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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 103 (2011)

Heft: 4

Artikel: Integrales Flussgebietsmanagement. Teil 2 = Gestion intégrale de l'espace fluvial

Autor: Vetsch, David / Rousselot, Patric / Fäh, Roland

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941826

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Integrales Flussgebietsmanagement/ Gestion intégrale de l'espace fluvial

«Teil 2»

Flussgebietsmodellierung mit der Simulationssoftware BASEMENT

David Vetsch, Patric Rousselot, Roland Fäh

1. Einleitung

Im Verlauf der letzten zweihundert Jahre wurden viele Schweizer Fliessgewässer kanalisiert um die angrenzenden Nutzungsflächen vor Hochwasser zu schützen. Die miteinhergehende Melioration führte zu einer Steigerung der Lebensqualität in den vormals durch regelmässige Überschwemmungen beeinträchtigten Regionen. Diese Massnahmen brachten jedoch auch Nachteile mit sich, welche erst im Laufe der Zeit erkannt wurden. Durch die Verengung des Fliessquerschnitts kam es aufgrund der erhöhten Strömungsbelastung zu einer verstärkten Erosion des Gerinnes, welcher mittels Schwellen entgegengewirkt werden musste. Aufgrund unterschiedlicher Sedimentaufkommen musste wiederum vielerorts Geschiebe zurückgehalten oder entnommen werden, um eine Anhebung der Flusssohle zu vermeiden und den für die Hochwassersicherheit entscheidenden Fliessquerschnitt zu gewährleisten. In manchen Flüssen kam es aufgrund des stark reduzierten oder ausbleibenden Sedimenttransports zur Bildung eines Gerinnes mit geringer morphologischer Vielfalt. Des Weiteren führten die Kanalisierung und der Bau von Schwellen zu einer Reduktion der Längs- und Quervernetzung der Lebensräume, was sich beispielsweise in der Fischdurchgängigkeit oder in der Interaktion des Gewässers mit den Flussauen auswirkt.

Seit ungefähr zwei Jahrzehnten zeichnet sich ein neuer flussbaulicher Trend ab, welcher den angesprochenen Defiziten entgegenwirken soll. Einzelne Flussabschnitte werden revitalisiert und ökologisch aufgewertet. Eine gängige Massnahme um die morphologische Vielfalt und die Habitatsvielfalt in einem Gewässer zu erhöhen sind Flussaufweitungen. Der Bau von Flussaufweitungen führt zu einer lokalen Anhebung der Gerinnesohle, was je nach Geschiebeaufkommen einer Stabilisierung des Gerinnes gleich kommt. Jedoch stellen derartige Eingriffe in ein Fliessgewässer auch neue Anforderungen an den Hochwasserschutz. Aus hydraulischer Sicht kann in einer lokalen Verbreiterung und bei einer Anhebung der Flusssohle aufgrund der geringeren Abflusstiefen gegenüber der kanalisierten Strecke eine gleichbleibende Abflusskapazität gewährleistet werden. Dennoch werden Flussaufweitungen zum Teil als potentielle Gefährdung der Hochwassersicherheit angesehen. Entsprechend sind für die Planung solcher Massnahmen numerische Simulationsmodelle hilfreich, um die vielfältigen Folgen eines Eingriffs zu analysieren und die verschiedenen Nut-

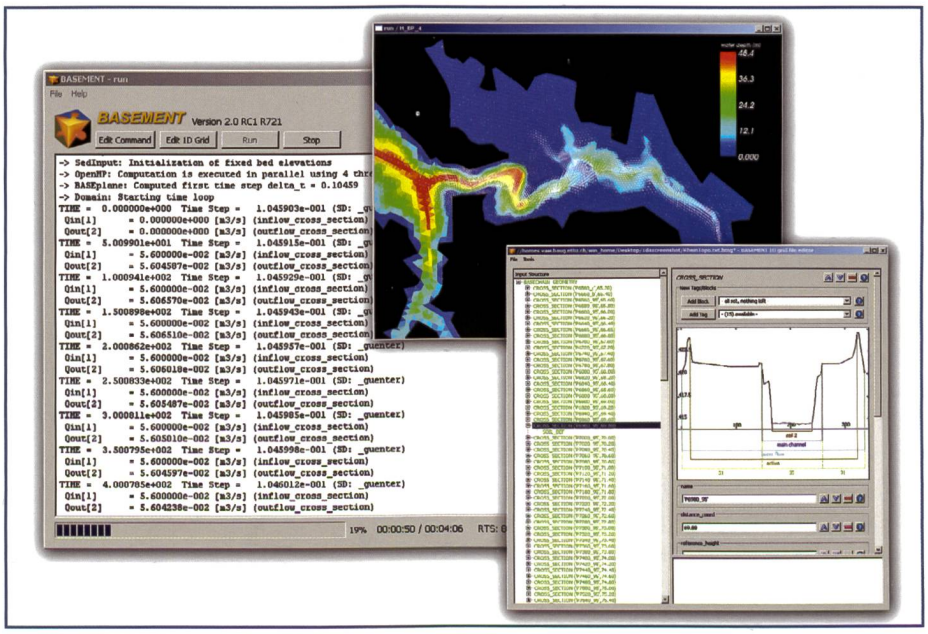

Bild 1. Grafische Benutzeroberfläche der Simulationssoftware BASEMENT.

zungsinteressen besser aufeinander abzustimmen. Des Weiteren ermöglicht die Anwendung von geeigneten numerischen Modellen die Simulation von Vorgängen unterschiedlicher Grössenordnung und somit die Untersuchung von lokalen bis zu überregionalen Problemstellungen.

Grundsätzlich eignet sich der Einsatz von Simulationsmodellen, die auf einer Software beruhen, wie sie in diesem Beitrag vorgestellt wird, für die Hochwasservorsorge, die Erstellung von Gefahrenkarten, die Optimierung der Regelung von Flüssen und Seen sowie zur Dimensionierung von Fliessgewässern. Des Weiteren können morphologische Entwicklungen untersucht und mittels geeigneter Indizes die Habitatsvielfalt eines Gewässers bestimmt werden. Im Vergleich zu physikalischen Experimenten bieten sich numerische Modelle für Parameter- und Variantenstudien als kostengünstige Alternative an.

Massgebende Eingriffe zur Verbesserung des Hochwasserschutzes und der ökologischen Situation bei bestehenden grossen Fliessgewässern, wie z.B. der Thur oder der Rhone, wurden in den letzten Jahren durchgeführt oder sind noch im Gange. Mit dem Ziel die entsprechenden Massnahmen sowohl vom flussbaulichen und ökologischen als auch vom sozialen Gesichtspunkt zu evaluieren, wurde im Jahr 2002 des transdisziplinäre Forschungsprojekt «Rhone-Thur» als wissenschaftliche Begleitung vom Bundesamt für Umwelt lanciert. Dieses wurde im Jahr 2007 in Form des Nachfolgeprojekts «Integrales Flussgebietsmanagement» bis Dato weitergeführt. In diesem Rahmen wurde die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich beauftragt, die Simulationssoftware *BASEMENT* («basic simulation environment for computation of environmental flow and natural hazard simulation») zu entwickeln. Das Programm inklusive umfangreicher Dokumentation steht interessierten Personen kostenlos zur Verfügung (www.basement.ethz.ch). Im vorliegenden Beitrag werden die grundsätzlichen Fähigkeiten des Programms *BASEMENT* kurz beschrieben und einige Anwendungsbeispiele aufgezeigt. Betreffend mathematischer und numerischer Details sei auf die Dokumentation (Faeh et al. [2011]) verwiesen. Eine Einführung zur grundsätzlichen Vorgehensweise bei der numerischen Fliessgewässermodellierung ist dem entsprechenden Merkblatt des BAFU («Numerische Fliessgewässermodellierung», in Vorbereitung) zu entnehmen.

2. Die Simulationssoftware *BASEMENT*

Das Computerprogramm *BASEMENT* ermöglicht die numerische Simulation der Strömung und des Sedimenttransports in einem Fliessgewässer. Die Simulationssoftware beinhaltet grundsätzlich zwei unterschiedliche Modelle; das eindimensionale Modell (als BASEchain bezeichnet) ermöglicht die Simulation von Fliessgewässern definiert anhand von Flussquerprofilen und das zweidimensionale Modell (als BASEplane bezeichnet) basiert auf einem dreidimensionalen digitalen Geländemodell. Details zu den beiden Modellen sind in den folgenden Abschnitten beschrieben. Zur Unterstützung der Konfiguration der Modelle, d.h. des Aufsetzens einer Simulation, besitzt das Programm eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) wie in *Bild 1* dargestellt. Das GUI beinhaltet einen «Command File Editor» mit dem die notwendigen Parameter für das numerische Modell definiert werden können. Sämtliche Optionen sind mit einer Beschreibung versehen und mit Beispielen erklärt. Eingabefehler werden sofort erkannt und entsprechend gekennzeichnet. Des Weiteren besitzt das GUI einen «1D-Grid Editor» für die Gittererstellung eindimensionaler Modelle, der eine grafische Darstellung der Querprofile samt ihren Eigenschaften ermöglicht. Zur Laufzeit der Berechnung können ausgewählte Resultate wie etwa Wassertiefen, Geschwindigkeiten oder Sohlendifferenzen visualisiert werden.

Die mit der Simulationssoftware modellierten Vorgänge sind grundsätzlich in zwei Arten zu unterteilen: einerseits die hydrodynamischen Ansätze zur Modellierung der Strömung, welche auch die Gerinnerauheit und die Turbulenz miteinschliessen, und andererseits die verschiedenen Ansätze für die Modellierung des Sedimenttransports. Die einzelnen Vorgänge, wie in *Bild 2* schematisch dargestellt, sind in den folgenden Abschnitten genauer erläutert.

2.1. Hydrodynamik

Zur Simulation der Wasserströmung werden hydrodynamische Modellgleichungen gelöst, bei welchen die Strömungsgeschwindigkeit eine über die Abflusstiefe gemittelte Variable ist. Deshalb werden die entsprechenden Modellgleichungen auch als tiefengemittelte Gleichungen bezeichnet. Diese Vereinfachung basiert auf der Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung und die Modellgleichungen sind daher nur dann gültig, wenn die vertikale Geschwindigkeitskomponente vernachlässigt werden kann. Bei Fliessgewässern mit einer vorwiegend ebenen, nicht zu stark geneigten Sohle und geringen kontinuierlichen Gefällswechseln sind diese Annahmen zulässig. Aufgrund der

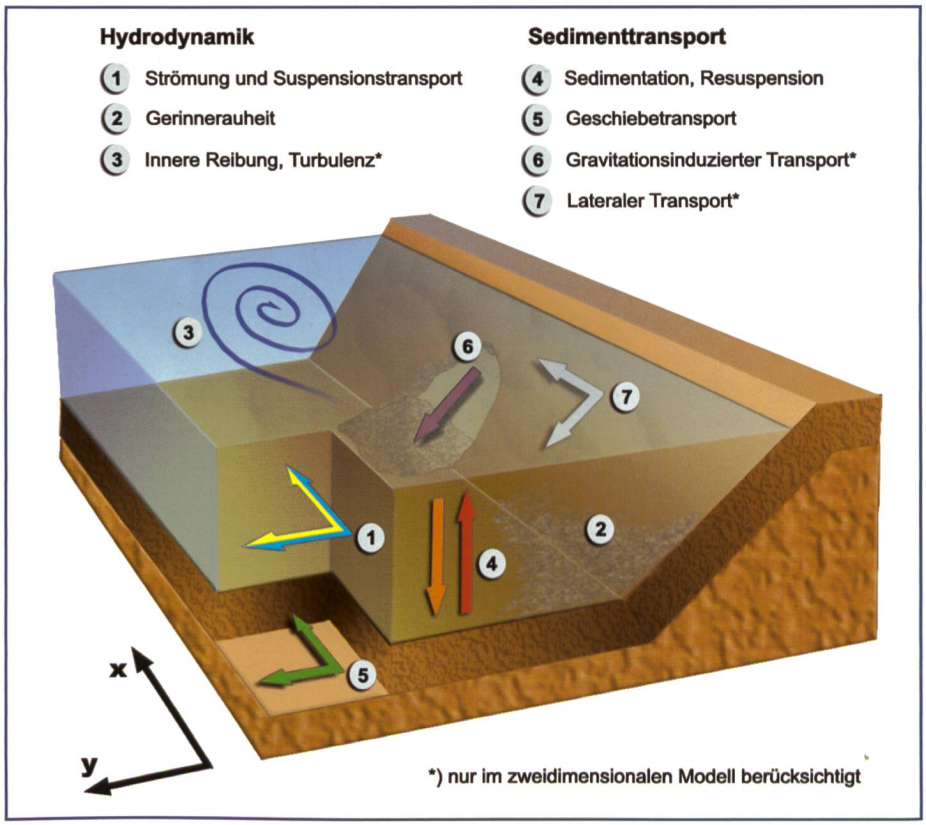

Bild 2. Vorgänge die mit der Simulationssoftware BASEMENT modelliert werden können.

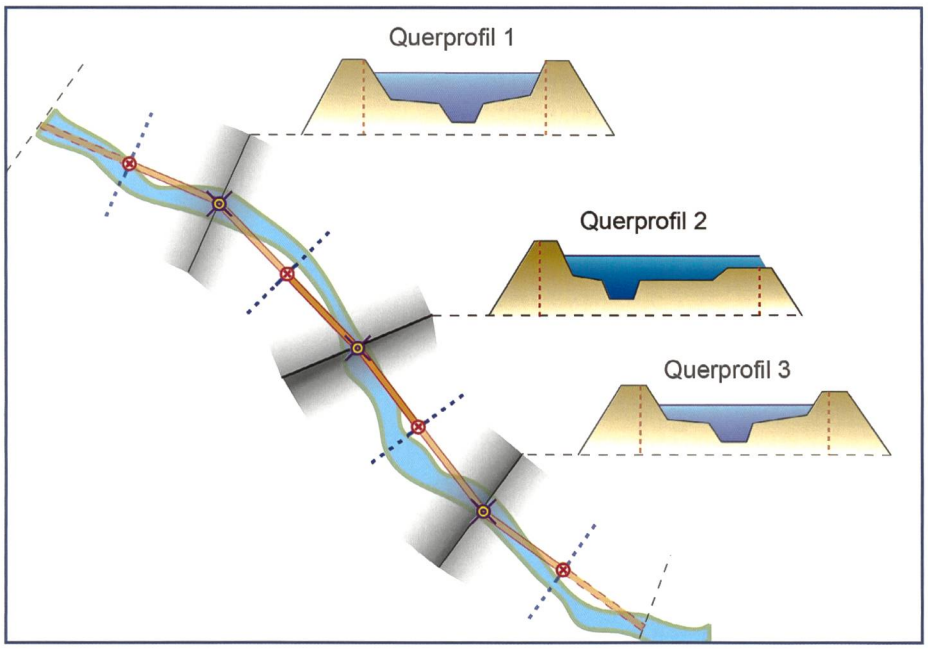

Bild 3. Modellierung eines Flusslaufs im eindimensionanen Modell.

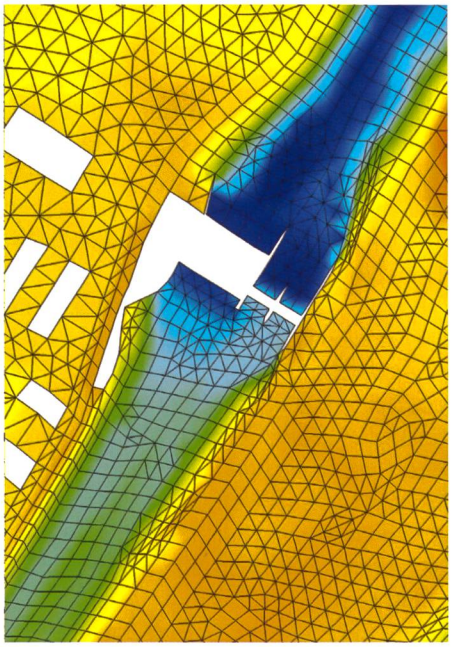

Bild 4. Ausschnitt aus einem zweidimensionalen Modell für ein Flusskraftwerk.

vereinfachten Gleichungen werden somit praxisorientierte Simulationen von grossräumigen Flussabschnitten oder über einen längeren Zeitraum möglich. Die Wahl des numerischen Verfahrens, welches zur Lösung der Gleichungen verwendet wird, ist entscheidend für die Genauigkeit und Stabilität des Modells. In *BASEMENT* wird dazu eine Finite-Volumen-Methode in Kombination mit einem als Riemann-Löser bezeichneten Verfahren verwendet, welches auch für stark instationäre Abflussvorgänge, wie z.B. Fliesswechsel oder die Ausbreitung einer Dammbruchwelle, stabil bleibt und akkurate Resultate liefert.

Zur Berücksichtigung der Gerinnerauheit können verschiedene Reibungsgesetze verwendet werden, wobei der Reibungskoeffizient z.B. in Form des gebräuchlichen Strickler-Beiwerts angegeben werden kann. Die empirische Natur der Reibungsgesetze bedingt je nach Problemstellung eine Variation des Reibungsbeiwerts. Dies bedeutet, dass die Gerinnerauheit die massgebende Grösse zur Kalibrierung der hierin erwähnten hydrodynamischen Modelle ist.

2.2 1D-BASEchain

Beim eindimensionalen Ansatz wird das Fliessgewässer in Form von Fluss-Querprofilen idealisiert (Bild 3). Dabei hängen die Genauigkeit und die Stabilität des Modells hauptsächlich vom Abstand der Querprofile ab. Die entsprechenden Modellgleichungen basieren auf den Gleichungen von De Saint-Venant. Pro Querprofil wird die zeitliche Variation des Abflusses und der durchflossenen Fläche bestimmt, woraus über das Querprofil gemittelte Werte für die Fliessgeschwindigkeit und die Wasserspiegellage resultieren. Zudem können pro Querprofil laterale Zuflüsse oder eine seitliche Entlastung berücksichtigt werden.

Durch die starke Idealisierung eines realen Fliessgewässers auf wesentliche, die Abflusskapazität bestimmende Grössen, sind Simulationen mit einem relativ kleinen Berechnungsaufwand möglich. Daher eignet sich das 1D-Modell vor allem für langfristige oder räumlich ausgedehnte Simulationen, bei welchen der lokale Detailgehalt eine untergeordnete Rolle spielt.

2.3 2D -BASEplane

Für Fragestellungen, bei welchen detailliertere ebene Strömungsvorgänge von Interesse sind, wie etwa die Ausbreitung einer Flutwelle in einer Ebene oder die Vereinigung oder die Aufteilung von Abflüssen, ist die Anwendung des zweidimensionalen Modells sinnvoll. Zur Lösung der Strömungsgleichungen muss das Berechnungsgebiet, wie in *Bild 4* dargestellt, in einzelne dreieckige oder viereckige Rechenzellen unterteilt werden. Die benötigten topographischen Informationen werden in der Regel anhand eines dreidimensionalen digitalen Höhenmodells auf das Berechnungsgitter interpoliert. Ähnlich wie beim 1D-Modell ist die Qualität und Auflösung des Gitters entscheidend für die Güte der Resultate. Dies bedeutet insbesondere, dass ein optimales Berechnungsgitter sich an den Strömungsvorgängen zu orientieren hat. Das aus der Dreiecksvermaschung des Höhenmodells resultierende Gitter genügt dieser Anforderung normalerweise nicht.

Als Ergebnis erhält der Anwender Wasserspiegellagen und eine tiefengemittelte Fliessgeschwindigkeit für jedes Rechenelement in Abhängigkeit der Zeit. 2D-Modelle eignen sich beispielsweise für die Berechnung von Ausuferungen ausserhalb des eigentlichen Fliessgewässers, zur Gefahrenkartierung oder für die Dimensionierung von Rückhalteräumen und Flussaufweitungen.

2.4 Sedimenttransport

Ergänzend zur Berechnung der Wasserströmung können Module zur Simulation von Sedimenttransport angewendet werden, um zeitliche Veränderungen der Lage der Flusssohle zu berechnen. Der Sedimenttransport wird unterteilt in Geschiebe- resp. Suspensionstransport sowie gravitationsinduzierter Transport. Der Geschiebetransport beschreibt die Bewegung von Sedimenten an der Oberfläche der Flusssohle aufgrund der vorhandenen Strömungsbelastung, wofür verschiedene empirische Formeln zur Verfügung stehen, wie etwa der bekannte Ansatz von Meyer-Peter und Müller. Der Suspensionstransport findet hingegen im Wasserkörper statt und wird direkt durch die Wasserströmung bestimmt. Entsprechend wird dazu eine Advektion-Diffusions-Gleichung gelöst. Damit kann der Transport von suspendiertem Sohlenmaterial oder auch die Ausbreitung von gelösten Stoffen simuliert werden. Zur

Beschreibung des Austausches des suspendierten Materials zwischen der Sohle und dem Wasserkörper stehen ebenfalls verschiedene empirische Ansätze zur Auswahl. Die granulare Zusammensetzung der transportierten Sedimente kann mittels beliebig vieler Kornklassen berücksichtigt werden, wobei pro Kornklasse jeweils eine Transportgleichung gelöst wird.

Zusätzlich zum Geschiebe- und Suspensionstransport, bei denen die Wasserströmung die treibende Kraft ist, kann das Sohlenmaterial auch durch rein gravitationsinduzierte Vorgänge, wie etwa eine Böschungsrutschung, verlagert werden. Diese Prozesse werden vereinfacht mit einem geometrischen Modell in Abhängigkeit des kritischen Böschungswinkels abgebildet.

2.5 Anfangs- und Randbedinungen

Bei einem numerischen Modell beschreiben die Anfangsbedingungen den Zustand des gesamten Modells zu Beginn der Simulation und die Randbedingungen (stationär oder zeitlich veränderlich) die Grössen an dessen Berandung. Die wohl wichtigste Anfangsbedingung für die hier aufgezeigten numerischen Modelle ist die Topographie. Üblicherweise liegen die topographischen Informationen für ein Fliessgewässer in Form von Gerinnequerprofilen vor. Vielfach werden die Profile mit beachtlichem Abstand aufgenommen und haben dementsprechend für die Zwischenräume einen vagen Informationsgehalt. Mit Hilfe von Luftbildern sowie Kenntnis der Situation vor Ort kann aus einer meist dünnen Datenlage das Optimum gewonnen werden. Insbesondere bei 2D-Modellen werden die Querprofildaten entlang des Fliesswegs interpoliert um ein verdichtetes Höhenmodell zu erhalten. Für das Umland hingegen existieren üblicherweise Höheninformationen in guter räumlicher Auflösung (z.B. Daten basierend auf Laserabtastung). Bei der Umwandlung der topographischen Rohdaten in ein zweckmässiges Berechnungsgitter ist auf die Definition von Bruchkanten besonderes Augenmerk zu legen. Nebst der Topographie gibt es weitere Anfangsbedingungen, wie etwa die Gerinnerauheit, anfängliche Wasserspiegellagen oder die Zusammensetzung der Gerinnesohle.

Die Randbedingungen für die Strömungsberechnung können auf verschiedene Art und Weise definiert werden. Als Zuflussrandbedingung können z.B. repräsentative Abflussganglinien von Messstationen des BAFU oder Resultate eines hydrologischen Modells verwendet werden. Dabei wird am Zuflussrand von Normalabflussbedingungen ausgegangen um lokale Instabilitäten zu vermeiden. Für die Randbedingung am Abflussrand stehen verschiedene Ansätze wie etwa Wasserstands-Abfluss-Beziehungen oder hydraulische Strukturen wie Wehre oder Schützen zur Verfügung. Der Einsatz dieser Strukturen innerhalb des Rechengebiets ist ebenfalls möglich, wobei diese dann als «innere Randbedingungen» bezeichnet werden.

Im Vergleich zu hydrologischen Informationen ist die Datengrundlage für Simulationen des Sedimenttransports meistens spärlich. Zur Bestimmung der Zuflussrandbedingung kann, sofern vorhanden, auf Geschiebehaushaltsstudien zurückgegriffen werden oder es muss anhand von Abschätzungen über den totalen jährlichen Sedimenteintrag eine Geschiebefunktion in Abhängigkeit des hydraulischen Abflusshydrographen konstruiert werden. Diese Funktion hängt massgeblich von den verwendeten Ansätzen für den Sedimenttransport ab und basiert oft auf der Annahme, dass die ganze Transportkapazität ausgeschöpft wird.

3. Erweiterungen und Spezialitäten

3.1. Effizienzsteigerung

Anwendungen von numerischen Modellen in der Ingenieurpraxis sind üblicherweise mit Terminvorgaben verbunden und erfordern diesbezüglich eine überschaubare Berechnungszeit. Dies lässt sich einerseits durch ein wohlgewähltes Berechnungsgitter erzielen, bei dem kleine Gitterzellen nicht an der Stelle tendenziell grosser Geschwindigkeiten zu liegen kommen. Andererseits gibt es softwaretechnische Ansätze wie die bei BASEMENT implementierte Parallelisierung der Berechnungsverfahren. Dieser Ansatz ist vor allem seit der Ausstattung handelsüblicher Computer mit Mehrkernprozessoren zweckmässig, wobei der Benutzer die Anzahl der eingesetzten Rechenkerne selber wählen kann. Jedoch ist die Anwendung des parallelisierten Modells kein Allerheilmittel gegen lange Rechenzeiten, da andere Faktoren wie die vorangehend erwähnte Qualität des Berechnungsgitters oder die Auslastung der einzelnen Rechenkerne ebenfalls eine Rolle spielen.

Bezüglich Simulationen mit Sedimenttransport gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Effizienz der Berechnung zu steigern. Zu diesen zählen vorbereitende Massnahmen wie die Reduktion des Simulationszeitraums auf transportwirksame Phasen oder die Verwendung von nur einer repräsentativen Korngrösse. Des Weiteren bietet *BASEMENT* einen numerischen Ansatz an, der als quasi-stationärer Berechnungszyklus bezeichnet wird. Dabei wird für geeignete Situationen davon ausgegangen, dass Veränderungen der Gerinnesohle eher langsam erfolgen und deren Einfluss auf die Wasserströmung für einen gegebenen Zeitabschnitt vernachlässigbar ist. Die erwähnten Möglichkeiten sind in den meisten Fällen ein sehr effektives Mittel um die Berechnungszeit zu reduzieren. Zu deren erfolgreichen Anwendung ist jedoch eine gewisse Erfahrung bezüglich der Modellierung mit Sedimenttransport unabdingbar.

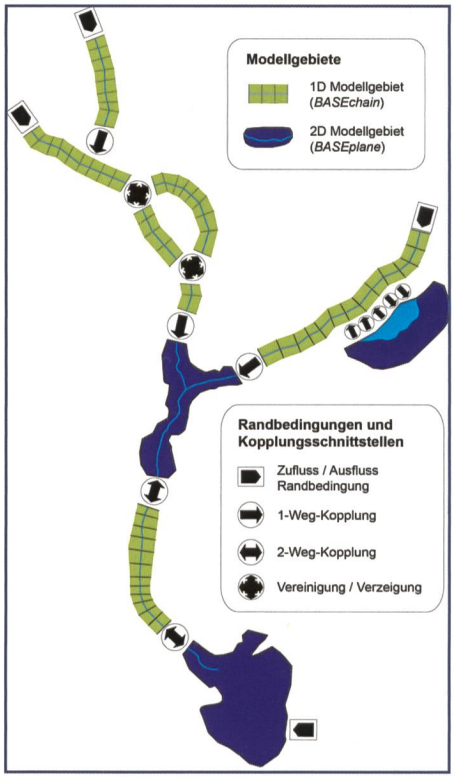

Bild 5. Möglichkeiten zur Kopplung des 1D- und 2D-Modells von BASEMENT.

3.2. Kopplung der Modelle

Für grossräumige Flussgebiete mit unterschiedlichen Fragestellungen mag es sinnvoll sein, das Berechnungsgebiet in einzelne Bereiche zu unterteilen, um eine effiziente Simulation zu ermöglichen. Konkret bedeutet dies, dass gewisse Flussabschnitte vereinfacht als 1D-Modell betrieben werden können und in Bereichen wo ein grösserer Detailgrad gefordert ist oder horizontal zweidimensionale Strömungsverhältnisse eine Rolle spielen ein 2D-Modell eingesetzt werden kann. Dazu bietet *BASEMENT* die Möglichkeit, die beiden Simulationsansätze auf verschiedene Weise miteinander zu koppeln (siehe

Bild 5). So ist es beispielsweise möglich, die Ausbreitung einer Hochwasserwelle in einem Flussschlauch in einer Dimension zu berechnen und etwaige Ausuferungen mit einer gekoppelten 2D-Region zu simulieren. Dabei können auch allfällige Rückstau- oder Rückflusseffekte berücksichtigt werden.

3.3. Regelung

Der Betrieb von Stauhaltungen in Flüssen oder die Abflussregulierung von Seen unterliegen häufig einem vorgegebenen Reglement. Zur Berücksichtigung solcher Verhältnisse bietet die Software den Einsatz von parametrisierten Reglern, für welche zweckmässige Sollgrössen wie etwa Abfluss oder Wasserspiegel und Stellgrössen von Abflussorganen definiert werden können. Dadurch lassen sich z.B. Wehre und Schützen gemäss den vorgegebenen Zielkriterien automatisch regeln. Ebenso kann mittels der Regelung der unbestimmte Abfluss eines Zubringers abgeschätzt werden.

3.4. Turbulenzmodell

Bei den vorliegenden Modellen sind einerseits turbulente Effekte aufgrund der Beschaffenheit der Gerinnesohle pauschal in den entsprechenden Ansätzen für die Gerinnerauheit enthalten. Andererseits können bei horizontal zweidimensionalen Strömungen Situationen auftreten, bei denen der Einfluss der Turbulenz massgebend sein kann, wie z.B. bei Nischenströmungen oder bei Einmündungen in einen flachen See. Zur numerischen Simulation solcher Vorgänge mit Berücksichtigung der Turbulenz müssen die Gleichungen des tiefengemittelten 2D-Modells erweitert werden. Als einfacher Ansatz bietet sich dazu die Verwendung eines Wirbelviskositätsmodells, wie in *BASEMENT* implementiert, an. Dabei kann eine turbulente Viskosität vorgegeben werden, welche in Kombination mit der Veränderung des Geschwindigkeitsgradienten einen zusätzlichen Strömungswiderstand bewirkt, häufig auch als «innere Reibung» bezeichnet.

4. Genauigkeit und Aufwand

Die Genauigkeit numerischer Resultate hängt massgeblich vom verwendeten Verfahren und dessen vereinfachenden Annahmen sowie von der Qualität der Daten für die Topographie und der Randbedingungen ab. Bei der Anwendung numerischer Verfahren gilt im Allgemeinen, dass sich der numerische Fehler bei höheren Gitterauflösungen verkleinert. Dieses Verhalten wird als Konvergenz bezeichnet. Bei praktischen Anwendungen ist die Gitterauflösung allerdings beschränkt durch die daraus resultierende Rechenzeit. Ein numerisches Resultat ist daher immer ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berechnungsaufwand.

Generell sollte der Aufwand für numerische Simulationen nicht unterschätzt werden. Ein lauffähiges Modell kann bereits mit geringem Aufwand erstellt werden. Für qualitativ hochstehende und quantitativ belastbare Resultate ist allerdings eine vertiefte Auseinandersetzung mit der Problemstellung und deren Umsetzung unabdingbar. Bereits die Gittererstellung kann entscheidend sein für die Stabilität der Simulation, den zeitlichen Rechenaufwand aber auch für die Güte der Resultate. Um Probleme im späteren Verlauf der Simulationen zu vermeiden, ist ein zeitlicher Mehraufwand für die Gittererstellung in den meisten Fällen lohnenswert. Für 2D-Modelle ist bei der Gittererstellung ein besonderes Augenmerk auf die vorhandenen Bruchkanten zu legen. Nach der Interpolation der Höheninformation auf das Rechengitter sollten wichtige Bruchkanten nochmals kontrolliert und bei Bedarf angepasst werden. Dadurch können auftretende Schwachstellen, wie z.B. ein intakter Hochwasserdamm dessen Kronenverlauf aufgrund von Interpolationsfehlern nicht durchgehend modelliert wird, im Vornherein beseitigt werden. Ein anderer Schwachpunkt eines Modells liegt häufig auch in den Randbedingungen. Eine ungünstige Definition der Randbedingungen oder deren Vorgabe an einer ungeeigneten Stelle kann zu fluktuierendem Verhalten der Randbedingungen führen. Zum Beispiel ist es ratsam zu überprüfen, ob der definierte Zuflussquerschnitt eine genügende Kapazität bezüglich des maximal vorgesehenen Zuflusses aufweist und ob das lokale Normalabflussgefälle passend gewählt ist. Des Weiteren ist es üblich, die Randbedingungen möglichst weit weg vom eigentlich interessierenden Gebiet anzuordnen um eventuelle Randeffekte zu minimieren.

Für eine konkrete praxisbezogene Problemstellung sollte der Anwender die zugrundeliegenden Modellannahmen beachten. Für die ein- und zweidimensionalen hydraulischen Modelle wird eine hydrostatische Druckverteilung angenommen. Zudem gelten die Gleichungen strenggenommen nur für moderate Sohlneigungen und kleine Gefällsänderungen. Auch Geschiebetransportformeln gelten meistens nur für einen eingeschränkten Bereich betreffend des Korndurchmessers oder dem Gefälle der Sohle. Deshalb wird ein numerisches Modell üblicherweise kalibriert, um allfällige Unzulänglichkeiten über das gesamte Modellgebiet zu minimieren und ein konsistentes Modell zu erhalten. Bei der Kalibrierung werden die massgebenden Modellparameter wie etwa die Gerinnerauheit solange variiert, bis das Simulationsresultat einem gemessenen Referenzzustand bestmöglich entspricht. Dennoch werden in vielen praktischen Fällen die oben erwähnten Grundannahmen lokal im Modellgebiet verletzt, woraus Abweichungen der Berechnungsresultate zu gemessenen Werten resultieren. Letztendlich muss der Modellierer entscheiden, ob die gewählten Parameter und die

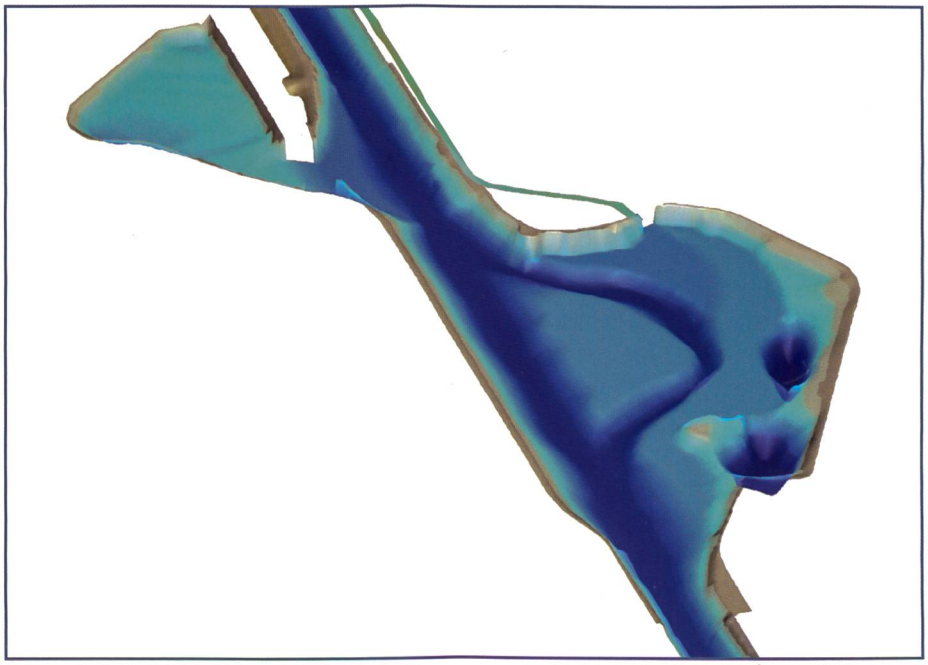

Bild 6. Simulierte Wassertiefen in einer Flussaufweitung.

Kalibrierung des Modells zweckmässig für die Fragestellung sind. Zur Unterstützung eines solchen Entscheids ist, wenn immer möglich, eine Validierung anhand eines zum Kalibrierungslastfall deutlich unterschiedlichen Lastfalls durchzuführen.

Berechnungen mit Sedimenttransport benötigen vielfach einen erheblichen Kalibrierungsaufwand. Im Vergleich zur reinen Hydraulik existiert eine ungleich grössere Anzahl an Parametern, welche zur Kalibrierung verändert werden können. Zusätzlich beruhen die Randbedingungen bezüglich des zugeführten Sedimentvolumens meistens auf groben Abschätzungen und haben gleichzeitig einen grossen Einfluss auf die Resultate. Vielfach können Modelle mit Sedimenttransport nicht ausreichend kalibriert und validiert werden, weil keine topographischen Informationen zu verschiedenen Zeitpunkten existieren.

All diesen Unsicherheiten ist Rechnung zu tragen, indem die Berechnungsergebnisse kritisch begutachtet und auf ihre Plausibilität geprüft werden.

5. Anwendungen

Im Folgenden werden typische Problemstellungen anhand von konkreten Anwendungen aus der Praxis vorgestellt.

5.1. Hydraulische Wirkungsweise einer Flussaufweitung (2D)

An einem kanalisierten Fliessgewässer wird eine Flussaufweitung geplant, um den Hochwasserschutz zu verbessern und gleichzeitig die ökologische Vielfalt zu fördern. Ein regulierbares Wehr in der Flussaufweitung dient als Hochwasserentlastung für extreme Ereignisse.

Mit einer rein hydraulischen 2D-Simulation wurde die Wirkungsweise der Flussaufweitung bestimmt (siehe *Bild 6*). Zu diesem Zweck wurden diverse Lastfälle simuliert. Von Interesse waren insbesondere die Strömungsrichtungen sowie die maximalen Fliessgeschwindigkeiten und Wasserstände während den definierten Hochwasserereignissen. Diese Ergebnisse aus den numerischen Simulationen wurden als Randbedingung für ein physikalisches Modell der geplanten Hochwasserentlastung innerhalb der Flussaufweitung verwendet.

5.2. Automatische Regelung am Beispiel Mittellandseen (1D)

Mit einem Testfall wurden die Fähigkeiten der Software bezüglich Regelung von hydraulischen Strukturen in einem grossräumigen Flussgebiet eruiert. Das numerische Modell beinhaltet die drei Jurarandseen mit ihren Verbindungskanälen sowie Teile der Aare und der Emme. Für die Modellierung wurde das gesamte Gebiet in einzelne 1D-Modelle unterteilt, welche untereinander gekoppelt sind und insgesamt über 800 Querprofile enthalten. Die Grenzen der einzelnen Modellgebiete wurden durch die fünf vorhandenen Flusskraftwerke bestimmt. Die Abflussregulierungs-Reglemente der einzelnen Wehre sind unterschiedlich.

Das Modell wurde anhand eines drei Monate langen Ereignisses von 2005 kalibriert und anschliessend anhand eines Ereignisses aus dem Jahr 2007 erfolgreich validiert. Danach wurden mit dem validierten Modell verschiedene Szenarien bezüglich der Staustufen sowie der Seeregulierung berechnet. Die Simulationen auf einem handelsüblichen Computer waren um mehrere tausend Faktoren schneller als die Ereignisse in Realität. Somit konnte gezeigt werden, dass die Software BASEMENT für grossräumige Simulationen mit regulierten Strukturen geeignet ist.

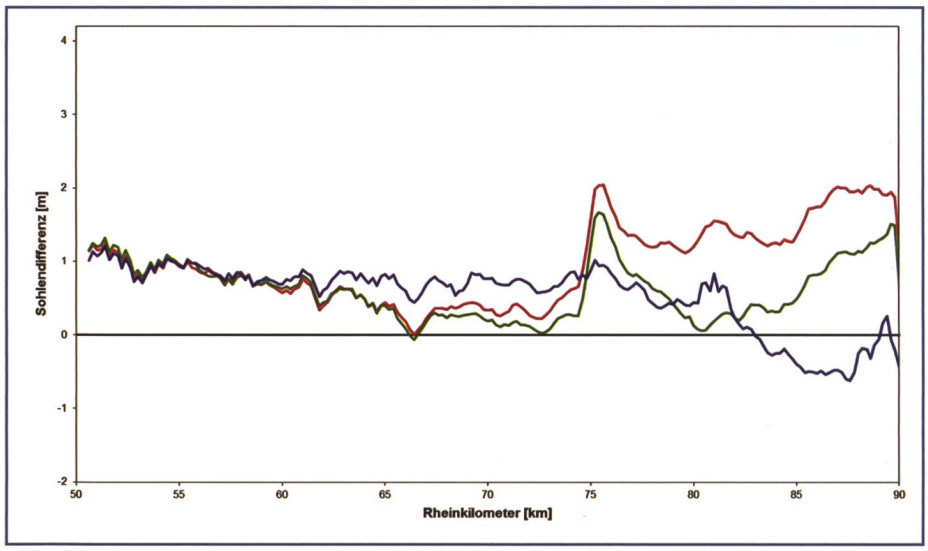

Bild 7. Simulierte Sohlendifferenzen des Alpenrheins in 1D von verschiedenen Massnahmen nach einer Simulationszeit von 50 Jahren gegenüber der Ausgangslage im Jahr 2005 (Null-Linie).

5.3. Einfluss von flussbaulichen Eingriffen auf die Sohlenentwicklung am Alpenrhein (1D)

Am Alpenrhein zwischen der Illmündung und dem Bodensee soll der Schutz vor Hochwasserereignissen verbessert und gleichzeitig den Anliegen der Bereiche Grundwassernutzung, Ökologie, Wasserkraft und Naherholung besser Rechnung getragen werden. Regelmässige Vermessungen der Sohle des Alpenrheins zeigen, dass die Sohle in den letzten 40 Jahren insgesamt leicht aufgeschottert wurde. Bauliche Massnahmen werden die langfristige Entwicklung der Sohle weiter verändern. Um diese Veränderungen für die nächsten 50 Jahre zu quantifizieren, wurden in einer ersten Planungsphase verschiedene Massnahmenvarianten simuliert. Aufgrund des 50 km umfassenden Modellgebiets und der langen Zeitdauer wurden die Simulationen in einer Dimension durchgeführt.

Für den Geschiebetransport wurde ein Mehrkornverfahren mit acht Kornfraktionen verwendet. Das Modell wurde aufgrund einer zehnjährigen Periode kalibriert und anschliessend anhand eines anderen 20-jährigen Zeitraums validiert. Die unterschiedlichen Verhältnisse im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum konnten die Güte des numerischen Modells belegen. Mit dem validierten Modell wurde dann die Sohlenentwicklung von sieben verschiedenen Massnahmenvarianten für die nächsten 50 Jahre simuliert und im Hinblick auf das zu erreichende Hochwasserschutzziel evaluiert (siehe *Bild 7*).

Die Prognoserechnungen zeigten, dass grundsätzlich eine Tendenz zur Auflandung bestehen bleibt. Die Sohlenentwicklung hängt primär von der Menge des eingetragenen Geschiebes ab. Wenn die Unsicherheiten der eingetragenen Geschiebemengen eingegrenzt werden, liefert das numerische Modell belastbare Resultate.

5.4. Morphologische Entwicklung einer Flussmündung in einen See am Beispiel der Rheinvorstreckung

Der Alpenrhein mündet in Form eines künstlichen Gerinnes – die sogenannte Rheinvorstreckung – in den Bodensee. Dabei werden grosse Mengen an feinkör-

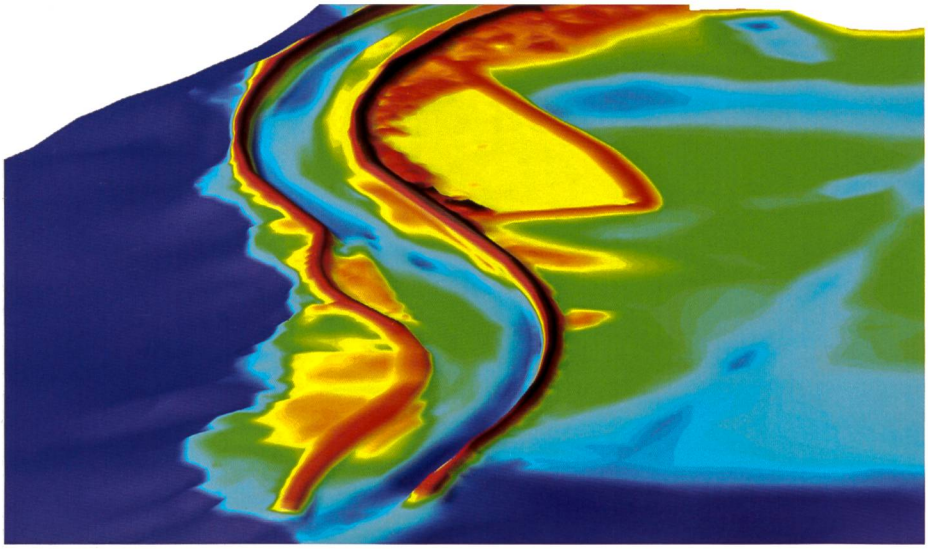

Bild 8. Sohlentopographie im Bereich der Rheinvorstreckung in den Bodensee.

nigem Sediment in die Vorstreckung und den Bodensee eingetragen. Um langfristige Prognosen über die Sohlenentwicklung des Vorstreckungsgerinnes zu ermöglichen, wurde ein numerisches Modell des Mündungsbereichs in zwei Dimensionen erstellt (siehe *Bild 8*). Die Topographie der Rheinvorstreckung ist zu zwei Zeitpunkten im Abstand von etwa 500 Tagen bekannt. Ausgehend vom früheren Zeitpunkt wurde das numerische Modell dahingehend kalibriert, dass die gemessenen Sohlendifferenzen durch die Simulation qualitativ und quantitativ reproduziert werden konnten.

Für die Sedimentumlagerungen wurde aufgrund der kleinen Korndurchmesser primär Suspensionstransport modelliert. Bei der Bestimmung der sedimentologischen Randbedingungen weist insbesondere die Bestimmung der Schwebstoffkonzentration in Abhängigkeit des Abflusses eine hohe Unsicherheit auf. Um das Modell für Langzeitprognosen verwenden zu können, muss noch eine Validierung über einen anderen Zeitraum erbracht werden.

Die Berechnung läuft auf einem handelsüblichen Computer durchschnittlich etwa 300 Mal schneller als in Realität. Das Modell ist somit in der Lage, Langzeitsimulationen über mehrere Jahre mit vertretbarem Aufwand zu simulieren.

5.5. Abschätzung der Habitatsvielfalt am Beispiel der Sense

Die Sense ist ein Fluss, welcher sich streckenweise noch in seinem natürlichen Zustand befindet. Für einen zwei Kilometer langen Abschnitt mit der Charakteristik eines verzweigten Gerinnes wurde ein Modell in zwei Dimensionen erstellt. Für die Kalibrierung des Modells standen umfangreiche Daten wie Fliessgeschwindigkeiten und Abflusstiefen zu verschiedenen Abflusszuständen zur Verfügung.

Mit dem kalibrierten Modell wurden die Auswirkungen von verschiedenen Geschiebetransportformeln (Ein- und Mehrkorn) auf die Morphologie und die Veränderungen der hydraulischen Habitatstypen untersucht. Dazu wurde eine Abflussganglinie über ein Jahr simuliert. Es konnte gezeigt werden, dass das Geschiebe im untersuchten Abschnitt nur umgelagert wird und sich die Habitatsvielfalt nicht verändert. Dies belegt, dass sich die Sense im Modellperimeter in einem Gleichgewichtszustand befindet. Die Indikatoren für die Habitatsvielfalt liefern allerdings nur für hohe Gitterauflösungen verwertbare Resultate.

6. Zukünftige Entwicklungen

Der vorliegende Beitrag beschreibt die grundlegenden Fähigkeiten und einige Spezialitäten des Simulationsmodells *BASEMENT*. Die aktuelle Version der Software ist auf der Webseite www.basement.ethz.ch abrufbar und beinhaltet eine Vielzahl an weiteren Details auf welche hier nicht weiter eingegangen wurde. Der heutige Stand des Programms ermöglicht dem Benutzer die numerische Simulation von Fliessgewässern mit Sedimenttransport zur Untersuchung praxisrelevanter sowie wissenschaftlicher Fragestellungen. Dennoch ist die Entwicklung der Software nicht als abgeschlossen zu betrachten. Einerseits besteht nach wie vor Potenzial zur Effizienzsteigerung der Modelle sowie für funktionale Erweiterungen, wie z.B. eine gebietsinterne Kopplung der Modelle zur Simulation von Durchlässen sowie Stollen mit Druckabfluss, die Erweiterung des Geschiebetransports für Situationen mit Nichtgleichgewichtstransport, die Berücksichtigung von Sekundärströmungseffekten oder die Implementierung eines effizienten dreidimensionalen Strömungsmodells. Andererseits generiert die zunehmende Anwendung des Programms neue Anforderungen, wie etwa eine bessere Benutzerfreundlichkeit, eine erweiterte Funktionalität der grafischen Benutzeroberfläche oder die Kombination der Simulationssoftware mit heute gängigen Geoinformationssystemen. Bei der Entwicklung der Software waren Qualität, Flexibilität und Stabilität, mit Hinblick auf eine praxisorientierte Anwendung, stets die Schwerpunkte. Dieser Fokus soll für die weitere Entwicklung von *BASEMENT* beibehalten werden.

BASEMENT

Das Programm BASEMENT und die dazugehörige Dokumentation (Faeh et al. 2011) sind kostenlos erhältlich unter www.basement.ethz.ch. Dort sind ebenfalls Eingabedateien für verschiedene Übungsbeispiele und Testfälle abrufbar, was den Einstieg in die numerische Modellierung erleichtern soll.

Verdankung

Die Entwicklung der Simulationssoftware *BASEMENT* wurde vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) unterstützt.

Literatur

Faeh, R., Mueller, R., Rouselot, P., Vetsch, D., Volz, C., Vonwiller, L., Veprek, R., Farshi, D. (2011). System Manuals of BASEMENT, Version 2.2. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich.

Anschrift der Verfasser

David Vetsch, Patric Rousselot, Roland Fäh
VAW, ETH Zürich
Gloriastrasse 37/39, CH-8092 Zürich
vetsch@vaw.baug.ethz.ch
rousselot@vaw.baug.ethz.ch
faeh@vaw.baug.ethz.ch