

Heft 9, 2014 WSL Berichte ISSN 2296-3456

Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen

Dieter Rickenmann



Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL CH-8903 Birmensdorf

Illgraben / VS 28- 6-00 3 14:18:17 A

Heft 9, 2014 WSL Berichte ISSN 2296-3456

Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen

Dieter Rickenmann

Herausgeberin Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL CH-8903 Birmensdorf Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe Prof. Dr. Konrad Steffen, Direktor WSL

Verantwortlich für dieses Heft Dr. Manfred Stähli, Leiter Forschungseinheit Gebirgshydrologie und Massenbewegungen

Schriftleitung: Sandra Gurzeler, WSL Layout: Dieter Rickenmann, WSL

Kontakt Eidg. Forschungsanstalt WSL Dr. Dieter Rickemann Zürcherstrasse 111 CH-8903 Birmensdorf E-Mail: dieter.rickenmann@wsl.ch

Zitiervorschlag Rickenmann, D., 2014: Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen. WSL Ber. 9: 105 S.

Bezug WSL-Shop Zürcherstrasse 111 CH-8903 Birmensdorf eshop@wsl.ch www.wsl.ch/shop

PDF Download www.wsl.ch/publikationen/pdf/13549.pdf

ISSN 2296-3456

Fotos Umschlag

Foto 1: Riedbach, Grächen (Kanton Wallis, Schweiz), Gerinne mit 40 % Gefälle und mit fluvialem Geschiebetransport während Schmelzwasser-Abflüssen, D. Rickenmann Foto 2: Gämschbach, Alpthal (Kanton Schwyz, Schweiz), Hochwasser vom 20.6.2007 mit Ablagerungen nach fluvialem Geschiebetransport, C. Rickli Foto 3: Erlenbach, Alpthal (Kanton Schwyz, Schweiz), Hochwasser vom 14.7.1995 (mit Spitzenabfluss von 10 m³/s), F. Forster Foto 4: Illgraben, Leuk-Susten (Kanton Wallis, Schweiz), murgangartiger Transport («debris flood»), vom 28.7.2006, C. Gwerder Foto 5: Illgraben, Leuk-Susten (Kanton Wallis, Schweiz), Front eines granularen Murgangs vom 28.7.2000, Foto aus Video der WSL Beobachtungsstation

<u>Inhalt</u>

A	Abstract		
V	Vorwort		
1	Ein	leitung	7
	1.1	Wildbachprozesse und Gefahrenbeurteilung	7
	1.2	Zum Inhalt der vorliegenden Publikation	8
2	Fli	esswiderstand in Kiesbettflüssen und Wildbächen	9
	2.1	Logarithmische Fliessgesetze	9
	2.2	Empirische Fliessgesetze (Potenzgesetze)	11
	2.3	Variable Power Equation (variables Potenzgesetz)	13
	2.4	Aufteilung des Fliesswiderstandes	16
3	Flu	vialer Geschiebetransport	20
	3.1	Charakterisierung von Wildbächen und Gebirgsflüssen	20
	3.2	Sedimentologische Parameter	22
	3.3	Bestimmung der Kornverteilung und von charakteristischen Korngrössen	23
	3.4	Geschiebetransport in steilen Gerinnen	28
	3.5	Schwemmholz in Wildbächen und Gebirgsflüssen	43
	3.6	Kritische Gerinnequerschnitte und potentielle Ablagerungen	46
	3.7	Numerische Simulationsmodelle	47
4	М	ırgänge	48
	4.1	Eigenschaften von Murgängen	48
	4.2	Wichtige Elemente der Prozess- und Gefahrenbeurteilung	52
	4.3	Auftreten von Murgängen	53
	4.4	Empirische Ansätze zum Fliess- und Ablagerungsverhalten	58
	4.5	Modelle zur Simulation von Murgängen	64
	4.6	Szenarien und Ablagerung im Kegelbereich	70
	4.7	Schlussbemerkungen	72
5	М	ngnitude und Frequenz von Wildbachereignissen	74
	5.1	Empirische Ansätze zur Abschätzung der Ereignisgrösse	75
	5.2	Feldbasierte Abschätzung der Ereignisgrösse	77
	5.3	Kombiniertes Verfahren zur Abschätzung der Ereignisgrösse	79
	5.4	Hochwasserabfluss und Murgänge	80
	5.5	Häufigkeit von Wildbachereignissen	80
	5.6	Allgemeine Bemerkungen zur Abschätzung von Geschiebefrachten in Wildbächen _	83
6	All	gemeine Bemerkungen zur Gefahrenbeurteilung von Wildbachprozessen	85
7	Lit	eraturverzeichnis	89
8	Ve	rzeichnis der Abkürzungen	_ 102

Abstract

An important part of the risk management of natural hazards in mountain regions concerns the hazard assessment and the planning of protection measures in steep headwater catchments, i.e. torrent control and slope stabilization. This publication presents an overview of methods to quantify channel processes in steep catchments. The understanding and the quantitative description of channel processes provides an essential basis for the planning of protection measures. In the European Alps, channel processes are mostly triggered by rainfall events and associated runoff processes. Apart from possible flood hazards during an intense rainstorm event, a lot of damage is often caused by fine and coarse sediment which is entrained either in form of fluvial bedload transport or of a debris flow. Typically, the damage increases with the total amount of sediment transported to the fan during an event, particularly if the water and the sediments leave the channel on the fan. This document mainly discusses the topics flow resistance, bedload transport, debris flows and the relation between magnitude and frequency of torrential sediment events.

A first focus is put on the calculation of flow resistance in steep channels. Flow resistance is shown to increase considerably in steep channels which are often characterized by very irregular bed morphology and large-sized sediment particles such as boulders and pebbles. Together with limited runoff in small catchments this produces relatively shallow flow depths. For these conditions some flow resistance approaches used for flatter streams and rivers are not valid. A recently developed new flow resistance law is presented, and a quantitative procedure is introduced which allows to account for high flow resistance in bedload transport calculations.

A second key aspect concerns fluvial bedload transport in steep streams. Steep torrent channels show differences to flatter mountain rivers. Grain size analysis is a prerequisite for the calculation of bedload transport. Several formulae are introduced which may be used for the prediction of bedload transport for a given hydrograph. The quantification of three main elements is discussed: initiation of particle motion, transport rate, and accounting for high flow resistance. A serious complication during a flood event may be the entrainment of large woody debris, which may lead to clogging at critical channel locations. Erosion and aggradation of sediment may also become a crucial process during a flood event.

As a third core area, debris flows and important elements for its hazard assessment are presented. The occurrence of debris flows is discussed in terms of the primary mechanisms and of triggering rainfall conditions. Empirical and semi-empirical equations are introduced to estimate the main parameters characterizing the flow and deposition behavior of debris flows. Simulation tools are presented, which may be primarily used estimate the potentially affected areas on the fan as well as the flow dynamics. A geomorphic assessment of the natural fan surface can provide indications about the process behavior including for example the runout distance of former events.

The last focus is on the magnitude and frequency of torrential sediment events. Apart from historic documents, a field based geomorphic assessment is recommended to arrive at a good estimate of a future even magnitude. A recently developed procedure is introduced which combines a field assessment with a GIS based analysis of other factors that may be relevant for sediment supply to channel system and for sediment entrainment along the channels during a rainstorm event. A study from several Swiss headwater catchments is presented which identified typical patterns in the relations of the magnitude and frequency of torrential sediment events.

Vorwort

Dieses Dokument basiert auf dem Skriptum zur Vorlesung "Naturgefahren", welche der Verfasser an der Professur für Alpine Naturgefahren an der Universität für Bodenkultur in Wien (BOKU) ab 2002 während mehrerer Jahre hielt. Die Unterlagen sind ursprünglich unter Mitarbeit meiner Kollegen Dr. Michael BRAUNER und Dr. Roland KAITNA entstanden. Sie wurden für die Vorlesung "Wildbach- und Hangverbau" an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich (ETHZ) aktualisiert. Die Unterlagen wurden auch im Rahmen des Projektes OPTIMETH, einer Initiative aus dem Kreis der Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt (A), teilweise überarbeitet. Im Projekt OPTIMETH wurde eine vergleichende Übersicht über Methoden zur Gefahrenbeurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen erstellt. Das Projekt OPTIMETH wurde auch vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) in der Schweiz unterstützt. Meinen Kollegen Christian RICKLI und Christoph GRAF danke ich für das Korrekturlesen des Manuskriptes sowie für Kommentare dazu. Das Dokument stellt eine Ergänzung dar zum WSL Bericht Nr. 343 meines Kollegen Albert BÖLL aus dem Jahre 1997 mit dem Titel "Wildbach- und Hangverbau", worin hauptsächlich Schutzmassnahmen im Zusammenhang mit Wildbachgefahren behandelt werden.

Die vorliegenden Unterlagen beruhen auch auf der langjährigen Auseinandersetzung mit Gerinneprozessen in Wildbächen und steilen Gerinnen und dem Bemühen, diese Prozesse besser verstehen und quantifizieren zu können. Die intensive Beschäftigung mit diesem Thema in Bezug auf meine Lehr- und Forschungstätigkeit ermöglichten mir meine beiden Arbeitgeber Universität für Bodenkultur und Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, wofür ich mich hiermit bedanken möchte.

1 Einleitung

1.1 Wildbachprozesse und Gefahrenbeurteilung

Zu den vielfältigen Alpinen Naturgefahren gehören auch Wildbachprozesse in steilen Gerinnen. Wildbachverbauungen haben in den europäischen Alpenländern eine lange Tradition. Bei der Planung und Umsetzung von Schutzmassnahmen spielte die Erfahrung der Fachleute früher eine überragende Rolle. Diese Erfahrung stützte und stützt sich dabei in erster Linie auf Beobachtungen im Zusammenhang mit früheren Wildbachereignissen sowie auf regelmässige Begehungen in den Wildbach-Einzugsgebieten. Quantitative Messungen zum Beispiel zum Abfluss und zu erodierten und abgelagerten Feststoffmengen wurden vermehrt erst etwa ab den 1990er Jahren begonnen. Entsprechend gab es früher auch wenige quantitative Methoden zur Beschreibung der Gerinneprozesse.

Mittlerweile stützt sich auch die Beurteilung der Wildbachprozesse vermehrt und sehr stark auf quantitative Ansätze und auch auf numerische Simulationsmodelle ab. Die quantitative Beschreibung der Gerinneprozesse in Wildbächen basiert in vielen Fällen auf früheren und umfangreichen Untersuchungen zur Beschreibung ähnlicher Prozesse in flacheren Gerinnen oder grösseren Einzugsgebieten. So gibt es zum Beispiel über den Geschiebetransport seit etwa hundert Jahren systematische Untersuchungen basierend auf Messungen im hydraulischen Versuchslabor und in natürlichen Gerinnen. In jüngerer Zeit wurden und werden sowohl im Versuchslabor als auch in der Natur systematische Messungen zum Geschiebetransport auch in steilen Gerinnen durchgeführt. Diese Studien helfen, die Prozesskenntnisse für Wildbäche zu verbessern, und sie zeigen, inwieweit frühere Methoden übernommen werden können oder angepasst werden müssen. In diesem Zusammenhang zeigte sich zum Beispiel, dass das Abflussverhalten bzw. die Hydraulik in steilen Gerinnen Unterschiede zum Verhalten in flacheren Gerinnen aufweist, welche auch für die Berechnung des Geschiebetransportes in steilen Gerinnen berücksichtigt werden müssen. Ebenfalls im Bezug auf das Fliessverhalten von Murgängen gibt es in Europa erst seit den 1990er Jahren systematische quantitative Messungen im Rahmen von automatischen Monitoring-Einrichtungen.

In der Schweiz traten in den 1990er Jahren neue rechtliche Grundlagen zum Umgang mit Naturgefahren in Kraft (BUWAL/BWW/BRP, 1997; BWW/BRP/BUWAL, 1997). Zur Erstellung von Gefahrenkarten und Hochwasserschutzkonzepten müssen zum Beispiel die Prozessintensitäten und die potentiell gefährdeten Räume guantifiziert werden. Eine Sichtung von technischen Berichten zu Gefahrenkarten und Hochwasserschutzkonzepten zu Wildbach- und Geschiebetransportprozessen zeigte, dass eine vergleichende Bewertung oft schwierig ist, da für die Erstellung der Gefahrenkarten und insbesondere für die Prozessbeurteilung teilweise sehr unterschiedliche Methoden verwendet werden. Zudem sind leider in den Berichten die verwendeten Methoden und Grundlagen wie Eingabe- oder Modellparameter manchmal nicht ausreichend dokumentiert. Nach KIENHOLZ (1999) und KIENHOLZ et al. (2002) sind die sachliche Richtigkeit und die gute Nachvollziehbarkeit die zwei wichtigsten Anforderungen an technische Berichte im Zusammenhang mit der Beurteilung von Naturgefahren. Die Wahl und Dokumentation der Vorgehensweise ist anerkanntermassen schwierig, da es allgemein für die Prozessbeurteilung von hydrologischen bedingten Naturgefahren in Wildbächen vor allem für die Prozesse Geschiebetransport und Murgänge nur wenige umfassende Zusammenstellungen zu vorhandenen Methoden gibt. Die vorliegende Publikation soll dazu beitragen, die guantitative Beschreibung von Wildbachprozessen und die Bestimmung von wichtigen Kennwerten zu unterstützen und die Wahl und Dokumentation der Methoden zu erleichtern.

1.2 Zum Inhalt der vorliegenden Publikation

Das vorliegende Dokument behandelt in Kapitel 2 den Fliesswiderstand in Kiesbettflüssen und Wildbächen. Dabei wird aufgezeigt, dass bei steilen Gerinnen mit geringen Abflusstiefen im Verhältnis zu den grösseren Körnern der Fliesswiderstand stark zunimmt und bekannte Ansätze für flachere Gerinne (MANNING-STRICKLER Gleichung, logarithmisches Fliessgesetz) nicht mehr gültig sind. Zudem wird beschrieben, wie der zusätzliche Fliesswiderstand im Hinblick auf die Berechnung des Geschiebetransportes quantitativ berücksichtigt werden kann.

In Kapitel 3 zum fluvialen Geschiebetransport werden die Wildbäche eingeführt und auf Unterschiede zu den Gebirgsflüssen hingewiesen. Dann werden Methoden vorgestellt zur Charakterisierung der Geschiebekörner und zur Bestimmung der Kornverteilung des Sohlenmaterials. Bei der Berechnung des Geschiebetransportes werden Formeln diskutiert, womit die folgenden drei Hauptelemente quantifiziert werden können: Transportbeginn, Geschiebetransportrate und Berücksichtigung von Energieverlusten infolge zusätzlichen Fliesswiderstandes in steilen Gerinnen. Im Weiteren wird auf die Problematik von Schwemmholz eingegangen und es werden mögliche Gefahrenstellen im Zusammenhang mit Erosion oder Ablagerung besprochen.

Das Kapitel 3 behandelt zuerst die Eigenschaften von Murgängen und stellt wichtige Elemente der Prozess- und Gefahrenbeurteilung vor. Dann wird diskutiert, unter welchen Bedingungen Murgänge auftreten können. Quantitative empirische oder semi-empirische Ansätze werden vorgestellt, womit wichtige Parameter des Fliess- und Ablagerungsverhaltens bestimmt werden können. Bei der Vorstellung von Simulationsmodellen geht es vor allem um das Fliess- und Ablagerungsverhalten auf dem Wildbachkegel. Schliesslich wird auf die Bedeutung von Szenarien und von Ablagerungsspuren auf dem Kegel hingewiesen.

Im Kapitel 4 geht es um die Magnitude und Frequenz von Wildbachereignissen. Dabei wird auf die Bedeutung einer feldbasierten Abschätzung der Ereignisgrösse hingewiesen. Weiter wird ein kombiniertes Verfahren zur Abschätzung der Ereignisgrösse vorgestellt. Schliesslich wird bei der Diskussion der Häufigkeit von Wildbachereignissen auf die grosse Bedeutung von historischer Information hingewiesen, und es wird eine wichtige Studie zur Murgangaktivität in typischen Schweizer Wildbach-Einzugsgebieten vorgestellt.

Das abschliessende Kapitel 5 enthält eine kurze Zusammenfassung wichtiger Aspekte, welche im Zusammenhang mit der Gefahrenbeurteilung von Wildbachprozessen berücksichtigt werden sollten.

2 Fliesswiderstand in Kiesbettflüssen und Wildbächen

Der Fliesswiderstand ist eine Mass für die Reibung des fliessenden Wassers an der Gerinnesohle und an den Uferböschungen. Mittels Fliessgesetzten kann für eine gegebene Abflusstiefe oder einen gegebenen Abfluss bestimmt werden, wie schnell das Wasser im Gerinne gemittelt über die durchflossene Querschnittsfläche abfliesst. Die Bestimmung des Fliesswiderstandes ist auch wichtig im Hinblick auf Berechnungen zum Geschiebetransport.

2.1 Logarithmische Fliessgesetze

Für die Bestimmung des Fliessverhaltens von Reinwasserabflüssen kann das aus der Rohrhydraulik entwickelte universelle, logarithmische Fliessgesetz nach COLEBROOK-WHITE und der Reibungskoeffizient nach DARCY-WEISBACH angewendet werden (DITTRICH 1998; BEZZO-LA 2002). In das allgemeine Widerstandsgesetz Gl. 2-1 gehen die VAN KARMANN-Konstante, eine Integrationskonstante sowie die relative Abflusstiefe, als Quotient zwischen Abflusstiefe und äquivalenter Rauigkeit k_s , ein. Wie Abb. 2-1 zeigt, weicht die vertikale Geschwindigkeitsverteilung bei steilen und rauen Gerinnen (links) teilweise bedeutend vom logarithmischen Geschwindigkeitsgesetz (rechts) ab. Unterschiedliche Anpassungen des ursprünglichen Verteilungsgesetzes versuchen dieses Phänomen zu berücksichtigen.



Abb. 2-1: Geschwindigkeitsverteilung in Steilgerinnen mit geringer relativer Abflusstiefe. (a) ungleichförmige Kornverteilung, Roaring River, Colorado, USA. (b) gleichförmige Kornverteilung, Laborgerinne EPF Lausanne (modifiziert nach BATHURST 1993).

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{a h}{k_s}\right)$$
GI. 2-1
$$\frac{V}{v^*} = \frac{V}{\sqrt{ghS}} = \sqrt{\frac{8}{f}}$$
GI. 2-2

Dabei ist *f* = Reibungskoeffizient nach DARCY-WEISBACH, κ = KARMAN-Koeffizient (= 0.4), *h* = Abflusstiefe, k_s = äquivalente Rauigkeitshöhe ("Sandrauigkeit"), *a* = Koeffizient (häufig *a* = 12), *V* = mittlere Fliessgeschwindikeit, *g* = Erdbeschleunigung, *S* = Gerinnegefälle (bzw. Reibungsgefälle) (in allen Gleichungen dieses Dokumentes ist *S* mit der Einheit [m/m] und nicht in [%] einzusezten), $v^* = (ghS)^{0.5}$ = Schergeschwindigkeit, k_s = prop. D_x , und D_x = charakteris-

9

tische Korngrösse für welche x % des Materials feiner sind. Die charakteristische Korngrösse des Gerinnebettes bezieht sich bei allen Fliessformeln auf die Kornverteilung des Oberflächenmaterials bzw. der Deckschicht.

Als äquivalente Rauigkeit k_s wird die natürliche Oberflächenrauigkeit verstanden, welche sich aus "Körnern konstanter Grösse, bei dichtest möglicher Packung" ergibt (SCHRÖDER 1994). Man beachte, dass gemäss dieser Definition die tatsächliche Korngrösse nur eine bedingte Einflussgrösse für die Bestimmung der Kornrauigkeit ist.

Tab. 2-1: Empirische Herleitung der äquivalenten Sandrauigkeit *k*_s für Sand/Kiessohlen, Kiessohlen und für Raugerinne.

$k_s = D_{65}$	EINSTEIN (1942)	Sand/Kiassahlan
$k_s = D_{90}$	GARBRECHT (1961)	Sanu/Riessonien
k_s =3.5 D_{84}	Hey (1979)	Kiessohlen
<i>k</i> _s =4.5 <i>D</i> ₅₀	THOMPSON & CAMPELL (1979)	Raugerinne

An den Rauigkeitselementen der Sohle löst sich die Strömung ab und es bilden sich Wirbel, welche schliesslich unter Energiedissipation wieder aufgelöst werden. Für die Bestimmung des Fliesswiderstands ist neben der Höhe der Rauigkeitselemente k_s auch die Sohlstruktur von Bedeutung. Eine Ableitung von k_s aus charakteristischen Korndurchmessern ist daher nur durch empirisch ermittelte, funktionale Beziehungen möglich und subsummiert geometrische Rauigkeit, Packung und Anordnung der Rauigkeitselemente. Daher können diese funktionalen Beziehungen nur als Anhaltswerte dienen.

Für die Bestimmung des Fliesswiderstands, basierend auf dem logarithmischen Widerstandsgesetz, sind unterschiedliche Formulierungen aufgestellt worden (KEULEGAN 1938; HEY 1979; BATHURST 1985; SMART & JÄGGI 1983).

$\frac{V}{v^*} = 6.25 + 5.62 \log\left(\frac{h}{k_s}\right)$	GI. 2-3 Keulegan (1938)
$\frac{V}{v^*} = 4 + 5.62 \log\left(\frac{h}{D_{84}}\right)$	GI. 2-4 BATHURST (1985) Natur, Kies, ebene Sohle, 0.4 % < S < 9 %, h/D_{84} < ca. 7 – 10
$\frac{V}{v^*} = 5.75 \sqrt{1 - e^{\left[-0.05 \frac{h}{D_{90}\sqrt{S}}\right]}} \log\left(8.2 \frac{h}{D_{90}}\right)$	GI. 2-5 Smart & Jäggi (1983) Labor, ebene Sohle, <i>S</i> < 20 %

Wie mehrere Untersuchungen gezeigt haben, besteht ein funktionaler Zusammenhang zwischen relativer Abflusstiefe, äquivalenter Rauigkeit (k_s) und Gerinnegefälle. Insbesondere ändert sich das Widerstandsverhalten bei einer relativen Abflusstiefe von etwa 4 bis 5.

Über sehr rauen Sohlen entwickelt sich nach DITTRICH (1998) im Kontaktbereich Sohle-Wasser eine Schicht mit reduzierter Geschwindigkeitsverteilung. Diese Schicht wird als untere Rauigkeitsschicht bezeichnet (Roughness sublayer). Dieser Umstand resultiert in einer Sförmigen Verformung der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung, was eine stabilitätserhöhende, sohlennahe Geschwindigkeitsreduktion und somit eine Schubspannungsentlastung zur Folge hat und sohlenfern die Geschwindigkeit erhöht (ROSPORT 1998).

BEZZOLA (2002) versucht durch verstärkte Berücksichtigung der Höhe der unteren Rauigkeitsschicht y_R das Widerstandsverhalten der Sohle besser zu beschreiben. Gemäss den Untersuchungen von BEZZOLA (2002) ist die untere Rauigkeitsschicht von der Form, Dichte und Exposition der Rauigkeitselemente, nicht aber von der relativen Abflusstiefe abhängig. Er gibt dazu die Werte in Tab. 2-2 an.

	· · ·
Rauigkeitselemente	Höhe der unteren Rauigkeitsschicht y_R
einheitliche Grösse, kugelförmig	0.5 <i>D</i> ₉₀
einheitliche Grösse, Naturgeschiebe	1 D ₉₀
variable Grösse, Naturgeschiebe	2 D ₉₀

Tab. 2-2: Mächtigkeit der unteren Rauigkeitsschicht nach BEZZOLA (2002)

Allgemein wird bei Gerinnequerschnitten mit W/h < ca. 10 (W = Breite des Gerinnes) die Abflusstiefe oft durch den hydraulischen Radius R ersetzt, womit die Wandreibung berücksichtigt wird. In den im Kapitel 2 vorgestellten Fliessformeln kann anstelle der Abflusstiefe auch der hydraulische Radius R verwendet werden, welcher dann auch bei der Berechnung der Schergeschwindigkeit v^* einzusetzen ist. Der hydraulische Radius R ist definiert als R = A/P, mit A = durchflossene Querschnittsfläche und P = benetzter Umfang des Fliessquerschnittes.

2.2 Empirische Fliessgesetze (Potenzgesetze)

Der bekannteste empirische Ansatz ist die Fliessformel nach STRICKLER (1923) bzw. ähnliche frühere Ansätze von GAUCKLER (1867) und MANNING (1890). Dabei handelt es sich um ein Potenzgesetz, und dieses weist somit eine Ähnlichkeit zur Definition des DARCY-WEISBACH Reibungskoeffizients (GI. 2-2) auf. Der STRICKLER Koeffizient k_{St} ist dimensionsbehaftet und wird meist zur Charakterisierung des Gesamtwiderstandes verwendet, welcher Korn- und Formrauigkeit bzw. zusätzliche Rauigkeiten einschliesst. Er ist nicht dimensionsrein und kann bei vorwiegendem Einfluss der Kornrauigkeit, also gestrecktem Gerinneverlauf mit ebener Sohle, von der äquivalenten Sandrauigkeit k_s abgeleitet werden. Die STRICKLER Formel ist aus Versuchen mit relativen Abflusstiefen h/D > 10 abgeleitet. Setzt man in GI. 2-9 $\varepsilon_0 = D_{90}$ als Rauigkeitshöhe ein, so kann GI. 2-6 in GI. 2-10 umgeformt werden. Der Vergleich von GI. 2-10 mit dem logarithmischen Fliessgesetz in Abb. 2-2 zeigt, dass die STRICKLER Formel für geringere Abflusstiefen einen deutlich anderen Verlauf aufweist als das logarithmische Fliessgesetz. Bei GI. 2-6, GI. 2-7, GI. 2-8, GI. 2-9 sind *R* in [m], ε_0 , D_{90} und k_s in [m], k_{St} in [m^{1/3}/s] einzusetzen und *V* hat dann die Einheit [m/s]. GI. 2-10 beschreibt einen mittleren Fliesswiderstand in alpinen Kiesflüssen (vgl. auch GI. 2-14 in Kap. 2.4).

$V = k_{St} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$	GI. 2-6 Strickler (1923)
$k_{st} = \frac{21.1}{\sqrt[6]{\varepsilon_0}}$	GI. 2-7 Strickler (1923)
$k_{st} = \frac{26}{\sqrt[6]{D_{90}}}$	GI. 2-8 Meyer-Peter & Müller (1949)
$k_{st} = 6.7\sqrt{g} \frac{1}{\sqrt[6]{k_s}} \approx \frac{21.1}{\sqrt[6]{\varepsilon_0}}$	GI. 2-9 nach Strickler (1923)
$c = \frac{V}{v^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 6.7 \cdot \left(\frac{R}{D_{90}}\right)^{1/6}$	GI. 2-10 STRICKLER (1923) mit GI. 2–9 und k_s = D_{90}

Für Wildbäche mit typischerweise kleinen relativen Abflusstiefen gibt es noch keine genaueren Angaben über die Wahl von geeigneten Werten der äquivalenten Sandrauigkeit k_s im logarithmischen Fliessgesetz sowie über allenfalls sinnvolle Modifikationen dieses Fliessgesetzes. Daher wird auch die STRICKLER Formel oft angewendet, mit typischen Werten für den STRICKLER-Koeffizienten k_{st} wie etwa in Tab. 2-3 angegeben. Wie viele Naturstudien (JARRET 1984; HODEL 1993; BATHURST 1985; RUF 1990; RICKENMANN 1994, 1996; ZELLER 1996; PALT 2001) und auch Laborstudien (MEYER-PETER & MÜLLER 1948; ROSPORT 1998) zeigen, ist ab einem Gerinnegefälle von mehr als ca. 1 - 3 % eine markante Änderung des Widerstandesverhaltens festzustellen. Dieses Phänomen ist auf die ab dieser Neigung vermehrt vorhandenen, ausgeprägten morphologischen Sohlstrukturen (Makrorauigkeit) und auf den Einfluss der relativen Abflusstiefe zurückzuführen. In Naturgerinnen treten bei Gerinnegefälle von mehr als ca. 1 - 3 % häufig Abflüsse mir relativen Abflusstiefen h/D oder R/D kleiner als 3 - 5 auf.



- Abb. 2-2: Verhalten verschiedener Fliesssformeln, dargestellt als normierte Fliessgeschwindigkeit *V*/*v** in Funktion der relativen Abflusstiefe, *R*/*D*₉₀. Die empirische STRICKLER Formel GI. 2-10 zeigt für geringe relative Abflusstiefen einen deutlich anderen Verlauf als logarithmische Fliessgesetze wie z.B. KEULEGAN (1938) (GI. 2–3) (modifiziert nach BEZZOLA 2005).
- Tab. 2-3: STRICKLER-Koeffizienten k_{St} für die Gesamtrauigkeit von Naturgerinnen nach ZELLER & TRÜMPLER (1984)

	k_{St} [m ^{1/3} /s]
Wildbäche	
Grobkiessohle mit Steinen, gerade	20–25
Grobkiessohle mit Steinen, gewunden	15–20
Steinsohle mit einzelnen Blöcken, gerade	12–17
Blocksohle, Schnellen-Becken, unregelmässig	8–15
Blocksohle, Schnellen-Becken, unregelmässig, verwachsen	5–12
Gebirgsflüsse	
Kies- und Steinsohle, gerade	20–33
Steinsohle mit Blöcken, gerade	14–25
Blocksohle, gerade	10–15

RICKENMANN (1994, 1996) entwickelt eine Abflussformel, welche auf 373 Naturdaten basiert, Gl. 2-11, Gl. 2-12, mit Q = Gerinneabfluss. Die Formeln sind dimensionsgerecht, und gelten für natürliche Gerinneabschnitte mit Sohlengefällen zwischen 0.01 und 63 %. Die Unterscheidung in zwei Bereiche mit einer Grenze von S = 0.8 % spiegelt den bereits erwähnten Umstand wider, dass oberhalb von ca. 1 % Gerinnegefälle durch ausgeprägte Sohlstrukturen ein erhöhter Fliesswiderstand auftritt. In Analogie zu Ansätzen in der Regimetheorie wird die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Sohlengefälles, der Kornrauigkeit (D_{90}) und des Abflusses ausgedrückt. Abb. 2-6 zeigt einen Vergleich von berechneten Fliessgeschwindigkeiten nach Gl. 2-11 mit unabhängigen Abflussmessungen.

$$V = \frac{0.37g^{0.33}Q^{0.34}S^{0.20}}{D_{90}^{0.35}}$$

$$V = \frac{0.96g^{0.36}Q^{0.29}S^{0.35}}{D_{90}^{0.23}}$$
GI. 2-11
RICKENMANN (1996), 0.8 % ≤ S < 63 %
GI. 2-12
RICKENMAN (1996), 0.01 % < S < 0.8 %

2.3 Variable Power Equation (variables Potenzgesetz)

Im Bereich relativer Abflusstiefen h/D_{84} bzw. R/D_{84} (oder R/D_{90}) kleiner als ca. 10 zeigt die STRICKLER Formel einen deutlich anderen Verlauf als das logarithmische Fliessgesetz (Abb. 2-2, Abb. 2-3). Auch einfache logarithmische Fliessgesetze ergeben für h/D_{84} < ca. 1 teilweise zu kleine oder sogar negative Fliessgeschwindigkeiten.



Abb. 2-3: (a) Doppelt-logarithmische und (b) halb-logarithmische Grafik von $(8/f)^{0.5}$ (= V/v^*) versus relative Abflusstiefe R/D_{84} , mit 376 Naturmessungen. Die farbigen Linien repräsentieren verschiedene Fliessgesetze: MS = Manning-Strickler GI. (gültig für grosse h/D_{84} Werte), RL = roughness layer GI. (gültig für kleine h/D_{84} Werte), MS/RL = "beste" Kombination, log = logarithmische GI. HEY (1979), Katul = KATUL et al. (2002), Rick = RICKENMANN (1991), Smart = SMART et al. (1992), TC = THOMPSON & CAMPELL (1979), VPE = variable power equation of FERGUSON (2007). [Figures A and B from FERGUSON (2007), with copyright permission from Wiley/ American Geophysical Union.]

RICKENMANN & RECKING (2011) vergleichen sechs Fliessformeln mit insgesamt 2890 Naturmessungen zu Fliessgeschwindigkeiten in Kiesflüssen weltweit. In diesem Datensatz befinden sich auch viele Messungen aus steilen Flüssen. Die beste Beschreibung des mittleren Trends aller Daten wurde für die das variable Potenzgesetz (VPE, variable power equation) von FERGUSON (2007) erreicht:

$$\frac{V}{v^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{a_1 a_2 (h/D_{84})}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 (h/D_{84})^{5/3}}}$$
GI. 2-13
FERGUSON (2007)

Dabei wurde für die Koeffizienten Werte von $a_1 = 6.5$ und $a_2 = 2.5$ verwendet. Mit Hilfe von zwei dimensionslosen Parametern für die Fliessgeschwindigkeit, U^{**} , und für den Einheitsabfluss, q^{**} , kann Gl. 2-13 mit $a_1 = 6.5$ und $a_2 = 2.5$ alternativ wie folgt angegeben werden:

$$U^{**} = 1.443 \ q^{**0.60} \left[1 + \left(\frac{q^{**}}{43.78} \right)^{0.8214} \right]^{-0.2435}$$
GI. 2-14
RICKENMANNN & RECKING (2011)
$$U^{**} = \frac{V}{\sqrt{gSD_{84}}}$$
GI. 2-15
$$q^{**} = \frac{q}{\sqrt{gSD_{84}^3}}$$
GI. 2-16

Im Bereich relativer Abflusstiefen h/D_{84} kleiner als ca. 10 zeigt die Mehrheit der Messungen aus Wildbach-ähnlichen Gerinneabschnitten (v.a. Daten von DAVID et al. (2010) in Abb. 2-4) deutlich grössere DARCY-WEISBACH Reibungskoeffizienten *f* (bzw. einen kleineren Koeffizienten *a*₂) als der mittlere Trend der übrigen Daten gemäss Gl. 2-13 (Abb. 2-4) bzw. Gl. 2-14 (Abb. 2-5). Die Änderung der Fliessgeschwindigkeit (V/v^*) mit relativer Abflusstiefe (h/D_{84}) passt für diese Daten (angedeutet durch die farbigen Verbindungslinien pro Gerinneabschnitt) besser mit Gl. 2-13 überein als mit der STRICKLER Formel. Für relative Abflusstiefen h/D_{84} kleiner als ca. 4 kann Gl. 2-13 angenähert werden mit:

$$\frac{V}{v^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 2.2 \frac{h}{D_{84}}$$
GI. 2-17

Gemäss den Daten von DAVID et al. (2010) kann der Koeffizient *a*₂ in sehr rauen Gerinnen bis zu etwa 0.4 heruntergesetzt sein, d.h. die Fliessgeschwindigkeit kann gegenüber dem mittleren Trend der übrigen Daten bis um etwa den Faktor 5 bis 6 vermindert sein. Ein Grund dafür könnte darin liegen, dass bei den von DAVID et al. (2010) untersuchten Gerinnen Schwemmholz in den Bachbettstrukturen die Rauigkeit erhöhte. Eine Anwendung der Fliessgesetze von SMART & JÄGGI (1984) (Gl. 2-5) sowie von RICKENMANN (1996) (Gl. 2-11) auf die Daten aus Wildbach-ähnlichen Gerinneabschnitten von David et al. (2010) in einer anderen Darstellung in Abb. 2-5 zeigt, dass auch diese Gleichungen die Fliessgeschwindigkeit in rauen Wildbächen tendenziell überschätzen. Ein weiterer Vergleich der hier diskutierten Fliessformeln wurde mit unabhängigen Messungen der Fliessgeschwindigkeit in Gebirgsflüssen im Himalaya (PALT 2001) durchgeführt; es zeigt sich ebenfalls, dass mit den VPE Ansätzen Gl. 2-13 bzw. Gl. 2-14 generell die beste Übereinstimmung erhalten wird (Abb. 2-6).

Die VPE Fliessformel GI. 2-13 mit den Koeffizienten $a_1 = 6.5$ und $a_2 = 2.5$ zeigt auch bei der Anwendung auf einige steile Wildbäche (Gerinneabschnitte ohne Schwemmholz) in der Schweiz eine recht gute Übereinstimmung mit Feldmessungen zur mittleren Fliessgeschwindigkeit (NITSCHE et al. 2012a).



Abb. 2-4: Messungen der Fliessgeschwindigkeit in natürlichen Gerinnen, dargestellt als *V*/*u** vs. *h*/*D*₈₄, für relative Abflusstiefen kleiner als 20. VPE = variable power equation, Gl. 2-13. Die Messungen aus Wildbach-ähnlichen Gerinneabschnitten, wie z.B. die Daten von DAVID et al., liegen generell unterhalb der VPE-Linie (nach Daten aus RICKENMANN & RECKING 2011).



Abb. 2-5: Messungen der Fliessgeschwindigkeit in natürlichen Gerinnen, dargestellt als *U*** vs. *q***, für kleinere relative Abflusstiefen (*q*** kleiner als 20). VPE = variable power equation in Form von Gl. 2-14. Die Messungen aus Wildbach-ähnlichen Gerinneabschnitten liegen generell unterhalb der VPE-Linie, wie z.B. die Daten von David et al. (nach Daten aus RICKENMANN & RECKING 2011).

Die neueren Untersuchungen zeigen, dass sich in steilen und rauen Gerinnen (mit $h/D_{84} < 4$) der Fliesswiderstand besser mit einem Potenzgesetz nach FERGUSON (2007) als mit einer Strickler Formel oder mit einem logarithmischen Fliessgesetz beschreiben lässt. Allerdings ist auch in diesem Potenzgesetz ein Rauigkeitskoeffizient enthalten, der stark von der Gerinnemorphologie abhängig ist. Es ist bekannt, dass der STRICKLER-Wert für Wildbäche in einem Bereich von etwa 2 m^{1/3}/s bis zu etwa 30 m^{1/3}/s variieren kann (vgl. Tab. 2-3). Wie oben angedeutet, dürfte der Rauigkeitskoeffizient des Potenzgesetzes ähnlich stark variieren, allerdings sind hierzu noch mehr Untersuchungen nötig.

Im Weiteren ist auch zu berücksichtigen, dass das Strömungsverhalten in Wildbächen teilweise nicht mehr mit einer eindimensionalen Betrachtung angenähert werden kann, dass lokal häufig Fliesswechsel zwischen Strömen und Schiessen erfolgen können und dass die Fliessverhältnisse generell stark vom Abfluss bzw. der relativen Abflusstiefe abhängig sind. Viele dieser Aspekte bedürfen noch weiterer detaillierter Untersuchungen.



Abb. 2-6: Vergleich der mit verschiedenen Fliessgesetzen berechneten Fliessgeschwindigkeit (V_{ber}) mit unabhängigen Messungen der Fliessgeschwindigkeit (V_{gem}) in Gebirgsflüssen im Himalaya (PALT 2001): RICKENMANN (1996), Gl. 2-11 und Gl. 2-12; RICKENMANN & RECKING (2011), Gl. 2-14; FERGUSON (2007), Gl. 2-13 bzw. Gl. 2-22, berechnet mit *R*; SMART & JÄGGI (1984), Gl. 2-5, berechnet mit *R*.

2.4 Aufteilung des Fliesswiderstandes

Der gesamte Fliesswiderstand beim Oberflächenabfluss in einem Gerinne setzt sich zusammen aus der Reibung an den einzelnen Körnern der Sohle (Kornrauigkeit) sowie der Reibungsverluste infolge der Sohlenformen und der unregelmässigen Gerinnegeometrie; diese beiden letzten Anteile werden häufig als Formverluste bezeichnet. In einigen Ansätzen für die Berechnung des Geschiebetransportes wie z.B. von MEYER-PETER & MÜLLER (1948) und PALT (2001) fliesst ein Korrektur-Term zur Berücksichtigung von Formverlusten ein. Dabei ist das Verhältnis zwischen Korn- oder Basisrauigkeit (k_r) und der Gesamtrauigkeit (k_{St}) massgebend. Eine ähnliche Korrektur wird hier zuerst mit Hilfe des MANNING Koeffizients (n) eingeführt, welcher dem Reziprokwert des STRICKLER Koeffizients entspricht ($n = 1/k_{St}$).

Mit 373 Daten zur Fliessgeschwindigkeit in steilen Gerinnen wurde von RICKENMANN (1994, 1996) ein Korrekturfaktor bestimmt, welcher eine Aufteilung des Fliesswiderstandes über den MANNING Koeffizient in eine Basisrauigkeit (n_o) und eine Gesamtrauigkeit (n_{tot}) beinhaltet. Diese Aufteilung wurde in Funktion des Abflusses Q in Gl. 2-18 nach RICKENMANN et al.

(2006a) bzw. in Funktion der Abflusstiefe h in Gl. 2-19 nach Chiari et al. (2010) (siehe auch Abb. 2-7) definiert. Diese Gleichungen für die Aufteilung des Fliesswiderstandes sind im Geschiebetransport-Simulationsprogramm SETRAC (CHIARI & RICKENMANN 2011) bzw. in der ersten Version des Nachfolgemodells TomSed (www.bedload.at) implementiert.



Abb. 2-7: Der Parameter (n_o/n_{tot}) als Funktion des Gefälles, zur Berücksichtigung von Energieverlusten durch hohen Fliesswiderstand in Wildbächen (modifiziert nach CHIARI et al. 2010).

S

0.1

1

0.01

Die Aufteilung des Fliesswiderstandes kann auch über den DARCY-WEISBACH Koeffizienten f erfolgen, indem die Gesamtreibung (f_{tot}) in eine Basisreibung (f_o) und eine zusätzliche Reibungskomponente (f_{add}) aufgeteilt wird:

 $f_{tot} = f_0 + f_{add}$ Gl. 2-20

Die meisten Geschiebetransportgleichungen basieren auf Laborversuchen, bei welchen die Formverluste vernachlässigbar waren und die Fliessverhältnisse relative Abflusstiefen von meist mehr als etwa 7 – 10 beinhalten, und somit eine MANNING-STRICKLER Gleichung wie etwa Gl. 2-10 oder Gl. 2-21 eine gute Beschreibung des Fliesswiderstandes darstellt, welcher hier als Basisreibung (f_o) definiert ist. In den Wildbächen mit groben Rauigkeitselementen wie Blöcken und Stufen und generell kleinen relativen Abflusstiefen kleiner als etwa 10 entsteht ein zusätzlicher Fliesswiderstand (f_{add}).

RICKENMANN & RECKING (2011) benutzen den VPE Ansatz nach FERGUSON (2007) (GI. 2-13) als Basis zur Entwicklung einer Methode zur Aufteilung des Fliesswiderstandes für mittel- bis gross-skalige Rauigkeitsbedingungen (im Sinne von BATHURST et al. 1981; hier für h/D_{84} < ca. 7) in Gerinnen verwendet. Anhand einer Formel des Typs MANNING-STRICKLER kann ein

0.001

Basisniveau für den Fliesswiderstand berechnet werden (Abb. 2-8), das den Fliessbedingungen bei klein-skaliger Rauigkeit (hier für h/D_{84} > ca. 7) entspricht:

$$\frac{V_o}{v^*} = \sqrt{\frac{8}{f_o}} = 6.5 \left(\frac{h}{D_{84}}\right)^{1/6}$$
 Gl. 2-21

Wird Gl. 2-21 für mittel- bis grossskalige Rauigkeitsbedingungen verwendet, kann mittels f_o bzw. der virtuellen Fliessgeschwindigkeit V_o ein entsprechendes Niveau für die Basisreibung geschätzt werden. Der gesamte Fliesswiderstand wird wie folgt berechnet:

$$\frac{V_{tot}}{v^*} = \sqrt{\frac{8}{f_{tot}}} = \frac{6.5 \bullet 2.5 (h/D_{84})}{\sqrt{6.5^2 + 2.5^2 (h/D_{84})^{5/3}}}$$
Gl. 2-22

Damit ergibt sich das Verhältnis zwischen Basiswiderstand und gesamtem Fliesswiderstand:

$$\sqrt{\frac{f_o}{f_{tot}}} = \frac{V_{tot}(h)}{V_o(h)}$$
Gl. 2-23



Abb. 2-8: Aufteilung des Fliesswiderstandes für mittel- bis grossskalige Rauigkeitsbedingungen (hier h/D_{84} < ca. 10). Anhand einer Formel des Typs MANNING-STRICKLER wird ein Basisniveau für den Fliesswiderstand bestimmt (gestrichelte lila Linie), das den Fliessbedingungen bei kleinskaliger (hier h/D_{84} > ca. 10) Rauigkeit entspricht (ausgezogene lila Linie), gemässe Ansatz nach RICKENMANN & RECKING (2011).

Die hier vorgeschlagene Aufteilung des Fliesswiderstandes ist im Grunde eine Funktion der relativen Abflusstiefe (Abb. 2-9). Es handelt sich um einen pauschalen, empirischen Ansatz, welcher aber implizit Informationen über eine durchschnittliche Rauigkeitserhöhung in steilen und rauen Gerinnen enthält. Alternativ zur Berechnung von (f_o/f_{tot}) in Funktion der Abflusstiefe mit Gl. 2-21 bis Gl. 2-23 kann (f_o/f_{tot}) auch in Funktion des Einheitsabflusses q wie folgt bestimmt werden:

$$U_o^{**} = \frac{V_o}{\sqrt{gSD_{84}}} = 3.074 \left(q^{**}\right)^{0.4}$$
Gl. 2-24

Zusammen mit Gl. 2-16 ergibt sich dann $V_{o}(q)$. Für die Berechnung des Gesamtwiderstandes f_{tot} bzw. V_{tot} wird Gl. 2-14 zusammen mit Gl. 2-15 sowie Gl. 2-16 verwendet, woraus sich $V_{tot}(q)$ ergibt. Das Verhältnis zwischen Basiswiderstand und gesamtem Fliesswiderstand ergibt sich dann zu:

$$\sqrt{\frac{f_o}{f_{tot}}} = \left(\frac{V_{tot}(q)}{V_o(q)}\right)^{1.5}$$
GI. 2-25



Abb. 2-9: Aufteilung des Fliesswiderstandes $(f_o/f_{tot})^{0.5}$, basierend auf 2890 Messungen in Kiesflüssen und z.T. in Wildbächen. Die Werte $(f_o/f_{tot})^{0.5}$ sind im Wesentlichen eine Funktion der relativen Abflusstiefe. Die dunkelrote Linie entspricht der Berechnung nach Gl. 2-25, die lila Linie der entspricht der Berechnung nach Gl. 2-23 (nach Daten aus RICKENMANN & RECKING 2011).

Das Verhältnis (f_o/f_{tot}) stellt einen Reduktionsfaktor dar, der ein Mass ist für denjenigen Energieanteil des Abflusses an der gesamten Fliessenergie (Sohlenschubspannung), welcher für den Geschiebetransport zur Verfügung steht. Die Aufteilung des Fliesswiderstandes über den Wert (f_o/f_{tot})^{0.5} ist die Grundlage, um ein reduziertes Energieliniengefälle S_{red} zu bestimmen, welches dann in die Berechnung des Geschiebetransportes einfliesst (siehe Kap. 3.4.4).

3 Fluvialer Geschiebetransport

3.1 Charakterisierung von Wildbächen und Gebirgsflüssen

In Gebirgsflüssen und Wildbachgerinnen sind die hydrologischen wie die hydraulischen Prozesse durch extreme Veränderungen räumlicher und zeitlicher Natur charakterisiert. Die Ursache hierfür liegt in der überaus starken geologischen wie morphologischen Prägung des Gerinnesystems in alpinen Einzugsgebieten. Daraus folgt eine hohe Variabilität der folgenden Parameter:

- Geschiebeverfügbarkeit und Geschiebeführung
- Zusammensetzung der Kornverteilung des Bachbettmaterials sowie der Geschiebequellen
- Flussgeometrie in Längs- und in Querrichtung
- Stark variable, aber insgesamt geringe Abflusstiefen
- Fliessverhalten im Übergangsbereich Strömen-Schiessen-Strömen

Typische **Wildbachgerinne** werden von diesen Parametern überaus stark geprägt, daher hat die Berücksichtigung der geologischen und morphologischen Ausgangssituation im Gerinne und seinen Nahbereichen einen hohen Stellenwert und darf nicht vernachlässigt werden. **Gebirgsflüsse** weisen hingegen bereits stärker selbst formenden Charakter auf. Die Bewertung kann sich daher zunehmend auf die engere Betrachtung der fluvialen Prozessabläufe beschränken. Wildbäche umfassen hier Alpine Einzugsgebiete, in welchen neben fluvialem Geschiebetransport auch Murgänge auftreten können. Solche Einzugsgebiete haben aufgrund verschiedener Studien eine Einzugsgebietsfläche kleiner als etwa 25 km² (RICKEN-MANN & KOSCHNI 2010). Typische Unterschiede zwischen Wildbächen und Gebirgsflüssen sind in Abb. 3-1 zusammengefasst.

	Wildbäche	Gebirgsflüsse
Transportprozess Murgang		
	G	eschiebetransport
Neigung	steiler als 5 10 %	ca. 0.1 10 %
Bettmorphologie	Blöcke, anstehender Fels	Deckschicht, z.T. einzelne Blöcke
unr	egelmässige Gerinnegeometrie	gleichförmigere Gerinnegeometrie
sehr breite Kornverteilung		weniger breite Kornverteilung
Kaskaden, Stufen, Becken		Schnellen, Becken, (alternierende) Bänke, verzweigtes Gerinne
Sedimentspeicher- vermögen im Bachbet	t	
Lateraler Eintrag von Sediment		

Abb. 3-1: Überblick über einige Unterschiede zwischen Wildbächen und alluvialen Gebirgsflüssen. Der graue Bereich markiert eine zunehmende bzw. abnehmende Bedeutung.

Ein wichtiger Unterschied der Wildbachgerinne zu alluvialen Gebirgsflüssen besteht im Verhältnis zwischen Feststoffbereitstellung und Abflussgeschehen. Hier kann eine Unterscheidung zwischen meist transportlimitierten Verhältnissen in Gebirgsbächen und Flüssen, und häufig sedimentlimitierten Verhältnissen in Wildbächen getroffen werden. Während für den Geschiebetransport beim transportlimitierten Regime der Abfluss bzw. die hydraulische Belastung entscheidend ist, ist beim sedimentlimitierten Regime die Feststoffverfügbarkeit der Minimumfaktor (Abb. 3-2).



Abb. 3-2: Transportlimitierte und sedimentlimitierte Verhältnisse (modifiziert nach MONTGOMERY & BUFFINGTON 1997). Mit zunehmender Einzugsgebietsfläche nimmt das Gerinnegefälle ab. Die typischen morphologischen Strukturen ändern sich ebenfalls mit dem Gerinnegefälle.

Morphologisch können drei Teilbereiche unterschieden werden: Gerinnnesohle (Bachbett), Gerinnebank (Ufer) und Gerinneeinhang. Die Morphologie der Sohle und der Geschiebebänke eines Gerinnes ist eng mit den ablaufenden Prozessen des Feststofftransports verknüpft. Hat ein Wildbach oder Gebirgsfluss seitliche Bewegungsfreiheit, so kann er durch Mäanderbildungen oder Gerinneverzweigungen sein Energieniveau (Abfluss, Feststofftransport) an die Talmorphologie anpassen. Ist ein Gebirgsbach durch die enge Talmorphologie seitlich eingeschränkt, so dass weder Bank- noch Mäanderbildung möglich sind, wird von einem Zwangsgerinne gesprochen (MONTGOMERY & BUFFINGTON 1997). Solche Bäche tendieren durch intensive Ausbildung von vertikalen Sohlstrukturen zu einer erhöhten Energiedissipation. Bäume, Felsblöcke, Felsstufen oder seitliche Hindernisse spielen dabei eine wichtige Rolle. Eine Zerstörung solcher Hindernisse kann zu temporär erhöhtem Feststofftransport führen (TUROWSKI et al. 2009). Grundsätzlich ändern sich mit dem Gerinnegefälle (bzw. der Grösse des Einzugsgebietes) die typischen morphologischen Strukturen an der Sohle (MON-TGOMERY & BUFFINGTON 1997), wie das auch in Abb. 3-1 und Abb. 3-2 angedeutet ist.

Bezüglich der Gerinnemorphologie kann auch zwischen der Gerinneform, der Sohlform sowie der Kornform unterschieden werden (DE JONG & ERGENZINGER 1995; MORVAN et al. 2008). Diese Strukturen können als Form- und Kornwiderstand in Berechnungsverfahren berücksichtigt werden. Allerdings ist eine genaue Unterscheidung zwischen Korn- und Formwiderstand eigentlich nur in Sandbettgerinnen möglich; in Kiesgerinnen und insbesondere in Wildbächen ist eine Unterscheidung zwischen Korn- und Formwiderstand bzw. zusätzlichem Fliesswiderstand in Frage gestellt (ZIMMERMANN 2010).

Je nach Verhältnis zwischen Feststofflieferung und hydraulischer Beanspruchung der Bachsohle kann zwischen kolluvialen und fluvialen Bachbettsedimenten unterschieden werden (MONTGOMERY & BUFFINGTON 1997). Bei kolluvialem Sediment überwiegt die Sedimentlieferung durch Hangschutt, welcher mit Ausnahme von murgangartigen Ausräumungprozessen durch Extremereignisse keine weitere Verlagerung erfährt. Kolluviale Gerinne sind daher durch kantiges, nicht sortiertes und schlecht eingeregeltes Geschiebe gekennzeichnet und weisen keine Deckschicht (Abpflästerungsschicht) auf. Bei fluvialem Sediment überwiegt hingegen fluvialer Transport, was zu gerundeten, gut sortierten und eingeregelten Sedimenten führt. Sie können eine Deckschicht aufweisen. Da das Bachbett eines Wildbaches aus kolluvialen und fluvialen Sedimenten zusammengesetzt ist, bildet sich nicht unbedingt eine Deckschicht aus, so wie sie in Gebirgsflüssen mit rein fluvialen Sedimentablagerungen häufig ist. Es ist daher fraglich, inwieweit Konzepte im Zusammenhang mit der Deckschichtbildung und dem Transportbeginn bei Aufbrechen einer Deckschicht auch in Wildbächen anwendbar sind.

Weitere wichtige Merkmale der Gerinnesohle von Gebirgsbächen sind, neben der Ausbildung einer Deckschicht vor allem in Gebirgsflüssen, die Entwicklung von Sohlstrukturen. Für steilere Wildbäche typisch sind sogenannte Stufen-Becken Sequenzen (step-pool Strukturen). Die Sohle wird dann auch als verformte oder deformierte Sohle bezeichnet (ROSPORT 1998). Empirische Studien belegen, dass solche Strukturen die Stabilität bis zu einem etwa 50 bis 100 jährlichen Abflussereignis erhöhen können.



Abb. 3-3: Stufen-Becken Sequenzen (step-pool structures) als typische Sohlstrukturen in steileren Wildbächen (modifiziert nach HAYWARD 1980).

3.2 Sedimentologische Parameter

Die Korngrössenzusammensetzung und die Kornform haben einen grossen Einfluss auf den Feststofftransport alpiner Gewässer. Auf Grund der räumlich und zeitlich grossen Variabilität der Sedimentverteilung stellt sich die Frage, ob eine umfassende Bestimmung der sedimentologischen Parameter möglich ist bzw. welche Genauigkeit zu erwarten ist. Erst dann kann eine auf die Fragestellung angepasste Bewertungsmethodik entwickelt werden.

Fliessgesetze für den Gerinneabfluss und Feststofftransportberechnungen benötigen charakteristische Korndurchmesser zur Bestimmung des Fliesswiderstandes (z.B. D_{84} , D_{90}), des Mobilisierungsbeginns (z.B. D_{50} , D_{65} , ev. Kornform) und der Effizienz in Abhängigkeit von der Kornsortierung (D_{16} , D_{30} , D_{84} , D_{90}). Bezogen auf einen Querschnitt stellt die aktuell aufgenommene Kornverteilung nur eine Momentaufnahme dar, als Resultat der unmittelbar vergangenen hydraulischen Bedingungen und des aufgetretenen Geschiebetransportes. Eine solche statische Aufnahme gibt daher nur einen teilweisen Einblick in die dynamisch veränderlichen sedimentologischen Verhältnisse während eines Ereignisses oder Betrachtungszeitraums.

Die räumliche Variabilität ist die Folge der oft sehr heterogenen Transport- bzw. Ablagerungsverhältnisse sowie der unterschiedlichen Sedimentquellen. Daher sollte die Sedimentologie von Sedimentquellen und Gerinne (separat nach Sohle und Bank) unterschieden werden. Für eine Bestimmung der Kornverteilung der Oberflächenschicht (Deckschicht) sollten verschiedene morphologische Einheiten wie z.B. Stromschnellen, Abstürze, Becken und Kiesbänke idealerweise anteilsmässig berücksichtigt werden. Es ist jedoch oft nicht einfach, Zonen unterschiedlicher Bachbettmorphologie klar abzugrenzen. Die zeitliche Variabilität ist durch die Prozessdynamik während des Transportereignisses bedingt und kann nur durch einen Vergleich über mehrere Transportereignisse hinweg näher erfasst werden. Einen möglichen Ansatz bieten Geländeaufschlüsse oder die vergleichende Bewertung zwischen Sohle und benachbarter Bank.

Die Kornform wirkt sich unter anderem auf die initiale Mobilisierungsphase und den Transportvorgang selbst aus. So ist durch zunehmende Plattigkeit des Einzelkorns eine bessere dachziegelartige Einregelung des fluvial belasteten Sohlgeschiebes und damit eine Reduktion der effektiven Kornrauigkeit bei gleichzeitiger stabiler Lagerung die Folge. BEZZOLA (2002) gibt für kantiges Geschiebe einen um 40 % höhere dimensionslose Sohlenschubspannung bei Mobilisierungsbeginn an. Eine pauschale Klasseneinteilung der Form- und Rundungsansprache kann z.B. nach SCHREINER (1997) erfolgen. Abb. 3-4 illustriert eine Ansprache von gut gerundeten bis zu kantigen Kornformen, wobei auch nach der Sphärizität unterschieden ist.



Abb. 3-4: Unterteilung der Kornformen nach Rundung (sehr kantig bis zu gut gerundet) und nach Sphärizität. [modifiziert nach: http://homepage.usask.ca/~mjr347/prog/geoe118/geoe118.017.html]

3.3 Bestimmung der Kornverteilung und von charakteristischen Korngrössen

In der Literatur sind unterschiedliche Analyseverfahren zur Bestimmung der Kornverteilung zu finden. Sie sind entweder für ein bestimmtes Korngrössenspektrum oder für bestimmte Ablagerungsbedingungen entwickelt worden. Für steile Gerinne mit einem typischerweise breiten Korngrössenspektrum sind für eine genaue Analyse unterschiedliche Verfahren zu kombinieren. Bei der Anwendung dieser statistischen Verfahren muss berücksichtigt werden, dass ihre Ableitung üblicherweise unter anderen sedimentologischen Bedingungen erfolgt ist und sie für die Anwendung in Wildbachgerinnen noch nicht systematisch überprüft wurden.

Zwecks besserer Vergleichbarkeit sollten alle Verfahren auf einer einheitlichen Korngrössenklassifizierung basieren. Tab. 3-1 gibt dazu eine Übersicht. Als Verfahren zur Bestimmung von Korngrössenverteilungen können die nachfolgend beschriebenen Methoden unterschieden werden. Tab. 3-1: Klasseneinteilungen zur Bestimmung von Korngrössenverteilungen. Der typische Anwendungsbereich der einzelnen Analyseverfahren ist durch graue Balken gekennzeichnet. ISO: International Organization for Standardization; VSS: Schweizerischer Verband der Strassenund Verkehrsfachleute; USCS: Unified Soil Classification System; ÖNORM: Austrian Standards Institute.

ISO Scale		Metrische Klassen	VSS USCS	ÖNORM B4412	Linienprobe VAW	Sieb- analyse	Flächen- ahlanalyse	Photo- sieving
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]			
					>2000			
					1500			
large boulder	arosse Blöcke				1200			
large boulder	greece breeke				1000			
					800			
		> 630			600			
					500			
					400			
boulder	Blöcke				350			
boulder	Bioone				300			
					250			
		200 - 630	> 200		200			
					150			
					120			
cobble	Steine				100			
					80			
		63 - 200	60 - 200	63	60			
					40			
coarse gravel	grober Kies			31.5	30			
		20 - 63		16	20			
medium gravel	mittlerer Kies			8	10			
		6.3 - 20		4				
fine gravel	feiner Kies	2.0 - 6.3	2 - 60	2				
coarse sand	grober Sand			1				
	9.0201 04.14	0.63 - 2.0	0.6 - 2.0	0.5				
medium sand	mittlerer Sand	0.2 - 0.63	0.2 - 0.6	0.25				
fine sand	feiner Sand			0.125				
		0.063 - 0.2	0.06 - 0.2	0.063				
coarse silt	grober Silt	0.02 - 0.063	0.02 - 0.06	0.02				
medium silt	mittlerer Silt	0.0063 - 0.02	0.006 - 0.02	0.0063				
fine silt	feiner Silt	0.002 - 0.0063	0.002 - 0.006	0.002				
clay	Ton	< 0.002	< 0.002	< 0.002				

Volumenanalyse

Ein bestimmtes Volumen an Sediment wird aus der Bachsohle entnommen. Dabei kann die Korngrösse ohne Einfluss von Einregelung und Schichtung bestimmt werden, allerdings muss der Standort gut zugänglich sein und die Probe aus granularem Material bestehen. Proben können nicht nur oberflächennah, sondern auch in unterschiedlichen Tiefen genommen werden. Je grösser das Maximalkorn ist, desto grössere Volumina müssen untersucht werden. Durch Siebung und Gewichtsermittlung der einzelnen Kornklassen wird die Volumenanalyse ausgewertet. Dabei wird die mittlere Achse (b-Achse) ermittelt. Die Siebung kann entweder nass oder trocken durchgeführt werden, jedoch sollte immer trocken gewogen werden, da der Einfluss des Wassergewichts bei kleinen Korngrössen bedeutend sein kann. Zur Ermittlung der notwendigen Probengrösse gelten folgende Richtwerte:

Tab. 3-2: Notwendige Probengrösse für Volumenproben

Volumen _{Probe} (m ³) = 2.5 D_{max} (m)	Fehr (1987a, b)
$Masse_{Probe}(kg) = 0.1 \ 10^{b} \ \rho_{s} D_{max}^{3}(m)$	BUNTE & ABT (2001)
ρ_s = Sedimentdichte; Genauigkeit: hoch (b=5), mittel (b=4), gering (b=3)	

Grundsätzlich ist eine Vorfraktionierung grober Komponenten im Gelände möglich. Dabei werden grobe Komponenten ab einer Korngrösse D > 32 mm einzeln gemessen (b-Achse), in entsprechende Korngrössen eingeteilt und mit Gewichtswaage oder Wasserverdrängung gewogen bzw. über das Verdrängungsvolumen und das spezifische Gewicht bestimmt. Allerdings ist der Einfluss der subjektiven Selektion mittels Schaufel beträchtlich. Eine Möglichkeit wäre hier die Gewinnung einer Probe mittels Baggerschaufel, und ein komplettes Ausmessen der gesamten Probe. Ab einer Korngrösse D < 32 mm sollte gesiebt werden. Wird eine Deckschicht angenommen, so sollte idealerweise eine Probe der Deckschicht sowie eine Probe der Unterschicht genommen werden. Die Mächtigkeit der Deckschicht kann dabei etwa mit $D_{90} \dots D_{max}$ angenommen werden.

Oberflächenanalyse

Mit unterschiedlichen Stichprobenaufnahmeverfahren (Raster, Linie, Zufall) wird die Oberfläche aufgenommen. Dabei kann die Oberfläche der Sohle bzw. einer Kiesbank oder eines Sedimentaufschlusses erhoben werden. Trotz der Möglichkeit, die Aufnahmefläche fotografisch zu erfassen, muss die Probenstelle für die Markierung von Orientierungspunkten zugänglich sein. Bei stark ausgeprägter Schichtung oder Einregelung kann es zur Verfälschung der tatsächlichen Korngrössenverhältnisse kommen (RUDOLF-MIKLAU 2001). Auf Grund der visuellen Ansprache werden die kleineren Fraktionen unterschätzt.

Neuere Verfahren der Oberflächeanalyse stützen sich auf Fotografien des Bachbettes ab. Beim sogenannten Photosieving ist der limitierende Parameter die Korngrösse, da die projizierte Fläche des Maximalkorns maximal 1 % der Analysefläche betragen soll. Es wird in der Folge die scheinbare b-Achse oder der mittlere Durchmesser der projizierten (freigelegten) Kornfläche durch automatisierte Kornabgrenzung ermittelt. Dazu bestehen verschiedene ausprogrammierte Ansätze, auf die zurückgegriffen werden kann (WARRICK et al. 2009; BUS-COMBE et al. 2010; GRAHAM et al. 2010; DETERT & WEITBERCHT 2012a, b). Allerdings ist die Anwendung des Photosieving in Wildbachgerinnen wegen sehr grosser Körner (und dem notwendigen vertikalen Abstand der Kamera) problematisch. Eine Alternative dazu könnten Kameras mit räumlich hochaufgelöster Distanzmessung bieten (NITSCHE et al. 2010).

Um die gesamte Kornverteilung zu erhalten, müssen die Einzelergebnisse in eine einheitliche Aufnahmemethodik ungerechnet werden und mit statistisch ermittelten Verhältnisfunktionen kombiniert werden. Diese funktionellen Zusammenhänge sind von der Kornform, Einregelung, Sortierung und Porosität abhängig und daher nur für bestimmte Ablagerungsbedingungen repräsentativ. Grundsätzlich anwendbar ist das an der ETH Zürich entwickelte Verfahren der Linienzahlanalyse (FEHR 1986, 1987a, b). Dieses wurde für Gebirgsflüsse entwickelt. Für schlecht sortierte Wildbachsedimente steht die Überprüfung aller Verfahren noch aus.

Linienzahlanalyse der Deckschicht in grobgeschiebereichen Bächen

In grobgeschiebereichen Bächen sind Siebanalysen der obersten (hydraulisch relevanten) Schicht oft nicht durchzuführen, da weder die Siebsätze für grössere Korndurchmesser geeignet sind, noch die Geschiebemengen (bei Korngrössen von 100 cm Durchmesser wären 2.5 m³ Material zu sieben) wirtschaftlich zu bewältigen sind. Es wurden daher einfachere Methoden entwickelt, die die Verhältnisse in Grobgeschiebebächen berücksichtigen.

Die häufigsten Techniken zur Analyse von Deckschichten sind flächenhafte, Gitter- und Linienproben (für einen Überblick siehe z.B. BUNTE & ABT 2001). In alpinen Gebirgsflüssen und Wildbächen wird oft die Linienzahlanalyse (LZA) angewendet, welche an der VAW-ETH Zürich als Methode zur Analyse von Grobgeschiebe entwickelt wurde (ANASTASI 1984, FEHR 1987a, b).

Vorgehen bei der Aufnahme einer Linienprobe:

Über die zu analysierende Deckschicht wird eine Schnur gespannt (Abb. 3-5 links), die systematische Fehler bei der Auswahl der zu untersuchenden Steinen vermeiden hilft. Bei allen Steinen, die grösser als 1 – 2 cm und unter der Schnur liegen, wird nun die mittlere Achse (b-Achse) gemessen. Die Steine werden in Durchmesserklassen (Fraktionen) eingeteilt und gezählt (Abb. 3-5 rechts). Es sollten mindestens 150 Steine gezählt werden. Wird gleichzeitig eine Volumengewichtsanalyse des Feinmaterials der Unterschicht vorgenommen, so sollten die Klassen der Linienprobe im Überlappungsbereich mit der Volumenprobe letzterer angepasst werden.

Analyse der Linienprobe:

 $p_{ic} = 0.11 + 0.89 \sum_{i=1}^{l} \Delta p_i$

Das Ergebnis einer LZA ist eine Häufigkeitsverteilung der Grobfraktion (>1cm) des Sediments in einem Wildbach. Um das Ergebnis mit anderen Methoden zu vergleichen und zu kombinieren, müssen die prozentuellen Anteile der LZA in Gewichtfraktionen einer Volumenanalyse umgerechnet werden. FEHR (1987a, b) entwickelte folgende empirische Umrechnungsformel (für hydraulisch beanspruchte Proben):

$$\Delta p_i = \frac{\Delta q_i D_{mi}^{0.8}}{\Sigma \Delta q_i D_{mi}^{0.8}}$$
Gl. 3-1

Dabei ist Δp_i = (Gewicht der Fraktion i)/(Gewicht der ganzen Probe), Δq_i = (Anzahl Steine der Fraktion i)/(Anzahl Steine der ganzen Probe), $D_{\rm mi}$ = mittlerer Korndurchmesser der Fraktion i. Da die Feinanteile durch die LZA unterschätzt werden, muss die Kornverteilungskurve noch angepasst werden. Für die Umrechnung einer LZA in die Kornverteilungskurve der Unterschicht wird nach FEHR (1987a, b) ein Feinanteil von 0.25 für die Sedimente < 1 cm angenommen:

$$p_{i_c} = 0.25 + 0.75 \sum_{i}^{i} \Delta p_i$$
 GI. 3-2
Umrechnung in Kornverteilung der Unterschicht

Falls eine Umrechnung einer LZA in die Kornverteilungskurve der Oberflächenschicht (Deckschicht) gemacht werden soll, ist ein kleinerer Anteil für die Sedimente < 1 cm anzunehmen. Gemäss einer Zusammenstellung von RECKING (2013) basierend auf Messungen in 78 Kiesbettflüssen schwankt dieser Anteil etwa zwischen 0.01 und 0.2 und beträgt im Mittel etwa 0.11. Daher könnte für eine Umrechnung in eine Oberflächenschicht angenommen werden:

	Gl. 3-3
Umrechnung in Kornverteilung	der Oberflächenschicht

Dabei ist p_{ic} = korrigierte Summenhäufigkeit (relativer Anteil) der Körner mit $D \le D_i$ (mit D_i = Korndurchmesser der Korngrössenklasse *i*). Um die Kornverteilungskurve für die Fraktion < 1cm zu komplettieren, kann entweder eine Volumenprobe herangezogen werden (Sieb-, Schlämmanalyse), oder eine Verteilung nach FULLER (FEHR 1987a, b) angenommen werden. Basierend auf Flusssedimenten und der Annahme optimaler Packungsdichte entwickelte FULLER (ANASTASI 1984) eine einparametrige synthetische Verteilung basierend auf dem D_{max} der Kornverteilung. Die FULLER Kurve beschreibt die Kornverteilung von gut sortierten fluvialen Feinsedimenten. Für Umrechnung der LZA kann für die Feinfraktion eine Kornverteilungskurve nach FULLER (1948) eine gute Näherung für Gebirgsflüsse in der Schweiz und im Alpenraum darstellt. Dabei wird eine theoretische Kornverteilungskurve für den Feinanteil wie folgt berechnet:

$$p_{FUi} = \sqrt{\frac{D_i}{D_{\text{max}}}}$$
Gl. 3-4

Dabei ist p_{FUi} = Summenhäufigkeit (relativer Anteil) der Körner mit $D \le D_i$ gemäss Fullerkurve. Diese Kornverteilung nach FULLER wird anschliessend mit der Kornverteilungskurve für den Grobanteil aus der LZA zusammengeführt. Dabei ist D_{max} der maximale Korndurchmesser der Feinsedimente.

GESCHIEBEANALYSE Beispiel Linienzahlanalyse No

> 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 n Δ% Fraktion [cm]

Abb. 3-5: Beispiel einer Linienzahlanalyse im Feld (links), Auswerteformular (rechts).

Statistische Verfahren der Zusammenlegung

Zur Kombination einer Oberflächen- mit einer Volumenanalyse wurde der Ansatz nach ANA-STASI (1984) durch FEHR (1987a) für Gebirgsflüsse kalibriert und validiert. FEHR (1987b) empfiehlt dazu die starre oder flexible Anpassung der synthetischen Volumenverteilung nach FULLER und anschliessende Zusammenlegung mit der umgerechneten Oberflächenverteilung aus der Linienzahlanalyse.

Bei der Bestimmung von charakteristischen Korngrössen ist auf Grund der weiten Kornverteilung und der schlechten Sortierung mit einer relativ grossen Schwankungsbreite zu rechnen. Statistische Verfahren der Zusammenlegung der LZA oder ähnlicher Methoden beinhalten bei der Anwendung in Wildbächen eine gewisse Unsicherheit, da sie für andere Bedingungen entwickelt wurden und erst für Wildbachbedingungen getestet werden müssen. Allerdings werden die wichtigen charakteristischen Korngrössen (D_{50} , D_{84} , D_{90}) bei groben Wildbächen in der Regel mit der Oberflächenanalyse ermittelt und werden von der unsicheren Zusammenlegung mit der Siebanalyse nur gering beeinflusst.

3.4 Geschiebetransport in steilen Gerinnen

Geschiebetransportvorgänge in Gebirgsflüssen und Wildbächen erfordern die Berücksichtigung mehrerer wichtiger Einflussfaktoren. So müssen die räumlich sehr variable Feststoffmobilisierung, der aktive Sedimenteintrag, eventuell eine Deckschichtbildung bzw. -mobilisierung, die Sedimentverfügbarkeit sowie Übergänge zu murgangartigem Feststofftransport mit berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich ein nur bedingt funktionaler Zusammenhang zwischen Gerinneabfluss und Feststofftransport, welcher in ein und demselben Gerinne stark variieren kann und beispielhaft in Abb. 3-6 und Abb. 3-7 dargestellt ist.

Bei der Bestimmung des Feststofftransports müssen insbesondere die folgenden Aspekte berücksichtigt werden: (i) Transportbeginn, (ii) Geschiebetransportfunktion, (iii) Aufteilung des Fliesswiderstandes (zusätzliche Energieverluste), (iv) evtl. Deckschicht, (v) Sedimentverfügbarkeit.



Abb. 3-6: Geschiebetransportmessungen im Erlenbach mittels Geophon-Sensoren (RICKENMANN & MCARDELL 2007, eq. 7), und Vergleich mit einer laborbasierten Geschiebetransportformel (GI. 2-23), berechnet für ein Gerinnegefälle von S = 0.105.



Abb. 3-7: Geschiebetransportmessungen im Erlenbach mittels Geophon-Sensoren (RICKENMANN & MCARDELL 2007), Beispiele von zwei Hochwasserereignissen.

3.4.1 Fluvialer Feststofftransport

Bei fluvialem Feststofftransport werden die Feststoffkomponenten durch das Medium Wasser bewegt. Sie bewegen sich nicht kontinuierlich sondern pulsierend mit Ruhephasen, springend oder rollend, bei geringem Transport als bodennahe Schicht und bei intensivem Transport mit abnehmender Konzentration in den höheren Schichten (SCHMIDT & ERGENZIN-GER 1992; SMART & JÄGGI 1983; RICKENMANN 1990). Mit zunehmendem Abfluss werden grössere Körner bewegt; nach dem Bewegungsbeginn herrscht also sogenannter selektiver Geschiebetransport (Abb. 3-8). Bedingt durch den selektiven Geschiebetransport können Gebirgsflüsse und Wildbäche eine Deckschicht ausbilden. Dabei vergröbert sich die Sohle durch Auswaschen der Feinanteile, und Grobkomponenten regeln sich ein, wodurch eine höhere Stabilität gegen erneute Erosion entsteht. Die dabei entstehenden Sohlstrukturen sind ein wichtiges Charakteristikum von steileren Kiesbett-Gerinnen (MONTGOMERY & BUF-FINGTON 1997; ROSPORT 1998; WOHL 2000; SCHÄCHLI 1991; GRANT et al. 1990).

In Wildbächen tritt der Feststofftransport oft in Form von Pulsen oder Sedimentwellen auf (Abb. 3-7). Das kann auf variable hydraulische Bedingungen während des Sedimenttransports oder auf diskontinuierliche Sedimentverfügbarkeit und Mobilisierungsmechanismen zurückgeführt werden, welche zum Beispiel durch Turbulenzspitzen oder Nachböschungsvorgänge des Sohlsediments nach Auskolkung von Grobkomponenten verursacht werden. Dabei können folgende Transportvorgänge unterschieden werden:

- Transport über eine intakte Deckschicht.
- Transport über eine Deckschicht mit bedingtem Sedimentaustausch.
- Transport durch permanenten Sedimentaustausch zwischen den transportierten Feststoffen und dem Sohlsediment nach Aufbrechen der Deckschicht (ROSPORT 1998, HUNZIKER 1995, GÜNTER 1971).

Während es sich anfangs um eine selektive, korngrössenabhängige Mobilität der Feststoffe handelt, ist nach dem völligen Aufbrechen der Deckschicht mit gleicher, also korngrössenunabhängiger Mobilität zu rechnen. Das hat wichtige Auswirkungen auf das transportierte Korngrössenspektrum und muss bei langfristigen Transportsimulationen, bei denen die ersten beiden Transportvorgänge einen entscheidenden Einfluss haben, berücksichtigt werden (WEBB et al. 1997, HUNZIKER 1995).



Abb. 3-8: Zusammensetzung von Siebproben des transportierten Geschiebes bei unterschiedlichen Abflüssen sowie des Bachbettmaterials (modifiziert nach BATHURST 1987). Die Vergröberung der Kornverteilung mit zunehmendem Abfluss ist das Resultat von selektivem Geschiebetransport. Das Sohlengefälle beim Messquerschnitt beträgt ca. 5 %. Ein weiterer schwierig zu messender Parameter ist die dynamische Veränderung des Fliesswiderstands während des Transportvorgangs. Die Übergänge zwischen Korn-, Formund Gerinnerauigkeit sind fliessend. Bei beginnender Mobilisierung der Sohle verändert sich überdies die Oberflächenstruktur und damit die Korn- und Formrauigkeit (ERGENZINGER & SCHMIDT 1995; ERGENZINGER et al. 1994). Charakteristische Korngrössenparameter (z.B. D_{30} , D_{50} , D_{90}) weisen in Wildbächen oft Schwankungsbereiche von bis zu 30 % auf (REID & DUNNE 1996; JÄGGI 1992). Vor allem die zeitliche Variabilität ist schwierig zu erfassen und bedingt eine entsprechende Unsicherheit bei den Berechnungen.

Der Feststofftransport kann durch eine funktionale Beziehung zu verschiedenen unabhängigen Parametern ausgedrückt werden:

- Überschreitung der kritischen Schubspannung bzw. des kritischen Abflusses beim Mobilisierungsbeginn. Dieser Parameter ist vor allem im Bereich des Transportbeginns von Relevanz. Er ist auch zur Bewertung der Deckschichtdynamik und bei selektivem Transport nur weniger Teilfraktionen der Kornverteilung von Bedeutung.
- Feststofftransport entsprechend der hydraulischen Belastung durch die Gerinneströmung. Ab dem Beginn von generellem Geschiebetransport (über die gesamte Kornverteilung) tritt dieser Parameter in den Vordergrund. Hier sind vor allem die Parameter hydraulischer Radius *R*, Abflusstiefe *h*, Gerinnegefälle *S* sowie Fliessgeschwindigkeit *V* bzw. Abfluss *q* von Bedeutung.
- Korrekturfaktor zur Berücksichtigung ungleichförmiger Sedimentmischungen. Dieser Parameter berücksichtigt Unterschiede im Bereich der Mobilisierung und Transportleistung. Die Kornverteilung wird dabei oft durch Korngrössen *D*₃₀, *D*₅₀, *D*_m, und *D*₈₄ oder *D*₉₀ ausgedrückt.
- Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der zusätzlichen Energieverluste bei hohem Fliesswiderstand.

Natürliche Gerinnesohlen von Gebirgsflüssen und Wildbächen stellen durch ihr weites Korngrössenspektrum ein Mehrkorngemisch dar. Bei diesen ist der selektive Geschiebetransport beim Ansteigen oder Abfallen der Hochwasserganglinie, knapp nach Mobilisierungsbeginn oder vor Mobilisierungsende, besonders stark ausgeprägt und verursacht Entmischungsvorgänge, die zu Deckschichtbildung führen können. Dieser selektive Geschiebetransport wird dann durch generellen Geschiebetransport abgelöst, wenn auf Grund der hydraulischen Belastung das gesamte Korngrössenspektrum mobilisiert und transportiert wird (Abb. 3-9).



Abb. 3-9: Zunahme des Geschiebetransportes mit dem Abfluss (modifiziert nach BEZZOLA 2005). Anfänglich findet eine selektive Mobilisierung statt. Q_c bezeichnet die initiale Mobilisierung, Q_D den generellen Mobilisierungsbeginn nach Aufbrechen der Deckschicht bzw. bei Mobilisierung auch der gröberen Körner der Oberflächenschicht. Der Bereich mit schwachem Geschiebetransport zwischen initialer Mobilisierung und generellem Mobilisierungsbeginn (Abfluss $Q_c < Q < Q_D$ in Abb. 3-9) wird in der Literatur auch als Phase-1 Transport und der Bereich mit stärker zunehmendem Geschiebetransport für $Q > Q_D$ als Phase-2 Transport beschrieben. Phase-1 Transport entspricht auch dem Transport von feinerem Geschiebe über eine gröbere Deckschicht. Eine vertiefte Diskussion von Messungen und Analysen zum Transport in Phase 1 und 2 findet sich in JACKSON & BESCHTA (1982), RYAN et al. (2005) und BATHURST (2007).

3.4.2 Mobilisierungsbeginn

Der Mobilisierungsbeginn ist ein zentraler Punkt bei der Bewertung von Geschiebetransportvorgängen. Er ist ein anfangs eher zufälliger Vorgang, bei dem durch turbulenzbedingte, sohlnahe Schubsspannungsspitzen einzelne Körner aus dem Sohlverband gelöst und abtransportiert werden (ROSPORT 1998). Basierend auf Untersuchungen der Gleichgewichtsbedingung zwischen strömungsinduziertem Angriff (Scherspannung, Formwiderstand, hydrodynamischer Auftrieb) und der Widerstandskraft des Korns (Reibung, Verkippung, Eigengewicht) formulierte SHIELDS (1936) das Konzept der dimensionslosen SHIELDS Zahl θ . Diese Zahl ist abhängig von der Sohlenschubspannung τ , dem Korndurchmesser *D*, dem Gerinnegefälle *S*, und dem Verhältnis der Sedimentdichte zur Wasserdichte $s = \rho_s/\rho$.

$$\tau = \rho g h S$$
 GI. 3-5

$$\theta = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)D} = \frac{hS}{(\rho_s / \rho_s - 1)D} = \frac{hS}{(s-1)D}$$
GI. 3-6

Die kritische SHIELDS Zahl bei Transportbeginn wird dann als θ_c bezeichnet. Viele Geschiebetransportformeln basieren auf diesem Ansatz einer konstanten Grenzschubspannung für eine gegebene Korngrösse, auch wenn die sohlnahe, räumliche Schubspannungsverteilung genauer betrachtet als turbulenzbedingter Zufallsparameter anzusehen ist. In Abhängigkeit des Gerinnegefälles wird der Erosionswiderstand der Sedimentsohle durch leichteres Abkippen bzw. Abgleiten der einzelnen Körner reduziert (BEZZOLA 2002). Allerdings wird dieser Effekt überlagert von einem verringerten Strömungsangriff auf die Sohle, bedingt durch kleine relative Abflusstiefen. Messdaten zeigen, dass in Summe der zweite Effekt überwiegt, d.h. mit zunehmendem Gerinnegefälle stellt man eine Erhöhung des Wertes für θ_c fest (GI. 3-7, GI. 3-8; Abb. 3-10).

$$\begin{aligned} \theta_c &= 0.15 \; S^{0.25} & \text{Gl. 3-7} \\ \theta_{ci} &= (1.32S + 0.037) \left(\frac{D_i}{D_{50}} \right)^{-\gamma} & \text{Gl. 3-8} \\ \text{(Recking 2009)} \end{aligned}$$

Bei einer natürlichen Sohle mit breiter Kornverteilung kann die Berechnung des Geschiebetransportes auch getrennt für verschiedene Kornfraktionen (Klassen von Korngrössen) erfolgen. Bei dieser sogenannten fraktionsweisen Berechnung des Geschiebetransportes wird über eine sogenannte Versteckfunktion (hiding function) das SHIELDS-Kriterium im Vergleich zu einem Einheitskorn modifiziert (PARKER 2008). In Gl. 3-8 ist sowohl die Abhängigkeit vom Gefälle als auch die Versteckfunktion berücksichtigt; der Index *i* bezieht sich auf ein Perzentil der Korngrössenverteilung. Der Exponent γ liegt typischerweise im Bereich von 0.64 bis 1.0 (RECKING 2009). Ein Exponent $\gamma = 1$ bedeutet, dass alle Korngrössen bei der gleichen absoluten kritischen Sohlschubspannung mobilisiert werden, bei einem Exponenten $\gamma = 0$ hängt die absolute kritische Sohlschubspannung linear vom jeweiligen Korndurchmesser ab (d.h. die SHIELDS Zahl ist konstant und unabhängig von der zu bewegenden Korngrösse).



(a)

Abb. 3-10: Kritische SHIELDS Zahl θ_c bei steileren Gerinnegefällen S und empirische Gleichungen. (a) Daten von LAMB et al. (2008) mit Gl. 3-7; hier ist $\tau_{*c} = \theta_c$; (b) Daten von RECKING (2009) mit Linien nach der Funktion $\theta_c = aS + b$. Die Gl. 3-8 mit dem Exponenten $\gamma = 0.93$ ergibt eine Übereinstimmung von +/-50 % mit den Daten von Abb. 3-10(b). Beide Datensätze umfassen Labor- und Felddaten. [Figure (a) from LAMB et al. (2008), and Figure (b) from RECKING (2009), with copyright permission from Wiley/ American Geophysical Union.]

Besonders bei Gebirgsflüssen und Wildbächen haben die Sohlformen, die geringe relative Abflusstiefe und das weite Korngrössenspektrum einen wesentlichen Einfluss auf die Geschiebemobilisierung (PALT 2001). Für diese Gerinne sollten bei der Geschiebemobilisierung daher folgende Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

- Bestimmbarkeit einer repräsentativen Kornverteilung sowie der Kornpackung und Kornlagerung
- Art der Abhängigkeit zwischen Gerinnegefälle, charakteristischer Korngrösse und relativer Abflusstiefe
- Selektiver Transportbeginn für unterschiedliche Kornfraktionen
- Transportbeginn mit/ohne Deckschicht
- Einfluss der Sohl- und Gerinneformen (verformte Gerinnesohle ebene Sohle nach Mobilisierung aller Sohlformen)

Für Wildbäche ist eine Unterscheidung in Deckschicht und darunter liegendem Sediment (Unterschicht) aufgrund des heterogenen Ursprungs des Bachsediments (heterogene Mischung aus unterschiedlichen Sedimentquellen) schwer möglich. So spiegelt eine in einem Wildbach entlang des Bachlaufes aufgenommene Grobkornanalyse eventuell mehr den räumlich sehr differenzierten, seitlichen Eintrag von Schutt wider, als den Umstand der hydraulischen Sortierung über den Bachverlauf. Die Erfassung kompletter Kornverteilungen ist durch ihre grosse Bandbreite nur mehr durch die statistische Kombination unterschiedlicher Aufnahmeverfahren möglich (FEHR 1987a). Es stellt sich dabei die Frage, ob damit die charakteristischen Korngrössen in ausreichender Genauigkeit für die sehr sensibel reagierenden Deckschichtkriterien ermittelt werden können (PALT 2001).

Viele empirische Untersuchungen zeigen einen Zusammenhang zwischen Gerinnegefälle, relativer Abflusstiefe und Mobilisierungsbeginn. PALT (2001) führt den augenscheinlichen Zusammenhang zwischen Gerinnegefälle und relativer Abflusstiefe auf neigungsbedingte höhere Abflussgeschwindigkeiten und damit verbundener geringerer relativer Abflusstiefe zurück. Geringere relative Abflusstiefen haben, bedingt durch die Reduktion der sohlnahen Abflussgeschwindigkeit, geringere Schubspannungsbelastung der Sohle zur Folge (BEZZOLA 2002). Der scheinbare erhöhte Widerstand steilerer Gerinne wird von PALT (2001) durch die Verformung der Sohle durch Sohlstrukturen erklärt, welche sich ab einer Neigung von 1 %

einstellt. Andere Autoren führen dieses Phänomen auf zusätzliche Dissipationsprozesse bei kleinen relativen Abflusstiefen zurück.

Gemäss SHIELDS (1936) nimmt die kritische Schubspannung für hydraulisch raue Sohlen den konstanten Wert von ungefähr 0.05 ein. MEYER-PETER & MÜLLER (1948) ermittelten für ungleichförmige Korngrössenverteilungen eine kritische SHIELDS Zahl θ_c von 0.047, welche für einen Neigungsbereich bis 2.3 % und relative Abflusstiefen > 10 ermittelt wurde. Für *S* kleiner als ca. 2 % liegt θ_c typischerweise im Bereich von 0.03 bis 0.06, für $D = D_{50}$ (BUFFING-TON & MONTGOMERY 1997). Nach BEZZOLA (2002) muss auf Grund der Kornform mit einer Variationsbreite von θ_c um 40 % gerechnet werden, womit θ_c etwa zwischen 0.028 und 0.066 liegen würde (vgl. auch Abb. Abb. 3-10).

Da in Wildbächen die Bestimmung einer repräsentativen, mittleren Abflusstiefe oft schwierig ist, bietet sich die Anwendung eines alternativen Mobilisierungskriteriums an, bei welchem ein kritischer Einheitsabfluss q_c anstelle einer kritischen SHIELDS Zahl bestimmt wird. Aufgrund von Labormessungen für Gerinnegefälle im Bereich 0.025 $\leq S \leq$ 0.20 schlugen BATHURST et al. (1987) einen Ansatz vor (Gl. 3-9; Abb. 3-11a), der von RICKENMANN (1991) leicht modifiziert angegeben wurde (Gl. 3-10):

$a = 0.15 a^{0.5} D^{1.5} C^{-1.12}$	Gl. 3-9
$q_c = 0.15 \ g D_{50} \ S$	(BATHURST et al. 1987)
0.065(1)1.67=0.5 p 1.5 g -1.12	GI. 3-10
$q_c = 0.065 (s-1)$ $g = D_{50}^{10} S$	(RICKENMANN 1991)

Ein neuerer Ansatz von BATHURST (2013) (Gl. 3-11; Abb. 3-11b) basiert ebenfalls auf Labormessungen und unterscheidet sich nur gering von der laborbasierten Gl. 3-9:

$$q_c = 0.13 \ g^{0.5} \ D_{50}^{1.5} \ S^{-1.146}$$

GI. 3-11 (BATHURST 2013)

Kritische Sohlenschubspannung mit Deckschicht

In Gebirgsflüssen kann eine Deckschicht vorhanden sein, wenn das feinere Geschiebematerial ausgespült wurde. Für den kritischen Abfluss beim Aufbrechen der Deckschicht (Beginn des Geschiebetransportes aus der Sohle) gibt JÄGGI (1992) basierend auf den Untersuchungen von GÜNTER (1971) folgende Beziehung für die dimensionslose Sohlenschubspannung $\theta_{c,D}$ an:

$\theta_{c,D} = \theta_c \left[\frac{D_{m,D}}{D_m} \right]^{2/3} \approx \theta_c \left[\frac{D_{90}}{D_m} \right]^{2/3}$	GI. 3-12 (JÄGGI 1992)

Dabei ist $D_{m,D}$ der mittlere Korndurchmesser der Deckschicht und D_m der mittlere Korndurchmesser der Unterschicht; $D_{m,D}$ kann angenähert durch D_{90} der Unterschicht ersetzt werden (JÄGGI 1992). Unter Verwendung der Manning-Strickler Gleichung kann gezeigt werden, dass der Abfluss pro Einheitsbreite $q \sim h^{5/3} \sim \theta^{5/3}$ ist. Damit lässt sich der kritische Abfluss pro Einheitsbreite beim Aufbrechen der Deckschicht $q_{c,D}$ basierend auf Gl. 3-12 wie folgt ausdrücken, wobei q_c mit Gl. 3-9 oder Gl. 3-10 bestimmt werden kann (BADOUX & RICKENMANN 2008):

$$q_{c,D} = q_c \left[\left(\frac{D_{90}}{D_m} \right)^{2/3} \right]^{5/3} = q_c \left[\frac{D_{90}}{D_m} \right]^{10/9}$$
(BADOUX & RICKENMANN 2008)
(BADOUX & RICKENMANN 2008)

Für steilere Gerinne sollte die Umformung von GI. 3-14 eher auf der (vereinfachten) VPE GI. 2-17 für geringe relative Abflusstiefen beruhen, wonach der Abfluss pro Einheitsbreite $q \sim h^{5/2} \sim \theta^{5/2}$ ist. Der kritische Abfluss pro Einheitsbreite beim Aufbrechen der Deckschicht $q_{c,D}$ lässt sich dann wie folgt ausdrücken:

$$q_{c,D} = q_c \left[\left(\frac{D_{90}}{D_m} \right)^{2/3} \right]^{5/2} = q_c \left[\frac{D_{90}}{D_m} \right]^{5/3}$$
Gl. 3-14

Nimmt man an, dass im Mittel $D_{90}/D_m \approx 2$ ist, ergibt dies nach GI. 3-13 ein Verhältnis ($q_{c,D}/q_c$) = 2.2 und nach GI. 3-14 ein Verhältnis ($q_{c,D}/q_c$) = 3.2, also eine beträchtliche Erhöhung des Grenzabflusses für das Aufbrechen einer Deckschicht.



Abb. 3-11: Normierter kritischer Einheitsabfluss q_c in Funktion des Gerinnegefälles S. (a) Labordaten (BATHURST et al. 1987) (b) Labordaten mit relativ einheitlichen Korngrössen (BATHURST 2013). [Figure (a) from BATHURST et al. (1987) with copyright permission from Blackwell, Oxford; Figure (b) from BATHURST (2013) with copyright permission from Elsevier, Amsterdam.]

Weitere Ansätze zur Berücksichtigung der Deckschichtbildung sind in PORTO & GESSLER (1999), HUNZIKER & JAEGGI (2002) sowie WEICHERT & BEZZOLA (2002) beschrieben. Ein anderer Ansatz zur Bestimmung des Grenzabflusses $q_{c,B}$ beim Aufbrechen bzw. der Zerstörung einer Art "Pflästerungsschicht" aus groben Körnern beruht auf Untersuchungen über die Dimensionierung von Blockrampen mit grossen Blöcken von WITTHAKER & JÄGGI (1986) für Rampengefälle im Bereich 0.05 $\leq S \leq$ 0.25:

$$q_{c,B} = 0.257 (s-1)^{0.5} g^{0.5} D_{65}^{1.5} S^{-1.17}$$
 GI. 3-15
(WITHAKER & JÄGGI 1986)

Dabei entspricht die Korngrösse D_{65} einem "mittleren" Durchmesser der grossen Blöcke und könnte in einem Wildbachgerinne grob etwa durch die Korngrösse D_{90} angenähert werden. Untersuchungen zu Hochwasserereignissen mit Geschiebetransport im Wallis 2000 zeigten, dass mit Gl. 3-15 der Transportbeginn in flacheren Gerinnen mit *S* kleiner als ca. 5 % zum Teil massiv überschätzt wird (BADOUX & RICKENMANN 2008).
Abb. 3-12 vergleicht Abfluss-basierte Ansätze für den Transportbeginn in steileren Gerinnen zusammen mit Naturmessungen aus Gebirgsflüssen im Himalaya (PALT 2001). Wie dieser Vergleich zeigt, kann die grosse Bandbreite des (Korngrössen-abhängigen) Beginns des Geschiebetransports in steileren Gerinnen durch die Annahme einer unteren und oberen Grenzbedingung für den Mobilisierungsbeginn angenähert werden. Als untere Grenzbedingung wird Gl. 3-11 nach BATHURST (2013) vorgeschlagen. Als obere Grenzbedingung (Übergang zur generellen Mobilisierung aller Fraktionen) könnten z.B. Gl. 3-14 oder Gl. 3-15 nach WHITTAKER & JÄGGI (1986) herangezogen werden.



Abb. 3-12: Abfluss-basierte Ansätze zur Geschiebemobilisierung im Vergleich mit Naturdaten aus Gebirgsflüssen im Himalaya (PALT 2001), gezeigt als normierter kritischer Einheitsabfluss in Funktion des Gerinnegefälles S. Links: Vergleich mit Material der Unterschicht. Hier stellt Gleichung Gl. 3-9 angenähert ein unteres Grenzkriterium dar. Rechts: Vergleich mit Material der Deckschicht. Hier stellt Gleichung Gl. 3-15 angenähert ein oberes Grenzkriterium dar. (modifiziert nach PALT & DITTRICH 2002)

3.4.3 Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransportes

Bei der Bewertung von Geschiebetransportvorgängen muss zwischen Ansätzen zur Berechnung der Geschiebetransportkapazität und Ansätzen für den aktuellen bzw. geschätzten Geschiebetransport unterschieden werden. Erstere berechnen zum jeweiligen Reinwasser-Abfluss den potentiell möglichen, maximalen Geschiebetransport. Zweitere sollten eine bessere Berechnung/Abschätzung des tatsächlichen Geschiebetransportes ergeben (z.B. unter Berücksichtigung von zusätzlichen Energieverlusten), welcher bei Gebirgsflüssen um bis zu ca. eine Grössenordnung (JÄGGI 1992), bei Wildbächen um eine bis mehrere Grössenordnungen (RICKENMANN 1997a, 2001a) niedriger liegen kann. Die Ansätze zur Berechnung der Geschiebetransportkapazität beruhen auf Laborversuchen mit ebener Sohle, ohne Deckschicht, mit ausreichendem Geschiebeangebot und meist mit relativen Abflusstiefen grösser als etwa 7 (MEYER-PETER & MÜLLER 1949; SMART & JÄGGI 1983; RICKENMANN 1990). Die modifizierten Ansätze wurden in der Regel von Naturdaten mit groben Bachbettstrukturen, teilweise mit Deckschichtbildung und teilweise auch begrenzter Geschiebeverfügbarkeit, abgeleitet (PALT 2001; RICKENMANN 2005a; CHIARI et al. 2010; RICKENMANN & RECKING 2011).

Die Transportgleichungen können in übersichtlicher Weise durch die SHIELDS Zahl θ gemäss Gl. 3-6 und die dimensionslose Geschiebetransportrate Φ_b gemäss Gl. 3-16 einheitlich dargestellt werden. Die spezifische Geschiebetransportrate q_b (bezogen auf einen Meter Gerinnebreite) kann dann nach Gl. 3-17 berechnet werden.

GI. 3-16 dimensionslose spezifische Geschiebetransportrate

GI. 3-17 spezifische Geschiebetransportrate

MEYER-PETER & MÜLLER (1948) entwickelten basierend auf Laboruntersuchungen die bekannte Formel für den Geschiebetransport in Kiesflüssen, welche für Gerinnegefälle im Bereich $0.0004 \le S \le 0.023$ gültig ist:

$$\Phi_{b} = 8 \left[\left(\frac{k_{st}}{k_{o}} \right)^{1.5} \theta - \theta_{c} \right]^{1.5} = 8 \left[\theta' - \theta_{c} \right]^{1.5}$$

$$Meyer-Peter \& Müller (1948)$$

Der Ausdruck $(k_{st}/k_o)^{1.5}$ in Gl. 3-18 reduziert θ zu θ unter Berücksichtigung der Energieverluste infolge von Formrauigkeit. Nach HUNZIKER (1995) wurde bei diesen Untersuchungen der Sohlwiderstand unterschätzt, und er schlägt eine Reduktion des Koeffizienten von 8 auf 5 vor (s. auch HUNZIKER & JÄGGI 2002). Eine ähnliche Reduktion des Koeffizienten wurde auch von WONG & PARKER (2006) gefunden.

SMART & JÄGGI (1983) erweiterten die Untersuchungen von MEYER-PETER & MÜLLER (1948) auf steile Gerinnegefälle, und entwickelten eine leicht modifizierte Gleichung gültig für 0.0004 $\leq S \leq 0.20$:

$$q_{b} = 4 \left(s - 1 \right)^{-1} \left(\frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} q S^{1.6} \left(1 - \frac{\theta_{c} \left(s - 1 \right) D_{m}}{hS} \right)$$
GI. 3-19
SMART & JÄGGI (1983)

Dabei stellt das Verhältnis (D_{90}/D_{30}) eine empirische Korrektur der Transportleistung entsprechend der Kornverteilung dar, wobei aufgrund der Versuche mit einem Verhältnis (D_{90}/D_{30}) von maximal 10 gerechnet werden soll. Dieses Verhältnis wird in Wildbächen oft überschritten und ist grossen Schwankungen unterworfen. Dieser Korrekturfaktor erhöht den Geschiebetransport und ist qualitativ in Übereinstimmung mit der von WILCOCK & CROWE (2003) vorgeschlagenen Erhöhung des Geschiebetransportes von Kiesfraktionen und grösseren Sedimenten bei zunehmendem Sandgehalt des Gerinnebettes.

RICKENMANN (1990, 1991, 2001a) analysierte die Daten von MEYER-PETER & MÜLLER (1948) sowie von SMART & JÄGGI (1983) zusammen mit weiteren Laborversuchen unter Berücksichtigung erhöhter Schwebstoffkonzentrationen einer Tonsuspension und konnte dadurch den Effekt einer veränderten Fluiddichte besser berücksichtigen (mit der Tonsuspension ergaben sich vergleichsweise grössere Transportraten).

$$\Phi_{b} = 3.1 \left(s - 1 \right)^{-0.5} \left(\frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} \theta^{0.5} \left(\theta - \theta_{c} \right) Fr^{1.1}$$
GI. 3-20
RICKENMANN (1990, 1991)

Gl. 3-20 ist gültig für Gerinnegefälle 0.0004 $\leq S \leq 0.20$, und $Fr = V/(gh)^{0.5}$ ist die FROUDE Zahl. Wird in Gl. 3-20 der Exponent von Fr mit 1.0 angenähert, für eine gleichförmige Geschiebemischung nach SMART & JÄGGI (1983) $(D_{90}/D_{30})^{0.2} = 1.05$ eingesetzt, und für das Dichteverhältnis von Quarzsediment zu Wasser s = 2.68 gesetzt, lässt sich Gl. 3-20 zu Gl. 3-21 vereinfachen (RICKENMANN 2001a). Zudem kann unter Verwendung der Definitionen für Φ_b sowie θ und der Kontinuitätsgleichung q = Vh eine Abfluss-basierte Gleichung abgeleitet werden,

 $\Phi_b = \frac{q_b}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)gD^3}} = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gD^3}}$

 $q_b = \Phi_b \sqrt{(s-1)gD^3}$

indem Gl. 3-20 mit dem Exponenten 1.0 bei der FROUDE Zahl *Fr* in Gl. 3-22 sowie Gl. 3-21 in Gl. 3-23 umgeformt wird.

$$\begin{split} \Phi_{b} &= 2.5 \; \theta^{0.5} \big(\theta - \theta_{c} \big) Fr & & & & & & & \\ GI. \; 3-21 & & & & & \\ RICKENMANN \; (2001a) & & & \\ q_{b} &= 3.1 \left(s - 1 \right)^{-1.5} \left(\frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} \left(q - q_{c} \right) S^{1.5} & & & & & \\ GI. \; 3-22 & & & \\ RICKENMANN \; (2001a) & & \\ q_{b} &= 1.5 \left(q - q_{c} \right) S^{1.5} & & & & \\ GI. \; 3-23 & & \\ RICKENMANN \; (2001a) & & \\ \end{array}$$

Dabei ist q_c der kritische Abfluss pro Einheitsbreite bei Beginn des Sedimenttransports. Gemäss der mathematischen Umformung müsste der Term q_c in Gl. 3-22 bzw. Gl. 3-23 mit V/V_c multipliziert werden (mit der kritischen Fliessgeschwindigkeit V_c , welche dem Abfluss für θ_c entspricht). Dies wird jedoch hier vernachlässigt, da für qc meist eine empirische Funktion benutzt wird. Gl. 3-22 ist gültig für Gerinnegefälle 0.0004 $\leq S \leq$ 0.10; bei höheren Gefällen wird durch grosse Geschiebekonzentrationen in den Laborversuchen die Abflusstiefe deutlich erhöht, was in Gl. 3-20 über θ berücksichtigt ist, in Gl. 3-22 aber unberücksichtigt ist. Gl. 3-22 hat den Vorteil, dass auch ohne detaillierte Angaben Vergleiche mit Naturmessungen möglich sind, wenn der Abfluss bekannt ist oder abgeschätzt werden kann. Der Vergleich einiger Formeln mit den Labordaten der VAW-ETH ist in Abb. 3-13 gezeigt.



Abb. 3-13: (a) Vergleich der im Labor gemessenen Transportraten (VAW-ETH Daten) mit den durch Gl. 3-20 ermittelten Transportraten, ausgedrückt als dimensionslose Transportrate. (b) Vergleich von Gl. 3-18 von MEYER-PETER & MÜLLER (1948) (MPM) mit Gl. 3-20 nach RICKEN-MANN (1990) (Ri) und den im Labor gemessenen Transportraten (VAW-ETH Daten). In der Grafik (b) wurde bei den MPM Daten θ' mit der Korrektur gemäss Gl. 3-18 berücksichtigt.

Für die Labordaten der VAW-ETH für Gerinnegefälle $0.03 \le S \le 0.20$ wurde folgende Gleichung bestimmt:

$$q_{b} = \frac{12.6}{(s-1)^{1.6}} \left(\frac{D_{90}}{D_{30}}\right)^{0.2} (q-q_{c}) S^{2}$$
GI. 3-24
RICKENMANN (1990, 1991)

GI. 3-24 ergibt eine bessere Übereinstimmung mit den Daten für $S \ge 0.10$ als GI. 3-22. Andere Geschiebetransportuntersuchungen für steile Gerinnegefälle (MIZUYAMA 1981; WARD 1986) führten zu einer ähnlichen Gleichung wie GI. 3-24 mit einem Exponenten von 2 beim Gerinnegefälle. Abb. 3-14a zeigt einen Vergleich von gemessenen und mit GI. 3-24 berechneten Geschiebetransportraten für die VAW-ETH Daten der steilen Gerinne. In der gleichen Abbildung sind auch zwei andere, unabhängige Datensätze dargestellt: die Laborversuche von Aziz & SCOTT (1989) in einer konventionellen Rinne umfassen Gerinnegefälle $0.03 \le S \le 0.10$ und Sandkörner mit Grössen von 0.29 bis 1 mm; die Laborversuche von NNADI & WILSON (1992) wurden in einem geschlossenen, horizontalen Kanal unter Druck durchgeführt, mit Druckgefällen von $0.013 \le S \le 0.206$, Sandkörnern von 0.7 mm und Nylonpartikeln von 4 mm Grösse.

Bei steilen Gefällen trägt die hangparallele Komponente des Gewichtes der Sedimentkörner zum Geschiebetransport bei, und ABRAHAMS et al. (2001) bzw. ABRAHAMS (2003) schlagen in Anlehnung an SCHOKLITSCH (1914) folgende Korrektur vor, die über einen entsprechend erhöhten Gefälle-Faktor S_k berücksichtigt wird:

 $S_{k} = S\left(\frac{\sin\varphi_{s}}{\sin(\varphi_{s} - \beta)}\right) = S a_{k}$ GI. 3-25
(ABRAHAMS 2003)

wobei φ_s der natürliche Böschungswinkel (Reibungswinkel) des Geschiebes unter Wasser und β der Winkel der Gerinneneigung ist. Gl. 3-25 wurde in Kombination mit Gl. 3-22 auf die VAW-ETH Daten sowie auf diejenigen von Aziz & Scott (1989) angewendet. Die Resultate sind zusammen mit den nach Gl. 3-22 berechneten Geschiebetransportraten für die Daten von NNADI & WILSON (1992) in Abb. 3-14 (a, b) gezeigt. Die zwei unterschiedlichen Berechnungsansätze führen zu ähnlich guter Übereinstimmung mit den beobachteten Werten. Mit der Gefällskorrektur Gl. 3-25 kann eine Gleichung des Typs Gl. 3-22 oder Gl. 3-23 also über einen sehr grossen Gefällsbereich 0.0004 $\leq S \leq$ 0.20 angewendet werden. Bei hohen Transportraten wird die Gemisch-Abflusstiefe gegenüber der Reinwasser-Abflusstiefe deutlich erhöht, woraus sich eine grössere Sohlenschubspannung ergibt. Dieser Effekt ist in Gl. 3-20 implizit berücksichtigt, da bei deren Ableitung die Gemisch-Abflusstiefe verwendet wurde.



Abb. 3-14: (a) Vergleich von gemessenen und mit Gl. 3-24 berechneten Geschiebetransportraten für die VAW-ETH Daten der steilen Gerinnegefälle und zwei unabhängige Datensätze von Azız & SCOTT (1989) sowie von NNADI & WILSON (1992). (b) Vergleich von gemessenen und mit GI. 3-22 berechneten Geschiebetransportraten. Für die VAW-ETH Daten (MPM: MEYER-PETER & MÜLLER; SJ: SMART & JÄGGI; Ri: RICKENMANN) aller Gerinnegefälle und die Daten von Azız & SCOTT (1989) wurde zusätzlich die Gefällskorrektur nach Gl. 3-25 berücksichtigt. (nach RICKENMANN 2005a)

3.4.4 Berücksichtigung von Energieverlusten

Die Transportformeln für steile Gerinnegefälle, z.B. Gl. 3-20 oder Gl. 3-22, können um den Effizienzfaktor α erweitert werden (d.h. Multiplikation des "konstanten" Koeffizienten von z.B.

1.5 in Gl. 3-23 mit dem Faktor α), welcher Werte zwischen etwa 0.001 bis 1 annehmen kann (RICKENMANN 2001a). Beobachtungen zum Geschiebetransport in Gebirgsflüssen und Wildbächen zeigen bei Sohlengefällen steiler als etwa 3 bis 5 % generell kleinere Werte als Berechnungen mit Geschiebetransportgleichungen (RICKENMANN & KOSCHNI 2010). Dabei sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Der Einfluss von Formverlusten bzw. von Markorauigkeit beim Fliesswiderstand ist schwierig zu quantifizieren.
- Der Beginn von wesentlichem Geschiebetransport ist schwierig zu quantifizieren, da bei einer breiten Kornverteilung des Bachbettes die Fliessverhältnisse und der Bewegungsbeginn (auf komplexe Weise) beeinflusst werden.
- Der Geschiebetransport ist oft durch die Geschiebeverfügbarkeit begrenzt, und nicht durch die Transportkapazität limitiert.
- Für steilere Sohlengefälle ab ca. 10 % ergeben sich z.B. nach Gl. 3-20 oder Gl. 3-24 Feststoffkonzentrationen, welche für Murgänge oder murgangartigen Geschiebetransport eher plausibel sind als für fluvialen Geschiebetransport (RICKENMANN 2005a, 2012).

Zur Bestimmung des Geschiebetransportes unter Berücksichtigung von Energieverlusten durch grobe Rauigkeitselemente (sogenannte Makrorauigkeit) kann z.B. Gl. 3-20 oder Gl. 3-22 in Kombination mit einem Ansatz für die Aufteilung des Fliesswiderstandes (s. Kap. 2.4) verwendet werden. RICKENMANN (2005a) führte eine empirische Funktion ein, um die grossskaligen Rauigkeiten in steilen Gerinnen über ein reduziertes Energieliniengefälle einzubeziehen. Mit dieser Methode konnte für verschiedene Hochwasserereignisse eine bessere Übereinstimmung zwischen in der Natur beobachteten und berechneten Geschiebevolumen erreicht werden (z.B. CHIARI et al. 2010; CHIARI & RICKENMANN 2009, 2011; BADOUX & RI-CKENMANN 2008). Dieser Ansatz wurde von RICKENMANN & RECKING (2011) aufgrund einer grösseren Datenbasis modifiziert. Die Aufteilung des Fliesswiderstandes basiert auf einem früheren Vorschlag von MEYER-PETER & MÜLLER (1948). Das reduzierte Energieliniengefälle S_{red} bezieht sich auf ein Basisniveau des Fliesswiderstandes (für eine Grundrauigkeit des Sohlenmaterials) und bestimmt die Energie, welche für den Geschiebetransport zur Verfügung steht:

$$S_{red} = S\left(\sqrt{\frac{f_o}{f_{tot}}}\right)^e = S\left(\frac{n_o}{n_{tot}}\right)^e$$

GI. 3-26 (RICKENMANN & RECKING 2011)

Das Energieliniengefälle *S* ist gemäss dem Fliessgesetz nach DARCY-WEISBACH GI. 2-2 proportional zum Reibungsbeiwert *f* oder gemäss dem Fliessgesetz nach MANNING-STRICKLER GI. 2-10 proportional zum Manning Koeffizient *n* im Quadrat und der Exponent *e* müsste den Wert 2 aufweisen. MEYER-PETER & MÜLLER (1948) zeigten aufgrund von theoretischen Überlegungen, dass *e* auch kleinere Werte (bis 1.3) annehmen kann, und anhand ihrer Experimente schlugen sie einen empirisch bestimmten Wert *e* = 1.5 vor. RICKENMANN et al. (2006a) schlugen vor, dass plausible Werte für *e* im Bereich von 1 ≤ *e* ≤ 2 liegen.

Für die Berechnung des Geschiebetransportes wird das reduzierte Energieliniengefälle S_{red} entweder via θ in Gl. 3-20 oder direkt in Gl. 3-22 eingesetzt. Die Werte für θ_c sind empirisch bestimmt und beziehen sich in der Regel auf den gesamten Fliesswiderstand (bzw. die totale Sohlenschubspannung). Daher ist bei Verwendung von Gl. 3-20 auch θ_c zu reduzieren. Der reduzierte Wert von θ_c kann so bestimmt werden, dass $\theta_{c,r} = h_c S_{red}(h_c) [(s-1) D_{50}]^{-1}$ den Abflussbedingungen bei Beginn des Geschiebetransportes entspricht, d.h. $S_{red}(h_c)$ und damit $\theta_{c,r}$ konstant sind für ein gegebenes Gerinnegefälle und eine gegebene Kornverteilung (D_{50}, D_{84}) (NITSCHE et al. 2011, 2012b). Alternativ könnte θ_c zu auch mit einem Abfluss-abhängigen Wert von S_{red} wie folgt reduziert werden: $\theta_{c,r} = \theta_c (S_{red}/S)$. Es ist schwierig zu überprüfen, welcher Ansatz plausibler ist.

Der in Kapitel 2.4 vorgeschlagene Ansatz zur Aufteilung des Fliesswiderstandes nach RI-CKENMANN & RECKING (2011) ist im Grunde eine Funktion der relativen Abflusstiefe. Es handelt sich um einen pauschalen, empirischen Ansatz, welcher aber implizit Informationen über eine durchschnittliche Rauigkeitserhöhung in steilen und rauen Gerinnen enthält. In der Studie von NITSCHE et al. (2011) wurden auch andere Ansätze zur Aufteilung des Fliesswiderstandes untersucht, welche zum Beispiel die zusätzlichen Energieverluste berücksichtigen, die durch grosse Blöcke (YAGER et al. 2007; WHITTAKER et al. 1988) oder durch Stufen-Becken Seguenzen (EGASHIRA & ASHIDA 1991) verursacht werden. Alle diese Ansätze wurden mit Gl. 3-21 und Gl. 3-26 mit einem Exponenten e = 1.5 kombiniert, und die berechneten Geschiebefrachten mit Beobachtungen zu effektiv transportierten Geschiebefrachten (Hochwasserereignisse 2005 in der Schweiz; Hochwasserereignisse 2000 im Kanton Wallis, Schweiz; Langjährige Abfluss- und Geschiebemessungen der WSL in Wildbächen der Schweiz) verglichen. Insgesamt ergaben sich über alle Gerinnetypen (Bachbettmorphologien) mit dem empirischen Ansatz nach RICKENMANN & RECKING (2011) und dem mehr physikalisch basierten Ansatz von YAGER et al. (2007) die besten Resultate. Einige Ergebnisse sind in Abb. 3-15 gezeigt.



Abb. 3-15: Verhältnis berechnetem zu gemessenem Geschiebevolumen (V_{ber}/V_{gem}), berechnet mit verschiedenen Gleichungskombinationen (Zeilen; definiert in Tab. 3-3) und unterschieden nach Datengruppen. Die (V_{ber}/V_{gem})-Verhältnisse sind in drei Klassen angegeben, von denen die mittlere Klasse alle Berechnungen innerhalb eines Faktors zehn um die gemessen Geschiebefrachten repräsentiert. Die grauen Zahlen geben den Median der (V_{ber}/V_{gem})-Verhältnisse an. Die Gruppe «Langzeitdaten» besteht aus 207 Transportereignissen, die Gruppe «Ereignisdaten» besteht aus 9 Transportereignissen. Die Gruppe «Alle Daten» besteht aus den Geschiebesummen der einzelnen Gerinne, um jeden Bach unabhängig von der Ereignisanzahl gleich zu gewichten. Der Ansatz von WHITTAKER et al. (Ri-W) wurde bei vier Gerinnen nicht angewendet (aus NITSCHE et al. 2012b).

Tab. 3-3 zeigt die verwendeten Kombinationen von Gleichungen für den Geschiebetransport und für die Aufteilung des Fliesswiderstandes, nach welchen die Resultate in Abb. 3-15 geordnet sind. Für detailliertere Untersuchungen zu einem gegebenen Gerinnetyp (z.B. Einflusses von groben Blöcken in unterschiedlicher Konzentration) sind spezifische Ansätze (YAGER et al. 2007; WHITTAKER et al. 1988 für Gerinnegefälle nicht grösser als etwa $S \approx 0.07$) vorzuziehen, wofür aber genauere Erhebungen zur Bachbettmorphologie nötig sind. Zur Darstellung der Unsicherheit der Abschätzungen zum Geschiebetransport können die für einen bestimmten Gerinnetyp geeignetsten Ansätze zur Aufteilung des Fliesswiderstandes verwendet und die Bandbreite der Resultate betrachtet werden.

Der in NITSCHE et al. (2011, 2012b) verwendete Exponent e = 1.5 ist vergleichbar mit dem Bereich der besten Exponenten gemäss den Simulationen mit dem Programm SETRAC (CHIARI & RICKENMANN 2009, 2011).

Tab. 3-3: Verwendete Abkürzungen für die Kombination von Gleichungen für den Geschiebetransport und für die Aufteilung des Fliesswiderstandes. Nr. der Gleichung aus Nitsche et al. (2012b).

Geschiebetransport	Gleichung	Partitionierung der Fliesswiderstände	Gleichung	Abkürzung
RICKENMANN (2001a)	Gl. (17)	keine Reduktion (no reduction)	1	Ri-no
RICKENMANN (2001a)	Gl. (25)	PAGLIARA & CHIAVACCINI (2006)	Gl. (9) + (10)	Ri-PC
RICKENMANN (2001a)	Gl. (25)	WHITTAKER et al. (1988)	Gl. (3) + (4)	Ri-W
RICKENMANN (2001a)	Gl. (25)	EGASHIRA & ASHIDA (1991)	Gl. (7) + (8)	Ri-EA
RICKENMANN (2001a)	Gl. (25)	YAGER et al. (2007)	Gl. (11) + (12)	Ri-Y
RICKENMANN (2001a)	Gl. (25)	RICKENMANN & RECKING (2011)	Gl. (16)	Ri-RR

3.4.5 Übergang zu murgangartigem Geschiebetransport

Die Eigenschaften von murgangartigen Transportvorgängen sind komplex und hängen von verschiedenen Faktoren ab wie z.B. der Viskosität und Turbulenz der Mischung, dispersiven Kräften durch Kollision der Grobkomponenten, Reibungskräften zwischen den (gröberen) Körnern und der Scherfestigkeit der Matrix (bestehend aus Feinkomponenten und Wasser). Je nach Dominanz einer dieser Faktoren kann grob in Schlammströme (mud flows) und (granulare) Murgänge (debris flows) unterschieden werden. Diese vereinfachte Darstellung berücksichtigt allerdings nicht, dass bei murgangartigen Abflüssen die Feststoffkonzentration gegen den hinteren Bereich eines Murenschubes oftmals abnimmt. Murgangartiger Feststofftransport kann durch intensive Feststoffeinstösse, durch Verflüssigung grosser Sohl-kompartimente oder nach Durchbruch von Verklausungen und Dämmen entstehen (TAKAHASHI 1991).

Ab einem Volumenanteil von mehr als etwa 5 % Silt oder Ton zeigen murgangartige Transportprozesse zunehmend viskoses Verhalten. Ab einem Volumenanteil an Feststoffen insgesamt von 45 bis 55 % bildet sich eine Schlammstrom oder ein Murgang im eigentlichen Sinn aus (COSTA 1984; JULIEN & O'BRIEN 1997). Nach empirischen Untersuchungen häuft sich die Entstehung von Murgängen oder murgangartigen Transportprozessen in steilen, oft flächigen Hangschuttbereichen mit 40 bis 58 % Neigung, an der Kontaktzone zwischen Fels/Hangschutt mit Neigungen zwischen 45 und 70 %, in Runsen zwischen 45 und 70 % und in Wildbachgerinnen zwischen 23 und 65 % Geländeneigung (HAEBERLI et al. 1991; RI-CKENMANN & ZIMMERMANN 1993). Diese Ergebnisse decken sich mit Untersuchungen, bei denen eine Änderung des Mobilisierungsmechanismus hin zu rutschungsartiger Mobilisierung der Bachsohle ab einer Sohlneigung von 20 % unter Laborbedingungen mit einheitlichem Sediment festgestellt werden konnte (RICKENMANN 1990; SMART & JÄGGI 1983). Aus diesen Gründen ist in Wildbachgerinnen ab einer mittleren Sohlneigung von mehr als etwa 20 % und Fehlen von stabilisierenden Sohlstrukturen mit murgangartigen Transportvorgängen zu rechnen (JÄGGI 1992). Die Formeln von SMART & JÄGGI (1983) und RICKENMANN (1990) prognostizieren bei Gerinnegefällen steiler als etwa 10 bis 15 % und hohen Abflussintensitäten Feststoffkonzentrationen, wie sie für murgangartigen Transport typisch sind. Bei grossen Fliesswiderständen (strukturierte Wildbachgerinne) und Abflüssen nahe des Transportbeginns überschätzen solchen Formeln die beobachten Transportraten zum Teil sehr stark.

Wie die Untersuchungen von SMART & JÄGGI (1983) und RICKENMANN (1990) sowie Labor/Feldbeobachtungen zeigen, treten ab Gerinnegefällen steiler als etwas 20 % bereits sehr hohe Sedimentkonzentrationen auf. Eine Extrapolation auf noch steilere Gefälle führt zu ähnlich hohen Transportraten wie sie aus Feldversuchen zur Bildung von Murgängen beobachtet wurden. Zudem muss ab Grenzneigungen von etwa 20 – 25 % mit einer generellen Instabilität der Sohle und einem kontinuierlichen Übergang von fluvialem zu murgangartigem Geschiebetransport gerechnet werden. Auch Vergleiche von Abflusskriterien für beginnenden Geschiebetransport und für Murgangbildung sowie von empirischen Fliessgesetzen für Reinwasser-Abfluss und Murgänge deuten darauf hin, dass mit einem kontinuierlichen Übergang gerechnet werden kann (RICKENMANN 2012). Ein eher kontinuierlicher Übergang der Ereignisfrachten wird auch in Abb. 3-16 illustriert.



Abb. 3-16: Relativ kontinuierlicher Übergang der Ereignisfrachten von fluvialem Transport zu Murgängen. Die Daten stammen vom Unwetter des Augusts 2005 in der Schweiz (RICKENMANN & KOSCHNI 2010). Die violette Linie entspricht der Integration von Gl. 3-23 für fluvialen Geschiebetransport über die Hochwasserdauer, wobei ein Porenanteil der Ablagerungen von 30 % berücksichtigt ist, und das Gerinnegefälle *S* wurde bachaufwärts der Ablagerungen bestimmt (RICKENMANN & KOSCHNI 2010). Bei den drei Murgangdaten mit Bachnamen wurden durch grosse Hanginstabilitäten viele Sedimente in das Gerinne eingetragen. Für Einzugsgebietsflächen *A*_c kleiner als 25 km² folgen die anderen Murgangdaten etwa dem Trend der Daten für fluvialen Transport.

3.4.6 Bemerkungen zur Berechnung des Feststofftransports

In Wildbächen ist aufgrund einer stark wechselnden Feststoffbereitstellung und einer sehr breiten Korngrössenverteilung mit grossen Schwankungen der Feststofftransportrate und einer ausgeprägten Phase selektiven Transports zu rechnen. Daraus lassen sich drei Grundaussagen ableiten:

• Die Feststofftransportrate weist vor allem bei geringen bis mittleren Sohlenbelastungen nur einen bedingten funktionalen Zusammenhang mit dem Abflussverlauf auf. Dabei hat der obere Schwellenwert, die maximale Transportkapazität (quasi-ebene Sohle bei optimalem, uneingeschränktem Sedimentangebot), die relativ höchste Genauigkeit. Die untere Bandbreite kann durch die Feststoffverfügbarkeit, die Anwendung eines Deckschichtkriteriums bzw. höhere Grenzbelastung bei Mobilitätsbeginn, oder durch die Berücksichtigung von Energieverlusten abgeschätzt werden.

 Durch die breite Kornverteilung und sehr heterogene Sedimentverhältnisse findet bei geringen bis mittleren Sohlenbelastungen ein selektiver Geschiebetransport statt. Dies trägt zur Bildung einer Deckschicht bei und resultiert in sehr differenzierten, örtlich stark variierenden Kornverteilungen, welche oft nur schwierig oder ungenau bestimmt werden können. Die hohe Sohlrauigkeit und das Vorhandensein von Sohlformen reduziert die effektive hydraulische Belastung des Bachbettes.

Kritische Sohlenschubspannung bzw. kritischer spezifischer Abfluss

Grundlage zur Berechnung des Feststofftransports ist neben dem charakteristischen Korndurchmesser und der Längsneigung vor allem das Verhältnis von aktueller zu kritischer Schubspannung. Die kritische Schubspannung reagiert gerade bei steilen Gerinnen sehr sensibel auf Variationen der Abflusshöhe, weshalb einige Berechnungsmethoden auch den weniger sensiblen Ansatz des kritischen spezifischen Abflusses anwenden. Neuere Untersuchungen zeigen tendenziell eine Zunahme der kritischen dimensionslosen Sohlenschubspannung θ_c mit zunehmendem Gerinnegefälle (LAMB et al. 2008; RECKING 2009; BUNTE et al. 2013); dabei wurde θ_c mit der totalen Sohlenschubspannung bestimmt.

Transportmindernde Wirkung der Deckschicht – selektiver Transport

Durch die Berechnung von θ_c bzw. q_c nach Deckschichtkriterien kann der transportmindernden Wirkung der Deckschicht Rechnung getragen werden. Das ist vor allem dann von Bedeutung, wenn nicht extreme Ereignisse nachgebildet werden sollen, sondern bei kleineren Abflüssen über längere Zeit transportierte Geschiebefrachten von Interesse sind. Für die Schwankungsbreite des Transportbeginns mit oder ohne Deckschicht kann mit einem Faktor von etwa 2 bis 3 bezogen auf θ_c bzw. q_c gerechnet werden.

Berechnung des Feststofftransportes

In Wildbächen mit typischerweise grossen Gerinnegefällen ist nur eine begrenzte Anzahl von Transportformeln abgesichert und daher anwendbar. Dabei muss grundsätzlich zwischen Formeln zur Ermittlung der Transportkapazität (maximal mögliche Transportintensität) und zur Ermittlung einer reduzierten Transportrate infolge von hohen Fliesswiderstände (zusätzliche Energieverluste, z.B. mit Gl. 3-26 berücksichtigt) unterschieden werden. Werden Geschiebefrachten gemäss der Transportkapazität berechnet, so sind diese eher für Murgänge oder murgangartigen Abfluss repräsentativ. Die Berechnungen mit Berücksichtigung der hohen Energieverluste gelten für Verhältnisse mit fluvialem Geschiebetransport.

3.5 Schwemmholz in Wildbächen und Gebirgsflüssen

In gebirgigen und bewaldeten Einzugsgebieten kann Holz durch Erosion und Rutschungen, durch Lawinen oder durch Sturm (Windwurf) in die Bachgerinne gelangen. Je nach Art und Herkunft spricht man auch von Wildholz, Totholz, Altholz, Lawinenholz oder Nutzholz. Bei Transport durch Wasser im Gerinne werden die Begriffe Schwemmholz, Unholz oder Schadholz verwendet (RIMBÖCK 2003; MIKLAU et al. 2011).

3.5.1 Gefahren im Zusammenhang mit Schwemmholz

Einen Überblick zur Schwemmholzproblematik in Gebirgsflüssen und Wildbächen geben HARTLIEB & BEZZOLA (2000), MAZZORANO (2009) und RUDOLF-MIKLAU et al. (2011). Bei Hochwasserereignissen verursacht Schwemmholz oft Probleme durch Verklausungen bei Brücken, Durchlässen oder auch natürlichen Engstellen. Die zwei wichtigsten Auswirkungen dabei sind: (i) Verklausungen oder temporäre Blockierungen bzw. Behinderungen des Abflusses von Wasser und Geschiebe in natürlichen Gerinneabschnitten können die Bildung von Murgängen begünstigen (RICKENMANN 2003), (ii) das Ausbrechen des Abflusses aus dem Gerinnebreich zum Beispiel auf dem Wildbachkegel kann zu grösseren Ablagerungen und Übermurungen führen. Eine andere häufige und unerwünschte Folge bei zu viel Schwemmholz ist das teilweise oder vollständige Verklausen von (teilweise) offenen Geschieberückhaltesperren, wodurch eine beabsichtigte Dosierwirkung bezüglich des Geschiebetransportes während eines Hochwasserereignisses beeinträchtigt oder vollständig unterbunden wird. Im Weiteren kann es dabei auch zur Zerstörung von Brücken kommen, oder das Schwemmholz kann durch Anprall an Gebäuden Schäden verursachen.

3.5.2 Art und Menge an Schwemmholz

Angaben zu Art und Herkunft des Holzes in den Gerinnen finden sich in HARTLIEB & BEZZOLA (2000) sowie in RIMBÖCK (2003). Wenn das Holz einmal im Gerinne liegt, ist vor allem die Form von Bedeutung, d.h. die Abmessungen der einzelnen Elemente, ob die Stücke beastet sind oder nicht und vor allem spielt das Vorhandensein von bzw. der Anteil an Wurzelstöcken eine wichtige Rolle. Im Weiteren hat auch die Holzart und die Wasseraufnahme, und damit die Dichte des Holzes einen Einfluss auf die Mobilisierbarkeit im Gerinne bei Hochwasser.

Was mögliche Holzmengen betrifft, kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen der effektiven Schwemmholzmenge, welche bei Hochwasser transportiert wird, und der Menge des potentiell mobilisierbaren Holzes, welches in den Gerinnen herumliegt oder aus bachnahen Zonen eingetragen werden könnte. Untersuchungen anhand von Daten aus den Alpen, aus Japan und Nordamerika zeigten, dass sowohl die transportierte Schwemmholzmenge als auch das Schwemmholzpotential mit der Einzugsgebietsgrösse grob korreliert werden kann (RICKENMANN 1997b; RIMBÖCK 2003). Im Weiteren ist die transportierte Schwemmholzmenge auch abhängig von der Wasserfracht oder der Feststofffracht eines Hochwasserereignisses (RICKENMANN 1997b). Um genauere Aussagen über Schwemmholzpotential und -menge machen zu können, sind detailliertere Erhebungen in einem gegebenen Einzugsgebiet nötig, wobei Faktoren wie Waldzustand, Erosionsprozesse, Abflussprofile und Sohlneigung zu berücksichtigen sind. RIMBÖCK (2003) entwickelte ein Verfahren für eine luftbildbasierte Abschätzung des Schwemmholzpotentials.

Detaillierte Aufnahmen der Schadensprozesse für das Hochwasser 2005 in der Schweiz und Erkenntnisse aus einer Studie in Wildbächen (RICKLI & BUCHER 2006) erlaubten für ausgewählte Einzugsgebiete eine Bilanzierung und eine Zuordnung des Schwemmholzeintrags zu den Eintragsprozessen Rutschung, Murgang, Ufererosion und Mitreissen von liegendem Holz im Gerinne (WALDNER et al. 2008, 2009). MÄCHLER (2009) entwickelte ein GIS-Verfahren zur Abschätzung von potentiellen Schwemmholzeinträgen durch Rutschungen. Die Untersuchungen zu den Hochwassern 2005 in der Schweiz beinhalten auch die Erstellung von Schwemmholzbilanzen mit Identifizierung von Ort und Ausmass des eingetragenen und abgelagerten Schwemmholzes sowie von Art des Schwemmholzes (WALDNER et al. 2007, 2008, 2009). Die neuen Daten bestätigten im Wesentlichen auch bisherige Abschätzformeln. Abb. 3-17 zeigt die in der Schweiz bei Hochwasserereignissen transportierte Menge an Schwemmholz in Abhängigkeit der Fläche des Einzugsgebietes. Schwemmholz kann auch durch die Prozesse Lawinen, Schneedruck und Windwurf in Wildbachgerinne eingetragen werden (RUDOLF-MIKLAU et al. 2011).



Transportiertes Schwemmholz [m³]

Abb. 3-17: Bei Hochwasserereignissen in der Schweiz transportierte Menge an Schwemmholz in Abhängigkeit der Fläche des Einzugsgebietes (WALDNER et al. 2008).

3.5.3 Transport von Schwemmholz und Verklausungsgefahr

Der Transportbeginn von im Gerinne liegenden Holzstücken hängt im Wesentlichen von den Strömungsbedingungen, der Holzart (Dichte, Beastung, Wurzeln) sowie von der räumlichen Lage im Bezug auf den Strömungsangriff ab (BEZZOLA et al. 2002; BRAUDRICK & GRANT 2000, 2001). Aufgrund von Laboruntersuchungen zeigt sich, dass der Transport von Holzstämmen bei relativen Abflusstiefen $h/d \sim 0.5$ bis 1.5 einsetzt, wobei *d* den Stammdurchmesser bezeichnet. Die kritischen Werte von h/d nehmen im erwähnten Bereich zu mit zunehmender FROUDE Zahl des Abflusses sowie mit zunehmender Beastung oder bei Präsenz von Wurzelstöcken, während die kritischen Werte für h/d bei gleichzeitigem Geschiebetransport eher im unteren Bereich liegen.

Bei den Transportdistanzen von Schwemmholz zeigen sich grössere Werte wenn die Stammlängen kleiner sind als die mittlere Gerinnebreite. Schwemmholz wird in der Regel schwimmend an der Oberfläche transportiert. Nach RIMBÖCK (2003) schwimmen Nadelholz, Wurzelstöcke und altes, getrocknetes Holz aufgrund der geringen Dichte fast immer, das schwere Eichen- und Buchenholz dagegen nur selten. Sperriges, stark verzweigtes und ausladendes Holz wie z.B. ein Wurzelstock schwimmt erst bei grosser Fliesstiefe und wird zuvor oft rollend an der Bachsohle verfrachtet. Während des Transportvorganges wird die Lage des Holzes durch die turbulente Strömung ständig verändert. Oft werden die Hölzer parallel zur Strömungsrichtung ausgerichtet. Beim Transport findet eine Verkleinerung des Schwemmholzes statt. Nach ZOLLINGER (1983) kann ein ganzer Baum mit Krone und Wurzelstock beim Transport im Gerinne innerhalb weniger Meter entastet, geschält und in 1 bis 5 m lange Stücke zerbrochen werden.

Ablagerung von Schwemmholz findet unter natürlichen Bedingungen statt, sobald der Abfluss zurückgeht und der Auftrieb und die Strömungskraft für den Weitertransport nicht mehr ausreichen. Nach Ablagerung einzelner Stücke können sich durch weitere Anlagerung von Schwemmholz relativ flache Haufen bilden. Beim Transport einzelner, kürzerer Stämme besteht nur eine relativ geringe Verklausungsgefahr, da die Stämme sich leicht längs ausrichten und so die Engstelle passieren können.

Einen Überblick zu mögliche Massnahmen zur Minderung der Verklausungsgefahr geben LANGE & BEZZOLA (2006). Die Verklausungsgefahr im Bereich von Brückenguerschnitten wurde im Labor in hydraulischen Modellversuchen untersucht (BEZZOLA et al. 2002). Bei einer schubweisen Zufuhr von Holzmischungen erreichte die Verklausungswahrscheinlichkeit p_{v} (Anzahl Versuche mit Verklausung im Verhältnis zu allen Versuchen der gleichen Kategorie) Werte von 0.2 bis 1.0. Dabei war p_v deutlich grösser bei einer Präsenz von Wurzelstöcken. Die Verklausungswahrscheinlichkeit von einzelnen Holzstücken hängt vor allem von deren Abmessungen relativ zur Durchlassöffnung ab. Im Falle von Einzelstämmen ergab sich eine Zunahme bis zu p_v = ca. 0.4 im Bereich 0.5 < L_h/B < 2, mit L_h = Länge des Einzelstammes und B = Breite der Durchlassöffnung. Im Falle von Wurzelstöcken ergab sich eine markante Zunahme bis zu p_v = 1.0 im Bereich 0.6 < d_W^*/H <= 1, mit H = lichte Höhe der Durchlassöffnung, $d_{W^*} = (d_{Wmax} d_{Wmin} L_h)^{1/3}$, mit d_{Wmax} , $d_{Wmin} =$ maximale bzw. minimale Abmessung des Wurzeltellers und L_h = Länge des Stammfortsatzes. Zusammenfassend wird aus dieser Untersuchung zur Verminderung der Verklausungsgefahr empfohlen, dass die Sohlbreite des Gerinnes etwa der zweifachen Abmessung der zu erwartenden Stammlänge entsprechen sollte, und dass die lichte Höhe unter der Brücke mindestens das 1.7-fache der massgebenden Abmessung der zu erwartenden Wurzelstöcke betragen sollte. Die Versuche zeigen weiter, dass die Schwemmholzmenge primär für den zeitlichen Verlauf des Verklausungsprozesses massgebend ist. Ob es überhaupt zu einer Verklausung kommt, hängt aber in erster Linie von der Abmessung und Form der gröbsten Komponenten ab (LANGE & BEZ-ZOLA 2006).

3.6 Kritische Gerinnequerschnitte und potentielle Ablagerungen

Bei der Abschätzung der Hochwassergefährdung entlang geschiebeführender Wildbäche und Gebirgsflüsse sind grundsätzlich drei Aspekte zu beurteilen: (i) Hydraulische Beurteilung, ob die Abflusskapazität des vorhandenen Gerinne ausreicht, um das Hochwasser schadlos abzuleiten; (ii) Wann und wo kann es bei intensiver Geschiebezufuhr zu Ablagerungen kommen, welche zur Ausuferung des Abflusses führen?; (iii) Wann und wo kann intensiver Abfluss mit wenig Geschiebe zu Erosionen führen, welche zum Beispiel die Stabilität von Uferböschungen und Fundationen von Konstruktionen gefährden? Die Beurteilung dieser Aspekte kann grundsätzlich auf zwei verschiedenen Detaillierungsebenen erfolgen: (a) Mit einfachen Abschätzungen der hydraulischen Verhältnisse und des Geschiebetransportes an kritischen Stellen (Querschnitten), verbunden mit einer integrativen Abschätzung möglicher Auswirkungen über das ganze Hochwasserereignis; oder (b) Unter Anwendung von numerischen Modellen zur Simulation der Hydraulik und des Geschiebetransportes, wobei die Erfahrung damit vor allem im steileren Gefällsbereich bisher beschränkt ist.

Bei den einfachen Abschätzungen kann man im Wesentlichen die hier vorgestellten Berechnungsverfahren anwenden. Falls es zu bedeutenden Ablagerungen im Gerinnebereich kommt, ist mit Ausuferungen des Abflusses und Ablagerungen des Geschiebes ausserhalb des Gerinnes, z.B. auf dem Wildbachkegel, zu rechnen. Besonders gefährdet für kritische Ablagerungen sind Gefällsknicke im Längenprofil (Abnahme des Gerinnegefälles, ohne Zunahme des Abflusses). Wenn solche Gefällsknicke zudem noch im Bereich von Brücken liegen, ist bei Schwemmholztransport die Gefahr von Verklausungen besonders gross. Berechnungsverfahren zur Abschätzung des Ablagerungsverhaltens bei Gefällsknicken sind in BEZZOLA et al. (1996) sowie in FRENCH et al. (2001) beschrieben.

Bei der Berechnung der Geschiebetransportkapazität des Gerinnes auf dem Kegel ist hier noch auf den Spezialfall der Wildbachschalen mit einer festen (und glatten) Sohle hinzuweisen. In diesem Fall ist die Geschiebetransportkapazität deutlich grösser als in einem natürlichen Gerinne mit beweglicher Sohle, und es müssen modifizierte Ansätze verwendet werden (HUNZINGER & ZARN 1996; SMART & JÄGGI 1983). Wenn der geschiebeführende Abfluss das Gerinne verlässt, müssen die möglichen Fliesswege und Ablagerungsstellen auf dem Kegel anhand der Topographie abgeschätzt werden. Bauwerke (Gebäude, Strassen) können das Fliess- und Ablagerungsverhalten wesentlich beeinflussen. Gerade im besiedelten Bereich müssen daher je nach Ablagerungsverlauf (welcher zusätzlich vom Schwemmholzanfall beeinflusst werden kann) eventuell unterschiedliche Szenarien des Hochwasserablaufes berücksichtigt werden. Im Wesentlichen ist bei einer Übersarung (= flächige fluviale Ablagerungen) des Kegels die gesamte Ereignisfracht (abzüglich des Anteils, welcher im Gerinne abgelagert wird) entlang der Fliesswege zu verteilen. Die mittleren Ablagerungsmächtigkeiten sind dabei eher kleiner als bei Murgangablagerungen auf dem Kegel, und die gröberen Geschiebekörner lagern sich präferentiell in steileren Zonen ab, während die feineren Partikel bis in flachere Zonen transportiert werden können.

3.7 Numerische Simulationsmodelle

Grundsätzlich ist die Entwicklung von hydraulisch-sedimentologischen, numerischen Simulationsmodellen für Kies- und Sandflüsse mit flacheren Gefällen schon sehr weit fortgeschritten. Speziell für steile Gerinne wurden bisher hingegen nur wenige solche Simulationsmodelle entwickelt, wie z.B. SHESED (WICKS & BATHURST 1996), ETC (MATHYS et al. 2003), SETRAC (RICKENMANN et al. 2006a) und PROMAB (RINDERER et al. 2009). Diese Modelle sind grundsätzlich ähnlich wie für Gebirgsflüsse entwickelte numerische Sedimenttransportmodelle, wie z.B. MORMO (SCHILLING & HUNZIKER 1995) und BASEMENT (VETSCH et al. 2005). Die Erfahrung mit der Anwendung von solchen Simulationsmodellen ist für den steileren Gefällsbereich und vor allem für Wildbäche aber bisher sehr beschränkt. Vor allem bezüglich der Simulation von Geschiebeablagerungen auf Wildbachkegeln besteht noch kaum Erfahrung.

Das eindimensionale Geschiebetransportmodell SETRAC (RICKENMANN et al. 2006a; CHIARI et al. 2010) wurde an der Universität für Bodenkultur in Wien entwickelt und anhand von Laborversuchen und von gut dokumentierten, geschiebeführenden Hochwasserereignissen (u.a. Hochwasser vom August 2005 in der Schweiz) auf die Eignung bei steilen Gefällen getestet (CHIARI & RICKENMANN 2009, 2011). Das Simulationsmodell wurde speziell für die Anwendung in Wildbacheinzugsgebieten und in Gebirgsflüssen entwickelt, wobei ein reduziertes Transportvermögen infolge von hohen Energieverlusten wegen Makrorauigkeit berücksichtigt wird. TomSed ist das Nachfolgemodell von SETRAC; es ist frei verfügbar unter http://www.bedload.at. Zur Berücksichtigung der erhöhten Energieverluste für den Geschiebetransport wurde in SETRAC und TomSed ein Ansatz zur Aufteilung des Fliesswiderstandes verwendet. Dieser Ansatz zur Aufteilung des Fliesswiderstandes basiert (nur) auf 373 Fliessgeschwindigkeits-Messungen. Er führt zu einer ähnlichen Reduktion des Energieliniengefälles wie der hier vorgestellte Ansatz zur Aufteilung des Fliesswiderstandes von RICKEN-MANN & RECKING (2011), welcher auf 2890 Fliessgeschwindigkeits-Messungen beruht. In einer neuen Version von TomSed ist der neue Ansatz zur Aufteilung des Fliesswiderstandes von RICKENMANN & RECKING (2011) implementiert. Für die schnelle Berechnung von Geschiebeverlagerungen in alpinen Einzugsgebieten wurde an der WSL das eindimensionale Geschiebetransportmodell sedFlow entwickelt, welches die neueren Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransportes in steilen Gerinnen berücksichtigt. Das Programm sedFlow erlaubt die Simulation vieler verschiedener Szenarien oder die Durchführung von Sensitivitätsanalysen mit Variation verschiedener Eingabe- und Modellparameter in relativ kurzer Zeit. Mit sedFlow wurden für eine Modelleichung Geschiebetransportberechnungen u.a. für die zwei Schweizer Gebirgsflüsse Kleine Emme und Brenno durchgeführt (Heimann et al. 2014; Rickenmann et al. 2014). Das Programm sedFlow ist frei verfügbar unter http://www.wsl.ch/sedFlow.

4 Murgänge

4.1 Eigenschaften von Murgängen

Murgänge treten in den Alpen in (steilen) Wildbächen praktisch jedes Jahr auf, und solche Ereignisse führen immer wieder zu beträchtlichen Schäden. Ein Murgang ist ein in der Regel schnellfliessendes Gemisch von Lockermaterial und unterschiedlichen Anteilen von Wasser. Murgänge weisen an der Front eine hohe Feststoffkonzentration auf und zeichnen sich durch ein schubartiges Fliessverhalten aus, das sich deutlich vom Reinwasser-Abfluss unterscheidet.

Die Kornzusammensetzung von Murgängen kann sehr verschieden sein. In den Alpen sammeln sich an der Front des Murganges häufig grobe Blöcke an. Meist wird auch in den übrigen Teilen eines Murgangschubes gröberes Geschiebe transportiert und bei einem Ausbruch auf dem Kegel abgelagert. Man spricht dann auch von *granularen Murgängen* (Abb. 4-1). Bei den *Schlammströmen* (Abb. 4-2) dominieren das Feinmaterial und das Wasser, während die groben Steine und Blöcke in der Regel fehlen oder keinen wesentlichen Einfluss auf das Fliessverhalten haben. Im hinteren Bereich eines Murganges sind die Feststoffkonzentrationen meist geringer als im vorderen Teil (Abb. 4-3). Die Verhältnisse bei der Ablagerung sind dann ähnlich wie bei den Prozessen "Übersarung" (fluvialer Geschiebetransport) oder "Überschwemmung" (vgl. auch BWW/BRP/BUWAL 1997).

Je nach Materialzusammensetzung gibt es verschiedene theoretische Ansätze zur Beschreibung des Fliessverhaltens. Aufgrund von Beobachtungen in der Natur ist eine Einteilung in verschiedene Typen bisher nur ansatzweise möglich. Aus diesem Grund ist die Terminologie bzw. Klassifikation von Murgängen auch nicht sehr scharf, und in verschiedenen Sprachen bestehen gewisse Bedeutungsunterschiede. Eine grobe Entsprechung der Begriffe in Deutsch, Französisch, Italienisch und Englisch zeigt Tab. 4-1.

Tab. 4-1. Degime ful i	Nulyange in einigen opra		
Deutsch	Französisch	Italienisch	Englisch
(Granularer) Mur-	lave torrentielle	colata detritica,	debris flow, granular or
gang		lava torrentizia	stony debris flows
Schlammstrom	coulée de boue lave torrentielle boueuse	colata di fango	mud flow
Hangmure	coulée de boue de versant	colata detritica di versante	hillslope debris flow (debris avalanche)

Tab. 4-1: Begriffe für Murgänge in einigen Sprachen.



Abb. 4-1: Front eines granularen Murgangs, Kamikamihori valley, Japan (Foto H. Suwa).



Abb. 4-2: Front eines schlammstromartigen Murgangs, Jiangjia valley, China (Foto Z. WANG).



Abb 4 2: traisabar Län

Abb. 4-3: typischer Längsschnitt durch einen Murgang mit abnehmender Feststoffkonzentration von der Front gegen den hinteren Teil (modifiziert nach PIERSON 1986).





Die **Hangmuren** (s. auch BUWAL/BWW/BRP 1997) unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Ort des Auftretens (keine vorgegebene seitliche Begrenzung des Fliessweges, relativ kurze Fliessdistanzen) von Murgängen, welche typischerweise in einem Gerinne oder in einer Runse ablaufen. In der Regel treten Hangmuren nicht mehrfach am gleichen Ort auf und weisen auch nicht mehrere Schübe auf. Im Anfangsstadium sind Hangmuren (Abb. 4-4) mit spontanen Rutschungen zu vergleichen, und beim Fliessen verhalten sie sich ähnlich wie Murgänge. Bei Unwetterereignissen entwickeln sich aus flachgründigen Rutschungen häufig auch Hangmuren.

Die für die Alpen typischen Murgänge können vereinfacht als ein Gemisch aus den drei Hauptkomponenten Wasser, Feinmaterial und groben Steinen betrachtet werden. Von der Zusammensetzung und vom Fliessverhalten her sind Murgänge eine Mischung aus reinen Hochwassern, Erdrutschen und Fels- oder Bergstürzen. Abb. 4-5 zeigt die relativen Anteile der drei Hauptkomponenten für solche schnellen Massenbewegungen. Die physikalischen Vorgänge bei der Entstehung, beim Fliessen und bei der Ablagerung von Murgängen sind daher entsprechend komplex und bis heute nur teilweise verstanden.



Abb. 4-5: Hauptbestandteile eines Murganges in einem Drei-Phasen-Diagramm, im Vergleich zu anderen schnellen Massenbewegungen (modifiziert nach PHILLIPS & DAVIES 1991). Im Vergleich zu Wildbach-Hochwassern haben Murgänge eine grössere Abflusstiefe, verusachen grössere Veränderungen im Bachgerinne und transportieren oft beträchtliche Geschiebemengen zu Tal. Bei einem Hochwasser werden die Steine durch die treibende Kraft des Wassers fortbewegt. Bei Murgängen mit hohen Feststoffkonzentrationen hat das Wasser-Gestein Gemisch eine wesentlich grössere Zähigkeit als reines Wasser allein. Damit solche Geröllmassen überhaupt in Bewegung geraten, sind zusätzlich zum Wasser ausreichend grosse Mengen an Lockermaterial sowie steile Gefälle erforderlich. Die wichtigsten Eigenschaften von Murgängen und von Spuren, die sie im Gelände hinterlassen, sind in Tab. 4-2 zusammengestellt.

Sind in einem Gerinne flache Ufer vorhanden, so bilden die Murgänge durch Materialablagerungen entlang des Bachbettes gewissermassen ihre eigene seitliche Begrenzung des Fliessquerschnittes (so genannte Levées oder Murwälle). Das Geschiebe wird im flacheren Gelände in unregelmässiger Form abgelagert. Die hohe Zähigkeit bzw. die grosse Kornreibung bei einem langsamer fliessenden Gemisch führt zu einem relativ abrupten Anhalten des Frontbereiches von Murgangschüben. Die vordersten Ablagerungen sind deshalb meist deutlich vom alten Terrain abgegrenzt. Die unregelmässigen Ablagerungsformen bewirken eine raue Geländeoberfläche. Augenzeugen von Murgängen berichten, dass solche Ereignisse oft von starkem Lärm, Erschütterungen des Bodens und manchmal auch von einem schwefligen Geruch begleitet sind. Diese Erscheinungen werden zuweilen auch schon kurz vor dem Eintreffen eines Murgangs wahrgenommen. Eine detailliertere Beschreibung des Murgangprozesses findet sich zum Beispiel in COSTA (1984, 1988).

Tab. 4-2: Charakteristische Eigenschaften von Murgängen (nach RICKENMANN 1996)

Zusammensetzung und Fliessverhalten:

- stark unterschiedliche Korngrössen, +/- gleichmässig über Abflusstiefe verteilt
- Transport sehr grosser Blöcke möglich
- höchste Geschiebekonzentration an der Front, dahinter häufig flüssigeres Gemisch
- hohe Dichte des Wasser-/Feststoffgemisches (ca. 1.6 ... 2.4 t/m3 in der Front)
- hohe "Zähigkeit" (Nicht-Newton'sche Flüssigkeit)
- meist Abfluss in Wellen, d.h. schubweises Auftreten einer oder mehrerer Gemischfronten
- Bildung von Murwällen (Levées) bei fehlender seitlicher Begrenzung des Abflussquerschnitts
- Ablagerungen insbesondere bei Verbreiterung des Bachbettes oder bei Gefällsknick; häufig bei Gefällen von 5% ... 18%

Charakteristische Spuren im Gelände, die auf Murgänge hindeuten:

- Levées (seitliche Murwälle)
- stehengebliebene Murzungen, auf dem Kegel oder bei lokaler Gerinneverbreiterung
- unsortierte Ablagerungen (alle Korngrössen durcheinander, keine Schichtung)
- grobe Blöcke und feinkörnige Matrix (sofern nicht ausgewaschen) in Ablagerungen
- abgeschliffene und geritzte Felspartien
- scharfe Begrenzung der Ablagerungen
- geringe Schäden an Vegetation im Ablagerungsbereich
- Erosionsquerschnitt meist U-förmig

In Tab. 4-3 sind typische Murgangparameter zusammengestellt, wie sie für die grössten Ereignisse während der Unwetter 1987 in der Schweiz abgeschätzt wurden. Tab. 4-4 gibt eine Übersicht über charakteristische Eigenschaften von Murgängen im Vergleich zu Hochwasser mit Feststofftransport und zu murgangartigen Abflüssen im Übergangsbereich. Die Murenfracht wird meist abgeleitet aus dem Volumen der Ablagerungen eines ganzen Ereignisses und beinhaltet damit auch das Porenvolumen.

Tab. 4-3: Typische Murgangparameter der grössten Ereignisse im Sommer 1987 in der Schweiz (nach ZIMMERMANN & RICKENMANN 1992). DQ = Datenqualität: **** = sehr gut, *** = zuverlässig, ** = grobe Schätzung, * = sehr grobe Schätzung/unsichere Spuren.

Murgangereignis,	Val Varuna		Val da Plaunca		Val Zavragia		Minstigertal	
Datum:	18.7.87		18.7.87		18.7.87		24.8.87	
	Wert	DQ	Wert	DQ	Wert	DQ	Wert	DQ
Murenfracht [m ³]	200'000	****	250'000	****	30'000	**	30'000	***
Max. Fliessgeschwindigkeit am Kegelhals [m/s]	8	**	10	*	8	***	14	**
Abflusstiefe am	6	***	?		6	****	10	***
Kegelhals [m]								
Maximalabfluss [m ³ /s]	400-800	**	400–900	*	500–700	****	150–250	***
Abflussspitze Reinwasser, geschätzt [m ³ /s]	7	*	9	*	30	**	17	**
Anzahl Schübe	ca. 10	**	>5	*	<=6	**	1	***
Max. Fracht pro Schub [m ³]	50'000	**	80'000	**	<30'000	**	<30'000	***
Max. Erosionstiefe [m]	11	****	12	****	2	**	4	**
Max. Erosionsquerschnitt [m ²]	650	****	550	****	20	**	55	**
Historische	ca. 10	****	keine be-	***	ca. 7	***	unsicher,	*
Ereignisse	in 150 J.		kannt		in 150 J.		unbekannt	

Tab. 4-4: Übersicht der Eigenschaften charakteristischer Verlagerungsprozesse in Wildbächen (nach	۱
Costa 1984; Hungr et al. 2001; Pierson & Costa 1987; u.a. in Hübl 2006)	

	,	,	,		
Verlagerungstyp	Hochwasser		Murgang		
	(flood)		(landslide of flow type)		
Verlagerungsart	flu	vial	murgangartig		
Terminus (dt.)	Hochwasser	Fluvialer Feststoff-	Murgangartiger Fest-	Murgang	
- · · · · · ·		transport	stofftransport		
l erminus (engl.)	Flood	Bedload transport	Debris flood	Debris flow	
			(nyperconcentrated		
			flow)		
Prozesstyp	Reinwasser-Abfluss	schwach Feststof	ftransport stark	Murgang	
Fliessverhalten	Newtonsch	Newtonsch	annähernd Newtonsch	Nicht-Newtonsch	
Vol. Feststoffkonzen-	Promillebereich	0–20 %	20–40 %	>40 %	
tration (ca. Bereich)					
Grösstkorn	mm–cm	dm	m	m	
Dichte (ca. Bereich)	1000 kg/m³	<1300 kg/m ³	1300–1700 kg/m ³	>1700 kg/m³	
Viskosität (ungefähr)	0.001–0.01 Pas	0.01–0.2 Pas	0.2–2 Pas	>2 Pas	
Scherfestigkeit	Keine	Keine	Keine	Vorhanden	
Massgeblich wirkende	Turbulenz, Schlepp-	Turbulenz, Schlepp-	Auftrieb, Turbulenz,	Auftrieb, dispersiver Druck,	
Kräfte	spannung	spannung	Schleppspannung,	viskose und friktionale Kräfte	
			dispersiver Druck		
Verteilung der Fest-	Feststoffe sohlennah	Feststoffe sohlennah	Feststoffe und	Feststoffe verteilt im Quer-	
stone im Querschnitt	(rollend, nuptend,	(rollend, nuptend,	Schweb verteilt im	scnnitt	
	Sphiller Sph	Springena) una	Querschnitt		
Ablagerungsform	Banking Eginstoff	Sortierte Fächer und	Bänke und Lannen	Murköpfe Murfirste (Levées)	
(stumme Zeugen)	rückstände		zumeist korngestützt	und zungenförmige Lappen	
	ruokotando	Lappon	Grobaeschiebe bis in	korn- oder matrixgestützt.	
			Höhe Wasserspiegel	zumeist scharfe Begrenzung	
			abgelagert	der Ablagerungen, U-förmiges	
				Abflussprofil	
Sortierung der abge-	Vorhanden	Vorhanden	Eher nicht vorhanden	Nicht vorhanden	
lagerten Feststoffe					
Entmischung der	ја	ja	ja/nein	nein	
Ablagerungen					
Schaden durch	Wasser und Schweb	Wasser, Schweb und	Feststoffe und Wasser	Feststoffe (und Wasser)	
	1	Geschiebe			

Der grösste Abfluss (Maximalabfluss) tritt in der Regel im Bereich der Murgangfront auf. Bei Murgängen in den Alpen kann der Maximalabfluss 100 m³/s bis 1000 m³/s erreichen, womit er etwa 10 bis 100 Mal grösser ist als ein vergleichbarer Hochwasserabfluss im gleichen Wildbachgerinne (Tab. 4-3). Die Höhe der Murgangfront kann bis zu 10 m betragen, und Fliessgeschwindigkeiten bis zu 15 m/s (54 km/h) wurden für alpine Murgänge abgeschätzt. Bei grösseren Murgangereignissen in den Alpen werden einige 10'000 m³ bis mehrere 100'000 m³ Feststoffe zum Kegel gebracht. Manchmal werden auch im Kegelbereich noch wesentliche Feststoffmengen erodiert. Die gesamte Fliesslänge hängt unter anderem von der pro Schub transportierten Materialmenge ab.

4.2 Wichtige Elemente der Prozess- und Gefahrenbeurteilung

Im Hinblick auf die Prozess- und Gefahrenbeurteilung von Murgängen sind – wie auch bei anderen gravitativen Naturgefahren – vor allem zwei Hauptaspekte zu untersuchen: Die Auftretenshäufigkeit und Ereignisgrösse (Magnitude-Frequenz Beziehung) sowie die Abschätzung des Fliess- und Ablagerungsverhaltens. Das Thema Magnitude-Frequenz von Wildbachereignissen wird in Kapitel 5 behandelt. Die übrigen Hauptaspekte werden weiter unten ausführlicher diskutiert, wobei eine Reihe von Methoden und Ansätzen vorgestellt wird. Ein weiteres Unterkapitel gibt eine kurze Übersicht über GIS-basierte und numerische Simulationsmodelle. Abschliessend wird das Ablagerungsverhalten auf dem Kegel diskutiert, welches für die Gefahrenbeurteilung oft sehr wesentlich ist.

Die wichtigsten Fragen in Bezug auf die Gefahrenbeurteilung sind:

- Mit welcher *Ereignisgrösse* ist zu rechnen?
- Mit welcher Auftretenshäufigkeit ist zu rechnen?
- Welches sind die gefährdeten Gebiete?

Zur Beurteilung des Gefahrenpotentials müssen im Wesentlichen also zwei Aspekte beurteilt werden: (a) das Auftreten von Murgängen und ihre Grösse, und (b) das Fliess- und Ablagerungsverhalten. Die wichtigsten Elemente und die vorhandenen Abhängigkeiten sind schematisch in Abb. 4-6 dargestellt.



Abb. 4-6: Wichtigste Elemente zur Gefahrenbeurteilung von Murgangereignissen, und die Abhängigkeiten zwischen den Elementen (nach RICKENMANN 2001b).

Etwas vereinfacht kann man die zwei Hauptaspekte wie folgt gruppieren:

a) Grösse und Häufigkeit ("Magnitude und Frequenz")

Hier sind vor allem die folgenden drei Elemente zu berücksichtigen:

- Entstehung (Ort, Art der Auslösung)
- Ereignisgrösse
- Ereignishäufigkeit

b) Fliess- und Ablagerungsverhalten

Hier sind vor allem die folgenden drei Elemente zu berücksichtigen:

- Ereignisgrösse
 - Fliessverhalten im Gerinne
 - Ablagerungsverhalten auf dem Kegel

Wie aus einer detaillierteren Prozessbeurteilung von Murgangereignissen ersichtlich ist, handelt es sich bei dieser Unterteilung in zwei Hauptbereiche um eine Vereinfachung. So kann der Murgang während des Fliessens zusätzliches Material aufnehmen (aus der Bachsohle und den Seitenhängen) oder auch ablagern. Beim heutigen Stand der Kenntnisse ist es schwierig, diese Prozesse einigermassen zuverlässig zu quantifizieren. Daher wird häufig in einem ersten Schritt eine Ereignisgrösse festgelegt, und dieser Wert bildet dann eine wichtige Eingangsgrösse bei der Abschätzung des Fliessverhaltens. Diese Vereinfachung ist vor allem dann möglich, wenn die Murgangparameter primär für den Kegelbereich abzuschätzen sind, wo in vielen Fällen keine wesentliche Materialaufnahme mehr stattfindet.

Für die Gefahrenbeurteilung stehen viele verschiedene Methoden und Ansätze zur Verfügung. Diese Vielfalt widerspiegelt einerseits die unterschiedliche Ausprägung von verschiedenen Murgangtypen und andererseits den begrenzten Stand der Kenntnisse. Ein tabellarischer Überblick zu vorhandenen Methoden zur Bestimmung der wichtigen Elemente ist in RICKENMANN (2001b) zu finden.

4.3 Auftreten von Murgängen

4.3.1 Murfähigkeit

Die Beurteilung der Murfähigkeit eines Wildbaches sollte sich in erster Linie auf eine Interpretation des Kegelbereiches sowie der Spuren früherer Ereignisse und/oder historische Angaben abstützen. Wenn sich daraus keine Hinweise ergeben, können ein paar allgemeine Charakteristika des Einzugsgebietes zur groben Beurteilung herangezogen werden (Tab. 4-5). Ein minimales Bachgefälle und ein genügend grosses Geschiebepotential sind die notwendigen Voraussetzungen, dass überhaupt Murgänge auftreten können. Diese beiden Faktoren sind auch die wichtigsten Kriterien zur Beurteilung des Gefährdungspotentials eines Wildbaches. 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, Schwemmholz) kann sich ein Murgang aber auch bei Gefällen von ca. 15 - 25 % bilden. Bei Bachgefällen unter 15 % ist die Entstehung von Murgängen nicht zu erwarten.

Die Klassifizierung des Murgangpotentials in Tab. 4-5 in beruht auf der Analyse der Murgänge 1987 in den Schweizer Alpen (RICKENMANN & ZIMMERMANN 1993) sowie auf einer halbquantitativen Beurteilung der Murganggefährdung nach AULITZKY (1973) und NAKAMURA (1980). Die Gefährdungsklassen in Tab. 4-5 entsprechen einer Mischung aus wahrscheinlicher Intensität der Ereignisse und möglicher Häufigkeit des Auftretens. Die Aussage bezieht sich jedoch primär auf die zu erwartende maximale Intensität eines Ereignisses. Infolge des grossen Feststoffpotentials und des grossen Gefälles können bei der Gefährdungsklasse A zum Beispiel auch kleinere Murgänge auftreten, was insgesamt zu einer grösseren Häufigkeit führt als etwa bei Klasse C, wo nur kleinere Murgänge zu erwarten sind. (Die Bedeutung der Gefährdungsklassen ist in der Legende zu Tab. 4-5 angegeben.)

Eine grobe Unterscheidung zwischen den Prozessen Murgänge und Geschiebetransport kann aufgrund von morphometrischen Parametern des Einzugsgebietes und des Kegels gemacht werden. Dabei wird das mittlere Gerinnegefälle auf dem Wildbachkegel, S_f , in Abhängigkeit der MELTON-Zahl, Me (Me = Differenz zwischen höchstem und tiefsten Punkt, normiert mit der Wurzel der Einzugsgebiets-Fläche), aufgetragen (MARCHI & BROCHOT 2000; BARDOU 2002; RICKENMANN & SCHEIDL 2010). Grosse Werte für S_f und Me definieren den Bereich des Auftretens von Murgängen, kleine Werte denjenigen des Auftretens von Geschiebetransport. Allerdings ist die Grenze zwischen den beiden Bereichen nicht sehr scharf, sondern es gibt einen breiten Übergangsbereich (Abb. 4-7).

Tab. 4-5: Einfluss von Bachgefälle (S) und Feststoffpotential (F) auf die Murgang-Gefährdung. Bedeu-
tung der Gefährdungsklassen: A1: stark murganggefährdet, A2: murganggefährdet, B:
schwach murganggefährdet. C: kaum murganggefährdet (aus PICKENMANN 1995)

Anrisszone: Bach- bzw. Hanggefälle	Gerinnemerkmale und Feststoffpotential F (Gerinne + Hänge)	Gefährdungs- klasse
<i>S</i> > 25 %	Gerinne in Lockermaterial, grössere potentielle Hanganbrüche (F>10 000 m ³)	A1
	Gerinne vorwiegend in Lockermaterial (F = 1 000 – 10 000 m ³)	A2
	Gerinne vorwiegend in Fels (F<1 000 m ³)	В
15 % < <i>S</i> < 25 %	Gerinne in schiefrigen, flyschartigen Gesteinen, potentielle Hanganbrüche (F>10 000 m³)	A1
	Übrige Gesteinsarten, Gerinne mit Verklausungsmöglichkeit (F > 10 000 m³)	A2
	Gerinne ohne Verklausungsmöglichkeit (F = 1 000 – 10 000 m ³)	В
	Gerinne vorwiegend in Fels (F<1 000 m ³)	C
<i>S</i> < 15 %	Nicht relevant	С



Abb. 4-7: Grobe Abgrenzung von murfähigen Wildbächen und solchen mit fluvialem Geschiebetransport (aus RICKENMANN & SCHEIDL 2010), anhand des Kegelgefälles *S_f* und der Melton-Zahl *Me*. Die Daten stammen aus der Schweiz (CH), Österreich (AUT) und Südtirol in Italien (ITST). Die Zonen A (fluvialer Transport), B (Übergangsbereich) und C (Murgänge) entsprechen einer Einteilung von BARDOU (2002), welche auch Daten von MARCHI & BROCHOT (2000) berücksichtigt. Die Auslösung von Murgängen kann in Form von Hangrutschungen oder von Gerinnedestabilisierung erfolgen. Bei intensiveren Niederschlägen ist grundsätzlich mit Rutschungen zu rechnen. Für das Auftreten von flachgründigen Rutschungen bzw. Hangmuren gibt es eine Reihe von Untersuchungen im Hinblick auf kritische Niederschlagsbedingungen. Bezüglich der massiven Gerinneerosion oder -destabilisierung gibt es Ansätze über den Grenzabfluss (analog zum Beginn des Geschiebetransportes) aus Laboruntersuchungen sowie einfache theoretische Abschätzungen. Alle Methoden liefern meist aber nur grobe Schätzwerte der auslösenden Niederschlagsbedingungen oder des Grenzabflusses für die Murgangbildung, da der Einfluss der Eigenschaften des Hangmaterials oder des Bachbettmaterials in der Regel nicht berücksichtigt sind.

Bei intensiverer und länger andauernder Schneeschmelze wird durch die zunehmende Bodensättigung die Disponibilität für Murgänge erhöht. Für grössere Murgangereignisse sind im Alpenraum häufig aber zusätzlich intensivere Niederschläge nötig. Bei der Auslösung spielt das Wasser die entscheidende Rolle. In den hochalpinen Schutthalden kann die Destabilisierung bereits durch eine unterirdische Sättigung des Lockermaterials erreicht werden. Da nicht nur der Oberflächenabfluss eine Rolle spielt, ist für die Auslösung nicht allein die Regenintensität von Bedeutung, sondern auch das Ausmass der Bodensättigung durch längeranhaltende Niederschläge. 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). Interessant ist, dass im inneralpinen Bereich zur Murgangbildung eher kleinere auslösende Niederschläge erforderlich sind, was mit den kleineren mittleren Jahresniederschlägen im Vergleich zu den randalpinen Gebieten zusammenhängen könnte (ZIMMERMANN et al. 1997). Grobe Bedingungen für kritische Niederschlagsverhältnisse werden häufig in Form der mittleren Niederschlagsintensität I [mm/h] und der Dauer D_N [h] des auslösenden Niederschlagsereignisses dargestellt. Diese Grenzbedingungen können regional oder lokal stark variieren. Abb. 4-8 zeigt einige dieser empirischen Grenzbedingungen im Vergleich mit Daten aus Österreich.

In Wildbachgerinnen können Murgänge auftreten, wenn in der Sohle genügend Geröll zum Abtransport bereitliegt. Für die Bildung eines Murgangs muss eine Mindestmenge an Gesteinsmaterial plötzlich in Bewegung geraten. Dieser Vorgang kann vor allem in steilen Gerinnen und bei Engstellen mit vorgängiger Behinderung des Materialflusses (eventuell mit Verklausung), oder bei einer abrupten Zunahme der Erosion im Gerinne auftreten. Abb. 4-9 zeigt eine Abgrenzung des Prozesses Murgang zu anderen Arten der Feststoffverlagerung in Wildbächen und den Zusammenhang bei der Bildung von Murgängen.

Eine einfache Analyse der Hangstabilität führt zu einer theoretischen Grenzneigung von etwa 12° bis 17° für typische Verhältnisse im Bachbett (Reibungswinkel des Materials von 33° bis 37°) (TAKAHASHI 1987). In Wildbachgerinnen ist (wie auch in Flüssen) ein minimaler Abfluss nötig (Grenzabfluss in Abb. 4-9), damit Geschiebe 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. Abb. 4-10 deutet darauf hin, dass das kritische Gefälle für die Murgang-Entstehung in Gerinnen vom Abfluss abhängt. Abb. 4-11 gibt ein Beispiel für die Murgangentstehung aus dem Gerinne heraus.



Abb. 4-8: Empirische Beziehungen für kritische Niederschlagsverhältnisse bei der Auslösung von Murgängen. Die Daten für die Schweiz sowie das entsprechende Grenzkriterium stammen von ZIMMERMANN et al. (1997). Das Grenzkriterium für Österreich ist von J. HÜBL, BOKU Universität Wien, 2001). Die Grenzbedingung für die weltweiten Daten stammt von CAINE (1980) und basiert auf flachgründigen Hangrutschungen und Hangmuren.



Abb. 4-9: Wesentliche Geschiebelieferungsprozesse in Wildbächen und die Rolle bei der Bildung von Murgängen (modifiziert nach RICKENMANN 1996).

Wenn flachgründige Rutschungen genügend gross und flüssig sind oder sehr nahe eines Gerinnes auftreten, können sie als Hangmuren bis in ein Wildbachgerinne gelangen und dort als Murgang weiterfliessen. Flachgründige Rutschungen, die in der Schweiz von 1997 bis 2005 auftraten, weisen typische Hangneigungen von etwa 24° bis 43° und Volumen von 50 bis 100 m³ auf (RAETZO & RICKLI 2007). Die Niederschlagbedingungen bei der Auslösung von flachgründigen Rutschungen in der Schweiz wurden von RICKLI et al. (2008) untersucht.



Abb. 4-10: Hang- bzw. Gerinnegefälle für die Entstehung von Murgängen durch Hangrutschung bzw. durch Gerinneerosion bzw. Gerinnedestabilisierung in Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche oberhalb der Anrisszone oberhalb der Anrissstelle (als Indikator für den Wasser-Abfluss). Daten aus Schweizer Untersuchungen (Vaw 1992; ZIMMERMANN et al. 1997).

Wie die Untersuchungen von SMART & JÄGGI (1983) und RICKENMANN (1990) sowie Laborund Feldbeobachtungen zeigen, kann ab Grenzgefällen eines Gerinnes von etwa 20 – 25 % mit einem kontinuierlichen Übergang von fluvialem zu murgangartigem Geschiebetransport gerechnet werden. Auch Vergleiche zwischen kritischen spezifischen Abflusskriterien für Geschiebetransport und für Murgangbildung zeigen, dass mit einem kontinuierlichen Übergang gerechnet werden kann.

Abb. 4-12 zeigt den Zusammenhang zwischen Prozessinitiierung und kritischem, spezifischem Abfluss für verschiedene Prozessarten. Analog wie für den Grenzabfluss bei Beginn des fluvialen Geschiebetransportes, kann ein kritischer dimensionsloser Abfluss q_c^* für die Bildung von Murgängen definiert werden:

$$q_c^* = q_c / [g^{0.5} D^{1.5}] = a_g / S^{\alpha g}$$

Gl. 4-1



Abb. 4-11: *linkes Bild*: Gerinne oberhalb der Entstehungszone (entspricht Zustand auf Bild rechts vor der Murgang-Auslösung); *rechtes Bild*: Gerinne bei der Entstehungszone nach der Murgang-Auslösung. Das Gerinnegefälle beträgt 51 % (S = 0.51). (Fotos M. ZIMMERMANN)

Dabei ist q_c der kritische spezifische Abfluss pro Meter Gerinnebreite, D eine charakteristische Korngrösse des Gerinnebettes, $S = \sin\beta$ das Gerinnegefälle, g = Erdbeschleunigung, a_g = empirischer Koeffizient, α_g = semi-empirischer Exponent.

In Abb. 4-12 sind solche Beziehungen zur Bestimmung des Grenzabflusses für Geschiebetransportbeginn und Murgang-Bildung dargestellt. Diejenigen von TOGNACCA et al. (2000) und WHITTAKER & JAEGGI (1986) basieren nur auf Laborversuchen, während diejenige von BATHURST et al. (1987) auch Felddaten berücksichtigt. Abb. 4-12 zeigt auch eine Grenzbedingung für den Beginn von "immature debris flows" nach TAKAHASHI (1987), was ungefähr intensivem Geschiebetransport oder "debris flood" Bedingungen entspricht. Die Abbildung zeigt eine grosse Bandbreite möglicher Grenzabflüsse für die Entstehung von Murgängen in Gerinnen, welche noch mit Naturdaten überprüft sind.



Abb. 4-12: Kritischer spezifischer Abfluss: Übergang zwischen fluvialem und murgangähnlichem Geschiebetransport. Die Kriterien für die Entstehung von Murgängen in Gerinnen sind noch nicht mit Naturdaten überprüft.

4.4 Empirische Ansätze zum Fliess- und Ablagerungsverhalten

Zur Beurteilung des Fliess- und Ablagerungsverhalten können entweder empirische Ansätze und Schätzformeln oder numerische Simulationsmodelle eingesetzt werden. Grundsätzlich gilt es abzuschätzen, wo kritische Stellen mit der Möglichkeit eines Gerinneausbruches vorhanden sind und welche Gebiete des Kegels dann überflossen werden können. Eine Zusammenstellung der Murgangparameter von Ereignissen im Jahre 1987 in der Schweiz ist in Tab. 4-2 gegeben. Genauere Messungen werden seit einigen Jahren an verschiedenen Murgang-Messstationen in den Alpen gemacht (z.B. GENEVOIS et al. 2000; MARCHI et al. 2002; RICKENMANN et al. 2001; HÜRLIMANN et al. 2003; MCARDELL et al. 2007).

Abb. 4-13 zeigt schematisch, in welcher Abfolge wichtige Murgangparameter zur Charakterisierung des Fliessverhaltens mit empirischen Ansätzen näherungsweise bestimmt werden können. Ist für ein zukünftiges Ereignis die Murenfracht *M* abgeschätzt worden, kann daraus ein ungefährer Maximalabfluss Q_p berechnet werden. Dieser Wert bestimmt zusammen mit dem Gerinnegefälle im Wesentlichen die Fliessgeschwindigkeit *V*. Der maximal erforderliche Abflussquerschnitt *A* ergibt sich dann aus $A = Q_p/V$. Ein Vergleich mit dem vorhandenen Abflussquerschnitt gibt Hinweise auf mögliche Ausbruchstellen. Auch die (gesamte) Reichweite (Fliessdistanz) eines Murganges vom Entstehungsort bis zum untersten Ablagerungspunkt, L, oder die Ablagerungslänge auf dem Kegel, L_f , kann grob anhand der Murenfracht abgeschätzt werden, wenn keine genauere Bestimmung mittels Simulationsmodellen möglich ist.

Die beobachteten Werte für die Murenfracht beinhalten in der Regel sowohl das Feststoffals auch das Poren- bzw. Wasservolumen. Stammen die Daten von einer Messstation, so wurde *M* durch die Integration des Gemisch-Abflusses über die Zeit bestimmt. In anderen Fällen wurde *M* aus der beobachteten Ablagerungsfläche und der (mittleren) Ablagerungsmächtigkeit bestimmt, womit das Porenvolumen eingerechnet ist, das näherungsweise dem Wassergehalt entspricht.



Abb. 4-13: Berechnungsreihenfolge von empirischen Ansätzen zur Abschätzung der wichtigsten Fliessparameter von Murgängen (nach RICKENMANN 1999)

Zum Erosionsverhalten entlang der Transitstrecke gibt es bisher nur wenige quantitative Beobachtungen (HUNGR et al. 2005; SCHÜRCH et al. 2011; BERGER et al. 2011). 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 werden daher mögliche Feststoffeinträge aus der Transitstrecke eingeschlossen, wenn das Abschätzverfahren gemäss Abb. 4-13 im Kegelbereich angewendet wird.

4.4.1 Maximalabfluss

Abb. 4-14 illustriert den Zusammenhang zwischen Murenfracht M [m³] und Maximalabfluss Q_p [m³/s] (RICKENMANN 1999). Dabei kann zwischen granularen und schlammstromartigen Murgängen unterschieden werden (MIZUYAMA et al. 1992):

$Q_p = 0.135 \; M^{0.78}$	(granulare Murgänge)	GI. 4-2
$Q_p = 0.0188 M^{0.79}$	(schlammstromartige Murgänge)	GI. 4-3

Die Unterscheidung basiert auf Beobachtungen in Japan, und sie wird grundsätzlich durch Murgangdaten aus anderen Gebieten bestätigt. Die Zuordnung ist allerdings nicht immer einfach. So liegen die Daten des Rio Moscardo in Abb. 4-14 möglicherweise deshalb näher bei Gl. 4-3, weil die Murgang-Abflüsse eher wasserreich waren. Die Murgänge im Jiangjia

ravine sind sehr feinmaterialreich, und man würde die entsprechenden Datenpunkte daher eher im Bereich von Gl. 4-3 erwarten. Die Murgänge im Illgraben sind auch feinmaterialreich, enthalten allerdings eher wenig kohäsive Sedimente. Bei Anwendung der Gleichungen sollte der Datenbereich der beobachteten Werte und die Tatsache berücksichtigt werden, dass der Maximalabfluss eher mit dem Volumen des grössten Schubes als mit der gesamten Murenfracht eines Ereignisses korreliert. Bei den Daten der Murgänge "Schweiz 1987" in Abb. 4-14 sind die Schubvolumen nicht bekannt. In alpinen Gebieten ist die Annahme von *M* grösser als ca. 50'000 m³ eher nicht plausibel, wie Abschätzungen nach den Murgängen 1987 in der Val Varuna zeigten (VAW 1992). Für die Abschätzung des Maximalabflusses sollte das Volumen des grössten erwarteten Schubes eingesetzt werden.





4.4.2 Fliessgeschwindigkeit

Für die Abschätzung der mittleren Fliessgeschwindigkeit *V* [m/s] können zwei unterschiedliche Gleichungen angegeben werden (RICKENMANN 1999):

$$V = 2.1 \ Q^{0.33} \ S^{0.33}$$

$$V = k_{St} \ h^{0.67} \ S^{0.5}$$
Gl. 4-4
Gl. 4-5

Dabei ist Q [m³/s] der Abfluss, S das Gefälle [m/m] im betrachteten Gerinneabschnitt, k_{St} ein pseudo STRICKLER-Koeffizient [m^{1/3}/s] und h [m] die Abflusstiefe. Die Anwendung der Gl. 4-4 und Gl. 4-5 auf Daten von Murgängen und Wasserabflüssen zeigen Abb. 4-15 und Abb. 4-16.



Abb. 4-15: Anwendung von GI. 4-4 auf Murgänge und Wasserabflüsse. Vergleich von berechneten und beobachteten Fliessgeschwindigkeiten (nach RICKENMANN 1999).



Abb. 4-16: Anwendung von GI. 4-5 auf Murgänge und Wasserabflüsse. Für beide Datensätze wurde je ein mittlerer STRICKLER-Koeffizient k_{St} angenommen. Vergleich von berechneten und beobachteten Fliessgeschwindigkeiten (nach RICKENMANN 1999).

Als Durchschnitt wird oft ein Wert von k_{St} = 10 m^{1/3}/s angenommen (RICKENMANN 1999). Für granulare Murgänge in natürlichen Gerinneabschnitten ergeben sich k_{St} -Werte im Bereich von 6 m^{1/3}/s (RICKENMANN & WEBER 2000). Für Murgang-Abflüsse in künstlichen (kanalisierten) Gerinnen können die pseudo MANNING-STRICKLER- Koeffizienten bis zu 50 % grösser sein. In künstlichen Gerinnen ist ein Ansatz nach Gl. 4-5 vorzuziehen. Gl. 4-4 gilt nur für natürliche Gerinneabschnitte.

4.4.3 Reichweite (gesamter Fliessweg)

Falls bedeutende Ablagerungsstrecken bzw. Umlagerungsstrecken vorhanden sind, könnte ein kleinerer Murgang dort stehen bleiben. Die Abschätzung des möglichen Ablagerungsvolumens in einem solchen Abschnitt und der Vergleich mit der geschätzten Murenfracht erlaubt eine Beurteilung, ob ein Anhalten des Murgangs wahrscheinlich ist oder nicht. Ablagerungen und Ausbrüche können auch oberhalb von engen Durchflussquerschnitten (Gerinneverfüllung) auftreten. In den meisten Fällen muss bei grösseren Murgangereignissen (welche für die Gefahrenbeurteilung relevant sind) wohl damit gerechnet werden, dass Murgänge bis zum Kegel gelangen. Aufgrund von 82 untersuchten Murgangereignissen des Sommers 1987 in der Schweiz ergibt sich: (a) Ein minimales Pauschalgefälle von 19 % wurde nirgends unterschritten. Das Pauschalgefälle bezeichnet das mittlere Gefälle des gesamten Fliessweges von der Anrisszone bis zum untersten Ablagerungspunkt; (b) Es besteht eine generelle Abhängigkeit der Reichweite L [m] von der Murenfracht M [m³]. Aus der Analyse weiterer Daten aus anderen Regionen ergibt sich eine bessere Korrelation, wenn zusätzlich die Höhendifferenz H_e [m] zwischen oberstem Anrisspunkt und unterstem Ablagerungspunkt mit einbezogen wird (RICKENMANN 1999; RICKENMANN & SCHEIDL 2010). Die mittlere Reichweite kann mit folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$L = 1.9 \ M^{0.16} \ H_e^{0.83}$$
 Gl. 4-6

Für eine maximale Reichweite L_{max} gilt in etwa die Beziehung:

$$L_{max} = 5 M^{0.16} H_{\rho}^{0.83}$$
 Gl. 4-7

Im Gegensatz zu den Gl. 4-2 und Gl. 4-3 wurde bei der Ableitung der Gl. 4-6 und Gl. 4-7 die gesamte Murenfracht verwendet, welche daher hier einzusetzen ist. Die Anwendung von Gl. 4-6 und Gl. 4-7 auf Daten von Murgängen zeigt Abb. 4-17. Für prognostische Abschätzungen wird eine zusätzliche Beziehung zwischen L und H_e benötigt. Dabei handelt es sich um das Längenprofil des erwarteten Fliessweges, womit Gl. 4-6 und Gl. 4-7 entweder mathematisch oder graphisch gelöst werden können.



Abb. 4-17: Anwendung der Gl. 4-6 und Gl. 4-7 auf Murgänge. Vergleich von berechneten und beobachteten Reichweiten.

4.4.4 Ablagerungslänge auf dem Kegel

Für die Ablagerungslänge L_f auf dem Kegel zeigen die Daten nur eine sehr schwache Abhängigkeit von der Murenfracht *M*. Es wird daher keine solche empirische Abschätzformel empfohlen. Für ein bestimmtes Wildbachgerinne und eine gegebene Kegeltopographie kann aber trotzdem erwartet werden, dass bei ähnlichen Materialeigenschaften grössere Murgänge weiter fliessen als kleinere. Grössere Murgänge haben tendenziell grössere Maximalabflüsse (siehe Gl. 4-2 und Gl. 4-3), verbunden mit grösseren Fliessgeschwindigkeiten und/oder grösseren Abflussquerschnitten. Basierend auf einer Impulsbetrachtung des Gemisch-Abflusses auf einer gleichmässig geneigten Fläche kann die Ablagerungslänge L_f theoretisch wie folgt abgeschätzt werden (HUNGR et al. 1984):

$L_f = A_V^2 / G$	Gl. 4-8
$A_V = V_u \cos(\beta_u - \beta) \left[1 + (g h_u \cos\beta_u)/(2 V_u^2)\right]$	Gl. 4-9
$G = g \left(S_R \cos \beta_u - \sin \beta \right)$	Gl. 4-10

Dabei ist β = Neigung des Ablagerungs-Abschnittes, β_u = Neigung des steileren Zulaufgerinnes, V_u = Fliessgeschwindigkeit im Zulaufgerinne, h_u = Abflusstiefe im Zulaufgerinne, S_R = Reibungsgefälle, das als konstant angenommen wird im Auslaufbereich, und g = Erdbeschleunigung. HUNGR et al. (1984) nehmen S_R = 10° an und erhalten damit eine gute Übereinstimmung zwischen beobachteten Werten von L_f für fünf Murgänge im Westen von Kanada und nach Gl. 4-8 berechneten Werten. Hingegen ergibt die Anwendung von Gl. 4-8 auf Murgänge im Kamikamihori Tal in Japan (mit gemessenen Abflussparametern) bessere Schätzwerte für L_f , wenn $S_R \approx (1.1 \tan \beta)$ gewählt wird anstatt S_R = 10°. Das gilt ebenfalls für die Anwendung von Gl. 4-8 auf einige Murgänge in der Schweiz von 1987, wenn Abflusstiefen aus Feldbeobachtungen eingesetzt werden und die Fliessgeschwindigkeiten mit einer CHEZY Gleichung oder mit Gl. 4-2 und Gl. 4-4 berechnet werden (RICKENMANN 2005b). Abb. 4-18 zeigt den Vergleich von berechneten und beobachteten Ablagerungslängen.



Abb. 4-18: Vergleich zwischen berechneten (GI. 4-8 bis GI. 4-10) und beobachteten Ablagerungslängen L_f . Bei den Ereignissen CH 1987 wurde die Fliesgeschwindigkeit (V_u) auf zwei Arten abgeschätzt: einerseits als Funktion der im Felde geschätzten Abflusstiefe (h_u) mit einer Chezy Gleichung für V_u (nach RICKENMANN & WEBER 2000), andererseits anhand der Murenfracht (M) und den GI. 4-2 und GI. 4-4. Es ist darauf hinzuweisen, dass die mit den Gl. 4-8 bis Gl. 4-10 berechneten Werte ein Minimum annehmen für Fliessgeschwindigkeiten V_u zwischen etwa 2 m/s und 4 m/s (RICKEN-MANN 2005b). Eine mögliche Abhängigkeit von S_R von β überrascht insofern nicht, da das Reibungsgefälle ja von den Materialeigenschaften des Murganges abhängt, was sich grob auch im Kegelgefälle widerspiegelt. Weitere Methoden zur Abschätzung der Reichweiten von Murgängen sind in RICKENMANN (2005b) sowie RICKENMANN & SCHEIDL (2010) diskutiert.

4.4.5 Aufprallkräfte

Beim Auftreffen von Murgängen auf Hindernisse kann die Aufprallkraft aus dem Staudruck abgeschätzt werden. Im Bereich der Murgangfront können Steine und grosse Blöcke von bis zu mehreren Metern Durchmesser transportiert werden. In diesem Fall sind lokal grössere Drücke zu erwarten. Aufgrund von Messungen des Murgang-Aufpralls auf feste Hindernisse wird abgeschätzt, dass der Staudruck im Mittel um etwa einen Faktor 2 bis 4 zu multiplizieren ist (GEO 2000). Die Formel für den dynamischen Aufpralldruck p_d [N/m²] infolge von Murgängen lautet:

Dabei ist ρ_M [kg/m³] = Dichte des Murganggemisches, V = Fliessgeschwindigkeit [m/s], β_d = Aufprallwinkel (häufig β_d = 90°) und α_d = empirischer Koeffizient (für Murgänge etwa α_d = 2 bis α_d = 4). In umfangreichen kleinmassstäblichen Modellversuchen wurden Aufprallkräfte von Murganggemischen gemessen, wobei die maximalen Werte für α_d kleiner als 4 waren (HOLZINGER & HÜBL 2004). Für die Berücksichtigung des Aufpralls einzelner grosser Blöcke auf ein Bauwerk ist ein Berechnungsansatz in EGLI (2005) beschrieben.

Zur Abschätzung der Aufprallkraft von granularen Murgängen führt eine theoretisch abgeleitete Formel von COUSSOT (1997) zu einer ähnlichen Form wie für den Staudruck von Fluiden, wobei der Multiplikationsfaktor vorläufig nicht genauer bestimmt werden kann und grössere Werte annehmen kann als 2 bis 4. Weitere Ansätze zur Berechnung der der Aufprallkraft von Murgängen wurden von ARMANINI & SCOTTON (1993) sowie von ZANUTTIGH & LAM-BERTI (2006) vorgeschlagen. RICKENMANN (2008) verglich diese Ansätze für den Bereich von Abflusstiefen und Fliessgeschwindigkeiten, wie sie auf dem Wildbachkegel bei Murgängen erwartet werden können. Es zeigte sich, dass bei FROUDE Zahlen *Fr* deutlich kleiner als 1 der hydrostatische Anteil wichtig ist, während für *Fr* > 1 der hydrodynamische Anteil (siehe auch Gl. 4-11) dominiert.

4.5 Modelle zur Simulation von Murgängen

4.5.1 Rein empirische Ansätze

Die Gefahrenhinweiskarte "Hochwasser/Murgang" in der Schweiz soll in einem Übersichtsmassstab (z.B. 1:50'00 oder 1:25'000) aufzeigen, wo potentielle Gefahren sind und wo nicht. Dazu sind die bei Extremereignissen gefährdeten Gebiete zu bestimmen (für eine Wiederkehrperiode in der Grössenordnung von ca. 300 Jahren, analog zu den Lawinen). Die Gefahrenräume bei Murgängen sind im Wesentlichen von der Reichweite sowie der seitlichen Ausbreitung auf dem Kegel abhängig. Zu deren Abschätzung können empirische Ansätze oder einfache Modelle verwendet werden (RICKENMANN 2005b).

Einen interessanten Ansatz entwickelten IVERSON et al. (1998), bei welchem die Ablagerungsfläche von Lahars über eine empirische Funktion mit dem Ereignisvolumen korreliert ist. Durch zusätzliche Annahmen können mit einem Geographischen Informationssystem (GIS) auf einfache Weise potentiell gefährdete Gebiete abgegrenzt werden. Ein ähnlicher Ansatz wurde von HOFMEISTER et al. (2003) und von BERTI & SIMONI (2007) auch für Murgänge implementiert. Kern dieser Modelle ist ein empirischer Zusammenhang zwischen der planimetrischen Ablagerungsfläche von Murgängen und dem Ereignisvolumen. Als Erweiterung wird im Modell TopRunDF über eine zufallsbasierte Verteilung der potentiellen Fliesspfade die Topographie des Kegels viel stärker mitberücksichtigt (SCHEIDL & RICKENMANN 2010). Das Modell TopRunDF wurde anhand zahlreicher Murgangereignisse in der Schweiz, in Österreich und in Südtirol getestet (RICKENMANN & SCHEIDL 2010). TopRunDF kann von einer Webseite heruntergeladen werden: http://www.debris-flow.at.

4.5.2 Einfache analytische Methoden

ZIMMERMANN et al. (1997) sowie GAMMA (2000) beschreiben eine automatisierte Anwendung von einfachen Modellen mit Verwendung eines GIS. Diese Methode wurde in einigen Gebieten der Schweiz zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten eingesetzt. Die Anrisszonen von Murgängen werden im Wesentlichen aufgrund eines Grenzgefälles oder Gefällsbereiches festgelegt. Zur Abschätzung der Fliessgeschwindigkeit und der Reichweite wird ein Massenpunktmodell für das Fliessverhalten eines Voellmy Fluides verwendet. Die zwei Reibungsparameter des Voellmy Ansatzes müssen aufgrund von früheren Ereignissen abgeschätzt werden (RICKENMANN 2005b). Die Ausbreitung auf dem Kegel wird aufgrund eines stochastischen Algorithmus simuliert, der ebenfalls vorgängig zu eichen ist. Das Geschiebepotential wird vereinfacht über geschieberelevante Flächen abgeschätzt. Je nach zu erwartender Murenfracht wird eine grössere Zahl von Simulationsdurchgängen gerechnet, und damit wird die Ausbreitung auf dem Kegel gewissermassen mit der Ereignisgrösse gekoppelt. Das resultierende Modell heisst DFWalk. In der Schweiz wurden die Parameter des Voellmy Modells DFWalk anhand der Nachrechnung von insgesamt 75 Murgangereignissen mit Volumen zwischen 3000 m³ und 450'000 m³ abgeschätzt (ZIMMERMANN et al. 1997; GAMMA 2000; GENO-LET 2002).

Das Voellmy Modell wurde ursprünglich für die Berechnung des Fliessverhaltens von Schneelawinen entwickelt (Bartelt et al. 1999), und basiert teilweise auf Ansätzen aus der Hydraulik. Dass die Ablagerungen von Murgängen und Schneelawinen eine gewisse Ähnlichkeit aufweisen, illustriert Abb. 4-19.

HUNGR et al. (1984) und TAKAHASHI (1991) beschreiben einen einfachen analytischen Ansatz zur Beschreibung der Fliessdistanz eines konstanten Murgangstromes im Auslaufbereich auf dem Kegel. Der Ansatz basiert auf der Impulsgleichung und der Annahme von konstanten Reibungsverlusten (siehe Gl. 4-8 bis Gl. 4-10); er wurde zuerst für Lawinen entwickelt und dann auf Murgänge angewandt. Die Hauptschwierigkeit liegt in der Bestimmung des Reibungskoeffizienten im Auslaufbereich (RICKENMANN 2005b). Dieser Ansatz wurde in TopFlowDF implementiert, welches ansonsten Ähnlichkeit mit dem Modell TopRunDF aufweist (SCHEIDL & RICKENMANN 2011). Im Unterschied zu TopRunDF wird keine empirische Fläche-Volumen Beziehung benötigt, dafür ist bei TopFlowDF der empirisch bestimmte Reibungskoeffizient wichtig.

LENZI et al. (2003) verknüpfen in einer GIS-Umgebung ein eindimensionales Fliessmodell für das Gerinne mit einem zweidimensionalen Ausbreitungsmodell auf dem Kegel. Es handelt sich dabei um mehr hydraulisch basierte Ansätze, wobei ein eigentliches Stoppen des Murganggemisches nicht simuliert werden kann.



Abb. 4-19: Vergleich der Ablagerungen eines Murgangs (linkes Bild, Ereignis vom 19.7.1987; Foto A. Godenzi, Chur) und einer Schneelawine (rechtes Bild; Foto R. Godenzi, Poschiavo, Bilddatum 8.5.1978). Beim Wildbach handelt es sich um die Val Varuna in der Nähe von Poschiavo (Kanton Graubünden, Schweiz). Die beiden Massenverlagerungsprozesse führten zu vergleichbaren Ablagerungsvolumen.

4.5.3 Numerische Simulationsmodelle

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass für schnelle gravitative Massenbewegungen wie Schneelawinen, Murgänge, Bergstürze und Hangrutschungen zum Teil ähnliche Modellansätze vorgeschlagen wurden. Im einfacheren Fall werden diese Ansätze auf die Bewegung eines Massenpunktes reduziert, was zu mathematisch einfacheren Lösungsmethoden führt (siehe vorhergehendes Kapitel 4.5.2). Murgänge zeigen bei höheren Fliessgeschwindigkeiten oft ein flüssigkeitsähnliches Verlagerungsverhalten, während im Anfangsstadium und bei der Ablagerung auch bodenmechanische Aspekte wichtig sind. Daher wurden für Murgänge und andere schnelle gravitative Massenbewegungen Modelle entwickelt, die auch Ansätze zur Beschreibung von laminaren und turbulenten, Newtonschen und nicht-Newtonschen Flüssigkeiten beinhalten.

Zur Beschreibung des Material- bzw. Fliessverhaltens von Murgängen existieren verschiedene 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.

Bei den Simulationsmodellen für Murgänge können grob zwei Gruppen unterschieden werden. Bei der einen Gruppe von Modellen wird das Murganggemisch in erster Näherung als *quasi-homogene* Flüssigkeit betrachtet. Das Fliessverhalten wird durch ein rheologisches Modell beschrieben. Ein rheologisches Modell stellt einen Zusammenhang zwischen der Scherrate γ_s (= Änderung der Fliessgeschwindigkeit / Änderung der Fliesstiefe) und der Schubspannung τ (ein Mass für den Fliesswiderstand) dar. Das laminare Fliessverhalten von

$$au = \mu \gamma_s$$
 GI. 4-12

wobei μ = die dynamische Viskosität ist. Das einfachste Modell zur Beschreibung vom Fliessverhalten von viskosen Murgängen ist das sogenannte BINGHAM Modell (siehe Abb. 4-20):

$$\tau = \tau_B + \mu \gamma_s$$
Gl. 4-13

Die Variable τ_B steht hierbei für die "Grenzschubspannung" – ein zweiter Materialparameter – die durch die treibenden Kräfte überwunden werden muss, bevor es zu einer Bewegung (zum Fliessen) kommen kann. Wie aus Abb. 4-20 ersichtlich ist, gibt es eine Reihe weiterer Modelle zur Beschreibung des Fliessverhaltens von Murgängen ("pseudoplastisch" \rightarrow scherverdünnend, d.h. die effektive Zähigkeit nimmt mit zunehmender Scherbeanspruchung ab; "dilatant" \rightarrow scherverdickend, d.h. die effektive Zähigkeit nimmt mit zunehmender Scherbeanspruchung zu). Die rheologischen Eigenschaften des Gemisches müssen meistens geschätzt werden. Für das feinere Material des Murganges können die rheologischen Parameter anhand von Labormessungen für verschiedene Wasseranteile bestimmt werden. Es ist noch wenig bekannt, wie die gröberen Komponenten die Rheologie beeinflussen. Bei der Anwendung solcher Modelle muss eine Ganglinie für das Murganggemisch als Input am oberen Modellrand definiert werden (wobei die Feststoffkonzentration variieren kann). Erosion und Deposition von Feststoffen wird in der Regel nicht betrachtet. Diese Modelle können zur Simulation des Ausbreitungsverhaltens auf dem Kegel verwendet werden.

Das Modell FLO-2D (O'BRIEN et al. 1993) ist das kommerziell schon am längsten erhältliche zweidimensionale Simulationsprogramm für Murgänge, und es wurde daher recht häufig angewendet. Es beinhaltet als rheologisches Modell eine Kombination des BINGHAM Modells mit einem inertialen Reibungsterm nach BAGNOLD/TAKAHASHI sowie einem turbulenten Reibungsterm; diese zwei letzten Reibungsterme werden zusammengefasst und mit einem empirisch bestimmten, CHEZY-ähnlichen Koeffizienten berücksichtigt (O'BRIEN et al. 1993). Als etwas komplexere Variante für eine viskoplastische Flüssigkeit wurde auch ein HERSCHEL-BULKLEY Ansatz in einem Simulationsprogramm für Murgänge implementiert (LAIGLE & COUSSOT 1996; RICKENMANN et al. 2006b).





Bei der Anwendung z.B. von FLO-2D und auch anderer Simulationsmodelle zeigt sich generell, dass eine genaue Berücksichtigung der Geländetopographie bzw. der Häuser und Verkehrswege eine grosse Bedeutung hat (RICKENMANN et al. 2006b), wie beispielhaft auch Abb. 4-21 illustriert.



Abb. 4-21: Simulation der Murgangablagerungen vom 24. August 1987 auf dem Kegel des Minstigerbaches (Schweiz) mit dem Programm FLO-2D. Die dunkelrot punktierte Fläche entspricht den beobachteten 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-STRICKLER Wert, aber mit unterschiedlichen BINGHAM-Parametern gerechnet. Die gelb-grünlich punktierte Fläche im unteren Kegelbereich bezeichnet fluviale Verschwemmungen mit feinerem Sediment.

Bei der zweiten Gruppe von Modellen wird die Massenkontinuität für das Wasser und die Feststoffe separat betrachtet, d.h. es handelt sich um *zwei-Phasen Modelle*. Die Erosion und Ablagerung von Feststoffen werden mit einfachen Ansätzen berücksichtigt. Solche Modelle wurden insbesondere in Japan entwickelt (z.B. NAKAGAWA et al. 2000). Bei den zwei-Phasen Modellen kann ein Abflusshydrograph als Input verwendet werden, und die resultierende Feststoffkonzentration hängt im Wesentlichen vom Gerinnegefälle und den Eigenschaften des Sohlenmaterials ab. Die Ablagerung von Feststoffen erfolgt nach Ansätzen aus dem Sedimenttransport.

Ein weiterer Modellansatz berücksichtigt Porenwasserdrücke und andere bodenmechanische Aspekte (IVERSON & DENLINGER 2001). Dabei werden die zwei Phasen Feststoffe und Flüssigkeit über die Mischungstheorie gekoppelt. Bezüglich der 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, die eine gewisse Ähnlichkeit zu "hydraulischen" Simulationsmodellen aufweisen. Zumindest bei höheren Fliessgeschwindigkeiten im Gerinne scheinen Reibungsgesetze ähnlich denjenigen für turbulenten Reinwasser-Abfluss brauchbare Resultate zu liefern (RICKENMANN & KOCH 1997). Auch das ebenfalls für Schneelawinen angewendete VOELLMY Modell beruht auf einem Ansatz für den turbulenten Fliesswiderstand nach CHEZY. Bevor eine zuverlässige Voraussage über das Ablagerungsverhalten auf dem

Kegel gemacht werden kann, sollte mehr Erfahrung bezüglich der Modell- und Parameterwahl bei Simulationsmodellen vorhanden sein. Vergleiche zwischen Naturbeobachtungen und Resultaten aus Simulationsberechnungen mit verschiedenen Modellansätzen sind z.B. in RICKENMANN et al. (2006b) und NÄF et al. (2006) diskutiert.

Von HUNGR (1995) stammt das DAN Modell für die Analyse des eindimensionalen Fliessverhaltens von Massenbewegungen, wobei zwischen einer Reihe von rheologischen "Reibungsansätzen" gewählt werden kann. Ähnliche Simulationsmodelle wurden auch an der WSL entwickelt (RICKENMANN & KOCH 1997; NÄF et al. 2006). Das DAN Modell wurde zum Beispiel erfolgreich zur Nachrechnung von Hangrutschungen bzw. Murgängen in Hong Kong eingesetzt, unter Verwendung der VOELLMY-Rheologie und teilweise einer rein Coulombschen Reibung in der Anrisszone (AYOTTE & HUNGR 2000). Das DAN-Modell wurde später erweitert für zwei-dimensionale Berechnungen und ist als effizientes Werkzeug für praktische Anwendungen konzipiert (MCDOUGALL & HUNGR 2004; HUNGR & MCDOUGALL 2009).

Der VOELLMY Ansatz ist in der Schweiz vor allem wegen der Anwendung für Schneelawinen bekannt und beinhaltet einen basalen (Coulombschen) und einen "turbulenten" Reibungsparameter (BARTELT et al. 1999). Numerische Modelle mit einer VOELLMY Rheologie wurden erfolgreich zur Nachrechnung von Hangrutschungen, Hangmuren und Murgängen in Gerinnen verwendet (RICKENMANN & KOCH 1997; HÜRLIMANN et al. 2003; CHEN & LEE 2003; SWARTZ et al. 2003; MCARDELL et al. 2003; REVELLINO et al. 2004). An der WSL wurde das Modell RAMMS für Murgänge entwickelt, sowohl in einer 1D Version als auch in einer 2D Version (SCHEUNER et al. 2009). Als Erweiterung wurde auch ein Modul von RAMMS zur Simulation von Hangmuren entwickelt (CHRISTEN et al. 2012). Detaillierte Angaben zum RAMMS Modell für Murgänge und Hangmuren finden sich unter: http:/ramms.slf.ch.

Kontinuumsmechanische Simulationsmodelle liefern grundsätzlich die genaueste Beschreibung des Bewegungs- oder Fliessvorganges, einschliesslich der Deformation der bewegten Masse entlang des Weges sowie räumlich und zeitlich detaillierten Angaben zu den Fliessparametern. Die Kenntnis der räumlichen Verteilung der Parameter Fliessgeschwindigkeit und Abflusstiefe ist wichtig für die Gefahrenkartierung nach den Schweizer Empfehlungen (BWW/BRP/BUWAL 1997). Es muss allerdings betont werden, dass die rheologischen Modellparameter oder Reibungsparameter in der Regel nicht auf direkte Weise (z.B. anhand von Proben) bestimmt werden können, sondern aufgrund von Erfahrung angenommen oder im besseren Fall anhand von früheren Ereignissen im gleichen Gebiet "geeicht" werden müssen (RICKENMANN et al. 2006b). Theoretisch könnten anhand von Proben und Laborversuchen die rheologischen Parameter von viskoplastischen Flüssigkeiten wie für ein BINGHAM oder HERSCHEL-BULKLEY Modell bestimmt werden; dies ist allerdings auch nur bedingt möglich, da dabei der Einfluss der Sedimentpartikel grösser als einige mm nicht berücksichtigt werden kann. Andere Modellansätze gehen davon aus, dass das Verhalten des Abflussgemisches über eine Art Kollisionsintensität ("granulare Temperatur") beschrieben werden und dass sich das mechanische Verhalten über den Fliessweg verändern kann. Somit besteht bezüglich der Wahl geeigneter Fliess- oder Material-Parameter bei den prozessorientierten. physikalisch basierten Modellen eine ähnlich grosse Unsicherheit wie bezüglich der Wahl der Modellparameter bei den rein empirisch basierten Modellen.

Verschiedene Untersuchungen zeigten, dass für das Ablagerungsverhalten von Murgängen auf dem Kegel die Topographie ein sehr wesentlicher und steuernder Faktor ist (RICKEN-MANN et al. 2006b; SCHEIDL & RICKENMANN 2010; RICKENMANN & SCHEIDL 2010). In diesem Sinne ist es auch wichtig, dass das Gerinne auf dem Kegel im Geländemodell möglichst genau abgebildet ist, d.h. das Geländemodell möglichst hoch aufgelöst und repräsentativ ist. Falls z.B. der Gerinnequerschnitt im Modell in einem oberen Abschnitt kleiner ist als in der Realität, könnte dort ein Ausbrechen simuliert werden, aber in der Realität wäre vielleicht ein Abschnitt weiter unten auf dem Kegel kritischer für einen möglichen Ausbruch des Murganges aus dem Gerinne. Bei den Szenarien bezüglich der Ausgangsbedingungen sind neben der Annahme des totalen Murgangvolumens bei einem Ereignis z.B. auch die Annahmen über die Anzahl Schübe und über die mögliche Änderung der Sohlenlage im Gerinne auf dem Kegel (z.B. durch Ablagerung von langsameren Schüben) zu berücksichtigen.

4.6 Szenarien und Ablagerung im Kegelbereich

4.6.1 Unsicherheit und Szenarien

Oft sind die Angaben über frühere Ereignisse sehr beschränkt, und die Abschätzung der Auftretenshäufigkeit von Ereignissen bestimmter Grösse ist nur grob und nicht mittels statistischer Methoden möglich. Man wird deshalb auch mit Szenarien arbeiten, welchen ungefähre Wiederkehrperioden zugeordnet werden.

Murgänge treten in der Regel in steileren Wildbacheinzugsgebieten auf. Dort besteht häufig eine starke Interaktion zwischen verschiedenen Prozessen. Hangprozesse können zu bedeutenden Feststoffeinträgen in die Gerinne führen. Eine grössere Hangrutschung kann einen Aufstau des Gerinneabflusses mit Dammbruchgefahr zur Folge haben. In den steilen Gerinnen selber sind die Prozesse "Hochwasser", "Geschiebetransport" und "Murgänge" oft stark miteinander verknüpft. Dabei sind neben möglichen Feststoffherden (Orte der Geschiebeherkunft) vor allem die kritischen Stellen von Interesse, wo es zu Blockierungen oder Verstopfungen des Gerinnes oder zu Abflussbehinderungen und damit zu Ausuferungen kommen kann (z.B. Verklausung bei einer Brücke), welche die potentiellen Übersarungsoder Übermurungsflächen beeinflussen.

Ebenfalls zu berücksichtigen sind die noch relativ grossen Unsicherheiten sowohl bei der Anwendung empirischer Methoden als auch bei der Verwendung numerischer Simulationsmodelle. Eine Unterscheidung in verschiedene Murgangtypen (granulare Murgänge, Schlammströme) ist heute erst ansatzweise möglich. Es ist daher wichtig, in einem technischen Bericht die getroffenen Annahmen genau festzuhalten, auf Unsicherheiten hinzuweisen und allenfalls Sensitivitätsüberlegungen zu den gewählten Eingabe- und Randbedingungen durchzuführen. Bei der Beurteilung der Wirksamkeit von Massnahmen ist auch auf allfällig notwendige Unterhaltsarbeiten hinzuweisen.

4.6.2 Spuren früherer Ablagerungen auf dem Kegel

Falls Spuren früherer Murgänge auf dem Kegel und/oder historische Dokumente vorhanden sind, sollte sich die Beurteilung des Ablagerungsverhaltens auf diese Hinweise abstützen (siehe auch Tab. 4-2). Dabei sind allenfalls die Grössen (Flächen) der gefährdeten Zonen entsprechend der erwarteten Murenfracht anzupassen. Bei der Beurteilung der Spuren auf dem Kegel (alte Ablagerungen) sollten vor allem nachfolgende Faktoren berücksichtigt werden. Generell weisen steilere Kegel mit einer unruhigen Kegeltopographie mit rauer Oberfläche (bei einem natürlichen Kegel) auf Murgangaktivität hin.

<u>Alte Ablagerungen</u>

Eine Ansammlung von Steinen bzw. Blöcken grösser als etwa 0.5 m bis 1 m Durchmesser lässt auf alte Murgangablagerungen schliessen, insbesondere wenn diese Ablagerungen ausserhalb des Gerinnes liegen. Murwälle (levées) oder Murköpfe sind, sofern noch erkennbar, ebenfalls Hinweise auf murganggefährdete Flächen. Allerdings könnte infolge einer veränderten Topographie am Kegelhals (z.B. neue Richtung des Bachlaufs) jetzt eine andere Seite des Kegels gefährdet sein als früher, oder infolge eines veränderten Abflussregimes (z.B. mit geschiebeärmeren Abflüssen und stark eingetieftem Gerinne am Kegelhals) könnten früher übermurte Flächen jetzt nicht mehr gefährdet sein. Inaktive Abflussrinnen und Relikte alter Bachläufe weisen generell auf frühere Geschiebeaktivität auf dem Kegel hin, die sowohl durch Murgänge als auch durch "normale" Hochwasserereignisse bedingt sein kann.
Zu beachten ist, dass durch die menschliche Nutzung bzw. Überbauung eines Wildbachkegels alte Spuren möglicherweise nicht mehr sichtbar sind.

Vegetationsbedeckung

Sind im Kegelbereich Flächen mit deutlich unterschiedlich alten Baumbeständen vorhanden, so können diese mit dementsprechend weit zurückliegenden Murgangereignissen zusammenhängen (oder durch Lawinenereignisse beeinflusst sein).

Aufschlüsse in alten Ablagerungen

Bei Vorhandensein von Aufschlüssen kann die Art der Schichtung einen Hinweis auf frühere Murgangaktivität und die Einzel-Schichtdicke einen Hinweis auf die Ereignisgrösse geben. Wird von alten Murgangablagerungen auf zukünftig mögliche Ablagerungsflächen geschlossen, ist zu beachten, inwiefern sich die Situation durch allfällige Bachverbauungen oder neue Gebäude verändert hat. Zudem könnten durch eine landwirtschaftliche oder sonstige Nutzung eines Kegels alte Ablagerungsspuren verwischt worden sein.

Entscheidend beeinflusst wird die Art der Ablagerungen davon, ob auf dem Kegel eher Murgänge oder fluviale Geschiebetransportprozesse vorherrschen. Im Bereich der Murgangablagerungen sind alle Korngrössen mehr oder weniger gleichmässig über die Ablagerungsfläche verteilt, wobei grosse Blöcke an der Front einzelner Murgangschübe oft bis zum vordersten Rand der Ablagerungen verfrachtet werden. Bei geschiebeführenden Hochwassern hingegen werden die gröberen Komponenten bei steileren Gefällen abgelagert, während die feineren Partikel in flachere Kegelbereiche transportiert werden. So findet auch nach einem Murgang oftmals durch den nachfolgenden Wasserabfluss noch eine Umlagerung der feineren Korngrössen statt.

4.6.3 Einfache Abschätzung des Ablagerungsverhaltens

Sind keine Spuren oder Hinweise auf ältere Ereignisse vorhanden, müssen die potentiellen Ablagerungszonen allein anhand der erwarteten Murenfracht, der Kegeltopographie und mit Annahmen über die Ablagerungsgeometrie abgeschätzt werden.

Eine Abschätzung möglicher Ausbruchsstellen (im Kegelbereich) kann gemacht werden, indem der benötigte Fliessquerschnitt mit dem vorhandenen Gerinnequerschnitt verglichen wird (siehe auch Abb. 4-13). Dabei sind im Weiteren auch Szenarien zu berücksichtigen, bei welchen es zum Beispiel zur Verklausung eines Querschnittes unter einer Brücke kommt, z.B. als Folge von Schwemmholz-Transport. Das Ablagerungsverhalten auf dem Kegel wird im Wesentlichen von den Materialeigenschaften des Murganges sowie von der Topographie gesteuert. Bei einer einfachen Abschätzung der betroffenen Flächen wird in einem ersten Schritt derjenige Anteil der Murenfracht bestimmt, welcher vermutlich im Gerinne selber zur Ablagerung kommt. Dieser Anteil kann je nach Ausbruchstelle variieren. Auch bei ausreichender Gerinnekapazität ist eine Auffüllung des Gerinnes möglich, z.B. wenn im Mündungsbereich nicht genügend Platz zur Ablagerung des Materials vorhanden ist oder wenn der Vorfluter das eingetragene Material nicht abzutransportieren vermag. Im zweiten Schritt ist dann die restliche Murenfracht auf dem Kegel zu "verteilen".

Falls die Länge von Murgangablagerungen auf dem Kegel mit empirischen Ansätzen geschätzt wird, sollte dieser Wert mit historischen Ablagerungen (falls vorhanden) verglichen und gegebenenfalls entsprechend angepasst werden. Falls keine Hinweise von alten Ablagerungen vorhanden sind, kann in grober Näherung angenommen werden, dass die Ablagerungsbreite etwa der zehnfachen Breite des Murgangstromes beim Kegelhals entspricht (IKEYA 1981). Die mittlere Ablagerungsmächtigkeit von Murgangablagerungen auf dem Kegel liegt oft im Bereich von 0.5 m bis ca. 3 m. Mit diesen groben Richtwerten ist es möglich, die Murenfracht einigermassen plausibel auf dem Kegel zu verteilen. Dabei ist aber immer zu beachten, dass die möglichen Ausbruchstellen und die Topographie sowie Bauwerke (Gebäude, Verkehrswege) das Ausbreitungs- und Ablagerungsverhalten wesentlich beeinflussen können.

4.7 Schlussbemerkungen

Neben den hier vorgestellten Ansätzen finden sich weitere Zusammenstellungen mit Angaben zur Abschätzung verschiedener Murgangparameter auch in HUNGR et al. (1984), IKEYA (1981, 1987), PWRI (1988), RICKENMANN (1995, 1999), TAKAHASHI (1981), VANDINE (1985, 1996) und HEINIMANN et al. (1998). Zur Gefahrenbeurteilung von murfähigen Wildbächen sind hier vor allem verschiedene empirische Methoden ausführlicher diskutiert. Es gibt zwar bereits eine Reihe von Modellvorstellungen zur Beschreibung des Entstehungs-, Fliess- und Ablagerungsverhaltens von Murgängen. Diese Modelle gelten allerdings jeweils für spezifische Materialmischungen und Randbedingungen. In der Natur können bei Murgängen die Materialzusammensetzung und der Wassergehalt sehr stark variieren. Die Grenzen der Anwendbarkeit der Modellbeschreibungen auf verschiedene Arten von Murgängen in der Natur sind noch wenig bekannt, weshalb empirischen Ansätzen vorläufig immer noch eine grosse Bedeutung zukommt.

Bezüglich der Vorhersage von Murgängen ist es prinzipiell möglich, für regional begrenzte Gebiete kritische Grenzwerte des Niederschlages zu bestimmen, vorausgesetzt, dass genügend Beobachtungen über vergangene Ereignisse vorhanden sind. Hingegen ist es kaum möglich, eine Prognose über den genauen Ort (Bachgerinne) des Auftretens zu machen. Während eines Murgangereignisses können durch Warnanlagen gefährdete Verkehrswege gesperrt werden (CHANG 2003; BADOUX et al. 2009).

Oft sind die Angaben über frühere Ereignisse sehr beschränkt, und die Abschätzung der Auftretenshäufigkeit von Ereignissen bestimmter Grösse ist nur grob möglich. Trotzdem sind Angaben zu früherer Murgangaktivität neben einer Beurteilung des Feststofflieferungspotentials des Einzugsgebietes sehr wichtig. Sie sind nicht nur die Basis für die Magnitude-Frequenz Beziehung, sondern können auch wichtige Hinweise zum Fliessverhalten liefern. Daher kommt der Ereignisdokumentation (z.B. HÜBL et al. 2002) sowie dem Erstellen von Ereigniskatastern (z.B. Storme-Datenbank des Bundesamtes für Umwelt in der Schweiz oder der WSL Unwetterschaden-Datenbank) eine grosse Bedeutung zu.

Die Prozessbeurteilung von Murgängen beruht in der Praxis vor allem auf der Analogie zu früheren Ereignissen, auf einer integralen Beurteilung des Einzugsgebietes sowie auf empirischen Ansätzen zur Schätzung der wichtigsten Murgangparameter. Die wichtigste Kenngrösse zur Abschätzung der Murganggefährdung ist die mögliche Murenfracht. Vermehrt kommen auch Geographische Informationssysteme (GIS) zur Erfassung des Erosionspotentials sowie numerische Modelle zur Simulation des Fliessverhaltens zum Einsatz. Einfache, halb-empirische Reichweitenmodelle werden zum Beispiel in Kombination mit einem GIS für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten verwendet.

Detaillierte Prozessabschätzungen sind für die Erarbeitung von Gefahrenkarten nötig. Dafür kommen auch Simulationsrechnungen mit numerischen Murgangmodellen in Frage. Eine Unsicherheit bildet dabei die Bestimmung oder Schätzung der Modellparameter zur Charakterisierung des Material- oder Fliessverhaltens. Diese Parameter lassen sich im Allgemeinen nicht auf direkte Weise anhand von Proben des Murgangmaterials bestimmen, da die dazu notwendigen rheologischen Messgeräte nicht zur Verfügung stehen. Sie müssen daher aufgrund der Nachrechnung ähnlicher Ereignisse abgeschätzt werden. Ohne vorgängige Parametereichung besteht zurzeit noch eine relativ grosse Unsicherheit bezüglich der Resultate solcher Simulationsrechnungen. Bei der Gefahrenbeurteilung sind auch mögliche Überlagerungen von Prozessen zu berücksichtigen. So können zum Beispiel Sedimentablagerungen von einem Murgang durch ein nachträgliches Hochwasser auf dem Kegel teilweise wieder erodiert und weiter abwärts transportiert werden (Abb. 4-21 und Abb. 4-22).



Abb. 4-22: Murgangablagerungen vom 24. August 1987 auf dem Kegel des Minstigerbaches in der Schweiz (Foto M. Zimmermann, Thun). Der Murgang mit einem Schub ereignete sich anfangs Nachmittag, die fluvialen Ablagerungen stammen von einem Hochwasser, das am Abend auftrat.

5 Magnitude und Frequenz von Wildbachereignissen

Es existieren noch keine Methoden, mit welchen eine genaue Auftretenswahrscheinlichkeit von Murgangereignissen einer bestimmten Grösse in Wildbachgebieten ermittelt werden kann (JAKOB 2012). Diese Aussage gilt ähnlich auch für geschiebeführende Hochwasser-Ereignisse in Wildbächen. In diesem Fall kann allerdings eine engere Verknüpfung mit einem Hochwasser einer bestimmten Jährlichkeit gemacht werden. Falls Daten über frühere Ereignisse vorhanden sind, ist dies oft eine sehr wichtige Information, auch wenn in der Regel damit keine statistischen Auswertungen im engeren Sinne gemacht werden können. Das Konzept der Extremwertanalyse von Hochwasserabflüssen ist unter Umständen nur bedingt auf Wildbachereignisse zu übertragen; bei beschränktem Geschiebepotential kann zum Beispiel die Wahrscheinlichkeit eines zukünftigen Ereignisses auch vom Ausräumungszustand des Gebietes abhängen.

Die wichtigsten Faktoren im Zusammenhang mit dem Auftreten von Murgängen sind die Identifizierung möglicher Anrisszonen und Feststoffherde (und damit der Ereignisgrösse) sowie die Abschätzung der Ereignishäufigkeit. Die Ereignisgrösse (Feststofffracht oder Murenfracht) ist einer der wichtigsten Parameter, und deren Bezug zur Ereignishäufigkeit ist für die Gefahrenbeurteilung von grosser Wichtigkeit. In murfähigen Wildbächen ist in der Regel die Murenfracht (wesentlich) grösser als die Fracht eines Hochwasserereignisses mit nur fluvialem Geschiebetransport und damit für die Gefahrenbeurteilung relevanter. Hier wird deshalb vor allem auf die Methoden zur Bestimmung der Murenfracht eingegangen. Die Murenfracht beinhaltet in der Regel das Volumen von Feststoffen und Poren. Empirische Werte zur Murenfracht basieren häufig auf den Feststoffablagerungen eines ganzen Ereignisses. Die Ereignisgrösse wird hier mit der Murenfracht gleichgesetzt.

Für die Abschätzung der Muren- oder Feststofffracht eines Wildbachereignisses sind die hydrologischen und geomorphologischen Charakteristika eines Einzugsgebietes wichtig. Grundsätzlich sind für die Geschiebelieferung in Wildbächen sowohl die Massenverlagerungen im Hangbereich als auch die Erosion bzw. Ablagerung von Sedimenten entlang der Gerinne (Sohle und Ufer) von Bedeutung (Abb. 5-1).



Abb. 5-1: Vereinfachtes Prozesssystem für Wildbäche, nach LIENER (2000) bzw. GERTSCH (2009). Die Geschiebefracht eines Wildbachereignisses hängt ab von der Geschiebelieferung aus den Hangbereichen sowie von der Erosion bzw. Ablagerung von Sedimenten entlang der Gerinnes (Sohle und Ufer- bzw. Böschungsbereiche).

Einen Überblick über geologisch-geomorphologische Grundlagen der Wildbachkunde und wichtige Erosions- und Massenverlagerungsprozesse geben BUNZA et al. (1976). Nach STINY (1931) ist ein Wildbach-Einzugsgebiet mit "Jungschutt" dadurch charakterisiert, dass die Geschiebeherde hauptsächlich aus relativ rezentem Lockermaterial bestehend, welches z.B. durch mechanische und chemische Verwitterung gebildet wird. Im Gegensatz dazu gibt es in einem Wildbach-Einzugsgebiet mit "Altschutt" nach STINY (1931) in der Regel umfangreiche Lockermaterial-Vorkommen, z.B. glaziale, hochgelegene Talverfüllungen aus Moränen der verschiedenen Eiszeiten. Die Moränen, insbesondere solche mit viel Feinmaterial, zählen zu den gefährlichsten Geschiebeherden der Alpen, und sie können für die Ereignisfracht von Wildbach-Hochwassern und Murgängen eine wichtige Rolle spielen (LUZIAN et al. 2002).

5.1 Empirische Ansätze zur Abschätzung der Ereignisgrösse

Einige empirische Ansätze zur Abschätzung der Muren- oder Feststofffracht eines Wildbachereignisses sind in Tab. 5-1 zusammengestellt. Solche Ansätze enthalten in der Regel einfache Parameter des Einzugsgebietes. Sie erlauben die Abschätzung entweder eines oberen Grenzwertes oder eines mittleren Wertes der möglichen Muren- oder Feststofffracht. Beim Ansatz von KRONFELLNER-KRAUS (1984) variiert *K* mit der Geologie und der Einzugsgebietsfläche, mit Werten zwischen etwa 250 (Wildbäche des Alpenvorlandes in Österreich) und etwa 1750 (Wildbäche mit grossen Geschiebeherden in "Altschutt" [siehe auch Kap. 5.5]). Der Wert für den geologisch-lithologischen Index $I_{\rm G}$ nach D'AGOSTINO & MARCHI (2001) kann je nach Verwitterungsanfälligkeit des Untergrundes Werte zwischen etwa 0.5 und 5 annehmen.

Der Vergleich zwischen beobachteten Frachten in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgrösse zeigt eine grosse Streuung von mehreren Grössenordnungen (Abb. 5-3); diese Streuung kann mit den obigen Schätzformeln nur sehr grob mitberücksichtigt werden. Solche Ansätze kommen daher eher auf Stufe Gefahrenhinweiskarte zur Anwendung. Für die Entwicklung zuverlässigerer Ansätze müssen insbesondere die geologischen, geomorphologischen und hydrologischen Besonderheiten eines Wildbach-Einzugsgebietes berücksichtigt werden, wozu detailliertere Untersuchungen erforderlich sind.

Tab. 5-1: Einfache empirische Gleichungen zur groben Abschätzung der Ereignisfracht eines Murganges oder geschiebeführenden Hochwassers in einem Wildbach; N = Anzahl Ereignisse als Grundlage der Ableitung der Formeln. Definition der Parameter: M = "maximale" Ereignisfracht [m³]; M_a = mittlere Ereignisfracht [m³]; A_c = Einzugsgebietsfläche [km²]; S_c = mittleres Gerinnegefälle [-]; S_f = mittleres Kegelgefälle [-]; L_c = Länge des aktiven Gerinnes [m]; K = Torrentialitäts-Faktor; I_G = geologisch-lithologischer Index. (*) Diese Beziehung wurde zuerst für Ereignisfrachten bei Geschiebetransport abgeleitet, und die Koeffizienten wurden dann für 15 grössere Murgangereignisse in Österreich angepasst.

Formel	N	Quelle
$M = K A_c \ 100 \ S_c$	1420	Kronfellner-Kraus (1984); Kronfellner-Kraus (1987)
$M = 27000 A_c^{0.78}$	~ 65	Zeller (1985); Rickenmann (1995)
$M_a = 150 A_c (100 S_f - 3)^{2.3}$	15 (*)	HAMPEL (1980)
$M = L_c (110 - 250 S_f)$	82	RICKENMANN & ZIMMERMANN (1993)
$M_a = 13600 A_c^{0.61}$	551	Такеі (1984)
$M_a = 29100 A_c^{0.67}$	64	D'AGOSTINO et al. (1996)
$M_a = 70 A_c S_c^{1.28} I_G$	84	D'Agostino & Marchi (2001)



Abb. 5-2: Feststofffrachten von Murgangereignissen vor allem aus der Schweiz und aus Norditalien, in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgrösse. Ebenfalls eingezeichnet sind einige Schätzformeln aus Tab. 5-1.



Abb. 5-3: Bereiche der beobachteten spezifischen Feststofffrachten (normiert mit der Fläche des Wildbach-Einzugsgebietes) nach Geologie unterteilt, basierend auf Angaben zu Feststoffablagerungen in Geschiebesammlern der Schweiz (nach SPREAFICO et al. 2005).

Es kann in speziellen Fällen hilfreich sein, eine für die Gefahrenbeurteilung geschätzte Feststofffracht mit empirischen Werten von früheren Ereignissen und Beobachtungen zu vergleichen. So gibt es z.B. für die Schweiz eine Zusammenstellung der spezifische Geschiebefrachten pro Jahr oder von Wildbachereignissen, gruppiert nach der vorherrschenden Geologie des Gebietes, d.h. für Wildbäche in den Kalkalpen, im Kristallin, in Molasse- und Flyschgebieten (SPREAFICO et al. 2005) (Abb. 5-3 und Abb. 5-4). Weitere Auswertungen dieser Daten aus Geschiebesammlern deuten darauf hin, dass auch die Form des Einzugsgebietes eine Rolle spielen könnte (GRASSO et al. 2010).



Abb. 5-4: Spezifische Jahresfrachten (normiert mit der Fläche des Wildbach-Einzugsgebietes) in den Untersuchungsgebieten nach Geologie unterteilt (nach SPREAFICO et al. 2005). Tendenziell nimmt die spezifische Jahresfracht mit der Grösse des Einzugsgebietes ab.

5.2 Feldbasierte Abschätzung der Ereignisgrösse

Für eine genauere Beurteilung des Feststoffpotentials (Stufe Gefahrenkarte), welches während eines Murgangereignisses mobilisiert werden kann, ist eine geologischgeomorphologische Beurteilung des Einzugsgebietes zu empfehlen, wobei der Einbezug eines geographischen Informationssystems hilfreich sein kann. Die hauptsächlichen potentiellen Entstehungsgebiete von Murgängen sind steile Rinnen mit viel Geschiebe oder instabile Hänge. Letztere sind auch von Bedeutung für die Entstehung von Hangmuren und den weiteren Materialeintrag entlang des Fliessweges.

Bei der Schätzung des potentiell mobilisierbaren Feststoffvolumens können mittlere Erosionsquerschnitte für einigermassen homogene Gerinneabschnitte benutzt und dann über die ganze Gerinnelänge aufsummiert werden. Typische Werte für Erosionsleistungen in Abhängigkeit der Gerinnebeschaffenheit und geologisch-lithologischen Verhältnisse geben zum Beispiel HUNGR et al. (1984) in Tab. 5-2. Weitere Angaben zu spezifischen Erosionsraten bei Murgang- und Wildbachereignissen finden sich in MARCHI & D'AGOSTINO (2004), Spreafico et al. (1996) und ZIMMERMANN & LEHMANN (1999). In einer Untersuchung über Murgangereignisse in der Schweiz (RICKENMANN & ZIMMERMANN 1993) variierten die mittleren Erosionsleistungen zwischen 40 m³/m und 90 m³/m, und lokal wurden maximale Erosionsquerschnitte von 500 m² bis 650 m² beobachtet. In einer ähnlichen Grössenordnung liegen Erosionsleistungen nach Ausbrüchen von Schweizer Gletscherseen (HAEBERLI 1983). Der Ausbruch von Gletscherseen kann zu sehr gefährlichen Murgängen führen, da unterhalb der Dammbresche grosse Abflussspitzen auftreten können und in den steilen Gerinnen oft Moränenmaterial leicht erodiert werden kann.

Gl. 5-1

Tab.	5-2:	Typische Werte für Erosionsleistungen in Abhängigkeit der Gerinnebeschaffenheit und geo-
		logisch-lithologischen Verhältnisse aus einer kanadischen Untersuchung von HUNGR et al.
		(1984). Dabei wurden Einzugsgebiete mit einer Fläche von 1 bis 3 km ² untersucht.

Gerinne- typ	Gerinne- neigung [°]	Untergrund des Bachbetts	Seitenhänge	Stabilitätsgrad	Erosionsleistung [m³/m]
Ă	20 – 35	Fels	nicht erodier- bar (Fels)	stabil, kaum Lockermaterial	0 – 5
В	10 – 20	wenig Lockerma- terial über Fels	nicht erodier- bar (Fels)	stabil	5 – 10
С	10 – 20	mächtige Schutt- ablagerungen oder Moräne	weniger als 5 m hoch	stabil	10 – 15
D	10 – 20	mächtige Schutt- ablagerungen oder Moräne	Schutthalde, mehr als 5 m hoch	Seitenhänge gerade noch stabil	15 – 20
E	10 – 20	mächtige Schutt- ablagerungen oder Moräne	Schutthalde, mehr als 20 m hoch	Seitenhänge potentiell instabil	bis zu 200

Aufgrund einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen in der Schweiz und in Österreich kann eine grobe empirische Formel zur Abschätzung der "maximalen" Erosionstiefe T_e [m] in Abhängigkeit des lokalen Gerinnegefälles S [m/m] angegeben werden (VAW 1992):

$$T_e = 1.5 + 12.5 S$$

Neben der Beschaffenheit der Sohle spielt prinzipiell auch die Belastung durch das Abflussgemisch eine Rolle; einen groben Ansatz zur Quantifizierung dieses Einflusses auf die Erosionsleistung findet sich in RICKENMANN et al. (2003). Ein Beispiel starker Sohlen- und Sei-



Abb. 5-5: Starke Erosion im Gerinnebereich bei zwei Murgangereignissen vom 18. Juli und 24. August 1987 in der Val Varuna (Nähe von Poschiavo, Kanton Graubünden), Schweiz. (a) Situation vor dem Ereignis (Foto Kraftwerke Brusio AG), (b) Situation nach dem ersten Ereignis (Foto U. Eggenberger, 29.7.1987), (c) Situation nach dem zweiten Ereignis (Foto G. Paravicini, 29.8.1987). Die blauen Kreise markieren den Ort einer alten gemauerten Wildbachsperre. Als Weiterentwicklung des feldbasierten Verfahrens von LEHMANN (1993) wurde in der Schweiz ein Beurteilungsverfahren für die Abschätzung von ereignisspezifischen Feststofffrachten am Kegelhals bzw. in einzelnen Gerinneabschnitten von Wildbächen entwickelt (FRICK et al. 2008, 2011; KIENHOLZ et al. 2010). Diese Methode mit dem Namen "SEDEX" basiert vor allem auf einer Abschätzung im Gelände der möglichen Erosion (bzw. Ablagerung) von Feststoffen in einzelnen Gerinneabschnitten von Wildbächen. Dabei werden mehrere mögliche Ereignis-Szenarien sowie auch die vorhandenen Unsicherheiten systematisch berücksichtigt. Übergeordnetes Ziel ist es, die Nachvollziehbarkeit und Transparenz von Beurteilungen sicherzustellen.

5.3 Kombiniertes Verfahren zur Abschätzung der Ereignisgrösse

In Ergänzung zur Methode SEDEX wurde auch eine etwas komplexere Methode zur Abschätzung der Ereignisgrösse bei Murgängen und fluvialem Geschiebetransport in Wildbächen entwickelt (GERTSCH 2009; GERTSCH et al. 2010; KIENHOLZ et al. 2010). Diese Methode wird als Methode "Gertsch" bezeichnet. Ziel der Methode ist die Abschätzung ereignisspezifischen Geschiebefracht am Kegelhals für Ereignisse mit einer Wiederkehrperiode von mehr als 100 Jahren. Die Methode ermöglicht einen hohen Grad an Nachvollziehbarkeit der Beurteilung.

Die Analyse von 58 in den Schweizer Alpen abgelaufenen Grossereignissen (v.a. Murgangereignisse) mit einer Wiederkehrperiode von mehr als 100 Jahren bildet die Grundlage der Methode. Aus den Erkenntnissen der Analyse wurde ein Verfahren mit einer Hang- und Gerinne-Beurteilungsmatrix in einer Excel-Datei programmiert, welches an 43 Einzugsgebieten validiert wurde. Die Methode ist geeignet für Einzugsgebiete kleiner als 10 km² in alpinen und voralpinen Wildbachsystemen mit einem mittleren Gerinnegefälle von deutlich mehr als 10 %, in welchen mit aktiven Geschiebeverlagerungsprozessen zu rechnen ist.

Der Methode liegt ein systembasierter Ansatz zugrunde. Es wird davon ausgegangen, dass das Ausmass der Geschiebemobilisierung in einem Gerinneabschnitt erstens von den Bedingungen im Gerinneabschnitt selber, zweitens von den Bedingungen und Prozessen in oberhalb liegenden Gerinneabschnitten und drittens von allfälligen Schwellenprozessen im Gesamtsystem beeinflusst werden.

Die Eingangsparameter können in einem geographischen Informationssystem (GIS) bestimmt werden. Viele Arbeitsschritte können teilweise automatisiert in einer Excel-Datei mit einer Hang- und Gerinne-Beurteilungsmatrix durchgeführt werden. Gewisse Werte werden vom Modell vorgeschlagen. Die Methode kann Schreibtisch-basiert und Feld-ergänzt durchgeführt werden. Bei der reinen Schreibtisch-basierten Anwendung stammen die Angaben aus GIS-Daten (Höhenmodell, Primärflächendatensatz CH und Landeskarte CH). Bei diesem Vorgehen liegt die Aussagequalität auf der Gefahrenhinweisstufe. Bei der genaueren Variante werden die GIS-Daten mit gezielten Angaben aus dem Feld ergänzt. Dabei müssen u.a. folgende Erhebungen und Abschätzungen gemacht werden: Geschiebeverfügbarkeit im Gerinneabschnitt und Eintrag durch Hangprozesse abschätzen, qualitatives Ereignisszenario bestimmen, sowie lokale Ablagerungsstellen identifizieren und quantifizieren. Die Aussagequalität dieser genaueren Vorgehensweise ist auf Stufe Gefahrenkarte anzusiedeln.

Das Ergebnis der Methode sind Erosionsleistungen sowie Ablagerungsfrachten und dadurch Geschiebebilanzen einzelner homogener Gerinneabschnitte, woraus die Gesamtgeschiebefracht am Kegelhals bei 100 bis 300 jährlichen Ereignissen bestimmt wird. Es können auch sehr pessimistische Szenarien im Bereich eines Extremereignisses mit einer Jährlichkeit von mehr als 300 Jahren (EHQ) betrachtet werden.

5.4 Hochwasserabfluss und Murgänge

Bei der Auslösung von Murgängen spielt das Wasser die entscheidende Rolle. Da nicht nur der Oberflächenabfluss einen Einfluss hat, ist für die Auslösung nicht allein die Regenintensität von Bedeutung, sondern auch das Ausmass der Sättigung des Untergrundes durch länger anhaltende Niederschläge. Für die Massenverlagerung (Transportvorgang) während des Murgangereignisses muss nicht nur genügend Lockermaterial sondern auch eine Mindestwassermenge vorhanden sein (in den Poren des Lockermaterials und als Gerinneabfluss), damit das Feststoff-Wasser Gemisch den Kegel erreichen kann. Eine Niederschlag-Abfluss Modellierung kann vor allem in kleineren Einzugsgebieten hilfreich sein, um diesen Wasseranteil abzuschätzen, welcher für die entstehende Murenfracht begrenzend sein kann.

Es gibt Ansätze, welche darauf basieren, eine mögliche Murgang-Ganglinie aus einer Abfluss-Ganglinie des Wassers für ein (Teil-)Einzugsgebiet herzuleiten (GOSTNER et al. 2003). Dabei stützt man sich auf eine Bestimmung des Transportvermögens des Wasser-Feststoff Gemisches, oder man erhöht den Abfluss um einen konstanten Geschiebeanteil. Die quantitativen Beziehungen zur Abschätzung der Feststoffkonzentration sind allerdings noch mit grossen Unsicherheiten behaftet. Insbesondere können mit diesem Vorgehen die Maximalabflüsse von Murgängen stark unterschätzt werden, denn der Maximalabfluss eines Murganges entspricht häufig nicht einfach der um den Geschiebeanteil erhöhten Abflussspitze der Reinwasser-Ganglinie. Abschätzungen zeigen, dass der Maximalabfluss eines Murganges durchaus 10 bis 100 Mal grösser sein kann als der Spitzenabfluss eines Hochwassers im gleichen Gebiet bei gleichen Niederschlagsbedingungen (ZIMMERMANN & RICKENMANN 1992; s. auch Kap. 4 und Tab. 4-3).

5.5 Häufigkeit von Wildbachereignissen

Der Entstehungsort und die Auslöseart beeinflussen primär die Ereignisgrösse. Beide Elemente zusammen sind wesentlich für das Fliessverhalten im Gerinne. In einem Gebiet mit beschränktem Feststoffpotential ("Jungschutt"-Wildbach) können die Häufigkeit und die Grösse zukünftiger Murgänge davon abhängen, wo im Gerinne in der Vergangenheit bereits wie viel Material ausgetragen wurde (ZIMMERMANN et al. 1997a, b).

Die zuverlässigste Abschätzung der möglichen zukünftigen Ereignishäufigkeit beruht auf Angaben über vergangene Ereignisse. Eine wichtige Quelle sind historische Dokumente (auch mündliche Überlieferung), eine andere Möglichkeit besteht in der Analyse und Interpretation geomorphologischer Spuren. Oft sind die Angaben über frühere Ereignisse sehr beschränkt, und die Abschätzung der Auftretenshäufigkeit von Ereignissen bestimmter Grösse ist nur grob und nicht mittels statistischer Methoden möglich. Man wird deshalb auch mit Szenarien arbeiten, welchen ungefähre Wiederkehrperioden zugeordnet werden. Einen sehr groben Hinweis kann man allenfalls aus der Häufigkeit von Grenzniederschlags-Situationen ableiten, wobei diese Betrachtung in der Regel mit grösseren Unsicherheiten behaftet ist.

<u>Murgänge</u>

Nach einer Untersuchung anhand von 189 Ereignissen in 17 Wildbach-Einzugsgebieten der Schweiz mit vorwiegend Murgängen zeigt sich, dass gewisse charakteristische Muster bezüglich der Wildbachaktivität bestimmt werden können (ZIMMERMANN et al. 1997a, b). Diese Muster hängen hauptsächlich von der Geschiebeverfügbarkeit bzw. von der Geologie und Lithologie des Einzugsgebietes ab. Aufgrund der Parallele zwischen historischer Information und geomorphologischer Merkmale wurden im Hinblick auf die Wildbachaktivität die nachfolgenden vier Typen gefunden (ZIMMERMANN et al. 1997a, b): 1) Wildbäche mit einem mehr oder weniger regelmässigen Auftreten von Murgängen Der Zeitraum der "Ruheperioden" zwischen Ereignissen beträgt rund 15 bis 30 Jahre, das meiste Geschiebe wird diffus entlang des Gerinnes erodiert, und die Ereignisfracht ist typischerweise kleiner als 100'000 m³. Die Geschiebequellen bestehen häufig aus relativ jungem Verwitterungsmaterial (v.a. "Jungschutt"-Wildbäche nach STINY 1931) (Abb. 5-6).

2) Wildbäche mit einem eher unregelmässigen Auftreten von Murgängen. Nach einer relativen aktiven Periode (Jahre bis wenige Jahrzehnte) kann eine längere Periode mit geringer bis fehlender Aktivität auftreten (mehrere Jahrzehnte). Diese Wildbäche verlaufen vor allem in veränderlich-festem Gestein, wie zum Beispiel Bündnerschiefer. Murgangereignisse können grosse Materialmengen von deutlich mehr als 100'000 m³ verfrachten, welche primär entlang des Fliessweges erodiert werden (Abb. 5-7).



Abb. 5-6: Muren- und Feststofffracht von Wildbachereignissen und deren Häufigkeit in Abhängigkeit von charakteristischen Typen von Einzugsgebieten. Hier ist Typ 1 illustriert (ZIMMERMANN et al. 1997a, b). Die grauen (Teile der) Balken bezeichnen eine Unsicherheit bezüglich der abgeschätzten Ereignisgrösse oder des Ereignistypes (evtl. Hochwasser mit Geschiebetransport).





3) Das Auftreten von Murgängen ist unregelmässig. Das Einzugsgebiet ist durch grosse Geschiebepotentiale vorwiegend in Moränenmaterial charakterisiert ("Altschutt"-Wildbäche nach STINY 1931), und die hauptsächlichen Geschiebequellen finden sich im oberen Teil des Gebietes. Die Murenfracht ist variabel und kann mehrere100'000 m³ betragen (Abb. 5-8).





4) Wildbachgebiete, für die es keine historischen Parallelen für das Auftreten von Murgängen gibt. Ereignisse wie zum Beispiel dasjenige 1987 im Minstigerbach (Kanton Wallis, Schweiz) könnten im Zusammenhang mit der Klimaerwärmung stehen; für diesen Bach ist nachgewiesen, dass über einen Zeitraum von gegen 300 Jahren vor 1987 kein ähnliches Ereignis stattfand. Eine Art Systemwechsel nach sehr langer Zeit der Inaktivität kann aber auch in einigen

Wildbachgebieten im voralpinen Raum festgestellt werden (Schesatobel 1802–1823, und Wartschenbach 1995/1997, beide Österreich; Val da Plaunca 1987, Schweiz) (Abb. 5-9).



Abb. 5-9: Muren- und Feststofffracht von Wildbachereignissen und deren Häufigkeit in Abhängigkeit von charakteristischen Typen von Einzugsgebieten. Hier ist Typ 4 illustriert (ZIMMERMANN et al. 1997a, b). Die grauen (Teile der) Balken bezeichnen eine Unsicherheit bezüglich der abgeschätzten Ereignisgrösse oder des Ereignistypes (evtl. Hochwasser mit Geschiebetransport).

Fluvialer Feststofftransport

Bei Wildbachereignissen mit fluvialem Geschiebetransport (bzw. Feststofftransport) wird die Häufigkeit meistens über die Häufigkeit eines Hochwasserereignisses bzw. des entsprechenden Niederschlagsereignisses bestimmt.

Berechnungen zum fluvialen Geschiebetransport sind angezeigt, wenn in flacheren Wildbachgerinnen die Auftretenswahrscheinlichkeit für Murgänge gering ist. Dann ist es sinnvoll, Abschätzungen zu möglichen Ereignisfrachten mittels einer Integration des Geschiebetransportes über die Dauer einer Hochwasserganglinie zu machen. Bei den Berechnungen zum fluvialen Geschiebetransport ist zu berücksichtigen, dass die Transportformeln eine maximale Geschiebetransportrate ergeben, welche durch den Abfluss und das Fliessverhalten (Hydraulik) bestimmt ist. Gerade in Wildbächen können aber die transportierten Geschiebefrachten auch wesentlich von der Geschiebeverfügbarkeit abhängen bzw. begrenzt werden.

5.6 Allgemeine Bemerkungen zur Abschätzung von Geschiebefrachten in Wildbächen

Die Abschätzung von Geschiebefrachten in Wildbächen für Ereignisse unterschiedlicher Jährlichkeiten im Rahmen einer Gefahrenbeurteilung ist mit einer beträchtlichen Unsicherheit verbunden. Es gibt dafür nur bedingt quantitative Ansätze, und die Abschätzungen basieren häufig auf Frachten von früheren Ereignissen und oft auch stark auf gutachterlichen und feldbasierten Einschätzungen der Verhältnisse im Einzugsgebiet. Unterschiede in den abgeschätzten Geschiebefrachten von einem Faktor 2 (zwischen verschiedenen Gutachtern) liegen durchaus im Rahmen der Unsicherheit.

Eine häufige Problemstellung betrifft die Frage, inwieweit existierende oder geplante Schutzmassnahmen bei der Abschätzung der Geschiebefrachten und der Hochwasserbildung in Wildbächen berücksichtigt werden sollen oder dürfen. Auch hierzu sind quantitative Aussagen oft schwierig zu machen. Ein einfacherer Fall ist die Wirkung eines Geschieberückhaltebeckens: Grundsätzlich kann die zu erwartende Geschiebefracht bachabwärts davon um das voraussichtliche Rückhaltevolumen vermindert werden, falls im Gerinne unterhalb nicht mit wesentlicher Erosion gerechnet werden muss (was bei geschiebearmem Hochwasserabfluss durchaus möglich ist). Schwieriger abzuschätzen ist etwa der Einfluss von Wildbachsperren auf die Geschiebeaufnahme entlang des Gerinnes; diese mögliche Geschiebeaufnahme hängt auch vom Zustand der Sperren (wie z.B. Bauart, Alter, Abnützung oder Schäden) ab. Eine ausführliche Diskussion über die Wirksamkeit von Schutzmassnahmen in Wildbächen im Hinblick auf die Gefahrenbeurteilung findet sich in PLANAT (2008).

6 Allgemeine Bemerkungen zur Gefahrenbeurteilung von Wildbachprozessen

Nachvollziehbarkeit der Prozessanalyse und Gefahrenbeurteilung

Nach KIENHOLZ (1998, 1999, 2002) bzw. PLANAT (2000) soll die Gefahrenbeurteilung nicht nur der Forderung nach sachlicher Richtigkeit genügen, sondern auch möglichst gute Nachvollziehbarkeit gewährleisten. Die Sicherstellung einer guten Nachvollziehbarkeit des Verfahrens ist zwar mit mehr Aufwand verbunden (Dokumentation), hilft jedoch für die Qualitätskontrolle und erleichtert die fachliche Diskussion und den Vergleich verschiedener Gefahrenbeurteilungen.

Die Forderung nach der Nachvollziehbarkeit beinhaltet, dass das gewählte Vorgehen bei der Gefahrenbeurteilung transparent und überprüfbar sein muss. Das Vorgehen, die eingesetzten Verfahren und Methoden, sowie die Interpretation der erhobenen Daten lassen sich dadurch besser kontrollieren. Dies ist auch deshalb wichtig, da eine genaue Überprüfung der Prozessbeurteilung selbst nach einem eingetretenen Ereignis schwierig ist. Nach KIENHOLZ (1999) sind daher folgende Grundregeln zu beachten:

- Flächendeckende Dokumentation (kartographische Darstellung) des gesamten relevanten Perimeters (Gefahren-Entstehungsgebiet und Gefahren-Wirkungsgebiet, d.h. z.B. Wildbacheinzugsgebiet und Schwemmkegel)
- klare Methodenwahl und -kombination und deren Offenlegung
- klar umrissene Entscheidungskriterien bei der Bewertung
- Evidenz einer Aussage angeben

Der letzte Punkt bezieht sich auf die Identifikation von Teilprozessen, deren Evidenz (Vorhandensein) aufgrund von Spuren früherer Ereignisse entweder als "erwiesen", "vermutet" oder "potentiell" qualifiziert werden kann.

Vorgehen bei der Gefahrenbeurteilung und wichtige Aspekte

Die Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT (2000) veröffentlichte Empfehlungen zur Qualitätssicherung bei der Beurteilung von Naturgefahren. Daraus lassen sich als wichtigste Teilschritte oder Aspekte der Gefahrenbeurteilung folgende Elemente aufführen:

- Ereignisdokumentation / Ursachenanalyse
- Karte der Phänomene
- Gefahrenkarte (ev. Gefahrenhinweiskarte)
- Risikoanalyse
- Punktuelle Gefahrenabklärungen
- Schutzmassnahmen / Frühwarndienste

Im Hinblick auf das Vorgehen bei der Gefahrenbeurteilung können darauf basierend die nachfolgenden Teilschritte abgeleitet werden. Diese Teilschritte sind im Zusammenhang mit den in der Schweiz erarbeiteten Empfehlungen (BWW/BRP/BUWAL 1997; BUWAL/ BWW/BRP 1997) kurz zusammengefasst:

a) <u>Grundlagen</u>

Die Ereignisdokumentation bzw. Ursachenanalyse (v.a. nach grösseren und wichtigeren Ereignissen) stellen wichtige Arbeiten zur Erarbeitung von Grundlagen dar. Sie umfassen Abklärungen zu früheren Ereignissen im Untersuchungsgebiet, zu den vorherrschenden Prozessen, zum Wirkungsbereich, zum festgestellten Schaden und zu den auslösenden Faktoren, insbesondere zu den meteorologischen Randbedingungen. Eine detailliertere Dokumentation mit Ursachenanalyse geht zusätzlich der Frage nach, wie sich das entsprechende Ereignis abgespielt hat und weshalb es zu Schäden gekommen ist.

Mit der Karte der Phänomene werden potentiell gefährliche Prozesse dokumentiert, welche v.a. aufgrund von im Feld beobachteten Merkmalen und Indikatoren (Spuren) abgeleitet werden. Diese Karte stellt ebenfalls einen wichtigen Teil der Grundlagen dar.

b) Erarbeitung der Gefahrenkarte

Der Hauptschritt bei der Gefahrenbeurteilung ist die Erarbeitung der Gefahrenkarte. Sie beinhaltet innerhalb eines klar abzugrenzenden Perimeters flächendeckende Angaben zum Gefahrenpotential. Die wichtigsten Elemente bei der Erarbeitung der Gefahrenkarte betreffen in einem Wildbach die Festlegung der massgebenden gefährdenden Prozesse (z.B. Bedeutung von Murgängen, Hanginstabilitäten, fluvialem Geschiebetransport etc.), die Abklärungen zu den Auslösebedingungen und der Eintretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses. Dann folgen Berechnungen und Modellierungen der Prozesse bezüglich der räumlichen Ausbreitung, das heisst insbesondere der Prozessintensität innerhalb der potentiell gefährdeten Gebiete für eine gegebene Eintretenswahrscheinlichkeit. Daraus ergibt sich schliesslich für jeden Prozess und zugehörige Ereignishäufigkeit die Gefahrenstufe (rot, blau, gelb, gelbschraffiert). Bei der Erarbeitung der Gefahrenkarte sind besonders auch nachfolgende Punkte zu beachten.

(i) Magnitude-Frequenz Beziehung:

Eine grosse Herausforderung besteht häufig in der Festlegung der Eintretenswahrscheinlichkeit und der dazugehörigen Grösse eines Ereignisses, da in vielen Fällen die Ereignisgrösse im Wesentlichen die Prozessintensität bestimmt. Es ist daher wichtig, eindeutige Angaben zur Festlegung der Eintretenswahrscheinlichkeit eines gegebenen Prozesses bzw. der dazugehörigen Ereignisgrösse (Magnitude-Frequenz Beziehung) zu machen.

(ii) Berechnungen und Prozessmodellierung:

Eine weitere grosse Herausforderung betrifft die Beschreibung der zeitlichen Entwicklung und räumlichen Verlagerungen eines Teilprozesses ("Modellierung") wie z.B. eines Murganges oder geschiebeführenden Hochwassers. Hierzu können (numerische) Simulationsmodelle oder auch empirische Ansätze verwendet werden. Zur Nachvollziehbarkeit dieses Teilschrittes sind genaue Angaben zu den Annahmen und Grundlagen der Berechnungen notwendig, insbesondere auch zu den gewählten Modellparametern. So sollte z.B. für die Modellierung von Murgängen die Bestimmung möglicher Bereiche der Modellparameter idealerweise auf der Nachrechnung von früheren Ereignissen beruhen. Ist dies nicht möglich, müssen andere Annahmen getroffen werden, z.B. die Verwendung von Modellparametern innerhalb eines Bereiches, wie er für ähnliche Gebiete bzw. Materialzusammensetzungen der Murgänge aufgrund von Nachrechnungen bestimmt wurde.

(iii) Szenarienbildung:

Die eigentliche Bedeutung des Begriffes der Szenarienbildung entstand vor dem Hintergrund, dass v.a. die Interaktion zwischen verschiedenen Prozessen oft schwierig zu quantifizieren ist (v.a. auch in Bezug auf die Eintretenswahrscheinlichkeit einer solchen kombinierten Wirkung). Beispiele für Szenarien in diesem Sinne sind z.B. der Einfluss von Schwemmholz im Hinblick auf eine mögliche (oder nicht auftretende) Verklausung bei einem Brückenquerschnitt, oder das Auftreten einer (grösseren) Rutschung mit Sedimentlieferung in ein Gerinne, die je nach Ort und Art des Eintrages unterschiedliche Auswirkungen im Gefahrenbereich haben kann. Wichtig für die Szenarienbildung ist auch allgemein die Untersuchung von möglichen Schwachstellen (z.B. bezüglich des Ausbrechens des Abflusses aus dem Gerinne), da für eine gegebene Eintretenswahrscheinlichkeit und Ereignisgrösse je nach Ausbruchsort unterschiedliche Gefahrensituationen entstehen können.

(iv) Unsicherheiten:

Die Unsicherheiten sollten benannt und so weit wie möglich quantifiziert werden. Dies betrifft insbesondere die Festlegung der Magnitude-Frequenz Beziehung, vgl. auch (i). So ist z.B. die Abschätzung von Geschiebefrachten in Wildbächen für Ereignisse unterschiedlicher Jährlichkeiten im Rahmen einer Gefahrenbeurteilung mit einer beträchtlichen Unsicherheit verbunden. Unterschiede in den abgeschätzten Geschiebefrachten von einem Faktor 2 (wie in Kapitel 4.6 erwähnt) liegen durchaus im Rahmen der Unsicherheit. Im Weiteren sollte die Unsicherheit insbesondere auch bezüglich der Prozessmodellierung und Annahme von Modellparametern (ii), sowie bezüglich der Festlegung von Szenarien (iii) angegeben werden.

Die Gefahrenkarte dient als zentrale Grundlage für die Risikoanalyse, die Nutzungsplanung, die Planung und Projektierung von Schutzmassnahmen sowie von vorbeugenden Massnahmen des Ereignismanagements (Frühwarnung, Notfallplanung, etc). Aus dieser Perspektive ist klar, dass die Erarbeitung der Gefahrenkarte und die Erstellung des Technischen Berichtes dazu möglichst umfassend und gut dokumentiert erfolgen sollte.

Die Beurteilung der verschiedenen Prozesse in Wildbächen im Hinblick auf eine Gefahrenbeurteilung beruht im Wesentlichen auf Untersuchungen und Berechnungen im Sinne der Ausführungen in diesem Kapitel. Die wichtigsten Aspekte zum Vorgehen sowie die zu berücksichtigenden Teilprozesse sind stichwortartig in Tab. 6-1 zusammengefasst. Tab. 6-1: Die Beurteilung der Prozesse in Wildbächen und Gebirgsflüssen im Hinblick auf eine Gefahrenbeurteilung beruht im Wesentlichen auf Untersuchungen und Berechnungen zu den nachfolgend aufgeführten wichtigen Aspekten oder Teilprozessen.

A: Erhebung Grundlagendaten

- Zielsetzung der Untersuchung (Sanierung, Neubau, Gefahrenzonenplanung, etc.)
- Ereignisdokumentation, Chronik, Ereigniskataster, ev. Ursachenanalyse
- geomorphologische Betrachtung des Einzugsgebietes (inkl. Karte der Prozesse bzw. Karte der Phänomene)
- geographische Kennzahlen des Einzugsgebietes
- vorhandene Schutzmassnahmen

B. Magnitude-Frequenz Beziehung

- Niederschlag (Intensität, Dauer)
- Abfluss
- Auslösemechanismus und Enstehungsort bei Murgängen
- Feststoffpotential/-fracht
- Schwemmholz

je für Eintretenswahrscheinlichkeiten gemäss BWW/BRP/BUWAL (1997)

Dabei ist zu beachten, dass dieser Schritt nicht unabhängig von den Schritten (C) und (D) ist. Beim fluvialen Geschiebetransport erfolgt die Materialaufnahme bzw. -ablagerung typischerweise abflussabhängig entlang des Gerinnes. Bei Murgängen können lokale Anrisszonen (z.B. Hanginstabilitäten) und Sedimenteinträge in das Gerinne die gesamte Feststofffracht dominieren, es kann aber auch die Materialaufnahme entlang des Fliessweges sehr wichtig sein. Bei den Schritten (B), (C) und (D) handelt es sich somit um einen iterativen Prozess.

C. Überlegungen zum Prozessablauf und zu Szenarien

- mögliche Interaktion zwischen verschiedenen Prozessen
- Szenarien bei schwieriger Bestimmung der Prozessabläufe und Quantifizierung der zugehörigen Eintretenswahrscheinlichkeiten
- Einfluss von Schutzmassnahmen

D. Berechnungen zum Fliess-, Transport- und Ablagerungsverhalten

Ziel: Bestimmung der räumlichen Verteilung der Prozessintensitäten für gegebene Eintretenswahrscheinlichkeit und Ereignisgrösse

D 1. Hochwasser

- Abflussermittlung (Spitzenabfluss, Ganglinie)
- Hydraulische Berechnungen

D 2. Schwemmholz

- mobilisierbare Fracht und Abmessungen Einzelstücke
- Transportkapazität
- mögliche Verklausungsstellen, Identifizierung gefährdeter Bereiche
- D 3. Fluvialer Geschiebetransport
 - Abfluss und Hydraulik (vgl. D.1)
 - mobilisierbares Feststoffvolumen
 - Transportkapazität
 - Erosion und Ablagerung
 - Einfluss Schwemmholz (vgl. D.2)

D 4. <u>Murgang</u>

- mobilisierbares Feststoffvolumen (Hanginstabilitäten und Gerinneerosion)
- ev. Vergleich mit Wasserabflussvolumen
- Feststoffkonzentration und Sedimenteigenschaften (Fliesseigenschaften/Rheologie)
- ev. Murgang-Ganglinie am Kegelhals
- Fliess- und Ablagerungsverhalten
- Einfluss Schwemmholz (vgl. D.2, D3)
- Allfällige Prozessüberlagerung (z.B. fluviale Verschwemmung von Murgangablagerungen)

E. Unsicherheiten

- Quantifizierung von Unsicherheiten
- Sensitivitätsanalysen zu Unsicherheiten bzgl. Eingangs- oder Modellparameter
- Teilweise Berücksichtigung von Unsicherheiten durch Szenarienbildung (vgl. C)

7 Literaturverzeichnis

- ABRAHAMS, A.D. (2003): Bedload transport equation for sheet flow. Journal of Hydraulic Engineering, 129, 159–163.
- ABRAHAMS, A.D., LI, G., KRISHNAN, C., ATKINSON, J.F. (2001): A sediment transport equation for interrill overland flow on rough surfaces. Earth Surface Processes and Landforms, 26, 1443–1459.
- ANASTASI, G. (1984): Geschiebeanalysen im Felde unter Berücksichtigung von Grobkomponenten. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 70, 99p.
- ARMANINI, A., SCOTTON, P. (1993): On the Dynamic Impact of a Debris Flowon Structures. Proceedings of XXV IAHR Congress, Tokyo, Tech. Sess. B III, pp. 203–210.
- ASHMORE, P.E. (1982): Laboratory modelling of gravel braided stream morphology. Earth Surface Processes and Landforms, 7, 201–225.
- AULITZKY, H. (1973): Berücksichtigung der Wildbach- und Lawinengefahrengebiete als Grundlage der Raumordnung von Gebirgsländern. In: 100 Jahre Hochschule für Bodenkultur, Band IV, Teil 2, pp.81–117.
- AYOTTE, D., HUNGR, O. (2000): Calibration of a runout prediction model for debris flows and avalanches. In: Wieczorek, G.F. and Naeser, N.D. (eds), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings 2nd International Conference, Taipei, Taiwan, pp. 505–514. Balkema, Rotterdam.
- Aziz, N.M., SCOTT, D.E. (1989): Experiments on sediment transport in shallow flows in high gradient channels. Hydrological Sciences Journal, 34, 465–478.
- BADOUX, A., GRAF, C., RHYNER, J., KUNTNER, R., MCARDELL, B.W. (2009): A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance. Natural Hazards 49 (3), 517–539.
- BARDOU, E. (2002): Méthodologie de diagnostic et prévision des laves torrentielles sur un bassin versant alpin. Thèse no. 2479, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 187 pp. + annexes.
- BARTELT, P., SALM, B., GRUBER, U. (1999): Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmyfluid model with active/passive longitudinal straining. Journal of Glaciology, 45, 242–254.
- BATHURST, J.C. (1985): Flow Resistance Estimation in Mountain Rivers. Journal of Hydraulic Engineering, 111, 625–643.
- BATHURST, J.C. (1987): Measuring and modelling bedload transport in channels with coarse bed materials. In K. Richards (ed.), River Channels – Environment and Process, pp. 272–294. Blackwell, Oxford.
- BATHURST, J.C. (1993): Flow resistance through the channel network. In K. Beven & M. J. Kirkby (eds), Channel Network Hydrology, pp. 69–98, John Wiley, New York.
- BATHURST, J.C. (2007): Effect of coarse surface layer on bed-load transport. Journal of Hydraulic Engineering, 133, 1192–1205.
- BATHURST, J.C. (2013): Critical conditions for particle motion in coarse bed materials of nonuniform size distribution. Geomorphology, 197, 170–184.
- BATHURST, J.C., GRAF, W.H., CAO, H.H. (1982): Initiation of sediment transport in steep channels with coarse bed material. In: Proc. of Euromech 156, Mechanics of Sediment Transport, pp. 207–213.
- BATHURST, J.C., GRAF, W.H., CAO, H.H. (1987): Bed load discharge equations for steep mountain rivers. In Thorne, C.R., Bathurst, J.C., & Hey, R.D. (eds), Sediment transport in gravel bed rivers, pp. 453–477. Wiley, Chichester.
- BERGER, C., MCARDELL, B.W., SCHLUNEGGER, F. (2011): Direct measurement of channel erosion by debris flows, Illgraben, Switzerland. Journal of Geophysical Research – Earth Surface, 116, F01002, doi:10.1029/2010JF001722.
- BERTI, M., SIMONI, A. (2007): Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships. Geomorphology, 90, 144–161.
- BEZZOLA, G.R. (2002): Fliesswiderstand und Sohlenstabilität natürlicher Gerinne unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der relativen Überdeckung. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 173, 258p.

- BEZZOLA, G.R. (2005): Vorlesungsmanuskript Flussbau, Fassung Wintersemester 2005/2006. Professur für Wasserbau an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- BEZZOLA, G.R., GANTENBEIN, S., HOLLENSTEIN, R., MINOR, H.-E. (2002): Verklausung von Brückenquerschnitten. Int. Symposium Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 175, pp. 87–97.
- BEZZOLA, G.R., SCHILLING, M., OPLATKA, M. (1996): Reduzierte Hochwassersicherheit durch Geschiebe. Schweizer Ingenieur und Architekt, 41, 886–892.
- BRAUDRICK, C., GRANT, G.E. (2000): When do logs move in rivers. Water Resources Research, 36, 571–584.
- BRAUDRICK, C., GRANT, G.E. (2001): Transport and deposition of large woody debris in streams: A flume experiment. Geomorphology, 41, 263–284.
- BRAUNER, M. (1999): Modelling the sediment budget of an alpine catchment within a GIS environment. In: Proceedings of the 28th IAHR Congress (1999), Graz, CD-ROM, 6p.
- BRAUNER, M. (2001): Aufbau eines Expertensystems zur Erstellung einer ereignisbezogenen Feststoffbilanz in einem Wildbacheinzugsgebiet. Dissertation am Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen, Universität für Bodenkultur, Wien.
- BRAY, D.I. (1979): Estimating average velocity in gravel-bed rivers. Journal of the Hydraulic Division, 105 (HY9), 1103–1122.
- BUFFINGTON, J.M., MONTGOMERY, D.R. (1997): A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bed rivers. Water Resources Research, 33, 1993–2029.
- BUNTE, K., ABT, S.R. (2001): Sampling surface and subsurface particle size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analysis in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring. U.S. Dep. of Agric., For. Serv., Rocky Mt. Res. Stn., Fort Collins, Colorado, USA.Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-74, 428p.
- BUNTE, K., ABT, S.R., SWINGLE, K.W., CENDERELLI, D.A., SCHNEIDER, J.M. (2013): Critical Shields values in coarse-bedded steep streams. Water Resources Research, 49, 1–21, doi:10.1002/2012WR012672.
- BUNZA, G., KARL, J., MANGELSDORF, J. (1982): Geologisch-morphologische Grundlagen der Wildbachkunde. Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes f
 ür Wasserwirtschaft, Heft 17, M
 ünchen, 128p.
- BUSCOMBE, D., RUBIN, D.M., WARRICK, J.A. (2010): A universal approximation of grain size from images of noncohesive sediment. Journal of Geophysical Research – Earth Surface, 115, F02015, doi:10.1029/2009JF001477.
- BUWAL/BWW/BRP (1997): Empfehlungen: Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Herausgeber: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bern, 42p.
- BWW/BRP/BUWAL (1997): Empfehlungen: Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Herausgeber: Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Biel, 32p.
- CHANG, S.Y. (2003): Evaluation of a system for detecting debris flows and warning road traffic at bridges susceptible to debris flow hazard. In: D. Rickenmann & C.L. Chen (eds.), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, pp 731–742. Millpress, Rotterdam.
- CAINE, N. (1980): The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler, 62A, 23–27.
- CHEN, H., LEE, C.F. (2003): A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes. Geomorphology, 51, 269–288.
- CHIARI, M., RICKENMANN, D. (2009): Modellierung des Geschiebetransportes mit dem Modell SETRAC für das Hochwasser im August (2005) in Schweizer Gebirgsflüssen. Wasser, Energie, Luft, 101, 319–327.

- CHIARI, M., RICKENMANN, D. (2011): Back-calculation of bedload transport in steep channels with a numerical model. Earth Surface Processes and Landforms, 36, 805–815.
- CHIARI, M., FRIEDL, K., RICKENMANN, D. (2010): A one dimensional bedload transport model for steep slopes. Journal of Hydraulic Research, 48, 152–160.
- CHRISTEN, M., BÜHLER, Y., BARTELT, P., LEINE, R., GLOVER, J., SCHWEIZER, A., GRAF, C., MCARDELL, B.W., GERBER, W., DEUBELBEISS, Y., FEISTL, T., VOLKWEIN, A. (2012): Integral hazard management using a unified software environment: numerical simulation tool "RAMMS" for gravitational natural hazards. In: Proc. International Symposium Interpraevent, Grenoble, France, Vol. 1, pp. 77–86.
- COSTA, J.E. (1984): Physical geomorphology of debris flows. In: J.E. Costa & P.J. Fleischer (eds), Developments and applications of geomorphology, Springer, Berlin, 268–317.
- COSTA, J.E. (1988): Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows. In: V.R. Baker, R.C. Kochel & P.C. Patton (eds), Flood Geomorphology, John Wiley & Sons, New York, pp. 113–122.
- COUSSOT P. (1997): Mudflow rehology and dynamics. IAHR Mongraph Series. Rotterdam: Balkema. 255p.
- DAVID, G.C.L., WOHL, E.E., YOCHUM, S.E., BLEDSOE, B.P. (2010): Controls on spatial variations in flow resistance along steep mountain streams. Water Resources Research, 46, W03513, doi:10.1029/2009WR008134.
- D'AGOSTINO, V., CERATO M., COALI, R. (1996): Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino Orientale. [Sediment transport of extreme events in torrents of eastern Trentino], Proc. International Symposium Interpraevent, Garmisch-Partenkirchen, Germany, Bd. 1, pp. 377– 386 [in Italian].
- D'AGOSTINO, V., MARCHI, L. (2001): Debris flow magnitude in the Eastern Italian Alps: data collection and analysis. Physics and Chemistry of the Earth (C), 26, 657–663.
- DE JONG, C., ERGENZINGER, P. (1995): The interrelations between mountain valley form and river-bed arrangement. In: E.J. Hickin (ed), River Geomorphology, pp. 55–91. John Wiley & Sons Ltd.
- DETERT M., WEITBRECHT V. (2012a): Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains a free stand-alone tool. In: Proc. of the 6th International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2012, San José (Costa Rica), pp. 595–600. Boca Raton, London.
- DETERT M., WEITBRECHT V. (2012b): BASEGRAIN 1.0. Wasser, Energie, Luft, 104, 334.
- DITTRICH, A. (1998): Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fliessgewässer. Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, Heft 198, 208p.
- EGASHIRA, S., ASHIDA, K. (1991): Flow resistance and sediment transportation in streams with steppool bed morphology. In: Fluvial Hydraulics of Mountain Regions, pp. 45–58. Springer: Heidelberg.
- EGLI, T. (2005): Wegleitung Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren. Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF, Bern, Kapitel 5 Murgänge, pp. 77–87.
- EINSTEIN, A. (1942): Formulas for the transportation of bed load. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 107, 561–597.
- FEHR, R. (1986): A method for sampling very coarse sediments in order to reduce scale effects in movable bed models. In: Proc. Symposium on Scale effects in modelling sediment transport phenomena, Toronto, IAHR, Delft, pp. 383–397.
- FEHR, R. (1987a): Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 92, 139p.
- FEHR, R. (1987b): Einfache Bestimmung der Korngrössenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse. Schweizer Ingenieur und Architekt, 38, 1104–1109.
- FERGUSON, R. (2007): Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams. Water Resources Research, 43, W05427, doi:10.1029/(2006)WR005422.
- FRENCH, R.H., MILLER, J.J., CURTIS, S. (2001): Estimating the depth of deposition (erosion) at slope transitions on alluvial fans. Journal of Hydraulic Engineering, 127, 780–782.
- FRICK, E., KIENHOLZ, H., ROTH, H. (2008): SEDEX eine Methodik zur gut dokumentierten Abschätzung der Feststofflieferung in Wildbächen. Wasser, Energie, Luft, 100, 131–136.

- FRICK, E., KIENHOLZ, H., ROMANG, H. (2011): SEDEX (SEDiments and EXperts), Anwender-Handbuch. Geographica Bernensia P42, Geographisches Institut der Universität Bern, 128p., ISBN 978-3-905835-27-4.
- GAMMA, P. (2000): dfwalk Ein Murgangsimulationprogramm zur Gefahrenzonierung. Geographica Bernensia, G66, Geographisches Institut der Universität Bern, 144p.
- GARBRECHT, G. (1961): Abflussberechnung für Flüsse & Kanäle. Die Wasserwirtschaft, 51, (2): 40–45, (4): 72–77.
- GAUCKLER, P.G. (1867): Etudes Théoriques et Pratiques sur l'Ecoulement et le Mouvement des Eaux. Comptes Rendues de l'Academie des Sciences, Paris, France, Tome 64, pp. 818–822.
- GENEVOIS, R., TECCA, P.R., BERTI, M., SIMONI, A. (2000): Debris-flow in the Dolomites: Experimental data from a monitoring system. 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, pp. 283–291. Rotterdam: Balkema.
- GENOLET, F. (2002): Modélisation de laves torrentielles Contribution à la paramétrisation du modèle Voellmy-Perla. Postgraduate thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 70p.
- GEO (2000): Review of natural terrain landslide debris-resisting barrier design. Geotechnical Engineering Office (GEO), Civil Engineering Department, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, Special Project Report SPR 1/(2000).
- GERTSCH, E. (2009): Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Bern, 203p. [http://www.zb.unibe.ch/download/eldiss/09gertsch_e.pdf]
- GERTSCH, E., KIENHOLZ, H., SPREAFICO, M. (2010): Projektbericht. Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen – Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 54, 310–315.
- GOSTNER, W., BEZZOLA, G.R., SCHATZMANN, M., MINOR, H.E. (2003): Integral analysis of debris flow in Alpine torrent – the case study of Tschengls. In: D. Rickenmann & C.L. Chen (eds), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings of 3rd International DFHM Conference, Davos, Switzerland, September 10–12, 2003, pp. 1129–1140. Rotterdam: Millpress.
- GRAF, W.H., SUSZKA, L. (1987): Sediment transport in steep channels. Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, 5, 11–26.
- GRAHAM, D.J., ROLLET, A.J., PIEGAY, H., RICE, S.P. (2010): Maximizing the accuracy of image-based surface sediment sampling techniques. Water Resources Research, 46, W02508, doi:10.1029/2008WR006940.
- GRASSO, A., JAKOB, A., SPREAFICO, M., BÉROD, D. (2010): Monitoring von Feststofffrachten in schweizerischen Wildbächen. Wasser, Energie, Luft, 102, 41–45.
- GRANT, G.E., SWANSON, F.J., WOLMAN, M.G. (1990): Pattern and origin of stepped-bed morphology in high gradient streams, Western Cascades, Oregon. Geological Society of America Bulletin, 102, 340–352.
- GÜNTER, A. (1971): Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 3, 69p.
- HAEBERLI, W. (1983): Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps. Annals of Glaciology, 4, 85–90.
- HAEBERLI, W., RICKENMANN, D., ZIMMERMANN, M. (1991): Murgänge. Ursachenanalyse der Unwetterereignisse (1987): Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Bern, Schweiz, Nr. 4, pp. 77–87.
- HAMPEL, R. (1980): Grundlagen für Gefahrenzonen in Wildbächen. Proc. International Symposium Interpraevent, Bad Ischl, Austria, Bd. 3, pp. 83–91.
- HARTLIEB, A., BEZZOLA, G.R. (2000): Ein Überblick zur Schwemmholzproblematik. Wasser, Energie, Luft, 92, 1–5.

- HAYWARD, J.A. (1980): Hydrology and stream sediments in a mountain catchment, in Tussock Grasslands and Mountain Lands Institute Special Publ. no. 17 (Ph. D. dissertation, Lincoln College, Canterbury), New Zealand, 235p.
- HEGG, C., RICKENMANN, D. (1999): Comparison of bedload transport in a steep mountain torrent with a bedload transport formula. In: Hydraulic Engineering for Sustainable Water Resources Management at the Turn of the Millenium. Proceedings 28th IAHR Congress, 22–27 August (1999) in Graz, Austria. [CD-ROM] Graz, Technical University, 7p.
- HEIMANN, F.U.M., RICKENMANN, D., TUROWSKI, J.M. (2014): An efficient tool for simulating bedload dynamics in mountain streams. Geosciences and Model Development (submitted).
- HEINIMANN, H.R., HOLLENSTEIN, K., KIENHOLZ, H., KRUMMENACHER, B., MANI, P. (1998): Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 85. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 248p.
- HEY, R.D. (1979): Flow Resistance in Gravel Bed Rivers. Journal of the Hydraulics Division, 105 (HY4), 365–379.
- HODEL, H. (1993): Untersuchung zur Geomorphologie, der Rauheit des Strömungswiderstandes und des Fliessvorganges in Bergbächen. Dissertation Nr. 9830, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 289p.
- HOFMEISTER, R.J., MILLER, D.J. (2003): GIS-based modeling of debris-flow initiation, transport and deposition zones for regional hazard assessments in western Oregon, USA. In: D. Rickenmann & C.L. Chen (eds), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings 3rd International DFHM Conference, Davos, Switzerland, pp. 1141–1149. Rotterdam: Millpress.
- HOLZINGER, G., HÜBEL, J. (2004): Belastung eines Murbrechers abgeleitet aus Laborversuchen. Proc. International Symposium Interpraevent, Riva del Garda, Italy, Bd. 3, pp. VII/131–139.
- HÜBL, J. (2006): Vorläufige Erkenntnisse aus 1:1 Murenversuchen: Prozessverständnis und Belastungsannahmen. In: FFIG, G. Reiser (Hrsg.), Geotechnik und Naturgefahren: Balanceakt zwischen Kostendruck und Notwendigkeit. Institut für Geotechnik, BOKU Universität Wien, Geotechnik und Naturgefahren, 19.10.2006, Wien.
- HÜBL, J., KIENHOLZ, H., LOIPERSBERGER, A. (eds) (2002): DOMODIS-Documentation of Mountain Disasters, State of Discussion in the European Mountain Areas. International Research Society Interpraevent, Klagenfurt, Austria. http://wasser.ktn.gv.at/interpraevent.
- HUNGR, O. (1995): A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. Canadian Geotechnical Journal, 32, 610–623.
- HUNGR, O., McDOUGALL, S. (2009): Two numerical models for landslide dynamic analysis. Computers & Geosciences, 35, 978–992.
- HUNGR, O., MORGAN, G.C., KELLERHALS, R. (1984): Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. Canadian Geotechechnical Journal, 21, 663–677.
- HUNGR, O., EVANS, S.G., BOVIS, M.J., HUTCHINSON, J.N. (2001): A review of the classification of landslides of the flow type. Environmental & Engineering Geoscience, 7, 221–238.
- HUNGR, O., McDOUGALL, S., BOVIS, M. (2005): Entrainment of material by debris flows. In: M. Jakob & O. Hungr (eds), Debris-Flow Hazards and Related Phenomena, pp. 135–158. Heidelberg: Praxis-Springer.
- HUNZIKER, R.P. (1995): Fraktionsweiser Geschiebetransport. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 138, 191p.
- HUNZIKER, R.P., JAEGGI, M.N.R. (2002): Grain sorting processes. Journal of Hydraulic Engineering, 128, 1060–1068.
- HUNZINGER, L., ZARN, B. (1996): Geschiebetransport und Ablagerungsprozesse in Wildbachschalen. Proc. International Symposium Interpraevent, Garmisch-Partenkirchen, Germany, Bd. 4, pp. 221–230.
- HÜRLIMANN, M., RICKENMANN, D., GRAF, C. (2003): Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. Canadian Geotechechnical Journal, 40, 161–175.
- IKEYA, H. (1981): A method of designation for area in danger of debris flow. In: Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands, International Association of Hydrological Sciences, Publ. no. 132, pp. 576–588.

- IKEYA, H. (1987): Debris flow and its countermeasures in Japan. Bulletin International Association of Engineering Geologists, 40, 15–33.
- IVERSON, R.M., SCHILLING, S.P., VALLANCE, J.W. (1998): Objective delineation of lahar-inundation zones. Geological Society of America Bulletin, 110, 972–984.
- IVERSON, R.M., DENLINGER, R.P. (2001): Flow of variably fluidized granular masses across threedimensional terrain, 1. Coulomb mixture theory. Journal of Geophysical Research, 106 (B1), 537–552.
- JACKSON, W.L., BESCHTA, R.L. (1982): A model of two-phase bedload transport in an Oregon Coast Range stream. Earth Surface Processes and Landforms, 7, 517–527.
- JAKOB, M. (2012): The fallacy of frequency Statistical techniques for debris-flow frequencymagnitude analyses. In: E. Eberhardt, C.A. Froese, K. Turner, & S. Leroueil (eds), Landslides and Engineered Slopes: Protecting society through improved understanding, pp. 741– 750. CRC Press/Balkema.
- JÄGGI, M.N.R. (1992): Sedimenthaushalt und Stabilität von Flussbauten. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 119, 100p.
- JARRETT, R.D. (1984): Hydraulics of high-gradient streams. Journal of Hydraulic Engineering, 110, 1519–1539.
- JULIEN, P.Y., O'BRIEN, J.S. (1997): On the importance of mud and debris flow rheology in structural design. In C.L. Chen (ed), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, prediction, and Assessment, pp. 350–359. New York: ASCE.
- KAITNA, R. (2006): Debris flow experiments in a rotating drum. Dissertation, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien, 170p.
- KATUL, G., WIBERG, P., ALBERTSON, J., HORNBERGER, G. (2002): A mixing layer theory for flow resistance in shallow streams. Water Resources Research, 38, 1250, doi:10.1029/ (2001)WR000817.
- KEULEGAN, G.H. (1938): Laws of turbulent flow in open channels. Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 21, Research Paper 1151, 707–741.
- KIENHOLZ, H. (1999): Anmerkungen zur Beurteilung von Naturgefahren in den Alpen. In: Relief, Boden, Paläoklima, Vol. 14, pp. 165–184. Berlin und Stuttgart: Gebr. Borntraeger.
- KIENHOLZ, H., HERZOG, B., BISCHOFF, A., WILLI, H.P. (2002): Fragen der Qualitätssicherung bei der Gefahrenbeurteilung. Bündnerwald, 55, 57–67.
- KIENHOLZ, H., FRICK, E., GERTSCH, E. (2010): Assessment tools for mountain torrents: SEDEX© and bed load assessment matrix. Proc. International Interpraevent Symposium, Taipei, Taiwan, pp. 245–256.
- KRONFELLNER-KRAUSS, G. (1984): Extreme Feststofffrachten und Grabenbildungen von Wildbächen. Proc. International Symposium Interpraevent, Villach, Austria, Bd. 2, 109–118.
- KRONFELLNER-KRAUSS, G. (1987): Zur Anwendung der Schätzformel für extreme Wildbach-Feststofffrachten im Süden und Osten Oesterreichs. Wildbach- und Lawinenverbau, 51, 187–200.
- LAIGLE, D., COUSSOT, P. (1997): Numerical modelling of debris flows. Journal of Hydraulic Engineering 123, 617–623.
- 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 – Earth Surface, 113, F0(2008), doi:10.1029/(2007)JF000831.
- LANGE, D., BEZZOLA G.R. (2006): Schwemmholz, Probleme und Lösungsansätze. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 188, 125p.
- LEHMANN, C. (1993): Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen Grundlagen und Anleitung. Geographica Bernensia G42, Bern.
- LENZI, M.A., D'AGOSTINO, V., GREGORETTI, C., SONDA, D. (2003): A simplified numerical model for debris flow hazard assessment: DEFLIMO. In: D. Rickenmann & C.L. Chen (eds), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings of 3rd International DFHM Conference, Davos, Switzerland, September 10–12, 2003, pp. 611–622. Rotterdam: Millpress.

LIENER, S. (2000): Zur Feststofflieferung in Wildbächen. Geographica Bernensia G64, Bern.

- LUZIAN, R., KOHL, B., BICHLER, I., KOHL, J., BAUER, W. (2002): Wildbäche und Muren Eine Wildbachkunde mit einer Übersicht von Schutzmassnahmen der Ära Aulitzky. Forstliche Bundesversuchsanstalt, Wien, ISBN 3-901347-34-8, 163p.
- MÄCHLER, D. (2009): GIS-Modellierung von potentiellen Schwemmholzeinträgen durch Rutschungen. Semesterarbeit, Umweltingenieurwesen, Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW), Wädenswil, 22 p.
- MANNING, R. (1890): On the flow of water in open channels and pipes. Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland, 20, 161–207.
- MARCHI, L., BROCHOT, S. (2000): Les cônes de déjection torrentielles dans les Alpes françaises; morphométrie et processus de transport solide torrentiel. Revue de géographie alpine, 88, 23– 38.
- MARCHI, L., ARATTANO, M. & DEGANUTTI, A.M. (2002): Ten years of debris flows monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps): Geomorphology 46 (1/2), 1–17.
- MARCHI, L., D'AGOSTINO, V. (2004): Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. Earth Surf. Process. Landforms 29(2): 207–220.
- MATHYS, N., BROCHOT, S., MEUNIER, M., RICHARD, D. (2003): 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, 527–548.
- MAZZORANO, B. (2009): Woody debris recruitment prediction methods and transport analysis. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien.
- MCARDELL, B.W., ZANUTTIGH, B., LAMBERTI, A., RICKENMANN, D. (2003): Systematic comparison of debris flow laws at the Illgraben torrent, Switzerland. In D. Rickenmann & C.L. Chen (eds), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment; Proceedings 3rd International DFHM Conference, Davos, Switzerland, September 10–12, 2003, pp. 647–657. Rotterdam: Millpress.
- MCARDELL, B.W., BARTELT, P., KOWALSKI, J. (2007): Field observations of basal forces and fluid pore pressure in a debris flow. Geophysical Research Letters, 34, L07406, doi:10.1029/(2006)GL029183.
- McDougall, S., Hungr, O. (2004): A model for the analysis of rapid landslide motion across threedimensional terrain. Canadian Geotechnical Journal, 41, 1084–1097.
- MEYER-PETER, E., MÜLLER, R. (1948): Formulas for bedload transport. In: Proceedings 2nd meeting Int. Assoc. Hydraulic Structures Res., Stockholm, Sweden, Appendix 2, pp. 39–64.
- MEYER-PETER, E., MÜLLER, R. (1949): Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs. Schweizerische Bauzeitung, 67, 29–32.
- MIZUYAMA, T. (1981): An intermediate phenomenon between debris flow and bed load transport. In: Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands, International Association of Hydrological Sciences, Publ. no. 132, pp. 212–224.
- MIZUYAMA, T., KOBASHI, S., OU, G. (1992): Prediction of debris flow peak discharge. Proc. International Symposium Interpraevent, Bern, Switzerland, Bd. 4, pp. 99–108.
- MONTGOMERY, D.R., BUFFINGTON, J.M. (1997): Channel reach morphology in mountain drainage basins. Geological Society of America Bulletin, 109, 596–611.
- MORVAN, H., KNIGHT, D., WRIGHT, N., TANG, X., CROSSLEY, A. (2008): The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1D, 2D and 3D numerical simulation models, Journal of Hydraulic Research, 46, 191–208.
- NÄF, D., RICKENMANN, D., RUTSCHMANN, P., MCARDELL, B.W. (2006): Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model. Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, 155–165.
- NAKAGAWA, H., TAKAHASHI, T., SATOFUKA, Y. (2000): 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; Proceedings 2nd International DFHM Conference, Taipei, Taiwan, August 16–18, 2000, pp. 193–201. Rotterdam: Balkema.
- NAKAMURA, J. (1980): Investigation manual on prediction of occurrence of dosekiryu [debris flows], delineation of dangerous zone affected by dosekiryu and arrangement of warning and evac-

uation system in mountain torrents in Japan. Proc. International Symposium Interpraevent, Bad Ischl, Austria, Bd. 3, pp. 41–81.

- NITSCHE, M., TUROWSKI, J.M., BADOUX, A., PAULI, M., SCHNEIDER, J., RICKENMANN, D., KOHOUTEK, T.K. (2010): Measuring streambed morphology using range imaging. In: A. Dittrich, K. Koll, J. Aberle & P. Geisenhainer (eds), River Flow 2010, Bundesanstalt für Wasserbau, pp. 1715– 1722. ISBN 978-3-939230-00-7.
- 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 macroroughness in steep mountain streams. Water Resources Research, 47, W08513, doi:10.1029/2011WR010645.
- NITSCHE, M., RICKENMANN, D., KIRCHNER, J.W., TUROWSKI, J.M., BADOUX, A. (2012a): Macro-roughness and variations in reach-averaged flow resistance in steep mountain streams, Water Resources Research, 48, W12518, doi: 10.1029/2012WR012091.
- NITSCHE, M., RICKENMANN, D., TUROWSKI, J.M., BADOUX, A., KIRCHNER, J.W. (2012b): Verbesserung von Geschiebevorhersagen in Wildbächen und Gebirgsflüssen durch Berücksichtigung von Makrorauigkeit. Wasser, Energie, Luft, 104, 129–139.
- NNADI, F.N., WILSON, K.C. (1992): Motion of contact-load particles at high shear stress. Journal of Hydraulic Engineering, 118, 1670–1684.
- O'BRIEN, J.S., JULIEN, P.Y., FULLERTON, W.T. (1993): Two-dimensional water flood and mudflow simulation. Journal of Hydraulic Engineering, 119, 244–261.
- PAGLIARA, S., CHIAVACCINI, P. (2006): Flow Resistance of Rock Chutes with Protruding Boulders. Journal of Hydraulic Engineering, 132, 545–552.
- PALT, S.M. (2001): Sedimenttransporte im Himalaya-Karakorum und ihre Bedeutung für Wasserkraftanlagen. Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 209, 257p.
- PALT, S.M., DITTRICH, A. (2002): Stabilität von Gebirgsflüssen und rauen Rampen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 54, 75–86.
- PARKER, G. (2008): Transport of gravel and sediment mixtures. In: M.H. Garcia (ed), Sedimentation engineering: Theories, measurements, modeling, and practice, pp. 165–252. Reston, USA: ASCE.
- PHILLIPS, C.J., DAVIES, T.R.H. (1991): Determining rheological parameters of debris flow materials. Geomorphology, 4, 101–110.
- PIERSON, T.C. (1986): Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. In: A.D. Abrahams (ed.), Hillslope Processes, pp. 269–296. Boston, USA: Allen and Unwin.
- PIERSON, T.C., COSTA, J.E. (1987): A rheologic classification of subarerial sediment-water flows. Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, Vol. VII, 1–12.
- PLANAT (2000): Empfehlungen zur Qualitätssicherung bei der Beurteilung von Naturgefahren. Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT), Bern, 20 p.
- PLANAT (2008): Wirkung von Schutzmassnahmen. Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT), Bern, Strategie Naturgefahren Schweiz, Umsetzung des Aktionsplans PLANAT 2005–2008, Projekt A3, Schlussbericht 2. Phase, Testversion, Dezember 2008. 289p.
- PORTO, P., GESSLER, J. (1999): Ultimate bed slope in Calabrian streams upstream of check dams: field study. Journal of Hydraulic Engineering, 125, 1231–1242.
- PWRI (1988): Technical standard for measures against debris flow (Draft). Technical Memorandum of Public Works Research Institute (PWRI), No. 2632, Ministry of Construction, Japan, 48p.
- RAETZO, H., RICKLI, C. (2007): Rutschungen. In: G.R. Bezzola & C. Hegg (eds), Ereignisanalyse Hochwasser (2005), Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BafU, Bern und Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, pp. 195–209.
- RECKING, A. (2009): Theoretical development on the effects of changing flow hydraulics on incipient bed load motion. Water Resources Research, 45, W04401, doi:10.1029/(2008)WR006826.
- RECKING, A. (2013): An analysis of nonlinearity effects on bed load transport prediction. Journal of Geophysical Research Earth Surface, 118, 1264–1281, doi:10.1002/jgrf.20090.
- REID, L.M., DUNNE, T. (1996): Rapid evaluation of sediment budgets. Geo-Ecology Texts, Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, 164p.

- REVELLINO, P., HUNGR, O., GUADAGNO, F.M., EVANS, S.G. (2004): Velocity and runout simulation of destructive debris flows and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campania region, Italy. Environmental Geology, 45, 295–311.
- RICKENMANN, D. (1990): Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 103, 249p.
- RICKENMANN, D. (1991): Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. Journal of Hydraulic Engineering, 117 (11), 1419–1439.
- RICKENMANN, D. (1994): An alternative equation for the mean velocity in gravel-bed rivers and mountain torrents. In G.V. Cotroneo & R.R. Rumer (eds), Proceedings ASCE 1994 National Conference on Hydraulic Engineering, Buffalo N.Y., USA, Vol. 1, pp. 672–676.
- RICKENMANN, D. (1995): Beurteilung von Murgängen. Schweizer Ingenieur und Architekt, 48, 1104– 1108.
- RICKENMANN, D. (1996): Fliessgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. Wasser, Energie, Luft, 88, 298–304.
- RICKENMANN, D. (1996): Murgänge: Prozess, Modellierung und Gefahrenbeurteilung. In B. Oddsson (ed), Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse, Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften, pp. 397–407. Basel: Birkhäuser.
- RICKENMANN, D. (1997a): Sediment transport in Swiss torrents. Earth Surface Processes and Landforms, 22, 937–951.
- RICKENMANN, D. (1997b): Schwemmholz und Hochwasser. Wasser, Energie, Luft, 89, 115–119.
- RICKENMANN, D. (1999): Empirical relationships for debris flows. Natural Hazards, 19, 47–77.
- RICKENMANN, D. (2001a): Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. Water Resources Research, 37, 3295–3305.
- RICKENMANN, D. (2001b): Murgänge in den Alpen und Methoden zur Gefahrenbeurteilung. In: Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Nr. 124, pp. 51–77.
- RICKENMANN, D. (2003): Methoden zur Beurteilung von Murgängen. Teil-Bericht für das Projekt ETALP des BMLFUW, Wien, Oesterreich.
- RICKENMANN, D. (2005a): Geschiebetransport bei steilen Gefällen. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 190, pp. 107–119.
- RICKENMANN, D. (2005b): Runout prediction methods. In: M. Jakob & O. Hungr (eds), Debris-Flow Hazards and Related Phenomena, pp. 263–282. Heidelberg: Praxis-Springer.
- RICKENMANN, D. (2008): Lastfälle aus Murgangprozessen Bemessungsgrundlagen. Herbstkurs der Fachleute für Naturgefahren (FAN), Bellinzona, Schweiz, 17.9.2008.
- RICKENMANN, D. (2012): Alluvial steep channels: flow resistance, bedload transport and transition to debris flows. In: M. Church, P. Biron & A. Roy (eds), Gravel Bed Rivers: Processes, Tools, Environment, pp. 386–397. Chichester, England: John Wiley & Sons.
- RICKENMANN, D., ZIMMERMANN, M. (1993): The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. Geomorphology, 8, 175–189.
- RICKENMANN, D., KOCH, T. (1997): Comparison of debris flow modelling approaches. In C.L. Chen (ed), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings 1st International DFHM Conference, San Francisco, CA, USA, August 7–9, 1997, pp. 576–585. New York: ASCE.
- RICKENMANN, D., WEBER, D. (2000): 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, pp. 245–254. Rotterdam: Balkema.
- RICKENMANN, D., MCARDELL, B.W. (2007): Continuous measurement of sediment transport in the Erlenbach stream using piezoelectric bedload impact sensors. Earth Surface Processes and Landforms, 32, 1362–1378.
- RICKENMANN, D., SCHEIDL, C. (2010): Modelle zur Abschätzung des Ablagerungsverhaltens von Murgängen. Wasser, Energie, Luft, 102, 17–26.

- RICKENMANN, D., KOSCHNI, A. (2010): Sediment loads due to fluvial transport and debris flows during the 2005 flood events in Switzerland. Hydrological Processes, 24, 993–1007.
- RICKENMANN, D., RECKING, A. (2011): Evaluation of flow resistance equations using a large field data base. Water Resources Research, 47, W07538, doi:10.1029/2010WR009793.
- RICKENMANN, D., HÜRLIMANN, M., GRAF, C., NÄF, D., WEBER, D. (2001): Murgang-Beobachtungsstationen in der Schweiz. Wasser, Energie, Luft, 93, 1–8.
- RICKENMANN, D., WEBER, D., STEPANOV, B. (2003): Erosion by debris flows in field and laboratory experiments. In: D. Rickenmann & C.L. Chen (eds), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings of 3rd International DFHM Conference, Davos, Switzerland, September 10–12, 2003, pp. 883–894. Rotterdam: Millpress.
- RICKENMANN, CHIARI, M., FRIEDL, K. (2006a): SETRAC A sediment routing model for steep torrent channels. In R. Ferreira, E. Alves, J. Leal & A. Cardoso (eds), River Flow 2006, pp. 843–852. London: Taylor & Francis.
- RICKENMANN, D., LAIGLE, D., MCARDELL, B.W., HÜBL, J. (2006b): Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. Computational Geosciences, 10, 241–264.
- RICKENMANN, D., HEIMANN, F.U.M., BÖCKLI, M. TUROWSKI, J.M., BIELER, C., BADOUX, A., (2014): Geschiebetransport-Simulationen mit sedFlow in zwei Gebirgsflüssen der Schweiz. Wasser Energie Luft (eingereicht).
- RICKLI, C., BUCHER, H.U. (2006): Einfluss ufernaher Bestockungen auf das Schwemmholzvorkommen in Wildbächen. Projektbericht zuhanden des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Schweiz, 94p.
- RICKLI, C., RAETZO, H., MCARDELL, B., PRESLER, J. (2008): Hanginstabilitäten. In: G.R. Bezzola & C. Hegg (eds), Ereignisanalyse Hochwasser 2005: Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, pp. 97–116.
- RIMBÖCK, A. (2003): Schwemmolzrückhalt in Wildbächen. Grundlagen zu Planung und Berechnung von Seilnetzsperren. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Nr. 94, Technische Universität München, 163p.
- RINDERER, M., JENEWEIN, S., SENFTER, S., RICKENMANN, D., SCHÖBERL, F., STÖTTER, J., HEGG, C. (2009): Runoff and bedload transport modelling for flood hazard assessment in small alpine catchments – the model PROMAB-GIS. In E. Veulliet, J. Stötter & H. Weck-Hannemann (eds), Sustainability in Natural Hazard Management, pp. 69–101. Berlin: Springer-Verlag.
- ROSPORT, M. (1998): Fliesswiderstand und Sohlstabilität steiler Fliessgewässer unter Berücksichtigung gebirgsbachtypischer Sohlstrukturen. Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 196, 144p.
- RÖSSERT, R. (1978): Hydraulik im Wasserbau. 4. Auflage, Oldenbourg, München.
- RUDOLF-MIKLAU, F. (2001): Untersuchungen an kohäsionslosen Sedimenten in kalkalpinen Wildbächen der Steiermark (Österreich). Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien.
- RUDOLF-MIKLAU F., HÜBL J., SCHATTAUER G., RAUCH H. P., KOGELNIG A., HABERSACK H., SCHULEV-STEINDL E. (2011): Handbuch Wildholz – Praxisleitfaden. Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt, 32p.
- RUF, G. (1990): Fliessgeschwindigkeiten in der Ruetz/Stubaital/Tirol. Wildbach- und Lawinenverbau, 54 (115), 219–227.
- RYAN, S.E., PORTH, L.S., TROENDLE, C.A. (2005): Coarse sediment transport in mountain streams in Colorado and Wyoming, USA. Earth Surface Processes and Landforms, 30, 269–288.
- SCHÄLCHLI, U. (1991): Morphologie und Strömungsverhältnisse in Gebirgsbächen: Ein Verfahren zur Festlegung von Restwasserabflüssen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 113, 112p.
- SCHEIDEGGER, J. (1970): Theoretical Geomorphology. 2. Auflage, Springer, Berlin.
- SCHEIDL, C., RICKENMANN, D. (2010): Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. Earth Surface Processes and Landforms, 35, 157–173.
- SCHEIDL, C., RICKENMANN, D. (2011): TopFlowDF A simple GIS based model to simulate debris-flow runout on the fan. In: R. Genevois, D.L. Hamilton & A. Prestininzi, Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment; Proceedings 5th International DFHM Con-

ference, Padova, Italy, June 14–17, 2011, pp. 253–262. Roma: Casa Editrice Università La Sapienza. doi: 10.4408/IJEGE.2011-03.B-030.

- SCHEUNER T., KEUSEN, H.R., MCARDELL, B.W., HUGGEL, C. (2009): Murgangmodellierung mit dynamisch-physikalischem und GIS-basiertem Fliessmodell. Fallbeispiel Rotlauigraben, Guttannen, August 2005. Wasser, Energie, Luft, 101, 15–21.
- SCHILLING, M., HUNZIKER, R. (1995): Programmpaket MORMO Grundlagen. In: Mathematische Modelle offener Gerinne, ÖWAV-Seminar Konstruktiver Wasserbau – Landschaftswasserbau, 21. Nov. 1995, Bd. 17, pp. 91–104.
- SCHOKLITSCH, A. (1914): Über Schleppkraft und Geschiebebewegung. Engelmann, Leipzig und Berlin.
- SCHREINER, A. (1997): Einführung in die Quartärgeologie. 2. Auflage, E. Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 257p.
- SCHRÖDER, R.C.M. (1994): Technische Hydraulik Kompendium für den Wasserbau. Springer, Berlin.
- SCHÜRCH, P., DENSMORE, A.L., ROSSER, N.J., MCARDELL, B.W. (2011): Dynamic controls on erosion and deposition on debris-flow fans. Geology, 39, 827–830.
- SHIELDS, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffsbau, Berlin, Heft 26.
- SMART, G.M., JÄGGI, M.N.R. (1983): Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 64, 188p.
- SMART, G.M., DUNCAN, M.J., WALSH, J.M. (2002): Relatively rough flow resistance equations, Journal of Hydraulic Engineering, 128, 568–578.
- SPREAFICO, M., LEHMANN, C., NAEF, O. (1996): Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. Teil I: Handbuch, 46p. + Anhang; Teil II: Fachliche Grundlagen, 113p. Groupe de travail pour l'hydrologie operationelle (GHO), Mitteilung Nr. 4, Landeshydrologie und – geologie, Bern.
- SPREAFICO, M., LEHMANN, CH., JAKOB, A., GRASSO, A. (2005): Feststoffbeobachtung in der Schweiz. Berichte des Bundesamtes für Wasser und Geologie, Serie Wasser, Nr. 8, Bern.
- STINY, J. (1931): Die geologischen Grundlagen der Verbauung der Geschiebeherde in Gewässern. Springer, Wien.
- STRICKLER, A. (1923): Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauhigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Sekretariat des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft, Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft, Bern, Nr. 16.
- SWARTZ, M., MCARDELL, B., BARTELT, P. (2003): Interpretation of the August 2000 Schipfenbach debris flow event using numerical models. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 184, pp. 51–60.
- TAKAHASHI, T. (1981): Estimation of potential debris flows and their hazardous zones; soft countermeasures for a disaster. Journal of Natural Disaster Science, 3 (1), 57–89.
- TAKAHASHI, T. (1987): High velocity flow in steep erodible channels. Proc. XXII IAHR Congress, Lausanne, Switzerland, Technical Session A, pp. 42–53.
- TAKAHASHI, T. (1991): Debris Flow. IAHR Monograph Series, Balkema Publishers, the Netherlands.
- TAKEI, A. (1984): Interdependence of sediment budget between individual torrents and a river-system. Proc. International Symposium Interpraevent, Villach, Austria, Bd. 2, 35–48.
- THOMPSON. S.M., CAMPELL, P.L. (1979): Hydraulics of a large channel paved with boulders. Journal of Hydraulic Research, 17, 341–354.
- TOGNACCA, C., BEZZOLA, G.R., 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, Proceedings 2nd International DFHM Conference, Taipei, Taiwan, August 16–18, 2000, pp. 89–97. Rotterdam: Balkema.
- TUROWSKI, J.M., YAGER, E.M., BADOUX, A., RICKENMANN, D., MOLNAR, P. (2009): The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel. Earth Surface Processes and Landforms, 34, 1661–1673.
- VANDINE, D.F. (1985): Debris flows and debris torrents in the Southern Canadian Cordillera. Canadian Geotechnical Journal, 22, 44–68.

- VANDINE, D.F. (1996): Debris flow control structures for forest engineering. Province of British Columbia, Ministry of Forests Research Program, Working Paper 22/(1996), 75p.
- VAW (1992): Murgänge 1987: Dokumentation und Analyse. Unveröffentlichter Bericht, No. 97.6, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- VETSCH, D., FÄH, R., FAHRSI, D., MÜLLER, R. (2005): BASEMENT Ein objektorientiertes Software-system zur numerischen Simulation von Naturgefahren. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 190, p. 201–212.
- WALDNER, P., RICKLI, C., KÖCHLI, D., USBECK, T., SCHMOCKER, L., SUTTER, F. (2007): Schwemmholz. In: G.R. Bezzola & C. Hegg (eds), Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, pp. 181–193.
- WALDNER, P., SCHMOCKER, L., SUTTER, F., RICKENMANN, D., RICKLI, C., LANGE, D., KÖCHLI, D. (2008): Schwemmholzbilanzen. In: G.R. Bezzola & C. Hegg (eds), Ereignisanalyse Hochwasser 2005: Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, pp. 136– 143.
- WALDNER, P., KÖCHLI, D., USBECK, T., SCHMOCKER, L., SUTTER, F. RICKLI, C., RICKENMANN, D., LANGE, D., HILKER, N., WIRSCH, A., SIEGRIST, R., HUG, C., KAENNEL, M. (2009): Schwemmholz des Hochwassers (2005). Schlussbericht des Teilprojekts 'Schwemmholz' zu Handen BA-FU/WSL. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 72p.
- WARD, T.J. (1986): Discussion of "Sediment transport formula for steep channels" by G.M. Smart, Journal of Hydraulic Engineering, 112, 989–990.
- WARRICK, J.A., RUBIN, D.M., RUGGIERO, P., HARNEY, J., DRAUT, A.E., BUSCOMBE, D. (2009): Cobble cam: grain-size measurements of sand to boulder from digital photographs and autocorrelation analyses. Earth Surface Processes and Landforms, 34, 1811–1821.
- WEBB, B.W., REID, I., BATHURST, J.C., CARLING, P.A., WALLING, D.E. (1997): Sediment erosion, transport and deposition. In: C.R. Thorne, R.D. Hey & M.D. Newson (eds), Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management, pp. 95–135. Chichester: John Wiley.
- WEICHERT, R., BEZZOLA, G.R. (2002): Einfluss von Makrorauigkeiten auf die Stabilität alpiner Gewässer. Wasser, Energie, Luft, 94, 259–264.
- WHITTAKER, J.G., JÄGGI, M. (1986): Blockschwellen. Mitteilungen der Versuchanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 91, 187p.
- WHITTAKER, J.G., HICKMAN, W.E., CROAD, R.N. (1988): Riverbed Stabilisation with placed blocks. Report 3–88/3, Central Laboratories, Works and Development Services Corporation, Lower Hutt, NZ.
- WICKS, J.M., BATHURST, J.C. (1996): SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system. Journal of Hydrology, 175, 213–238.
- WILCOCK, P.R., CROWE, J.C. (2003): Surface-based transport model for mixed-size sediment. Journal of Hydraulic Engineering, 129, 120–128.
- WOHL, E.E (2000): Mountain Rivers. Water Resources Monograph, American Geophysical Union, Washington DC, USA, 320p.
- WONG, M., PARKER, G. (2006): Reanalysis and correction of bed-load relation of Meyer-Peter and Müller using their own database. Journal of Hydraulic Engineering, 132, 1159–1168.
- YAGER, E.M., KIRCHNER, J.W., DIETRICH, W.E. (2007): Calculating bed load transport in steep boulder bed channels. Water Resources Research, 43, W07418, doi:10.1029/2006WR005432.
- ZANUTTIGH, B., LAMBERTI, A. (2006): Experimental analysis of the impact of dry avalanches on structures and implication for debris flows. Journal of Hydraulic Research, 44, 522–534.
- ZELLER, J. (1963): Einführung in den Sedimenttransport offener Gerinne. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 62, [= Sonderdruck aus Schweizerische Bauzeitung, 81. Jg., Hefte 34, 35, 36].

- ZELLER, J. (1985): Feststoffmessung in kleinen Gebirgseinzugsgebieten. Wasser, Energie, Luft, 77, 246–251.
- ZELLER, J. (1996): Der Kstr-Koeffizient in der Geschwindigkeitsgleichung von Strickler und dessen Problematik. Proc. International Symposium Interpraevent, Garmisch-Partenkirchen, Germany, Bd. 4, pp. 63–74.
- ZELLER, J., TRÜMPLER, J. (1984): Rutschungsentwässerungen Hinweise zur Bemessung steiler Entwässerungsgräben. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf, 276p.
- ZIMMERMANN, A. (2010): Flow resistance in steep streams: an experimental study. Water Resources Research, 46, W09536, doi:10.1029/2009WR007913.
- ZIMMERMANN, M., RICKENMANN, D. (1992): Beurteilung von Murgängen in der Schweiz: Meteorologische Ursachen und charakteristische Parameter zum Ablauf. Proc. International Symposium Interpraevent, Bern, Switzerland, Bd. 2, 153–163.
- ZIMMERMANN, M., MANI, P., GAMMA, P., GSTEIGER, P., HEINIGER, O., HUNZIKER, G. (1997a): Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Schlussbericht NFP 31, Verlag der Fachvereine, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz, 161p.
- ZIMMERMANN, M., MANI, P., ROMANG, H. (1997b): Magnitude-frequency aspects of Alpine debris flows. Eclogae Geologicae Helvetiae, 90, 415–420.
- ZIMMERMANN, M., LEHMANN, C. (1999): Geschiebefracht in Wildbächen: Grundlagen und Schätzverfahren. Wasser, Energie, Luft, 91, 189–194.
- ZOLLINGER, F. (1983): Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz Ihre Morphologie und die Möglichkeiten einer Steuerung. Dissertation Nr. 7419, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

8 Verzeichnis der Abkürzungen

а	Koeffizient in logarithmischem Fliessgesetz (häufig $a = 12$)
a_g	Koeffizient in Gleichung für kritischen dimensionslosen Abfluss q_c^*
a_k	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung hangparallelen Komponente des Gewichtes der Sedimentkörner
a_1	Koeffizient in VPE-Gleichung (mittlerer Wert $a_1 = 6.5$)
a_2	Koeffizient in VPE-Gleichung (mittlerer Wert $a_2 = 2.5$)
A	durchflossene Querschnittsfläche (Abflussquerschnitt)
A_C	Fläche eines hydrologischen Einzugsgebietes
A_V	Faktor (Zähler) in der Formel für die Länge der Murgangablagerung auf dem Kegel
В	Breite der Durchlassöffnung bei einem Fliessquerschnitt
d	Stammdurchmesser von Schwemmholz
d_{Wmax}	maximale Abmessung des Wurzeltellers (Schwemmholz)
d_{Wmin}	minimale Abmessung des Wurzeltellers (Schwemmholz)
d_W^*	= $(d_{Wmax} d_{Wmin} L)^{1/3}$ = mittlere Abmessung des Wurzelstückes (Schwemmholz)
D_x	charakteristische Korngrösse für welche x % des Materials feiner sind
D_{mi}	mittlerer Korndurchmesser der Korngrössenklasse i
D_{max}	maximale Korngrösse
D_N	Dauer eines Niederschlagsereignisses
е	Exponent bei der Formel zur Reduktion des reduzierten Energieliniengefälles
f	= 8 $(v^*/V)^2$ = Reibungskoeffizient nach DARCY-WEISBACH
f_o	DARCY-WEISBACH Koeffizient für die Kornrauigkeit
fadd	DARCY-WEISBACH Koeffizient für die Makrorauigkeit
f_{tot}	DARCY-WEISBACH Koeffizient für die Gesamtrauigkeit
Fr	$= V/(gh)^{0.5} = FROUDE Zahl$
g	Erdbeschleunigung
G	Faktor (Nenner) in der Formel für die Länge der Murgangablagerung auf dem Kegel
GF	Geschiebefracht (Volumen inklusive Porenanteil bei Geschiebeablagerungen)
h	Abflusstiefe
h_u	Abflusstiefe im Zulaufgerinne (eines Murganges) oberhalb des Kegels
Н	lichte Höhe der Durchlassöffnung bei einem Fliessquerschnitt
H _e	Höhendifferenz zwischen oberstem Anrisspunkt und unterstem Ablagerungspunkt eines Murganges
Ι	mittlere Niederschlagsintensität

Κ	Torrentialitäts-Faktor (nach KRONFELLNER-KRAUS))
k_s	äquivalente Rauigkeitshöhe ("Sandrauigkeit")
k_{St}	STRICKLER Koeffizient (für die Gesamtrauigkeit)
L	gesamte Reichweite (Fliessdistanz) eines Murganges
L _c	Länge des aktiven Gerinnes (bzgl. Erosion während eines Wildbachereignisses)
L_{f}	Länge von Murgangablagerungen auf dem Wildbachkegel
L _{max}	maximale gesamte Reichweite eines Murganges
L_h	Länge des Stammes von Schwemmholz
М	Feststofffracht (Volumen) eines Murganges (meist abgeleitet aus Ablagerungen ei- nes ganzen Ereignisses; beinhaltet auch das Porenvolumen; bei automatischen Mes- sungen eventuell bestimmt für einzelne Murgangschübe)
Ме	Melton-Zahl
no	MANNING Koeffizient für die Kornrauigkeit oder Basisrauigkeit
<i>n</i> _{tot}	MANNING Koeffizient für die Gesamtrauigkeit
p_d	dynamischer Aufpralldruck infolge von Murgängen
<i>p</i> _{Fui}	Summenhäufigkeit (relativer Anteil) der Fullerverteilung der Körner mit $D \le D_i$
p_i	Summenhäufigkeit (relativer Anteil) der Kornverteilung der Körner mit $D \le D_i$
p_v	Verklausungswahrscheinlichkeit von Schwemmholz
Δp_i	relativer Anteil einer Korngrössenklasse i an der gesamten Kornmasse
Р	benetzter Umfang des Fliessquerschnittes
q	(spezifischer) Abfluss im Gerinne pro Meter Gerinnebreite
q_b	Geschiebetransportrate pro Meter Gerinnebreite
q_c	kritischer Abfluss bei Beginn des Geschiebetransports (pro Meter Gerinnebreite)
$q_{c,D}$	kritischer Abfluss beim Aufbrechen der Deckschicht (pro Meter Gerinnebreite)
$q_{c,B}$	kritischer Abfluss beim Aufbrechen einer Blockrampe (pro Meter Gerinnebreite)
q_c^*	kritischer dimensionsloser Abfluss (Murgangentstehung, Geschiebetransports)
q^{**}	$= q/(gSD_{84}^{3})^{0.5}$ = dimensionsloser Abfluss (pro Meter Gerinnebreite)
Q	= q W = Abfluss im Gerinne ("uber ganze Gerinnebreite")
Q_B	$= q_b W = $ Geschiebetransportrate
Q_c	$= q_c W =$ kritischer Abfluss bei Beginn des Geschiebetransports
$Q_{c,D}$	$= q_{c,D} W =$ kritischer Abfluss beim Aufbrechen der Deckschicht
Q_p	Maximalabfluss (eines Murgangschubes)
Q_S	Sedimentzufuhr von oben und/oder durch seitliche Einträge
R	= A/P = hydraulischer Radius

S	$= \rho_s / \rho$ = Verhältnis von Sedimentdichte zu Wasserdichte
S	Gerinnegefälle (bzw. Reibungsgefälle) (in allen Gleichungen dieses Dokumentes ist S mit der Einheit [m/m] und nicht in [%] einzusezten)
S_c	mittleres Gefälle des Wildbachgerinnes oberhalb des Wildbachkegels
S_f	mittleres Gerinnegefälle auf dem Wildbachkegel (bzw. mittleres Kegelgefälle)
S_k	= $S a_k$ = korrigiertes Sohlengefälle zur Berücksichtigung hangparallelen Komponen- te des Gewichtes der Sedimentkörner
Sred	reduziertes Energieliniengefälle (bzw. reduziertes Sohlengefälle) zur Berücksichti- gung der Makrorauigkeit für die Berechnung des Geschiebetransportes
S_R	Reibungsgefälle eines Murganges auf dem Kegel
T _e	maximale Erosionstiefe im Wildbachgerinne
U^{**}	$= V/(gSD_{84})^{0.5}$ = dimensionslose mittlere Fliessgeschwindigkeit
v*	$=(ghS)^{0.5}$ = Schergeschwindigkeit
V	mittlere Fliessgeschwindigkeit (Wasser oder Murgang)
V_o	virtuelle mittlere Fliessgeschwindigkeit, bezogen auf die Basisrauigkeit
V _{tot}	(effektive) mittlere Fliessgeschwindigkeit, bezogen auf die Gesamtrauigkeit
V_u	Fliessgeschwindigkeit im Zulaufgerinne (eines Murganges) oberhalb des Kegels
W	Breite des Gerinnes
<i>Y</i> _R	Höhe der unteren Rauigkeitsschicht (beim Gerinneabfluss)

	Griechische Symbole
$lpha_d$	Koeffizient bei der Berechnung des dynamischen Aufpralldruckes von Murgängen
α_g	Exponent in Gleichung für kritischen dimensionslosen Abfluss q_c^*
α_o	Vorfaktor bei einer Geschiebetransportformel
β	Winkel der Gerinneneigung (oder Neigung des Ablagerungs-Abschnittes)
eta_d	Aufprallwinkel bei der Berechnung des dynamischen Aufpralldruckes von Murgän- gen
β_u	Neigung des Zulaufgerinnes (eines Murganges) oberhalb des Kegels
γ	Exponent bei der Versteckfunktion ("hiding function")
γs	Scherrate (Änderung der Fliessgeschwindigkeit / Änderung der Fliesstiefe)
εο	Rauigkeitshöhe
к	VAN KARMAN-Konstante (= 0.4)
μ	dynamische Viskosität
ρ	Dichte von Wasser
ρ_M	Dichte des Murganggemisches
$ ho_{s}$	Dichte der Feststoffe (Sedimentpartikel)
θ	= hS/[(s-1)D] = dimensionslose Sohlenschubspannung
θ'	= reduzierte dimensionslose Sohlenschubspannung, unter Berücksichtigung der Energieverluste infolge von Form- oder Makrorauigkeit
$ heta_c$	= kritische dimensionslose Sohlenschubspannung bei Beginn des Geschiebetrans- ports
τ	$= \rho ghS =$ Sohlenschubspannung
$ au_B$	Grenzschubspannung (Bingham yield stress, Bingham shear strength)
φ_s	natürlicher Böschungswinkel (Reibungswinkel) des Geschiebes unter Wasser
$\Phi_{\rm b}$	$= q_b/[(s-1)gD^3]^{0.5}$ = dimensionslose (spezifische) Geschiebetransportrate (pro Meter Gerinnebreite)

Verzeichnis der Schriftenreihe WSL Berichte

Flexible Murgangbarrieren. Bemessung und Verwendung Volkwein, A., 2014 WSL Ber. 8: 32 S.

Zukunftsbilder für die Landschaft in vier periurbanen Regionen der Schweiz Tobias, S., 2014 WSL Ber. 7: 69 S.

Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. Forum für Wissen 2013 Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL (Hrsg.) 2013. WSL Ber. 6: 116 S.

Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen. Hydrologisches Jahr 2011/12 Techel, F.; Pielmeier, C.; Darms, G.; Teich, M.; Margreth, S., 2013 WSL Ber. 5: 118 S.

Situazione fitosanitaria dei boschi 2012 Meier, F.; Engesser, R.; Forster, B.; Odermatt, O.; Angst, A., 2013 WSL Ber. 4: 28 S.

Protection des forêts - Vue d'ensemble 2012 Meier, F.; Engesser, R.; Forster, B.; Odermatt, O.; Angst, A., 2013 WSL Ber. 3: 28 S.

Forstschutz-Überblick 2012 Meier, F.; Engesser, R.; Forster, B.; Odermatt, O.; Angst, A., 2013 WSL Ber. 2: 28 S.

Hochwasserschutz in der Stadt Zürich: Eine empirische Studie zur Riskokommunikation Maidl, E.; Buchecker, M., 2013 WSL Ber. 1: 88 S.

Alle WSL Berichte sind als Download auf www.wsl.ch/berichte verfügbar.