

Modellierung von Murgängen und Sedimenttransport in Wildbächen



Prof. Dr. Dieter Rickenmann
dieter.rickenmann@boku.ac.at

Universität für Bodenkultur
Department für Bautechnik und Naturgefahren
Institut für Alpine Naturgefahren
Peter Jordan-Straße 82
1190 Wien
Tel.: +43-1-47654-4351; Fax: +43-1-47654-4390

und Eidg. Forschungsanstalt WSL
Gebirgshydrologie und Wildbäche
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
rickenmann@wsl.ch.

Der Beitrag gibt einen Überblick über einige wichtige Aspekte, welche bei der Modellierung (Beschreibung) und Gefahrenbeurteilung von Sediment-Transfer Prozessen in Wildbächen von Bedeutung sind. Behandelt werden fluviabler Geschiebetransport in steilen Gerinnen und Murgänge, wobei auch auf den Übergangsbereich zwischen den beiden Prozessen hingewiesen wird.

Im Hinblick auf die Gefahrenbeurteilung sind – wie auch bei anderen gravitativen Naturgefahren – vor allem zwei Hauptaspekte zu untersuchen: Die Frage des Auftretens und der Ereignisgrösse (Magnitude-Frequenz Beziehung) sowie die Abschätzung des Fliess- und Ablagerungsverhaltens. In diesem Beitrag werden primär Aspekte des Auftretens, der transportierten Geschiebemengen sowie des Verlagerungsverhaltens dieser potentiell gefährlichen Sediment-Transfer Prozesse in Wildbächen diskutiert.

1 Geschiebetransport in Wildbächen und Flüssen

Beobachtungen zum Geschiebetransport in Laborversuchen zeigen grundsätzlich ein ähnliches Verhalten bei flacheren und steileren Gefällen (Rickenmann, 1991, 2001). Betrachtet man den Geschiebetransport in Gebirgsflüssen und in Wildbächen, so führen bei den steilen Gerinnen vor allem zwei Aspekte häufig zu vergleichsweise geringeren Transportraten: Beschränkte Sedimentverfügbarkeit und hohe Formverluste beim Fliesswiderstand wegen der unregelmässigen Gerinneformen. Der Vergleich von Geschiebetransportformeln, die meist auf Laborversuchen basieren, mit Messungen in der Natur ergibt grundsätzlich eine nur mässig gute Übereinstimmung (Gomez & Church, 1989). Bei Gerinnegefällen steiler als etwa 20% können die Geschiebetransportraten stark ansteigen und ähnlich hohe Sediment-Konzentrationen wie bei Murgängen erreicht werden (Smart & Jäggi, 1983; Takahashi, 1991; Tognacca, 1999; Rickenmann, 2005a).

Für die Geschiebetransportrate Q_b und den Abfluss Q über die ganze Gerinnebreite kann folgende einfache Beziehung angegeben werden (Rickenmann, 2001):

$$Q_b = A (Q - Q_c) S^{1.5} \quad (1)$$

Dabei ist A ein empirischer Koeffizient, Q_c der kritische Abfluss bei Transportbeginn und S das Gerinnegefälle.

Für einige Naturdaten zum Geschiebetransport sind nur Geschiebefrachten für ganze Hochwasserereignisse bekannt, so dass für einen Vergleich zwischen Beobachtung und Berechnung (1) über die Hochwasserdauer integriert werden muss. Eine Untersuchung mit Naturdaten sowie den Laborversuchen der ETH Zürich zeigt einerseits eine grosse Streuung der Daten und andererseits, dass vor allem in kleineren Gerinnen bei relativ kleinen Abflusstiefen die beobachteten Geschiebefrachten deutlich geringer sind als nach der Berechnung mit (1) oder mit der integrierten Form (Rickenmann, 2001). Die Hauptgründe für die grosse Streuung insbesondere der Naturdaten dürften einerseits in der beschränkten Geschiebeverfügbarkeit und andererseits in nicht berücksichtigten Formverlusten für den Fliesswiderstand liegen, welche aufgrund fehlender hydraulischer Daten nicht quantifiziert werden können. Diese beiden Faktoren sind vor allem bei Wildbachgerinnen mit steileren Gefällen von Bedeutung.

Basierend auf Naturmessungen an Gebirgsflüssen im Himalaya entwickelte Palt (2001) einen Ansatz zur vereinfachten Berücksichtigung der Formverluste. In Analogie dazu wurde für Wildbäche ein ähnlicher Ansatz vorgeschlagen (Rickenmann, 2005a; Rickenmann et al., 2006):

$$n_r/n_{tot} = 0.083 (h/d_{90})^{0.33} / S^{0.35} \quad (2)$$

Dabei ist n_r der Manning-Koeffizient bezogen auf die Kornrauigkeit des Sohlenmaterials, n_{tot} bezieht sich auf den gesamten Fliesswiderstand, h ist die Abflusstiefe und d_{90} ist die charakteristische Korngrösse des Bettmaterials, für welche 90% der Körner kleiner sind. Das Verhältnis

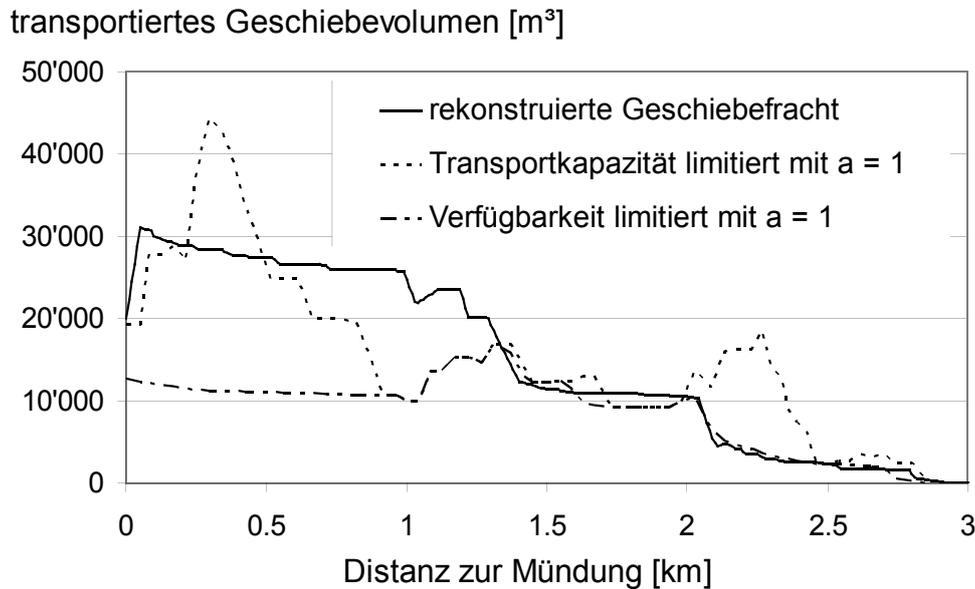


Bild 1: Beispiel einer Berechnung des Geschiebetransportes mit dem Simulationsmodell SETRAC. Vergleich von beobachteten und simulierten Geschiebefrachten entlang des Gerinnes des Sesslabaches in Tirol (Österreich) für das Hochwasser vom 22./23. August 2005.

n_r/n_{tot} stellt den relativen Anteil des Fließwiderstandes dar, welcher als Kornreibung für den Geschiebetransport zur Verfügung steht.

In Kombination mit (2) lässt sich ein reduziertes Energieliniengefälle S_{red} für den Geschiebetransport wie folgt ausdrücken

$$S_{red} = S [n_r/n_{tot}]^a \quad (3)$$

Gemäß der Fließformel von Manning-Strickler ist das Energieliniengefälle proportional zum Manning n Wert im Quadrat, d.h. $a = 2$. Für die Naturmessungen der Geschiebetransportdaten in Rickenmann (2001) führt das vorgeschlagene Verfahren zu einer besseren generellen Übereinstimmung der Naturdaten mit der einfachen Geschiebetransportformel (Rickenmann, 2005a). Für einige Datensätze ergibt sich dann allerdings eine deutliche Überschätzung der Geschiebetransportkapazität, was auf Grenzen dieses vereinfachten, pauschalen Korrektur-Verfahrens hinweist. Neben dem zusätzlichen Fließwiderstand durch Formverluste ist bei größeren Abflussintensitäten auch mit erhöhtem Fließwiderstand infolge intensiven Geschiebetransportes zu rechnen (Song et al., 1998; Recking, 2006); dieser Anteil ist jedoch für praktische Anwendungen bisher noch nicht berücksichtigt worden.

Speziell für steile Gerinne wurden bisher nur wenige Simulationsmodelle entwickelt, wie z. B. SHESED (Wicks & Bathurst, 1996), ETC (Mathys et al., 2003), SETRAC (Rickenmann et al., 2006) und PROMAB (Rinderer et al., 2007). Diese Modelle sind grundsätzlich ähnlich wie für Gebirgsflüsse entwickelte numerische Sedimenttransportmodelle, wie z. B. MORMO (Schilling & Hunziker, 1995) und BASEMENT (Vetsch et al., 2005).

Für ein Wildbachereignis vom August 2005 im Sesslabach in Österreich (Tirol) wurde mit dem Modell SETRAC eine Simulation durchgeführt (Rickenmann et al., 2006). Im Modell SETRAC sind verschiedene Ansätze zur Berechnung des Fließwiderstandes und Geschiebetransportes implementiert; für die Simulation im Sesslabach

wurden ähnliche Ansätze verwendet wie die hier vorgestellten. Bild 1 zeigt einen Vergleich von beobachteten und simulierten Geschiebefrachten entlang des Gerinnes. Der Sesslabach hat eine Einzugsgebietsfläche von 9.9 km² und ein mittleres Gerinnegefälle von 25%, das Kegelgefälle beträgt 18%. Ungefähr 32 000 m³ Geschiebe wurde zum Kegel transportiert. Das simulierte Hochwasserereignis dauerte 24 Stunden, und der Spitzenabfluss betrug etwa 25 m³/s am Kegelhals. Es wurde ein Fall mit beschränkter Geschiebeverfügbarkeit und ein Fall mit Limitierung gemäß Transportkapazität berechnet. Dabei zeigten die Simulationen die beste Übereinstimmung mit den beobachteten Geschiebefrachten für einen Exponenten $a = 1.0$ in Gl. (3).

2 Übergangsbereich zwischen Sedimenttransport und Murgängen

In natürlichen Gerinnen mit Gefällen steiler als etwa 10% gibt es nur wenige Messungen zum Geschiebetransport. Bei Gefällen steiler als etwa 20% bis 25% ist ein wassergesättigtes Bachbett schon nahe an der Grenze zur Instabilität und zur Auslösung von Murgängen aus dem Gerinnebett heraus (Takahashi, 1991), wie auch einige Laborversuche von Smart & Jäggi (1983) zeigten.

In den Alpen sammeln sich an der Front des Murganges häufig grobe Blöcke an. Im hinteren Bereich eines Murganges sind die Feststoffkonzentrationen meist geringer als im vorderen Teil. Die Verhältnisse sind dann ähnlich wie bei murgangartigem Abfluss im Übergangsbereich (englische Begriffe dazu sind „debris flood“, „immature“ debris flow, „hyperconcentrated flow“) oder wie bei intensivem fluvialen Geschiebetransport.

Eine einfache Analyse der Hangstabilität führt zu einer theoretischen Grenzneigung von etwa 21% bis 30% für typische Verhältnisse im Gerinnebett (Reibungswinkel des Materials von 33° to 37°) (Takahashi, 1987). In Wildbachgerinnen ist (wie auch in Flüssen) ein minimaler Abfluss nötig (Grenzabfluss in Bild 2), damit Geschiebe

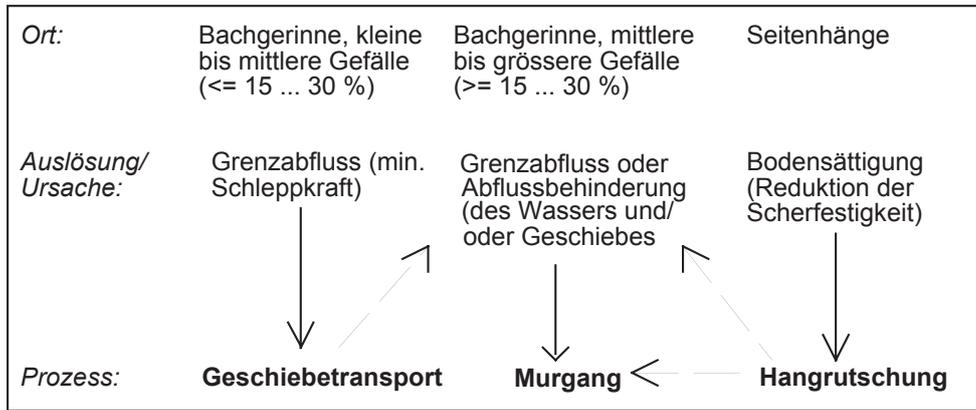


Bild 2: Wesentliche Geschiebelieferungsprozesse in Wildbächen und die Rolle bei der Bildung von Murgängen.

transportiert wird. Die kombinierte Belastung der Sohle durch Abfluss und bewegtes Geschiebe kann bei genügend großen Gefällen ausreichen, damit genügend Feststoffe plötzlich in Bewegung kommen und sich ein Murgang bildet. Analog wie für den Grenzabfluss bei Beginn des fluvialen Geschiebetransportes, kann ein kritischer dimensionsloser Grenzabfluss q^* für die Bildung von Murgängen definiert werden:

$$q^* = q_c / [g^{0.5} d^{1.5}] = B / S^\diamond \quad (4)$$

Dabei ist q_c der kritische spezifische Abfluss pro Meter Gerinnebreite, d eine charakteristische Korngröße des Bachbettmaterials, $S = \sin \beta$ das Gerinnegefälle (mit β = Gerinneneigung), g die Erdbeschleunigung, B ein empirischer Koeffizient, \diamond ein semi-empirischer Exponent.

In Bild 3 sind einige Beziehungen zur Bestimmung des Grenzabflusses für Geschiebetransport und Murgänge dargestellt. Die Gleichungen von *Whittaker & Jaeggi* (1986) sowie *Tognacca et al.* (2000) basieren nur auf Laborversuchen, während die Form der Gleichung von *Bathurst et al.* (1987) auch von Felddaten bestätigt wird. Bild 3 zeigt auch eine Grenzbedingung für den Beginn von „immature debris flows“ nach *Takahashi* (1987); diese Beziehung basiert ebenfalls auf Laborversuchen. Die Abbildung zeigt eine grosse Bandbreite möglicher Grenzabflüsse für Murgänge, welche noch mit Naturdaten zu verifizieren sind.

In *Rickenmann* (2005a) wurden einige Formeln zur Abschätzung der Geschiebe- oder Sedimentkonzentration bei steilen Gefällen mit Daten von einmaligen Feldversu-

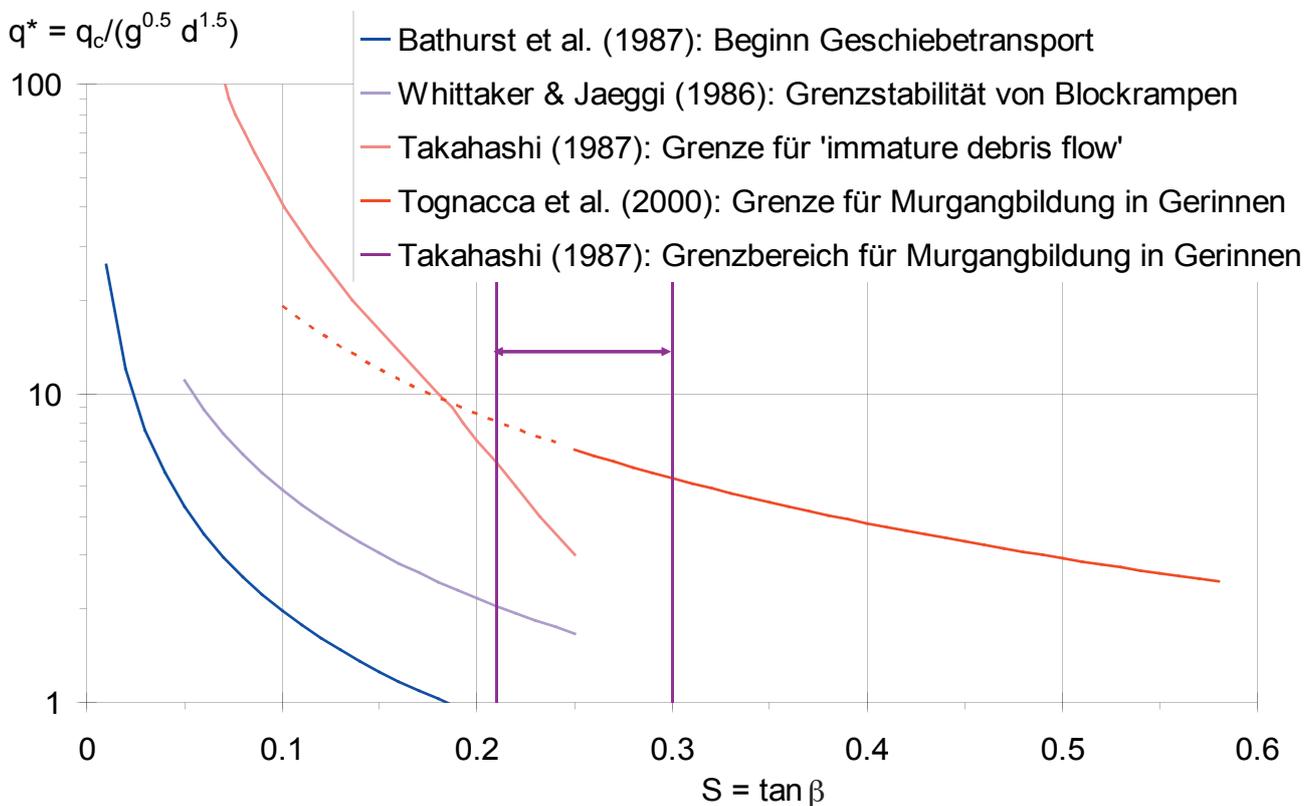


Bild 3: Dimensionsloser kritischer Abfluss (pro Einheitsbreite) für den Beginn von fluvialen Geschiebetransport und die Bildung von Murgängen.

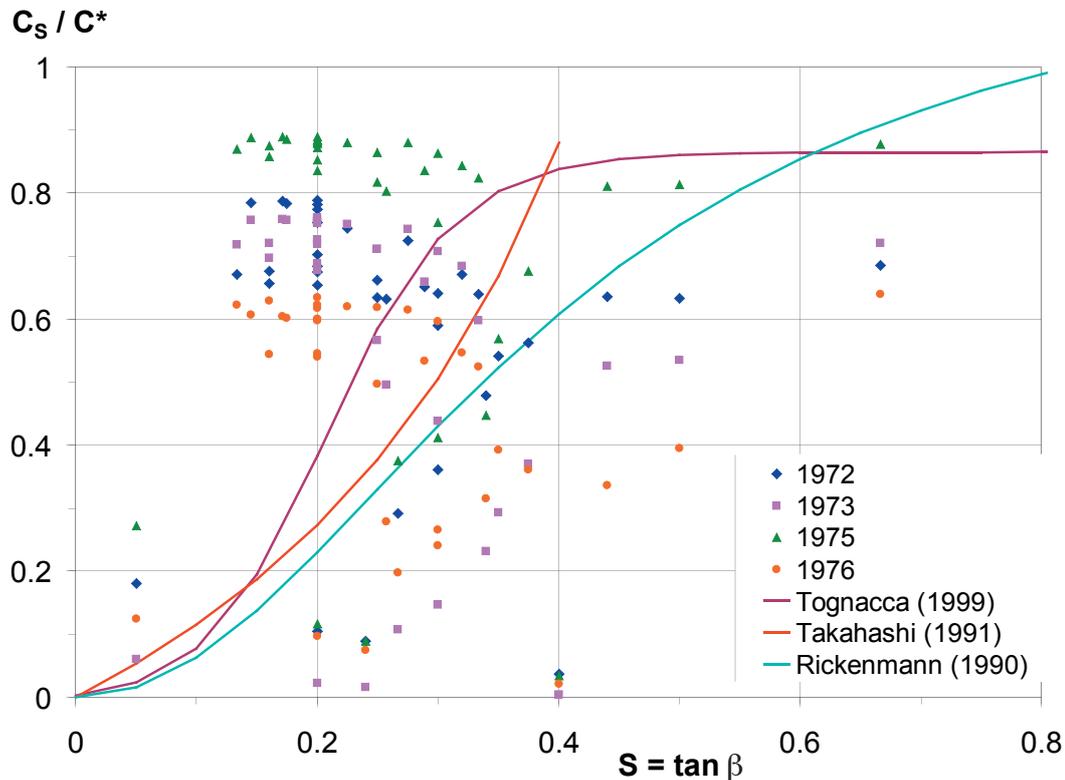


Bild 4: Volumetrische Sedimentkonzentration C_s in Abhängigkeit des Gerinnegefälles S : Vergleich von Daten von vier Murgangversuchen in Kasachstan (1972–1976) mit Gleichungen für den Geschiebetransport bei steilen Gefällen und für Murgänge. Die Werte von C_s sind mit der maximalen Packungskonzentration C^* normiert.

chen zur Murgangentstehung in Kasachstan (Rickenmann et al., 2003) verglichen. Bei diesen Versuchen aus den 1970er Jahren wurden künstliche Hochwasserwellen erzeugt, welche in einem durchschnittlich 30% steilen und rund 700 m langen Gerinneabschnitt in Moränematerial zu rascher Sohlen- und Seitenerosion führten. Querprofilvermessungen entlang des Gerinnes erlaubten die Berechnung der mittleren Sedimentkonzentrationen pro Versuch und pro Teilabschnitt mit konstantem Gefälle (Rickenmann et al., 2003).

Der Vergleich verschiedener Ansätze mit den Feldmessungen ist in Bild 4 gezeigt. Bei der Beziehung von Rickenmann (1990) handelt es sich um die Extrapolation einer empirischen Funktion zur Beschreibung des Geschiebetransportes bei steilen Gefällen. Der Ansatz von Tognacca (1999) beruht auf Laborversuchen an der ETHZ zur Murgangentstehung mit Gerinnegefällen von $0.25 \leq S \leq 0.70$, und in der Auswertung wurden auch Geschiebetransportversuche für den Gefällsbereich von $0.03 \leq S \leq 0.20$ miteinbezogen. Bei der Funktion von Takahashi (1991) wurde aufgrund von theoretischen Überlegungen und Laborversuchen die sogenannte Gleichgewichts-Sedimentkonzentration von Murgängen bestimmt.

Bei den Daten der Feldversuche in Kasachstan handelt es sich um abschnittsweise Werte von Feststoffkonzentrationen. Die beobachtete Sedimentkonzentration C_s repräsentiert einen Mittelwert über die Versuchsdauer und beinhaltet die Summe der Feststoffe und des Wassers, welche in einen Gerinneabschnitt mit gegebener Sohlenneigung gelangten.

Die Gleichungen von Rickenmann (1990) und Takahashi (1991) sind in Bild 4 auf steilere Gefälle angewendet

als bei der Herleitung verwendet wurde. Die Daten der Feldversuche zeigen eine grosse Streuung von C_s für ein gegebenes Gefälle. Ein Teil dieser Streuung hängt möglicherweise mit den relativ kurzen Gerinneabschnitten zusammen, welche die Ausbildung von „Gleichgewichts“-Bedingungen erschwerten. Als wichtiger Einflussfaktor sind zudem unterschiedliche Erosionswiderstände der Gerinneabschnitte in den hier gezeigten einfachen Ansätzen nicht berücksichtigt.

3 Murgänge

Die Auslösung von Murgängen kann in Form von Hangrutschungen oder von Gerinnedestabilisierung erfolgen. Für die Bildung eines Murganges aus dem Gerinnebett oder aus einem Hang heraus beträgt das Mindestgefälle ca. 25%–30%. Bei Vorhandensein weiterer, die Murgangentstehung fördernder Faktoren (z. B. Engstellen, Wildholz) kann sich ein Murgang aber auch bei Gefällen von ca. 15%–25% bilden (s. auch Bild 2). Bezüglich der massiven Gerinneerosion oder -destabilisierung gibt es Ansätze über den Grenzabfluss (analog zum Beginn des Geschiebetransportes) aus Laboruntersuchungen sowie einfache theoretische Abschätzungen (s. Abschnitt „Übergangsbereich“ und Bild 3). Beide Methoden liefern aber nur grobe Schätzwerte des Grenzabflusses bei der Auslösung von Murgängen, da die Eigenschaften des groben Bachschuttmaterials nicht berücksichtigt sind.

Bei der Auslösung ist nicht nur der Oberflächenabfluss und damit die Regenintensität von Bedeutung, sondern auch das Ausmass der Bodensättigung durch längeranhaltende Niederschläge, was zur Bildung von

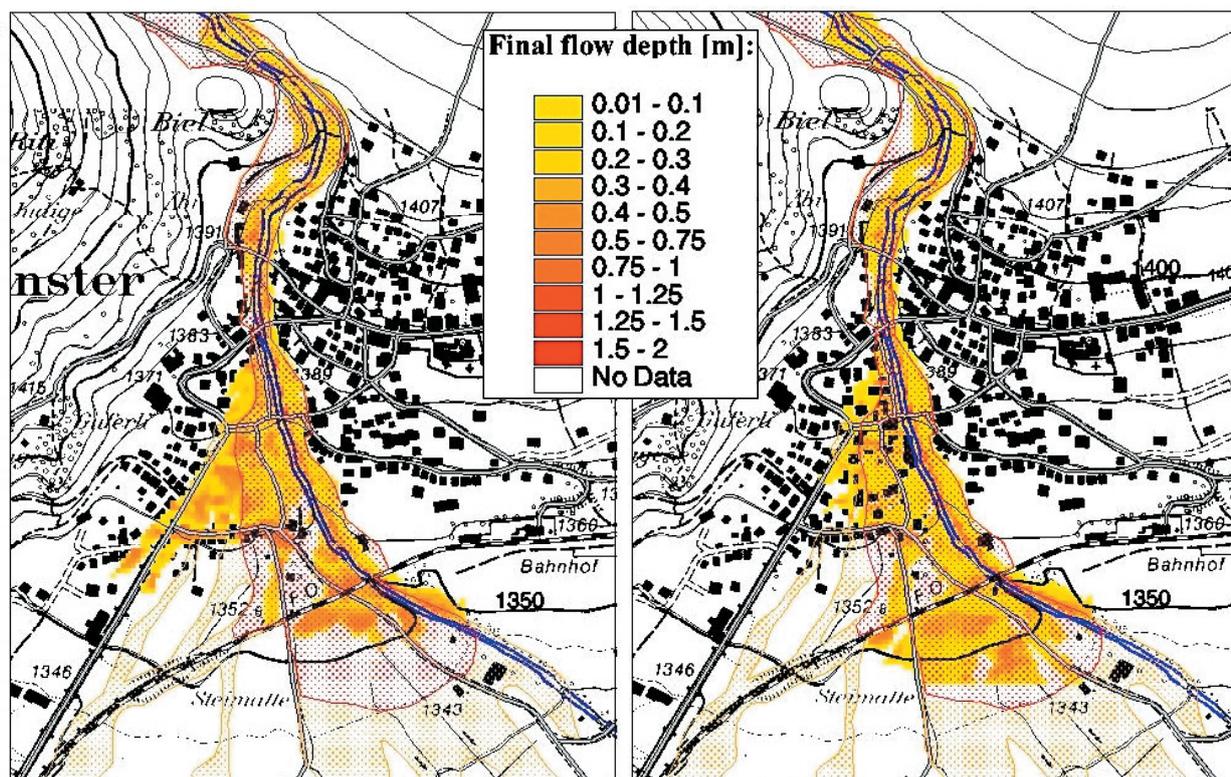


Bild 5: Simulation der Murgangablagerungen vom 24. August 1987 auf dem Kegel des Minstigerbaches (Schweiz) mit dem Programm FLO-2D. Die dunkelrot punktierte Fläche entspricht den Murgangablagerungen. Beim rechten Bild sind die Häuser in der Simulation berücksichtigt, beim linken Bild nicht. Für die beiden Fälle wurde mit dem gleichen pseudo-Manning Wert, aber unterschiedlichen Bingham-Parametern gerechnet.

Hangrutschungen führen kann. So muss zum Beispiel bei Gewitterniederschlägen in der Schweiz gleichzeitig eine minimale Auslöseintensität von rund 30 mm/h und eine minimale Niederschlagssumme von rund 40 mm erreicht sein, dass es zur Bildung von Murgängen kommt (Zimmermann et al., 1997). Bedingungen für kritische Niederschlagsverhältnisse werden häufig in Form der mittleren Niederschlagsintensität i [mm/h] und der Dauer D [h] des auslösenden Niederschlagsereignisses dargestellt. Diese Grenzbedingungen können regional oder lokal stark variieren.

Zur Beurteilung des Fliess- und Ablagerungsverhalten können entweder empirische Ansätze und Schätzformeln (Rickenmann, 1999, 2005b; Jakob, 2005) oder numerische Simulationsmodelle eingesetzt werden (Rickenmann et al., 2006). Grundsätzlich gilt es abzuschätzen, wo kritische Stellen mit der Möglichkeit eines Gerinneausbruches vorhanden sind und welche Gebiete des Kegels dann überflossen werden können.

Das Erosionsverhalten entlang der Transitstrecke ist noch wenig verstanden; neben einfachen Modellvorstellungen in Anlehnung an die Bodenmechanik wird auch auf empirische Ansätze aus dem Geschiebetransport zurückgegriffen (Rickenmann et al., 2003). Bei der Schätzung der Murenfracht anhand von geomorphologischen Methoden sollten auch mögliche Feststoffeinträge aus der Transitstrecke berücksichtigt werden (Hungr et al., 2005).

Für eine einfache Abgrenzung von potentiell gefährdeten Gebieten auf der Stufe Gefahrenhinweiskarte werden in jüngerer Zeit häufig GIS basierte Modelle mit relativ einfachen Ansätzen zur Beschreibung der Murgangver-

lagerung angewendet. Ein Beispiel dazu ist der Ansatz von Zimmermann et al. (1997) sowie Gamma (2000). Dabei wird zur Abschätzung der Fließgeschwindigkeit und der Reichweite ein Massenpunktmodell für das Fließverhalten eines Voellmy Fluides verwendet, und die zwei „Reibungsparameter“ müssen aufgrund von früheren Ereignissen „geeicht“ werden (Rickenmann, 2005b).

Zur Beschreibung des Material- bzw. Fließverhaltens existieren verschiedene empirische und theoretische Ansätze, welche auch in numerischen Simulationsmodellen implementiert sind. Dabei besteht ein Hauptproblem darin, dass es keine klaren Kriterien gibt, welche Ansätze auf welche Murgangtypen in der Natur am besten angewendet werden sollen. Immerhin kann bei den empirischen Ansätzen für den Maximalabfluss (in Abhängigkeit der Murenfracht) und die Fließgeschwindigkeit (in Abhängigkeit der Abflusstiefe, des Gefälles und eines Reibungsparameters) ein grober Unterschied zwischen granularen und schlammstromartigen Murgängen gemacht werden (Rickenmann, 1999; Rickenmann & Weber, 2000; Ikeda & Hara, 2003).

Bei einer Gruppe von Simulationsmodellen wird das Murganggemisch in erster Näherung als homogene Flüssigkeit betrachtet und zum Beispiel ein viskoplastisches Fließverhalten postuliert (Ancey, 2006). Dabei können die rheologischen Parameter nur für das feinere Material des Murganges anhand von Labormessungen für verschiedene Wasseranteile bestimmt werden. Der Einfluss der größeren Komponenten auf die Rheologie ist schwierig zu quantifizieren. Im Falle der Ablagerung kommt das ganze Gemisch zum Stoppen. Ein bekanntes Simulations-

programm ist FLO-2D (O'Brien et al., 1993), welches auf einem gemischten Ansatz einer Bingham'schen Flüssigkeit und dispersiver bzw. turbulenter Reibungsterme basiert. Bei der Anwendung dieses und auch anderer Simulationsmodelle zeigt sich generell, dass eine genaue Berücksichtigung der Geländetopographie eine grosse Bedeutung hat (Rickenmann et al., 2006), wie beispielhaft auch Bild 5 illustriert.

Bei einer anderen Gruppe von Simulationsmodellen werden die zwei Phasen Wasser und Feststoffe separat betrachtet, wobei die Erosion von Feststoffen mit einfachen Ansätzen berücksichtigt wird und die Ablagerung von Feststoffen nach Ansätzen aus dem Sedimenttransport erfolgt (z. B. Nakagawa et al., 2000). Ein neuerer Modellansatz berücksichtigt Porenwasserdrücke und andere bodenmechanische Aspekte (Iverson & Denlinger, 2001). Dabei werden die zwei Phasen Feststoffe und Flüssigkeit über die Mischungstheorie gekoppelt. Zur Anwendung dieses Modells auf natürliche Murgangereignisse ist noch wenig bekannt.

Eine wichtige Einschränkung bezüglich der Simulationsmodelle ist, dass die meisten nicht systematisch anhand von Naturereignissen getestet wurden. Bisher wurden in der Praxis eher solche Modelle eingesetzt, welche eine gewisse Ähnlichkeit zu „hydraulischen“ Simulationsmodellen aufweisen. Zumindest bei höheren Fließgeschwindigkeiten im Gerinne scheinen Fließgesetze mit einem „turbulenten“ Reibungsterm, wie beim Modell FLO-2D oder beim „Voellmy“ Modell, brauchbare Resultate zu liefern. Um zuverlässige Aussagen über das Fließ- und Ablagerungsverhalten machen zu können, sollten die Modell- oder Reibungsparameter möglichst mit früheren Ereignissen „geeicht“ werden. Vergleiche zwischen Naturbeobachtungen und Resultaten aus Simulationsberechnungen mit verschiedenen Modellansätzen sind in Swartz et al. (2004), Rickenmann et al. (2006) und Naef et al. (2006) diskutiert.

4 Fazit

Im Vergleich zum fluvialen Geschiebetransport in Gebirgsflüssen und Kiesbächen mit flacherem Gerinnegefälle zeigen Naturmessungen aus steileren Gerinnen und Wildbächen grundsätzlich eine grössere Streuung und vergleichsweise geringere Transportraten. Eine grobe Berücksichtigung der Formverluste in den steileren Gerinnen führt zu einer besseren Übereinstimmung der berechneten Transportraten in Wildbächen.

Die Untersuchungen zum Geschiebetransport im Labormassstab lassen darauf schliessen, dass ein einheitlicher Ansatz zur Berechnung der Transportraten über den ganzen Gefällebereich angewendet werden kann. Bei Gerinnegefällen steiler als etwas 20% treten in den Laborversuchen bereits hohe Sedimentkonzentrationen auf; eine Extrapolation auf noch steilere Gefälle führt zu ähnlich hohen Transportraten, wie aus Feldversuchen zur Bildung von Murgängen abgeschätzt wurde. Die Anwendung von Geschiebetransportgleichungen bei steileren Gefällen führt zu Sedimentkonzentrationen wie sie im Übergangsbereich zu Murgängen zu erwarten sind.

Zur Simulation des Fließ- und Ablagerungsverhaltens von Murgängen wurden bereits viele Modelle entwickelt. Bei der Anwendung für die Praxis besteht eine

Hauptschwierigkeit darin, massgebende Murgangtypen in der Natur zu unterscheiden, so dass eine klare Zuordnung eines geeigneten Modelltyps möglich ist. Eine weitere wichtige Forderung aus der Sicht der Gefahrenbeurteilung besteht darin, dass die Simulationsmodelle sowohl für Murgänge als auch für den Sedimenttransport viel umfassender anhand von gut dokumentierten Wildbachereignissen getestet werden sollten.

Literatur

- Ancey, C.: Plasticity and geophysical flows: A review. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, in press (online version 2006).
- Bathurst, J.C., Graf, W.H. und Cao, H.H.: Bed load discharge equations for steep mountain rivers. In C.R. Thorne, J.C. Bathurst & R.D. Hey (eds), *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, p. 453–477. New York: Wiley & Sons 1987.
- Gamma, P.: dfwalk – Ein Murgangsimulationprogramm zur Gefahrenzonierung. *Geographica Bernensia*, G66, Geographisches Institut der Universität Bern, 2000, 144p.
- Gomez, B., and Church, M.: An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers. *Water Resources Research* 25 (1989), p. 1161–1186.
- Hungr, O., McDougall, S. und Bovis, M.: Entrainment of material by debris flows. In: M. Jakob & O. Hungr (eds), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*, p. 135–158. Heidelberg: Praxis-Springer 2005.
- Ikeda, A. und Hara, Y.: Flow properties of debris flows on the Kitamata Valley of the Name River, Japan. In D. Rickenmann & C.L. Chen (eds.), *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Proc. 3rd Intl. DFHM Conference*, Davos, Switzerland: 851–862. Rotterdam: Millpress 2003.
- Iverson, R.M. und Denlinger, R.P.: Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain, 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research*, 106 (B1) (2001), p. 537–552.
- Jakob, M.: Debris-flow hazard analysis. In: M. Jakob & O. Hungr (eds), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*, p. 411–443. Heidelberg: Praxis-Springer 2005.
- Mathys, N., Brochot, S., Meunier, M. und Richard, D.: Erosion quantification in the small marly experimental catchments of Draix (Alpes de Haute Provence, France). *Calibration of the ETC rainfall-runoff-erosion model. Catena* 50 (2003), p. 527–548.
- Naef, D., Rickenmann, D., Rutschmann, P. und McArdell, B.W.: Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6 (2006), p. 155–165.
- Nakagawa, H., Takahashi, T. und Satofuka, Y.: A debris-flow disaster on the fan of the Harihara River, Japan. In G.F. Wieczorek & N.D. Naeser (eds), *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, p. 193–201. Rotterdam: Balkema 2000.
- O'Brien, J.S., Julien, P.Y. und Fullerton, W.T.: Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering* 119 (1993), p. 244–261.
- Palt, S.M.: Sedimenttransporte im Himalaya-Karakorum und ihre Bedeutung für Wasserkraftanlagen. *Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH)*. Nr. 209, 2001, 257 p.
- Recking, A.: Etude expérimentale de l'influence du tri granulométrique sur le transport solide par charriage. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA), 2006.
- Rickenmann, D.: Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich*, Nr. 103, 1990, 249p.

- Rickenmann, D.: Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering* 117(11) (1991), p. 1419–1439.
- Rickenmann, D.: Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards* 19 (1999), p. 47–77.
- Rickenmann, D.: Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. *Water Resources Research* 37 (2001), p. 3295–3305.
- Rickenmann, D.: Geschiebetransport bei steilen Gefällen. In: Tagungspublikation zu VAW 75 Jahre, Festkolloquium 7. Oktober 2005, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 190, 2005a, p. 107–119.
- Rickenmann, D.: Runout prediction methods. In: M. Jakob & O. Hungr (eds), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*, p. 263–282. Heidelberg: Praxis-Springer 2005b.
- Rickenmann, D. und Weber, D.: Flow resistance of natural and experimental debris flows in torrent channels. In G.F. Wieczorek & N.D. Naeser (eds.), *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment; Proceedings 2nd International DFHM Conference*, Taipei, Taiwan, August 16-18, 2000: 245–254. Rotterdam: Balkema 2000.
- Rickenmann, D., Chiari, M. und Friedl, K.: SETRAC – A sediment routing model for steep torrent channels. In R. Ferreira, E. Alves, J. Leal & A. Cardoso (eds), *River Flow 2006*, p. 843–852. London: Taylor & Francis 2006.
- Rickenmann, D., Weber, D. und Stepanov, B.: Erosion by debris flows in field and laboratory experiments. In D. Rickenmann & C.L. Chen (eds.), *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Proc. 3rd Intl. DFHM Conference*, Davos, Switzerland: 883–894. Rotterdam: Millpress 2003.
- Rickenmann, D., Laigle, D., McArdell, B.W. und Hübl, J.: Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. *Computational Geosciences*, 10 (2006), p. 241–264, DOI: 10.1007/s10596-005-9021-3.
- Rinderer, M., Jenewein, S., Senfter, S., Rickenmann, D., Schöberl, F., Stötter, J. und Hegg, C.: Runoff and bedload transport modelling for flood hazard assessment in small alpine catchments – the model PROMAB-GIS. In Veulliet E., Stötter J., Weck-Hannemann H. (eds.): *Sustainability in Natural Hazard Management*. Berlin (in press).
- Schilling, M. und Hunziker, R.: Programmpaket MORMO – Grundlagen. In „Mathematische Modelle offener Gerinne“, ÖWAV-Seminar 21. Nov. 1995, Konstruktiver Wasserbau – Landschaftswasserbau, Bd. 17, 1995, S. 91–104.
- Smart, G.M. und Jäggi, M.: Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 64, 1983.
- Song, T., Chiew, Y.M. and Chin, C.O.: Effect of Bed-Load Movement on Flow Friction Factor. *Journal of Hydraulic Engineering* 124 (1998), p. 165–175.
- Swartz, M., McArdell, B., Bartelt, P. und Christen, M.: Evaluation of a two-phase debris flow model using field data from the Swiss Alps. In *Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung* (ed.): *Proceedings Internationales Symposium INTERPRAEVENT*, Riva del Garda, Bd. 1, 2004, p. III/319–III/329.
- Takahashi, T.: High velocity flow in steep erodible channels. In *Proceedings of the 22nd IAHR Congress*, Lausanne, Switzerland, 1987, Techn. Session A, p. 42–53.
- Takahashi, T.: *Debris flow*. IAHR Monograph Series. Rotterdam: Balkema, 1991.
- Tognacca, C.: Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 164, 1999.
- Tognacca, C., Bezzola, G.R. und Minor, H.-E. (2000): Threshold criterion for debris-flow initiation due to channel-bed failure. In G.F. Wieczorek & N.D. Naeser (eds), *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, p. 89–97. Rotterdam: Balkema 2000.
- Vetsch, D., Fäh, R., Fahrli, D. und Müller, R.: BASEMENT – Ein objektorientiertes Softwaresystem zur numerischen Simulation von Naturgefahren. In: Tagungspublikation zu VAW 75 Jahre, Festkolloquium 7. Oktober 2005, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 190, 2005, p. 201–212.
- Whittaker, J. und Jaeggi, M.: Blockschwellen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 91, 1986.
- Wicks, J.M. und Bathurst, J.C.: SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system. *Journal of Hydrology* 175 (1996), p. 213–238.
- Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., Gsteiger, P., Heiniger, O. und Hunziker, G.: Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Schlussbericht NFP 31, vdf-ETH, Zürich, Switzerland, 1997, 161p.