

Doctoral Thesis ETH NO. 16093

**RHEOMETRY FOR LARGE PARTICLE FLUIDS AND DEBRIS  
FLOWS**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

**MARKUS SCHATZMANN**

Dipl. Kultur-Ing. ETH

born 06.01.1969

citizen of Windisch (Aargau)

accepted on the recommendation of

Prof. Hans-Erwin Minor, examiner  
Prof. Erich Windhab, co-examiner  
Dr. Gian Reto Bezzola, co-examiner  
Dr. Peter Fischer, co-examiner

2005

## Abstract

The present study focused on existing and novel rheometric tools for the efficient determination of the rheological behaviour of large particle fluids with particular interest in the application to debris flows.

The main goal was the examination of the ball measuring system (BMS). Implemented in a standard rheometer, the BMS consists of a sphere that is dragged at specified speeds across a sample of 0.5 liter volume with the help of a small sphere holder. Accordingly torques due to drag exerted on the sphere and its holder as well as corresponding speeds are measured within a wide range.

Based on the present study it could be shown that the system principally allows the determination of the flow curve, relaxation time and fluid fatigue of fluids containing particles up to 10 mm grain size. The existing theory for the conversion of measured into rheological data was improved by (i) respecting the characteristics of different types of fluids (Newtonian, Power Law and Yield Stress Fluids) and (ii) by considering the laminar flow regime ( $Re \leq 1$ ) as well as the transitional regime ( $1 < Re < 100$ ). In case of the Yield Stress Fluids it was shown that the new semi-empirical relationships correspond well with the yield stress criterion derived by different authors for spheres starting to move in this type of fluid.

For comparison, a variety of debris flow material mixtures and other suspensions were investigated with the BMS as well as with other rheometric tools, such as the large scale rheometer of Coussot&Piau, the BML viscometer, the Slump Test, the Inclined Channel Test, the Inclined Plane Test and the Kasumeter. Overall the flow curves and the yield stresses obtained with the BMS agreed well with the results of the other systems.

For the determination of the flow curve in daily application, the ball measuring system is recommended for particle fluids up to 10 mm grain size, and the BML viscometer for fluids up to 30 mm grain size. The yield stress is determined efficiently with the Slump Test, either based on the slump height or based on the profile of deposit.

With regard to debris flows, a distinction between granular debris flows, mud flows and viscous debris flows is given in the present study. For granular debris flows where a porefluid (water, clay and silt) is distinguished from the larger particles, rheology is considered to be relevant on the level of the porefluid. For the latter the rheological properties are determined based on standard measuring systems in conventional rheometers. For mudflows where a muddy phase (water, clay, silt, sand and ev. gravel) is distinguished from the larger particles, the rheological properties of the mud can be determined with the help of the rheological apparatus and tests recommended in the section above. For viscous debris flows where the entire mixture of water and all sediments behaves more or less as one phase, two rheometric methods are given: One is based on field and laboratory investigations which requires the apparatus and tests recommended above. The other method is entirely based on field investigations and requires observations of the flowing debris flow.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit bestehenden und neuen Messsystemen zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Grobpartikelfluiden mit besonderem Interesse hinsichtlich der Anwendung auf Murgänge.

Das Hauptziel der Arbeit lag in der Prüfung des Kugelmesssystems (BMS). Modular einbaubar in einem Standardrheometer besteht das BMS aus einer an einer schmalen Halterung befestigten Kugel, die - exzentrisch rotierend - bei definierten Geschwindigkeiten durch ein Profluid von 0.5 l Volumen gezogen wird. Entsprechend werden die auf die Kugel aufzubringenden Momente sowie die zugehörigen Geschwindigkeiten in einem grossen Messbereich gemessen.

In der Arbeit wurde gezeigt, dass das BMS die Bestimmung der Fliesskurve der Erholungszeit und der Ermüdung von Grobpartikelfluiden mit Körnern bis zu 10 mm Durchmesser erlaubt. Die bestehende Theorie zur Umwandlung der gemessenen Grössen in rheologische Grössen wurde verbessert und erweitert durch (i) Differenzierung nach Fluidtypen (Newton, Power Law und Grenzschubspannungsflied) und (ii) unter Berücksichtigung der laminaren Kugelumströmung ( $Re \leq 1$ ) wie auch des Übergangsbereiches ( $1 < Re < 100$ ). Im Falle der Grenzschubspannungsfliede konnte gezeigt werden, dass der neue Ansatz gut mit dem von verschiedenen Autoren definierten Kriterium für den Bewegungsbeginn von Kugeln in solchen Fluiden korrespondiert.

Als Vergleich wurde eine Vielzahl von Murgangmaterialmischungen und anderen Suspensionen mit dem BMS und anderen Messsystemen wie dem Grossrheometer von Coussot&Piau, dem BML Viskometer, dem Slump Test, dem Kasumeter und dem Ablagerungstest in geneigter Rinne und auf geneigter Ebene untersucht. Die mit dem BMS bestimmten Fliesskurven und Grenzschubspannungen stimmten dabei gut mit den Resultaten der anderen Messsysteme überein.

Für die effiziente Bestimmung der Fliesskurve von Grobpartikelfluiden bis zu 10 mm Korndurchmesser wird das BMS, bis zu 30 mm Korndurchmesser der BML Viskometer empfohlen. Der Slump Test empfiehlt sich zur Bestimmung der Grenzschubspannung, wo letztere entweder aus der Slumphöhe oder aus dem Ablagerungsprofil ermittelt wird.

Bei Murgängen wird zwischen granularen Murgängen, Schlammströmen und viskosen Murgängen unterschieden. Bei granularen Murgängen ist das Konzept der Rheologie nur anwendbar auf das Porenfluid (Wasser, Ton und Silt). Für letzteres können die Fliesskurvenparameter mittels Standardmesssystemen in konventionellen Rheometern bestimmt werden. Bei Schlammströmen, wo eine flüssige Phase (Schlamm: Wasser und Ton- bis Kiespartikel) von einer festen Phase (Steine und Blöcke) unterschieden wird, kann der Schlamm mit den weiter oben empfohlenen Messsystemen untersucht werden. Bei viskosen Murgängen, wo das gesamte Sediment-Wasser-Gemisch als eine einzige Phase betrachtet wird, werden zwei rheometrische Methoden empfohlen: Eine Methode basiert auf Feld- und Laboruntersuchungen. Die andere Methode basiert alleine auf Felduntersuchungen, bedingt jedoch die Beobachtung eines fliessenden Murganges.

## Résumé

En vue de l'application aux laves torrentielles ce travail se concentre sur la rhéométrie pour déterminer les propriétés rhéologiques de fluides formés de gros grains.

Le but principal du travail est l'analyse du système de boule (BMS). Implémenté dans un rhéomètre conventionnel, le BMS est constitué d'une sphère entraînée par un bras rotatif. L'ensemble – en rotation excentrique – est mu à des vitesses définies à l'intérieur d'un échantillon de 0.5 l de volume. Le couple exercé sur l'ensemble boule et bras est mesuré dans une grande plage en même temps que la vitesse.

Ce travail montre que le BMS permet de déterminer la courbe d'écoulement, le temps de repos et la fatigue de fluides contenant des particules jusqu'à un diamètre de 10 mm. La théorie existante de la conversion des grandeurs mesurées en grandeurs rhéologiques a été améliorée par la considération (i) de différents types de fluides (newtonien, « power law », fluide à seuil) ainsi (ii) que différents régimes (laminaire ( $Re \leq 1$ ), transitionnel ( $1 < Re < 100$ )). Dans le cas des fluides à seuil, la nouvelle approche corrobore le critère de seuil donné par différents auteurs pour des sphères se mouvant dans ce type de fluide.

Pour comparaison, de nombreux mélanges d'eau et de sédiments de laves torrentielles ainsi que différentes suspensions ont été analysés avec le système BMS et d'autres systèmes comme le rhéomètre à grande échelle de Coussot&Piau, le viscomètre BML, le « slump test », le casumètre et des tests dans un chenal incliné et sur un plan incliné. Les courbes d'écoulement et les seuils de contrainte obtenus avec le BMS concordent bien avec les résultats obtenus avec ces autres systèmes.

Pour une détermination optimale de la courbe d'écoulement de fluides contenant des grains jusqu'à un diamètre de 10 mm, le système BMS est recommandé. Pour un diamètre allant jusqu'à 30 mm le viscomètre BML convient. Le seuil de contrainte est déterminé efficacement avec le « slump test », basé soit sur la hauteur du « slump », soit sur le profil du dépôt.

Quant aux laves torrentielles, on distingue la lave granulaire, la coulée de boue et la lave visqueuse. Pour la lave granulaire, le concept de rhéologie n'est applicable qu'au fluide intergranulaire (eau et sédiment fin). Pour celui-ci la courbe d'écoulement peut être déterminée avec des systèmes de mesure standards dans un rhéomètre conventionnel. La coulée de boue est composée d'une phase liquide (boue: eau et sédiment d'un mélange argile-gravier) et d'une phase solide (pierres, blocs). Les propriétés de la boue peuvent être déterminées avec les appareils et systèmes décrits dans le paragraphe précédent. Enfin pour la lave visqueuse où le mélange eau et sédiments se comporte comme une seule phase liquide, deux méthodes rhéométriques sont proposées. La première est basée sur des analyses de terrain et des analyses de laboratoire, tandis que la deuxième est uniquement basée sur des analyses de terrain. Toutefois dans ce cas il faut pourvoir observer la lave en mouvement.

## Riassunto

La tesi seguente tratta l'uso di esistenti e innovativi dispositivi reometrici per una efficiente determinazione del comportamento reologico di fluidi a particelle grossolane con un accento particolare sull'applicazione nel campo delle colate detritiche.

L'obiettivo principale dello studio era indagare il "ball measuring system (BMS)". Il sistema (BMS) è composto da una sfera, solidale ad un supporto, la quale è mossa ad una specifica velocità, all'interno di un campione di materiale di circa 0.5 litri. Simultaneamente, il momento torcente richiesto per il movimento della sfera e la sua velocità sono misurati in un grande campo di misura.

Lo studio evidenzia come il BMS permette la determinazione del reogramma e del tempo di rilassamento per fluidi che contengono particelle grossolane di diametro superiore a 10 mm. Le teorie esistenti, devote alla conversione dei dati misurati in parametri reologici, sono state migliorate considerando: (i) le caratteristiche di differenti tipologie di fluidi (newtoniani, pseudoplastici, dilatanti o dotati di tensione di soglia) e nel considerare (ii) il regime laminare ( $Re \leq 1$ ) tanto che il regime transizionale ( $1 < Re < 100$ ). Nel caso di fluidi dotati di tensione di soglia è stato possibile mostrare come le nuove semi-empiriche relazioni proposte corrispondono bene al criterio del inizio moto di sfera in tali fluidi derivato da diversi autori.

Per confronto sono state analizzate altri tipi di misture e di sospensioni utilizzando sia il BMS che altri sistemi reometrici, come il grande reometro di Coussot&Piau, il viscometro BML, il Slump Test, il kasumeter e gli esperimenti con canale inclinato e su piano inclinato. I reogrammi e i valori di tensione di soglia ottenuti con il BMS sono in accordo con i risultati degli altri sistemi reometrici.

Per la determinazione efficiente dei reogrammi, il BMS è raccomandato per fluidi con particelle grandi fino a 10 mm, mentre il viscometro BML è raccomandato per fluidi con particelle grandi fino a 30 mm. La tensione di soglia viene accuratamente determinata per mezzo dello Slump Test osservando o la variazione in altezza del provino o la forma dello stesso a fine prova.

Riguardo le colate di detriti (debris flow) si possono distinguere le colate detritiche granulari, le colate di fango e le colate di detrito viscoso. Per le colate detritiche granulari, in cui è possibile individuare una matrice ed una parte più grossolana, la reologia è rilevante solo per il fluido intergranulare (acqua e sedimento argilloso-siltoso). In questo caso il reogramma si determina con dei consueti sistemi reometrici. Per le colate di fango, dove si distingue una fase liquida (il fango: acqua e sedimento argilloso-ghiaioso) da una fase solida (massi, blocchi), la reologia può essere ricavata con le indicazioni già fornite precedentemente. Per le colate di detrito viscoso, in cui le diverse fasi si confondono in una unica pseudofase, sono proposti due metodi: Il primo include delle analisi sia di campo che di laboratorio compiute con le attrezzature e le metodologie già descritte. Il secondo metodo include solamente delle analisi di campo attraverso l'osservazione diretta del flusso di una colata di detriti.