

Lonza:

Geschiebetransportsimulationen mit *sedFlow*



Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

Forschungseinheit Gebirgshydrologie und Massenbewegungen

8903 Birmensdorf, Schweiz

Martin Böckli, Dieter Rickenmann

21. August 2015



Eidg. Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft WSL

Inhalt

1	Einleitung	2
1.1	Ziele der Simulationsberechnungen	2
1.2	Simulierter Gerinneabschnitt	2
2	Grundlagen	3
2.1	Einzugsgebiet und Gerinneverbauungen	4
2.2	Beobachtungen zum Geschiebetransport für das Hochwasserereignis 2011	4
2.3	Beobachtungen zum Geschiebetransport für die Periode 1976 bis 2012	6
2.4	Angaben in der SOLID-Datenbank	6
2.5	Hydrologie	7
2.5.1	BAFU Abflussmessungen	7
2.5.2	Verwendete Hydrologie für das Hochwasserereignis 2011	7
2.5.3	Hydrologie für die Zeitperiode 1976 bis 2012	8
2.6	Kornverteilungen	9
3	Simulationsresultate zum Geschiebetransport	10
3.1	Angaben zur Variation der Randbedingungen und Eingabeparameter	10
3.2	Simulationsresultate Geschiebetransport für das Hochwasserereignis vom 10.10.2011	10
3.3	Sensitivität der Eingabeparameter	12
3.4	Diskussion der Simulationsresultate	13
3.5	Simulationsresultate Geschiebetransport für die Zeitperiode 1976 bis 2011	14
4	Literaturverzeichnis	17
5	Anhang	18

1 Einleitung

1.1 Ziele der Simulationsberechnungen

Mit dem an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL entwickelten Modell *sedFlow* wurden Geschiebetransportsimulationen an der Lonza durchgeführt. Die Hauptziele dieses Berichtes sind:

- Präsentation der Grundlagendaten zu den Geschiebetransportberechnungen in der Lonza
- Präsentation der Resultate zu folgenden Berechnungen:
 1. Kalibrierung des Modelles anhand des Hochwasserereignisses vom 10.10.2011
 2. Validierung anhand von Daten zu Geschiebeablagerungen im Staubecken Ferden in der Periode 1976-2011

Für die Kalibrierung des Modelles wurde die abgeschätzte Geschiebebilanz des Hochwasserereignisses vom 10.10.2011 verwendet. Die hier dargestellten Arbeiten wurden im Rahmen des BAFU (GHO) Projektes „Feststofftransport in Gebirgseinzugsgebieten“ (Vertrags-Nr. 11.0026.PJ/ K154-7241) durchgeführt.

1.2 Simulierter Gerinneabschnitt

Die Lonza fliesst durch das Lötschenthal und mündet unterhalb von Steg/Gampel im Walliser Haupttal von Norden her in die Rhone. Die Simulationsstrecke erstreckt sich von der Fafleralp bis zum Stauee bei Ferden und hat eine Länge von 9.5 km. Bis zum Stauee entwässert die Lonza eine Fläche von 130.7 km² (Abb. 1). Das Längsgefälle entlang der Simulationsstrecke schwankt zwischen 2.2 und 13.6 % und beträgt im Mittel 4.7 %. Rund 25 % der Einzugsgebietsfläche sind vergletschert und das Abflussregime ist dementsprechend glazial mitgeprägt. Bis zum Staubecken Ferden ist der Abfluss weitgehend unbeeinflusst. In der Lonza trat im Oktober 2011 ein Hochwasserereignis mit viel Geschiebetransport auf, welches relativ gut dokumentiert wurde (Geoplan, 2012). Von diesem Ereignis sind die Einträge der aktiven Seitzubringer in die Lonza, sowie der Eintrag des Gebirgsflusses Lonza in den Stauee bei Ferden bekannt. In Blatten (1520 m ü.M.) in der Mitte der Simulationsstrecke befindet sich eine Abflussmessstation des BAFU.

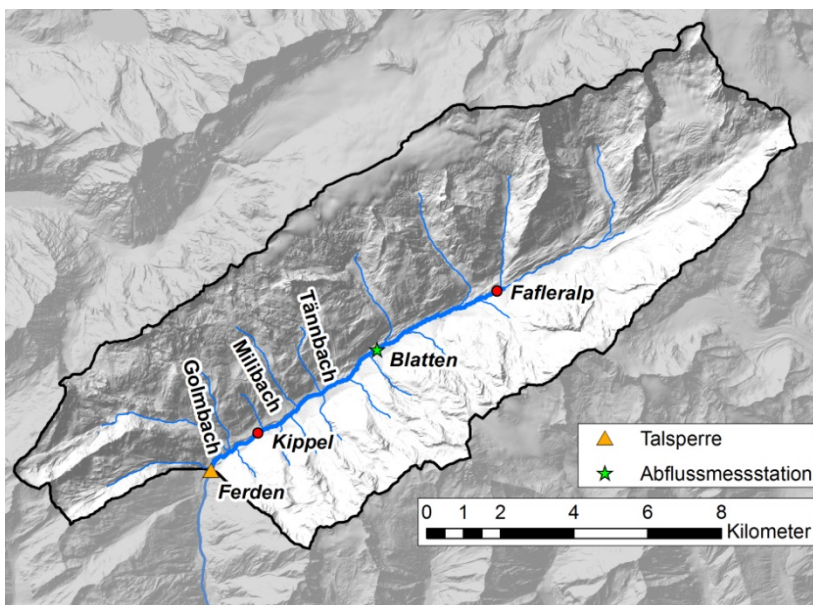


Abb. 1 Übersicht über das Einzugsgebiet der Lonza oberhalb von Ferden. Dargestellt sind der simulierte Gerinneabschnitt (blau, dick) und die wichtigsten Seitzubringer. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118).

1.3 Das Geschiebetransport-Simulationsprogramm *sedFlow*

Das Geschiebetransportsimulationsprogramm *sedFlow* wurde an der WSL im Rahmen des Projektes SEDRIVER entwickelt (Heimann et al., 2014a, 2014b). 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. (2014a) und eine zusammenfassende Beschreibung in Rickenmann et al. (2014).

2 Grundlagen

2.1 Einzugsgebiet und Gerinneverbauungen

Die Lonza oberhalb von Ferden ist ein weitgehend unverbauter Gebirgsfluss mit einer starken Geschiebedynamik. Uferverbauungen sind in der Nähe von Blatten und Kippel in einigen wenigen Abschnitten vorhanden. Bei Blatten wird die Gerinnesohle durch einen natürlichen Felsaufschluss stabilisiert, was zu einem konvexen Knickpunkt im Längsprofil führt (Abb. 2). Ein weiterer konvexer Knickpunkt ist bei der Fafleralp beim oberen Ende der Simulationsstrecke zu finden. Diese Stabilisierung der Sohle ist vermutlich auf den Eintrag von grobem Material aus den Seitenbächen zurückzuführen.

Auf beiden Talseiten münden murgangfähige Wildbäche in die Lonza. Im hinteren Teil des Lötschentals besteht ein grosser Teil der Einzugsgebiete der Seitenbäche aus vegetationslosen, unvergletscherten Flächen mit grossen Moränen. Diese stellen ein grosses Geschiebepotenzial für die Lonza dar. Im vorderen Teil des Lötschentals verhindert die enge und steile Talmorphologie eine Kegelbildung der Seitengerinne. Das aus den seitlichen Gerinnen zugeführte Material gelangt daher grösstenteils direkt in die Lonza (Geoplan, 2012).

2.2 Beobachtungen zum Geschiebetransport für das Hochwasserereignis 2011

Als Grundlage für die Kalibrierung wurden Abschätzungen des Geschiebetransports für das Ereignis vom 10.10.2011 verwendet. Von diesem Ereignis sind der Geschiebeeintrag der drei aktiven Seitenbäche Golmbach, Milibach und Tännbach in die Lonza, der Geschiebeeintrag der Lonza ins Staubecken bei Ferden und Ablagerungen in der Lonza im Gerinneabschnitt zwischen Tännbach und Ferden bekannt (Abb. 2). Für die Bestimmung der Erosions- und Ablagerungsfrachten der Seitenbäche und der Ablagerungen entlang der Lonza wurde nach dem Ereignis eine Befliegung durch das Büro in-Terra GmbH durchgeführt und die neu vermessene Topographie mit dem Höhenmodell DTM-AV 2m aus dem Jahr 2005 verglichen. Eine Abschätzung des Geschiebeeintrages ins Staubecken wurde durch die KW Lötschen gemacht. Für den oberen Teil der Simulationsstrecke zwischen Fafleralp und Tännbach wurde anhand von Feldbegehungen und Luftbildern durch André Henzen eine grobe Abschätzung des Geschiebeeintrages durch Seitenerosion gemacht (Grundlagen und genauere Angaben dazu in Geoplan, 2012).

Bei den Feststofffrachten aus Geländevermessungen und Vermessungen des Staubeckens sind auch die Feinanteile, die als Schwebstoffe transportiert wurden mitberücksichtigt. Um die als Geschiebe transportierten Feststoffanteile abzuschätzen, wurden die Frachten der Ereignisanalyse von Geoplan AG um 30 % reduziert. Die vorliegenden Abschätzungen sind mit einer grossen Unsicherheit verbunden. Der Anteil der Feinsedimente von 30 % entspricht einer groben Annahme und könnte tendenziell auch höher liegen, was tiefere Werte des Geschiebetransportes zur Folge hätte. Alle Angaben zu den Geschiebevolumen sowie zu den Sohlenänderungen beinhalten auch das Porenvolumen.

Auf Basis der Differenzkarte von digitalen Geländemodellen vor und nach dem Ereignis (Geoplan 2012) wurde die Sohlenänderung im Gerinne der Lonza ab km 4.5 bis zum oberen Ende des Staubeckens Ferden berechnet (Abb. 3). In diesem Abschnitt wurde generell viel Material abgelagert. Im Mündungsbereich des Golmbachs bzw. im Bereich der Stauwurzel des Beckens Ferden kam es zu einer Auflandung von bis zu 14 m.

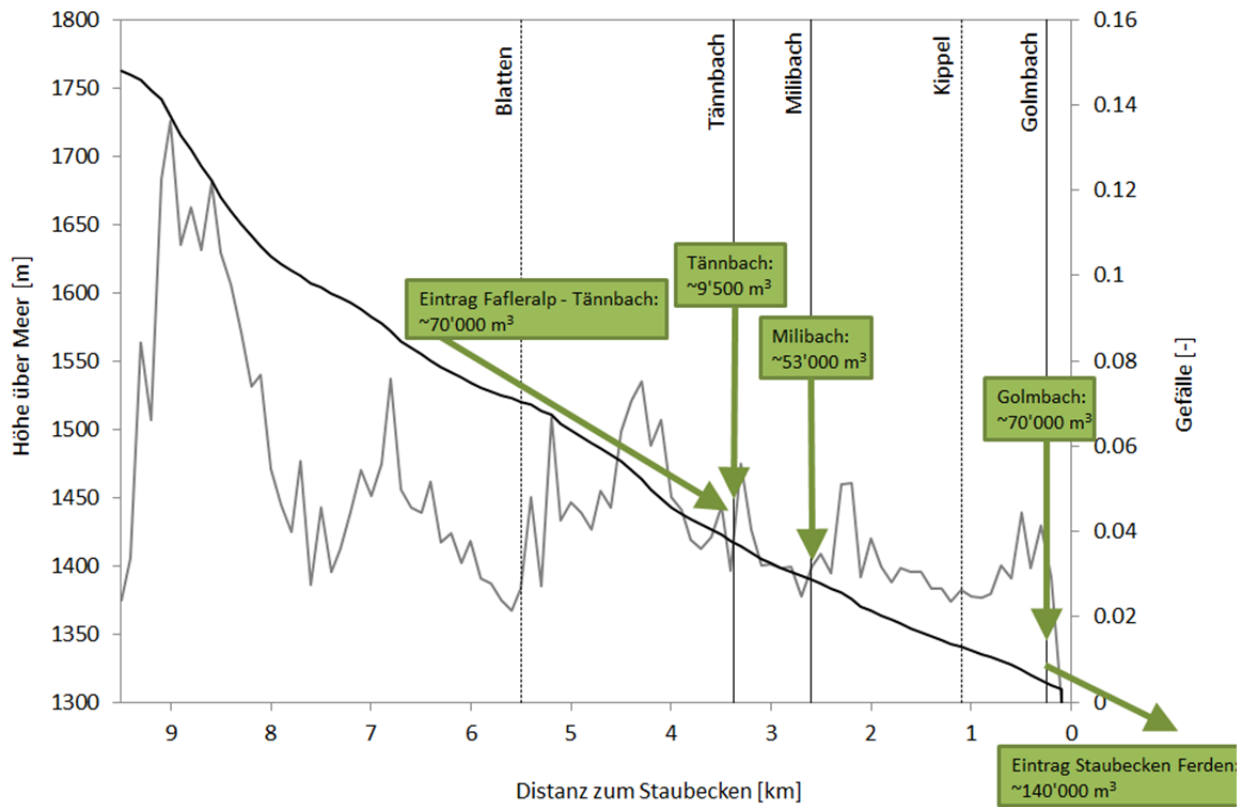


Abb. 2 Geschiebeeinträge in die Lonza und Geschiebeaustrag ins Staubecken Ferden während des Hochwasserereignisses vom 10.10.2011.

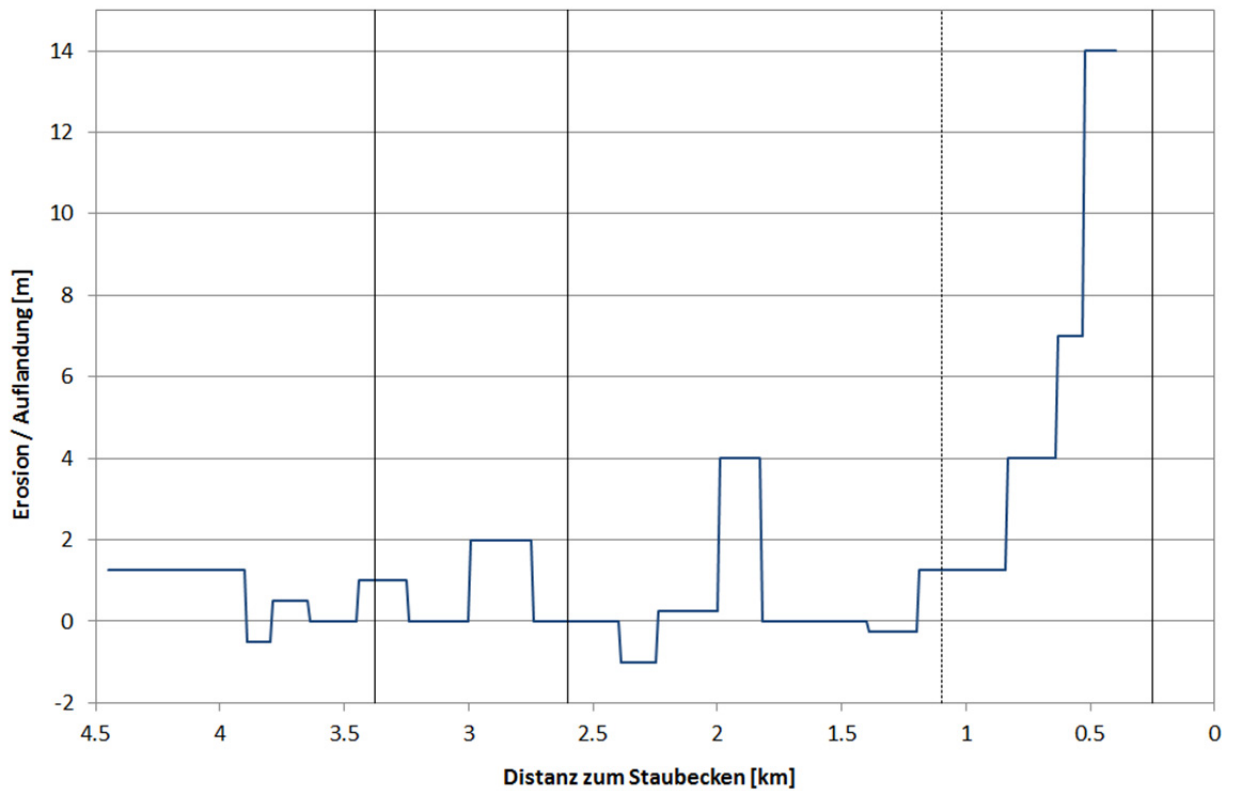


Abb. 3 Sohlenänderungen entlang des Gerinnebetts der Lonza (Grundlage: Differenzkarte der Studie von Geoplan, 2012).

2.3 Beobachtungen zum Geschiebetransport für die Periode 1976 bis 2012

Von der Enalpin AG wurden Ablagerungsvermessungen im Staubecken Ferden während der Zeitperiode von 1976 bis 2013 durchgeführt (Abb. 4). Seit 1982 wurden die Ablagerungen regelmässig alle zwei Jahre mittels eines Echolots vermessen und das Staubecken gespült. Nach den zwei ausserordentlichen Hochwassern vom 15./16.10.2000 und vom 10.10.2011 wurde jeweils zusätzlich eine Vermessung und eine Spülung gemacht. Insgesamt sind die Feststoffeinträge ins Staubecken von 21 Perioden bekannt. Die angegebenen Werte beinhalten auch das Feinmaterial, das in der Lonza als Schwebstoff transportiert wird. Von den Ablagerungen im Staubecken wird ungefähr ein Viertel als Geschiebe transportiert (mündliche Aussage von Hermann Salzgeber, Enalpin AG).

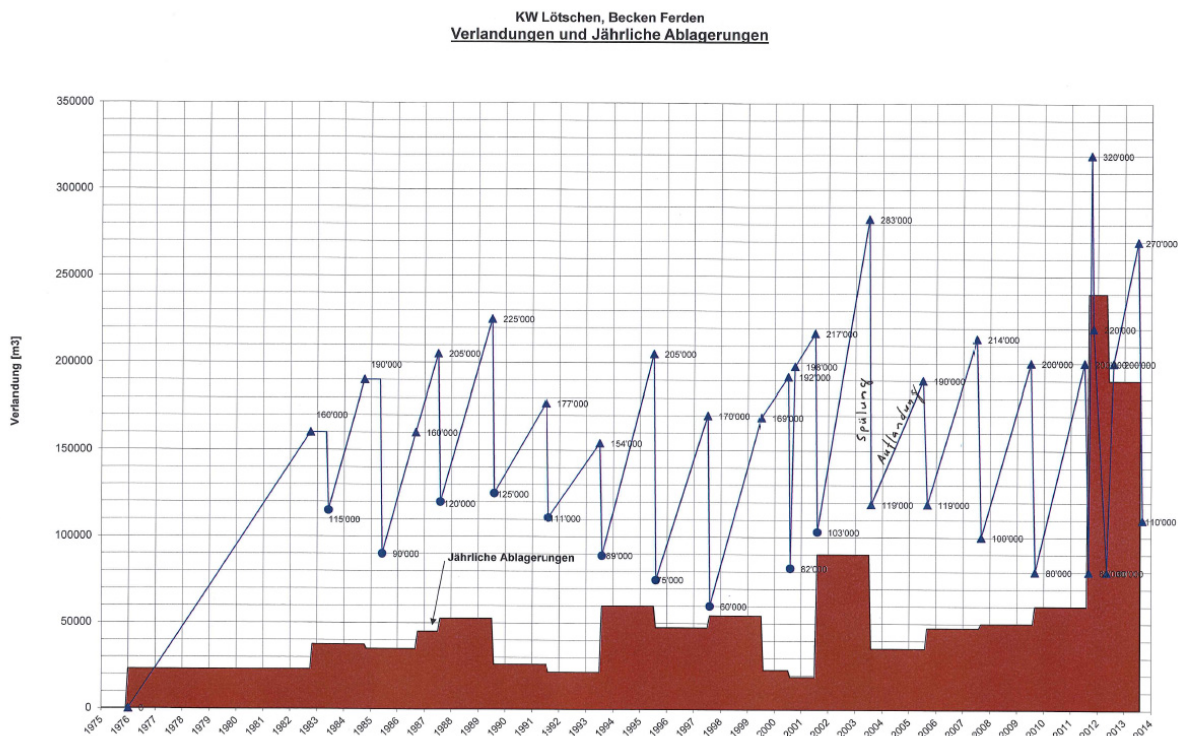


Abb. 4 Stauraumverlandung und Spülungen im Staubecken Ferden im Zeitraum 1976 bis 2013 (Abbildung der Enalpin AG)

2.4 Angaben in der SOLID-Datenbank

Für die Kalibrierung des Modelles waren ursprünglich Einträge aus der SOLID-Datenbank des BAFU zu Feststoffablagerungen im Staubecken Ferden vorgesehen. In der Datenbank sind drei Einträge vorhanden (Tabelle 1). Diese Daten wurden von den Kraftwerksbetreibern Enalpin AG an den Kanton Wallis und vom Kanton an den Bund weitergegeben. Die Daten der SOLID-Datenbank ergeben für die Periode 1.1.2007 bis 15.7.2009 Frachten von 100'000 m³ und 120'000 m³, was in der Grössenordnung den Feststoffablagerungen von 95'000 m³ und 100'000 m³ nach Abbildung 4 entspricht. Für den Zeitraum 2003 bis 2006 hingegen gibt es keinen Eintrag in der SOLID-Datenbank, während nach Abbildung 4 total 251'000 m³ Feststoffe abgelagert wurden. Die Werte aus der SOLID-Datenbank wurden hier nicht weiter verwendet.

Tabelle 1 Einträge in der SOLID-Datenbank des BAFU

Geschiebe [m ³]	Datum von	Datum bis
0	01-Jan-03	31-Dez-06
100'000	01-Jan-07	15-Aug-07
120'000	16-Aug-07	15-Aug-09

2.5 Hydrologie

2.5.1 BAFU Abflussmessungen

Die BAFU-Abflussmessstation bei Blatten ist seit 1956 in Betrieb. Die Hochwasserstatistik (Abb. 5) umfasst den Zeitraum 1956 bis 2011 (55 Jahre). Die grösste Hochwasserspitze wurde während des Ereignisses von 1971 gemessen. Sie entspricht mit 81 m³/s einem hundertjährigen Ereignis.

Der maximal gemessene Abfluss während des Ereignisses vom 10. Oktober 2011 beträgt 71.2 m³/s. Dieser wurde vom BAFU aufgrund von Messwertverfälschungen durch Geschiebe nachträglich auf 60 m³/s korrigiert (Geoplan, 2012).

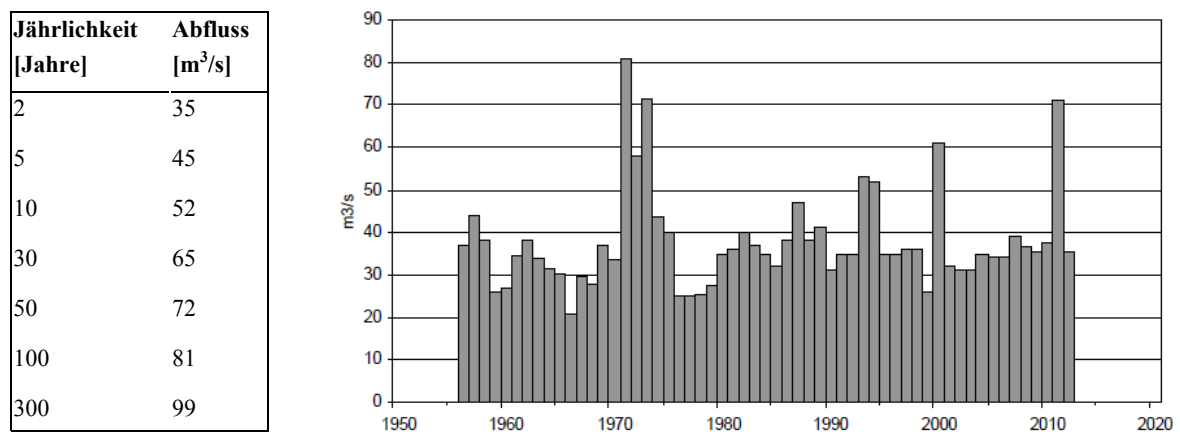


Abb. 5 Hochwasserstatistik der Lonza bei der BAFU-Abflussmessstation Blatten (<http://www.hydrodaten.admin.ch/lhg/de>)

2.5.2 Verwendete Hydrologie für das Hochwasserereignis 2011

Für die Geschiebetransportsimulationen muss der Abfluss entlang der simulierten Gerinnestrecke bekannt sein oder abgeschätzt werden. Dazu wurde die BAFU-Abflussganglinie bei Blatten auf die verschiedenen Teileinzugsgebiete der Zubringer aufgeteilt (20 % Gisentella, 20 % UistreTalbach, 20 % InnreTalbach, 40 % Oberlauf Lonza).

Für die Rekonstruktion des Abflusses beim Staubecken Ferden liegen Messungen des Kraftwerkes Lötchen (Enalpin AG) vor: i) Überlauf durch die Hochwasserentlastungsanlage; ii) Durchfluss durch die Turbinen und iii) Pegelstand im Staubecken. Mit dem Pegelstand im Staubecken und einem digitalen Höhenmodell wurde von der WSL die Veränderung des Stauseevolument während des Ereignisses berechnet. Aus den drei Datensätzen Überlauf durch die Hochwasserentlastungsanlage, Durchfluss durch die Turbinen und Veränderung des Stauseevolument konnte eine Zuflussganglinie ins Staubecken abgeschätzt werden (Abb. 6).

Es wurde angenommen, dass 80 % des Zuflusses zwischen Blatten und Ferden aus den drei Bächen Golmbach, Milibach und Tännbach stammen (Geoplan, 2012). Dieser Abfluss wurde anhand der Flächenanteile der Einzugsgebiete, die sich im Hauptniederschlagsgebiet befanden, auf die drei Bäche

aufgeteilt. Die restlichen 20 % des Zuflusses wurden je zur Hälfte auf den Gafenbach und den Färdbach aufgeteilt.

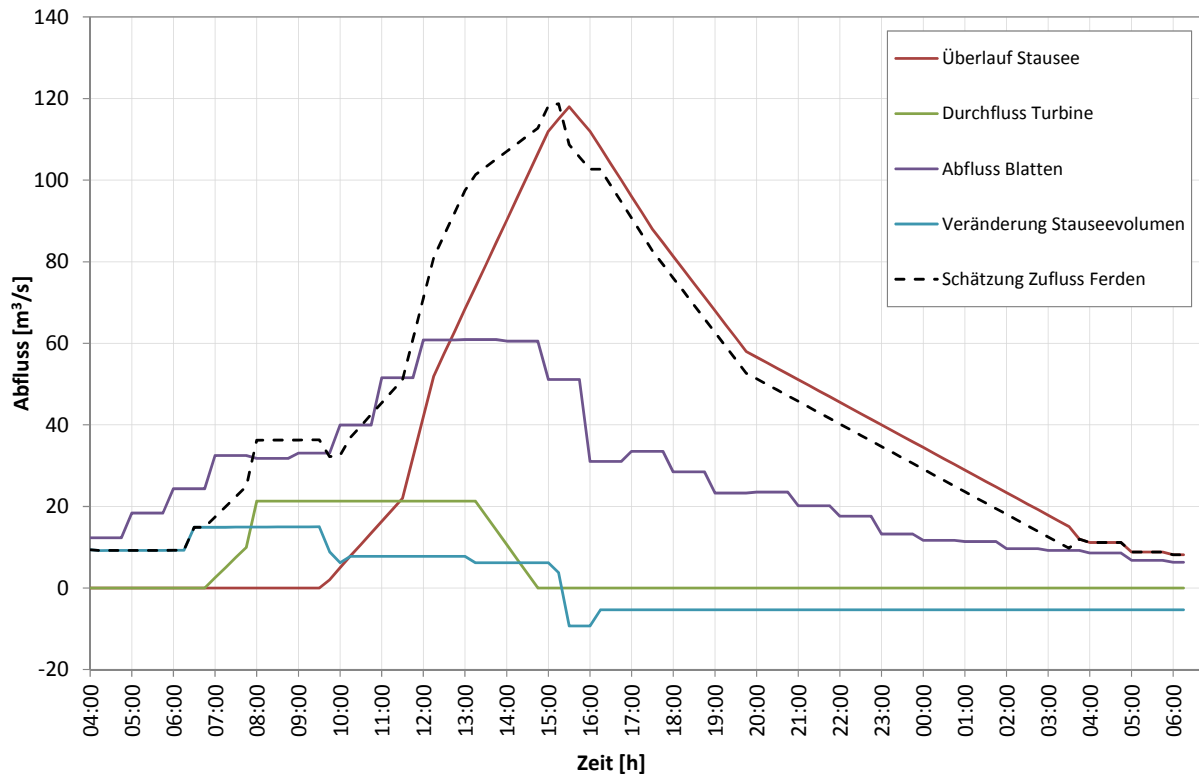


Abb. 6 Schätzung des Zuflusses ins Staubecken Ferden während des Hochwasserereignisses vom 10.10.2011. Daten zu Überlauf Stausee, Durchfluss Turbine und Pegel im Staubecken von der Enalpin AG; Abfluss Blatten: gemessene Werte der BAFU Abflussmessstation; Veränderung Stauseevolumen und Zufluss Ferden abgeschätzt von der WSL. Skala von Ordinate gilt für Überlauf, Durchfluss, Abfluss, Veränderung Stauseevolumen und Schätzung Zufluss).

2.5.3 Hydrologie für die Zeitperiode 1976 bis 2012

Analog zur Hydrologie für die Eichperiode wurde die Abflussganglinie der Station Blatten für die Validierung auf die verschiedenen Teileinzugsgebiete der Zubringer aufgeteilt (20 % Gisentella, 20 % UistreTalbach, 20 % InnreTalbach, 40 % Oberlauf Lonza).

Um eine Abflussganglinie beim Staubecken Ferden zu erhalten, wurde die gemessene Ganglinie bei Blatten mit einem Flächenfaktor hochskaliert. Das Einzugsgebiet der Lonza bis Blatten beträgt 77.8 km^2 , bis zum Staubecken Ferden 130.7 km^2 . Die so erhaltene Ganglinie zwischen Blatten und Ferden wurde für die Simulationen flächenanteilmässig auf die Seitenbäche Färdbach (49 %), Golmbach (11 %), Gafenbach (9 %), Milibach (15 %) und Tännbach (16 %) aufgeteilt.

Diese Aufteilung unterscheidet sich im Vergleich zur Aufteilung für das Hochwasserereignis 2011, bei welchem der Hauptniederschlag nicht gleichmässig über das ganze Einzugsgebiet verteilt war sondern hauptsächlich über den Teil-Einzugsgebieten des Golmbachs, Milibachs und des Tännbachs auftrat.

2.6 Kornverteilungen

Kornverteilungen wurden über die ganze Gerinnelänge mittels Linienzahlanalysen nach Fehr (1987) aufgenommen. Das Gerinne wurde nach den Faktoren Gerinneneigung, Gerinnebreite und Lage der Seitenzubringer in quasi-homogene Abschnitte unterteilt. Für jeden Abschnitt wurde eine repräsentative Kornverteilung erstellt (Abb. 7). Für die Geschiebetransportberechnungen mit *sedFlow* wurden die Linienzahlanalysen in eine gröbere Kornverteilung der Oberflächenschicht und eine feinere Kornverteilung der Unterschicht umgerechnet, wobei der Feinanteil mit Körnern < 1 cm bei der Oberflächenschicht auf 10 % und bei der Unterschicht auf 25 % festgesetzt wurde. Die Werte der charakteristischen Korndurchmesser der Oberflächenschicht variieren für D_{50} zwischen 3 und 12.5 cm, und für D_{84} zwischen 13 und 54 cm.

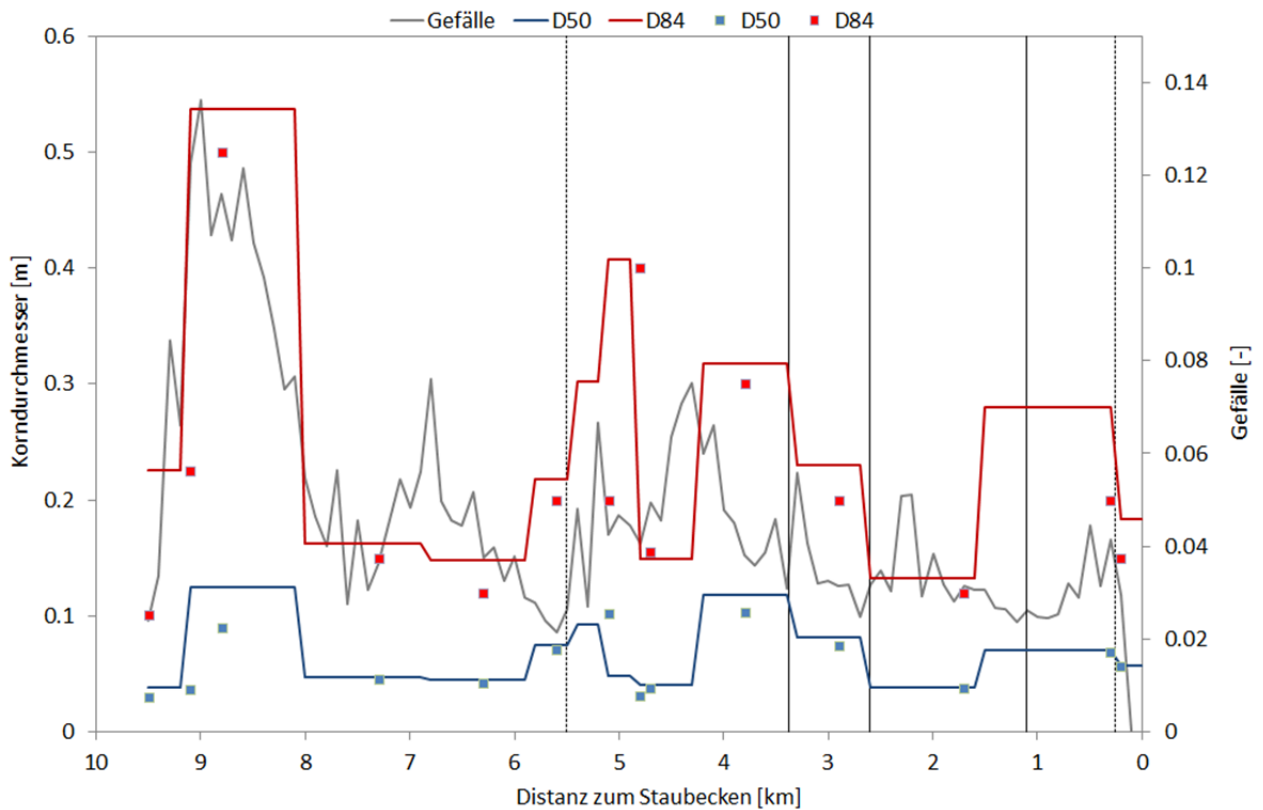


Abb. 7 Kornverteilungen in der Lonza gemäss Linienproben der WSL. Dargestellt sind die charakteristischen Korndurchmesser D_{50} und D_{84} der Oberflächenschicht entlang der Untersuchungsstrecke (wobei jeweils 50 % respektive 84 % des Gewichtsanteils des Sohlenmaterials feiner sind).

3 Simulationsresultate zum Geschiebetransport

3.1 Angaben zur Variation der Randbedingungen und Eingabeparameter

Für die Lonza oberhalb des Staubeckens Ferden liegen keine kontinuierlichen Querprofilvermessungen vor. Die Gerinnebreite wurde im Feld und mithilfe von Luftbildern bestimmt. Das Längsprofil wurde mit einem digitalen Höhenmodell ermittelt. Als Vergleichsgrundlage für die Kalibrierung liegen nur punktuelle Angaben zu den Geschiebeeinträgen aus den drei aktiven Seitenbächen (für das Hochwasser 2011) und zum Geschiebeaustrag am Ende der Untersuchungsstrecke ins Staubecken Ferden vor (für das Hochwasser 2011 und die Zeitperiode 1976 – 2011). Es wurde deshalb darauf verzichtet, die Eingabeparameter wie Korngrößenverteilung und Gerinnebreite an einzelnen Stellen entlang der Untersuchungsstrecke zu variieren. Im Rahmen einer Sensitivitätsstudie wurde der Einfluss einer Variation verschiedener Parameter auf die simulierte Geschiebefracht entlang der ganzen Untersuchungsstrecke betrachtet (siehe Kap. 3.3).

3.2 Simulationsresultate Geschiebetransport für das Hochwasserereignis vom 10.10.2011

Mit den Geschiebetransportformeln nach Rickenmann (2001) und Wilcock und Crowe (2003) wurde versucht, das Hochwasserereignis vom 10.10.2011 möglichst gut nachzurechnen. Die Transportformel nach Rickenmann (2001) wurde (i) ohne Berücksichtigung von Versteckeffekten (d.h. Gl. 3a mit einem Exponenten $m = 0$)¹ angewandt sowie ii) mit der Versteckfunktion mit einem Potenzansatz nach Parker (2008) (Gl. 3a mit einem Exponenten $m = -0.8$) und (iii) mit der Versteckfunktion nach Wilcock und Crowe (2003) (Gl. 3b, 3d). Die Grenzschiebungsspannung für den Bewegungsbeginn (θ_{c50}) wurde mit dem empirischen Ansatz von Lamb et al. (2008) berechnet und das Minimum ($\theta_{c50,min}$) auf 0.03 festgelegt. Die Transportformel von Wilcock und Crowe (2003) wurde mit einem fixen Sandanteil von $F_s = 0.20$ verwendet. Bei beiden Transportformeln wurde anstelle des Sohlgefälles ein reduziertes Energieliniengefälle nach Rickenmann und Recking (2011) verwendet (Gl. 4). Für den Fliesswiderstand wurde bei allen Varianten das Fliessgesetz von Ferguson (2007) in der q-basierten Version von Rickenmann und Recking (2011) gewählt (Gl. 1a).

Bei allen Simulationen wurde in einem ersten Schritt nur eine Kornverteilung (für die Unterschicht) definiert, d.h. es wurde bei der Eingabe nicht zwischen Oberflächenschicht und Unterschicht unterschieden; das Programm *sedFlow* berechnet während der Simulation allerdings verschiedene Kornverteilungen für die Austauschschicht (Oberflächenschicht) und die Unterschicht. Die zu Grunde liegende Annahme hier ist, dass beim Hochwasserereignis 2011 die „Deckschicht“ oder Oberflächenschicht relativ schnell erodiert oder mit Ablagerungen überdeckt wurde.

Die Feststoffeinträge aus den Seitenbächen Golmbach, Milibach und Tännbach wurden kontinuierlich über die ganze Zeitdauer des Hochwasserereignisses eingespeist. Auch die Seitenerosion entlang der Lonza zwischen dem Zufluss Tännbach und der Fafleralp wurde kontinuierlich eingespeist.

Mit den gewählten Formelkombinationen ergaben sich ähnliche Resultate bezüglich der simulierten Geschiebefrachten (Abb. 8). Als Eintrag ins Staubecken Ferden wurde eine Fracht zwischen 60'000 und 80'000 m³ berechnet. Im Vergleich mit den im Becken gemessenen Ablagerungen von 140'000 m³ sind die berechneten Frachten eher zu tief, auch wenn die Größenordnung richtig ist. Der grösste Teil des berechneten Eintrages stammt direkt aus dem Golmbach. Das Geschiebe, das vom Milibach der Lonza zugeführt wird, wird grösstenteils auf der Strecke zwischen den Zuflüssen

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

Milibach und Golmbach abgelagert. Die simulierten Ablagerungen zwischen km 4.5 bis zum Staubecken liegen etwa im Bereich der beobachteten Ablagerungen aus der Ereignisdokumentation (Abb. 3), welche auf dem Vergleich zweier digitaler Höhenmodell basieren. Nur bei der Mündung des Milibachs wurde eine zu grosse Auflandung simuliert.

In einem weiteren Schritt wurde überprüft, wie sich die Erhöhung der minimalen dimensionslosen Grenzschubspannung für den Bewegungsbeginn ($\theta_{c50,min}$) von 0.03 auf 0.08 auswirkt und welchen Einfluss die Vorgabe einer „Deckschicht“ hat, d.h. die Eingabe einer initialen Oberflächenschicht welche größer ist als die Unterschicht. Gerechnet wurde dabei mit der Transportformel von Rickenmann (2001) ohne Berücksichtigung von Versteckeffekten (d.h. Gl. 3a mit einem Exponenten $m = 0$). Die Unterschiede in den simulierten Geschiebefrachten und Sohlenänderungen für das Hochwasser 2011 sind gering (Abb. 9).

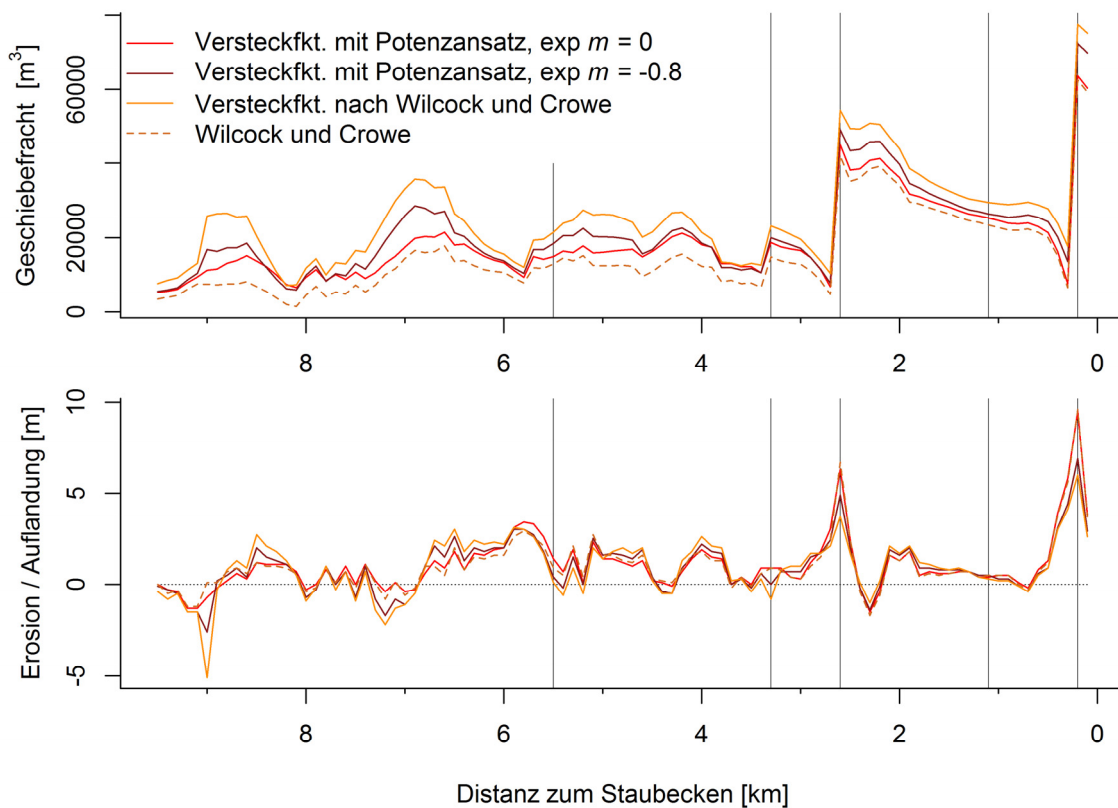


Abb. 8 Simulationsergebnisse mit verschiedenen Formelkombinationen. Dargestellt sind die Geschiebefracht (oben) und die Sohlenänderung (unten) während des Hochwasserereignisses vom 10.10.2011. Gerechnet wurde mit der Transportformel von Rickenmann (2001) in Kombination mit verschiedenen Versteckfunktionen (durchgezogene Linien) und mit der Transportformel von Wilcock und Crowe (2003) mit einem Sandanteil von $F_S = 0.20$ (gestrichelte Linie). Die Gleichungen zu den Versteckfunktionen finden sich im Synthesebericht (Rickenmann et al. 2015).

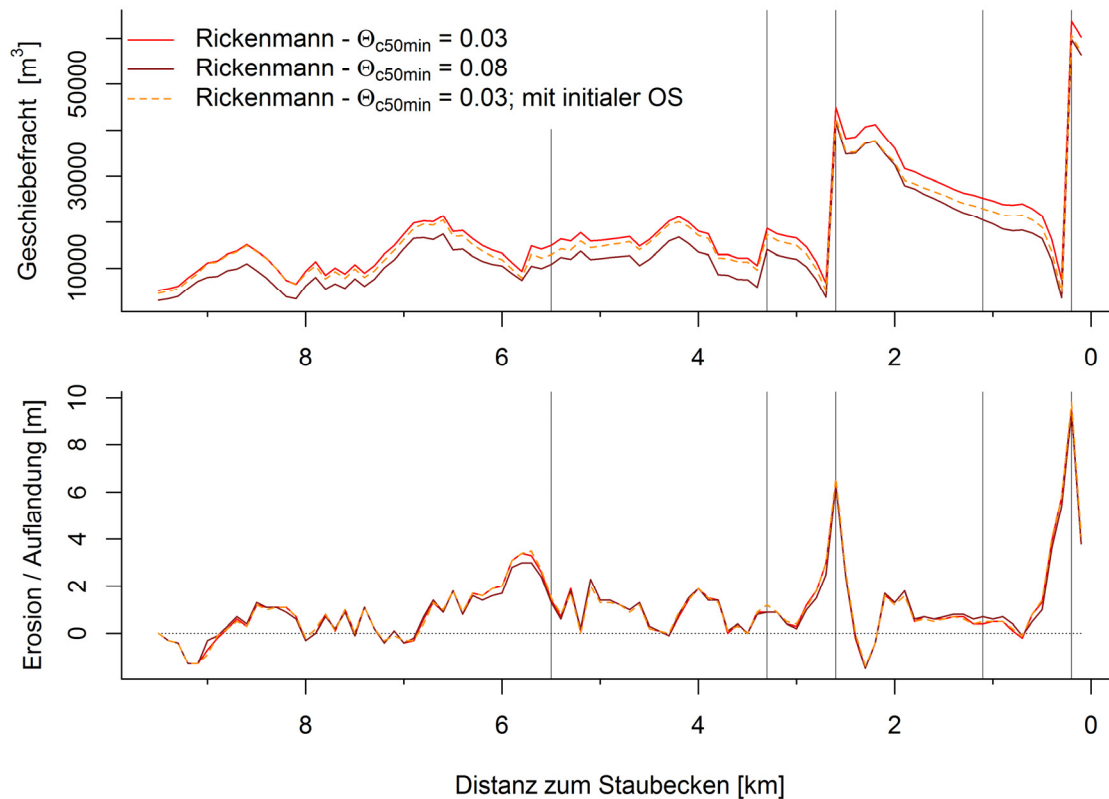


Abb. 9 Vergleich der berechneten Geschiebefracht (oben) und Sohlenänderung (unten) bei einer Änderung der minimalen Grenzschubspannung für den Bewegungsbeginn ($\Theta_{c50,min}$) und Einfügen einer initialen Oberflächenschicht (OS). Berechnungen mit der Transportformel von Rickenmann (2001) ohne Berücksichtigung von Versteckeffekten (Gl. 3a mit einem Exponenten $m=0$).

3.3 Sensitivität der Eingabeparameter

In einer Sensitivitätsanalyse wurden die vier Inputparameter Abfluss, Seiteneinträge, Kornverteilungen und Gerinnebreite jeweils um +/- 40 % variiert und miteinander kombiniert. Für die Variation der Kornverteilung wurden die Durchmesserfraktionen verändert, die eigentlichen Massenangaben wurden belassen. Dabei wurde jede mögliche Kombination der variablen Parameter (Referenzwert, Minimal-, und Maximalwert) aus Abfluss, Seiteneinträge, Kornverteilungen und Gerinnebreite gebildet, und somit wurden 81 Simulationen durchgeführt. In Abb. 10 sind die Resultate dargestellt, welche mit der Transportformel von Rickenmann (2011) ohne Berücksichtigung von Versteckeffekten berechnet wurden. Betrachtet man die beiden mittleren Quartile (25 % - 75 % aller simulierten Werte), so ist die Sensitivität der genannten Parameter auf die absoluten Sohlenänderungen eher gering. Bei den extremen Perzentilen (2.5 % bzw. 97.5 % aller simulierten Werte) ergeben sich in der Steilstrecke bei km 9 eine stärkere Erosion sowie erhöhte Ablagerungen zwischen km 5.6 und 6.3 und bei den Mündungen der beiden Seitenbäche Milibach und Golmbach. Bei den Geschiebefrachten ergibt sich, bezogen auf einen mittleren Wert von ca. 17'000 m³ (km 4 – 5.5), für das 75 %-Perzentil eine relative Erhöhung um einen Faktor 1.5 und für das 97.5 %-Perzentil um einen Faktor 2.5. Für den Geschiebeaustrag ins Staubecken ergibt sich, bezogen auf einen Wert von ca. 62'000 m³, für das 75 %-Perzentil eine relative Erhöhung um einen Faktor 1.2 und für das 97.5 %-Perzentil um einen Faktor 1.6.

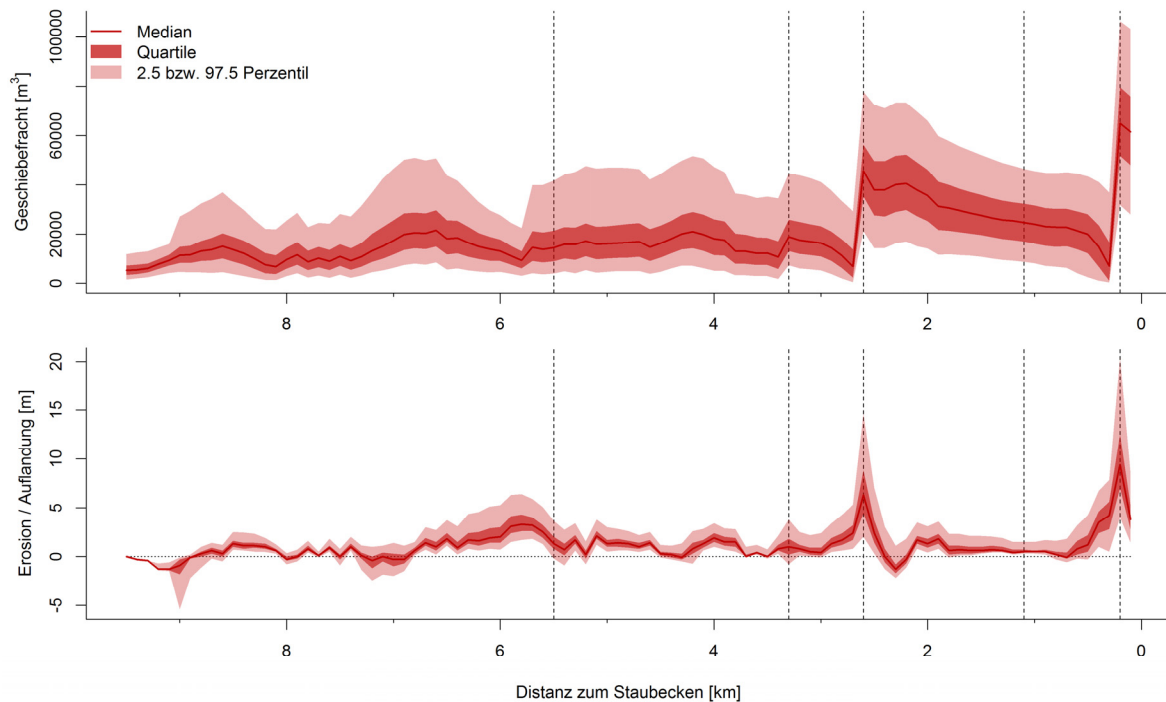


Abb. 10 Sensitivitätsanalyse in der Lonza für das Hochwasser vom 10.10.2011: Berechnete Geschiebefrachten (oben) und Sohlenveränderungen (unten) aufgrund von 81 Simulationen mit variablen Eingangsparametern für die Modellierung mit *sedFlow*. Dargestellt sind die Resultate berechnet mit der Transportformel von Rickenmann (2001) ohne Berücksichtigung von Versteckeffekten (Gl 3a mit einem Exponenten $m = 0$).

3.4 Diskussion der Simulationsresultate

Für die Lonza fehlen wiederholt vermessene Querprofile, mit welchen ein detaillierteres Geschiebetransportdiagramm erstellt werden könnte. Die Kalibrierung erfolgte anhand von Angaben zum Hochwasserereignis vom Oktober 2011. Diese Daten sind mit einer grossen Unsicherheit verbunden. So wurde zum Beispiel der Anteil des Geschiebes an den Ablagerungen auf 70 % geschätzt. Dieser Anteil könnte durchaus auch höher liegen. Die Linienzahlanalysen zur Bestimmung der Kornverteilungen wurden erst nach dem Hochwasserereignis aufgenommen. Der Zustand vor dem Ereignis ist nicht bekannt, wodurch eine gewisse Unsicherheit bezüglich der verwendeten Kornverteilungen besteht. Die Unsicherheit der verwendeten Abflussganglinien ist auch relativ gross, weil der gemessene Abfluss in Blatten nur anhand eines Flächenansatzes auf die Teileinzugsgebiete aufgeteilt wurde.

Die Eingabe einer initialen „Oberflächenschicht“ und die Erhöhung der Grenzschubspannung für den Bewegungsbeginn haben praktisch keinen Einfluss auf die Simulationsresultate (Abb. 9). Dies ist darauf zurück zu führen, dass in einem ersten Schritt nur ein Hochwasser simuliert wurde. Dadurch wird nur mit grossen Abflüssen gerechnet und die Schubspannung liegt relativ deutlich über der Grenzschubspannung bei Transportbeginn.

Mit der Sensitivitätsanalyse konnte der Einfluss der Unsicherheiten in der Abflussganglinie, den Kornverteilungen, der Gerinnebreite und in den seitlichen Feststoffeinträgen auf den Geschiebetransport abgeschätzt werden (Abb. 10). Es zeigte sich, dass auch die Kombination mit der höchsten berechneten Geschiebefracht zu weniger Geschiebeablagerung im Staubecken Ferden führte als beobachtet wurde.

3.5 Simulationsresultate Geschiebetransport für die Zeitperiode 1976 bis 2011

Für die Langzeitsimulationen wurden die Gerinnegeometrie und die Kornverteilungen der Simulationen des Hochwassers 2011 sowie die Modellparameter übernommen. Diese Simulationen stellen somit eine Überprüfung (Validierung) von *sedFlow* für andere Abflussbedingungen in der Lonza dar. Es wurden die gleichen Formelkombinationen wie für das Hochwasser 2011 verwendet (siehe Kap. 3.2). Als Vergleichsgrundlage standen Ablagerungsmessungen im Staubecken Ferden für die Periode 1976 bis 2011 zur Verfügung. Um die Güte der Simulationen zu beurteilen, wurde die Geschiebefracht am Ende der Simulationsstrecke mit den beobachteten Geschiebeablagerungen für 19 Vermessungsperioden verglichen. Bei diesen Langzeitsimulationen wurden die Abflüsse der Jahre 1976 bis 2011 verwendet, wobei keine seitlichen Feststoffeinträge berücksichtigt wurden.

Basierend auf den Modell-Einstellungen wie für das Hochwasser vom Oktober 2011 wurde mit der Formel von Rickenmann (2001) ein etwa 25-mal zu grosser Geschiebetransport berechnet (i) (Abb. 11). Mit der Annahme einer initialen Oberflächenschicht ist der Geschiebetransport im Durchschnitt noch ca. 15-mal zu gross (ii). Die Erhöhung der minimalen Schubspannung für den Bewegungsbeginn $\theta_{e50,min}$ von 0.03 auf 0.08 führt nur zu einer unwesentlichen Verkleinerung der Geschiebefrachten (iii). Wird zusätzlich der Exponent e bei der Berechnung des reduzierten Energieliniengefälles (Gl. 4) von 1.5 auf 2 erhöht, resultiert nur noch einer ungefähr 8-fache (für $\theta_{e50,min} = 0.03$) bzw. 6.2-fache (für $\theta_{e50,min} = 0.08$) Überschätzung (iv, v).

Bei der Formel Wilcock und Crowe (2003) ergab die Simulation mit einem Sandanteil von $F_s = 0.20$ und mit einer initialen Oberflächenschicht eine Überschätzung des beobachteten Geschiebetransportes um etwa einen Faktor 2.8 (vi). Die Reduktion des Sandanteils auf $F_s = 0.05$ führt noch zu einer 1.3-fachen Überschätzung (vii). Wird zusätzlich der Exponent e beim reduzierten Energieliniengefälle von 1.5 auf 2 erhöht, resultiert eine Unterschätzung um mehr als 70 % des beobachteten Geschiebetransportes (viii). Mit der Kombination eines Sandanteils von $F_s = 0.20$ und eines Exponenten $e = 2$ (Berechnung des reduzierten Energieliniengefälles) resultiert eine Unterschätzung um mehr als 30 % (ix).

Eine analoge Abbildung mit den absoluten Geschiebetransportraten ist im Anhang (Abb. 13) aufgeführt.

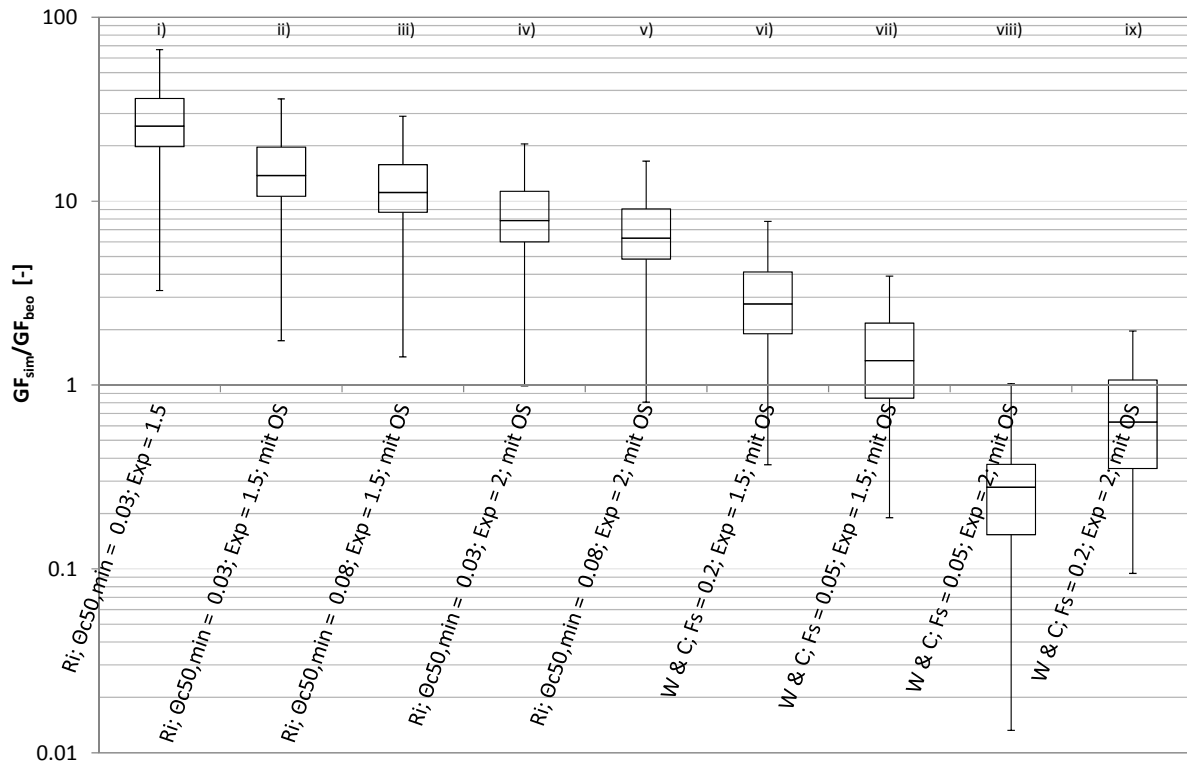


Abb. 11 Verhältnis der simulierten zu den beobachteten Geschiebefrachten (GF_{sim}/GF_{beo}) im Staubecken Ferden. Dargestellt sind für jede Formelkombination die Resultate von 19 Perioden, für welche die Ablagerungen vermessen wurden (siehe Abb. 4), für die jeweiligen im Text beschriebenen Kombinationen (i) bis (ix). In der Box liegen jeweils die mittleren 50 % der Daten, sie wird also begrenzt durch das untere und obere Quartil. Die mittlere Linie kennzeichnet den Median. Die Whisker kennzeichnen das Maximum und das Minimum. Ri = Rickenmann (2001), W&C = Wilcock und Crowe (2003), OS = initiale Oberflächenschicht wurde definiert.

Das Verhältnis der simulierten zu den beobachteten Geschiebefrachten im Staubecken Ferden wurde auch als Zeitreihe dargestellt (Abb. 12). Dabei sind die mit den verschiedenen Formelkombinationen berechneten Minima und Maxima zu erkennen. Das Verhältnis ist in den drei Perioden 01.09.1986 bis 01.06.9187, 01.07.2000 bis 31.11.2000 und 01.07.2011 bis 31.10.2011 eindeutig kleiner, und die Berechnungen sind näher bei den Beobachtungen. Diese drei Perioden gehören zu den kürzesten Vermessungszeiträumen. Zusätzlich fanden in zwei dieser drei Perioden die grössten Hochwasserereignisse mit viel Geschiebetransport statt (15./16.10.2000 und 10.10.2011). Die Resultate der verschiedenen Formelkombinationen zeigen ähnliche Änderungen über die Zeit.

Eine analoge Abbildung mit den absoluten Geschiebetransportraten ist im Anhang (Abb. 14) aufgeführt.

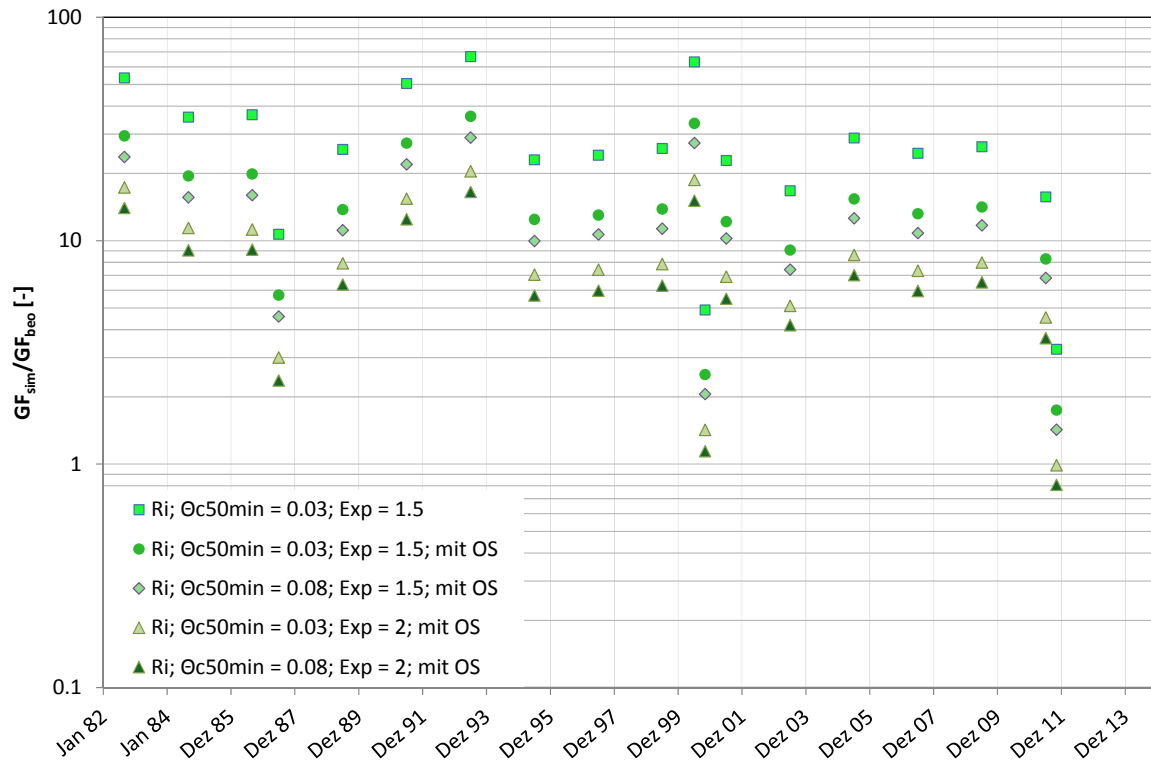


Abb. 12 Verhältnis der simulierten zu den Beobachteten Geschiebefrachten (GF_{sim}/GF_{beo}) im Staubecken Ferden. Dargestellt sind die Resultate für 19 Perioden mit Ablagerungsmessungen, berechnet mit der Transportformel von Rickenmann (2001) unter Verwendung von verschiedenen minimalen dimensionslosen Grenzschubspannungen für den Bewegungsbeginn ($\theta_{c50,min}$) und von unterschiedlichen Exponenten (Exp) bei der Bestimmung des reduzierten Energieliniengefälles. OS = initiale Oberflächenschicht wurde definiert

4 Literaturverzeichnis

- BAFU (2014): Abschätzung der mittleren jährlichen Geschiebelieferung in Vorfluter, Praxishilfe. Arbeitsgemeinschaft Hunziker, Zarn und Partner AG, Aarau; Hydrologie – Wasserbau, Urtenen-Schönbühl; belop gmbh, Sarnen; im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Bern, Mai 2014.
- Geoplan (2012): Hochwasserereignis vom 10.10.2011 im Lötschental – Ereignisanalyse. Geoplan AG, Steg, unveröffentlichter Bericht im Auftrag des Kantons Wallis, zuhanden des Talrats von Lötschen.
- Fehr, R. (1987): Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse. Schweizer Ingenieur und Architekt, 105, 1104-1109.
- Ferguson, R. (2007): Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams. Water Resources Research, 43, W05427, doi: 10.1029/2006WR005422.
- 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.
- Lamb, M.P., Dietrich, W.E., Venditti, J.G. (2008): Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope? Journal of Geophysical Research, 113, F02008. doi:10.1029/2007JF000831.
- Nitsche, M., Rickenmann, D., Turowski, J.M., Badoux, A., Kirchner, J.W. (2011): Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams. Water Resources Research, 47, W08513, doi:10.1029/2011WR010645.
- Nitsche, M., Rickenmann, D., Turowski, J.M., Badoux, A., Kirchner, J.W. (2012): Verbesserung von Geschiebevorhersagen in Wildbächen und Gebirgsflüssen durch Berücksichtigung von Makrorauigkeit. Wasser Energie Luft, 104(2), 129-139.
- 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 river 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., Turowski, J.M. (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)
- Wilcock, P.R., Crowe, J.C. (2003): Surface based transport model for mixed-size sediment. Journal of Hydraulic Engineering, 129(2), 120-128.

5 Anhang

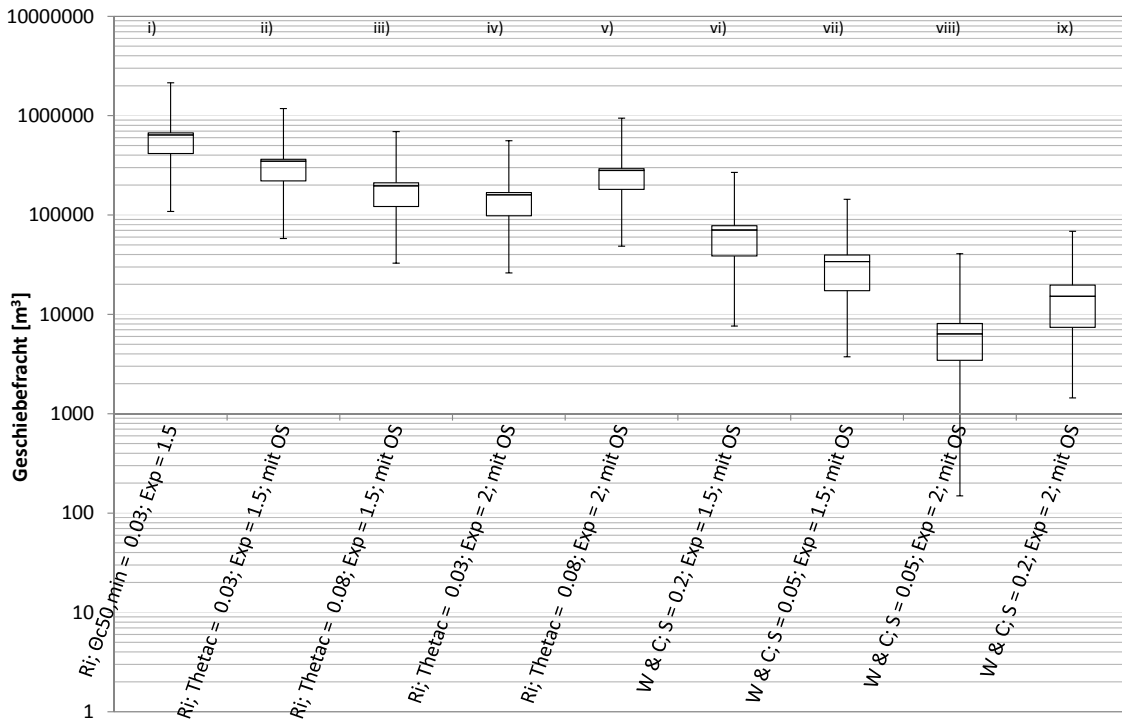


Abb. 13 Berechnete Geschiebefrachten im Staubecken Ferden. Dargestellt sind für jede Formelkombination die Resultate von 19 Perioden, nach denen die Stauraumverlängerung gemessen wurde (siehe Abb. 3) für die jeweiligen im Text beschriebenen Kombinationen (i) bis (ix). In der Box liegen jeweils die mittleren 50 % der Daten. Sie wird begrenzt durch das untere und obere Quartil. Die mittlere Linie kennzeichnet den Median. Die Whisker kennzeichnen das Maximum und das Minimum. Ri = Rickenmann (2001), W&C = Wilcock und Crowe (2003), OS = initiale Oberflächenschicht wurde definiert.

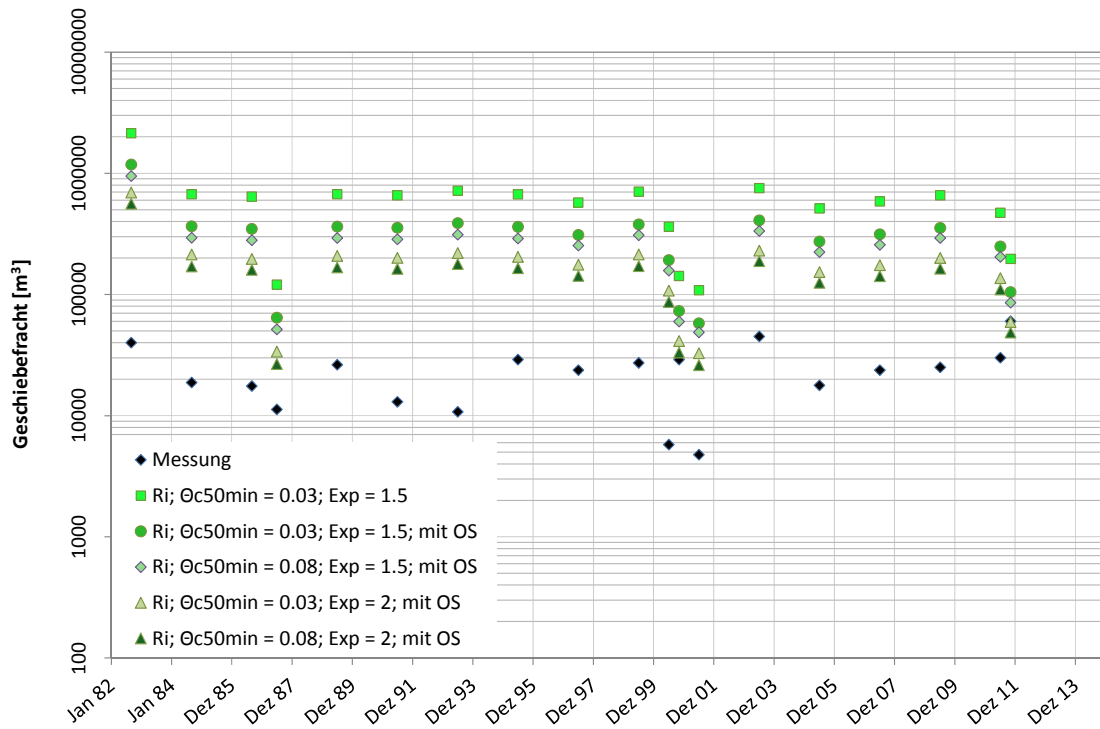


Abb. 14 Berechnete und beobachtete Geschiebefrachten im Staubecken Ferden. Dargestellt sind die Resultate für die 19 Perioden, berechnet mit der Transportformel von Rickenmann (2001) unter Verwendung der verschiedenen minimalen dimensionslosen Grenzschubspannungen für den Bewegungsbeginn ($\theta_{c50,min}$) und Exponenten (Exp) bei der Bestimmung des reduzierten Energieliniengefälles.