

## **GESCHIEBETRANSPORTMODELLIERUNG IN WILDBÄCHEN UND VERGLEICH DER MORPHOLOGISCHEN VERÄNDERUNG MIT LIDAR DATEN**

### **MODELLING SEDIMENT TRANSPORT IN A MOUNTAIN STREAM AND COMPARISON OF THE MORPHOLOGIC CHANGE WITH LIDAR DATA**

Michael Chiari<sup>1</sup>, Elisabeth Mair<sup>1</sup>, Dieter Rickenmann<sup>1,2</sup>

#### **ZUSAMMENFASSUNG**

Zur Validierung von Geschiebetransportmodellen sind einerseits Angaben zur Hydrologie und Hydraulik des Abflusses notwendig. Andererseits werden Angaben über die Prozesse Erosion und Ablagerung für die Überprüfung der Geschiebetransportmodellierung benötigt. Die durch ein extremes Hochwasser in einem alpinen Einzugsgebiet bedingten morphologischen Veränderungen wurden mit Hilfe von luftgestützten Laserscan Geländemodellen quantifiziert. Es wurde eine Ereignisrekonstruktion für den Suggadinbach in Vorarlberg durchgeführt. Um die aus der Unschärfe der Eingangsparameter resultierende Bandbreite der möglichen Abflussganglinien zu berücksichtigen, wurden verschiedene Szenarien mit dem eindimensionalen Geschiebetransportmodell SETRAC simuliert und mit der in der Natur beobachteten Sedimentverlagerung verglichen.

**Keywords:** Geschiebetransport, numerische Modellierung, steile Gefälle

#### **ABSTRACT**

To validate sediment transport models, hydrologic and hydraulic parameters have to be known or assumed. But also the quantification of erosion and deposition is needed to verify the simulation results. Airborn LiDAR data were used to calculate the morphologic changes that were caused by an extreme flood event in an alpine catchment. The reconstruction of an extreme event was performed for the Suggadin mountain stream in Vorarlberg. To take the bandwidth of possible input hydrographs into account different scenarios are modelled with the one dimensional bedload transport model SETRAC. The results of the simulations are compared with the observed transported sediment loads inferred from the morphologic changes.

**Keywords:** bedload transport, numerical modelling, steep slopes

---

1 Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich,  
email: michael.chiari@boku.ac.at

2 Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Gebirgshydrologie und Wildbäche,  
Birmensdorf, Schweiz

## EINLEITUNG

Die Modellierung von Geschiebetransportprozessen in steilen Wildbacheinzugsgebieten stellt eine große Herausforderung dar. Für die Kalibrierung hydraulischer Modelle sind im Allgemeinen gemessene Abflussdaten wie Durchfluss und Wasserspiegellagen notwendig. Vor allem in kleineren steilen Einzugsgebieten sind diese Daten oft nur schwer oder auch gar nicht verfügbar. Des Weiteren werden für die Validierung von Geschiebetransportmodellen Angaben über die Verlagerungsprozesse, d. h. die Bereiche mit Erosion bzw. Ablagerung benötigt.

Abgesehen von den oft nur groben Daten oder Beobachtungen zum Prozessablauf in der Natur, ist die Verfügbarkeit von Geschiebetransfer-Modellen für steile Gerinne sehr limitiert.

## FALLBEISPIEL SUGGADINBACH

Der Suggadinbach (Abb. 1) durchfließt das Gargellental, ein in südwestlicher Richtung verlaufendes Seitental des Montafons in Vorarlberg (Abb. 2). Er entwässert ein 75 km<sup>2</sup> großes Gebiet. Das Einzugsgebiet des Suggadinbaches liegt im Bereich des Silvretta-Kristallins, und ist vor allem aus verschiedenen Gneisen und Glimmerschiefern aufgebaut. Der Waldanteil an der Gesamtfläche des Einzugsgebiets beträgt 21%.



**Abb. 1:** Hochwasserereignis am Suggadinbach im Montafon in Vorarlberg im August 2005  
(Quelle: WL.V Bludenz)

**Fig. 1:** Flood event at the Suggadin mountain stream in Montafon valley in Vorarlberg on August 2005  
(source: WL.V Bludenz)

Die Ereignisrekonstruktion bezieht sich auf das Hochwasserereignis vom 22./23. August 2005 (Abb. 1). Seit dem Nachmittag des 19. August 2005 gab es im Einzugsgebiet Niederschläge. Das auslösende Niederschlagsereignis begann am 22. August um die Mittagszeit und

erreichte seine höchsten Intensitäten um Mitternacht mit Stundenniederschlägen von über 9 mm/h. Zur Mittagszeit des 23. August endeten die Niederschläge. In 24 Stunden fiel im Einzugsgebiet eine Regenmenge von 93 mm.

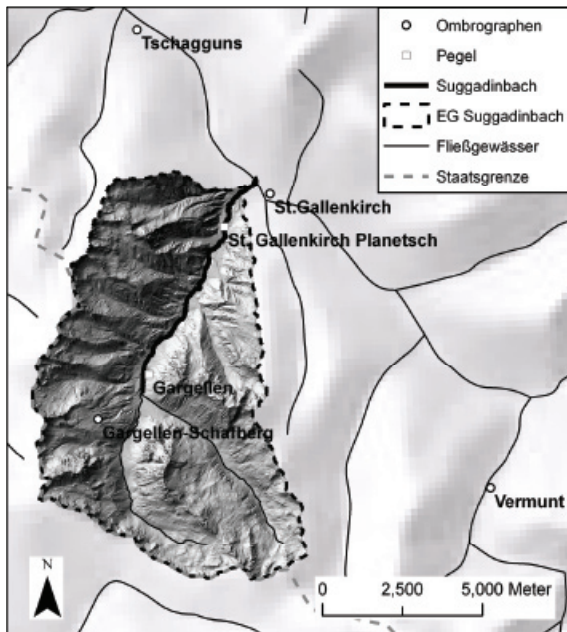
Um ca. 18.00 Uhr am 22. August setzte das Hochwasserereignis ein, ab 22.00 Uhr war die Straße ins Gargelltal nicht mehr befahrbar.

Insgesamt war die Zerstörung von zwei Brücken, 4 km Landesstraße, jeweils 4 km Hochspannungsleitung, Telefonleitung, Stromversorgung und Kanalisationsleitungen und 5 ha Wald zu verzeichnen.

## Rekonstruktion der Ereignisganglinien

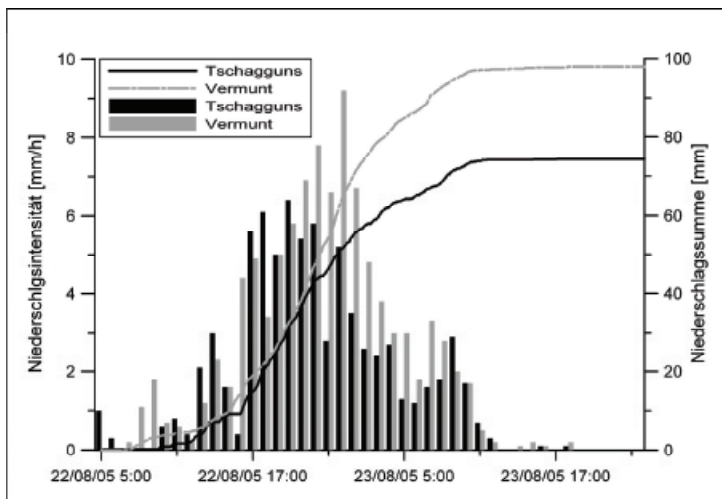
Die für die Modellierung der Geschiebetransportprozesse notwendigen Abflussganglinien wurden mit Hilfe des Niederschlags-Abfluss-Modells HEC-HMS erstellt. Leider fielen die im Einzugsgebiet liegenden Niederschlagsstationen Gargellen Schafberg und St. Gallenkirch (Abb. 2) während des Ereignisses aus und können nicht herangezogen werden. Als Eingangsdaten standen die Niederschlagsdaten von zwei außerhalb des Einzugsgebiets liegenden Niederschlagsmessstationen zur Verfügung: Vermunt und Tschagguns.

Entsprechend der Seehöhe der Messstation (Vermunt: 1733 m, Tschagguns: 680 m) wurden die Daten der Station Vermunt für das obere Einzugsgebiet, jene der Station Tschagguns für das untere Einzugsgebiet übernommen. Die Station Tschagguns ist 6 km und die Station Vermunt ist 11 km vom Suggadinbach entfernt. Die Niederschlagsintensitäten und die Summenlinien für die Stationen Tschagguns und Vermunt sind in der Abb. 3 dargestellt.



**Abb. 2:** Übersicht Einzugsgebiet Suggadinbach mit Ombrographen und Abflusspegel

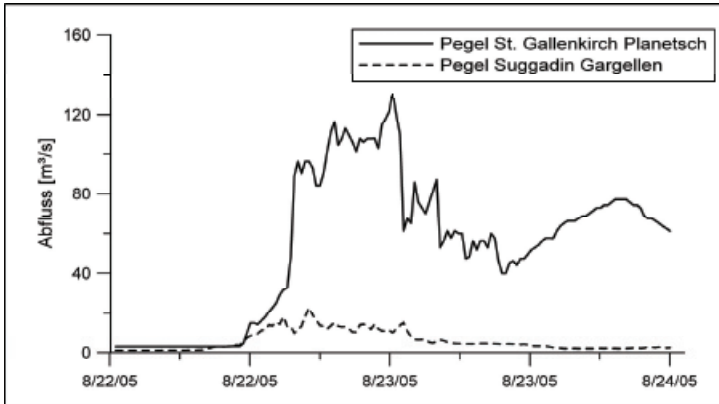
**Fig. 2:** Catchment area of the Suggadin mountain stream with rainfall and discharge gauges



**Abb. 3:** Niederschlagsintensitäten und Niederschlagssummen für die Stationen Tschagguns und Vermunt  
**Fig. 3:** Rainfall intensity and accumulative rainfall for the stations Tschagguns and Vermunt

Zur Rekonstruktion des Abflusses standen die Daten von zwei Pegelstationen im Suggadinbach zur Verfügung. Einer dieser Pegel befindet sich im oberen Einzugsgebiet. Aufgrund der aus diesem Pegel resultierenden geringen Abflussspende von  $0.6 \text{ m}^3/(\text{s km}^2)$  wurde dieser Pegel zur Festlegung der Abflussspitze nicht verwendet, da daraus unrealistische Abflussbeiwerte resultierten. Im unteren Einzugsgebiet befindet sich ein alter Messpegel, für den kein gültiger Pegelschlüssel mehr existiert. Für diesen wurde eine Rückrechnung des Abflusses nach Rickenmann (1990) unter Berücksichtigung der durch den Geschiebetrieb erhöhten Gemischabflusstiefe durchgeführt. Weiters wurde im unteren Bachabschnitt der Spitzenabfluss für ein Querprofil, das während des Durchgangs der Hochwasserwelle nur eingeschränkten morphologischen Veränderungen unterlag, nach der oben erwähnten Methode rückgerechnet. Aus diesem Spitzenabfluss und dem aus den Pegeldaten entnommenen zeitlichen Verlauf der Hochwasserwelle wurde die Abflussganglinie nachgebildet. Um die Unsicherheiten der Eingangsganglinien auch bei der Modellierung des Geschiebetransports zu berücksichtigen, wurde zusätzlich ein zweites Szenario entwickelt. Dazu wurde für das gemessene Profil mit beweglicher Sohle der maximal mögliche Durchflussquerschnitt festgelegt und der zugehörige Spitzenabfluss bestimmt. Zusammen mit dem zeitlichen Verlauf aus den Pegeldaten ergibt sich daraus ein Maximalszenario.

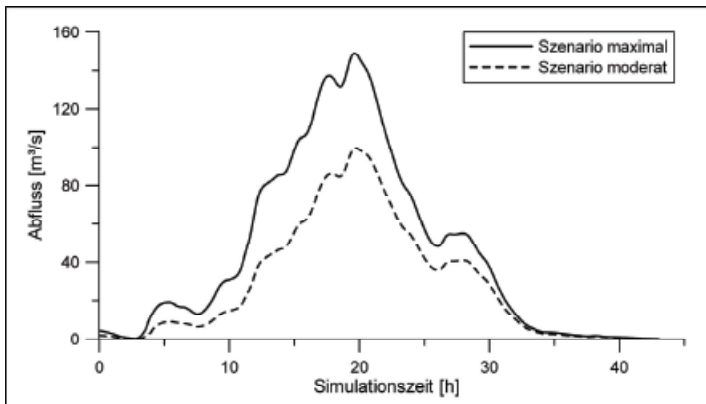
In Abb. 4 sind die Abflussganglinien aus den Pegelmessungen dargestellt. Der Spitzenabfluss beträgt im Fall des Pegels St. Gallenkirch Planetsch ca.  $130 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der Anstieg der Ganglinie des Pegels St. Gallenkirch Planetsch ab 13.00 Uhr am 23. 08. 2005 wird auf eine Störung der Messung zurückgeführt, da er nicht durch Niederschlag erklärt werden kann



**Abb. 4:** Abflussdaten der zwei Pegel des Suggadinbaches. Bei den Daten des Pegels St. Gallenkirch Planetsch basiert der Abfluss auf einem beobachteten Fließquerschnitt und einer rechnerischen Abschätzung der Fließgeschwindigkeit.

**Fig. 4:** Discharge gauges at the Suggadin mountain stream. For the gauge St. Gallenkirch Planetsch the discharge was recalculated.

Die aus dem rückgerechneten Querprofil resultierenden Abflussspitzen ergeben eine mögliche Bandbreite von  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  bis  $170 \text{ m}^3/\text{s}$ . In Abb. 5 sind die mittels Niederschlags-Abfluss-Simulation (HEC-HMS) generierten Ganglinien für das moderate Szenario und das Maximalszenario dargestellt. Im moderaten Szenario beträgt die Abflussspitze  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Im Maximalszenario wird mittels des Niederschlags-Abfluss-Modells der aus den Eingangsniederschlagsdaten und verschiedenen Gebietsparametern resultierende maximal plausible Abfluss von  $149 \text{ m}^3/\text{s}$  unter der Annahme sehr hoher Abflussbeiwerte bestimmt. Die aus dem beobachteten Abflussquerschnitt errechneten  $170 \text{ m}^3/\text{s}$  können unter Verwendung realistischer Einzugsgebietsparameter nicht aus dem gemessenen Niederschlag nachgebildet werden.

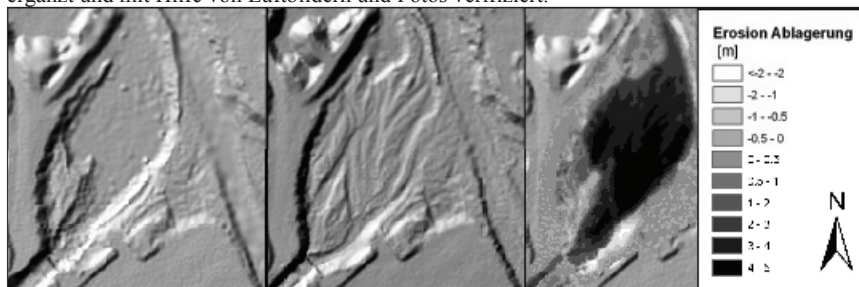


**Abb. 5:** Abflussganglinien des Suggadinbaches am Gebietsauslass: Szenario moderat und Maximalszenario

**Fig. 5:** Discharge at the outlet of the Suggadin mountain stream for the moderate scenario and the maximum scenario

## Rekonstruktion der Geschiebefracht

Die aus LiDAR Daten (Laserscan) generierten Höhenmodelle entsprechen der geomorphologischen Erscheinung der Erdoberfläche zum Zeitpunkt des Fluges. Hat sich nun das geomorphologische Erscheinungsbild in Wild- bzw. Gebirgsbächen nach einem Ereignis stark verändert (Ablagerung, Seitenerosion, Tiefenerosion, etc.) so kann die rezente Veränderung durch erneute Befliegung und Messung erfasst werden. Durch einfache Subtraktion der zeitlich unterschiedlichen Höhenmodelle können potentielle Erosions- und Ablagerungsbereiche identifiziert sowie qualitativ erfasst werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den errechneten Volumina um Raumvolumen handelt. Um auf Geschiebe-Feststoffvolumen zu kommen sind die Feinanteile und das Porenvolumen zu berücksichtigen. Des Weiteren muss angemerkt werden, dass sich mit Laserscan generierte Geländemodelle nur für nicht überflutete Bereiche eignen, da Wasser das Signal absorbiert. In Wildbachgerinnen mit aus der Wasseroberfläche herausragenden Rauigkeitselementen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das Gerinne hinreichend genau abgebildet wird. Durch Analyse der Punktdichten in den betrachteten Abschnitten können Problembereiche identifiziert werden. Abb. 6 zeigt das digitale Geländemodell des Mündungsbereichs Suggadinbach in die Ill. Auf dem linken Bild ist der Zustand zum Zeitpunkt der ersten Befliegung dargestellt. Auf der mittleren Abbildung kann man die durch das Augusthochwasser 2005 verursachten Ablagerungen erkennen und in der rechten Abbildung sind die aus den beiden Geländemodellen errechneten Erosions- und Ablagerungshöhen dargestellt. Die errechneten Geschiebebilanzen wurden mit Angaben zu den Baggerungen ergänzt und mit Hilfe von Luftbildern und Fotos verifiziert.



**Abb. 6:** Digitales Geländemodell des Mündungsbereichs Suggadinbach in die Ill vor dem Hochwasser, nach dem Ereignis und mit berechneten Erosions- und Ablagerungshöhen.

**Fig. 6:** Digital terrain model of the estuary of the Suggadin mountain stream into the river Ill before the flood event, after the flood and with calculated erosion and deposition heights.

Um die flächige Information als eindimensionales Geschiebefrachtendiagramm darstellen zu können, wurden die aktiven Gerinnebereiche in 50 m Abschnitte unterteilt und pro Teilfläche das Erosions- und Ablagerungsvolumen berechnet. Während des Ereignisses wurden ca. 50 000 m<sup>3</sup> Geschiebe mobilisiert. Abb. 7 zeigt das rekonstruierte Geschiebefrachtendiagramm und das Gerinnegefälle in den einzelnen Abschnitten.

Bei Wildbachgerinnen mit stabilen Sohlstrukturen wird davon ausgegangen, dass maßgebliche morphologische Veränderungen nur durch größere Hochwässer hervorgerufen werden. In dem Zeitraum zwischen den beiden Laserscan Befliegungen (Laserscan Flug vor dem Ereignis: 10.12.2002; Laserscan Flug nach dem Ereignis: 13.11.2005) sind keine weiteren größeren Hochwässer im Einzugsgebiet bekannt.

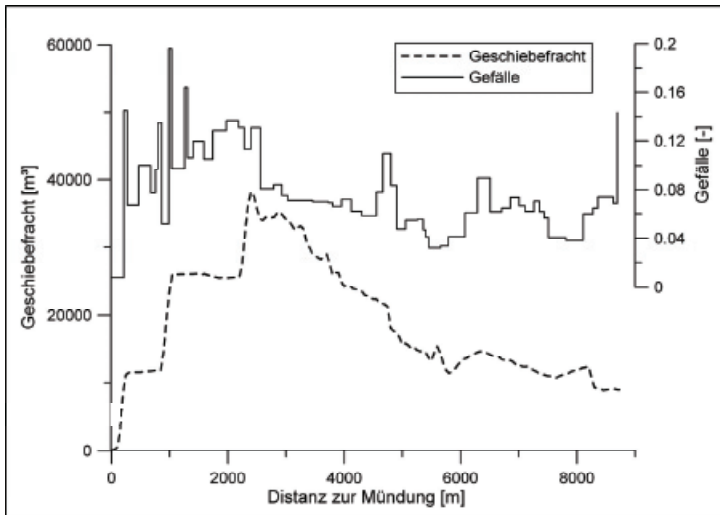


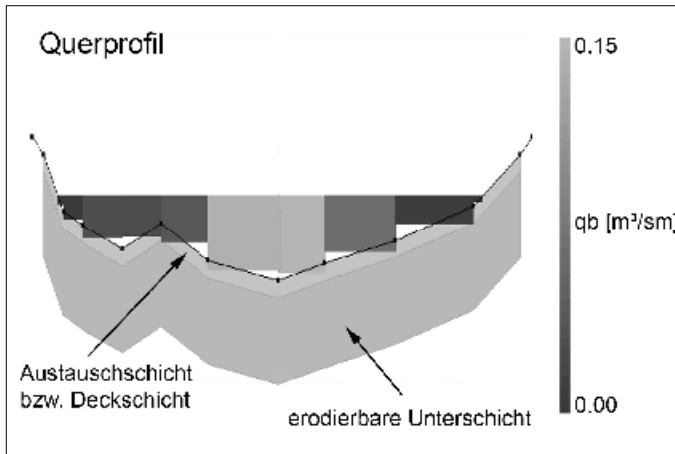
Abb. 7: Rekonstruierte Geschiebefracht für das Hochwasserereignis mit Angabe des Gerinnegefälles der einzelnen Abschnitte

Fig. 7: Transported bedload volumes for the flood event with illustration of the channel slope for the reaches

## DAS SIMULATIONSMODELL SETRAC

Es existieren viele Sedimenttransportmodelle die erfolgreich an Flüssen angewandt wurden, aber nur eine geringe Anzahl eignet sich für die Modellierung von steileren Gerinnen (Papanicolaou et al. 2004). Ein eindimensionales Geschiebetransportmodell wurde zur Rekonstruktion der Transportprozesse im Suggadinbach angewandt.

Das eindimensionale Geschiebetransportmodell SETRAC (Rickenmann et al. 2006) wurde an der Universität für Bodenkultur in Wien entwickelt. SETRAC ist das Akronym für Sediment Transport Model in Alpine Catchments. Die Abflussganglinien werden als kinematische Welle durch ein Gerinnesystem geleitet. Verschiedene Ansätze zur Berechnung des Fließwiderstands stehen dem Anwender zur Auswahl. Zusätzlich kann der Einfluss der Formrauigkeit auf den Geschiebetransport berücksichtigt werden. Verschiedene Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports (Rickenmann 1991, Smart & Jäggi 1983) stehen zur Verfügung. Die Querprofile werden zur Berechnung des Pegelschlüssels nach der Streifenmethode aufgeteilt. Die Anzahl der Streifen richtet sich dabei nach der Komplexität des Querprofils. So können auch gegliederte Profile gut abgebildet werden. In jedem Streifen wird neben der Fließgeschwindigkeit auch der Geschiebetrieb berechnet. Ein gegliederter Querschnitt mit Visualisierung des Geschiebetransports ist in Abb 8 dargestellt. In SETRAC können auch Änderungen der Gerinnegeometrie durch Auflandungen bzw. Erosion berücksichtigt werden. Wobei jedem Berechnungsabschnitt eine mögliche Erosionstiefe zugewiesen wird. Weiters stehen für den Geschiebetransport ein Einkorn- sowie ein Mehrkornmodell zur Verfügung. Bei der Wahl des Mehrkornmodells wird zwischen einer aktiven Austauschschicht und einer erodierbaren Unterschicht unterschieden.



**Abb 8:**  
Gegliedertes  
Querprofil mit  
Visualisierung des  
spezifischen  
Geschiebetransports  
in den einzelnen  
Streifen.

**Fig. 8** Structured  
cross-section with  
visualization of the  
specific bedload  
transport within the  
stripes.

## SIMULATIONEN

Aufgrund der Unsicherheiten bei der Rekonstruktion der Abflussganglinie wird eine Bandbreite der möglichen Werte berücksichtigt. Dazu wurden die Simulationen mit einem moderaten, sowie einem maximalen Abflussereignis durchgeführt. Mögliche Erosionstiefen wurden für die einzelnen Abschnitte im Feld geschätzt und liegen zwischen 0 m für Bereiche mit nicht erodierbarer Sohle und 10 m für Bereiche mit unlimitierter Geschiebeverfügbarkeit. Für die Simulationen wurde SETRAC als Einkornmodell ohne Sohlveränderung verwendet.

### Verwendete Formeln im SETRAC Modell

Die Fließgeschwindigkeit in steilen Gerinnen kann als Funktion des Gefälles und der relativen Abflusstiefe ausgedrückt werden (Rickenmann et al. 2006):

$$v = \frac{1.93g^{0.5}h^{1.5}S^{0.5}}{d_{90}} \quad (1)$$

wobei  $g$  die Erdbeschleunigung,  $v$  die Fließgeschwindigkeit,  $h$  die Abflusstiefe und  $S$  das Energieliniengefälle ist. Der  $d_{90}$  ist die charakteristische Korngröße wobei 90% Gewichtsanteil des Sediments feiner ist.

Für steile Gefälle entwickelte Rickenmann (1990) eine Formel zur Berechnung des Geschiebetransports:

$$q_b = 12.6 \left( \frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} (q - q_c) S^{2.0} (s - 1)^{-1.6} \quad (2)$$

mit

$$q_c = 0.065(s - 1)^{1.67} g^{0.5} d_{50}^{1.5} S^{-1.12} \quad (3)$$



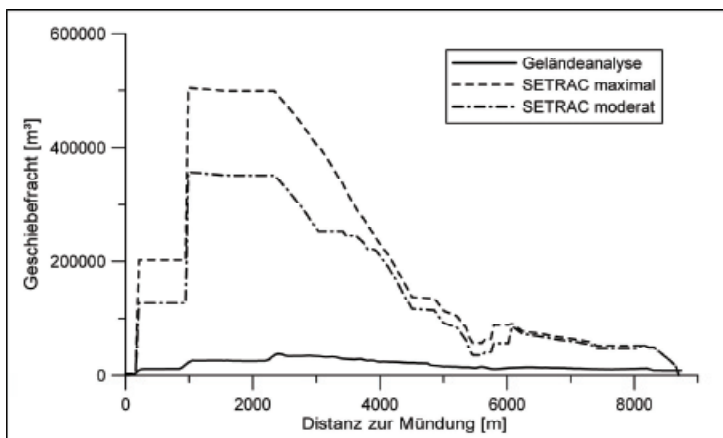
wobei  $q_b$  die spezifische Geschiebetransportrate,  $q$  der spezifische Abfluss und  $q_c$  der kritische spezifische Abfluss bei Transportbeginn ist. Der  $d_{30}$  bzw.  $d_{50}$  sind die charakteristischen Korngrößen wobei 30% bzw. 50% Gewichtsanteil des Sediments feiner ist. Mit  $s$  wird das Verhältnis zwischen Feststoff- und Fluidichte bezeichnet. Um Formverluste berechnen zu können wird der Anteil der Kornrauigkeit an der Gesamtrauigkeit als Funktion des Gefälles und der relativen Abflusstiefe ausgedrückt (Rickenmann 2005).

$$\frac{n_r}{n_{tot}} = 0.083S^{-0.35} \left( \frac{h}{d_{90}} \right)^{0.33} \quad (4)$$

wobei  $n_r$  der Manning Beiwert bezogen auf die Kornrauigkeit und  $n_{tot}$  der Manning Beiwert für die Gesamtrauigkeit ist. Der Anteil des Energieliniengefälles bezogen auf die Kornrauigkeit  $S_{red}$  kann wie folgt berechnet werden (Rickenmann et al. 2006):

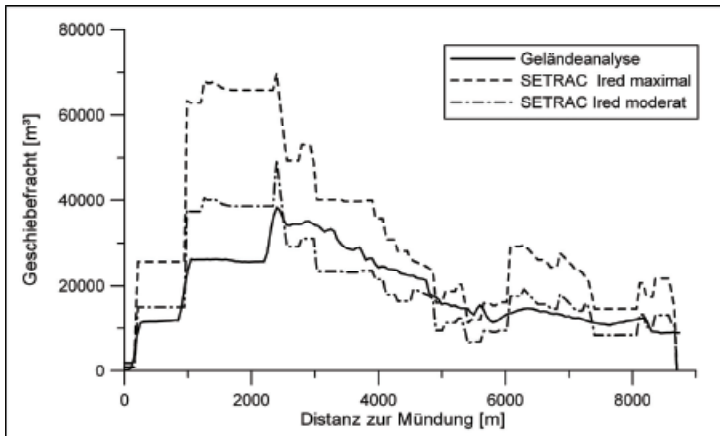
$$S_{red} = S \left( \frac{n_r}{n_{tot}} \right)^a \quad \text{mit } 1 \leq a \leq 2 \quad (5)$$

Ein Vergleich zwischen den einzelnen Simulationen und der rekonstruierten Geschiebefracht ist in den Abb. 9 und Abb. 10 dargestellt. Abb. 9 zeigt die Simulationsergebnisse für das moderate und das Maximalszenario. Trotz Limitierung der Geschiebeverfügbarkeit entsprechend der Feldaufnahmen, wird der Transport beim Maximalszenario um den Faktor 10 überschätzt. Auch das moderate Szenario resultiert in einem zu hohen Transport. Die gleichen Simulationen sind auch mit Berücksichtigung von Formverlusten nach Gleichung 4 gerechnet worden und die Ergebnisse in Abb. 10 dargestellt. Der Exponent  $a$  in der Gleichung 5 wurde 1 gesetzt.



**Abb. 9:** Vergleich der rekonstruierten Geschiebefracht mit SETRAC Simulationen mit moderater und maximaler Ganglinie ohne Berücksichtigung von Formverlusten

**Fig. 9:** Comparison of the reconstructed bedload volume with SETRAC Simulations for the moderate and maximum hydrograph scenario without consideration of form roughness losses



**Abb. 10:** Vergleich der rekonstruierten Geschiebefracht mit SETRAC Simulationen mit moderater und maximaler Ganglinie mit Berücksichtigung von Formverlusten

**Fig. 10:** Comparison of the reconstructed bedload volume with SETRAC Simulations for the moderate and maximum flow scenario with consideration of form roughness losses

## DISKUSSION

Die eindimensionalen Simulationen des Geschiebetransports zeigen eine deutliche Überschätzung der effektiv beobachteten Geschiebefracht während des Hochwasserereignisses von August 2005 für den Suggadinbach. In kleineren, steilen Einzugsgebieten kann durch die Anwendung von im Labor hergeleiteten Geschiebetransportformeln der tatsächliche Transport um bis zu drei Größenordnungen überschätzt werden (Rickenmann 2001). Das Gerinnegefälle im Suggadinbach liegt im Bereich von etwa 4% bis 14 % (Abb. 7). SETRAC wurde auch in steileren Wildbacheinzugsgebieten angewandt und es zeigt sich ein ähnliches Verhalten. Beim durchschnittlich 25% steilen Seßlabach (Tirol) kann der beobachtete Geschiebetransport auch nur mit der Berücksichtigung von Formverlusten nachgebildet werden (Rickenmann et al. 2006). Ein sehr ähnliches Verhalten zeigen die Simulationen für den durchschnittlich 24% steilen Schnannerbach (Tirol) (Chiari und Rickenmann 2007). Bei den Augusthochwässern in der Schweiz wurden für Gerinnegefälle größer als etwa 5% auch deutlich geringere Geschiebefrachten beobachtet, als sie mit einfachen Geschiebetransport Formeln berechnet werden (Rickenmann et al. 2008). Auch Rathburn & Wohl (2001) und Palt (2001) berichten von Überschätzungen der effektiv transportierten Geschiebefrachten. Neben Sedimentlimitierung kann diese Tatsache auch teilweise durch Formverluste erklärt werden. Die Rauigkeit eines unregelmäßigen Gerinnebetts kann nicht hinreichend durch eine Perzentile einer Kornverteilung beschrieben werden (Aberle & Smart 2003).

Andere Autoren berichten über den Beitrag von Becken – Absturz Sequenzen zur Gesamtrauhigkeit (z. B. Lee and Ferguson 2002, Wohl and Thompson 2000). Die Arbeit von Zimmermann und Church (2001) lässt schließen, dass möglicherweise nur das Energieliniengefälle innerhalb der Becken für den Geschiebetransport zur Verfügung steht.

## SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die Simulationen des Augusthochwassers 2005 bestätigen die Eignung von SETRAC für die Geschiebetransport-Modellierung bei steilen Gefällen. Jedoch zeigen die Simulationsergebnisse, dass neben der limitierten Geschiebeverfügbarkeit der Einfluss von Formverlusten bei der Anwendung von eindimensionalen Geschiebetransport-Modellen nicht vernachlässigbar ist. Durch eine reine Geschiebelimitierung in den einzelnen Gerinneabschnitten kann der zeitliche Verlauf des Geschiebetransports nicht richtig abgebildet werden, da die Geschiebespeicher schon mit der steigenden Hochwasserwelle entleert werden. Die Verwendung des totalen Energieliniengefälles führt zu einer Überschätzung der Transportkapazität in natürlichen Gerinnen. Durch die Einführung eines reduzierten Energieliniengefälles zur Berücksichtigung der durch Formrauigkeit verursachten Verluste, kann der beobachtete Transport viel besser nachgebildet werden. Um mehr Erfahrung im Bereich der Geschiebetransport-Modellierung zu sammeln wird SETRAC in weiteren Einzugsgebieten in Österreich, der Schweiz und Frankreich zur Rückrechnung von extremen Ereignissen angewandt.

## FORMELZEICHEN

- a* variabler Exponent
- d*<sub>30</sub> charakteristische Korngröße, wobei 30% Gewichtsanteil des Sediments feiner ist (m)
- d*<sub>50</sub> charakteristische Korngröße, wobei 50% Gewichtsanteil des Sediments feiner ist (m)
- d*<sub>90</sub> charakteristische Korngröße, wobei 90% Gewichtsanteil des Sediments feiner ist (m)
- g* Erdbeschleunigung (m/s<sup>2</sup>)
- h* Abflusstiefe (m)
- n*<sub>tot</sub> Manning Beiwert für die Gesamtrauhigkeit (s/m<sup>1/3</sup>)
- n*<sub>r</sub> Manning Beiwert bezogen auf die Kornrauigkeit (s/m<sup>1/3</sup>)
- q* spezifischer Abfluss (m<sup>3</sup>/sm)
- q*<sub>b</sub> spezifische Feststofftransportrate (m<sup>3</sup>/sm)
- q*<sub>c</sub> kritischer spezifischer Abfluss beim Transportbeginn (m<sup>3</sup>/sm)
- S* Energieliniengefälle
- S*<sub>red</sub> Anteil des Energieliniengefälles bezogen auf die Kornrauigkeit
- s* Verhältnis zwischen Feststoff- und Fluidsdichte
- v* Fließgeschwindigkeit (m/s)

## LITERATUR

- Aberle, J. & Smart, G.M. (2003): The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. *J. Hydraul. Res.*, 41(3); pp. 259–269.
- Chiari, M., Rickenmann, D. (2007): The influence of form roughness on modelling of sediment transport at steep slopes. In: Kostadinov, St., Bruk, St., Walling, D. (Hrsg.), *International Conference, Making 100 years of experience with erosion and torrent control in Serbia, Conference Proceedings on CD, Erosion and torrent control as a factor in sustainable river basin management*, 25.-28. September 2007, Belgrad.
- Lee, A. J. and Ferguson R. I. (2002): Velocity and flow resistance in step-pool streams, *Geomorphology*, Vol 46; pp.59-71.
- Palt, S. (2001): Sedimenttransporte im Himalaya-Karakorum und ihre Bedeutung für Wasserkraftanlagen. Mitteilung 209 des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe.

- Papanicolaou, A. N., Bdour, A., Wicklein, E. (2004): One-dimensional hydrodynamic/sediment transport model applicable to steep mountain streams, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 4, 357-375
- Rathburn, S.L. and Wohl, E.E. (2001): One-dimensional sediment transport modeling of pool recovery along a mountain channel after a reservoir sediment release. *Regulated Rivers: Research & Management*, 17(3): 251-273.
- Rickenmann, D. 1990: Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. *Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zurich, Mitteilung Nr. 103.*
- Rickenmann, D. (1991): Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering* 117(11): 1419-1439.
- Rickenmann, D. (1996): Fließgeschwindigkeit in Wildbächen Gebirgsflüssen. *Wasser, Energie, Luft* 88(11/12): 298-304.
- Rickenmann, D. (2001): Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 12; pp. 3295-3305.
- Rickenmann, D. (2005): Geschiebetransport bei steilen Gefällen. *Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Mitteilung Nr. 190, 107-119.*
- Rickenmann, D., Chiari, M., Friedl, K. 2006 (2006): SETRAC – A sediment routing model for steep torrent channels. In: Ferreira, R.M.L., Alves, E., Leal, J., Cardoso, A. (Eds.), *River Flow 2006, proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, Lisbon, Portugal, 6-8 September 2006, Taylor & Francis, London, Volume 1, 843-852; ISBN: 0-415-40815-6.
- Rickenmann, D. Hunzinger, L. Koschni, A. (2008): Hochwasser und Sedimenttransport während des Unwetters vom August 2005 in der Schweiz, In: *Interpraevent: Tagungsband Internationales Symposium Interpraevent, 2008, Dornbirn*
- Smart, G.M. and Jäggi, M.N.R. (1983): Sedimenttransport in steilen Gerinnen. *Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zurich, Mitteilung Nr. 64.*
- Wohl, E. E., and Thompson D. M. (2000): Velocity characteristics along a small step-pool channel, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.25, pp. 353-367.
- Zimmermann, A. and Church M. (2001): Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step-pool channel, *Geomorphology*, Vol. 40, pp. 311-327.