

Universität für Bodenkultur

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Institut für Alpine Naturgefahren

**Parametrisierung von numerischen
Mur-Simulationsmodellen durch Laborversuche**

Masterarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

eingereicht von:
Lukas Delago

Betreuer:
Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Hübl

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Roland Kaitna

Wien, 2016



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner anderen Stelle vorgelegt.

Unterschrift:

Datum, Ort:

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Menschen danken die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Dr. Roland Kaitna dank ich für sein offenes Ohr bei jeglichen Schwierigkeiten und die schnellen Rückmeldungen.

Bei Martin Falkensteiner und Ing. Friedrich Zott bedank ich mich für die Unterstützung im Labor.

Daniel Beiter dank ich für die Matlab Einführungen und die ständigen konstruktiven Diskussionen.

Monika und dem IAN-Team dank ich für das angenehme Arbeitsklima am Institut.

Meinen Studienkolleg_innen und Freund_innen die mich auch in schwierigen Zeiten stets Unterstützt haben.

Auch dem Tüwi-Verein möcht ich für die erlernten sozialen Fähigkeiten und die gute Ablenkung nach einem langen Uni-Tag danken.

Meinen Eltern möcht ich danken, dass sie mir dieses Studium ermöglicht haben und für ihre Unterstützungen in jeglicher Hinsicht.

Zum Schluss möchte ich meiner Familie Linda und Tilia danken für ihre Geduld und Bestärkung in meinen Vorhaben.

ABSTRACT

Debris flows are one of the dangerous mass movement processes in the Alps. Debris flows are a fast moving water-sediment-mixtures with a flow depth exceeding that of a typical flood event in the respective torrent. In debris flow hazard assessment the use of numerical simulation models is becoming more and more common, especially in order to predict the flow and deposition behaviour. The flow resistance parameters of such models are currently determined from back-calculation of known events and still subject to great uncertainty. To narrow down the rheological model parameters, in this master thesis samples of four well-observed debris flow events in catchment areas of different geological setting were investigated using a vertically rotating drum. The rotating drum has a diameter of 2,46 m and a flume width of 0.45 m. The slow rotation creates a wave (surge), allowing continuous recording of data. For each experiment the average flow height, the basal normal stress and pore water pressure, as well as the torque and the flow velocity are recorded. For the experiments mixtures with varying maximum particle diameters ($d_{\max} = 16, 31.5 \text{ and } 63 \text{ mm}$) and varying volumetric sediment concentrations (C_v) were tested at varying speed levels. An important aspect in this study was the development of an automated data processing tool.

It was possible to derive parameters for the Bingham model for mixtures with a fines fraction up to $0.04 \text{ mm} > 9\%$. The sample material of the Wäldletobel watershed, with its fines fraction of only 4-7%, did not form a water-debris mixture at velocities below 0.9 or 1.3 m/s. Consequently, the data gathered was insufficient and no rheologic interpretation was possible.

Based on the case study of the Firschitzbach watershed, it was found that the Bingham model parameters depend not only on the volumetric sediment concentration, but also on maximum grain sizes of the sub-samples tested in the experiments. The extrapolation of Bingham parameters for the complete grain size did not provide credible results.

KURZFASSUNG

Muren gehören zu den gefährlichsten Massenverlagerungsprozessen in den Alpen. Dabei handelt es sich um ein schnellfließendes, oft sehr zähflüssiges Wasser-Feststoff-Gemisch. Für die Gefahrenbeurteilung werden vermehrt numerische Mur-Simulationsmodelle eingesetzt, speziell um das Fließ- und Ablagerungsverhalten vorherzusagen. Die Bestimmung der Fließwiderstandsparameter beruht aktuell auf Rückrechnung bekannter Ereignisse und ist noch mit einer großen Unsicherheit behaftet.

Um die rheologischen Modellparameter einzugrenzen, wurden in dieser Masterarbeit Proben von vier gut dokumentierten Murgängen unterschiedlicher geologischer Einzugsgebiete mit Hilfe einer Trommelversuchsanlage untersucht. Die vertikal rotierende Trommel weist einen Durchmesser von 2,46 m und eine Rinnenbreite von 0,45 m auf. Durch die Rotation entsteht eine Mur-Welle und es können kontinuierlich Daten aufgenommen werden. Mit Hilfe der Sensoren werden die mittlere Höhe, die basale Normalspannung und der Porenwasserdruck, sowie das Drehmoment, und die Fließgeschwindigkeit aufgezeichnet. Die Versuche in dieser Studie wurden mit unterschiedlichen maximalen Korndurchmessern ($d_{\max} = 16, 31.5 \text{ und } 63 \text{ mm}$), unterschiedlichen volumetrischen Sedimentkonzentrationen (C_v) und verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt. Ein wichtiger Aspekt der Arbeit war die Automatisierung der Datenauswertung.

Bei jenen Gemischen, die einen Feinanteil ($d < 0,04 \text{ mm}$) von $> 9\%$ aufweisen, konnten Parameter für das Bingham Modell abgeleitet werden. Beim Material des Wäldletobels, der einen Feinanteil von nur $4 - 7\%$ aufweist, kam es erst ab einer Geschwindigkeit von $0,9$ bzw. $1,3 \text{ m/s}$, abhängig vom maximalen Korndurchmesser, zu einer Durchmischung des Wasser-Feststoff-Gemischs. Durch die zu geringe Datenmenge konnte keine Anpassung vorgenommen werden. Die Modellparameter für die Simulationssoftware Flo-2d konnten nur für einzelne Korndurchmesser bestimmt werden, da das Fließverhalten der Mischungen nicht nur von der

volumetrischen Sedimentkonzentration, sondern auch vom maximalen Korndurchmesser abhängt. Die Extrapolation der Firschnitzbach Daten auf die gesamte Kornverteilung lieferte keine realistischen Ergebnisse.

INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung.....	V
ABSTRACT	VII
KURZFASSUNG.....	IX
INHALTSVERZEICHNIS	XI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XIV
TABELLENVERZEICHNIS	XX
1 EINLEITUNG	1
1.1 Muren.....	1
1.2 Gefahrenbeurteilung von Muren.....	4
Fließ- und Ablagerungsverhalten	7
1.3 Zielsetzung	10
2 RHEOLOGISCHE GRUNDLAGEN	11
2.1 Rheologische Modelle von Flüssigkeiten.....	11
2.2 Rheologische Modelle von Muren.....	15
Bingham Modell.....	15
2.3 Numerische Simulationssoftware Flo-2d.....	17
3 METHODEN	20
3.1 Experiment.....	20
3.1.1 Rotierende Trommel.....	20
3.1.1.1 Normal- und Schubspannung	22
3.1.1.2 Porenwasserdrucksensor	23

3.1.1.3	Laser	23
3.1.1.4	Mittlere Geschwindigkeit.....	24
3.1.2	Versuchsmaterial	25
3.1.3	Volumetrische Sedimentkonzentration	31
3.2	Datenaufbereitung	32
3.2.1	Überblick.....	32
3.2.2	Automatisierte Berechnung der Fließparameter	34
3.2.2.1	Bereinigung.....	35
3.2.2.2	Struktur	35
3.2.2.3	Mittelwert & Standardabweichung	35
3.2.2.4	Parameter	36
3.2.3	Video-Analyse.....	40
3.2.4	Regression	41
4	ERGEBNISSE UND INTERPRETATION	45
4.1	Firschnitzbach.....	47
4.1.1	Versuchsreihe „fb2“	47
4.1.2	Versuchsreihe „fb3“	52
4.1.3	Versuchsreihe „fb4“	57
4.1.4	Versuchsreihe „fb5“	61
4.1.5	Versuchsreihe „fb6“	64
4.2	Mühlbach	68
4.2.1	Versuchsreihe „mb1“	68
4.2.2	Versuchsreihe „mb2“	72
4.3	Schauflerbach	76
Versuchsreihe „ws1“	76	
4.4	Wäldletobel	80
4.5	Vergleiche der Versuche	83
4.5.1	Firschnitzbach	83
4.5.2	Mühlbach	89
4.5.3	Vergleich der Versuche mit einen D_{\max} von 31,5 mm.....	90
4.5.4	Vergleich der Versuche mit einen D_{\max} von 63 mm.....	92
5	DISKUSSION.....	95

6	SCHLUSSFOLGERUNG	100
7	LITERATURVERZEICHNIS.....	102
	ANHANG	105
	Kornverteilungen	105
	Firschnitzbach	105
	Wäldletobel.....	106
	Mühlbach.....	107
	Schauflerbach.....	108
	Matlab-Skript.....	109
	Master.....	109
	get_pars_d.....	110
	regression_sdens_d.....	113
	regression_d_2	115
	video_read.....	116
	torquefunktion_degwinmat	117
	Anmerkungen für die Durchführung der Matlab-Skript	117
	Trommel-Versuchsanleitung	120

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Hauptbestandteile eines Murganges in einem Drei-Phasen-Diagramm, im Vergleich zu anderen schnellen Verlagerungsprozessen (nach Philipps und Davies, 1991; modifiziert Weber, 2004).....	3
Abbildung 2: Links: Typischer Längsschnitt einer Mure (Rickenmann & Kaitna, 2010). Rechts: Schematische Ansicht der Korngrößenaggregation (Iverson , 2005).....	4
Abbildung 3: Wichtigste Aspekte der Gefahrenbeurteilung von Muren (Rickenmann, 2001).....	5
Abbildung 4: Berechnungsreihenfolge von empirischen Ansätzen zur Abschätzung der wichtigsten Murparameter (Rickenmann, 1999).....	8
Abbildung 5: Ableitung von rheologischen Parametern (Loiskandl, 2011)....	11
Abbildung 6: Berechnung der Scherfestigkeit eines Fluids bei hydrostatischer Druckverteilung in einem unendlich breiten Gerinne (Schneiderbauer, 2006).....	13
Abbildung 7: Fließdiagramm (Links) und Viskositätsdiagramm (Rechts) einiger idealisierten Flüssigkeiten(verändert nach Schatzmann, 2005).	14
Abbildung 8: Vertikale Geschwindigkeitsverteilung in einer Flüssigkeit mit Grenzschubspannung (Modifiziert nach Kaitna et al., 2007).....	16
Abbildung 9: Links: Seitenansicht der rotierenden Trommel. Rechts: Querschnitt des Versuchaufbaus (Kaitna et al., 2007).....	21
Abbildung 10: Frontansicht der Trommel (links) und schematische Darstellung der aufgenommenen Daten (rechts).	22
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Sensorblöcke für die Erfassung der Normalspannung (links) und der Schubspannung (rechts) (Kaitna und Rickenmann, 2007).....	23

Abbildung 12: Links: Ansicht der Trommelrinne. Im Vordergrund der Laser. Im Hintergrund die Normal- und Schubspannungsplatten sowie im oberen Bereich der Abstreifer. Rechts: Detail der Rauheitsmatte. ...	24
Abbildung 13: Position der Videokamera oberhalb der Wellenfront.	25
Abbildung 14: Kornverteilungen des Gesamten Murgangmaterials.	26
Abbildung 15: Kornverteilung des gesamten Materials (Schwarz) und für die jeweiligen Versuche bei den maximalen Korndurchmessern für den Firschnitzbach.	27
Abbildung 16: Kornverteilung des gesamten Materials (Schwarz) und für das Versuchsmaterial mit einem maximalen Korndurchmesser von 31,5 mm (Rot) des Mühlbachs.	28
Abbildung 17: Kornverteilung des gesamten Materials (Schwarz) und für das Versuchsmaterial mit einem maximalen Korndurchmesser von 31,5 mm (Blau) des Schauflerbachs.	29
Abbildung 18: Kornverteilung des gesamten Materials (Schwarz) und für das Versuchsmaterial mit einem maximalen Korndurchmesser von 16 mm (Grün), 31,5 mm (Rot) und 63 mm (Blau) des Wäldletobels.	30
Abbildung 19: Übersicht Datenverarbeitung. Inputdaten - Orange; Transformation - Blau (Matlab) und Schwarz; Outputdaten - Grün (Winkel $\theta = \alpha$).	33
Abbildung 20: Übersicht und Abfolge der Matlab-Skripts. (Schwarz - Bearbeitungsordner)	34
Abbildung 21: Skizze des durch die Abweichung des Schwerpunktes von der Vertikalen entstandenen Winkel α (Kaitna et al., 2007).	37
Abbildung 22: Beispiel der grafischen Darstellung der Sensorenwerte (Mühlbach, 1. Versuchsreihe, 3. C_v -Wert).	40
Abbildung 23: Erster Schritt des Iterationsverfahren mit $H_{plug} = 0$ in der linken Abbildung und Rechts die Annäherung an die gesuchte Höhe der ungescherten Zone.	42

Abbildung 24: Rheogramm zur Ermittlung der Grenzs Schubspannung (τ_{yi}) und der Viskosität (η) bei einem C_V -Wert und 6 unterschiedlichen Geschwindigkeiten (fb2_150220_04).....	43
Abbildung 25: Darstellung der Exponentialfunktion für die Alpha- und Beta-Werte. Links mit sss_geo_sdens und rechts mit sss_torque (fb2).	44
Abbildung 26: Fließdiagramm von fb2 bei 6 verschiedenen C_V - Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.....	48
Abbildung 27: Fließdiagramm von fb2 bei 7 verschiedenen C_V -Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde...	48
Abbildung 28: Frames aus der Video-Analyse. Von links nach rechts Oben: fb2_1_v1 bis v3 (kein Fließen) und Unterhalb zum Vergleich fb2_2_v1 (zähflüssiges Fließen) und fb2_3_v1 (eindeutiges Fließen) von links nach rechts.	50
Abbildung 29, 1-4: Ansicht der Trommelrinne. Wippen; Frames von fb2_1_v3.	51
Abbildung 30: Die Grenzs Schubspannungen gegen die C_V -Werte aus Tabelle 4, mit der exponentiellen Anpassung.....	51
Abbildung 31: Die Viskosität gegen die C_V -Werte aus Tabelle 4, mit der exponentiellen Anpassung.....	52
Abbildung 32: Fließdiagramm von fb3 bei 5 verschiedenen C_V - Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.....	53
Abbildung 33: Fließdiagramm von fb3 bei 5 verschiedenen C_V - Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde...	53
Abbildung 34: Ansicht der Trommelrinne. Einseitige Aggregation der Grobkomponenten bei fb3_1_v2 (links) und fb3_1_v3 (rechts).....	54
Abbildung 35: Ansicht der Trommelrinne. Steinflug; Frames von fb3_2_v5.	55
Abbildung 36: Die Grenzs Schubspannungen gegen die C_V -Werte aus Tabelle 4, mit der exponentiellen Anpassung.....	56

Abbildung 37: Die Viskosität von fb3 gegen die C_v -Werte aus Tabelle 4, mit der exponentiellen Anpassung.....	56
Abbildung 38: Fließdiagramm von fb4 bei 4 verschiedenen C_v -Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.....	57
Abbildung 39: Fließdiagramm von fb4 bei 4 verschiedenen C_v -Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde...	58
Abbildung 40: Die Grenzs Schubspannungen gegen die C_v -Werte aus Tabelle 6, mit der exponentiellen Anpassung.....	59
Abbildung 41: Die Viskosität gegen die C_v -Werte aus Tabelle 6, mit der exponentiellen Anpassung.....	60
Abbildung 42: Fließdiagramm von fb5 bei 4 verschiedenen C_v -Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.....	61
Abbildung 43: Fließdiagramm von fb5 bei 4 verschiedenen C_v -Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde...	62
Abbildung 44: Die Grenzs Schubspannungen gegen die C_v -Werte aus Tabelle 4, mit der exponentiellen Anpassung.....	63
Abbildung 45: Die Viskosität gegen die C_v -Werte aus Tabelle 4, mit der exponentiellen Anpassung.....	63
Abbildung 46: Fließdiagramm von fb6 bei 5 verschiedenen C_v -Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.....	64
Abbildung 47: Fließdiagramm von fb6 bei 5 verschiedenen C_v -Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde...	65
Abbildung 48: Die Schubspannung gegen die C_v -Werte aus Tabelle 8, mit der exponentiellen Anpassung.....	66
Abbildung 49: Die Viskosität gegen die C_v -Werte aus Tabelle 8, mit der exponentiellen Anpassung.....	67
Abbildung 50: Fließdiagramm von mb1 bei 5 verschiedenen C_v -Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.	68

Abbildung 51: Fließdiagramm von mb1 bei 5 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde.....	69
Abbildung 52: Die Schubspannung gegen die C_v -Werte aus Tabelle 9, mit der exponentiellen Anpassung.....	70
Abbildung 53: Die Viskosität gegen die C_v -Werte aus Tabelle 9, mit der exponentiellen Anpassung.....	71
Abbildung 54: Fließdiagramm von mb2 bei 3 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.	72
Abbildung 55: Fließdiagramm von mb2 bei 5 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde.....	73
Abbildung 56: Die Schubspannung gegen die C_v -Werte aus Tabelle 10, mit der exponentiellen Anpassung.....	74
Abbildung 57: Die Viskosität gegen die C_v -Werte aus Tabelle 10, mit der exponentiellen Anpassung.....	75
Abbildung 58: Fließdiagramm von ws1 bei 3 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.	76
Abbildung 59: Fließdiagramm von ws1 bei 4 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde.....	77
Abbildung 60: Video-Frame von ws1_4_1. Rechts mit Stromlinien.....	78
Abbildung 61: Die Schubspannung gegen die C_v -Werte aus Tabelle 11, mit der exponentiellen Anpassung.....	79
Abbildung 62: Die Viskosität gegen die C_v -Werte aus Tabelle 11, mit der exponentiellen Anpassung.....	79

Abbildung 63: Frames von wt1_1 aus der Video-Analyse. Von links nach rechts: Oben v1, v2, v3 und unten v4, v5.....	81
Abbildung 64: Schubspannung gegen die Trommelgeschwindigkeit aller Versuche des Wäldletobels. Wobei wt1 einen $d_{\max} = 31,5$ mm, wt2 einen $d_{\max} = 63$ mm und wt3 einen $d_{\max} = 16$ mm aufweist.....	82
Abbildung 65: Frames aus der Video-Analyse. Von links nach rechts: wt2 v1-4.....	83
Abbildung 66: Über den Drehmomentflansch ermittelte Grenzscherubspannungen aller Versuche des Firschnitzbachs (> kennzeichnet jene Versuche mit mehr Material).....	84
Abbildung 67: Über die Normalspannung ermittelte Grenzscherubspannungen aller Versuche des Firschnitzbachs (> kennzeichnet jene Versuche mit mehr Material).....	85
Abbildung 68: Über den Drehmomentflansch ermittelte Viskosität aller Versuche des Firschnitzbachs (> kennzeichnet jene Versuche mit mehr Material).....	85
Abbildung 69: Über die Normalspannung ermittelte Viskosität aller Versuche des Firschnitzbachs (> kennzeichnet jene Versuche mit mehr Material).	86
Abbildung 70: Die Alpha-Werte für die Grenzscherubspannung aller Versuche des Firschnitzbachs.	87
Abbildung 71: Die Beta-Werte für die Grenzscherubspannung aller Versuche des Firschnitzbachs.	87
Abbildung 72: Die Alpha-Werte für die Viskosität aller Versuche des Firschnitzbachs.	88
Abbildung 73: Die Beta-Werte für die Viskosität aller Versuche des Firschnitzbachs.	88
Abbildung 74: Die ermittelten Grenzscherubspannungen des Mühlbachs.	89
Abbildung 75: Die ermittelten Viskositäten des Mühlbachs.	90

Abbildung 76: Die Grenzs Schubspannungen aus den Versuchen mit $D_{\max}=31,5$ mm.	91
Abbildung 77: Die Viskositäten aus den Versuchen mit $D_{\max}=31,5$ mm.	91
Abbildung 78: Die Grenzs Schubspannungen aus den Versuchen mit $D_{\max}=63$ mm.	93
Abbildung 79: Die Viskositäten aus den Versuchen mit $D_{\max}=63$ mm.	93

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Überblick des verwendeten Versuchsmaterials.	31
Tabelle 2: Durch <i>get_pars_d</i> erstellte Excel-Tabelle für einen Wassergehalt (Weitere nicht Dargestellte Spalten: Oberflächengeschwindigkeit v_o [m/s] und Schüttdichte ρ_s [kg/m ³]).	37
Tabelle 3: Übersicht der durchgeführten Versuche.	46
Tabelle 4: Viskosität η und Grenzs Schubspannung τ_{Gr} von fb2 mit den jeweiligen C_v -Werten.	49
Tabelle 5: Viskosität η und Grenzs Schubspannung τ_{Gr} von fb3 mit den jeweiligen C_v -Werten.	55
Tabelle 6: Viskosität η und Grenzs Schubspannung τ_{Gr} von fb4 mit den jeweiligen C_v -Werten.	59
Tabelle 7: Viskosität η und Grenzs Schubspannung τ_{Gr} von fb5 mit den jeweiligen C_v -Werten.	62
Tabelle 8: Viskosität η und Grenzs Schubspannung τ_{Gr} von fb6 mit den jeweiligen C_v -Werten.	66
Tabelle 9: Viskosität η und Grenzs Schubspannung τ_{Gr} von mb1 mit den jeweiligen C_v -Werten.	70

Tabelle 10: Viskosität η und Grenzscherungsspannung τ_{Gr} von mb2 mit den jeweiligen C_v -Werten.....	74
Tabelle 11: Viskosität η und Grenzscherungsspannung τ_{Gr} von ws1 mit den jeweiligen C_v -Werten.....	78

1 EINLEITUNG

Durch Muren kommt es speziell in den Alpen immer wieder zu großen Schäden und auch zu Todesfällen¹. Die Auslösemechanismen und die physikalischen Vorgänge eines Murganges sind sehr komplex und werden nur zum Teil verstanden. In diesem Kapitel wird auf den Stand der Technik bezüglich Muren und deren Gefahrenbeurteilung eingegangen, sowie auf das sich daraus resultierende Ziel dieser Arbeit.

1.1 Muren

Muren (auch Rufen oder Laui genannt) gehören zu den hydrogeologischen Massenverlagerungsprozessen des „Teilsystems Natur“. Wenn sich ein Naturphänomen (wie der Murgang) mit dem „Teilsystem Mensch“ überlagert kann der Prozess zu einer Gefahr werden. In den Alpen kommt es jährlich zu Murereignissen, da die Disposition für Massenverlagerungsprozesse durch die geomorphologischen Gegebenheiten relativ hoch ist.

Um auf die Gefahr von Murgängen eingehen zu können, wird versucht die Mechanismen des Prozesses zu untersuchen und zu verstehen, sowie die potentiell gefährdeten Gebiete auszuweisen. (Wagner & Suda, 2006; Zimmerman, 1996)

Infolge von Starkregenereignissen und/oder durch die Schneeschmelze kommt es zu einer Steigerung des Abflusses und damit auch zu einer erhöhten Mobilisierung von Feststoffen in Wildbächen oder alpinen Flüssen. Je nach Wasser-Feststoff-Gehalt werden die Verlagerungsprozesse (mit steigender Feststoffkonzentration) in:

- Hochwasser

¹ u.a. 24.07.15 Rauris, Pinzgau (AT), Sperre der einzigen Verbindungsstraße; 05.08.15 Cadore, Belluno (IT), 3 Todesfälle;

- Fluviatiler Feststofftransport
- Murartiger Feststofftransport
- Murgang

unterteilt (Hübl et al., 2011; ONR 24800).

Nach der Definition der ONR 24800 (2009) handelt es sich bei Muren im engeren Sinn um ein schnellfließendes, sehr zähflüssiges² Wasser-Feststoff-Gemisch mit einer hohen Feststoffkonzentration an der Front. Murgänge unterscheiden sich deutlich vom Hochwasserabfluss durch ein schubartiges Fließverhalten und durch bis zu 100-mal größere Abflüsse im gleichen Gerinne. Für eine Entstehung sind Wasser, genügend Lockermaterial und eine Neigung von 25 – 30 Prozent nötig. Bei Vorhandensein von murgang-fördernden Faktoren, wie z. B. Engstellen mit Verklauungsgefahr ist bereits eine Neigung von 15 – 25 Prozent ausreichend (Rickenmann, 2001, 2003, 2007).

Die Kornzusammensetzung kann sehr stark von Mure zu Mure variieren, aber auch innerhalb eines Murschubes. Wie in Abbildung 1 ersichtlich bestehen Muren vereinfacht aus den drei Hauptkomponenten: Wasser, Feinmaterial und groben Steinen. Wenn man die Zusammensetzung und das Fließverhalten betrachtet, sind Muren eine Mischung aus den drei Eckpunkten Hochwassern, Erdbeben und Fels- oder Bergstürzen (Abbildung 1).

Muren mit einem hohen Feinanteil werden oft als Schlammströme bezeichnet und wenn es sich dabei um vulkanisches Material handelt als Lahar. Bei den granularen Murgängen überwiegt der Grobanteil und das Fließverhalten wird wesentlich durch Blöcke und Steine bestimmt. Im Unterschied zu den oberhalb beschriebenen Murgängen, die sich innerhalb von Gerinnen bewegen, treten Hangmuren auf Hängen und Böschungen auf. Dabei kommt es meist zu einer anfänglichen Rutschung und durch den hohen

² Nicht-Newton'sches Fließverhalten

Wassergehalt des Bodens zu einer Verflüssigung des Materials. (Hübl et al., 2011; Rickenmann et al., 2010)

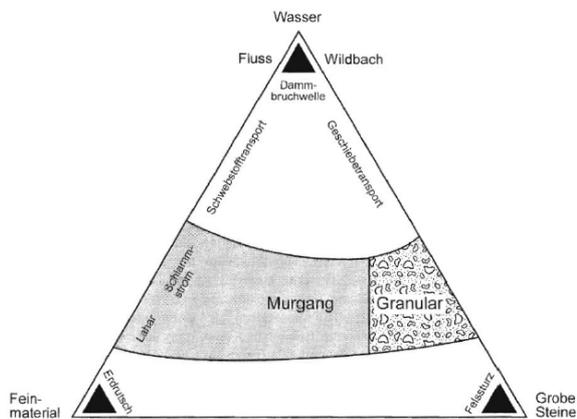


Abbildung 1: Hauptbestandteile eines Murganges in einem Drei-Phasen-Diagramm, im Vergleich zu anderen schnellen Verlagerungsprozessen (nach Philipps und Davies, 1991; modifiziert Weber, 2004).

Die Feststoffkonzentration ändert sich sehr stark innerhalb einer Mure. Der Murkopf weist meist eine hohe Feststoffkonzentration auf mit einer Ansammlung von groben Blöcken. Der Murschwanz charakterisiert sich hingegen durch einen großen Anteil an Wasser (Abbildung 2, Links).

Im rechten Bild von Abbildung 2 können wir die schematische Darstellung einer Korngrößenaggregation sehen. Der Murkopf weist einen niedrigen Porenwasserdruck mit einer Ansammlung und Zirkulation der groben Korngrößen auf. Der flüssigere und feinkörnigere Murschwanz hingegen weist einen niedrigeren Reibungswiderstand, höheren Porenwasserdruck auf und tendiert gegen den Murkopf zu drücken. (Iverson, 1997, 2005; Müllegger, 2011)

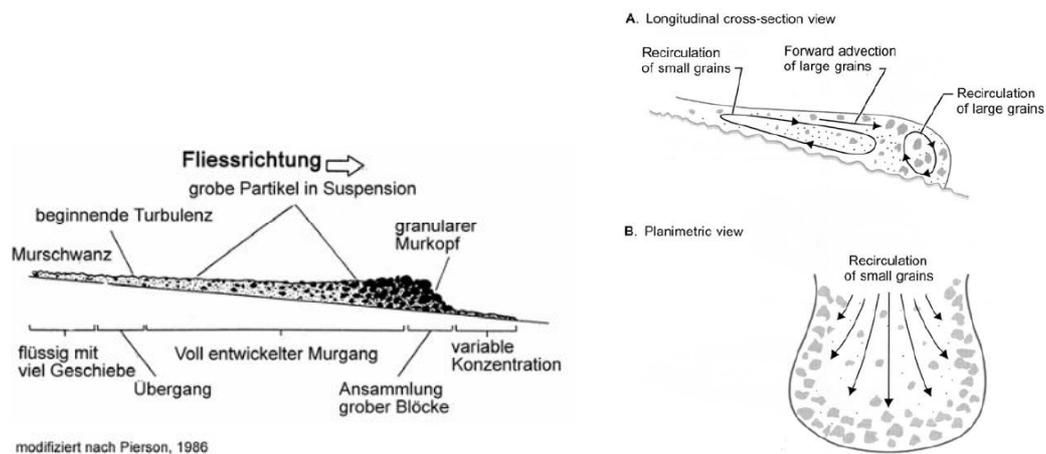


Abbildung 2: Links: Typischer Längsschnitt einer Mure (Rickenmann & Kaitna, 2010). Rechts: Schematische Ansicht der Korngrößenaggregation (Iverson, 2005).

Durch die hohe Dichte des Wasser-Feststoff-Gemisches ($1,6-2,4 \text{ t/m}^3$) und die hohen Geschwindigkeiten (bis zu 15 m/s) weisen Muren ein sehr hohes Schadenspotential auf. Zusätzlich können durch die mitgeführten Blöcke (bis zu 50 Tonnen) sehr hohe Anprallkräfte auftreten (Rickenmann, 1996).

1.2 Gefahrenbeurteilung von Muren

Wie auch bei anderen gravitativen Naturgefahren sind für die Gefahrenbeurteilung von Muren besonders drei Fragen wichtig:

- Mit was für einem Ausmaß ist bei einem Ereignis zu rechnen?
--> **Ereignisgröße**
- Wie häufig kann es zu einem Ereignis kommen?
--> **Eintrittswahrscheinlichkeit**
- Wo kann es zu einem Ereignis kommen?
--> **Fließ- und Ablagerungsverhalten**

Diese Elemente sind alle miteinander verbunden und in Abbildung 3 ist die Interaktion dieser Komponenten schematisch dargestellt (Rickenmann, 2001, 2003).

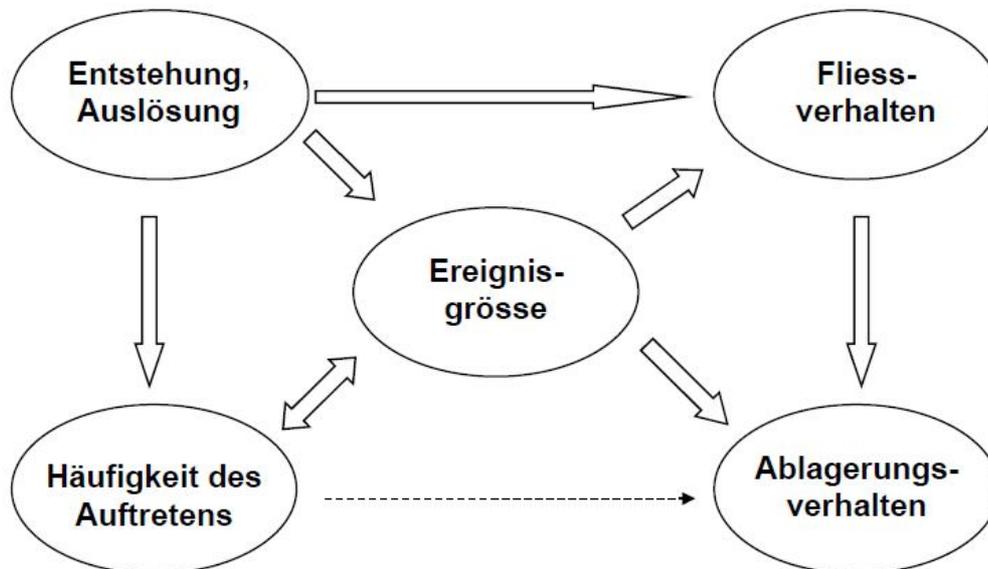


Abbildung 3: Wichtigste Aspekte der Gefahrenbeurteilung von Muren (Rickenmann, 2001).

Die Eigenschaften des Entstehungsorts und der Auslösung sind ausschlaggebend für die Ereignisgröße. Zwischen der Häufigkeit und der Ereignisgröße besteht eine Wechselbeziehung (Magnitude-Frequenz Beziehung). Wenn z.B. in einem Einzugsgebiet die Materialverfügbarkeit begrenzt ist (z.B. „Jungschuttwildbach“ nach Stiny, 1931) kann die Häufigkeit und die Größe von den Erosionen und/oder Ablagerungen von vorangegangener Ereignisse abhängen (Zimmermann et al., 1997). Empirische Analysen zeigen, dass die Fließparameter und die Reichweite von Murgängen stark von der Ereignisgröße und damit auch vom Entstehungsort abhängen. (Rickenmann, 1995, 1999, 2001).

Wie können diese Fragen beantwortet werden?

Ob ein Wildbach überhaupt *murfähig* ist, kann über das Einzugsgebiet abgeschätzt werden. Wichtig für die Murfähigkeit eines Gerinnes ist die

Verfügbarkeit von Feststoffherden innerhalb des Gerinnes oder in Gerinne-Nähe, sowie eine Gerinneneigung mit mindestens 15 Prozent. Zusätzlich kann die Murfähigkeit anhand einer Geländeanalyse und der Interpretation von „Stummen-Zeugen“ (z.B. Levees, Murlappen, u.a.), besonders an den Murkegeln, bestimmt werden.

Die *Ereignisgröße* oder die *Murfracht* kann nur geschätzt werden und erfordert die Verwendung verschiedener Methoden:

- Analyse der Ereignischroniken. Meistens indirekt über die Angabe von Schäden sind Aussagen über das Volumen, die Reichweite und die Abflüsse möglich.
- Mit unterschiedlichen empirischen Modellansätzen welche auf verschiedener Einzugsgebiets-Parameter beruhen, kann die Ereignisgröße (mittlere/maximale) bestimmt werden (u.a. Zeller (1985), Kronfellner-Kraus (1985), Lehmann (1993), Rickenmann (1995), D'Agostino et al. (1996)). Die Ergebnisse der einzelnen Ansätze variiert aber sehr stark.
- Abschätzung des Geschiebepotentials eines Gerinnes. Das Gerinne kann in einzelne Abschnitte unterteilt werden und die Erosionsleistung im Gerinne und in den Hängen (z.B. durch Rutschungen, Unterspülungen,...) wird für jeden Abschnitt³ geschätzt.

Für die Bestimmung der *Ereignishäufigkeit* bzw. der *Eintrittswahrscheinlichkeit* können die Verfahren wie sie z.B. bei Hochwasser verwendet werden, nicht eingesetzt werden. Statistische Auswertungen sind oft nicht möglich, da Muren periodisch auftreten können und die Datengrundlagen recht gering sind. Aussagen über die Häufigkeit sind mittels historischer Daten, sowie Analyse und Interpretation geomorphologische Spuren möglich, aber immer noch mit sehr großer Unsicherheit behaftet.

³ in m³/Laufmeter

Um das *Fließ- und Ablagerungsverhalten* von Muren zu beurteilen, können entweder empirische Ansätze und Schätzformeln oder numerische Simulationsmodelle herangezogen werden. Grundsätzlich geht es dabei um die Abschätzung an welchen Stellen es zu Ausbrüchen kommen kann und wie und in welchem Ausmaß der Kegel überflossen werden kann (Rickenmann, 2007; Zimmermann, 2006).

Fließ- und Ablagerungsverhalten

Empirische Ansätze

Bei der Verwendung von empirischen Ansätzen wird zu Beginn die zukünftige Murfracht M in $[m^3]$ geschätzt. Daraus kann ein grober Maximalabfluss Q_p in $[m^3/s]$ berechnet werden, aus dem sich zusammen mit dem Gerinnegefälle die Fließgeschwindigkeit, v in $[m/s]$ bestimmen lässt. Aus $A = Q_p / v$ ergibt sich der maximal erforderliche Abflussquerschnitt A in $[m^2]$. Durch Vergleiche mit den bestehenden Abflussquerschnitten kann eine mögliche Ausbruchstelle angedeutet werden. Die (totale) Reichweite L in $[m]$ oder die Ablagerungslänge auf dem Kegel L_f in $[m]$ kann grob über die ermittelte Murfracht bestimmt werden.

In Abbildung 4 ist der Zusammenhang der oben beschriebenen Murgangparameter und die vorgeschlagene Berechnungsreihenfolge dargestellt (Rickenmann, 1999).

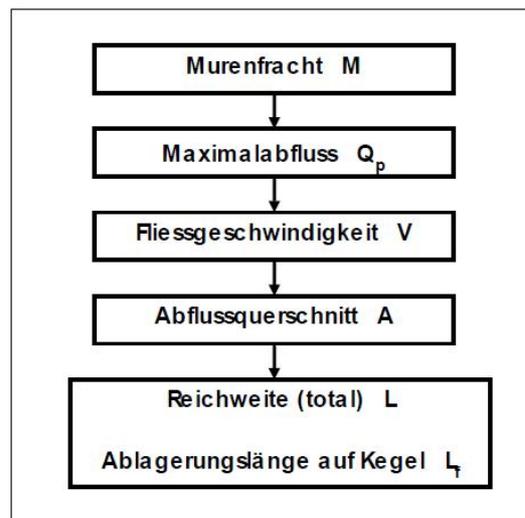


Abbildung 4: Berechnungsreihenfolge von empirischen Ansätzen zur Abschätzung der wichtigsten Murparameter (Rickenmann, 1999).

Modelle für die Murgangsimulation

Auf der Stufe der Gefahrenkarte⁴ im Maßstab 1:50.000 bis 1:25.000 werden immer häufiger für die Ausweisung potentiell gefährdeter Gebiete GIS⁵ basierte Modelle mit relativ einfachen Ansätzen verwendet. Beispiele zu Ansätzen einfacher GIS basierter Modelle werden in Zimmermann et al. (1997) und Gamma (2000) beschrieben. (Rickenmann, 2007; Hübl et al., 2011; Zimmermann, 2006). Bei diesen Modellen wird für die Beurteilung der Fließgeschwindigkeit und der Reichweite ein Massenpunktmodell für das Fließverhalten eines Voellmy Fluids verwendet und die Abschätzung der beiden „Reibungsparameter“ des Voellmy Ansatzes erfolgt mittels früherer Ereignisse (Rickenmann, 2005).

Eine andere Variante um das Fließ- und Ablagerungsverhalten von Murgängen abzuschätzen sind numerische Simulationsmodelle. Simulationsmodelle geben vor allem die Gelegenheit die Ausbreitung eines

⁴ bzw. Gefahrenhinweiskarte in der Schweiz und in Bayern

⁵ Geographisches Informationssystem

zukünftigen Murgangs flächig zu modellieren und zusätzlich dynamische Parameter wie Fließhöhen und Anpralldruck abzuschätzen. Im Gegenzug ist diese Methodik auch mit einem sehr viel höheren Zeitaufwand verbunden und die nötigen Eingangsparameter für die Modelle sind nicht immer vorhanden (Rickenmann, 2001; Gamma, 2000).

Bei den meisten Simulationsmodellen wird das Wasser-Feststoff-Gemisch der Mure als homogene Flüssigkeit betrachtet⁶. Die bekannte Simulationssoftware Flo-2d (O'Brien et al., 1993), basiert auf diesem Ansatz, und kombiniert den Fließwiderstand einer Bingham'schen Flüssigkeit mit einem dispersiven bzw. turbulenter Reibungsterm um den Fließwiderstand des Murgangs darzustellen. Die benötigten rheologischen Parameter für das Bingham Modell können bis zum jetzigen Zeitpunkt aber nur für das feinere Material des Murgangs mittels Laboruntersuchungen bestimmt werden. Der Einfluss der gröberen Bestandteile auf die Rheologie der Gesamtmischung ist schwierig zu quantifizieren (Rickenmann, 2007), da Laborversuche zur Bestimmung der rheologischen Parameter meist nur mit idealisierten Kornzusammensetzungen und maximalen Korngrößen bis zu einigen Millimetern durchgeführt wurden (Rickenmann, 2001).

Eine andere Gruppe betrachtet das Murganggemisch als zwei getrennte Phasen. Durch einfache Ansätze werden Erosion und Ablagerung berücksichtigt. Das Gerinnegefälle und die Eigenschaften des Sohlmaterials bestimmen die Feststoffkonzentration, welche aus dem Abflusshydrographen (Input) resultieren kann. Ein neuer Modellansatz von Iverson & Denlinger (2001) berücksichtigt bodenmechanische Aspekte und Porenwasserdrücke. Die Anwendung dieses Modells ist derzeit noch auf den akademischen Bereich beschränkt und nicht für die Ingenieurspraxis verfügbar.

⁶ „equivalent Fluid approach“

1.3 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es durch Laborversuche rheologische Parameter von unterschiedlichen geologischen Einzugsgebieten zu bestimmen, um anschließend auf die Eingangsparameter des numerischen Simulationsprogramms Flo-2d schließen zu können.

Dafür wird das Material von gut dokumentieren Murgängen aus vier geologisch unterschiedlichen Einzugsgebieten in einer Trommelversuchsanlage mit Materialproben bis zu maximalen Korngrößen von 63 mm untersucht. Anschließend sollen die Modellparameter für Flo-2d bestimmt werden und durch Extrapolation auf die Parameter des Gesamtmaterials geschlossen werden. Ein wichtiger Aspekt der Arbeit ist die Automatisierung der Datenauswertung, damit die Erhebung der Parameter in Zukunft vereinfacht wird.

2 RHEOLOGISCHE GRUNDLAGEN

Die Rheologie ist die Wissenschaft, die sich mit der Verformung und dem Fließverhalten von Materie beschäftigt. Sie umfasst Teilgebiete der Elastizitätstheorie, der Plastizitätstheorie und der Strömungslehre. In dieser Studie ist die Strömungslehre von Interesse. Ein relativ einfaches rheologisches Fließmodell ist das Bingham Modell, welches häufig für die Beschreibung von Muren herangezogen wird und sich in veränderter Weise auch im numerischen Mur-Simulationsmodell Flo-2d wiederfindet.

2.1 Rheologische Modelle von Flüssigkeiten

Betrachtet man in einer sich bewegenden Flüssigkeit zwei zu einander parallele Flächen A mit dem Abstand dn und mit dem Geschwindigkeitsunterschied dv , so müssen in den beiden Flächen entgegengesetzte Kräfte wirken um den Geschwindigkeitsunterschied aufrecht zu erhalten (Abbildung 5).

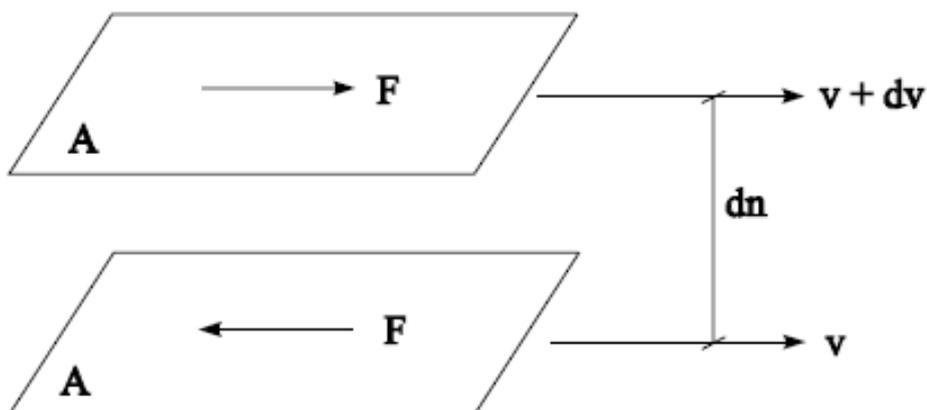


Abbildung 5: Ableitung von rheologischen Parametern (Loiskandl, 2011).

Jene Kräfte, die die Widerstandskraft infolge der Viskosität überwinden, sind proportional zu der Fläche A und dem Geschwindigkeitsgradienten dv/dn . Nach der Division durch A erhalten wir den Newton'schen Ansatz für die Schub- oder Scherspannung τ [Pa]:

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dn} \quad \text{Gl.1}$$

Der Geschwindigkeitsgradient dv/dn entspricht der Scherrate $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] an einem Flüssigkeitselement. Der Proportionalitätsfaktor η wird als dynamische Viskosität mit der Einheit [Pa*s] bezeichnet. Die dynamische Viskosität ist eine stark temperaturabhängige Stoffgröße. Bezieht man die dynamische Viskosität η auf die Dichte ρ bezeichnet man sie als kinematische Viskosität ν mit der Einheit [m^2/s].

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \text{Gl.2}$$

Die Abhängigkeit vom Druck kann bei Wasser vernachlässigt werden, Salze und Verunreinigungen hingegen können die Viskosität stark beeinflussen (Schatzmann, 2005; Loiskandl, 2011).

Bei der Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung und einem unendlich breitem Gerinne errechnet sich die Scherspannung mit (Abbildung 6):

$$\tau = \rho g h \sin\theta \quad \text{Gl.3}$$

wobei ρ die Dichte des Gemisches ist, h die Tiefe an der die Schubspannung ermittelt wird, θ die Sohlneigung und g die Gravitation darstellen.

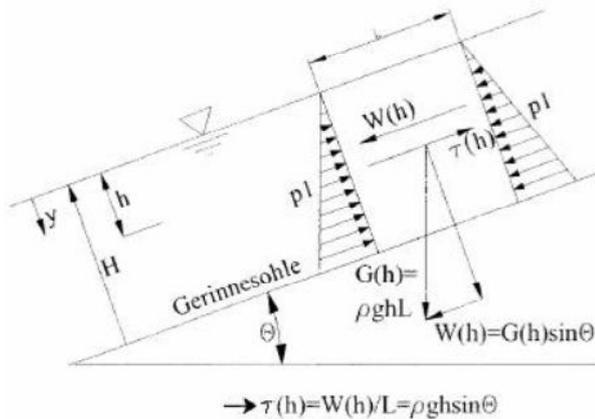


Abbildung 6: Berechnung der Scherfestigkeit eines Fluids bei hydrostatischer Druckverteilung in einem unendlich breiten Gerinne (Schneiderbauer, 2006).

Bei Newton'schen Flüssigkeiten (z.B. Wasser) besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Schubspannung und der Scherrate. Bei den nicht-Newton'schen Flüssigkeiten hingegen, bleibt die Viskosität bei einwirkenden Scherkräften nicht konstant.

Die unterschiedlichen Verhaltensweisen können graphisch mittels dem Fließdiagramm oder dem Viskositätsdiagramm dargestellt werden. Beim Fließdiagramm wird die Schubspannung (τ_y) gegen die Scherrate ($\dot{\gamma}$) aufgetragen, beim Viskositätsdiagramm wird hingegen die Viskosität η gegen die Scherrate ($\dot{\gamma}$) aufgetragen (Abbildung 7).

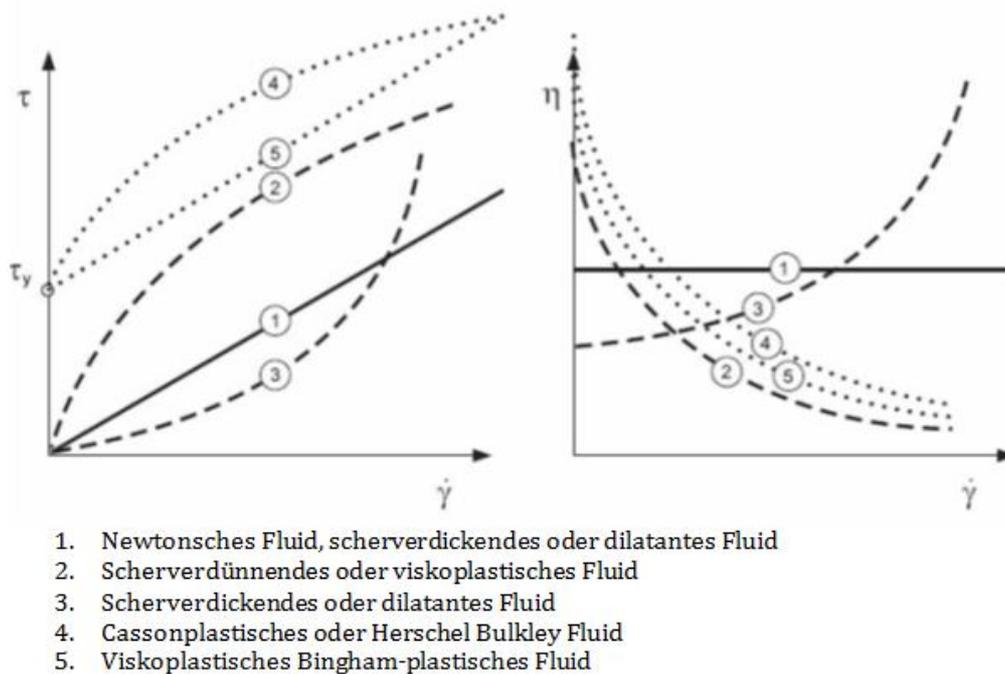


Abbildung 7: Fließdiagramm (Links) und Viskositätsdiagramm (Rechts) einiger idealisierten Flüssigkeiten (verändert nach Schatzmann, 2005).

Bei einem scherverdünnendem oder viskoplastischem Fluid nimmt die dynamische Viskosität mit steigender Belastung ab (z.B. Shampoo). Bei einer Zunahme der dynamischen Viskosität mit steigender Belastung spricht man von einem scherverdickenden oder einem dilatanten Fluid. Die anderen beiden Modelle (Linie 4 und 5) vermögen der Verschiebung, bis zu einem gewissen Grad, Widerstand zu leisten. Dieser Widerstand wird als die Grenzscherubspannung τ_{gr} bezeichnet (Abbildung 7: $\tau_{gr} = \tau_y$).

Wenn mit zunehmender Scherrate der Fließwiderstand abnimmt spricht man von Herschel-Bulkley Flüssigkeiten (z.B. Tonteig). Bingham'sche Flüssigkeiten haben hingegen einen linearen Zusammenhang und stellen eine Vereinfachung des Herschel-Bulkley Modells dar.

Mathematisch lassen sich die ersten drei Modelle wie folgend darstellen:

$$\tau = \eta * \left(\frac{dv}{dy}\right)^n \quad \text{Gl.4}$$

- $n = 1$ newtonsches Fließverhalten (vergleiche Gl.1)
- $n < 1$ pseudoplastisches Verhalten
- $n > 1$ dilatantes Fließverhalten

Das Herschel-Bulkley-Modell wird wie folgend ausgedrückt:

$$\tau = \tau_{gr} + m \left(\frac{dv}{dy} \right)^n \quad \text{Gl.5}$$

wobei beim Bingham-Modell der Faktor $n = 1$ ist und m (die Viskosität) konstant bleibt (Schatzmann, 2005; Kaitna & Rickenmann, 2007; Krawtschuk, 2009).

2.2 Rheologische Modelle von Muren

Für die Beschreibung des Fließverhaltens von Muren gibt es viele verschiedene Ansätze (z.B. Iverson, 1997, 2014; Hungr, 1995; Johnson, 1984). Eine Problematik ist die Anpassung an die geologischen Gegebenheiten (z.B. granularer Murgang versus Schlammstrom), weiteres sind die sich ändernden Bedingungen (wie Wassergehalt, Kornzusammensetzung, u.a.) bereits innerhalb eines einzelnen Murschubes (Kapitel 1.1 Muren) eine große Schwierigkeit.

Bingham Modell

Für die Berechnung von viskosen Muren wird oft das sogenannte Bingham Modell verwendet (z.B. Costa, 1988; Jordan, 1994; Kaitna et al., 2007).

Mathematisch lässt sich das Bingham Modell wie folgt darstellen:

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad \text{Gl.6}$$

τ = Schubspannung [Pa],

τ_y = Bingham Grenzs Schubspannung [Pa],

η = Bingham Viskosität [Pa.s]

$\frac{dv}{dy} = \dot{\gamma}$ = Scherrate [s^{-1}]

Eine wichtige erste Annahme ist, dass man die Mure als ein homogenes Wasser-Feststoff-Gemisch betrachtet. Dieses Einphasenmodell unterstellt eine konstante Viskosität η und eine Grenzschubspannung τ_{Gr} (oder Grenzscherfestigkeit), die erst überwunden werden muss damit es zu einem Fließen kommen kann (Abbildung 7, Linie 5) und beim Unterschreiten der Grenzschubspannung kann das Stoppen einer Flüssigkeit beschrieben werden. Mit dem Newton'schen Ansatz ist dies nicht möglich. Durch dieses Modell ist es außerdem möglich die Bildung von Levées, die Ausbildung eines U-förmigen Gerinnes oder das Vorhandensein einer ungescherten Zone („plug flow“) zu erklären (ungescherte Zone = H_{plug} , Abbildung 8) (Weber, 2004; Johnson, 1970).

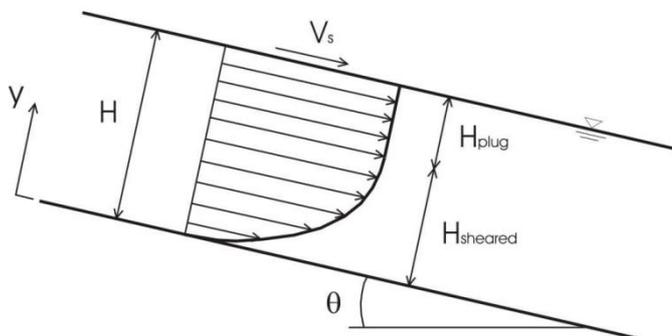


Abbildung 8: Vertikale Geschwindigkeitsverteilung in einer Flüssigkeit mit Grenzschubspannung (Modifiziert nach Kaitna et al., 2007).

Beim Betrachten der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung von einem Bingham Fluid (Abbildung 8) kann man erkennen, dass es zwei unterschiedliche Zonen gibt. Von der Sohle ($y = 0$) aus nimmt die Geschwindigkeit mit der Höhe y quadratisch zu bis zum Erreichen der ungescherten Zone bei der Höhe $H_{sheared}$. Die ungescherte Zone (H_{plug}) weist

eine konstante Geschwindigkeitsverteilung auf welche der Oberflächengeschwindigkeit v_s (oder v_0) entspricht.

Nach Kaitna et al. (2007) kann die Oberflächengeschwindigkeit v_s bzw. die Geschwindigkeit der ungescherten Zone in einem unendlich breitem Gerinne folgendermaßen Berechnet werden:

$$v(y) = v_s = \frac{\rho g \sin\theta}{2\eta} H_{\text{sheared}}^2 \quad \text{für } H \geq y \geq H_{\text{sheared}} \quad \text{Gl.7}$$

Für den gescherten Bereich kann folgende Gleichung herangezogen werden:

$$v(y) = \frac{\rho g \sin\theta}{2\eta} [H_{\text{sheared}}^2 - (H_{\text{sheared}} - y)^2] \quad \text{für } y \leq H_{\text{sheared}} \quad \text{Gl.8}$$

wobei ρ die Dichte des Gemisches ist, θ die Sohlneigung und g die Gravitation darstellen. Die Höhe der ungescherten Zone H_{plug} lässt sich folgendermaßen Berechnen:

$$H_{\text{plug}} = \frac{\tau_y}{\rho g \sin\theta} \quad \text{Gl.9}$$

bzw. die Höhe der gescherten Zone (Abbildung 8):

$$y_0 = H - H_{\text{plug}} \quad \text{Gl.10}$$

2.3 Numerische Simulationssoftware Flo-2d

Flo-2d (O'Brien et al., 1993) ist ein zweidimensionales, Raster-basiertes Modell zur physikalischen Simulation von Reinwasserabfluss, Sedimenttransport, hyperkonzentrierten Abfluss und viskosen Murgängen. Das Programm führt die Abflussberechnung mittels der Methode der finiten Differenzen für den aus dem Niederschlag entstehenden Abfluss oder für einen gegebenen Hydrographen auf Basis einer diffusen oder dynamischen Welle zweidimensional über eine Oberfläche oder eindimensional für ein Gerinne durch.

Als Input sind folgende Größen notwendig:

- Digitales Geländemodell
- Oberflächenbeschaffenheit des Geländes
- Gerinnequerschnitte, Geometrie von Einbauten (z.B. Gebäude)
- Bemessungsniederschlag
- Green/Ampt Parameter
- Hydrograph
- Rheologische Materialkennwerte

Es gibt bereits Erfahrungen mit der Modellierung des Ablagerungsverhaltens auch von europäischen Wildbächen (z.B. Hübl & Steinwendtner, 2001; Gostner, 2002), wobei es bezüglich der Wahl der rheologischen Parameter noch große Unsicherheiten gibt (Rickenmann, 2003; Mayer, 2003; Gostner, 2002).

Flo-2d beruht auf einem gemischten Ansatz einer Bingham'schen Flüssigkeit (Term 1 und 2 in Gl.11, vgl. Gl.6) und dispersiver bzw. turbulenter Reibungsterme (Term 3 in Gl.11):

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) + C_0 \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad \text{Gl.11}$$

mit

$$C_0 = \rho_m l^2 + f(\rho_m, C_v) d_s^2 \quad \text{Gl.12}$$

ρ_m = Fluid Dichte [kg/m³],

l = Prandtl'sche Mischlänge [m],

d_s = Charakteristische Korndurchmesser [m/cm]

C_v = Volumetrische Sedimentkonzentration [-]

Die Eingabe der rheologischen Parameter in Flo-2d erfolgt über den Zusammenhang der Materialparameter α_i, β_i und dem C_v -Wert:

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad \text{Gl.13}$$

$$\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad \text{Gl.14}$$

(Rickenmann et al., 2010; O'Brien et al., 1993; Hillebrand, 2013).

In dieser Masterarbeit wird genau der Zusammenhang in Gl. 13 und Gl. 14 für verschiedene Materialmischungen bei unterschiedlichen Sedimentkonzentrationen und maximalen Korndurchmessern untersucht.

3 METHODEN

Die rheologischen Parameter wurden mittels einer Trommelversuchsanlage, welche mit verschiedenen Mess-Sensoren ausgestattet ist, bestimmt. Um das Verhalten verschiedener Einzugsgebiete zu untersuchen, wurden die Versuche mit geologisch unterschiedlichem Material durchgeführt. Im Kapitel Datenaufbereitung werden die verwendeten Methoden zur Ableitung der Modellparameter erklärt, aber auch der Aufbau und die Verwendung der verschiedenen Matlab Skripten beschrieben.

3.1 Experiment

Das Experiment wird mit Proben aus vier verschiedenen geologischen Einzugsgebieten mit unterschiedlichen Versuchsreihen durchgeführt. Jede Versuchsreihe wird durch einen maximalen Korndurchmesser bestimmt (z.B. fb2 → Firschnitzbach, $D_{\max} = 31,5$ mm). Vor Beginn des Versuchs wird das Material in einem Kunststoff-Trog maschinell oder manuell (bei hohem Grobanteil) mit Wasser durchmischt. Ein Versuch wird mit mindestens drei verschiedenen volumetrischen Sedimentkonzentrationen durchgeführt. Für eine volumetrische Sedimentkonzentration werden mindestens vier Geschwindigkeitsstufen mit jeweils mindestens zehn Umdrehungen durchlaufen.

Aus einer Versuchsreihe werden die gesuchten Fließparameter für einen bestimmten maximalen Korndurchmesser und Sedimentkonzentration bestimmt.

3.1.1 Rotierende Trommel

Die Versuche wurden mittels einer Trommelversuchsanlage mit einem Durchmesser von 2,46 m durchgeführt (Abbildung 9). Die Gerinnebreite der

3 METHODEN

Trommel beträgt 0,45 m. Um ein Rutschen des Versuchsmaterials vorzubeugen, ist die Sohle der Rinne mit einem synthetischen Kunststoffnetz mit einer Höhe von 2 mm ausgekleidet (Abbildung 12).

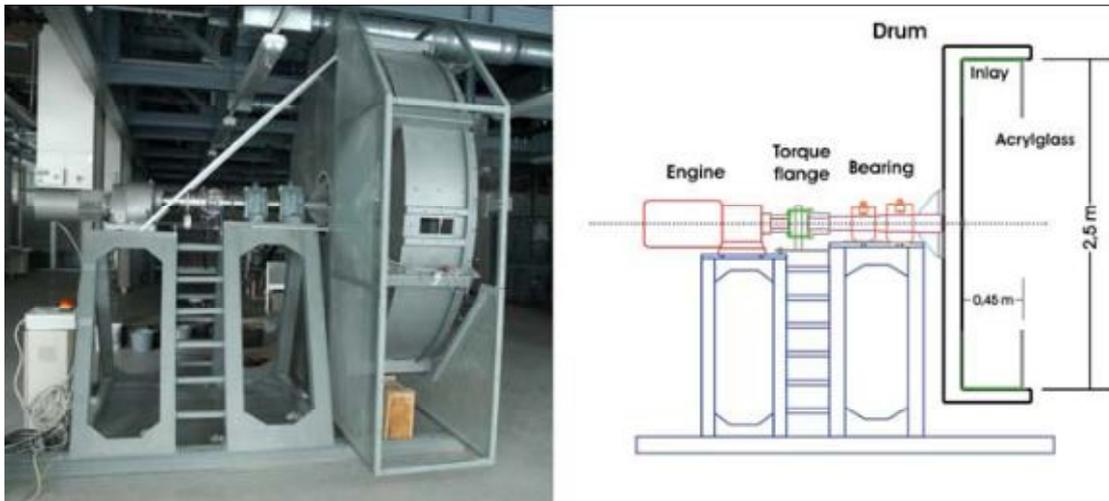


Abbildung 9: Links: Seitenansicht der rotierenden Trommel. Rechts: Querschnitt des Versuchsaufbaus (Kaitna et al., 2007).

Die Seitenwände bestehen an der Innenseite aus poliertem Stahlblech und an der Außenseite aus Acrylglas, das eine Beobachtung des Materials während der Versuche ermöglicht. Um zu verhindern, dass bei sehr zähflüssigen Proben das Material am Rinnenboden kleben bleibt, ist bei einem Winkel von 78° bis 88° ein Abstreifer montiert (Abbildung 12). Die Trommel ist einachsrig gelagert und durch eine Welle mit dem Motor verbunden. Zwischen Motor und Trommel befinden sich eine Kupplung und ein Drehmomentflansch. Das Drehmoment, welches benötigt wird um eine konstante Geschwindigkeit aufrecht zu erhalten wird am Drehmomentflansch gemessen und die maximale Umdrehungsgeschwindigkeit beträgt 32 U/min (entspricht einer Bahngeschwindigkeit von 4,2 m/s). Durch die Rotation der Trommel wird eine stehende Welle erzeugt und es können kontinuierlich verschiedenste Daten bei einer Messfrequenz von 400 Hz aufgenommen werden.

In Abbildung 10 sind rechts schematisch die aufgenommenen Daten dargestellt und links ist die Versuchsanlage abgebildet.

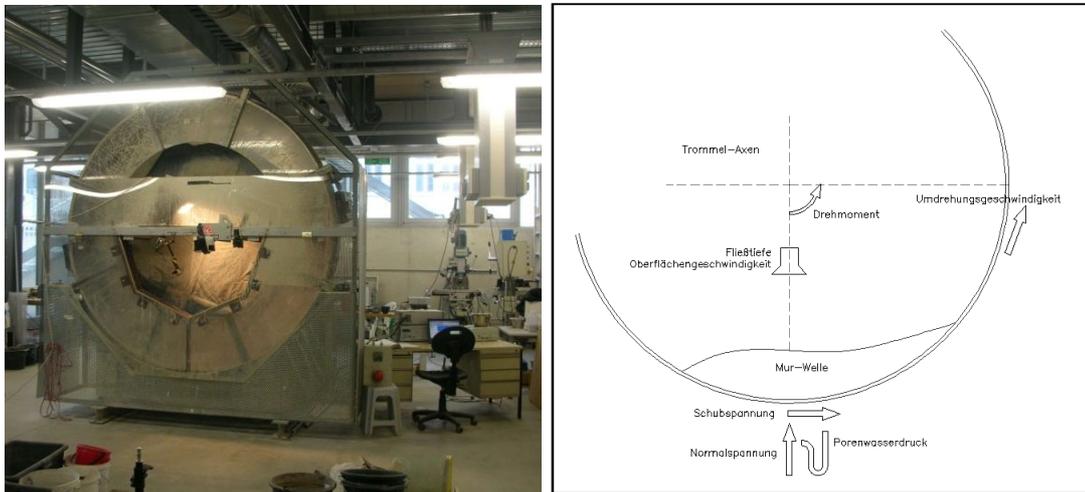


Abbildung 10: Frontansicht der Trommel (links) und schematische Darstellung der aufgenommenen Daten (rechts).

3.1.1.1 Normal- und Schubspannung

Am Rinnenboden befinden sich zwei Sensorblöcke, die je um 180° versetzt sind und Normal- und Schubspannung mittels Plattformwägezellen⁷ messen. Da während einer Drehung zwei unabhängige Werte aufgezeichnet werden, ist eine einfache Überprüfung der Daten möglich. Der Durchmesser der Platten beträgt 60 mm und die mögliche Nennlast ist bei einer Messgenauigkeit von 0,1 %, mit 7200 g beschränkt. Die Sensoren messen dabei in zwei unterschiedlichen Richtungen, wobei die Normalspannungsplatten in radialer Richtung und die Scherspannungsplatten in tangentialer Richtung messen (Abbildung 11).

⁷ „single point load cells“, Firma HBM

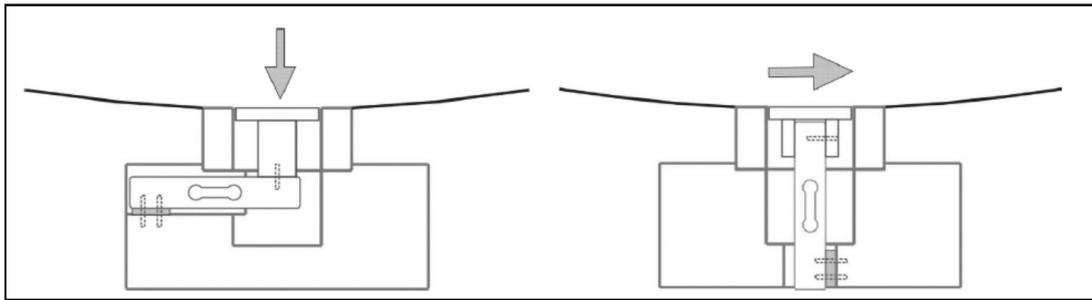


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Sensorblöcke für die Erfassung der Normalspannung (links) und der Schubspannung (rechts) (Kaitna und Rickenmann, 2007).

Die gesamte Schubspannung (Sohl- und Seitenschubspannung) des Versuchsmaterials kann über das Drehmoment (3.1.1 Rotierende Trommel) ermittelt werden.

3.1.1.2 Porenwasserdrucksensor

Der Porenwasserdrucksensor befindet sich an einem der beiden Sensorblöcke und ist zwischen den Messplatten für die Erfassung der Normal- und Schubspannung situiert. Es handelt sich dabei um einen Drucksensor auf dem sich ein mit Öl gefüllter Plexiglaszylinder befindet. Auf der Seite wo der Plexiglaszylinders mit dem Versuchsmaterial in Berührung kommt befindet sich eine Öffnung mit einer wasserdichten, synthetischen aber beweglichen Folie und einem Stahlnetz mit einer Maschenweite von 2 mm, über die der Druck übertragen wird.

3.1.1.3 Laser

Um die Abflusstiefe der stehenden Welle zu erfassen, sind zwei sich gegenüberliegenden Laser mittig über dem Gerinne montiert (Abbildung 12). Im Zuge anderer Untersuchungen (z.B. Kaitna, 2006; Krawtschuk, 2009; Hillebrand, 2013) wurden auch Ultraschallsensoren eingesetzt da der Laser

bei durchsichtigen (wässrigen) Fluiden ungenaue Messergebnisse liefert. Der Laser weist aber gegenüber dem Ultraschallsensor eine höhere Genauigkeit, schnellere Reaktionszeit und punktgenauere Messung auf. Da in dieser Arbeit als Versuchsmaterial nur natürliches Murmaterial eingesetzt wurde, kam für die Messung der Wellengeometrie ausschließlich der Laser zum Einsatz.

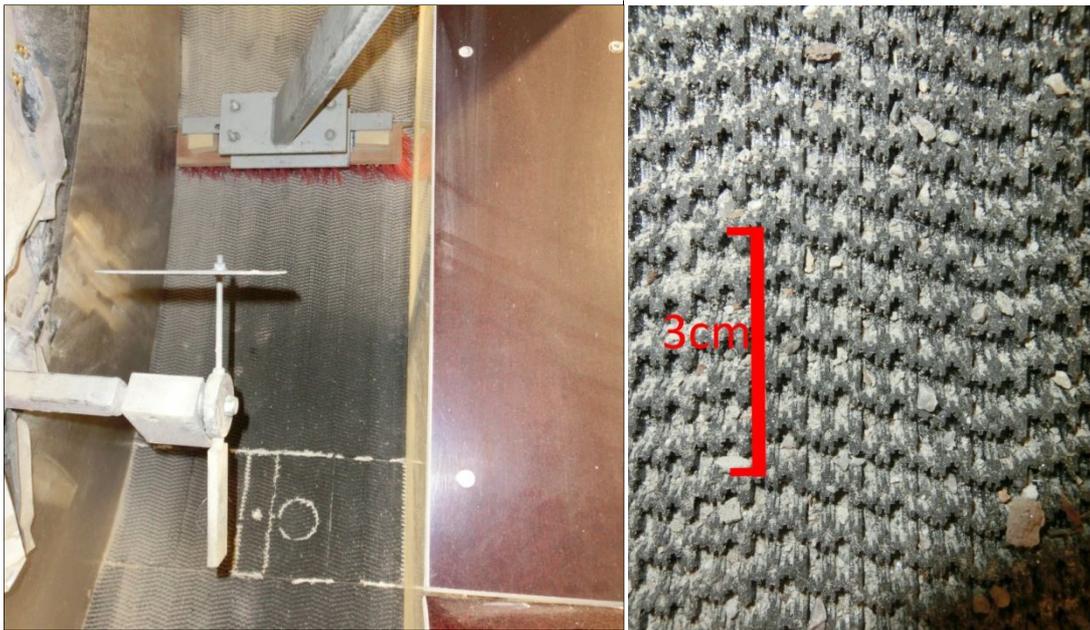


Abbildung 12: Links: Ansicht der Trommelrinne. Im Vordergrund der Laser. Im Hintergrund die Normal- und Schubspannungsplatten sowie im oberen Bereich der Abstreifer. Rechts: Detail der Rauheitsmatte.

3.1.1.4 Mittlere Geschwindigkeit

Die Umdrehungsgeschwindigkeit der Trommel (v_t) wird mit einer Lochscheibe, welche an der Welle montiert ist aufgezeichnet. Gemessen wird die Geschwindigkeit in RPM und durch Umformung mittels Gleichung 15 erhalten wir die Geschwindigkeit in m/s (r entspricht dem Trommelradius).

$$v_t = 2r\pi * \frac{\text{RPM}}{60} \quad \text{Gl.15}$$

Um die Oberflächengeschwindigkeit (v_o) der Welle zu ermitteln wurde eine Videokamera („X7-Pro“) fix oberhalb der Welle bzw. Trommelrinne montiert. (Abbildung 13).



Abbildung 13: Position der Videokamera oberhalb der Wellenfront.

Das Ziel ist es, die Wellenfront in die Bildmitte zu bekommen, um die Oberflächengeschwindigkeit ermitteln zu können. Deshalb ist es nötig in Abhängigkeit des Probematerials, der Umdrehungsgeschwindigkeit und des Wassergehaltes die Kameraposition zu verändern. Für die Video-Analyse sind nur wenige Sekunden von Interesse. Die Aufnahme sollte aber erst nach einigen Umdrehungen gemacht werden, bis sich ein quasi-stationärer Zustand ausgebildet hat.

Addiert man die Oberflächengeschwindigkeit und die Umdrehungsgeschwindigkeit der Trommel erhalten wir die mittlere Wellengeschwindigkeit:

$$v_m = v_{pl} = v_o + v_t \quad \text{Gl.16}$$

3.1.2 Versuchsmaterial

Das verwendete Material für die Versuche stammt aus vier verschiedenen geologischen Einzugsgebieten, wo es in rezenter Zeit zu gut dokumentierten

3 METHODEN

Murereignissen gekommen ist. Dabei handelt es sich um folgende Bäche (mit Ereignisdatum):

- Firschnitzbach bei Virgen (Osttirol), 04.08.2012
- Wäldletobel bei Klösterle (Voralberg), 11.07.2010
- Mühlbach am Attersee (Oberösterreich), 24.06.2009
- Schauflerbach in Wörschach (Steiermark), 16.05.2014

Aus den Einzugsgebieten wurde eine repräsentative Materialprobe entnommen und untersucht. Vor Ort wurde zusätzlich eine Linienzahlanalyse durchgeführt (außer beim Schauflerbach).

Die Korngrößenanalyse für das Material ≤ 63 mm wurde am Institut für Geotechnik (Department für Bautechnik und Naturgefahren, BOKU Wien) durchgeführt. Die Korngrößen zwischen 63 μm – 63 mm (Kies, Sand) wurden gesiebt und die Korngrößen < 63 μm (Schluff, Ton) geschlämmt. Steine (> 63 mm) wurden zuvor ausgesiebt und einer Einzelkornanalyse unterzogen.

Anschließend wurden die Kornverteilungslinien der Grob- und Feinkomponenten für das gesamte Murmaterial mittels linearer Kombination bestimmt (Abbildung 14).

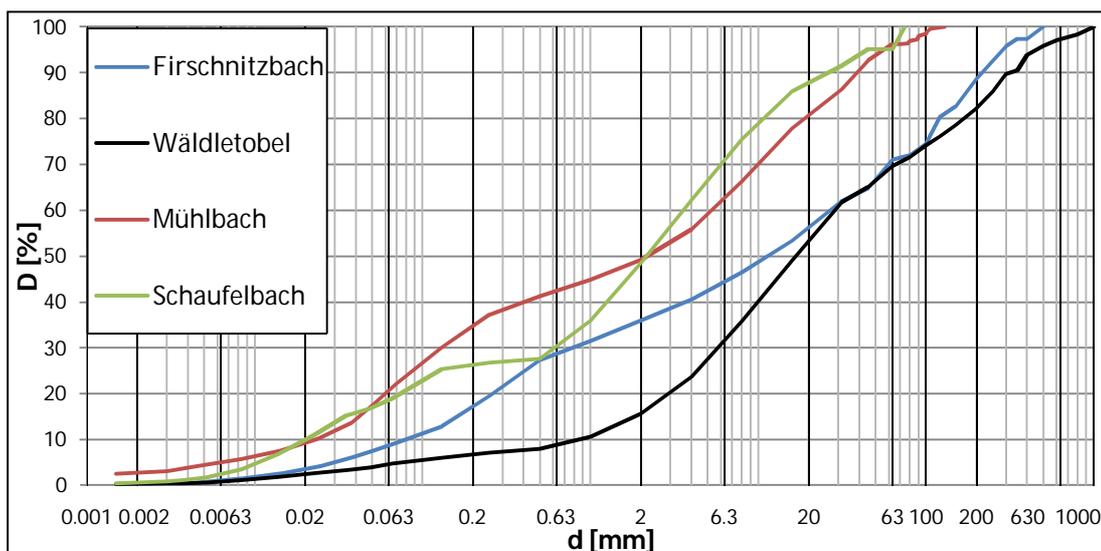


Abbildung 14: Kornverteilungen des Gesamten Murgangmaterials.

Die Versuche wurden mit unterschiedlichen maximalen Korndurchmessern durchgeführt, deshalb wurden zusätzlich die Kornverteilungen für das jeweilige Größtkorn berechnet.

Firschnitzbach

Die Kornverteilung für das gesamte Murmaterial des Firschnitzbachs und für die Versuche bei den maximalen Korndurchmessern von D16 mm, D31,5 mm und D63 mm sind in Abbildung 15 dargestellt.

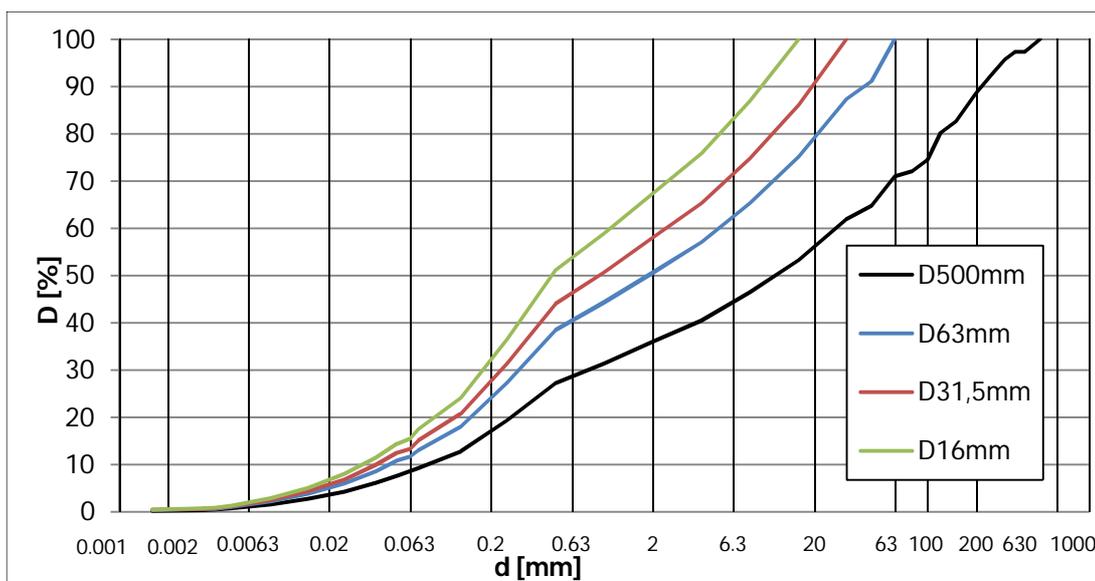


Abbildung 15: Kornverteilung des gesamten Materials (Schwarz) und für die jeweiligen Versuche bei den maximalen Korndurchmessern für den Firschnitzbach.

Mühlbach

Da das Material des Mühlbachs relativ feinkörnig war, wurden nur Materialproben mit einem maximalen Korndurchmesser von 31,5 mm

3 METHODEN

untersucht. Die Kornverteilungslinien des Murmaterials und des Untersuchungsmaterials mit einem maximalen Korndurchmesser von D31,5 mm sind in Abbildung 16 dargestellt.

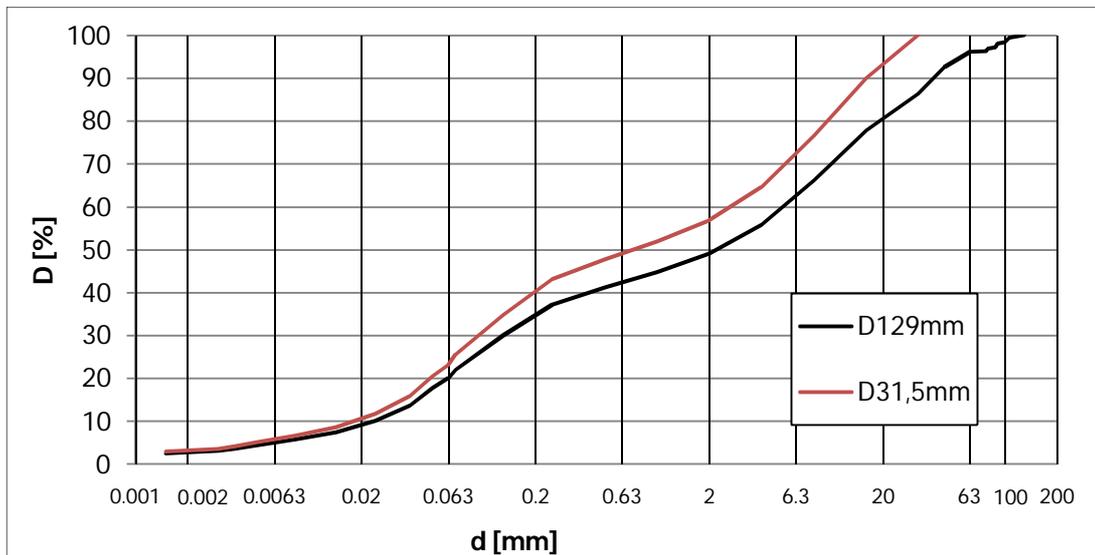


Abbildung 16: Kornverteilung des gesamten Materials (Schwarz) und für das Versuchsmaterial mit einem maximalen Korndurchmesser von 31,5 mm (Rot) des Mühlbachs.

Schauflerbach

Beim Schauflerbach wurde nur das Murmaterial mit einem maximalen Korndurchmesser von 63 mm untersucht, da einerseits das zur Verfügung stehende Material begrenzt war und da andererseits wie in Abbildung 17 ersichtlich mehr als 95 % des gesamten Murmaterials in diesen Bereich fallen.

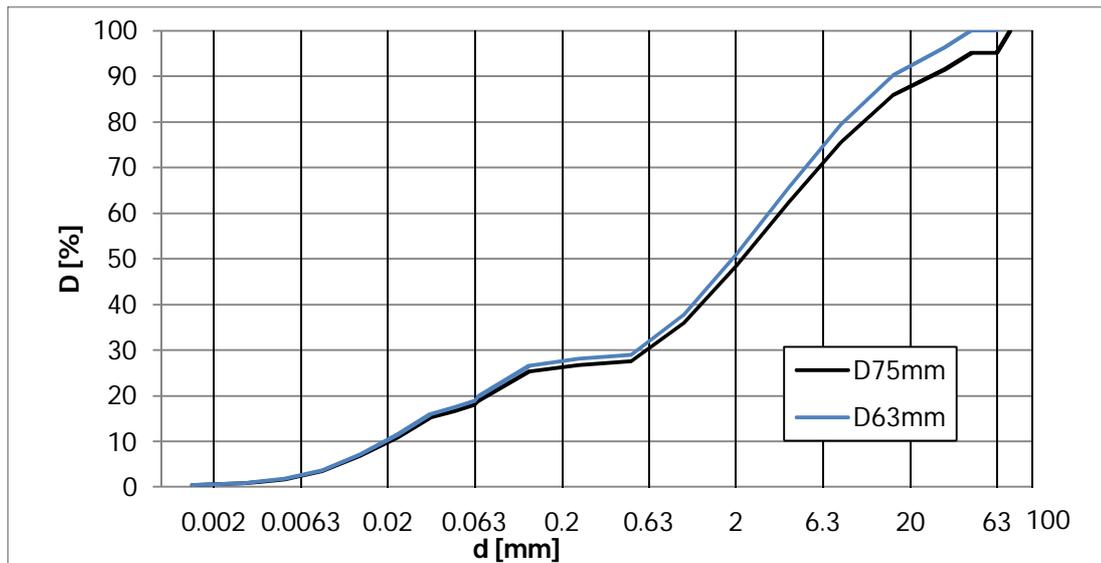


Abbildung 17: Kornverteilung des gesamten Materials (Schwarz) und für das Versuchsmaterial mit einem maximalen Korndurchmesser von 31,5 mm (Blau) des Schauflerbachs.

Wäldletobel

Die Kornverteilungskurven für das gesamte Material des Wäldletobels und für die verschiedenen Versuchsreihen sind in Abbildung 18 dargestellt.

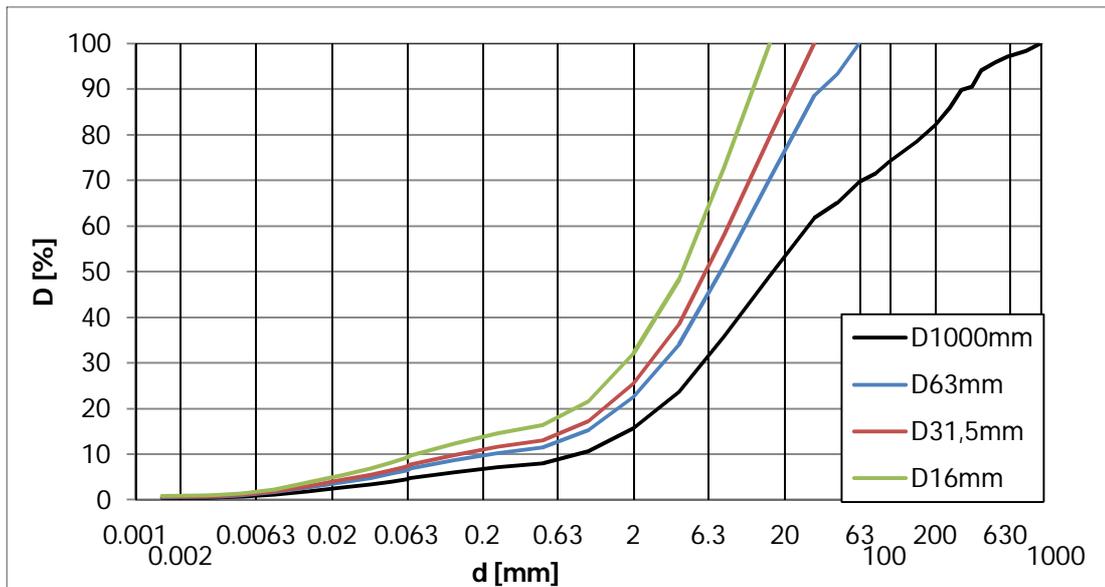


Abbildung 18: Kornverteilung des gesamten Materials (Schwarz) und für das Versuchsmaterial mit einem maximalen Korndurchmesser von 16 mm (Grün), 31,5 mm (Rot) und 63 mm (Blau) des Wäldletobels.

In Tabelle 1 sind alle durchgeführten Versuche aufgelistet, mit der allgemeinen geologischen Beschreibung des Einzugsgebietes, den einzelnen Kornfraktionen in Abhängigkeit des maximalen Kornes und die Masse des verwendeten Versuchsmaterials.

Tabelle 1: Überblick des verwendeten Versuchsmaterials.

Name des Baches	Geologisches EZG				max. Korn [mm]	Masse [kg]	
	Allgemein	Fraktionen [%] des Versuchsmaterials					
		Kies	Sand	Schluff			Ton
Firschnitzbach	Schieferhülle	32.60	51.86	15.01	0.53	16	95
Firschnitzbach	Schieferhülle	32.60	51.86	15.01	0.53	16	119
Firschnitzbach	Schieferhülle	41.99	44.63	12.92	0.46	31.5	91
Firschnitzbach	Schieferhülle	49.34	38.98	11.28	0.40	63	112
Firschnitzbach	Schieferhülle	49.34	38.98	11.28	0.40	63	142
Wäldletobel	Dolomit	68.02	22.79	8.37	0.82	16	119
Wäldletobel	Dolomit	74.55	18.13	6.66	0.66	32.5	94
Wäldletobel	Dolomit	77.48	16.05	5.89	0.58	63	118
Mühlbach	Grauwacke	43.07	33.66	20.32	2.95	31.5	84
Mühlbach	Grauwacke	43.07	33.66	20.32	2.95	31.5	102
Schauflerbach	Überwiegend Mergel	49.06	31.97	18.44	0.53	63	151

Coussot (1994) postuliert einen Wert von mindestens 10 % für den Feinanteil < 0,04 mm, ab dem ein viskoses Fließverhalten zu erwarten ist. Dies trifft bei einem Maximalkorn von $D = 63$ mm auf den Schauflerbach (~16 %) und den Mühlbach (~15 %) zu. Der Firschnitzbach hat einen Anteil < 0,04 mm von ~9% was als ausreichend betrachtet wird (Kaitna et al., 2007, 2008). Der Wäldletobel hingegen weist einen Partikelanteil < 0,04 mm von ~5 % auf und wurde bewusst ausgesucht um das Materialverhalten eines grobkörnigen geologischen Einzugsgebiets zu untersuchen.

3.1.3 Volumetrische Sedimentkonzentration

Um die volumetrische Sedimentkonzentration (C_v -Wert) zu bestimmen wurde nach dem Durchlaufen der verschiedenen Geschwindigkeitsstufen bei einem bestimmten Wassergehalt eine Probe (Wasser-Feststoff-Gemisch) von ca. $0,0015 \text{ m}^3$ aus der Trommelrinne entnommen. Die Probe wurde im nassen

und im trockenen Zustand (Entwässerung mittels Ofentrocknung bei 105° C) gewogen.

Bei sehr grobkörnigen Material (Kiesanteil > 50 %) trennt sich das Wasser-Feststoff-Gemisch bereits beim Stillstand der Trommel, deshalb wurde beim Wäldletobel das gesamte Probematerial im trockenen Zustand und das beigemengte Wasser gewogen.

Anschließend wurde mittels Gleichung 17 der C_v -Wert und nach Gleichung 18 die Schüttdichte berechnet:

$$C_v = \frac{V_s}{V_{ges}} = \frac{\frac{m_s}{\rho_s}}{\frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_w}{\rho_w}} \quad \text{Gl.17}$$

$$\rho_b = \rho_w + C_v * (\rho_s - \rho_w) \quad \text{Gl.18}$$

C_v = Volumetrische Sedimentkonzentration [-]

V_s = Volumen Feststoffe [m³]

m_s = Masse Feststoffe [kg]

ρ_s = Dichte Feststoffe [kg/m³] (Annahme 2.700 kg/m³)

V_{ges} = Gesamt Volumen [kg/m³] (Wasser und Feststoffe)

m_w = Masse Wasser [kg]

ρ_w = Dichte Wasser [kg/m³] (Annahme 1.000 kg/m³)

ρ_b = Schüttdichte [kg/m³] (engl. bulkdensity)

3.2 Datenaufbereitung

3.2.1 Überblick

Die gewonnenen Messdaten aus den Trommelversuchen wurden mit der Software CATMAN als asc-Datei exportiert. Diese asc-Dateien beinhalten einen Header (37 Zeilen) und die Datenaufzeichnung mit bis zu 40.000 Zeilen und 13 Spalten. Um diese großen Datenmenge zu verarbeiten,

3 METHODEN

werden in weiterer Folge die Programme MATLAB und EXCEL für die Verarbeitung herangezogen.

Im 1. Teil von Abbildung 19 werden der C_V -Wert und die Schüttdichte bestimmt.

Im 2. Teil werden mit der Schüttdichte aus Teil 1 und der asc-Datei einige Fließparameter berechnet.

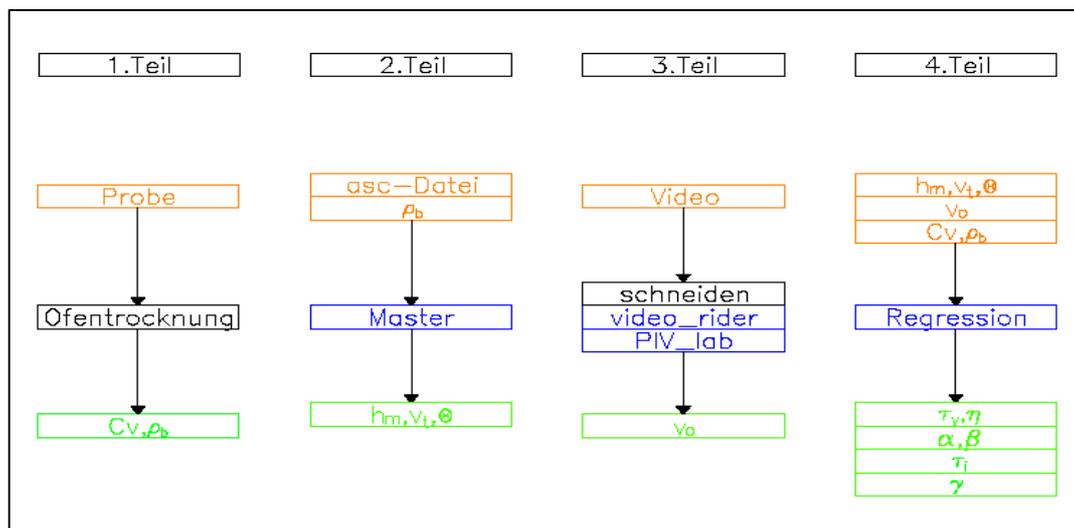


Abbildung 19: Übersicht Datenverarbeitung. Inputdaten - Orange; Transformation – Blau (Matlab) und Schwarz; Outputdaten – Grün (Winkel $\theta = \alpha$).

Die digitalen Videos wurden auf repräsentative 1-2 Sekunden Sequenzen gekürzt und anschließend mit dem MATLAB-Tool „PIVlab 1.35“ (Thielicke & Stamhuis, 2012) weiter verarbeitet (Abbildung 19: 3. Teil).

Die gewonnenen Ergebnisse aus den ersten Teilen wurden dann als Inputdaten für den 4. Teil in Abbildung 19 herangezogen, wo der Zusammenhang zwischen Scherrate und Schubspannung iterativ ermittelt wird (Kapitel 3.2.4 Regression) und in weiterer Folge die Alpha- und Beta-Werte mittels einer Regressionsanalyse berechnet werden.

3.2.2 Automatisierte Berechnung der Fließparameter

Um die verschiedenen Auswertungsschritte zusammenzufassen, greift das Matlab-Skript *Master* auf alle weiteren Skripts zu (Abbildung 20), die für die Auswertung und Berechnung der Fließparameter aus den Trommelrohdaten nötig sind. Dafür wurden alle schon vorhandenen Matlab Skripts mit der Endung „_d“ im Zuge dieser Arbeit verändert. Zu variierende Parameter (Anfangs- und End-Wert für die Berechnungen, Schüttdichte = s_{dens} , ρ_b) sowie die Bezeichnung und der Pfad der Input- bzw. Bearbeitungsordner können in diesem Skript verändert werden. Als Endergebnis erhält man eine Excel-Tabelle mit den Parametern für die weitere Analyse und eine graphische Darstellung der Sensorwerte (Normalspannung, Laser, Porenwasserdruck).

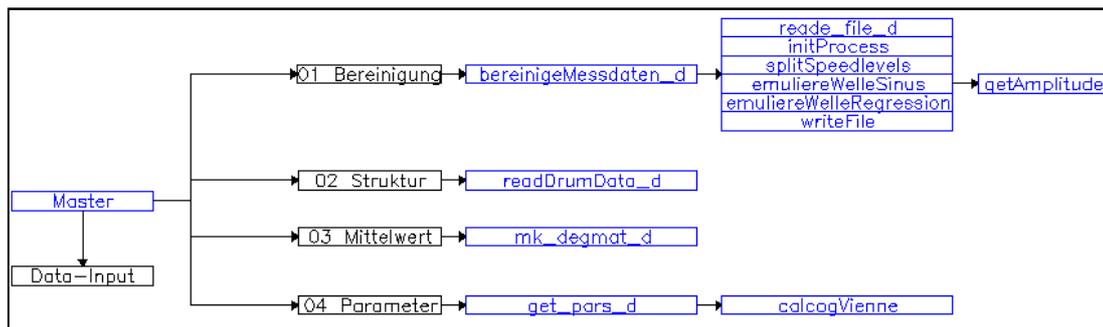


Abbildung 20: Übersicht und Abfolge der Matlab-Skripts. (Schwarz – Bearbeitungsordner)

Wichtig ist die Bezeichnung der Input-Dateien, da der Name weiter gegeben wird bzw. die einzelnen Kürzel in den Skripten Verwendung finden. Die ersten 3 Zeichen definieren das Probematerial, das Datum der Versuchsdurchführung wird im 5. bis 10. Zeichen wiedergegeben und die letzten 2 Zeichen definieren den Wassergehalt.

Der Dateiname (in den Skripten als *data-name* bezeichnet) für *mb2_150219_01* bedeutet z.B.:

- 1 - 3. Zeichen Probenbezeichnung (Mühlbach, 2. Versuchsreihe)
- 5 - 10. Zeichen Datum (19. Februar 2015)
- 12 - 13. Zeichen volumetrische Sedimentkonzentrationsnummer (erster C_v -Wert)

3.2.2.1 Bereinigung

Der Ordner "01 Bereinigung" enthält das Skript *bereinigeMessdaten_d* sowie alle weiteren Unter-Skripts zur Bereinigung der Messdaten. Durch die Rotation der Trommel weisen die Messdaten eine sinusförmige Grundschiwingung auf, die es zu bereinigen gilt. Anschließend werden die Messdaten nach der Geschwindigkeit unterteilt und für jede Umdrehung eine txt-Datei erstellt. Nur die Daten von -90° bis $+90^\circ$ werden weitergegeben, da der Kontakt der Sensoren mit dem Versuchsmaterial nur in jenem Bereich möglich ist. Das Ursprungsskript wurde von David Prenner erstellt und für eine detailliertere Beschreibung siehe Prenner (2011).

3.2.2.2 Struktur

Um einen Zugriff bzw. eine Überprüfung der Daten zu erleichtern wird im Ordner "02 Struktur" mit dem Skript *readDrumData_d* aus den einzelnen txt-Dateien, eine mat-Datei erstellt welche als „Structur Array“ abgespeichert wird. Die Ergebnisse werden nach der Geschwindigkeit und den einzelnen Kanälen unterteilt. *readDrumData* wurde von Jakob Hillebrand erstellt und für eine detailliertere Beschreibung siehe Hillebrand (2013).

3.2.2.3 Mittelwert & Standardabweichung

In "03 Mittelwert" wird mit dem Skript *mk_degmat_d* für alle Umdrehungen der gleichen Geschwindigkeit der Mittelwert über einen Grad (entspricht 22 mm) und die dazugehörige Standardabweichung ermittelt. Das Ergebnis

als „double“ Dateityp wird im "03 Mittelwert\Output" Ordner gespeichert. Das Ursprungsskript wurde von Roland Kaitna erstellt.

3.2.2.4 Parameter

Der Bearbeitungsordner "04 Parameter" enthält *get_pars_d* und *calcogVienna* (Ursprungsskript von Roland Kaitna).

Im Skript *get_pars_d* werden die verschiedenen Parameter (Tabelle 2) ermittelt und in eine Excel-Tabelle geschrieben. Dabei wird für eine Versuchsreihe eine Excel-Datei (z.B. mb2_Parameter.xlsx) erzeugt und für jeden Wassergehalt je ein Arbeitsblatt (z.B. 03, für den 3.C_v-Wert) verwendet. Um die Schubspannung und den Winkel α zu ermitteln wird dabei auf das Skript *calcogVienna* zugegriffen (Abbildung 20).

Im Skript *calcogVienna* wird der Schwerpunkt der stehenden Welle berechnet. Als Eingangsgrößen werden dazu Winkelgrade und die mittlere Höhe der Welle aus den Laser-Daten oder aus den Normalspannungsdaten (Umrechnung von [Pa] in [mm] siehe Gl.20) benötigt. In dieser Arbeit wurden für die weiteren Berechnungen die Laser-Daten herangezogen, da sie genauer sind als die berechneten Höhen aus der Normalspannung. Dabei wird die Welle in 1° Abschnitte unterteilt, der Schwerpunkt und der Auslenkwinkel berechnet und durch Aufsummierung der einzelnen Ergebnisse erhalten wir den Schwerpunkt und den dazugehörigen Winkel α (Abbildung 21) der gesamten Mur-Welle. Mit Hilfe des Schwerpunktes kann auf die Summe der treibenden Kräfte geschlossen werden. In einem stationären System entspricht diese der Summe der Widerstandskräfte (Komponenten der Gravitation in Fließrichtung gleich der Schubspannung an der Sohle und der Gerinnwand). Für eine detailliertere Beschreibung siehe Kaitna et al., 2007.

3 METHODEN

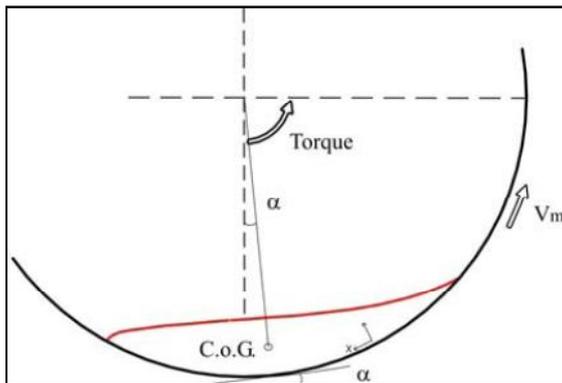


Abbildung 21: Skizze des durch die Abweichung des Schwerpunktes von der Vertikalen entstandenen Winkel α (Kaitna et al., 2007).

Anschließend werden durch das Skript *get_pars_d* die ermittelten Daten für jede volumetrische Sedimentkonzentration grafisch wie in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Durch *get_pars_d* erstellte Excel-Tabelle für einen Wassergehalt (Weitere nicht Dargestellte Spalten: Oberflächengeschwindigkeit v_o [m/s] und Schüttdichte ρ_s [kg/m³]).

Variable	v_trommel	V_laser	V_ns	A_b	As_tot	bdensity
Einheit	m/s	m ³	m ³	m ²	m ²	kg/m ³
	1	2	3	4	5	6
Variable	h_la_mean	h_nss_mean	h_la_max	h_nss_max	sss_torque	sss_geo_sdens
Einheit	mm	mm	mm	mm	Pa	Pa
	7	8	9	10	11	12
Variable	sss_mean	sss_geo_bdens	COG_la_out	COG_h_nss_out	mue	cogx_la
Einheit	Pa	Pa	°	°	°	mm
	13	14	15	16	17	18

Für die Erstellung von Tabelle 2 werden folgende Abkürzungen und Berechnungen verwendet:

Normalspannung	ns	[g]
Laser	la	[mm]
Schubspannung	sss, τ	[Pa]

3 METHODEN

Geschwindigkeit	v	[m/s]
Volumen	V	[m ³]
Benetzte Sohlfläche d. Welle	A _b	[m ²]
Benetzte Seitenflächen d. Welle	A _{s_tot}	[m ²]
Berechnete Schüttdichte	bdensity	[kg/m ³]
Gemessene Schüttdichte	sdensity, ρ _b	[kg/m ³]
„Sohlneigungswinkel“	COG_out, mue, θ, α	[°]
Horizontale Abweichung d. COG	cogx_la	[mm]
Gravitation	g	[m/s ²]
Fläche der Sensoren	A _{platten}	[m ²]

$$nss = \frac{ns}{1000} * \frac{g}{A_{platten}} \quad [Pa] \quad \text{Gl.19}$$

$$h_{nssmean} = \frac{nss_i}{\rho_b * g * \cos(\alpha)} \quad [mm] \quad \text{Gl.20}$$

$$\rho_{bdensity} = \frac{nss}{g * \left(\frac{la}{1000}\right) * \cos(\alpha)} \quad \left[\frac{kg}{m^3}\right] \quad \text{Gl.21}$$

Die Schubspannung τ kann einerseits über die Schubspannungsplatten, dem Drehmoment oder der Laser- bzw. Normalspannungsdaten ermittelt werden. Die Schubspannungsplatten lieferten keine plausiblen Werte und werden deshalb in weiterer Folge nicht berücksichtigt. Die Berechnung mit der Höhe aus den Normalspannungsdaten sowie mit der berechneten Schüttdichte (Tabelle 2, Spalte 14) wurden auch weggelassen, da die Laser-Daten und die gemessenen Schüttdichten (Gleichung 18) genauer sind.

Nach Gleichung 22 wird die Schubspannung berechnet. Dabei wird das Drehmoment T einmal gemessen (sss_torque) und einmal mittels Gleichung 23 berechnet (sss_geo_sdens). Dabei werden eine konstante Sohlschubspannung und eine dreiecksförmige Schubspannung an den Seitenflächen angenommen. Da auch bei einer leeren Trommel ein Drehmoment gemessen wird, muss die Schubspannung sss_torque bearbeitet werden, was im Skript *regression_d_sdens* vollzogen wird (3.2.2.5 Regression).

3 METHODEN

$$SSS = \frac{T}{A_b * R + A_s_{tot} * R - \frac{h_{mean}}{3}} \quad [Pa] \quad \text{Gl.22}$$

Wobei R [m] dem Trommelradius entspricht.

$$T = g * V_{la} * \rho_b * \frac{cogx_{la}}{1000} \quad [Nm] \quad \text{Gl.23}$$

Zusätzlich zu der Excel-Tabelle werden in *get_pars_d* für jede Geschwindigkeitsstufe die Normalspannung, die Höhe (Laser) und der Porenwasserdruck grafisch dargestellt (Abbildung 22). Ersichtlich sind die Mittelwerte und Standardabweichungen über mehrere Umdrehungen bei derselben Geschwindigkeit für jeden einzelnen Sensor. Für die Normalspannung und die Höhe (Laser) wird der Mittelwert (M) der linken (L) und rechten (R) Sensoren dargestellt und für die weiteren Berechnungen herangezogen. Die Darstellung der Sensorwerte ermöglicht eine sehr schnelle Überprüfung der Messdaten. Ausfälle oder Fehler können sofort identifiziert werden.

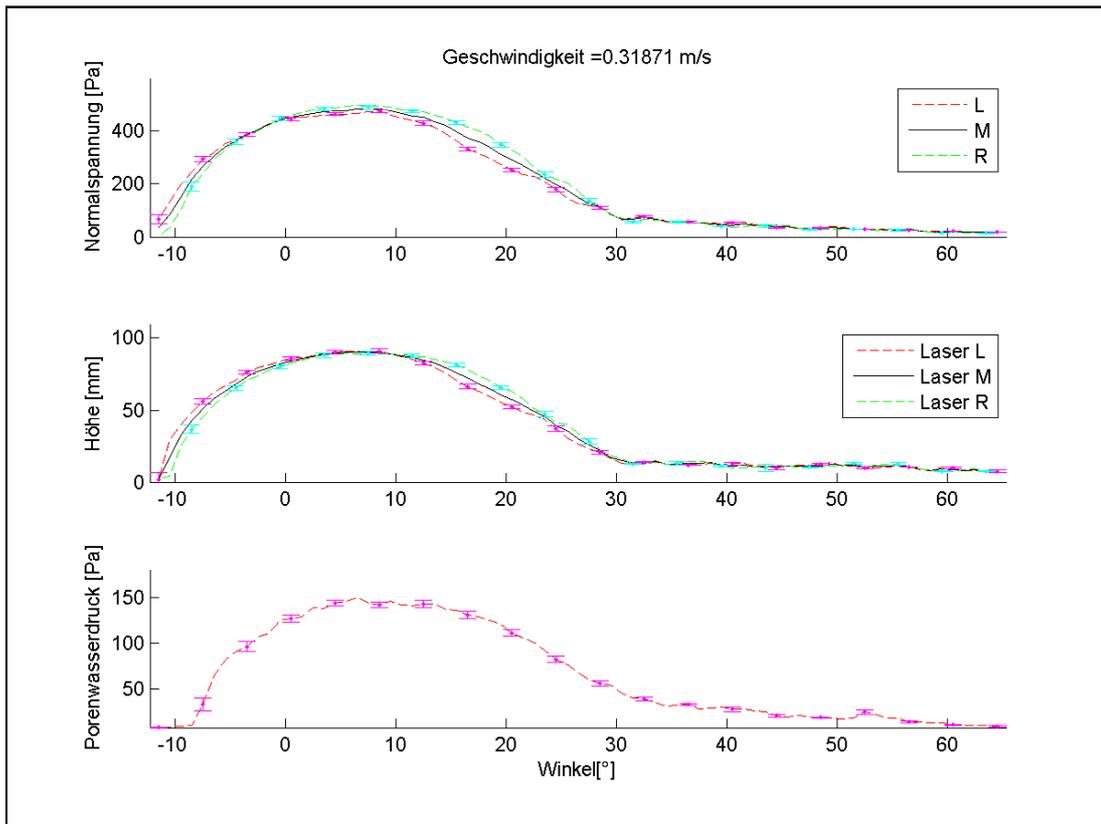


Abbildung 22: Beispiel der grafischen Darstellung der Sensorenwerte (Mühlbach, 1. Versuchsreihe, 3. C_v -Wert).

3.2.3 Video-Analyse

Im 3. Schritt (Abbildung 19) wird mittels dem frei erhältlichem Programm „GoProStudio“ aus den Roh-Videos eine repräsentative 1-2 Sekunde Bildsequenz ausgeschnitten. Anschließend wird das gekürzte Video mit dem Skript *video_read* in einzelne Frames (Bilder) aufgeteilt und von farbig in Graustufen transformiert.

Die einzelnen Bilder werden mit dem Matlab-Tool „PIVlab 1.35“ (Thielicke & Stamhuis, 2012) bearbeitet. „PIVlab“ ermittelt aus den einzelnen Bildern Strukturveränderungen und dessen Verschiebung (gemessen in Pixel) zum vorherigen Bild. Für die Kalibrierung müssen die Millisekunden zwischen den

einzelnen Bildern bekannt sein und ein bekannter Abstand im Bild. Da die Kameraposition verändert wird, wurde ein Messstab in die Bildmitte gehalten.

3.2.4 Regression

Für den nächsten Schritt (Abbildung 19, 4. Teil) werden folgende Größen aus den vorangegangenen Abschnitten (1-3) benötigt:

Trommelgeschwindigkeit	v_t	[m/s]
mittlere Mur-Wellengeschwindigkeit ⁸	v_{pl}	[m/s]
„Sohlneigungswinkel“	COG_{la_out}	[°]
mittlere Abflusstiefe	h_{la_mean}	[mm]
Schüttdichte	ρ_b	[kg/m ³]
Schubspannungen	$SSS_{torque}, SSS_{geo_sdens}$	[Pa]

Wie bereits erwähnt muss die Schubspannung sss_torque , welche über das Drehmoment ermittelt wird noch Bereinigt werden, da auch bei einer leeren Trommel eine gewisse Schubspannung „ermittelt“ wird. Dabei wird das „Leerlauf-Drehmoment“ von sss_torque subtrahiert (Gleichung 25). Durch Auswertung der Daten aus Versuchen mit leerer, nasser und verschmutzter⁹ Trommel wird mit Hilfe des Skripts *torquefunktion_degwinmat* die Schubspannung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit in eine Excel-Datei geschrieben. Durch Auswertung mehrerer Versuche wurde eine Funktion (Gleichung 24) in Abhängigkeit der Geschwindigkeit ermittelt und in die Berechnung bei *regression_d_sdens* mit einbezogen.

$$\tau_{leer} = 1,56 * v_t^2 + 6,844 * v_t + 67,63 \text{ [Pa]} \quad \text{Gl.24}$$

$$\tau_{torque} = SSS_{torque} - \tau_{leer} \quad \text{Gl.25}$$

⁸ siehe Gl. 16

⁹ jenes Material welches nach einem Versuch die Rinnenoberfläche benetzt wurde in der Trommel belassen

Für die Bestimmung der Scherrate wird iterativ die Höhe der ungescherten Zone (H_{plug}) berechnet (Abbildung 23, rechts). Ausgangspunkt ist dabei das Bingham Modell, wobei eine lineare Geschwindigkeitsverteilung der gescherten Zone wie in Abbildung 23 (vgl. Abbildung 8) angenommen wird. Durch Umformung von Gleichung 3 erhalten wir Gleichung 26, wobei im ersten Iterationsschritt die Grenzschubspannung τ_{y1} und somit auch die Höhe der ungescherten Zone H_{p1} gleich 0 sind (Abbildung 23, links).

$$H_{pi} = \frac{\tau_{yi}}{g \cdot \rho_b \cdot \sin(\theta)} \quad \text{Gl.26}$$

$$\gamma_i = \frac{v_{pl}}{h_{la\ mean} - H_{pi}} \quad \text{Gl.27}$$

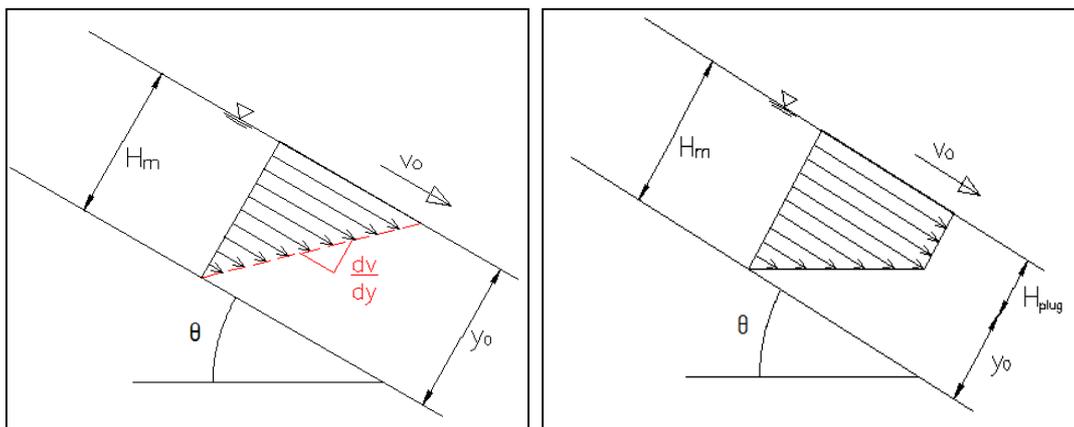


Abbildung 23: Erster Schritt des Iterationsverfahren mit $H_{plug} = 0$ in der linken Abbildung und Rechts die Annäherung an die gesuchte Höhe der ungescherten Zone.

Durch eine lineare Anpassung der berechneten Werte der Scherrate (x-Werte) und der Schubspannung (y-Werte) bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen erhalten wir eine Grenzschubspannung (Abbildung 20), welche als Eingangswert für den nächsten Schritt eingesetzt

3 METHODEN

wird. Dieser Vorgang wird so lang fortgesetzt, bis die Differenz der beiden letzten Grenzscherbspannungen $< 0,1 \text{ Pa}$ ist (Abbildung 24).

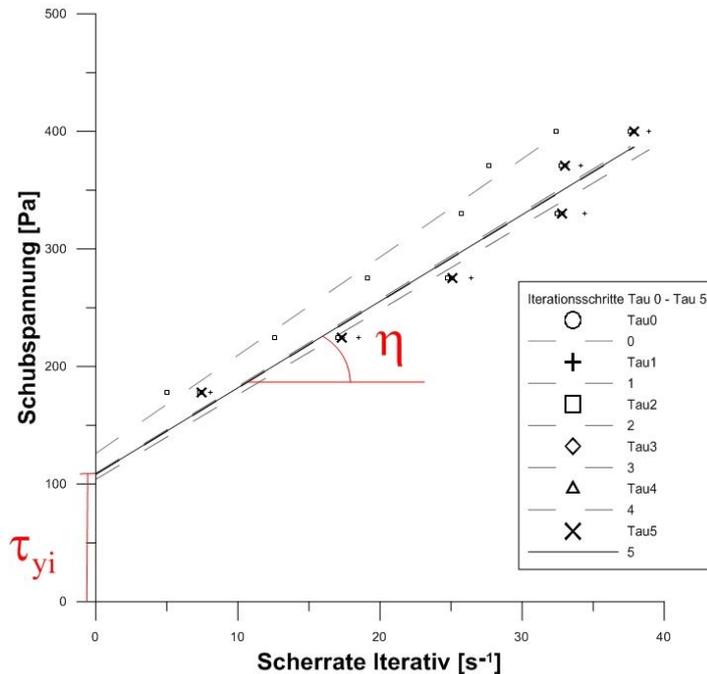


Abbildung 24: Rheogramm zur Ermittlung der Grenzscherbspannung (τ_{yi}) und der Viskosität (η) bei einem C_V -Wert und 6 unterschiedlichen Geschwindigkeiten (fb2_150220_04).

Der oben beschriebene Vorgang wird für eine Versuchsreihe durchgeführt und die resultierende Grenzscherbspannung und Viskosität wird in derselben Excel-Datei in ein neues Arbeitsblatt mit dem Titel „Parameter“ geschrieben.

Vor dem Start von *regression_d2* müssen die bestimmten C_V -Werte (Gleichung 17) in das Arbeitsblatt „Parameter“ eingetragen werden. Anschließend wird im Skript *regression_d2* der C_V -Wert gegen die Grenzscherbspannung bzw. die Viskosität aufgetragen und eine exponentielle Kurvenanpassung vorgenommen. Die erhaltene Exponentialgleichung entspricht Gleichung 13 bzw. Gleichung 14. Die berechneten Alpha- und Beta-Werte werden in das Arbeitsblatt „Parameter“ geschrieben und zusätzlich wird eine Grafik (Abbildung 25) für jede Berechnungsvariante mit

3 METHODEN

den Datenpunkten und der berechneten Kurve in „05 Regression/Output“ gespeichert.

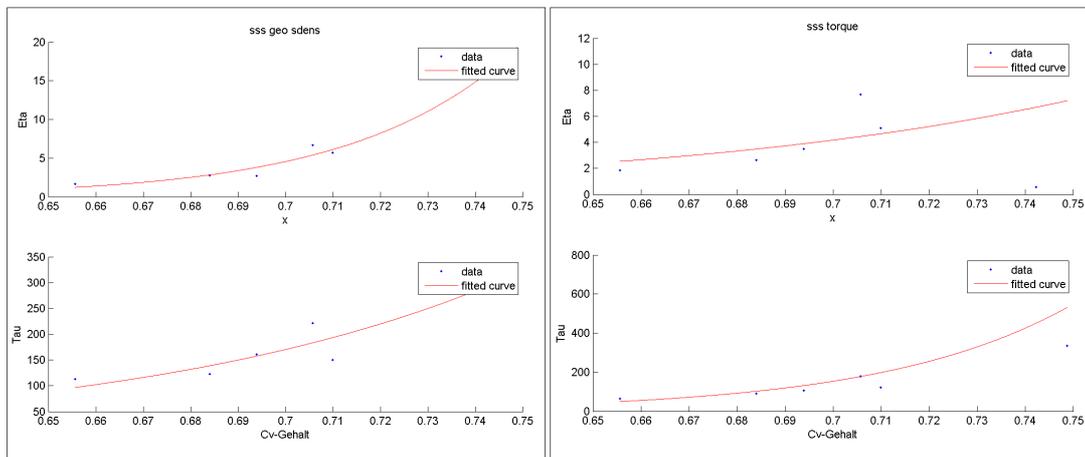


Abbildung 25: Darstellung der Exponentialfunktion für die Alpha- und Beta-Werte. Links mit sss_geo_sdens und rechts mit sss_torque (fb2).

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse aus den Laborversuchen und der Datenanalyse präsentiert. Dabei beschreiben die ersten drei Zeichen die Versuchsreihe, das 5. Zeichen den C_v -Wert und die letzten zwei Zeichen die Geschwindigkeitsstufe.

Die Versuchsbezeichnung „fb2_2_v4“ bedeutet somit:

- fb2 = Firschnitzbach $D_{max} = 31,5$ mm (Tabelle 3)
- fb2_2 = 2. volumetrische Sedimentkonzentration
- fb2_2_v4 = bei der 4. Geschwindigkeitsstufe

Bei den Fließdiagrammen bezieht sich die Legendenbezeichnung auf die C_v -Werte in chronologischer Reihenfolge, welche jeweils in den darauffolgenden Tabellen aufgelistet werden.

Bei bildlichen Darstellungen der Mur-Welle bewegt sich das Gemisch stets von rechts nach links.

In Tabelle 3 sind die durchgeführten Versuche nach der maximalen Korngröße sortiert dargestellt, mit den in weiterer Folge verwendeten Abkürzungen und der Bandbreite der C_v -Werte. Der erste Versuch mit dem Firschnitzbach „fb1“ ist in Tabelle 3 nicht vorhanden und wird auch in weiterer Folge nicht behandelt, da es während des Versuchs zu einem Durchführungsfehler gekommen ist.

Tabelle 3: Übersicht der durchgeführten Versuche.

Name des Bachs	Abkürzungen	Datum	max. Korn [mm]	Masse [kg]	Volumetrische Sedimentkonzentration [-]		
					min	mittel	max
Firschnitzbach	fb4	26.03.2015	16	95	0.612	0.630	0.655
Firschnitzbach	fb6	06.05.2015	16	119	0.628	0.601	0.550
Firschnitzbach	fb2	20.02.2015	31.5	91	0.656	0.706	0.749
Firschnitzbach	fb3	24.03.2015	63	112	0.716	0.762	0.789
Firschnitzbach	fb5	05.05.2015	63	142	0.663	0.684	0.711
Wäldletobel	wt3	04.05.2015	16	119	0.604	0.645	0.688
Wäldletobel	wt1	10.04.2015	31.5	94	0.520	0.579	0.646
Wäldletobel	wt2	27.04.2015	63	118	0.596	0.641	0.697
Mühlbach	mb1	12/13.01.2015	31.5	84	0.568	0.524	0.474
Mühlbach	mb2	17.02.2015	31.5	102	0.547	0.497	0.364
Schauflerbach	ws1	07.05.2015	63	151	0.697	0.726	0.750

Der erste Versuch wurde mit dem Material des Mühlbachs durchgeführt (mb1). Dabei wurde eine Masse von 84 kg untersucht. Bei der Versuchsdurchführung fiel der beträchtliche Massenunterschied zwischen der 1. und 5. Versuchsreihe durch die Probenahme für die C_v -Wert Bestimmung auf. Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben ist für die Bestimmung des C_v -Werts eine Probenahme von ca. $0,0015 \text{ m}^3$ (bzw. ca. 4 kg) nötig. Bei durchschnittlich 5 Messungen ergibt das insgesamt eine Entnahme von ca. 20 kg. Um den Massenunterschied zwischen der ersten und letzten Messung unter $\frac{1}{4}$ zu begrenzen, wurde für alle weiteren Versuche ein Gewicht von mindestens 90 kg Murmaterial festgelegt und für den Mühlbach ein zweiter Versuch bei gleichbleibendem Korndurchmesser durchgeführt.

4.1 Firschnitzbach

Um mögliche Zusammenhänge der Ergebnisse mit der Probemenge zu untersuchen wurden die Versuche mit den maximalen Korndurchmessern von 16 mm und 63 mm mit unterschiedlicher Versuchsmenge durchgeführt.

4.1.1 Versuchsreihe „fb2“

Beim fb2 wurde das Material mit einem maximalen Korndurchmesser von 31,5 mm bei 7 verschiedenen volumetrischen Sedimentkonzentrationen untersucht.

In Abbildung 26 und 27 sind die ermittelten Schubspannungen und die dazugehörigen iterativ berechneten Scherraten von 7 verschiedenen volumetrischen Sedimentkonzentrationen dargestellt. Zusätzlich werden die linearen Anpassungen und die dazugehörigen Gleichungen angezeigt (vgl. Abbildung 7, Linie 5 und Gleichung 6). Die Schubspannung wurde in Abbildung 27 über den Drehmomentflansch ermittelt. In Abbildung 26 wird die Schubspannung hingegen über die Normalspannung berechnet und beim ersten C_v -Wert ist die Steigung¹⁰ der ermittelten linearen Anpassung negativ und wird deshalb nicht dargestellt.

¹⁰ Die Steigung der Geraden entspricht der Viskosität, vgl. Abbildung 20

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

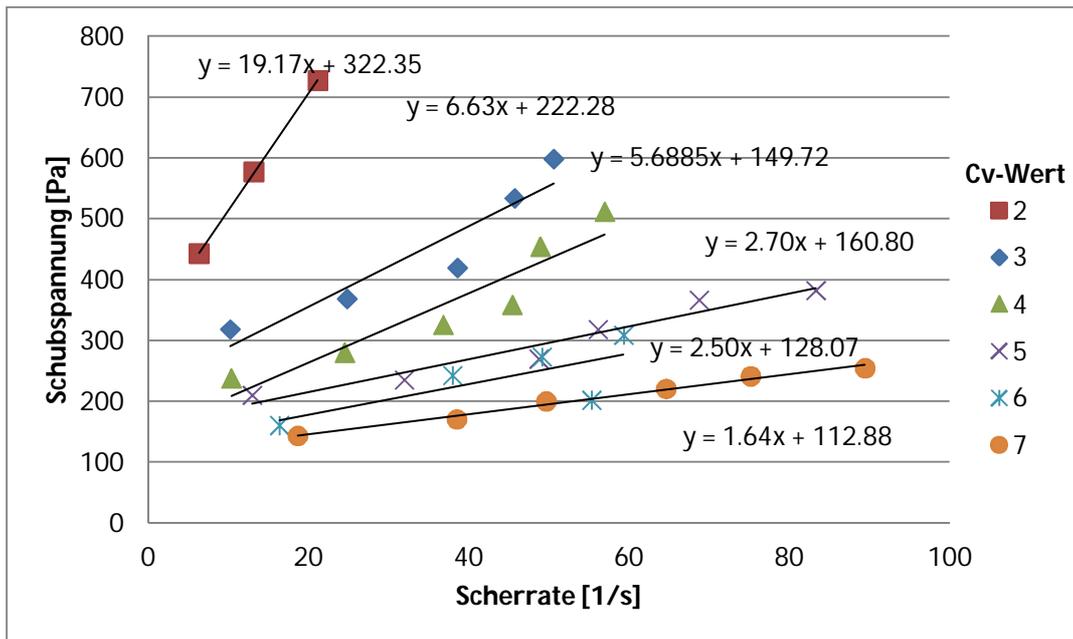


Abbildung 26: Fließdiagramm von fb2 bei 6 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.

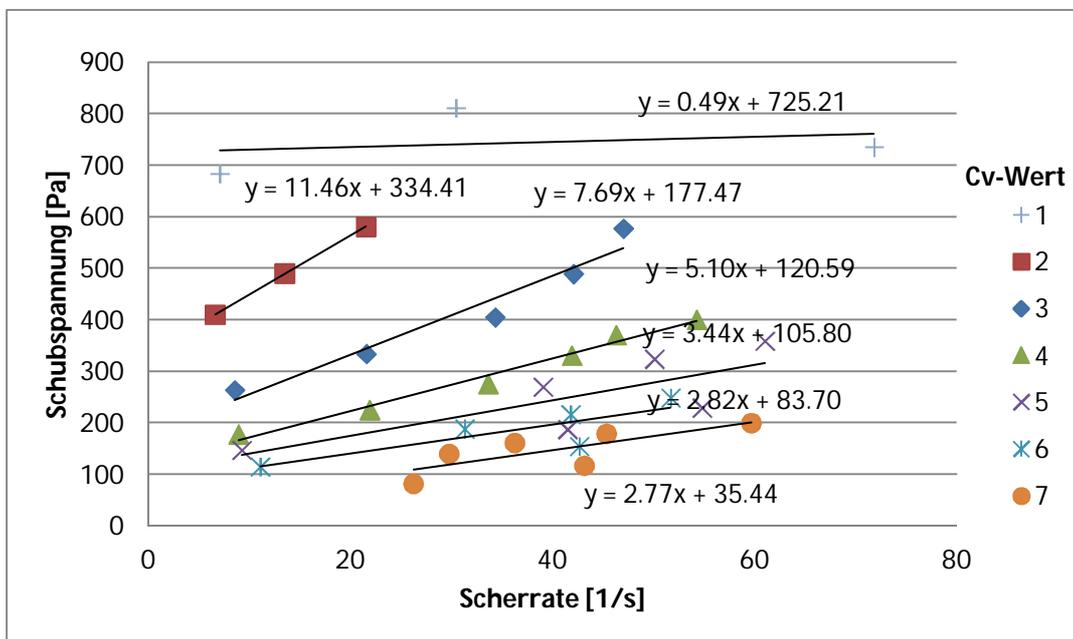
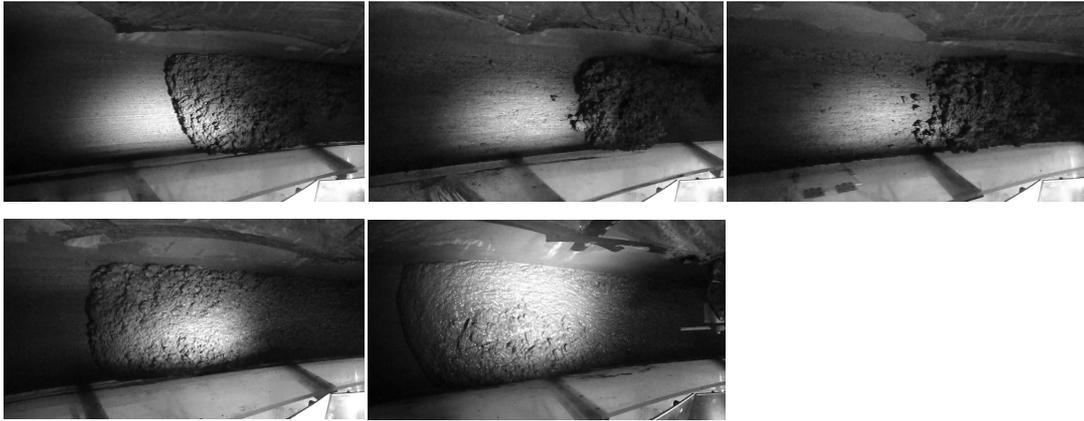


Abbildung 27: Fließdiagramm von fb2 bei 7 verschiedenen C_v -Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde.

Tabelle 4: Viskosität η und Grenzscherubspannung τ_{Gr} von fb2 mit den jeweiligen C_v -Werten.

C_v [-]	Normalspannung		Drehmomentflansch	
	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]
0.742			0.58	724.09
0.749	19.16	322.35	11.48	334.29
0.706	6.66	221.79	7.70	177.37
0.710	5.69	149.72	5.10	120.59
0.694	2.70	160.80	3.50	106.18
0.684	2.76	122.70	2.63	89.57
0.656	1.64	112.88	1.87	63.78

Mit steigendem Wassergehalt nimmt wie zu erwarten die Grenzscherubspannung und die Viskosität ab (Tabelle 4). Lediglich vom 1. auf den 2. C_v -Wert und vom 3. auf den 4. C_v -Wert kommt es zu einer Erhöhung der volumetrischen Sedimentkonzentration trotz Zugabe von Wasser. Dies kann durch den Einfluss einzelner großer Körner oder durch einen Messfehler entstanden sein. Die Grenzscherubspannung beim ersten C_v -Wert (0,742) ist um ein vielfaches höher und die Viskosität um ein vielfaches niedriger als bei den restlichen Versuchen. Während der Versuche wurde bereits erkannt, dass es sich bei der ersten Versuchsreihe von fb2 um kein Fließen im eigentlichen Sinn, sondern ein Gleiten der zähen Masse am Trommelboden handelt (Abbildung 28, Oben) und wurde deshalb für die weiteren Berechnungen nicht verwendet.



**Abbildung 28: Frames aus der Video-Analyse. Von links nach rechts
Oben: fb2_1_v1 bis v3 (kein Fließen) und Unterhalb zum Vergleich
fb2_2_v1 (zähflüssiges Fließen) und fb2_3_v1 (eindeutiges Fließen)
von links nach rechts.**

Im Zuge der Video-Analyse wurde ein Bewegungsmuster der Mur-Welle beobachtet, welches sich auch bei anderen Versuchen, bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten, zeigte. Anhand des Versuchs fb2_1 soll dieses Bewegungsmuster beschrieben werden:

Das Versuchsmaterial rutscht bei der ersten Geschwindigkeit wie eine zusammenhängende Masse über die Rauheitsmatten. Ab der zweiten Geschwindigkeit von 0,86 m/s bleibt ein Teil des Versuchsmaterials an den Seitenwänden sowie der Sohle kleben und staut sich teilweise am Abstreifer (Wie in Abbildung 29, Bild 4 rechts) oder rotiert mit der Trommel mit. Ab der dritten Geschwindigkeitsstufe (Abbildung 29, 1-4), haftet sich das Murmaterial an die Sohle (1) und wird daraufhin in Richtung des Abstreifers transportiert (2). Es kommt zu einer Akkumulation des Versuchsmaterials (3) und beim Erreichen eines gewissen Volumens fällt das akkumulierte Material wieder zum Ausgangspunkt zurück (4). Dieses Phänomen wird in weiterer folge als Wippen bezeichnet.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

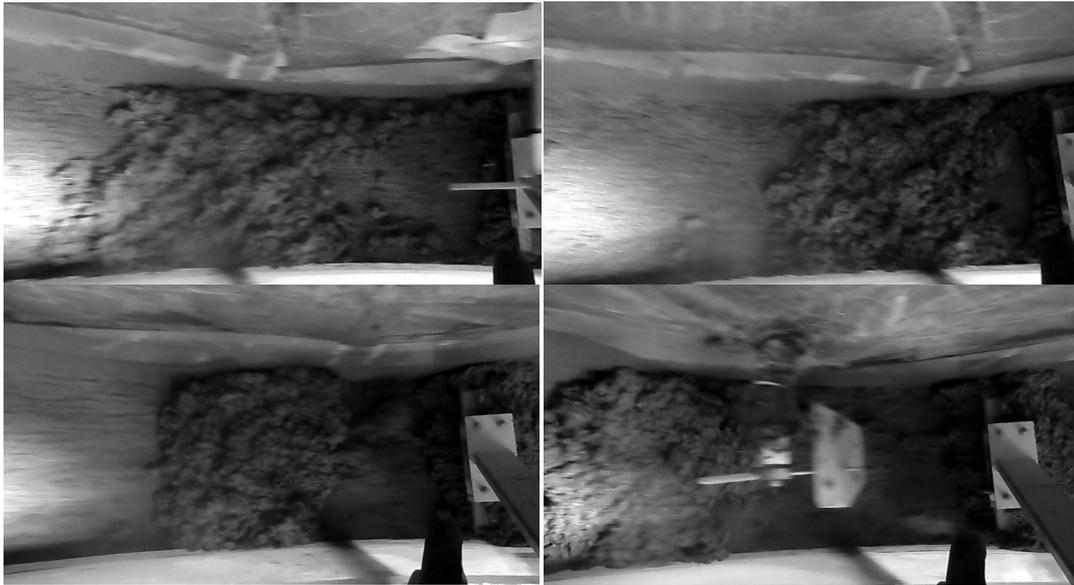


Abbildung 29, 1-4: Ansicht der Trommelrinne. Wippen; Frames von fb2_1_v3.

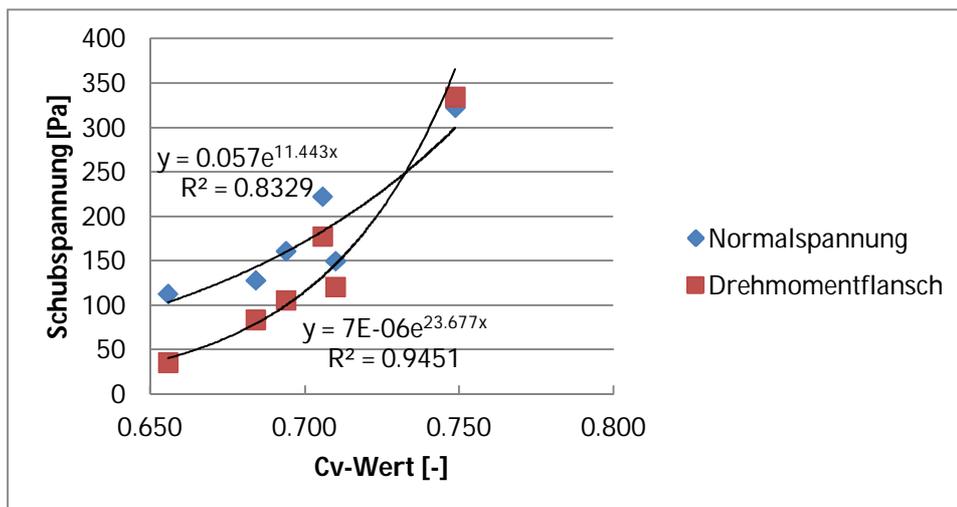


Abbildung 30: Die Grenzschubspannungen gegen die C_v-Werte aus Tabelle 4, mit der exponentiellen Anpassung.

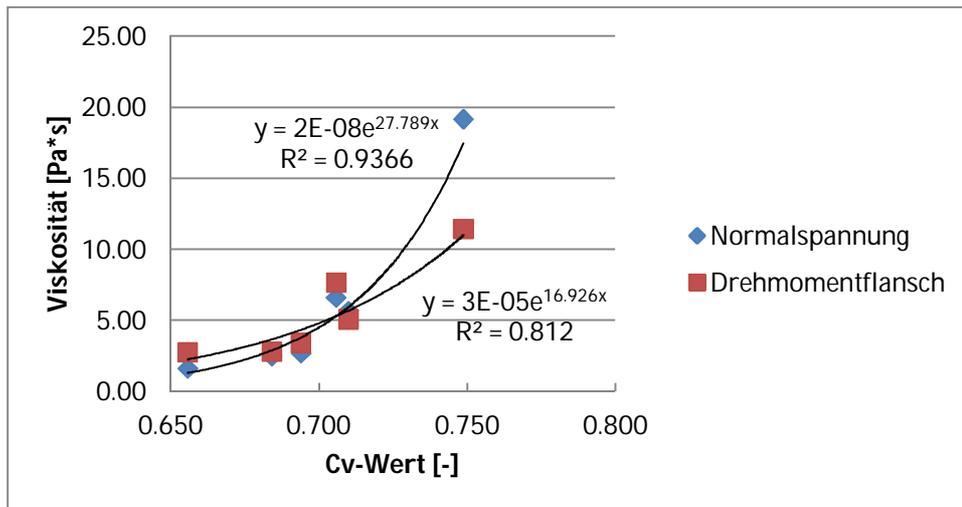


Abbildung 31: Die Viskosität gegen die C_v -Werte aus Tabelle 4, mit der exponentiellen Anpassung.

Durch die exponentielle Anpassung der Werte in Abbildung 30 und 31 erhalten wir die gesuchten Modellparameter für einen maximalen Korndurchmesser von 31,5 mm:

über die Normalspannung

$$\tau_y = 0.025 * e^{12.587 * C_v}$$

$$\eta = 3.841 * 10^{-9} * e^{29.827 * C_v}$$

über den Drehmomentflansch

$$\tau_y = 5.219 * 10^{-5} * e^{20.937 * C_v}$$

$$\eta = 2.334 * 10^{-5} * e^{17.513 * C_v}$$

4.1.2 Versuchsreihe „fb3“

Bei der 3. Versuchsreihe wurde das Material mit einem maximalen Korndurchmesser von 63 mm bei 5 verschiedenen volumetrischen Sedimentkonzentrationen untersucht.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

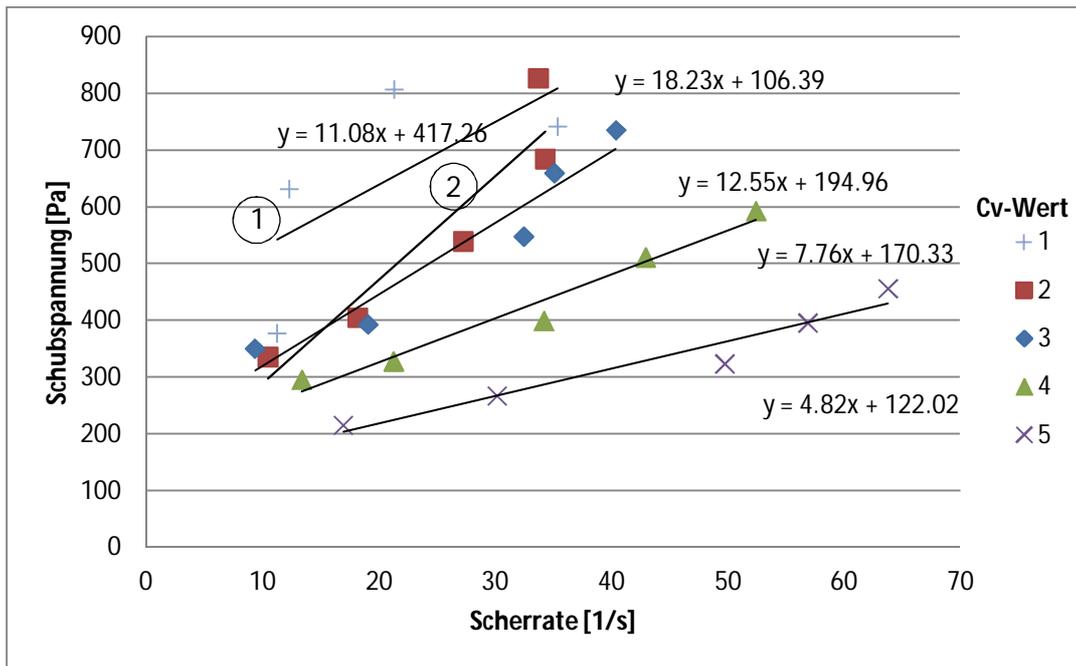


Abbildung 32: Fließdiagramm von fb3 bei 5 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.

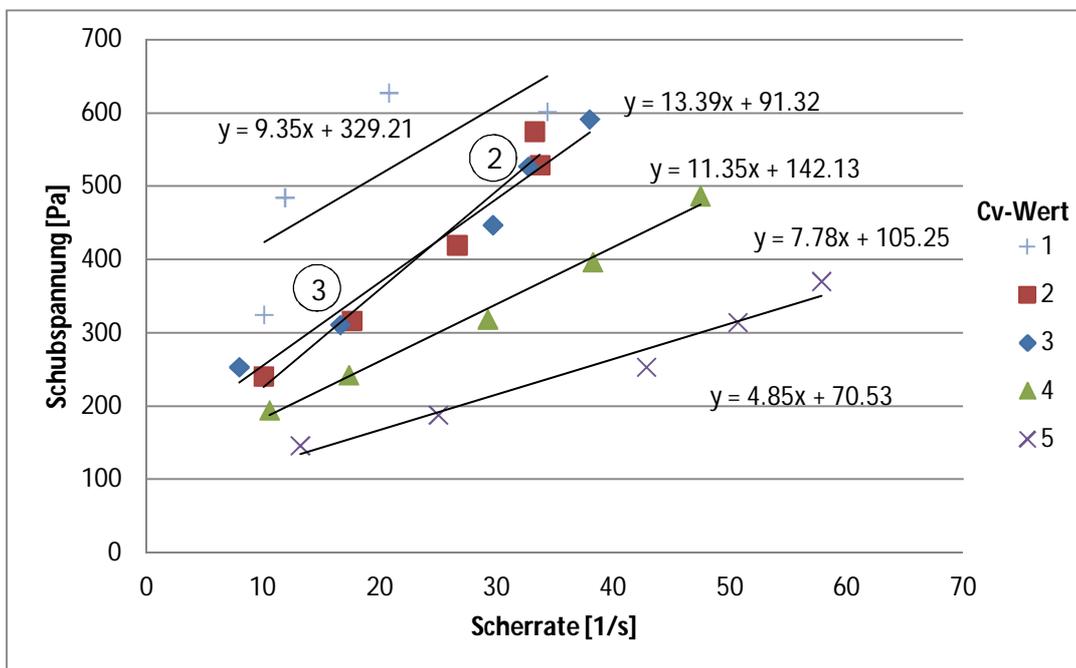


Abbildung 33: Fließdiagramm von fb3 bei 5 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde.

Wie in Abbildung 32 und 33 ersichtlich sind die Schubspannungen des zweiten und dritten Datenpunkts beim ersten C_v -Wert relativ hoch. Dies kommt vermutlich durch eine einseitige Aggregation der Grobkomponenten (Abbildung 34) zustande, die sich in der 4. Geschwindigkeitsstufe wieder auflöst.



Abbildung 34: Ansicht der Trommelrinne. Einseitige Aggregation der Grobkomponenten bei fb3_1_v2 (links) und fb3_1_v3 (rechts).

Die Steigung der linearen Anpassung beim zweiten C_v -Wert in Abbildung 32 und 33 ist viel steiler als die der Übrigen. Wie auf den Video-Frame von fb3_2_v5 ersichtlich (Abbildung 35) hüpfen, rollen und springen die größten Steine auf und vor der Front. Die Viskosität ist deutlich erhöht (Tabelle 5), wobei die Normalspannungsplatten auf dieses Phänomen sensibler reagieren. Dieses Verhalten, in weiterer Folge als Steinflug bezeichnet, konnte bei fb3_2_v4-5 und bei fb3_4_v4-5 beobachtet werden, wobei die Auswirkungen bei Zweiteren nicht klar ersichtlich sind.



Abbildung 35: Ansicht der Trommelrinne. Steinflug; Frames von fb3_2_v5.

Tabelle 5: Viskosität η und Grenzscherubspannung τ_{Gr} von fb3 mit den jeweiligen C_v -Werten.

C_v [-]	Normalspannung		Drehmomentflansch	
	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]
0.780	11.27	349.55	9.35	329.21
0.789	18.23	106.39	13.39	91.32
0.753	12.55	194.96	11.35	142.13
0.771	7.76	170.33	7.78	105.25
0.716	4.82	122.02	4.85	70.53

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

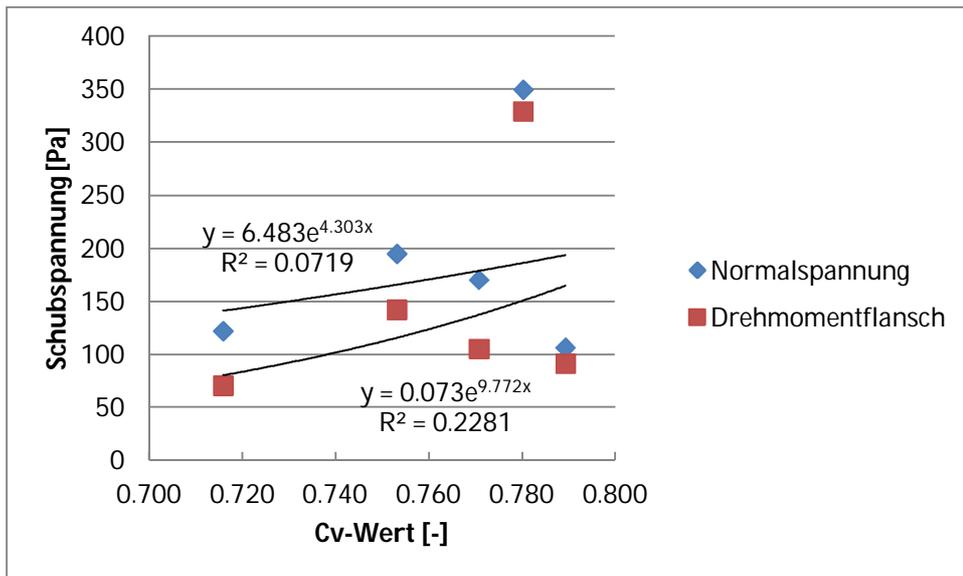


Abbildung 36: Die Grenzs Schubspannungen gegen die C_v -Werte aus Tabelle 4, mit der exponentiellen Anpassung.

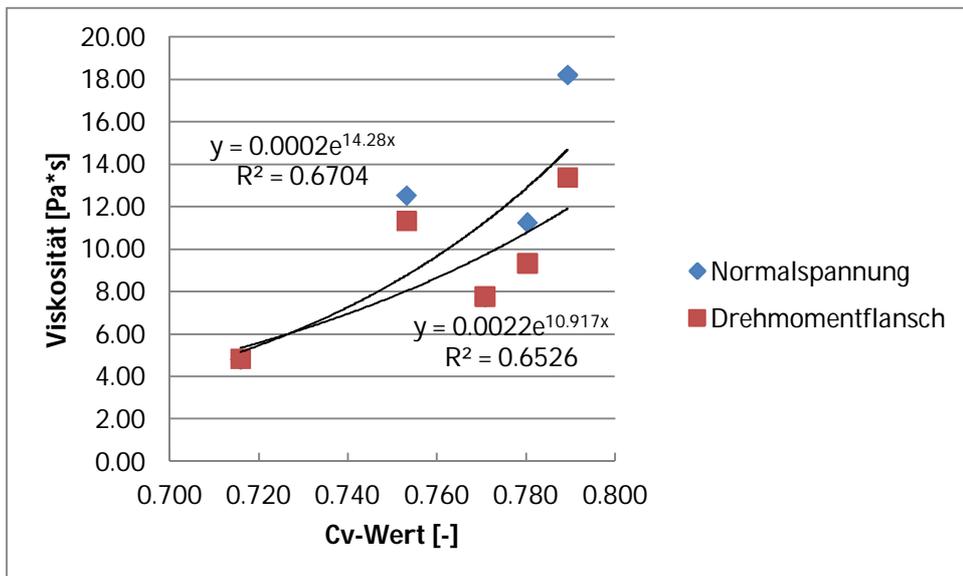


Abbildung 37: Die Viskosität von fb3 gegen die C_v -Werte aus Tabelle 4, mit der exponentiellen Anpassung.

Durch die exponentielle Anpassung der Werte in Abbildung 36 und 37 erhalten wir die gesuchten Modellparameter für einen maximalen Korndurchmesser von 63 mm:

über die Normalspannung

$$\tau_y = 3.648 * e^{5.169 * C_v}$$

$$\eta = 8.842 * 10^{-5} * e^{15.293 * C_v}$$

über den Drehmomentflansch

$$\tau_y = 0.0808 * e^{9.823 * C_v}$$

$$\eta = 0.00461 * e^{9.952 * C_v}$$

4.1.3 Versuchsreihe „fb4“

Bei der 4. Versuchsreihe wurde das Material mit einem maximalen Korndurchmesser von 16 mm und 5 C_v -Werten untersucht. Beim 5. C_v -Wert ist es zu einem Fehler bei der Datenaufbereitung im Skript *bereinigeMessdaten_d* gekommen. Eine genauere Begutachtung konnte aus zeitlichen Gründen nicht durchgeführt werden und deshalb werden diese Ergebnisse nicht dargestellt.

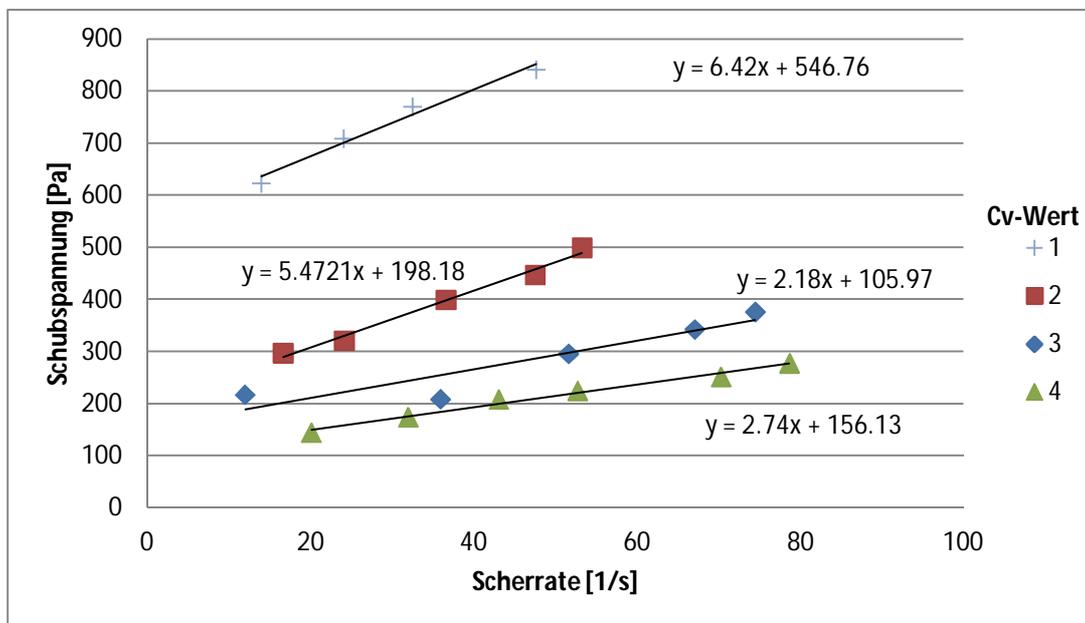


Abbildung 38: Fließdiagramm von fb4 bei 4 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

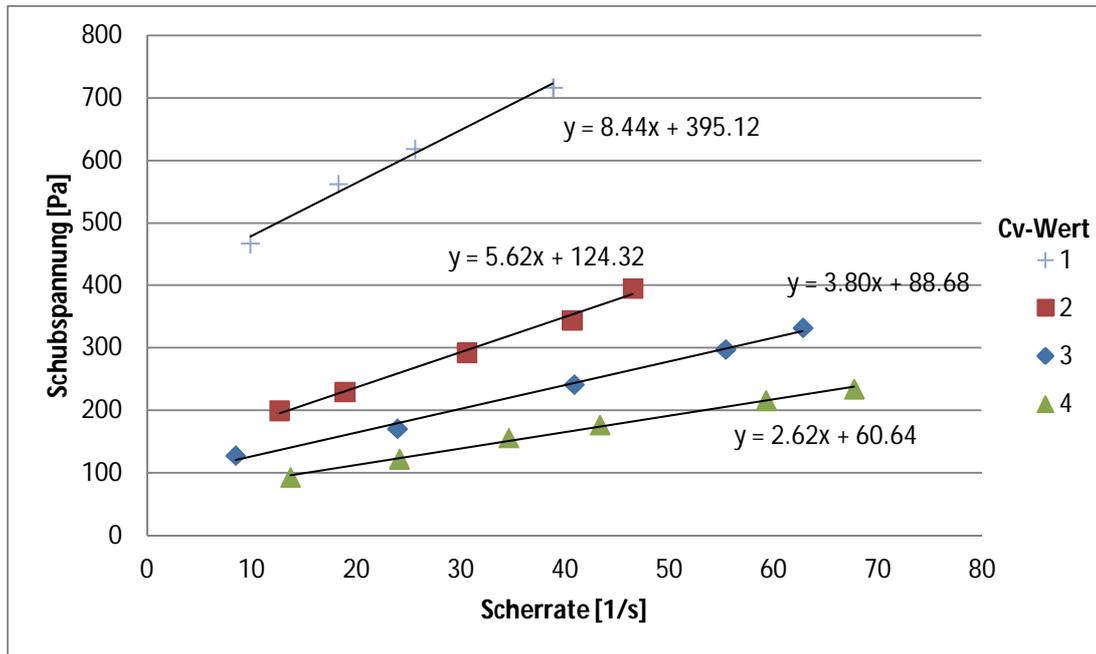


Abbildung 39: Fließdiagramm von fb4 bei 4 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde.

In Abbildung 38 und 39 sind die ermittelten Schubspannungen und die dazugehörigen iterativ berechneten Scherraten bei 4 verschiedenen volumetrischen Sedimentkonzentrationen sowie die dazugehörigen linearen Anpassungen dargestellt. In Tabelle 6 sind die Viskosität und die Grenzschubspannung für die jeweiligen C_v -Werte in Zahlenform aufgelistet.

Tabelle 6: Viskosität η und Grenzscherungsspannung τ_{Gr} von fb4 mit den jeweiligen C_v -Werten.

Cv [-]	Normalspannung		Drehmomentflansch	
	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]
0.655	6.42	546.76	8.44	395.12
0.630	5.47	198.18	5.62	124.32
0.631	2.74	156.13	3.80	88.68
0.612	2.18	105.97	2.62	60.64
0.621				

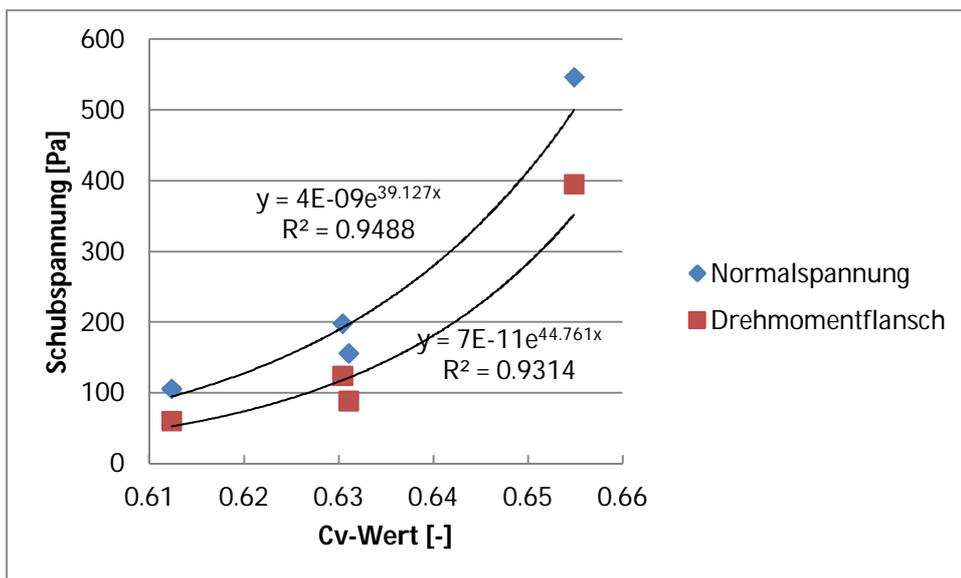


Abbildung 40: Die Grenzscherungsspannungen gegen die C_v -Werte aus Tabelle 6, mit der exponentiellen Anpassung.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

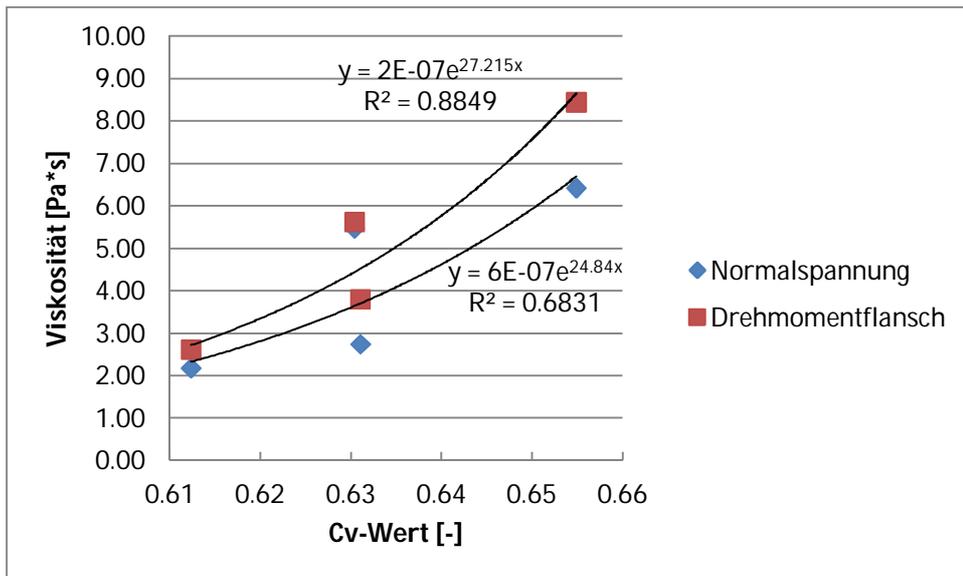


Abbildung 41: Die Viskosität gegen die C_v -Werte aus Tabelle 6, mit der exponentiellen Anpassung.

Durch die exponentielle Anpassung der Werte in Abbildung 40 und 41 erhalten wir die gesuchten Modellparameter für einen maximalen Korndurchmesser von 16 mm:

über die Normalspannung

$$\tau_y = 1.312 * 10^{-10} * e^{44.364 * C_v}$$

$$\eta = 4.483 * 10^{-6} * e^{21.67 * C_v}$$

über den Drehmomentflansch

$$\tau_y = 6.739 * 10^{-13} * e^{51.919 * C_v}$$

$$\eta = 4.519 * 10^{-7} * e^{25.576 * C_v}$$

4.1.4 Versuchsreihe „fb5“

In der 5. Versuchsreihe wurde das Murmaterial mit einem maximalen Korndurchmesser von 63 mm bei 4 C_v -Werten untersucht, wobei zum Versuchsmaterial von fb3 30 kg Material beigemischt wurde.

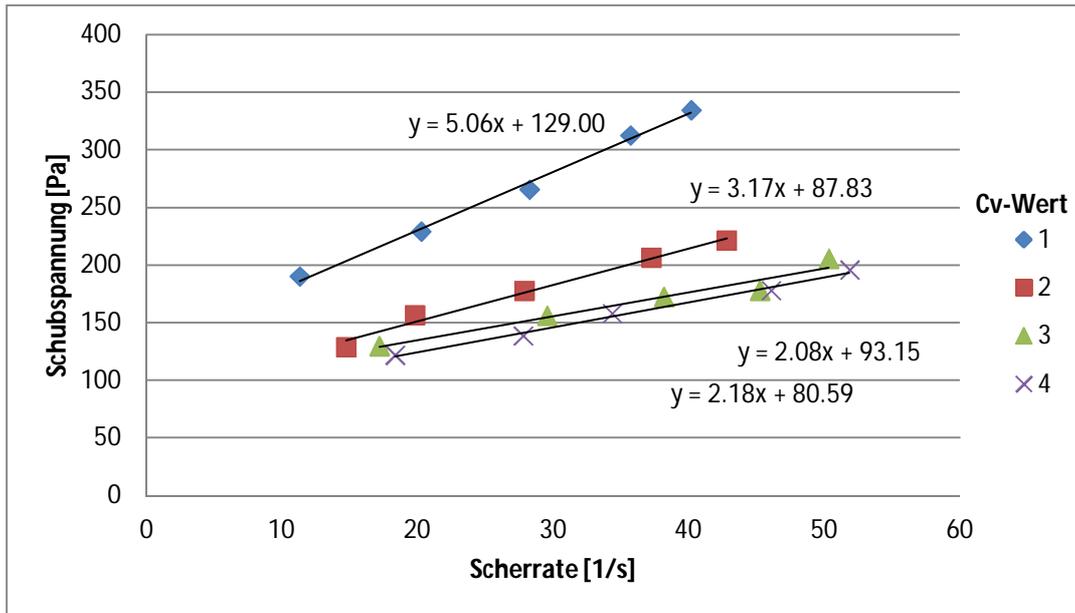


Abbildung 42: Fließdiagramm von fb5 bei 4 verschiedenen C_v -Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

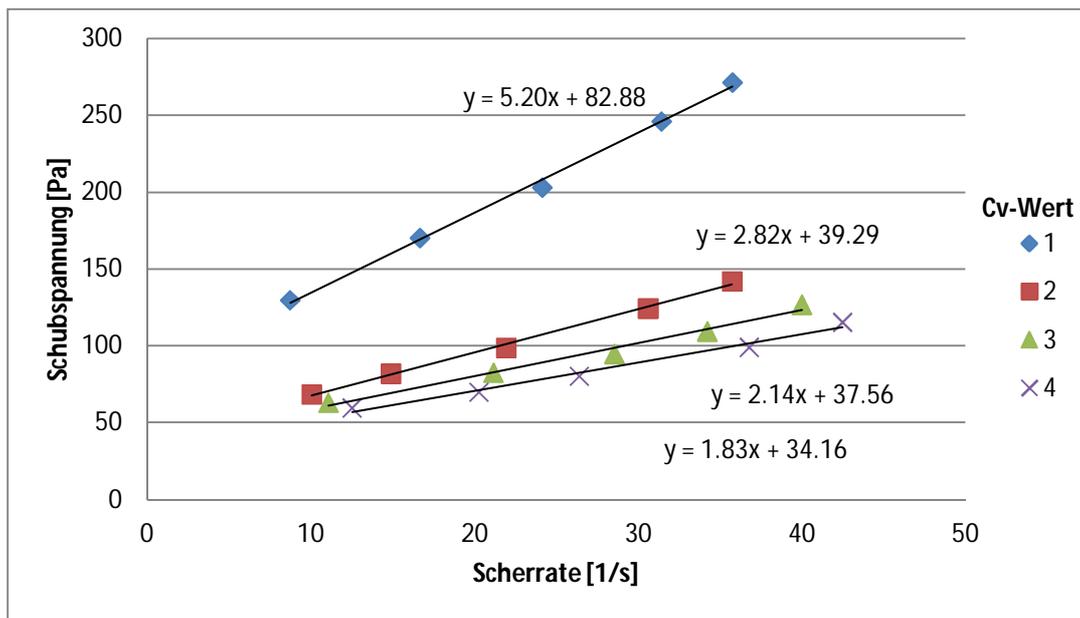


Abbildung 43: Fließdiagramm von fb5 bei 4 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde.

In Abbildung 42 und 43 sind die ermittelten Schubspannungen und die dazugehörigen iterativ berechneten Scherraten bei 4 verschiedenen volumetrischen Sedimentkonzentrationen sowie die dazugehörigen linearen Anpassungen dargestellt. In Tabelle 7 sind die Viskosität und die Grenzscherubspannung für die jeweiligen C_v -Werte in Zahlenform aufgelistet.

Tabelle 7: Viskosität η und Grenzscherubspannung τ_{Gr} von fb5 mit den jeweiligen C_v -Werten.

C_v [-]	Normalspannung		Drehmomentflansch	
	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]
0.711	5.06	129.00	5.20	82.88
0.689	3.17	87.83	2.82	39.29
0.663	2.08	93.15	2.14	37.56
0.673	2.18	80.59	1.83	34.16

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

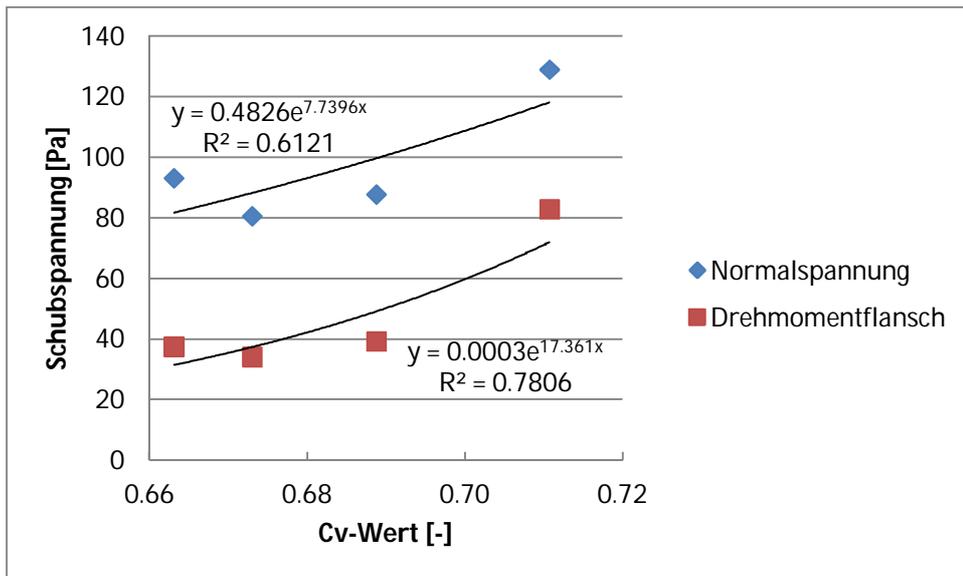


Abbildung 44: Die Grenzscherubspannungen gegen die C_v -Werte aus Tabelle 4, mit der exponentiellen Anpassung.

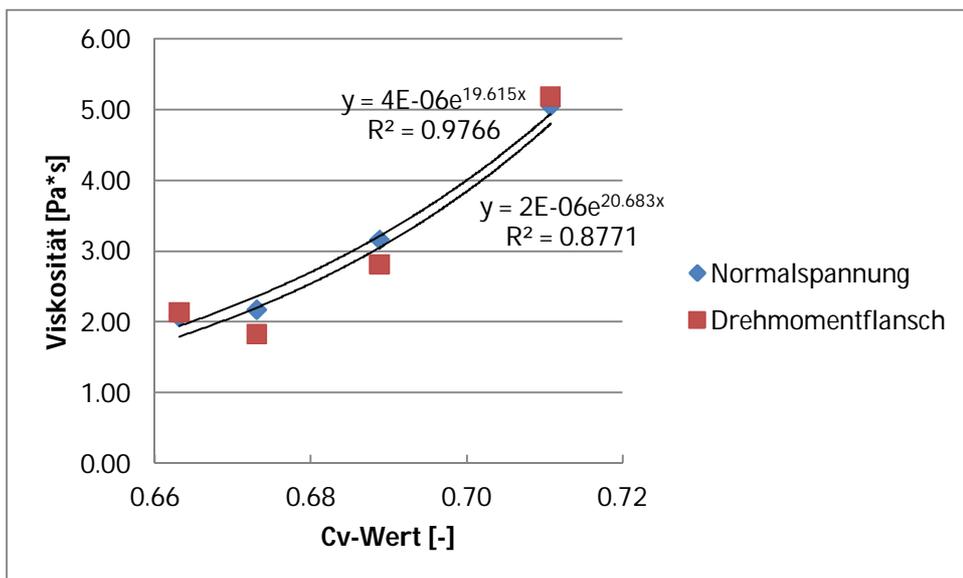


Abbildung 45: Die Viskosität gegen die C_v -Werte aus Tabelle 4, mit der exponentiellen Anpassung.

Durch die exponentielle Anpassung der Werte in Abbildung 44 und 45 erhalten wir die gesuchten Modellparameter für einen maximalen Korndurchmesser von 63 mm:

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

über die Normalspannung

$$\tau_y = 0.213 * e^{8.938 * C_v}$$

$$\eta = 2.48 * 10^{-6} * e^{20.433 * C_v}$$

über den Drehmomentflansch

$$\tau_y = 1.743 * 10^{-5} * e^{21.571 * C_v}$$

$$\eta = 3.094 * 10^{-7} * e^{23.381 * C_v}$$

4.1.5 Versuchsreihe „fb6“

In der 6. Versuchsreihe wurde das Murmaterial mit einem maximalen Korndurchmesser von 16 mm bei 5 C_v -Werten untersucht wobei zum Versuchsmaterial von fb4 24 kg Material beigemischt wurde.

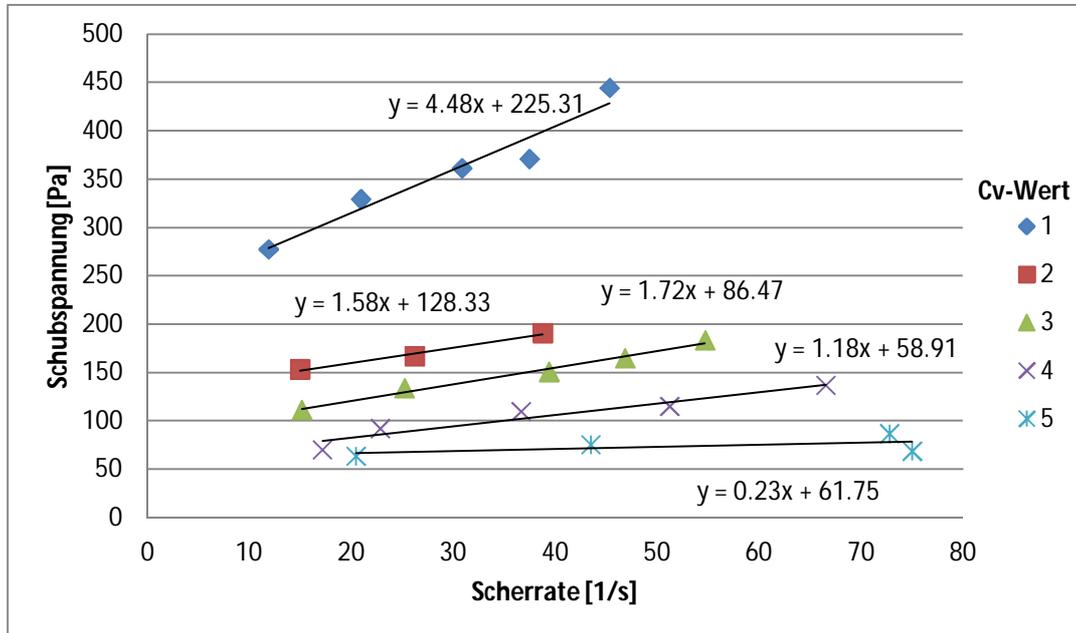


Abbildung 46: Fließdiagramm von fb6 bei 5 verschiedenen C_v -Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

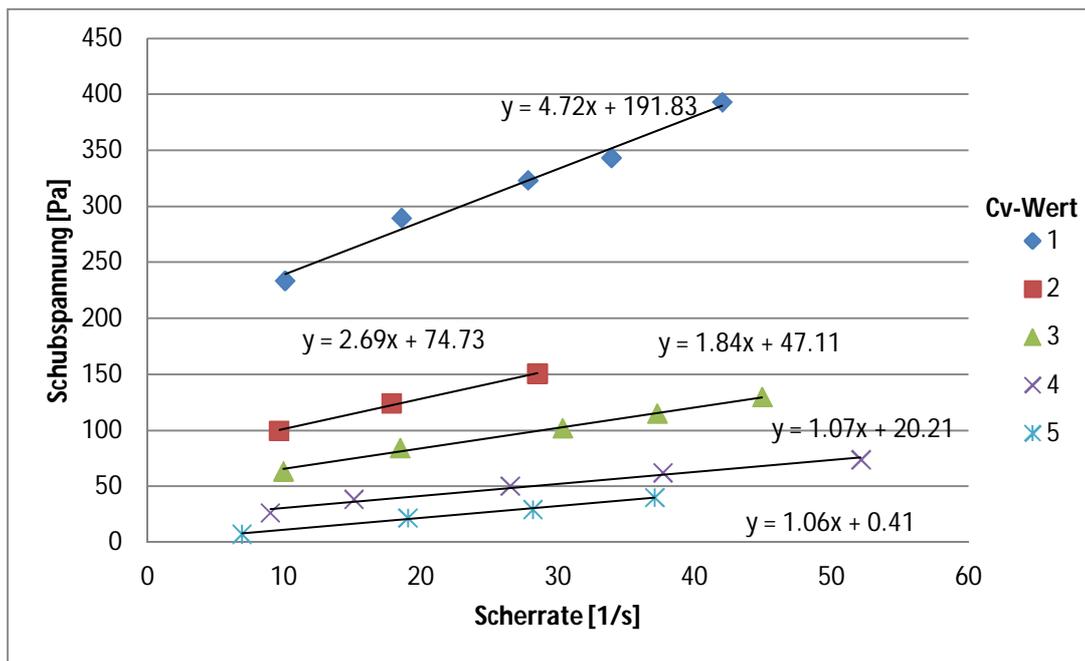


Abbildung 47: Fließdiagramm von fb6 bei 5 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde.

In Abbildung 46 und 47 sind die ermittelten Schubspannungen und die dazugehörigen iterativ berechneten Scherraten bei 5 verschiedenen volumetrischen Sedimentkonzentrationen sowie die dazugehörigen linearen Anpassungen dargestellt. In Tabelle 8 sind die Viskosität und die Grenzscherung für die jeweiligen C_v -Werte in Zahlenform aufgelistet.

Auffallend ist die markant höhere Viskosität in der ersten Versuchsreihe als in den darauf folgenden. Der Anstieg des 4. C_v -Werts kann nur durch den Einfluss grober Komponenten oder durch einen Messfehler entstanden sein.

Tabelle 8: Viskosität η und Grenzscherungsspannung τ_{Gr} von fb6 mit den jeweiligen C_v -Werten.

C_v [-]	Normalspannung		Drehmomentflansch	
	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]
0.628	4.48	225.31	4.72	191.83
0.618	1.58	128.33	2.69	74.73
0.600	1.72	86.47	1.84	47.11
0.610	1.18	58.91	1.07	20.21
0.550	0.23	61.75	1.06	0.41

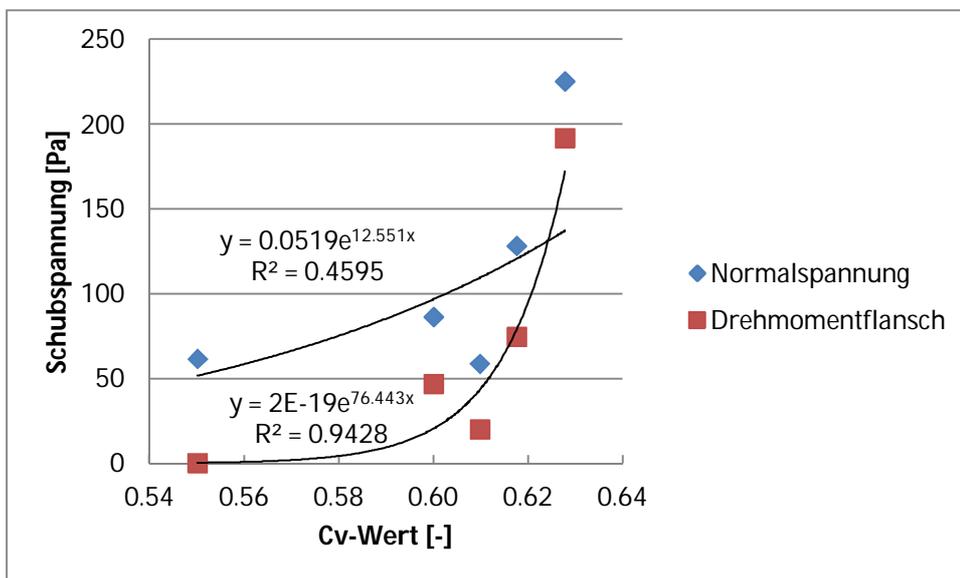


Abbildung 48: Die Schubspannung gegen die C_v -Werte aus Tabelle 8, mit der exponentiellen Anpassung.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

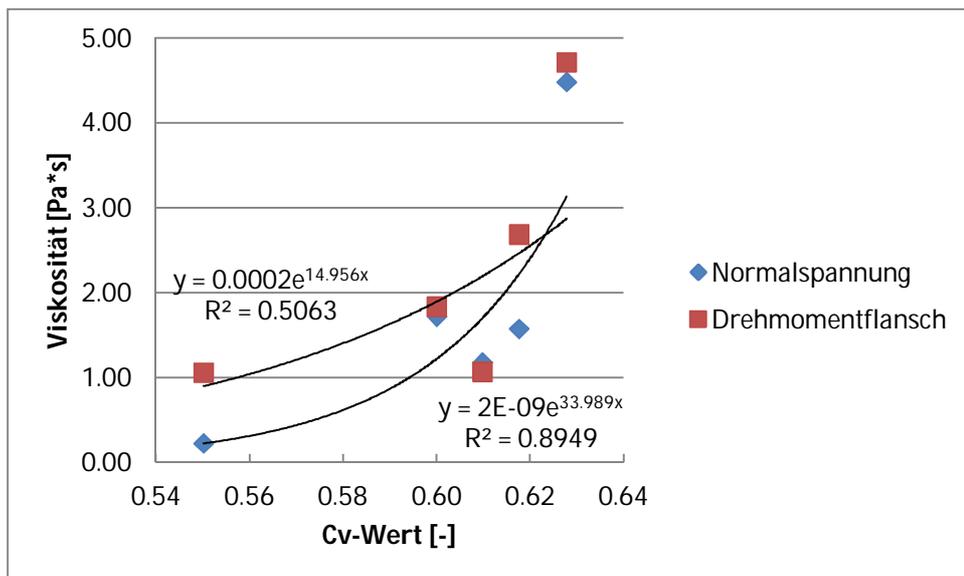


Abbildung 49: Die Viskosität gegen die C_v -Werte aus Tabelle 8, mit der exponentiellen Anpassung.

Durch die exponentielle Anpassung der Werte in Abbildung 48 und 49 erhalten wir die gesuchten Modellparameter für einen maximalen Korndurchmesser von 16 mm:

über die Normalspannung

$$\tau_y = 9.8 * 10^{-11} * e^{45.256 * C_v}$$

$$\eta = 5.513 * 10^{-17} * e^{61.929 * C_v}$$

über den Drehmomentflansch

$$\tau_y = 8.309 * 10^{-23} * e^{89.343 * C_v}$$

$$\eta = 2.042 * 10^{-13} * e^{48.950 * C_v}$$

4.2 Mühlbach

4.2.1 Versuchsreihe „mb1“

Die erste Versuchsreihe wurde mit 85 kg Murmaterial mit einem maximalen Korndurchmesser von 31,5 mm und 5 C_v -Werten durchgeführt.

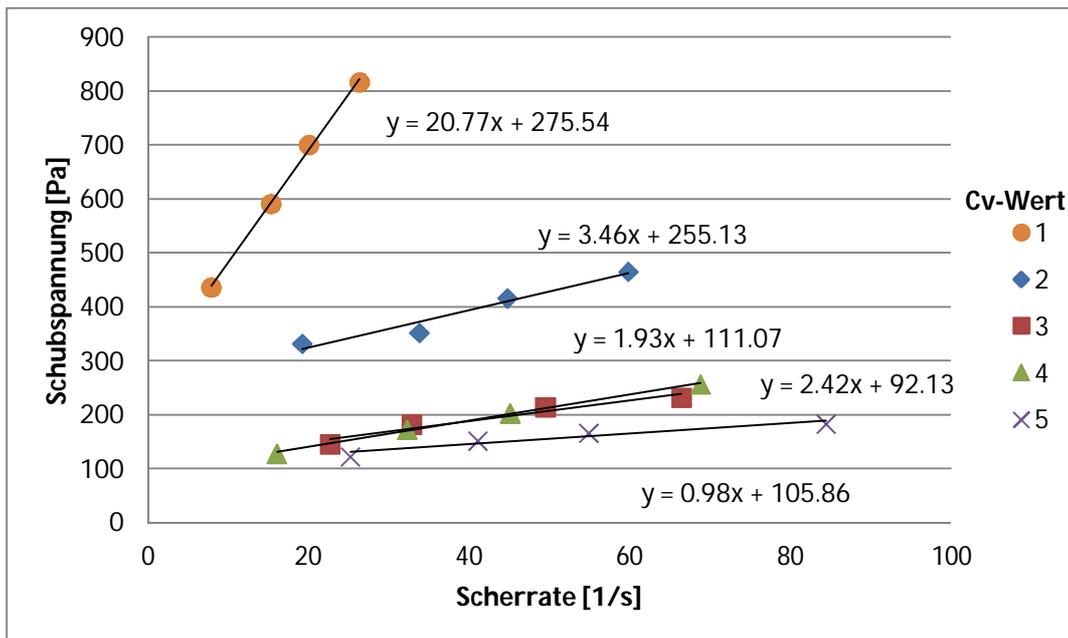


Abbildung 50: Fließdiagramm von mb1 bei 5 verschiedenen C_v -Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

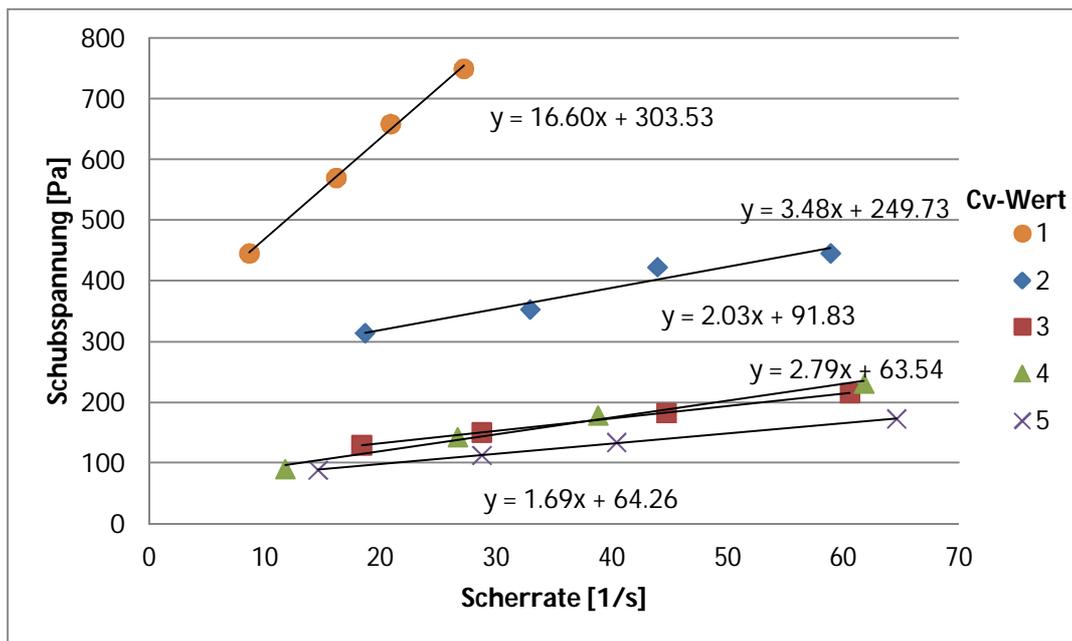


Abbildung 51: Fließdiagramm von mb1 bei 5 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde.

In Abbildung 50 und 51 sind die ermittelten Schubspannungen und die dazugehörigen iterativ berechneten Scherraten bei 5 verschiedenen volumetrischen Sedimentkonzentrationen, sowie die dazugehörigen linearen Anpassungen dargestellt. Die Viskosität beim ersten C_v -Wert ist im Vergleich zu den darauffolgenden sehr hoch (Tabelle 9). Der C_v -Gehalt des ersten Versuchs ist in einem höheren Bereich als die zwei darauffolgenden, was die erhöhte Viskosität erklären könnte. Die Erhöhung der berechneten volumetrischen Sedimentkonzentration vom 4. auf den 5. C_v -Wert nach der Zugabe von Wasser kann nur durch einen Messfehler oder durch den Einfluss einzelner großer Körner entstanden sein.

Tabelle 9: Viskosität η und Grenzschubspannung τ_{Gr} von mb1 mit den jeweiligen C_v -Werten.

Cv [-]	Normalspannung		Drehmomentflansch	
	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]
0.568	20.77	275.54	16.60	303.53
0.543	3.46	255.13	3.48	249.73
0.540	1.93	111.07	2.03	91.83
0.474	2.42	92.13	2.79	63.54
0.492	0.98	105.86	1.69	64.26

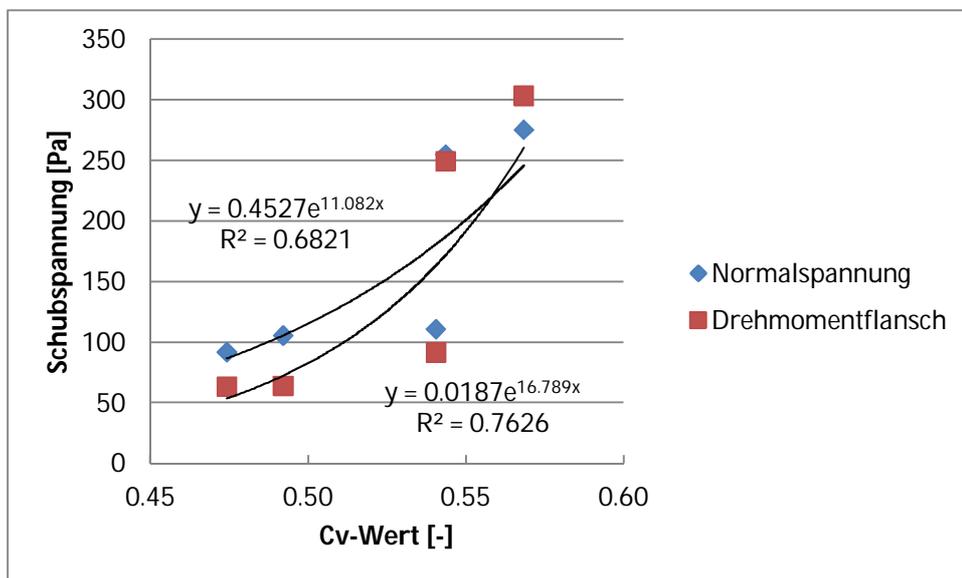


Abbildung 52: Die Schubspannung gegen die C_v -Werte aus Tabelle 9, mit der exponentiellen Anpassung.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

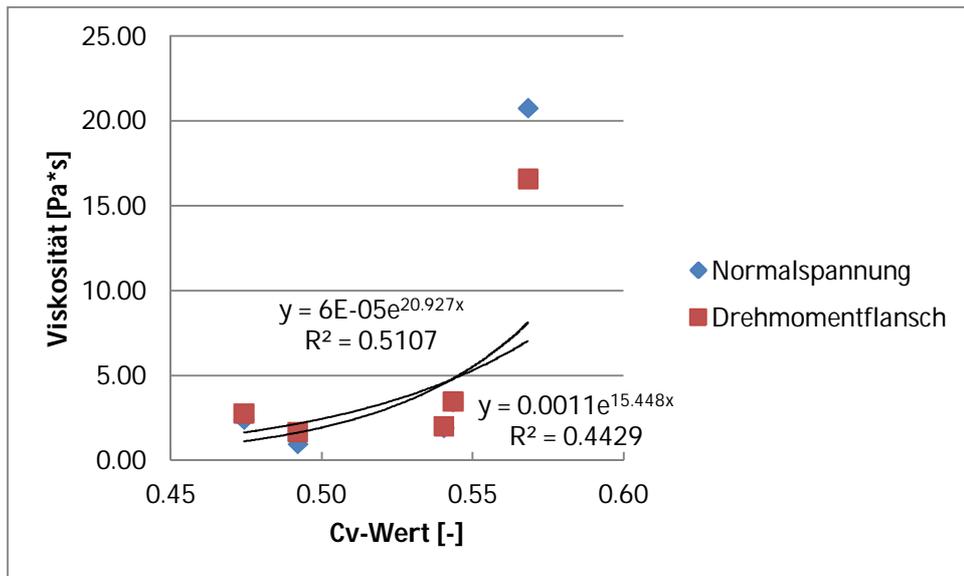


Abbildung 53: Die Viskosität gegen die C_v -Werte aus Tabelle 9, mit der exponentiellen Anpassung.

Durch die exponentielle Anpassung der Werte in Abbildung 52 und 53 erhalten wir die gesuchten Modellparameter für einen maximalen Korndurchmesser von 31,5 mm:

über die Normalspannung

$$\tau_y = 0.188 * e^{12.789 * C_v}$$

$$\eta = 2.567 * 10^{-18} * e^{76.605 * C_v}$$

über den Drehmomentflansch

$$\tau_y = 0.00309 * e^{20.211 * C_v}$$

$$\eta = 7.836 * 10^{-16} * e^{66.141 * C_v}$$

4.2.2 Versuchsreihe „mb2“

Bei der zweiten Versuchsreihe wurde 18 kg Murmaterial zum Material aus mb1 beigemischt. Der Versuch wurde mit 5 verschiedenen C_v -Werten durchgeführt.

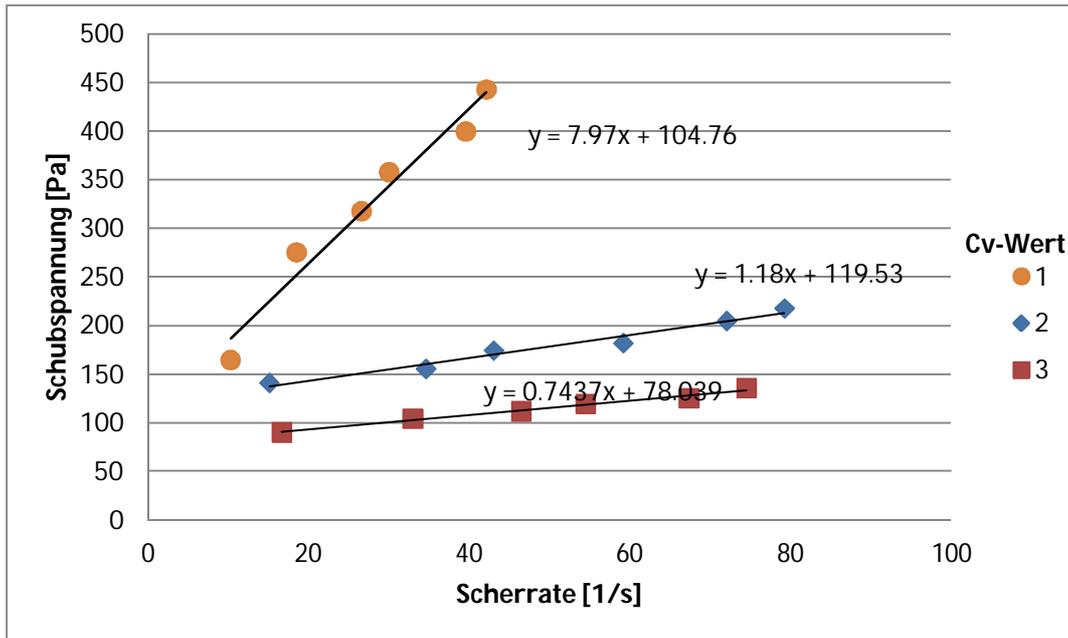


Abbildung 54: Fließdiagramm von mb2 bei 3 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

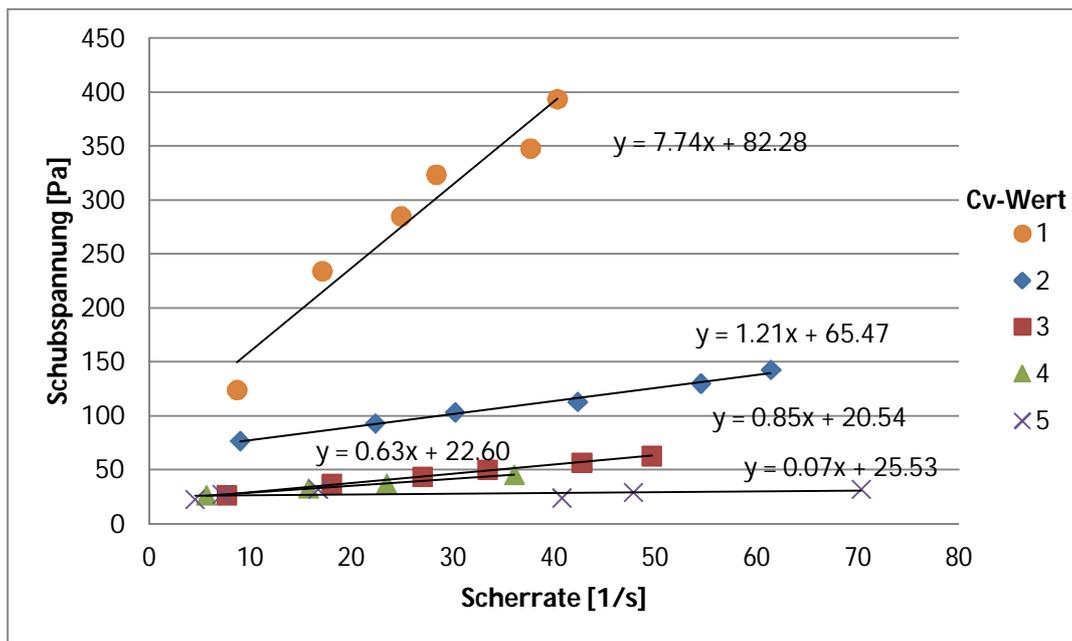


Abbildung 55: Fließdiagramm von mb2 bei 5 verschiedenen C_v -Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde.

Die ermittelten Schubspannungen und die dazugehörigen iterativ berechneten Scherraten sind in Abbildung 54 und 55 dargestellt. Bei der Berechnung über die Normalspannungsplatten konnte nur bei den 3 ersten volumetrischen Sedimentkonzentrationen eine positive Viskosität ermittelt werden. Die Viskosität beim ersten C_v -Wert ist im Vergleich zu den darauffolgenden wie beim Versuch mb1 sehr hoch. Die Erhöhung der volumetrischen Sedimentkonzentration vom 1. auf den 2. C_v -Wert kann nur durch einen Messfehler oder durch den Einfluss einzelner großer Körner erklärt werden. Der 5. C_v -Wert ist sehr gering. Die Gültigkeit der Ergebnisse ist anzuzweifeln, da sich das Gemisch augenscheinlich nicht wie ein viskoses Fluid verhält.

Tabelle 10: Viskosität η und Grenzscherung τ_{Gr} von mb2 mit den jeweiligen C_v -Werten.

C_v [-]	Normalspannung		Drehmomentflansch	
	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]
0.529	7.97	104.76	7.74	82.28
0.547	1.18	119.53	1.21	65.47
0.544	0.74	78.04	0.85	20.54
0.504			0.38	25.01
0.364			0.07	25.53

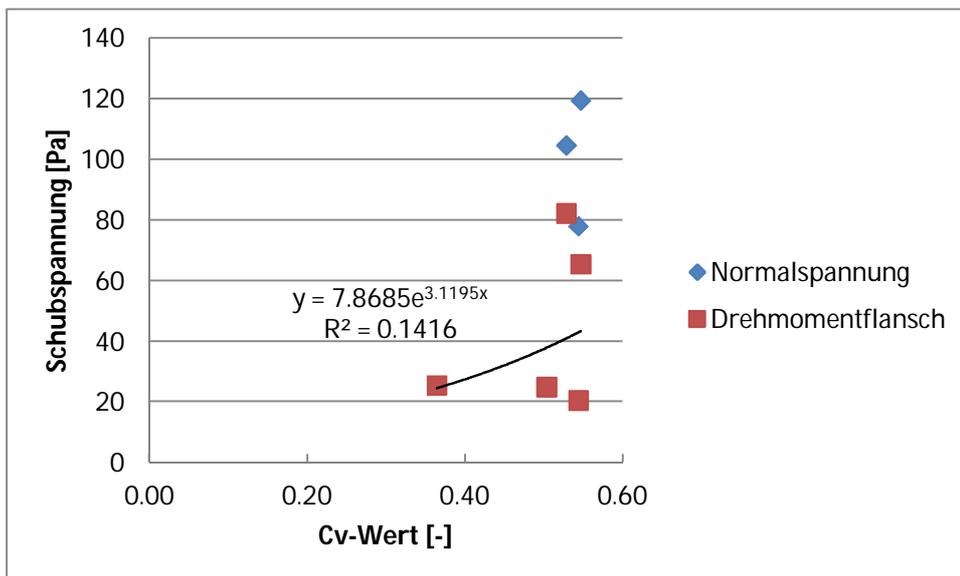


Abbildung 56: Die Schubspannung gegen die C_v -Werte aus Tabelle 10, mit der exponentiellen Anpassung.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

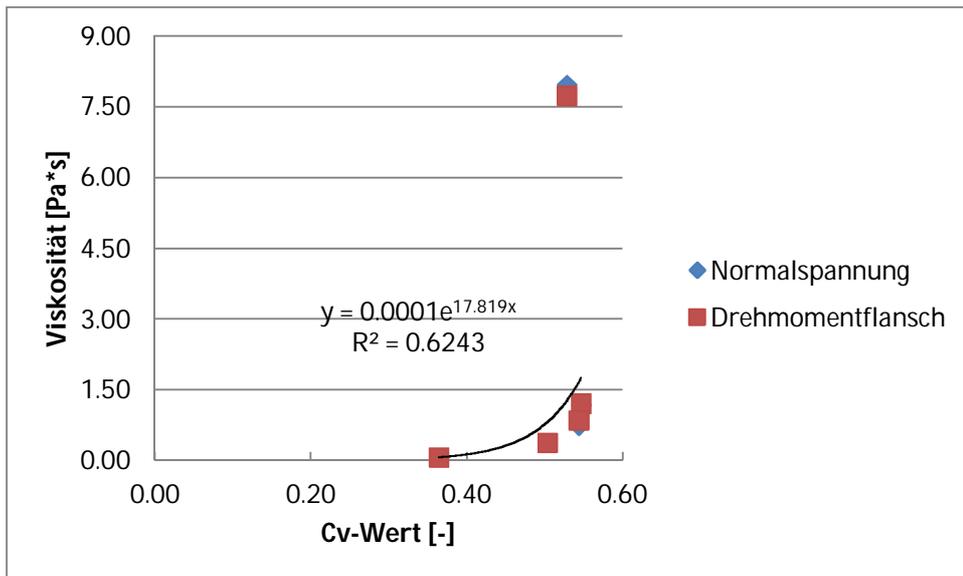


Abbildung 57: Die Viskosität gegen die C_v -Werte aus Tabelle 10, mit der exponentiellen Anpassung.

Durch die exponentielle Anpassung der Werte in Abbildung 56 und 57 erhalten wir die gesuchten Modellparameter für einen maximalen Korndurchmesser von 31,5 mm:

über den Drehmomentflansch

$$\tau_y = 4.762 * e^{7.481 * C_v}$$

$$\eta = 0.0459 * e^{7.481 * C_v}$$

über die Normalspannungsplatten konnten mit den vorhandenen Daten nur negative Modellparameter ermittelt werden.

4.3 Schauflerbach

Versuchsreihe „ws1“

Diese Versuchsreihe wurde mit einem maximalen Korndurchmesser von 63 mm bei 4 verschiedenen volumetrischen Sedimentkonzentrationen durchgeführt.

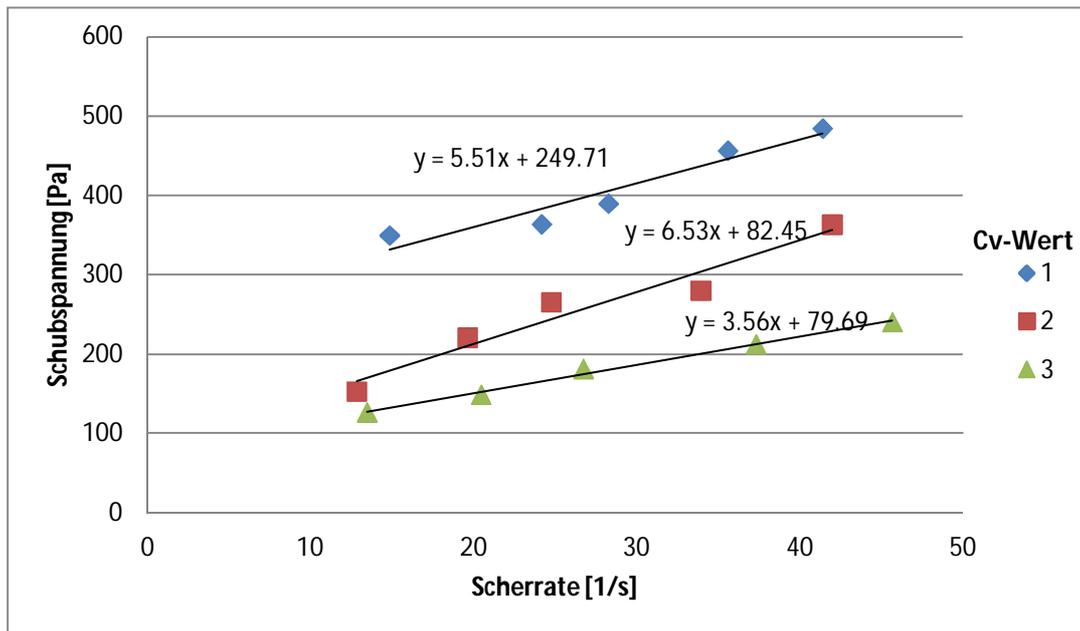


Abbildung 58: Fließdiagramm von ws1 bei 3 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über die Normalspannung berechnet wurde.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

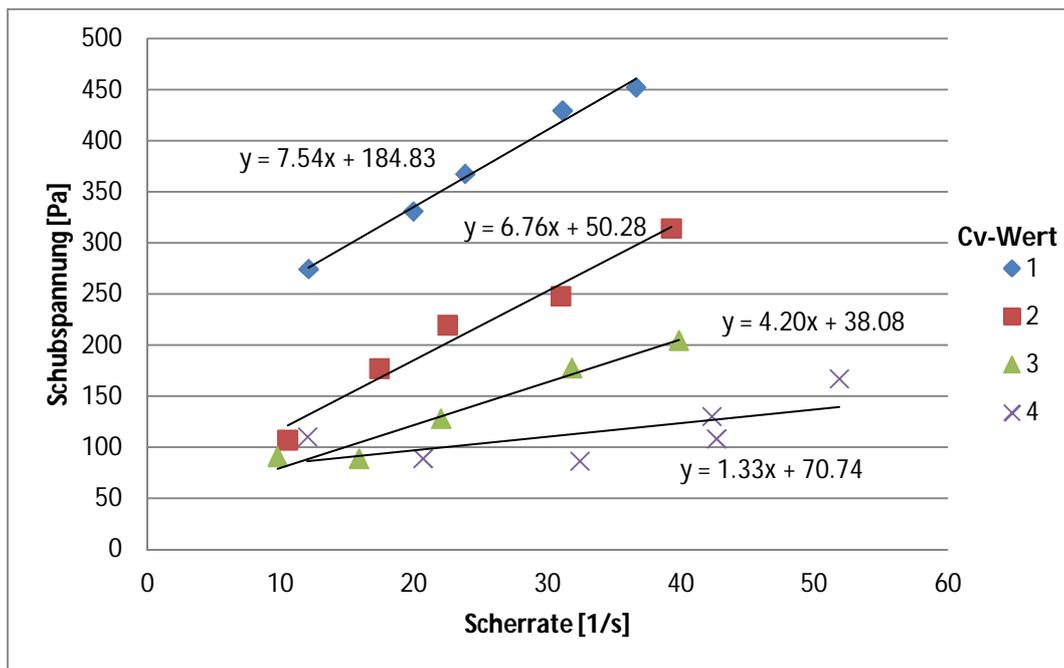


Abbildung 59: Fließdiagramm von ws1 bei 4 verschiedenen C_v - Werten, wobei die Schubspannung über den Drehmomentflansch berechnet wurde.

In Abbildung 58 und 59 sind die ermittelten Schubspannungen und die dazugehörigen iterativ berechneten Scherraten bei 4 verschiedenen volumetrischen Sedimentkonzentrationen sowie die dazugehörigen linearen Anpassungen dargestellt. Bei der Ermittlung über die Normalspannungsplatten konnte für den 4. C_v -Wert keine positive Viskosität ermittelt werden (Abbildung 58). Bei der Bestimmung der Schubspannung über den Drehmomentflansch (Abbildung 59) ist beim 4. C_v -Wert eine erhöhte Schubspannung bei der ersten Geschwindigkeitsstufe ersichtlich. Dies könnte auf eine schlechte Durchmischung des Wasser-Feststoff-Gemischs beruhen. In Abbildung 60 ist ein Video-Frame von ws1_4_1 zu sehen. Im rechten Bild sind zusätzlich die Stromlinien eingezeichnet, welche mit Hilfe des Matlab-Tools PIVlab regeneriert wurden. Der linke vordere Bereich der Mur-Welle (in beiden Bildern) besteht hauptsächlich aus Wasser, organischem Material und Feinsedimenten. Der Übergang zum Gemisch ist

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

durch eine Richtungsänderung der Stromlinien gekennzeichnet. Im linken Bildbereich beträgt die mittlere Oberflächengeschwindigkeit 0,028 m/s und im rechten Bildbereich 0,16 m/s. Wobei die Geschwindigkeitsvektoren im linken Bereich teilweise in die entgegengesetzte Richtung weisen. Zusätzlich ist eine Sortierung quer zur Fließrichtung ersichtlich, wobei sich die feinen Komponenten im mittleren Bereich aufhalten.

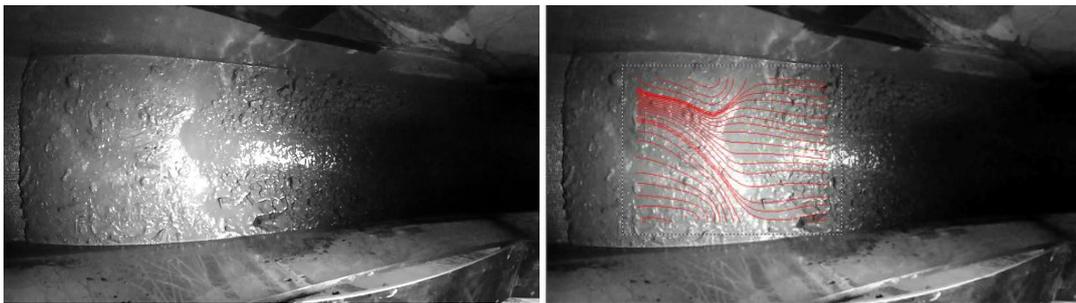


Abbildung 60: Video-Frame von ws1_4_1. Rechts mit Stromlinien.

Die Erhöhung der volumetrischen Sedimentkonzentration vom 1. auf den 2. C_v -Wert kann nur durch einen Messfehler oder durch den Einfluss einzelner großer Körner entstanden sein (Tabelle 11).

Tabelle 11: Viskosität η und Grenzschubspannung τ_{Gr} von ws1 mit den jeweiligen C_v -Werten.

C_v [-]	Normalspannung		Drehmomentflansch	
	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]	η [Pa*s]	τ_{Gr} [Pa]
0.738	5.51	249.71	7.54	184.83
0.750	6.54	82.46	6.76	50.28
0.718	3.56	79.69	4.20	38.08
0.697			1.33	70.74

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

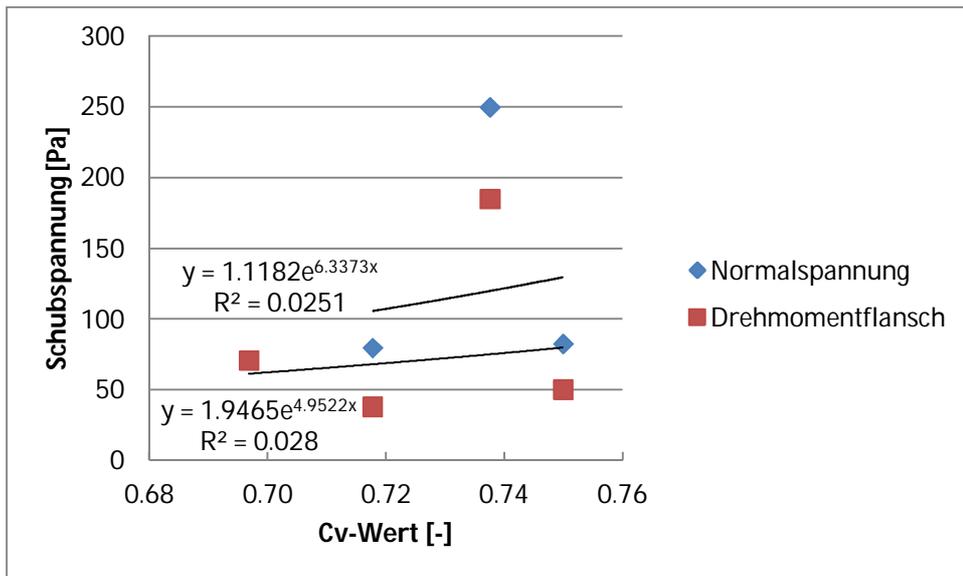


Abbildung 61: Die Schubspannung gegen die C_v -Werte aus Tabelle 11, mit der exponentiellen Anpassung.

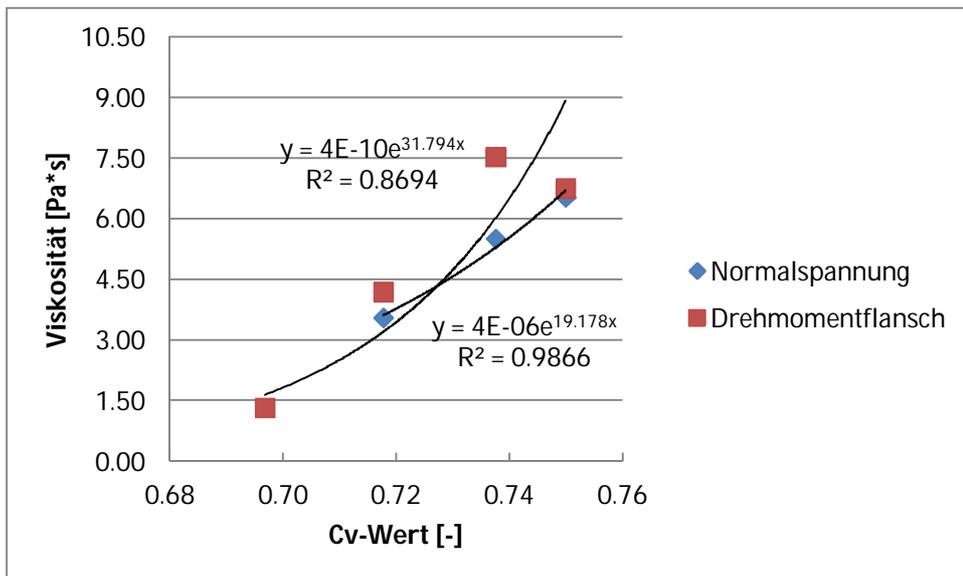


Abbildung 62: Die Viskosität gegen die C_v -Werte aus Tabelle 11, mit der exponentiellen Anpassung.

Durch die exponentielle Anpassung der Werte in Abbildung 61 und 62 erhalten wir die gesuchten Modellparameter für einen maximalen Korndurchmesser von 63 mm:

über die Normalspannung

$$\tau_y = 4.494 * e^{4.649 * C_v}$$

$$\eta = 7.032 * 10^{-6} * e^{18.346 * C_v}$$

über den Drehmomentflansch

$$\tau_y = 0.478 * e^{7.146 * C_v}$$

$$\eta = 8.655 * 10^{-7} * e^{21.345 * C_v}$$

4.4 Wäldletobel

Da das Material des Wäldletobels sehr grobkörnig ist, wurde die volumetrische Sedimentkonzentration durch Wägung bestimmt (Kapitel 3.1.3 Volumetrische Sedimentkonzentration). Die Untersuchungen wurden bei jeder Versuchsreihe mit drei verschiedenen C_v -Werten durchgeführt.

Bei der Auswertung aller Versuchsreihen (wt1-3) kam es zu keinen Ergebnissen, da die Viskosität negativ ist. Bei der Video-Analyse konnte man erkennen, dass bei den niedrigeren Geschwindigkeitsstufen kein Wasser-Feststoff-Gemisch zustande kommt. In Abbildung 63 sind die Frames von wt1_1 bei den 5 verschiedenen Geschwindigkeitsstufen dargestellt. In Abbildung 63 ist bei der 3. Geschwindigkeitsstufe eine Sortierung der Korngrößen quer zur Fließrichtung ersichtlich. Wobei sich die feineren Komponenten im mittleren Bereich aufhalten.

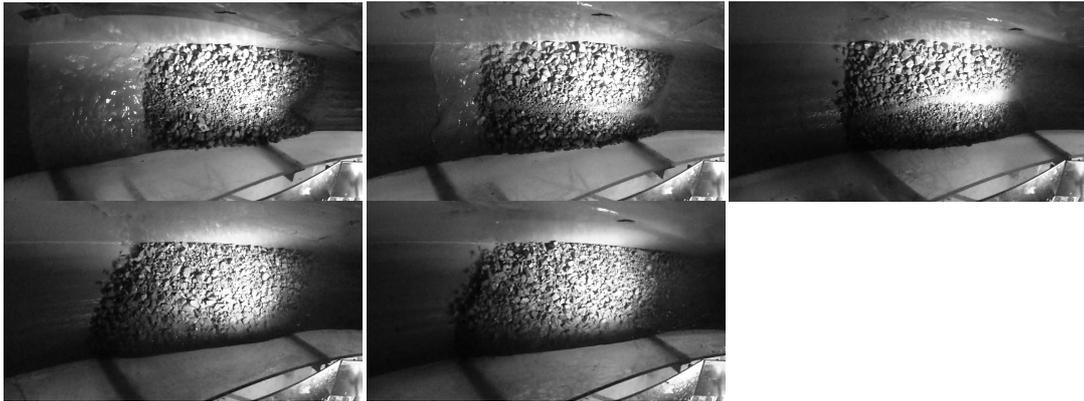


Abbildung 63: Frames von wt1_1 aus der Video-Analyse. Von links nach rechts: Oben v1, v2, v3 und unten v4, v5.

Wenn man die Umdrehungsgeschwindigkeit der Trommel gegen die ermittelte Schubspannung (über den Drehmomentflansch) aufträgt, kann man erkennen, dass bei allen Versuchsreihen die Schubspannung mit der Geschwindigkeit zunimmt, danach abnimmt und anschließend wieder steigt (Abbildung 64). Dieser Abstieg der Schubspannung kann durch die vollkommene Durchmischung des Wasser-Feststoff-Gemisches erklärt werden. Anfangs wird die Schubspannung nur mit einem Teil des in der Trommelrinne vorhandenen Wassers gemessen. Ab einer gewissen Geschwindigkeit, u.a. abhängig vom maximalen Korndurchmesser, kommt es zur Durchmischung des Versuchsmaterials und des in der Trommelrinne vorhandenen Wassers. Durch einen höheren Anteil an Wasser im Porenraum wird anfänglich die Schubspannung herabgesetzt und anschließend steigt sie wieder an (Abbildung 65).

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

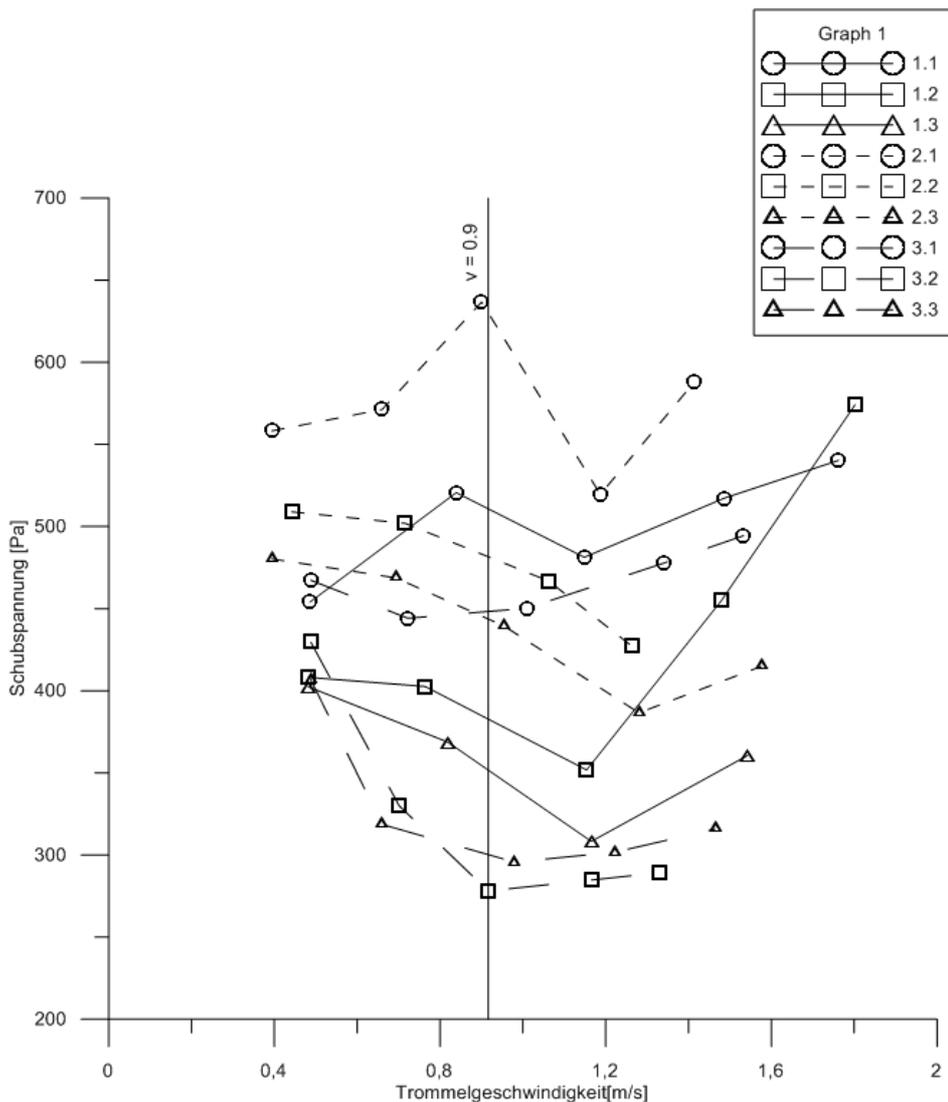


Abbildung 64: Schubspannung gegen die Trommelgeschwindigkeit aller Versuche des Wäldletobels. Wobei wt1 einen $d_{\max} = 31,5$ mm, wt2 einen $d_{\max} = 63$ mm und wt3 einen $d_{\max} = 16$ mm aufweist.

Bis auf den Versuch wt2_2 und wt2_3, nimmt die Schubspannung ab einer Umdrehungsgeschwindigkeit von ca. 0,9 m/s zu. Bei der zweiten Versuchsreihe (wt2) handelt es sich um das Material mit einem maximalen Korndurchmesser von 63 mm. Wie in Abbildung 65 ersichtlich ist die Geschwindigkeit von ca. 1,3 m/s zu gering um eine Durchmischung des

Wassers mit dem Wäldletobel-Material bei einem maximalen Korndurchmesser von 63 mm hervorzurufen.

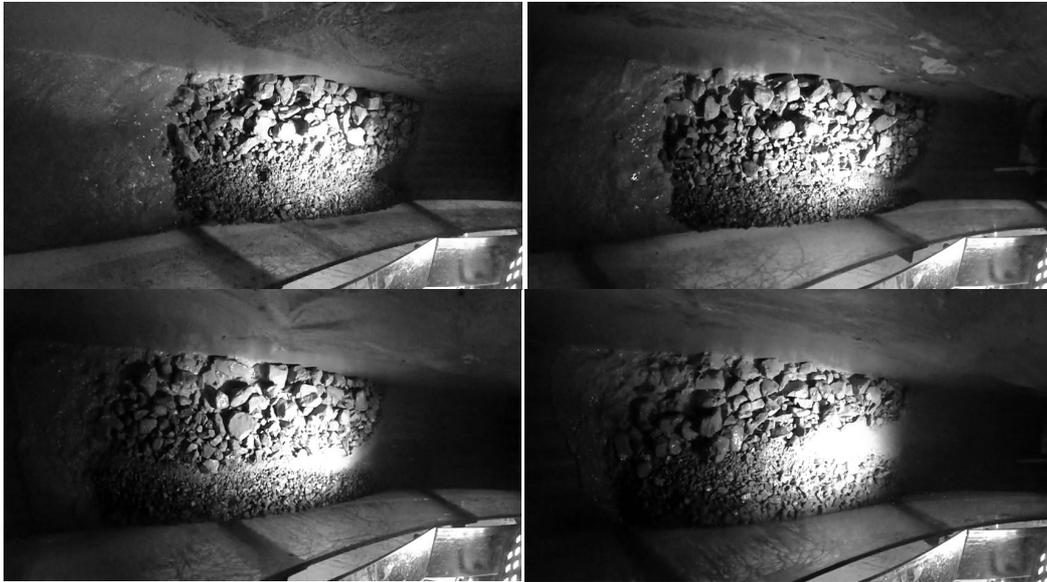


Abbildung 65: Frames aus der Video-Analyse. Von links nach rechts: wt2 v1-4.

In weiterer Folge wurde versucht mit den Daten ab einer Geschwindigkeit von 0,9 m/s die Modellparameter zu Berechnen. Durch die zu geringe Anzahl an Datenpunkten konnte aber keine Analyse durchgeführt werden.

4.5 Vergleiche der Versuche

4.5.1 Firschnitzbach

Es zeigt sich, dass der Bereich der volumetrischen Sedimentkonzentration für fließfähige Murmischungen vom maximalen Korndurchmesser abhängig ist (Abbildung 66-69). Die Versuche mit $D_{\max} = 16$ mm sind in einen niedrigeren Cv-Werte Bereich (0,55 – 0,65) als die Versuche mit $D_{\max} = 63$ mm (0,65 – 0,8). In Abbildung 66 und 67 ist die Grenzschubspannung gegen

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

den C_V -Wert aufgetragen, wobei in Abbildung 66 die Grenzschubspannung über den Drehmomentflansch und in Abbildung 67 über die Normalspannung ermittelt wurde. In Abbildung 68 (Normalspannung) und 69 (Drehmomentflansch) sind die korrespondierenden Viskositäten dargestellt. Jene Versuche, welche mit mehr Material durchgeführt wurden, weisen einen niedrigeren C_V -Bereich auf und auch die Schubspannungen und Viskositäten sind niedriger. Das entspricht dem Trend der Anpassungen bei beiden Korndurchmessern.

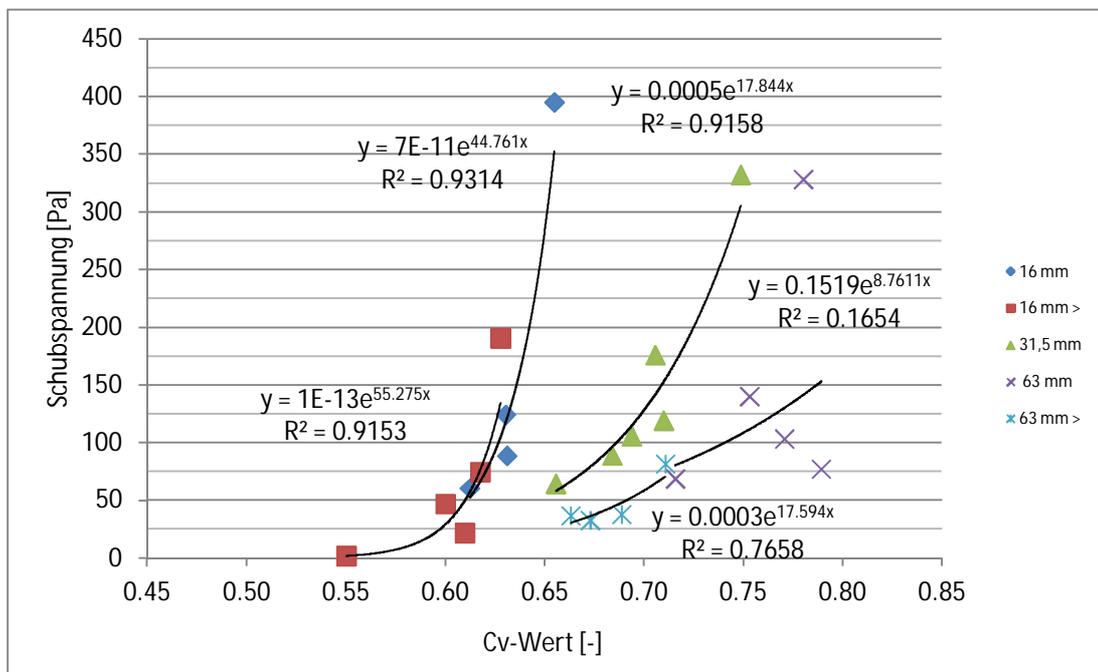


Abbildung 66: Über den Drehmomentflansch ermittelte Grenzschubspannungen aller Versuche des Firschnitzbachs (> kennzeichnet jene Versuche mit mehr Material).

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

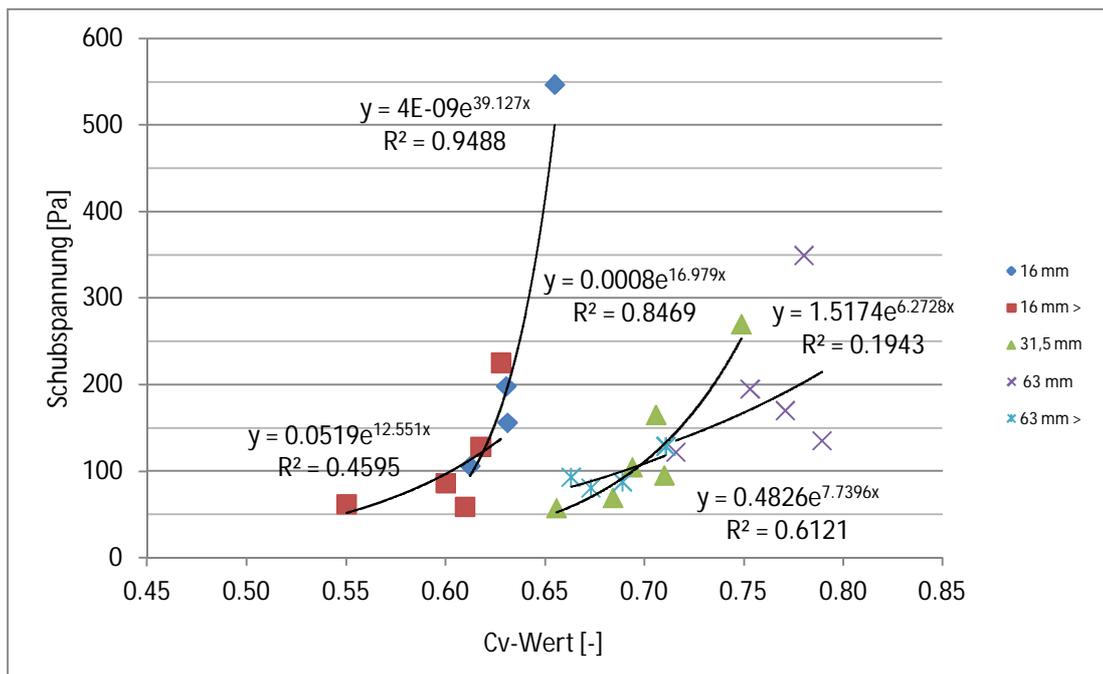


Abbildung 67: Über die Normalspannung ermittelte Grenzschubspannungen aller Versuche des Firschnitzbachs (> kennzeichnet jene Versuche mit mehr Material).

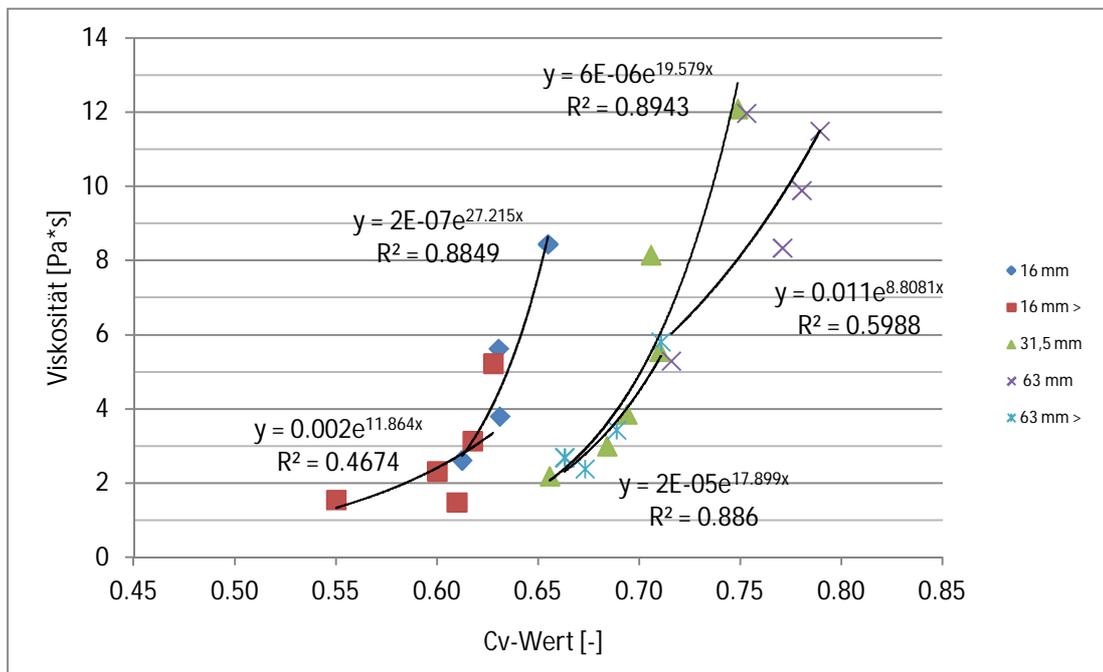


Abbildung 68: Über den Drehmomentflansch ermittelte Viskosität aller Versuche des Firschnitzbachs (> kennzeichnet jene Versuche mit mehr Material).

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

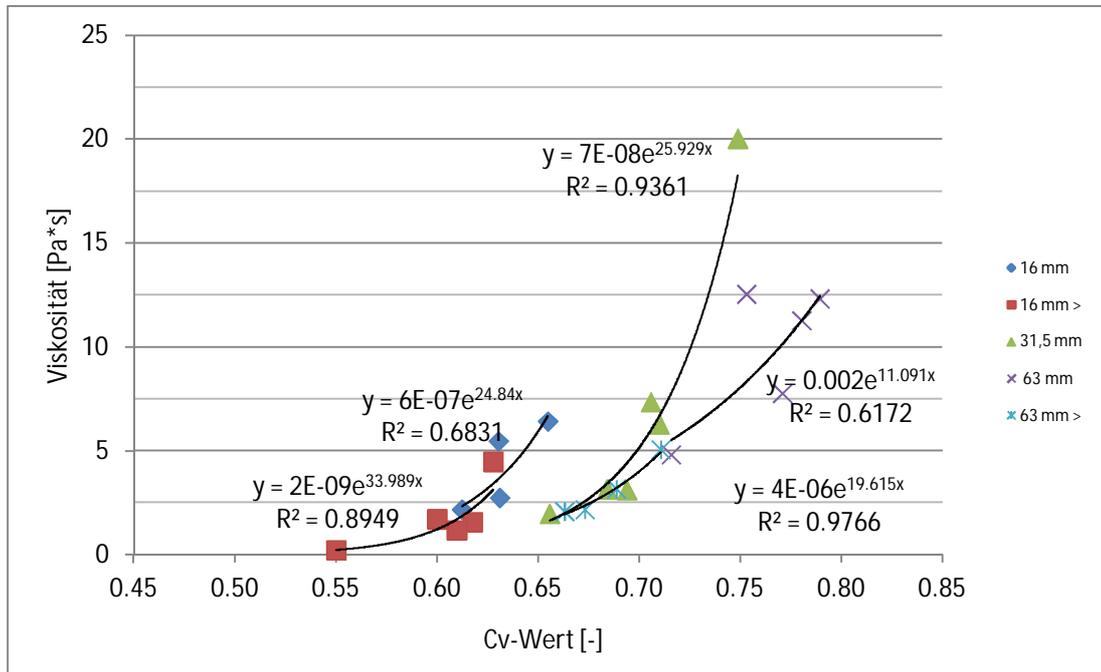


Abbildung 69: Über die Normalspannung ermittelte Viskosität aller Versuche des Firschnitzbachs (> kennzeichnet jene Versuche mit mehr Material).

Die berechneten Modellparameter für die Grenzschubspannung sind in Abbildung 70 (Alpha-Werte) und 71 (Beta-Werte) dargestellt, in Abbildung 72 und 73 sind hingegen die Modellparameter für die Viskosität abgebildet. Bei einer linearen Anpassung der Modellparameter ist für die Alpha-Werte eine klare Steigung der Werte bei größerem Korndurchmesser ersichtlic. Für die Beta-Werte ist hingegen das Gegenteil der Fall.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

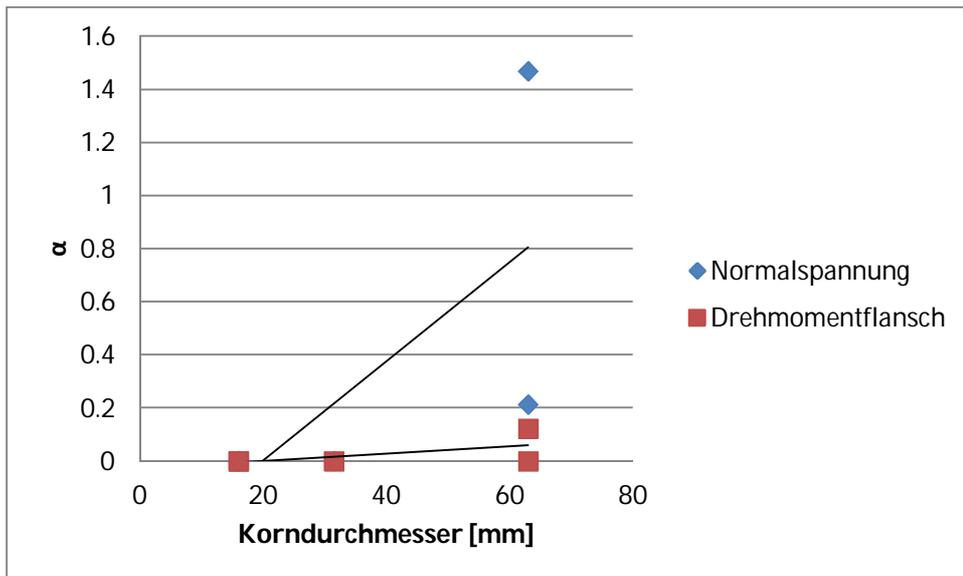


Abbildung 70: Die Alpha-Werte für die Grenzscherubspannung aller Versuche des Firschnitzbachs.

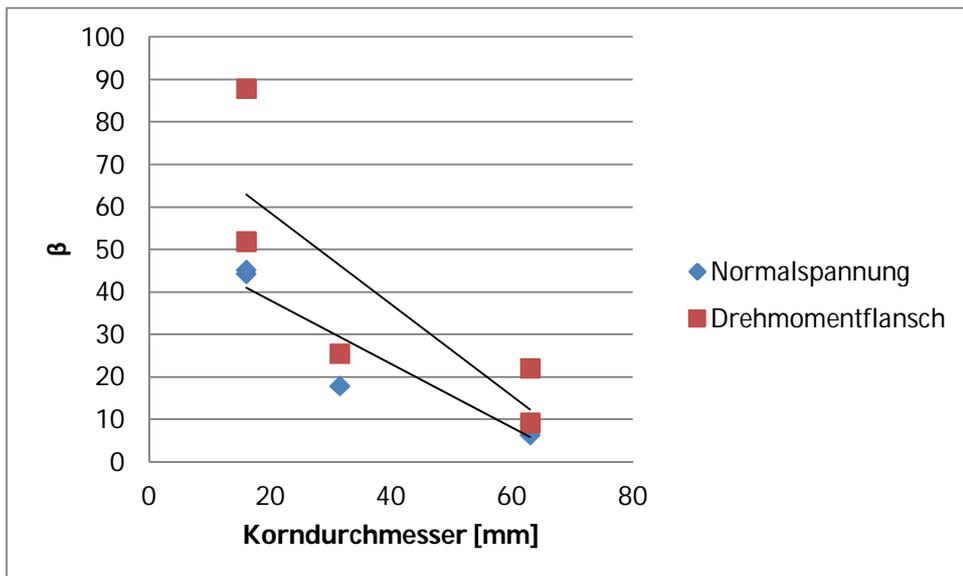


Abbildung 71: Die Beta-Werte für die Grenzscherubspannung aller Versuche des Firschnitzbachs.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

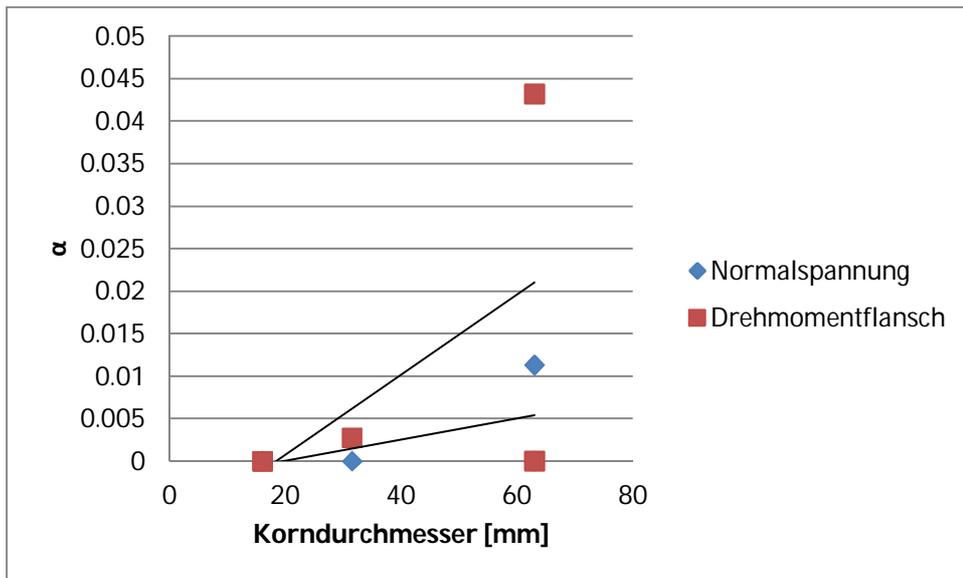


Abbildung 72: Die Alpha-Werte für die Viskosität aller Versuche des Firschnitzbachs.

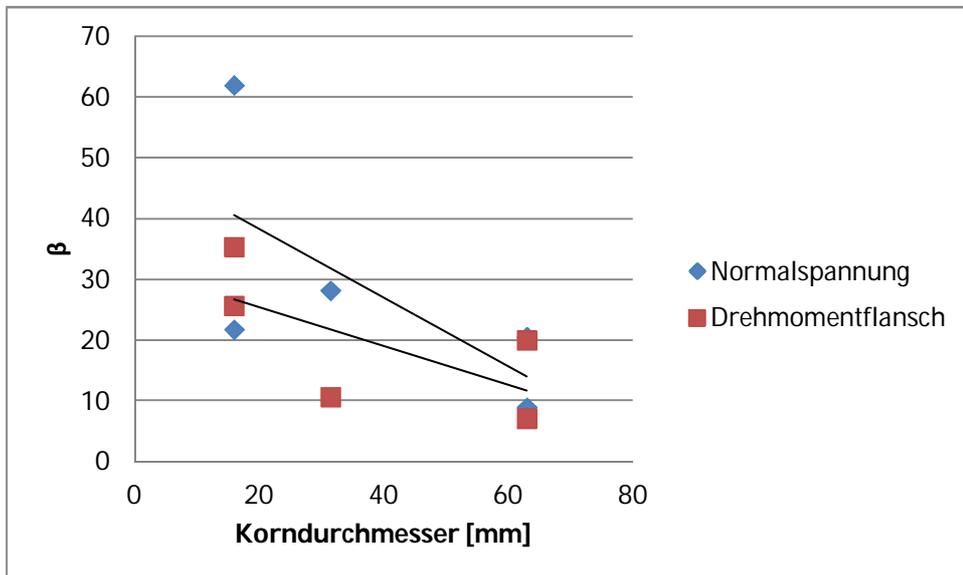


Abbildung 73: Die Beta-Werte für die Viskosität aller Versuche des Firschnitzbachs.

4.5.2 Mühlbach

Beim Mühlbach wurden die Daten aus beiden Versuchen mit $D_{\max} = 31,5$ mm verglichen. In Abbildung 74 ist die ermittelte Viskosität und in Abbildung 75 die Grenzschubspannung dargestellt. In der zweiten Versuchsreihe „mb2“ konnten über die Normalspannung keine Werte berechnet werden und jene, welche über den Drehmomentflansch ermittelt wurden stellen eher eine Punktwolke dar und weisen keine klar ersichtliche Tendenz wie die Daten von der ersten Versuchsreihe „mb1“ auf.

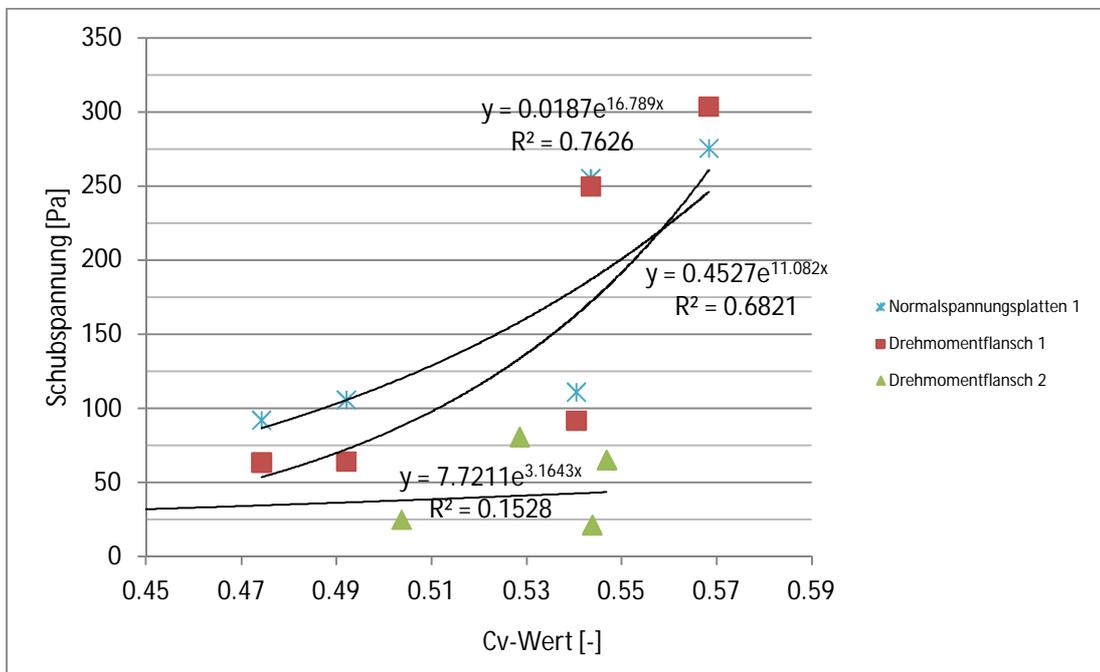


Abbildung 74: Die ermittelten Grenzschubspannungen des Mühlbachs.

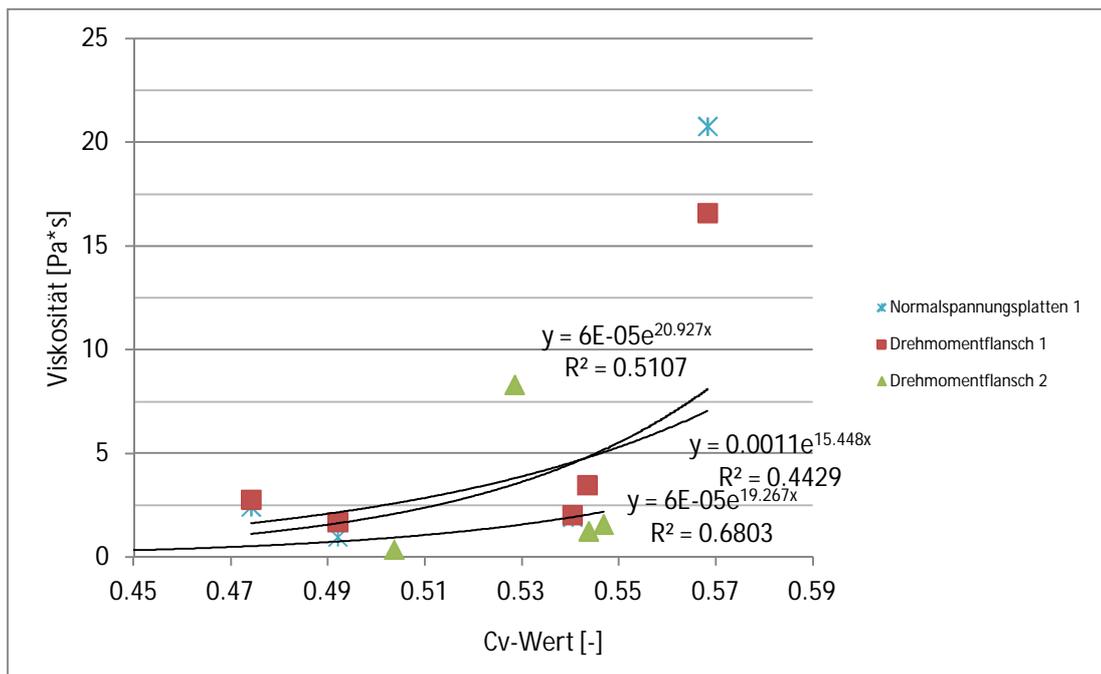


Abbildung 75: Die ermittelten Viskositäten des Mühlbachs.

4.5.3 Vergleich der Versuche mit einem D_{\max} von 31,5 mm.

Die zweite Versuchsreihe des Firschnitzbachs „fb2“ und die Versuche mit dem Mühlbach weisen einen maximalen Korndurchmesser von 31,5 mm auf. Die zweite Versuchsreihe des Mühlbachs „mb2“ wurde aus Gründen, die im Kapitel 4.2.2 Versuchsreihe „mb2“ dargelegt werden, nicht weiter behandelt.

Die Werte aus Tabelle 4 und 9 für die Grenzschubspannung und die Viskosität sind in Abbildung 75 und 76 für beide Versuche gemeinsam dargestellt. Die C_v -Gehalte von mb1 gehen von 0,45 bis 0,55 und jene von fb2 von 0,65 bis 0,75. Die Werte der Viskosität und der Grenzschubspannung sind tendenziell bei fb2 größer.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

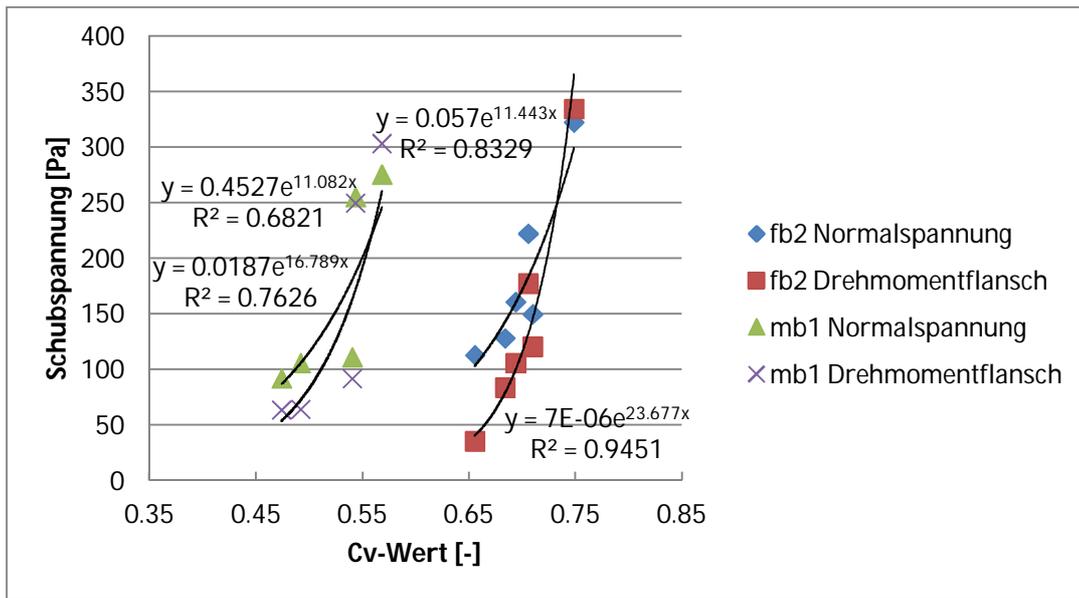


Abbildung 76: Die Grenzschubspannungen aus den Versuchen mit $D_{\max} = 31,5$ mm.

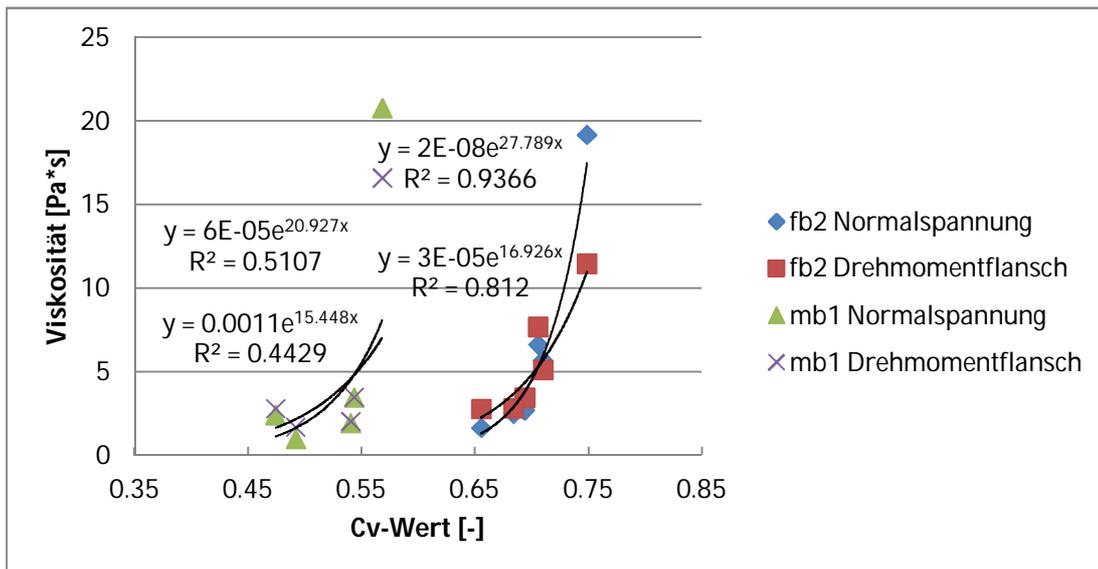


Abbildung 77: Die Viskositäten aus den Versuchen mit $D_{\max} = 31,5$ mm.

Die Modellparameter für die Grenzschubspannung sind bei fb2 für die Alpha-Werte niedriger und bei den Beta-Werten fast ident. Bei der Viskosität

hingegen sind die Werte von Alpha bei mb1 niedriger und die Beta-Werte höher.

Modellparameter

mb1

über den Normalspannung

$$\tau_y = 0.188 * e^{12.789 * C_v}$$

$$\eta = 2.567 * 10^{-18} * e^{76.605 * C_v}$$

über den Drehmomentflansch

$$\tau_y = 0.00309 * e^{20.211 * C_v}$$

$$\eta = 7.836 * 10^{-16} * e^{66.141 * C_v}$$

fb2

über die Normalspannung

$$\tau_y = 0.025 * e^{12.587 * C_v}$$

$$\eta = 3.841 * 10^{-9} * e^{29.827 * C_v}$$

über den Drehmomentflansch

$$\tau_y = 5.219 * 10^{-5} * e^{20.937 * C_v}$$

$$\eta = 2.334 * 10^{-5} * e^{17.513 * C_v}$$

4.5.4 Vergleich der Versuche mit einen D_{\max} von 63 mm.

Die dritte und fünfte Versuchsreihe des Firschnitzbachs („fb3“, „fb5“) und der Versuch mit dem Schauflerbach („ws1“) weisen einen maximalen Korndurchmesser von 63 mm auf. In den Abbildungen 78 und 79 sind die Versuchsergebnisse für alle drei Versuchsreihen dargestellt. Aus den Abbildungen lassen sich keine eindeutigen Unterschiede erkennen.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

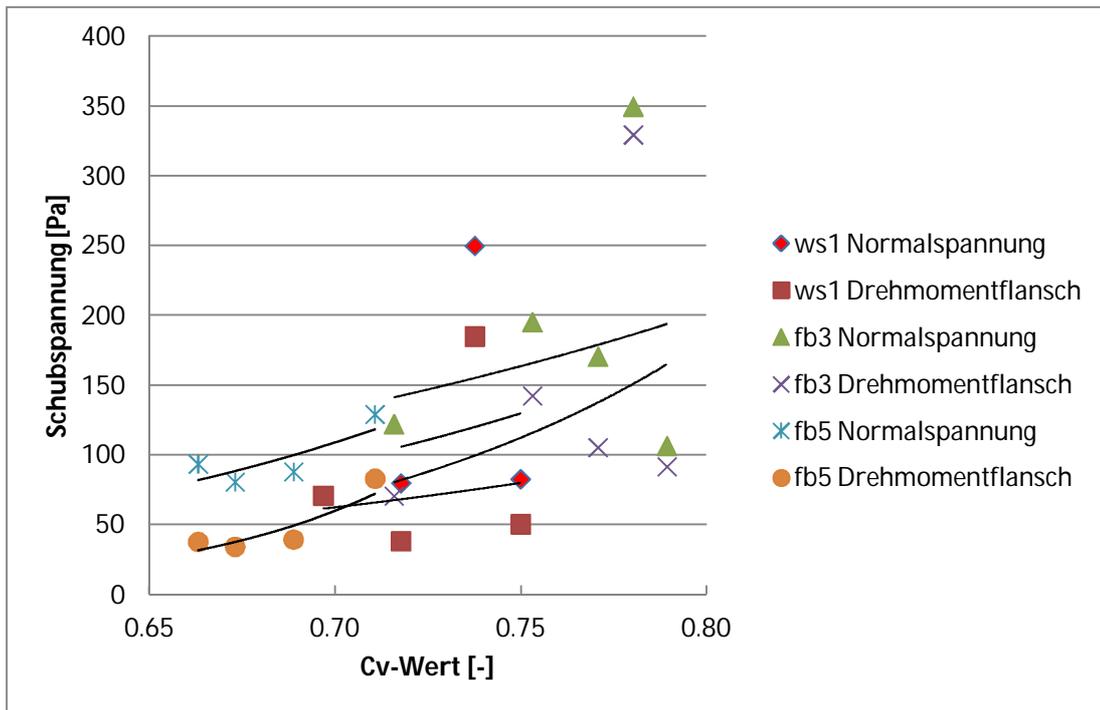


Abbildung 78: Die Grenzschubspannungen aus den Versuchen mit $D_{\max} = 63$ mm.

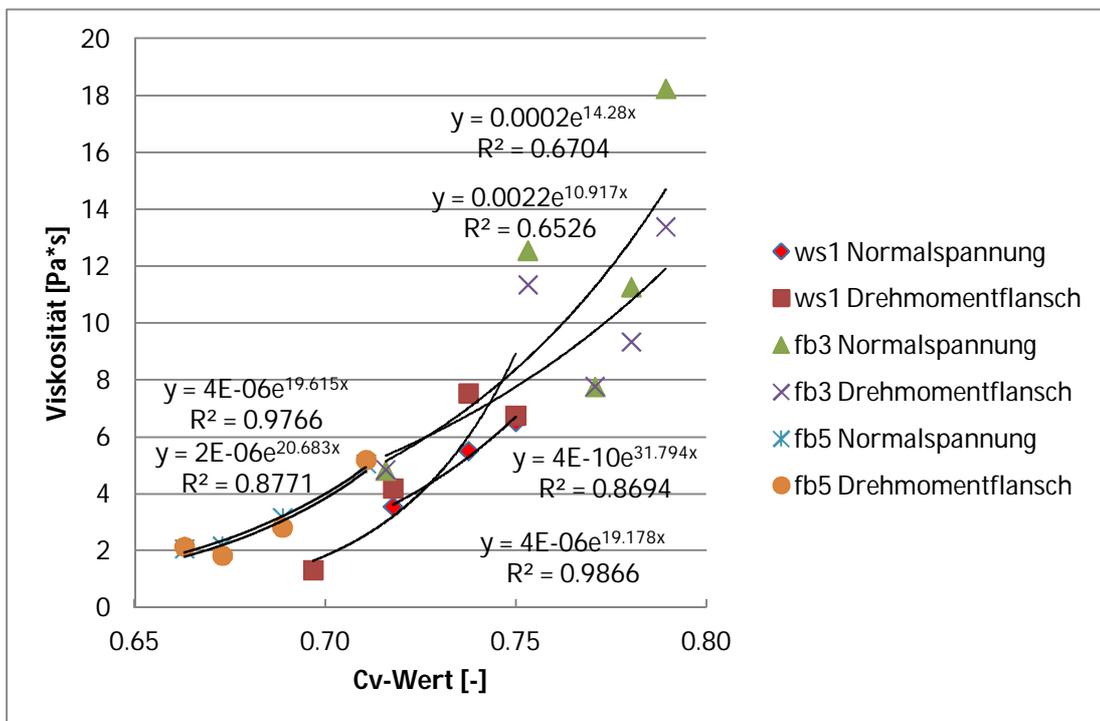


Abbildung 79: Die Viskositäten aus den Versuchen mit $D_{\max} = 63$ mm.

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

Die Modellparameter der Versuche mit dem Firschnitzbach unterscheiden sich stark bei der Berechnung über den Drehmomentflansch. Für die Grenzs Schubspannung sind die Alpha-Werte beim Firschnitzbach niedriger und die Beta-Werte höher. Bei den Werten für die Viskosität ist keine Tendenz ersichtlich.

Modellparameter

ws1

über die Normalspannung

$$\tau_y = 4.494 * e^{4.649 * C_v}$$

$$\eta = 7.032 * 10^{-6} * e^{18.346 * C_v}$$

über den Drehmomentflansch

$$\tau_y = 0.478 * e^{7.146 * C_v}$$

$$\eta = 8.655 * 10^{-7} * e^{21.345 * C_v}$$

fb3

über die Normalspannung

$$\tau_y = 3.648 * e^{5.169 * C_v}$$

$$\eta = 8.842 * 10^{-5} * e^{15.293 * C_v}$$

über den Drehmomentflansch

$$\tau_y = 0.0808 * e^{9.823 * C_v}$$

$$\eta = 0.00461 * e^{9.952 * C_v}$$

fb5

über die Normalspannung

$$\tau_y = 0.213 * e^{8.938 * C_v}$$

$$\eta = 2.48 * 10^{-6} * e^{20.433 * C_v}$$

über den Drehmomentflansch

$$\tau_y = 1.743 * 10^{-5} * e^{21.571 * C_v}$$

$$\eta = 3.094 * 10^{-7} * e^{23.381 * C_v}$$

5 DISKUSSION

Um die rheologischen Parameter von verschiedenen Teilproben von Murmaterial im Labor zu bestimmen, wurde eine Trommelversuchsanlage eingesetzt, mit der das stationäre Fließen einer Materialmischung (Mur-Welle) über einen längeren Zeitraum beobachten werden kann.

Für die Auswertung wird angenommen, dass die Mur-Welle einen stationären und gleichförmigen Abfluss aufweist. Die Stationarität ist durch die konstante Trommelrotation gewährleistet, jedoch ist der Abfluss nicht gleichförmig. Um die vertikalen Geschwindigkeitskomponenten vernachlässigen zu können muss nach Savage & Hutter (1989) das Verhältnis der Fließhöhe zur Mur-Wellenlänge $\ll 1$ sein. Da im vorliegenden Fall das Verhältnis mit 0,01 relativ gering ist, können zwar vertikale Geschwindigkeitskomponenten besonders an der Front und im hinteren Bereich der Welle nicht ausgeschlossen werden, sie können allerdings als gering eingeschätzt werden (Mangeney-Castelnau, 2005).

Wenn eine Flüssigkeit entlang eines gekrümmten Gerinnes fließt, entstehen durch die Umlenkung der Fließlinien Zentrifugalkräfte, die die Druckverteilung am Gerinne-Boden (Normalspannung und Porenwasserdruck) verändern kann. Im vorliegenden Fall – dem Fließen einer Materialmischung in einer rotierenden Trommel – ist das Bezugssystem allerdings umgekehrt, und die Versuchsmischung ist relativ zum Laborbezugssystem stationär. Kaitna et al. (2007) zeigte, dass bei den verwendeten Geschwindigkeiten der Einfluss der Zentrifugalbeschleunigung $< 10\%$ ist.

Der Vorteil bei der Untersuchung von Murmaterial mit einer rotierenden Trommel ist, dass die Gravitation in die gleiche Richtung und die Sortierungs- und Aggregationseffekte ähnlich wie bei natürlichen Muren sind. Für mehr Details siehe Kaitna et al. (2007).

Für die Analyse der Versuche wird angenommen, dass sich das Wasser-Feststoff-Gemisch wie ein homogenes Fluid verhält („equivalent fluid

approach“; Hungr, 1995). Diese Annahme ist sicherlich eine starke Vereinfachung, da es besonders bei Muren mit einer breiten Kornverteilung zu komplexen Interaktion von Wasser und Feststoff (z.B. Suspension von Feinanteil oder Porenwasserüberdruck), sowie zwischen Feststoff und Feststoff (Reibung, Kollision) kommt (Iverson, 1997). Da die meisten numerischen Simulationsmodelle ebenso eine homogene Flüssigkeit unterstellen, basieren alle hier beschriebenen Analysen auf der gleichen Annahme.

Als rheologisches Modell wurde das Bingham Modell herangezogen. Dabei handelt es sich um eine Vereinfachung des Herschel-Bulkley Modells, wobei die Viskosität konstant bleibt und die Schubspannung einen linearen Zusammenhang mit der Scherrate aufweist. Für die Berechnung von viskosen Muren wird das Modell von vielen Autoren (z.B. Costa, 1988; Jordan, 1994; Kaitna et al., 2007) verwendet.

Coussot (1994) postuliert einen Wert von mindestens 10 % für den Feinanteil mit $d < 0,04$ mm, ab dem ein viskoses Fließverhalten zu erwarten ist. In dieser Studie trifft dies auf den Mühlbach und den Schauflerbach zu. Der Firschnitzbach hat einen Feinanteil von ~ 9%, was von Kaitna et al. 2007 und 2008 als ausreichend betrachtet wird. Der Wäldletobel hat hingegen einen Feinanteil $d < 0,04$ mm zwischen 4-7 %, je nach maximalen Korndurchmesser. Dementsprechend waren die Versuche mit dem Wäldletobel-Material nur im begrenzten Maße erfolgreich. Ein Teil der Daten musste verworfen werden, da es bei geringen bzw. hohen Geschwindigkeiten zu einer Trennung (Segregation) des Wasser-Feststoff-Gemischs gekommen ist (Abbildung 64). Die zu erwartende kontinuierliche Steigung der Schubspannung mit der Geschwindigkeit (Gleichung 1) konnte bei den Versuchen mit einem maximalen Korndurchmesser bis zu 31,5 mm erst ab einer Umdrehungsgeschwindigkeit von ca. 0,9 m/s festgestellt werden (Abbildung 63). Bei einem maximalen Korndurchmesser von 63 mm ist ein Sprung der Schubspannung hingegen erst bei ca. 1,3 m/s festzustellen. Durch eine zu geringe Datenmenge konnte keine Anpassung

an ein rheologisches Modell errechnet werden und um die genauen Parameter, ab denen eine vollständige Durchmischung des Murgemisches zustande kommt zu bestimmen, sind weitere Untersuchungen nötig. Zusätzlich musste bei den Versuchen mit dem Wäldletobel-Material die Bestimmung des C_v -Gehalts mittels Wägung durchgeführt werden, da bei Stillstand der Trommel sich das Wasser-Feststoff-Gemisch unmittelbar trennte. Die Unterschiede zwischen beiden Methoden konnte nicht verlässlich quantifiziert werden.

Die Bestimmung des C_v -Gehalts mittels Ofentrocknung hat bei einzelnen Versuchsreihen keine plausiblen Ergebnisse geliefert (u.a. „ws1“, „mb2“). Die entnommene Probemenge war relativ gering ($0,002 \text{ m}^3$) und einzelne große Körner können das Ergebnis stark beeinflussen. Des Weiteren wurden die Proben beim Stillstand der Trommel, quer und längs der Rinne, entnommen. Die Festlegung der volumetrischen Sedimentkonzentration für eine kleinskalige Mur-Welle auf einen Wert mit drei Nachkommastellen ist zu hinterfragen, da u.a. der C_v -Gehalt bereits innerhalb einer Welle stark variiert (Kapitel 1.1 Muren). Da aber eine Änderung des C_v -Werts in der dritten Nachkommastelle in der Simulationssoftware Flo-2d bereits einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat, wäre die genaue Bestimmung des C_v -Werts wichtig.

Bei größer werdenden Korndurchmessern wurden öfters die Aggregation und die Sortierung von gewissen Korngrößen beobachtet („ws1“ in Abbildung 59, „fb3“ in Abbildung 31, „wt1“ in Abbildung 62) Bereits Coussot & Piau (1995) berichteten von derartigen Schwierigkeiten bei ähnlichen Versuchen.

Aussagen über das Verhalten der volumetrischen Sedimentkonzentration in Abhängigkeit der unterschiedlichen geologischen Einzugsgebiete sind schwierig, da einerseits zu wenige Versuche bei denselben maximalen Korndurchmessern durchgeführt wurden und da andererseits eine nicht ausreichende Anzahl von Daten vorliegen. Bei den Versuchen mit dem Firschnitzbach ist ein Anstieg der volumetrischen Sedimentkonzentration mit

steigendem maximalem Durchmesser zu erkennen. Bei allen Versuchen ist ersichtlich, dass bei einer höheren volumetrischen Sedimentkonzentration auch die Werte für die Grenzs Schubspannungen und die Viskosität steigen. Wie bereits in anderen Untersuchungen gezeigt wurde, besteht eine Abhängigkeit der rheologischen Parameter vom C_v -Wert, dem maximalen Korndurchmesser und der Art der Sedimente (u.a. Coussot & Piau, 1995). Bei den Versuchen mit einem größeren Volumen („fb5“ und „fb6“) sind die rheologischen Parameter und auch die Sedimentkonzentration etwas niedriger.

Für die Ermittlung der Schubspannung wurden zwei unabhängige Varianten gewählt:

- Messung der Normalspannung
- Messung des Drehmomentflansch

Die Normalspannungsplatten (Kapitel 3.1.1.1 Normal- und Schubspannung) reagieren sensibler auf kurzzeitige Veränderungen wie z.B. auf den Steinflug (u.a. Kapitel 4.1.2 Versuchsreihe „fb3“) und die berechneten Schubspannungen sind meistens um 10-50 Pa höher. Bei der Bestimmung der Viskosität sind die Werte, welche über das Drehmoment bestimmt wurden tendenziell höher. Um eventuelle Unstimmigkeiten bei der Messung schnell und einfach zu identifizieren sind beide Varianten von Vorteil.

Die Steigung der Schubspannung mit der Scherrate untermauert die Annahme des viskosen Fließverhaltens bei allen erfolgreichen Versuchen (Abbildung 7).

Die Alpha- und Beta-Werte konnten für die einzelnen maximalen Korndurchmesser ermittelt werden, aber durch zu wenige Versuche mit verschiedenen Korndurchmessern ist ein Extrapolieren der Daten nur bei den Versuchen mit dem Firschnitzbach möglich. Der Trend von den Werten des Firschnitzbachs geht zwar in die richtige Richtung, doch eine Extrapolation auf das maximale Korn der gesamten Kornverteilung liefert kein realistisches Ergebnis.

6 SCHLUSSFOLGERUNG

Um die rheologischen Modellparameter numerischer Mur-Simulationsmodelle einzugrenzen, wurden mit Hilfe einer Trommelversuchsanlage vier verschiedene Murproben untersucht. Das Murmaterial wurde bei maximalen Korndurchmessern bis zu 63 mm und unterschiedlichen volumetrischen Sedimentkonzentrationen untersucht. Die Ergebnisse aus den Trommel-Versuchen zeigen eine Übereinstimmung mit dem Bingham Modell. Ausschließlich bei den Versuchen mit dem Wäldletobel konnten wegen einer zu geringen Datenmenge keine Vergleiche mit dem Bingham Modell durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um sehr grobkörniges Material (Partikelanteil $P < 0,04 \text{ mm} = 4\text{-}7\%$). Eine Durchmischung des Wasser-Feststoff-Gemischs konnte erst ab einer Trommel-Geschwindigkeit von 0,9 bzw. 1,3 m/s, in Abhängigkeit des maximalen Korndurchmesser, beobachtet werden. Bei weiteren Versuchen mit grobkörnigen Proben muss darauf geachtet werden, dass es zu einer guten Durchmischung des Wasser-Feststoff-Gemisches kommt.

Bei den Versuchen mit einem maximalen Korndurchmesser von 63 mm wurden vermehrt Aggregation und Sortierungseffekte beobachtet.

Beide Varianten für die Bestimmung der Schubspannung haben sich als nützlich erwiesen, wobei die Normalspannungsplatten sensibler auf kurzzeitige Belastungsänderungen (u.a. Steinflug) reagieren.

Die Bestimmung der volumetrischen Sedimentkonzentration wird mit größer werdendem Korndurchmesser unsicherer und die Unsicherheit in der 3. Nachkommastelle ist relativ hoch. Für zukünftige Versuche wäre eine genauere Bestimmung wichtig. Die Wägung des beigemengten Wassers und der Proben im trockenen Zustand könnte eine Alternative sein.

Es konnten zwar die Alpha- und Beta-Werte für das Simulationsmodell Flo-2d bestimmt werden, die Extrapolation auf die gesamte Kornverteilung der einzelnen Einzugsgebiete konnte aber nicht durchgeführt werden, da die

6 SCHLUSSFOLGERUNG

Datengrundlage recht gering ist. Die Tendenz der Alpha- und Beta-Werte für den Firschnitzbach läuft zwar in die zu erwartende Richtung, plausible Ergebnisse für die gesamte Kornverteilung erhält man aber nicht.

Durch die beträchtliche Reduzierung des Zeitaufwands für die Datenaufbereitung mit Hilfe der Matlab-Skripts können in Zukunft mehr Versuche in der gleichen Zeitspanne durchgeführt werden und eine sicherere Aussage über eine mögliche Bestimmung der rheologischen Parameter durch Laborversuche ist möglich.

7 LITERATURVERZEICHNIS

Ancey C. (2006): Plasticity and geophysical flows: A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Volume 142, Issues 1-3, S. 4-35.

Coussot, P. (1994): Steady, laminar, flow of concentrated mud dispersions in open channel, *J. Hydraul. Res.* 32, S. 535–559.

Coussot, P., Piau JM (1995): A large scale field coaxial cylinders rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions. *J Rheol.* 39, S. 105–125.

Coussot, P., Laigle, D., Arattano, M., Deganutti, A., Marchi, L. (1998): Direct determination of rheological characteristics of debris flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 124, S. 865–868

D'Agostino, V., Cerato, M., Coali, R. (1996): Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino Orientale. (Sediment transport of extreme events in torrents of eastern Trentino), *Proceedings Int. Symposium Interpraevent*, Garmisch-Partenkirchen, Vol. 1, S. 377-386

Gamma, P. (2000): dfwalk – Ein Murgangsimulationprogramm zur Gefahrenzonierung. *Geographica Bernensia*, G66, Geographisches Institut der Universität Bern, 144 S.

Gostner, W. (2002): Integrale Analyse eines murfähigen Wildbaches anhand einer Fallstudie (Modellierung der Murgänge am Tschenglerbach). *Nachdiplomstudium. ETH Zürich (VAW) und EPFL Lausanne (LCH)*, 203 S.

Hillebrand, J. (2013): Experiments in a larger vertical rotating drum to determine rheological parameters for the Lorenzerbach-watershed, Styria, Austria, *Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur, Wien*, 99 S.

Hübl, J.; Hochschwarzer, M.; Sereinig, N.; Wöhler-Alge, M. (Ed.) (2011): *Alpine Naturgefahren. Ein Handbuch für Praktiker. Wildbach- und Lawinenverbauung Sektion Vorarlberg*, 133 S.

Hungr, O. (1995): A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 32, S. 610-623

Iverson, R.M. (1997): The Physics of Debris Flows. *Rev. Geophys.* 35(3), S. 245–296

Iverson, R.M. (2003): The debris-flow rheology myth. *3rd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Davos*. S. 303-314

Iverson, R.M. (2005): Debris-flow mechanics, in: *Debris-flow hazards and related phenomena*. (Hrsg. M. Jakob and O. Hungr), Springer-Praxis, Heidelberg, S. 105-134

Iverson, R.M. (2014): Debris flows: behaviour and hazard assessment in: *Geology Today*, Volume 30, Issue 1, S. 15–20

- Iverson, R.M. und Denlinger, R.P.(2001): Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain, 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research*, 106 (B1), S. 537–552
- Johnson, A. M. (1970): *Physical processes in geology*. Freeman and Cooper, San Francisco, 577 S.
- Johnson, A. M. (1984). Debris flow. In D. & Brunsden, *Slope Instability*, John Wiley & Sons Ltd. S. 257-361
- Jordan, R.P. (1994): *Debris Flows in the Southern Coast Mountains, British Columbia: Dynamic behaviour and physical properties*, Dissertation, University of British Columbia, 258 S.
- Kaitna R. (2006): *Debris flow experiments in a rotating drum*. Dissertation - Institut für Alpine Naturgefahren , Universität für Bodenkultur, Wien , 167 S.
- Kaitna R. (2012): *Rheologische Untersuchung von Murmaterial: Methodenübersicht*, *Journal für Wildbach-,Lawinen-, Erosions-und Steinschlagschutz.*, Heft Nr. 169, Wien.
- Kaitna, R., & Rickenmann, D. (2007): A new experimental facility for laboratory debris flow investigation. *Journal of Hydraulic Research* Vol.45, No.6, S. 797-810
- Kaitna R., Rickenmann D., Schatzmann M. (2007): Determination of rheologic information from laboratory experiments. *Acta Geotechnica* 2(2): S. 71-85
- Kaitna R., Rickenmann D., Schatzmann M. (2008): Vergleichende rheologische Untersuchungen von Murgangmaterial. (Rotierende Trommel und Kugelrheometer), *Interpraevent 2008 – Conference Proceedings*, Vol. 1, Dornbirn, S. 379-390
- Kerscher, H. (1999). Muren als geomorphologische Phänomene. In K. Fischer, *Relief Boden Paläoklima - Massenbewegungen und Massentransporte in den Alpen als Gefahrenpotential*. Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, S. 77-95
- Krawtschuk, A.(2009): *Versuche zur Entwicklung einer granularen Murfront mit künstlichen Versuchsmaterialien*. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur, Wien, 107 S.
- Kronfellner-Krauss, G. (1984): *Extreme Feststofffrachten und Grabenbildungen von Wildbächen*. *Proceedings Internationales Symposium Interpraevent*, Villach, Bd. 2, S. 109-118
- Lehmann, C. (1993): *Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen - Grundlagen und Anleitungen*. *Geographica Bernensia*, 42, 241 S.
- Loiskandl, W. (2011):*Hydraulik und Hydromechanik Teil I, Vorlesungsunterlagen SS 2011*, IHLW, Universität für Bodenkultur Wien, 102 S.

- Major, J.J.; Pierson, T.C. (1992): Debris flow rheology: experimental analysis of fine-grained slurries. *Wat. Res. Res.*, 28(3), S. 841-857
- Mangeney-Castelnau, A.; Bouchut, B.; Vilotte, J.P.; Lajeunesse, E.; Aubertin, A.; and Pirulli, M. (2005): On the use of Saint-Venant equations for simulating the spreading of a granular mass. *Journal of Geophysical Research – Sol. Ea.*, 110, B09103, 17 S.
- Mayer, P. (2003): Hydraulische Simulationsmodelle mit Anwendungsmöglichkeit in Wildbächen, Kompendium für das Projekt ETAlp, IWHW, Universität für Bodenkultur, Wien, 72 S.
- O'Brien, J.S., Julien, P.Y., Fullerton, W.T. (1993): Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 19(2): S. 244-261
- ONR 24800. (2009-02-15): Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung. S. 76.
- Phillips C. J. & Davies T.R.H. (1991). Determining rheological parameters of debris flow material. *Geomorphology*, 4. S. 101-110
- Prenner, D. (2011). Erstellung eines automatisierten Auswertetools für Labormessdaten. Bachelorarbeit am Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien, 36 S.
- Rickenmann, D. (1995): Beurteilung von Murgängen. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 48, S. 1104-1108
- Rickenmann, D. (1996): Murgänge: Prozess, Modellierung und Gefahrenbeurteilung. In Oddsson, B.: Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse, Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften, Boston, Berlin, Basel, Birkhäuser, S. 397-407
- Rickenmann, D. (1999): Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards*, 19(1), S. 47-77
- Rickenmann D. (2001): Murgänge in den Alpen und Methoden zur Gefahrenbeurteilung. *Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen*, Band 124, S. 51-77
- Rickenmann D. (2003): Methoden zur Beurteilung von Murgängen. Kompendium für das Projekt ETAlp, Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen, Universität für Bodenkultur Wien, 83 S.
- Rickenmann, D. (2005): Runout prediction methods. In: *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. (Hrsg. M. Jakob and O. Hungr) Praxis-Springer, Heidelberg, S. 263-282
- Rickenmann, D. (2007): Modellierung von Murgängen und Sedimenttransport in Wildbächen. In: *Tagungspublikation zum 1. Departmentkongress Bautechnik und Naturgefahren*, Universität für Bodenkultur, Wien, Ernst & Sohn (J. Wiley), S. 29-35

7 LITERATURVERZEICHNIS

- Rickenmann, D.; Brauner, M.; Kaitna, R. (2010): Kapitel 5 Feststoffe (38 S.), Kapitel 6 Muren (31 S.) in: Naturgefahren Vorlesungsunterlagen SS 2010. Universität für Bodenkultur, Institut für Alpine Naturgefahren, Wien.
- Schatzmann, M. (2005): Rheometry for large particle fluids and debris flows. Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen technischen Hochschule Zürich, 243 S.
- Stiny, J. (1931): Die geologischen Grundlagen der Verbauung der Geschiebeherde in Gewässern. Wien: Springer, 121 S.
- Thielicke, W. and Stamhuis, E. J. (2014): PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB (version: 1.35). <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1092508>
- Wagner, K.; Suda, M. (2006): NATURgefahren oder NaturGEFAHREN, Die Sichtweise von Wissenschaft, Verwaltungen und Bevölkerung auf Sturzfluten, Rutschungen und vergleichbare alpine Prozesse. Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt (München), 71. Jahrgang 2006, S. 79-94
- Weber, D. (2004): Untersuchungen zum Fließ- und Erosionsverhalten granularer Murgänge. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 336 S.
- Zeller, J. (1985): Feststoffmessung in kleinen Gebirgseinzugsgebieten. Wasser, Energie, Luft, 77 (7/8), S. 246-251
- Zimmerman, M. (1996): Murgänge erkennen und bewerten. In: Björn Oddson: Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse: Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften. Birkhäuser Verlag, Basel, S. 183–196
- Zimmerman, M. (2006): Prognose von Murganggefahren : wie sicher ist sie? In: Bull. angew. Geol. ,Vol. 11/2, S. 65-73
- Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., Gsteiger, P., Heiniger, O. und Hunziker, G.(1997): Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Schlussbericht NFP 31, vdf-ETH, Zürich, Switzerland, 161 S.

ANHANG

Kornverteilungen

Firschnitzbach

Gesamte Kornverteilung

	d [mm]	D [%]			
Block	500,00	100,00			
	400,00	97,35			
	350,00	97,35			
	300,00	95,73			
	250,00	92,58			
Stein	200,00	88,57			
	150,00	82,55			
	120,00	80,21			
	100,00	74,53	Relative Anteil für Versuche		
Kies	80,00	72,01	≤ 63 mm	≤ 31,5 mm	≤ 16 mm
	63,00	71,00	100,00		
	45,00	64,72	91,16		
	31,50	62,00	87,33	100,00	
	16,00	53,36	75,16	86,06	100,00
	8,00	46,39	65,34	74,82	86,93
	4,00	40,50	57,05	65,33	75,90
Sand	2,00	35,97	50,66	58,01	67,40
	1,00	31,48	44,34	50,77	58,99
	0,50	27,31	38,47	44,05	51,18
	0,25	19,48	27,44	31,42	36,51
	0,13	12,86	18,12	20,75	24,11
	0,0708	9,32	13,13	15,03	17,47
	0,0630	8,29	11,68	13,38	15,54
Schluff	0,0523	7,73	10,89	12,47	14,49
	0,0385	6,14	8,65	9,90	11,51
	0,0247	4,30	6,05	6,93	8,05
	0,0148	2,75	3,88	4,44	5,16
	0,0087	1,58	2,22	2,54	2,95

ANHANG

	0,0049	0,72	1,02	1,17	1,36
	0,0039	0,48	0,68	0,78	0,90
	0,0032	0,44	0,62	0,71	0,82
Ton	0,0016	0,28	0,40	0,46	0,53

Wäldletobel

Gesamte Kornverteilung

	d [mm]	D [%]				
Block	1000,00	100,00				
	800,00	98,31				
	600,00	97,06				
	500,00	95,88				
	400,00	93,93				
	350,00	90,47				
	300,00	89,75				
	250,00	85,88				
Stein	200,00	82,16				
	150,00	78,52				
	120,00	76,04				
	100,00	74,09	Relative Anteil für Versuche			
Kies	80,00	71,53	≤ 63 mm	≤ 31,5 mm	≤ 16 mm	
	63,00	69,69	100,00			
	45,00	65,02	93,3			
	31,50	61,67	88,5	100,00		
	16,00	49,07	70,41	79,56	100,00	
	8,00	35,76	51,32	57,99	72,89	
	4,00	23,69	33,99	38,41	48,27	
	Sand	2,00	15,69	22,52	25,45	31,98
		1,00	10,59	15,2	17,18	21,59
		0,50	8,01	11,5	12,99	16,33
0,25		7,16	10,28	11,62	14,60	
0,13		6,01	8,63	9,75	12,26	
0,0662		4,74	6,8	7,68	9,66	
Schluff	0,0630	4,51	6,47	7,31	9,19	
	0,0493	3,97	5,7	6,44	8,10	

	0,0362	3,34	4,79	5,41	6,80
	0,0230	2,63	3,78	4,27	5,37
	0,0139	1,83	2,62	2,96	3,72
	0,0083	1,13	1,62	1,83	2,30
	0,0051	0,67	0,96	1,08	1,36
	0,0037	0,53	0,76	0,86	1,08
	0,0030	0,46	0,66	0,75	0,94
Ton	0,0015	0,40	0,58	0,66	0,82

Mühlbach

Gesamte Kornverteilung

	d [mm]	D [%]				
Block	129,00	100,00				
	106,00	99,52				
	100,00	98,44				
	91,00	98,08				
	90,00	97,93				
Stein	89,00	97,31				
	88,00	97,20				
	80,00	96,90				
Kies	79,00	96,67	Relative Anteil für Versuche			
	78,00	96,38	≤ 63 mm	≤ 31,5 mm	≤ 16 mm	
	63,00	96,21	100,00			
	45,00	92,66	96,31			
	31,50	86,39	89,79	100,00		
	16,00	77,85	80,92	90,12	100,00	
	8,00	66,29	68,90	76,73	85,15	
	4,00	55,88	58,08	64,68	71,77	
	Sand	2,00	49,18	51,12	56,93	63,17
		1,00	44,85	46,62	51,92	57,61
0,50		41,30	42,93	47,81	53,05	
0,25		37,25	38,72	43,12	47,85	
0,13		30,14	31,33	34,89	38,72	
Schluff	0,0692	22,08	22,95	25,56	28,36	
	0,0630	20,10	20,89	23,27	25,82	

ANHANG

	0,0513	17,72	18,42	20,51	22,76
	0,0378	13,73	14,27	15,89	17,63
	0,024	10,18	10,58	11,78	13,07
	0,0142	7,51	7,81	8,70	9,65
	0,0084	5,76	5,99	6,67	7,40
	0,0051	4,45	4,63	5,16	5,72
	0,0037	3,64	3,78	4,21	4,67
	0,003	3,16	3,28	3,65	4,05
Ton	0,0015	2,55	2,65	2,95	3,27

Schauflerbach

	d [mm]	D [%]	Relative Anteil für Versuche		
			≤ 63 mm	≤ 31,5 mm	≤ 16 mm
	75,00	100,00			
Kies	63,00	95,13	100,00		
	45,00	95,13	100,00		
	31,50	91,55	96,24	100,00	
	16,00	85,88	90,28	93,81	100,00
	8,00	75,55	79,42	82,52	87,97
	4,00	62,28	65,47	68,03	72,52
Sand	2,00	48,46	50,94	52,93	56,43
	1,00	35,92	37,76	39,24	41,83
	0,50	27,62	29,03	30,17	32,16
	0,25	26,78	28,15	29,25	31,18
	0,13	25,32	26,62	27,66	29,48
	0,0662	18,96	19,93	20,71	22,08
Schluff	0,0630	18,04	18,97	19,71	21,01
	0,0485	16,74	17,60	18,29	19,49
	0,0350	15,26	16,04	16,67	17,77
	0,0227	11,01	11,57	12,03	12,82
	0,0139	6,85	7,20	7,48	7,98
	0,0084	3,57	3,75	3,90	4,16
	0,0051	1,75	1,84	1,91	2,04
	0,0037	1,22	1,28	1,33	1,42
	0,0030	0,85	0,89	0,93	0,99
Ton	0,0015	0,50	0,53	0,55	0,58

Matlab-Skript

Master

```

close all; clc;

%Zu ändernde Variablen:
% In "03 Mittelwert\mk_degmat_d.m"
%Definiere Anfangs- und Endwinkel für die Auswertung
%Wichtig bei sehr flüssigen Mischungen, start weiter nach unten setzen.

start = -35;
stop = 80;

%In "04 Parameter\get_pars_d.m"
% Proben-dichte

sdensity = 2113;

debug = 0;
if (debug == 0)
    clearvars -except start stop sdensity debug
    % Versuchsbezeichnung als Stammname wird erzeugt. Bsp.:mb2_150217_01
    [filename, path] = uigetfile(fullfile('Data_input', '*.asc'),'Datei wählen. ');
    index_extension = strfind(filename, '.');
    data_name = filename(1:(index_extension-1));

    % Ascii-Datei mit Rohdaten
    input_01 = fullfile(path, filename);
    % Ausgabeordner für outF... Textdateien
    output_01 = fullfile('01 Bereinigung', 'Output', data_name);

    % Vorherige Ausgabeordner
    input_02 = output_01;
    % Ausgabe für save-befehl, hängt .mat automatisch an
    output_02 = fullfile('02 Struktur', 'Output', data_name);

    % Eingabe für load-befehl, sucht automatisch nach .mat
    input_03 = output_02;
    % Ausgabedatei inklusive _degwinmat
    output_03 = fullfile('03 Mittelwert', 'Output', strcat(data_name, '_degwinmat'));

    % Vorherige Ausgabeordner
    input_04 = output_03;
    % Ausgabeordner für Ergebnisse
    output_04 = fullfile('04 Parameter', 'Output', data_name);

    % Verwendete SCRIPTS

    bereinigeMessdaten_d(input_01, output_01);
    readDrumData_d(input_02, output_02);
    mk_degmat_d(input_03, output_03, start, stop);
    get_pars_d(input_04, output_04, data_name, sdensity);
end

if (debug == 1)
    bereinigeMessdaten_d(input_01, output_01);
end

if (debug == 2)
    readDrumData_d(input_02, output_02);
end

if (debug == 3)
    mk_degmat_d(input_03, output_03, start, stop);
end

```

```

if (debug == 4)
    get_pars_d(input_04, output_04, data_name, sdensity);
end

```

get_pars_d

```

function get_pars_d(input_file, output_path, data_name, sdensity)
if(exist(output_path, 'dir') == 0)
    mkdir(output_path);
end
% Global variables
radius = 1263; % radius mm of drum, might change with different roughness
width = 0.45; % channel width
plate_radius = 0.06;
plate = plate_radius^2*pi/4; % area of force plates
% get structure array
load(input_file);
% create outputname based on filename
plength = length(input_file); %- 4 %-4 for the extension
pname = input_file(1:plength); pname = mat2str(pname);
% get number of speed levels
[win, cols, nspeed] = size(degwinmat);
% Preallocate the outputvariable for the table
vel=nan(nspeed, 1); Vol_la=nan(nspeed, 1); Vol_ns=nan(nspeed, 1);
Ab=nan(nspeed, 1); As_tot=nan(nspeed, 1);
bdensity=nan(nspeed, 1); sdens=nan(nspeed, 1);
h_la_mean=nan(nspeed, 1); h_la_max=nan(nspeed, 1);
h_nss_mean=nan(nspeed, 1); h_nss_max=nan(nspeed, 1);
sss_torque=nan(nspeed, 1); sss_geo_sdens=nan(nspeed, 1);
sss_geo_bdens=nan(nspeed, 1);
COG_la_out=nan(nspeed, 1); COG_h_nss_out=nan(nspeed, 1); mue=nan(nspeed, 1);
nss_mean=nan(nspeed, 1); sss_mean=nan(nspeed, 1);

for n = 1:nspeed
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Einlesen aller Benötigten Daten für die Auswertung %
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    angle = degwinmat(1:win, 1, n);
    ns_l = degwinmat(1:win, 2, n); % [g]
    ns_r = degwinmat(1:win, 3, n); % [g]
    ns = (ns_l+ns_r)./2; % mean value of left and right
    ss_l = degwinmat(1:win, 4, n); % [g]
    ss_r = degwinmat(1:win, 5, n); % [g]
    ss = (ss_l+ss_r)./2; % mean value of left and right
    la_l = degwinmat(1:win, 6, n); % [mm]
    la_r = degwinmat(1:win, 7, n); % [mm]
    la = (la_l+la_r)./2; % mean value of left and right
    pw_r = degwinmat(1:win, 9, n); % [Pa]
    rpm = mean(degwinmat(1:win, 10, n));
    torque = degwinmat(1:win, 11, n); % [kNm]

    std_ns_l = degwinmat(1:win, 12, n);
    std_ns_r = degwinmat(1:win, 13, n);
    std_ss_l = degwinmat(1:win, 14, n);
    std_ss_r = degwinmat(1:win, 15, n);
    std_la_l = degwinmat(1:win, 16, n);
    std_la_r = degwinmat(1:win, 17, n);
    std_pw_r = degwinmat(1:win, 19, n);
    std_rpm = degwinmat(1:win, 20, n);

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %Sensoren deaktivieren
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %ns = ns_l;
    %ns = ns_r;
    %la = la_l;
    %la = la_r;

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

ANHANG

```
% calculate parameters %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define index vector of where to look at
ivec = la>5; % CHANGE THIS PROBABLY

nss = (ns./1000).*9.81./plate; % get to [Pa]
sss = (ss./1000).*9.81./plate; % get to [Pa]

vel(n,1) = rpm*2*radius/1000*pi/60;

bdensity_vector = nss./(9.81*(la/1000).*cosd(angle)); % [kg/m³]
bdensity(n,1) = mean(bdensity_vector(ivec==1)); % get mean bulk density over a
certain threshold

% calculate h from nss data, using measured bulk density
h_nss = nss./(9.81*sdensity*cos(angle*pi/180))*1000; % [mm]

h_la_mean(n,1) = mean(la(ivec==1));
h_la_max(n,1) = max(la(ivec==1));
h_nss_mean(n,1) = mean(h_nss(ivec==1));
h_nss_max(n,1) = max(h_nss(ivec==1));
sss_mean(n,1) = mean(sss(ivec==1));
nss_mean(n,1) = mean(nss(ivec==1));
mue(n,1) = atand(sss_mean(n,1)/nss_mean(n,1));

[cogx_la, ~, ~, As_la, COG_la] = calcogVienna(angle(ivec==1), la(ivec==1));
[cogx_h_nss, ~, ~, As_h_nss, COG_h_nss] = calcogVienna(angle(ivec==1),
h_nss(ivec==1));
% Note: cogx is in mm and COG is in degree
COG_la_out(n,1) = COG_la;
COG_h_nss_out(n,1) = COG_h_nss;
Ab(n,1) = sum(ivec)*2*radius/1000*pi/360*width; % in m
As_tot(n,1) = As_la*2; % in m
Vol_la(n,1) = As_la*width; % in m3
Vol_ns(n,1) = As_h_nss*width; % in m3
torque_geo_sdens = Vol_la(n,1)*sdensity*9.81*cogx_la/1000; % in Nm or kg.m2.s-2
torque_geo_bdens = Vol_la(n,1)*bdensity(n,1)*9.81*cogx_la/1000; % in Nm or
kg.m2.s-2
sss_torque(n,1) = mean(torque)/(Ab(n,1)*(radius/1000)+As_tot(n,1)*((radius/1000)-
(h_la_mean(n,1)/1000)/3));
sss_geo_sdens(n,1) =
torque_geo_sdens/(Ab(n,1)*(radius/1000)+As_tot(n,1)*((radius/1000)-
(h_la_mean(n,1)/1000)/3));
sss_geo_bdens(n,1) =
torque_geo_bdens/(Ab(n,1)*(radius/1000)+As_tot(n,1)*((radius/1000)-
(h_la_mean(n,1)/1000)/3));
% all in N/m2 or Pa

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Plot der Sensorenwerte %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Zu Plottenden Bereich wählen
index_unten = find (la > 5, 1);

if index_unten > 1
    a = index_unten - 1;
else
    a = 1;
end
b = 100;
%Leerbereich oberhalb maximalen Kurvenpunkt.
f_scale = 1.2;
%Überspringt x Werte beim Plot von den "errorbars".
jump = 4; %
f = figure(n);
set(f, 'Units', 'normalized', 'Position', [0.2, 0.1, 0.7, 0.7]);
%Normalspannung
subplot(3,1,1);
title(strcat('Geschwindigkeit = ', num2str(vel(n)), ' m/s'));
hold on;
```

ANHANG

```
plot(angle(a:b), ns_l(a:b), 'r--', angle(a:b),ns(a:b),'k-',
angle(a:b),ns_r(a:b),'g--');
errorbar(angle(a:jump:b), ns_l(a:jump:b), std_ns_l(a:jump:b), 'm.');
```

```
errorbar(angle(a+3:jump:b), ns_r(a+3:jump:b), std_ns_r(a+3:jump:b), 'c.');
```

```
hold off;

if max(ns_l(a:b)) < max(ns_r(a:b))
    axis([-inf, +inf, 0, max(ns_r(a:b))*f_scale]);
else axis([-inf, +inf, 0, max(ns_l(a:b))*f_scale]);
end
ylabel('Normalspannung [Pa]'); %Achsenbeschriftung
legend('L', 'M', 'R', 'Location', 'NorthEast'); %Position der Legende

%Laser
subplot(3,1,2);
hold on;
plot(angle(a:b), la_l(a:b), 'r--', angle(a:b),la(a:b),'k-',
angle(a:b),la_r(a:b),'g--');
errorbar(angle(a:jump:b), la_l(a:jump:b), std_la_l(a:jump:b), 'm.');
```

```
errorbar(angle(a+3:jump:b), la_r(a+3:jump:b), std_la_r(a+3:jump:b), 'c.');
```

```
hold off;
if max(la_l(a:b)) < max(la_r(a:b))
    axis([-inf, +inf, 0, max(la_r(a:b))*f_scale]);
else axis([-inf, +inf, 0, max(la_l(a:b))*f_scale]);
end
%Achsenbeschriftung
ylabel('Höhe [mm]'); %Achsenbeschriftung
legend('Laser L', 'Laser M', 'Laser R', 'Location', 'NorthEast'); %Position
der Legende

%PWP
subplot(3,1,3);
hold on;
plot(angle(a:b), pw_r(a:b), 'r--');
errorbar(angle(a:jump:b), pw_r(a:jump:b), std_pw_r(a:jump:b), 'm.');
```

```
hold off;

if max(pw_r(a:b)) < 0;
    axis([-inf, +inf, -inf, +inf]);
else
    axis([-inf, +inf, -inf, max(pw_r(a:b))*f_scale]);
end

%Diagramm Titel
xlabel('Winkel[°]'); %Achsenbeschriftung
ylabel('Porenwasserdruck [Pa]'); %Achsenbeschriftung

% PLOTS ERZEUGEN
saveas( f, fullfile(output_path, strcat(data_name, '_', num2str(vel(n)),
'.fig')), 'fig');
%saveas( f, fullfile(output_path, strcat(data_name, '_', num2str(vel(n)),
'.jpg')), 'jpg');
print(f, '-dpng', fullfile(output_path, strcat(data_name, '_', num2str(vel(n)),
'.png')));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Clear useless vars %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear std_ns_l std_ns_r std_ss_l std_ss_r std_la_l std_la_l std_pw_l std_pw_r
std_rpm std_torque
clear ns_l ns_r ss_l ss_r la_l la_r pw_l pw_r rpm torque
clear cogy_la cogdis_la As_la COG_la
%clear cogx_la cogx_h_nss cogy_h_nss cogdis_h_nss As_h_nss COG_h_nss
clear cogx_h_nss cogy_h_nss cogdis_h_nss As_h_nss
clear ivec h_nss nss sss

end % speed level loop

sdens(1:nspeed) = sdensity;
index_extension = strfind(data_name, '_');
BachReihe = data_name(1:(index_extension(1)-1));
```

ANHANG

```
Cv = data_name((index_extension(2)+1):end);
xlsname = fullfile('04 Parameter', 'Output',strcat(BachReihe,'_Parameter'));

% Header
T = {'v_video','v_trommel', 'V_laser', 'V_ns', 'A_b', 'As_tot', 'bdensity', 'sdens',
'h_la_mean',...
'h_nss_mean', 'h_la_max', 'h_nss_max', 'sss_torque', 'sss_geo_sdens', 'sss_mean',
'sss_geo_bdens',...
'COG_la_out', 'COG_h_nss_out', 'mue','cogx_la';...
'm/s','m/s', 'm³', 'm³', 'm²', 'm²', 'kg/m³', 'kg/m³', 'mm',...
'mm', 'mm', 'mm', 'Pa', 'Pa', 'Pa',...
'o', 'o', 'o', 'mm'};
xlswrite(xlsname, T, Cv, 'B1');

clearvars T

% Geschwindigkeitsstufen
T = {'Variable'; 'Einheit'};
for i=1:nspeed
    T = [T; i];
end
xlswrite(xlsname, T, Cv, 'A1');

clearvars T
%flansch = sss_torque;
% Daten
T(:, 1) = vel;
T(:, 2) = Vol_la;
T(:, 3) = Vol_ns;
T(:, 4) = Ab;
T(:, 5) = As_tot;
T(:, 6) = bdensity;
T(:, 7) = sdens;
T(:, 8) = h_la_mean;
T(:, 9) = h_nss_mean;
T(:, 10) = h_la_max;
T(:, 11) = h_nss_max;
T(:, 12) = sss_torque;
T(:, 13) = sss_geo_sdens;
T(:, 14) = sss_mean;
T(:, 15) = sss_geo_bdens;
T(:, 16) = COG_la_out;
T(:, 17) = COG_h_nss;
T(:, 18) = mue;
T(:, 19) = cogx_la;

%Sortieren der Daten in Abhängigkeit der rpm
[Y, I] = sort(T(:,1),'ascend');
T_sort = T(I,:);
%xlswrite(xlsname, T, Cv, 'B3');
xlswrite(xlsname, T_sort, Cv, 'C3');

fid = fopen(strcat(xlsname,'.txt'), 'a');
fprintf(fid, '%s\r\n', Cv);
fclose(fid);

end
```

regression_sdens_d

```
function [filename, path] = regression_d_sdens()
%Wenn keine Werte eingefügt werden ist die Steigung (Viskosität) der
%ermittelten Regressionsgeraden negativ.
%1. Variante mit sss_geo_sdens
%2. Variante mit sss_torque
%Vor dem Durchlaufen des Skripts:
%nach erfolgreichem durchlaufen aller Sedimentkonzentrationen und
% Überprüfung der Plausibilität (Plots!), müssen die Ermittelten %Cv-Werte
```

ANHANG

```
% in die jeweilige Excel-Datei im Blatt "Parameter" eingefügt
% werden(B4-B:)

%Iteratives verfahren mit den folgenden Parametern:
rohl = 'sdens, h_la_mean';
%Anzahl der Iterationsvarianten
It = 2;
[filename, path] = uigetfile(fullfile('04 parameter', 'Output', '*.xls'),'Datei
wählen.');
```

```
%Erzeugt Textfile zum auslesen der Cv-Werte
txt_filename = strrep(filename, 'xls', 'txt');
insert = fullfile(path,filename);
fid = fopen(fullfile(path, txt_filename), 'r');
Cv = fscanf(fid, '%s');
fclose(fid);
%Anzahl der Cv_Werte für 1. Schleife
index = strfind(Cv, '0');
%Header
T = {'', '', 'rohl', '', '', '' ;'', '', 'sss_geo_sdens', '', 'sss_torque', '' ;...
    '', 'Cv', 'Viskosität', 'Grenzschubspannung', 'Viskosität', 'Grenzschubspannung'};
xlswrite(insert, T, 'Parameter', 'A1');
flag = 1;
%Für verschiedene Cv-Werte
for i=1:size(index, 2)
    T = xlsread(fullfile(path, filename), strcat('0', Cv(index(i)+1)), 'A1:V9');
    [Y, I] = sort(T(:,3));
    T_sort = T(I,:);
    %Erstellung einer Tabelle für das Berechnen der gesuchten Werte.
    M = zeros(size(I,1), 7);
    M(:,1) = T_sort(:,2) + T_sort(:,3); % v_pl
    M(:,2) = T_sort(:,18); % COG_la_out
    %Mittlere Höhe
    M(:,3) = T_sort(:,10); % h_la_mean
    %Dichte aus Trocknung
    M(:,4) = T_sort(:,9); % s_dens
    %Schubspannung
    M(:,5) = T_sort(:,15); % sss_geo_sdens
    M(:,6) = T_sort(:,14); % sss_torque
    %Aus leerlaufschmutz Versuchen Drehmoment abziehen!
    M(:,9) = 1.156*T_sort(:,3).^2.+6.844*T_sort(:,3)+67.63;
    M(:,6) = M(:,6)-M(:,9);
    %Excell Struktur Proben Nummer (Cv)
    c = Cv(index(i)+1);
    excell = ['A' num2str(i+3)];
    xlswrite(insert, c, 'Parameter', excell);
    %Für Iterationsvariationen
    for j=1:It;
        Dichte = M(:,4);
        %Anfangswert der Iteration definieren
        delta_tau = 0.1;
        tau_0 = 0;
        tau_1 = 1;
        %Schubspannungszuweisung
        sss = (4+j);
        while (abs(tau_1 - tau_0) > delta_tau)
            tau_0 = tau_1;
            M(:,7) = tau_0 ./ (9.81 .* Dichte(:,1) .* sin(pi .* M(:,2) ./ 180));
% H0_1
            M(:,8) = M(:,1) ./ ((M(:,3) ./ 1000) - M(:,7)); % Scherrate 1/s
            p = polyfit(M(:,8), M(:,sss), 1);
            tau_1 = p(2);

            if p(1) < 0
                disp(strcat('Cv-Wert 0', Cv(index(i)+1), ' : Bei der ',
num2str(j), '. Regression ist die Steigung k negativ!'));
                flag = 0;
                break;
            end
        end
        excell_cv = ['0' num2str(i)]; %Welches Excel-sheed
        if flag == 1
```

```

        if j == 1
            excell1 = 'C';
            excell2 = ['B' num2str(12)];
            excell3 = ['C' num2str(12)];
            S = {'Scherrate','Schubspannung'};
            xlswrite(insert, S , excell_cv, 'B11');
        elseif j == 2
            excell1 = 'E';
            excell2 = ['B' num2str(22)];
            excell3 = ['C' num2str(22)];
            S = {'Scherrate','Schubspannung'};
            xlswrite(insert, S , excell_cv, 'B21');
        end
        excell = [excell1 num2str(i+3)];
        xlswrite(insert, p, 'Parameter', excell);           %Einfüegepunkt für
        Grafik Werte und jeden Cv-Gehalt
        xlswrite(insert, M(:,8) , excell_cv, excell2);
        xlswrite(insert, M(:,sss) , excell_cv, excell3);
        clearvars excell1 excell2
    end
    flag = 1;
end
end
regression_d_2(filename, path);
end

```

regression_d_2

```

function regression_d_2(filename, path)
%Wenn man nur dieses Skript durchlaufen will:
%funktion/ende und die hier drunter stehende Zeile deaktivieren.
[filename, path] = uigetfile(fullfile('04 parameter', 'Output', '*.xls'),'Datei
wählen.');
```

```

source = fullfile(path,filename);
T = xlsread(source, 'Parameter', 'B4:J11' );
%Erzeugt Output Ordner für Plots
index_extension = strfind(filename, '.');
data_name = filename(1:(index_extension-1));
output_path = fullfile('05 regression', 'Output', data_name);
mkdir(output_path);
%Modellanpassung mit:
%Immer: h_la_mean, sdens
% 1 sss_geo_sdens
% 2 sss_torque
% For Loop zur Modellanpassung Nimmt importierten Datensatz entfernt %Zeilen mit NaN
passt exp-Modell an speichert Koeffizienten in Matrix
% Parameter
CoefMatrix = zeros(size(T,2)-1,2);
counter = 0;
% START LOOP
% T = Viskositäten/Schubspannungs Datensatz
for k=2:size(T,2);
    % Wähle k-te Spalte als y Variable
    fitMatrix = T(:,[1,k]);
    % Entfernen von Zeilen mit NaN
    fitMatrix(any(isnan(fitMatrix), 2), :) = [];
    % Kurvenanpassung
    f = fitype ('exp1');
    [ab, gof] = fit(fitMatrix(:,1),fitMatrix(:,2),f);
    % Speichern der Parameter a,b
    CoefMatrix(k-1, :) = coeffvalues(ab);
    %Plots
    counter = counter+1;
    if k == 2
        figure (k+1);
        subplot(2,1,1);
        title('sss geo sdens');
```

```

        hold on;
        plot(ab,fitMatrix(:,1),fitMatrix(:,2));
        hold off
        ylabel('Eta');
    elseif k == 3;
        figure (k);
        subplot(2,1,2);
        hold on
        plot(ab,fitMatrix(:,1),fitMatrix(:,2));
        hold off
        xlabel('Cv-Gehalt');
        ylabel('Tau');
    elseif k == 4
        figure (k+1);
        subplot(2,1,1);
        title('sss torque');
        hold on;
        plot(ab,fitMatrix(:,1),fitMatrix(:,2));
        hold off
        ylabel('Eta');
    elseif k == 5;
        figure (k);
        subplot(2,1,2);
        hold on
        plot(ab,fitMatrix(:,1),fitMatrix(:,2));
        hold off
        xlabel('Cv-Gehalt');
        ylabel('Tau');
    end
    if k == 3 || k == 5;
        %saveas( figure(k), fullfile(output_path, strcat(data_name ,'_', num2str(k),
        '.fig')), 'fig');
        saveas( figure(k), fullfile(output_path, strcat(data_name ,'_', num2str(k),
        '.fig')));
        print(figure(k),'-dpng', fullfile(output_path, strcat(data_name ,'_',
        num2str(k), '.png')));
    end
end
header = {'','coeffizienten','a','b';'1','Eta','','','tau','','';...
        '2','Eta','','','tau','',''};
xlswrite(source, header , 'Parameter', 'A15' );
xlswrite (source, CoefMatrix , 'Parameter', 'C16' );
end

```

video_read

```

clc; clear all; close all;

filename = uigetfile(fullfile('Video_input', '*.mp4'), 'Ordner Auswählen');
index_extension = strfind(filename, '.');
%data_name = filename(1:(index_extension-1));
data_name = filename(1:(end-4));
if(~exist(fullfile('00 Oberflächengeschwindigkeit', data_name), 'dir'))
    mkdir(fullfile('00 Oberflächengeschwindigkeit', data_name));
end

trommelObj = VideoReader(filename);
nFrames = trommelObj.NumberOfFrames;
vidHeight = trommelObj.Height;
vidWidth = trommelObj.Width;

% Preallocate movie structure.
mov(1:nFrames) = struct('cdata', zeros(vidHeight, vidWidth, 3, 'uint8', 'colormap',
[]));
% Read one frame at a time.
jump = 1;
for k = 1 : jump : nFrames
    mov(k).cdata = read(trommelObj, k);
    if k<10

```

```

        imwrite(rgb2gray(mov(k).cdata), fullfile('00 Oberflächengeschwindigkeit',
data_name, strcat(data_name,'00', num2str(k), '.jpg')));
    elseif k<100
        imwrite(rgb2gray(mov(k).cdata), fullfile('00 Oberflächengeschwindigkeit',
data_name, strcat(data_name,'0', num2str(k), '.jpg')));
    else
        imwrite(rgb2gray(mov(k).cdata), fullfile('00 Oberflächengeschwindigkeit',
data_name, strcat(data_name, num2str(k), '.jpg')));
    end
    %gray_frame2 = rgb2gray(read(trommelObj, k));
    %mov(k).cdata = rgb2gray(read(trommelObj, k));
end

```

torquefunktion_degwinmat

```

clc

%Die Daten aus dem "Leerlauf"-Versuch mit dem Skript "master" durchlaufen lassen.
%Es wird zu einer Fehlermeldung bei "get_pars_d" kommen. Ignorieren!
%Die Datei, die von "readDrumData" (im Ordner "02 structure\Output" ) erzeugt wurde,
%im Workspace öffnen und anschließend das Skript " torquefunktion_degwinmat.m"
%starten. Im Ordner "torque" wird eine Excel-Datei erzeugt mit den Drehmomenten für
%jede Geschwindigkeit.

[notin,notinn,nspeed] = size(degwinmat);
name = data_name;
filename_t = fullfile( 'torque', name);
%Header
T = {'Geschwin', 'Torque[Nm]'};
xlswrite(filename_t, T, 'Tabelle1', 'A1');
clear T
for n = 1:nspeed
    torque = mean(degwinmat(:, 11, n));
    rpm = mean(degwinmat(:, 10, n));
    T(1,1)= rpm;
    T(1,2)= torque;
    excell = ['A' num2str(n+1)];
    xlswrite(filename_t, T, 'Tabelle1', excell);
end

```

Anmerkungen für die Durchführung der Matlab-Skript

master

Dieses Skript greift auf alle weiteren Skripts zu, die für die Auswertung und Berechnung der Parameter aus den Trommelrohdaten nötig sind. Zu variierende Parameter können in diesem Skript verändert werden. Als Endergebnis erhält man eine Tabelle mit den gesuchten Parametern und eine graphische Darstellung der Sensorenwerte (Normalspannung, Laser, Porenwasserdruck)

In Matlab:

Set Path --> Add with Subfolders...--> Hauptordner (z.B. "Matlab_Trommelauswertung") auswählen. Alle weiteren Ordner müssen in diesem enthalten sein.

Aufbau:

data-name: mb2_150219_01

- ersten 3 Zeichen Probenbezeichnung (Mühlbach, 2. Versuchsreihe)
- 5-10 Zeichen Datum (19. Februar 2015)
- letzten 2 Zeichen Cv Nummer (01 erste Cv-Wert)

"Data_input" in diesen Ordner werden die Daten, die von den Trommelversuchen stammen (in ".ASC" Format) gespeichert. Der Dateiname wird an alle weiteren Skript mit "data_name" weiter gegeben.

"01 Bereinigung" enthält "bereinigeMessdaten_d" sowie alle weiteren Skripts zur Bereinigung der Messdaten (Ursprungsskript von David Prenner). Im Ordner "Output" wird ein Ordner mit dem Dateinamen erzeugt und die Ermittelten Textfiles (je 1 pro Geschwindigkeit und Umdrehung) werden darin gespeichert.

"02 Struktur" enthält "readDrumData_d" sowie alle weiteren Skripts zur Erstellung einer Structure array (Ursprungsskript von Jakob Hillebrand). "readDrumData_d" greift auf "01 Bereinigen\Output\Dateiname" zu und speichert die Structure array im "02 Struktur\Output" Ordner mit dem Dateinamen.

"03 Mittelwert" enthält "mk_degmat_d", welches für alle Umdrehungen den Mittelwert über einen Grad und die dazugehörige Standardabweichung ermittelt. Das Ergebnis (als double Dateityp) wird in "03 Mittelwert\Output" Ordner mit dem Dateinamen gespeichert.

Einfügen der Oberflächengeschwindigkeit aus "00 Oberflächengeschwindigkeit"

"04 Parameter" enthält "get_pars_d" und "calcogVienna" (Ursprungsskript von Roland Kaitna). Im Ordner "Output" wird ein Ordner mit dem Dateinamen erzeugt und die ermittelten Parameter werden im Excel Format und in graphischer Form (für jede Geschwindigkeit und als ".fig" sowie ".png" Format) darin gespeichert.

Der Such-Ort der Inputdaten sowie die Namen der Ordner können nach Belieben in diesem Skript geändert werden.

Um nur einzelne Abschnitte durchlaufen zu lassen (z.B. für Fehlersuche):

debug = 0: alle Skripts werden ausgeführt.

debug = 1: nur "bereinigeMessdaten_d" sowie alle weiteren Skripts zur Bereinigung der Messdaten werden ausgeführt.

debug = 2 : nur "readDrumData_d" sowie alle weiteren Skripts zur Erstellung einer Structur array werden ausgeführt.

debug = 3 : nur "mk_degmat_d" wird ausgeführt.

debug = 4 : nur "get_pars_d" und "calcogVienna" werden ausgeführt.

Ermittlung des leerlauf Drehmoments.

Ablauf für asc.-Datei

1. Master durchlaufen → Fehler bei „get_pars“
2. Die Datei, die von "mk_degmat" (im Ordner "03 degmat\Output") erzeugt wurde, im Workspace öffnen
3. Das Skript "torque_kalibrierung.m" starten.
4. Im Ordner "torque" wird eine Excel-Datei erzeugt mit der leerlauf Schubspannung für jede Geschwindigkeit in m/s.
5. Ermittlung der Funktion mittels polynomischer Regressionsanalyse und Einfügung in Skript „regression_d_sdens

Fehler bei einzelnen Sensorenwerten (nicht Plausibel)

1. Master Durchlaufen lassen.
2. Aus Erzeugter Excel-Tabelle „richtige“ Geschwindigkeitsstufen kopieren und wieder schließen.
3. In „Master“ *debug* auf 4 Setzen und im Skript „get_pars“ nach *%Einlesen aller Benötigten Daten für die Auswertung%* bei *%Sensoren deaktivieren%* Gewünschte Sensor mittels neu Definition der Auswertungsparameter deaktivieren(z.B.Laser links nicht plausibel Werte: $la = (la_r+la_l)/2 \rightarrow la = la_r.$)

Trommel-Versuchsanleitung

Ein Versuch besteht aus einer Materialprobe mit mindestens 3 verschiedene Wassergehalten und jeweils 4 verschiedenen Geschwindigkeitsstufen.

Vorbereitung

- Videokameras aufladen (~4h, Achtung: Kamera ohne Tesa-Tape schlechte Batterie) und Format (240fps) überprüfen.
- Scheinwerfer (2X) aufladen.
- Sensoren-Batterie (auf Trommelwelle montiert) aufladen.
- Proben überprüfen ($V_{\min} = 0,05 \text{ m}^3$ bzw. 100 kg, bei Frost Proben ins Labor).

Unmittelbar vor dem Versuch

- Trommel Sperre entfernen.
- Überprüfung ob Kabel am Trommel Umfang nicht lose sind
- Am Laptop „Catman“ öffnen und Versuchsprojekt „trommel20141103“ starten.
- Sensoren Nullstellen (Achtung Sensoren dürfen beim Nullstellen nicht auf dem Kopf stehen!)
- Plausibilität der Sensoren überprüfen.

Versuch

- Trommelrinne mit gut durchmischem Probematerial auffüllen.
- Scheinwerfer positionieren (Keine zu starken Reflexionen in Bildmitte der Kamera)
- Kameraposition bei Bedarf ändern und Messstab in Bildmitte und Oberflächennahe halten.
- Umdrehungen: 3600/7200/10800/14400/18000/21600

- Nach durchlaufen von 4-7 Geschwindigkeitsstufen Probe für Cv-Messung entnehmen.

Nach dem Versuch bei „Catman“ in den Modus „Data Viewer“, Daten als „.asc“ Datei mit Header und mindestens 4 Nachkommastellen exportieren.