Nachteile. Änderungen während der Projektierungsphase lassen sich nicht so leicht implementieren wie in numerischen Modellen. In der Praxis werden deshalb die beiden Ansätze häufig in einem sogenannten hybriden Modell kombiniert. Mit den numerischen Berechnungen werden die Auslegung und die Randbedingungen für das physikalische Modell so genau wie möglich spezifiziert. Das physikalische Modell wird dann für die Feinabstimmung der Dimensionierung eines Bauteiles verwendet.

Simulationssoftware BASEMENT

Das Programm *BASEMENT* wird seit 2002 an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich entwickelt und steht kostenlos zur Verfügung (Box 1). Der Kern der Software besteht aus der Lösung der Saint-Venant-Gleichungen für 1-D-Modelle sowie der Flachwassergleichungen für die Hydrodynamik der 2-D-Modelle. Diese Gleichungen basieren auf der Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung und sind demnach nur gültig, wenn die vertikale Geschwindigkeitskomponente vernachlässigt werden kann. Für die Kalibrierung werden Reibungsgesetze für den Widerstand an der Gewässersohle verwendet. Zusätzlich kann beim 2-D-Modell ein Turbulenzmodell aktiviert werden.

Als Randbedingungen für die Strömungsberechnung stehen u. a. Zuflusshydrografen, Normalabfluss sowie hydraulische Strukturen wie Wehr und Schütze zur Verfügung. Diese Strukturen können auch innerhalb des Rechengebiets verwendet werden. *BASEMENT* bietet auch die Möglichkeit, Wehre und Schützen nach beliebigen Zielkriterien automatisch zu regeln.

Abbildung 3 zeigt einen schematischen Überblick über die mit *BASEMENT* modellierten Prozesse. Der Sedimenttransport wird unterteilt in Geschiebetransport und Schwebstofftransport. Für die Berechnung des Geschiebetransports stehen empirische Formeln zur Verfügung. Für den Schwebstofftransport wird eine Advektions-Diffusions-Gleichung gelöst. Damit lässt sich sowohl die Ausbreitung von Schadstoffen als auch der Transport von suspendiertem Gewässersohlenmaterial simulieren. Für die Beschreibung des Austausches des suspendierten Materials zwischen Gewässersohle und Flüssigphase kann zwischen verschiedenen Ansätzen gewählt werden. Das zu transportierende Feststoffgemisch kann in beliebig viele Kornklassen unterteilt werden, *BASEMENT* löst die entsprechenden Transportgleichungen.

Beim Sedimenttransport ist die Wasserströmung die treibende Kraft. Das Gewässersohlenmaterial kann jedoch auch durch gravitative Prozesse wie einen Böschungskollaps transportiert werden. Solche Vorgänge lassen sich mit einem geo-

> Box 1: *BASEMENT* – eine Software zur Modellierung von Fließgewässern

BASEMENT ist eine Software zur Berechnung von Prozessen in Fließgewässern unter Berücksichtigung von Strömung und Feststofftransport. Die Prozesse können entweder ein- oder zweidimensional oder auch als gekoppeltes Modell beschrieben werden. Auch Regelungseingriffe lassen sich abbilden. Beim Feststofftransport wird zwischen Geschiebetransport und Suspensionstransport unterschieden. Dabei können unterschiedliche Korngrößen berücksichtigt werden. Zur Unterstützung der Modellkonfiguration steht eine grafische Benutzeroberfläche zur Verfügung. In Zukunft ist vorgesehen, *BASEMENT* mit Funktionen wie einem Grundwassermodell, einer Simulation von Dichteströmen sowie praxisorientierten Modellierungen von dreidimensionalen Strömungsvorgängen zu erweitern. Das Programm und die dazugehörige Dokumentation (Fäh *et al.* 2011) sind kostenlos erhältlich unter www.basement.ethz.ch – dort sind ebenfalls Eingabedateien für verschiedene Übungsbeispiele und Testfälle abrufbar. Dadurch soll der Einstieg in die numerische Modellierung erleichtert werden.

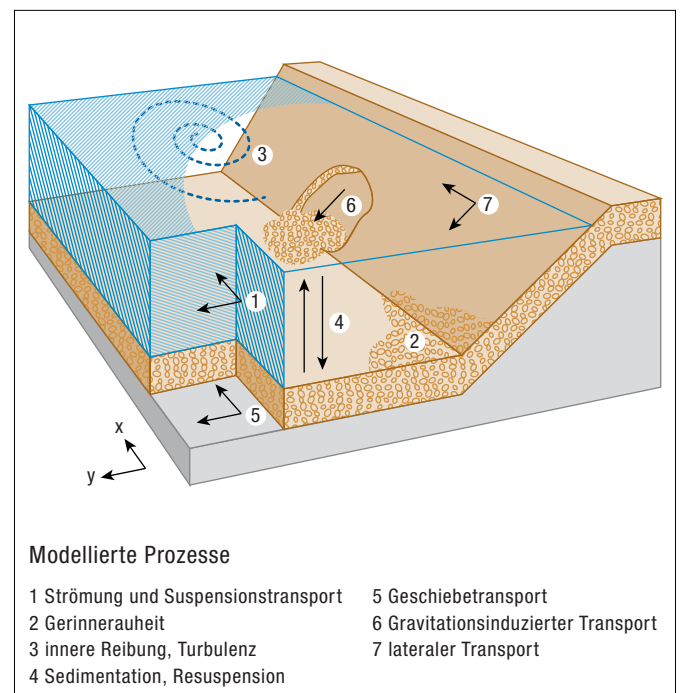


Abb. 3 Übersicht über die Prozesse, die bei einem 2-D-Modell simuliert werden. Illustration nach VAW, ETH Zürich

metrischen Modell, das auf einem kritischen Böschungswinkel basiert, abbilden.

Zur effizienten Simulation grossräumiger Gebiete können mehrere Modelle aneinander gekoppelt werden (Abb. 4). So ist es möglich, einen Gewässerabschnitt in einem 1-D-Modell zu berechnen und etwaige Ausuferungen mit einem gekoppelten 2-D-Modell zu simulieren. Des Weiteren unterstützt die Software die Verwendung von handelsüblichen Computern mit Multi-Core-Prozessoren.

BASEMENT bietet noch weitere Funktionen. Im «Command File Editor» werden die notwendigen Parameter für numerische Modelle definiert. Sämtliche zur Verfügung stehenden Parameter werden beschrieben und mit Beispielen illustriert. Eingabefehler werden sofort erkannt und entsprechend gekennzeichnet. Der sogenannte 1-D Grid Editor wird für die Gittererstellung der 1-D-Modelle verwendet und gibt die Querprofile samt ihren Eigenschaften grafisch wieder. Bereits während der Berechnung können Resultate wie Abflusstiefe, Geschwindigkeit oder Gewässersohlendifferenzen visualisiert werden.

Vorgehen

Zu Beginn der Modellierung (Abb. 5) müssen die entsprechenden Daten beschafft werden. Unabdingbar für eine Simulation sind Informationen betreffend Anfangs- und Randbedingungen. Daten von gemessenen Wasserspiegellagen, Hochwasserspurten, Korngrößen, Bewuchs u. a. m. vermögen die Kalibrierung des Modells erheblich zu erleichtern. Eine fundierte Datengrundlage kann die Vorhersagekraft des Modells massgeblich steigern.

Mit den vorhandenen Informationen wird ein Rechengitter erstellt, das der Dimension des Modells entspricht. Mit diesem Gitter und den gewählten Randbedingungen beginnt die eigentliche Simulation. In einem ersten Schritt wird das numerische Modell anhand eines dokumentierten Ereignisses kalibriert und falls möglich mit weiteren Vergleichsdaten validiert. Mit dem kalibrierten Modell werden die Varianten berechnet. Nach der Simulation werden die Resultate ausgewertet und visualisiert.

Anfangsbedingungen: Topografie

Die topografischen Informationen über ein Fließgewässer liegen meist in Form von Gerinnequerprofilen vor. Häufig wurden die Profile mit grossem Abstand aufgenommen und haben für die Zwischenräume nur einen geringen Informationsgehalt. Mithilfe von Orthofotos sowie Kenntnis der Situation vor Ort kann aus einer eher dünnen Datenlage das Optimum gewonnen werden. Insbesondere bei 2-D-Modellen werden die Querprofildaten entlang des Fließwegs interpoliert, um ein verdichtetes Höhenmodell zu erhalten. Für das Umland

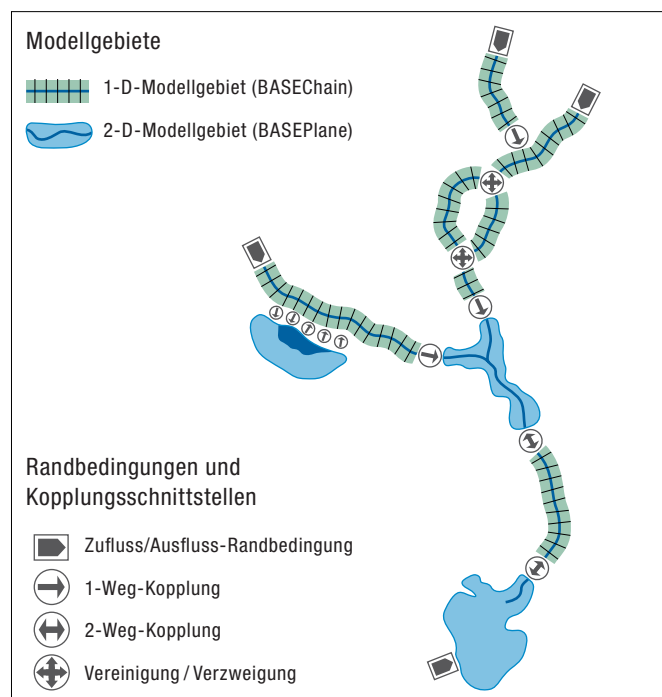


Abb. 4 Schematische Darstellung von 1-D- und 2-D-Modellgebieten, die beliebig aneinandergesetzt werden können. Der Informationsaustausch kann in eine oder zwei Richtungen stattfinden. Illustration nach VAW, ETH Zürich

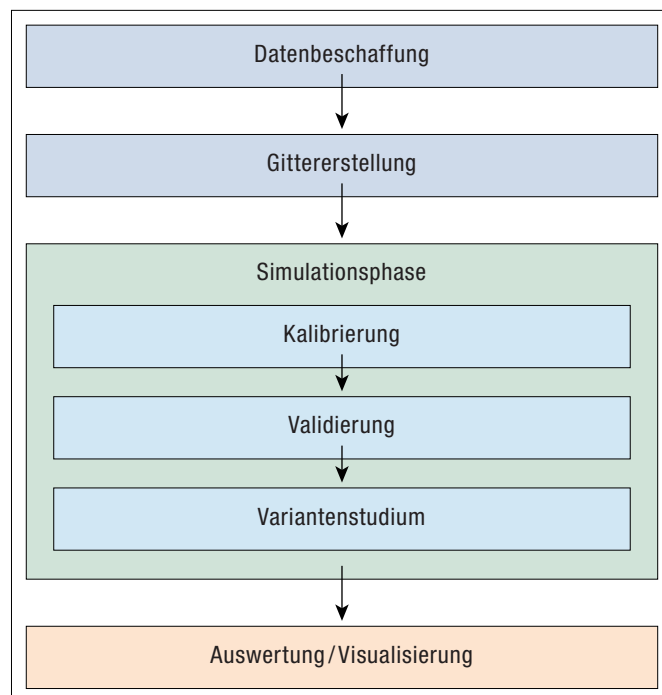


Abb. 5 Schematischer Ablauf einer numerischen Modellierung. Die einzelnen Prozesse werden nach Bedarf iterativ wiederholt. Illustration nach VAW, ETH Zürich

hingegen gibt es oft Höheninformationen in guter Auflösung (z. B. Daten aus Laserscanning).

Für die 1-D-Modelle ergibt sich das Rechengitter direkt aus der Aufreihung der einzelnen Querprofile. Für die 2-D-Modelle muss aus den vorhandenen Höheninformationen zusätzlich ein Rechengitter erzeugt werden, das aus Dreiecks- und Viereckselementen besteht. Bei der Erstellung des Gitters müssen vorhandene Bruchkanten beachtet werden.

Randbedingungen: Strömung und Sedimenttransport

Als Zuflussrandbedingung für die Strömung können zum Beispiel repräsentative Abflussganglinien von Messstationen des BAFU oder Resultate eines hydrologischen Modells verwendet werden. Für die Randbedingung am Ausflussrand stehen verschiedene Ansätze wie Wasserstands-Abfluss-Beziehungen oder hydraulische Strukturen wie Wehre oder Schützen zur Verfügung.

Die Randbedingungen für den Sedimenttransport sind in den meisten Fällen nicht bekannt. Vielfach muss zuerst der totale jährliche Sedimenteintrag abgeschätzt werden, um eine Geschiebezufussfunktion in Abhängigkeit vom hydraulischen Abflusshydrografen zu konstruieren. Diese Funktion hängt massgeblich von der verwendeten Geschiebetransportformel ab und basiert oft auf der Annahme, dass die ganze Transportkapazität ausgeschöpft wird.

Kalibrierung und Validierung

Numerische Modelle enthalten Kalibrierungsparameter, mit denen die Ergebnisse der Simulation an die realen Situationen angepasst werden können. Als Kalibrierungsgrundlagen für die Hydraulik werden im Idealfall Wasserspiegellagen verwendet, die zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen wurden. Häufig sind solche Daten nicht vorhanden. Dann können – wenn vorhanden – vermessene Hochwasserspuren verwendet werden, deren zugehörige Abflussspitzen bekannt sind. Für die Kalibrierung werden die Reibungsbeiwerte der Gewässersohle des numerischen Modells so weit angepasst, bis die simulierten Wasserspiegellagen mit den gemessenen Werten übereinstimmen.

Modelle mit Sedimenttransport sind zusätzlich zu kalibrieren. Dafür muss die Topografie zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen werden. Für die Kalibrierung des Geschiebe- und Schwebstofftransports stehen verschiedene Parameter zur Auswahl. Das Modell gilt als validiert, wenn mit einem kalibrierten Parametersatz ein vom Kalibrierungsfall unterschiedliches Ereignis qualitativ und quantitativ reproduziert werden kann.

Das kalibrierte und validierte Modell dient als Ausgangspunkt für die eigentlichen Simulationen. Mit verschiedenen Randbedingungen für die Hydraulik und den Sedimenttransport lassen sich Szenarien berechnen. Bauliche Massnahmen

können in das Rechengitter eingebaut und ihre Auswirkungen untersucht werden.

Auswertung und Darstellung der Resultate

Numerische Simulationen generieren grosse Datenmengen. Der Anwender oder die Anwenderin sollten sich bereits vor den Simulationen überlegen, welche Resultate gewünscht werden, denn oft sind nur einzelne Aspekte von Interesse. Zu viele Informationen führen zu grossen Ergebnis-Dateien und erhöhen den Berechnungs- und Auswertungsaufwand. Die Ergebnisse werden in tabellarischer Form als Textdatei ausgegeben und können in Visualisierungsprogramme kopiert werden. Für flächige Darstellungen von skalaren und vektoriellen Daten erfolgt die Nachbearbeitung meist in anderen, kommerziellen Programmen.

Genauigkeit und Aufwand

Die Genauigkeit der Resultate ist abhängig vom verwendeten Verfahren und dessen Annahmen sowie von der Qualität der topografischen Daten und den Randbedingungen. Im Allgemeinen verkleinert sich der Fehler bei höheren Gitterauflösungen, was als Konvergenz bezeichnet wird. Bei praktischen Anwendungen wird die Gitterauflösung durch die Rechenzeit beschränkt. Das Resultat einer numerischen Simulation ist deshalb immer ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berechnungsaufwand.

Generell sollte der Aufwand für numerische Projekte nicht unterschätzt werden. Ein einfaches Modell kann bereits mit geringem Aufwand erstellt werden. Für qualitativ und quantitativ verlässliche Resultate lohnt sich jedoch eine vertiefte Auseinandersetzung mit der Problemstellung. Bereits die Gittererstellung kann für die Stabilität der Simulation, den zeitlichen Rechenaufwand und die Qualität der Resultate entscheidend sein. Um im späteren Verlauf der Simulationen Probleme zu vermeiden, lohnt es sich, für die Gittererstellung genügend Zeit aufzuwenden. Nach der Interpolation der Höheninformation auf das Rechengitter sollten wichtige Bruchkanten kontrolliert und bei Bedarf angepasst werden. Die Randbedingungen sind in einigen Fällen an ungünstigen Stellen platziert, was zu unregelmässigem Verhalten führen kann. Üblicherweise werden die Randbedingungen möglichst weit weg vom eigentlich interessierenden Gebiet angeordnet, um Randeffekte zu minimieren.

Für eine konkrete Problemstellung sollte der Anwender die zugrunde liegenden Modellannahmen beachten. Für die 1-D- und 2-D-Modelle wird beispielsweise von einer hydrostatischen Druckverteilung ausgegangen. Zudem haben die Gleichungen streng genommen nur für kleine Gefälle innerhalb der Gewässersohle Gültigkeit. Auch Geschiebetransportformeln gelten meistens für einen eingeschränkten Bereich betreffend Korndurchmesser oder Gefälle der Gewässersohle.

In der Praxis werden diese Grundannahmen oft verletzt, und es können lokale Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Werten auftreten.

Berechnungen mit Sedimenttransport benötigen oft einen erheblichen Aufwand, um das Modell zu kalibrieren. Im Vergleich zur reinen Hydraulik gibt es mehr Parameter, welche zur Kalibrierung verändert werden können. Zusätzlich bestehen die Randbedingungen bezüglich des zugeführten Sedimentvolumens meistens aus groben Abschätzungen und haben dennoch einen grossen Einfluss auf die numerischen Resultate. Vielfach können Modelle mit Sedimenttransport nicht ausreichend kalibriert und validiert werden, weil keine topografischen Informationen zu verschiedenen Zeitpunkten existieren. Diesen Unsicherheiten ist Rechnung zu tragen, indem numerische Resultate kritisch begutachtet und auf ihre Plausibilität geprüft werden.

Anwendungen

Anhand konkreter Beispiele sollen Anwendungsmöglichkeiten von *BASEMENT* gezeigt werden.

Gewässersohlenentwicklung am Alpenrhein (1-D)

Am Alpenrhein soll der Hochwasserschutz zwischen der Illmündung (SG) und dem Bodensee erhöht werden, und gleichzeitig soll den Anliegen von Ökologie, Grundwassernutzung, Wasserkraft und Naherholung besser Rechnung getragen werden. In einer ersten Planungsphase wurden Varianten baulicher Massnahmen und ihre Auswirkungen auf die langfristige Entwicklung der Gewässersohle simuliert. Es wurden 1-D-Modelle erstellt, weil das Rechengebiet 50 km umfasst und lange Zeiträume simuliert werden mussten. Für den Geschiebetransport wurde ein Mehrkornverfahren mit 8 Kornfraktionen verwendet. Das Modell wurde anhand eines Zeitraums von 10 Jahren kalibriert und anhand eines anderen Zeitraums von 20 Jahren validiert. Mit dem validierten Modell wurde die Entwicklung der Gewässersohle für 7 Varianten von Massnahmen und für eine Zeitspanne von 60 Jahre simuliert und im Hinblick auf das zu erreichende Hochwasserschutzziel evaluiert (Abb. 6).

Automatische Regelung von Seen (1-D)

Der Schaden von Hochwasserereignissen kann mit einer optimalen Regelung der Seen und der aufeinanderfolgenden Staustufen vermindert werden. An einem Beispiel wurde getestet, ob sich *BASEMENT* zur Regelung von hydraulischen Strukturen in einem grossen Gebiet eignet (Abb. 7). Das numerische Modell umfasste die 3 Jurarandseen Bieler-, Neuenburger- und Murtensee mit ihren Verbindungskanälen sowie Teile der Aare und der Emme. Das Gebiet bestand aus einzelnen 1-D-Modellen, welche aneinandergeschaltet wurden und insgesamt 800 Querprofile enthielten. Die Wehre unterlagen unterschiedlichen Regulierungsreglementen. Anhand eines drei Monate

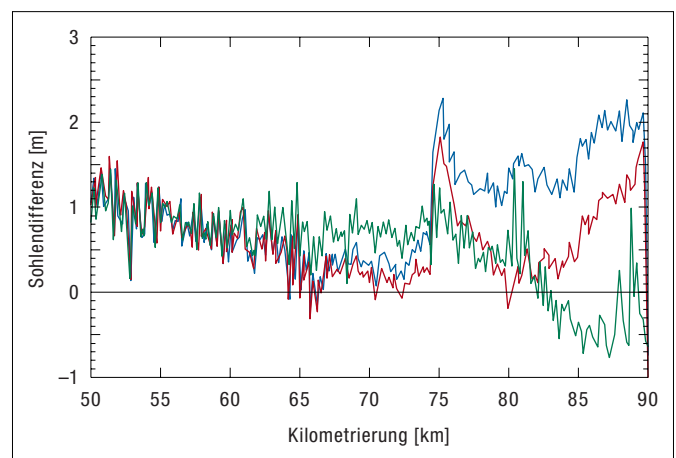


Abb. 6 Mit einem 1-D-Modell simulierte Sohldifferenzen verschiedener Massnahmen für eine Simulationszeit von 50 Jahren am Beispiel des Alpenrheins (SG). Die Nulllinie zeigt die Sohlenentwicklung ohne Massnahmen. Illustration nach VAW, ETH Zürich

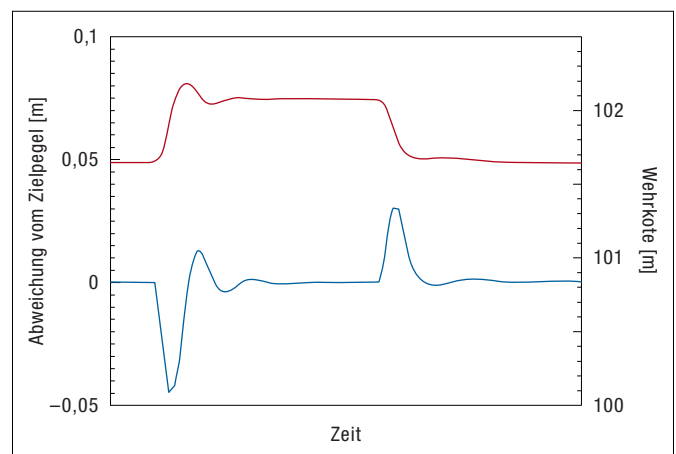


Abb. 7 Verhalten eines geregelten Wehrs mit einer abrupten Verringerung sowie anschliessender Steigerung des Zuflusses. Die blaue Kurve zeigt die Abweichung des Pegels vom Zielwert. Die rote Kurve zeigt den Verlauf der Wehrkote. Illustration nach VAW, ETH Zürich

langen Zeitabschnitts von 2005 wurde das gekoppelte Modell kalibriert und anschliessend anhand eines Zeitabschnitts von 2007 validiert. Danach wurden mit dem validierten Modell diverse Szenarien bezüglich der Staustufen und der Seeregulierung berechnet.

Habitatsvielfalt an der Sense (2-D)

Die Sense (BE/FR) befindet sich streckenweise noch in einem natürlichen Zustand. An einem 2 km langen Abschnitt, der die Charakteristik eines verzweigten Gerinnes hat, wurde eine Abflussganglinie über 1 Jahr simuliert. Es wurde eine

2-D-Simulation durchgeführt, um die vielfältigen Strukturen der Topografie abbilden zu können. Die Kalibrierung des hydraulischen Modells erfolgte anhand von gemessenen Wasserspiegellagen. Im Anschluss wurden die Auswirkungen verschiedener Geschiebetransportformeln (Ein- und Mehrkorn) auf die Morphologie sowie die Veränderungen der Habitattypen (MB 3, Index für hydro-morphologische Diversität) untersucht.

Entwicklung der Rheinmündung (2-D)

Der Alpenrhein mündet in Form eines künstlichen Gerinnes – der sogenannten Rheinvorstreckung – in den Bodensee (Abb. 8). Dabei werden grosse Mengen an feinkörnigem Sediment in die Vorstreckung und den Bodensee eingetragen. Um die langfristigen Veränderungen der Gewässersohle innerhalb der Vorstreckung abzuschätzen, wurde ein 2-D-Modell des Mündungsbereichs erstellt. Für die Sedimentumlagerungen wurde hauptsächlich der Schwebstofftransport modelliert, weil der Korndurchmesser klein ist. Die Topografie der Vorstreckung ist an 2 Zeitpunkten im Abstand von etwa 500 Tagen bekannt. Ausgehend vom früheren Zustand wurde das numerische Modell dahingehend kalibriert, dass die gemessenen Gewässersohlendifferenzen durch die Simulation qualitativ und quantitativ reproduziert werden konnten.

Hydraulische Wirkungsweise einer Aufweitung (2-D)

Aufweitungen werden geplant, um die Biodiversität zu fördern und gleichzeitig den Hochwasserschutz zu verbessern. Mit einer hydraulischen 2-D-Simulation wurde die Wirkungsweise der Aufweitung anhand mehrerer Lastfälle bestimmt (Abb. 9). Die Ergebnisse können als Randbedingung eines physikalischen Modells für geplante Aufweitungen verwendet werden.

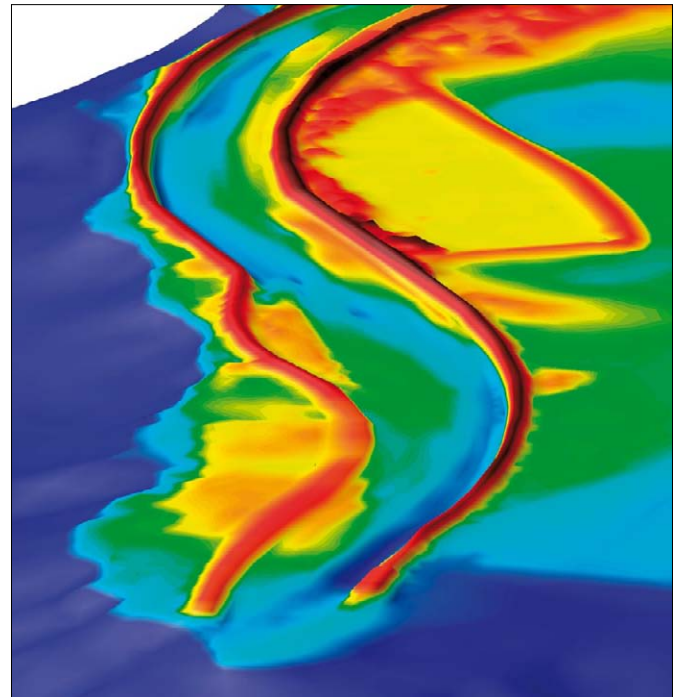


Abb. 8 Sohlentopografie (2-D) im Bereich der Rheinvorstreckung in den Bodensee. Illustration: VAW, ETH Zürich

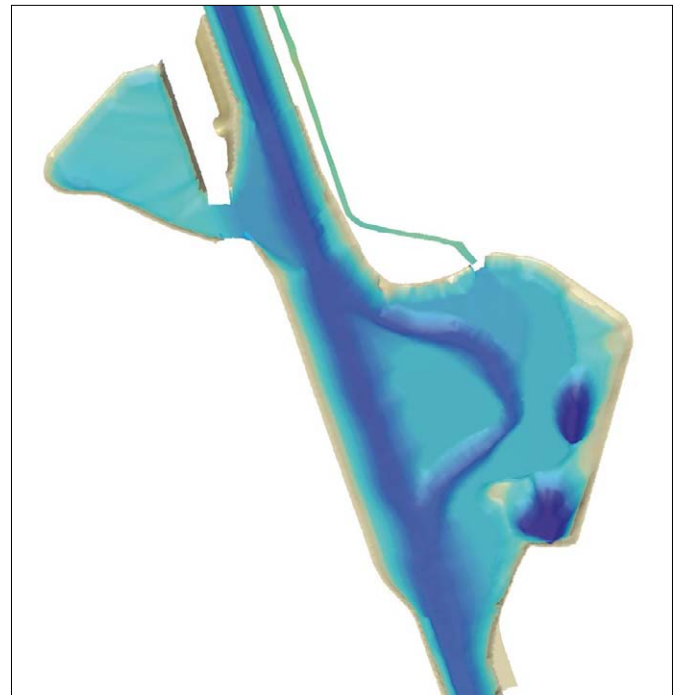


Abb. 9 Simulierte Abflusstiefen (2-D) in einer Aufweitung neben einem kanalisiertem Gewässer mit Hochwasserentlastung. Illustration: VAW, ETH Zürich

Literatur

Fäh, R., Mueller, R., Rousselot, P., Veprek, R., Vetsch, D., Volz, C., 2006–2011: *BASEMENT* – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation. VAW, ETH Zürich, online: www.basement.ethz.ch

Vetsch, D., Rousselot, P., Fäh, R., 2011: Flussgebietsmodellierung mit der Simulationssoftware *BASEMENT*. Wasser Energie Luft: 4/2011, 313–319.

Impressum

Konzept

In diesem Projekt arbeiteten Wasserbauerinnen und -bauer, Ökologinnen und Ökologen sowie Vertreterinnen und Vertreter von Behörden von Bund und Kantonen gemeinsam an Lösungen für die Behebung der vorhandenen Defizite in und an Fließgewässern. Im Rahmen des Projekts erforschten sie dynamische, vernetzte Lebensräume und entwickelten innovative Konzepte in der Umsetzung flussbaulicher Massnahmen. Ausführliche Informationen finden sich unter www.rivermanagement.ch

Projekt

Das Projekt wurde vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziell unterstützt und von vier Projektleitern an folgenden Institutionen durchgeführt:

Armin Peter, Eawag, Fischökologie und Evolution, Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum, www.eawag.ch

Christoph Scheidegger, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Biodiversität und Naturschutzbiologie, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, www.wsl.ch
Anton Schleiss, EPF-Lausanne, Laboratoire de Constructions Hydrauliques LCH-EPFL, Station 18, 1015 Lausanne, www.lch.epfl.ch

Roland Fäh, ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW-ETHZ, Gloriastrasse 37/39, 8092 Zürich, www.vaw.ethz.ch

Koordination

Sonia Angelone, Manuela Di Giulio

Fachliche Begleitung

BAFU: Paul Dändliker, Manuel Epprecht, Werner Göggel, Susanne Haertel-Borer, Daniel Hefti, Jean-Pierre Jordan, Stephan Lussi, Olivier Overney, Markus Thommen
Kantone: Lorenz Jaun (UR), Vinzenz Maurer (BE), Sandro Peduzzi (TI), Markus Zumsteg (AG)

Projekt: Sonia Angelone, Tobias Buser, Manuela Di Giulio, Roland Fäh, Armin Peter, Christopher Robinson, Christoph Scheidegger, Anton Schleiss

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Redaktion

Manuela Di Giulio, Sonia Angelone

Sprachliche Bearbeitung

Jacqueline Dougoud

Zitierung

Rousselot, P., Vetsch, D., Fäh, R., 2012: Numerische Fließgewässer-Modellierung. In: Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. BAFU, Bern. Merkblatt 7.

Gestaltung und Illustrationen

anamorph.ch: Marcel Schneeberger (AD), Patrik Ferrarelli

PDF-Download

www.bafu.admin.ch/uw-1211-d

Diese Publikation ist auch in französischer und italienischer Sprache verfügbar. Die Originalsprache ist Deutsch.

© BAFU 2012



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU