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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 100 (2008)

Heft: 2

Artikel: Sohlenentwicklung in einer Flussaufweitung beim Durchgang einer Hochwasserwelle : Vergleich zwischen Messung und numerischer Modellierung

Autor: Fäh, Roland / Müller, Renata / Rousselot, Patric

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939692

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: 16.07.2025

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

Sohlenentwicklung in einer Flussaufweitung beim Durchgang einer Hochwasserwelle – Vergleich zwischen Messung und numerischer Modellierung

Roland Fäh, Renata Müller, Patric Rousselot, David Vetsch

Zusammenfassung

In den letzten beiden Jahrhunderten sind ein Grossteil der schweizerischen Flüsse aus Hochwasserschutzgründen reguliert worden. Dabei wurden die Flussläufe verkürzt, begradigt und verengt, indem sie in ein prismatisches Gerinne gezwungen wurden. Das Gefälle und damit auch die Transportkapazität wurden dadurch erhöht, weshalb die Gerinne begannen sich einzutiefen. Als Gegenmassnahme wurden Sohlschwellen eingebaut. Durch die Hinterfüllung der Schwellen wurde das Sohlgefälle reduziert und das Sedimenttransport-Regime verändert. Negative Folge dieser Massnahme war, dass die Fische nicht mehr zu ihren Laichgründen aufsteigen konnten. Generell kann festgestellt werden, dass bei früheren Flusskorrektionen die technischen Aspekte des Hochwasserschutzes im Vergleich zu den ökologischen stärker gewichtet wurden.

Mit den neuen Richtlinien zur Gestaltung des Hochwasserschutzes an Fliessgewässern (z.B. Bundesamt für Wasser und Geologie 2001) hat sich dies geändert. Als wichtigstes Prinzip wird darin gefordert, dem Fluss mehr Raum zur Verfügung zu stellen. Erreicht wird dies, indem der Fluss lokal aufgeweitet wird. Durch die grössere Flussbreite in der Aufweitung wird die Transportkapazität reduziert, das Geschiebe lagert sich ab und man erzielt so eine zu den Schwellen analoge, sohlstabilisierende Wirkung. Die Morphologie des Flusses nähert sich wieder einem natürlichen Zustand an und beginnt – je nach Verhältnis von Länge zu Breite der Aufweitung – zu mäandrieren oder bildet ein verzweigtes Gerinne.

Die Renaturierungsmassnahmen dürfen die Hochwassersicherheit nicht beeinträchtigen. Um dies zu gewährleisten, werden Hochwassersituationen numerisch simuliert, wobei meist vorausgesetzt wird, dass sich die Flusssohle nicht verändert. Wie die alpinen Hochwasser der letzten Jahre gezeigt haben, kann dies zu einer falschen Einschätzung der Situation führen (Bezzola und Hegg, 2007). Im Rahmen des Rhone-Thur-Projekts wurde deshalb ein Softwaresystem entwickelt, mit dem Hochwassergefahren unter Berücksichtigung des Sedimenttransports und einer beweglichen Sohle beurteilt werden können. Die frei verfügbare Software heisst Basement, ist gut dokumentiert und kann von der Webpage www.basement.ethz.ch heruntergeladen werden.

Die Möglichkeiten und Grenzen von solchen numerischen Modellen werden am Beispiel der Thuraufweitung bei Altikon aufgezeigt. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Veränderung der Sohle, welche sich beim Durchlauf einer Hochwasserwelle ergibt.

Abstract

During the last two centuries, most of the rivers in Switzerland have been regulated to reduce flood risks. The rivers were straightened by cutting the meanders, canalized and narrowed. As a consequence, the specific bed load capacity increased and the river beds degraded. To stabilize the river beds sequence of sill were build. Thus, the slope of the river bed between the sills was reduced and the sediment retained. A negative consequence of this measures was that the sills prevented the fishes to swim upstream and thus to get to their spawn places. In general, it can be stated that in earlier days the design of river training works was guided by a technical point of view. The ecological aspects were poorly considered.

Nowadays, environmental aspects have become more important. In river engineering, this led to the idea to concede more space to the rivers. A particular restoration measure was, to replace the sills by a local widening of the river bed. Due to the increased width the bed load capacity in the widening is reduced and the sediment is locally accumulated and thus has an analogous function as the sills. Depending on the length and width of the widening, the morphology of the river bed develops towards a more natural state like meandering or even braiding.

Of course this restoration measures should not affect the flood protection. To ensure this, numerical models are applied to determine the watersurface elevations during a flood. In most cases, such simulations are based on a fixedbed approach. As the recent floods in the Alpine region of Switzerland revealed, this can lead to a wrong assessment of the risks. Therefore, in the framework of the Rhone-Thur project a software system was developed allowing for the simulation of flood events with consi-deration of sediment transport and corresponding changes of the riverbed. The software is called Basement and can be downloaded from www.basement.ethz.ch.

To investigate the possibilities and limitations of different numerical approaches, the corresponding models were applied to a widening of the Thur River which was carried out near Altikon. The focus will be on the alteration of the river bed as it takes place during a flood wave.

1. Einleitung

Im Laufe der letzten 15 Jahre wurden im Alpenbereich viele Flussaufweitungen realisiert (z.B. Zarn 1993, Hunzinger and Zarn 1997, Habersack et al. 2000, Schmautz 2004). Ziel dieser Massnahmen war, die während der letzten zwei Jahrhunderte korrigierten Flüsse zu revitalisieren. Bei den früheren Flusskorrekturen wurden die Gerinne begradigt und verengt. In der Folge begannen sich die aus dem Gleichgewicht gebrachten Flüsse einzutiefen. Die Hochwasserschutzdämme wurden unterspült und die Grundwasserspiegel im Umland der Flüsse abgesenkt. Um die Erosion zu stoppen, wurden Kaskaden von Schwellen eingebaut; mit negativen Folgen für Flora und Fauna. An Stelle der Schwellen werden heute Aufweitungen gebaut. Sie sollen die Flusssohle stabilisieren und gleichzeitig den Flussraum ökologisch aufwerten.

Die Querprofile der korrigierten Flüsse bestehen meist aus einem Hauptgerinne, das auf beiden Seiten von Vorländern eingefasst ist *(Bild 1)*.

Die Aufweitung wird entweder maschinell durch Ausbaggerung der Vorländer erstellt, oder man entfernt nur den Böschungsschutz des Hauptgerinnes und erlaubt dem Fluss, sich eigendynamisch durch Seitenerosion aufzuweiten.

Die Abflusstiefe ist im aufgeweiteten Bereich des Flusslaufs kleiner als oberhalb des Zulaufs. Durch die Verengung am unteren Ende der Aufweitung kann ein Rückstau entstehen, der die Strömung verlangsamt. Beide Prozesse verringern die Geschiebetransportkapazität im Bereich der Aufweitung, was zu Auflandungen der Flusssohle führt.

Beobachtungen in der Natur und Untersuchungen an physikalischen und numerischen Modellen haben jedoch gezeigt, dass sich die erwartete Auflandung in der Aufweitung nicht immer einstellt. Je nach Lage der Aufweitung innerhalb eines längeren Flussabschnittes bildet sich bei einem Geschiebedefizit an Stelle eines mäandrierenden oder gar verzweigten Gerinnes ein dominantes Einzelgerinne mit einer entsprechend tiefen Sohlenlage (Requena et al. 2005, Marti und Bezzola, 2004).

Während eines Hochwassers kann die Entwicklung der Flusssohle nicht beobachtet werden. Die Form des Gerinnes lässt sich nur bei Niedrigwasser vor und nach dem Hochwasserereignis festhalten. Um die morphologische Entwicklung des Gerinnes beim Durchgang einer Hochwasserwelle nachvollziehen zu können, ist man deshalb auf Simulationen angewiesen. Da Untersuchungen am physikalischen Modell meist zu aufwändig sind, werden oft numerische Modelleeingesetzt.

Die hier dokumentierte Untersuchung hat zum Ziel, Möglichkeiten und Grenzen von solchen Modellen aufzuzeigen. Die entsprechenden numerischen Simulationen umfassen:

- Die Beurteilung des Einflusses der beweglichen Sohle auf die Lage des Wasserspiegels
- Die Analyse der Sohlenentwicklung während des Durchgangs des Hochwassers
- Eine Beurteilung der Grenzen von ein- und zweidimensionalen Modellen.

Die Untersuchungen wurden am Beispiel der Aufweitung der Thur bei Altikon durchgeführt. Diese Aufweitung eignet sich, weil hier – im Rahmen des «Rhone-Thur»-Projektes – die Veränderung des Gerinnes durch ein intensives topographisches Monitoring aufgezeichnet wurde *(Bild 2)*.

Bild 1. Die Thur bei Altikon: Links nach der Korrektion des 19. Jahrhunderts, rechts nach der Aufweitung des Hauptgerinnes. Schon zwei Jahre nach der Revitalisierungsmassnahme hat sich die morphologische Vielfältigkeit deutlich verbessert.

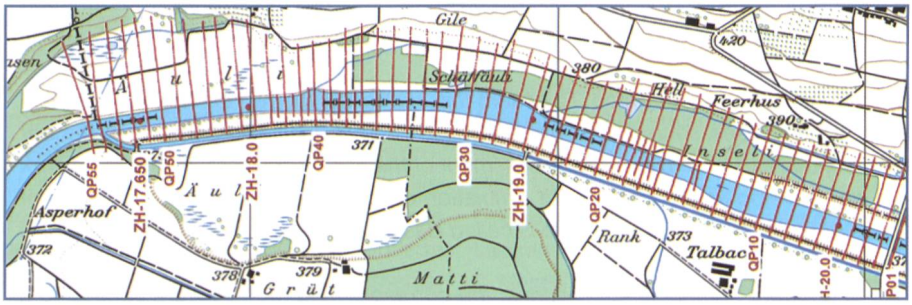

Bild 2. Topographisches Monitoring der Aufweitung bei Altikon. Die Entwicklung des Gerinnes wird mit Querprofilen mit grosser räumlicher (max. Abstand 50 m) und zeitlicher Auflösung aufgenommen.

2. Reaktion der Aufweitung bei Altikon auf den Durchgang der Welle des Hochwassers von 2005

Das Mittelgerinne der Thur wurde unterhalb der Schrägseilbrücke Altikon auf einer Länge von etwa 1,5 km wechselseitig aufgebrochen (siehe Schema *Bild 3b*). Die Aufweitung ist nicht durchgängig. Sie wird durch eine Einschnürung unterbrochen. Der linke Hochwasserschutzdamm ist durch Buhnen geschützt. Auf der rechten Seite befindet sich ein Auenwald von nationaler Bedeutung. Das Flussbett der Thur wird sich hier um mehr als das Doppelte der ursprünglichen Breite auf ca. 100 m aufweiten können. Schon kurze Zeit nach der Realisierung der verschiedenen flussbaulichen Elemente zeigte sich, dass sich die angestrebte Vielfalt der Sohlenstruktur einstellt. An den Buhnenköpfen entstanden Kolke, durch Auflandungen bildeten sich Kiesbänke, und der Talweg begann zu mäandrieren, was bei Niedrigwasser entsprechende Querströmungen zur Folge hatte. Diese haben das mit Rauhbäumen und Faschinen geschützte Ufer seitens des Auenwalds teilweise zerstört. Die erwünschte Dynamik hat sich also eingestellt, wobei die Beobachtungen und auch die numerischen Simulationen zeigen, dass nur grössere Hochwasser das Flussbett massgeblich umgestalten können.

Bild 3a zeigt die gemessene Veränderung der mittleren Sohle zwischen November 2004 und September 2005. In dieser Zeit ereigneten sich zwei kleinere Hochwässer mit einem Q_{max} von ungefähr 400 m^3/s und das etwa 20-jährige Hochwasser im August mit einem Q_{max} = 930 m^3/s. Insgesamt wurden im Bereich des Hauptgerinnes der Aufweitung etwa

7400 m³ Material abgelagert, wobei die numerischen Simulationen zeigen, dass die beiden kleineren Hochwasser nur einen marginalen Beitrag zu den totalen Sohlveränderungen leisten.

In *Bild 4* ist die Differenz der Sohllagen zwischen der Messung vom September 2005 und November 2004 dargestellt. Dabei wurden nur die Veränderungen der Sohle im Bereich des Hauptgerinnes berücksichtigt, weil nicht alle Querprofile inklusive der Vorländer aufgenommen wurden und somit die Bildung der Differenz verfälscht worden wäre.

Im betrachteten Bereich wurde 7400 m³ Material abgelagert. Die Abweichung gegenüber der Ausgangssohle beträgt im Maximum etwa +/– 1,50 m. Im Querschnitt mit den grössten Sohldifferenzen (siehe *Bild 4*, QP_29) fällt auf, dass die Flusssohle – entgegen der Erwartung – auf der Kurveninnenseite erodiert und auf der Kurvenaussenseite Material abgelagert wird. An dieser Stelle zeigen sich auch die Grenzen einer eindimensionalen Betrachtung, die sich auf eine gemittelte Sohle abstützt. Obwohl hier die grössten Sohlveränderungen beobachtet werden, drückt sich dies in der mittleren Sohle nicht aus, weil sich die Erosionen und Auflandungen in Querrichtung kompensieren.

3. Das numerische Modell der Aufweitung bei Altikon

Das numerische Modell umfasst neben den zu lösenden Gleichungen die Anfangs- und Randbedingungen. Die Anfangsbedingungen bestehen aus der Topographie zum Zeitpunkt des Berechnungsbeginns und der zugehörigen hydraulischen Situation, d.h. dem Wasserstand und den Fliessgeschwindigkeiten in allen benetzten Rechenzellen.

Am Rand des Berechnungsgebiets müssen grundsätzlich für alle gesuchten Grössen Randbedingungen vorgegeben werden. Im vorliegenden Fall wird mit einer beweglichen Sohle gerechnet. Das heisst, dass am Rand neben den hydraulischen Grössen (Zufluss und Fliessgeschwindigkeit) auch die zugehörige Sohlenbewegung resp. die Geschiebezufuhr als Funktion der Zeit vorzugeben ist. Dabei sind vor allem die Vorgaben am Zuflussrand von entscheidender Bedeutung.

3.1 Hydraulische Randbedingungen

Die Qualität der numerischen Simulation soll anhand von Naturdaten überprüft werden. Dabei muss grundsätzlich der ganze Zeitraum zwischen den Messkampagnen (Nov. 2004 bis Sept. 2005), innerhalb welchem das Hochwasser August 2005 stattfand, simuliert werden. Um die Rechenzeit möglichst klein zu halten, werden nur jene Zeitabschnitte berechnet, in denen der Abfluss so gross ist ($Q > Q_0 = 30$ m³/s), dass auch wirklich Material transportiert wird. Damit lässt sich der zu betrachtende Zeitabschnitt von mehr als 11 Monaten auf etwa 14 Tage verkürzen. *Bild 6* zeigt den resultierenden Zuflusshydrographen, der aus den Stundenmitteln der Messstation Andelfingen abgeleitet wurde. Das Hochwasser vom August 2005 umfasst in dieser Zeitreihe den Abschnitt vom Tag 10 bis 13.

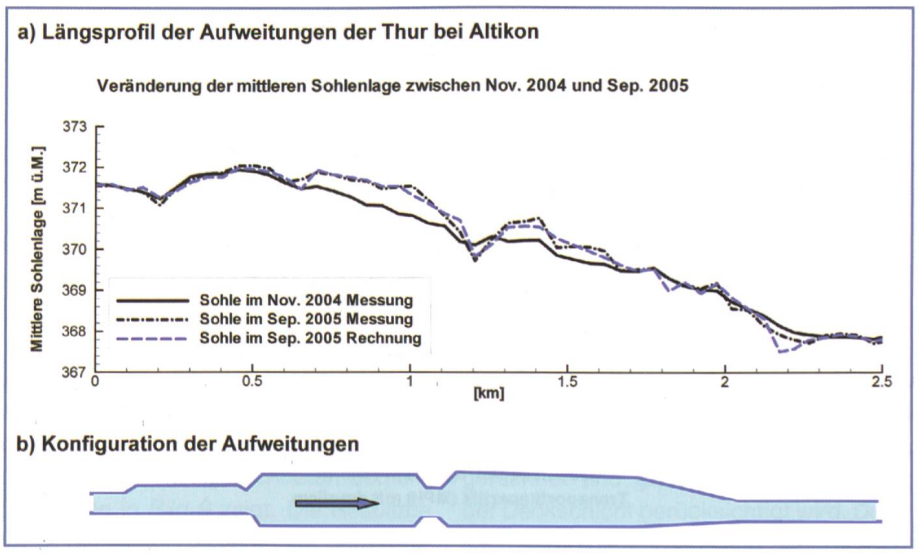

Bild 3. Veränderung der mittleren Sohle zwischen November 2004 und September 2005, a) Längsprofil der gemessenen und gerechneten mittleren Sohle, b) Schema der Konfiguration der Aufweitungen.

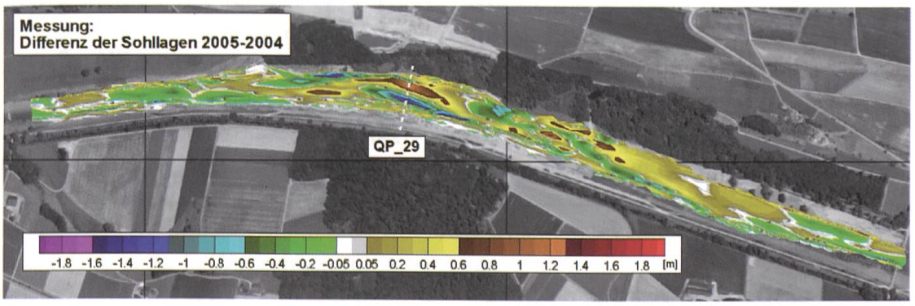

Bild 4. Differenz der Sohlelagen im Bereich des Hauptgerinnes zwischen September 2005 und November 2004.

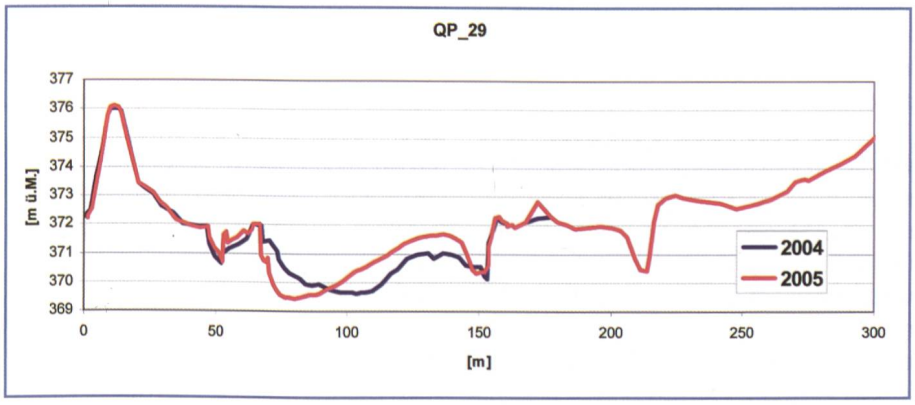

Bild 5. Veränderung der Sohle im Querprofil QP_29 zwischen Nov. 2004 und Sep. 2005.

3.2 Randbedingungen für den Feststofftransport

Bei Modellen mit beweglicher Sohle besteht normalerweise die grösste Ungewissheit bezüglich der Bestimmung der Randbedingungen. Dies gilt einerseits für die zeitliche Variation des Feststoffflusses und andererseits für die granulometrische Zusammensetzung, d.h. die Kornverteilung der Feststoffe. Zur Beschreibung des Feststofftransports wird oft zwischen dem Transport des Geschiebes (d.h. der groben Körner, die sich in Sohlennähe bewegen) und jenem der suspendierten Feinanteile unterschieden.

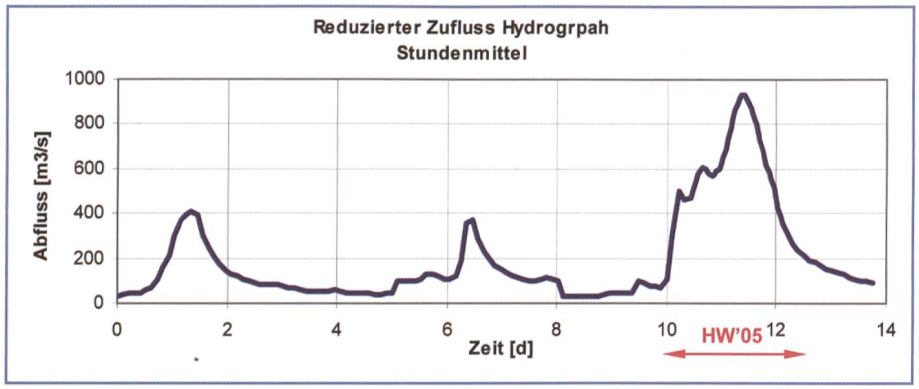

Bild 6. Reduzierter Zuflusshydrograph, der für Simulation massgeblich war.

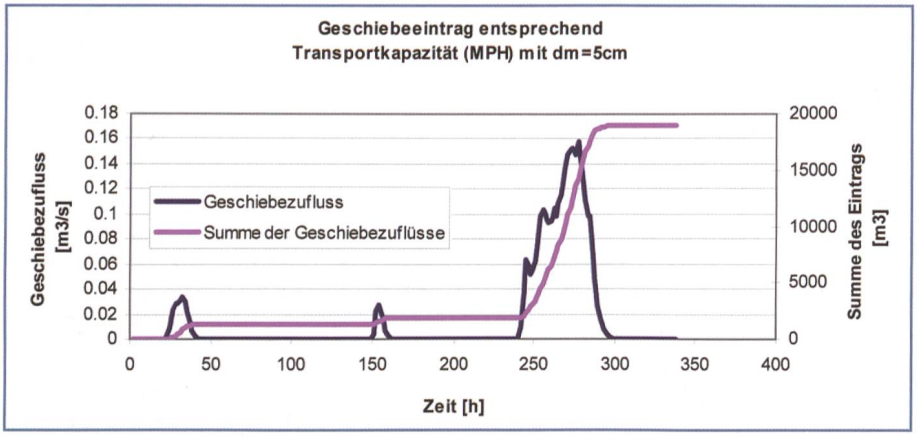

Bild 7. Geschiebezufluss als Funktion der Zeit.

Aufgrund der Datenlage wird für die Simulation nur das Geschiebe berücksichtigt: zum einen, weil im Hauptgerinne nur das Geschiebe eine bettbildende Wirkung erzielt, und zum anderen, weil sich die verwertbaren topographischen Aufnahmen auf dieses beschränken.

Zur Beschreibung des Geschiebes wird in alpinen Flüssen im Allgemeinen zwischen den charakteristischen Korngrössen der Deckschicht und des laufenden Geschiebes, das sich über der Deckschicht bewegt sowie des Unterschichtmaterials unterschieden. Das Material dieser drei Schichten wiederum besteht aus einem Gemisch von unterschiedlich grossen Körnern. Um Sortierprozesse und Deckschichtbildung modellieren zu können, muss die Kornverteilung durch eine gewisse Anzahl Kornklassen diskretisiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Sensitivität der Simulationsergebnisse bezüglich der Beschreibung der Kornverteilung untersucht. Aus Platzgründen kann hier aber nicht darauf eingegangen werden. In *Bild 7* wird deshalb nur der totale Geschiebefluss als Funktion der Zeit, wie er für alle Rechnungen als massgeblich definiert worden ist, angegeben.

Die zu verschiedenen Zeitpunkten am Zuflussrand vermessenen Querprofile haben sich in ihrer Geometrie kaum verändert. Daraus lässt sich ableiten, dass für die betrachtete Zeitperiode an dieser Stelle der Geschiebetrieb gerade etwa der Transportkapazität entsprochen hat. Die massgebliche Transportkapazität wurde basierend auf einem Korndurchmesser von $d_m = 5$ cm und der Meyer-Peter-Müller-Formel bestimmt. Der verwendete Korndurchmesser entspricht etwa dem mittleren Korndurchmesser des Sohlmaterials. Das Korn wurde so grob gewählt (der mittlere Korndurchmesser des laufenden Geschiebes beträgt $d_m = 2{,}5$ cm), damit das transportierte Volumen etwa der Menge entspricht, wie sie aufgrund der Geschiebehaushaltstudie für die Thur (Arge Fu Thur, 2005) erwartet werden kann.

Bild 7 zeigt, dass mit den gewählten Parametern über eine relativ lange Zeitdauer kein Geschiebe zufliesst. Innerhalb des Berechnungsgebietes, kann es aber – je nach lokaler Situation der hydraulischen Belastung – trotzdem zu Geschiebeumlagerungen kommen.

3.3 Software zur Lösung der Gleichungen

Um den räumlichen und zeitlichen Verlauf der hydraulischen Grössen und der Zusammensetzung der Feststoffe zu bestimmen, wird auf der Basis der Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls ein Gleichungssystem aufgestellt. Zur Lösung der Gleichungen wurden verschiedene Computerprogramme (Floris, 2dMb, Basement) eingesetzt, die alle an der VAW entwickelt worden sind. Auf die im Rahmen des Rhone-Thur-Projekts neu entwickelte Software Basement soll hier kurz eingegangen werden. Für die Details sei auf die Webseite www.basement.ethz.ch verwiesen, von der die Software inklusive der umfassenden Dokumentation umsonst heruntergeladen werden kann.

Das Softwaresystem Basement umfasst zurzeit zwei Module: Basechain löst die eindimensionalen Gleichungen für die instationäre Berechnung von Strömungs- und Sedimenttransport in offenen Gerinnen und Baseplane macht dasselbe für eine horizontal zweidimensionale Situation.

Um die Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls lösen zu können, wird das Berechnungsgebiet in einzelne Rechenzellen unterteilt. Die zeitliche Änderung einer gesuchten Grösse (z.B. der Wasserstand) wird nun bestimmt, indem die Flüsse über den Zellenrand bilanziert werden. In einem Zweiphasen-System (Wasser und Feststoffe), in dem die Feststoffe aus mehreren Komponenten (Kornklassen) bestehen, die zudem in unterschiedlichen Transportmodi (Geschiebe und Suspension) transportiert werden, ist es zweckmässig, die einzelnen Rechenzellen auch vertikal zu unterteilen, um so die zu betrachtenden Kontrollvolumen genauer spezifizieren zu können.

Bild 8 zeigt die vertikale Unterteilung einer einzelnen Rechenzelle in drei Kontrollvolumina. In der obersten Schicht werden die Massen und Impulserhaltung für das Wasser und die suspendierten Feststoffe formuliert. Daraus lassen sich die Abflusstiefe *h*, die spezifischen Abflüsse *r* und *q* sowie die Konzentrationen der Schwebstoffe C_g für jede Kornklasse *g* bestimmen.

In der mittleren Schicht, die auch als Active-Layer oder Austauschschicht

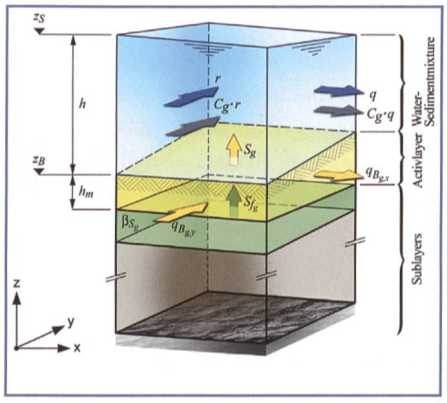

Bild 8. Vertikale Unterteilung einer Rechenzelle.

bezeichnet wird, führt die Massenbilanz des Geschiebetriebs zu einer so genannten Sortiergleichung, mit der der volumetrische Anteil β_g der jeweiligen Kornklasse g der obersten Schicht der Sohle beschrieben wird.

Summiert man die Massenbilanzen aller Bodenschichten, erhält man eine Bestimmungsgleichung für die Änderung der Solenkote, z_B bei der Formulierung der Erhaltungsgleichungen werden zusätzliche Unbekannte via empirische Schliessbedingungen (z.B. Geschiebetrieb q_B, Suspensionseintrag S_g) eingeführt. Darauf kann hier aber aus Platzgründen nicht eingegangen werden.

4. Resultate der numerischen Simulation

4.1 1d-Modell

Um den Geschiebehaushalt eines Flusses analysieren zu können, sind normalerweise langfristige Simulationen (z.B. 50 Jahre), die sich meist über mehrere Dutzende Kilometer erstrecken, durchzuführen. Mit der Leistung der Computer, die heute im Ingenieuralltag eingesetzt werden, führt dies zu Rechenzeiten, die nur den Einsatz von eindimensionalen Ansätzen erlauben. Die Modellvereinfachungen, die damit einhergehen, sind erheblich. Dies gilt insbesondere für Anwendungen, wie sie hier vorgestellt werden. In der Aufweitung der Thur kann sich ein mäandrierendes oder verzweigtes Gerinne bilden, dessen Eigenheiten mit einem eindimensionalen Modell nur ganz grob, d.h., anhand der Entwicklung der mittleren Sohle beschrieben werden kann.

Das grundsätzliche Verhalten von Aufweitungen kann damit aber abgebildet werden. Der Vergleich der gerechneten und gemessenen mittleren Sohle in *Bild 3* zeigt die gute Übereinstimmung. In den aufgeweiteten Bereichen stellt sich der erwartete Sohlenversatz ein. Während des Hochwassers vom August 2005 hat sich die mittlere Sohle auf einer Länge von mehreren hundert Metern um 30 bis 50 cm angehoben. Am unteren Ende der Aufweitungen kam es zu Eintiefungen, die im numerischen Modell etwas überschätzt worden sind. Insgesamt lässt sich aber feststellen, dass die Auswirkung der Hochwasserwelle auf die Aufweitung grundsätzlich richtig wiedergegeben wird. Das hydraulische Modell wurde durch Anpassen der durchströmten Flächen, mit denen die ungleichmässige Geschwindigkeitsverteilung in Querrichtung berücksichtigt werden kann, kalibriert. Dies setzt voraus, dass Vergleichsmessungen vorhanden sind und dass der Modellierer eine gewisse Erfahrung hat. Wie weit das eindimensionale Modell ohne diese Voraussetzungen als Prognosetool eingesetzt werden kann, wäre noch zu untersuchen.

4.2 2d-Modell

Im zweidimensionalen Modell ist die räumliche Auflösung wesentlich grösser (4 mal 10 m) als im eindimensionalen Modell, das auf Querprofilen im Abstand von 25 bis 50 m basiert. Dies ermöglicht die Darstellung von einzelnen Bankstrukturen, wie die Darstellung der gerechneten Sohlendifferenzen in *Bild 9* zeigt. Die Resultate dieser Simulation basieren auf dem rudimentärsten Ansatz (Einkornmodell ohne Berücksichtigung der Deckschicht) für die Beschreibung des Sedimenttransports. Vergleicht man die berechneten Sohlveränderungen mit den gemessenen von *Bild 4*, so sieht man eine gute Übereinstimmung bezüglich der Lage der Erosions- resp. der Ablagerungsorte. Eine numerische Auswertung der aufsummierten Differenzen zeigt aber, dass in der Rechnung 14 000 m^3 Material abgelagert wurden, während es in Wirklichkeit nur eine Auflandung von 7400 m^3 gab. Verteilt auf die ganze Fläche hat sich also zu viel Material abgelagert.

Der Grund dafür ist der für die Simulation verwendete relativ grobe Korndurchmesser von d_m = 5 cm. Dieser entspricht der mittleren Korngrösse in der Unterschicht, d.h. dem Sohlmaterial unter der Deckschicht. In Wirklichkeit trägt aber mehrheitlich das laufende Geschiebe (d_m = 2,5 cm), d.h., das Material das transportiert wird bevor die Deckschicht aufgerissen wird, zu den Gerinneveränderungen bei. Und da die Ablagerungstendenz dieser feineren Fraktion wesentlich kleiner ist, verbleibt weniger Material in der Aufweitung.

Das Modell zur Beschreibung des Sedimenttransports kann verfeinert werden, indem mit dem mittleren Korndurchmesser des laufenden Geschiebes gerechnet und gleichzeitig die Wirkung der Deckschicht berücksichtigt wird. Dies kann durch die Vorgabe von zwei zusätzlichen kritischen Sohlschubspannungen erfolgen. Dabei entspricht die eine der kritischen Sohlschubspannung der Deckschicht, während die andere repräsentativ für das Sohlmaterial sein soll. Übersteigt nun in einer bestimmten Rechenzelle die Strömungskraft den kritischen Wert für die Sohlschubspannung der Deckschicht, wird diese als aufgerissen betrachtet. Infolge wird der kleinere Wert, der für das Unterschichtmaterial massgebend ist, verwendet.

Bild 10 zeigt die Resultate, die mit diesem Ansatz erzielt wurden. Die berechnete Sohlendifferenz von 6500 m^3 stimmt nun gut mit der gemessenen überein. Die Erosion am unteren Ende der Aufweitung wird aber unterschätzt. Um dies zu verbessern, müsste die kritische Sohlschub-

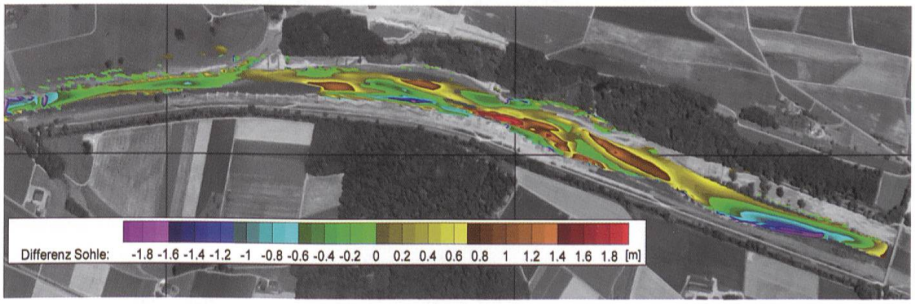

Bild 9. Gerechnete Sohlendifferenzen zwischen September 2005 und November 2004 unter Annahme eines 1-Korn-Modells und eines massgebenden Korndurchmessers von d_m = 5 cm, der repräsentativ für das Sohlmaterial ist.

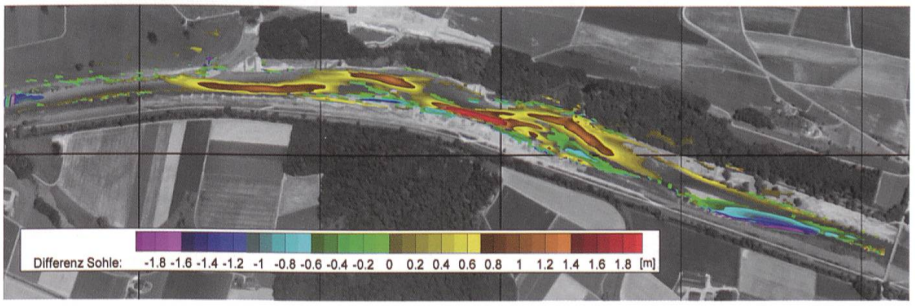

Bild 10. Gerechnete Sohlendifferenzen zwischen September 2005 und November 2004 unter Berücksichtigung der Deckschicht und einem für das laufende Geschiebe repräsentativen Korndurchmesser von d_m = 2,5 cm.

spannung für die Deckschicht verkleinert und als Kompensation gleichzeitig der massgebende Korndurchmesser für das laufende Geschiebe etwas vergrössert werden.

Vergleicht man *Bild 10* und *Bild 9* fällt auf, dass sich die Ablagerungsmuster sehr ähnlich sind. Dieses Ergebnis hat sich auch bei der Variation von anderen n Parametern (unterschiedlicher Geschiebezufluss, Mehrkornmodell usw.) ergeben. Das bedeutet, dass die Gerinnemorphologie für den untersuchten Fall bei der zweidimensionalen Simulation wenig sensitiv auf die Eingabeparameter reagiert.

5. Schlussfolgerungen

Die Sohlveränderungen, die sich beim Durchgang einer Hochwasserwelle in einer Aufweitung ergeben, wurden anhand von Messungen und numerischen Simulationen für das Beispiel der Thuraufweitung bei Altikon bestimmt. Sowohl die eindimensionale Berechnung wie auch jene mit dem zweidimensionalen Ansatz zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Im Fall der zweidimensionalen Rechnung reagieren die Ablagerungs- und Erosionsmuster nur wenig sensitiv auf die Variation der Eingabeparameter. Daraus lässt sich schliessen, dass die Dynamik der Sohlentwicklung relativ zuverlässig wiedergegeben und das Modell allenfalls als Prognosetool eingesetzt werden kann.

Bibliographie

Arge FuThur (2005). Geschiebehaushaltstudie Thur und Einzugsgebiet, Schlussbericht.

Bezzola G.R. und *Hegg C.* (Ed.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707. 215 S.

Bundesamt für Wasser und Geologie (2001). Hochwasserschutz an Fliessgewässern, Wegleitung 2001, BAFU, Biel 2001, 72 S.

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

Hunzinger, L.M. and *Zarn, B.* (1997). Morphological changes at enlargements and constrictions of gravel bed rivers, 3rd Int. Conference of River Flood Hydraulics, Stellenbosch, South Africa, 5–7 Nov. 1997, 227–236. HR Wallinford.

Marti, C. und *Bezzola, G.R.* (2004), Morphologie in Flussaufweitungen, Mitteilung VAW, 184: 173–188.

Requena, P., Bezzola, G.R., Minor, H.-E. (2005). Aufweitungen in erodierenden Flüssen, Wasser, Energie und Luft, 97(7/8):183–189.

Schmautz, M. (2004). Gravel river widening by bank erosion in a straight stretch of river – investigations on a numerical model, River Flow 2004 1:99–107, Napoli.

Zarn, B. (1993). Stabilising a riverbed by local widening – a case study of the river Emme, Sediment Transport Mechanisms in Coastal Environments and Rivers, Le Havre, EuroMech 310: 388–396.

Verdankung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Rhone-Thur-Projekts und der Ereignisanalyse Hochwasser 2005 durchgeführt. Wir möchten uns bei allen beteiligten Partnern (EAWAG, WSL, LCH und VAW) für die Zusammenarbeit und insbesondere dem Bundesamt für Wasser und Geologie (heute BAFU) und dem Kanton Thurgau für die finanzielle Unterstützung bedanken.

Anschrift des Verfassers

Roland Fäh et al.
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich
CH-8092 Zürich, Tel. +41 44 632 4116
www.vaw.ethz.ch, faeh@vaw.baug.ethz.ch