

Kleine Emme:

Geschiebetransport-Simulationen mit *sedFlow*



Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

Forschungseinheit Gebirgshydrologie und Massenbewegungen

8903 Birmensdorf, Schweiz

Martin Böckli, Dieter Rickenmann, Claudia Bieler,
Florian U.M. Heimann, Lynn Burkhard, Alexandre Badoux

21. August 2015



Eidg. Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft WSL

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Simulationsberechnungen zum Geschiebetransport im Projekt SEDRIVER.....	2
1.2	Simulierter Gerinneabschnitt.....	2
1.3	Das Geschiebetransport-Simulationsprogramm sedFlow	3
1.4	Weitere Anwendung von sedFlow	4
2	Untersuchungsgebiet und Grundlagen	5
2.1	Bisherige Studien zur Kleinen Emme	5
2.2	Einzugsgebiet und Gerinneverbauungen.....	5
2.2.1	Hauptzuflüsse	5
2.2.2	Geologie und Felsabschnitte.....	5
2.2.3	Verbauungen	6
2.2.4	Wasserfassungen	7
2.2.5	Hochwasserereignisse	7
2.3	Beobachtungen zum Geschiebetransport während der Eichperiode	7
2.3.1	Sohlenveränderungen entlang des Gerinnes.....	7
2.3.2	Annahmen zu Ein- und Austrägen von Geschiebe in Bezug auf den simulierten Gerinneabschnitt.....	8
2.3.3	Geschiebefrachtogramm	9
2.4	Hydrologie.....	11
2.4.1	BAFU Abflussmessungen	11
2.4.2	Verwendete Hydrologie für die Eichperiode.....	11
2.4.3	Niederschlags–Abfluss Simulationen mit dem Modell PREVAH.....	13
2.4.4	Hochwasserszenarien für die Zukunft.....	13
2.5	Kornverteilungen.....	14
2.6	Rechteckprofile für sedFlow Simulationen	15
3	Simulationen für die Eichperiode 2000 - 2005	17
3.1	Abflussberechnung und Geschiebetransportformel.....	17
3.2	Angaben zur Variation der Randbedingungen und Eingabeparameter	18
3.2.1	Kornverteilung.....	18
3.2.2	Gerinnegeometrie	20
3.2.3	Seiteneinträge	20
3.3	Simulationsergebnisse zum Geschiebetransport für die Eichperiode.....	21
3.4	Sensitivitäten der Eingabeparameter	24
3.5	Wahl der Versteckfunktion.....	25
4	Simulationen für mögliche Hochwasser in der Zukunft (Szenarien)	26
5	Literaturverzeichnis	29

1 Einleitung

1.1 Simulationsberechnungen zum Geschiebetransport im Projekt SEDRIVER

Mit dem an der WSL entwickelten Modell *sedFlow* wurden Geschiebetransportsimulationen in der Kleinen Emme durchgeführt. Die Hauptziele dieses Berichtes sind:

- Präsentation der Grundlagendaten zu den Geschiebetransportberechnungen in der Kleinen Emme
- Präsentation der Resultate zu folgenden Berechnungen:
 1. Eichung des Modelles für die Periode 2000 bis 2005
 2. Abschätzung des Geschiebetransportes während zukünftiger Hochwasserereignisse

Für die Eichung des Modelles wurde die Geschiebebilanz zwischen 2000 und 2005 rekonstruiert, u.a. basierend auf Querprofilvermessungen und auf der Dokumentation und Analyse des Hochwassers vom August 2005. Die hier dargestellten Arbeiten wurden innerhalb des Projektes „SEDRIVER“ (SNF Projekt Nr. 4061-125975) im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes NFP61 des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNF) durchgeführt.

1.2 Simulierter Gerinneabschnitt

Das Einzugsgebiet der Kleinen Emme weist in Littau - unweit der Einmündung in die Reuss – eine Fläche von 477 km² auf. Die Kleine Emme wird im oberen Abschnitt auch Waldemme genannt und entspringt im östlichen Teil der Briener Rothorn-Kette. Nach der Quelle durchfließt sie bei Flühli einen Talkessel mit einem Gefälle von 1.5 %. Die nachfolgende Lammschlucht hat ein Gefälle von 4 %. Die Wiss Emme und die Waldemme vereinigen sich vor Schüpfheim zur Kleinen Emme. Das Gefälle nimmt auf 0.5 % ab. Nach der Mündung der Fontanne fließt die Kleine Emme auf einer Breite von 30 m kanalisiert bis zur Mündung in die Reuss. Das Gefälle nimmt von 0.8 % bei Wolhusen auf 0.4 % bei Littau ab. Die geschiebeführenden Wildbäche Rümli (vor Malters) und Renggbach (nach Malters) münden auf dieser Strecke in die Kleine Emme (Abb. 1).

Die simulierte Untersuchungsstrecke (Abb. 2) wurde durch die Verfügbarkeit der vermessenen Querprofile bestimmt. Von Doppleschwand (km 25) bis zur Mündung des Renggbachs oberhalb von Littau (km 5.6) wird ein Flussabschnitt mit einer Länge von 19.4 km simuliert. Das Gerinnegefälle beträgt auf den obersten 2 km zwischen 0.5 bis 3.5 %. Unterhalb der Mündung der Fontanne bis nach Littau schwankt es ungefähr zwischen 0.5 und 1.5 % (tendenziell kleiner im unteren Bereich). Entlang dieses Abschnitts ist die Kleine Emme mit zahlreichen Sohlschwellen stabilisiert. Das mittlere Nettogefälle (unter Abzug der Absturzhöhen der Schwellen) der Untersuchungsstrecke beträgt 0.87 %.

Beim Hochwasserereignis vom 20. – 22. August 2005 wurden an der Kleinen Emme Brücken und Schwellen beschädigt. Nach Verklausungen trat der Fluss an mehreren Stellen über die Ufer. Bei Emmenbrücke wurde eine Ufersicherung zerstört sowie Schienen unterspült. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass während des Hochwassers im Jahr 2005 an der Kleinen Emme grossflächige Schäden aufgetreten sind. Die seitlichen Überflutungen traten vor allem im Bereich Littau bis zur Mündung in die Reuss auf. Daher wurden die Simulationen für die Eichperiode nur bis zur Mündung des Renggbachs durchgeführt. Die Kleine Emme weist nur noch an wenigen Abschnitten eine natürliche Dynamik auf.

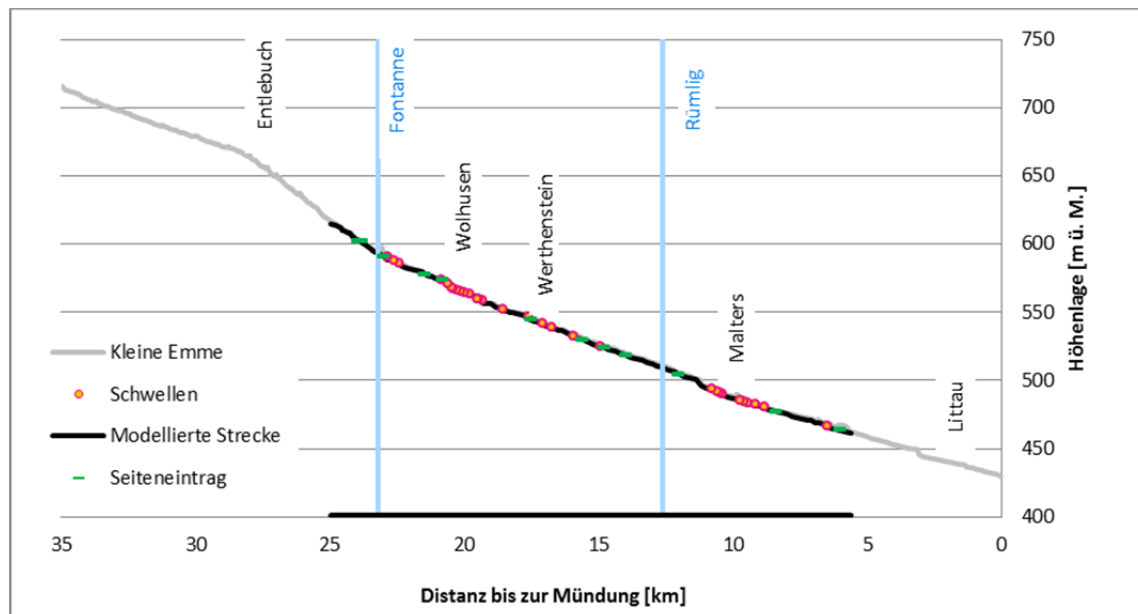


Abb. 1 Längsprofil der Kleinen Emme von der Mündung der Wiss Emme in die Kleine Emme (oberhalb Waldemme) bei Schüpheim bis nach Littau zur Mündung der Kleinen Emme in die Reuss. Die schwarz markierte Strecke wurde mit dem Programm sedFlow simuliert. In blau sind die zwei relevantesten Zubringer Fontanne und Rümlig markiert. Die wichtigsten Ortschaften entlang der Kleinen Emme sind zur Orientierung ebenfalls angegeben. An den roten Punkten befinden sich die 30 Schwellen, die grünen Markierungen zeigen Standorte mit Seiteneinträgen infolge von Ufererosion in die Kleine Emme während des Hochwassers 2005.

1.3 Das Geschiebetransport-Simulationsprogramm sedFlow

Das Geschiebetransportsimulationsprogramm sedFlow wurde an der WSL im Rahmen des Projektes SEDRIVER entwickelt (Heimann et al., 2015a; 2015b). 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 Szenarien-Analyse mit automatisierten Simulationsberechnungen vieler Varianten bezüglich der Eingabeparameter.

Das Programm sedFlow ist im Synthesebericht zu den Anwendungen von sedFlow in Schweizer Gebirgsflüssen (Rickenmann et al., 2015) näher beschrieben, eine ausführliche Beschreibung findet sich auch in Heimann et al. (2015a) und eine zusammenfassende Beschreibung in Rickenmann et al. (2014).

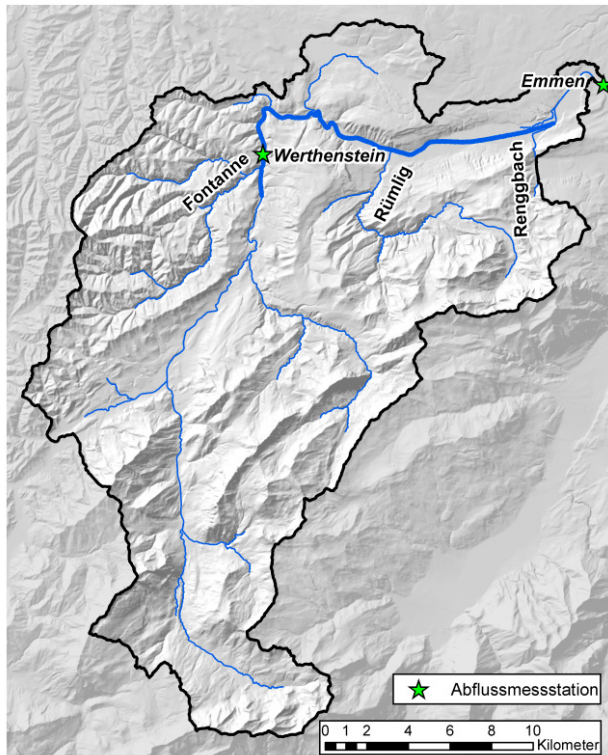


Abb. 2 Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Die dicke blaue Linie zeigt die simulierte Untersuchungsstrecke. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118).

1.4 Weitere Anwendung von sedFlow

Im Rahmen des NFP61 Projektes SEDRIVER der WSL und der EAWAG wurden die Folgen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und den Geschiebetransport in Gebirgsflüssen sowie mögliche Auswirkungen davon auf die Qualität von Fischhabitaten untersucht.

In Schweizer Gebirgsflüssen hat die Klimaerwärmung verschiedene Einflüsse, welche die Population der Bachforellen (*Salmo trutta fario*) direkt betreffen. Es ist unter anderem davon auszugehen, dass aufgrund der Klimaänderung die Winterabflüsse ansteigen werden, was auch auf die Häufigkeit von Hochwasserereignissen mit Geschiebetransport im Winterhalbjahr einen Einfluss haben kann (KOHS, 2007; BAFU, 2012). Eine Zunahme der Hochwasserabflüsse und eine damit verbundene Zunahme der winterlichen Erosionstiefen in Gebirgsflüssen könnte wiederum die Laichplätze der Bachforellen gefährden (Unfer et al., 2010). Zudem hat auch die Beeinflussung des Abflussregimes durch Wasserkraftanlagen einen ungünstigen Einfluss auf die Fischpopulationen.

In einer separaten Studie wurden (i) in verschiedenen Abschnitten voralpiner und alpiner Flüsse Untersuchungen zur Laichaktivität der Bachforelle durchgeführt, wobei insbesondere die Eingrabungstiefe der Fischeier studiert wurde; (ii) für die beiden Gebirgsflüsse Kleine Emme und Brenno wurden Geschiebetransport-Modellierungen für die nahe (2021-2050) und ferne (2070-2099) Zukunft realisiert, mit besonderem Augenmerk auf die maximale Erosionstiefe in den Wintermonaten (während der Laichperiode der Bachforellen); (iii) basierend auf diesen und weiteren Informationen wurden die möglichen Auswirkungen des Klimawandels im Zusammenhang mit dem Geschiebetransport auf die Laichaktivität von Bachforellen diskutiert. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise und alle erarbeiteten Resultate dieser weiteren Anwendung von sedFlow ist in Junker et al. (2014) sowie in Badoux et al. (2014) beschrieben.

2 Untersuchungsgebiet und Grundlagen

2.1 Bisherige Studien zur Kleinen Emme

Wie bereits erwähnt wurde, ist die Kleine Emme seit langem ein verbauter Fluss. Zur Hydrologie und zum Geschiebehaushalt der Kleinen Emme liegen viele Berichte und Studien liegen. Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der Eidg. Technischen Hochschule Zürich hat im Jahr 1997 eine Geschiebehaushaltstudie der Kleinen Emme erstellt (VAW, 1997). Dabei wurde vor allem das Verhalten der Kleinen Emme in Bezug auf die Kiesentnahme und die Sohleneintiefungen untersucht. Diese Studie sollte eine Grundlage für zukünftige Verbauungen sein. Nach dem Hochwasserereignis im Jahr 2005 haben sich unterschiedliche Büros und Amtsstellen mit der Kleinen Emme beschäftigt. Das Büro Hunziker, Zarn und Partner (HZP) führte eine Geschiebehaushaltsstudie von der Mündung der Fontanne bis in die Reuss durch. Mittels eines 1 D Geschiebetransportmodells wurde der Geschiebetransport simuliert. Falls die Randbedingungen sich nicht stark ändern, gehen HZP in der Zukunft von ähnlichen Geschiebefrachten und Sohlenveränderungen wie bisher aus (HZP, 2008). Zum Hochwasser 2005 an der Kleinen Emme existieren technische Berichte zur Ereigniskartierung und den Schäden (Bart, 2005; Oeko-B, 2006) sowie zur Wetterlage (Bart, 2005). Im Rahmen der Ereignisanalyse des Bundes zum Hochwasser 2005 (Bezzola und Hegg, 2007, 2008) verfasste die Flussbau AG einen Teil der Untersuchungen zu den Gerinneprozessen (Flussbau 2009a; 2009b).

2.2 Einzugsgebiet und Gerinneverbauungen

2.2.1 Hauptzuflüsse

Die zwei bedeutenden Seitenzubringer Fontanne (km 23.3) und Rümli (km 12.6) werden für die Simulation des Geschiebetransportes in der Kleinen Emme berücksichtigt (Abb. 1 und 2). Alle weiteren Zubringer führen im Allgemeinen sehr wenig Abfluss und tragen nur wenig Geschiebe in die Kleine Emme ein, weshalb sie in den Simulationen nicht berücksichtigt werden.

Die Fontanne mit einem Einzugsgebiet von 63 km² ist stark verbaut und fliesst vor Wolhusen in die Kleine Emme. Das Einzugsgebiet der Fontanne liegt im Napfgebiet und fliesst durch relativ instabile Nagelfluh. Die Korngrösse dieses Materials ist relativ klein. Der Rümli mit einem Einzugsgebiet von 65 km² fliesst bei Schachen zwischen Werthenstein und Malter in die Kleine Emme. Der Rümli fliesst durch die Pilatuskette über relativ stabiles Kalkgestein. Die Korngrössen des transportierten Materials sind eher grösser (HZP, 2008). Der Renggbach ist ein kleiner Seitenzubringer, welcher vor Littau in die Kleine Emme mündet.

2.2.2 Geologie und Felsabschnitte

Die Kleine Emme fliesst von Flühli 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. Vor allem im oberen Bereich der simulierten Flussstrecke befinden sich mehrere Felsstrecken mit einer gesamten Streckenlänge von 1310 m. An diesen Stellen liegt nur sehr wenig bewegliches Material für den Geschiebetransport in der Sohle bereit. Die Geschiebefracht kann auf diesen Abschnitten nur geringfügig zunehmen, deshalb ist die exakte Angabe der Felsabschnitte für die Geschiebetransport-Simulationen sehr relevant. Mithilfe des Geologischen Atlas der Schweiz (Blatt 1149 Wohlhusen; Kellerhals und Haefeli, 2002), der Konsultation von Luftbildern sowie eines

externer Berichtes (HZP, 2008) wurden die Standorte für die aufgeführten Felsabschnitte bestimmt. In Tabelle 1 ist die exakte Kilometrierung der Felsstrecken angegeben.

Tabelle 1 Kilometerangaben der Felsstrecken auf der simulierten Untersuchungsstrecke (HZP, 2008; Geologischer Atlas der Schweiz).

von km	bis km
24.6	24.55
23.6	23.5
23.3	23.2
22.8	22.4
22	21.8
21	20.6
18.75	18.6
16.35	16.25

2.2.3 Verbauungen

Bereits Anfangs des 19. Jh. wurden an der Kleinen Emme Verbauungen angeordnet. Durch die Einengung wurde Land gewonnen, allerdings führte es zu unerwünschten Sohleneintiefungen. Nachdem die Zubringer teilweise ebenfalls verbaut wurden und darin Geschiebe entnommen wurde, hat sich die Geschiebelieferung verkleinert. Dies führte zu vermehrter Erosion der Flusssohle in der Kleinen Emme. Die alten Verbauungen wurden teilweise bereits vor dem Hochwasser 2005 ersetzt. (VAW, 1997). Entlang der simulierten Flussstrecke befinden sich ca. 30 Schwellen, welche sich vor allem um die Ortschaften Wolhusen und Werthenstein konzentrieren (Abb. 1). Die genaue Lokalisierung erfolgte aufgrund von Angaben aus den GIS-Daten des Kantons Luzern (<http://www.geo.lu.ch/map/oekomorphologie>) und eines externen Berichtes (VAW, 1997). Die Absturzhöhen der Schwellen variieren zwischen 0.1 und 2 m (Tabelle 2). Sofern keine Informationen vorhanden waren, wurde eine Absturzhöhe von 0.5 m angenommen. Im Juli 2005 wurden einige Daten zu Verbauungen in der Kleinen Emme aufgenommen und diese standen für die Analyse zur Verfügung. Es muss erwähnt werden, dass in den letzten Jahren viele neue Verbauungen an der Kleinen Emme realisiert wurden.

Tabelle 2: Kilometerangaben der 30 Schwellen auf der simulierten Untersuchungsstrecke (GIS-Daten Kanton Luzern, ökomorphologische Fachdaten von Erhebungen aus den Jahren 2004/05 und 2012).

Kilometer [km] oberhalb Mündung	Höhenkote [mü.M.]	Absturzhöhe [m]	Kilometer [km] oberhalb Mündung	Höhenkote [mü.M.]	Absturzhöhe [m]	Kilometer [km] oberhalb Mündung	Höhenkote [mü.M.]	Absturzhöhe [m]
22.873	590.57	1.67	19.8	563.08	0.46	10.783	494.34	0.50
22.625	588.10	0.10	19.5	560.07	0.50	10.6	492.39	0.22
22.439	586.16	1.16	19.45	559.50	0.50	10.474	490.72	0.50
20.85	573.50	0.10	19.317	558.72	2.00	10.4	490.04	0.50
20.615	570.60	0.65	18.576	552.13	0.30	9.718	485.76	0.20
20.46	568.06	0.35	17.606	546.73	2.00	9.6	484.64	0.15
20.41	567.68	0.45	17.065	541.63	0.74	9.425	483.69	0.15
20.27	566.39	0.20	16.735	538.71	0.50	9.144	482.12	0.23
20.115	565.15	0.60	15.911	532.64	0.70	8.845	480.23	0.50
19.985	564.17	0.50	14.918	525.09	0.20	6.47	466.62	0.25

2.2.4 Wasserfassungen

Ab Wolhusen wird das Wasser der Kleinen Emme an vier Stellen für die Stromproduktion in ein Wehr geleitet: Gewerbekanal in Wolhusen, Steinerwehr (Malters), Thorenbergwehr (Malters) und Wehr Emmenweid (Littau). Die Konzessionswassermengen liegen bei 3 und 9 m³/s (VAW, 1997). Je ein Wehr bei Wolhusen (km 20.8) und bei Werthenstein (km 16.7) wurden als Schwellen ins System eingebaut, da sie über die gesamte Flussbreite ausgeführt sind. Das Wehr bei Wolhusen wurde mit 0.1 m, dasjenige in Werthenstein mit 0.5 m Absturzhöhe berücksichtigt.

2.2.5 Hochwasserereignisse

Im August 2005 kam es zum grössten Hochwasser seit Beginn der Pegelmessungen an der Kleinen Emme im Jahr 1936. In Littau wurde ein Abfluss von 650 m³/s gemessen. Dies führte zu grossen Überflutungen in Malters, Littau und an einigen flussaufwärts liegenden Standorten (Bart, 2005; Bezzola und Hegg 2007; 2008). Bereits in den Jahren 1984, 2002 sowie im Jahr 2007 wurden bei der Messstation Littau Abflusswerte von mehr als 500 m³/s gemessen (Scherrer 2012).

2.3 Beobachtungen zum Geschiebetransport während der Eichperiode

2.3.1 Sohlenveränderungen entlang des Gerinnes

Als Datengrundlage für die Simulationen dienen in der Kleinen Emme Querprofile im Abstand von ca. 50 bis 200 m, welche in den Jahren 2000 (September) und 2005 (November) aufgenommen wurden. Diese wurden vom BAFU vermessen und standen auch für die vorliegende Studie zur Verfügung. Aus diesen Querprofilen wurde zusammen mit weiteren Beobachtungen ein Geschiebebudget abgeleitet.

In der Ereignisanalyse des BAFU zum Hochwasser 2005 wurde aus den Sohlenveränderungen ein Geschiebefrachtdiagramm erstellt (Flussbau, 2009a). Dafür wurden die Daten der Querprofilvermessungen des BAFU verwendet. In jedem Profil wurde der Bereich der beweglichen Sohle definiert und daraus die Sohlenbreite und die Lage der mittleren Sohle ermittelt. Aus dem Vergleich der mittleren Sohlen vor und nach dem Ereignis sowie der Distanz zwischen den Profilen wurde die Volumenänderung zwischen jeweils zwei Profilen berechnet. Diese Werte wurden anschliessend über die Gewässerlänge kumuliert (Abb. 3). Aus der so erhaltenen Volumenbilanz für die Sohle lässt sich erkennen, welche Geschiebemengen durch Sohlenerosion mobilisiert bzw. im Bereich der Flusssohle abgelagert wurden (Flussbau 2009a). Durch die WSL wurde aus den Sohlenveränderungen der BAFU Querprofile auf analoge Weise die Volumenänderungen bestimmt (Abb. 4).

Die mittlere Höhe der Flusssohle verändert sich um weniger als einen Meter. Die höchsten Erosionstiefen treten vor allem im oberen Bereich der Untersuchungsstrecke bei Wolhusen auf und betragen bis zu 0.8 m. Die maximalen Ablagerungen treten im Bereich der flussabwärts liegenden Ortschaften Werthenstein und Malters auf und betragen maximal 0.8 m.

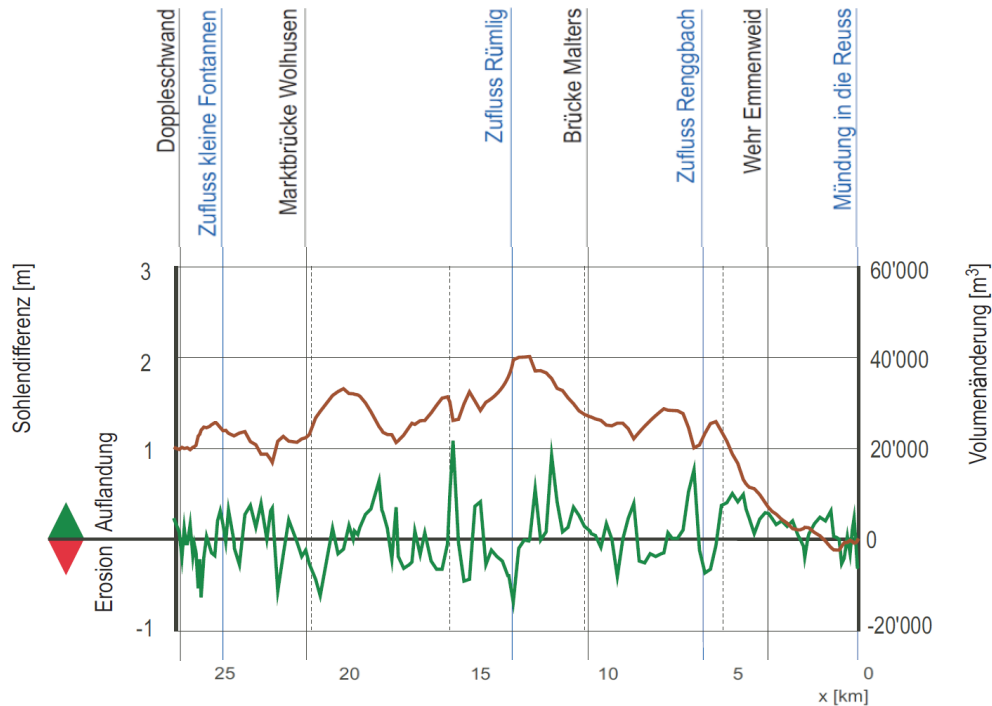


Abb. 3 Sohlenveränderung und Volumenänderung der Kleinen Emme für die Periode 2000 - 2005 gemäss Bezzola und Hegg (2008) bzw. Flussbau (2009a). Die Werte in der Abszisse geben die Distanz bis zur Mündung an. Grüne Linie = Sohlendifferenz 2000 – 2005, braune Linie = Volumenänderung 2000 – 2005.

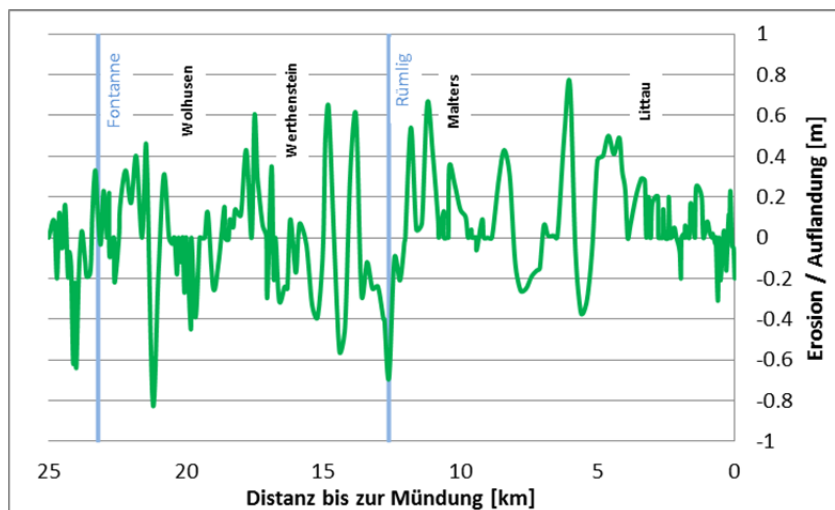


Abb. 4: Resultierende Sohlenveränderung der Kleinen Emme für die Periode 2000 – 2005 nach Berechnung der WSL.

2.3.2 Annahmen zu Ein- und Austrägen von Geschiebe in Bezug auf den simulierten Gerinneabschnitt

Während der Periode 2000 – 2005 spielt in der Kleinen Emme die Seitenerosion eine wesentliche Rolle für den Geschiebetransport, die Sedimenteinträge durch Zubringer sind hingegen weniger wichtig. Für die während des Hochwassers 2005 mobilisierte Geschiebefracht wurden die Geschiebeeinträge durch Seitenzubringer sowie durch Ufererosion geschätzt (Flussbau, 2009b). Dabei zeigte sich, dass von der gesamten mobilisierten Geschiebefracht fast die Hälfte aus Seitenerosionsprozessen stammte (Abb. 5).

Diese Geschiebeeinträge aus Seitenerosion traten verteilt über die gesamte simulierte Flusslänge auf (Tabelle 3). Die dabei mobilisierten Volumen wurden für die Erstellung des Geschiebefracht-diagramms verwendet.

Tabelle 3 Gesamtvolumen der Geschiebeeinträge durch Seitenerosion in die Kleine Emme während des Hochwassers 2005 (Flussbau, 2009b).

Standort [km]	Volumen [m ³]
6	24595
8.4	25298
12	26000
14	7682
14.8	14666
15.6	1297
17.5	6286
20.8	1496
21.46	1496
23	698
23.9	698

2.3.3 Geschiebefracht diagramm

Die oben beschriebene Datengrundlage war ausreichend für eine detaillierte Geschiebebilanzierung in der Kleinen Emme. Im Rahmen der Analyse des Hochwassers 2005 wurde ein Geschiebefracht diagramm für die Periode 2000 – 2005 durch die Flussbau AG (Flussbau, 2009a) erstellt (Abb. 5). Um die aus den Sohlenveränderungen abgeleiteten Geschiebefrachten zu plausibilisieren, wurden auch Transportrechnungen durchgeführt (Abb. 5). An der Kleinen Emme wurde die Transportkapazität mittels Normalabflussrechnung an einer ausgewählten Stelle berechnet. Die Hydraulik wurde nach Strickler, die Transportrechnung mit der Formel von Meyer-Peter-Müller modifiziert nach Hunziker berechnet (Flussbau, 2009a).

Durch die WSL wurde ebenfalls ein Geschiebefracht diagramm für die Periode 2000 – 2005 erstellt (Abb. 6). Der eine Teil der Geschiebefracht wurde über die Volumenänderungen aus den Querprofil-Vergleichen berechnet. Dabei wurde die Sohlendifferenz zweier benachbarten Profile mit der mittleren Breite und der Länge des Abschnitts bis zum nächsten Profil multipliziert. Für die Erstellung des Geschiebefracht diagramms wurden zusätzlich die Seiteneinträge aus der Studie zum Hochwasser 2005 (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 m³ betrug. Dabei wurde vereinfachend angenommen, dass die Geschiebefracht bei km 5 ebenfalls ca. 160'000 m³ betrug. Der Eintrag am Beginn der simulierten Strecke bei Doppleschwand von ca. 25'000 m³ wurde aufgrund der Bilanzierung gerinne-aufwärts ab der Mündung in die Reuss ermittelt (Abb. 6). Die drei steileren Anstiege in der Geschiebefracht im unteren Abschnitt der simulierten Strecke (km 12, 8.4 und 6) entsprechen den Seiteneinträgen an diesen Stellen. Diese betragen jeweils ca. 25'000 m³ (Tabelle 3).

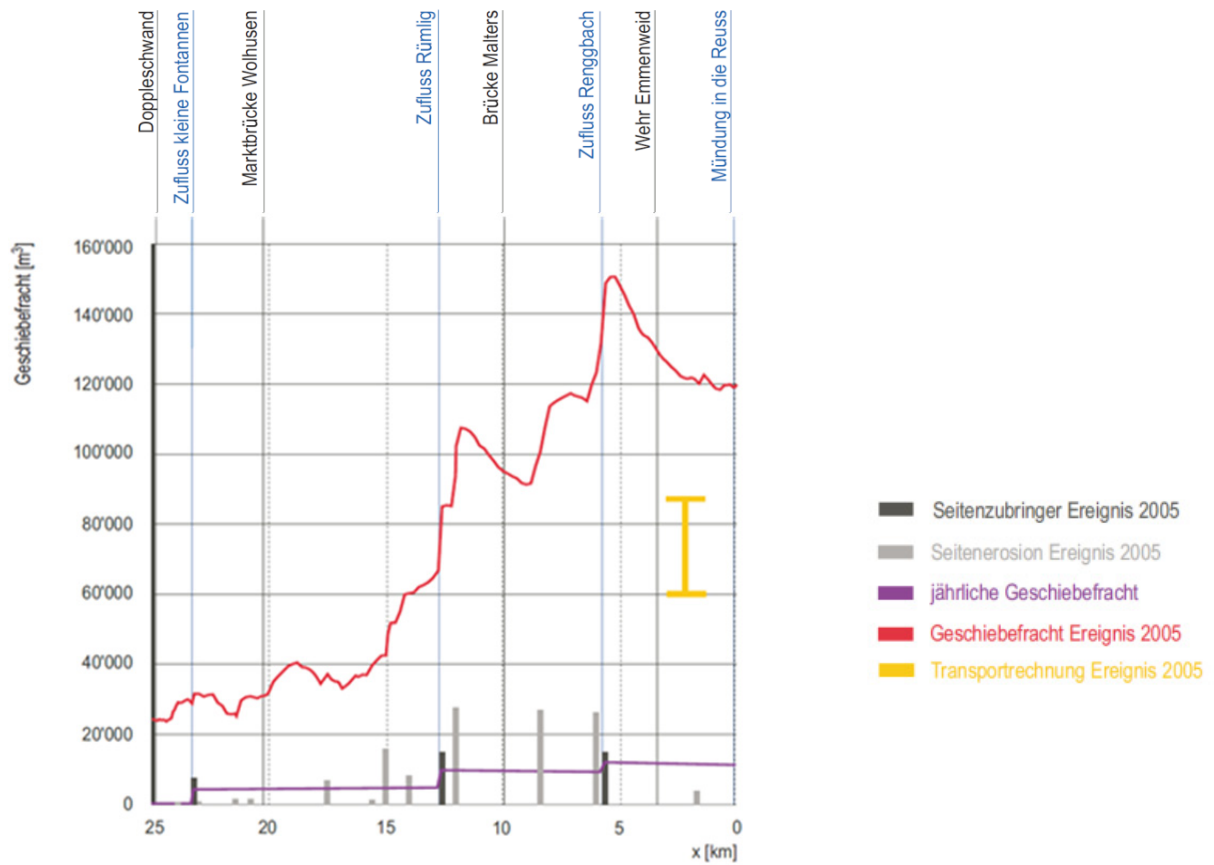


Abb. 5 Geschiebefracht diagramm für das Hochwasser 2005 gemäss BAFU (2008) bzw. Flussbau (2009a). Die Abszisse gibt die Distanz zur Mündung an.

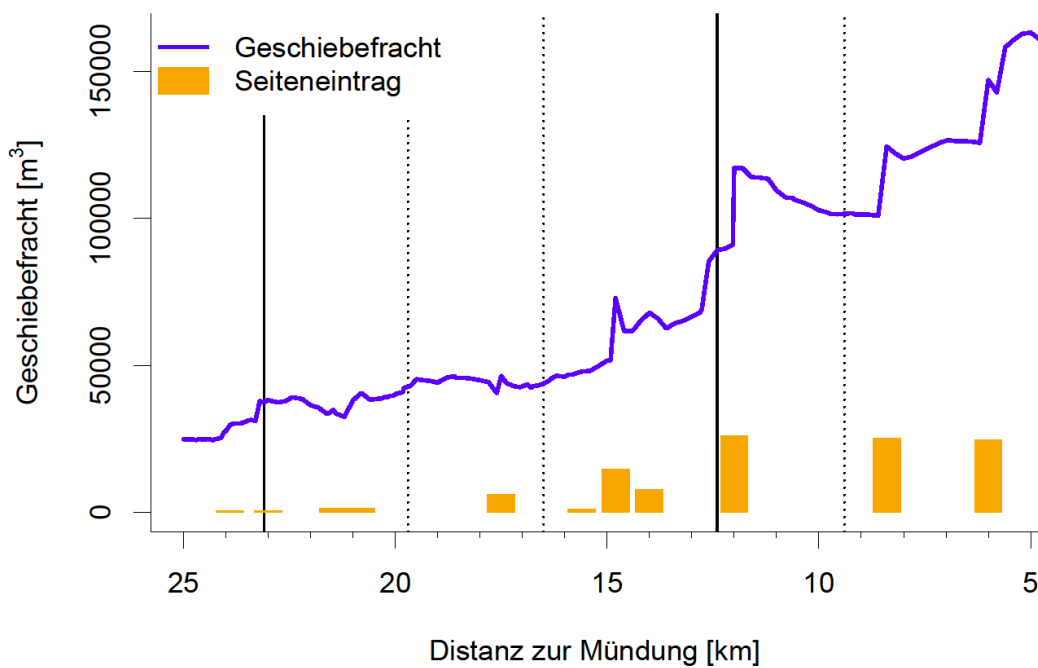


Abb. 6 Durch die WSL ermitteltes Geschiebefracht diagramm für die Kleine Emme für die Periode 2000–2005. Die orangen Balken geben die während des Hochwassers 2005 durch Seitenerosion eingetragenen Geschiebefrachten an.

2.4 Hydrologie

2.4.1 BAFU Abflussmessungen

Im Einzugsgebiet der Kleinen Emme betreibt das Bundesamtes für Umwelt BAFU an zwei Standorten Abflussmessungen (Abb. 2): In Werthenstein seit dem Jahr 1985 (Einzugsgebietsgrösse 311 km²) und in Emmen seit 2013 (Einzugsgebietsgrösse 477 km²). Die Station in Emmen ersetzt dabei die Station Littau, Reussbühl, welche von 1978 bis 2012 nahezu an der gleichen Stelle in Betrieb war. In Tabelle 4 ist die Hochwasserstatistik für die Messstationen Werthenstein und Littau angegeben. Die Simulationen mit sedFlow wurden für die Periode 2000 – 2005 für eine Dauer von 6 Jahren durchgeführt. Die vom BAFU gemessenen Abflüsse an den beiden Messstationen sind eine wichtige Grundlage für die Simulationen.

Tabelle 4 Hochwasserwahrscheinlichkeiten (Jahreshochwasser) bei den Messstationen (<http://www.hydrodaten.admin.ch/de/2487.html>).

Messstation	Werthenstein	Littau
Messperiode [m ³ /s]	1985 – 2011	1978 – 2011
HQ ₂ [m ³ /s]	196	313
HQ ₅ [m ³ /s]	265	418
HQ ₁₀ [m ³ /s]	320	489
HQ ₃₀ [m ³ /s]	417	595
HQ ₅₀ [m ³ /s]	468	644
HQ ₁₀₀ [m ³ /s]	544	712

2.4.2 Verwendete Hydrologie für die Eichperiode

Die Daten der Abflussmessstation definieren die Hydrologie in den benachbarten Gerinneabschnitten, soweit keine wichtigen Zuflüsse vorhanden sind. Für die Geschiebetransportsimulationen müssen die Abflüsse über die ganze Gerinnelänge bekannt sein. Dazu wurden Ganglinien für die zwei wichtigen Zubringer Fontanne und Rümli sowie des Zuflusses am oberen Modellrand (Oberlauf) benötigt. Diese Ganglinien wurden aus den Daten der Abflussmessstationen und Resultaten aus dem Niederschlags-Abfluss Modell PREVAH (PREcipitation Runoff EVApotranspiration HRU Model; Viviroli et al., 2007; siehe Kap. 2.4.3) ermittelt.

Um die Ganglinie am oberen Rand der Simulationsstrecke bei Doppleschwand (km 25) zu erhalten, wurde die Differenz aus dem gemessenen Abfluss in Werthenstein und dem modellierten PREVAH Abfluss der Fontanne berechnet. Für den Zubringer Fontanne wurden die PREVAH Resultate verwendet. Die Ganglinie des Rümli wurde aus der Differenz zwischen den gemessenen BAFU Daten bei Werthenstein und dem gemessenen BAFU Daten bei Littau (unterhalb Simulationsausfluss) berechnet. Zwischen Littau und dem oberhalb liegenden Simulationsende mündet der Zubringer Rengbach in die Kleine Emme. Dieser wird nicht mehr in der Simulation berücksichtigt. Deswegen wurde die vom BAFU gemessene Ganglinie in Littau um 5 % vermindert (VAW, 1997). Die Summe aller eingespeisten Ganglinien soll demnach 95 % der gemessenen Abflüsse in Littau ergeben.

Über die gesamte Untersuchungsperiode stieg der maximale Abfluss während des Hochwassers 2005 auf 611 m³/s. Der Grenzabfluss in der Kleinen Emme liegt bei ca. 50 – 70 m³/s (HZZ, 2008).

Die verwendeten Ganglinien des Oberlaufes, der Fontanne, des Rümli und die gesamte Abflussganglinie ab Mündung Rümli bis zum Modellende in Littau sind in Abbildung 7 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Fontanne den tiefsten Anteil zur Wasserfracht beiträgt. Der Oberlauf trägt

64 %, die Fontanne 10 % und der Rümli mit Umgebung 26 % zur gesamten Wasserfracht im System bei (gemittelte Werte über die gesamte Simulationsperiode). Die Hochwasserspitzen treten nicht zur gleichen Zeit auf.

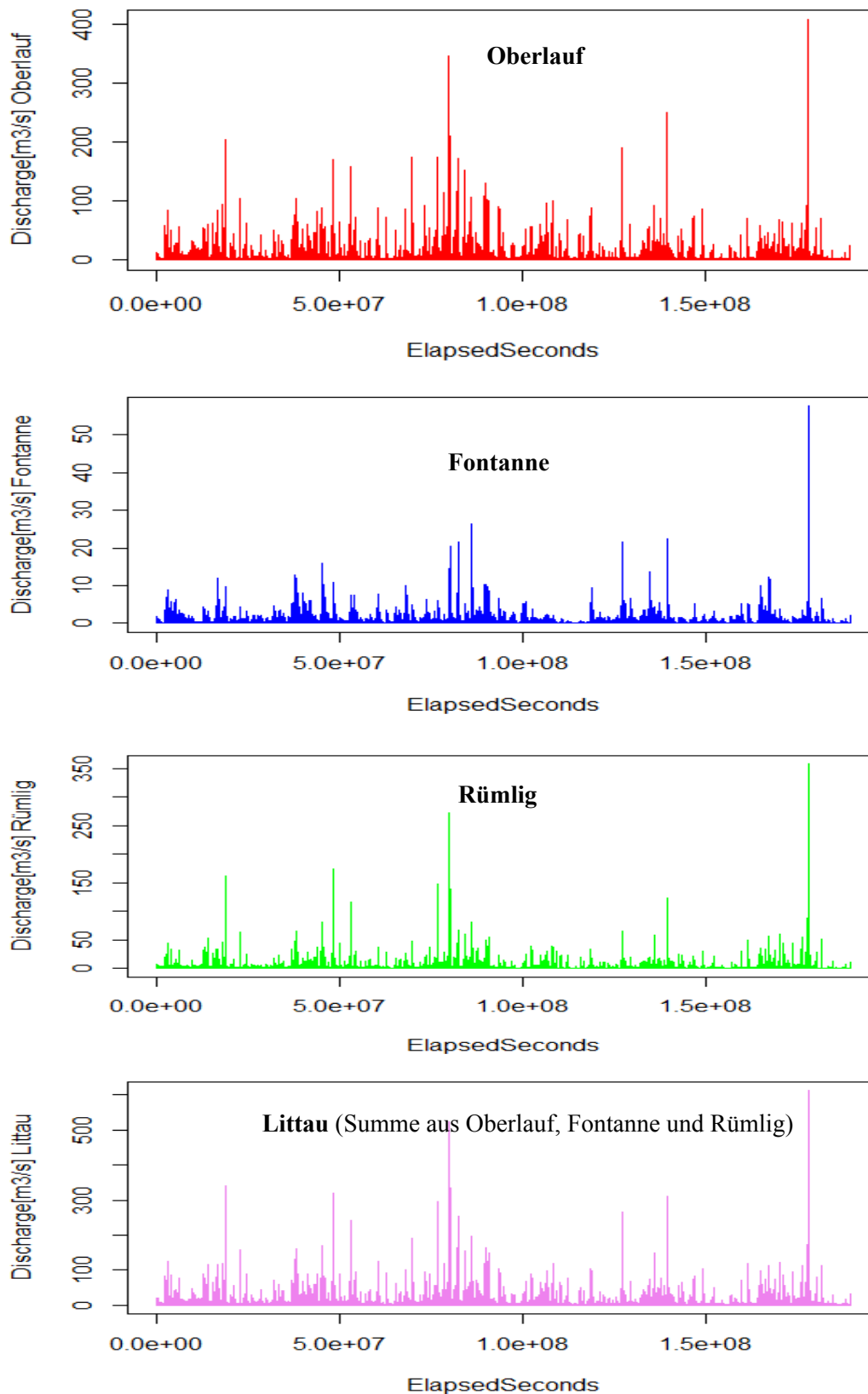


Abb. 7 Verwendete Abflussganglinien an den vier Standorten Oberlauf (oberes Ende der Simulationsstrecke), Fontannen, Rümli und Littau (unteres Ende der Simulationsstrecke) für die Simulationen der Bestvarianten. Die Ganglinie ist hier über die sechs Jahre der Eichperiode dargestellt.

2.4.3 Niederschlags–Abfluss Simulationen mit dem Modell PREVAH

Für die Niederschlag–Abfluss Simulationen mit dem Modell PREVAH wurde das Einzugsgebiet der Kleinen Emme in mehrere Teileinzugsgebiete unterteilt (Abb. 8). Damit sind Ganglinien über das ganze Einzugsgebiet verteilt bekannt. Für diese Arbeit wird aus den Simulationen nur der Abfluss der Fontanne, der sich aus drei Teileinzugsgebieten zusammensetzt, weiterverwendet.

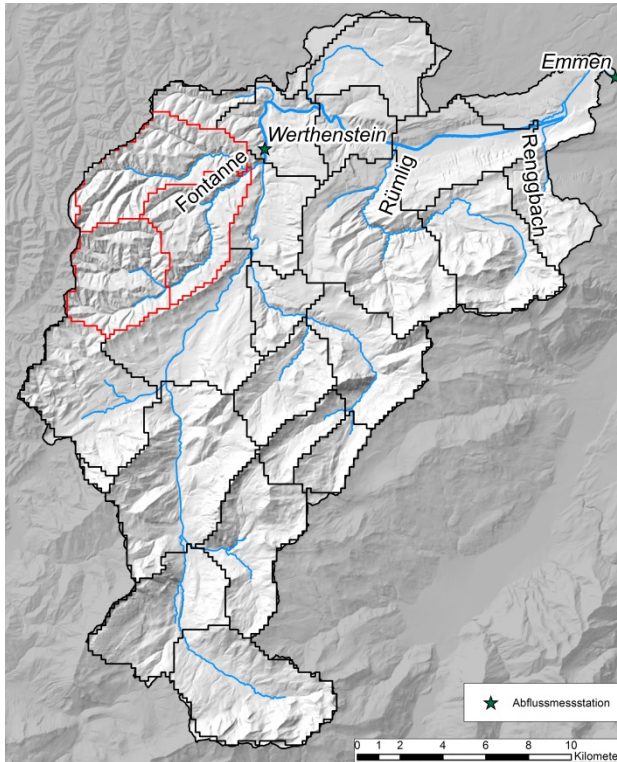


Abb. 8 Teileinzugsgebiet für die Abflusssimulation mit PREVAH. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118).

2.4.4 Hochwasserszenarien für die Zukunft

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 historische Ganglinien vom November 1979, August 2005 und März 1981 verwendet (Abb. 9). Der Grenzabfluss für Start und Ende wurde auf $65 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt. Für die Volumina wurde die Hochwasserfracht des Ereignisses 2005 als Referenzwert verwendet und mit einer exponentiellen Skala von $-\frac{1}{3}$ bis $+1$ zur Basis 2 variiert (Tabelle 5). Für die Abflussspitzen wurde das 50-jährliche Ereignis als Referenz genommen (mit $HQ_{50} = 644 \text{ m}^3/\text{s}$, entspricht etwa dem Ereignis 2005), und in sechs Stufen zwischen einem HQ_{30} und HQ_{300} variiert (mit $HQ_{30} = 595 \text{ m}^3/\text{s}$ und $HQ_{300} = 824 \text{ m}^3/\text{s}$; Tabelle 6). Mit den drei unterschiedlichen Formen der Hochwasserganglinien mit verschiedenen Abflussfrachten und -spitzen wurden anschliessend die potentielle Geschiebeverfrachtung und Sohlenveränderung gerechnet.

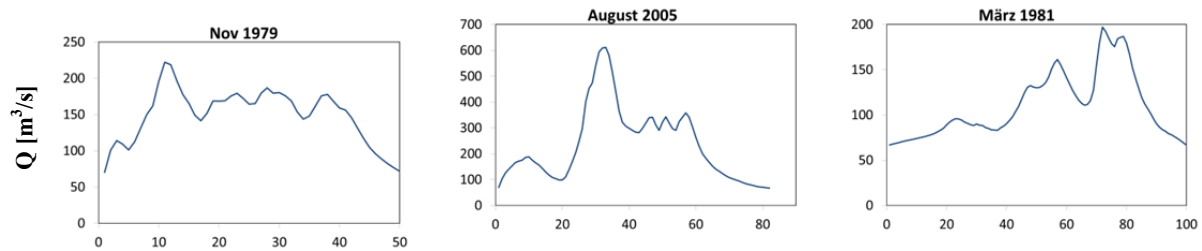


Abb. 9 Die drei ausgewählten Hochwasserganglinien für die Szenarienbildung: frontbetont (Nov 1979), mittenbetont (August 2005) und schlussbetont (März 1981)

Tabelle 5 Variation der Abflussfrachten für die Bildung der Hochwasserszenarien

2^{exp}	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{6}$	0	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{5}{6}$	1
Faktor	0.79	0.89	1	1.12	1.26	1.41	1.59	1.78	2

Tabelle 6 Variation der Hochwasserspitzen für die Bildung der Hochwasserszenarien

Jährlichkeit	30	40	50	75	100	150	200	250	300
Abfluss [m³/s]	595	623	644	685	712	753	782	805	824

Die vom BAFU gefittete Log-Pearson-III Verteilung wurde visuell durch ein Exponentialgesetz angenähert.

2.5 Kornverteilungen

Die Kornverteilung in der Kleinen Emme wurde von Burkhard (2011) mit Hilfe von 15 Linienzahlanalysen nach der Methode von Fehr (1987) bestimmt. Ergänzt wurden diese Grundlage mit vorhergehend von der WSL aufgenommenen Daten zur Kornverteilung. Abbildung 10 zeigt die Variation der charakteristischen Korngrößen D_{84} und D_{50} entlang der Untersuchungsstrecke.

Die Methode der Linienzahlanalyse ermöglicht mit relativ kleinem Aufwand eine Aussage über die Zusammensetzung des Sohlenmaterials in Gebirgsflüssen und Wildbächen. Dabei wird die Verteilung der Grobkomponenten im Feld ausgemessen und die Feinanteile werden anschliessend mittels einer Fuller-Verteilung angenähert. Für die Simulation des Geschiebetransportes in *sedFlow* muss zwischen dem an der Oberfläche der Sohle liegenden Deckschichtmaterial und dem die Sohle bildenden Unterschichtmaterial unterschieden werden. Für die Umrechnung der Linienzahlanalyse in eine Korngrößenverteilung der Unterschicht wird ein Feinanteil von 25 % und in eine Korngrößenverteilung der Deckschicht ein Feinmaterialanteil von 10 % angenommen.

Für eine erfolgreiche Durchführung einer Linienzahlanalyse ist die Wahl des geeigneten Standortes von grosser Bedeutung. Je nachdem wozu die Korngrößenverteilung gebraucht wird, muss das Material in der Sohle oder am Uferstrand untersucht werden. Im Fall der Geschiebetransportsimulation interessiert die Korngrößenverteilung des Materials an der Flusssohle. Da diese aufgrund der Wasserführung der Kleinen Emme und der Strömung nicht einfach analysiert werden kann, wurden die Linienzahlanalysen in der Uferregion durchgeführt.

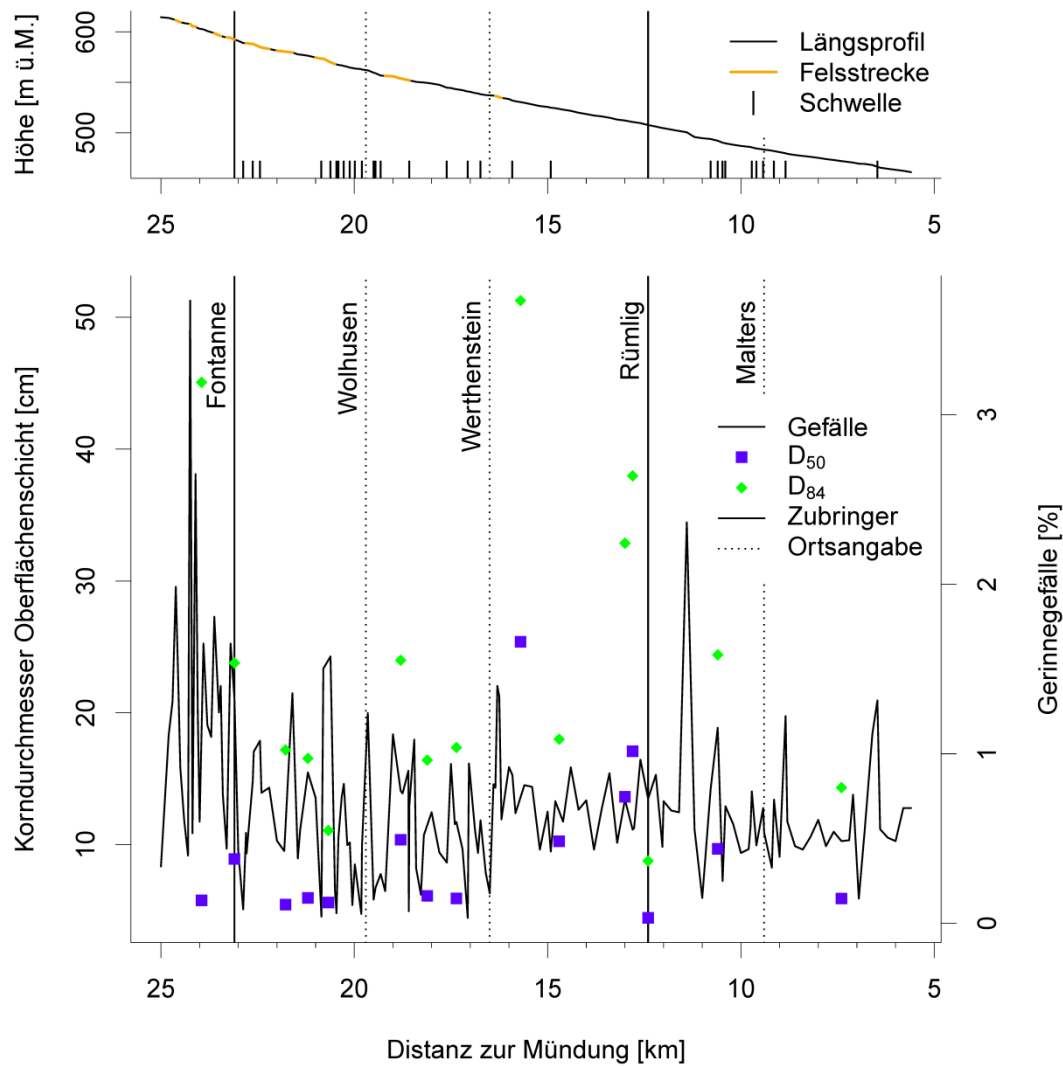


Abb. 10 Oben: Längsprofil entlang der Simulationsstrecke der Kleinen Emme mit Lokalisierung der Felsstrecken und der Schwellen. Unten: Charakteristische Korndurchmesser D_{50} und D_{84} der Oberflächenschicht sowie Gerinnegefälle. Die Einmündung von Seitenbächen und einige Ortschaften sind zur genaueren Orientierung angegeben.

2.6 Rechteckprofile für sedFlow Simulationen

Da im Modell *sedFlow* mit Rechteckprofilen gerechnet wird, wurden die vom BAFU vermessenen Querprofile durch Rechteckprofile angenähert. Dazu wurden die Originalprofile geglättet und ihre Ufer wurden auf die gleiche Höhe gebracht. Um dies zu erreichen, können unterschiedliche Ansätze gewählt werden (Abb. 11, Schritt 1). In dieser Arbeit wurde Variante 2 gewählt. Der tiefer gelegene Böschungspunkt wurde vertikal auf die gleiche Höhe gebracht, wie der höher gelegene. Für jedes Profil wurde anschliessend ein Rechteck berechnet, welches bei einem repräsentativen Abfluss die äquivalente Fläche zur Originalprofilfläche aufweist. Dazu wurde mit einer Fließwiderstandsgleichung der Abfluss in eine Abflusstiefe umgerechnet. Für diese Abflusstiefe wurde ein Rechteckprofil mit demselben durchflossenen Querschnitt und hydraulischen Radius ermittelt. Für den repräsentativen Abfluss wurde hier das Mittel von Q_{\max} und Q_{crit} gebildet (Schritt 2, Variante 1). Als Q_{\max} wurde der maximal gemessene Abfluss in Littau während der Eichperiode eingesetzt: Der Wert wurde flussaufwärts über die Simulationsstrecke verkleinert. Q_{crit} ist der kritische Abfluss bei Transportbeginn.

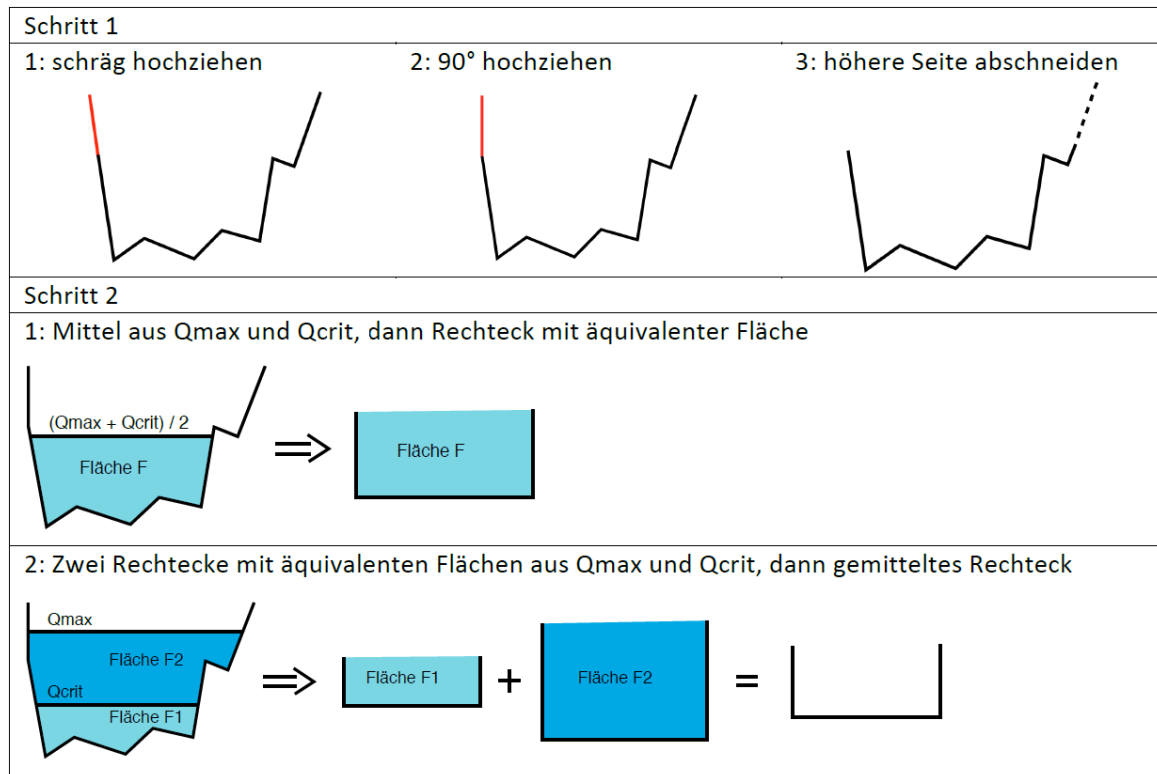


Abb. 11 Schema für die Umrechnung der Querprofile in Rechteckprofile (Burkhard 2011). Für Schritt 1 können drei verschiedene Varianten verwendet werden, für Schritt 2 können zwei verschiedene Varianten eingesetzt werden.

3 Simulationen für die Eichperiode 2000 - 2005

Für die Modelleichung 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 $\theta_{c50,min}$ (minimale kritische dimensionslose Sohlenschub-spannung bei Transportbeginn) in erster Linie das Niveau des Geschiebetransportes bzw. der Geschiebefracht beeinflusst. 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)¹, durch die Anfangskornverteilung sowie durch die repräsentative Gerinnebreite bestimmt.

Die Güte der während der Eichung erhaltenen Simulationsresultate für die Eichperiode wurde im Wesentlichen anhand der gemessenen Sohlenveränderungen (Eintiefung bzw. Auflandung) sowie anhand der Entwicklung der Geschiebefracht über die Untersuchungsstrecke visuell beurteilt. Zudem wurde überprüft, ob sich die Entwicklung der Kornverteilung in einem plausiblen Rahmen bewegt.

3.1 Abflussberechnung und Geschiebetransportformel

Bei der Kleinen Emme wurde die Abflussveränderung entlang des Gerinnes wegen vielen Abschnitten mit Gerinnegefällen S kleiner als 1 % 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.

Bei der Eichung wurden mehrere im Modell *sedFlow* implementierte Formelsätze für den Geschiebetransport getestet. Mit den Geschiebetransportformeln von Rickenmann (2001) und von Wilcock und Crowe (2003), in beiden Fällen in Kombination mit dem reduzierten Energieliniengefälle nach Rickenmann und Recking (2011), konnten für die Kleine Emme plausible Resultate erhalten 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 als homogen betrachteten Gerinneabschnitten variiert. Bei diesem Teil der Optimierung handelte es sich zu einem gewissen Grad um eine Feinjustierung. Die teilweise sehr kleinräumigen Änderungen der Korngrößenverteilung führte dazu, dass für die Bestvarianten pro Formelkombination ca. 20 Simulationen nötig waren. Für die Bestvariante wurde die Geschiebetransport-formeln von Rickenmann (2001) mit der Versteckfunktion von Wilcock und Crowe (2003) kombiniert (Gl. 3b,d) und der Wert $\theta_{c50,min} = 0.06$ gesetzt; die Versteckfunktion mit Potenzansatz gemäss Gl. (3a) mit unterschiedlichen Exponenten (z.B. mit $m = -0.8$ oder mit $m = 0$, d.h. ohne Versteck-Effekte) ergab viel weniger plausible Resultate. Hier werden vor allem die Simulationsresultate mit der Formel von Rickenmann (2001) näher diskutiert und graphisch dargestellt. Berechnungen mit der Transportformel von Wilcock und Crowe (2003) ergaben ein etwas tieferes Niveau der simulierten Geschiebefrachten.

¹ Alle Verweise auf Gleichungen (bzw. Gl.Nr. sowie abgekürzte Variablen) und Optionen der hydr. Berechnung beziehen sich auf den Synthesebericht (Rickenmann et al., 2015)

3.2 Angaben zur Variation der Randbedingungen und Eingabeparameter

Als Referenz für die Eichung des Modelles wurden das Geschiebefrachtdiagramm und die Sohlenveränderungen zwischen 1999 und 2005 verwendet. Als Inputparameter dienten die vermessenen Querprofile, die ermittelte Hydrologie, die aufgenommenen Kornverteilungen und die rekonstruierten Seiteneinträge durch Ufererosion beim Hochwasser 2005. Bei der Eichung wurden einzelne Parameter angepasst, bis die Geschiebeprozesse während der Eichperiode zufriedenstellend rekonstruiert werden konnte (Bestvariante).

Für die Simulationsstrecke in der Kleinen Emme und für die Eichperiode von 2000 bis 2005 sind die meisten Rahmenbedingungen für den Geschiebetransport relativ gut bekannt. Mit den zwei BAFU Abflussmessstationen 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 ebenfalls bekannt. Damit ist die Geschiebebilanz des Untersuchungsgebietes gut bestimmt. Da die Kleine Emme entlang 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, Grenz- oder Referenzschubspannung) verbleibt somit im Wesentlichen die Kornverteilung, welche für die Optimierung der Simulationsresultate in einem plausiblen Bereich variiert wurde.

3.2.1 Kornverteilung

Die Korngrößenverteilungen können mit der Methode der Linienzahlanalyse nur mit einer beschränkten Genauigkeit bestimmt werden (vor allem was die Umrechnung in eine Kornverteilung der Unterschicht betrifft). Die auf Kiesbänken aufgenommenen Linienzahlanalysen sind nicht unbedingt repräsentativ für das ganze Flussbett. Zudem ist nicht bekannt, wie die im Rahmen des Projektes aufgenommenen Korngrößen dem Sohlzustand im Jahre 2000 entsprechen. Wegen dieser Unsicherheiten wurde für die Simulationen eine Anpassung der räumlichen Verteilung der Korngrößen innerhalb eines plausiblen Bereichs vorgenommen.

Die aufgenommenen Kornverteilungen in der Kleinen Emme sind in Abbildung 12 gezeigt, gemäss Linienproben der WSL und von Burkhard (2012). Dargestellt sind die charakteristischen Korndurchmesser D_{50} und D_{84} der Oberflächenschicht entlang der Untersuchungsstrecke (wobei jeweils 50% respektive 84% des Gewichtsanteils des Sohlenmaterials feiner sind).

Für die Simulation des Geschiebetransportes in der Kleinen Emme wurden schliesslich acht repräsentative Kornverteilungen aus den auf Feldmessungen basierenden Korngrößenanalysen ausgewählt. Die Eichung erfolgte aufgrund der Anpassung der Geschiebefracht und der Sohlenveränderung an die gemessenen Werte. Je nach Transportformel wurde eine spezifische Kornverteilungsabfolge entlang des Flussabschnittes angepasst. Die für die Bestvariante gewählten (optimierten) Kornverteilungen sind ebenfalls in Abbildung 12 eingetragen. Zum Vergleich ist für die Bestvariante in Abbildung 13 auch die simulierte End-Kornverteilung gezeigt. Angaben zur Kornverteilung in den Zubringern Fontanne und Rümli sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7 D_{84} und D_{50} der verwendeten Kornverteilungen in den Zubringern Fontanne und Rümli.

	D_{50} [m]	D_{84} [m]
Fontanne	0.038	0.084
Rümli	0.048	0.138

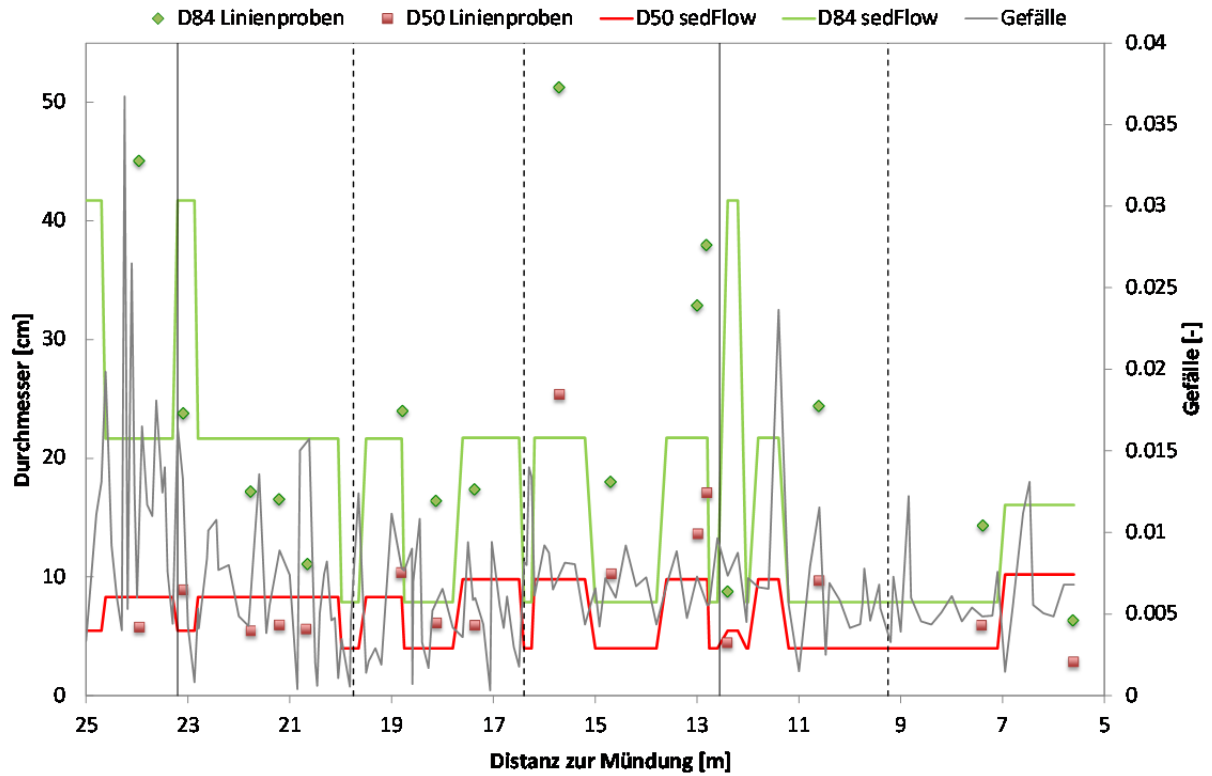


Abb. 12 Charakteristische Korndurchmesser D_{50} und D_{84} der aufgenommenen Linienzahlanalysen (einzelne Datenpunkte), sowie D_{50} und D_{84} der Kornverteilungen, die für die Bestvariante verwendet wurden (Linien).

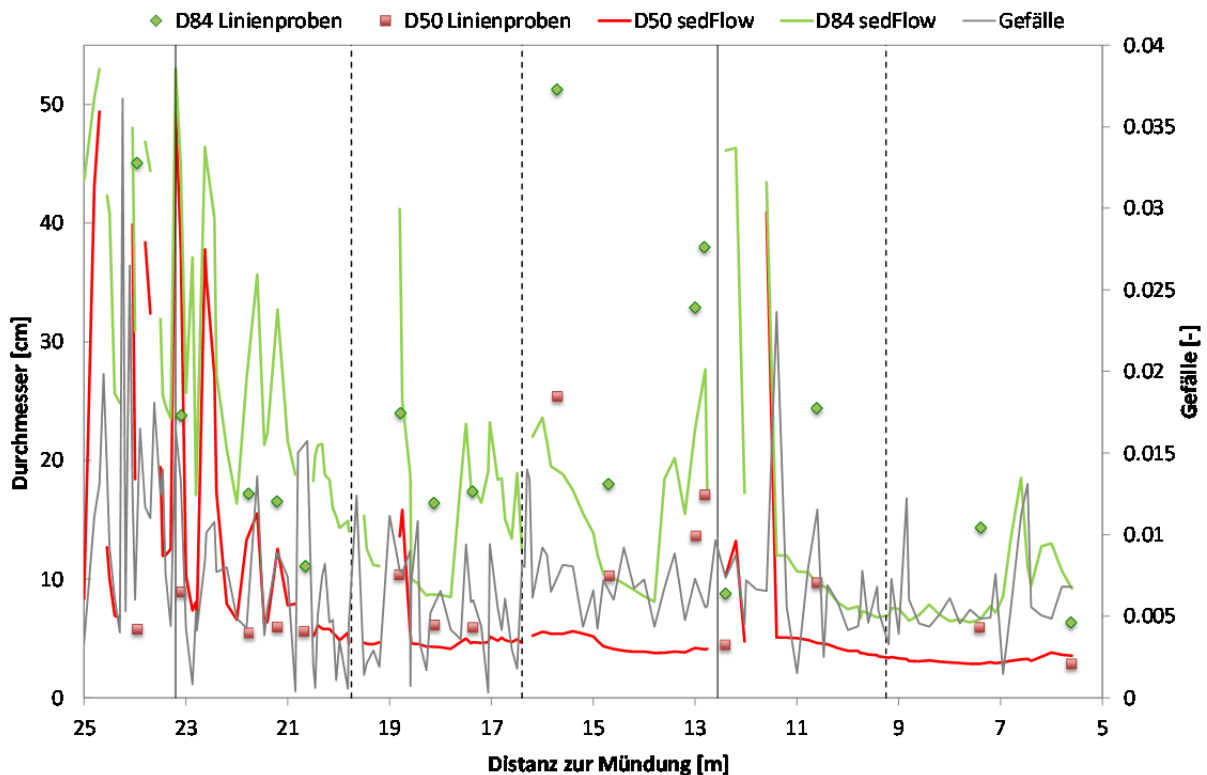


Abb. 13 Charakteristische Korndurchmesser D_{50} und D_{84} der aufgenommenen Linienzahlanalysen (einzelne Datenpunkte), sowie D_{50} und D_{84} der Kornverteilungen bei Simulationensende (Linien) für die Bestvariante.

3.2.2 Gerinnegeometrie

Die Gerinnegeometrie bleibt für alle Simulationen gleich. Die Inputparameter Gerinnebreite und Sohlenhöhe sind mit kleinen Unsicherheiten behaftet und können deswegen als relativ genau angenommen werden. Die Gerinnebreite variiert in der Kleinen Emme zwischen 26 und 74 m. Die mittlere Gerinnebreite liegt bei 40 m. Das Gerinnegefälle ist aufgrund der vermessenen Querprofile ebenfalls relativ genau bekannt. Nicht genau bekannt sind die Absturzhöhen bei den Schwellen für den Ausgangszustand. Diese wurden aufgrund von Feldbeobachtungen geschätzt und bei den durchgeführten Simulationen nicht verändert.

3.2.3 Seiteneinträge

Der Geschiebeeintrag durch die Seitenbäche (Fontannen, Rümli) sowie am oberen Modellrand wurde für die Simulation auf einen realistischen Wert gebracht, der aus den vorhandenen Geschiebestudien übernommen wurde (HZZ, 2008; Flussbau, 2009b). Gefälle und Kornverteilung der Seitenbäche Fontannen und Rümli sowie am oberen Modellrand wurden entsprechend angepasst. Die Einträge durch Ufererosion wurden als punktuelle Geschiebeeinträge proportional zum Abfluss im Hauptfluss auf die gesamte Dauer des Hochwassers im August 2005 aufgeteilt, wobei die Zugabe räumlich verteilt über die beobachteten Erosionsstrecken erfolgte.

3.3 Simulationsresultate zum Geschiebetransport für die Eichperiode

Bei der Optimierung zeigte sich, dass für die Kleine Emme mit den Geschiebetransportformeln von Rickenmann (2001) (Abb. 14) und von Wilcock und Crowe (2003) (Abb. 15) plausible Resultate erreicht werden konnten, insbesondere was das generelle Niveau der transportierten Geschiebefrachten betrifft.

Bei der Kleinen Emme kann mit der Anpassung der Kornverteilung die Simulation der Geschiebefracht erheblich beeinflusst werden. Die anderen Parameter der Hydrologie und der Gerinnegeometrie, welche relativ genau bekannt sind, wurden nur in der Sensitivitätsanalyse variiert.

Vergleicht man die Simulationsresultate der Bestvariante mit den Beobachtungen, so wird die Geschiebefracht insgesamt sehr gut abgebildet (Abb. 14a), während die Sohlenveränderungen nur teilweise zufriedenstellend simuliert werden (Abb. 14b). Die im Modell resultierenden Kornverteilungen (charakterisiert durch das D_{50} und D_{84} in Abb. 14d, 14e) sind über weite Bereiche den Beobachtungen 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.

Ein weiteres gutes Simulationsresultat konnte mit der Transportformel von Wilcock und Crowe (2003) erreicht werden (Abb. 15), wobei ein konstanter Sandanteil von 20 % angenommen wurde. Der Sandanteil beeinflusst die Grösse der sogenannten Referenzschubspannung, welche einen ähnlichen Einfluss auf den Geschiebetransport hat wie die kritische dimensionslose Sohlenschubspannung z.B. in der Transportformel von Rickenmann (2001). Mit einem Sandanteil von 20 % ergibt sich eine vergleichsweise kleine Referenzschubspannung, und damit erhält man die grössten Geschiebefrachten bei den Berechnungen mit der Transportformel von Wilcock und Crowe (2003). Diese Simulation wurde mit der gleichen Anfangs-Kornverteilung wie bei der Bestvariante mit der Transportformel von Rickenmann (2001) durchgeführt; die simulierten End-Kornverteilungen für D_{84} liegen bei beiden Transportformeln trotz unterschiedlicher Versteckfunktionen in einer ähnlichen Grösse (während die simulierten End-Kornverteilungen für D_{50} bei der Formel von Wilcock und Crowe (2003) etwas kleiner sind). Bezüglich der transportierten Geschiebefracht ergibt die Simulation mit der Transportformel von Wilcock und Crowe (2003) generell (bis zu 50 %) kleinere Werte für die obersten 18 Flusskilometer und etwas grössere Werte für die untersten 4 Flusskilometer als die Transportformel von Rickenmann (2001).

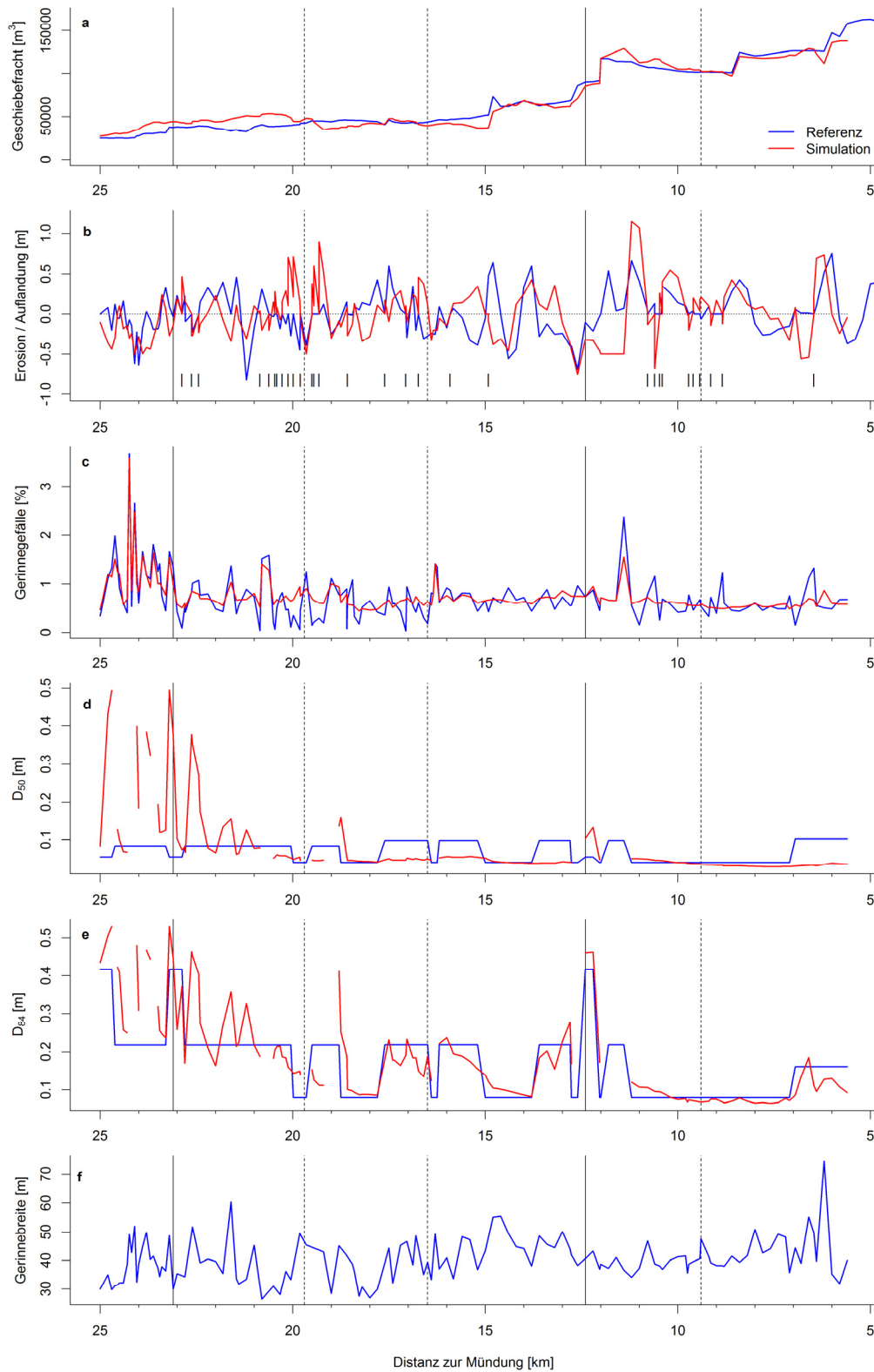


Abb. 14 Simulationsresultate der Bestvariante mit der Transportformel von Rickenmann (2001) für die Eichperiode von 2000 bis 2005, berechnet mit der Versteckfunktion nach Wilcock und Crowe (2013) (und mit $\theta_{c50,min} = 0.06$, s. auch Rickenmann et al., 2015). Dargestellt sind die Geschiebefracht, die Sohlenveränderung (Erosion bzw. Auflandung), das Gerinnegefälle, die charakteristischen Korngrößen D_{50} und D_{84} der Oberflächenschicht sowie die Gerinnebreite. Referenz = Messung bzw. Anfangszustand, Simulation = berechneter Endzustand.

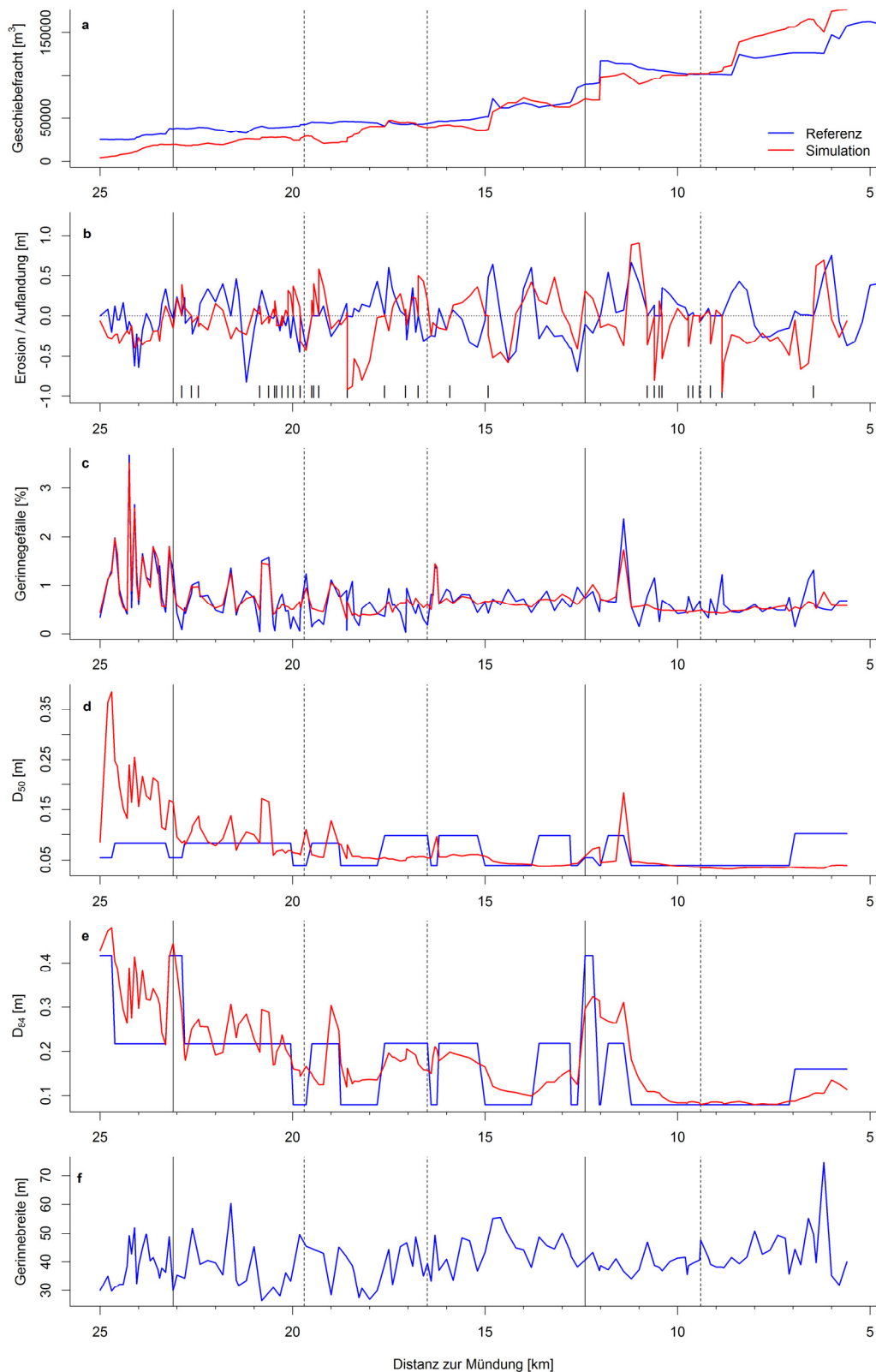


Abb. 15 Simulationsresultate für die Eichperiode von 2000 bis 2005, berechnet mit der Transportformel von Wilcock und Crowe (2003), mit konstantem Sandanteil von 20%. Dargestellt sind die Geschiebefracht, die Sohlenveränderung (Erosion bzw. Auflandung), das Gerinnegefälle, die charakteristischen Korngrößen D_{50} und D_{84} der Oberflächenschicht sowie die Gerinnebreite. Referenz = Messung bzw. Anfangszustand, Simulation = berechneter Endzustand.

3.4 Sensitivitäten der Eingabeparameter

Für die Sensitivitätsanalyse wurden die Werte der folgenden Eingabedaten, im Vergleich zur Bestvariante, um +/- 30 % variiert: (i) die Kornverteilungen, (ii) die kritische Schubspannung bei Transportbeginn ($\theta_{c50,min}$), (iii) die Gerinnebreiten und (iv) die Ganglinien. Dabei wurde jede mögliche Kombination der variablen Parameter (Referenzwert, Minimal-, und Maximalwert) aus Kornverteilung, kritischer Schubspannung, Gerinnebreite sowie Ganglinie gebildet. So wurden 81 Simulationen durchgeführt (Abb. 16). 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. Die verwendete Formel war diejenige von Rickenmann (2001) (Gl. 2a), kombiniert mit der Versteckfunktion nach Wilcock und Crowe (2003) (Gl. 3b, 3d).

Betrachtet man die beiden mittleren Quartile (25 – 75 % aller simulierten Werte), so ist die Sensitivität der genannten Parameter auf die absoluten Sohlenveränderungen eher gering (Abb. 16). Bei den extremen Perzentilen (2.5 bzw. 97.5 % aller simulierten Werte) ergeben sich in den Abschnitten von km 16 bis km 11 sowie von km 9 bis km 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 m³ (im Bereich von km 13) für das 75 %-Perzentil eine relative Erhöhung um einen Faktor 2.1 und für das 97.5 %-Perzentil um einen Faktor 5.7.

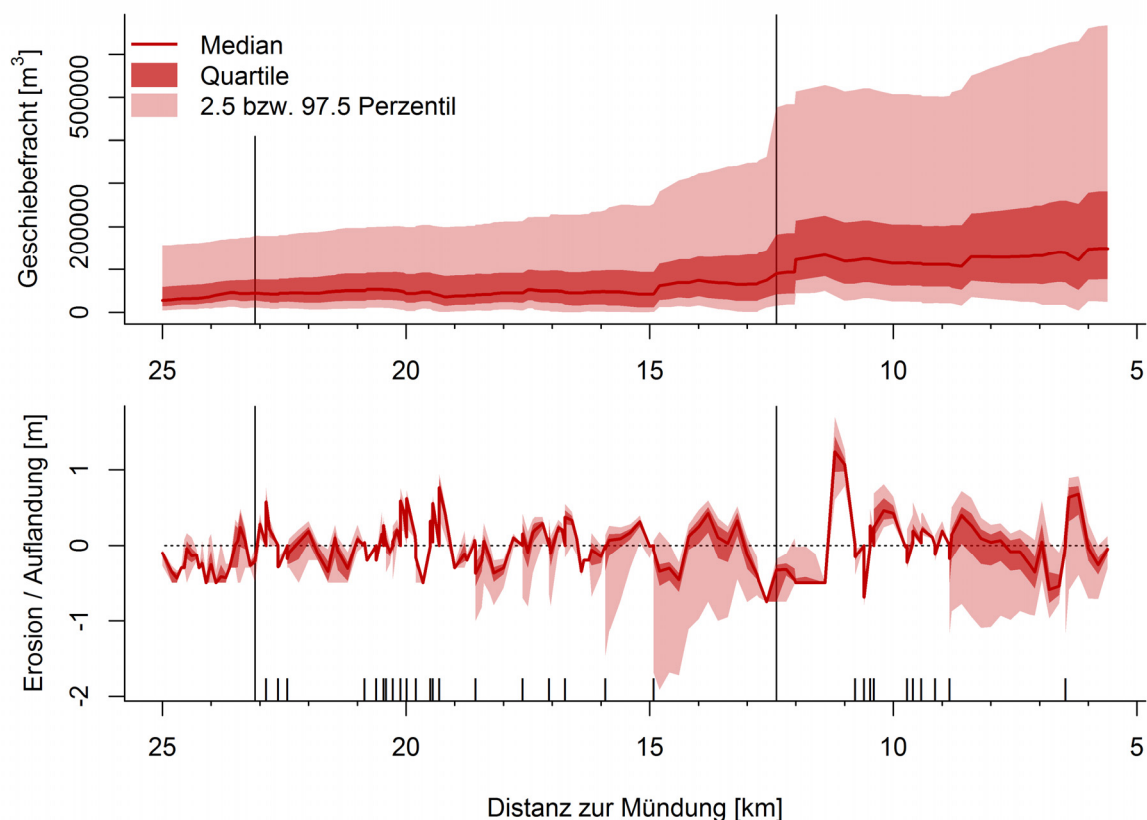


Abb. 16 Geschiebefracht (oben) und Sohlenveränderung (unten) von 81 Simulationen der Sensitivitätsanalyse für die Kleine Emme. Resultate der Transportformel von Rickenmann (2001), Versteckfunktion nach Wilcock und Crowe (2003). Der Minimalwert der kritischen Schubspannung bei Transportbeginn ($\theta_{c50,min}$) hatte die Werte 0.042, 0.06 und 0.078.

3.5 Wahl der Versteckfunktion

Für die Bestvariante, berechnet mit der Transportformel von Rickenmann (2001), wurde der Einfluss der Wahl von verschiedenen Versteckfunktionen untersucht, durch welche die kritische Schubspannung bei Transportbeginn für die verschiedenen Kornfraktionen unterschiedlich verändert wird. Die Versteckfunktionen mit einem Potenzansatz ergeben für die Kleine Emme bei sonst gleichen Rahmenbedingungen generell grössere transportierte Geschiebefrachten und führen in gewissen Gerinneabschnitten zu mehr Erosion oder Auflandung als bei der Bestvariante (Abb. 17).

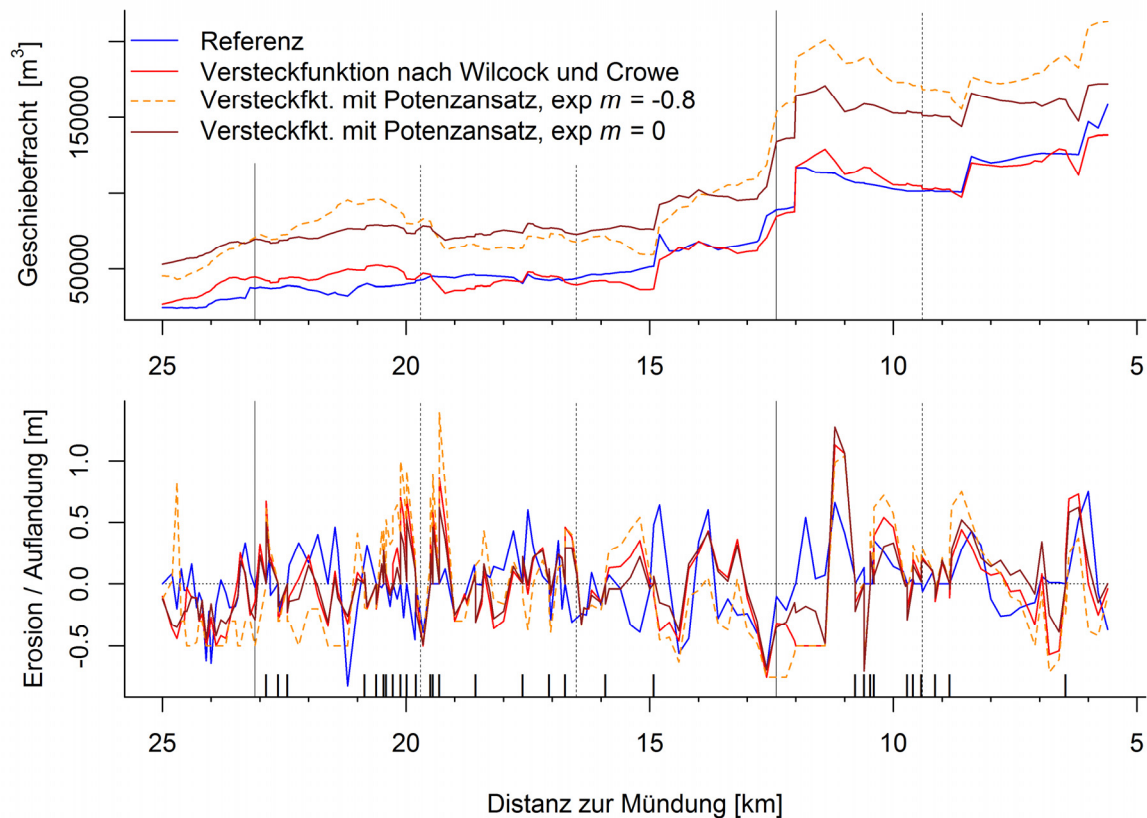


Abb. 17 Vergleich der der Simulationsresultate für unterschiedliche Ansätze der Versteckfunktion. Dargestellt sind die Geschiebefracht und die Sohlenveränderungen für die Eichperiode (September 2000 – November 2005) berechnet mit der Transportformel von Rickenmann. Die rote Linie repräsentiert die Simulationsresultate der (kalibrierten) Bestvariante. Bei allen Varianten wurde mit $\theta_{c50,min} = 0.06$ gerechnet.

4 Simulationen für mögliche Hochwasser in der Zukunft (Szenarien)

Mit drei unterschiedlichen Formen von Hochwasserganglinien mit verschiedenen Abflussfrachten und Abflussspitzen (siehe Kap. 2.4.4) wurden die potentielle Geschiebeverfrachtung und Sohlenveränderung gerechnet. Pro Ganglinienform wurden 81 Simulationen durchgeführt. Die Simulationen wurden mit der Transportformel von Rickenmann (2001) in Kombination mit der Versteckfunktion nach Wilcock und Crowe (2013) und mit $\theta_{c50,\min} = 0.06$ durchgeführt.

Für eine 100-jährliche Hochwasserspitze kombiniert mit einer grossen Wasserfracht (Faktor 1.26) zeigt Abbildung 18 den Einfluss der Ganglinienform auf die Simulationsresultate. Die Sohlenveränderung ist für alle drei Hochwasserganglinien ähnlich. Die transportierte Geschiebefracht unterscheidet sich z.T. aber stark. Vor allem im oberen Teil der Simulationsstrecke (km 25–11) ergaben sich unterschiedliche Frachten von bis zu einem Faktor 3. In den untersten 5 km wurden ähnliche Frachten simuliert.

Die unterschiedlichen Werte im oberen Teil der Simulationsstrecke sind aber nicht auf die verschiedenen Ganglinienformen zurückzuführen. Vielmehr ist die relative Verteilung des Gesamtabflusses auf die drei Teileinzugsgebiete (Oberlauf, Fontanne, Rümli) bei den drei Hochwasserganglinien sehr unterschiedlich (Tabelle 8). Dies ist vermutlich eine Folge unterschiedlicher Niederschlagsverteilungen im ganzen Einzugsgebiet; die Hochwasserspitzen und –frachten wurden normiert (siehe Kap. 2.4.4), nicht aber die Verteilung im Einzugsgebiet). Am Ende der Simulationsstrecke (Summe) sind die Abflussfrachten wieder identisch.

Die Auswertung der Szenarienanalyse ergibt für alle drei Ganglinienformen eine grosse Variabilität der Geschiebefracht (Abb. 19). Die Sohlenveränderung hingegen reagiert nicht sensitiv auf eine Veränderung der Hochwasserspitze oder –fracht.

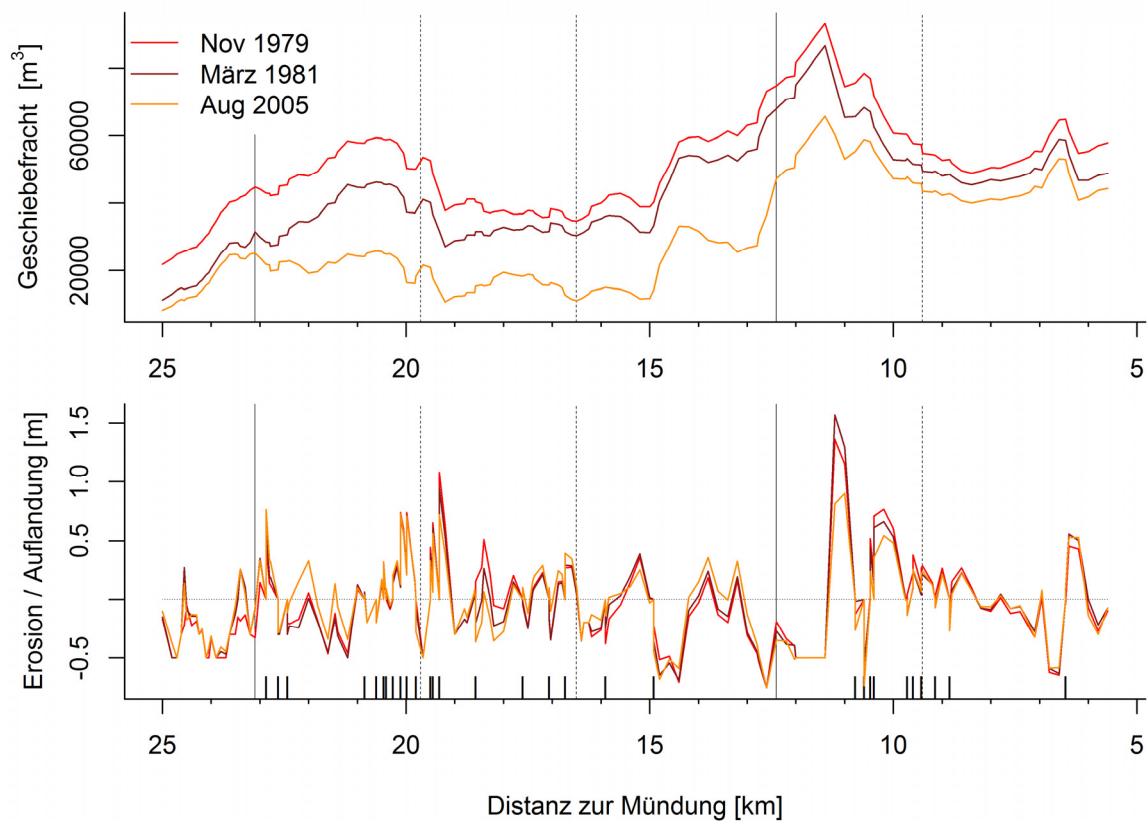


Abb. 18 Geschiebefracht und Sohlenveränderung für drei verschiedene Ganglinienformen. (i) Nov 1979: frontbetont; (ii) März 1981: schlussbetont; (iii) August 2005: mittenbetont. Dargestellt sind die Simulationsergebnisse gerechnet mit einer hundertjährigen Hochwasserspitze kombiniert mit einer grossen Wasserfracht (Faktor 1.26, vgl. Tabelle 6).

Tabelle 8 Abflussfrachten der drei Zubringer in der Simulationsstrecke der Kleinen Emme sowie Summe für die drei ausgewählten Hochwasserganglinien (Hundert-jährliche Hochwasserspitze kombiniert mit einer grossen Wasserfracht, d.h. mit Faktor 1.26).

	Abflussfracht [m ³]		
	Nov 1979	März 1981	Aug 2005
Oberlauf	$7.76 \cdot 10^7$	$5.23 \cdot 10^7$	$4.75 \cdot 10^7$
Fontanne	$5.25 \cdot 10^6$	$2.72 \cdot 10^7$	$9.69 \cdot 10^6$
Rümlig	$8.30 \cdot 10^6$	$1.16 \cdot 10^7$	$3.40 \cdot 10^7$
Summe	$9.12 \cdot 10^7$	$9.11 \cdot 10^7$	$9.12 \cdot 10^7$

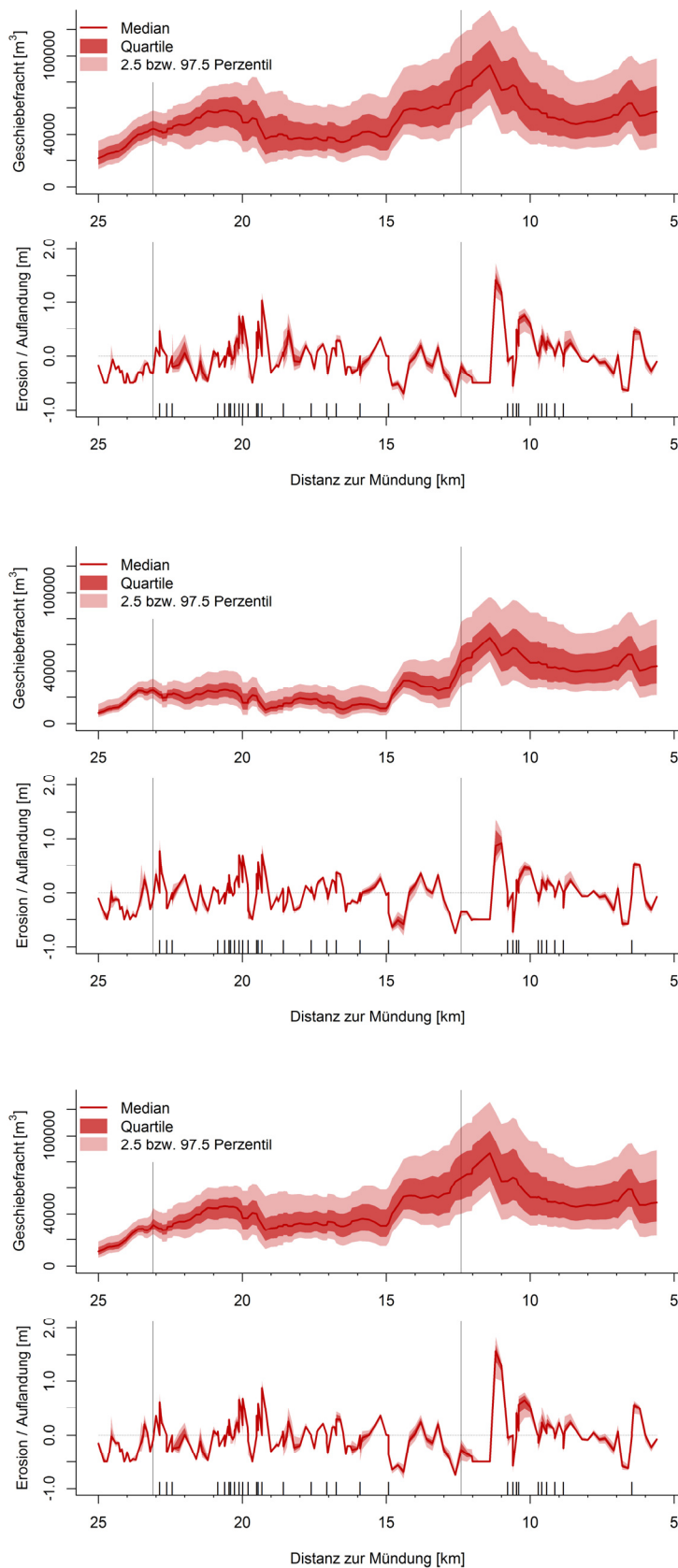


Abb. 19 Geschiebefracht und Sohlenänderung für mögliche Hochwasserszenarien in der Kleinen Emme. Dargestellt sind jeweils die Resultate von 81 Simulationen für die drei Formen der Hochwasserganglinien. (a) (oben) HW-Ganglinie von Nov 1979; (b) (Mitte) HW-Ganglinie von Aug 2005; (c) (unten) HW-Ganglinie von März 1981.

5 Literaturverzeichnis

- Badoux A., Peter, A., Rickenmann, D., Junker, J., Heimann, F., Zappa, M., Turowski, J.M. (2014): Geschiebetransport und Forellenhabitats in Gebirgsflüssen der Schweiz: mögliche Auswirkungen der Klimaänderung. *Wasser Energie Luft*, 106 (3), 200-209.
- BAFU (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217, 76p.
- Bart (2005): Ereigniskartierung Kleine Emme. Ingenieure Bart AG, St. Gallen, im Auftrag des Kantons Luzern, Technischer Bericht, Bericht 21032-1, 15.9.2005, sowie Karte der Phänomene, September 2005.
- Bernhard, L. und Zappa, M. (2012): Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete (Schlussbericht CCHydrologie, Teilprojekt WHH-CH-Hydro). Unveröffentlichter Bericht der Eidg. Forschungsanstalt WSL zu Händen des Bundesamtes für Umwelt BAFU
- Bezzola, G.R., Hegg, C. (eds). (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1–Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Umwelt-Wissen Nr. 0707.
- Bezzola, G.R., Hegg, C. (eds). (2008): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2–Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Umwelt-Wissen Nr. 2508.
- Burkhard, L. (2011): Simulation des Geschiebetransportes in Gebirgsflüssen während Hochwasserereignissen am Beispiel der Kleinen Emme (LU). Masterarbeit an der ETH Zürich und an der Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Fehr, R. (1987): Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 105, 1104-1109.
- Flussbau (2009a): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Sohlenveränderungen und Geschiebefrachten. Flussbau AG, Bern, unveröffentlichter Bericht, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Bern.
- Flussbau (2009b): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Seitenerosion. Flussbau AG, Bern, unveröffentlichter Bericht, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Bern.
- Heimann, F.U.M., Rickenmann, D., Turowski, J.M. (2015a): *sedFlow* – a tool for simulating fractional bedload transport and longitudinal profile evolution in mountain streams. *Earth Surface Dynamics*, 3, 15-34, doi: 10.5194/esurf-3-15-2015.
- Heimann, F.U.M., Rickenmann, D., Böckli, M., Badoux, A., Turowski, J.M., Kirchner, J.W. (2015b): Calculation of bedload transport in Swiss mountain rivers using the model *sedFlow*: proof of concept. *Earth Surface Dynamics*, 3, 35–54, doi:10.5194/esurfd-3-35-2015.
- HZP (2008): Kleine Emme, Geschiebehaushaltstudie. Abschnitt Fontanne bis Reuss. Hunziker, Zarn & Partner AG (HZP), Aarau, unveröffentlichter Bericht, im Auftrag des Kanton Luzern, Dienststelle Verkehr und Infrastruktur.
- Junker, J., Heimann, F.U.M., Hauer, C., Turowski, J.M., Rickenmann, D., Zappa, M., Peter, A. (2014): Assessing the impact of climate change on brown trout (*Salmo trutta fario*) recruitment. *Hydrobiologia*, online version, doi: 10.1007/s10750-014-2073-4.

- Kellerhals & Haefeli (2002): Geologischer Atlas der Schweiz, 1:25'000, Blatt 1149 Wolhusen. Unpubliziertes Originaldokument, Kellerhals & Haefeli AG, Bern, deponiert im Archiv der Geologischen Landesaufnahme, Bundesamt für Landestopographie swisstopo, Wabern.
- KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. Ein Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHS), Wasser Energie Luft, 99, 55–57.
- Oeko-B (2005): Ereignisdokumentation Unwetter 21.-23. August 2005, Übersicht Ereignisse Kleine Emme (Wolhusen-Luzern). Oeko-B AG, Schüpfheim, im Auftrag des Kantons Luzern, Situationsplan, 27.12.2006.
- Rajczak, J., Pall, P., Schär, C. (2013): Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region. *Journal of Geophysical Research - Atmosphere*, 118, doi:10.1002/jgrd.50297.
- Rickenmann D., Heimann F., Böckli M., Turowski J.M., Bieler C., Badoux A. (2014): Geschiebetransport-Simulationen mit *sedFlow* in zwei Gebirgsflüssen der Schweiz. *Wasser Energie Luft*, 106 (3), 187-199.
- Rickenmann, D., Böckli, M., Heimann, F.U.M., Badoux, A. (2015): Synthesebericht: Das Modell *sedFlow* und Erfahrungen aus Simulationen des Geschiebetransportes in fünf Gebirgsflüssen der Schweiz. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Schweiz, WSL Berichte, Heft 24, 68p. (www.wsl.ch/publikationen/pdf/14594.pdf)
- Scherrer (2012): Hydrologische Grundlagen an den Seitenbächen der Kleinen Emme (Unterlauf). Beilage 2: Historische Hochwasser. Büro Scherrer AG, Reinach, Bericht 11/153, im Auftrag des Kantons Luzern, Verkehr und Infrastruktur, Abteilung Naturgefahren.
- Viviroli D., Gurtz J., Zappa M. (2007): The Hydrological Modelling System PREVAH. *Geographica Bernensia P40*, Bern, Institute of Geography, University of Bern, ISBN 978-3-905835-01-0.
- VAW (1997): Geschiebehaushalt Kleine Emme, Studie über den Geschiebehaushalt der Kleinen Emme und Prognose der zukünftigen Sohlenveränderungen zwischen der Lammschlucht und der Mündung in die Reuss. Versuchsanstalt für Wasserbau, ETH Zürich, Bericht Nr. 4106, im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Luzern.