Universität für Bodenkultur, Wien

University of Naturale Rsources and Applied Life Sciences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Department of Civil Engineeering and Natural Hazards

Institut für Alpine Naturgefahren

Institut of Mountain Risk Engineering



Versuche zur Entwicklung einer granularen Murfront mit künstlichen Versuchsmaterialien

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieures

> eingereicht von Alexander Krawtschuk Wien, 2009

> > Betreuer:

A.o. Univ. Prof. DI Dr. Johannes HÜBL Univ. Ass. DI Dr. Roland KAITNA

Danksagung

Viele Persönlichkeiten haben zum Gelingen der vorliegenden Diplomarbeit beigetragen.

Für die wissenschaftliche Betreuung und Unterstützung möchte ich Prof. Dr. Johannes Hübel, Prof. Dr. Dieter Rickenmann, Dr. Roland Kaitna sowie dem gesamten Team des Institutes für Alpine Naturgefahren danken.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Roland Kaitna, der mir einerseits Mut gemacht hat mich an das interessante Thema der Murenforschung heranzuwagen und zum anderen mir in jeder Phase der Arbeit mit Rat und Tat zur Seite stand. Seiner kompetenten Unterstützung habe ich es zu verdanken, dass ich auch schwerste Probleme lösen konnte.

Weiter möchte ich mich bei Ing. Fritz Zott vom Institut für Alpine Naturgefahren bedanken, der mir in der Anfangsphase der Versuchsdurchführung mit seinem fachkundigen Wissen in Sachen Messtechnik und Murtrommel half.

Danke auch an Monika, der immer gut gelaunten Seele des Institutes. Sie hat immer ein offenes Ohr und findet für schwierigste organisatorische Probleme immer eine Lösung.

Ein großer Dank gilt auch Gabriel Dusl und Georg Angelmaier, die mich bei meinen aufwendigen Versuchen, tatkräftig unterstützten, sowie all meinen Studienkolleginnen und –kollegen mit denen ich während meines Studiums tolle Zeiten erleben durfte.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie, im Besondern bei meinem Vater Fritz jun., meiner Mutter Karin, meiner Schwester Evelin, meinen Nichten Chantal und Talisha, meinem Großvater Fritz sen., meiner verstorbenen Großmutter Serafine sowie bei Sigrun für den finanziellen wie auch moralischen Beistand während der letzten Jahre danken.

Kurzfassung

Muren sind Gesteins- und Schlammströme, welche sich mit hohen Geschwindigkeiten talwärts bewegen und dadurch große Schäden verursachen können. Vereinfacht betrachtet bestehen Muren aus einer flüssigen (Wasser und Feinsediment) und einer festen Phase (Grobsediment). Beschreibungen von beobachteten Murgangereignissen sind selten, berichten aber oft von einer Ansammlung großer Blöcke und einem geringen Wasseranteil im Frontbereich.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde versucht mit künstlichen Murmaterialien die Ausbildung einer granularen, ungesättigten Murfront zu untersuchen. Versuchsanlage diente hierzu die sogenannte Murtrommel. In dieser rotierenden Trommel kann ein stationärer, verkleinerter Murschub erzeugt werden, der bei verschiedenen Geschwindigkeiten über einen längeren Zeitraum beobachtet werden kann. Bisher wurden für solche Untersuchungen meist schräge Rutschen verwendet (z.B. IVERSON, 1997). Der große Nachteil dieser Einrichtungen ist die nur einmalig mögliche Datenaufzeichnung. Besonderes Augenmerk bei der Trommel wurde auf die Entwicklung von Porenwasserdrucksensoren gelegt, um die Ausbildung einer Von ungesättigten Zone nachzuweisen. weiterer Bedeutung sind Normalspanungs- und Schubspanungsmessungen, sowie die Abflusstiefenmessung mittels Ultraschallsensors und eines Lasers. Die zwei Phasen eines Murganges wurden Labor vereinfacht mit einer synthetischen Polymerflüssigkeit verschiedener Viskositäten und PVC Partikel einheitlicher Körnung hergestellt. Um zu untersuchen, welche Faktoren die Ausbildung einer granularen Front beeinflussen, wurden folgende Parameter systematisch variiert:

- Viskosität der flüssigen Phase
- PVC Partikel Konzentration
- Geschwindigkeit der Trommel

Aufgrund der Versuche war es in weiterer Folge möglich die gewonnen Daten mit entsprechenden Programmen wie CATMAN und MATLAB auszuwerten und zu interpretieren. Die einzelnen Ergebnisse haben gezeigt, dass mehrere Faktoren zusammenspielen müssen, damit sich eine granulare Murfront ausbilden kann. Vor

allem der volumetrische Feststoffhaushalt und die Geschwindigkeit haben entscheidenden Einfluss, aber auch die Viskosität spielt eine gewisse, jedoch untergeordnete Rolle bei der Ausbildung eines trockenen Murkopfes. In einem weiteren Schritt wurde die Auswirkung einer granularen Front auf den Fließwiderstand (Sohlenschubspannung) der bewegten Masse untersucht.

Abstract

Debris flows are mixtures of rock, gravel, silt or mud, which descend steep mountain channels at high velocity and often cause severe damages. In a simplified view debris flows consist of a fluid phase (water and fine sediment) and a solid phase (coarse sediment). Descriptions of observed debris flows are rare, however, often at the head of a debris flow an increased concentration of boulder-sized rocks in connection with a low content of water is reported. The goal of this study is to investigate the development of a granular, unsaturated debris flow using artificial material. A large scale rotating drum was used for this purpose. In the rotating drum a stationary, miniaturized debris flow surge can be produced and observed at different flow velocities over an arbitrary time period. Similar investigations have been conducted in tilted flumes of different sizes (e.g. IVERSON, 1997). The considerable disadvantage of such a device is that data can be collected and saved only once. In this special focus was given on the development of reliable pore fluid pressure sensors which are important for the identification of the formation of a granular debris flow front. Additionally normal stress and shear stress measurements as well as flow depth measurements were conducted. The two phases of a mudflow were simulated in a simplified way using synthetic liquids of different viscosity and pvc particles of same size. In order to investigate, which factors influencing the formation of a granular front, the following parameters were systematically varied:

- Viscosity of the liquid phase
- Concentraion of the pvc particles
- Speed of the drum

Based on these tests we could consolidate and evaluate the produced data with the help of programs like CATMAN and MATLAB. The results showed that some factors have to coincide in order to build a granular flow front. Volumetric concentration of solid particles and flow velocity have a significant impact on the formation of head of a dry debris flow front. The viscosity of the fluid phase has a less pronounced effect. In a next step the effect of an unsaturated front on the flow resistance of the mixtures (bed shear stress) was investigated.

Inhaltsverzeichnis

1.	. Ein	leitu	ng	9
	1.1.	Bes	chreibung von Muren	9
	1.2.	Ziel	der Diplomarbeit	.14
2	. Gru	ındla	ngen der Rheologie, Physik und Hydraulik	.16
	2.1.	Gru	ndlagen der Rheologie	.16
	2.2.	Rhe	eologische Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens von Muren	.19
	2.2	.1.	Bingham Modell	.19
	2.2	.2.	Herschel Bulkley Modell	.21
	2.3.	Dim	ensionslose Kennzahlen im Zusammenhang mit Murgängen	.22
	2.3	.1.	Volumetrischer Feststoffanteil (C _v -Wert)	.22
	2.3	.2.	Bingham Zahl	.22
	2.3	.3.	Reynoldszahl	.23
	2.3	.4.	Froude-Zahl	.23
	2.3	.5.	Savage-Zahl	.24
	2.3	.6.	Bagnold Zahl	.25
	2.3	.7.	Skalierung	.27
	2.4.	Geo	technische Grundlagen	.28
	2.4	.1.	Reibungswinkel	.28
	2.4	.2.	Effektive Normalspannung	.28
	2.4	.3.	Kohäsion	.29
	2.4	.4.	Porenwasserdruck	.29
	2.4	.5.	Scherfestigkeit (Schubfestigkeit)	.30
3.	. Ver	such	nsmaterialien, -anlage, -durchführung	.31
	3.1.	Vers	suchsmaterialien	.31
	3.1	.1.	Carbopol Ultrez 10R	.31
	3.1	.2.	Kunststoffgranulate	.31
	3.2.	Tror	mmel-Versuchsanlage	.32
	3.2	.1.	Trommelaufbau	.32
	3.2	.2.	Porenwasserdrucksensor	.33

	3.2.3.	Normal- und Scherspannungssensor	34
	3.2.4.	Ultraschallsensor und Laser	35
	3.2.5.	Mittlere Geschwindigkeit	36
	3.2.6.	Datenmanipulation der Trommelsensoren	36
	3.2.6	1. Basis Signal Normal-, Schubspannung, Porenwasserdruck	36
	3.2.6	2. Abflusstiefenmessung und Volumenänderungen	38
	3.2.6	3. Fließtiefenprofile	41
3	.3. Rh	eometer	42
3	.4. Ve	suchsdurchführung	44
	3.4.1.	Übersicht über die Versuche	44
4.	Resulta	te	47
4	.1. Ge	nerelle Beobachtungen	47
4	.2. Qu	alitative Beschreibung der einzelnen Versuche	50
	4.2.1.	Wasser-Granulat Versuche	50
	4.2.1.	1. Versuch 080813	50
	4.2.1.	2. Versuch 080829_1 und 080829_2	50
	4.2.2.	Carbopol-Granulat Versuche	51
	4.2.2.	1. Versuch 080819	51
	4.2.2.	2. Versuch 080829_3	52
	4.2.2.	3. Versuch 081006	53
	4.2.2.	4. Versuch 081007	55
4	.3. Gra	nulare Murfront	56
	4.3.1.	Einfluss der Geschwindigkeit auf die Murfront	56
	4.3.2.	Einfluss des volumetrischen Feststoffanteil auf die Murfront	60
	4.3.3.	Einfluss der Viskosität auf die Murfront	61
4	.4. Re	bungswinkel und Reibungsbeiwert	67
5.	Diskus	sion	70
6.	Schlus	sfolgerung	73
7. Abbildungsverzeichnis			75
8.	Tabelle	nverzeichnis	77

9.	Literat	ur	78
10.	Sym	bolverzeichnis	82
11.	Appe	endix	84
1	1.1.	Gesamtübersicht der einzelnen Wasser-PVC Versuche	84
1	1.2.	Gesamtübersicht der einzelnen Carbopol-PVC Versuche	86
1	1.3.	Einfluss der Geschwindigkeit auf die Murfront	90
	11.3.1.	Versuch 080819_1 Carbopol 0,05%+PVC-Partikel	90
	11.3.2.	Versuch 080819_2 Carbopol 0,05%+PVC-Partikel	91
	11.3.3.	Versuch 080929_1 Wasser+PVC-Partikel	92
	11.3.4.	Versuch 080929_3 Carbopol 0,05%+PVC-Partikel	93
	11.3.5.	Versuch 081006_1 Carbopol 0,07%+PVC-Partikel	94
	11.3.6.	Versuch 081006_2 Carbopol 0,07%+PVC-Partikel	95
	11.3.7.	Versuch 081006_3 Carbopol 0,07%+PVC-Partikel	96
	11.3.8.	Versuch 081007_1 Carbopol 0,10%+PVC-Partikel	97
	11.3.9.	Versuch 081007_3 Carbopol 0,10%+PVC-Partikel	98
1	1.4.	Reibungswinkel	99
	11.4.1.	Versuch 081006_1 Carbopol 0,07%+PVC-Partikel	99
	11.4.2.	Versuch 081006_2 Carbopol 0,07%+PVC-Partikel	100
	11.4.3.	Versuch 081006_3 Carbopol 0,07%+PVC-Partikel	101
	11.4.4.	Versuch 081007_1 Carbopol 0,10%+PVC-Partikel	102
1	1.5.	Rheometerversuche	103
	11.5.1.	Rheometerversuch 080819	103
	11.5.2.	Rheometerversuch 080829_3	104
	11.5.3.	Rheometerversuch 081006	105
	11.5.4.	Rheometerversuch 081007	106
	11.5.5.	Mittelwerte aller Rheometerversuche	107

1. Einleitung

1.1. Beschreibung von Muren

Unter Muren versteht man Gesteins- und Schlammströme, die fast jedes Jahr im Gebirge im Zuge von Starkregenereignissen auftreten und große Schäden verursachen können. Dabei werden große Mengen von Schutt- und Verwitterungsmaterial, beziehungsweise Boden mobilisiert und in einem Bachlauf oder Gerinne zu Tal befördert. Mobilisiert werden diese Schuttmengen durch:

- Hangrutschungen oder Gerinnedestabilisierung,
- Verklausungsbrüche in einem Bachbett,
- Hohe Erosionsleistungen bei wenig verfestigtem Hangschutt, sofern geringe Vegetation vorhanden ist.

Murgänge weisen hohe Feststoffkonzentrationen an der Front auf und sind oft durch einen schubweisen Abfluss charakterisiert, wodurch sie sich deutlich vom Reinwasserabfluss unterscheiden. In der Transportphase kann es aufgrund hoher Schleppspannungen zu sehr hohen Erosionsleistungen kommen. Diese Schleppspannungen können laut COSTA (1984) sechsmal höher sein, als jene von Reinwasserabflüssen. Daher kann es am Ende der Verfrachtung zur Ausbildung von großen Schuttfächern kommen. Solche Ablagerungen entstehen meist an einem Gefälleknick im Gerinne bzw. Bachlauf und bestehen aus hochgradig unsortiertem Material mit teilweise inverser Sortierung und steilen Flanken, sogenannten Levees¹ (siehe Abbildung 1-1). Die Kornverteilungen erstrecken sich von Tonmineralien bis hin zu großen Blöcken, welche mehrere Meter Durchmesser haben können.

Im Zuge des Fließvorganges kommt es zu einer Dreiteilung des Längsschnittes. Laut PIERSON (1986) weißt dieser folgende Charaktere auf (siehe Abbildung 1-1):

¹ Levees: kommt aus dem französischen vom Wort *Lever* und heißt übersetzt soviel wie "das Aufgehen".

-

- Murkopf (Front): Hauptbestandteil sind die groben und großen Komponenten, die Murfront fällt steil ab.
- Murkörper (Body): verhältnismäßig gleichmäßige Mischung Wasser zu groben Bestandteilen.
- Murschwanz (Tail): wasserkonzentrierter Bereich der Mure.

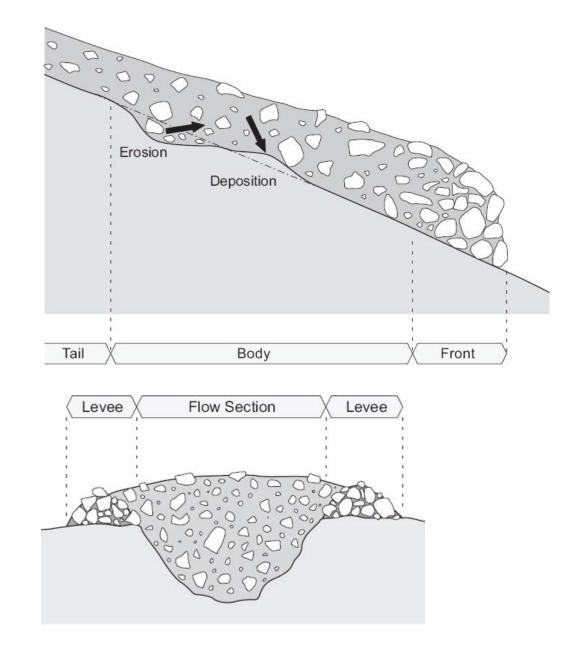


Abbildung 1-1: Längsschnitt und Querschnitt einer Mure (nach PIERSON, 1986 aus SCHATZMANN, 2005).

Im Wesentlichen besteht eine Mure aus den drei Komponenten Wasser, Feinanteilen und grobem Material (Steine, Blöcke). Je nach Zusammensetzung dieser drei Bestandteile unterscheiden PHILLIPS und DAVIES (1991, modifiziert nach WEBER,

2004) die verschiedenen Massenverlagerungsprozesse. Die unterschiedliche Mischung der Komponenten hat großen Einfluss auf die Fließvorgänge. So dominieren die viskosen Reibungen bei einem Schlammstrom, der zum Großteil aus Feinmaterial und Wasser besteht, die Zähigkeitseinflüsse. Im Gegensatz dazu überwiegen bei granularen Murgängen die Reibungskräfte, d.h. die Korn zu Kornreibung. Wie die Verlagerungsprozesse eingeteilt werden soll nachstehende Abbildung 1-2 erläutern.

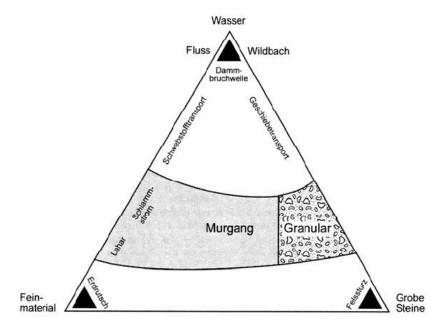


Abbildung 1-2: Materialzusammensetzung unterschiedlicher Massenverlagerungsprozesse (nach PHILLIPS und DAVIES, 1991, modifiziert WEBER, 2004).

Folgende Kräfte haben Einfluss auf den Fließwiderstand von Muren:

- Partikel-Partikel Kräfte
- Partikel-Flüssigkeitskräfte
- Viskositätsabhängige Flüssigkeitskräfte

Bereits zu Beginn der frühen siebziger Jahre, versuchte man die Komplexibilität von Muren genauer zu erforschen (JOHNSON, 1970; COSTA, 1984). Sie wurden als homogenes Fluid² betrachtet, das von den rheologischen³ Eigenschaften der Matrix

² Fluid: aus dem lat. *fluidus* "fließend", Substanzen die keinen Widerstand einer beliebig großen Scherspannung entgegensetzen (detailierte Beschreibung siehe Kapitel 2).

³ rheologisch: *Rheologie* stammt aus dem griechischen und heißt "Fließkunde" (detailierte Beschreibung siehe Kapitel 2).

kontrolliert wird. Unterschiedliche Modelle (speziell hydraulische Modelle) wurden vorgeschlagen, um den Prozess einer Mure zu verstehen. Jedoch kein Konzept konnte unter Berücksichtigung der verschiedenen Materialeigenschaften den Vorgang beschreiben. Die Aufmerksamkeit richtete sich überwiegend in Richtung Bodenbestandteile und geotechnische Modelle, um Muren näher zu beschreiben (SAVAGE und HUTTER, 1989; IVERSON, 1997).

Typisch für Muren ist die hohe Feststoffdichte, die einen Wert von bis zu 2,30 g/cm³ (COSTA, 1988) erreichen kann. Weshalb Muren gerade für den Menschen so gefährlich sind, lässt sich sehr gut an den bisher beobachteten Maximalabflüssen erkennen. So wurden in den Alpen Abflussspitzen zwischen 100 m³/s und 1000 m³/s beobachtet. Diese Werte übersteigen vergleichbare Hochwasserabflüsse um das 10 bis 100 fache. Die Murfront kann dabei Höhen von 10 Meter und eine Maximalgeschwindigkeit von bis zu 20 m/s (72 km/h) erreichen. Ob in einem Wildbach Muren entstehen können, hängt in erster Linie vom Gefälle des Bachbettes und vom vorhandenen Geschiebepotential ab. Für die Entstehung bzw. die Bildung eines Murganges ist ein Mindestgefälle von ca. 15 % bis 30 % des Bachbettes erforderlich. Alles unter 15 % schließt eine Murenbildung aus (KAITNA, RICKENMANN; 2008).

Einteilungen von Muren basieren einerseits auf der mittleren Fließgeschwindigkeit des Gemisches und deren Sedimentkonzentration laut PIERSON und COSTA (1987) oder aber nach der Dichte (bzw. Sedimentkonzentration), wie es COSTA (1988) vorgenommen hat. Um einen Massentransport (Murgang) von einer Massenbewegung (Erdrutsch) zu unterscheiden, wird das Vorhandensein eines Geschwindigkeitsgradienten im Medium herangezogen.

Beim Fließen ist ein solcher Geschwindigkeitsgradient vorhanden, was zum Scheren innerhalb der bewegten Masse führt. Bei einem Erdrutsch bzw. Felssturz ist ein solcher Gradient nur auf die Trennfläche zwischen bewegter und verbleibender Masse beschränkt (siehe Abbildung 1-3, WEBER, 2004).

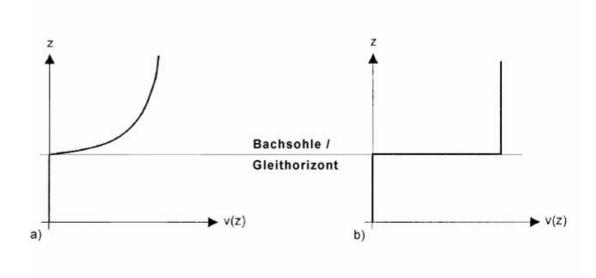


Abbildung 1-3: Schematische Darstellung des Geschwindigkeitsprofiles in Hauptbewegungsrichtung bei a) einem Murgang und bei b) einem Erdrutsch (Weber, 2004).

Muren sind allem vor dann sehr gefährlich. zu hohen wenn es Abflussgeschwindigkeiten und hohen Dichten innerhalb der Mure kommt. Daraus resultieren beträchtliche Zerstörungskräfte und sehr große Abflusstiefen. Die Dichte wirkt sich linear und die Geschwindigkeit mit dem Quadrat auf die kinetische Energie aus. Das Schadenspotential kann, aufgrund dieses großen Impulses, enorme Ausmaße annehmen. Die Probleme bzw. die Zerstörungen durch Muren werden immer größer, da der Lebensraum der Menschen immer mehr mit den Alpen vernetzt wird. Es werden immer mehr Siedlungen und große infrastrukturelle Einrichtungen in Problemzonen errichtet und somit einem hohen Schadensrisiko ausgesetzt. Wichtig ist, dass der Mensch diese Gefahren verstehen bzw. abschätzen lernt und Methoden entwickelt, um diese Bedrohungen zu reduzieren.

Die quantitative Erfassung von Murgängen ist sehr schwierig. Das Hauptproblem stellt die Charakterisierung des Abflusses dar. So sind physikalische Vorgänge wie der Abfluss einer Mure bis heute nicht vollständig verstanden. Diese Charakterisierung des Abflusses ist vor allem für die Ermittlung bzw. Schätzung der Abflusstiefe, der kinetischen Energie und dem Ablagerungs- und Auslaufverhalten der Mure von großer Bedeutung. Um diese Parameter besser abzuschätzen, wurden Laborversuchsanlagen, wie die Murtrommel entwickelt.

1.2. Ziel der Diplomarbeit

Im Zuge der Diplomarbeit wurde versucht, mit Hilfe der "Murtrommel-Versuchsanlage", die Ausbildung oft beobachteter granularer Murfronten genauer zu untersuchen. Es wurde der L_g -Wert eingeführt, der die Länge der ungesättigten Murfront angibt (siehe Abbildung 1-4).

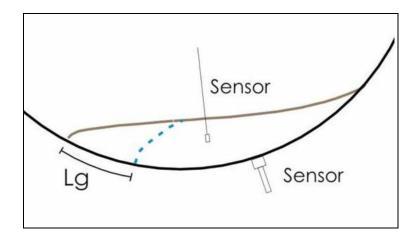


Abbildung 1-4: Skizze der geschätzten ungesättigten Front in der Murtrommel (KAITNA, 2006).

Die Fragen die sich hierbei stellen sind:

"Welche Faktoren beeinflussen die Entwicklung einer granularen Front bei Murgängen? Hängt diese Entwicklung von der Geschwindigkeit und der Viskosität der Mure ab? Spielt die Kornverteilung oder die Korngröße eine Rolle bzw. wie wichtig ist die Gerinnerauhigkeit und das Dichteverhältnis?"

Um diese Fragen zu beantworten wurden entsprechende Versuche durchgeführt. Für die Experimente wurden sowohl Gemische aus Wasser mit künstlichen Granulaten, als auch Carbopol-Kunststoffgranulare Mischungen verwendet. Bei Carbopol handelt es sich um ein homogenes Material, welches mit Wasser vermischt wird. Mit Hilfe des Carbopol können unterschiedlich starke viskose Mischungen hergestellt werden. Durch die Variation des Anteils der Kunststoffgranulate können verschiedene künstliche Murgangmischungen simuliert werden. Ein primäres Ziel dieser Diplomarbeit war die Entwicklung und das Testen von verlässlichen Porenwasserdrucksensoren, um die Länge einer ungesättigten Zone an der Murfront zu quantifizieren. Es wurde auf eine genaue Kalibrierung der Porendrucksensoren besondere Rücksicht genommen.

Zusätzlich wurde über visuelle Beobachtung und Videoauswertung versucht, Rückschlüsse auf die Entwicklung solcher trockenen Fronten zu ziehen. Weiteres wurde die Normal-, sowie Schubspannung gemessen und mit Hilfe eines Lasers, sowie eines Ultraschallsensors konnten auch die Fließtiefen der einzelnen Mischungen aufgenommen werden.

2. Grundlagen der Rheologie, Physik und Hydraulik

2.1. Grundlagen der Rheologie

Das Wort Rheologie stammt aus dem griechischen und heißt übersetzt Fließkunde. Somit ist die Rheologie die Lehre vom Fließ- und Verformungsverhalten von Substanzen. Durch Scherkräfte können große Deformationen entstehen, die bei vielen Substanzen zum Fließen führen. Daher werden Materialien, die ein entsprechend ausgeprägtes Fließverhalten aufweisen, als Fluide bezeichnet. Das beschreibbare rheologische Scherverhalten befindet sich zwischen den beiden Extremen *Fließen* und *Verformen* (Fließen von idealviskosen Flüssigkeiten und dem Verformen von idealelastischen Festkörpern). Zwei sehr gute Beispiele für diese Verhaltensformen sind einerseits Wasser (Fließen) und anderseits eine Stahlkugel (Verformen).

Mit Hilfe, des Zwei-Platten Modells werden einige grundlegende rheologische Parameter beschrieben. Dabei wird die obere Platte mit der Fläche A (Scherfläche A) und der Kraft F (Scherkraft F) bewegt und die dabei entstehende Geschwindigkeit v gemessen (siehe Abbildung 2-1). Zwischen den beiden Platten, die im Abstand H zueinander stehen, befindet sich eine Versuchsflüssigkeit, die durch die Bewegung geschert wird. Damit sich eine laminare Schichtenströmung ausbilden kann, ist es wichtig, dass es zu keinen Rutschungen an der Wand kommt.

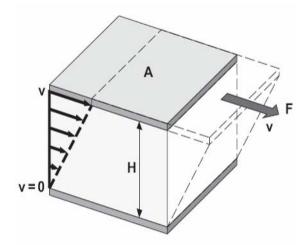


Abbildung 2-1: Das Zwei-Platten Modell zur Beschreibung der rheologischen Parameter (SCHATZMANN, 2005).

Anhand dieses Modells können wir die Schubspannung τ (auch als Scherspannung bezeichnet) ableiten

$$\tau = \frac{F}{A}$$
 [τ] = $Pa = \frac{N}{m^2}$, (Gleichung 1)

sowie die Scherrate an einem Flüssigkeitselement, die dem Geschwindigkeitsunterschied dv zwischen den zwei parallelen Platten durch den Abstand dh entspricht

$$\gamma = \frac{dv}{dh}$$
 [γ] = s^{-1} . (Gleichung 2)

In weiterer Folge erhält man aus dem Verhältnis von Schubspannung und Scherrate die Viskosität η

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma}$$
 [η] = $Pa * s$. (Gleichung 3)

Bei einer hydrostatischen Druckverteilung in einem unendlich breiten Gerinne errechnet sich die Scherspannung wie folgt (siehe Abbildung 2-2)

$$\tau = \rho g h \sin \Theta. \tag{Gleichung 4}$$

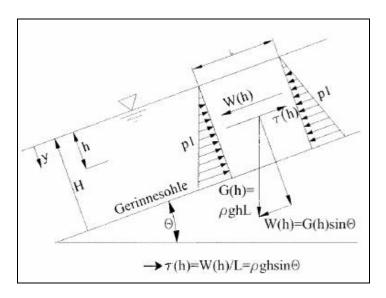


Abbildung 2-2: Berechnung der Scherfestigkeit eines Fluids an der Stelle h-y bei hydrostatischer Druckverteilung in einem breiten Gerinne (SCHNEIDERBAUER, 2006).

Wenn man nun in einem Diagramm die Scherfestigkeit und die Scherrate abbildet, erhält man ein sogenanntes Fließdiagramm. Wird die Viskosität und die Scherrate aufgetragen bekommt man ein Viskositätsdiagramm (siehe Abbildung 2-3).

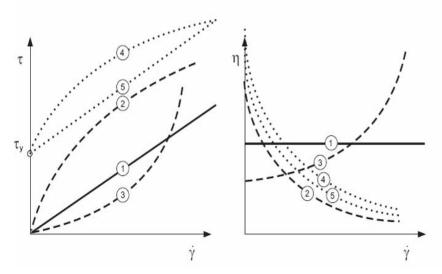


Abbildung 2-3: Links: Fließdiagramm; Rechts: Viskositätsdiagramm von einigen idealisierten Flüssigkeiten (SCHATZMANN, 2005).

- 1 Newtonsches Fluid, scherverdickendes oder dilatantes Fluid
- 2 Scherverdünnendes oder viskoplastisches Fluid
- (3) Scherverdickendes oder dilatantes Fluid
- (4) Cassonplastisches oder Herschel Bulkley Fluid
- 5 Viskoplastisches Bingham-plastisches Fluid

Der Unterschied zwischen einer idealviskosen (Newtonschen) Flüssigkeit und einer Nicht-Newtonschen Flüssigkeit ist, dass bei der nicht idealviskosen Flüssigkeit die Viskosität, bei einwirkenden Scherkräften, nicht konstant bleibt. Aus dieser Definition geht hervor, dass diese Fluide nicht dem Gesetz der Newtonschen Flüssigkeitsreibung folgen (siehe Gleichung 1).

Scherverdünnendes bzw. scherverdickendes Fließverhalten lässt sich am besten mit folgendem mathematischen Modell beschreiben

$$\tau = \eta * \left(\frac{dv}{dn}\right)^n.$$
 (Gleichung 5)

Von viskoplastischem Verhalten spricht man, wenn bei zunehmender Scherrate der Verformung immer weniger Widerstand entgegengesetzt wird, was soviel heißt, dass η mit wachsender Belastung abnimmt. Dilatantes Verhalten liegt vor wenn η mit wachsender Belastung zunimmt.

- n < 1 pseudoplastisches Verhalten
- n = 1 newtonsches Fließverhalten
- n> 1 dilatantes Fließverhalten

2.2. Rheologische Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens von Muren

2.2.1. Bingham Modell

Für die Berechnung von viskosen Muren wird das sogenannte Bingham Modell von vielen Autoren (z.B. COSTA, 1988; JORDAN, 1994) verwendet. Vorteil dieses Modells ist es bestimmte Eigenschaften, wie die Bildung von Levees (siehe Kapitel 1.1), die Ausbildung eines U-förmigen Gerinnes oder das Vorhandensein einer ungescherten Zone ("plug flow") zu erklären (siehe Abbildung 2-4).

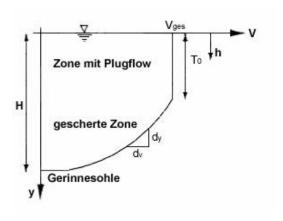


Abbildung 2-4: Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Bingham Modell (SCHNEIDERBAUER, 2006).

Das Fließverhalten von Bingham Fluiden ist linear. Es handelt sich hierbei um viskoplastische Fluide. Für das Bingham Modell berechnet sich die Scherspannung wie folgt

$$\tau = \tau_{Gr} + \eta_B \left(\frac{dv}{dy}\right). \tag{Gleichung 6}$$

Der Term η_B (Pascal) wird dabei als die sogenannte Bingham Zähigkeit bezeichnet. Bei η_B handelt es sich nicht um einen Wert der geprüften Substanz, sondern um einen berechneten Wert, der der Kurvenanpassung dient. Die scheinbare Viskosität η_S , welche daraus abgeleitet wird, errechnet sich aus

$$\eta_S = \frac{\tau_{GR}}{\frac{dv}{dv}} + \eta_B$$
 (Gleichung 7)

Diese Viskosität gibt eine Zähigkeit an, die jener einer Newtonschen Flüssigkeit entspricht. Man erkennt sehr gut, dass beim Bingham Modell (aber auch beim Herschel Bulkley Modell, siehe Punkt 2.2.2) ein Fließen erst nach Erreichen einer gewissen Grenzschubspannung beginnt. Wird eine entsprechende Mindestschubspannung τ_{GR} bzw. τ_{HB} (ermittelt aus dem Fließdiagramm bei γ =0) nicht überschritten, so kommt es zu keinem Fließen. Vor allem bei geringen Schubspannungen verhält sich das Material wie ein Festkörper. Es kommt dabei zur Ausbildung einer ungescherten Zone ("Plug Flow") in den oberflächennahen Schichten. Die Höhe T_0 dieser Zone ist ein Wert der Fließgrenze und berechnet sich in einem unendlich breitem Gerinne (JORDAN, 1994) mit

$$T_0 = \frac{\tau_{GR}}{\gamma \sin \phi} \,. \tag{Gleichung 8}$$

Setzt man Gleichung 4 und 8 in Gleichung 6 ein so erhält man das Geschwindigkeitsprofil für ein Binghamsches Material mit $h \ge T_0$.

$$\rho * g * y * \sin \Theta = T_0 * \rho * g * \sin \Theta + \eta_b * \frac{dv}{dy}$$
 (Gleichung 9)

$$\frac{\rho * g * \sin \Theta}{\eta_B} * \left[\int_h^H y dy - T_0 \int_h^H dy \right] = \int dv$$
 (Gleichung 10)

$$\frac{\rho * g * \sin \Theta}{\eta_{R}} * \left[\frac{1}{2} (H^{2} - h^{2}) - T_{_{0}} (H - h) \right] = v(h) + C.$$
 (Gleichung 11)

Θ ... Gerinneneigung [°]

H ... Abflusstiefe [m]

h ... Abflusstiefe an der Stelle y mit der Bedingung $T_0 \le h \le H$ [m]

v(h) ... Geschwindigkeit an der Stelle h [m/s]

Ist die Geschwindigkeit an der Sohle Null (v(h=H)=0), so erhält man mit dieser Randbedingung für die Integrationskonstante C=0 und in weiterer Folge das Geschwindigkeitsprofil in einem Binghamschen Material für $h \ge T_0$ für stationäre Abflussbedingungen in einem unendlich breiten Gerinne.

$$v(h) = \frac{\rho * g * \sin \phi}{\eta_B} * \left[\frac{1}{2} (H^2 - h^2) - T_{_0} (H - h) \right]$$
 (Gleichung 12)

H ... Abflusstiefe [m]

h ... Abflusstiefe an der Stelle y [m]

Nach RICKENMANN (1990) kann für ein Binghamsches Fluid die mittlere Geschwindigkeit nach folgender Formel berechnet werden

$$\overline{v} = \frac{\rho_M * g}{3\eta_B} * \left[1 - \frac{3}{2} * \frac{\tau_{GR}}{\tau} + \frac{1}{2} * \left(\frac{\tau_{GR}}{\tau} \right)^3 \right] * H^2 * \sin \phi.$$
 (Gleichung 13)

2.2.2. Herschel Bulkley Modell

Das Verhalten flüssiger Körper ist sehr komplex, da viele Faktoren wie die Viskosität und die Kapillarkräfte der Gefäßwand das Fließverhalten beeinflussen.

Das allgemeine Potenzgesetz wird auch Herschel Bulkley Beziehung genannt und lautet

$$\tau = \tau_{GR} + \eta_{HB} * \left(\frac{dv}{dy}\right)^{n}, \tag{Gleichung 14}$$

wobei η_{HB} als Herschel Bulkley Viskosität bezeichnet wird. Für den Herschley Bulkley Index n gilt:

- n < 1 für scherverdünnendes Verhalten
- n = 1 für Binghamverhalten
- n > 1 f
 ür scherverdickendes Verhalten

Für das Geschwindigkeitsprofil wird $h \ge T_0$ gesetzt und umgeformt. Es ist die gleiche Herangehensweise wie schon zuvor beim Bingham Modell (für stationäre Abflussbedingungen in einem unendlich breiten Gerinne).

$$v(h) = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho * g * \sin \phi}{\eta_{HR}} \right)^{\frac{1}{n}} * \left[(H - T_0)^{\frac{n+1}{n}} - (h - T_0)^{\frac{n+1}{n}} \right]$$
 (Gleichung 15)

2.3. Dimensionslose Kennzahlen im Zusammenhang mit Murgängen

2.3.1. Volumetrischer Feststoffanteil (C_v-Wert)

Der C_v-Wert oder der volumetrische Feststoffanteil errechnet sich wie folgt

$$Cv = \frac{V_{Granulat}}{V_{Gesamt}}$$
 (Gleichung 16)

Dabei wird das Kunstoffgranulatvolumen durch das Gesamtvolumen dividiert.

2.3.2. Bingham Zahl

JORDAN (1994) gibt die Bingham Zahl für die Einteilung laminare/turbulente Strömung für Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten wie folgt an

$$Bi = \frac{\tau_B * h}{\eta_B * v}.$$
 (Gleichung 17)

Bis heute jedoch konnte kein gültiger Grenzwert für die Bingham Zahl gefunden werden.

2.3.3. Reynoldszahl

Das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften wird als Reynoldszahl bezeichnet. Sie ist dimensionslos und wird wie folgt berechnet

$$Re = \frac{v * R}{\upsilon} = \frac{\rho * v * R}{\eta}.$$
 (Gleichung 18)

R ist dabei der hydraulische Radius und berechnet sich aus dem Abflussquerschnitt A durch den benetzten Umfang U. Bei der Reynoldszahl gibt es einen Grenzwert Re_{krit} der den Übergang vom laminaren Strömen (Re < 500) zum turbulenten Schießen (Re > 2000) beschreibt. Diese Grenzwerte gelten streng genommen nur für Newtonsche Flüssigkeiten, jedoch gibt DAVIES (1988) für nicht Newtonsche Flüssigkeiten, also Murgänge, Grenzwerte an (Re_{krit} 600 und 1500).

2.3.4. Froude-Zahl

Die Froude-Zahl beschreibt in einem hydrodynamischen System das Verhältnis von Trägheits- zu Schwerkräften. Es handelt sich hierbei um eine dimensionslose Kennzahl

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g * H}}$$
 (Gleichung 19)

Mithilfe der Froude-Zahl kann der Strömungszustand eines Gerinnes beschrieben werden, da das Verhältnis von Fließ- zu Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Flachwasserwelle dargestellt wird. Für H wird die Abflusstiefe (in einem offenen Gerinne) eingesetzt, es handelt sich um eine charakteristische Länge. Bei den Grenzwerten für die Froude-Zahl muss wieder zwischen Newtonschen und Nicht-Newtonschen Flüssigkeiten unterschieden werden. Bleibt die Viskosität konstant, so bewegen sich die Grenzen von 0 bis >1 (siehe wie folgt):

- Fr=0 ruhender Strömungszustand (z.B. See)
- Fr<1 strömender Strömungszustand
- Fr=1 kritischer Grenzabfluss
- Fr>1 schießender Strömungszustand

Bei Murgängen ist die Froude-Zahl von der Reynoldszahl abhängig (DAVIES, 1988):

- Fr≈2 bei sehr turbulentem Abfluss
- Fr≈1,3 beim Grenzwert des turbulenten Abfluss (Re ist rund 1500)
- Fr≈0,8 bei laminaren Fließverhalten in einem schmalen Gerinne
- Fr≈0,6 bei laminaren Fließverhalten in einem breiten Gerinne

2.3.5. Savage-Zahl

Die Savage-Zahl stellt das Verhältnis der Trägheitskräfte der Partikle (als Maß der Partikelkollisionen) und der quasi-statistischen Partikelreibung als ein Resultat der Columb`schen Reibung dar und wird wie folgt berechnet

$$N_{Sav} = \frac{\rho_s \gamma^2 \delta^2}{(\rho_s - \rho_f)gH \tan \phi}$$
 (Gleichung 20)

 ρ_s ... Dichte Partikel [kg/m³]

 ρ_f ... Dichte Fluid [kg/m³]

 γ ... Scherrate [1/s]

 ϕ ... Reibungswinkel [°]

g ... Erdbeschleunigung [m/s²].

SAVAGE und HUTTER (1989) haben daraus abgeleitet, dass bei $N_{\it Sav} > 0.1$ die Partikelkollision die Fließdynamik stark beeinflusst.

2.3.6. Bagnold Zahl

Sehr viele, später entwickelte Murfließkonzepte bauen auf den Untersuchungen von Bagnold (1954) auf. Er führte Scherexperimente mit Dispersionen aus elastischen Waxpartikeln und Glyzerin-Wasser-Alkohol Gemischen durch. Das Versuchsgerät besteht aus einem feststehenden inneren Zylinder und einem rotierenden äußeren Zylinder. Die Abmessung für den Bereich zwischen den zwei Zylindern, in dem das Versuchsmaterial getestet wird, hat eine Breite von 1,08 cm und eine Höhe von 5,00 cm (siehe Abbildung 2-5).

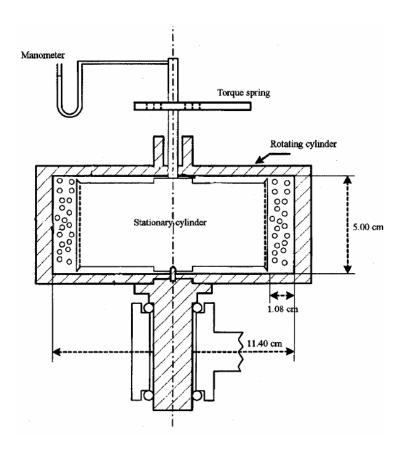


Abbildung 2-5: Scherversuchsgerät welches von Bagnold für seine Experimente verwendet wurde (SCHATZMANN, 2005).

Gemessen wird das Drehmoment an der Achse, welches benötigt wird um die Schubspannung, die Normalspannung und die Rotationsgeschwindigkeit zu bestimmen.

Bagnold beobachtete bei seinen Versuchen einen linearen Zusammenhang zwischen Scherrate und Scherspannung bei niedrigen Schergeschwindigkeiten und bezeichnete diesen Zusammenhang als *makroviskoses Fließregime* (Spannung aufgrund der Flüssigkeitsviskosität). Die Scherspannung τ wird wie folgt berechnet

$$\tau = b\lambda^{1.5}\mu\gamma$$
 (Gleichung 21)

b ... empirische Konstante (= 2.25)

 μ ... Newtonsche-Viskosität des Fluides [Pa*s]

λ ... lineare Sedimentkonzentration (n\u00e4here Details siehe Kaitna 2006).

Bei größeren Schergeschwindigkeiten wurde beobachtet, dass Schubspannung und Normalspannung proportional zum Quadrat der Scherrate sind und unabhängig von der Fluidviskosität. Die Schubspannung (Spannung aufgrund der Partikelkollision) wird wie folgt berechnet

$$\tau = a \sin \alpha \rho_s \lambda^2 d^2 \gamma^2 \tag{Gleichung 22}$$

a ... empirische Konstante (= 0.042)

 α ... dynamischer Reibungswinkel [°]

 ρ_{s} ... Dichte Partikel [kg/m³]

d ... Durchmesser Partikel [mm]

Die sogenannte Bagnold Zahl N_B ist eine dimensionslose Zahl, die das Verhältnis von Trägheitsspannung (Spannung aufgrund der Partikelkollision) zur viskosen Spannung (Spannung aufgrund der Flüssigkeitsviskosität) beschreibt.

$$N_{B} = \frac{\lambda^{0.5} \rho_{s} d^{2}}{\mu} \gamma$$
 (Gleichung 23)

N_B < 40 beschreibt *makroviskoses Fließregime*

N_B > 450 Fließregime stark beeinflusst durch Partikelkollision

40 < N_B < 450 Abhängigkeit von Normalspannung und Schubspannung nimmt stufenweise von linear zu quadratisch zu

Bagnold nimmt an, dass der Impulstransfer, hervorgerufen durch die Kollision der elastischen Partikel, in parallelen Schichten, welche sich in einer relativ Bewegung zueinander befinden, übertragen werden. Der Impulstransfer aufgrund der Kollisionen ist proportional zur relativen Geschwindigkeit von zwei kollidierenden Partikeln, was

wiederum verhältnisgleich zur Erdbeschleunigung g in einem linearen Geschwindigkeitsfeld mit laminarer Strömung ist. Aus diesem Grund ist die Kollisionsfrequenz ebenso proportional zu g. Die Scherspannung in einem kollidierenden Flusssystem ist deshalb gleichgewichtig zum Quadrat der Scherrate (COUSSOT, 1997; KAITNA, 2006).

2.3.7. Skalierung

Um einen natürlichen Prozess verkleinert im Labor abzubilden, sind grundlegende Skalierungsüberlegungen zu beachten. Bei einem hydraulischen Modellversuch wird versucht, die gleiche Reynoldszahl und Froudezahl wie in der Natur, im Modell zu realisieren. Bei turbulentem Abfluss in offenen Gerinnen ist vor allem die Froudeskalierung von Bedeutung, da die viskosen Kräfte relativ klein sind und daher die Reynoldszahl von untergeordneter Bedeutung.

Im Falle von Murgang-Modellversuchen ist eine eindeutige Skalierung problematisch, da neben der Gravitation und den Trägheitskräften auch die viskosen Kräfte der Flüssigkeit von Bedeutung sind. Weiter sind die Kräfte zwischen den festen Partikeln (Reibung, Kollision, etc.), aber auch Kraftaustausch zwischen den Partikel und der flüssigen Phase von Bedeutung. Die oben beschriebenen Kennzahlen nach Bagnold und Savage stellen nur einen Teil möglicher Kennzahlen dar (siehe Iverson, 1997).

Eine weitere Komplikation stellt die große Bandbreite der Erscheinungsform 'Murgang' dar, da manche Kennzahlen für verschiedene Murgangereignisse über mehrere Größenordnungen variieren können und es somit fraglich ist, welche Größe bei Laborversuchen abzubilden ist. Die Versuche dieser Arbeit basieren auf den Skalierungsüberlegungen, beschrieben von Kaitna, 2006.

2.4. Geotechnische Grundlagen

2.4.1. Reibungswinkel

Der Reibungswinkel φ ist laut Geotechnik jener Winkel, unter dem ein Boden oder Festkörper belastet werden kann ohne zu versagen oder abzurutschen. Er wird auch als Winkel der inneren Reibung bezeichnet. Bei Berechnungen wird der Tangens des Reibungswinkels verwendet, da dieser dimensionslos ist und ein Verhältnis von Vertikal- zu Horizontalkräften darstellt.

In dieser Studie wurde ein dynamischer Reibungsbeiwert berechnet, um den Fließwiderstand der sich in Bewegung befindenden Masse zu charakterisieren. Bei Division der Schubspannung durch die Normalspannung erhält man einen Reibungsbeiwert. Der ArcusTangens davon entspricht einem Reibungswinkel (Physik: Rutschblock), also

$$\varphi = \arctan(SS/NS)$$
 (Gleichung 24)

SS ... Schubspannung

NS ... Normalspannung.

Dieser Reibungswinkel oder Reibungsbeiwert wird im Kapitel 4.5 genauer erläutert bzw. die Ergebnisse der Experimente genauer beschrieben.

2.4.2. Effektive Normalspannung

Die effektive Normalspannung σ ist jene Spannung im Boden, welche die Scherfestigkeit durch Reibung aktiviert. Berechnet wird die effektive Normalspannung mit

$$\sigma = \sigma - u$$
 (Gleichung 25)

 σ ... effektive Normalspannung [kN/m²]

 σ ... totale Normalspannung [kN/m²]

u ... Porenwasserdruck [kN/m²].

2.4.3. Kohäsion

Unter Kohäsion c versteht man die Verbindungskräfte zwischen den Atomen bzw. Molekülen eines Mediums. Im Boden bzw. feinkörnigem Lockergestein ist zum Beispiel die Köhasion für den inneren Zusammenhalt der einzelnen Teilchen verantwortlich. Verursacht werden diese Zusammenhänge durch chemische Bindungen innerhalb der Moleküle, durch elektrostatische Anziehung benachbarter Atome bzw. Moleküle (Ionenbindung, Wasserstoffbrückenbindung, etc.) oder durch mechanische Verschlaufung bzw. Verfilzung fadenförmiger Makromoleküle. Die Folgen der Köhasion sind unter anderem die Viskosität von Fluiden, sowie die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten.

Bei nichtbindigen Böden, z.B. bei feuchten Sanden, werden aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers, Haftkräfte auf die Bodenkörner übertragen. Diese Oberflächenspannungen sind nur in Böden mit nicht vollständiger Wassersättigung vorhanden. Diese Haftwirkung wird als scheinbare Kohäsion bzw. Kapillarkohäsion bezeichnet. Trocknet der Boden aus so werden diese Haftkräfte Null.

2.4.4. Porenwasserdruck

In der Bodenmechanik ist der Porenwasserdruck u wie folgt definiert: es ist jener Druck, der durch das Wasser in den Poren auf den Boden übertragen wird. In konsolidierten Böden nimmt der Porenwasserdruck unterhalb des Grundwasserspiegels linear zu (hydrostatisch).

2.4.5. Scherfestigkeit (Schubfestigkeit)

Der Boden ist ein Gefüge (Korngerüst, Haufwerk) aus Feststoffteilchen mit luft- oder wassergefüllten Poren. Dieser Aufbau ist ein Grund dafür, dass der Boden gegenüber Scherbeanspruchungen sehr empfindlich ist. Die Scherfestigkeit τ ist ein Maß für die Empfindlichkeit gegenüber solchen Spannungszustandsänderungen. Es wird darunter die Fähigkeit verstanden, Schub- und Zugspannungen auszuhalten, ohne plastisch zu versagen, d.h. nicht zu brechen (Sprödbruchverhalten) bzw. zu fließen (duktiles Verhalten; Schmidt, 2006). Vom Boden abhängig, haben die Kohäsion, die effektive Normalspannung, der Porenwasserdruck, sowie der Reibungswinkel Einfluss auf die Scherfestigkeit τ . Berechnet wird die Scherfestigkeit wie folgt

 $\tau = c + (\hat{\sigma} - u) * \tan \varphi$ (Gleichung 26)

τ ... Scherfestigkeit [kN/m²]

c ... Kohäsion [kN/m²]

 σ ... effektive Normalspannung [kN/m²]

u ... Porenwasserdruck [kN/m²]

 φ ... Reibungswinkel [°].

Die Köhasion hängt dabei von den Materialeigenschaften und vom Wassergehalt ab, nicht aber von der Normalspannung. In der Bodenmechanik überwiegt der Reibungsdem Kohäsionsanteil. Eine Änderung dieses Verhältnisses kann in stark bindigen Böden vorkommen.

3. Versuchsmaterialien, -anlage, -durchführung

3.1. Versuchsmaterialien

3.1.1. Carbopol Ultrez 10R

Bei Carbopol handelt es sich um ein quellfähiges Polymer, welches in der Kosmetikindustrie, z.B. bei Cremen oder Zahnpasten verwendet wird, um bestimmte viskose Eigenschaften zu erzielen. Es ist ein weißes Pulver, das durch Zugabe von deionisiertem Wasser zu quellen beginnt. Die Vorteile dieses Pulvers bestehen darin, dass damit sehr gut verschiedene Mischungen mit unterschiedlichen Zähigkeiten hergestellt werden können und man somit in der Lage ist eine große Bandbreite an Gemischen in der Trommel zu untersuchen. Durch das Vermischen des Carbopol mit deionisiertem Wasser steigt der pH Wert in den basischen Bereich. Um einen neutralen pH Wert von sieben und somit eine neutrale Stabilisierung zu erreichen ist es erforderlich, verdünnte Natronlauge (NaOH 4 mol/l) hinzuzugeben. Weitere Vorteile des Carbopol Ultrez 10R sind, dass es vollständig homogen und durchsichtig ist.

3.1.2. Kunststoffgranulate

Kunststoffgranulate wurden dem Carbopol bzw. dem Wasser hinzugegeben, um einen entsprechenden Feststoffanteil zu haben und um die Wirklichkeit noch besser zu rekonstruieren. Es handelt sich dabei um zylindrische PVC Partikel mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Länge von ca. 10 mm bis 15 mm (siehe Abbildung 3-1). Die Dichte dieser PVC-Teile ist 1,42 g/cm³.



Abbildung 3-1: Eimer mit Kunststoffgranulaten, Länge ca.10-15mm und einem Durchmesser von 10mm.

3.2. Trommel-Versuchsanlage

Die Versuche wurden in einer rotierenden Trommel durchgeführt. Der Vorteil gegenüber anderen Versuchsmethoden besteht darin, dass mit Hilfe der sogenannten Murtrommel eine stehende Welle erzeugt werden kann. Durch die ständig rotierende Bewegung der Trommel werden mittels der Normalspannungs- und Schubspannungsmessplatten, sowie durch den Porenwasserdrucksensor kontinuierlich Daten aufgezeichnet. IVERSON (1997) konnte bei seinen Versuchen mit einer überdimensionalen Rutsche nur einmalig Daten aufzeichnen. Das über die Rinne abgelassene Material fuhr dabei einmal über die Sensoren und die daraus erhaltenen Daten wurden zur Auswertung herangezogen.

Die Trommel wird mit dem Wasser-Granulat bzw. Carbopol-Granulat Gemisch befüllt und die gewünschte Drehzahl mit dem Regler eingestellt. Die eingestellte Drehzahl wird für rund 10 bis 20 Umdrehungen beibehalten. Sind dann die entsprechenden Rotationen erreicht, wird die nächste Geschwindigkeit eingestellt. Um entsprechend viele Informationen für den Normal-, Schubspannungsbereich und Porenwasserdruck zu erhalten sind Drehzahlen zwischen 1 bis 25 U/min gefahren worden. Dies entspricht Geschwindigkeiten zwischen 0,07 bis 3,31 m/s. Die Sensoren haben eine Messfrequenz von 200Hz, was bei einer Drehzahl von 1 U/min einer Auflösung von 0,65 mm bzw. bei 25 U/min einer Auflösung von 1,63 mm entspricht. Um Vergleichsmessungen mit einem Rheometer durchführen zu können, wurden Proben vor, während und nach den Versuchen genommen.

3.2.1. Trommelaufbau

Die Murtrommel (siehe Abbildung 3-2) hat einen Durchmesser von 2,46 m, eine Breite von 0,45 m und ein Gesamtgewicht von ca. 570 kg. Die seitlichen Wandungen der Trommel bestehen an der Innenseite aus einem polierten Stahlblech und an der Außenseite aus einem Plexiglas, durch das man die stehende Welle beobachten kann. Ein synthetisches Gitter mit der Maschenweite 7 x 7 mm und einer Stärke von ca. 2 mm wurde am Trommelboden eingebaut, um eine künstliche Rauhigkeit zu erzeugen. Somit werden Rutschungen an der Sohle vermieden. Gelagert ist die gesamte Trommel

einseitig auf einer horizontalen Achse. Diese Achse ist über einen Drehmomentflansch und eine Kupplung mit dem Motor verbunden. Das vom Motor aufgebrachte Drehmoment, welches nötig ist um die Trommel auf einer konstanten Geschwindigkeit zu halten, wird am Flansch gemessen. Die maximale Umdrehungsgeschwindigkeit beträgt 32 U/min was einer Geschwindigkeit von 4,2 m/s entspricht. Am Trommelboden selbst können bis zu acht Messsensoren angebracht werden. Die Daten werden mit Unterstützung eines Messkraftverstärkers umgewandelt und auf einem Computer gespeichert. Die Programme CATMAN, EXCEL und MATLAP sind in weiterer Folge erforderlich, um die gespeicherten Daten so umzuwandeln, dass man interpretierbare Ergebnisse erhält.

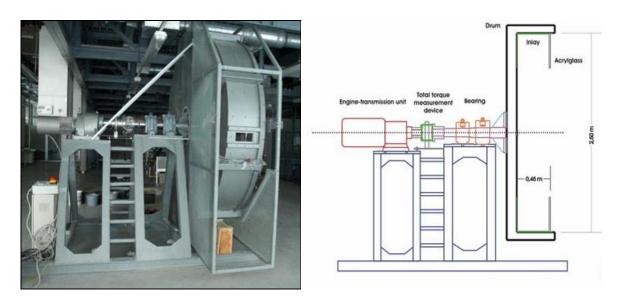


Abbildung 3-2: Links: Seitenansicht der Trommel; Rechts: Querschnitt des Versuchsaufbau der Trommel (KAITNA, 2006).

3.2.2. Porenwasserdrucksensor

Bereits IVERSON (1997) verwendete ein ähnliches System um den Porenwasserdruck an der Grenze zwischen Murgang und Gerinneboden zu messen. Es handelt sich dabei um Drucksensoren, auf die ein mit Öl gefüllter Plexiglaszylinder aufgeschraubt wird (siehe Abbildung 3-3). Auf der Seite des Plexiglaszylinders, auf der das Testmaterial vorbeigleitet, befindet sich eine wasserdichte synthetische Folie und ein Stahlnetz mit einer Maschenweite von 2 mm. Wichtig dabei war es den Plexiglaszylinder so aufzuschrauben, dass keine Luftblasen entstehen, da durch das Vorhandensein von Blasen die Datenübertragung verfälscht wird. Als Folie wurde einerseits ein

sogenanntes Teraband⁴ verwendet. Die daraus erhaltenen Ergebnisse mit dem elastischen Band waren, was die Dichtheit betrifft nicht vollkommen zufriedenstellend, weshalb in weiterer Folge ein DUREX Kondom angebracht wurde.



Abbildung 3-3: Links: Ansicht eines modifizierten Porenwasserdrucksensor; Rechts: Schnitt durch eine Porenwasserdrucksensor (aus KAITNA, 2006).

3.2.3. Normal- und Scherspannungssensor

Die Normal- und Scherspannungssensoren sind im mittleren Drittel der Trommelsohle nebeneinander angebracht (siehe Abbildung 3-4). Dieselbe Anordnung befindet sich 180° an der gegenüberliegenden Seite. Dadurch können zwei unabhängige Normal- und Scherspannungsmesswerte aufgezeichnet werden. Der Durchmesser der Platten beträgt 60 mm. Die mögliche Nennlast ist bei einer Messgenauigkeit von 0,1 %, mit 7200 g beschränkt. Die Sensoren von Normal- und Scherspannung messen dabei in zwei unterschiedliche Richtungen. Die Normalspannungsplatten messen in radialer Richtung und die Scherspanungsplatten in tangentialer Richtung (siehe Abbildung 3-5).

⁴ Teraband: wird auch Latexband bezeichnet und findet Anwendung bei gymnastischen Übungen.

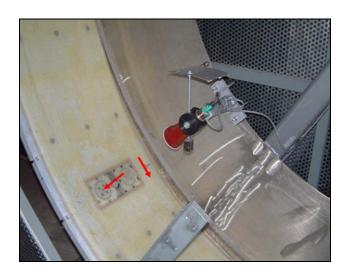


Abbildung 3-4: Kanalboden der Trommel mit Normal- und Scherspannungsplatte, Porenwasserdrucksensor und mit darüber montiertem Ultraschallsensor (aus KAITNA, 2006).

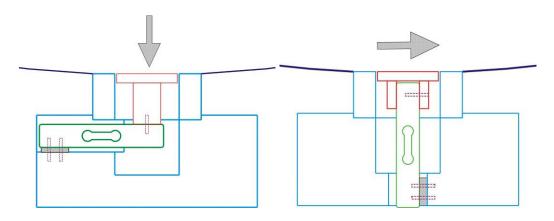


Abbildung 3-5: Links: Normalspannungsplatte mit radialer Messrichtung; Rechts: Schubspannugsplatte mit tangentialer Messrichtung (aus KAITNA, 2006).

3.2.4. Ultraschallsensor und Laser

Um die Abflusstiefe zu erfassen sind, lotrecht über den Spannungsmessplatten in der Mitte des Abflussquerschnittes, ein Ultraschallsensor und ein Laser angeordnet. Der Laser ist aufgrund seiner höheren Genauigkeit, der schnelleren Reaktionszeit und der punktgenauen Messung gegenüber dem Ultraschallsensor, der mit einer Messung im Kegelbereich die Abflusstiefe bestimmt, im Vorteil. In Folge der Durchsichtigkeit der Versuchsmedien Wasser und Carbopol hat der Laser Probleme bei der Datenaufzeichnung, was zu ungenauen Versuchsergebnissen führt. Auch bei der Ultraschallmessung treten Probleme, aufgrund des ungünstigen Reflexionswinkels am Murkopf und Murschwanz, auf. Um diese Probleme zu lösen bzw. um die Genauigkeit

von Ultraschallsensor und Laser zu kontrollieren, wurden die Abflusstiefen auch mit der Normalspannung bestimmt.

3.2.5. Mittlere Geschwindigkeit

Um die durchschnittliche Geschwindigkeit der Abflusswelle zu bestimmen, wurden an der Achse eine Lochscheibe und ein fotoelektronischer Sensor, der einen Impuls pro Grad registriert, angebracht. Die Geschwindigkeit der Welle entspricht somit der Umdrehungsgeschwindigkeit des Trommelbodens. Mit Hilfe des fotoelektronischen Sensors und der Lochscheibe können die genauen Positionen der Messeinheiten ermittelt werden und somit die Umdrehung pro Zeitintervall bestimmt werden. In weiterer Folge kann dies dann zur durchschnittlichen Fließgeschwindigkeit der Welle umgerechnet werden.

Da es bei der Aufzeichnung der Winkelgeschwindigkeit zwischen 0 und 1 U/min technische Probleme gegeben hat, wurde ein unabhängiger induktiver Sensor am Umfang der Trommel angebracht. Da dieser einen Impuls pro Umdrehung registriert, kann die Phasenverschiebung der Trommel zur Lochscheibe aufgezeichnet werden.

3.2.6. Datenmanipulation der Trommelsensoren

3.2.6.1. Basis Signal Normal-, Schubspannung, Porenwasserdruck

Die gesamten Informationen, die man während eines Versuches erhält, werden wie schon vorher erwähnt von einem Messkraftverstärker umgewandelt und auf einem Computer gespeichert. Die gewonnenen Daten können unter Verwendung des Programmes CATMAN bearbeitet werden. Die Informationen sind auf einer Sinuskurve aufgesetzt (siehe Abbildung 3-7).

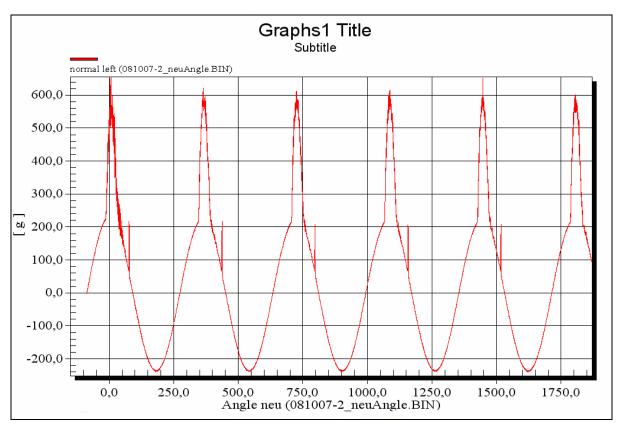


Abbildung 3-7: Beispiel der aufgesetzten Daten, anhand des Normalspannungssensor links, auf die Sinuskurve wie sie im Programm CATMANN angezeigt werden (Versuch 081007_2).

Im Fall der Normalspannung und des Porenwasserdruckes befinden sich die Daten bei 0° und 180° auf der Sinuskurve bzw. befinden sich die Informationen der Schubspannungssensoren um 90°versetzt. D.h. die maximalen und minimalen Werte befinden sich bei 90° und 270°.

Desweiteren nimmt das Basissignal von Normalspannung und Porenwasserdruck mit steigender Rotationsgeschwindigkeit zu, da in radialer Richtung gemessen wird. Um die Informationen von der Sinuskurve abzuheben und um diese Infos weiter verarbeiten zu können, wurde ein MATLAB Skriptum geschrieben. Durch dieses Programm werden die Daten von der Sinuskurve abgehoben und so justiert bzw. bereinigt, dass die daraus resultierenden Ergebnisse wiederum in das Programm CATMAN importiert werden können (siehe Abbildung 3-8).

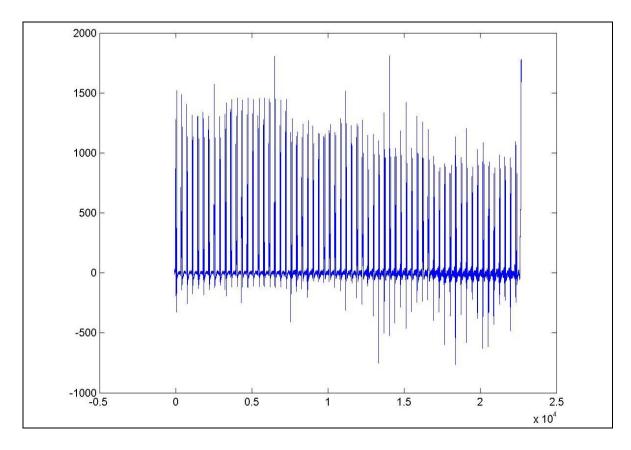


Abbildung 3-8: Beispiel der bereinigten Daten durch das Programm MATLAB (Versuch 081007_2).

Ist das Basissignal angepasst, werden die Daten der gleichen Geschwindigkeit zusammengeführt (Daten von bis zu 20 Umdrehungen) und gemittelt. Es wird für jede Geschwindigkeit die Längsverteilung für die Druckwelle, sowie für die Normal-, Schubspannung und den Porenwasserdruck ermittelt.

3.2.6.2. Abflusstiefenmessung und Volumenänderungen

Bei den Versuchen mit Wasser und Granulat bzw. Carbopol und Granulat beschränkte sich die Abflusstiefenmessung auf den Murkörper bzw. auf den Hauptteil, d.h. die Mitte der Murwelle. Es ist wegen der Steilheit des Winkels nicht möglich im vorderen oder im hinteren Bereich der Welle zu messen. Aufgrund der Durchsichtigkeit von Wasser und Carbopol sind die Daten, die man bei der Abflusstiefenmessung vom Laser erhält, sehr ungenau und nicht zu verwenden. Die Aufzeichnungen des Ultraschallsensors bei den Wasser-Granulat Versuchen sind ebenso sehr ungenau und nicht zu gebrauchen (siehe Abbildung 3-9).

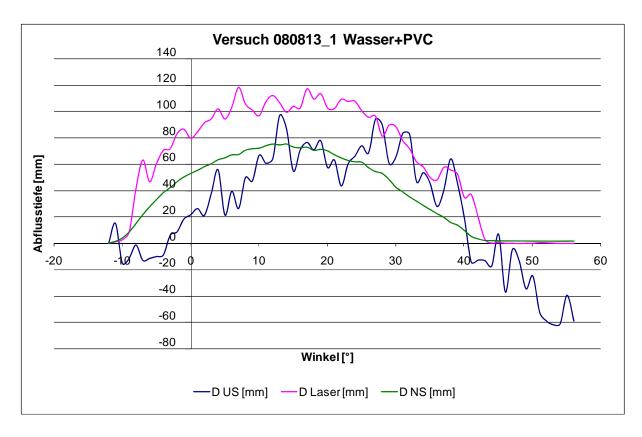


Abbildung 3-9: Versuchsergebnisse der Abflusstiefenbestimmung mit Ultraschallsensor, Laser und Normalspannungsmessplatte in Abhängigkeit vom Winkel bei einem Wasser+PVC Versuch(080813_1).

Bei den Carbopol-Granulat Versuchen liefert der Ultraschallsensor sehr ansprechende Ergebnisse (siehe Abbildung 3-10). Da auch hier der Laser keine guten Werte liefert, wird die Abflusstiefe über die Normalspannungsmessungen ermittelt und mit den Daten vom Ultraschallsensor verglichen.

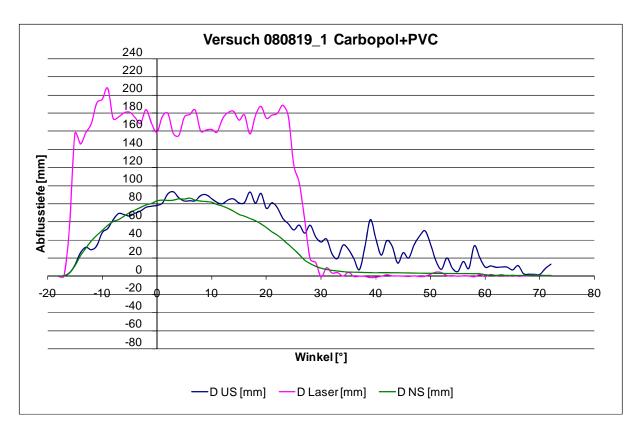


Abbildung 3-10: Versuchsergebnisse der Abflusstiefenbestimmung mit Ultraschallsensor, Laser und Normalspannungsmessplatte in Abhängigkeit vom Winkel bei einem Carpobol+PVC Versuch (080819_1).

Die Genauigkeit der einzelnen Messdaten kann ebenso durch Messen der Abflusstiefe und Multiplikation mit der Länge der Murwelle und der Breite des Gerinnes ermittelt werden. Da man dadurch das Volumen berechnen und dieses mit den erhaltenen Daten aus den Gewichtsmessungen (jene Masse, welche in die Trommel für den Versuch gegeben wird), vergleichen kann. Ein großes Problem bei den Versuchen war der Volumenverlust. Vor allem bei den Wasser-Granulat bzw. den Carbopol-Granulat Gemischen ist eine deutliche Verlustrate an Masse zu erkennen. Je höher die Geschwindigkeiten wurden, umso größer waren auch die Verluste (siehe Abbildung 3-11). Durch den einsetzenden "Regeneffekt" in der Trommel und durch teilweise undichte Stellen im Bereich der Sensoren kam es teilweise zu erheblichen Volumenreduktionen. Auch der Trommelboden und die Trommelseitenwände wurden bei steigender Geschwindigkeit stärker vom Material benetzt und der am Ende der Murwelle angebrachte Besen, der die Versuchsmenge zurückhalten soll, verliert seinen Effekt bei immer größer werdender Geschwindigkeit. Dies hatte zur Folge, dass die gerechneten und die hineingegeben Volumina mit einer Ungenauigkeit von ca. 0-20 % behaftet waren.

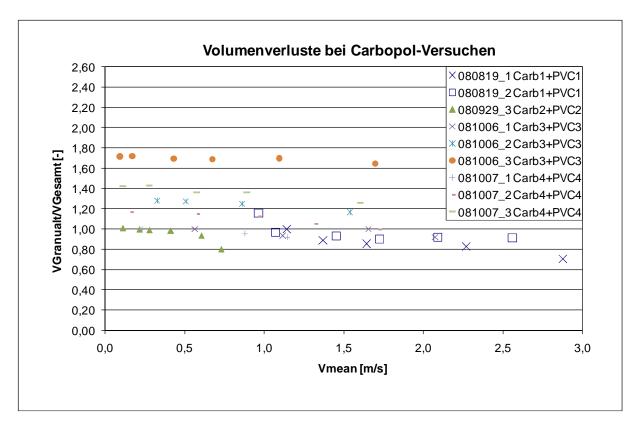


Abbildung 3-11: Volumenverluste bei Carbopolversuchen, wenn die Geschwindigkeit gesteigert wird (V_{Gesamt} entspricht dabei immer dem Versuchsausgangsvolumen).

3.2.6.3. Fließtiefenprofile

Die Normal- und Schubspannung, sowie der Porenwasserdruck werden direkt mit den Sensoren, die am Trommelboden befestigt sind, gemessen. Um die Messungen von Normalspannung und Porenwasserdruck zu kontrollieren, wurden die Daten auf einem Intervall von einem Grad (entspricht 22 mm ein Grad) gemittelt und wurden dann umgewandelt, um die Abflusstiefe wie folgt zu berechnen

$$D_i = \frac{Stress_i}{\rho_{Bulk} \cdot g \cdot \cos \alpha} \cdot 1000$$
 (Gleichung 27)

D_i ... Abflusstiefe im entsprechenden Abflussbereich i [mm]

Stress, ... Normalspannung [Pa]

 ρ_{Bulk} ... Gesamtdichte [kg/m³]

g ... Erdbeschleunigung [m/s²]

 α ... Winkelposition des Sensor [°]

Die Ergebnisse der Abflusstiefen aus den Längsprofilen wurden mit den Ergebnissen der Ultraschallmessungen und der Lasermessungen, wie unter Punkt 3.2.6.2 schon beschrieben, verglichen. Bei Versuchen mit konkaven Flächen muss die Zentrifugalkraft bei den Berechnungen berücksichtigt werden. In diesen Fällen ist es jedoch nicht notwendig, da die Position der Welle relativ zum Laborboden konstant ist, bei gleichbleibender Geschwindigkeit.

3.3. Rheometer

Einen Rheometer verwendet man um Fließeigenschaften von Substanzen zu eruieren. Um die Trommelergebnisse der einzelnen Carbopolmischungen zu vergleichen, wurden unabhängige Messungen mit einem Rheometer (Bohlin Visco 88BV, siehe Abbildung 3-12) durchgeführt. Der Bohlin Visco 88BV arbeitet nach dem SEARL-Prinzip, was bedeutet, dass sich der Messkörper um einen feststehenden Zylinder dreht. Zwischen stehendem und rotierendem Zylinder bleibt ein Spalt. In diesem Zwischenraum befindet sich das Testmaterial. Dieses erfährt durch die rotierende Bewegung des inneren Zylinders ein Geschwindigkeitsgefälle. Anhand der bekannten Messfläche und dem gemessenen Drehmoment kann nun die jeweilige Schubspannung ermittelt werden. Wichtig hierbei ist, dass bei der Analyse von Nicht-Newtonschen Flüssigkeiten zur Ermittlung der tatsächlichen Scherrate noch zusätzlich die Umdrehungsgeschwindigkeit herangezogen werden muss. Mit Hilfe der Schnittstelle, über die das Rheometer mit einem Computer verbunden ist, erhält man die nötigen Ergebnisse für Schubspannung, Scherrate, Drehzahl, Drehmoment, Temperatur der geprüften Substanz und die Viskosität.

Es gibt drei unterschiedliche Zylindermesssysteme C14, C25 und C30. Die einzelnen Zylindersysteme werden durch Referenzmessungen kalibriert. Dafür wird ein Öl mit bekannten rheologischen Eigenschaften verwendet. Bei den Messungen für die Carbopolmischungen aus der Trommel wurde der größte DIN Koaxialzylinder (C30 – DIN 53019) benützt. Er hat einen Außendurchmesser von 33 mm und einen Innendurchmesser von 30 mm, was einen Spalt zwischen Innen- und Außenzylinder von 1,5 mm zur Folge hat.

Um die Messungen durchführen zu können wird der innere Zylinder über eine Schnappkupplung mit dem Rheometer verbunden. Dann wird in den Außenzylinder das zu testende Material eingefüllt und über einen Bajonettverschluss mit dem kleineren Zylinder verbunden. Danach kann mit der Analyse begonnen werden. Um die rheologischen Daten zu ermitteln, werden das gemessene Drehmoment M (Nm), die Umdrehungsgeschwindigkeit v (rpm), und die geometrischen Konstanten C1 und C2 des verwendeten Messsystems herangezogen.

Viskosität (Pas)	$\eta = \sigma / \gamma$
Scherrate (1/s)	$\gamma = C2 * v$
Schubspannung (Pa)	s = C1 * M

Die messsystemabhängigen Konstanten C1 und C2 sind in nachfolgender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 3-1: Messsystemabhängige Konstanten C1 und C2.

Messsystem	C1	C2
1	154.70	1.207
2	27.16	1.207
3	15.72	1.207



Abbildung 3-12: Standard Rheometer (Bohlin Visco 88BV) mit Zylindermesssystem C 30.

3.4. Versuchsdurchführung

Die Carbopol Mischungen wurden einige Tage vorher hergestellt. Dabei wurde Carbopol mit Wasser vermischt und mit einem Mixer verrührt. Es wurde immer wieder der pH-Wert gemessen und entsprechende Mengen an verdünnter Natronlauge hinzugegeben um vom basischen wieder in den neutralen Bereich zu kommen. Nach entsprechendem Mischvorgang wurde das Carbopol Mischgut mit einem Deckel verschlossen. Am Tag der Versuchsdurchführung wurde abermals durchgemischt und der pH-Wert gemessen. Anschließend wurde das Gemenge in die Trommel gegeben und das Kunststoffgranulat hinzugegeben. Nachdem die Trommel befüllt war, wurde die gewünschte Versuchsgeschwindigkeit eingestellt und für ca. 10 bis 20 Umdrehungen beibehalten. Danach erfolgte eine Geschwindigkeitserhöhung. Es wurden bei den einzelnen Experimenten immer zwischen drei und sechs Geschwindigkeitssteigerungen durchgeführt. Bis auf die Herstellung der Mischungen war die Vorgehensweise bei den Wasser-Granulat Versuchen gleich den Carbopol-Granulat Experimenten. Die Herstellung der Mischung erfolgte am selben Tag wie die Versuchsdurchführung bzw. wurde die Trommel direkt mit Wasser und Kunststoffgranulaten beschickt.

3.4.1. Übersicht über die Versuche

Es wurden Trommelversuche mit folgenden Materialmischungen durchgeführt

- Reines Kunststoffgranulat,
- Wasser-Kunststoffgranulat Mischungen,
- · Carbopol-Kunststoffgranulat Mischungen.

Der Datei-Name beschreibt das Datum (Jahr, Monat und Tag) an dem der Versuch durchgeführt würde und die Zahl nach dem Unterstrich gibt die Menge der Experimente an einem Tag an. Die einzelnen Versuche, die mit Unterstrich eins, zwei, etc. formuliert werden, unterscheiden sich in der Zusammensetzung der Mischung (siehe Tabelle 3-2, 3-3 und 3-4).

Um die Funktionsfähigkeit der einzelnen Messeinrichtungen zu überprüfen wurden anfänglich reine Kunststoffgranulat, sowie Wasser-Kunststoffgranulat Mischungen

verwendet. Durch diese Ergebnisse konnten die Sensoren entsprechend kalibriert werden.

	Ubersicht der Versuche mit PVC Granula	
Tabelle 3-2:		

				Volumetrische		
	¥	Bezeichnung	Datei-Name	Feststoffkonzentration	Testvolumen [kg]	Bemerkung
'	nuk e			C _v -Wert [-]		
(Granulat siche		080724_1		40	
	kene Gran Gemsiche	PVC 1	080724_2a		31	nicht genau Definiert
	trockene Gem		080724_2b		31	
		PVC 2	080812_1		14	

Bei den weiteren Tests wurden dann Wasser-Granulat Gemische verwendet. Durch Variation der Testvolumina, sprich Mischungsverhältnis Granulate zu Wasser, sind unterschiedliche volumetrische Feststoffkonzentrationen entstanden und dadurch auch unterschiedliche Ergebnisse, was das Auftreten der granularen Murfront betrifft. Die Testvolumina bewegten sich zwischen 44 und 63 Kilogramm. Die C_v-Werte lagen bei diesen Experimenten zwischen 0,460 und 0,590.

Tabelle 3-3: Übersicht der Versuche mit Wasser und PVC Granulaten.

Gemsiche	Bezeichnung	Datei-Name	Volumetrische Feststoffkonzentration C_v [-]	Testvolumen [kg]	Bemerkung
Waser-Granulat Gem	PVC 2	080812-2	C _v =0.739	30	Wasser hinzugegeben, Versuch jedoch abgebrochen da Trommel undicht!
P-G-	Wasser+PVC1	080813-1	C _v =0.590	44	
Wase	Wasser+PVC2	080929-1	C _v =0.470	63	
	VV 4336171 V OZ	080929-2	C _v =0.460	47	

In weiteren Experimenten wurde untersucht, wie sich die granularen Kunststoffpartikel in Nicht-Newtonschen Flüssigkeiten verhalten. Dabei wurden mehrere verschiedene Carbopol Mischungen mit unterschiedlichen Zähigkeiten angerichtet. Der volumetrische Feststoffanteil bewegte sich bei diesen Versuchen zwischen 0,260 und 0,610. Die Viskosität laut Rheometer befand sich im Bereich zwischen 0,02282 (Pa*s) und 0,2065 (Pa*s).

Tabelle 3-4: Übersicht der Versuche mit Carbopol und PVC Granulaten.

	Bezeichnung	Datei-Name	Volumetrische Feststoffkonzentration C_{v} [-]	Testvolumen [kg]	Bemerkung
che	Carb1+PVC1	080819-1	C _v =0.360	41	
misc	Calbirl VC1	080819-2	C _v =0.450	47	
de de	Carb2+PVC2	080929-3	C _v =0.490	32	
anula		081006-1	C _v =0.260	34	
5	Carb3+PVC3	081006-2	C _v =0.450	45	
Carbopol-Granulat Gemische		081006-3	C _v =0.580	59	
Ca		081007-1	C _v =0.360	38	
	Carb3+PVC3	081007-2	C _v =0.510	46	
		081007-3	C _v =0.610	57	

4. Resultate

4.1. Generelle Beobachtungen

Es wurden Versuche mit unterschiedlichen Volumina durchgeführt. Diese reichten von 14 kg bis 63 kg. Auch die Rotationsgeschwindigkeiten wurden variiert, welche sich zwischen 1 bis 25 U/min bewegten. Umgerechnet entspricht das einer mittleren Geschwindigkeiten zwischen 0,07 bis 3,31 m/s am Trommelradius. In den meisten Fällen war es möglich eine stationäre Welle für das zu testende Material zu erzeugen. Nur bei rein granularen Mischungen wurde ein unstationärer Abfluss beobachtet. Vor allem bei PVC-Wasser Gemischen wurde oft ein teilweise asymmetrischer Abfluss (horizontale Wirbelbildung) beobachtet. Ein symmetrischer Abfluss der Welle spielt eine große Rolle, da bei asymmetrischen Abflüssen, d.h. schräg überflossenen Scherkraftsensoren keine repräsentativen Daten geliefert werden.

Die ersten Trommelversuche wurden mit Kunststoffgranulaten durchgeführt, ohne dass Wasser in die Trommel hinzugegeben wurde. Dabei sind zwei unterschiedliche Granulatgrößen verwendet worden, einerseits Partikel mit einem Durchmesser von 10 mm (Hauptbestandteil), zusätzlich wurden 20 mm große Granulate hinzugegeben, um die Bewegung von größeren Teilen zu beobachten. Zu Beginn des Versuches, bei sehr geringer Geschwindigkeit, wurde eine schubweise Bewegung des Materials aufgezeichnet. Weiter ergab sich, dass bei den niedrigen Geschwindigkeiten die roten Partikel vorne am Murkopf zu finden waren. Tendenziell zeigt sich dann bei den höheren Geschwindigkeiten, dass die großen roten Granulate nach vorne transportiert und in weiterer Folge auf die Seite verlagert wurden, ähnlich wie bei einer natürlichen Levee Bildung, wo sie kaum mehr wegkommen. Der Grund dafür dürfte sein, dass die großen roten Partikel nicht weit genug nach hinten gelangen, um dann wieder in die Mitte zu kommen. Es wurde mit einem größeren Granulat versucht diesen Trend zu widerlegen. Vier rote Partikel sind zu einem großen Teil zusammengeklebt und ebenfalls in die Trommel gegeben worden. Jedoch hat sich auch hier gezeigt, dass sich das große Granulat nach vorne bewegt und dann auf die Seite wandert, um dort zu verbleiben.

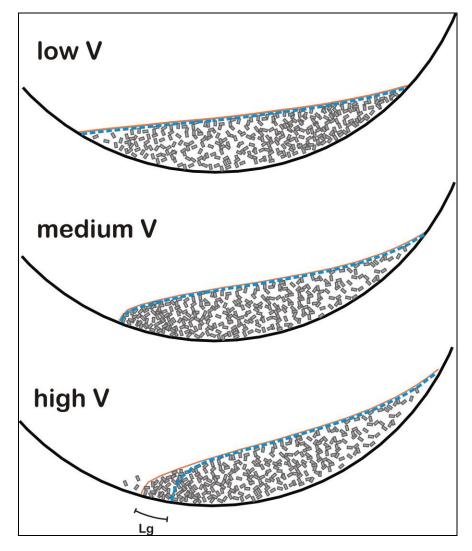


Abbildung 4-1: Murfrontentwicklung bei den unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen (geringe, mittlere, hohe Geschwindigkeit).

Je nach Mischungsverhältnis von Wasser-Granulat bzw. Carbopol-Granulat und unterschiedlicher Variationen der Geschwindigkeiten stellte sich im Zuge der Versuchsdurchführung eine flach auslaufende oder eine steil aufstellende Front ein (siehe Abbildung 4-1). Für ein konstantes Mischungsverhältnis stellt sich bei geringer Rotationsgeschwindigkeit eine eher flache, stark verdünnte Front ein. Wird die Rotationsgeschwindigkeit nun erhöht, schieben sich PVC Partikel nach vorne und generieren eine stärker konzentrierte Front. Bei weiterer Geschwindigkeitserhöhung beginnt sich die Front deutlich aufzustellen und eine "typische steile Murfront" zu entwickeln. Wird nun die Geschwindigkeit weiter erhöht, kommt es zu einer fortschreitenden "Austrocknung" der Front. Bei sehr hohen Geschwindigkeiten kann es zu einer "schiebenden Front" kommen, ein deutliches Anzeichen eines ungesättigten

Bereichs (in Englischsprachiger Literatur wird oft von einem 'rocky spray'⁵. berichtet). Durch die optische Beobachtung von der Seite bzw. durch die Videoauswertung von oben konnten diese Punkte, flach auslaufende Front, steile Front, sowie "rocky spray" gut beurteilt werden. Im folgenden Kapitel 4.2 werden die einzelnen Versuche verbal und qualitativ beschrieben. Um die Größe des abgerückten Porenwasserdruckes und um die Länge des trockenen Murkopfes zu erklären, wurde die Bezeichnung Lg eingeführt. Der Lg-Wert stellt die Länge in Millimeter der trockenen Murfront dar (siehe Abbildung 4-2). Dabei entspricht die Abweichung von einem Grad einer Länge von 22 mm.

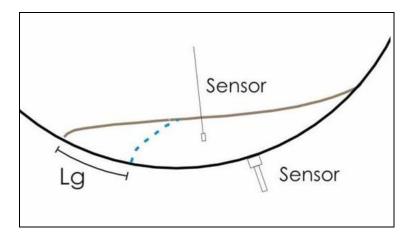


Abbildung 4-2: Skizze der geschätzten ungesättigten Front in der Murtrommel, KAITNA 2006.

-

⁵ "rocky spray": Übersetzt "springende Felsen". Soll die herumspringenden Teile an der trockenen Murfront beschreiben.

4.2. Qualitative Beschreibung der einzelnen Versuche

4.2.1. Wasser-Granulat Versuche

4.2.1.1. Versuch 080813

Das Wasser-Granulat Gemisch wurde mit einer Anfangsgeschwindigkeit von v1= 0,52 m/s in Bewegung gesetzt. Die Murwelle zeigte eine schöne Symmetrie, d.h. die Sensoren werden gerade überströmt. Bei der zweiten und den darauf folgenden zwei Geschwindigkeiten war eine, sich immer stärker ausbildente, Asymmetrie feststellbar. Es bildete sich eine horizontale Drehbewegung der Masse aus. Diese Drehbewegung führte dazu, dass die Sensoren schräg überströmt wurden und die Datenaufzeichnung dadurch nicht mehr brauchbar war. Auch ein leicht einsetzender "rocky spray" war erkennbar. Die Geschwindigkeit wurde stark reduziert, um die sich immer weiter ausbildende Asymmetrie und Strudelbewegung in den Griff zu bekommen. Dadurch entstand ein stark wassergesättigter Murenkopf. Die Rotationsbewegung der Trommel wurde wieder soweit erhöht, dass sich das Wasser circa auf gleicher Höhe mit der granularen Murenfront befand. Bei dieser Umdrehungsgeschwindigkeit war wieder eine schöne Symmetrie der Welle zu erkennen. In weiterer Folge wurde Wasser hinzugegeben. Die Geschwindigkeit wurde solange gesteigert bis der "rocky spray" einsetzte (Geschwindigkeit v8= 0,69 m/s). Die Symmetrie war immer noch sehr gut zu erkennen. Eine weitere Steigerung der Rotationsbewegung führte wieder zu einer starken Asymmetrie und Strudelbewegung. Daraufhin wurde der Versuch abgebrochen.

4.2.1.2. Versuch 080829_1 und 080829_2

Hier wurde die erste Geschwindigkeit (v1= 1,06 m/s) so gewählt, dass eine homogene Mischung entstehen konnte. Es wurde darauf geachtet, dass sich am Murkopf das Wasser und die Granulate auf gleicher Höhe, sprich in einer Linie befanden. Bei Steigerung der Geschwindigkeit kam es wie bei Versuch 080813 zu einer horizontal rotierenden Bewegung des Gemisches. Diesmal aber, aus Sicht der Kamera, gegen den Uhrzeigersinn drehend. Natürlich war auch hier wieder die Asymmetrie von Murfront und Murschwanz zu beobachten. Es ist also anzunehmen, dass die

unterschiedlichen Oberflächen der beiden seitlichen Begrenzungsflächen (Stahl und Plexiglas) nicht die Ursache einer asymmetrischen Strömung sind. Bei der Geschwindigkeit drei (v3= 2,12 m/s) bildeten sich diese Merkmale stärker aus und die springenden Granulate ("rocky spray") nahmen auch zu. Die Ausbildung der ungesättigten Front setzte bei Geschwindigkeit drei ein. Die Drehzahl wurde dann so sehr verringert, dass bei der letzten Geschwindigkeit vier (v4= 0,57 m/s) das Wasser sich weit vor der granularen Front befand.

Beim Versuch 080829_2 wurde granulare Masse entnommen. Bei der ersten Geschwindigkeit (v1= 0,56 m/s) bildete sich eine homogene Mischung mit einer kurzen Wasserfront aus. Bei Steigerung der Geschwindigkeit war eine steile und trockene Murfront gut zu erkennen. Außerdem war auch eine Asymmetrie des Murschwanzes sichtbar. Bei Geschwindigkeit drei (v3= 0,86 m/s) und vier (v4= 1,08 m/s) nahmen die Asymmetrie und die Strudelbewegung gegen den Uhrzeigersinn stärker zu. Dies führte wiederum dazu, dass der Versuch abgebrochen wurde.

4.2.2. Carbopol-Granulat Versuche

4.2.2.1. Versuch 080819

Bei dieser Versuchsreihe wurden zwei unterschiedliche Mischungsverhältnisse (080819_1 und 080819_2) untersucht. Es handelte sich um Carbopol-Granulat Mischungen, die getestet wurden. Beim ersten Versuch war der Massenunterschied zwischen Carbopol und Granulat sehr groß. Es wurden ca. 28 kg Carbopol und ca. 13 kg Granulat in die Trommel gegeben. Bei der ersten Geschwindigkeit (v1= 1,14 m/s) war das Carbopol Gemisch deutlich vor der Murfront. Die Geschwindigkeit wurde bis zu einem Punkt, wo Granulat und Carbopol Mischung an der Front gleichauf waren, gesteigert. Die Erhöhung der Umdrehungszahl ließ eine deutliche Asymmetrie an der Murfront (siehe Abbildung 4-3), sowie eine leicht einsetzende Strudelbewegung erkennen. Je weiter die Geschwindigkeit gesteigert wurde, desto stärker setzte die Drehbewegung ein und der Murkopf, sowie der Murschwanz wurden immer unsymmetrischer. Bei den Geschwindigkeiten vier (v4= 2,27 m/s) und fünf (v5 = 2,88 m/s) war ein trockener Murkopf zu beobachten. Bei diesen Geschwindigkeiten setzte der sogenannte "rocky spray" ein.



Abbildung 4-3: Standbild der asymmetrischen Front bei Versuch 080819_1 (Geschwindigkeit v4= 2,27 m/s).

Bei der zweiten Versuchsreihe handelte es sich ebenfalls um ein Carbopol-Granulat Gemisch. Die Masse des Granulats wurde um ca. 5,50 kg erhöht. Bei der ersten Geschwindigkeit (v1= 0,97 m/s) war zu erkennen, dass sich das Carbopol Gemisch deutlich vor den PVC Partikeln befand. Der Abfluss der Welle zeigte eine schöne Symmetrie. Bei Erhöhung der Drehzahl stellte sich die Front steil auf, weiter war eine leicht einsetzende Asymmetrie, sowie eine rotierende Bewegung auffällig. Die Strudelbewegung und Asymmetrie von Murkopf und Murschwanz nahmen immer stärker zu, je höher die Geschwindigkeit wurde. Ab der Geschwindigkeit vier (v4= 1,73 m/s) setzte auch wieder der "rocky spray" ein, der mit größer werdender Drehzahl immer stärker in Erscheinung trat.

4.2.2.2. Versuch 080829_3

Mit der Carbopol Mischung wurden ca. 12 kg Granulat in die Trommel gegeben. Bei der ersten Geschwindigkeit (v1= 0,22 m/s) bildete sich eine ca. 5 cm lange Carbopol Front aus. Es war unmöglich die Geschwindigkeit so einzustellen, dass sich keine flüssige Front ausbildete. Mit der Zeit hat sich die Carbopol Front auf ca. 2-3 cm eingependelt. Die Geschwindigkeit wurde leicht erhöht, eine steile Front bildete sich aus. Durch eine weitere Geschwindigkeitserhöhung begann eine Strudelbewegung einzusetzen. Bei der vierten Geschwindigkeit (v4= 0,61 m/s) war eine leichte Symmetrie zu erkennen. Die

Front wurde trocken. Bei der fünften Geschwindigkeit (v5= 0,73 m/s) war eine sehr schöne Symmetrie zu erkennen. Im weiterem setzte der "rocky spray" ein. Die ungesättigte Zone vergrößerte sich zunehmend. Folgend wurde die Geschwindigkeit sechs (v6= 0,11 m/s) verringert. Es bildete sich wieder eine Carbopol-Granulat Front aus.

4.2.2.3. Versuch 081006

Das erste Experiment dieser Versuchsreihe wurde mit ca. 25.50 kg Carbopol und ca. 8 kg Granulat durchgeführt. Bei der ersten Geschwindigkeit (v1= 0,57 m/s) bildete sich eine ca. 8 cm lange Carbopol Front aus (siehe Abbildung 4-4).



Abbildung 4-4: Standbild von der Carbopol Front bei Versuch 081006_1, Geschwindigkeit sehr niedrig (Geschwindigkeit v1= 0,57 m/s).

Bei Erhöhung der Geschwindigkeit auf v2= 1,12 m/s kam das Granulat an die Front heran. Eine Symmetrie war erkennbar und die Front wurde trocken. Die Geschwindigkeit vier (v4= 2,08 m/s) zeigte eine stark ungesättigte Front (siehe Abbildung 4-5). Es setzte der "rocky spray" ein.



Abbildung 4-5: Standbild einer stark ungesättigten Front bei Versuch 081006_1, Geschwindigkeit sehr hoch (Geschwindigkeit v4= 2,08 m/s).

Bei der zweiten Versuchsreihe an diesem Tag wurde die Granulatmasse um ca. 9 kg erhöht. Bei der ersten Geschwindigkeit (v1= 0,33 m/s) war eine deutliche Carbopol Front zu erkennen. Sie war ca. 6-7 cm lang. Mit Steigerung der Geschwindigkeit auf v2= 0,51 m/s ist es gelungen, dass sich keine flüssige Front mehr ausbildete, sondern Carbopol und die granularen Teilchen gleich auf waren. Außerdem war eine deutliche Symmetrie zu erkennen. Bei weiterer Zunahme der Geschwindigkeit bildete sich eine steile Front aus. Eine ungesättigte Zone war auf dem Video schwer erkennbar. Es kam zu keinen springenden Teilchen an der Front, jedoch bildete sich eine leichte Asymmetrie aus. Darauf hin wurde die Geschwindigkeit kurzzeitig reduziert, um die Asymmetrie unter Kontrolle zu bringen. Die Drehzahl wurde wieder auf v4= 1,54 m/s gesteigert, was wiederum eine klare Symmetrie hervorrief. Im Folgenden bildete sich eine trockene Front aus und der "rocky spray" setzte ein. Bei weiterer Steigerung der Geschwindigkeit war eine deutliche Symmetrie, sowie ein sehr ausgeprägter "rocky spray" zu erkennen. Der Versuch musste dann abgebrochen werden, da die Drehzahlaufzeichnung ausgefallen war.

Beim dritten Versuch dieser Serie wurde die Masse der Teilchen weiter vergrößert. Durch diese Erhöhung kam es schon bei der ersten sehr langsamen Geschwindigkeit zur Ausbildung einer steilen Front. Es wurde versucht die Geschwindigkeit so zu reduzieren, dass sich eine flüssige Front ausbildet, was jedoch leider nicht gelang. Die

Geschwindigkeit wurde daraufhin wieder erhöht auf v3= 0,43 m/s. Es war eine leichte Asymmetrie zu erkennen. Die Front war trocken jedoch kam es noch nicht zu einem "rocky spray". Bei Geschwindigkeit vier (v4= 0,68 m/s) war schon eine deutliche Asymmetrie feststellbar. Die Front war nach wie vor trocken. Bei der nächsten Geschwindigkeit war deutlich, die trockene Front, sowie der "rocky spray" zu identifizieren. Anschließend bildete sich eine Asymmetrie im Schwanzbereich aus, die an der Front jedoch wieder in einen symmetrischen Fluss überging. Der "rocky spray" verstärkt sich bei Geschwindigkeit sechs (v6= 1,70 m/s). Die trockene Front war gut erkennbar. Die Asymmetrie verschwand und es kam zu einem symmetrischen Fließen des Carbopol-Granulat Gemisches.

4.2.2.4. Versuch 081007

Auch bei dieser Versuchsserie wurden drei Experimente durchgeführt. Beim ersten Versuch war das Carbopol Volumen um ein vielfaches höher als das der Granulate. Die erste Geschwindigkeit (v1= 0,23 m/s) zeigte deutlich, dass das Carbopol vor der Partikelfront war. Eine schubweise Bewegung der Gesamtmasse stellte sich ein. Bei Erhöhung der Geschwindigkeit auf v2= 0,88 m/s war eine sehr klare Symmetrie zu beobachten. Die Carbopol Mischung bewegte sich immer noch vor der granularen Masse. Bei weiterer Steigerung der Geschwindigkeit war die Symmetrie immer noch gut zu beobachten, jedoch kam es zu keiner trockenen Murfrontausbildung.

Für Versuch zwei wurde das granulare Volumen erhöht. Bei Geschwindigkeit eins (v1= 0,16 m/s) bildete sich eine ca. 1-2 cm lange Carbopol Front aus. Am Murschwanz existierte eine leicht schubweise Bewegung. Bei Steigerung der Geschwindigkeit war dann eine steile Front zu erkennen, jedoch war diese noch nicht trocken. Es war auch eine sehr deutliche Symmetrie zu beobachten. Bei Geschwindigkeit drei (v3= 0,97 m/s) stellt sich die Front noch steiler auf. Der Murkopf war jedoch weiterhin nicht trocken. Erst bei Geschwindigkeit vier (v4= 1,32 m/s) stellte sich eine teilweise trockene Front ein. Der Murkopf wurde immer steiler und es setzte ein leichter "rocky spray" ein. Bei Geschwindigkeit fünf (v5= 1,72 m/s) blieb die Symmetrie aufrecht und es kam zur Ausbildung einer trockenen Front. Weiter setzte der "rocky spray" verstärkt ein.

Beim dritten Experiment befand sich mehr granulare Masse in der Trommel als Carbopol. Schon die erste Geschwindigkeit (v1= 0,12 m/s), die sehr niedrig gewählt wurde, zeigte eine steile Front. Jedoch war der Murkopf nicht trocken. Granulate und Carbopol befanden sich gleich auf. Es war auch eine deutliche Symmetrie zu erkennen. Bei Geschwindigkeit zwei (v2= 0,28m/s) stellte sich die Front steiler auf, jedoch bildete sich noch keine ungesättigte Zone aus. Die Symmetrie war weiter gut erkennbar. Bei Steigerung der Geschwindigkeit auf v3= 0,58 m/s, stellte sich der vordere Teil der Welle weiter auf und es war ein teilweise trockener Frontbereich zu erkennen, in der Größenordnung von ca. 1 bis 2 Zentimetern. Bei weiterer Steigerung der Umdrehungszahl war ein trockener Frontbereich sehr gut ersichtlich. Es kam auch zum Einsetzen des "rocky spray". Die Front wurde immer steiler. Bei Geschwindigkeit fünf (v5= 1,61 m/s) war der "rocky spray" schon deutlich erkennbar: Ferner existierte auch eine klare Symmetrie.

4.3. Granulare Murfront

4.3.1. Einfluss der Geschwindigkeit auf die Murfront

Der L_g -Wert, also die Länge einer ungesättigten Zone im Frontbereich einer Versuchsmischung, wurde für sämtliche Versuche ausgewertet und in den nachstehenden Tabellen (Tabelle 4-1, 4-2 und 4-3) dargestellt.

Tabelle 4-1: Ergebnisse der L_g-Werte von den Wasser+PVC Versuchen

Versuch	Lg	Versuch	Lg
Wasser+PVC	[mm]	Wasser+PVC	[mm]
080813_1	0	080929_1	0
	132		66
	220		110
	352		0
	0	080929_2	0
	11		22
	22		44
	110		88
	286		

Tabelle 4-2: Ergebnisse der L_q-Werte von den Carbopol+PVC Versuchen

Versuch	Lg
Carbopol+PVC	[mm]
080819_1	0
	0
	0
	22
	110
080819_2	0
	0
	22
	44
	88
	132

Versuch	Lg
Carbopol+PVC	[mm]
080929_3	0
	0
	22
	44
	88
	0

Tabelle 4-3: Ergebnisse der L_q-Werte von den Carbopol+PVC Versuchen

Versuch	Lg	Versuch	Lg
	_		
Carbopol+PVC	[mm]	Carbopol+PVC	[mm]
081006_1	0	081007_1	0
	0		0
	0		0
	0		
081006_2	0	081007_2	0
	0		0
	22		22
	44		44
			88
081006_3	0	081007_3	0
	0		22
	22		44
	22		110
	66		132
	154		

Abbildungen 4-6 und 4-7 zeigen die typische Verteilung der totalen Normalspannung und des Porenwasserdruckes am Gerinneboden in Längsrichtung einer Wasser-Granulat und einer Carbopol-Granulat Versuchsmischung (exemplarisch Versuch 080929_2 und 081007_2) bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Die visuelle Beurteilung der beiden Versuche zeigte, dass sich beim Probelauf 080929_2 bei der ersten Geschwindigkeit (v1= 0,56 m/s) eine homogene Mischung mit einer kurzen Wasserfront entwickelte. Bei Steigerung der Geschwindigkeit wurde die Murfront steiler und schnell trocken, was dazu führte, dass die Reibung größer wurde. Es ist auch eine Asymmetrie des Murschwanzes zu erkennen. Bei Geschwindigkeit v3 (v3= 0,86 m/s) und v4 (v4= 1,08 m/s) nahmen die Asymmetrie und die Strudelbewegung gegen den Uhrzeigersinn zu. Außerdem wurde bei diesen beiden Geschwindigkeiten (v3 und v4)

eine ausgeprägte granulare Murfront wahrgenommen (siehe Abbildung 4-6 (1c) und (1d)).

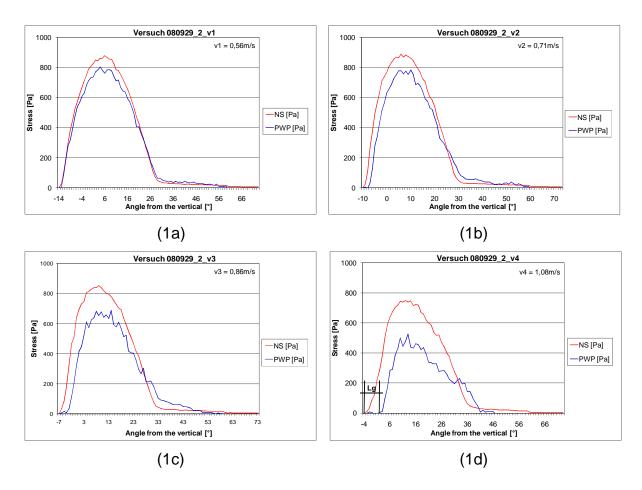


Abbildung 4-6: Ausbildung der trockenen Murfront bei stufenweiser Steigerung der Geschwindigkeit (Wasserl+PVC Versuch 080929 2).

Beim Test 081007_2 sah man, dass sich bei Geschwindigkeit eins (v1= 0,16 m/s) eine ca. 1-2 cm starke Carbopol Front ausbildete. Am Murschwanz war eine leicht schubweise Bewegung festzustellen. Bei Steigerung der Geschwindigkeit erkannte man dann eine steile Front, jedoch war diese noch nicht trocken. Der Abfluss der Welle war sehr symmetrisch. Bei Tempo drei (v3= 0,97 m/s) stellte sich die Front immer steiler auf. Ein trockener Murkopf konnte weiterhin nicht beobachtet werden. Erst bei Geschwindigkeit vier (v4= 1,32 m/s) war eine teilweise trockene Vorderseite der Murwelle zu beobachten. Diese Beobachtung spiegelt auch das Ergebnis des Diagrammes ((2d), siehe Abbildung 4-7) wieder, da auch hier schon ein Davondriften zu beobachten ist. Die Front wurde immer steiler und es setzte ein leichter "rocky spray" ein. Bei Geschwindigkeit fünf (v5= 1,72 m/s) blieb die Symmetrie aufrecht und es kam

zur Ausbildung einer granularen Murfont. Der sogenannte "rocky spray" verstärkte sich weiter.

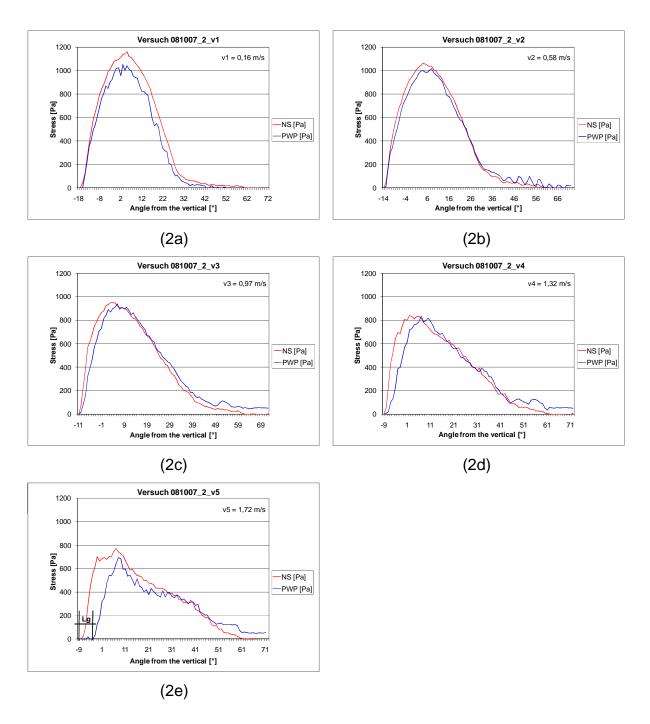


Abbildung 4-7: Ausbildung der trockenen Murfront bei stufenweiser Steigerung der Geschwindigkeit (Carpobol+PVC Versuch 081007_2).

Bei beiden Versuchen sieht man, dass bei zunehmender Geschwindigkeit der Porenwasserdruck immer weiter von der Normalspannung abrückt und sich somit eine trockene Murfront ausbildet. Es ist also gut zu erkennen, dass das Ausbilden einer granularen Murenfront stark von der Geschwindigkeit beeinflusst wird. Die Diagramme spiegeln außerdem wieder, dass bei Wasser-Granulat Gemischen eine geringere Geschwindigkeit erforderlich ist, um eine trockene Murfront auszubilden. Die Volumen, die bei beiden Versuchen verwendet wurden, sind in etwa gleich. Bei der Untersuchung des Versuches 080929_2 waren ca. 46,06 kg in der Trommel und beim Experiment 081007_2 wurden 47,00 kg in die Murtrommel gefüllt.

Im Zuge dieser Versuche bewegen sich die Volumenverluste im Bereich von ca. 15%. Die Werte des volumetrischen Feststoffanteiles liegen beim Versuch 080929_2 zwischen 0,44 bis 0,54 und beim Experiment 081007_2 im Bereich von 0,48 bis 0,57. Eine gesammelte Darstellung der Verteilung der Normalspannung und des Porendrucks für alle Versuchsmischungen ist im Appendix zu finden.

Eine weitere Darstellung der Abhängigkeit von L_g -Wert zur Geschwindigkeit zeigt Abbildung 4-8. Hier werden die beiden Versuche 081006 und 081007, die unterschiedliche C_v -Werte haben, gegenübergestellt. Es ist wiederum deutlich zu sehen, je größer die Geschwindigkeit wird desto stärker ist der L_g -Wert ausgeprägt.

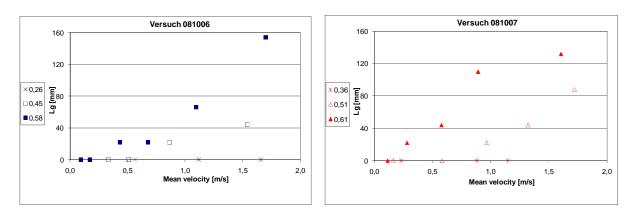


Abbildung 4-8: Ausbildung des Lg-Wert in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (Carpobol+PVC Versuch 081006 und 081007).

4.3.2. Einfluss des volumetrischen Feststoffanteil auf die Murfront

Ein weiterer Einflussparameter auf die Entwicklung einer ungesättigten Front ist der volumetrische Feststoffanteil. Der C_v-Wert oder volumetrische Feststoffanteil errechnet sich wie in Gleichung 16 beschrieben. Dabei wird das Kunststoffgranulatvolumen durch das Gesamtvolumen dividiert. Es wurde beobachtet, dass bei sehr geringen C_v-Werten, auch bei höheren Geschwindigkeiten, sich nur sehr schwer bzw. gar keine trockene

Front ausbildet. Je größer der C_v-Wert war, desto schneller stellte sich, auch schon bei niedrigen Umdrehungszahlen, eine steile und ungesättigte Murfront ein.

4.3.3. Einfluss der Viskosität auf die Murfront

Die Versuchsreihen 080819 (Carbopol Mischung 1; 0,05%), 081006 (Carbopol Mischung 2; 0,07%) sowie 081007 (Carbopol Mischung 3; 0,10%) wurden jeweils mit unterschiedlichen Zähigkeiten hergestellt (siehe Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Mengenangaben über die Herstellung der Carbopol Mischungen

Carbopol Mischungen	Wasser [g]	Carbopol [g]	Natronlauge [g]	Verhältnis [%]
Carbopol Mischung 1	40000	20	35	0.05
Carbopol Mischung 2	40000	28	70	0.07
Carbopol Mischung 3	40000	40	110	0.10

Bei der Auswertung und Beurteilung der L_g-Werte hat sich gezeigt, dass die Viskosität nicht der Hauptverursacher für die Ausbildung einer granularen Front war. Sowohl die Reynoldszahl, als auch die Froude-Zahl wurden für sämtliche Versuche berechnet. Durch diese beiden Werte kann das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften (Reynoldszahl) und das Verhältnis von Trägheits- zu Schwerkräften (Froude-Zahl) der künstlichen Murwelle bestimmt werden (siehe Kapitel 2.3). Die Lage der ungesättigten Front wurde mit L_g/H_{max} normalisiert, um die Versuchsmischungen verschiedener Volumina untereinander vergleichbar zu machen

Reynoldszahl bewegte sich bei den meisten Versuchen im laminaren Strömungsbereich zwischen 30 und 600 (siehe Abbildung 4-9). Es wurden jedoch auch turbulente Strömungen beobachtet. Vor allem bei den Wasserversuchen wurde eine sehr hohe Reynoldszahl erfasst (siehe Abbildung 4-10). Ein Grund dafür ist, dass Wasser eine sehr niedrige Viskosität (0,001 Pa*s) aufweist. Es zeigt sich also, dass der Prozess der Ausbildung einer ungesättigten Zone bei relativ ähnlichen Randbedingungen, d.h. Fließgeschwindigkeiten und C_v-Werten, nachgewiesen werden kann, obwohl die Viskosität der flüssigen Phase über mehrere Größenordnungen verändert wurde.

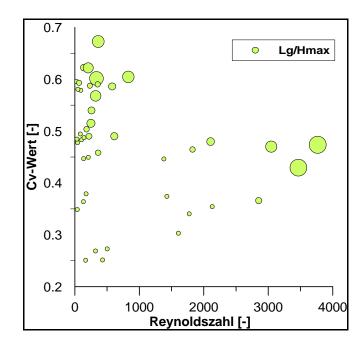


Abbildung 4-9: Verhalten der Reynoldszahl bei den einzelnen Carbopol-Granulat Versuchen.

Tabelle 4-5: Ergenistabellen der Carbopol-Granulat Versuche für Reynoldszahl, C_v -Wert und L_g/H_{max} .

Versuch	Re-Zahl [-]	C _v -Wert [-]	Lg/Hmax [-]
080819_1	1608	0,30	0,00
	1775	0,34	0,00
	2131	0,35	0,00
	2854	0,37	0,35
	3469	0,43	2,20
080819_2	1428	0,37	0,00
	1383	0,45	0,00
	1828	0,46	0,25
	2108	0,48	0,64
	3049	0,47	1,22
	3768	0,47	2,24

Versuch	Re-Zahl [-]	C _v -Wert [-]	Lg/Hmax [-]
080929_3	106	0,48	0,00
	143	0,49	0,00
	220	0,49	0,33
	251	0,51	0,71
	337	0,60	1,66
	44	0,48	0,00

Versuch	Re-Zahl [-]	C _v -Wert [-]	Lg/Hmax [-]
081006_1	169	0,25	0,00
	323	0,27	0,00
	432	0,25	0,00
	503	0,27	0,00
081006_2	138	0,45	0,00
	212	0,45	0,00
	362	0,46	0,24
	614	0,49	0,55
081006_3	92	0,58	0,00
	49	0,58	0,00
	235	0,59	0,18
	355	0,59	0,19
	580	0,59	0,53
	832	0,60	1,29

Versuch	Re-Zahl [-]	C _v -Wert [-]	Lg/Hmax [-]
081007_1	37	0,35	0,00
	135	0,36	0,00
	176	0,38	0,00
081007_2	34	0,48	0,00
	87	0,49	0,00
	182	0,50	0,25
	261	0,54	0,51
	324	0,57	1,11
081007_3	28	0,60	0,00
	66	0,59	0,20
	138	0,62	0,40
	209	0,62	1,04
	365	0,67	1,35

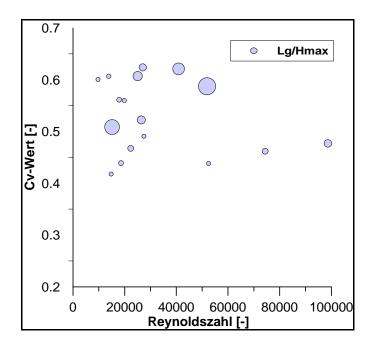


Abbildung 4-10: Verhalten der Reynoldszahl bei den einzelnen Wasser-Granulat Versuchen.

Tabelle 4-6: Ergebnistabellen der Wasser-Granulat Versuche für Reynoldszahl, C_v-Wert und L_g/H_{max}.

Versuch	Re-Zahl [-]	C _v -Wert [-]	Lg/Hmax [-]
080813_1	19869	0,56	0,00
	25056	0,61	1,53
	40938	0,62	2,27
	51971	0,59	3,87
	9749	0,60	0,00
	13875	0,61	0,11
	17936	0,56	0,21
	27068	0,62	0,95
	15192	0,51	3,18

Versuch	Re-Zahl [-]	C _v -Wert [-]	Lg/Hmax [-]
080929_1	52515	0,44	0,00
	74445	0,46	0,51
	98691	0,48	0,98
	27524	0,49	0,00
080929_2	14766	0,42	0,00
	18639	0,44	0,25
	22409	0,47	0,52
	26476	0,52	1,17

Bei der Froude-Zahl wurden Werte zwischen 0,1 und 6 berechnet. Das heißt, es haben sich sowohl strömende ($Fr \approx 0,6$), als auch schießende Strömungszustände ($Fr \approx 2$) ausgebildet. Auch hier wurden drei Größen (Froude-Zahl, C_v -Wert, L_g / H_{max}) in Abhängigkeit zueinander gestellt. Es ist deutlich erkennbar, je geringer der C_v -Wert ist, umso größer ist die Froude-Zahl (siehe Abbildung 4-11).

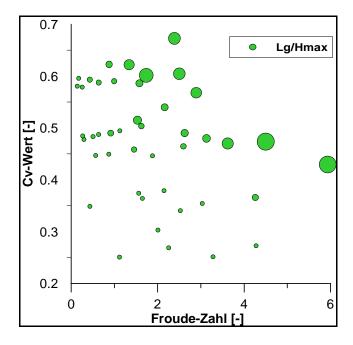


Abbildung 4-11: Verhalten der Froude-Zahl bei den einzelnen Carbopol-Granulat Versuchen.

Versuch	Froude-Zahl [-]	C _v -Wert [-]	Lg/Hmax [-]
080819_1	2,0	0,30	0,00
	2,5	0,34	0,00
	3,0	0,35	0,00
	4,3	0,37	0,35
	5,9	0,43	2,20
080819_2	1,6	0,37	0,00
	1,9	0,45	0,00
	2,6	0,46	0,25
	3,1	0,48	0,64
	3,6	0,47	1,22
	4,5	0,47	2,24

Versuch	Froude-Zahl [-]	C _v -Wert [-]	Lg/Hmax [-]
080929_3	0,5	0,48	0,00
	0,6	0,49	0,00
	0,9	0,49	0,33
	1,5	0,51	0,71
	1,7	0,60	1,66
	0,3	0,48	0,00

Versuch	Froude-Zahl [-]	C _v -Wert [-]	Lg/Hmax [-]
081006_1	1,1	0,25	0,00
	2,3	0,27	0,00
	3,3	0,25	0,00
	4,3	0,27	0,00
081006_2	0,6	0,45	0,00
	0,9	0,45	0,00
	1,5	0,46	0,24
	2,6	0,49	0,55
081006_3	0,3	0,58	0,00
	0,1	0,58	0,00
	0,6	0,59	0,18
	1,0	0,59	0,19
	1,6	0,59	0,53
	2,5	0,60	1,29

Versuch	Froude-Zahl [-]	C _v -Wert [-]	Lg/Hmax [-]
081007_1	0,4	0,35	0,00
	1,7	0,36	0,00
	2,2	0,38	0,00
081007_2	0,3	0,48	0,00
	1,1	0,49	0,00
	1,6	0,50	0,25
	2,2	0,54	0,51
	2,9	0,57	1,11
081007_3	0,2	0,60	0,00
	0,4	0,59	0,20
	0,9	0,62	0,40
	1,3	0,62	1,04
	2,4	0,67	1,35

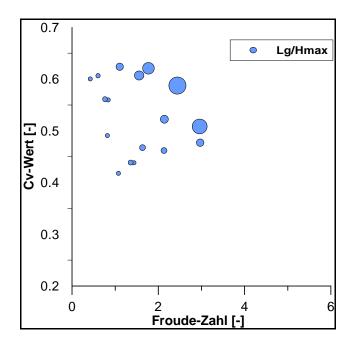


Abbildung 4-12: Verhalten der Froude-Zahl bei den einzelnen Wasser-Versuchen.

Tabelle 4-8: Ergebnistabellen der Wasser-Granulat Versuche für Froude-Zahl, Cv-Wert und Lg/Hmax.

Versuch	Froude-Zahl [-]	C _v -Wert [-]	Lg/Hmax [-]
080813_1	0,8	0,56	0,00
	1,6	0,61	1,53
	1,8	0,62	2,27
	2,4	0,59	3,87
	0,4	0,60	0,00
	0,6	0,61	0,11
	0,8	0,56	0,21
	1,1	0,62	0,95
	3,0	0,51	3,18

Versuch	Froude	C _v -Wert [-]	Lg/Hmax [-]
080929_1	1,4	0,44	0,00
	2,1	0,46	0,51
	3,0	0,48	0,98
	0,8	0,49	0,00
080929_2	1,1	0,42	0,00
	1,4	0,44	0,25
	1,6	0,47	0,52
	2,1	0,52	1,17

Die Parameter Geschwindigkeit und volumetrischer Feststoffanteil haben einen großen, die Viskosität einen kleineren Einfluss auf die Ausbildung einer trockenen Front. Es spielen noch eine Reihe andrere Faktoren eine wichtige Rolle bei der Entwicklung einer ungesättigten Murfront, wie z.B. das Volumen, das leider im Zuge der Versuche immer unterschiedlich groß angenommen wurde und daher nicht verglichen werden konnte.

Auch die Kornverteilung, die Rauhigkeit, die Korngröße, etc. spielen eine nicht unwichtige Rolle bei der Entstehung einer granularen Murfront. Jedoch konnten diese Punkte aus Zeitgründen nicht mehr behandelt werden. Die Einbeziehung all dieser Faktoren würde den Rahmen einer Diplomarbeit sprengen.

4.4. Reibungswinkel und Reibungsbeiwert

Wie in Kapitel 2.4 schon erklärt, errechnet sich ein dynamischer Reibungsbeiwert aus der Division von Schubspannung durch Normalspannung. Berechnet man den ArcusTangens aus dem Quotienten erhält man einen Bodenreibungswinkel. Dieser Reibungswinkel, sowie die totale Normalspannung und der Porenwasserdruck, die gemessen wurden und der (theoretische) hydrostatische Druck, der aus der Abflusstiefe berechnet wurde, werden in den nachstehenden Diagrammen miteinander verglichen (siehe Abbildung 4-13).

Der Versuch 081007_2 zeigt exemplarisch, welche Auswirkung eine ungesättigt Front auf den Bodenreibungswinkel hat. Bei der ersten Geschwindigkeit (v1= 0,16 m/s) ist der hydrostatische Druck kleiner, als der gemessene Porenwasserdruck. Diese Erhöhung wird in diesem Fall wahrscheinlich nicht durch die Massenbewegung hervorgerufen, da die Geschwindigkeit noch sehr niedrig ist. Es ist eher glaubhaft, da eine sehr zähe Carbopol Mischung (Carbopol Mischung 3; 0,10%) verwendet wurde, dass die Erhöhung des gemessenen Drucks aufgrund der großen Viskosität auftrat. Dadurch wurde ein Teil der PVC-Partikel in Schwebe gehalten, was die Dichte der Flüssigkeit erhöht. Je höher die Geschwindigkeiten während des Versuches wurden, umso näher kam der hydrostatische Druck an den gemessenen Druck heran bzw. überragte diesen. Eine Darstellung weiterer ausgewählter Versuche mit der Gegenüberstellung von totaler Normalspannung, Porenwasserdruck, Reibungswinkel und hydrostatischem Druck ist im Appendix zu finden.

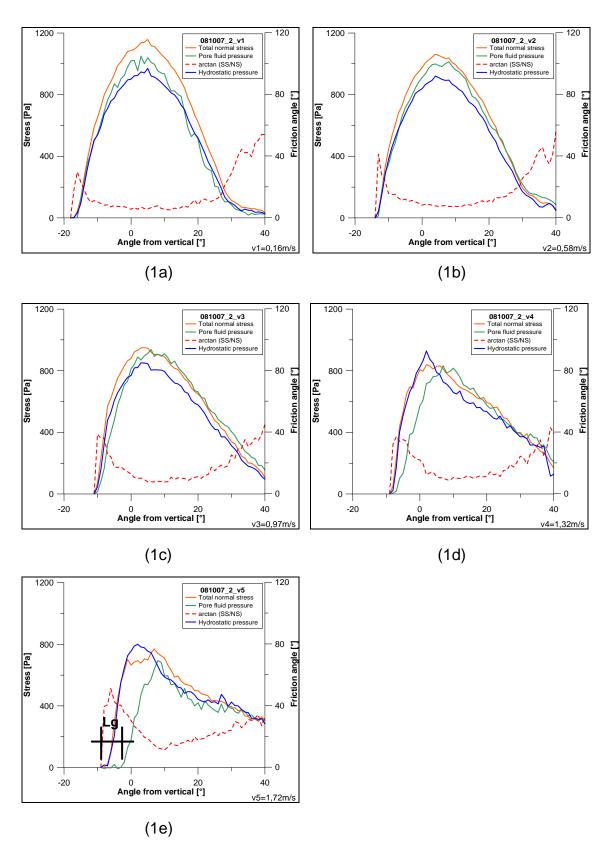


Abbildung 4-13: Vergleich von totaler gemessener Normalspannung, gemessenem Porenwasserdruck, berechnetem Reibungswinkel und berechnetem hydrostatischen Porenwasserdruck (Versuch 081007_2).

Generell ist zu erkennen, dass der Reibungswinkel relativ gering ist (zwischen 5° und 10°), da die verwendete Flüssigkeit einen relativ geringen inneren Fließwiderstand hat (Viskosität), verglichen mit dem Fließwiderstand von Partikeln. Bei den größeren Geschwindigkeiten ab v3 (Geschwindigkeit v3= 0,97m/s) ist dann sehr gut der Abstand des Porenwasserdrucks von der Normalspannung zu erkennen (Lg-Wert, siehe Abbildung 4-13, (1c), (1d) und (1e)). Dieser korrespondiert mit einem länger andauernden Peak des Reibungswinkels. Es verhindert nicht mehr die Flüssigkeit die Partikelreibung, sondern ist selbst hauptverantwortlich für den Reibungswiderstand, da die Front trockener wird und nun die Partikelreibung einsetzt.

Grundsätzlich ist der Material-Reibungswinkel und der in dieser Arbeit berechnete Bodenreibungswinkel (siehe Gleichung 24) nicht das gleiche. Letzterer ändert sich, da durch den Porenwasserdruck die effektive Spannung und damit die Scherfestigkeit geändert wird. Der natürliche Reibungswinkel der PVC Partikel beträgt 30°. Dieser wurde durch die Messung des maximalen Böschungswinkels von PVC Körnern ermittelt. Der Winkel entspricht in etwa dem Frontreibungswinkel der einzelnen Versuche von 081007_2. Teilweise, wie in Abbildung 4-11 (1e) zu erkennen, ragt der Peak des Reibungswinkels über 40° hinaus. Dies wird aller Wahrscheinlichkeit nach durch einzelne Körner an der Front hervorgerufen. Der immer größer werdende Peak des Reibungswinkels am Anfang ist wie schon erwähnt auch ein Indiz dafür, dass eine ungesättigte Front vorhanden ist. Im hinteren Bereich wird der Reibungswinkel immer kleiner, da dort der verflüssigte Murkörper bzw. Murschwanz existiert. Es ist auch gut erkennbar, dass die größte totale Normalspannung nicht am Anfang der Front zu beobachten ist. Diese Abweichung ist einerseits durch die Geschwindigkeit bedingt und andererseits durch die Rauhigkeit, was anhand von früheren Versuchen gezeigt wurde (KAITNA, 2006).

5. Diskussion

Rheologische Modelle sind keine physikalisch basierenden Modelle, aber finden Verwendung zur Simulation von Murgängen in der Praxis (NAEF, RICKENMANN, RUTSCHMANN, MCARDELL, 2006; RICKENMANN, LAIGLE, MCARDELL, HÜBL, 2006). Vor allem die Vorhersage möglicher Ablagerungsflächen ist wichtig für die Gefahrenzonenplanung.

Rheologische Modelle haben unter anderem die Voraussetzung, dass es sich um ein homogenes Material handelt und ein Zusammenhang zwischen Scherwiderstand und Scherrate besteht. (Bingham, Herschley Bulkley, "Kornreibungsmodell" nach BAGNOLD (1954)). Es hat sich gezeigt, dass rheologische Modelle sehr gut für die Beschreibung von feinkörnigen Murschlämmen, ohne einem erheblichen Anteil von groben Partikeln geeignet sind (z.B. COUSSOUT, 1994; PARSON, WHIPPLE, SIMONI, 2001). Sind grobe Partikel vorhanden, so kommt es meist zu einer heterogenen Ausbildung der Mure, sowie zu granularen, reibungsintensiven Fronten und flüssigen Murkörpern (z.B. IVERSON, 1997: HUNGR, 2000). Verbesserte Simulationsmodelle die für Gefahrenzonenplanung werden dem zukünftig Rechnung tragen müssen und das recht komplexe Phänomen "Murgang" mittels physikalisch basierenden Modellen abbilden. Diese Studie stellt somit einen Beitrag zum Verständnis der komplexen Vorgänge in granularen Suspensionen dar.

Es stellt sich die Frage, ob mit künstlichen Murmaterialien und einer rotierenden Trommel untersucht werden kann, welche Faktoren Einfluss auf die Entwicklung einer ungesättigten Murfront haben. Bisher wurden solche Versuche mittels natürlichem Murmaterial und einer schrägen Rutsche durchgeführt (IVERSON, 1997).

Pro Argumente:

- Es handelt sich um ein einfaches System und es werden nur Flüssigkeiten und homogene Partikel verwendet.
- Durch die rotierende Bewegung der Trommel werden wiederholt Daten aufgenommen. Es ist daher möglich mit Mittelwerten zu rechnen. Am

Gerinneboden können unterschiedliche Sensoren eingebaut werden (Problematisch bei Förderbandrinnen).

Contra:

- Der Effekt des gekrümmten Gerinneboden, sowie die Auswirkung der Zentrifugalbeschleunigung sind fraglich. (KAITNA und RICKENMANN (2007) zeigen, dass der Effekt der Zentrifugalbeschleunigung gering ist).
- Es stellt sich auch die Frage, ob die gleichen physikalischen Prozesse im Labor abgebildet werden können und zwar so wie sie in der Natur vorkommen (Skalierungsproblematik)?

Durch die Verwendung von Porenwasserdrucksensoren kann sehr gut die Entwicklung einer ungesättigten Front beobachtet werden. Bisher, sei es in Laborstudien bzw. Feldversuchen, gibt es allerdings relativ wenige Messungen des Porendrucks. IVERSON (1997) verwendete ein ähnliches System, um den Porenwasserdruck an der Grenze zwischen Murgang und Gerinneboden zu messen. Dieser konnte eine ungesättigte Zone bei verschiedenen Murgangmischungen nachweisen, allerdings keine Aussage über die verschiedenen Faktoren treffen, die die Ausbildung einer granularen Front beeinflussen. Daher wurde mithilfe der Murtrommel versucht, die verschiedenen Faktoren, die Einfluss auf eine trockene Murfront haben zu ermitteln. MAJOR und IVERSON (1999) untersuchten verschiedene Murmaterialien (sandige Kiesgemische, lehmige Kiesgemische, etc.). Die Experimente haben gezeigt, dass sich die totale Normalspannung proportional mit der Fließtiefe erhöht und abhängig von der Geschwindigkeit und der Sedimentkonzentration ist, sowie dass der Porenwasserdruck in der Nähe der Front null ist und nach dem Passieren der Front ansteigt. Diese Ergebnisse sind typisch für viele natürliche Murmaterialien. Es bildet sich eine relativ trockene Front aus und die Wassersättigung nimmt bis zum Murschwanz immer mehr zu. Je nach Gemisch hat sich gezeigt, dass der Porenwasserdruck in den meisten Versuchen kleiner war. als die totale Normalspannung, das heißt das es zu keiner vollständigen Verflüssigung gekommen ist und ein Teil der Normalspannung über das Korngerüst abgetragen wird (effektive Normalspannung). Die ungesättigte Zone konnte wieder sehr gut definiert werden.

Dass der Porenwasserdruck die Scherfestigkeit einer statischen Wasser-Sediment Mischung beeinflusst, ist nichts Neues. Aus der Idee der effektiven Spannung in der Bodenmechanik (TERZAGHI, 1923, 1943) resultierte, dass ein Boden-Wasser Gemisch sich kontinuierlich, bei relativ geringem Widerstand verformt, wenn viele Poren (CASAGRANDE, 1936). Es hat vorhanden sind sich gezeigt, dass der Porenwasserdruck sich in quasi statischen Murschlämmen langsam abbaut und dass solch ein Druck auf die Mobilität von Muren einen Einfluss hat (HAMPTON, 1979; PIERSON 1981; MAJOR et. al., 1997).

Die Forschungen von MCADRELL, BARTELT, KOWALSKI (2007) haben ebenfalls gezeigt, dass der Porenwasserdruck eine wichtige Größe für das Verständnis von Muren ist. MCADRELL et. al (2007) haben im Illgraben in der Schweiz Feldversuche von Murgängen beschrieben, mithilfe einer 8 m² großen Druckkraftplatte. Mit dieser konnten Normal- und Schubspannung, sowie der Porenwasserdruck gemessen werden. Bei den Untersuchungen hat sich ergeben, dass der Porenwasserdruck ein Hauptbestandteil für die außergewöhnliche Mobilität von Muren ist. Eine Korrelation von angenommenen dynamischen Drücken und gemessenen Geophondaten lassen darauf schließen, dass die Kollision von Partikeln einen Porenwasserdruck hervorruft. Dieser Effekt ist jedoch bei Muren mit starken Scherkräften nicht mehr die Erklärung von großen Porenwasserdrücken. Viele weitere Versuche sind dafür notwendig, um diese Problematik besser zu verstehen.

Es stellt sich auch die Frage der "Grenzkorngröße" – Was gehört zum Fluid? – Was gehört zum Sediment? Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen sind diese Fragestellungen klar definiert (Wasser und Carbopol einerseits, anderseits 10 mm PVC Partikel). Bei natürlichen Materialien sind diese Probleme nicht eindeutig geklärt. So gehören z.B. Ton eher zur Suspension (Flüssigkeit), Kies und größere Teile zum Sediment. In einem sozusagen undefinierten Bereich befinden sich dabei Schluff und Sand. Zukünftige Versuche sollten mit natürlichen Sediment-Wasser Mischungen gemacht werden.

6. Schlussfolgerung

Diese Diplomarbeit beinhaltet Untersuchungen über die Entwicklung einer ungesättigten Murfront mithilfe der rotierenden Murtrommel und künstlichen Murmaterialien. Getestet wurden Wasser-Granulat und Carbopol-Granulat Gemische. Zur quantitativen Erfassung der ungesättigten Front wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit Porendrucksensoren entwickelt, getestet und für den Einsatz bei den Versuchen kalibriert.

Bei den Versuchen wurde der volumetrische Feststoffanteil, die Geschwindigkeit, sowie die Viskosität variiert. Durch die Analyse in der vertikal rotierenden Trommel konnten die zu untersuchenden Parameter gut beobachtet und ihre Abhängigkeit bei der Entwicklung einer ungesättigten Murfront angemessen beschrieben werden. Andere Einflussgrößen, wie das Volumen der Masse, die Gerinnerauhigkeit, die Kornverteilung, die Korngröße, etc. konnten aus Zeitgründen in dieser Diplomarbeit nicht beobachtet und beurteilt werden.

Bei den Experimenten mit den unterschiedlichen Wasser-Granulat bzw. Carbopol-Granulat Gemischen hat sich gleich von Anfang an gezeigt, dass die Geschwindigkeit einen sehr großen Anteil an der Ausbildung einer granularen Murfornt hat. Dies konnte sehr gut durch die Ergebnisse der Porenwasserdruckmessung dargestellt werden. Je höher die Geschwindigkeit wurde, umso schneller rückte der Porenwasserdruck von der Normalspannung ab. Dieses Abrücken, gekennzeichnet durch den Lg-Wert, ist ein Kennzeichen für die ungesättigte Front. Auch der volumetrische Feststoffanteil (Cv-Wert) hat Einfluss auf die Ausbildung der trockenen Front. So zeigte sich, dass bei großen Cv-Werten eine größere Geschwindigkeit erforderlich war, um eine ungesättigte Zone zu schaffen. Der Anteil der Viskosität an der Bildung der ungesättigten Murfront war nicht so groß, als vorab vermutet. Es zeigte sich, dass die Viskosität nur einen untergeordneten Einfluss auf die trockene Front hat.

Bei der Beurteilung bzw. Auswertung der einzelnen Versuche, wie stark der Einfluss der einzelnen Parameter ist, gab es ab und an Probleme, da die Mischungen in der Trommel teilweise eine Strudelbewegung ausbildeten. Die aufgezeichneten Daten, durch das schräge Überfließen der Sensoren, konnten nicht mehr gebraucht werden.

Durch die Vielzahl an Versuchen wurden diese Probleme beseitigt. Auch die genaue Kalibrierung der Sensoren war von großer Bedeutung, um entsprechend gute Ergebnisse zu erhalten.

Es zeigt sich auch, dass die Ausbildung einer ungesättigten Front einen deutlichen Einfluss auf den Fließwiderstand der Masse hat. Dies sollte in zukünftigen untersuchen große Beachtung finden. Weitere Versuche sollten vor allem Materialien mit einer breiten Kornverteilung, sowie unterschiedlichen Rauhigkeiten beinhalten.

Die anfänglich definierten Ziele und Parameter, wie Geschwindigkeit, Viskosität, volumetrischer Feststoffanteil zu untersuchen und ihre Abhängigkeit bei der Entwicklung einer granularen Murfront zu beschreiben, konnten mithilfe der guten Messtechnik sehr gut nachgewiesen werden.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Längsschnitt und Querschnitt einer Mure (nach PIERSON, 1986 aus SCHATZMANN, 2005)10
Abbildung 1-2:	Materialzusammensetzung unterschiedlicher Massenverlagerungsprozesse (nach PHILLIPS und DAVIES, 1991, modifiziert WEBER, 2004)
Abbildung 1-3:	Schematische Darstellung des Geschwindigkeitsprofiles in Hauptbewegungsrichtung bei a) einem Murgang und bei b) einem Erdrutsch (Weber, 2004)
Abbildung 1-4:	Skizze der geschätzten ungesättigten Front in der Murtrommel (KAITNA, 2006)14
Abbildung 2-1:	Das Zwei-Platten Modell zur Beschreibung der rheologischen Parameter (SCHATZMANN, 2005)16
Abbildung 2-2:	Berechnung der Scherfestigkeit eines Fluids an der Stelle h-y bei hydrostatischer Druckverteilung in einem breiten Gerinne (SCHNEIDERBAUER, 2006)
Abbildung 2-3:	Links: Fließdiagramm; Rechts: Viskositätsdiagramm von einigen idealisierten Flüssigkeiten (SCHATZMANN, 2005)18
Abbildung 2-4:	Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Bingham Modell (SCHNEIDERBAUER, 2006)19
Abbildung 2-5:	Scherversuchsgerät welches von Bagnold für seine Experimente verwendet wurde (SCHATZMANN, 2005)25
Abbildung 3-1:	Eimer mit Kunststoffgranulaten, Länge ca.10-15mm und einem Durchmesser von 10mm31
Abbildung 3-2:	Links: Seitenansicht der Trommel; Rechts: Querschnitt des Versuchsaufbau der Trommel (KAITNA, 2006)33
Abbildung 3-3:	Links: Ansicht eines modifizierten Porenwasserdrucksensor; Rechts: Schnitt durch eine Porenwasserdrucksensor (aus KAITNA, 2006)34
Abbildung 3-4:	Kanalboden der Trommel mit Normal- und Scherspannungsplatte, Porenwasserdrucksensor und mit darüber montiertem Ultraschallsensor (aus KAITNA, 2006)35
Abbildung 3-5:	Links: Normalspannungsplatte mit radialer Messrichtung; Rechts: Schubspannugsplatte mit tangentialer Messrichtung (aus KAITNA, 2006)
Abbildung 3-7:	Beispiel der aufgesetzten Daten, anhand des Normalspannungssensor links, auf die Sinuskurve wie sie im Programm CATMANN angezeigt werden (Versuch 081007_2)37
Abbildung 3-8:	Beispiel der bereinigten Daten durch das Programm MATLAB (Versuch 081007_2)38
Abbildung 3-9:	Versuchsergebnisse der Abflusstiefenbestimmung mit Ultraschallsensor, Laser und Normalspannungsmessplatte in

	Abhängigkeit Versuch(080813	vom _1)	Winkel	bei	einem	Wasser+PVC 39
Abbildung 3-10	Versuchsergebn Ultraschallsenso Abhängigkeit v (080819_1)	r, Lase om Wir	er und I nkel bei	Normalsp einem	annungsm Carpobol+	essplatte in PVC Versuch
Abbildung 3-11	Volumenverluste gesteigert wir Versuchsausgan	d (V _G	_{esamt} er	ntspricht	dabei	immer dem
Abbildung 3-12	Standard Rheom	-		-	-	-
Abbildung 4-1:	Murfrontentwickl Geschwindigkeit					
Abbildung 4-2:	Skizze der ges KAITNA 2006					
Abbildung 4-3:	Standbild der (Geschwindigkei					
Abbildung 4-4:	Standbild von Geschwindigkeit					
Abbildung 4-5:	Standbild einer Geschwindigkeit					
Abbildung 4-6:	Ausbildung der Geschwindigkeit					
Abbildung 4-7:	Ausbildung der Geschwindigkeit					
Abbildung 4-8:	Ausbildung des (Carpobol+PVC	_				_
Abbildung 4-9:	Verhalten der F Versuchen					
Abbildung 4-10	:Verhalten der I Versuchen					
Abbildung 4-11	:Verhalten der f Versuchen					•
Abbildung 4-12	Verhalten der Fr	oude-Za	hl bei den	einzelne	n Wasser-	Versuchen66
Abbildung 4-13	Vergleich von to Porenwasserdru hydrostatischen	ck, bered	chnetem	Reibung	swinkel un	d berechnetem

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Messsystemabhängige Konstanten C1 und C2	43
Tabelle 3-2:	Übersicht der Versuche mit PVC Granulaten	45
Tabelle 3-3:	Übersicht der Versuche mit Wasser und PVC Granulaten	45
Tabelle 3-4:	Übersicht der Versuche mit Carbopol und PVC Granulaten	46
Tabelle 4-1:	Ergebnisse der L _g -Werte von den Wasser+PVC Versuchen	56
Tabelle 4-2:	Ergebnisse der L _g -Werte von den Carbopol+PVC Versuchen	57
Tabelle 4-3:	Ergebnisse der L _g -Werte von den Carbopol+PVC Versuchen	57
Tabelle 4-4:	Mengenangaben über die Herstellung der Carbopol Mischungen	61
Tabelle 4-5:	Ergenistabellen der Carbopol-Granulat Versuche für Reynoldszahl, Wert und L_g/H_{max} .	
Tabelle 4-6:	Ergebnistabellen der Wasser-Granulat Versuche für Reynoldszahl, Wert und L_g/H_{max} .	•
Tabelle 4-7:	Ergebnistabellen der Carbopol-Granulat Versuche für Froude-Zahl, Wert und L_g/H_{max} .	
Tabelle 4-8:	Ergebnistabellen der Wasser-Granulat Versuche für Froude-Zahl, C Wert und Lg/Hmax.	

9. Literatur

- BAGNOLD, R.A. (1954): Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Proc. Of the Royal Society London, Series A, 225: 49-63.
- BOLLRICH, G. (2000): Technische Hydromechanik 1, Verlag Bauwesen 5. Auflage.
- BOHLIN INSTRUMENTS LTD: (1994): A basic introduction to rheology. Part No MAN0334 Issue 2, UK.
- CASAGRANDE, A. (1936): Characteristic ofd cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills, Bosten Society of Civil Engineers Journal, v. 23, p. 13-32.
- COSTA, J.E. (1984): Physical geomorphologie of debris flows. Developments and applications of geomorphology, Springer, Berlin, 268-317.
- COSTA, J.E. (1988): Rheologic, geomorphic and sedimentologie differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows. Flood Geomorphology, John Wiley & Sons, New York, p. 113-122.
- COUSSOT, P. (1994): Steady, laminar flow of concentrated mud suspensions in open channel. Journal of Hydraulic Research 32 (4): 535-559.
- COUSSOT, P. (1997): Mudflow rheology and dynamics. IAHR Monograph Series. Rotterdam: Balkema.
- DAVIES, T.R.H. (1988): Debris-flow surges a laboratory investigation. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 96, ETH Zürich.
- DAVIES, T.R.H. (1990): Debris-flow surges experimental simulation. Journal of Hydrology (N.Z.), Vol. 29 No. 1.
- HAMPTON, M.A. (1979): Buoyancy in debris flows, Journal of Sedimentary Petrology, v. 49, p. 753-758.
- HUNGR, O. (2000): "Analyses of Debris Flow Surges Using the Theory of Uniformly Progressive Flow". Earth Surface Processes and Landforms 25, p. 483-495.
- ILSTAD, T., MARR, J. G., ELVERHOI, A., HARBITZ, C.B. (2004): Laboratory studies of subaqueous debris flow by measurements of pore-fluid pressure and total stress. Marine Geology 213, p. 403-414, www.elsevier.com/locate/margeo.

- IVERSON, R.M. (1997): The physics of debris flow. American Geophysical Union, 35, 3, p. 245 296, Paper number 97RG00426.
- JOHNSON, A.M. (1970): Physical processes in geology. San Francisco: Freeman and Cooper.
- JORDAN, R.P. (1994): Debris Flows in the Southern Coast Mountains, British Columbia, Dynamic behaviour and physical properties, Dissertation, University of British Columbia.
- KAITNA, R. (2006): Debris flow experiments in a rotating drum. Institute of Mountain Risk Engineering.
- KAITNA, R., RICKENMANN, D. (in press): Flow of different material mixtures in a rotating drum. In Cui, P., Cheng, Ch. (eds.): Debris-flow hazard mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Proceedings of the 4th International DFHM Conference Chengdu, China, September 10-13 2007. Millpress Rotterdam.
- KAITNA, R., RICKENMANN, D. (2007): A new experimental facility for laboratory debris flow investigation. Journal of Hydraulic Research, Vol. 45, No. 6, p. 797-810.
- KAITNA, R., RICKENMANN, D., SCHATZMANN, M. (2007): Experimental study on rheologic behaviour of debris flow material. Springer Verlag 2007.
- KAITNA, R., RICKENMANN, D. (2008) Skriptum zur Vorlesung, Naturgefahren. Universität für Bodenkultur, Institut für Alpine Naturgefahren, Kap. 3 & 5.
- MAJOR, J.J. (1997): Verification of vertically rotating flume using non-Newtonian fluids. Discussion by Jon.J. Major. Journal of Hydraulic Engineering 123 (10): 936-937.
- MAJOR, J.J., IVERSON R.M. (1999): Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins. Geological Society of American Bulletin, v. 111, no.10.
- MCADRELL, B.W., BARTELT, P., KOWALSKI, J. (2007): Field observations of basal forces and fluid pressure in a debris flow. Geophysical research letters, Vol. 34, L07406.
- METZNER, A. B., OTTO, R. E. (1957): Agitation of Non- Newtonian Fluids. AICHE Journal, Vol. 3 Issue 1, p. 3-10.
- NAEF, 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, p. 155-165.
- PARSON, J.D., WHIPPLE, K.X., SIMON, A. (2001): Experimental study of the rain flow, fluid-mud transition in debris flow. The Journal of Geology, volume 109, p. 427-447.
- PHILLIPS, C.J., DAVIES T.R.H. (1991): Determining rheologic parameters of debris flow material. Geomorphology 4, 101-110.
- PIERSON, T.C., COSTA, J.E. (1987): A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. In Reviews in Engineering Geology VII, Geological Society of America: 1-11.
- PIERSON, T.C. (1981): Dominant particle support mechanismus in debris flows at Mt. Thomas, New Zeland, and implications for flow mobility, Sedimentology, v. 28, p. 49-60.
- RICKENMANN, D. (1990): Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes.

 Mitteilungen, 103. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.
- RICKENMANN, D. (2002): Über Murgänge in den Alpen. Blackwell Verlag, Berlin, 23-26.
- RICKENMANN, D., LAIGLE, D., MCARDELL, B.W., HÜBL, J. (2006): Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. Computational Geosciences 10, p. 241–264, DOI: 10.1007/s10596-005-9021-3.
- SAVAGE, S.B.; HUTTER, K. (1989): The motion of a finte mass of granular material down a rough incline. J. Fluid Mech. 199: 177-215.
- SCHATZMANN, M. (et al 2003): Rheological behavior of fine and large particle Suspensions, Journal of hydraulic engineering.
- SCHATZMANN, M. (2005): Rheometry for large particle fluids and debris flows.

 Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen technischen Hochschule Zürich.
- SCMIDT, H.H. (2006): Grundlagen der Geotechnik 3.Auflage. B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden 2006.
- SCHNEIDERBAUER, S. (2006): Experimentelle Untersuchungen von Murschüben in einer vertikal drehenden Trommel und in einem Förderband. Institut für Alpine Naturgefahren.

- TERZAGHI, K. (1923): Die Berechnung der Durchlassigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der Hydrodynamischen Spannungserscheinungen: Akademie der Wissenschaften in Wien, Sitzungsberichte: Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse, part IIa, v. 132, no. 3/4.
- TERZAGHI, K. (1943): Theoretical soil mechanics: New York, John Wiley and Sons, 510p..
- VEN TE CHOW, Ph.D. (1959): Open-Channel hydraulics. McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC.
- WEBER, D. (2004): Untersuchungen zum Fließ- und Erosionsverhalten granularer Murgänge. Dissertation, Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.

10. Symbolverzeichnis

Formelzeichen	Benennung, Bedeutung, Bemerkung	bevorzugte Einheit
A	Fläche	m^2
C_v – Wert	volumetrischer Feststoffanteil	
F	Kraft	kN
G	treibende Kraft	kN
g	Erdbeschleunigung g = 9.81 m/s^2	m/s ²
H	Abflusstiefe	m
n	Herschel Bulkley Index	
h	Abflusstiefe an der Stelle y	m
P	Druck	Pa
rpm	Umdrehungen pro Minute	
η	Viskosität	Pa*s
$\eta_{\scriptscriptstyle B}$	Binghamzähigkeit	Pa*s
$\eta_{{\scriptscriptstyle HB}}$	Herschel Bulkley Viskosität	Pa*s
$\eta_{\scriptscriptstyle S}$	scheinbare Viskosität	Pa*s
T_0	Stärke der Zone mit Plugflow	m
ν	Fließgeschwindigkeit	m/s
V_{Ges}	Gesamtgeschwindigkeit	m/s
\mathcal{V}_{OBFL}	Oberflächengeschwindigkeit	m/s
γ	Scherrate	1/s
φ	Reibungswinkel	Grad
ρ	Dichte	kg/m ³
$ ho_s$	Dichte Partikel	kg/m ³
$ ho_f$	Dichte Fluid	kg/m ³

τ	Schubspannung	Pa
$ au_{\mathit{GR}}$, $ au_{\mathit{HB}}$	Grenzschubspannung	Pa
Bi	Bingham Zahl	
Re	Reynoldszahl	
Fr	Froude-Zahl	
$N_{\it Sav}$	Savage-Zahl	
b	empirische Konstante	
μ	Newtonsche-Viskosität des Fluides	Pa*s
λ	lineare Sedimentkonzentration	
a	empirische Konstante	
α	dynamischer Reibungswinkel	Grad
$ ho_s$	Dichte der Partikel	kg/m³
d	Durchmesser der Partikel	mm
$N_{\scriptscriptstyle B}$	Bagnold Zahl	
c	Kohäsion	kN/m²
σ	effektive Normalspannung	kN/m²
и	Porenwasserdruck	kN/m²

11. Appendix

11.1. Gesamtübersicht der einzelnen Wasser-PVC Versuche

	s [m]	Hmean NS Hmean lase		_			_	_	_	0,040 0,040	_
	Flow depths [m]	Hmax laser	keine Dater	keine Daten	keine Dater	keine Daten	keine Daten				
		Hmax NS	0,098	0,086	0,097	0,091	0,091	0,102	0,103	0,116	060'0
	city	Vm [m/s]	0,52	0,85	1,12	1,53	0,26	0,38	0,48	0,69	1,10
Pa.s	Velocity	Vm [rpm]	3,93	6,39	8,50	11,57	1,98	2,86	3,63	5,24	8,30
0,001	Density	[kg/m3]	1150	1120	1050	1000	1120	1080	1100	1150	1050
II J	Lg	[mm]	0	132	220	352	0	11	22	110	286
	S	M	0,56	0,61	0,62	0,59	09'0	0,61	0,56	0,62	0,51
	S	from laser	keine Daten								
	S	from NS	0,56	0,61	0,62	0,59	0,60	0,61	0,56	0,62	0,51
<u>e</u> e	Volume	from granulate	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57
	Volume	from laser	keine Daten								
1,263 0,45	Volume	from NS	33,17	30,60	29,91	31,62	30,93	30,62	33,10	29,77	36,53
Radius = Breite =			080813_1	31,81	MΜ	0,59					

Name: 80813 Material: Wasser+Granulat 10mm

	SN	Hydraulic radius	Geometry	etry total surge NS	ge NS			2	verson Denlir	linger 2001			
	VOLini/VOL	Hmean [m]	_	As	Ab	Re with R	Re with Hm	Froude	NR.	Lg/Hmax	Lg/Hmean	Lg/L	shearrate
080813_1	1	0,033	1,918	0,074	0,863	19869	23312	8,0	441991	0,00	0,00	0,00	17,73
31,81	0,92	0,026	1,697	0,068	0,764	25056	28397	1,6	348715	1,53	4,40	0,08	37,47
ΜW	0,90	0,035	1,653	0,066	0,744	40938	48398	1,8	457243	2,27	5,37	0,13	36,47
0,59	0,95	0,034	1,763	0,070	0,794	51971	61210	2,4	403062	3,87	8,80	0,20	50,88
	0,93	0,033	1,808	0,069	0,813	9749	11439	0,4	460339	0,00	0,00	0,00	8,93
	0,92	0,034	1,741	0,068	0,784	13875	16341	9,0	453666	0,11	0,28	0,01	12,58
	1,00	0,034	1,874	0,074	0,843	17936	21125	0,8	429768	0,21	0,55	0,01	15,96
	0,90	0,034	1,697	0,066	0,764	27068	31880	1,	498878	0,95	2,75	90'0	23,04
	1,10	0,013	1,697	0,081	0,764	15192	16137	3,0	121993	3,18	20,43	0,17	104,29

Versuch: 80929_1 und_2 Material: Wasser+Granulat 10mm Versuch 1 und 2

	Volume	Volume	Volume	S			Lg	Density	Velocity	city		Flow depths [m]	ths [m]	
	from NS	from laser	from granulate	from NS			[mm]	[kg/m3]	Vm [rpm]	Vm [m/s]	Hmax NS		Hmean NS	Hmean NS
1_626080	49,65	keine Daten	21,75	0,44	keine Daten	keine Daten	0	1100	8,05	1,06	0,137	keine Daten	0,056	keine Dater
46,67	47,10	keine Daten	21,75	0,46	keine Daten	keine Daten	99	1100	11,75	1,55	0,129	keine Daten	0,054	keine Daten
MΜ	45,61	keine Daten	21,75	0,48	keine Daten	keine Daten	110	1100	16,06	2,12	0,112	keine Daten	0,052	keine Daten
0,47	44,32	keine Daten	21,75	0,49	keine Daten	keine Daten	0	1200	4,31	0,57	0,118	keine Daten	0,049	keine Daten
2_626080	24,18	keine Daten	10,10	0,42	keine Daten	keine Daten	0	1050	4,27	0,56	0,086	keine Daten	0,028	keine Dater
22,04	23,02	keine Daten	10,10	0,44	keine Daten	keine Daten	22	1050	5,39	0,71	0,087	keine Daten	0,028	keine Daten
M	21,61	keine Daten	10,10	0,47	keine Daten	keine Daten	44	1050	6,48	98'0	0,084	keine Daten	0,028	keine Daten
0,46	19,34	keine Daten	10,10	0,52	keine Daten	keine Daten	88	1050	8,18	1,08	0,075	keine Daten	0,026	keine Dater

Pa.s

0,001

그

ΞΞ

1,263 0,45

Radius = Breite =

	SN	NS Hydraulic radius	Geometry	etry total surge NS	ge NS			<u> </u>	ærson Denlii	inger 2001			
	VOLini/VOL	Hrmean [m]		As	Ab	Re with R	Re with Hm	Froude	NR	Lg/Hmax	Lg/Hmean	Lg/L	shearrate
080929_1	1,00		2,050	0,110	1,143	52515	98259	1,4	491595	0,000	000'0	0,000	25,287
46,67	0,95		2,006	0,105	0,903	74445	92312	2,1	489586	0,512	1,222	0,033	38,276
MΜ	0,92		1,984	0,101	0,893	98691	121499	3,0	482382	0,982	2,115	0,055	54,328
0,47	0,89	0,040	2,138	0,098	0,962	27524	33519	8,0	528791	0,000	000'0	0,000	15,473
080929_2	1,00		1,918	0,054	0,863	14766	16604	1,1	219008	0,00	00'0	0,00	26,83
22,04	0,95		1,830	0,051	0,823	18639	20959	4,1	221947	0,25	0,79	0,01	33,86
×Σ	0,89		1,763	0,048	0,794	22409	25197	1,6	229555	0,52	1,57	0,02	40,71
0.46	0.80		1.697	0.043	0.764	26476	29536	2.1	233143	1.17	3.38	0.05	55.34

11.2. Gesamtübersicht der einzelnen Carbopol-PVC Versuche

Versuch: 080819 Material: Carbopol 0.05%+Granulat 10mm

Pa Pa.s

Rheometer: _T bin = µ bin = (

Radius = Breite =

1,263 [m] 0,45 [m]

	Volume	Volume	Volume	ઠ	రే	Š	ΓĠ	Density	Velocity	ity	Н	Flow depths [m]		
	from NS	from laser	from granulate	from NS	from laser	MW	[mm]	[kg/m3]	Vm [rpm]	Vm [m/s]	Hmax NS	Hmax laser	Hmean NS	Hmean laser
080819_1	30,29	keine Daten	9,18	0,30	keine Daten	0,30	0	1100	8,64	1,14	0,088	keine Daten	0,033	kein Daten
25,92	26,97	keine Daten	9,18	0,34	keine Daten	0,34	0	1100	10,37	1,37	0,086	keine Daten	0,030	kein Daten
MΜ	25,91	keine Daten	9,18	0,35	keine Daten	0,35	0	1100	12,45	1,65	0,080	keine Daten	0,030	kein Daten
0,36	25,08	keine Daten	9,18	0,37	keine Daten	0,37	22	1100	17,18	2,27	0,063	keine Daten	0,029	kein Daten
	21,37	keine Daten	9,18	0,43	keine Daten	0,43	110	1250	21,77	2,88	0,050	keine Daten	0,024	kein Daten
080819_2	35,02	keine Daten	13,10	0,37	keine Daten	0,37	0	1000	7,31	0,97	0,108	keine Daten	0,039	kein Daten
29,24	29,36	keine Daten	13,10	0,45	keine Daten	0,45	0	1008	8,11	1,07	0,094	keine Daten	0,033	kein Daten
×Μ	28,21	keine Daten	13,10	0,46	keine Daten	0,46	22	1008	11,01	1,46	0,087	keine Daten	0,032	kein Daten
0,45	27,31	keine Daten	13,10	0,48	keine Daten	0,48	44	1008	13,06	1,73	0,069	keine Daten	0,031	kein Daten
	27,88	keine Daten	13,10	0,47	keine Daten	0,47	88	1110	15,82	2,09	0,072	keine Daten	0,034	kein Daten
	27,65	keine Daten	13,10	0,47	keine Daten	0,47	132	1150	19,37	2,56	0,059	keine Daten	0,033	kein Daten

		ļ											
	SN	Hydraulic radius	Geometry	netry total surge NS	Je NS			Ivers	verson Denlinger 2	2001			
	VOLini/VOL	Hrmean [m]	7	As	Ab	Re with R	Re with Hm	Froude	NR	Lg/Hmax	Lg/Hmean	Lg/L	shearrate
080819_1	1,00	0,029	2,094	0,067	0,942	1607,8	1843,6	2,01	10492	0,00	00'00	00'0	46,06
25,92	0,89	0,026	2,006	090'0	0,903	1774,9	2011,6	2,53	9864	0,00	00,00	00,00	60,81
MΜ	0,86	0,026	1,962	0,157	0,883	2131,0	2415,1	3,04	9962	0,00	00,00	00,00	73,00
0,36	0,83	0,026	1,962	0,190	0,883	2853,7	3221,5	4,26	9811	0,35	0,76	0,01	104,21
	0,71	0,022	1,962	0,047	0,883	3469,1	3839,1	5,93	10255	2,20	4,58	90'0	159,56
080819_2	1,16	0,033	2,072	0,078	0,932	1428,3	1675,8	1,56	12485	0,00	0,00	00,00	32,97
29,24	0,97	0,029	2,006	0,065	0,903	1383,0	1585,8	1,89	11842	0,00	00,00	0,00	43,23
ŞΣ	0,93	0,028	1,962	0,063	0,883	1827,7	2087,6	2,60	11742	0,25	0,69	0,01	60,52
0,45	06'0	0,027	1,962	0,061	0,883	2108,4	2398,9	3,13	11710	0,64	1,42	0,02	74,11
	0,92	0,030	1,852	0,062	0,833	3048,9	3509,6	3,62	13486	1,22	2,59	0,05	81,85
	0,91	0,029	1,874	0,061	0,843	3768,4	4321,1	4,50	13743	2,24	4,00	0,07	103,25

Versuch: 080929_3 Material: Carbopol 0.

1,263 [m] 0,45 [m]

Radius = Breite =

1,94 Pa 0,0398 Pa.s

0.05%+Granulat 10mm Versuch 3	τ bin =
	= nid n

	Nolume	Nolume	Volume	ડે	రే	ડે	Б	Density	Velocity	city	ı.	Flow depths [m]		
	from NS	from laser	from granulate	from NS	from laser	ΜM	[mm]	[kg/m3]	[wdı] wA	[s/w] w/V	Hmax NS	Hmax laser	Hmean NS	Hmean laser
080929_3	16,53	15,69	7,99	0,48	0,51	0,50	0	1100	1,66	0,22	290'0	0,063	0,019	0,018
15,61	16,40	15,19	7,99	0,49	0,53	0,51	0	1100	2,13	0,28	0,068	0,071	0,020	0,019
M	16,31	16,15	7,99	0,49	0,49	0,49	22	1100	3,14	0,42	990'0	0,076	0,021	0,020
0,49	15,52	17,87	7,99	0,51	0,45	0,48	44	1100	4,60	0,61	0,062	0,062	0,016	0,019
	13,29	21,74	7,99	09'0	0,37	0,48	88	1100	5,53	0,73	0,053	0,078	0,018	0,028
	16,72	21,75	7,99	0,48	0,37	0,42	0	1100	0,86	0,11	0,064	0,078	0,015	0,026
	NS	Hydraulic radius	Geometry to	etry total surge NS	ge NS			lvers	Iverson Denlinger 2001	2001				
	VOLini/VOL	Hrmean [m]	7	As	Ab	Re with R	Re with Hm	Fronde	NR	Lg/Hmax	Lg/Hmean	Lg/L	shearrate	
080929_3	1,00	0,018	1,918	0,037	0,863	106,32	115,29	0,51	4409	00'0	00'0	00,00	15,37	
15,61	0,99	0,018	1,830	0,036	0,823	143,01	155,72	0,64	4567	00,00	00,00	00,00	18,73	
M	0,99	0,019	1,763	0,036	0,794	220,46	241,04	0,91	4732	0,33	1,05	0,01	26,30	
0,49	0,94	0,015	1,653	0,034	0,744	251,18	269,04	1,54	3670	0,71	2,75	0,03	50,57	
	0,80	0,017	1,653	0,030	0,803	336,91	363,86	1,74	5023	1,66	4,89	0,05	54,04	

	SN	Hydraulic radius	Geor	netry total surg	Je NS			lverson	on Denlinger	2001			
	VOLini/VOL	Hrmean [m]	٦	As	Ab	Re with R	Re with Hm	Fronde	NR	Lg/Hmax	Lg/Hmean	Lg/L	shearrate
80929_3	1,00	0,018	1,918	0,037	0,863	106,32	115,29	0,51	4409	00,00	0,00	0,00	15,37
15,61	0,99	0,018	1,830	0,036	0,823	143,01	155,72	0,64	4567	0,00	0,00	0,00	18,73
×	0,99	0,019	1,763	0,036	0,794	220,46	241,04	0,91	4732	0,33	1,05	0,01	26,30
0,49	0,94	0,015	1,653	0,034	0,744	251,18	269,04	1,54	3670	0,71	2,75	0,03	50,57
	0,80	0,017	1,653	0,030	0,803	336,91	363,86	1,74	5023	1,66	4,89	0,05	54,04
	5	7700	1 000	7000	0000	14.24	47.46	000	7366		2		1000

Versuch: 081006 Material: Carbopol 0.07% +Granulat 10mm

1,263 [m] 0,45 [m]

Radius = Breite =

6,5 Pa 0,0874 Pa.s Rheometer: t bin = µ bin = (

	Volume	Volume	Volume	5	ò	ò	Lg	Density	Velocity	city	4	Flow depths [m]		
	from NS	from laser	from granulate	from NS	from laser	ΜW	[mm]	[kg/m3]	Vm [rpm]	Vm [m/s]	Hmax NS	Hmax laser	Hmean NS	Hmean lase
081006_1	23,52	18,77	5,90	0,25	0,31	0,28	0	1120	4,28	0,57	0,076	0,075	0,026	0,021
22,65	21,97	18,60	5,90	0,27	0,32	0,29	0	1120	8,46	1,12	0,068	0,068	0,025	0,021
MΜ	23,47	19,01	5,90	0,25	0,31	0,28	0	226	12,53	1,66	0,057	0,054	0,026	0,024
0,26	21,63	19,41	5,90	0,27	0,30	0,29	0	977	15,69	2,08	0,051	0,049	0,024	0,022
081006_2	30,06	28,05	13,44	0,45	0,48	0,46	0	1200	2,51	0,33	0,098	0,095	0,035	0,032
29,18	29,92	28,18	13,44	0,45	0,48	0,46	0	1200	3,86	0,51	0,097	760'0	0,035	0,032
MΜ	29,33	28,55	13,44	0,46	0,47	0,46	22	1180	6,54	0,86	0,093	0,092	0,036	0,033
0,45	27,42	29,06	13,44	0,49	0,46	0,48	4	1150	11,64	1,54	0,080	0,085	0,035	0,034
081006_3	40,44	41,87	23,40	0,58	95'0	0,57	0	1220	1,31	0,17	0,125	0,131	0,046	0,047
40,04	40,33	41,63	23,40	0,58	0,56	0,57	0	1210	0,72	0,10	0,120	0,126	0,045	0,046
MΜ	39,84	41,63	23,40	0,59	0,56	0,57	22	1220	3,28	0,43	0,125	0,128	0,047	0,049
0,58	39,66	52,94	23,40	0,59	0,44	0,52	22	1180	5,12	0,68	0,117	0,127	0,047	0,064
	39,92	41,57	23,40	0,59	0,56	0,57	99	1150	8,29	1,10	0,125	0,133	0,049	0,051
	38,71	41,57	23,40	0,60	0,56	0,58	154	1100	12,86	1,70	0,119	0,133	0,047	0,051

	SN	Hydraulic radius	Geon	Geometry total surge NS	ge NS			lvers	lverson Denlinger 200′	2001			
	VOLini/VOL	Hrmean [m]	٦	As	Ab	Re with R	Re with Hm	Froude	N.	Lg/Hmax	Lg/Hmean	Lg/L	shearrate
081006_1	1,00	0,023	2,006	0,052	0,903	169,1	188,6	1,12	1973	00'0	0,00	0,00	28,96
22,65	0,93	0,023	1,984	0,049	0,893	322,6	358,5	2,26	1932	00,00	0,00	00,00	59,53
MΜ	1,00	0,023	1,984	0,052	0,893	431,8	481,7	3,28	1713	00,00	0,00	00,00	84,77
0,26	0,92	0,022	1,984	0,048	0,893	503,1	556,7	4,28	1628	0,00	0,00	0,00	115,00
081006_2	1,00	0,030	2,006	690'0	0,903	138,055	159,530	0,567	3855,634	000'0	000'0	0,000	12,615
29,18	1,00	0,030	2,006	0,068	0,903	212,3	245,3	0,87	3870	00,00	0,00	00,00	19,40
M	96'0	0,031	1,940	0,068	0,873	362,4	420,4	1,46	3914	0,24	0,61	0,01	31,96
0,45	0,91	0,030	1,896	0,065	0,853	613,5	709,0	2,63	3896	0,55	1,26	0,02	58,50
081006_3	1,00	0,038	2,006	0,091	0,903	92,368	111,252	0,258	6760,016	000'0	000'0	0,000	5,010
40,04	1,00	0,038	2,050	060'0	0,923	49,4	59,3	0,14	6655	0,00	00,00	0,00	2,81
ΜW	66'0	0,039	1,940	680'0	0,873	235,4	284,6	0,64	9269	0,18	0,47	0,01	12,28
0,58	0,98	0,039	1,896	0,088	0,853	355,5	429,7	1,00	6675	0,19	0,47	0,01	19,16
	66'0	0,040	1,852	680'0	0,833	580,5	6'902	1,58	6641	0,53	1,35	0,04	29,76
_	96'0	0,039	1,852	0,086	0,833	832,3	1006,1	2,50	6375	1,29	3,28	0,08	48,13

Versuch: 081007 Material: Carbopol 0,10%+Granulat 10mm

20,9 Pa 0,1846 Pa.s

Rheometer: t bin = C

> Radius = 1,263 [m] Breite = 0,45 [m]

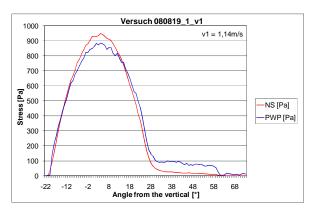
_	Volume	Volume	Volume	Š	రే	ర	βŋ	Density	Velocii	city	ш.	Flow depths [m]	_	
_	from NS	from laser	from granulate	from NS	from laser	MΜ	[mm]	[kg/m3]	[wdɪ] wA	[s/ш] m/	Hmax NS	Hmax laser	Hmean NS	Hmean laser
081007_1	25,73	26,79	8,97	0,35	0,33	0,34	0	1150	1,77	0,23	0,083	0,101	0,029	0,031
24,68	24,64	20,85	8,97	0,36	0,43	0,40	0	1100	99'9	0,88	0,078	0,072	0,029	0,025
ΜW	23,66	21,66	8,97	0,38	0,41	0,40	0	1100	8,68	1,15	690'0	0,067	0,029	0,026
0,36														
081007_2	30,13	31,06	14,60	0,48	0,47	0,48	0	1200	1,23	0,16	0,105	0,116	0,037	0,035
28,28	29,52	28,86	14,60	0,49	0,51	0,50	0	1150	4,39	0,58	0,072	960'0	0,027	0,034
MΜ	29,00	28,69	14,60	0,50	0,51	0,51	23	1120	7,30	0,97	0,088	0,091	0,036	0,035
	27,05	28,27	14,60	0,54	0,52	0,53	4	1120	66,6	1,32	0,086	0,095	0,038	0,036
0,51	25,71	27,70	14,60	0,57	0,53	0,55	88	1120	13,01	1,72	0,079	0,082	0,036	0,035
081007_3	36,66	37,34	21,84	09'0	0,58	0,59	0	1230	0,87	0,12	0,115	0,117	0,043	0,043
35,24	36,83	36,86	21,84	0,59	0,59	0,59	22	1200	2,13	0,28	0,111	0,120	0,043	0,044
MΜ	35,09	35,24	21,84	0,62	0,62	0,62	4	1200	4,37	0,58	0,109	0,110	0,044	0,043
0,61	35,13	34,78	21,84	0,62	0,63	0,62	110	1150	6,75	0,89	0,106	0,114	0,045	0,044
	32.47	33.91	21.84	0.67	0.64	0.66	132	1100	12.14	1,61	0.098	0.105	0.046	0.044

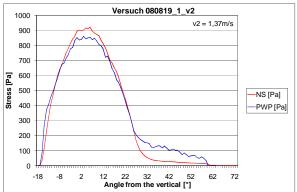
	SN	Hydraulic radius	Geom	Geometry total surge NS	ge NS			Ivers	Iverson Denlinger 2007	2001			
	9	Hrmean [m]	٦	As	Ab	Re with R	Re with Hm	Fronde	K	Lg/Hmax	Lg/Hmean	Lg/L	shearrate
081007_1		0,026	1,962	0,057	0,883	37,5	42,3	0,44	1217	0,00	0,00	0,00	10,74
24,68	96'0	0,026	1,896	0,055	0,853	134,8	152,2	1,65	1172	0,00	0,00	0,00	40,40
MΜ	0,92	0,026	1,852	0,053	0,833	175,7	198,4	2,15	1186	0,00	00,00	0,00	52,65
0,36													
081007_2	1,00	0,032	1,984	0,071	0,893	33,6	39,1	0,27	2059	0,00	0,00	0,00	5,85
28,28	0,98	0,024	1,896	0,051	0,853	87,2	7,76	1,13	1435	0,00	0,00	0,00	28,60
MΜ	96'0	0,031	1,830	0,066	0,823	181,8	210,9	1,62	1864	0,25	0,61	0,01	35,67
	06'0	0,033	1,786	0,068	0,803	260,6	304,6	2,16	2097	0,51	1,16	0,02	46,25
0,51	0,85	0,031	1,763	0,063	0,794	324,0	375,8	2,90	2102	1,11	2,44	0,05	63,57
081007_3	1,00	0,036	1,962	0,081	0,883	27,678	32,968	0,177	3109	000'0	000'0	000'0	3,559
35,24	1,00	0,036	1,918	0,081	0,863	66,1	78,7	0,43	2979	0,20	0,51	0,01	8,71
MΜ	96'0	0,037	1,852	0,080	0,833	138,3	165,3	0,88	3229	0,40	1,00	0,02	17,47
0,61	96'0	0,038	1,786	0,078	0,803	208,6	250,3	1,34	3102	1,04	2,44	90'0	26,39
	08.0	0.038	1 710	0.078	0.774	365.4	440.1	2.30	3438	1 کتر	2 87	80.0	46.42

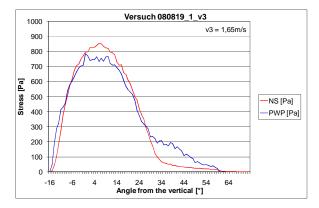
11.3. Einfluss der Geschwindigkeit auf die Murfront

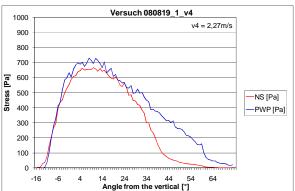
Anbei alle Ergebnisse (Wasser- und Carbopol-Granulat Gemsiche) der einzelnen Versuche in Bezug auf die Geschwindigkeit zur Ausbildung einer ungesättigten Murfront (siehe auch Kapitel 4.3.1).

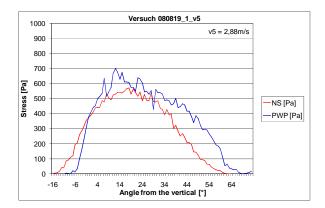
11.3.1. Versuch 080819_1 Carbopol 0,05%+PVC-Partikel



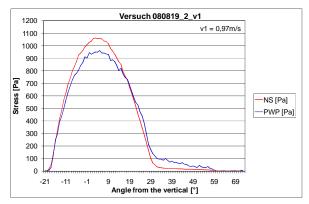


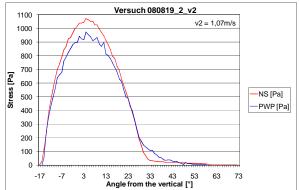


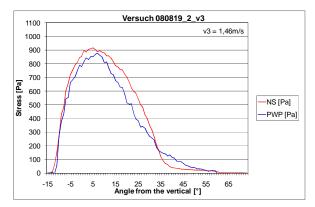


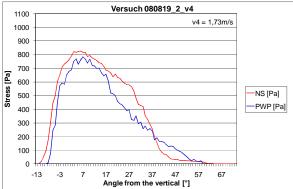


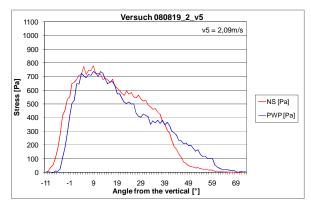
11.3.2. Versuch 080819_2 Carbopol 0,05%+PVC-Partikel

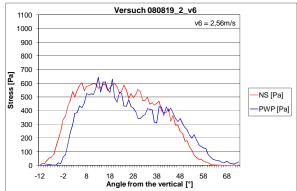




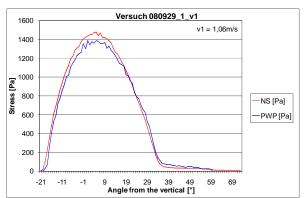


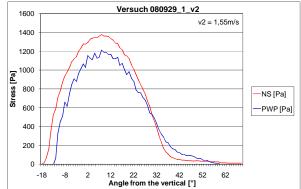


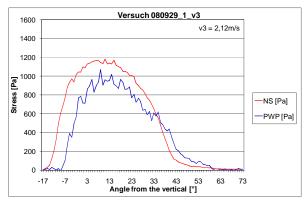


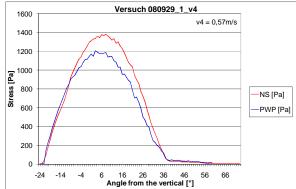


11.3.3. Versuch 080929_1 Wasser+PVC-Partikel

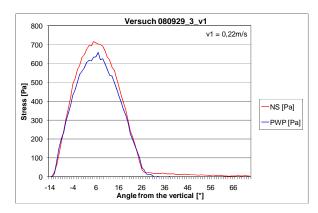


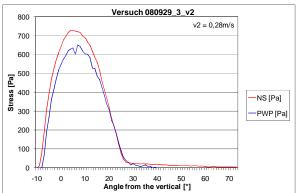


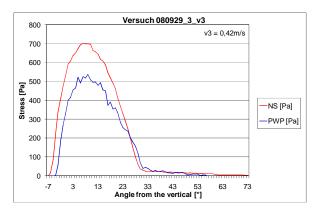


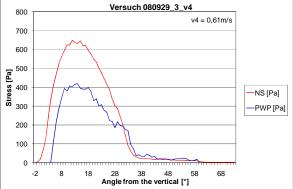


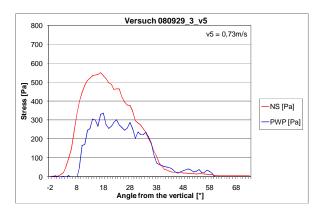
11.3.4. Versuch 080929_3 Carbopol 0,05%+PVC-Partikel

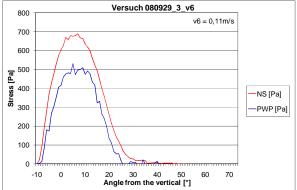




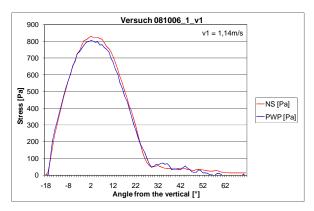


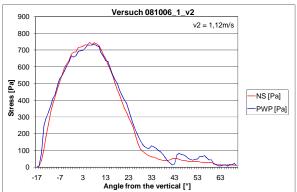


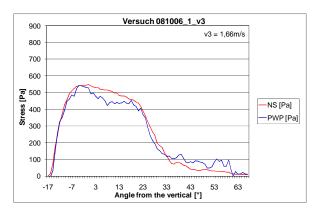


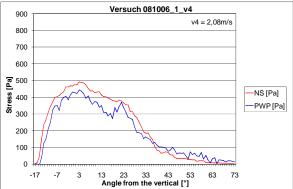


11.3.5. Versuch 081006_1 Carbopol 0,07%+PVC-Partikel

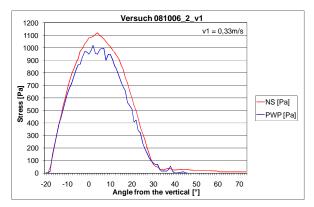


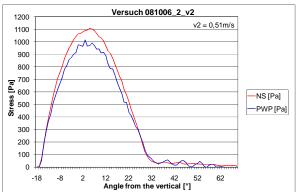


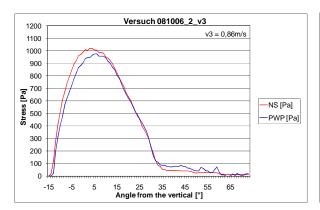


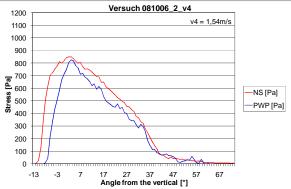


11.3.6. Versuch 081006_2 Carbopol 0,07%+PVC-Partikel

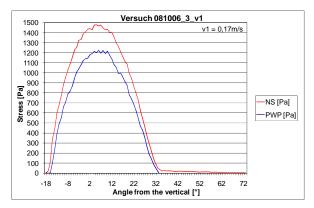


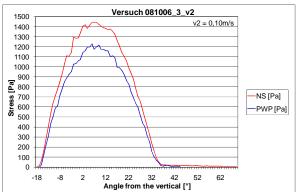


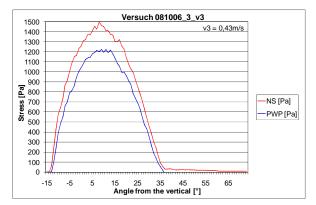


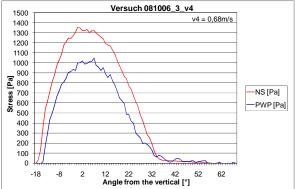


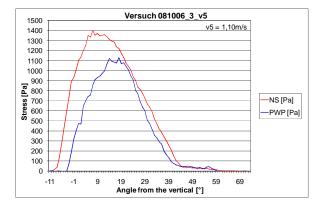
11.3.7. Versuch 081006_3 Carbopol 0,07%+PVC-Partikel

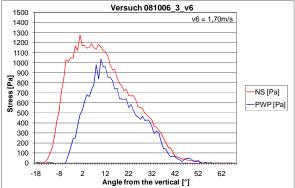




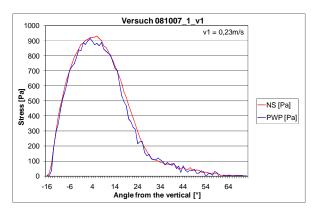


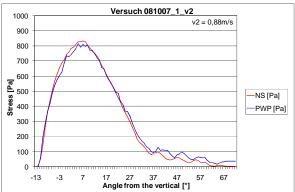


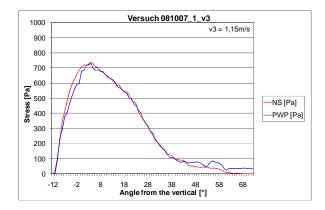




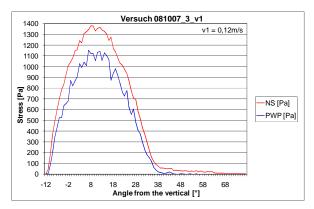
11.3.8. Versuch 081007_1 Carbopol 0,10%+PVC-Partikel

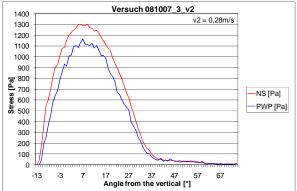


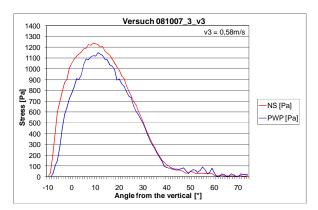


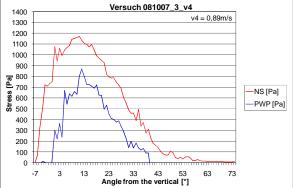


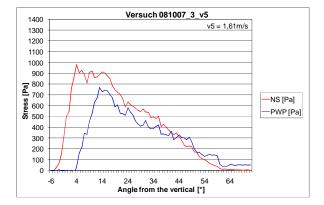
11.3.9. Versuch 081007_3 Carbopol 0,10%+PVC-Partikel







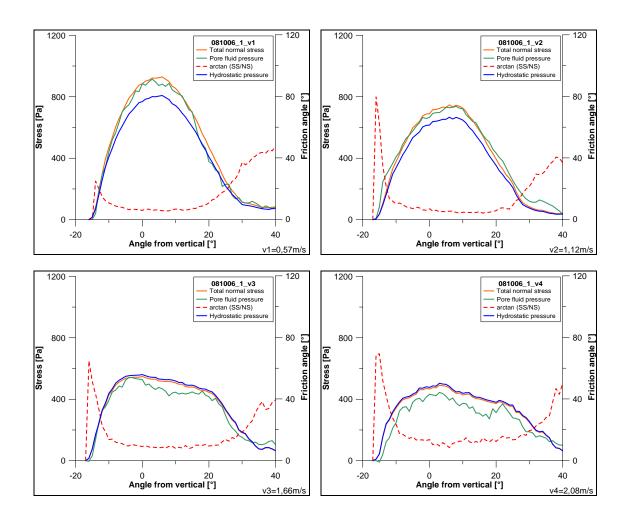




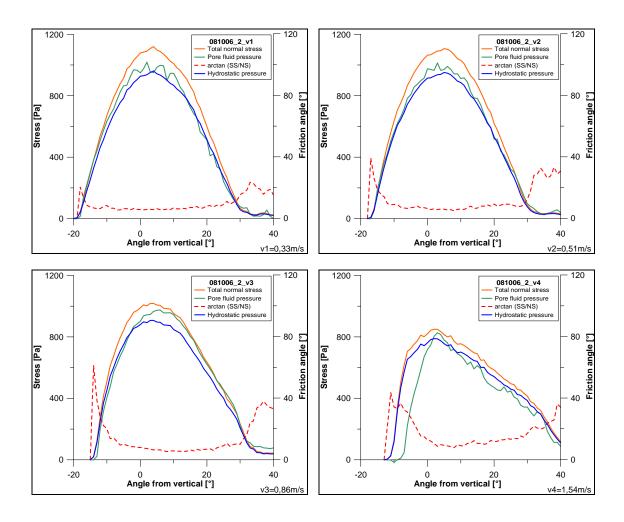
11.4. Reibungswinkel

Anbei wird die Abhängigkeit des Reibungswinkels auf die ungesättigte Murfront gezeigt. Es werden nicht alle Versuche dargestellt, sondern nur jene die ein anschauliches Ergebnis geliefert haben (siehe auch Kapitel 4.4).

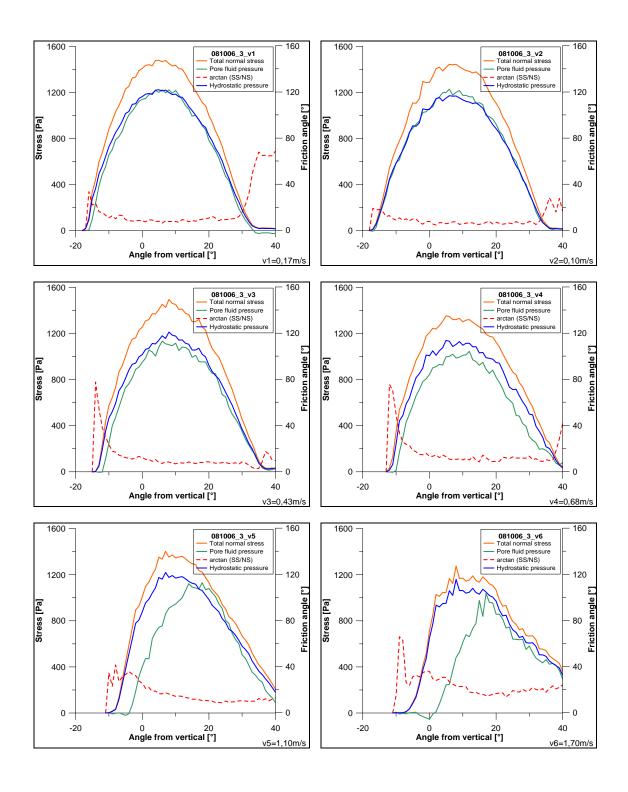
11.4.1. Versuch 081006_1 Carbopol 0,07%+PVC-Partikel



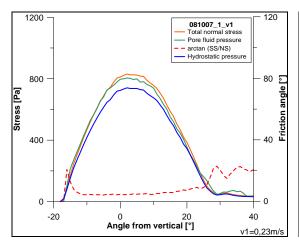
11.4.2. Versuch 081006_2 Carbopol 0,07%+PVC-Partikel

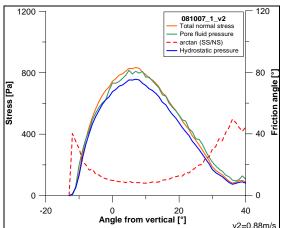


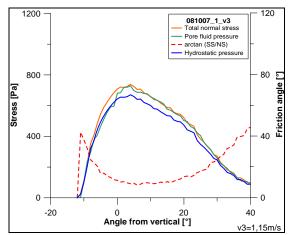
11.4.3. Versuch 081006_3 Carbopol 0,07%+PVC-Partikel



11.4.4. Versuch 081007_1 Carbopol 0,10%+PVC-Partikel





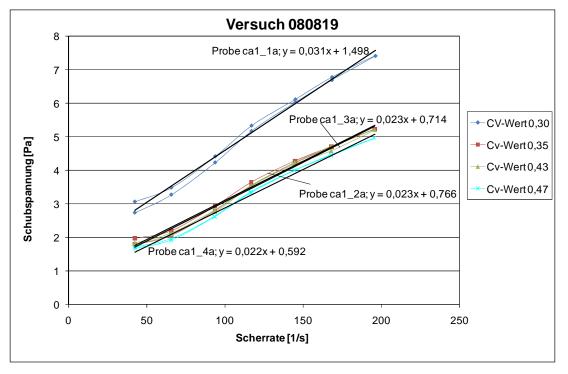


11.5. Rheometerversuche

Mit dem Rheometer wurden die vier Carbopol-Granulat Versuche (080819, 080929_3, 081006, 081007, siehe auch Kapitel 3.3.1) untersucht. Auf der x-Achse (Abszisse) werden die Werte für die Scherrate und auf der y-Achse (Ordinate) die Daten für die Schubspannung aufgetragen.

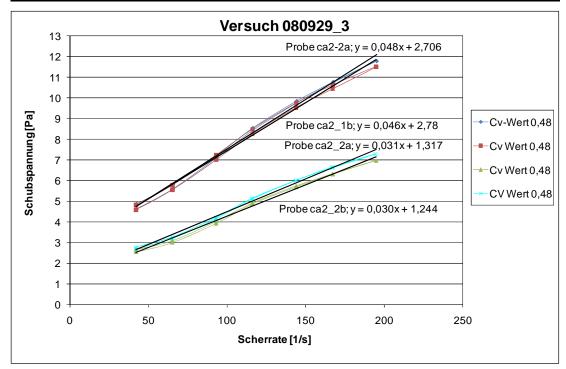
11.5.1. Rheometerversuch 080819

Versuch 0808	19_1	Versuch 0808	19_1	Versuch 0808	19_1	Versuch 0808	19_2
Probe vor Ve	rsuch genom.	Pr. während	Ver. genom.	Pr. nach Vers	such genom.	Pr. nach Vers	such genom.
ca1_1a	CV-Wert 0,30	ca1_2a	Cv-Wert 0,35	ca1_3a	Cv-Wert 0,43	ca1_4a	Cv-Wert 0,47
Scher	Schub	Scher	Schub	Scher	Schub	Scher	Schub
42,52	3,07	42,40	1,97	42,37	1,84	42,37	1,71
65,84	3,49	65,63	2,20	65,58	2,14	65,60	1,96
93,88	4,42	93,60	2,94	93,53	2,82	93,55	2,63
117,07	5,33	116,73	3,64	116,64	3,55	116,65	3,36
145,10	6,12	144,70	4,28	144,59	4,24	144,61	4,01
168,46	6,78	168,01	4,71	167,88	4,72	167,90	4,44
196,27	7,41	195,76	5,23	195,61	5,21	195,64	4,96
168,42	6,69	168,00	4,69	167,88	4,58	167,91	4,47
145,04	6,03	144,70	4,22	144,58	4,19	144,61	4,00
117,00	5,17	116,72	3,55	116,64	3,53	116,65	3,33
93,81	4,23	93,59	2,80	93,53	2,76	93,54	2,62
65,78	3,27	65,63	2,06	65,59	2,10	65,60	1,92
42,47	2,74	42,38	1,79	42,36	1,80	42,36	1,67



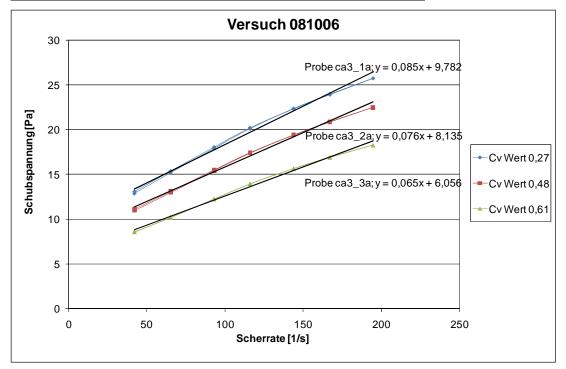
11.5.2. Rheometerversuch 080829_3

Versuch 0809 Probe vor Ve	_	Versuch 0809 Probe vor Ve	_	Versuch 0809 Pr. nach Vers	_	Versuch 0809 Pr. nach Vers	_
ca2_1a	Cv-Wert 0,48	ca2_1b	Cv Wert 0,48	ca2_2a	Cv Wert 0,48	ca2_2b	CV Wert 0,48
Scher	Schub	Scher	Schub	Scher	Schub	Scher	Schub
42,26	4,87	42,20	4,84	42,17	2,67	42,15	2,79
65,42	5,81	65,33	5,79	65,28	3,10	65,25	3,27
93,28	7,23	93,16	7,25	93,09	4,03	93,05	4,22
116,32	8,55	116,18	8,50	116,08	4,91	116,03	5,15
144,19	9,86	144,01	9,77	143,89	5,74	143,84	6,01
167,41	10,79	167,20	10,63	167,06	6,32	167,00	6,67
195,04	11,80	194,81	11,52	194,65	6,96	194,59	7,29
167,37	10,75	167,18	10,45	167,05	6,30	167,00	6,62
144,15	9,76	143,98	9,55	143,87	5,69	143,83	6,01
116,27	8,44	116,14	8,25	116,07	4,87	116,02	5,11
93,23	7,11	93,13	7,01	93,08	3,93	93,03	4,15
65,38	5,60	65,31	5,56	65,26	3,01	65,24	3,20
42,23	4,63	42,19	4,59	42,16	2,55	42,14	2,69



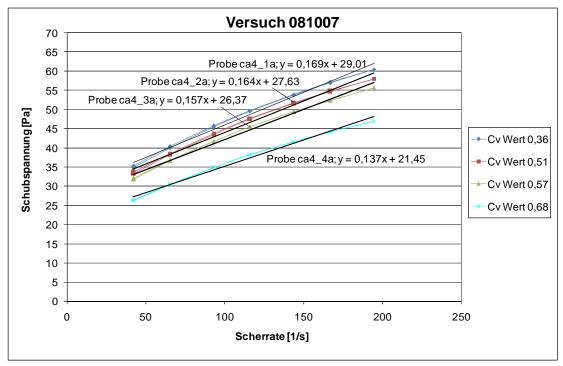
11.5.3. Rheometerversuch 081006

Versuch 0810 Pr. nach Vers		Versuch 0810 Pr. nach Vers	_	Versuch 0810 Pr. nach Vers	_
ca3_1a	Cv Wert 0,27	ca3_2a	Cv Wert 0,48	ca3_3a	Cv Wert 0,61
Scher	Schub	Scher	Schub	Scher	Schub
42,21	13,11	42,17	11,16	42,15	8,62
65,34	15,38	65,29	13,14	65,26	10,23
93,18	18,07	93,09	15,54	93,05	12,27
116,20	20,23	116,08	17,46	116,04	13,93
144,04	22,33	143,89	19,43	143,85	15,64
167,23	23,93	167,07	20,90	167,01	16,90
194,84	25,75	194,67	22,52	194,59	18,24
167,21	23,99	167,06	20,87	167,01	16,87
144,00	22,37	143,88	19,41	143,83	15,63
116,15	20,13	116,06	17,40	116,02	13,94
93,13	17,92	93,06	15,45	93,03	12,23
65,30	15,21	65,26	13,00	65,24	10,20
42,18	12,89	42,15	11,00	42,14	8,57



11.5.4. Rheometerversuch 081007

Versuch 0810	07_1	Versuch 0810	07_2	Versuch 0810	07_2	Versuch 0810	07_3
Pr. während	Ver. genom.	Pr. während	Ver. genom.	Pr. nach Vers	such genom.	Pr. nach Vers	such genom.
ca4_1a	Cv Wert 0,36	ca4_2a	Cv Wert 0,51	ca4_3a	Cv Wert 0,57	ca4_4a	Cv Wert 0,68
Scher	Schub	Scher	Schub		Schub	Scher	Schub
42,14	35,24	42,13	33,65	42,13	32,07	42,13	26,46
65,24	40,33	65,23	38,55	65,22	36,75	65,23	30,48
93,03	45,73	93,02	43,81	93,02	41,75	93,01	34,86
116,01	49,76	116,00	47,70	115,99	45,53	115,99	38,20
143,81	53,96	143,80	51,79	143,78	49,46	143,78	41,63
166,97	57,09	166,96	54,76	166,94	52,37	166,94	44,17
194,55	60,50	194,52	58,04	194,51	55,60	194,51	47,00
166,96	56,97	166,94	54,66	166,93	52,35	166,93	44,16
143,79	53,80	143,77	51,55	143,76	49,42	143,77	41,59
115,98	49,53	115,98	47,45	115,97	45,47	115,97	38,14
93,00	45,43	92,99	43,48	92,99	41,66	92,99	34,80
65,21	39,94	65,21	38,23	65,20	36,62	65,21	30,38
42,12	34,80	42,12	33,22	42,12	31,88	42,12	26,31



11.5.5. Mittelwerte aller Rheometerversuche

