

# Geschiebetransport-Simulationen mit sedFlow in zwei Gebirgsflüssen der Schweiz

Dieter Rickenmann, Florian Heimann, Martin Böckli, Jens M. Turowski, Claudia Bieler, Alexandre Badoux

## Zusammenfassung

Zur Berechnung des Geschiebetransportes in steilen Gerinnen mit Makrorauigkeit wurde an der WSL das neue eindimensionale Simulationsprogramm sedFlow entwickelt, welches für die schnelle Berechnung von Geschiebeverlagerungen in alpinen Einzugsgebieten konzipiert wurde. Mit diesem relativ einfachen mechanistischen Geschiebetransport-Modell konnten die generellen Trends zum beobachteten Geschiebetransport der Eichperiode in der Kleinen Emme sowie im Brenno entlang der 20 bis 25 km langen Untersuchungsstrecken plausibel abgebildet werden. Für die Kleine Emme werden die Resultate einer Sensitivitätsanalyse vorgestellt, wozu die Eingangsparameter für das Modell in einem plausiblen Bereich variiert wurden. Für den Brenno wurden verschiedene Hochwasserszenarien berechnet und der Einfluss von verschiedenen grossen Seiteneinträgen auf den Geschiebetransport im Vorfluter untersucht.

## 1. Einleitung

Berechnungen zum Geschiebetransport in steilen Gerinnen beruhen in der Regel auf Gleichungen, die in Laborversuchen mit einer vereinfachten Nachbildung der Bachbettmorphologie und Kornverteilung des Geschiebes durchgeführt wurden. In Gebirgsflüssen und Wildbächen sind die Gerinne oft durch raue Sohlen und, im Verhältnis zu den grösseren Körnern, geringen Abflusstiefen charakterisiert. Mit konventionellen Berechnungsansätzen wird der Geschiebetransport in solchen Gerinnen zum Teil massiv überschätzt (Rickenmann, 2001; Badoux und Rickenmann, 2008; Chiari und Rickenmann, 2010; Nitsche et al., 2011, 2012; Rickenmann, 2012). Eine wichtige Rolle bei der Berechnung des Geschiebetransportes in Gebirgsflüssen und Wildbächen spielen die hohen Fliesswiderstände und die damit verbundenen Energieverluste (Rickenmann und Recking, 2011). Mit Daten zum Geschiebetransport aus mehreren Wildbächen und Gebirgsflüssen der Schweiz wurden verschiedene Ansätze zur Berücksichtigung solcher Energieverluste getestet (Nitsche et al., 2011). Wird nur ein reduzierter Anteil an der gesamten Fliessenergie für die Berechnung des Geschiebetransportes berücksichtigt, ergibt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung mit beobachteten Geschiebefrachten. In steilen Gerinnen zeigt sich zudem ein Trend zu erhöhten

kritischen Schubspannungen beim Transportbeginn mit zunehmendem Gerinnegefälle (Lamb et al., 2008; Recking, 2009).

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes NFP61 «Nachhaltige Wassernutzung» wurde im Projekt «SEDRIVER» an der WSL das eindimensionale Geschiebetransport-Simulationsprogramm sedFlow entwickelt, welches die erwähnten neuen Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransportes in steilen Gerinnen berücksichtigt. Dieses Modell wurde für die schnelle Berechnung der Geschiebeverlagerungen in alpinen Einzugsgebieten konzipiert. Das Programm sedFlow erlaubt die Simulation vieler verschiedener Szenarien oder die Durchführung von Sensitivitätsanalysen mit Variation verschiedener Eingabe- und Modellparameter in relativ kurzer Zeit. Dies scheint uns auch deshalb wichtig, weil die Unsicherheiten bei der eigentlichen Modellierung des Geschiebetransportes oftmals grösser sind als diejenigen bezüglich der Grundlagendaten wie zum Beispiel Gerinnegeometrie und Hydrologie.

In diesem Artikel stellen wir Simulationsberechnungen für zwei Gebirgsflüsse in der Schweiz vor: für die Kleine Emme, ein voralpines Einzugsgebiet, und für den Brenno, ein alpines Einzugsgebiet. Für beide Flüsse sind durch Querprofilvermessungen und andere Untersuchungen Referenzdaten zum Geschiebetransport vor-

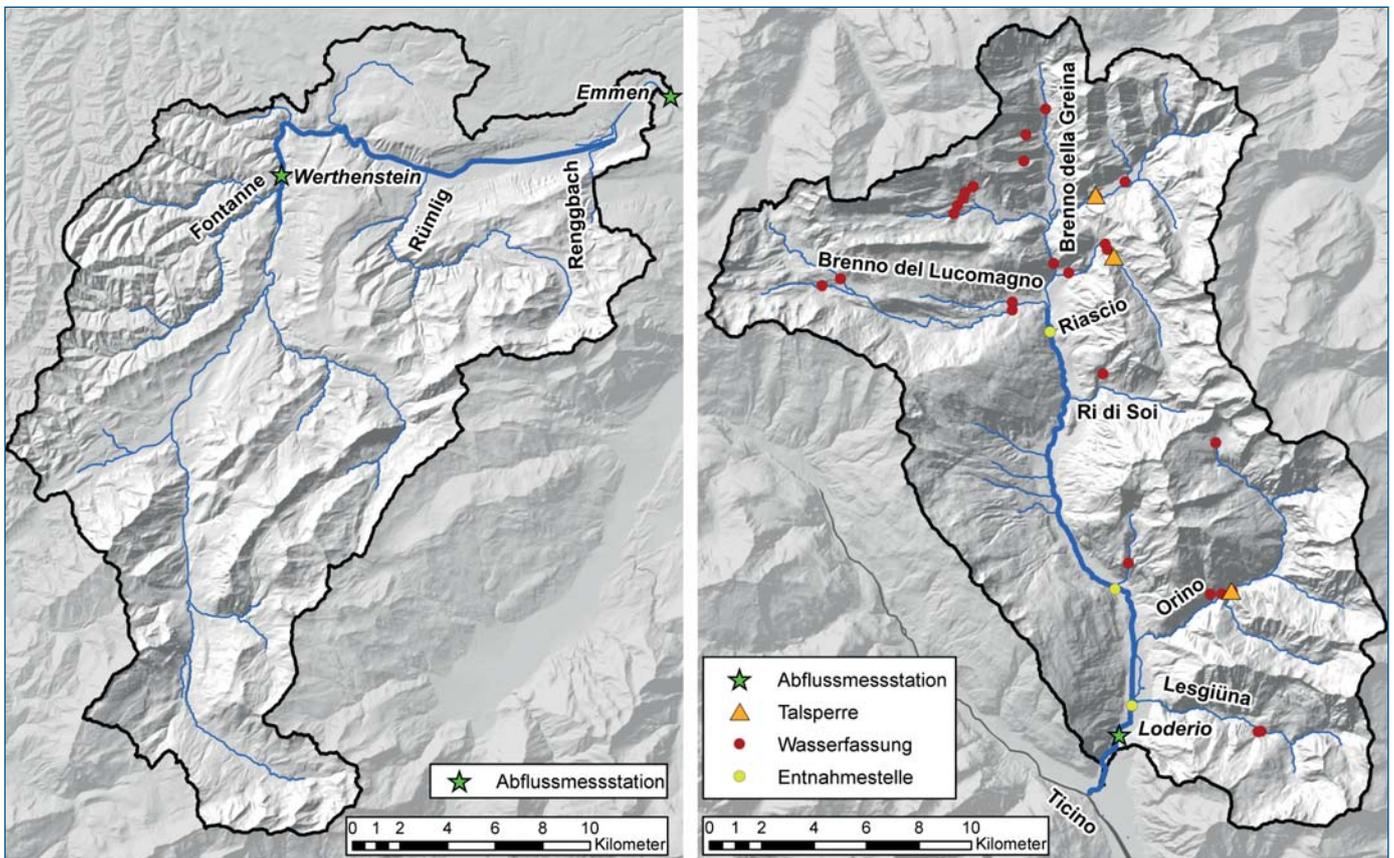
handen. Zuerst beschreiben wir die Grundlagendaten und geben eine Übersicht über das Simulationsprogramm sedFlow. Dann präsentieren wir die Simulationsergebnisse für die Eichperiode mit den Referenzdaten, und schliesslich betrachten und diskutieren wir weitere Simulationsergebnisse, welche im Rahmen von Sensitivitätsanalysen, Hochwasserszenarien und unterschiedlichen Annahmen zu Sedimenteinträgen aus murgangfähigen Seitenbächen berechnet wurden. Die hier präsentierten Resultate beinhalten im Wesentlichen eine Zusammenfassung der Studie von Heimann et al. (2014b) für den deutschsprachigen Raum. Eine Anwendung des Modells sedFlow zur Untersuchung möglicher Auswirkungen der Klimaänderung auf das Forellenhabitat ist in Badoux et al. (2014; in dieser Ausgabe WEL) diskutiert.

## 2. Untersuchungsgebiete und Grundlagen

### 2.1 Kleine Emme

#### Einzugsgebiet und Simulationsstrecke

Die Kleine Emme befindet sich in der Zentralschweiz und entwässert das Entlebuch und das Mariental (Bild 1). In Emmen (frühere Stationsbezeichnung: Littau), knapp einen Kilometer vor der Einmündung in die Reuss auf 430 m ü.M., betreibt das BAFU seit 1936 eine Abflussmessstation. An dieser Stelle umfasst das Einzugsgebiet eine Fläche von 478 km<sup>2</sup>. Eine weitere BAFU-Messstation befindet sich auf 595 m ü.M. am Standort Werthenstein-Chappelboden (seit 1985). Bei einer mittleren Einzugsgebietshöhe von 1050 m ü.M. liegt der höchste Punkt auf 2350 m ü.M. (Brienzer Rothorn). Das Gebiet weist keine Vergletscherung auf und das Abflussregime wird als «nivo-pluvial préalpin» (unterer Teil) bez. «nival de transition» (oberer Teil) angegeben (Weingartner und Aschwanden, 1989). Der jährliche Abflussverlauf ist weitgehend natürlich und wird nur im untersten Teil der Kleinen Emme durch kleine Lauf-



**Bild 1. Übersicht über die Einzugsgebiete: links das Einzugsgebiet der Kleinen Emme, rechts das Einzugsgebiet des Brenno. Dargestellt sind der simulierte Gerinneabschnitt (blau, dick), die grösseren Zubringer, die Abflussmessstationen (BAFU), Talsperren, Wasserfassungen und die Geschiebeentnahmestellen (gemäss der BAFU-GHO SOLID Datenbank).**

Gerinne	Simulation HW-Szenarien		
	Minimaler Eintrag [m <sup>3</sup> ]	Mittlerer Eintrag [m <sup>3</sup> ]	Maximaler Eintrag [m <sup>3</sup> ]
Brenno della Greina	Fluvial berechnet		
Brenno del Lucom./Ri di Piera	Fluvial berechnet		
Riale Riascio	20 000	50 000	100 000
Ri di Soi	20 000	50 000	100 000
Ri di Prugiasco	5 000	15 000	30 000
Lesgiüna	Fluvial berechnet		
Crenone (Vallone)	5 000	15 000	30 000
Austrag in Ticino	Fluvial berechnet		

**Tabelle 1. Abschätzung wichtiger Geschiebeeinträge durch Murgänge in einigen Seitenbächen des Brenno für die Simulation von Hochwasserszenarien, basierend auf Untersuchungen von Flussbau (2003; 2003/2005), Stricker (2010), der Storme-Datenbank sowie eigenen Annahmen. Beim Ri di Prugiasco wurde angenommen, dass der Geschiebesammler überlastet ist und Geschiebe bis in den Brenno gelangt.**

kraftwerke marginal beeinflusst. Beim Unwetter im August 2005 wurde an der Kleinen Emme mit 650 m<sup>3</sup>/s die grösste Hochwasserspitze erfasst. Vor allem im untersten Flussabschnitt entstanden damals schwere Überflutungsschäden (Emmen, Littau und Malters). Ein Spitzenwert mit einer statistischen Wiederkehrdauer von 100 Jahren beträgt gemäss BAFU gut 710 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

Die Kleine Emme fliesst von Flüfli bis zur Mündung in die Reuss in Littau im Molassegebiet. Unterhalb der Mündung

der Entlen wird das Gefälle steiler und die Kleine Emme fliesst durch Nagelfluhgebiet. Die Zubringer Wiss Emme und Fontanne liegen in Nagelfluh, der Rümilig und der Renggbach fliessen durch Mergel-Sandsteinschichten und Moränenmaterial (HZP, 2008).

Die 19.4 km lange Simulationsstrecke beginnt im Bereich von Doppleschwand und reicht bis zum Zufluss des Renggbach (oberhalb von Littau, vgl. Bild 1). Das Gerinnegefälle beträgt auf den obersten 2 km 0.5 bis 3.5%. Unterhalb der

Mündung der Fontanne bis nach Littau schwankt es im Wesentlichen zwischen 0.5 und 1.5% (tendenziell kleiner im unteren Bereich). In diesem Abschnitt ist die Kleine Emme weitgehend kanalisiert und mit zahlreichen Sohlschwellen stabilisiert (Bild 2). Das mittlere Gefälle der Untersuchungsstrecke beträgt 0.7% (Nettogefälle mit Berücksichtigung der Schwellen). Die wichtigsten Wasser- und Geschiebezubringer sind die Fontanne (bei km 23.3) und der Rümilig (bei km 12.6). Vor allem im oberen Bereich der simulierten Flussstrecke befinden sich mehrere Abschnitte, wo die Sohle auf Fels verläuft, insgesamt betrifft dies eine Streckenlänge von 1.3 km.

Die Kornverteilungen in der Kleinen Emme basieren auf Linienzahlanalysen von Burkhard (2012) und von der WSL. Aus den Linienzahlanalysen wurde eine repräsentative Kornverteilung der Deckschicht und der Unterschicht ermittelt (Bild 2). Da die Kornverteilung des Flussbettes aufgrund des kanalisiertes Gerinnes der Kleinen Emme und der erheblichen Abflusstiefen nicht einfach analysiert werden kann, wurden die Linienzahlanalysen in ufernahen Bereichen durchgeführt. Die Kornverteilungen entlang der Simulationsstrecke variieren stark. Beim D<sub>84</sub> (84% der Geschiebekörner sind kleiner als dieser

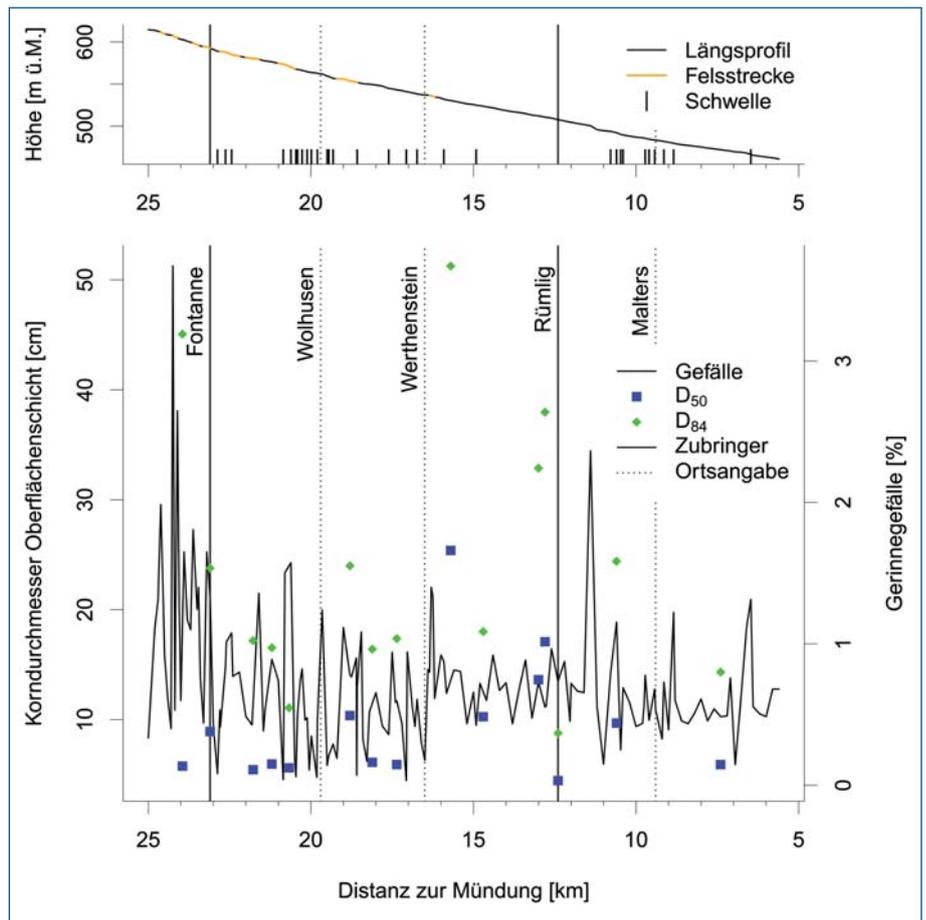
Wert) zeigt sich eine leichte Tendenz zu einer Vergrößerung im Bereich der Mündungen der Fontanne und des Rümliig.

**Beobachtungen zum Geschiebetransport**

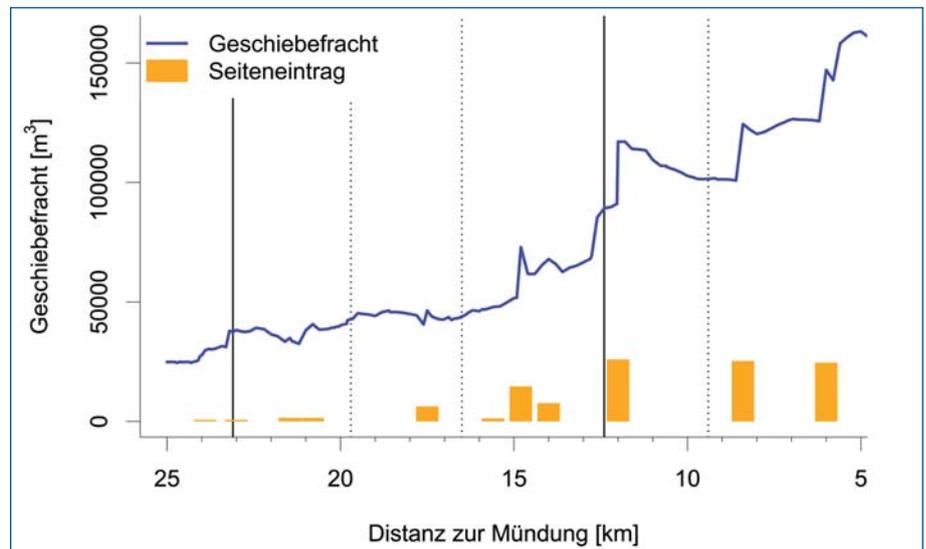
Für die Eichung des Transportmodells in der Kleinen Emme liegen zwei Datensätze terrestrisch vermessener Querprofile im Abstand von ca. 50 bis 200 m vor, die im September 2000 und im November 2005 vom BAUF aufgenommen wurden. Für alle Querprofile wurde der Bereich der beweglichen Sohle definiert und daraus die Sohlenbreite und die mittlere Sohlenlage ermittelt. Die Differenz der mittleren Sohlenlage von 2000 und 2005 ergibt die Sohlenveränderung entlang des Gerinnes. Im Rahmen der Analyse des Unwetters vom August 2005 wurde aus diesen Sohlenveränderungen ein Geschiebefrachtdiagramm für das Hochwasserereignis erstellt (Flussbau, 2009a).

Im Untersuchungszeitraum von 2000 bis 2005 spielt in der Kleinen Emme die Seitenerosion eine wesentliche Rolle für den Geschiebetransport (Hunzinger und Durrer, 2008). Demgegenüber fällt der Beitrag der Zubringer weniger ins Gewicht; Berechnungen der Flussbau (2009b) zeigen auf, dass von der gesamten mobilisierten Geschiebefracht während des Hochwassers vom August 2005 fast die Hälfte aus Seitenerosionsprozessen stammte.

Für die Erstellung des Geschiebefrachtdiagramms der Kleinen Emme (Bild 3) wurden die Seiteneinträge aus der Studie der Flussbau (2009a) übernommen. Aufgrund der Querprofilvermessungen, der Geschiebestudien sowie der Ereignisanalyse zum Hochwasser 2005 wurde geschätzt, dass der Austrag der Kleinen Emme in die Reuss (mit Ausbaggerungen) ca. 160 000 m<sup>3</sup> betrug. Der Geschiebeeintrag in die Simulationsstrecke bei Doppleschwand ergibt sich dann aus der Geschiebebilanz und beträgt rund 25 000 m<sup>3</sup>. Die drei deutlichsten Zunahmen der Geschiebefracht im unteren Abschnitt der simulierten Strecke entsprechen den drei wichtigsten Einträgen aus Seitenerosion und betragen jeweils ca. 25 000 m<sup>3</sup> (km 12, 8,4 und 6). Erosion und Ablagerung traten über die gesamte Simulationsstrecke verteilt auf. Das beobachtete Geschiebefrachtdiagramm für die Kleine Emme (Bild 3) kann grob in zwei Bereiche unterteilt werden. Auf den oberen 10 km (km 25 – km 15) stabilisieren die vielen Schwellen die Sohle, und es gibt wenig netto Erosion oder netto Deposition (Bild 6b). Die unteren 10 km der Untersuchungsstrecke sind dominiert durch eine stufenweise Zunahme



**Bild 2. Kornverteilungen in der Kleinen Emme, gemäss Linienproben der WSL und von Burkhard (2012). Dargestellt sind die charakteristischen Korndurchmesser  $D_{50}$  und  $D_{84}$  der Deckschicht entlang der Untersuchungsstrecke (wobei jeweils 50% respektive 84% des Gewichtsanteils des Sohlenmaterials feiner sind).**



**Bild 3. Geschiebefrachtdiagramm für die Kleine Emme für die Periode 2000 bis 2005 für die Untersuchungsstrecke von Doppleschwand bis Littau. Die in Orange markierten Balken geben die während des Hochwassers 2005 als Seitenerosion eingetragenen Geschiebefrachten (ohne Feinmaterial) in den Hauptfluss an.**

der Geschiebefracht, welche vor allem auf die Seiteneinträge durch Ufererosion während des Hochwassers 2005 zurückzuführen ist.

**Hydrologische Grundlagen**

Für die Geschiebetransportsimulationen mit *sedFlow* müssen Informationen zum Abflussgeschehen entlang der gesamten Simulationsstrecke vorliegen. Zu diesem Zweck wurden einerseits Daten der Ab-

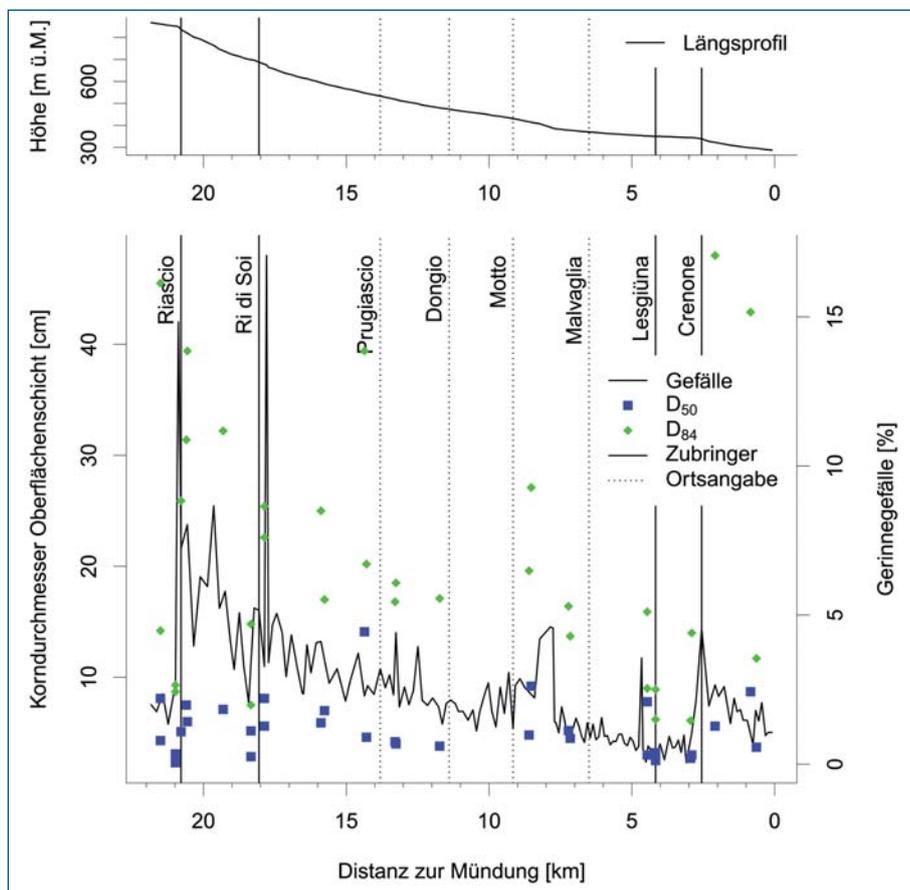
flussmessstationen Littau (ab 2013 neu Emmen) und Werthenstein verwendet und andererseits mit dem hydrologischen Modell PREVAH (Viviroli et al., 2007) die Ganglinie für das Teileinzugsgebiet der Fontanne als Zubringer in die Kleine Emme im oberen Bereich der Untersuchungsstrecke für den Untersuchungszeitraum von 2000 bis 2005 berechnet. Die Ganglinie des Rümli wurde aus der Differenz zwischen dem gemessenen Abfluss bei Werthenstein und dem um 5% reduzierten, gemessenen Abfluss bei Littau (Reduktion wegen des Zuflusses des Renggach nach dem Ende der Untersuchungsstrecke) berechnet.

## 2.2 Brenno

### Einzugsgebiet und Simulationsstrecke

Der Brenno befindet sich im nördlichen Teil des Kantons Tessin und entwässert das Bleniotal (Bild 1). Einige Kilometer vor der Einmündung in den Ticino auf 348 m ü.M. befindet sich die BAFU Abflussmessstation Loderio. An dieser Stelle umfasst das Einzugsgebiet des Brenno eine Fläche von 397 km<sup>2</sup>. Bei einer mittleren Einzugsgebietshöhe von 1820 m ü.M. liegt der höchste Punkt auf 3402 m ü.M. (Rheinwaldhorn). Die Vergletscherung des Gebietes beträgt 1.1% und das Abflussregime wird als «nival méridional» angegeben (Weingartner und Aschwanden, 1989). Das Regime ist allerdings stark durch die Wasserkraftnutzung beeinträchtigt (Blenio Kraftwerke AG). Wasser wird über grosse Teile des Einzugsgebietes entnommen und unterhalb von Biasca in den Ticino zurückgeleitet. Die höchste im Brenno gemessene Abflussspitze betrug 515 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (seit 1961, d.h. seit dem Bau der Wasserkraftanlagen) und trat während des Hochwassers von Juli 1987 auf. Ein Spitzenwert mit einer statistischen Wiederkehrdauer von 100 Jahren liegt gemäss BAFU bei knapp 500 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

Die Simulationsstrecke erstreckt sich von Olivone beim Zusammenfluss des Brenno della Greina mit dem Brenno del Lucomagno bis zur Mündung in den Ticino (Biasca) und hat eine Länge von 22 km (Bild 4). Das Gefälle der Untersuchungsstrecke variiert zwischen 0.5% und 15%, wobei das mittlere Gerinnegefälle 2.7% beträgt. Verzweigte Gerinne und Auenlandschaften weisen auf Abschnitte des Brenno mit einer weitgehend natürlichen Dynamik hin. Die wichtigsten Geschiebelieferanten sind der Ri di Soi und der Riale Riascio im oberen sowie die Lesgiüna und der Crenone im unteren Teil des Einzugs-



**Bild 4. Kornverteilungen im Brenno, gemäss Linienproben der WSL. Dargestellt sind die charakteristischen Korndurchmesser  $D_{50}$  und  $D_{84}$  der Deckschicht entlang der Untersuchungsstrecke (wobei jeweils 50% respektive 84% des Gewichtsanteils des Sohlenmaterials feiner sind).**

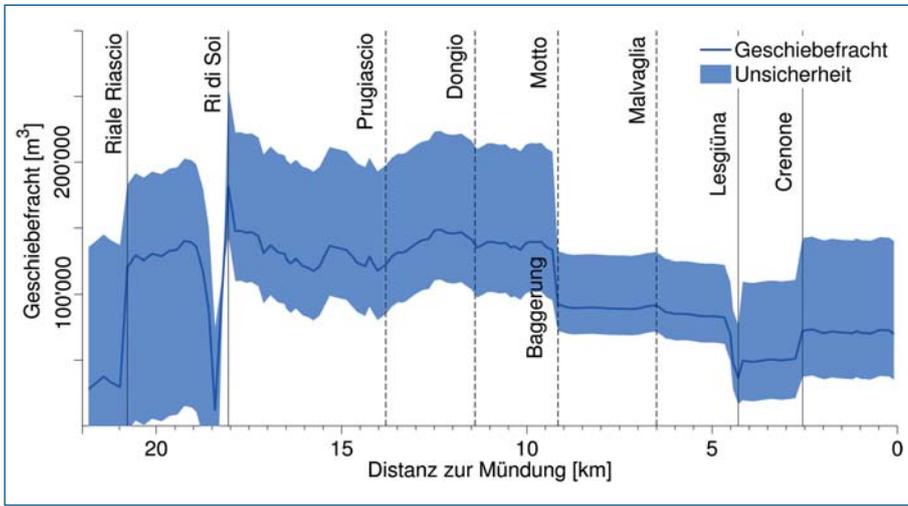
gebietes. Bei diesen Wildbächen treten (mit Ausnahme der Lesgiüna) Murgänge bis in den Mündungsbereich auf. Beim Zusammenfluss von Ri di Soi und Riale Riascio mit dem Brenno wird das Flussbett durch grobe Blöcke stabilisiert.

Die gesamte Simulationsstrecke wurde nach verschiedenen geomorphologischen Faktoren (Neigung, Breite und Lage der Seitenzubringer) in weitgehend homogene Abschnitte unterteilt. Für jeden Abschnitt wurden mehrere Linienanzahlanalysen aufgenommen und daraus eine repräsentative Kornverteilung der Deckschicht und der Unterschicht ermittelt (Bild 4). Zusätzlich wurden auch in den wichtigen Seitenzubringern Kornverteilungen bestimmt. Die Kornverteilungen der einzelnen Abschnitte variieren stark. So wird zum Beispiel durch Zubringer (z.B. Riale Riascio und Ri di Soi) grobes Material in den Brenno eingebracht. Das  $D_{84}$  scheint trotz starker Variabilität Richtung Mündung tendenziell abzunehmen. Eine weitere lokale Vergrößerung des Geschiebes unterhalb km 2.5 (flussabwärts der Mündung der Lesgiüna) ist auf einen früheren Felssturz zurückzuführen. Generell liegt in Flachstrecken eher feines Soh-

lenmaterial vor, während in Steilstrecken grobes Material zu finden ist.

### Beobachtungen zum Geschiebetransport

Als Datengrundlage für die Eichung des Modells liegen für die Simulationsstrecke im Brenno zwei Datensätze terrestrisch vermessener Querprofile vor. Der erste stammt vom April 1999 und der zweite vom Juni/Juli 2009. Für die Strecke zwischen Olivone und der Mündung in den Ticino wurden jeweils 151 Profile erstellt, wobei der mittlere Abstand zwischen den Profilen rund 150 m beträgt. Die Differenz der mittleren Sohlenlage von 1999 und 2009 ergibt die Sohlenveränderung entlang des Gerinnes. Bei einigen Querprofilen hat sich die Geometrie aufgrund von Auflandungen oder Seitenerosion zwischen 1999 und 2009 stark verändert. Um die Änderung der Sohle trotzdem berechnen zu können, wurden zu diesem Zweck die vermessenen Profile von 1999 manuell ergänzt. Die grössten Veränderungen während der rund 10 Jahre ereigneten sich bei der Mündung des Ri di Soi zwischen km 17.8 und 18.7. Ober- und unterhalb der Mündung wurde eine mittlere Erhöhung der Sohle von vier Metern ermittelt, was



**Bild 5. Geschiebefrachtdiagramm für den Brenno für die Periode 1999 bis 2009 für die Untersuchungsstrecke von Olivone bis Biasca. Für die Berechnung wurden die mittleren geschätzten Seiteneinträge verwendet. Der Bereich zwischen minimalen und maximalen Einträgen beruht auf minimalen und maximalen Seiteneinträgen und ist blau schraffiert.**

auf das Murgangereignis vom September 1999 zurückzuführen ist (s. auch Bild 8b).

Zur Erstellung des Geschiebefrachtdiagramms (Bild 5) wurden neben den Daten zu den Sohlenveränderungen auch Abschätzungen zu den Geschiebeeinträgen der Seitenzubringer sowie zum Austrag in den Vorfluter verwendet. Die Einträge der Zubringer wurden anhand früherer Studien (Flussbau, 2003/2005; Stricker, 2010) bestimmt. Zudem wurden Materialentnahmen während der Periode 1999 bis 2009 an drei Stellen entlang der Untersuchungsstrecke aufgrund von Angaben in der SOLID-Datenbank des BAFU berücksichtigt. Dabei wurde der Geschiebeaustrag in den Ticino aufgrund der Transportberechnungen mit *sedFlow* für die Bestvariante auf ca. 70 000 m<sup>3</sup> abgeschätzt. Die Geschiebeeinträge der beiden Hauptzuflüsse in Olivone (Oberlauf) ergeben sich dann aus der Geschiebebilanz über die gesamte Untersuchungsstrecke für die Periode 1999 bis 2009 und betragen zusammen ca. 35 000 m<sup>3</sup>.

Das beobachtete Geschiebefrachtdiagramm für den Brenno (Bild 5) kann grob in drei Bereiche unterteilt werden. Auf den obersten ca. 7 km (km 24 – km 17) sind die lokalen Geschiebeeinträge durch den Riale Riascio von ca. 100 000 m<sup>3</sup> und durch den Ri di Soi von ca. 200 000 m<sup>3</sup> in der Periode 1999–2009 von grosser Bedeutung. Beim Ri di Soi wurde allein durch das Murgangereignis vom September 1999 schätzungsweise 100 000 m<sup>3</sup> Geschiebe in den Brenno eingetragen. Im mittleren ca. 8 km langen Abschnitt (km 17 – km 9) gibt es wenig netto Erosion oder netto Deposition, während die

Abnahme der Geschiebefracht bei km 9 auf Ausbaggerungen zurückzuführen ist. Im untersten Abschnitt (km 9–km 0) dominiert der Durchtransport von Geschiebe mit relativ wenig Deposition oder Erosion, mit Ausnahme der lokalen Ablagerung bei der Lesgiüna-Mündung (km 4.2) sowie des seitlichen Geschiebeeintrages durch Murgänge aus dem Crenone (Vallone).

#### Hydrologische Grundlagen

Die Daten der Abflussmessstation Loderio sind im Projekt nur lokal anwendbar. Für die Geschiebetransportsimulationen müssen die Abflüsse über die ganze Gerinnelänge bekannt sein. Zu diesem Zweck wurde das Niederschlags-Abfluss Modell PREVAH (Viviroli et al., 2007) eingesetzt. Um an verschiedenen Stellen entlang des Gerinnes eine Ganglinie zu erhalten, wurde das gesamte Einzugsgebiet in Teileinzugsgebiete aufgeteilt. Dabei wurde für wichtige Seitenzubringer ein eigenes Einzugsgebiet bereitgestellt und kleinere Seitenzubringer wurden zu einem zusammengefasst.

Infolge der Wasserkraftanlagen der Blenio Kraftwerke AG mit den drei Reservoiren Carassina, Luzzone und Malvaglia ist das Abflussverhalten des Brenno seit dem Beginn der 1960er-Jahre stark anthropogen beeinflusst. Bei den PREVAH-Simulationen wurden die Wasserfassungen und Reservoirs nicht berücksichtigt. Um realistischere Abflusswerte zu erhalten, haben wir deshalb die Simulationsergebnisse um die gefassten Wassermengen korrigiert. Dazu wurden bei jeder Fassung die abgeleiteten Abflüsse sowie die Dotierwassermengen gemäss den Angaben der

Kraftwerke (inkl. der monatlichen Schwankungen) berücksichtigt. Auch nach Durchführung dieser Korrekturen überschätzt die Simulation den gemessenen Abfluss während der Eichperiode (am Standort Loderio) immer noch stark. Um bessere Abflussganglinien für die Teileinzugsgebiete zu erhalten, skalierten wir den gemessenen stündlichen Abfluss bei Loderio entsprechend der PREVAH-Simulationen auf die Teileinzugsgebiete herunter. Mit diesem Vorgehen entspricht die Summe der Abflüsse bei Loderio immer der BAFU-Messung und die räumliche Verteilung immer den (um den Einfluss der Wasserkraftnutzung korrigierten) Simulationsergebnissen von PREVAH.

### 2.3 Das Geschiebetransport-Simulationsprogramm *sedFlow*

Das Geschiebetransport-Simulationsprogramm *sedFlow* wurde an der WSL im Rahmen des Projektes SEDRIVER entwickelt. Es wurde speziell für Berechnungen in Gebirgsflüssen konzipiert, mit den folgenden wesentlichen Elementen: (i) Berücksichtigung neuer Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransportes in steilen Gerinnen mit Makrorauigkeit, (ii) Berechnung von fraktionsweisem Transport; (iii) schnelle Berechnungszeiten zur Modellierung ganzer Einzugsgebiete und zur Szenarienanalyse mit automatisierten Simulationsberechnungen vieler Varianten bezüglich der Eingabeparameter.

Die Berechnung des Fließwiderstandes wird entweder mit der variable power equation, VPE, von Ferguson (2007) (1a) oder mit einer Korngrößen-abhängigen Manning-Strickler-Gleichung (1b) durchgeführt:

$$\frac{v_m}{v^*} = \frac{a_1 a_2 \left( \frac{r_h}{D_{84}} \right)}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 \left( \frac{r_h}{D_{84}} \right)^{0.6}}} \quad (1a)$$

$$\frac{v_m}{v^*} = a_1 \left( \frac{r_h}{D_{84}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (1b)$$

Dabei ist  $v_m$  die mittlere Fließgeschwindigkeit,  $v^* = [g r_h S]^{0.5}$  die Schergeschwindigkeit,  $r_h$  der hydraulische Radius,  $S$  das Gerinnegefälle bzw. das Energieliniengefälle,  $D_{84}$  die charakteristische Korngrösse des Oberflächenmaterials (Deckschicht), für welche 84% des Materials feiner ist, und  $g$  die Gravitationsbeschleunigung. Gleichung (1a) wurde von Rickenmann und Recking (2011) anhand von fast 3000 Beobachtungen getestet und zeigt mit den

Koeffizienten  $a_1 = 6.5$  und  $a_2 = 2.5$  eine sehr gute Übereinstimmung mit dem mittleren Trend der Beobachtungen, insbesondere auch bei kleineren relativen Abflusstiefen mit erhöhtem Fließwiderstand. *Rickenmann* und *Recking* (2011) formulierten eine zu Gleichung (1a) äquivalente Form, wobei die Fließgeschwindigkeit direkt als Funktion des Einheitsabflusses  $q$  berechnet werden kann.

In *sedFlow* wird das Gerinne durch ein Rechteckprofil angenähert, und es bestehen im Wesentlichen folgende Optionen für die Abflussberechnung: (i) Unter Verwendung eines Potenzgesetzes für den Fließwiderstand (wie die Manning-Strickler-Gleichung) wird die Abflussveränderung entlang des Gerinnes mittels eines analytischen Ansatzes für die kinematische Welle nach *Liu* und *Todini* (2002) mit einem impliziten numerischen Verfahren berechnet, was schnelle Berechnungszeiten ergibt, wie das etwa auch beim Modell Topkapi der Fall ist (*Konz et al.*, 2011). Für diese Option in *sedFlow* wird aus numerischen Gründen die Gleichung (1b) verwendet. (ii) Der Ansatz für die kinematische Welle wird mit einem expliziten numerischen Berechnungsverfahren mit Gleichung (1a) oder (1b) gelöst, was deutlich längere Berechnungszeiten erfordert. (iii) Es wird eine hydraulisch einfachere Berechnung durchgeführt unter der Annahme gleichen Abflusses pro Zeitschritt in den Gerinneabschnitten ohne Zufluss, wobei mit Gleichung (1a) oder (1b) (zusätzlich) das Energieliniengefälle zwischen den Gerinne-Abschnitten für Normalabfluss pro Abschnitt berechnet wird, und dabei ein minimaler positiver Wert nicht unterschritten werden darf (*Heimann et al.*, 2014a). Damit ergeben sich ebenfalls schnelle Berechnungszeiten, aber der Fließwiderstand wird in steilen und rauen Gerinnen mit Gleichung (1a) besser berücksichtigt als bei der Option (i). Option (iii) hat zudem den Vorteil, dass bei starken seitlichen Geschiebeeinträgen auch negative Sohlengefälle in Fließrichtung zulässig sind.

Betreffend Option (iii) ist zu präzisieren, dass das Energieliniengefälle für die Geschiebetransport-Abschätzung nicht das Ergebnis einer Staukurvenberechnung ist. Vielmehr ist es das Gefälle zwischen einzelnen Energiehöhen, die in den meisten Fällen unabhängig voneinander berechnet wurden, wobei das lokale Sohlengefälle als Proxy für das Reibungsgefälle verwendet wird. Dieses Vorgehen basiert auf der Annahme, dass das simulierte System nur aus den beiden Extremfällen des vollkommenen Einstaus auf der

einen Seite und von parallelen Sohl-, Reibungs- und Energieliniengefällen auf der anderen Seite besteht. Bei einer räumlichen Auflösung (Länge der Gerinneabschnitte) von mehreren Zehnermetern ist diese Annahme für die meisten Gebirgsflüsse zutreffend und ermöglicht eine effiziente Simulation von Einstausituationen, indem numerisch aufwändige Staukurvenberechnungen vermieden werden. Allerdings muss gesagt werden, dass dieses Vorgehen zu sehr grossen Fehlern führt, wenn mittlere Rückstauereffekte im simulierten System auftreten. In diesem Fall liefert ein Flow Routing, basierend auf der kinematischen Welle, welches das Sohlengefälle sowohl als Proxy für das Reibungsgefälle in den hydraulischen Berechnungen als auch als Proxy für das Energieliniengefälle in den Geschiebetransportberechnungen verwendet, bessere Abschätzungen der transportierten Geschiebefrachten. Dieses Verfahren ist aber nur sinnvoll, wenn keine negativen Sohlengefälle auftreten.

Für die Berechnung des Geschiebetransportes können verschiedene Formeln verwendet werden. In «*sedFlow*» implementiert sind die Ansätze von *Rickenmann* (2001), *Wilcock* und *Crowe* (2003) und *Recking* (2010). Für die hier präsentierten Simulationen wurden die Berechnungen mit der Formel von *Rickenmann* (2001), modifiziert für fraktionsweisen Transport, durchgeführt:

$$\Phi_{bi} = 3.1 \left( \frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} \frac{\sqrt{\theta_{i,r}} (\theta_{i,r} - \theta_{ci,r})}{\sqrt{s-1}} Fr \quad (2a)$$

$$q_b = \sum q_{bi}, \text{ summiert über die Anzahl Kornfraktionen} \quad (2b)$$

Dabei ist  $\Phi_{bi} = q_{bi} / [F_i [(s-1) g D_i^{3\gamma}]]^{-0.5}$  die dimensionslose Geschiebetransportrate pro Kornfraktion,  $F_i$  der relative Anteil der Kornfraktion  $i$  (an der Deckschicht-Kornverteilung für  $D > 2$  mm) mit  $D_i$  als deren mittlere Korngrösse,  $D_{30}$  und  $D_{90}$  charakteristische Korndurchmesser, wobei jeweils 30% respektive 90% des Gewichtsanteils des Sohlenmaterials feiner sind,  $q_{bi}$  die volumetrische Geschiebetransportrate pro Einheitsbreite und Kornfraktion,  $s = \rho_s / \rho$  das Verhältnis von Feststoffdichte ( $\rho_s$ ) zur Dichte des Fluids ( $\rho$ ),  $Fr$  die Froude-Zahl,  $\theta_{i,r} = r_h S_{red} [(s-1) D_i]^{-1}$  die dimensionslose Sohlenschubspannung und  $S_{red}$  das reduzierte Energieliniengefälle nach *Rickenmann* und *Recking* (2011), siehe auch *Nitsche et al.* (2011, 2012).  $q_b$  ist die volumetrische Geschiebetransportrate

pro Einheitsbreite. Die kritische dimensionslose Sohlenschubspannung bei Transportbeginn  $\theta_{ci}$  wird mit einer sogenannten Versteckfunktion entweder mit einem Potenzansatz (*Parker*, 2008) gemäss Gl. (3a) oder dem Ansatz nach *Wilcock* und *Crowe* (2003) gemäss Gl. (3b, 3c) wie folgt berechnet:

$$\theta_{ci} = \theta_{c50} (D_i / D_{50})^{-\gamma} \quad (3a)$$

$$\theta_{ci} = \theta_{c50} (D_i / D_m)^{-(1-b)} \quad (3b)$$

$$b = 0.67 / [1 + \exp(1.5 - D_i / D_m)] \quad (3c)$$

$$\theta_{c50} = 0.15 S^{0.25} \quad (3d)$$

Dabei ist  $D_{50}$  die mediane Korngrösse und  $D_m$  die geometrisch mittlere Korngrösse des Oberflächenmaterials (Deckschicht) und  $\gamma$  ein Exponent zwischen 0 und 1. Der Exponent  $b$  ergibt nach Gl. (3c) angenähert Werte von  $b = 0.12$  für  $(D_i / D_{50}) < 1$  und  $b = 0.67$  für  $(D_i / D_{50}) \geq 3$ . Die kritische dimensionslose Sohlenschubspannung bei Transportbeginn  $\theta_{c50}$  wird mit dem empirischen Ansatz von *Lamb et al.* (2008) gemäss Gleichung (3d) berechnet, wobei in *sedFlow* zusätzlich ein minimaler Wert für  $\theta_{c50, \min}$  definiert werden kann (da Gl. 3d für kleine Gerinnegefälle unrealistisch kleine Werte für  $\theta_{c50}$  ergibt). Damit die Berechnung konsistent ist, wird in Gleichung (2a)  $\theta_{ci,r} = \theta_{ci} (S_{red} / S)$  eingesetzt; damit variiert  $\theta_{ci,r}$  mit dem Abfluss, im Gegensatz zum Ansatz in *Nitsche et al.* (2011, 2012), worin für  $\theta_{c,r}$  ein abflussunabhängiger Wert verwendet wird.

In *sedFlow* wird die Zusammensetzung der Oberflächen- und Unterschicht laufend neu berechnet. Im Modell können auch Schwellen im Gerinne definiert werden, welche als Fixpunkte im Längenprofil für die Sohlenlage oberhalb davon wirken (sofern die Schwelle von unterstrom her nicht einsedimentiert wird), während die Sohlenlage unterhalb davon entsprechend dem Geschiebetransport angepasst wird. Die Beobachtungen zu den Sohlenänderungen und den davon abgeleiteten transportierten Geschiebefrachten beinhalten auch ein Porenvolumen. Deshalb ist bei der Darstellung der Simulationsergebnisse für die Sohlenänderungen und Geschiebefrachten ein angenommener Porenanteil von 30% eingerechnet. Eine detailliertere Beschreibung zu *sedFlow* findet sich in *Heimann et al.* (2014a), worin u.a. auch der Kornaustausch zwischen Oberflächen- und Unterschicht beschrieben ist.

Für die Einspeisung von fluvial transportiertem Sediment werden an den

Modellrändern die Transportkapazitäten entsprechend dem aktuellen Abfluss und entsprechend Gefälle, Gerinnebreite und Kornverteilung in einer Schlüsselstrecke berechnet. Hierbei passt sich die Kornverteilung des eingespeisten Sediments dem aktuellen Abfluss an. Um Sediment auch unabhängig vom aktuellen Abfluss beispielsweise im Fall von Ufererosionen einspeisen zu können, lassen sich an beliebigen Punkten Sedimentganglinien als Input definieren. Hierbei bleibt die Kornverteilung des eingespeisten Sediments konstant. Für eher plötzliche Einspeisungen von Sediment, beispielsweise im Fall von Murgängen, lässt sich auch ein definiertes Sedimentvolumen mit festgelegter Korngrößenverteilung zu einem bestimmten Zeitpunkt an einer beliebigen Stelle in die modellierte Untersuchungsstrecke einfügen.

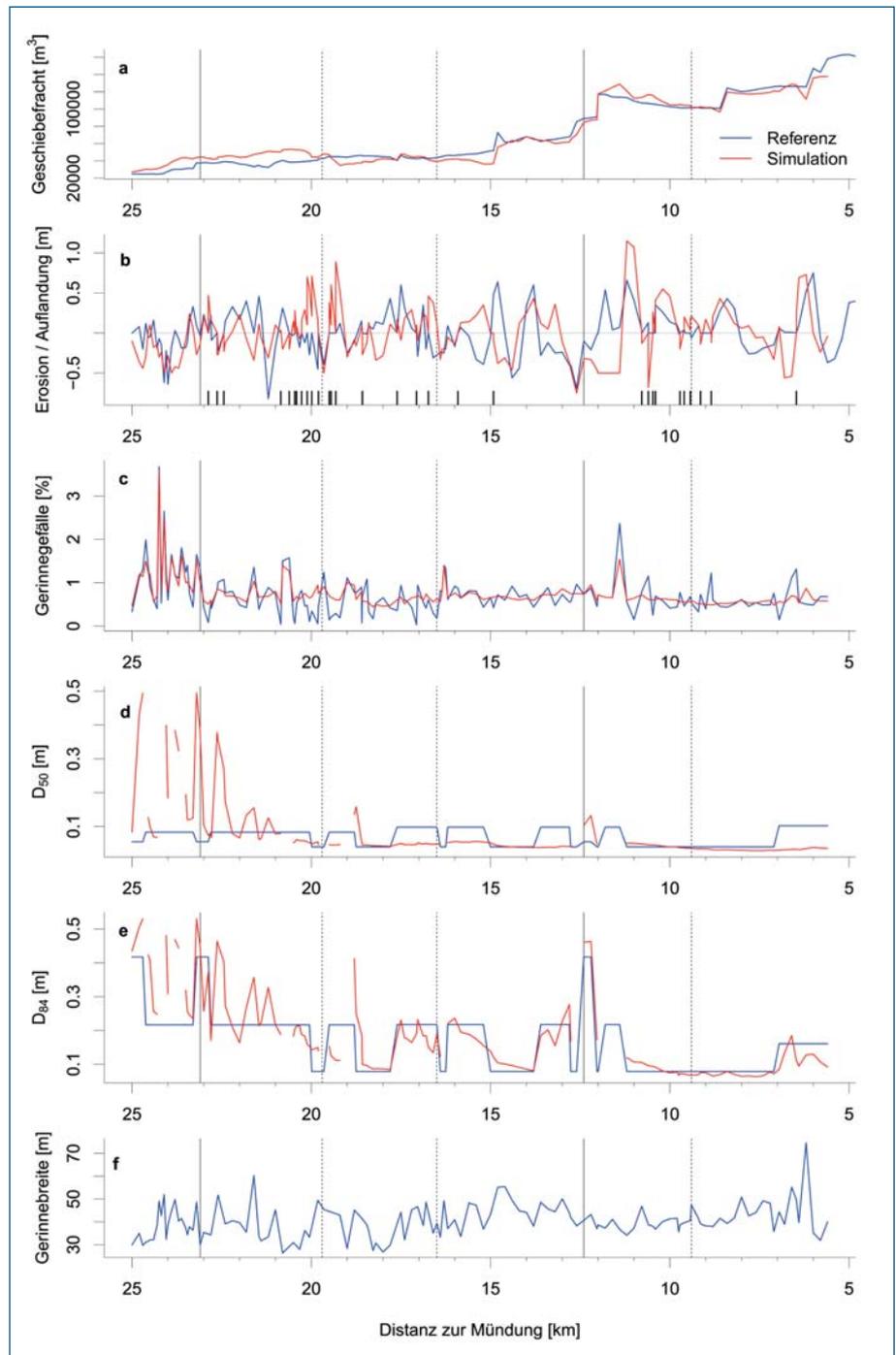
### 3. Ergebnisse der Simulationen für die Eichperiode

Für die Modelleichung in der Kleinen Emme und im Brenno wurde versucht, die Beobachtungen zum Geschiebetransport für die Eichperiode so gut wie möglich durch die Simulationen mit *sedFlow* zu reproduzieren, d.h. sowohl die Geschiebefracht als auch die Sohlenveränderungen möglichst gut abzubilden. Dabei wird durch die Wahl der Transportformel sowie des Grenzwertes  $\theta_{c50,min}$  in erster Linie das Niveau des Geschiebetransportes beeinflusst, d.h. vor allem die Geschiebefracht. In zweiter Linie werden die Sohlenveränderungen bzw. die lokalen (abschnittswisen) Änderungen des Transportverhaltens durch die Wahl der Versteckfunktion und des entsprechenden Exponenten (z.B. Gl. 3a), durch die Anfangskornverteilung sowie durch die repräsentative Gerinnebreite bestimmt. In Situationen mit nicht gut definierter Breite (einige Abschnitte im Brenno) wurde diese im Sinne eines Eichparameters variiert.

Die Güte der während der Optimierung erhaltenen Simulationsergebnisse für die Eichperiode wurde im Wesentlichen anhand der gemessenen Sohlenveränderungen (Bilder 6b, 8b) sowie anhand der Entwicklung der Geschiebefracht über die Untersuchungsstrecke (Bilder 6a, 8a) visuell beurteilt.

#### 3.1 Kleine Emme

Für die Simulationsstrecke in der Kleinen Emme und für die Eichperiode 2000 bis 2005 sind die meisten Rahmenbedingungen für den Geschiebetransport relativ gut bekannt. Mit den zwei BAFU-Abfluss-



**Bild 6. Kleine Emme, Simulationsergebnisse der Best-Variante (mit Formeln 1a, 2a, 3b,c, 3d mit  $\theta_{c50,min} = 0.06$ ) für die Kalibrierungsperiode von 2000 bis 2005. Dargestellt sind die akkumulierte Geschiebefracht, die Sohlenveränderung bzw. die Erosion und Auflandung, das Gerinnegefälle, die charakteristischen Korngrößen  $D_{50}$  und  $D_{84}$  sowie die Gerinnebreite entlang der Untersuchungsstrecke.**

messstationen bestehen bei der Hydrologie nur geringe Unsicherheiten. Neben den Querprofilvermessungen sind die Seitenerosionen infolge des Hochwassers 2005 durch die Ereignisanalyse gut quantifiziert, und wegen der häufigen Geschiebeentnahmen im Mündungsbereich ist der Geschiebeaustrag bekannt. Damit ist die Geschiebebilanz gut bestimmt. Da die Kleine Emme in der Untersuchungsstrecke weitgehend kanalisiert ist, sind die Querprofile und die Gerinnebreite ebenfalls gut

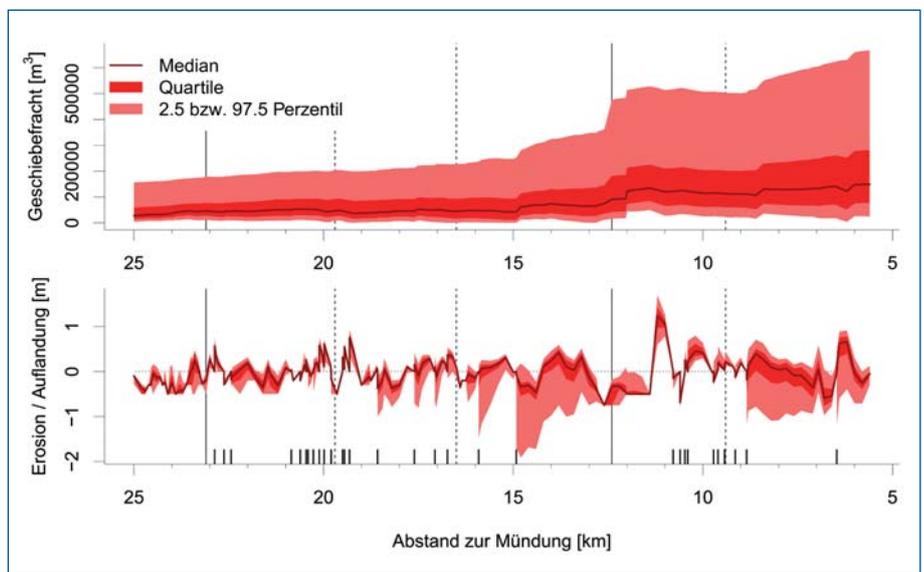
definiert. Neben der Wahl der Geschiebetransportformel und der Festlegung der Bedingungen beim Transportbeginn (Versteckfunktion, kritische Schubspannung) verbleibt somit im Wesentlichen die Kornverteilung, welche für die Optimierung der Simulationsergebnisse in einem plausiblen Bereich variiert wurde.

Bei der Kleinen Emme wurde die Abflussveränderung entlang des Gerinnes wegen der eher geringen Gerinnegefälle mit der kinematischen Welle nach

Liu und Todini (2002) und einem impliziten numerischen Verfahren (Option i) unter Verwendung des Fließgesetzes von Manning-Strickler (Gl. 1b) gerechnet. Mit den Geschiebetransportformeln von Rickenmann (2001), in Kombination mit dem reduzierten Energieliniengefälle nach Rickenmann und Recking (2011), konnten für die Kleine Emme plausible Resultate erreicht werden, insbesondere was das generelle Niveau der transportierten Geschiebefrachten betrifft. Um die lokalen Änderungen über die Untersuchungsstrecke besser abbilden zu können, wurden vor allem die Kornverteilungen in den «homogenen» Gerinneabschnitten variiert. Bei diesem Teil der Optimierung handelte es sich zu einem gewissen Grad um eine Feinjustierung. Für die Bestvariante wurde der Exponent der Versteckfunktion nach dem Ansatz von Wilcock und Crowe (2003) gewählt (Gl. 3b,c) und der Wert  $\theta_{c50,min} = 0.06$  gesetzt; die Versteckfunktion gemäss Gl. (3a) mit unterschiedlichen Exponenten (z.B. mit  $y = 0.8$  oder mit  $y = 0$ , d.h. ohne Versteck-Effekte) ergab viel weniger plausible Resultate.

Vergleicht man die Simulationsergebnisse der Bestvariante mit den Beobachtungen, so wird die Geschiebefracht insgesamt sehr gut abgebildet (Bild 6a), während die Sohlenänderungen nur teilweise zufriedenstellend simuliert werden (Bild 6b). Die Kornverteilungen (charakterisiert durch  $D_{50}$  und  $D_{84}$  in den Bildern 6d und 6e) sind über weite Bereiche recht ähnlich für den Anfangs- und Endzustand. Auf den obersten ca. 4 km ergibt sich bei der Modellierung eine z.T. deutliche Vergrößerung, welche auf die vielen Felsstrecken in diesem Abschnitt (mit einer dünnen Alluvionsschicht im Modell) zurückzuführen ist.

Für die Sensitivitätsanalyse wurden die Werte der Eingabedaten, im Vergleich zur Bestvariante, für die Kornverteilungen, die kritische Schubspannung bei Transportbeginn ( $\theta_{c50,min}$ ), die Gerinnebreiten und die Abflussganglinien um +/- 30% variiert. Für die Änderung der Kornverteilung wurden nur die mittleren Durchmesser der Kornfraktionen verändert, während die relativen Anteile der Kornfraktionen an der gesamten Kornverteilung beibehalten wurden. In Bild 7 sind die Geschiebefrachten und die Sohlenveränderungen von 81 Simulationen abgebildet. Jeder variable Parameter (Referenzwert, Minimal- und Maximalwert) aus Kornverteilung, kritischer Schubspannung, Gerinnebreite sowie Ganglinie wurde mit allen anderen kombiniert. Betrachtet man die beiden Quartile



**Bild 7. Kleine Emme, Sensitivitätsanalyse: Berechnete Geschiebefrachten (oben) und Sohlenveränderungen (unten) aufgrund von 81 Simulationen mit variablen Eingangsparametern für die Modellierung mit sedFlow.**

(25%–75% aller simulierten Werte), so ist die Sensitivität der genannten Parameter auf die absoluten Sohlenveränderungen eher gering. Bei den extremen Perzentilen (2.5% bzw. 97.5 % aller simulierten Werte) ergeben sich in den Abschnitten km 16–11 sowie km 9–6 etwas stärkere Änderungen mit z.T. deutlich erhöhter Sohlenerosion v.a. in lokal steileren Strecken. Bei den Geschiebefrachten ergibt sich, bezogen auf einen mittleren Wert von ca. 62 000 m<sup>3</sup> (im Bereich von km 13), bei der Bestvariante für das 75%-Perzentil eine relative Erhöhung um einen Faktor 2.1 und für das 97.5%-Perzentil um einen Faktor 5.7.

### 3.2 Brenno

Für die Simulationsstrecke im Brenno, während der Eichperiode 1999 bis 2009, sind die Rahmenbedingungen für den Geschiebetransport generell weniger gut bekannt als für die Kleine Emme. Dies betrifft erstens die Hydrologie, dadurch dass nur eine Abflussmessstation am Ende der Untersuchungsstrecke vorhanden ist und der beträchtliche Einfluss der Wasserkraftnutzung zu Unsicherheiten bezüglich der Abflüsse aus den Teileinzugsgebieten führt. Zweitens ist für die Bestimmung der Geschiebebilanz weder der Eintrag am oberen Modellende noch der Austrag in den Ticino bekannt, und die wichtigen seitlichen Einträge aus dem Riale Riasco sowie dem Ri di Soi können nur grob quantifiziert werden. Drittens ist die Abschätzung einer repräsentativen Gerinnebreite (eines Rechteckprofils) in einigen Abschnitten mit grösseren Unsicherheiten verbunden. Wir nehmen jedoch an, dass die gemessenen Korngrößenverteilungen etwas zu-

verlässiger sind, da die Zugänglichkeit der Gerinnesohle generell besser war als in der Kleinen Emme.

Für alle Querprofile wurde die mittlere Sohlenlage des Brenno berechnet. Dabei wurden jeweils nur die Punkte berücksichtigt, die bei den Vermessungen der beweglichen Sohle zugeordnet wurden (unsere eigenen Berechnungen ergaben z.T. Unterschiede zu denjenigen in den dokumentierten Querprofilunterlagen). Die Querprofilbreite ist aufgrund der natürlichen Dynamik des Brenno vor allem in Ablagerungs- oder Umlagerungsstrecken sehr unsicher. Neben der Wahl der Geschiebetransportformel und der Festlegung der Bedingungen beim Transportbeginn (Versteckfunktion, kritische Schubspannung) wurden für den Brenno daher für die Optimierung der Simulationsergebnisse primär die repräsentativen Gerinnebreiten angepasst, d.h. in einem plausiblen Bereich variiert. Diese Anpassung betrifft insbesondere die folgenden Abschnitte: km 0.92, km 4–4.5, km 9.3–10.5, km 14.58–16.05, km 17.8–18.5, km 20.11 sowie km 21.4–21.8, und umfasst total ca. 5.6 km oder etwa 23% der gesamten Simulationsstrecke.

Beim Brenno wurde die Abflussveränderung entlang des Gerinnes wegen der grösseren Gerinnegefälle und kleineren relativen Abflusstiefen mit der VPE Gl. (1a) und mit der Annahme Normalabfluss und einer vereinfachten hydraulischen Berechnung (Option iii) gerechnet. Bei der Optimierung zeigte sich, dass für den Brenno mit der Geschiebetransportformel von Rickenmann (2001), in Kombination mit dem reduzierten Energieliniengefälle nach Ri-

ckenmann und Recking (2011), plausible Resultate erreicht werden konnten, insbesondere was das generelle Niveau der transportierten Geschiebefrachten betrifft. Dabei wurde für diese Bestvariante ohne Versteckfunktion gerechnet (d.h. Gl. 3a mit einem Exponenten  $\gamma = 0$  verwendet), und der Wert  $\theta_{c50,min} = 0.10$  gesetzt. Berechnungen mit der Transportformel von Wilcock und Crowe (2003) ergaben von km 20 bis km 5 generell ein zu tiefes Niveau der simulierten Geschiebefrachten, während

von km 5 bis km 0 plausible Resultate erreicht wurden. Vergleicht man die Simulationsergebnisse der Bestvariante mit den Beobachtungen, so wird die Geschiebefracht insgesamt gut abgebildet (Bild 8a). Eine Ausnahme stellt der Bereich unterhalb der Geschiebeentnahme (Baggerung bei km 9) dar, welche in *sedFlow* nicht berücksichtigt wurde. Die Sohlenänderungen werden ebenfalls zufriedenstellend simuliert (Bild 8b). Die Kornverteilungen (charakterisiert durch  $D_{50}$  und  $D_{84}$  in Bild 8d, 8e)

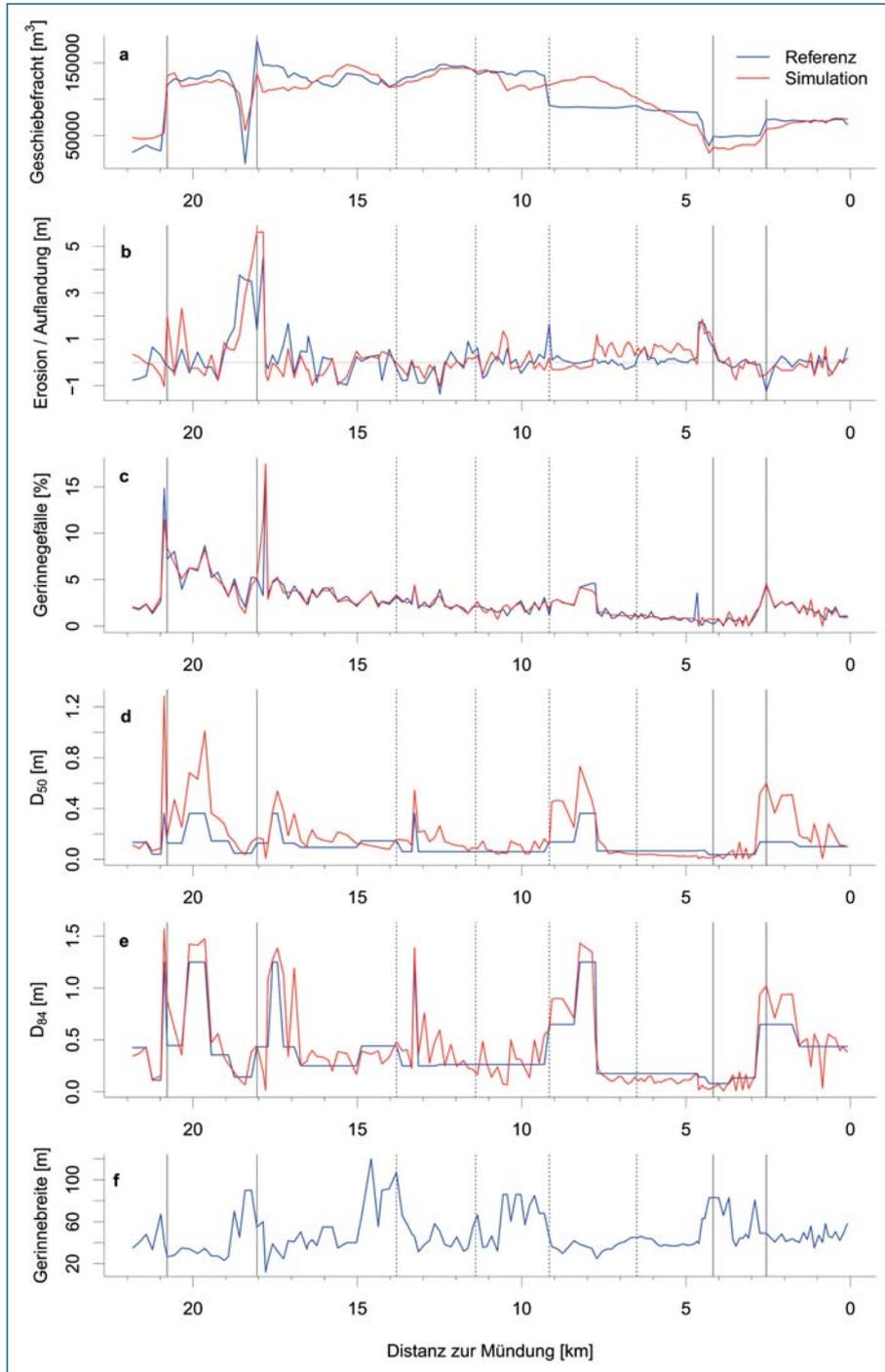
sind über viele Bereiche ähnlich für den Anfang- und Endzustand. Dabei basiert die Anfangskornverteilung auf den Feldaufnahmen. Hingegen musste vor allem bei lokalen Verteilungen (Knickpunkten im Längsprofil) eine im Vergleich zur Linienprobe größere Anfangskornverteilung gewählt werden, damit diese Knickpunkte in der Simulation nicht zu stark erodierten und das lokale Längsprofil ausgeglichen wurde. An diesen Orten ist auch z.T. eine weitere Vergrößerung für den Endzustand der Kornverteilungen festzustellen.

Für die Sensitivitätsanalyse wurden die Werte der Eingabedaten, im Vergleich zur Bestvariante, für die Gerinnebreiten, die Kornverteilungen, die kritische Schubspannung bei Transportbeginn ( $\theta_{c50,min}$ ), die Abflussganglinien sowie die seitlichen Sedimenteinträge alle um +/- 30% variiert. Jeder variable Parameter (Referenzwert, Minimal- und Maximalwert) aus Gerinnebreite, Kornverteilung, kritischer Schubspannung, Ganglinie sowie Sedimenteintrag wurde mit allen anderen kombiniert und somit 243 Simulationen durchgeführt (keine Abbildung). Bezogen auf die beiden mittleren Quartile (25%–75% aller simulierten Werte) ist die Sensitivität der genannten Parameter auf die absoluten Sohlenveränderungen eher gering. Bei den Geschiebefrachten ergibt sich, bezogen auf einen mittleren Wert von ca. 125 000 m<sup>3</sup> (im Bereich von km 9), bei der Bestvariante für das 75%-Perzentil eine relative Erhöhung um einen Faktor 1.5 und für das 97.5%-Perzentil um einen Faktor 2.6. Die relativen Änderungen bei den Geschiebefrachten sind somit deutlich geringer als bei der Kleinen Emme, was daran liegen dürfte, dass die Geschiebefrachten im Brenno auf einem erheblich höheren Niveau liegen als in der Kleinen Emme.

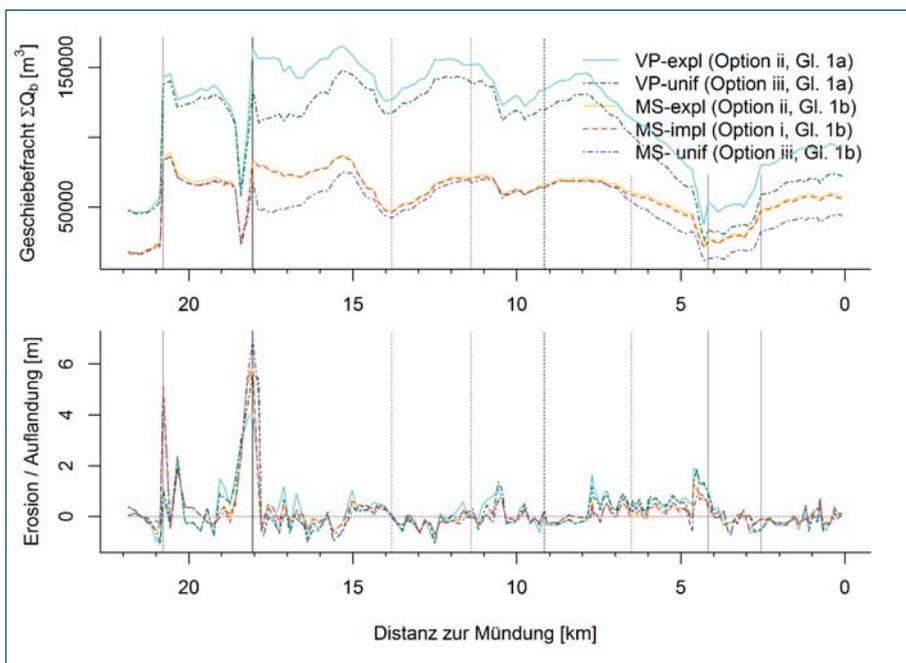
#### 4. Weitere Untersuchungen

##### 4.1 Einfluss der Abflussberechnung auf die Simulationsergebnisse für die Eichperiode

Für den Brenno wurde untersucht, inwieweit sich drei unterschiedliche Optionen der Abflussberechnung auf die Simulationsergebnisse auswirken (s. auch Abschnitt 2.3): (i) flow routing mittels kinematischer Welle und implizitem Berechnungsverfahren kombiniert mit Gl. (1b); (ii) flow routing mittels kinematischer Welle und explizitem Berechnungsverfahren kombiniert mit Gl. (1a) oder (1b); (iii) hydraulische Berechnung mit Annahme Normalabfluss und einer vereinfachten hydraulischen Berechnung mit Gl. (1a) oder (1b). Diese Berechnungen für



**Bild 8. Brenno, Simulationsergebnisse der Best-Variante (mit Formeln 1a, 2a, 3a mit  $\gamma = 0$ , 3d mit  $\theta_{c50,min} = 0.10$ ) für die Kalibrierungsperiode von 1999 bis 2009. Dargestellt sind die akkumulierte Geschiebefracht, die Sohlenveränderung bzw. die Erosion und Auflandung, das Gerinnegefälle, die charakteristischen Korngrößen  $D_{50}$  und  $D_{84}$  sowie die Gerinnebreite entlang der Untersuchungsstrecke.**



**Bild 9. Vergleich der Simulationsergebnisse mit «sedFlow» bei Anwendung eines flow routing Ansatzes (Gl. 1b und kinematische Welle implizit, «MS-impl»); Gl. 1a oder 1b und kinematische Welle explizit («VP-expl» bzw. «MS-expl») bzw. mit Annahme Normalabfluss und einer vereinfachten hydraulischen Berechnung (Gl. 1a oder 1b, «VP-unif» bzw. «MS-unif»). Eine genauere Beschreibung der Optionen der hydraulischen Berechnungen findet sich in Abschnitt 2.3 im Text (VP = variable power Gl. 1a, MS = Manning-Strickler Gl. 1b).**

den Brenno wurden für alle Optionen mit den gleichen Eingabeparametern durchgeführt wie bei der Bestvariante für die Eichperiode, welche mit Option (iii) und Gl. (1a) berechnet wurde, und der Vergleich der Resultate ist in Bild 9 dargestellt.

Die simulierten Geschiebefrachten unterscheiden sich sehr deutlich, je nachdem ob Gl. (1a) oder Gl. (1b) verwendet wird. Beim hier verwendeten Fließgesetz von Manning-Strickler (Gl. 1b) ist der Rauigkeitsbeiwert nach Strickler ( $K_{st}$ ) nur eine Funktion des Korndurchmessers und ist vergleichbar mit dem Ansatz von Jäggi (1984) mit  $K_{st} = 21/(D_{90}^{0.167})$ . Dieses Fließgesetz entspricht eher der Kornrauigkeit und unterschätzt somit den gesamten Fließwiderstand z.T. deutlich. Dadurch ergeben sich mit diesem Ansatz im Durchschnitt kleinere Abflusstiefen und damit geringere Transportraten als mit der variable power equation, VPE (Gl. 1a), welche den erhöhten Fließwiderstand bei kleineren relativen Abflusstiefen besser abbildet. Bezüglich der simulierten Geschiebefrachten bestehen hingegen für ein gegebenes Fließgesetz nur mässige oder geringe Unterschiede zwischen den Optionen (i), (ii) und (iii). Diese Resultate weisen darauf hin, dass mit Berechnungen ohne flow routing (Option iii) in Gebirgsflüssen plausible Resultate erhalten werden könnten. Solche Simulationen laufen viel schneller

ab, und sie erlauben in Anbetracht anderer Unsicherheiten bei der Berechnung des Geschiebetransportes die Durchführung von Sensitivitäts- und Szenarienanalysen unter Berücksichtigung vieler Varianten innerhalb von kurzer Zeit.

#### 4.2 Hochwasserszenarien und Geschiebetransport

Auch hier werden Untersuchungen für den Brenno vorgestellt. Für die Bildung möglicher zukünftiger Hochwasserszenarien wurden die Form der Abflussganglinie, das Abflussvolumen und die Hochwasserspitze variiert. Für die Form der Ganglinien wurden drei Varianten gewählt: eine front-, eine mitten- und eine schlussbetonte Form. Dafür wurden die historischen Ganglinien vom Juli 1987, September 2008 und November 2002 der Abflussmessstation Loderio verwendet. Der Grenzabfluss für Start und Ende wurde auf  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  festgelegt. Für die Abflussvolumina wurde die Hochwasserfracht des Ereignisses 1987 als Referenzwert verwendet und mit neun verschiedenen Faktoren in 2er-Potenzschritten von  $2^{-0.2} = 0.87$  bis  $2^{0.6} = 1.52$  variiert. Für die Abflussspitzen wurde das 100-jährliche Ereignis als Referenz genommen (mit  $HQ_{100} = 497 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und in neun Stufen zwischen einem  $HQ_{30}$  und  $HQ_{300}$  variiert (mit  $HQ_{30} = 408 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $HQ_{300} = 577 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Mit den drei unterschiedlichen

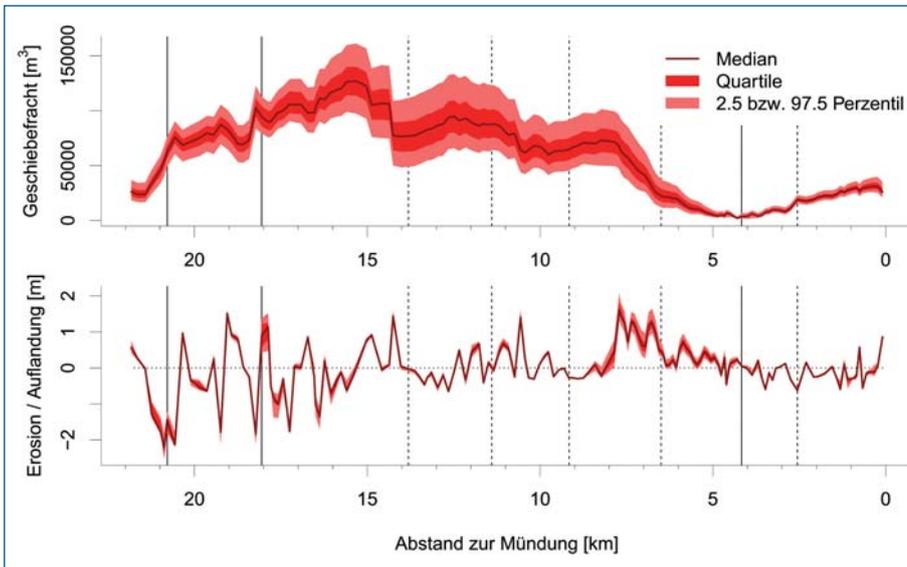
Formen der Hochwasserganglinien mit verschiedenen Abflussfrachten und -spitzen wurden anschliessend die potenzielle Geschiebeverfrachtung und Sohlenveränderung gerechnet.

Als Grundlage für die Gerinnegeometrie wurde die Querprofilvermessung von 2009 verwendet. Es wurde ohne seitliche Sedimenteinträge durch Murgänge gerechnet. Nur die Zubringer, welche fluvial Material liefern (Brenno della Greina, Brenno del Lucomagno sowie Lesgiüna), wurden berücksichtigt. Dabei zeigte sich, dass die Form der Ganglinie für die drei untersuchten Hochwasserereignisse praktisch keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat. Entscheidend für den Geschiebetransport sind bei diesen Ereignissen die Abflussfracht und -spitze. Die Sohlenveränderung reagiert nicht sensitiv auf einen veränderten Abfluss, während sich die berechneten Geschiebefrachten viel deutlicher unterscheiden. Hier sind die Resultate für die mittenbetonte Form der Ganglinie gezeigt (Bild 10), basierend auf insgesamt 81 Simulationsrechnungen (für je 9 Volumen mit je 9 Abflussspitzen kombiniert). Bei diesen Modellierungen wurde angenommen, dass keine Ausuferungen aus dem Gerinne stattfinden; aus dem Vergleich der simulierten Abflussquerschnitte und Sohlenveränderungen mit den effektiven Querprofilen können jedoch kritische Gerinneabschnitte mit Ausuferungsgefahr identifiziert werden.

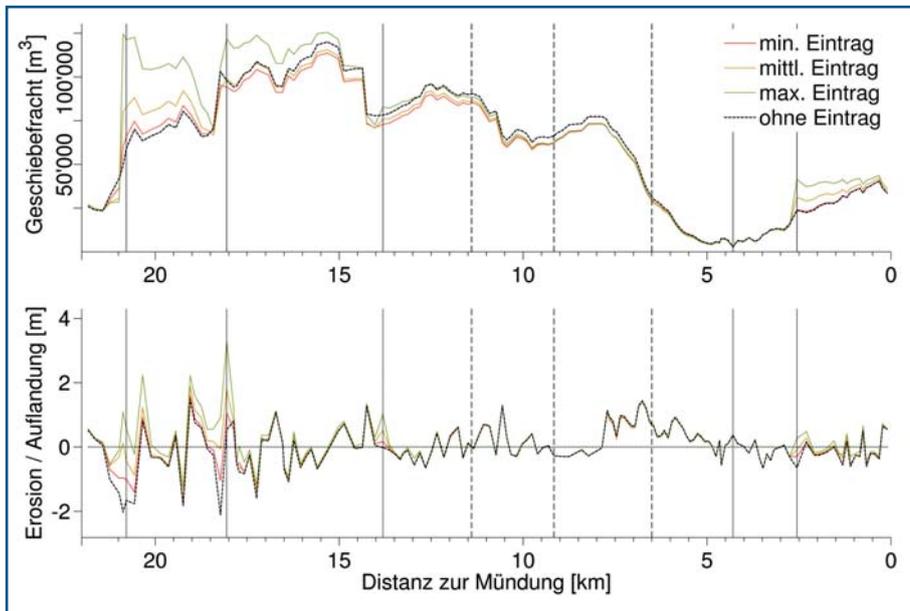
Ähnliche Untersuchungen wurden auch für die Kleine Emme durchgeführt. Für diesen Fall ergeben sich prinzipiell ähnliche Resultate. Während sich die unterschiedlichen Abflussganglinienformen nur relativ schwach auf die Sohlenänderungen auswirken, werden die Geschiebefrachten viel stärker beeinflusst. Grundsätzlich zeigen sich bei den Hochwasserszenarien ähnliche Auswirkungen wie bei der Sensitivitätsanalyse.

#### 4.3 Hochwasserszenarien und Einfluss seitlicher Geschiebeeinträge

Um realistische Szenarien bezüglich des Geschiebetransportes zu erhalten, wurden für den Brenno in einem weiteren Schritt auch Feststoffeinträge aus den Seitenbächen berücksichtigt. Für die murgangfähigen Wildbäche wurden bei der Szenarienbildung ein minimaler, ein mittlerer und ein maximaler Eintrag in das Hauptgerinne angenommen (Tabelle 1). Die Annahmen basieren auf den Daten zur Geschiebelieferung während der Eichperiode (BAFU-GHO Datenbank Solid; Storme



**Bild 10.** Darstellung der berechneten Geschiebefrachten (oben) und Sohlenveränderungen (unten) für mögliche Hochwasserszenarien im Brenno. Hier wurde für die Grundvariante die Form der Hochwasserganglinie vom Juli 1987 verwendet. Dargestellt sind die Resultate von 81 Simulationen (mit 9 Werten für die Abflussfracht und 9 Werten für die Hochwasserspitze).



**Bild 11.** Berechnung von Szenarien für unterschiedliche Geschiebeeinträge aus den Seitenbächen beim Brenno für ein hundertjährliches Hochwasser (mit einer Form der Hochwasserganglinie wie im November 2002). Dargestellt sind Geschiebefrachtung (oben) und Sohlenveränderung (unten). Für die verschiedenen Seitenbäche wurde jeweils mit einem minimalen, einem mittleren und einem maximalen, kontinuierlichen Geschiebeeintrag gerechnet. Die Geschiebeeinträge wurden für den Riale Riasco, Ri di Soi, Ri di Prugiasco sowie Crenone variiert (vgl. Bild 4 für Verortung der Seitenbäche). (Am oberen Modellrand und beim Seitenbach Lesgiüna wird der Geschiebeeintrag fluvial berechnet und ist daher nicht variabel.)

Datenbank). Zusätzlich zu den während der Eichperiode simulierten Seitenbächen wird der Ri di Prugiasco (mit der Annahme eines bereits gefüllten Geschiebesammlers) für die Szenarien berücksichtigt. Bei den nicht-murgangfähigen Zubringern wird der Eintrag fluvial vom Modell berechnet. Für die Szenarienbildung mit Berücksichtigung der Seiteneinträge wurde hier

die schlussbetonte Ganglinienform vom November 2002 verwendet und mit einer Hochwasserspitze gemäss  $HQ_{100}$  sowie mit einer mittleren Wasserfracht (Faktor 1.15) kombiniert. Bezüglich der zeitlichen Verteilung der Sedimenteinträge wurden zwei Varianten geprüft. In einem Fall (a) wurden die Einträge kontinuierlich über das Hochwasserereignis verteilt einge-

speist, in einem zweiten Fall (b) wurden sie instantan zu einem Zeitpunkt eingegeben. Hier sind die Resultate für den Fall (a) gezeigt, wobei die angenommenen Seiteneinträge (minimal, mittel und maximal gemäss Tabelle 1) proportional zum Abfluss eingespeist wurden (Bild 1). Als Hauptresultat ergab sich, dass sich die seitlichen Einträge im Brenno flussabwärts umso weiter auf die Geschiebefracht auswirken, je grösser sie sind. Je nach lokalen Verhältnissen (Gerinneneigung, Transportkapazität, Sedimenteintrag) kann es flussabwärts zu einer Erhöhung oder einer Verminderung des Geschiebetransportes kommen. Die Auswirkungen auf die Sohlenveränderungen scheinen dagegen mehr auf die lokale Umgebung beschränkt zu sein. Grössere Ablagerungen bei der Mündung des Seitenbaches können flussaufwärts davon zu einer Verringerung des Wasserspiegelgefälles und damit zu einer Verminderung der Geschiebefracht führen.

## 5. Diskussion

### 5.1 Simulationsresultate für die Eichperiode

Bei den Simulationen mit der Transportformel nach Rickenmann (2001) besteht für die Kleine Emme eine Tendenz, dass Unterschiede in den lokalen Gefällen über die Simulationsperiode teilweise ausgeglichen werden (Bild 6c); beim Brenno betrifft dies einige steilere Abschnitte und die Strecke von km 8 bis km 4.5 (Bild 8c). Vor allem bei flacheren und kürzeren Gerinneabschnitten können bei massivem Geschiebetransport die simulierten Sohlenänderungen so gross sein, dass die Gefällsänderungen betragsmässig in einem ähnlichen Bereich sind wie die Gefällsunterschiede zwischen nachfolgenden Gerinneabschnitten, womit die in den Transportgleichungen angelegte Tendenz zum Gefällsausgleich sichtbare Auswirkungen zeigt. Für die Bestvarianten wurde beim Brenno die Transportformel nach Rickenmann (2001) mit der Versteckfunktion Gl. (3a) mit  $y = 0$  kombiniert (d.h. es sind keine Versteckeffekte aktiv, und die minimale Schubspannung zur Mobilisierung der Partikel hängt linear vom Korndurchmesser ab) und bei der Kleinen Emme wurde sie mit der Versteckfunktion nach Wilcock und Crowe (2003) kombiniert. Der verwendete Wert von  $\theta_{c50,min} = 0.10$  für den Brenno mag auf den ersten Blick als hoch erscheinen. Nach neueren Untersuchungen liegt er aber durchaus noch in einem plausiblen Bereich (Bunte et al., 2013). Es ist hier darauf hinzuweisen, dass das

Transportverhalten bei relativ geringer Belastung (Schubspannung) der Gerinnesohle im Bereich des Transportbeginns immer noch relativ schlecht bekannt ist, und auch grosse Unsicherheiten bezüglich der Wahl einer geeigneten Versteckfunktion bestehen.

Es kann vermutet werden, dass die geringen beobachteten Sohlenänderungen in der Kleinen Emme weitgehend im Bereich des «Rauschens» liegen im Bezug auf die Unsicherheit der relativ einfachen Geschieberegnergebnisse. Beim Brenno hingegen sind die beobachteten Sohlenänderungen grösser und liegen daher eher in einem Bereich, welcher durch die Simulationen einigermaßen zuverlässig abgebildet werden kann.

## 5.2 Weitere Feststellungen

Die Kleine Emme weist innerhalb der obersten ca. 4 km der Simulationsstrecke viele Felsstrecken auf, wobei im Flussbett aus Nagelfluh an vielen Orten deutliche Rinnen herausgerodiert wurden. Dies führt zu Rauigkeitselementen in der Grössenordnung von wenigen Dezimetern. Daher musste dort für die Bestvariante eine relativ grobe Anfangskornverteilung gewählt werden (*Bild 6e*); die Endkornverteilung wurde tendenziell noch gröber, was mit der dünnen Alluvionsschicht im Modell zusammenhängt.

Beim Brenno musste wie erwähnt vor allem bei lokalen Verteilungen (konvexen Knickpunkten im Längsprofil) eine eher grobe Anfangskornverteilung gewählt werden (*Bilder 8c, 8e*). Alternativ konnte an diesen Stellen auch eine Felsstrecke definiert werden, damit diese Knickpunkte in der Simulation nicht zu stark erodierten und das lokale Längsprofil nicht ausgeglichen wurde. Die Wahl einer groben Anfangskornverteilung kann dadurch gerechtfertigt werden, dass bei diesen lokalen Steilstrecken eine beträchtliche Anzahl (natürlicher) grober Blöcke mit einer b-Achse von ca. 1 bis 2 m (bzw. bis zu 5 m an gewissen Orten) vorhanden ist. Diese tragen zu einer Stabilisierung des Flussbettes bei und wurden durch die Linienzahlanalyse ungenügend erfasst. Rechnet man die beobachteten (flächenbezogenen) Blockkonzentrationen (mit Berücksichtigung des halben Blockvolumens, da ein beträchtlicher Anteil über der mittleren Sohle liegt) in einen volumetrischen Anteil an der Oberflächenschicht um, so ergeben sich für die fünf Abschnitte mit lokalen Verteilungen Werte von bis zu 25% unterhalb des Riale Riasecio bzw. von ca. 10% in den anderen Steilstrecken. In *sedFlow*

wird die Makrorauigkeit mit einem einfachen Ansatz über das  $D_{84}$  berücksichtigt. Ergänzt man bei den lokalen Verteilungen die Linienproben um die beobachteten Blockkonzentrationen und betrachtet z.B. das  $D_{90}$  als charakteristisches Rauigkeitsmass, so können die in diesen Abschnitten für die Modellierung erhaltenen Anfangs- und Endkornverteilungswerte für  $D_{84}$  (*Bild 8e*) als nicht unplausibel betrachtet werden. Für eine genauere Berücksichtigung der stabilisierenden Wirkung von groben Blöcken könnten z.B. auch Ansätze von *Yager et al.* (2012) oder von *Whittaker et al.* (1988) verwendet werden, wie sie etwa in *Nitsche et al.* (2011, 2012) diskutiert sind.

Sowohl die Simulationen für die Sensitivitätsanalysen (*Bild 7*, Kleine Emme) als auch für die Hochwasserszenarien (*Bild 10*, Brenno) zeigen, dass sich die betrachteten Änderungen in den Modellparametern viel stärker auf das Niveau der simulierten Geschiebefrachten als auf die simulierten Sohlenänderungen auswirken. Dies dürfte teilweise damit zusammenhängen, dass bei unseren Analysen die Änderungen pauschal auf die ganze Untersuchungsstrecke angewendet wurden (z.B. Abfluss, Kornverteilung und  $\theta_{c50,min}$  überall grösser) und somit die relativen Änderungen von Abschnitt zu Abschnitt ähnlich blieben. Es ist auch darauf hinzuweisen, dass sich z.B. lokale Änderungen beim Geschiebeeintrag im Brenno räumlich weiter auf die Geschiebefrachten auswirken als auf die Sohlenänderungen (*Bild 11*).

## 6. Schlussfolgerungen

Für die beiden Gebirgsflüsse Kleine Emme und Brenno konnten mit dem eindimensionalen Geschiebetransport-Simulationsprogramm *sedFlow* die Beobachtungen zu den Sohlenveränderungen und zu den Geschiebefrachten für die jeweils untersuchten Eichperioden zufriedenstellend nachgerechnet werden. Dabei wurde, neben der Wahl der Transportformel, bei der Kleinen Emme vor allem die Anfangskornverteilung des Flussbettes in einem plausiblen Bereich für die Bestvariante angepasst. Beim Brenno waren, neben der Wahl der Transportformel, der gewählte Wert der minimalen Grenzschubspannung für den Transportbeginn sowie lokale Anpassungen der Gerinnebreite in Umlagerungs- oder Ablagerungsstrecken bei der Optimierung der Simulationsergebnisse wichtig.

Es kann festgestellt werden, dass mit einem insgesamt relativ einfachen mechanistischen Geschiebetransportmodell

die generellen Trends zum beobachteten Geschiebetransport entlang der etwa 20 km langen Untersuchungsstrecken plausibel abgebildet werden konnten. Dies bestätigt die grundsätzliche Anwendbarkeit von neueren Ansätzen zur Berechnung des Geschiebetransportes in steilen Gerinnen, welche in früheren Untersuchungen mit anderen Referenzdaten ebenfalls zu plausiblen Resultaten führten (*Nitsche et al.*, 2012).

Weitere Untersuchungen sind nötig, um herauszufinden, für welche Formelkombinationen und bei welchen Gerinneverhältnissen die Simulationen bei lokalen Verteilungen eine zu starke Tendenz zur Erosion von Knickpunkten zeigen. Andere wichtigen offenen Fragen bezüglich des Geschiebetransportes in steilen Gerinnen betreffen die Wahl einer geeigneten Transportformel, die Verhältnisse beim Transportbeginn und dabei insbesondere die Wahl einer geeigneten Versteckfunktion bei der fraktionierten Berechnung.

Die aktuelle Version des Simulationsprogrammes *sedFlow* kann unter den Bedingungen der GNU General Public License (GPL) von der folgenden Seite heruntergeladen werden: [www.wsl.ch/sedFlow](http://www.wsl.ch/sedFlow)

### Danksagung

Die hier vorgestellten Untersuchungen und insbesondere die Entwicklung des Geschiebetransport-Simulationsprogrammes *sedFlow* wurden hauptsächlich im Rahmen des NFP61-Projektes SEDRIVER des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNF Projekt Nr. 4061-125975/1/2) durchgeführt. Die Arbeiten und Simulationen für den Brenno wurden parallel auch durch das BAFU-(GHO)-Projekt «Feststofftransport in Gebirgs-Einzugsgebieten» (Vertrags-Nr. 11.0026.PJ/K154-7241) unterstützt. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) sowie die Wasserbauämter der Kantone Luzern und Tessin stellen Daten zur Kleinen Emme und zum Brenno zur Verfügung. Wir danken im Weiteren *Christa Stephan* (Projektarbeit ETH/WSL), *Lynn Burkhard* (Masterarbeit ETH/WSL), *Anna Pöhlmann* (WSL) und *Christian Greber* (Masterarbeit ETH/WSL) für Beiträge zur Entwicklung und Anwendung von «*sedFlow*».

### Literatur

*Badoux, A., Rickenmann, D.* (2008): Berechnungen zum Geschiebetransport während der Hochwasser 1993 und 2000 im Wallis. «Wasser Energie Luft» 100: 217–226.  
*Badoux, A., Peter, A., Rickenmann, D., Junker, J., Heimann, F.U.M., Zappa, M., Turowski, J.M.* (2014): Geschiebetransport und Forellenhabi-

- tate in Gebirgsflüssen der Schweiz: mögliche Auswirkungen der Klimaänderung. «Wasser Energie Luft», 106: 200–209.
- Bunte, K.B., Abt, S.R., Swingle, K.W., Cenderelli, D.A., Schneider, J.M. (2013): Critical Shields values in coarse-bedded steep streams. *Water Resources Research*, 49: 1–21.
- Burkhard (2012): Simulation des Geschiebetransportes in Gebirgsflüssen während Hochwasserereignissen am Beispiel der Kleinen Emme (LU). Masterarbeit an der VAW-ETH Zürich und an der WSL Birmensdorf.
- Chiari, M., Rickenmann, D. (2010): Back-calculation of bedload transport in steep channels with a numerical model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36: 805–815.
- Ferguson, R. (2007): Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams. *Water Resources Research*, 43: W05427, doi: 10.1029/2006WR005422.
- Flussbau (2003/2005): Revitalisierung von Auenökosystemen (Risanamento dei Ecosistemi Alluvionali). Fachbericht Morphologie und Geschiebe. Flussbau AG, unveröffentlichter Bericht, im Auftrag des Kantons Tessin, Dipartimento del Territorio.
- Flussbau (2003): Geschiebetransport im Brenno. Einfluss der Murgangablagerung aus dem Ri di Soi. Flussbau AG, unveröffentlichter Bericht, im Auftrag des Kantons Tessin, Divisione delle costruzioni.
- Flussbau (2009a): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Sohlenveränderungen und Geschiebefrachten. Flussbau AG, unveröffentlichter Bericht, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Bern.
- Flussbau (2009b): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Seitenerosion. Flussbau AG, unveröffentlichter Bericht, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Bern.
- Heimann, F.U.M., Rickenmann, D., Turowski, J.M. (2014a): An efficient tool for simulating bedload dynamics in mountain streams. *Earth Surface Dynamics Discussion*, 2: 733–772, doi:10.5194/esurf-d-2-733-2014.
- Heimann, F.U.M., Rickenmann, D., Böckli, M., Badiux, A., Turowski, J.M., Kirchner, J.W. (2014b): Recalculation of bedload transport observations in Swiss mountain rivers using the model sedFlow. *Earth Surface Dynamics Discussion*, 2: 773–822, doi:10.5194/esurf-d-2-773-2014
- Hunzinger, L., Durrer, S. (2008): Seitenerosion, in: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen, Herausgegeben von Bezzola, G.R. und Hegg, C., Umwelt-Wissen, Nr. 0825, Bundesamt für Umwelt BAFU & Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bern, S. 125–136.
- HZP (2008): Kleine Emme, Geschiebehaltungstudie. Abschnitt Fontanne bis Reuss. Hunziker, Zarn & Partner AG (HZP), unveröffentlichter Bericht, im Auftrag des Kantons Luzern, Dienststelle Verkehr und Infrastruktur.
- Jäggi, M. (1984): Abflussberechnung in kiesführenden Flüssen. *Wasserwirtschaft*, 74(5): 263–267.
- Konz, M., Chiari, M., Rimkus, S., Turowski, J.M., Molnar, P., Rickenmann, D., Burlando, P. (2011): Sediment transport modelling in a distributed physically based hydrological catchment model, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 2821–2837, doi:10.5194/hess-15-2821-2011.
- Lamb, M.P., Dietrich, W.E., Venditti, J.G. (2008): Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope? *Journal of Geophysical Research*, 113: F02008. doi:10.1029/2007JF000831.
- Liu, Z., Todini, E. (2002): Towards a comprehensive physically-based rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6: 859–881, doi:10.5194/hess-6-859-2002.
- Nitsche, M., Rickenmann, D., Turowski, J.M., Badoux, A., Kirchner, J.W. (2011): Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams. *Water Resources Research*, 47: W08513, doi: 10.1029/2011wr010645.
- Nitsche, M., Rickenmann, D., Turowski, J.M., Badoux, A., Kirchner, J.W. (2012): Verbesserung von Geschiebevorhersagen in Wildbächen und Gebirgsflüssen durch Berücksichtigung von Makrorauigkeit. «Wasser Energie Luft» 104: 129–139.
- Parker, G. (2008): Transport of Gravel and Sediment Mixtures. In *ASCE Manual 54- Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*, M.H. Garcia (ed.), 165–251.
- Recking, A. (2009): Theoretical development on the effects of changing flow hydraulics on incipient bed load motion. *Water Resources Research*, 45: W04401, doi:10.1029/2008WR006826.
- Recking, A. (2010): A comparison between flume and field bed load transport data and consequences for surface-based bed load transport prediction. *Water Resources Research*, 46: W03518, doi: 10.1029/2009wr008007.
- Rickenmann, D. (2001): Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. *Water Resources Research*, 37: 3295–3305.
- Rickenmann, D. (2012): Alluvial steep channels: Flow resistance, bedload transport prediction, and transition to debris flows. In *Gravel Bed Rivers: Processes, tools, environments*, Church, M., Biron, P. & Roy, A. (eds.), John Wiley and Sons, 386–397.
- Rickenmann, D., Recking, A. (2011): Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field dataset. *Water Resources Research* 47, W07538. doi: 10.1029/2010WR009793.
- Stricker, B. (2010): Murgänge im Torrente Riascio (TI): Ereignisanalyse, Auslösefaktoren und Simulation von Ereignissen mit RAMMS. Masterarbeit an der Universität Zürich und der Eidg. Forschungsanstalt WSL Birmensdorf.
- Viviroli, D., Gurtz, J., Zappa, M. (2007): The Hydrological Modelling System PREVAH; Geographica Bernensia, Hallerstrasse 12, Berne, University of Berne.
- Weingartner, R., Aschwanden, H. (1989): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 5.2, Bern.
- Whittaker, J.G., Hickman, W.E., Croad, R.N. (1988): Riverbed Stabilisation with placed blocks. Report 3–88/3, Central Laboratories, Works and Development Services Corporation, Lower Hutt, NZ.
- Wilcock, P.R., Crowe, J.C. (2003): Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(2), doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:2(120).
- Yager, E.M., Dietrich, W.E., Kirchner, J.W., McArdeil, B.W. (2012): Prediction of sediment transport in step-pool channels, *Water Resources Research*, 48, W01541, doi:10.1029/2011WR010829.

## Anschrift der Verfasser

Dieter Rickenmann<sup>1</sup>, Florian Heimann<sup>1</sup>, Martin Böckli<sup>1</sup>, Jens M. Turowski<sup>1,2</sup>, Claudia Bieler<sup>1</sup>, Alexandre Badoux<sup>1</sup>

<sup>[1]</sup> Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

<sup>[2]</sup> Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam.