

VERGLEICHENDE RHEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN VON MURGANGMATERIAL

ROTIERENDE TROMMEL UND KUGELRHEOMETER

COMPARATIVE RHEOLOGIC INVESTIGATIONS OF DEBRIS FLOW MATERIAL

ROTATING DRUM AND BALL MEASURING SYSTEM

Roland Kaitna¹, Dieter Rickenmann^{1,2} und Markus Schatzmann³

ZUSAMMENFASSUNG

Murgänge repräsentieren eine erhebliche Gefahr in alpinen Einzugsgebieten. Um das Fließverhalten von Murgängen zu beschreiben werden in der Praxis oft rheologische Modelle verwendet. In der vorliegenden Studie wird zum einen eine neuartige ‚Trommel-Versuchsanlage‘, zum anderen ein ‚Kugelhrometer‘ vorgestellt, um Murgangmischungen mit maximalen Korngrößen von 1-5 mm zu untersuchen und rheologische Parameter für verschiedene Modelle abzuleiten.

Keywords: Trommel-Versuchsanlage, Kugelhrometer, Rheologie, Bingham Modell

ABSTRACT

Debris flows represent a serious hazard in alpine regions. In order to describe the flow behaviour of debris flows often rheologic models are used. This study introduces two novel facilities to determine rheologic parameters of different models for debris flow material mixtures containing maximum grain sizes of 1-5 mm.

Keywords: rheology, rotating drum, ball measuring system

EINLEITUNG

Murgänge sind seltene, natürliche Prozesse, angesiedelt zwischen Hochwasser, Erdbeben und Felsstürzen, bei denen sich ein Gemisch von Sediment, Wasser und zum Teil Wildholz kanalisiert und meist sehr schnell zu Tal bewegt.

1 Institut für Alpine Naturgefahren, BOKU, Peter Jordanstr. 82, 1190 Wien, Österreich (Tel.: +43-1-47654-4372; Fax: +43-1-47654-4392; email: roland.kaitna@boku.ac.at)

2 Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, Schweiz (email: dieter.rickenmann@wsl.ch)

3 Basler & Hofmann Ingenieure und Planer AG, Bachweg 1, CH-8133 Esslingen (Tel.: +41-44387-1522, Fax.: +41-44387-1500; email: markus.schatzmann@bhz.ch)

In vielen Alpentälern stellen Murgänge eine ernsthafte Gefährdung menschlichen Siedlungsraums und Infrastruktur dar. Für die Gefahrenanalyse und die Erstellung von Gefahrenzonenplänen ist es wichtig, sowohl Fließparameter wie Geschwindigkeit und Abflusstiefe als auch die räumliche Verteilung von Auslaufängen von zukünftigen Murgangereignissen zu ermitteln.

Abgesehen von empirischen Ansätzen (Schätzformeln, siehe Rickenmann 1999) oder einer rückwärtsgerichteten Indikation (Bewertung historischer Ereignisse), kommen häufig numerische Simulationsmodelle zur Anwendung (z.B. O'Brien et al. 1993, Rickenmann et al. 2006) um Gefahrenzonen zu identifizieren.

Die Basis der in der Praxis angewandten numerischer Modelle sind meist rheologische Ansätze, die einen Murgang als homogenes Medium betrachten und den Fließwiderstand in Abhängigkeit der Scherrate und von Materialparametern darstellen (z.B. Johnson 1970, O'Brien et al. 1993, Coussot 1997). Im Zusammenhang mit Murgängen stellt diese Herangehensweise eine starke Vereinfachung dar, da die tatsächlich ablaufenden physikalischen Prozesse beim Fließen eines so heterogenen Gemisches nicht abgebildet werden können.

Aufgrund eines verbesserten Prozessverständnisses wurde in den letzten Jahren vermehrt versucht, die Massen- und Impulserhaltung der festen und der flüssigen Phase getrennt zu modellieren (z.B. Iverson & Denlinger 2001, Pudasaini et al. 2005). Diese Zweiphasenmodelle basieren zumeist auf dem Mohr-Coulomb Modell für die Reibung der festen Phase und einer einfachen rheologischen Formulierung für die flüssige Phase. Trotz intensiver Forschungstätigkeit sind noch einige Fragen zu beantworten, wie z.B. die Koppelung der Phasengleichungen, Bestimmung der relevanten Parameter, usw. (Hutter 2005). Generell ist festzuhalten, dass diese Zweiphasenmodelle ein realistischeres Bild des Prozesses zeichnen, ihre Praxistauglichkeit allerdings noch nicht gewährleistet ist.

Aus diesem Grund werden rheologische Einphasenmodelle auch in den nächsten Jahren ein wertvolles Hilfsmittel sein, um in der Ingenieurspraxis eine Abschätzung der Murganggefährdung durchzuführen.

Rheologisches Modell

Eine allgemeine Formulierung für ein häufig angewandtes Modell zur Beschreibung des Fließverhaltens von viskosen Flüssigkeiten ist das Herschel Bulkley Modell:

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

wobei τ = die Schubspannung als Maß für den Fließwiderstand, τ_y = die Grenzschubspannung, $\dot{\gamma}$ = die Scherrate und K & n = Parameter. Für das einfachere Bingham Modell ist $n = 1$ und K = die Bingham Viskosität η .

Gleichung (1) reflektiert eine typische Eigenschaft vieler natürlicher und experimenteller Murgänge: das Vorhandensein einer scheinbar ungescherten Zone (H_{plug}) oberhalb einem mehr oder weniger stark gescherten Bereich y_0 (vgl. Abb1). In der ungescherten Zone liegt die Schubspannung unterhalb des kritischen Werts der durch die Grenzschubspannung ausgedrückt wird.

Die Höhe der ungescherten Zone und das vertikale Geschwindigkeitsprofil der Flüssigkeit bzw. des Gemisches sind abhängig vom jeweiligen Modell bzw. den rheologischen Parametern. Beim Bingham Modell ist das Geschwindigkeitsprofil in der gescherten Zone quadratisch.

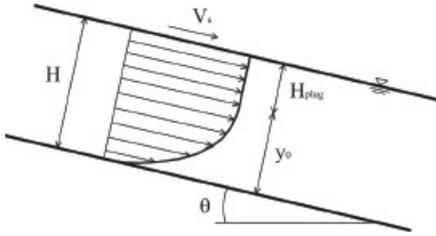


Abb1: Typisches Geschwindigkeitsprofil einer Flüssigkeit mit Grenzschubspannung, H = Abflusstiefe, V_s = Oberflächengeschwindigkeit und θ = Gerinnegefälle.

Fig1: Typical vertical velocity profile in a yield stress fluid, H = flow depth, V_s = surface velocity, and θ = channel slope.

Die tiefengemittelte Gleichung für die mittlere Geschwindigkeit eines gleichförmig, stationären Abflusses in einem unendlich breiten Gerinne lautet für eine Bingham Flüssigkeit:

$$V_m = \frac{H\tau_0}{3\eta} \left[1 - \frac{3}{2} \frac{\tau_B}{\tau_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_B}{\tau_0} \right)^3 \right] \quad (2)$$

mit τ_0 = Sohlschubspannung wobei $\tau_0 = \rho g H \sin \theta$.

Eine große Anzahl von Untersuchungen hat gezeigt, dass die Werte für die rheologischen Parameter zum einen vom Wassergehalt der jeweiligen Sediment-Wasser Mischungen abhängen, zum anderen aber auch stark von der Korngrößenverteilung und der Art des Sediments; hier ist vor allem der Anteil von Tonmineralen entscheidend (z.B. Costa 1984; Coussot & Meunier 1996, Remaitre et al. 2005).

Für die numerische Simulation ist die Kenntnis der rheologischen Parameter nötig. In der Literatur finden sich Werte für die rheologischen Parameter für Murgänge unterschiedlichster Zusammensetzung mit einer Streuung über mehreren Größenordnungen (Cui et al. 2005, Schatzmann 2005). Da es in den meisten Fällen nicht möglich ist, die rheologischen Parameter für das komplette Korngrößenspektrum des potentiell mobilisierbaren Sediments in einem Einzugsgebiet direkt zu messen, werden in der Praxis die Kennwerte oft anhand eines dokumentierten Murgangereignisses rückgerechnet (falls vorhanden), basierend auf einem Analogieschluss zu Einzugsgebieten ähnlicher Charakteristik geschätzt oder basierend auf rheologischen Messungen von einem Teil des Materials (Komponenten bis 5 mm) auf das Gesamtmaterial extrapoliert (Coussot et al. 1998).

Hier setzt die vorliegende Studie an: Ziel ist es, anhand von Laborversuchen in einer rotierenden Trommel, die rheologischen Parameter für Murgangmaterial mit Korngrößen bis 5 mm abzuschätzen und die Ergebnisse mit unabhängigen Messungen in einem Kugelmesssystem (BMS) zu vergleichen.

EXPERIMENTE

Kugelmesssystem

Das Kugelmesssystem (engl. *ball measuring system*) (BMS) wurde von Müller et al. 1999 entwickelt und ist heute modular einbaubar in den Paar Physica MCR 300 Rheometer

(Abb2). Es besteht aus einem zylindrischen Behälter mit einem Durchmesser von 115 mm resp. Füllvolumen von 0.5 Liter. Eine an einer flachen Halterung aufgehängte exzentrisch rotierende Kugel mit Durchmesser $D = 12$ mm wird bei definierter Geschwindigkeit durch das in den Behälter eingefüllte Probefluid geführt. Gleichzeitig wird die a priori definierte Rotationsgeschwindigkeit Ω sowie das aufzubringende Moment T während einer vollen Kreisbahn 40 mal gemessen (Standardexperiment). Für die Bestimmung der Fließkurve werden somit mehrere Experimente bei unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten Ω durchgeführt.

Im Rahmen einer eingehenden Analyse konnte gezeigt werden, dass mit dem BMS Sediment-Wasser-Mischungen untersucht werden können, die Grobkomponenten bis $d_{max} = 10$ mm Durchmesser enthalten (Schatzmann 2005). In der selben Untersuchung wurde gezeigt, dass die Streuung der gemessenen Momente T in erster Linie abhängig ist von der relativen Korngröße d_{max}/D , während die Streuung der gemessenen Rotationsgeschwindigkeiten Ω primär von der Sedimentkonzentration C_v und der Kornverteilung innerhalb des Fluides abhängig ist.

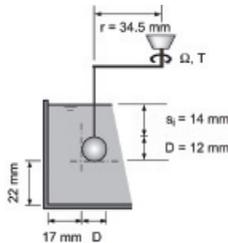
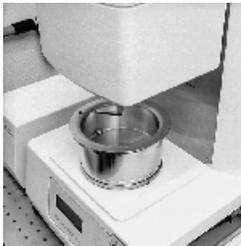


Abb2: Links: Kugelmesssystem (BMS) im Standardrheometer, rechts: geometrische Randbedingungen
Fig2: Left: ball measuring system (BMS) in the standard rheometer, right: sketch of the geometry of the setup

Die Fließkurve resp. rheologischen Parameter eines Fluids leiten sich per Definition aus der Scherströmung ab. Da sich beim Kugelmesssystem keine Scherströmung sondern eine Kugel- (und untergeordnet Halterungs-) umströmung einstellt, muss eine Verbindung zur Scherströmung hergestellt werden. Es muss also ein theoretisch-empirischer Ansatz hergeleitet werden, der die Umwandlung der Messgrößen T - and Ω - Daten in die rheologischen Größen τ (Schubspannung) und $\dot{\gamma}$ (Scherrate) ermöglicht. Ein erster Ansatz wurde von Tyrach (2001) entwickelt, welcher sich allerdings nur für laminaren Umströmungsbereich und für Newtonfluide als gültig erwies, nicht aber für Nicht-Newtonfluide wie im Falle von mittel bis hoch konzentrierten Sediment-Wasser-Mischungen (Schatzmann et al. 2003). Basierend auf der Theorie der Rührerauslegung nach Metzner and Otto (1957) wurde deshalb von Schatzmann (2005) unter Berücksichtigung verschiedener Fluidtypen (Newton, Power law und Yield stress) und zweier Strömungsregimes (laminar und transitional) ein verfeinerter Ansatz entwickelt. Die Unterscheidung der Strömungsregimes erfolgte anhand der Kugelreynoldszahl

$$\text{Re}_{SPH} = 2\pi \frac{\Omega r D \rho_B}{\mu} \quad (3)$$

mit r = Kugelbahnradius, ρ_B = Fluidichte und μ = dynamische Viskosität, definiert als Schubspannung dividiert durch Scherrate.

Für die Umrechnung von Rotationsgeschwindigkeit Ω in Scherrate $\dot{\gamma}$ ergab sich:

$$\dot{\gamma} = K_{\Omega} \Omega \quad (4)$$

wobei die Konstante K_{Ω} abhängig ist vom Kugeldurchmesser D . Für die Umrechnung des Moments T in die Schubspannung τ ergab sich für das laminare Regime ($Re_{SPH} \leq 1$):

$$\tau = K_T T \quad (5)$$

und für das transitionale Regime ($1 < Re_{SPH} < 300$):

$$\tau = [k_1 + k_2 e^{(-k_3 \cdot Re_{SPH})}] \cdot T \quad (6)$$

wobei die Koeffizienten K_T wie auch k_1 , k_2 und k_3 abhängig sind vom Fluidtyp und vom Kugeldurchmesser D .

Mit dem BMS können Fließkurven im Bereich $0.1 < \dot{\gamma} < 100 \text{ s}^{-1}$ und $0.5 < \tau < 2'000 \text{ Pa}$. Die Bestimmung der Fließkurve (16 Experimente bei 8 verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten inkl. Aufrühren der Mischung vor jedem Experiment) dauert rund 20 Minuten.

Rotierende Trommel

Herzstück der Versuchsanlage bildet eine einseitig gelagerte Trommel mit einem Durchmesser von 2.46 m (Abb3). Der rechteckige Gerinnequerschnitt hat eine Breite von 0.45 m und ist mit einem synthetischen 5x5 mm Gitter mit einer Höhe von 1 mm ausgelegt, um möglichen Schlupf zu vermeiden. Die hintere Gerinnewand besteht aus rostfreiem Stahl, die vordere aus Acrylglas, um Beobachtungen von der Seite zu ermöglichen.

Die Geometrie der stehenden Welle wird mittels eines Lasersensors und einer Ultraschallsensoren gemessen. Beide Sensoren sind in einem Abstand von 180° in der Mitte des Gerinnequerschnitts am rotierenden Teil der Versuchsanlage (= Trommel) installiert, und zeichnen so die Abflusstiefe längs der Versuchswelle zweimal pro Umdrehung auf.

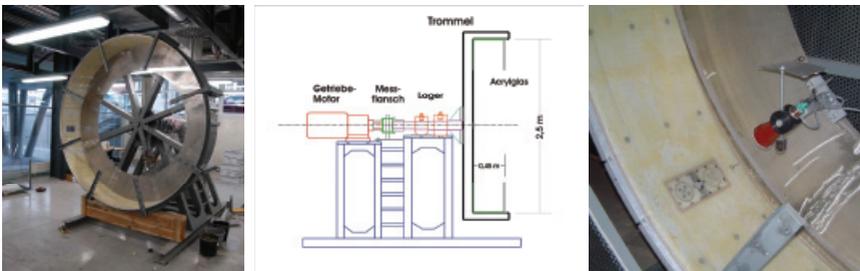


Abb3: Links: Trommel Versuchsanlage, Mitte: Schema der Trommelversuchsanlage, rechts: Kraftmessplatten und Ultraschallmesssensor

Fig3: Left: front view of the rotating drum, centre: sketch of the drum setup, right: channel section of the drum with force plates and ultrasonic sensor

Zwischen der Motor-Getriebe Einheit und der Trommel befindet sich ein Messflansch, der kontinuierlich das benötigte Drehmoment aufzeichnet, um das Versuchsmaterial auf einer bestimmten Geschwindigkeit in der Trommel zu halten. Aus dem Drehmoment wird infolge die mittlere Sohlenschubspannung der Versuchswelle rückgerechnet, wobei eine konstante Spannungsverteilung an der Sohle und eine dreieckförmige Spannungsverteilung an den Seitenwänden angenommen wird. Diese Bestimmung der mittleren Sohlenschubspannung kann auf zwei Arten verifiziert werden: zum einen durch direkte Messung der Sohlenschubspannung mittels zweier unabhängigen Schubkraftmessplatten, die in einem Abstand von 180° in der Mitte der Abflusssktion angebracht sind. Zum anderen kann aus der

Auslenkung des Schwerpunktes der Versuchswelle auf die Summe der treibenden Kräfte (Komponente der Gravitation in Fließrichtung) geschlossen werden. In einem stationären System entspricht die Summe der treibenden Kräfte der Summe der Widerstandskräfte (d.h. Schubspannung an der Sohle und Gerinnewand).

Die mittlere Geschwindigkeit der Versuchswelle entspricht der Umfangsgeschwindigkeit der Trommel und wird aus der Messung der Winkelgeschwindigkeit der Antriebswelle berechnet. Weiters wird die Oberflächengeschwindigkeitsverteilung und damit die mittlere Oberflächengeschwindigkeit mittels Partikel – Tracing aus digitalen Videoaufzeichnungen abgeleitet.

Das Probematerial wurde mindestens 24h vor einem Versuch vorbereitet. Vor jedem Versuch wurde das Material nochmals 10 Minuten gemischt und anschließend in die Trommel gefüllt. Nach Starten des Messsystems wurde die Trommel auf das erste Geschwindigkeitsniveau eingestellt und die Messungen für 10 bis 20 Umdrehungen wiederholt. Danach wurde die Geschwindigkeit stufenweise erhöht, wobei wiederum bei jeder konstanten Rotationsgeschwindigkeit die Messungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt wurden. Insgesamt wurden Messungen auf 6 bis 8 Geschwindigkeitsniveaus durchgeführt.

Um den Wassergehalt und die Korngrößenverteilung zu kontrollieren wurden vor, während und nach jedem Versuch an verschiedenen Stellen der Welle (Frontbereich – Mitte – hinterem Teil) Proben genommen.

Eine detaillierte Beschreibung der Versuchsanlage und des Messsystems findet sich in Kaitna & Rickenmann (2007) und Kaitna et al. (2007).

Material

Das Versuchsmaterial stammt von einer frischen Ablagerung eines Murgangs in der ‚Scalärarüfe‘ in der Nähe von Timmis bei Chur in der Schweiz und wurde eingehend granulometrisch untersucht (Schatzmann 2005). Der Anteil an Partikel < 0.04 mm beträgt 9 %, was mehr oder weniger dem von Coussot (1994) postulierten Wert von mindestens 10 % entspricht, ab dem ein viskoses Fließverhalten zu erwarten ist.

Mit einem neuartigen Kugelrheometer wurden intensive rheologische Untersuchungen mit Proben verschiedener maximalen Korngrößen (≤ 0.25 mm, ≤ 1 mm, ≤ 5 mm, ≤ 7 mm und ≤ 10 mm) durchgeführt (Schatzmann 2005). Es konnten erfolgreich für alle Mischungen sogenannte ‚Rheogramme‘ (Zusammenhang zwischen Schubspannung und Scherrate) produziert werden und die Parameter für das Herschel Bulkley Modell sowie das Bingham Modell abgeleitet werden. In der vorliegenden Studie wurden Messungen mit Mischungen mit einer maximalen Korngröße von 5 mm und Werten der volumetrischen Sedimentkonzentration (C_v) zwischen 0.476 und 0.620 in der Trommelversuchsanlage durchgeführt.

RESULTATE

Annahmen für die Auswertung der Trommelversuche

Im ersten Schritt werden die rheologischen Parameter für das Bingham Modell aus den Versuchen in der Trommel abgeschätzt. Zum einen ist dieses Modell eines der einfachsten rheologischen Modelle, um das Fließverhalten von Murmaterial annäherungsweise zu beschreiben, zum anderen wird es oft in der Praxis bei der Gefahrenanalyse verwendet (z.B. Flo2d Simulationen, O'Brien et al. 1993).

Im Zuge einer vereinfachten Auswertung der ‚Trommelversuche‘ wird eine Analogie zu gleichförmig-stationären Abfluss in einem geraden Gerinne gezogen. Dabei wird der Auslenkungswinkel des Schwerpunkts des Versuchsmaterials (Auslenkung von der 6 Uhr Position) als Neigungswinkel des äquivalenten geraden Gerinne definiert. Weiters wird für alle Berechnungen die mittlere Fließtiefe der Welle als relevante Abflusstiefe herangezogen.

Die Analyse ist eindimensional, d.h. der Einfluss der Wandreibung wird vernachlässigt. Obwohl die Seitenwände des Rechteckgerinnes sehr glatt sind (polierter Stahl, Acrylglas), ist diese Vereinfachung bei hohen Rotationsgeschwindigkeiten fragwürdig. Aus diesem Grund wurden die Versuche bei sehr hohen Geschwindigkeiten und unregelmäßigen Strömungsmustern von der Analyse ausgeschlossen.

Eine weitere Annahme ist, dass die Geschwindigkeit an der Gerinnesohle gleich null ist (kein Schlupf). Diese Annahme scheint durch die schon beschriebene Applikation einer Bodenrauigkeit gerechtfertigt.

Abschätzung der rheologischen Parameter

Beim Bingham Modell ist die Schubspannung als Funktion der Scherrate und der Materialparameter τ_y und η durch Gleichung (1) mit $n = 1$ gegeben. Für diese Gleichung ist einzig die mittlere Schubspannung bekannt, die wie schon erwähnt auf drei verschiedene Arten bestimmt wird. Um die gesuchten Bingham Parameter zu bestimmen wurden zwei verschiedene Methoden gewählt, um eine mittlere Scherrate abzuschätzen: Einerseits (A) wurde eine lineare Geschwindigkeitsverteilung unter einer ungesicherten Zone angenommen („Plugzone“), andererseits (B) eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung unterhalb einer ungesicherten Zone. Eine lineare Geschwindigkeitsverteilung entspricht einer konstanten Scherrate und ist die einfachste Annahme für eine Flüssigkeit mit Grenzscherhöhe. Bei dieser Methode wird die Scherrate iterative bestimmt: im ersten Schritt ein lineares Geschwindigkeitsprofil entlang der gesamten Fließtiefe angenommen und mittels aller Versuchsdaten eine Grenzscherhöhe (τ_B') berechnet. Im Folgenden wird eine modifizierte Scherhöhe als Differenz von der gesamten Fließtiefe H und der Höhe der ungesicherten Zone, definiert als $H_{plug} = \tau_B' / (\rho g \sin \alpha)$, berechnet (α ist definiert als der Ablenkungswinkel des Schwerpunkts von der Vertikalen). Mit der neuen Scherhöhe lässt sich eine neue Scherrate berechnen und daraus eine bessere Abschätzung der Grenzscherhöhe. Diese Berechnungsschleife wird wiederholt, bis die Grenzscherhöhe konstant bleibt.

Die Geschwindigkeitsverteilung in einem offenen, unendlich breitem Gerinne für ein Bingham Fluid ist parabolisch (e.g. Johnson 1970, Ancy 2006). Die zweite Methode zur Abschätzung einer mittleren Scherrate in der Versuchswelle basiert auf geometrischen Überlegungen, um anhand der mittleren Geschwindigkeit und der Oberflächengeschwindigkeit, sowie der Fließtiefe, die Scherrate am Gerinneboden zu bestimmen (Holmes et al. 1993):

$$\dot{\gamma} = \frac{2V_{plug}^2}{3 \cdot (V_{plug} - V_m)H} \quad (7)$$

mit V_{plug} = die absolute Oberflächengeschwindigkeit (relativ zum Labor).

Der mit den Ansätzen (A) und (B) ermittelte Zusammenhang zwischen Schubspannung und Scherrate für alle Versuchsmischungen ist in Abb4 ersichtlich. Zum Vergleich wurden die Referenzmessungen mit dem Kuglrheometer (BMS) zusätzlich eingetragen. Es ist

anzumerken, dass die Sedimentkonzentration C_v bei den Versuchen in der Trommel zeitlich und räumlich im Bereich von ± 0.01 bis 0.04 variiert hat. Aus diesem Grund stellen die Angaben der Sedimentkonzentrationen der Trommelversuche einem Mittelwert dar und werden mit den jeweils nächstgelegenen C_v -Werten der BMS Messungen verglichen.

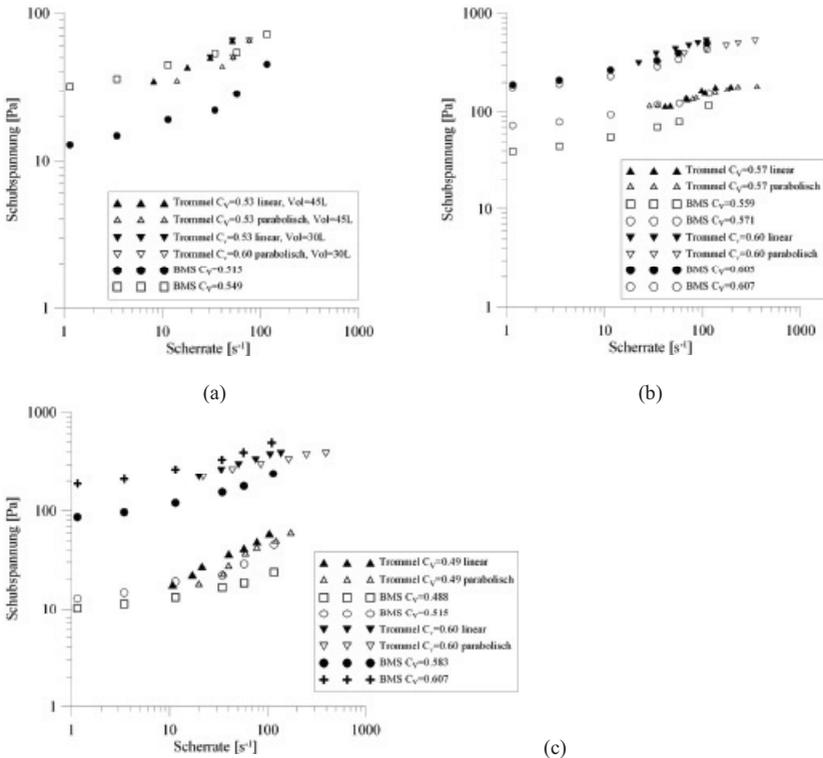


Abb4: Rheogramme aller in der Trommelversuchsanlage und im Kugelrheometer (BMS) untersuchten Murgangmischungen (maximale Korngröße 5 mm).

Fig4: Rheograms of debris flow mixtures with grain sizes < 5 mm at different sediment concentrations C_v , tested with the rotating drum and the ball measuring system (BMS)

Abb4 zeigt deutlich einen steigenden Trend der Schubspannung mit steigender Scherrate für alle Versuchsmischungen sowohl bei der Trommel-Versuchsanlage und als auch bei den Ergebnissen aus dem Kugelrheometer. Diese Beobachtung bestätigt die grundlegende Annahme eines viskosen Fließverhaltens der Wasser-Sedimentmischungen.

In Anbetracht der vereinfachten Auswertung liegen die Ergebnisse der Analyse der Trommelversuche recht nahe an den Kugelrheometer-Ergebnissen. Vor allem bei hohen Sedimentkonzentrationen ($C_v > 0.6$) ist eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen. Auch für Konzentrationen von $0.52 < C_v < 0.6$ ist die Übereinstimmung zufrieden stellend, hingegen bei niederen Konzentrationen ($C_v < 0.52$) liegt die gemessene Schubspannung bei hohen Scherraten zum Teil über den Messungen im Kugelrheometer. Der Hauptgrund dafür sind wahrscheinlich Segregationseffekte, die während der Versuche in der Trommel zu

beobachten waren und der daraus resultierenden Schwierigkeit, die ‚tatsächliche‘ Sedimentkonzentration zu bestimmen. Bei niederen Sedimentkonzentrationen setzen sich die groben Partikel (> 1 mm) schnell ab und werden an der Gerinnesohle (= Trommelboden) in den hinteren Bereich transportiert und sammeln sich dort an. Diese Situation mag einem Übergang zu murartigen Feststofftransport („hyperconcentrated flow“) darstellen.

Wie zu erwarten aufgrund der angenommenen Geschwindigkeitsverteilungen sind die Scherraten basierend auf einem parabolischen Geschwindigkeitsprofil höher als solche basierend auf einem linearen Profil. Es ist interessant zu beobachten, dass der Unterschied allerdings in den meisten Fällen recht gering ausfällt. Der Grund hierfür liegt in einer geringeren berechneten Scherhöhe für das lineare Geschwindigkeitsprofil, wodurch der Effekt eines parabolischen Profils zum Teil kompensiert wird. Ähnliche Ergebnisse lieferten Versuche mit homogenen viskoplastischen Flüssigkeiten (siehe Kaitna & Rickenmann 2007).

In einem weiteren Schritt wurde die Anwendbarkeit des Bingham Modells anhand der allgemeinen tiefengemittelten Gleichung (2) beurteilt. Es ist anzumerken, dass die Gleichung nur für gleichförmig-stationären Abfluss in einem unendlich breiten Gerinne gilt. Der Abfluss in der Trommel ist stationär, jedoch weder gleichförmig noch seitlich unbegrenzt. Um den Effekt der Wandreibung zu berücksichtigen, wurde die Korrekturrechnung für die mittlere Schubspannung nach Smart & Jaeggi (1983) durchgeführt. Ungleichförmigkeit des Abflusses und der Effekt der gekrümmten Sohle wurden vernachlässigt.

Da für jede Versuchsmischung Messungen auf verschiedenen Geschwindigkeitsniveaus durchgeführt wurden, erhält man um die kubische Gleichung (2) zu lösen unter Verwendung aller möglichen Kombinationen von Messdaten 15 bis 28 Lösungen für die Bingham Parameter. Da das Versuchsmaterial ein scherverdünnendes Fließverhalten zeigt, ist der Wert der Standardabweichung also auch als Maß für die Abweichung von einem idealen Bingham Fließverhalten.

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse ist in Abb5 ersichtlich. Es ist darauf hinzuweisen, dass im Falle des Kugelhreometers (BMS) die Scherrate direkt bestimmt wurde, ohne vorab ein Modell zu postulieren. Es wurden sowohl Bingham Parameter als auch die Parameter für das Herschel Bulkley Modell abgeleitet. Zum Vergleich ist in Abb5 links auch die Grenzscherubspannung für das Herschel Bulkley Modell angegeben.

Die Fehlerbalken in X-Richtung in Abb5 weisen auf die schon angesprochene Variation der Sedimentkonzentrationen bei den Versuchen in der Trommel hin (Segregationseffekt, rasches Absinken grober Partikel bei geringen Sedimentkonzentrationen) und gelten für alle ‚Trommel-Resultate‘. Die Fehlerbalken in Y-Richtung repräsentieren die Standardabweichung der Lösungen der tiefengemittelten Gleichung (2).

In Abb5 ist gut zu erkennen, dass die Resultate aus den verschiedenen Methoden zur Abschätzung der Grenzscherubspannung sehr gut miteinander übereinstimmen. Die Grenzscherubspannung errechnet mit einem linearen Geschwindigkeitsprofil sind geringfügig höher als die Ergebnisse basierend auf einem parabolischen Geschwindigkeitsprofil. Die Grenzscherubspannung errechnet mit der tiefengemittelten Gleichung (2) zeigt die niedrigsten Werte. Die Bingham Grenzscherubspannung aus den Referenzmessungen im Kugelhreometer (BMS) bestätigen die Abschätzungen aus den Trommelversuchen. Die Grenzscherubspannung für das Herschel Bulkley Modell liegt erwartungsgemäß systematisch unter den Werten für das Bingham Modell, allerdings ist die Abweichung relativ gering.

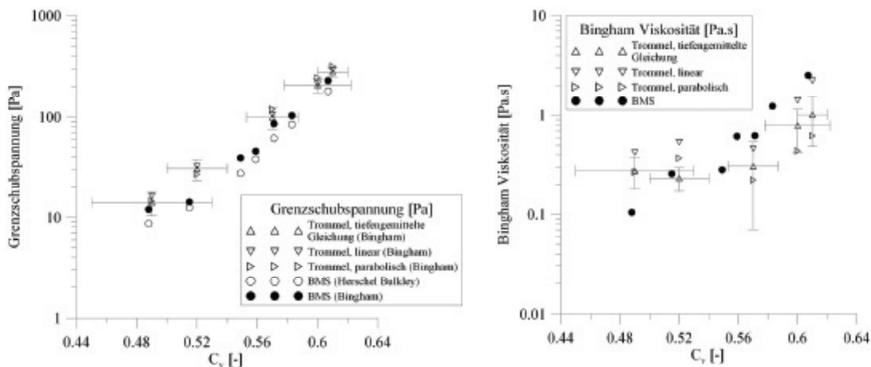


Abb5: Links: Vergleich der Ergebnisse für die Grenzschubspannung in Abhängigkeit der Sedimentkonzentration; rechts: Vergleich aller Ergebnisse für die Bingham Viskosität in Abhängigkeit der Sedimentkonzentration für alle untersuchten Mischungen

Fig5: Left: comparison of all results of the yield stress for all mixtures; right: comparison of all results of Bingham viscosity for all tested mixtures.

Eine größere Streuung zeigen die Ergebnisse für die Bingham Viskosität. Im Bereich von Sedimentkonzentrationen $C_v < 0.52$ liegen die Abschätzungen aus den Trommelversuchen meist über den Messungen im Kugelhreometer, für Sedimentkonzentrationen $C_v > 0.52$ eher darunter. Eine recht gute Übereinstimmung findet sich hier für die Berechnungen basierend auf einer linearen Scherrate.

Wie von verschiedenen Autoren berichtet (z.B. Coussot 1997; Johnson 1970; Chen 1986), reagieren die rheologischen Parameter äußerst sensitiv auf Änderungen des Wassergehalts im Bereich hoher Sedimentkonzentrationen. Sowohl für die Grenzschubspannung als auch für die Viskosität ist diese Abhängigkeit exponentiell, was durch einen linearen Trend im halb-logarithmischen Diagramm zum Ausdruck kommt.

DISKUSSION

Verschiedene Studien (z.B. Ancy 2006, Schatzmann et al. 2003; Ancy 2001; Coussot and Piau 1995) haben gezeigt, dass die rheologischen Eigenschaften von viskosen Sediment-Wasser-Gemischen zum einen vom Wassergehalt, zum anderen aber auch vom Durchmesser des Größtkorns abhängig sind. Durch eine Erhöhung der Konzentration grober Partikel in einer viskosen Flüssigkeit werden auch die Werte der Modell Parameter erhöht. Im Falle von Murgangmaterial bedeutet das, dass eine rheologische Analyse einer Mischung mit eingeschränkter Kornverteilung (z.B. limitierte maximale Korngröße) nicht repräsentativ für die Gesamtmischung sein kann. Coussot et al. (1998) schlagen ein Procedere vor, um Herschel Bulkley Parameter für natürliche Murgangmischungen abzuschätzen, indem rheologische Untersuchungen von Mischungen mit verschiedenen maximalen Korngrößen durchgeführt werden und anschließend für das komplette Material extrapoliert wird. In konventionellen Rheometern können Mischungen von meist maximal 0.1 mm Korngröße untersucht werden, im Kugelhreometer (BMS) wurden erfolgreich Mischungen einem Größtkorn von 10 mm untersucht. Hier stellt die Trommel-Versuchsanlage eine Möglichkeit dar, einen breiten Bereich von Mischungen abzudecken und rheologische Parameter für eine natürliche Murgangmischung abzuschätzen.

Aus ähnlichen Gründen wurden in der Vergangenheit Versuche mit eigens konstruierten Großrheometern durchgeführt (z.B. Coussot & Piau 1995, Contreras & Davies 2000). Die Versuche waren teilweise erfolgreich, teilweise jedoch – vor allem bei granularen Mischungen – waren die Ergebnisse nicht eindeutig. Hier bieten Versuche zur Abschätzung von Materialparameter in offenen Gerinnen den Vorteil, dass das Gravitationsfeld in gleicher Richtung wie in natürlichen Murgängen wirkt und infolge dessen Geschwindigkeitsverteilung und Verteilung von Normal- und Schubkräften in Natur und Modell ähnlich sind.

Im Zusammenhang mit Felduntersuchungen (Abschätzung der Grenzschubspannung anhand von Ablagerungen von Murgängen aus der Vergangenheit, ‚Stumme Zeugen‘) und im Idealfall durch Validierung anhand von Simulationen eines gut dokumentierten Murgangereignisses scheint dies eine viel versprechende Möglichkeit zu sein, die Größenordnung der rheologischen Parameter für ein Einzugsgebiet durch unabhängige Untersuchungen im Labor zu bestimmen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Um das Fließverhalten von Murgangmaterial zu untersuchen, wurde eine ‚Trommel-Versuchsanlage‘ entwickelt. In der vorliegenden Studie werden Methoden vorgestellt, um für viskose Mischungen (d.h. hoher Feinkornanteil) mit einem maximalen Korndurchmesser von 5 mm Parameter für das Bingham Modell abzuschätzen. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit unabhängigen Messungen in einem neuartigen Kugelrheometer.

Ziel zukünftiger Versuche sollte es sein, Versuche mit Mischungen unterschiedlicher maximaler Korngröße durchzuführen und aus den Ergebnissen rheologischen Parameter für das komplette Murgangmaterial (uneingeschränkte Korngrößenverteilung) abzuschätzen.

LITERATUR

- Ancey C (2001) Role of lubricated contacts in concentrated polydisperse suspensions. *Journal of Rheology* 45: 1421-1439.
- Ancey C. (2006): Plasticity and geophysical flows: A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Volume 142, Issues 1-3, Pages 4-35*.
- Chen C.L. (1986): Chinese concepts of modelling hyperconcentrated streamflow and debris flow. Proc. of the 3rd Int. Symp. on River Sed. Univ. of Mississippi: 1647 – 1657.
- Contreras S.M., Davies T.R. (2000): Coarse-grained debris flows: Hysteresis and time-dependent rheology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(12): 938-941.
- Costa J.E. (1984): Physical Geomorphology of Debris Flows. In Costa, J.E.; Fleischer, P.J. (eds.): *Developments and Applications of Geomorphology*. Berlin: Springer: 268 – 317
- Coussot P., Piau J.M. (1995): A large scale field coaxial cylinders rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions. *Journal of Rheology* 39: 105 – 125.
- Coussot P., Meunier M. (1996): Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth Science Reviews* 40: 209-227
- Coussot P. (1997): *Mudflow rheology and dynamics*. IAHR Monograph Series. Rotterdam: Balkema.
- Coussot P., Laigle D., Arattano M., Deganutti A., Marchi L. (1998): Direct determination of rheological characteristics of debris flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 124 (8): 865 – 868.

- Cui P., Chen X., Waqng Y., Hu K., Li Y. (2005): Jiangia Ravine debris flows in south-western China. In Jakob M, Hungr O (eds.): *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, Berlin Heidelberg: pp 565 – 594
- Holmes R.R., Huizinga R.J., Brown, S.M., Jobson H.I. (1993): Laboratory procedures and data reduction techniques to determine rheologic properties of mass flows. *USGS Water-Resources Investigation Report*: 93-4123.
- Hutter K. (2005): Debris and mudflows: Are we asking the correct questions? What are the deficits? VAW 75 Jahre: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. Festkolloquium: 92 – 105.
- Iverson M.R.; Denlinger R.P. (2001): Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research* 106(B1): 537 – 552.
- Johnson A.M. (1970): *Physical processes in geology*. Freeman and Cooper, San Francisco
- Kaitna R., Rickenmann D. (2007): A new experimental facility for laboratory debris flow investigation. *Journal of Hydraulic Research*. In press.
- Kaitna R., Rickenmann D., Schatzmann M. (2007): Determination of rheologic information from laboratory experiments. *Acta Geotechnica*, Vol.2, Nr.2, S. 71-85. Springer. Berlin.
- Metzner A.B., Otto R.E. (1957): Agitation of Non-Newtonian Fluids. *AIChE Journal* 3: 3-10
- Müller M., Tyrach J., Brunn P.O. (1999) Rheological characterization of machine-applied plasters. *ZKG International* 52: 252-258
- O'Brien, J.S., Julien, P.Y., Fullerton, W.T. (1993): Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *J. Hydr. Eng., ASCE*, 119(2), 244-261
- Pudasaini S.P., Wang Y., Hutter K. (2005): Modelling debris flows down general channels. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5: 799-819.
- Remaitre A., Malet J.P., Maquaire O., Ancey C., Locat J. (2005): Flow behaviour and runoff modelling of a complex debris flow in a clay – shale basin. *Earth Surf. Process. Landforms* 30: 479 – 488
- Rickenmann D. (1999) Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards* 19(1): 47-77
- Rickenmann D., Laigle D., McArdell B.W., Hübl J. (2006) Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. *Computational Geosciences* 10: 241–264, DOI: 10.1007/s10596-005-9021-3.
- Schatzmann M. (2005): Rheometry for large particle fluids and debris flows. Dissertation No 16093, ETH Zurich, Switzerland.
- Schatzmann M., Fischer P., Bezzola G.R. (2003). Rheological behaviour of fine and large particle suspensions. *J Hydr Eng (ASCE)* 129: 796-803
- Smart G.M., Jaeggi M. (1983): *Sediment transport on steep slopes*. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Mitteilungen 64. Zürich: Eigenverlag.
- Tyrach J. (2001): Rheologische Charakterisierung von zementären Baustoffsystemen. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg