Internationales Symposion
INTERPRAEVENT 2000 – VILLACH / ÖSTERREICH
Tagungspublikation, Band 3, Seite 345 – 355

ZUM FLIESSVERHALTEN GRANULARER MURENSCHÜBE

Daniel Weber[1] und Dieter Rickenmann[2]

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Untersuchung des Abfluss- und Erosionsverhaltens wurden physikalische Experimente in einer eigens dafür konzipierten Laborrinne durchgeführt. Für verschiedene Fliessgesetze wurden die darin verwendeten Fliessbeiwerte anhand der Messergebnisse rückwärtsbestimmt. Trotz teilweise grosser Streuung der berechneten Beiwerte zeigt sich eine Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration des Gemisches. Besonders deutlich war diese Abhängigkeit bei turbulenten Ansätzen. Daher wurde der allgemeine Ansatz mit dem Parameter der Feststoffkonzentration ergänzt. Zur Ermittlung der für diese Gleichung erforderlichen Exponenten und Konstanten wurde sowohl die Methode der multiplen linearen Regression als auch dimensionslose Parameter verwendet. Ein Vergleich der berechneten mit den gemessenen Geschwindigkeiten ergibt einen Korrelationskoeffizienten von 0,81 und einen Standardfehler von 20 %. Zur Validierung der Formel ist noch eine Überprüfung an anderen Datensätzen nötig.

EINFÜHRUNG

Heftige Unwetter verursachten 1987 zahlreiche Murgänge in den Schweizer Alpen. Dabei trat in den betroffenen Wildbächen teilweise beträchtliche Erosion auf, welche das Gesamtvolumen des Murenschubes und damit das Gefahrenpotential vergrösserte. Um die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Erosionsleistung von Murenschüben zu identifizieren und zu quantifizieren wurden an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft physikalische Modellversuche über granulare Murgänge durchgeführt. Dabei wurde auch das Fliessverhalten der

[1] Abt. Wasser-, Erd- und Felsbewegungen, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, Schweiz. (Tel.: +41-1-7392495: FAX: +41-1-7392488; E-mail: daniel.weber@wsl.ch)
[2] Abt. Wasser-, Erd- und Felsbewegungen, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, Schweiz. (Tel.: +41-1-7392442; FAX: +41-1-7392488; E-mail: dieter.rickenmann@wsl.ch)

Mischungen untersucht. In diesem Beitrag werden einige Resultate zum beobachteten Fliessverhalten vorgestellt.

ZUM FLIESSVERHALTEN VON MURGÄNGEN

Murgänge sind ein schnell fliessendes Gemisch aus Wasser und Bodenpartikeln verschiedenster Grösse. Beobachtungen zeigen, dass an der Font granularer Murgänge sich die grossen Blöcke akkumulieren und die Feststoffkonzentration hoch ist, während im hinteren Teil der Murgangwelle das Gemisch immer flüssiger wird (Suwa et al. 1993). Oft werden Murgänge idealisiert als Mischung von groben Partikeln und einer Flüssigkeit, bestehend aus Wasser und dem Feinanteil der Feststoffe, betrachtet. Beim Fliessvorgang eines Murgangs treten demnach Wechselwirkungen sowohl innerhalb der einzelnen als auch zwischen den Phasen auf. In den meisten Modellen zur Beschreibung von Murgängen bleiben diese Effekte aber unberücksichtigt. In erster Näherung werden die Gemische einfach als eine quasi-homogene Flüssigkeit mit bestimmten rheologischen Eigenschaften behandelt.

Zu den verschiedenen vorgeschlagenen Modellen (Hungr et al. 1984; Rickenmann 1999) zur Beschreibung des Fliessverhaltens von Murgängen gehören Ansätze für Newton'sch laminares und Newton'sch turbulentes Fliessen, für eine Bingham'sche Flüssigkeit und für dilatante Kornscherung im inertialen Bereich (Takahashi 1991). Bis auf den Bingham'schen Ansatz kann die mittlere Geschwindigkeit V [m/s] als einfache Funktion der Abflusstiefe h [m], der Gerinneneigung J (mit $J = \sin\theta$, wobei θ der Neigungswinkel des Gerinnes ist) und einem Fliessbeiwert K_W ausgedrückt werden (Rickenmann und Koch 1997):

$$V = K_W h^{\alpha} J^{\beta} \qquad (1)$$

Dabei sind die Exponenten α und β abhängig vom verwendeten Fliessgesetz. Sie sind, zusammen mit dem Fliessbeiwert K_W, in Tabelle 1 zusammengefasst. Es ist zu erwähnen, dass die Exponenten und Fliessbeiwerte teilweise empirisch hergeleitet wurden (beispielsweise Strickler-Ansatz), zum Teil auf theoretischen Überlegungen beruhen (dilatantes Modell, Bagnold 1954). Ein grosser Wert für K_W bedeutet einen kleinen Fliesswiderstand respektive Reibungsverlust.

Tabelle 1: Fliessbeiwerte K_W und Exponenten α und β für Gl. (1)

Fliessgesetz	K_W	α	β
Newton'sch laminar	$\frac{1}{3}\frac{\rho g}{\mu}$	2,00	1,00
Dilatantes Kornscheren	ξ	1,50	0,50
Newton'sch turbulent: Manning-Strickler	k_{Str}	0,67	0,50
Newton'sch turbulent: Chézy	C	0,50	0,50

Dabei ist ρ die Dichte des Gemisches [kg/m^3], g die Erdbeschleunigung [m/s^2], μ die dynamische Viskosität des Gemisches [kg/(sm)], ξ ein von Korngrösse und Konzentration abhängiger Koeffizient [1/(sm^{0,5})], k_{Str} der Beiwert nach Strickler [m^{0,33}/s] und C der Chézy-Koeffizient [m^{0,5}/s].

Aus Angaben über V, h und J zu 124 Feldereignissen berechnete Rickenmann (1999) die Fliessbeiwerte zu den verschiedenen Modellansätzen. Dabei zeigt sich, dass die Parameter μ und ξ über zwei Grössenordnungen streuen, während k_{Str} und C innerhalb einer Grössenordnung variieren. Für die granularen Murgänge dieses Datensatzes liegt der mittlere äquivalente k_{Str} -Wert im Bereich von 5,5-6,5 $m^{1/3}/s$ (Rickenmann und Weber, 2000). Auch die Resultate aus numerischen Simulationen zu instationären Murgangwellen zeigen, dass die mit Fliessgesetzen ähnlich denjenigen von turbulenten Reinwasserabflüssen berechneten mittleren Abflussgeschwindigkeiten mit den beobachteten in akzeptabler Weise übereinstimmen (Koch 1998).

VERSUCHSSTAND

Für die Durchführung der Experimente wurde eine Laborrinne aufgebaut, die im wesentlichen aus zwei Teilen besteht. Im oberen Abschnitt von drei Metern Länge, welcher aus dem Startbehälter und der Beschleunigungsstrecke besteht, wird die Murgangwelle erzeugt. Daran schliesst der eigentliche Messkanal von fünf Metern Länge an. Er ist knapp 80 cm breit und so aufgebaut, dass man entweder ein Bachbett von dreidimensionaler Struktur darin einbauen oder einen schmaleren Kanal von 30 cm Breite darin plazieren kann, in welchem sich zweidimensionale Versuche (flaches Bachbett) durchführen lassen. Beide Bereiche können unabhängig voneinander von 0 bis 55 % geneigt werden.

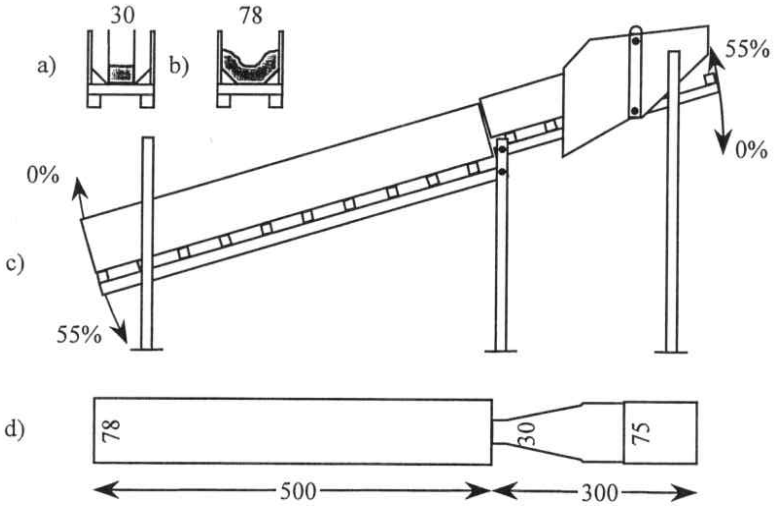

Abbildung 1: Skizze der Laborrinne a) Querschnitt Messkanal bei 2D-Versuchen, b) dito 3D, c) Seitenansicht, d) Aufsicht (Masse in cm)

Für die Experimente kamen zwei verschiedene natürliche Materialien zum Einsatz: Zum einen ein gerundetes Material aus einer Kiesgrube, zum anderen Material aus einem murgangführenden Wildbach in den Schweizer Alpen. Beide Materialien

sind von der Kornverteilung her ähnlich, obwohl für das Wildbachmaterial die Streuung der einzelnen Siebanalysen vor allem im Ton/Silt-Bereich bedeutend grösser ist.

Tabelle 2: Korngrössencharakteristika der Labormaterialien (1 und 2) im Vergleich zu derjenigen von sieben murfähigen Wildbächen (Feldproben) der Schweiz

Material	Ton [%]	Silt [%]	Sand [%]	Kies [%]	$dm=\sum d_i * \Delta p_i$	d90	dmax
	0-2µm	2-63µm	0,063-2mm	2-63mm	[mm]	[mm]	[mm]
Feldproben	0,5-2,7	3,1-15,5	16,4-29,5	62,9-73,1	11-17,2	32-45	63
Material 1: Kiesgrube	1,3	3,2	18,0	77,5	10,4	20	25
Material 2: Wildbach	0,9-3,0	6,5-19,5	15,1-17,4	62,7-75,2	9,5-11,3	19-21	30

Der Messkanal war mit verschiedenen Messgeräten ausgerüstet. Vier Echolote dienten der Erfassung der Abflusstiefen an verschiedenen Positionen. Ein Distanzmesslaser konnte zum selben Zweck an einer fünften Position eingesetzt werden. Er war an eine computergesteuerte Lineareinheit montiert. So konnte das Gerinne rasterförmig abgetastet und aus der Differenz der Topographien vor und nach einem Murgang das Erosionsvolumen berechnet werden. Zwei Videosysteme mit Zeitgeneratoren schliesslich erlaubten die Bestimmung der Frontgeschwindigkeiten und eine qualitative Beurteilung des Fliessverhaltens.

EXPERIMENTE

Die erste Versuchsserie wurde mit dem Kiesgrubenmaterial durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Probleme im experimentellen Bereich festgestellt und behoben, so z. B. bezüglich der Bewässerung des Bachbettes. Es zeigte sich, dass das gerundete Material auch mit sehr hoher Feststoffkonzentration (bis über 80 % Volumenanteil) noch abfliessen konnte. Zudem ergaben sich bei der steilsten Neigung von 55 % generelle Stabilitätsprobleme im Bachbett, vor allem bei intensiver Bewässerung.

Die beiden Hauptversuchsreihen, eine in 2D- die andere in 3D-Anordnung, wurden mit dem Wildbachmaterial durchgeführt. Dabei wurden die folgenden Parameter systematisch verändert: das Startvolumen (0,05 m^3, 0,10 m^3, 0,15 m^3), die Neigung (25 %, 40 %, 55 %) und der volumetrische Wassergehalt des Startgemisches (20 %, 30 %, 50 %, 70 %, 100%). Sporadisch wurden zusätzliche Versuche mit weiteren Parameterveränderungen gemacht, beispielsweise Hinzufügen von grobem Material. Die Durchführung einer Reihe von sechs gleichen Experimenten ergab eine Reproduzierbarkeit der mittleren Frontgeschwindigkeiten um +/– 5 %, diejenige für die mittlere Maximalabflusstiefe betrug knapp +/– 10 %.

Die Messungen lieferten direkte Angaben über die Abflusstiefen, die Front- und Peakgeschwindigkeiten und die Volumenveränderung des Bachbettes. A priori war der Wassergehalt der Startmischung bekannt. Dieser musste noch um den Betrag der Restfeuchte der Feststoffe korrigiert werden, welche im Bereich von ein paar Volumenprozenten lag. Aus dem Einbaugewicht und der ersten topographischen Vermessung konnte die Lagerungsdichte des Bachbettes bestimmt werden. Am unteren

Ende des Messkanals wurde der Murenschub aufgefangen und gewogen, anschliessend dekantiert und nochmals gewogen.

Bei Frontgeschwindigkeiten von teilweise über 5 m/s traten die Limiten der Vermessung der Ganglinien mittels Echoloten klar zu Tage. Mit einer relativ langen Messzyklusdauer von ca. 40 ms ergab sich nur eine eher grobe Auflösung der Wellengeometrie. Mit einer Messfrequenz von 2,5 kHz war die Zyklusdauer des Lasers 100 mal kürzer und die damit erfassten Ganglinien viel präziser. Diese zeigten im allgemeinen einen sehr steilen Anstieg im Frontbereich bis auf das Maximum, gefolgt von einer flachen Abnahme gegen den hinteren Teil der Welle. Deshalb konnten auch die mittels Echoloten bestimmten Maximalabflusstiefen als genügend genau beurteilt werden.

RESULTATE

Aus den Frontgeschwindigkeiten, den Maximalabflusstiefen (resp. der hydraulischen Radien bei Maximalabfluss) und der Neigung der Rinne wurden in einem ersten Schritt die K_W nach den oben aufgeführten Fliessgesetzen rückwärtsberechnet. Dabei wurden die Frontgeschwindigkeiten und die Maximalabflusstiefen über die 5 m lange Fliessstrecke im Messkanal gemittelt. Es zeigt sich, dass für jeden Ansatz der Verlauf des jeweiligen Fliessbeiwertes gegenüber dem volumetrischen Feststoffgehalt C_S ähnlich ist (Abbildung 2). Mit zunehmendem Feststoffgehalt nimmt der Fliessbeiwert und damit die Fliessgeschwindigkeit ab.

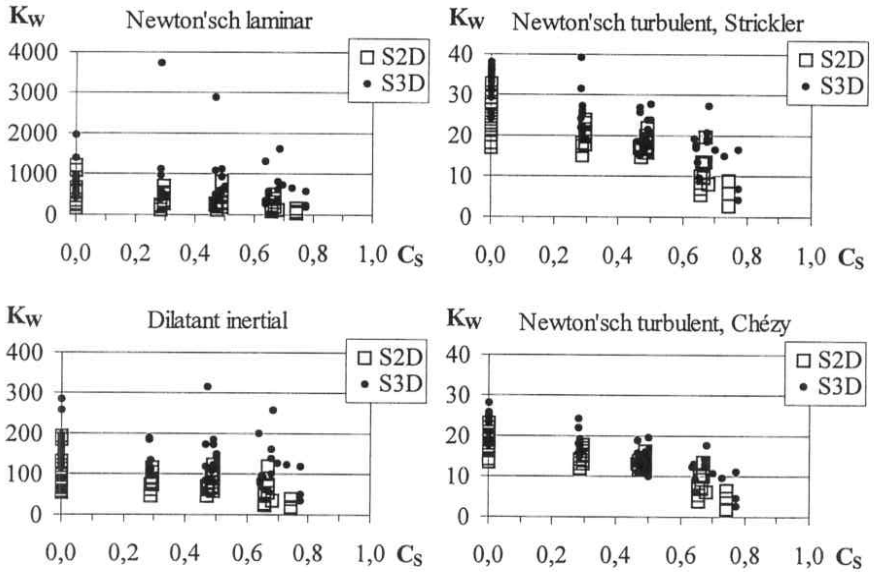

Abbildung 2: Rückwärtsberechnete Fliessbeiwerte unter Verwendung des hydraulischen Radius in Abhängigkeit des Feststoffgehaltes. (S2D = Wildbachmaterial 2-dimensional, S3D dito 3-dimensional)

Abbildung 2 zeigt einen ähnlichen Trend wie er von Rickenmann (1999) für Feldereignisse festgestellt wurde. So ist die Streuung für den laminaren und dilatanten Ansatz deutlich grösser als für die turbulenten Ansätze. Für die ersten beiden Fliessgesetze ist zudem die Abhängigkeit des K_W–Wertes von der Feststoffkonzentration nicht so deutlich ausgeprägt.

Dafür gibt es verschiedene Gründe. Zum einen besteht eine deutliche Abnahme des Exponenten der Abflusstiefe für die Reihenfolge der Ansätze gemäss Tabelle 1. Damit ist die Streuung allein aufgrund der Messungenauigkeit für die ersten beiden Fliessgesetze grösser. Zudem sind diese Ansätze theoretisch hergeleitet worden. So entwickelte Bagnold (1954) seinen Ansatz für ein Material bestehend aus lauter gleich grossen Kugeln, eine Annahme, die für Murgänge nur als sehr grobe Näherung gelten kann. Es stellt sich auch die Frage, für welche Art von Murgängen die Annahme laminaren Fliessens sinnvoll ist. Erfolgreich wurde ein solcher Ansatz schon auf Schlammströme und Murgänge mit zäher Matrix, also mit hohem Feinanteil, angewendet (Coussot 1997). Diese Voraussetzung ist für das Material der hier vorgestellten Experimente aber nicht gegeben (vgl. Tabelle 2).

Im Gegensatz dazu stehen die beiden turbulenten Ansätze. Sie sind empirisch aus systematischen Messreihen hergeleitet. Dabei wurden sämtliche unbekannten Parameter in einem Reibungsbeiwert zusammengefasst. Der gesamte Energieverlust wird im wesentlichen von der Rauhigkeit des Gerinnebettes bestimmt, weil die inneren Verluste infolge der geringen Zähigkeit des Wassers vernachlässigt werden können. Bei einem Murgang treten aber, bedingt durch den Feststoffanteil, zusätzliche interne Verluste durch den Kontakt einzelner Partikeln und zwischen den verschiedenen Phasen auf. Zusätzlich ändert sich je nach Art und Menge des Feinanteils die Rheologie der Matrix. In den Ansätzen von Tabelle 1 werden diese zusätzlichen Unbekannten im Parameter K_W integriert.

Aus der Kornverteilung der in den Experimenten verwendeten Materialien geht klar hervor, dass der Feinanteil gering ist. Dadurch wird die Zähigkeit der Matrix nicht massgeblich erhöht, der Abfluss hat eher turbulenten Charakter. Um die Abhängigkeit von der Konzentration zu beschreiben, wurde Gleichung (1) wie folgt ergänzt:

$$V = K\, h^{\alpha}\, J^{\beta}(1-C_S)^{\gamma} \qquad (2)$$

Darin ist K eine Konstante $[m^{(1-\alpha)}/s]$, C_S der volumetrische Feststoffgehalt [-] und γ ein Exponent. Mittels multipler linearer Regression wurden die Exponenten und K bestimmt (Tabelle 3). Obwohl fast durchwegs kleiner als 1, streuen insbesondere die Exponenten der Abflusstiefe und der Neigung für die verschiedenen Datensätze beträchtlich. Der Exponent für die Konzentration bleibt dagegen relativ stabil. Trotz relativ grosser Variation der Exponenten α und β verändert sich die Güte der Korrelation praktisch nicht (Datensatz mit Maximalabflusstiefen) bzw. nur mässig (Datensatz mit hydraulischem Radius). Da die Gerinneneigung als Parameter exakt bekannt ist, dürfte die Variation der Exponenten α und β teilweise durch die beschränkte Messgenauigkeit der Abflusstiefe bedingt sein. Ausserdem scheinen sich diese Exponenten teilweise zu kompensieren, so dass die Güte der Korrelation auf gegenseitige Änderungen nicht sehr sensitiv reagiert.

Tabelle 3: Fliessbeiwerte und Exponenten für die verschiedenen Datenreihen der Laborversuche unter Verwendung der mittleren Maximalabflusstiefe resp. des entsprechenden hydraulischen Radius. Die Korrelationskoeffizienten r^2 wurden aus dem Vergleich der gemessenen mit den nach Formel (2) unter Verwendung der jeweiligen Exponenten und Fliessbeiwerte berechneten Geschwindigkeiten bestimmt.

	K	α	β	γ	r^2	K	α	β	γ	r^2
Datensatz	Maximalabflusstiefe					hydraulischer Radius				
Wildbach 2D	12,84	0,42	0,29	0,78	0,79	13,14	0,38	0,32	0,84	0,68
Wildbach 3D	15,83	0,68	0,10	0,73	0,79	21,12	0,67	0,03	0,67	0,60
alle Versuche	13,11	0,44	0,30	0,69	0,79	9,50	0,02	0,56	0,81	0,68
alle Versuche, mit V/V*	17,63	0,50	0,50	0,70	0,80	20,99	0,50	0,50	0,68	0,65

Neben den beiden Versuchsreihen mit dem Wildbachmaterial wurden beide zusammen mit dem Kiesgrubenmaterial als Datensatz verwendet. Dieser Datensatz wurde zusätzlich noch in Form dimensionsloser Parameter ausgewertet. Dazu wurden die gemessenen Frontgeschwindigkeiten in Relation zur Schubspannungsgeschwindigkeit gesetzt, welche sich nach folgender Gleichung berechnet:

$$V^* = (g\, h\, J)^{0,5} \qquad (3a)$$

$$V^* = (g\, R_h\, J)^{0,5} \qquad (3b)$$

Dabei ist g die Erdbeschleunigung [m/s^2] und R_h der hydraulische Radius [m]. In dieser Form sind die Exponenten für die Abflusstiefe und die Neigung a priori zu 0,5 gesetzt.

DISKUSSION

Zhang (1993) schlägt für die Berechnung der Geschwindigkeit von Murgängen mit kleiner Viskosität, d. h. mit beschränktem Anteil an kohäsivem Feinmaterial, einen modifizierten Ansatz nach Manning-Strickler vor (Gleichung 4). Für die Herleitung geht er davon aus, dass die kinetische Energie des Reinwasserabflusses gleich ist wie diejenige des daraus entstehenden Murgang-Gemisches.

$$V = (1/a)\, k_{Str}\, R_h^{2/3}\, J^{1/2} \qquad (4)$$

$$1/a = 1/[(\rho_S/\rho_W)\,(C_S/(1-C_S)) + 1]^{1/2} \qquad (5)$$

Darin ist k_{Str} der Beiwert nach Strickler [$m^{1/3}/s$] und 1/a ein von der Feststoffkonzentration abhängiger Parameter mit ρ_S und ρ_W als Dichte der Feststoffe

respektive des Wassers [kg/m^3]. Der Faktor 1/a in Gleichung (4) ist genauso wie der Ausdruck $(1\text{-}C_S)^{\gamma}$ in Gleichung (2) ein Reduktionsfaktor für die Fliessgeschwindigkeit im Vergleich zu Reinwasserabfluss. In Abbildung 3 sind die Reduktionsfaktoren nach Gleichung (5) respektive (2) dargestellt.

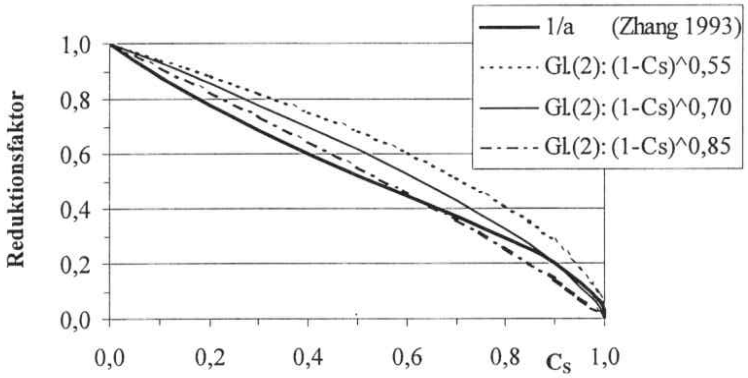

Abbildung 3: Vergleich der Reduktionsfaktoren nach Zhang (1993), Gl. (5), und einem Ansatz nach Gl. (2) mit verschiedenen Exponenten γ.

Abbildung 3 zeigt für beide Ansätze einen sehr ähnlichen Trend in der Abnahme des Fliessbeiwertes. Die Reduktion nach Zhang ist vor allem im Bereich schwacher Konzentrationen grösser als beim empirischen, exponentiellen Ansatz. Für beide stellt sich die Frage nach der Anwendbarkeit im Bereich sehr hoher Konzentrationen. Wird die maximale Lagerungsdichte erreicht, ist eine Erhöhung der volumetrischen Konzentration nicht mehr möglich. Bei einer solch kompakten Lagerung ist zudem bei Neigungen unter dem Stabilitätswinkel auch ein Fliessen nicht mehr möglich. Bei entsprechender Belastung treten Bruchmechanismen auf, die mit den Methoden der Bodenmechanik behandelt werden müssen.

Für diesen Bereich wurde eine spezielle Untersuchung der Stabilitätseigenschaften der verwendeten Murgangmaterialien durchgeführt. Dazu wurde das Material zuerst ofentrocken in eine kleine Rinne eingebracht und leicht verfestigt. Anschliessend wurde die Rinne immer steiler geneigt bis zu dem Punkt, an dem das Material die Stabilität verlor. Daraufhin wurde sukzessive der Wassergehalt des Materials erhöht und die Prozedur wiederholt. Eine Schwelle von 0,1 Meter Höhe am unteren Ende der Rinne stellte sicher, dass der Scherhorizont innerhalb des Materials lag und nicht zwischen Material und Rinne.

Für sämtliche Materialien zeigt sich ein ähnlicher Verlauf des kritischen Stabilitätswinkels gegenüber dem Wassergehalt. Zuerst nimmt der kritische Stabilitätswinkel mit dem Wassergehalt leicht zu, wird dann aber mit weiterer Erhöhung des Wassergehaltes abrupt kleiner. Bei den sehr tiefen Wassergehalten erfolgte ein Bruch und das Material scherte als kompakter Block über eine Gleitfläche ab. Ab dem kritischen Wassergehalt, bei dem die Stabilität stark zurückging, ging die Scherung

mehr in einen Fliessprozess über. Der Einbruch der Stabilität erfolgte in einem Bereich von 8,5 – 13,0 % Gewichtsanteil des Wassers am trockenen Material. Für das gerundete Material aus der Kiesgrube fällt auf, dass die kritischen Stabilitätswinkel generell kleiner sind und der Einbruch der Stabilität bereits bei knapp 7 % Wasseranteil erfolgt.

Aus diesen Untersuchungen wurde eine Grenzkonzentration C* für den Feststoffgehalt abgeleitet, die unterschritten sein muss, damit die Mischung überhaupt fliessen kann. Aus den Stabilitätskurven ermittelte sich der Wert für das Kiesgrubenmaterial zu 0,85, derjenige des Wildbachmaterials zu 0,81. Ein Vergleich der relativen Geschwindigkeiten V/V* mit den Konzentrationsverhältnissen C_S/C^* ergibt die in Abbildung 4 dargestellte Abhängigkeit.

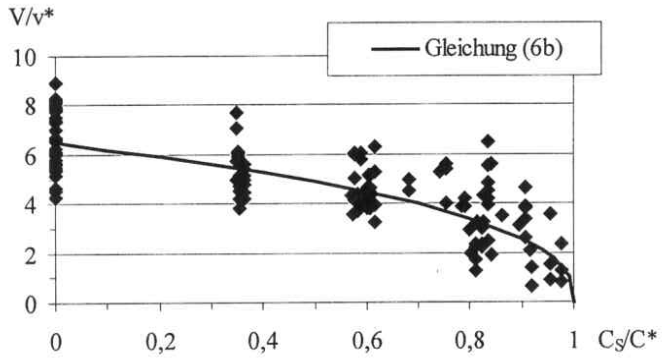

Abbildung 4: Relativgeschwindigkeit V/V* (bestimmt unter Verwendung des hydraulischen Radius) in Abhängigkeit der Relativkonzentration C_S/C^*.

Eine Regressionsanalyse dieser dimensionslosen Wertepaare ergibt bei Verwendung sämtlicher Versuchsdaten folgende empirische Beziehung:

mit h: $V/V^* = 5{,}44\,(1-C_S/C^*)^{0{,}42}$ (6a)

mit Rh: $V/V^* = 6{,}47\,(1-C_S/C^*)^{0{,}40}$ (6b)

Durch Einsetzen der entsprechenden Gleichung (3) für die Schubspannungsgeschwindigkeit und einfaches Umformen folgt:

$$V = 17{,}03\,h^{0{,}5}\,J^{0{,}5}\,(1-C_S/C^*)^{0{,}42} \quad (7a)$$

$$V = 20{,}28\,R_h^{0{,}5}\,J^{0{,}5}\,(1-C_S/C^*)^{0{,}40} \quad (7b)$$

Ein Vergleich der mit Formel (7a) berechneten Geschwindigkeiten mit den gemessenen ergibt einen Korrelationskoeffizienten r^2 von 0,81. Für Gl. (7b) mit Verwendung des

hydraulischen Radius ist der Korrelationskoeffizient mit 0,71 kleiner. Damit ist die Güte der Korrelationen vergleichbar der Anwendung von Gleichung (2) (vgl. Tabelle 3). Der Standardfehler beträgt 20 % für Gleichung (7a), resp. 23 % für (7b). Die statistischen Kennwerte liegen somit im Bereich derjenigen von empirischen Gleichungen für die Fliessgeschwindigkeit von Reinwasserabflüssen in Wildbächen (Rickenmann 1996).

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die vorgestellten Formeln sollten anhand anderer Datensätze, vor allem auch solcher zu Feldereignissen, überprüft und deren möglicher Gültigkeitsbereich abgegrenzt werden. Dabei ist insbesondere der Einfluss unterschiedlicher Materialzusammensetzungen genauer zu untersuchen. Im weiteren ist anzunehmen, dass die empirischen Gleichungen in der Form von Gl. (2) und (7) nur für granulare Murgänge mit kleinem Feinmaterialanteil gültig sind. So ist zum Beispiel bekannt, dass sich die Materialeigenschaften bei grösseren Anteilen an kohäsivem Feinmaterial in einem relativ engen Konzentrationsbereich sehr stark ändern können (Pierson und Scott 1985). Ausserdem sind bei der Übertragung der Modellversuche zu granularen Murgängen neben der Forderung nach Froude'scher Ähnlichkeit weitere mögliche Skalierungseffekte genauer zu untersuchen.

LITERATUR

Bagnold R. (1954). "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear" *Proc. Royal Soc. London*, Vol. 225; 49-63.

Coussot P. (1997). "Mudflow rheology and dynamics" *IAHR Monograph*, A. A. Balkema, Rotterdam; 255 pp.

Hungr O., Morgan G. C., Kellerhals R. (1984). "Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures" *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 21; 663-677.

Koch T. (1998). "Testing various constitutive equations for debris flow modelling" *Proceedings of the HeadWater'98 1998-Meran,* IAHS Publication No. 248;. 249-257.

Pierson T. C., Scott K. M. (1985). "Downstream dilution of a Lahar: Transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow" *Water Resources Research,* Vol. 21 (10); 1511-1524

Rickenmann D. (1996). "Fliessgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen." *Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air*, Vol. 88 (11/12); 298-304.

Rickenmann D., Koch T. (1997). "Comparison of debris flow modelling approaches" *Proceedings of the 1st International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, 1997-San Francisco, CA, USA,* ASCE Publication; 576-585.

Rickenmann D. (1999). "Empirical relationships for debris flows." *Natural Hazards*, Vol. 19; 47-77.

Rickenmann D., Weber D. (2000). "Flow resistance of field and experimental debris flows in torrent channels" *Proceedings of the 2nd International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, 2000-Taipai, Taiwan,* ASCE Publication

Suwa H., Okunishi K., Sakai M. (1993). "Motion, debris size and scale of debris flows in a valley on Mount Yakedake, Japan" *Proceedings of Sediment problems:*

Strategies for monitoring, prediction and control, 1993-Yokohama, IAHS Publication No. 217;. 239-247.

Takahashi T. (1991). "Debris Flow" *IAHR Monograph,* A.A. Balkema, Rotterdam; 165 pp.

Zhang S. (1993). "A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China." *Natural Hazards*, Vol. 7; 1-23.