

# Grosse Schliere:

Geschiebetransportsimulationen mit *sedFlow*



Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Forschungseinheit Gebirgshydrologie und Massenbewegungen

8903 Birmensdorf, Schweiz

Martin Böckli, Christian Greber, Dieter Rickenmann

21. August 2015



Eidg. Forschungsanstalt für Wald,  
Schnee und Landschaft WSL

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
1.1	Ziele der Simulationsberechnungen .....	2
1.2	Simulierter Gerinneabschnitt .....	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>4</b>
2.1	Beobachtungen zum Geschiebetransport .....	4
2.2	Hydrologie .....	5
2.3	Kornverteilungen .....	7
2.4	Gerinnegeometrie .....	8
2.5	Geschiebeeintrag durch Seitenzubringer und Rutschungen .....	9
<b>3</b>	<b>Simulationen für die Eichperiode Hochwasser 2005</b> .....	<b>11</b>
3.1	Abflussberechnung und Geschiebetransportformel .....	11
3.2	Input für die Periode 2005 .....	11
3.3	Simulationsresultate Geschiebetransport für die Eichperiode .....	12
<b>4</b>	<b>Simulationsresultate für die Validierungsperiode</b> .....	<b>15</b>
4.1	Input für die Periode 2002-2003 .....	15
4.2	Simulationsresultate Geschiebetransport für die Periode 2002–2003 .....	15
4.3	Input für die Periode 2003-2004 .....	16
4.4	Simulationsresultate Geschiebetransport für die Periode 2003-2004 .....	16
<b>5</b>	<b>Sensitivitätsbetrachtung</b> .....	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>24</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Ziele der Simulationsberechnungen

Mit dem an der WSL entwickelten Modell *sedFlow* wurden Geschiebetransportsimulationen an der Grossen Schliere durchgeführt. Die Hauptziele dieses Berichtes sind:

- Präsentation der Grundlagendaten zu den Geschiebetransportberechnungen in der Grossen Schliere
- Präsentation der Resultate zu folgenden Berechnungen:
  1. Kalibrierung des Modelles anhand des Ereignisses vom August 2005
  2. Validierung des Modelles anhand von Daten zum Geschiebetransport für die Jahre 2002 und 2003
  3. Betrachtung der Sensitivität der simulierten Geschiebefracht in Bezug auf verschiedene Modellparameter und Eingabedaten

Für die Kalibrierung des Modelles wurde v.a. die bis zum Sammler Schlierenrüti transportierte Geschiebefracht beim Hochwasserereignis vom August 2005 abgeschätzt. Die hier dargestellten Arbeiten wurden im Rahmen des BAFU (GHO) Projektes „Feststofftransport in Gebirgseinzugsgebieten“ (Vertrags-Nr. 11.0026.PJ/ K154-7241) durchgeführt. Der Bericht basiert im Wesentlichen auf den Resultaten der an der WSL und ETH durchgeführten Masterarbeit von Christian Greber (Greber, 2013).

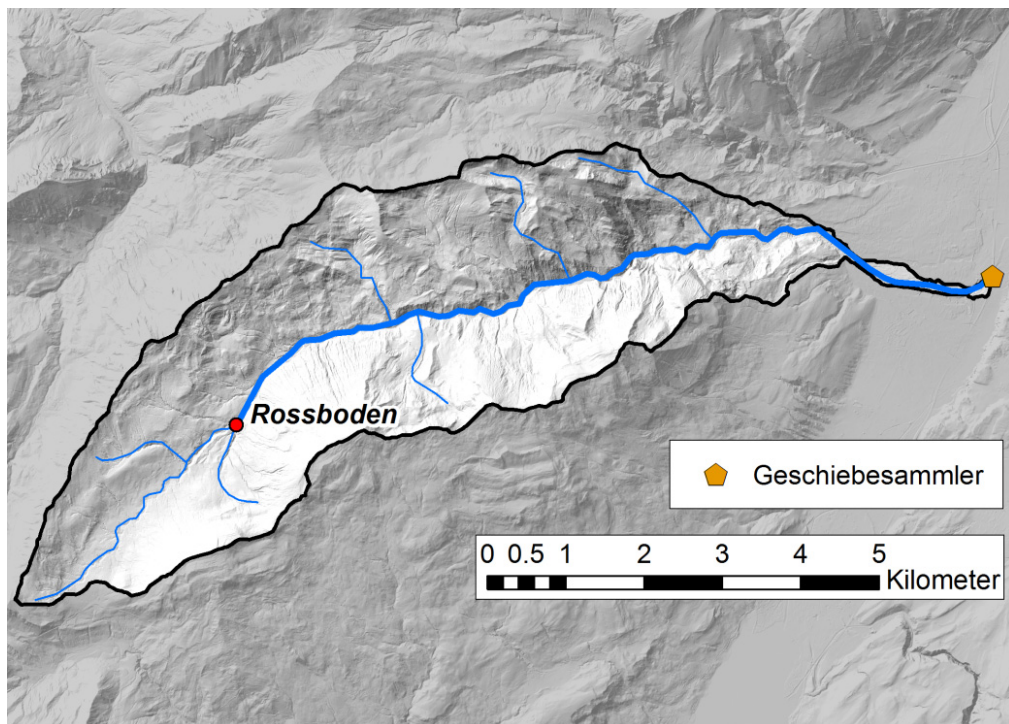
## 1.2 Simulierter Gerinneabschnitt

Die Grosse Schliere befindet sich im Kanton Obwalden und hat eine Einzugsgebietsfläche von 26.5 km<sup>2</sup> (bis zum Sammler Schlierenrüti) (Abb. 1). Sie entspringt auf einer Höhe von 1600 m ü.M. und mündet auf einer Höhe von 445 m ü.M. in die Sarner Aa. Die Simulationsstrecke erstreckt sich vom Rossboden bis zum Geschiebesammler Schlierenrüti und hat eine Länge von 11.6 km. Die mittlere Gerinneneigung liegt bei 7.7 %. Das gesamte Einzugsgebiet der Grossen Schliere liegt unterhalb der Baumgrenze und weist deshalb auch keine vergletscherten Flächen auf. Das Gerinne ist stark verbaut. Entlang des untersten Kilometers befindet sich eine Schwellentreppe mit Zwischenabständen von 20 bis 30 m. Auch die Ufer sind hier hart verbaut. Der zweite Kilometer oberhalb des Geschiebesammlers ist mit Buhnen befestigt. Weiter flussaufwärts hat es eine Vielzahl von grösseren und kleineren Sperren mit Absturzhöhe von bis zu 12 m. Auch die grösseren Seitenzubringer sind zum Teil stark ausgebaut.

## 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. 1** Übersicht über das Einzugsgebiet der Grossen Schliere. Dargestellt sind der simulierte Gerinneabschnitt (blau, dick) und die wichtigsten Seitenzubringer. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118).

## 2 Grundlagen

### 2.1 Beobachtungen zum Geschiebetransport

Für die Kalibrierung und Validierung des Modelles liegen Daten zu Feststoffentnahmen aus dem Geschiebesammler Schlierenrüti vor. Der teilweise natürliche Geschiebeablagerungsplatz (Sammler) befindet sich am unteren Ende der simulierten Untersuchungsstrecke. Diese Schätzungen der entnommenen Geschiebefrachten sind in der SOLID-Datenbank des BAFU (Stand 25.2.2013) dokumentiert (Tabelle 1). Dabei sind die Entnahmemengen verschiedener Perioden zwischen 1984 und 2007 angegeben. Fehlende Angaben bedeuten, dass keine Daten vom Kanton ans BAFU übermittelt wurden. In Jahren mit einer Nullmessung wurde keine Entnahme vorgenommen (schriftl. Mitteilung, A. Grasso). Ablagerungen können jedoch auch in dieser Zeit vorgekommen sein. Von Herrn B. Amstutz (schriftl. Mitteilung) des Ingenieurbüros ZEO AG wurde eine zusätzliche Liste mit Geschiebeentnahmen zur Verfügung gestellt (Tabelle 2). Das Büro ZEO ist seit vielen Jahren für die flussbauliche Betreuung der Grossen Schliere zuständig. Die Liste in Tabelle 2 ist etwas detaillierter in Bezug auf Entnahmeort, Zeitpunkt sowie Grund der Geschiebeentnahme. Sie deckt sich aber nur teilweise mit der Liste der SOLID-Datenbank. Die deutlichste Diskrepanz besteht für die SOLID-Periode von Januar bis September 2005. Gemäss SOLID-Datenbank wurden in dieser Zeit 57'000 m<sup>3</sup> Geschiebe entnommen. In der Auflistung von ZEO wird für diese Periode jedoch keine Entnahme angegeben. Dies deckt sich auch mit den Aussagen des Revierförsters R. Wallimann (mündl. Mitteilung), wonach die Sammlerleerung normalerweise nicht direkt nach Ereignissen erfolgt. Deshalb liegt die Annahme nahe, dass es sich beim Wert der SOLID-Datenbank um eine Abschätzung des verfrachteten Materials während des Ereignisses 2005 handelt. Auch der Eintrag in der SOLID-Datenbank für die Periode von September bis Dezember 2005 dürfte dem Ereignis 2005 zuzuordnen sein.

**Tabelle 1** Geschiebefracht-Entnahmen aus der Grossen Schliere gemäss SOLID-Datenbank des BAFU.

Total [m <sup>3</sup> ]	Geschiebefracht [m <sup>3</sup> ]	Holz [m <sup>3</sup> ]	Start Beobachtungszeitraum	Ende Beobachtungszeitraum
25'600	25'600	0	1. Jan 1984	31. Jan 2002
5'100	5'100	0	1. Jan 2003	31. Dez 2003
0	0	0	1. Jan 2004	31. Dez 2004
57'100	57'000	100	1. Jan 2005	15 Sep 2005
19'400	19'400	0	16 Sep 2005	31 Dez 2005
0	0	0	1. Jan 2007	31 Dez 2007

**Tabelle 2** Geschiebefracht-Entnahmen gemäss Ingenieurbüro ZEO (angepasst nach schriftl. Mitteilung, B. Amstutz). *San.* = Sanierung; *HSK* = Hochwasserschutzkanal; *oh* = oberhalb

Jahr	Zeitpunkt	Ort	Geschiebefracht [m <sup>3</sup> ]	Bemerkung
1985	März/Mai	Sammler	51'460	
2002	Jan/Feb	Sammler	25'664	
	Feb	Kanal oh Kantonsstrasse	2'290	
2003	Juni/Juli	Kanal Brünigbahn bis Sammler	5'112	
2005	Okt/Nov	Kanal Bereich Zentralbahn	4'728	HW 2005
	Herbst	Sammler	12 – 15'000	San. HSK + Samraaa
2006	Okt	Sammler	300	Korp Kägiswil
	Nov	Kanal Zentralbahn bis Sammler	2'472	San. Kanal
2008	Feb	Sammler	24'015	HW 2005
	Okt	Kanal Bereich Zentralbahn	3'399	HW 2008
	Nov	Kanal oh + Kantonsstrasse abwärts	1'904	San. Kanal

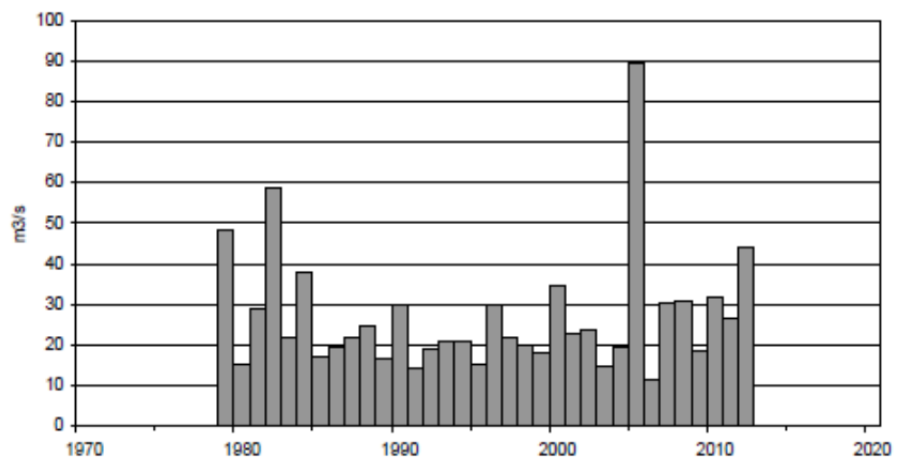
Da es sich um einen natürlichen, grossflächigen Sammler handelt, wird bei den Entnahmen nach der Baggerung nicht immer die gleiche Kote erreicht (mündl. Mitteilung R. Wallimann; schriftl. Mitteilung B. Amstutz), was eine Unsicherheit bezüglich der beobachteten Frachten beinhaltet. Zudem könnte beim Hochwasser 2005 auch ein Teil der Gesamtfracht durch den Sammler hindurch transportiert worden sein. Aufgrund aller Unsicherheiten wird hier mit einer Geschiebefracht während des Hochwasserereignisses 2005 von 50'000-80'000 m<sup>3</sup> gerechnet.

## 2.2 Hydrologie

### BAFU-Abflussmessungen

Die BAFU-Messstation Chilch-Erli in Alpnach ist seit 1979 in Betrieb und liefert Abflussdaten der Kleinen Schliere. Die Hochwasserstatistik beruht auf einer 34-jährigen Messreihe von 1979 bis 2012. Die grösste Hochwasserspitze mit einem Wert von 89 m<sup>3</sup>/s wurde während des Hochwasserereignisses von 2005 gemessen und entspricht ungefähr einem 100-jährlichen Ereignis (Abb. 2). Im Einzugsgebiet der Grossen Schliere befindet sich keine Abfluss-Messstation.

Jährlichkeit [Jahre]	Abfluss [m <sup>3</sup> /s]
2	23
5	34
10	44
30	63
50	73
100	90
300	123



**Abb. 2** Hochwasserstatistik und gemessene Hochwasserspitzen der gesamten Beobachtungsperiode 1979 – 2012 an der Messstation Chilch-Erli in Alpnach. (Quelle: hydrodaten.admin.ch)

### Vergleichbarkeit der Grossen und Kleinen Schliere

Die Einzugsgebiete der Grossen und Kleinen Schliere liegen direkt nebeneinander. Die Oberflächenbedeckung weist bei beiden Einzugsgebieten einen relativ grossen Waldanteil, wenig vegetationslose Fläche und keine Vergletscherungen auf. Auch die mittlere Höhenlage ist vergleichbar. Die Fläche des Einzugsgebietes der Kleinen Schliere beträgt bei der Abflussmessstation Alpnach, Chilch-Erli 21.8 km<sup>2</sup>. Bei der unteren Grenze der Untersuchungsstrecke der Grossen Schliere, direkt oberhalb des Geschiebesammlers, beträgt die Fläche 26.5 km<sup>2</sup>. Da die beiden Einzugsgebiete sehr ähnlich sind, scheint eine Schätzung des Abflusses der Grossen Schliere auf der Basis der Daten der Kleinen Schliere vertretbar und sinnvoll. Dies ist aufgrund der fehlenden Abflussmessung bei der Grossen Schliere wichtig.

### Anpassung der Abflussdaten für die Grosse Schliere

Das Einzugsgebiet der Grossen Schliere ist um einen Faktor 1.21 grösser als dasjenige der Kleinen Schliere. Mit diesem Faktor müsste der gemessene Abfluss der Kleinen Schliere vergrössert werden, wenn eine lineare Flächenskalierung angenommen würde.

Mit dem Programm HQx\_meso\_CH (BWG, 2003) zur Bestimmung von Hochwasserspitzen in mesoskaligen Einzugsgebieten der Schweiz (10 –500 km<sup>2</sup>) wurden Abflüsse verschiedener Jährlichkeiten für die Grosse Schliere berechnet. Diese Werte wurden mit den gemessenen Werten der Kleinen Schliere verglichen. Es zeigte sich, dass der Vergrößerungsfaktor umso kleiner wird, je grösser das Ereignis ist. Für ein HQ<sub>100</sub> erhält man einen Faktor von 1.11 und für ein HQ<sub>10</sub> einen Faktor von 1.44. Dass der Faktor für kleine Abflüsse grösser ist als der Flächenfaktor, erscheint nicht plausibel. Für die Umrechnung wird daher eine Beziehung postuliert, welche für kleine Abflüsse den Flächenfaktor von 1.21 und für ein HQ<sub>100</sub> den mittels HQx\_meso\_CH abgeleiteten Faktor von 1.11 verwendet. Dazwischen wird eine lineare Funktion angenommen (Gleichung 1).

$$f = 1.21 - 0.0011 * Q_{\text{Kleine Schliere}} \quad (1)$$

$f$  = Vergrößerungsfaktor

$Q_{\text{Kleine Schliere}}$  = gemessener Abfluss an der Kleinen Schliere [m<sup>3</sup>/s]

### Verwendete Hydrologie

Um einen Abfluss an mehreren Stellen im Gerinne zu erhalten, wurde das Einzugsgebiet der Grossen Schliere in sieben Teileinzugsgebiete aufgeteilt (Abb. 3). Dabei wurden mehrere kleine, seitliche Wildbacheinzugsgebiete jeweils zu einem grösseren zusammengefasst. Der berechnete Abfluss wurde flächenanteilmässig auf die verschiedenen Teileinzugsgebiete aufgeteilt. Der zusätzliche Abfluss, der durch die Seitenbäche in die Grosse Schliere gelangt, wird im Modell also an sechs fiktiven Orten ins Gerinne eingespeist.

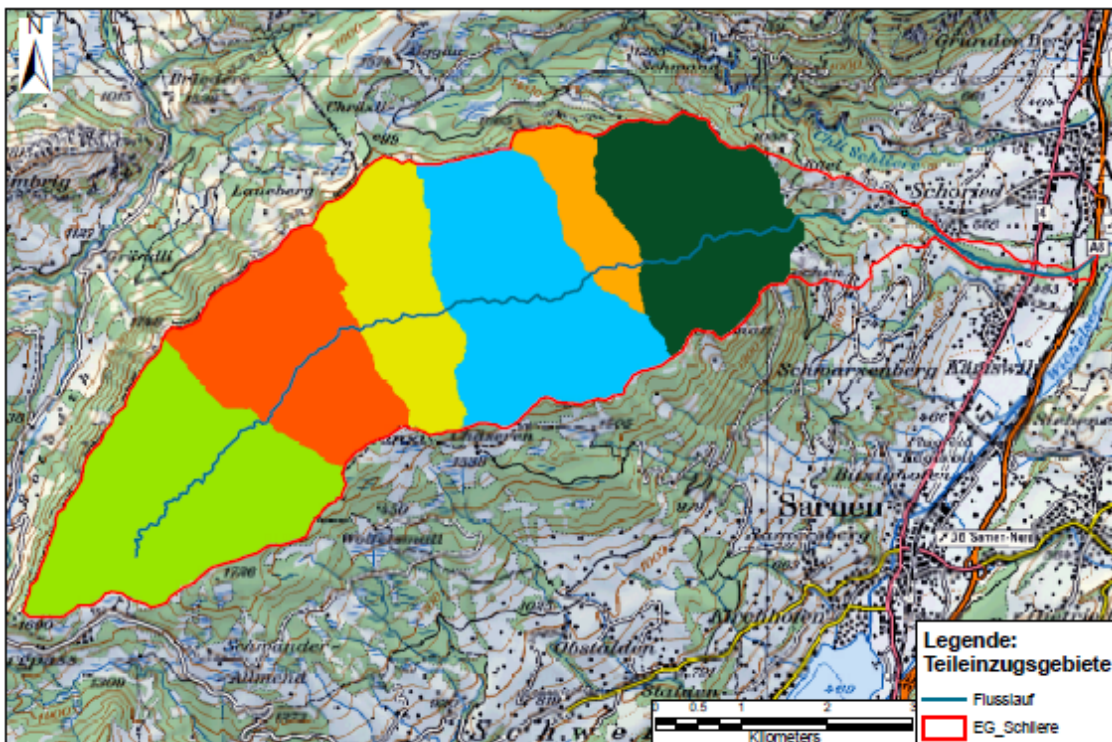


Abb. 3 Teileinzugsgebiete für die Geschiebetransportsimulationen mit sedFlow.

### Verifizierung mit PREVAH-Simulationen

Um die Ähnlichkeit der Einzugsgebiete der Grossen und der Kleinen Schliere zu prüfen, wurden Niederschlag-Abfluss-Simulationen mit dem Modell PREVAH (Viviroli et al., 2007) durchgeführt. Dabei wurde Folgendes festgestellt: i) Die PREVAH-Simulation unterschätzt die für den Geschiebetransport entscheidenden mittleren und grossen Abflüsse in der Kleinen Schliere; ii) Die Abflussspitzen treten in den beiden Einzugsgebieten meist gleichzeitig auf und der relative Unterschied zwischen den Abflüssen der beiden Einzugsgebiete bleibt über die Simulationsperiode annähernd konstant (Abb. 4). Dies lässt darauf schliessen, dass das Niederschlags-Abfluss-Verhalten in beiden Gebieten ähnlich ist. Aus diesen Erkenntnissen folgern wir, dass a) Die Resultate der PREVAH-Simulationen nicht geeignet wären für Geschiebetransportsimulationen in der Grossen Schliere und b) Die Umrechnung der Messdaten der Kleinen Schliere auf das Einzugsgebiet der Grossen Schliere als plausibel betrachtet werden kann.

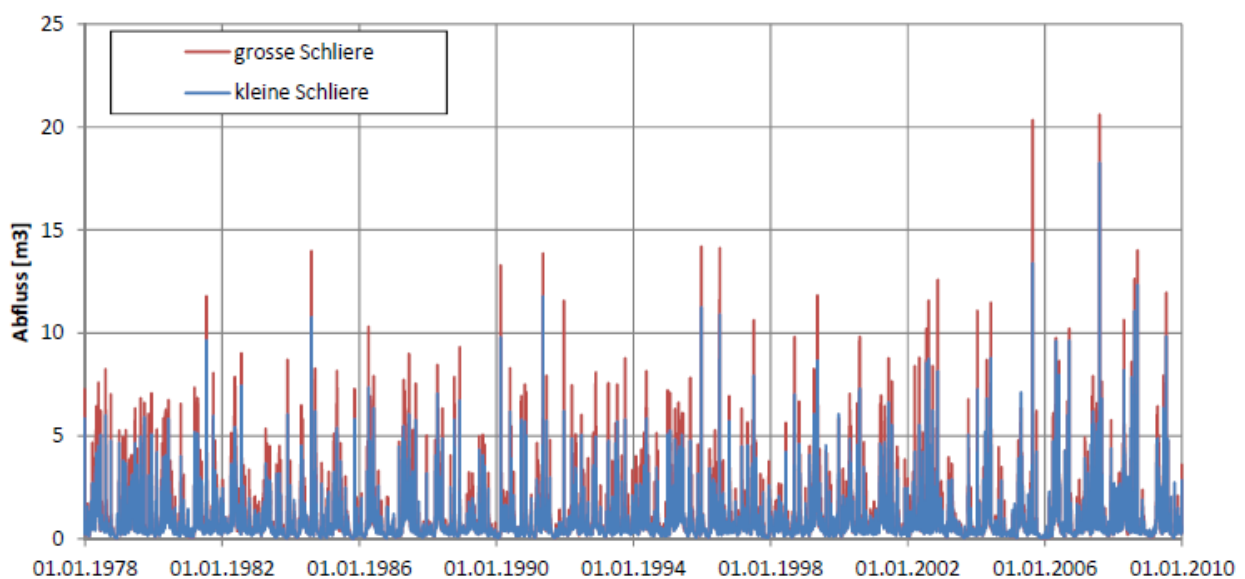
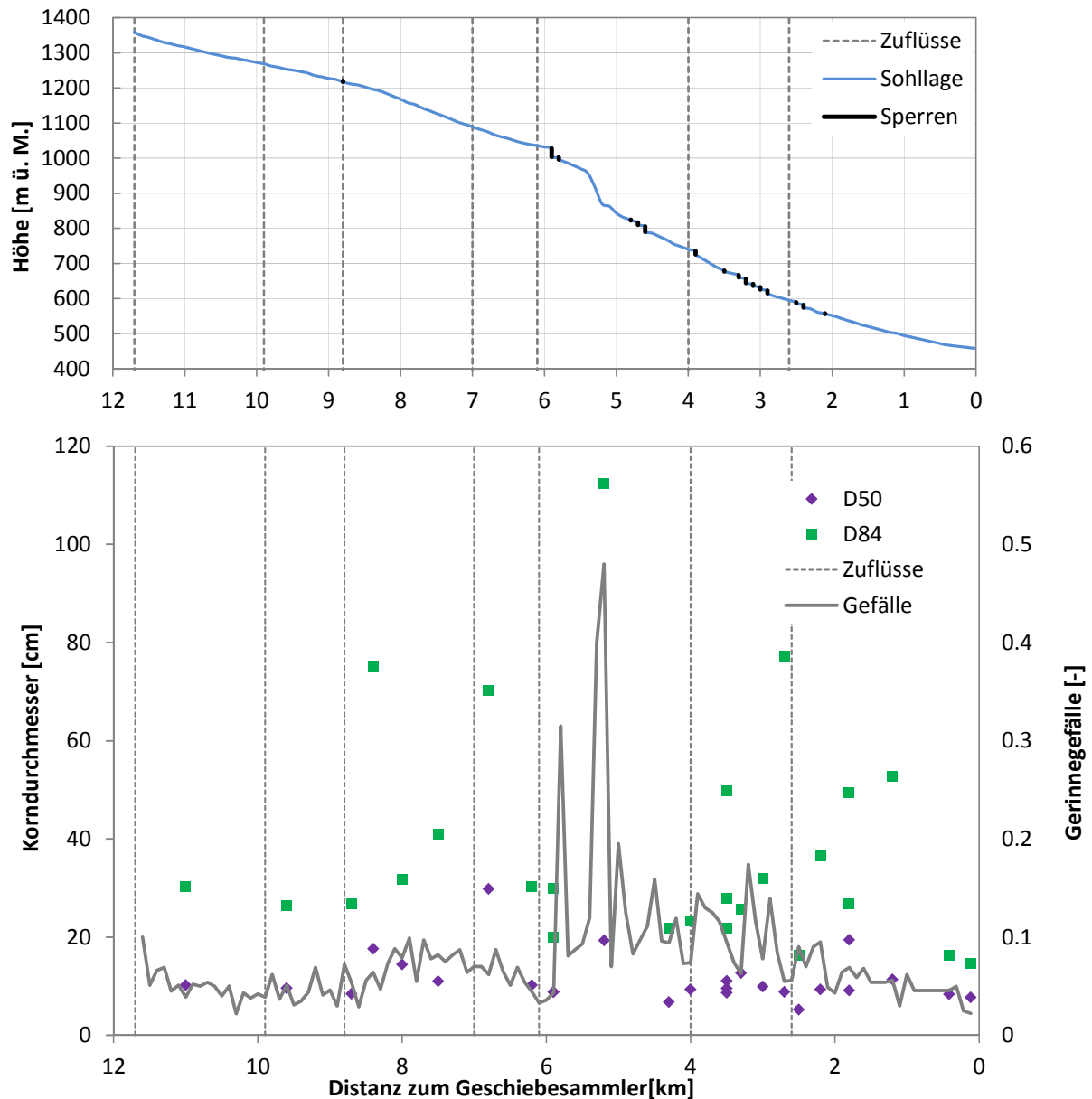


Abb. 4 Vergleich der mit PREVAH simulierten Abflüsse für die Grosse und die Kleine Schliere im Zeitraum 1978-2010.

### 2.3 Kornverteilungen

Zur Bestimmung der Kornverteilungen wurden an 29 Stellen entlang des simulierten Gerinneabschnittes Linienproben aufgenommen. Das Gerinne wurde nach den Faktoren Gerinneneigung, Gerinnebreite und Lage der Seitzubringer in quasi-homogene Abschnitte unterteilt. Für jeden Abschnitt wurden mehrere Linienzahlanalysen aufgenommen und daraus eine repräsentative Kornverteilung erstellt (Abb. 5). Die Linienzahlanalysen wurden dabei einzeln ausgewertet und danach gemittelt. Für die Geschiebetransportberechnungen mit *sedFlow* wurden die Linienzahlanalysen in eine gröbere Kornverteilung der Deckschicht und eine feinere Kornverteilung der Unterschicht umgerechnet, wobei der Feinanteil für Korngrößen mit  $D < 1\text{cm}$  bei der Deckschicht auf 10 % und bei der Unterschicht auf 25 % festgesetzt wurde. Die Standortwahl für die Durchführung der Linienproben wurde durch die Schneeschmelze, welche zu einem erhöhten Abfluss führte, erschwert. Die vorhandenen trockenen Bereiche waren begrenzt, weshalb auch an weniger optimalen Standorten Proben aufgenommen wurden.



**Abb. 5** Charakteristische Korndurchmesser  $D_{50}$  und  $D_{84}$  der Oberflächenschicht der von der WSL aufgenommenen Kornverteilungen in der Simulationsstrecke in der Grossen Schliere. Zusätzlich angegeben sind das Gerinnegefälle und das Längsprofil der Grossen Schliere.

## 2.4 Gerinnegeometrie

Die Abflussbreite und die Höhe der Gerinnesohle wurden zuerst mittels Höhenmodell und Luftbildern abgeschätzt und später an die Resultate der Vermessungen (eigene Feldbegehungen) angepasst. Die Höhe und die Gerinnebreite wurden jeweils alle 100 m aufgenommen. Dabei wurde der aktuelle Zustand des Gerinnes aufgenommen, welcher nicht mit der Gerinnegeometrie vor dem letzten grossen Hochwasserereignis 2005 übereinstimmen muss und somit eine gewisse Unsicherheit beinhaltet.

### Gerinnebreite

Die Gerinnebreite wurde anhand von Luftbildern (swissimage 2011) bestimmt. Aus dem Luftbild ist nicht immer klar ersichtlich, wo die seitliche Begrenzung des Flusses liegt. Der Grund dafür liegt in dem zum Teil sehr starken Schattenwurf während der Bildaufnahme. Da die Bäume teilweise sehr nah am Ufer stehen, kann der Uferbereich dort nicht genau bestimmt werden. Um die im Büro ermittelten

Breiten mit der Realität zu vergleichen, wurden Feldmessungen durchgeführt. Aufgrund dieser Daten wurden die erhobenen Breiten teilweise angepasst.

### **Längsprofil**

An den Standorten der gewählten Querprofile wurde die mittlere Sohlenhöhe aus dem digitalen Geländemodell (DTM-AV, 2012) bestimmt und daraus das Gerinnegefälle berechnet. Die Gerinnegefälle zwischen den Profilen variieren von 2.2 % im untersten Bereich bis zu 48 % in der steilen Felsstrecke. Das durchschnittliche Gerinnegefälle beträgt 7.7 % (Abb. 5).

### **Sperren und Schwellen**

Die Grosse Schliere wurde mit vielen Sperren und Schwellen verbaut. Für die Modellierung mit *sedFlow* sind diese wichtig. Ohne Sperren wäre das für den Geschiebetransport relevante Netto-Gefälle zwischen den Profilen viel grösser. Die Sperren wurden mittels GPS eingemessen und deren Absturzhöhe aufgenommen. Als Absturzhöhe wurde die Distanz zwischen der Oberkante und dem Unterwasserspiegel gemessen. Bei der Modellierung der Sperren wurde am betreffenden Querprofil die Sperrenoberkante fixiert. Die aktuelle Unterkante der Sperre wurde ebenfalls eingegeben, bleibt aber variabel. Die Eingabe einer Sperre ist nur bei einem definierten Querprofil möglich. Für die Modellierung wurden deshalb nahe beieinander liegende Sperren zusammengefasst, indem die Absturzhöhen addiert wurden. Dadurch wird der Rechenaufwand und infolge dessen die Berechnungszeit gering gehalten, da die Berechnungsdauer direkt mit dem Querprofilabstand zusammen hängt. Im Bereich der Schwellentreppe (unterster Kilometer) hat es viele Schwellen mit Absturzhöhen zwischen 35 und 50 cm. Diese wurden nicht einzeln berücksichtigt, um die Eingabe möglichst einfach zu halten. Dafür wurde der unterste Punkt in der Simulation um die kumulierte Absturzhöhe der Schwellentreppe angehoben und so das Netto-Gefälle über die ganze Strecke der Schwellentreppe reduziert.

## **2.5 Geschiebeeintrag durch Seitenzubringer und Rutschungen**

Der Geschiebeeintrag in die Grosse Schliere durch Seitengerinne ist aufgrund der starken Verbauung der Bäche eher von geringer Bedeutung (mündl. Mitteilung R. Wallimann). Entscheidender für den Geschiebehaushalt der Grossen Schliere ist der Eintrag ins Gerinne durch Rutschungen. Für die Eich- und Validierungsperioden (HW 2005; 2002 und 2003) wurden in Ereignisberichten und der Unwetterdatenbank (StorMe, 2013) dokumentierte Rutschungen gesucht. Dabei wurden nur Rutschungen mit einem Volumen grösser als 5000 m<sup>3</sup> berücksichtigt. Für das Hochwasser 2005 (Belop, 2006) sind drei Rutschungen von Interesse (Tabelle 3): i) Teufibachwald mit einem Volumen von 112'500 m<sup>3</sup>, ii) Fallhörnli mit einem Volumen von 450'000 m<sup>3</sup> und iii) Mättlibach mit einem Volumen von 50'000 m<sup>3</sup>. Aufgrund der Lage im Hang und Aussagen des Försters (R. Wallimann) wurden nur 25 % der Rutschung beim Teufibachwald und 10 % der Rutschung beim Mättlibach als Geschiebeeintrag ins Gerinne angenommen. Beim Fallhörnli wurde mit einem Geschiebeeintrag von 40'000 m<sup>3</sup> gerechnet (hier waren widersprüchliche Angaben in StorMe (2013) und dem Ereignisbericht des Kantons Obwalden (Belop, 2006) vorhanden).

**Tabelle 3** Seitliche Sedimenteinträge durch Rutschungen in die Grosse Schliere während des Hochwasserereignisses von 2005

<b>Name</b>	<b>Distanz zum Geschiebesammler [km]</b>	<b>Volumen Rutschung [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Berücksichtigtes Volumen für die Simulationen [m<sup>3</sup>]</b>
Teufibachwald	7.1 – 7.2	112'500	9'000
Mättlibach	6.1	50'000	10'000
Fallhörnli	5.0 – 5.2	450'000	40'000

Für das Jahr 2002 wurden drei Rutschungen mit einem Volumen von jeweils mindestens 5'000 m<sup>3</sup> im StorMe Naturereigniskataster gefunden. Alle drei Rutschungen sind praktisch am selben Ort im Bereich Wittenmatt (km 6.9) niedergegangen. Die erste Rutschung geschah im Juli 2002. Darauf folgten eine im August und eine weitere im November 2002. Das Volumen betrug insgesamt 25'000 m<sup>3</sup>. Da diese Rutschungen nicht direkt ins Gerinne mündeten, wurden sie für die Geschiebetransportsimulationen nur zu 50 % berücksichtigt. Für das Jahr 2003 konnte keine bedeutende Rutschung gefunden werden.

### 3 Simulationen für die Eichperiode Hochwasser 2005

#### 3.1 Abflussberechnung und Geschiebetransportformel

Bei der Grossen Schliere wurde die Abflussveränderung entlang des Gerinnes wegen vielen Abschnitten mit Gerinnegefällen  $S$  grösser als 1 - 2 % und kleinen relativen Abflusstiefen mit dem Fliessgesetz von Ferguson (2007) in der  $q$ -basierten Version von Rickenmann und Recking (2011) (entspricht Gl. 1a)<sup>1</sup> und mit der Annahme Normalabfluss und einer vereinfachten hydraulischen Berechnung (Option iii) bestimmt.

Bei der Kalibrierung wurden mehrere im Modell *sedFlow* implementierte Formelsätze für den Geschiebetransport getestet. Mit der Geschiebetransportformel von Rickenmann (2001)(Gl. 2a), in Kombination mit dem reduzierten Energieliniengefälle nach Rickenmann und Recking (2011)(Gl. 4), konnten für die Grosse Schliere plausible Resultate erhalten werden. Für diese Bestvariante wurde ohne Versteckfunktion gerechnet (d.h. Gl. 3a mit einem Exponenten  $m = 0$  verwendet), und der Grenzwert (minimale kritische dimensionslose Sohlenschubspannung bei Transportbeginn) zu  $\theta_{c50,min} = 0.04$  gesetzt.

#### 3.2 Input für die Periode 2005

Für die Eichung des Modelles anhand des Ereignisses von 2005 wurde die Periode vom 01.01.2005 - 17.09.2005 simuliert. Das Hochwasserereignis dauerte vom 20.08. - 22.08.2005, wobei die Abflussspitze von 96.6 m<sup>3</sup>/s am 22.08. um 01:00 Uhr erreicht wurde. Für die Kornverteilung wurden die vorhandenen Ergebnisse der Linienzahlanalyse verwendet (siehe Kap. 2.3). Für die Kornverteilungen und die Gerinnegeometrie wurden im Verlauf der Eichung kleinere Änderungen vorgenommen. Die während und nach dem Ereignis beobachteten, grösseren Rutschungen wurden als Sedimentganglinien eingespeist (Tabelle 3). Die Rutschung beim Mättlibach wurde beim einem Profil (km 6.1), die beim Teufibachwald über zwei Profile (km 7.1 – 7.2) und diejenige beim Fallhörnli über drei Querprofile verteilt (km 5.0 – 5.2) eingespeist.

Im Bereich unterhalb der grossen Wildbachsperrern bei km 5.8 und km 5.9 kam es während der ersten Simulationen zu unrealistisch hohen Sohlenerosionen. Deshalb wurde hier im Verlauf der Eichung die Mächtigkeit des erodierbaren Sohlenmaterials auf 3 m beschränkt.

Der Geschiebeeintrag in die Grosse Schliere durch Seitengerinne ist aufgrund der starken Verbauung der Bäche eher von geringer Bedeutung. Im Modell wurde trotzdem mit einem fluvialen Eintrag ins Gerinne gerechnet. Der berechnete Geschiebeeintrag durch die Seitenbäche während des Ereignisses 2005 bewegt sich dabei zwischen 2'000 m<sup>3</sup> und 13'000 m<sup>3</sup>. Der Eintrag ins Gerinne erfolgte in den Simulationen nicht an den Orten, an denen in Realität Seitenbäche vorhanden sind, sondern an den sechs fiktiven Stellen, bei denen zusätzliche Ganglinien eingespeist werden (siehe Kap. 2.2, Verwendete Hydrologie).

Die Absturzhöhen bei den einzelnen Schwellen entlang des untersten Kilometers der Untersuchungsstrecke wurden nur mit 5 respektive 7 cm berücksichtigt (anstelle von im Jahre 2013 gemessenen Werten von 35 und 50 cm), weil angenommen wurde, dass die Schwellen beim Hochwasser 2005 weitgehend mit Geschiebe eingedeckt waren, was durch Videofilme von der Grossen und Kleinen Schliere als plausibel erscheint (YouTube, 2010).

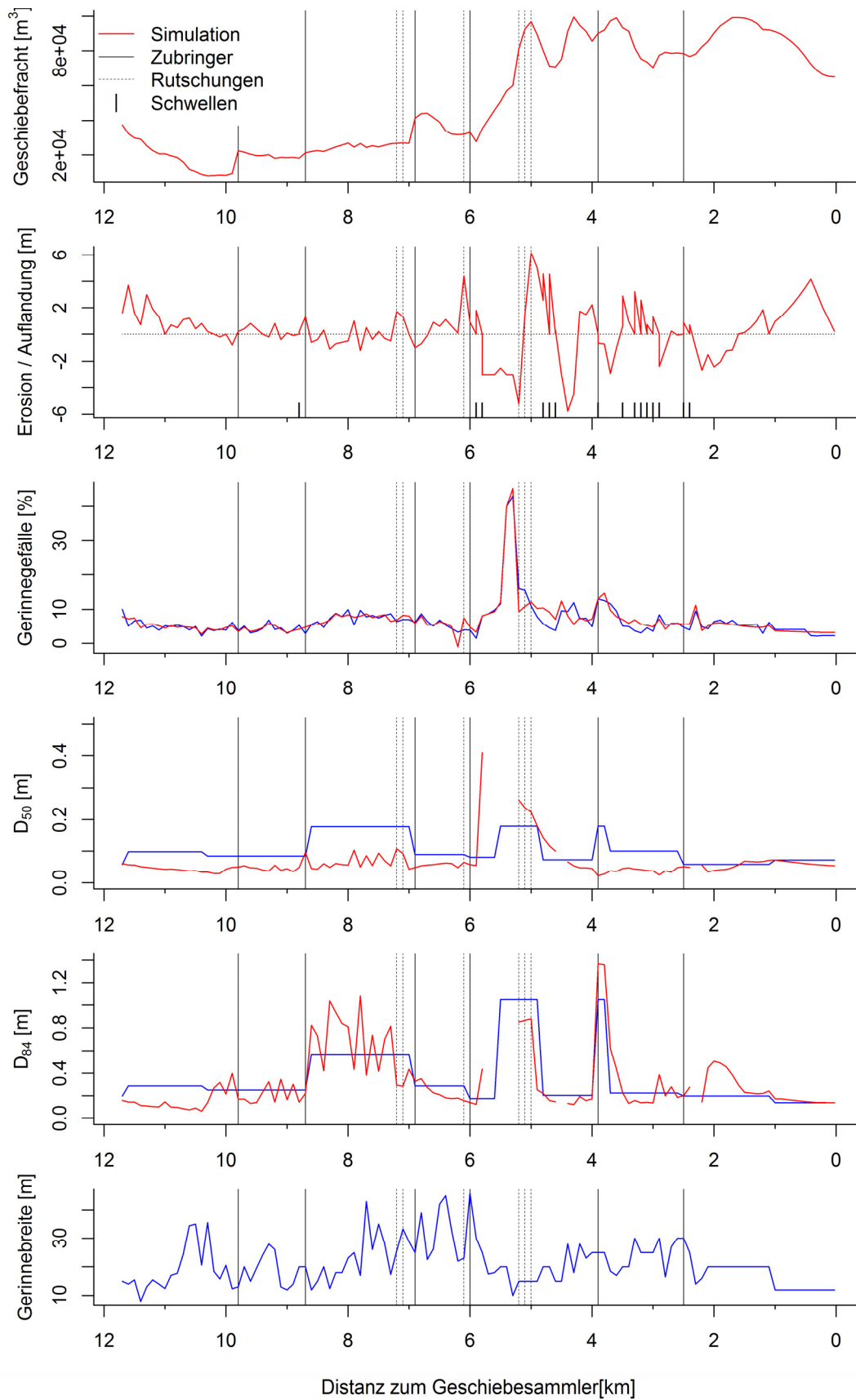
---

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

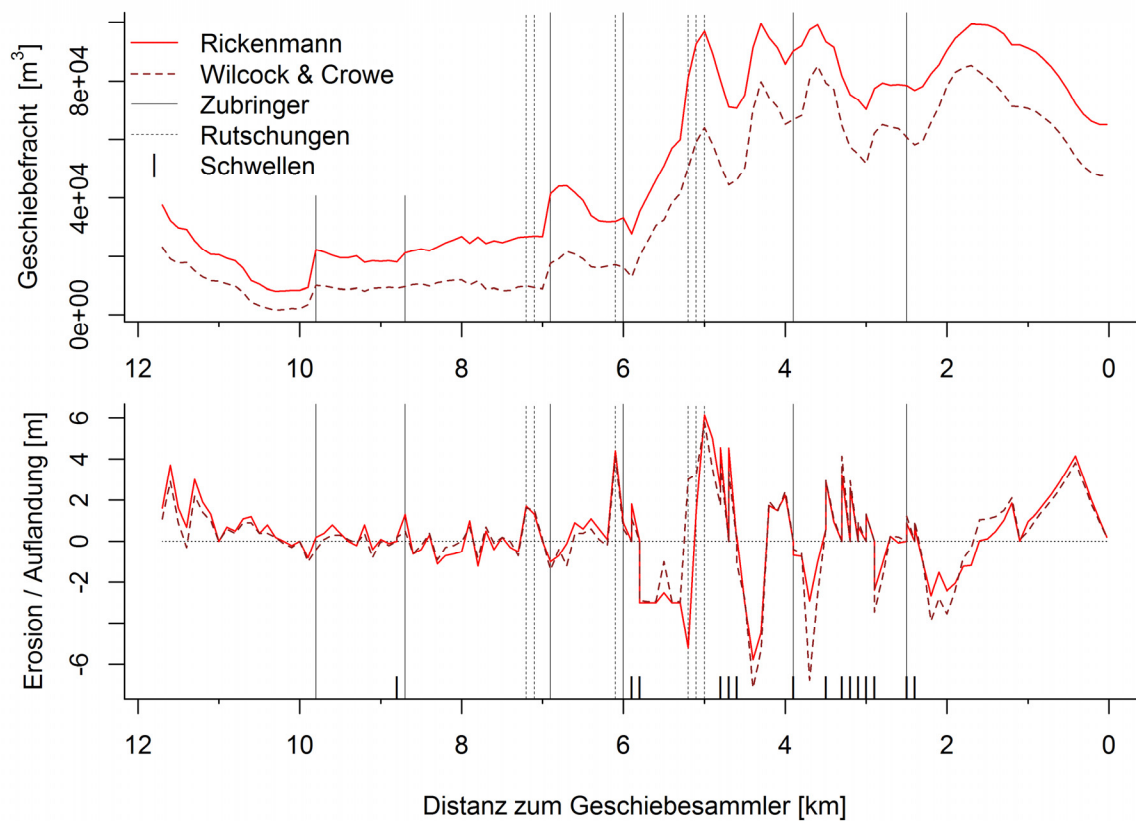
### 3.3 Simulationsresultate Geschiebetransport für die Eichperiode

Für die Eichperiode wurden die Geschiebefracht, die Sohlenänderung sowie die Entwicklung des Gerinnegefälles und der charakteristischen Korndurchmesser  $D_{50}$  und  $D_{84}$  ausgewertet (Abb. 6). Am oberen Ende der Simulationsstrecke wird ungefähr  $40'000 \text{ m}^3$  Geschiebe in die Grosse Schliere eingetragen. Das zugeführte Geschiebe wird bis zum nächsten Seitenzubringer grösstenteils abgelagert. Aufgrund dieser Ablagerung kommt es bis zu 4 m Auflandung. Bei der obersten eingetragenen Rutschung (Teufibachwald, km 7.1 – km 7.2) erkennt man, dass das zugeführte Material nicht gross weiter transportiert wird, da es zu Auflandung kommt. Dasselbe gilt bei der Rutschung beim Mättlibach (km 6.1).

Bei der untersten Rutschung (km 5.2 – km 5.0) beim Fallhörnli wird der bei km 5.2 eingespeiste Teil des Materials weiter transportiert und es kommt zusätzlich zu Tiefenerosion. Bei den unteren beiden Einspeisungsprofilen und bis zu den nächsten Schwellen findet Auflandung statt. In diesem Bereich wurde das Gerinne durch den Sedimenteintrag durch die Rutschung tatsächlich um einige Meter angehoben (mündl. Mitteilung, R. Wallimann). Weiter unten zwischen km 4 und 2 treten meist bei den Profilen oberhalb von Schwellen Auflandungen auf. Hinter den Schwellen folgt dann jeweils eine Erosionsstrecke. Diese Tendenz wurde von B. Amstutz bestätigt (schriftl. Mitteilung). Direkt unterhalb des Geissfussstegs bei km 2.1 entstand beim Hochwasser 2005 eine Erosion von 2 bis 3 m (mündl. Mitteilung, R. Wallimann). Dies wird vom Modell sehr gut abgebildet. Im Bereich der Sperrentreppe bis zum Geschiebesammler ergibt sich wie erwartet eine Auflandung.



**Abb. 6** Simulationsergebnisse der Bestvariante für die Eichperiode vom 01.01.2005 – 17.09.2005 berechnet mit der Transportformel von Rickenmann (2001). 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.



**Abb. 7** Vergleich der mit den Transportformeln von Wilcock und Crowe (2003) und Rickenmann (2001) (Bestvariante) erhaltenen Simulationsresultate für die Eichperiode vom 01.01.2005 – 17.09.2005. Dargestellt sind die Geschiebefracht und die Sohlenänderung.

In einem zweiten Schritt wurde auch die Transportformel von Wilcock und Crowe (2003) mit einem Sandanteil von  $F_S = 0.20$  für die Eichperiode angewendet. Alle anderen Input-Variablen wurden gleich belassen. Der Verlauf des Geschiebefrachtendiagramms ist qualitativ ähnlich wie mit der Formel von Rickenmann (2001) (Abb. 7). Allerdings wird ein ungefähr 30 % geringerer Transport berechnet. Die berechneten Sohlenänderungen sind in beiden Simulationen sehr ähnlich.

## 4 Simulationsresultate für die Validierungsperiode

Mit den Modell-Einstellungen für die Eichperiode wurden zwei weitere Perioden gerechnet. Einerseits wurde der Zeitraum vom 1.8.2003 - 31.12.2004 (Periode 2003-2004) als transportarme Periode simuliert. Andererseits wurde die Periode vom 1.3.2002 - 1.8.2003 (Periode 2002-2003) mit einer mittleren Transportfracht modelliert. Die gewählten Perioden entsprechen nicht ganzen Jahren wie in der SOLID Datenbank, weil in der Liste der Entnahmen von B. Amstutz der jeweilige Entnahmemonat der Geschiebefracht im Sammler genau angegeben ist (schriftl. Mitteilung). Für die Definition der Validierungsperioden wurde jeweils der Monat nach der letzten Entnahme bis zum Monat der nächsten Entnahme berücksichtigt.

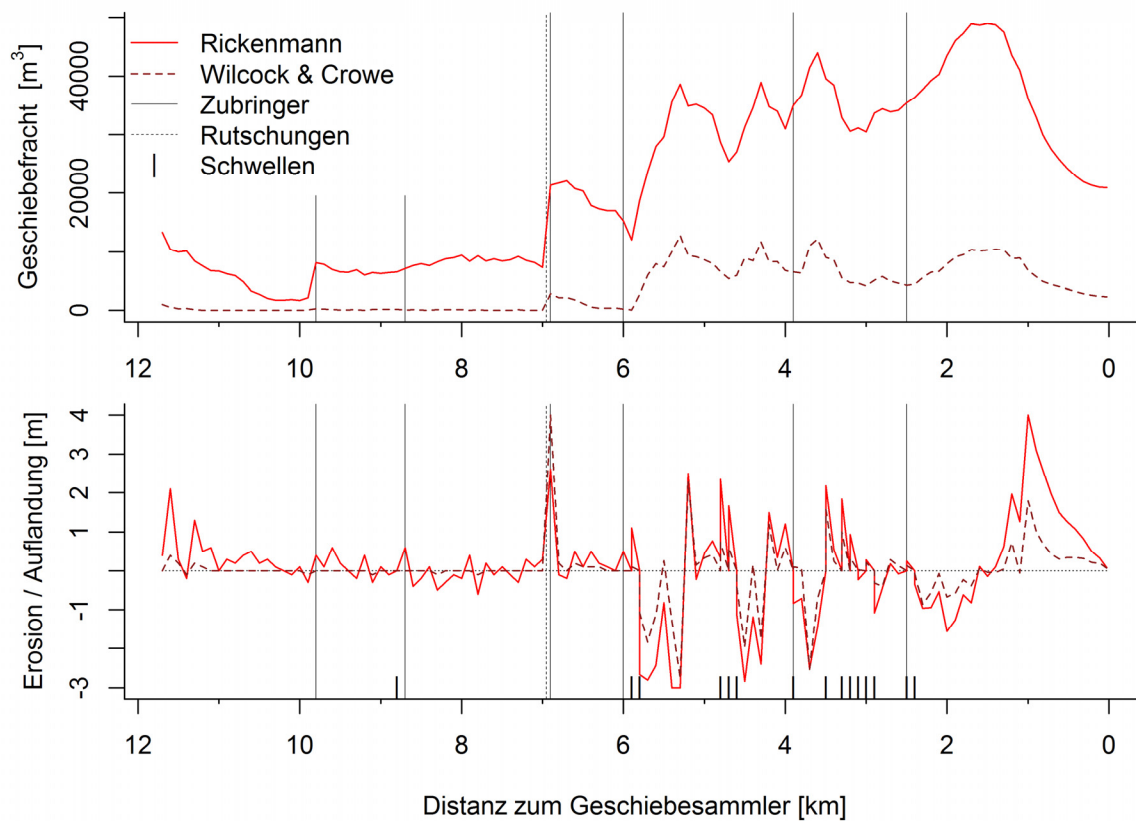
### 4.1 Input für die Periode 2002-2003

Für die Simulation dieser Periode musste die Schwellentreppe am unteren Ende der Simulationsstrecke angepasst werden. Der maximale Abfluss betrug knapp  $26 \text{ m}^3/\text{s}$ , während er 2005 bei  $97 \text{ m}^3/\text{s}$  lag. Es ist anzunehmen, dass bei Spitzenabflüssen mit statistischen Wiederkehrperioden von zwei bis fünf Jahren (siehe Abb. 2) die Sperren zumindest teilweise ihre Wirkung behalten haben. Deshalb wurden für die Periode 2002-2003 die bei Niedrigwasser im Feld vermessenen Absturzhöhen von 35 und 50 cm verwendet. Ohne die Anpassung dieser Absturzhöhen wäre der Transport in den Sammler um einiges zu hoch ausgefallen. Als seitliche Geschiebeeinträge wurden die für das Jahr 2002 gefundenen Rutschungen bei Wittenmatt (km 6.9) berücksichtigt (siehe Kap. 2.5). Ansonsten wurden die gleichen Modelleinstellungen wie für die Eichperiode verwendet.

### 4.2 Simulationsresultate Geschiebetransport für die Periode 2002–2003

Das Transportniveau und die Sohlenänderungen bewegen sich für die Periode 2002-2003 generell in einem viel kleineren Rahmen als während der Eichperiode (Abb. 8). Das Verhalten des Geschiebefracht-diagramms mit der Formel von Rickenmann (2001) entspricht auf den oberen Kilometern qualitativ (auf einem tieferen Niveau) demjenigen von 2005. Mit der Formel von Wilcock und Crowe (2003) mit einem Sandanteil von  $F_s = 0.20$  wird im oberen Bereich praktisch kein Geschiebe transportiert. Die Rutschungen bei km 6.9 führen mit beiden Transportformeln lokal zu einer Auflandung und zu erhöhtem Transport.

Der berechnete Wert des transportierten Materials beim Geschiebesammler liegt mit der Formel von Rickenmann (2001) bei  $20'000 \text{ m}^3$  und mit der Formel von Wilcock und Crowe (2003) bei  $2500 \text{ m}^3$ . Laut SOLID Datenbank (Tabelle 1) wurde in dieser Periode eine Fracht von  $5'000 \text{ m}^3$  Geschiebe entnommen.



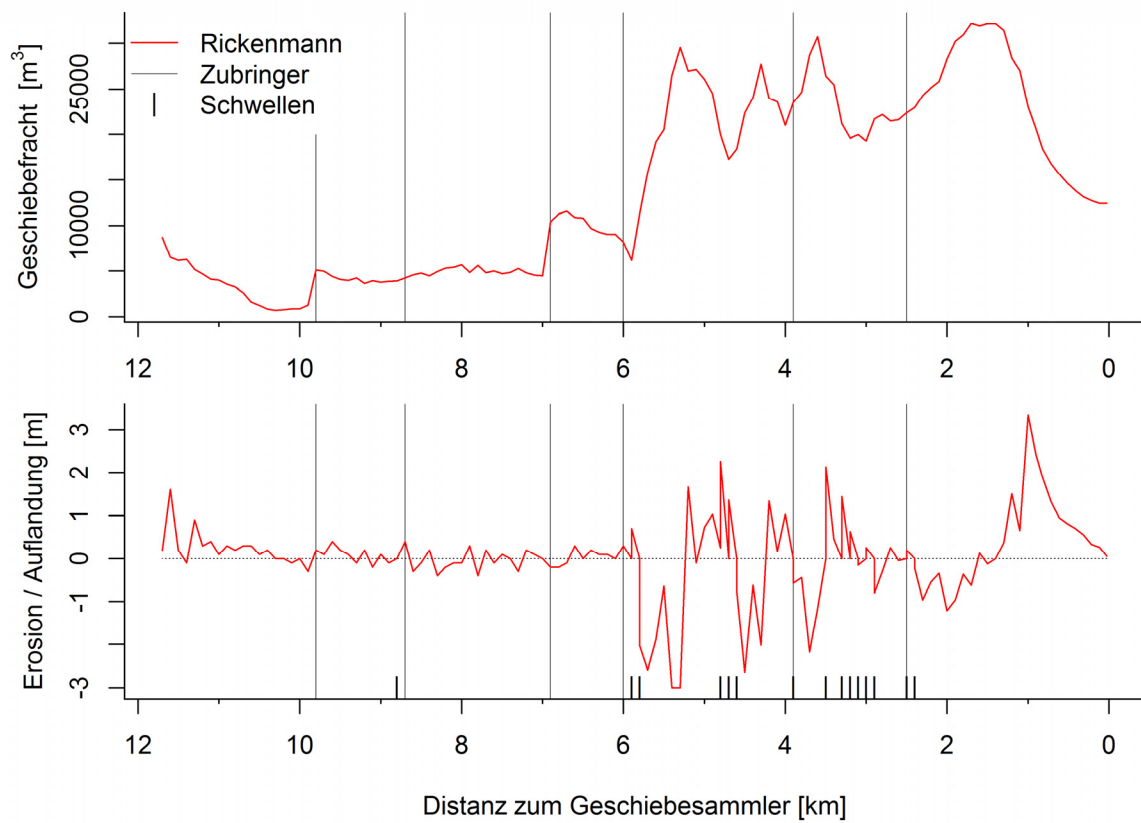
**Abb. 8** Simulationsergebnisse der Periode 2002-2003 berechnet mit der Formel von Rickenmann (2001), mit  $\theta_{c50,min} = 0.04$ , und mit der Formel von Wilcock und Crowe (2003), mit einem Sandanteil von  $F_s = 0.20$ . Dargestellt sind die Geschiebefracht und die Sohlenveränderung.

### 4.3 Input für die Periode 2003-2004

Der maximale Abfluss in dieser Periode liegt bei  $22.4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Deshalb wurde auch hier bei der Schwellentreppe am unteren Ende der Simulationsstrecke die im Feld bei Niedrigwasser vermessenen Absturzhöhen von 35 und 50 cm verwendet. Für diese Periode sind keine grösseren Rutschungen dokumentiert, und daher wurde seitlich kein Geschiebe eingespeist. Als Modelleinstellungen wurden wiederum die gleichen wie für die Eichperiode verwendet.

### 4.4 Simulationsergebnisse Geschiebetransport für die Periode 2003-2004

Die Simulationsergebnisse für die Periode 2003-2004 sehen qualitativ sehr ähnlich aus wie diejenigen für die Periode 2002-2003 (Abb. 9). Das Niveau der Geschiebefracht ist jedoch tiefer, ebenso wie die Erosionen und Auflandungen. Mit der Formel von Rickenmann (2001) wurde eine Geschiebefracht in den Sammler von  $12'000 \text{ m}^3$  berechnet. In diesem Jahr fand keine Entnahme aus dem Geschiebesammler statt. Die simulierten Sohlenerosionen von bis zu 3 m (km 3.5 - km 6) sind für die transportarme Periode mit niedrigen Abflüssen sicher zu hoch.



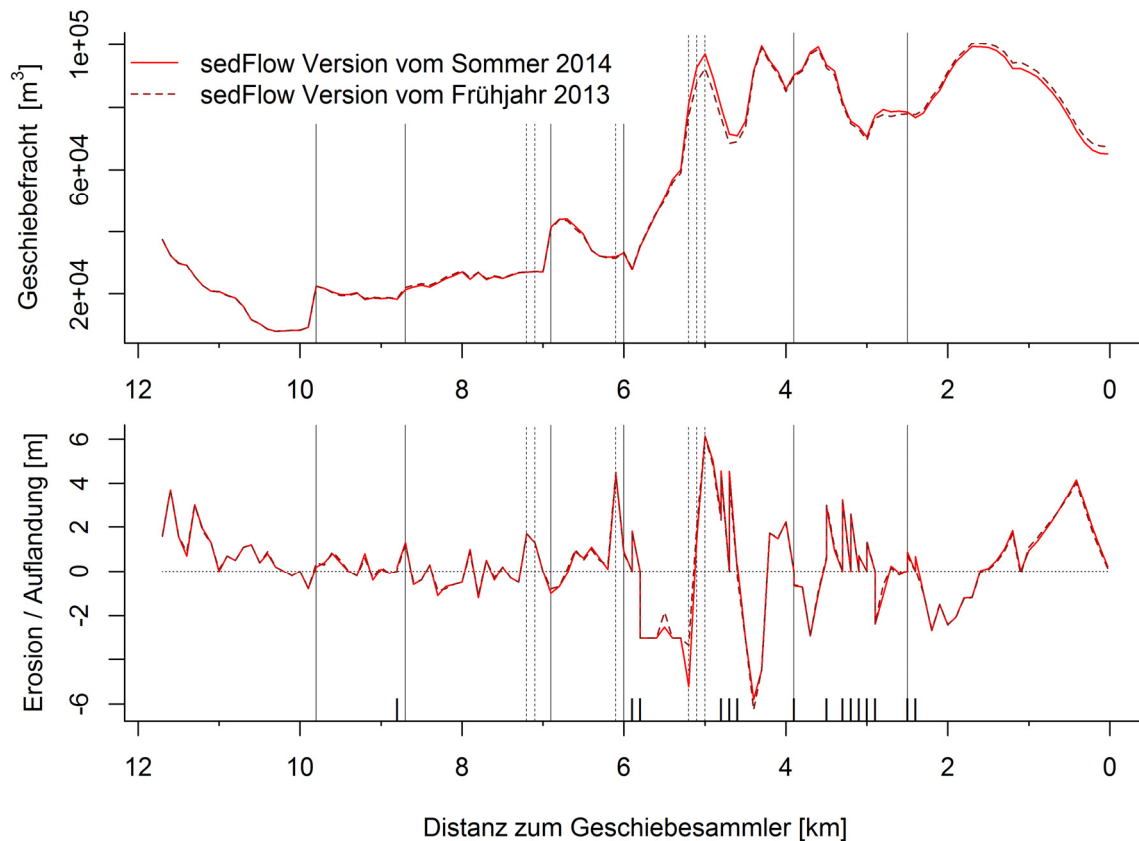
**Abb. 9** Simulationsergebnisse der Periode 2003-2004 berechnet mit der Formel von Rickenmann (2001), mit  $\theta_{c50,min} = 0.04$ . Dargestellt sind die Geschiebefracht und die Sohlenänderung. (Mit der Formel von Wilcock und Crowe (2003) lief die Simulation aus unbekanntem Grund nicht durch.)

## 5 Sensitivitätsbetrachtung

Mit der nachfolgenden Sensitivitätsbetrachtung wurde überprüft, wie stark sich eine Änderung der Modellparameter und eine Änderung der Eingabedaten auf die simulierte Geschiebefracht auswirkt. Als Eingabeparameter werden die Gerinne- und Ereignis-spezifischen Parameter, wie Längsgefälle, Gerinnebreite, Kornverteilung sowie Abflüsse bezeichnet. Die Modellparameter beziehen sich auf Varianten und Einstellungen im Simulationsprogramm *sedFlow*, wie zum Beispiel Wahl der Transportformel, der Ansätze zur Beschreibung des Transportbeginns und der Austauschvorgänge in der obersten Geschiebeschicht im Flussbett sowie der hydraulischen Berechnung. Der Einfachheit halber wurde nur die simulierte Fracht am Ende der Untersuchungsstrecke (Geschiebesammler Schlierenrüti) sowie die maximale simulierte Fracht entlang der Grossen Schliere betrachtet. Die Angabe der maximalen Geschiebefracht soll für Varianten mit ähnlichen Resultaten für den Sammler aufzeigen, dass weiter oben in der Untersuchungsstrecke deutliche Unterschiede in den Simulationsresultaten auftreten können. Für die Geschiebefracht beim Sammler ist der absolute Wert (Abb. 11) und die relative Änderung der Fracht im Vergleich zur Bestvariante (Abb. 12) gezeigt. Für die maximale Geschiebefracht entlang der Untersuchungsstrecke ist nur die relative Änderung im Vergleich zur Bestvariante dargestellt (Abb. 12).

Die Simulationen in Kapitel 4 wurden mit der aktuellen *sedFlow* Version (vom Sommer 2014) durchgeführt. Die in diesem Kapitel gezeigten Resultate wurden von Christian Greber im Rahmen seiner Masterarbeit im Frühjahr 2013 mit einer älteren Version von *sedFlow* berechnet (die Entwicklung von *sedFlow* war damals noch nicht ganz abgeschlossen). Die mit den zwei verschiedenen Versionen berechneten Geschiebefrachten und Sohlenänderungen für die Eichperiode (Hochwasser 2005) unterscheiden sich nur minimal für die Modell-Parameter der Bestvariante (Abb. 10). Die Erkenntnisse aus der Sensitivitätsbetrachtung sollten somit auch für die *sedFlow* Version vom Sommer 2014 repräsentativ sein.

Die Resultate sind in Abb. 11 und Abb. 12 zusammengefasst, wobei die verschiedenen Simulationsvarianten zur besseren Übersicht in sechs Gruppen eingeteilt wurden. Liegt die simulierte Geschiebefracht beim Sammler innerhalb der bereits erwähnten Bandbreite der beobachteten Fracht von  $50'000\text{m}^3$  bis  $80'000\text{m}^3$ , werden die Simulationsresultate für die betrachtete Variante zumindest für den untersten Abschnitt als plausibel erachtet.

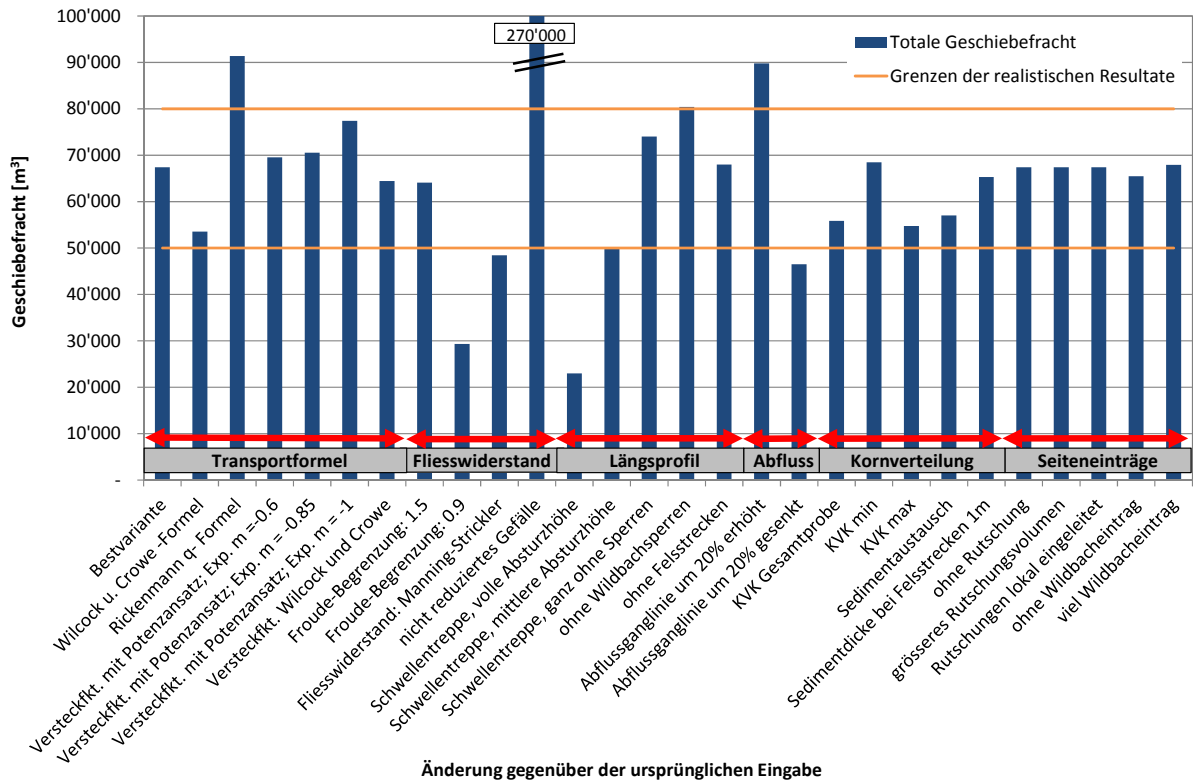


**Abb. 10** Berechnete Geschiebefrachten und Sohlenänderungen für die Eichperiode 2005. Vergleich der Resultate der Simulation mit einer älteren *sedFlow* Version (verwendet in Greber, 2013) und denjenigen der aktuellen *sedFlow* Version (vom Sommer 2014). Für beide Simulationen wurden die gleichen Eingabe- und Modell-Parameter der Bestvariante verwendet.

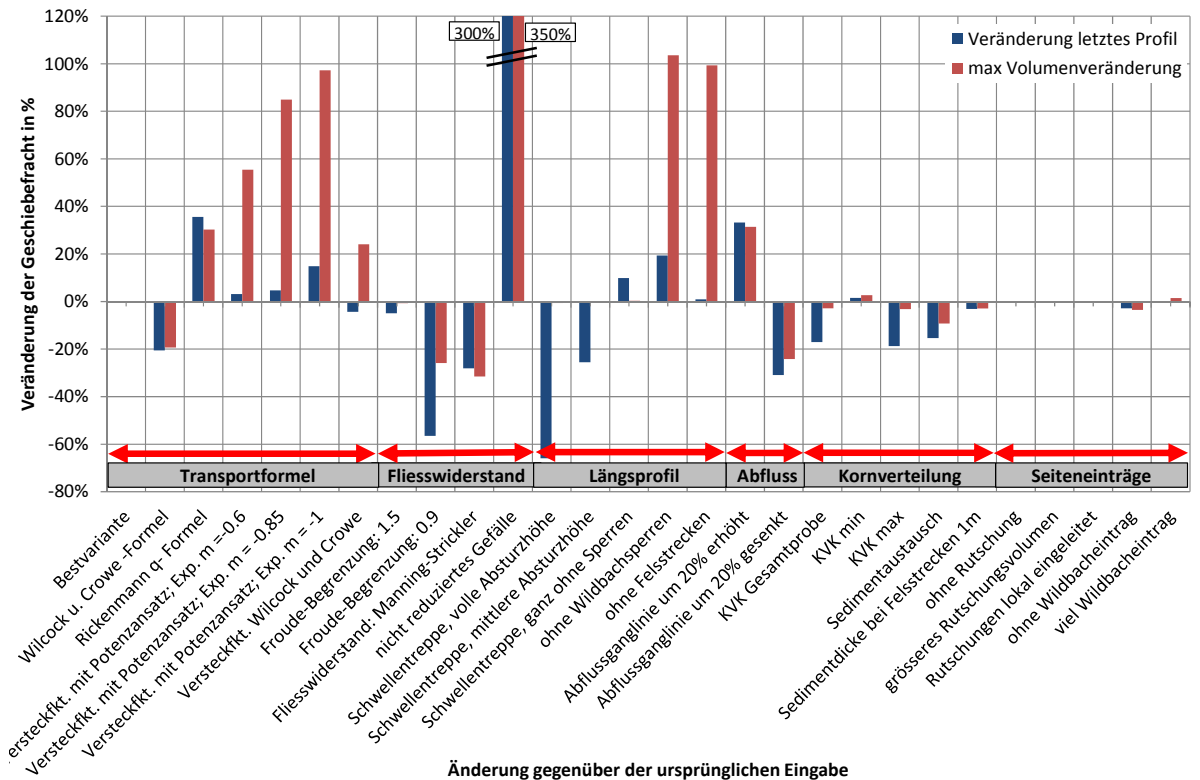
### Einfluss der Transportformel

Eine der wichtigsten Einflussgrössen ist die Wahl der Transportformel. Hier wurden zusätzlich die Formel von Wilcock und Crowe (2003) und die  $q$ -basierte Version von Rickenmann (2001) getestet. Beim Ansatz von Wilcock und Crowe wurde mit einem Sandanteil von  $F_S = 0.10$  gerechnet (Im Gegensatz zum Sandanteil von  $F_S = 0.20$  in Kap. 3.3) und damit ein tieferes Transportniveau erhalten. Sowohl die Geschiebefracht beim Sammler als auch die maximale Geschiebefracht entlang der Simulationsstrecke sind ungefähr 20 % kleiner als bei der Bestvariante (Abb. 7).

Die  $q$ -basierte Formel nach Rickenmann führt hingegen zu einem allgemein höheren Transportniveau. So ist die Geschiebefracht beim Sammler ca. 35 % grösser als bei der Bestvariante. Beim der maximalen Geschiebefracht ergibt sich eine Erhöhung um 30 %.



**Abb. 11** Simulierte Geschiebefrachten beim Sammler für die Eichperiode 2005: Vergleich der Resultate bei einer Änderung verschiedener Eingabe- oder Modellparameter (Sensitivitätsanalyse). Die orangen Linien markieren die Bandbreite plausibler Resultate (abgeändert nach Greber, 2013).



**Abb. 12** Relative Änderung der simulierten Geschiebefrachten für die Eichperiode 2005 im Vergleich zum Resultat für die Bestvariante. Gezeigt sind die Auswirkungen bei einer Änderung verschiedener Eingabe- oder Modellparameter. (Abgeändert nach Greber, 2013).

### **Einfluss der Versteckfunktion**

Die Versteckfunktion hat einen erheblichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Die Bestvariante wurde ohne Berücksichtigung einer Versteckfunktion (d.h. Gl. 3a mit einem Exponenten  $m = 0$ ) gerechnet. Hier wurden folgende Varianten der Versteckfunktion untersucht: (1) Versteckfunktion mit Potenzansatz (Parker, 2008) mit den Exponenten  $m = -0.6$ ,  $m = -0.85$  und  $m = -1$  (Gl. 3a), sowie (2) Versteckfunktion von Wilcock und Crowe (2003) (Gl. 3b, 3d). Bei allen getesteten Versteckfunktionen liegen die beim Sammler simulierten Geschiebefrachten im plausiblen Wertebereich von 50'000 – 80'000 m<sup>3</sup>.

### **Einfluss der Limitierung der Froude-Zahl**

Bei den Simulationen für die Hasliaare (Böckli et al., 2015; Rickenmann et al., 2015) war eine Limitierung der Froude-Zahl nötig, um in steileren Gerinneabschnitten eine zu starke Erosion konvexer Knickpunkte im Längsprofil zu vermeiden. Für die Grosse Schliere wurde überprüft, wie gross der Einfluss einer Limitierung der Froude-Zahl auf 1.5 und auf 0.9 auf die transportierte Geschiebefracht ist. Bei einer Begrenzung auf 1.5 ändert sich die Geschiebefracht nicht wesentlich. Bei einer Begrenzung auf 0.9 aber reduziert sich die maximal transportierte Fracht um gut 20 % und die transportierte Fracht in den Sammler reduziert sich um knapp 60 % und liegt mit 30'000 m<sup>3</sup> nicht mehr im plausiblen Wertebereich.

### **Einfluss der Fliesswiderstandsberechnung**

Die Berechnung des Fliesswiderstandes für die Bestvariante erfolgte mit der variable power equation (VPE) von Ferguson (2007) (Gl. 1a). Geprüft wurde hier, wie sich die Berechnung des Fliesswiderstandes mit der Manning-Strickler Gleichung (Gl. 1b) auswirkt, wobei der Strickler-Beiwert vom Korndurchmesser  $D_{84}$  abhängt. Die Geschiebefracht beim Sammler reduziert sich damit um 28 %, die maximal transportierte Fracht um 31 %.

### **Einfluss des Energieliniengefälles**

Für die Geschiebetransportberechnungen wurde für die Bestvariante das reduzierte Energieliniengefälle nach Rickenmann und Recking (2011) berücksichtigt. Dass dies in steileren Gerinne notwendig ist, um eine Überschätzung des Geschiebetransportes zu vermeiden, zeigt sich auch am Beispiel der Grossen Schliere. Ohne reduziertes Energieliniengefälle erhöht sich die Fracht im Sammler um 300 % und die maximal transportierte Fracht um 350 %.

### **Einfluss der Schwellentreppe (unterster Kilometer)**

Bei Niedrigwasser bewegen sich die Absturzhöhen bei den Schwellen im untersten Kilometer der Untersuchungsstrecke zwischen 35 und 50 cm. Bei der Bestvariante für die Eichperiode wurde angenommen, dass die Absturzhöhen beim Hochwasser 2005 weitgehend mit Geschiebe eingedeckt waren und deshalb die Absturzhöhen nur 5 und 7 cm betragen haben. Hier wurden Varianten betrachtet mit der vollen Höhe der Abstürze (35 und 50 cm), mit der Hälfte der Absturzhöhe sowie ohne Absturzhöhe (Schwellen vollständig mit Geschiebe eingedeckt). Der Einfluss dieser Anpassung beschränkt sich auf den letzten Kilometer.

Mit einer Erhöhung der Schwellen-Absturzhöhen reduziert sich das Netto-Gefälle und somit die Transportkapazität des Gerinnes. Der Transport beim Sammler ist deshalb bei den beiden Varianten mit grösseren Absturzhöhen kleiner. Ein Grossteil des Geschiebes wird im Bereich der Sperrentreppe abgelagert. Mit Berücksichtigung der vollen Absturzhöhen wird der Geschiebetransport beim Sammler um 65 % reduziert, mit Berücksichtigung der halben Absturzhöhen um 25 %. Werden die

Schwellen als vollständig mit Geschiebe eingedeckt simuliert, erhöht sich der Transport beim Sammler um 10 %.

### Einfluss der Sperren

Die Grosse Schliere ist mit vielen Wildbachsperren verbaut. Die Sperren haben einen grossen Einfluss auf die Simulationsresultate. Sie fixieren das Gerinnebett und verhindern damit extreme Erosion und sie reduzieren das Netto-Gefälle und somit die Transportkapazität.

Werden die Sperren in der Simulation nicht berücksichtigt, erhöht sich der Geschiebetransport in den Sammler um 19 % und der maximale Transport um 103 %.

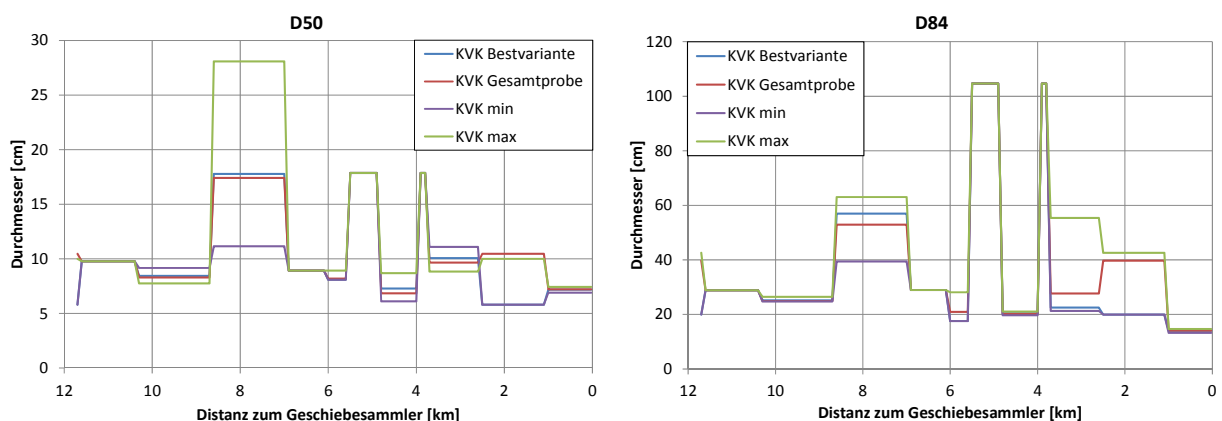
### Einfluss des Abflusses

Da für die Grosse Schliere die Abflussganglinie der Kleinen Schliere übernommen und angepasst wurde, ist dieser Parameter mit einer gewissen Unsicherheit verbunden. Deshalb wurde hier die Abflussganglinie um 20 % erhöht beziehungsweise vermindert. Bei einer Erhöhung nimmt die Geschiebefracht im Sammler um 33 % und der maximale Transport um 31 % zu. Bei einem reduziertem Abfluss nimmt der Transport bis in den Sammler um 31 % und der maximale Transport um 24 % ab.

### Einfluss der Kornverteilung

Die Kornverteilung ist mit einigen Unsicherheiten verbunden, da die Zugänglichkeit der Gerinnesohle für die Durchführung der Linienzahlanalysen eingeschränkt und die Wahl der Aufnahmestandorte nicht immer optimal war. Zudem ist unbekannt, wie die Kornverteilung vor den simulierten Ereignissen war.

Hier wurden drei zusätzliche Varianten geprüft: (1) Zusammenlegung aller in einem Abschnitt aufgenommenen Linienzahlanalysen zu einer Probe („KVK Gesamtprobe“); (2) Verwendung der feinsten in einem Abschnitt ermittelten Kornverteilung („KVK min“) und (3) Verwendung der grössten in einem Abschnitt ermittelten Kornverteilung („KVK max“) (Abb. 13).



**Abb. 13** Charakteristische Korndurchmesser  $D_{50}$  (links) und  $D_{84}$  (rechts) der verwendeten Kornverteilungen für die Sensitivitätsstudie (KVK = Kornverteilungskurve).

Die Verwendung der feinsten Kornverteilungen führt nur zu sehr kleinen Unterschieden der Geschiebefracht im Vergleich zur Bestvariante. Die Verwendung der grössten Kornverteilungen hingegen führt zu einer Abnahme von 17 % für die Geschiebefracht beim Sammler und von 3 % für

die maximale Geschiebefracht. Ähnlich verhalten sich die Resultate bei einer Zusammenlegung der Linienzahlanalysen.

### **Einfluss der Sediment austauschvorgänge**

In der Bestvariante verläuft der Sediment austausch zwischen der aktiven Schicht und der Unterschicht kontinuierlich. Dies bedeutet, dass erodiertes Material sofort mit Unterschichtmaterial aufgefüllt wird. Eine andere Möglichkeit, die *sedFlow* zur Verfügung stellt, besteht darin, die Austauschschicht erst nach einer festgelegten (kritischen) Erosionsmächtigkeit mit Unterschichtmaterial aufzufüllen (Variante „Sediment austausch“). Dies hat zur Folge, dass die Deckschicht weniger schnell verfeinert wird. Es ist anzunehmen, dass mit der zweiten Variante deshalb der simulierte Transport allgemein tiefer ausfällt. Die Geschiebefracht beim Sammler wird um 15 % reduziert und der maximale Transport um 9 %.

### **Einfluss der Limitierung des verfügbaren Materials bei Felsstrecken**

Die gewählte Limitierung des verfügbaren Materials bei den Felsstrecken von 3 m ist eine Annahme. Um diesen Parameter auf seine Sensitivität zu überprüfen, wurde die Limitierung von 3 auf 1 m reduziert. Dadurch wird die Geschiebefracht beim Sammler sowie der maximale Transport um 3 % reduziert. Diese Änderung hat offenbar eher lokale Auswirkungen.

### **Einfluss der Rutschungen**

Bei der Bestvariante werden durch Rutschungen knapp 60'000 m<sup>3</sup> Geschiebe flussaufwärts von km 5 in das Gerinne eingespeist. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden drei zusätzliche Varianten geprüft: (1) Die Rutschungen wurden ganz weggelassen („ohne Rutschung“); (2) Das Volumen der Rutschungen wurde vergrößert („grösseres Rutschungsvolumen“; Fallhörnli: 45'000 m<sup>3</sup>, Mättlibach: 50'000 m<sup>3</sup>, Teufibachwald: 56'000 m<sup>3</sup>); (3) Die Rutschungen wurden jeweils nur an einem Profil eingespeist („Rutschungen lokal eingeleitet“).

Bei allen vier Varianten ist die simulierte Geschiebefracht beim Sammler identisch. Dies bedeutet, dass Art und Umfang des seitlichen Geschiebeeintrages ins Gerinne im oberen Teil der Simulationsstrecke keinen Einfluss auf die Geschiebefracht im unteren Teil hat. Auch der maximale Transport unterscheidet sich bei diesen vier Variationen nicht. Die Rutschungen beeinflussen den Geschiebetransport nur lokal.

### **Einfluss der Seitenzubringer**

Der fluviale Geschiebeeintrag durch die Seitenbäche wurde bei einer Variante ganz weggelassen („ohne Seiteneintrag“) und bei einer anderen wurde er erhöht („viel Seiteneintrag“). Bei der Variante mit viel Seiteneintrag betrug das zugeführte Geschiebevolumen zwischen 3700 m<sup>3</sup> und 17'000 m<sup>3</sup> pro Seitenzubringer bzw. total 62'000 m<sup>3</sup> (im Vergleich zu zugeführten Geschiebevolumen von 2000 m<sup>3</sup> bis 13'000 m<sup>3</sup> pro Seitenzubringer bzw. total 42'000 m<sup>3</sup> beim Referenzszenario). Die Auswirkungen veränderter seitlicher Geschiebeeinträge durch Wildbäche auf den Geschiebetransport scheinen wie bei den Rutschungen eher lokal begrenzt zu sein und haben kaum Auswirkungen auf den Geschiebeeintrag in den Sammler.

## 6 Literaturverzeichnis

- Belop (2006): Unwetter 22./23. August 2005, Ereignisdokumentation Bericht. Forstingenieurbüro Berwert-Lopes (Belop) GmbH, Stalden, im Auftrag des Kantons Obwalden, Amt für Wald und Raumentwicklung, Abteilung Naturgefahren.
- BWG (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Berichte, Serie Wasser, 118p..
- Böckli, M., Bieler, C., Rickenmann, D., Heimann, F.U.M., Badoux, A. (2015): Hasliaare: Geschiebetransportsimulationen mit *sedFlow*. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Schweiz.
- Ferguson, R. (2007): Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams. *Water Resources Research*, 43, W05427, doi: 10.1029/2006WR005422.
- Greber, C. (2013): Simulation des Geschiebetransportes in Gebirgsflüssen während Hochwasserereignissen am Beispiel der Grossen Schliere (Kt. Obwalden). Masterarbeit an der ETH Zürich und an der Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- 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.
- Parker, G. (2008): Transport of Gravel and Sediment Mixtures. In M.H. Garcia (ed.): *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*; ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, no. 110, pp. 165-251.
- Rickenmann, D. (2001): Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. *Water Resources Research*, 37, 3295–3305.
- 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.
- 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](http://www.wsl.ch/publikationen/pdf/14594.pdf))
- StorMe (2013): Naturereigniskataster StorMe Kanton Obwalden.
- 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.
- Wilcock, P.R., Crowe, J.C. (2003): Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(2), 120-128.
- YouTube (2010): <http://www.youtube.com/watch?v=CdcFHSBZUPU>. Video des Abflusses in der Grossen Schliere während des Hochwasserereignisses vom 25.09.2010.