

Universität für Bodenkultur, Wien

University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna



Diplomarbeit

Weiterentwicklung und Test eines Prototyps zur Messung von Geschwindigkeitsprofilen in granularen Suspensionen

von

Gerold Maria Mader, B.Sc.



Betreuer:

Assoc. Prof. Dr. Roland Kaitna

Priv.-Doz. Dr. Christian Scheidl

Institut für Alpine Naturgefahren

Wien, Juli 2020

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen Hilfsmittel benutzt habe als angegeben. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche gekennzeichnet. Außerdem wurde diese Arbeit noch keiner anderen Stelle vorgelegt.

Gerold Maria Mader

Danksagung

Als erstes möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Durch die Unterstützung meiner Eltern Irmgard und Theodor und den Rückhalt meiner Geschwister Judith und Christoph mit ihren Partner Clemens und Alex konnte ich die anstrengenden Seiten eines Studiums gut überstehen.

Ohne Bernd Rauscher würde ich wahrscheinlich immer noch im Keller des Instituts sitzen und versuchen die Trommel zum Laufen zu bringen oder irgendein Werkzeug zu suchen. Danke Bernd für die großartige Zusammenarbeit am Projekt „Diplomarbeit“.

Mein großer Dank gilt Dr. Roland Kaitna, der mir Einblicke in die wissenschaftliche Arbeit gab und als Betreuer hervorragende Arbeit leistete. Seine freundliche Art spiegelt die Grundhaltung des Instituts für Alpine Naturgefahren wider, welche ich durch meine Arbeit am IAN bei einer Reihe von MitarbeiterInnen kennenlernen durfte. Hier sei als erstes Amtsrätin Monika Stanzer genannt, welche mit guter Laune und Hilfsbereitschaft für jedes studentische oder organisatorische Problem eine praktische Lösung findet. Für Lösungen praktikabler Natur zeichnet sich auch Amtsdirektor Friedrich Zott aus, wobei diese Probleme meistens im Labor des Instituts auftreten. Danke Fritz für das gemeinsame Arbeiten und die Handgriffe, die ich lernen durfte.

Weiters möchte ich mich bei Herrn Professor Dr. Johannes Hübl bedanken, der mir die Möglichkeit gegeben hat, bei der Erstellung des neuen ALPNAT-Masters die studentische Perspektive einfließen zu lassen und bei weiteren Projekten unter anderem mit DI Markus Beck und Johannes Hödl mitzuarbeiten.

Eine große Hilfe waren auch Dr. Christian Scheidl und DI Georg Nagl, die mir beim Programmieren, den einen oder anderen Trick zeigten. Für die anregenden Fachgespräche über Naturgefahren, Drohnen und andere landläufige Aspekte des menschlichen Lebens gilt mein Dank DI Phillipp Aigner.

Gemeinsames Lernen auf der Uni oder die Besuche von Exkursionen und natürlich das ein oder andere Bier nach einer Prüfung mit Andreas Tegethoff, Christian Laister, Christoph Lainer, Curdin Condrau, Daniel Feiel, Erik Kuschl, Felix Draesner, Georg Hubmer, Jonas Peter, Leander Messner, Lukas Reider, Micha Heiser, Nuria Guerrero Hue, Patrick Berner, Paul Neuschmid, Peter Markus Wagner, Quirin Stimm, Sebastian Tschann, Stefan Ullrich, Theo Tasser, Tobias Schöffl, Tobias Schneider, Ulrich Kriechbaum, Ursula Enzenhofer und Valentina Pelzmann waren immer lehrreiche und lustige Erlebnisse. Danke dafür.

Eine weitere Gruppe von Menschen, die mit ihrer Hilfe und ihrer Geselligkeit die Zeit in Wien unvergesslich gemacht hat, sind meine Freunde: Alexander Leitich, Bernhard Wagner, Christian Rudigier, Benedicte Maderthaler, Daniela Nagel, Manuel Krina, Ferdinand Koller, Maiken Kloser, Florian Schall, Julia Franzen, Johannes Gojo, Jonathan Gasser, Bianca Waschnig, Kim Bauer, Klaus Schlachter, Matthias Geiger, Michael Gartner, Maria Huka, Michael Pucher, Theresia Winsauer, Franz Simon, Ulrich Worthmann und Constanze Riha. Ihnen möchte ich an dieser Stelle ganz herzlich „Danke“ sagen.

Schlussendlich bleibt mir nur noch mich beim Wiener Sportclub zu bedanken. Danke für die vielen Spiele, die wenigen Siege und die vielen Lektionen, Niederlagen sportlich zu ertragen.

Inhaltverzeichnis

Selbstständigkeitserklärung	I
Danksagung	II
Zusammenfassung	1
Abstract	2
1. Einleitung.....	3
1.1. Definition Mure	3
1.2. Fragestellung.....	6
2. Stand des Wissens	7
3. Methodik	11
3.1. Versuchsaufbau.....	11
3.1.1. Trommelversuchsanlage.....	11
3.1.2. Halterung des Messsystems zur Messung des Geschwindigkeitsprofils („Messfinne“)	12
3.1.3. Messfinne	13
3.1.4. Versuchsmaterial	15
3.2. Experimente	17
3.2.1. Ablauf der Versuche.....	17
3.3. Datenauswertung	18
4. Ergebnisse	26
4.1. Geschwindigkeiten und Korrelationen	26
4.1.1. Anpassung der Parameter	27
4.1.2. Ergebnisse der Versuche mit Wasser-Keramik-Gemisch.....	28
4.1.3. Ergebnisse der Versuche mit Wasser-Kies-Gemisch	31
4.2. Geschwindigkeitsprofile	34
4.2.1. Geschwindigkeitsprofile Keramik-Wasser Gemisch	34
4.2.2. Geschwindigkeitsprofile Wasser-Kies-Gemisch	39
5. Diskussion	43
5.1. Plausibilität der Ergebnisse	43
5.2. Vorteil der Messfinne.....	44
5.3. Kritik.....	45
6. Conclusio	46
Quellenverzeichnis	48
Abbildungsverzeichnis:.....	50
Tabellenverzeichnis	52

Zusammenfassung

Murgänge und andere Massenbewegungen weisen ein Fließverhalten auf, welches sich von jenem von Reinwasserabflüssen unterscheidet, vor allem was die Bewegung der Teilchen innerhalb der Masse betrifft. Die Beschreibung dieses Verhaltens erfolgt durch Modellansätze, welche wiederum auf ihre Güte überprüft werden müssen. Für diese Überprüfung wurden bisher mittlere Geschwindigkeiten und Fließtiefen für den gesamten Murkörper herangezogen. Allerdings gibt es bisher kaum Messungen, welche belastbare Daten zur Erstellung eines Geschwindigkeitsprofils liefern.

In dieser Arbeit wird ein Gerät getestet, welches in der Lage ist, diese Geschwindigkeiten in unterschiedlichen Fließhöhen simultan zu messen. Der Versuchsaufbau setzt sich aus einer Trommel mit einem Durchmesser von 2,45 m mit einem sich darin befindlichen 0,45 m breiten Kanal und einer 86,6 cm lange und 11 cm breite Messfinne zusammen.

In den Kanal wurden im Zuge der Messungen unterschiedliche Versuchsmaterialien gegeben. In Kombination mit der Hauptkomponente Wasser wurden sowohl Keramikugeln mit Durchmessern von 2,8 bis 4,3 mm als auch gerundete Kieskörner mit Durchmessern von 4 bis 8 mm in Suspension gebracht.

Das Startvolumen des Wassers betrug 15 Liter. In die Suspensionen wurde die Messfinne eingebracht. Auf dieser befinden sich 10 Elektrodenpaare, die die Veränderung der Leitfähigkeit in 5 verschiedenen Fließhöhen messen kann.

Die Experimente wurden mit beiden Suspensionen bei Trommelgeschwindigkeiten zwischen 3 Umdrehungen pro Minute (0,39 m/s) und 9 Umdrehungen (1,55 m/s) durchgeführt und zeigten, dass die meisten verschiedenen Geschwindigkeiten bei 3 Umdrehungen pro Minute bei beiden Mischungen und zusätzlich bei der Kies-Wasser-Suspension bei 5 und 7 Umdrehungen gemessen wurden.

Im Zuge der Datenauswertung konnten zudem Geschwindigkeitsprofile gewonnen werden, welche einen Einblick in das Fließverhalten der Versuchsmaterialien geben.

Abstract

Debris flows and other mass movements show a flow behaviour that differs from that of pure water discharges, especially with regard to the movement of particles within the mass. The description of this behaviour is done by model approaches, which in turn have to be checked for their quality. Up to now, average velocities and flow depths for the entire debris flow body have been used for this examination. However, there are hardly any measurements that provide reliable data for the creation of a velocity profile.

In this thesis a device is tested, which is able to measure these velocities in different flow heights simultaneously. The experimental setup consists of a drum with a diameter of 2,45 m with a 0,45 m wide channel inside and a 86,6 cm long and 11 cm wide measuring fin.

In the course of the measurements, different test materials were placed in the channel. In combination with the main component water, ceramic balls with diameters of 2,8 to 4,3 mm as well as rounded gravel grains with diameters of 4 to 8 mm were brought into suspension.

The starting volume of the water was 15 litres. The measuring fin was introduced into the suspensions. On this fin there are 10 pairs of electrodes which can measure the change in conductivity at 5 different flow heights.

The experiments were performed with both suspensions at drum speeds between 3 rotations per minute (0,39 m/s) and 9 rotations (1,55 m/s) and showed that most of the different speeds were measured at 3 rotations per minute for both mixtures and additionally for the gravel-water suspension at 5 and 7 rotations.

In the course of the data evaluation, velocity profiles were also obtained which provide an insight into the flow behaviour of the test materials.

1. Einleitung

„Kaum eine andere Naturgewalt vernichtet in unseren Hochgebirgen so viel volkswirtschaftliche Werte als die verheerende Tätigkeit der Wildbäche, welche in den Abgängen von Schuttströmen – Muren ihren katastrophalen Höhepunkt erreicht.“ (Stiny, 1910)

Mit der voraussichtlichen Häufung von Starkregenereignissen als Folge des Klimawandels und der erhöhten Bereitstellung von Lockermaterial durch Rückzug der Gletscher und Permafrostböden stehen die Grundzutaten für Murgangereignisse Jahr für Jahr in einem immer größeren Umfang zur Verfügung. Das Wissen über den Prozess ‚Murgang‘ – also was innerhalb einer Mure vor sich geht – ist noch immer Teil der Forschung. Gleichzeitig stellt das Phänomen, welches vor allem in montanen und alpinen Regionen dieser Welt vorkommt, eine hohe Gefährdung der anthropogenen Kulturräume dar. Für die Wissenschaft ergibt sich daraus nicht nur ein Antrieb aus der ihr grundsätzlich innewohnenden Neugier, ein Phänomen so exakt wie möglich beschreiben zu wollen, sondern auch eine praktische Notwendigkeit. IngenieurInnen, welche sich mit dem Thema Naturgefahren befassen und sich dem Schutz vor den Gefahren, die von Muren ausgehen bzw. deren Abwehr verschrieben haben, sind auf die Erkenntnisse der wissenschaftlichen Forschung angewiesen, um ihrerseits neue Möglichkeiten zu entwickeln, diesen Schutz zu erhöhen oder den daraus resultierenden Schaden zu minimieren. Diese Arbeit will einen Mosaikstein in der Entwicklung eines Gesamtbildes des Prozesses ‚Mure‘ beitragen.

1.1. Definition Mure

Als eine Mure wird eine Massenbewegung von Feststoffen und Wasser in einem Wildbachgerinne bezeichnet. Laut ONR 24800 handelt es sich um ein Gemisch aus „Feststoffen und Wasser“ wobei die Richtlinie die Feststoffe in „Geschiebe, Schwebstoffe und Schwimmstoffe“ unterteilt, also ein Gemisch, welches sich in unterschiedlicher Geschwindigkeit durch das Gerinne bewegt. Somit beinhaltet Geschiebe feste Gesteinsteile, die sich „gleitend, rollend und springend“ im Gerinne bewegen, während Schwebstoffe als jene Feststoffe bezeichnet werden, welche über längere Zeit nicht mit dem Gerinneboden interagieren oder mit Wasser in Suspension gehen. Schwimmstoffe wiederum schwimmen immer obenauf. Dabei handelt es sich meist um „Holz, Laub und Gras“ oder andere Stoffe organischen Ursprungs. (ONR 24800, 2009)

Eine „ideale“ Mure wird in Kopf, Körper und Schwanz eingeteilt (Abbildung 1).

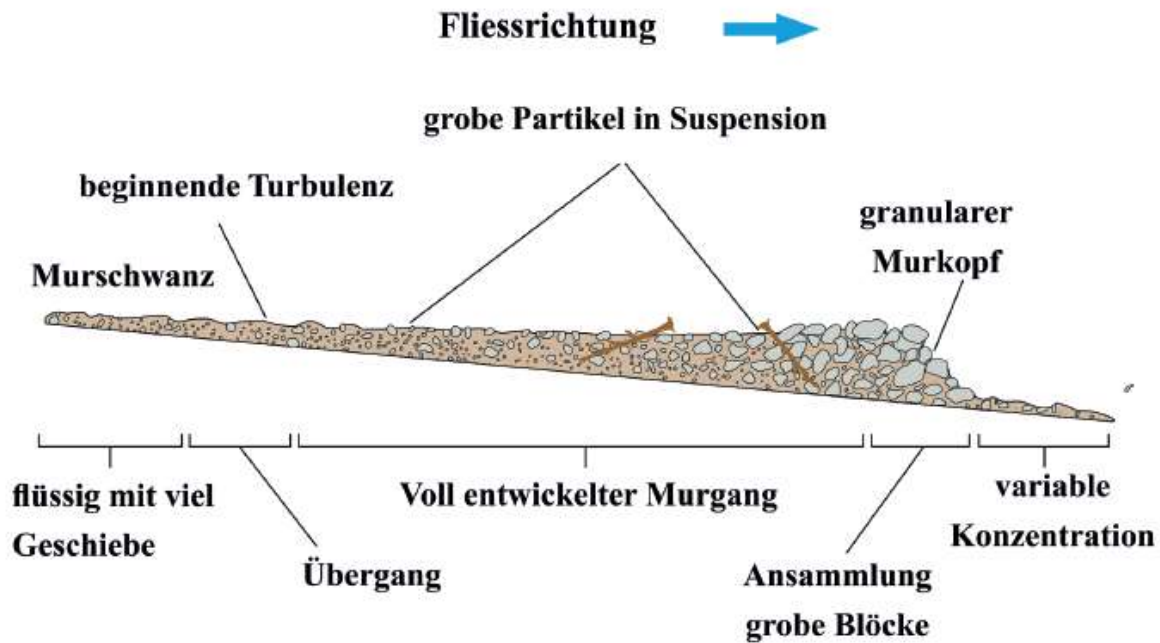


Abbildung 1: Seitliche Betrachtung einer Mure mit der Unterteilung in Murkopf, Murkörper und Murschwanz (nach Pierson, 1986, zitiert in Rickenmann, 2014, modifiziert von Condrau, 2019)

Ein Murgang unterscheidet sich nicht nur in seinem Fließverhalten von einem Reinwasserabfluss, sondern konsequenterweise auch in den Eigenschaften seiner einzelnen Bestandteile.

Zusammensetzung und Fließverhalten:

- weit gestreute Korngrößen, welche sich mehr oder weniger gleichmäßig über die Abflusstiefe verteilt
- Sehr große Blöcke können transportiert werden
- Der Hauptteil des Geschiebes befindet sich an der Front, dahinter ist die Suspension meistens flüssiger
- Murgänge weisen eine hohe Dichte auf (ca. 1600 bis 2400 kg/m³ in der Front)
- Im Vergleich mit Newton'schen Flüssigkeiten (Wasser) weisen Muren höhere jedoch unterschiedliche Viskositäten (Nicht-Newton'sche Flüssigkeit) auf.
- Der Abfluss tritt meistens schubweise einer oder mehrerer Gemischfronten auf (Wellen)
- Fehlt eine seitliche Begrenzung bilden sich Murwälle (Levéés) im Abflussquerschnitt
- Muren lagern sich lokal bei Verbreiterung des Bachbettes oder bei Gefällsknick ab; Das Gefälle beträgt meist von 5 bis 18%.

Charakteristische Spuren im Gelände, die auf Murgänge hindeuten:

- seitliche Murwälle oder Murfirste (Levéés)
- Murzungen bleiben auf Kegeln oder in lokal breiteren Gerinneabschnitten stehen
- Ablagerungen sind unsortiert (alle Korngrößen durcheinander, keine Schichtung)
- Ablagerungen bestehen aus groben Blöcken und feinkörniger Matrix (sofern nicht ausgewaschen)
- Felspartien weisen Schleif- und Ritzspuren auf
- die Ablagerungen grenzen sich scharf voneinander ab
- Vegetation im Ablagerungsbereich weist Schäden auf („Stumme Zeugen“)
- Querschnitt der erodierten Fläche meist u-förmig

Die ONR 24800 gibt außerdem einen Überblick über das Feststoff-Wasser-Gemisch, wobei die Feststoffe noch in Grob- und Feinmaterial unterschieden werden.

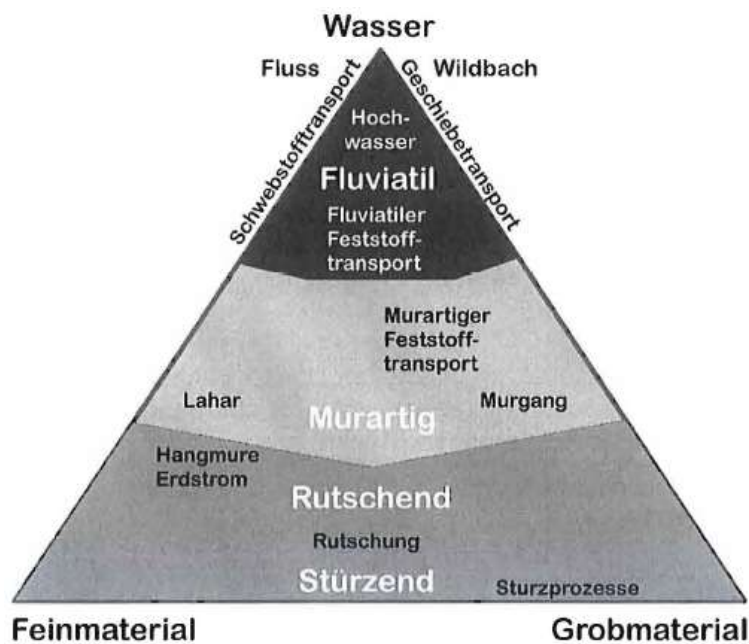


Abbildung 2: „Murendreieck“, Drei-Phasen-Diagramm, welches die verschiedenen hohen Anteile an Fein-, Grobmaterial und Wasser und die dazu gehörenden Massenverlagerungsprozesse zeigt, laut ONR 24800. (2009)

Bei der Unterscheidung der Prozesstypen spielt in der ONR 24800 (2009) der Anteil der Feststoffe in der bewegten Masse die maßgebende Rolle (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Unterscheidung der Wildbachprozesse laut ONR 24800 (2009), gekürzt:

Verlagerungstyp	Hochwasser		Mure	
Verlagerungsart	fluvial		murartig	
Terminus	Hochwasser	Fluviatiler Feststofftr.	Murartiger Feststofftr.	Murgang
Prozesstyp	Reinwasserabfluss	schwach Feststofftr. stark		Murgang
Vol. Feststoffkonzentration c_v (Bereich)	Promillebereich	0 bis 20%	20% bis 40 %	> 40%
Maximale Korngröße	mm bis cm	bis dm	bis m	bis m
Dichte (kg/m^3)	1000	<1300	1300 bis 1700	> 1700

In der ONR 24800 „Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung“ (2009) werden – wie in Tabelle 1 dargestellt - keine Geschwindigkeiten für die einzelnen Prozesstypen angegeben, obwohl diese einen wichtigen Parameter im Prozessverständnis und damit der Gefahrenabschätzung darstellen.

1.2. Fragestellung

Im wissenschaftlichen Kontext stellt sich die Frage, wie sich Murgänge – als Gemisch von festen und flüssigen Bestandteilen – dynamisch verhalten und wie Phänomene innerhalb dieses Gemisches beschrieben und erklärt werden können. In einem ersten Schritt wurden sogenannte Ein-Phasenmodelle vorgeschlagen, in denen ein Murgang als homogene Flüssigkeit mit bestimmten rheologischen Eigenschaften modelliert wird. Die Ansätze reichen von einem Newton'schen Fließverhalten, über einen Bingham Ansatz zu visko-plastischen Ansätzen (Ancey, 2007). Weiters wurden Modellierungsansätze entwickelt, die zwischen der flüssigen und der festen Phase unterscheiden. (Iverson, 1997). Dieser Ansatz wird als Zwei-Phasenmodell bezeichnet (z.B. „Coloumb mixture-theory“ von Iverson & Denlinger, 2001).

Um die Qualität und Anwendbarkeit der jeweiligen Modelle zu testen, wurden bisher meistens Parameter, wie die mittlere Geschwindigkeit oder die Fließtiefe herangezogen. Da die interne Geschwindigkeitsverteilung einen direkten Einblick in das rheologische Fließverhalten gibt, wären direkte Messungen innerhalb einer Mure von Vorteil. Bisher gibt es sowohl auf experimenteller Ebene als auch von Feldmessungen relativ wenige Messungen (Kaitna et al., 2016, Nagl et al., 2020).

Um systematische Messungen im Labor zu ermöglichen, wird in der vorliegenden Arbeit ein Prototyp eines Messinstruments („Messfinne“ oder „Profiler“) getestet, mit dem

Geschwindigkeiten zum selben Zeitpunkt in unterschiedlichen Höhen innerhalb einer granularen Suspension abgeleitet werden können.

In dieser Arbeit werden folgende Fragestellungen behandelt:

- Funktioniert die Messfinne (Profiler), um Geschwindigkeiten in unterschiedlichen Höhen innerhalb der Mure zu messen?
- Für welches Material ist diese Methode am besten geeignet?
- Welche Trommelgeschwindigkeit ist am besten geeignet für Messungen?
- Welche Fenstergrößen, Schritte und Korrelationsgrenzen sind für ein gutes Ergebnis geeignet?

2. Stand des Wissens

Die Strömungsprofile von Muren können fließende bis gleitende Formen annehmen.

Da Murgänge über abtragbare Teile des Gerinnebetts gleiten, interagiert der Murgang mit den dabei erodierten Feststoffen. Dies beeinflusst auch die Form der Masse und wird als innere Verformung bezeichnet. Dieses Phänomen sollte auch an Geschwindigkeitsprofilen ablesbar sein.

Die möglichen Formen eines Geschwindigkeitsprofils können höchst unterschiedlich sein. (Nagl et al., 2020) Dargestellt sind diese Formen in Abbildung 3.

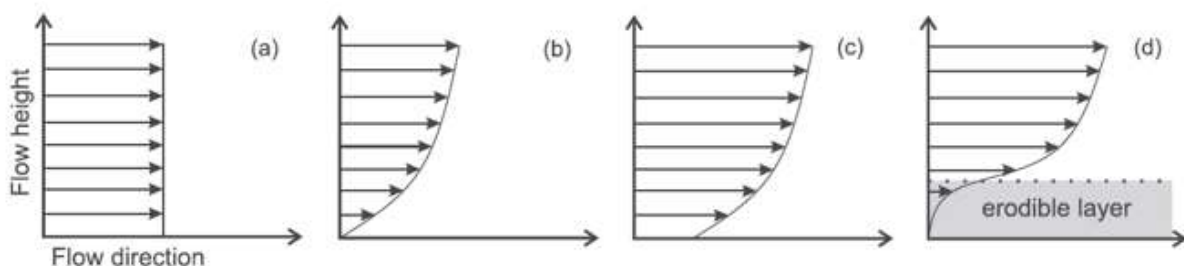


Abbildung 3: Abstrahierte Darstellung möglicher Geschwindigkeitsprofile. (a) Gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil mit Gleiten über die gesamte Fließhöhe. (b) Strömungsprofil über starres Bett ohne Bewegung an der Basis, aber mit innerer Verformung. (c) Kombination von Gleiten und innerer Verformung (a+b). (d) Bewegung über ein erodierbares Bett. (Nagl et al., 2020)

Die Geschwindigkeit von Muren lässt sich auf verschiedene Art und Weise messen. In der Vergangenheit wurden beispielsweise Systeme mit Lasermessungen oder Partikelverfolgung über Videoaufnahmen herangezogen. (Weber, 2004) Die meisten

dieser Messsysteme lassen bisher nur auf mittlere Fließgeschwindigkeiten und die Oberflächengeschwindigkeit quer über die Fließrichtung schließen.

Eine weitere Möglichkeit, Geschwindigkeitsprofile aufzunehmen, ist, mit Laser bestimmte Korngrößen zum Fluoreszieren, zu bringen und dann mit einer Hochgeschwindigkeitskamera deren Bewegung aufzuzeichnen. (San Vitale et al., 2016)

Da bei diesen Beobachtungen nicht die Geschwindigkeit der Feststoffteilchen innerhalb einer Suspension gemessen wurden, mussten diese geschätzt oder angenommen werden. Kaitna et al. (2014) kommen bei ihren Geschwindigkeitsmessungen zum Schluss, dass innerhalb einer sich abwärts bewegenden granularen Suspension eine innere Rotationsbewegung stattfindet, wie in Abbildung 4 dargestellt.

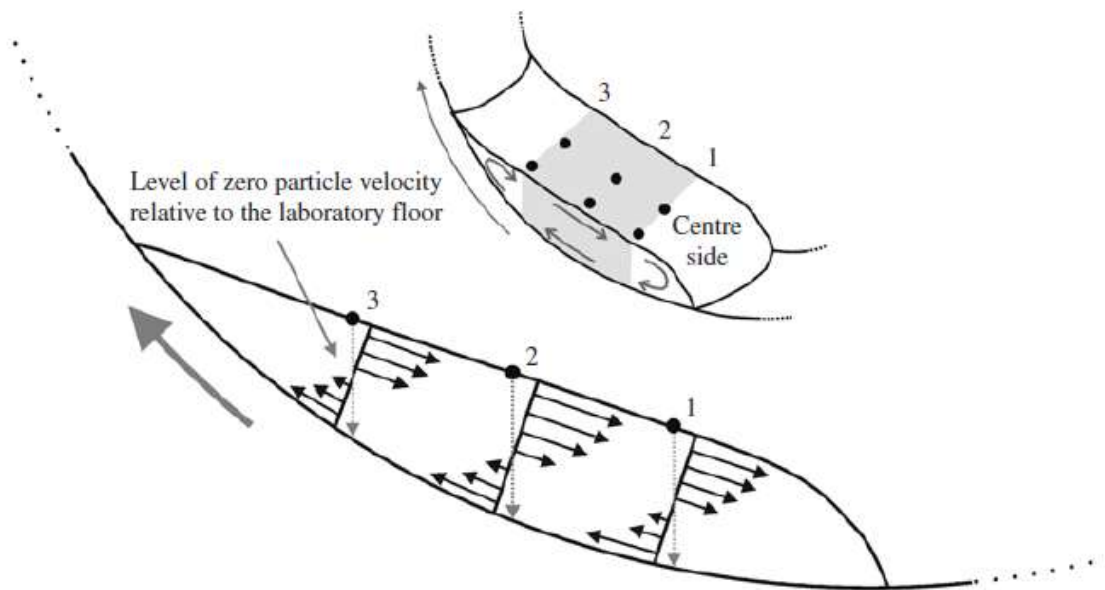


Abbildung 4: Die Geschwindigkeitsverteilung in einer granularen Welle, die in einer Trommel erzeugt wurde. Die Nummern unterteilen die Suspension in Murfront (1), Murkörper (2) und in Murschwanz (3). Die schwarzen Punkte zeigen die Stellen, an denen mit dem Sensor gemessen wurde. Die Bewegungsrichtung der Teilchen wird durch die schwarzen Pfeile veranschaulicht. (Kaitna et al., 2014)

Aus der oberen Abbildung geht hervor, dass es eine Zone im Murkörper geben muss, an der die Geschwindigkeit null oder nahe null ist. Diese Zone bildet die zentrale Achse um die innere Rotationsbewegung in der Mure. In dieser Arbeit versuchten die Autoren, diese Geschwindigkeiten innerhalb eines Murkörpers mithilfe eines Geschwindigkeitssensors zu messen.

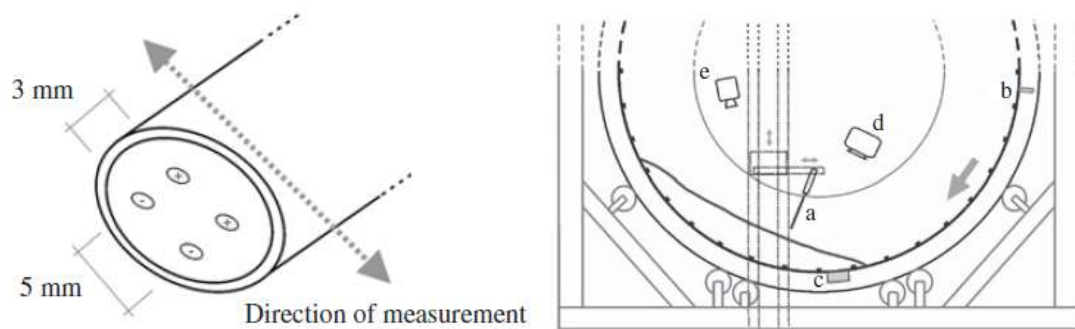


Abbildung 5: Links Oberfläche des Geschwindigkeitssensors, rechts die Versuchsanlage (Trommel) mit dem Geschwindigkeitssensor (a), dem Porenwasserdrucksensor (b), der Wägezelle (c), dem 2D- Laserscanner (d) und der digitalen Videokamera (e) (Kaitna et al., 2014)

Der dafür verwendete Sensor misst die Änderung der Leitfähigkeit des Wassers zu einem gewissen Zeitpunkt, wenn ein Kornteilchen zwischen den beiden Elektroden durchschlüpft. Dies geschieht bei zwei Elektrodenpaaren, deren Abstand gegeben ist und im vorliegenden Fall 5 mm beträgt. Die Änderung der Leitfähigkeit zeigt sich bei beiden Sensoren zu einem jeweils anderen Zeitpunkt. Aus der Differenz dieser beiden Zeitpunkte errechnet sich die Zeit, die ein Teilchen von Elektrodenpaar 1 zu Elektrodenpaar 2 gebraucht hat. Somit sind die Variablen der Formel

$$1.1 \quad v = \frac{s}{\Delta t}$$

mit der Strecke s von 5 mm sowie der zeitlichen Differenz Δt , in der die Leitfähigkeitsänderung, stattfand gegeben. Mithilfe der Kreuzkorrelation werden die Zeitpunkte der Messung geschätzt.

Das Material, welches dabei verwendet wurde, waren Kiesgemische mit durchschnittlichen Korngrößen von 13, 10 und 4 mm. Außerdem wurde eine Kornmischung mit ähnlicher Beschaffenheit wie die eines Murgangs in Taiwan verwendet. Die maximale Korngröße wurde hierbei auf 128 mm begrenzt, um eine Beschädigung des Sensors zu vermeiden.

Die Idee, mit einer Art von Finne Messungen in rotierenden Massen durchzuführen, wendeten Kwapinska et al. 2005 in ihrer Arbeit „Mixing of particles in rotary drums: A comparison of discrete element simulations with experimental results and penetration models for thermal processes“ zur Messung von Temperaturen an. Das Ziel dieser Arbeit ist es, Mischverhalten unterschiedlicher Partikel zu beschreiben und eine bessere Darstellung der Durchdringung von Partikel 1 durch Partikel 2 zu erreichen.

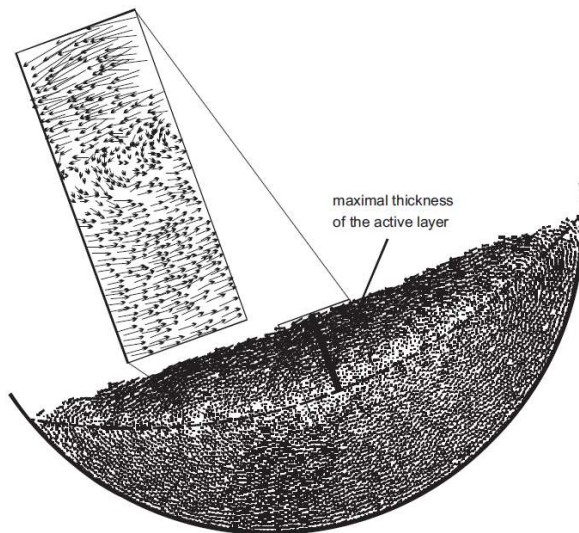


Abbildung 6: Geschwindigkeitsvektoren in einer Partikelmasse, simuliert mit der Discret-Element-Methode. Im vergrößerten Abschnitt werden nur bestimmte Vektoren dargestellt. (Kwapinska et al. 2005).

Nagl et al. stellten in ihrem Aufsatz 2020 „Velocity profiles and basal stresses in natural debris flows“ eine Messmethode in einem natürlichen Gerinne in Südtirol mithilfe eines Profilers vor. In dieser Arbeit wurden nicht nur Geschwindigkeiten von natürlichen Abflüssen gemessen, sondern auch die Kräfte beim Aufprall, die Normalspannung und der Porenwasserdruck. Die Ergebnisse zeigen, dass sich nur am Murkopf mitgeschwemmte Blöcke bewegen. Im Murkörper und Murschwanz findet nur innere Verformung statt. Hier wechselt auch die Form der Geschwindigkeitsprofile.

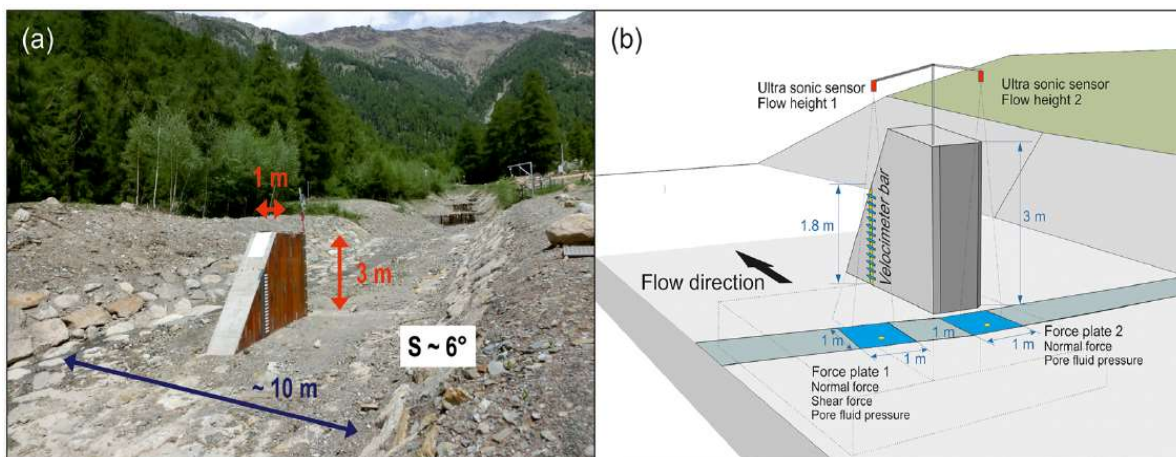


Abbildung 7: (a) Versuchsanordnung von Georg Nagl am Gadriabach, Italien im Gerinne und (b) mit der Position der Normalspannungs- und Porenwasserdrucksensoren (blau) und der Geschwindigkeitssensoren (grün) (Nagl et al., 2020)

3. Methodik

3.1. Versuchsaufbau

3.1.1. Trommelversuchsanlage

Trommel:

Die Versuche wurden in einer sogenannten Trommel (Abbildung 8) durchgeführt. Um die Arbeitssicherheit zu gewährleisten, befindet sich die Trommel in einem 3 m breiten und 3,25 m hohen Metallkäfig. Die Antriebswelle ruht auf einem Stahlgerüst mit 1,66 m Länge. Die Trommel weist einen Innendurchmesser von 2,45 m auf. Das Versuchsmaterial rotiert in einem 0,45 m breiten Kanal. Die Wände des Kanals bestehen auf der einen Seite aus Stahlblech und auf der gegenüberliegenden Seite aus Acrylglas. Um die Rauigkeit am Gerinneboden zu erhöhen, wurden Kunststoffmatten am Boden eingebracht.

Da während einer Umdrehung Feinanteile von der Versuchsmischung in der Kunststoffmatten hängen bleiben können, ist horizontal ein Besen angebracht, der das Material abstreift (Abbildung 8h).

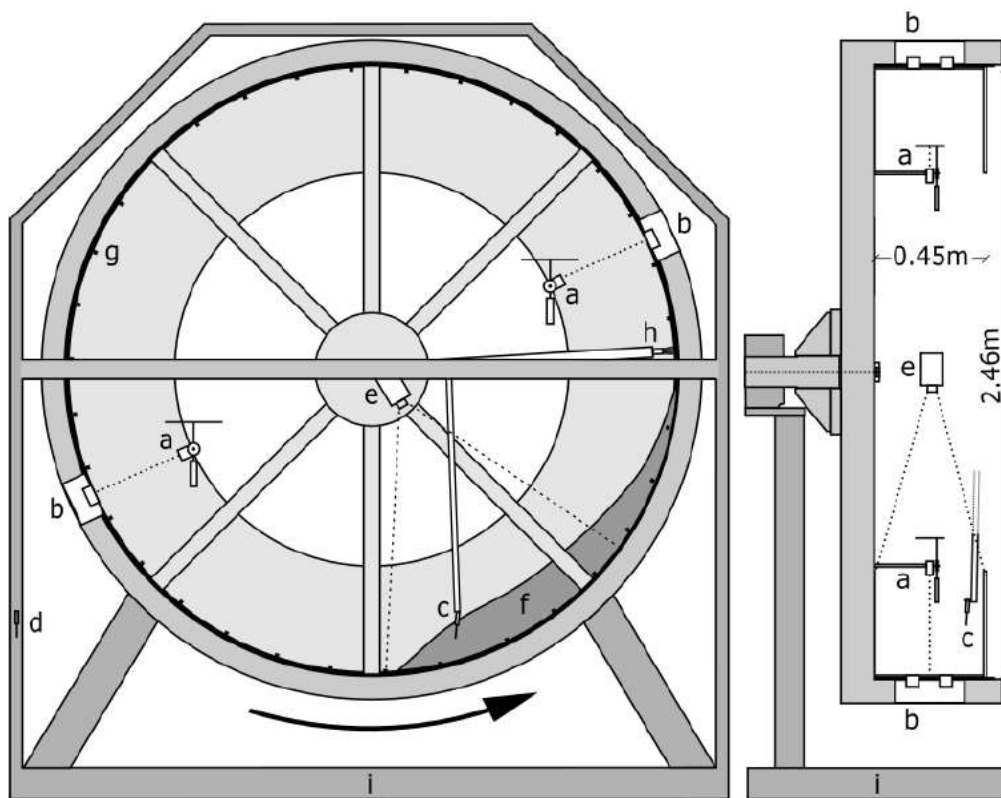


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Trommel, wobei (a) die Lasersensoren zur Höhenmessung, (b) die Normalspannungs- und Schubspannungssensoren, (c) einen Temperatursensor in der bewegten Masse, (d) einen Temperatursensor für die Umgebungsmessung, (e) eine Kamera, (f) eine granuläre Suspension (g) eine Rauigkeit mit einer Dicke von 2 mm, (h) einen Besen und (i) einen Stahlrahmen zur Sicherung der Trommel darstellen. Nicht alle aufgezählten Sensoren sind maßgebend für die Ergebnisse dieser Arbeit. (Kaitna et al. 2007, modifiziert von Heil et al. 2017)

3.1.2. Halterung des Messsystems zur Messung des Geschwindigkeitsprofils („Messfinne“)

Um die Messfinne in der gewünschten Lage in der Suspension zu positionieren und diese Position auch während der Bewegung verändern zu können, musste ein Halterungssystem konstruiert werden, welches die Messfinne einerseits stabil hält und andererseits auch eine gewisse Beweglichkeit aufweist. Nach einer intensiven Planungsphase fiel die Entscheidung aus Gründen der Dauerhaftigkeit, Standsicherheit und Flexibilität in der Anwendung zugunsten einer massiven Stahlkonstruktion (Abbildung 9). Vor allem der Umstand einen schweren Drehtisch aus Gusseisen 1,5 m über dem Boden zu positionieren, machte eine tragfähiges Material notwendig.



Abbildung 9: Links die Halterung für die Messfinne und rechts die Kunststoffrollen mit verstellbaren Schrauben zur Höheneinstellung.

Die Halterung besteht aus mehrfach verschweißten I-Trägern, an deren Enden Löcher gebohrt wurden, um die Konstruktion an der Trommel zu befestigen. Mit den angebrachten Kunststoffrollen konnte die Konstruktion auch bewegt werden. Wenn die Bohrlöcher der Halterung sowie der Stahlträger, bündig auf der Trommel aufliegen, kann das Vorderteil der Halterung abgesenkt werden, indem die Schrauben über den Vorderrädern gelöst werden.

Ähnlich verhält es sich mit dem hinteren Teil der Halterung. Auch hier wurde diese so ausgerichtet, dass sie mit den im Boden eingelassenen Gewindehülsen bündig ist. Im Anschluss wurde auch das Hinterrad abgelassen und die Halterung durch zwei Schrauben im Boden fixiert.

Auf der Trägerkonstruktion ruht eine 2 cm dicke Stahlplatte, welche wiederum einen gusseisernen Drehtisch trägt (Abbildung 10).



Abbildung 10: Drehtisch mit Stahlrohr und Messfinne ohne Verkabelung

Mit diesem Drehtisch wurde der Winkel der Finne in der Suspension eingestellt. Dieser Winkel kann während der Trommelbewegung neu ausgerichtet werden, falls sich die Position der Murwelle in der Trommel verändert. Dies kann durch einen Wechsel der Trommelgeschwindigkeit oder aufgrund von Sortierungsprozessen während des Fließvorgangs hervorgerufen werden kann. Dementsprechend wurde ein 43 cm langes Stahlrohr am Drehtisch montiert. Am Ende dieses Rohrs wurde ein „Schlitten“ befestigt, womit die Höhe der Finne per Hand eingestellt werden kann.

Bei Vorversuchen konnte beobachtet werden, an welchem Ort in der Trommel sich der Murkopf ausbildet. Mit Erhöhung der Geschwindigkeit über 9 Umdrehungen pro Minute verschiebt sich das Material in der Trommel weiter in Drehrichtung. Dadurch kann abgeschätzt werden, wie die Messfinne positioniert wird.

3.1.3. Messfinne



Abbildung 11: Auf Halterung montierte Messfinne von hinten.

Als Messgerät fungiert eine „Messfinne“ (Abbildung 11 und 12). Diese Finne ist 86,6 cm lang, 11 cm breit und 0,6 cm tief. Die Finne besteht aus Kunststoff und einer Metallschiene, um den Kunststoffteil vor Abrieb zu schützen. Die Messfinne wurde bei jedem Versuch 2 cm über dem Kanalboden positioniert. Der Abstand von 2 cm ist notwendig, um nicht Gefahr zu laufen, dass die Unterkante der Messfinne den konkaven Gerinneboden der Trommel berührt.

Auf dieser Finne sind 20 Elektrodenpaare angebracht, die als Leitfähigkeitssensoren paarweise fungieren. Das Messprinzip basiert auf der Korrelation der zwei Leitfähigkeitsmessungen der Sensorpaare. Durch den Zeitversatz und der bekannten

Distanz der Sensoren lässt sich die Geschwindigkeit errechnen. Details zur Datenauswertung werden in Kapitel 3.3. erklärt.



Abbildung 12: Unterer Teil der Messfinne mit den bearbeiteten Leveln 1 – 5.

Jeweils 2 dieser Leitfähigkeitssensoren befinden sich auf gleicher Höhe („Level“). So bilden Sensor 1 und Sensor 2 das unterste Level, welches als Level 1 bezeichnet wird. Für diese Versuche wurden nur die untersten fünf Level herangezogen, da die oberen fünf in den hier beschriebenen Versuchen nicht umströmt wurden.

Der horizontale Abstand der Leitfähigkeitssensoren beträgt 0,8 cm. Der vertikale Abstand der Anode und der Kathode beträgt 0,4 cm. Das Ende der Kupferdrähte wurde aufgeraut. In vertikaler Richtung sind die Abstände zwischen den Ebenen unterschiedlich, wie in der Tabelle 2 ersichtlich. Ausgehend von einem Sicherheitsabstand der Messfinne zum Gerinneboden von 2 cm, wird noch der Abstand vom Ende der Messfinne zum Mittelpunkt des Sensors addiert. Die Sensoren von Level 1 sind 0,6 cm von der Kante entfernt. Damit ist der Abstand von Level 1 vom Gerinneboden 2,6 cm.

Tabelle 2 zeigt die Abstände der Messlevel zum Gerinneboden und zum darauffolgenden Level:

Level	Abstand vom Gerinneboden (m)	Abstände zw. den Leveln(m)
1	0.026	-
2	0.041	0.015
3	0.056	0.015
4	0.086	0.030
5	0.116	0.030

Diese Leitfähigkeitssensoren bestehend aus je einer Anode und einer Kathode, erzeugen ein elektrisches Feld, sobald sie sich in einem leitfähigen Medium – in unserem Fall Wasser - befinden. Gemessen wird nun die Leitfähigkeit (Konvektivität) in mV/V über die Zeit. Die elektrische Spannung beträgt 9 V, wobei die Variationen der Spannung (=Maß

für die Leitfähigkeit) mit einer Frequenz von 9600 Hz gemessen wurden. Kommt es zu einer Änderung der Leitfähigkeit in beiden Leitfähigkeitssensoren zu unterschiedlichen Zeitpunkten, werden diese aufgezeichnet und mithilfe der Kreuzkorrelation die wahrscheinlichsten Signale übereinandergelegt. Als Ergebnis erhält man die Zeit, die ein Teilchen braucht, um zwischen den beiden Elektrodenpaaren durchzuschlüpfen, und dazu die Korrelation als Maß, mit der die Werte miteinander in Zusammenhang stehen. Nach der allgemeinen Formel für die Geschwindigkeit

$$1.1 \quad v = \frac{s}{\Delta t}$$

ist nun die Variable Δt bekannt. Die Variable s bezeichnet den Abstand zwischen den Elektrodenpaaren und hat den Wert 0,8 cm. Angenommen wird, dass sich die Struktur des gesättigten Geschiebes beim Durchgang nicht signifikant ändert.

Aus technischen Gründen musste die Messfinne so montiert werden, dass die Elektrodenpaare bei der Messung seitenverkehrt vorlagen. Diesem Umstand wurde in der Auswertung Rechnung getragen.

Vor Versuchsbeginn musste man die Sensoren testen. Am besten geschieht dies, indem ein längliches Behältnis mit Material (Kies oder Keramik) und Wasser gefüllt wird und die Messfinne hindurchzieht. Alternativ kann auch ein Schwamm mit Wasser befeuchtet und über den jeweiligen Level gezogen werden.

3.1.4. Versuchsmaterial

Die Versuche wurden mit einer Kies-Wasser-Mischung und mit einer Mischung von Wasser und Keramikpartikel durchgeführt (Abbildung 13).



Abbildung 13: Keramikkugeln der Firma Saint-Gobain NorPro (links) Flusskies der Fa. Raschhofer (rechts).

Die Keramikpartikel des Herstellers Saint-Gobain NorPro sind unregelmäßig gerundet und haben einen mittleren Durchmesser (b-Achse) von 3 (Tabelle 3). Der innere

Reibungswinkel von 28° wurde ermittelt indem das jeweilige Material auf einen Kegel aufgeschüttet wurde, solange bis sich kein Teilchen mehr auf dem Kegel ablagern konnte. Tabelle 3 zeigt die physikalische Eigenschaften des Versuchsmaterials:

Physikalische Eigenschaften:	Keramik	Kies
Durchmesser (mm)	3	6.1
Lagerungsdichte dynamisch (kg/m^3)	1329.5	-
Lagerungsdichte stationär (kg/m^3)	-	1619
Innerer Reibungswinkel ($^\circ$)	28	35
Gewicht (kg)	48	60

Für den Flusskies wurde zusätzlich eine Siebkurvenanalyse durchgeführt (Abbildung 14). So sind 18% der Körner 8 mm oder größer. 59% der Körner haben einen Durchmesser zwischen 6,3 und 8 mm. 23% der Körnerdurchmesser liegen zwischen 4 und 6,3 mm.

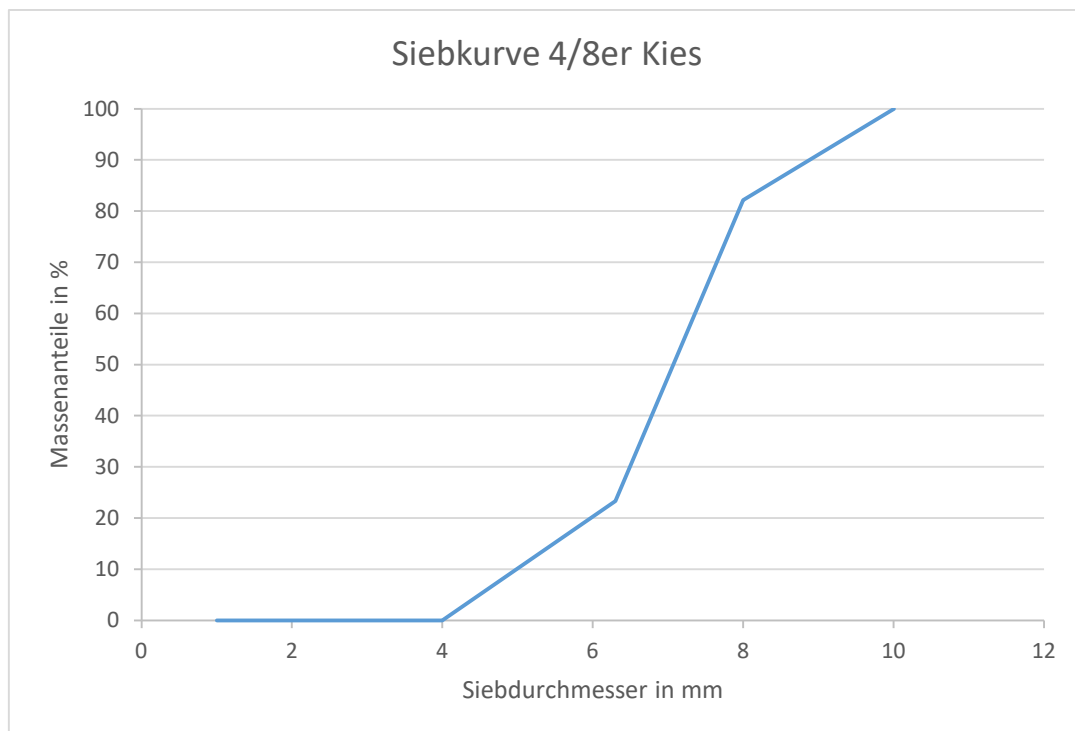


Abbildung 14: Kornverteilungskurve des 4/8er Kies.

Im Zuge von Vorversuchen mussten die Materialeigenschaften für die Versuche mit den Keramikugeln angepasst werden. Deshalb wurde bei Verwendung dieses Materials eine Portion Kaolin (0,15 kg) beigemischt. Daraus lässt sich der Cv-Wert (volumetrische Feststoffkonzentration) bei Keramik zwischen 0,64 und 0,71 angeben und bei Kies zwischen 0,65 und 0,71.

Die optimale Mischung des Materials kann durch Probeläufe vor den eigentlichen Versuchen ermittelt werden. Grundsätzlich wurden 15 Liter Wasser beigemennt, jedoch ist bei höheren Geschwindigkeiten ab 7 Umdrehungen pro Minute der Verlust von Wasser sehr hoch. Es ist daher darauf zu achten, dass während des Versuchs die granulare Welle nicht „austrocknet“.

3.2.Experimente

3.2.1. Ablauf der Versuche

Zu Beginn eines Versuchs wird das Material in die Trommel eingebracht. Danach wird die Halterung mit der Messfinne vor die Trommel geschoben und auf die Auflage der Trommel aufgesetzt.



Abbildung 15: Messsystem in der Trommel unmittelbar vor dem Versuchsstart

Nachdem die Halterung und damit das Messsystem befestigt wurden, konnte mit der Ausrichtung der Messfinne begonnen werden. Nach einigen Tests und Vorversuchen mit dem jeweiligen Material wurde die optimale Position der Messfinne mit 68° zum Lot festgelegt. Bei den verwendeten Geschwindigkeiten befand sich die Messfinne damit immer im zentralen Murkörper, also im tiefsten Bereich der Mure.

Nach Abschluss der Vorbereitungen, wurde die Drehzahl auf die gewünschte Geschwindigkeit justiert. Erst wenn sich das Wasser und das Material gemischt haben und die Murbewegung sichtbar ausgebildet war, wurde die Messung gestartet. Bei der ersten Versuchsreihe im Juni bzw. Oktober 2019 lief die Messung 10 min, bei der zweiten im Dezember 2019 waren es 5 min.

Des Weiteren empfiehlt es sich, den Messbeginn erst nach 3 bis 6 Umdrehungen in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit zu starten, damit sich die typische murartige

Welle ausbilden kann. Dies gilt vor allem für niedrige Trommelgeschwindigkeiten von unter 5 Umdrehungen pro Minute.

3.3. Datenauswertung

In diesem Kapitel möchte ich einen Überblick und eine Beschreibung der Arbeitsabläufe geben. Abschließend erläutere ich, wie ich vorgegangen bin.

Auswertung der gewonnenen Daten:

Für die Analyse der aus dem Versuch gewonnenen Daten wurde das Programm MatLab R2018b verwendet. Der Arbeitsablauf gliedert sich in 10 Schritte und ist für die verwendeten Materialien und die jeweilige Trommelgeschwindigkeit identisch (Abbildung 16).

Im ersten Skript habe ich die Rohdaten strukturiert, indem ich die Signalaufnahmen der einzelnen Elektrodenpaare (=Sensoren) gegenübergestellt habe. Zum Beispiel wurden die Signale des Sensors 1 mit den Signalen des Sensors 2 kombiniert, da es sich hierbei um die beiden Sensoren des untersten Levels der Finne handelt. Diese Vorgangsweise wurde für jeden Level durchgeführt. Außerdem wurde eine Zeitvariable erstellt, welche die gesamte Versuchsdauer beinhaltet.

Im nächsten Schritt erfolgt mit Hilfe des Programms MatLab die Ermittlung der Geschwindigkeiten und der dazugehörigen Korrelationen. Zu deren Ermittlung wendet MatLab innerhalb des „getvelo.m“ – Skript (Abbildung 17) die Funktion der Kreuzkorrelation an. Mit Hilfe von Schleifen werden die Fenster dann über die Messdaten gelegt. Diese Berechnung erfordert die meiste Rechenzeit. Hier wurden die Parameter verändert, um eine erste Schätzung für ein Best-Practice-Modell abzugeben.

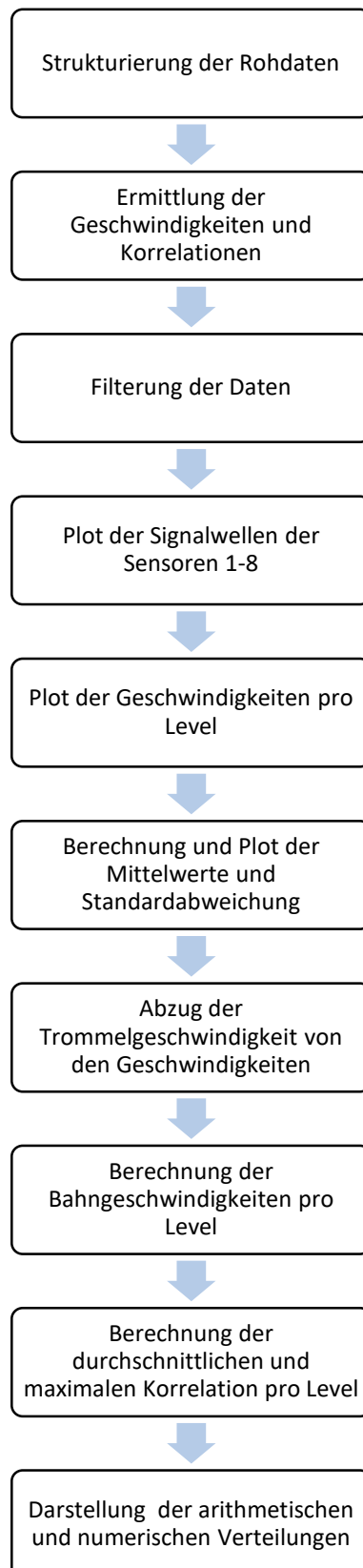


Abbildung 16: Überblick über die Arbeitsschritte bei der Datenauswertung

```

function [velo,acor_m] = getVelo(data1, data2, distance,acor_lim,velo_lim1,velo_lim2)

%limits for values of velocity and acor
%v_lim = limit of velocity
%acor_lim = limit of cross corr

Fs = 9600; % Sampling frequency

%without normalization
%[acor,lag] = xcorr(data1,data2,'coeff');
%normalized
[acor,lag] = xcorr((data2-mean(data2)),(data1-mean(data1)));

[~,I] = max(abs(acor));
lagDiff = lag(I);
acor_m = acor(I); % acor at lag for analyse

timeDiff = lagDiff/Fs;
velo = distance/timeDiff;

%velocity limit v_lim

if velo > velo_lim1
    velo = nan;
elseif velo < velo_lim2
    velo = nan;
else
    velo = velo;
end

%next limit acor_lim
if acor_m < acor_lim
    velo = NaN;
else
    velo = velo;
end

```

Abbildung 17: Anwendung der Kreuzkorrelation mit MatLab im „getVelo.m“-Skript. Weitere Erklärung der Variablen im Text.

In der obigen Abbildung wird F_s als Messfrequenz bezeichnet. lag ist der Abstand zwischen dem Signal 1 und Signal 2, um das das Signal 2 verschoben wird und $lagDiff$ der Abstand zwischen den Signalen, um den verschoben werden muss, um die maximale Korrelation $acor_m$ zu erhalten. Der Befehl (I) gibt die Position der maximalen Korrelation und des Abstandes zwischen den Signalen an. $timeDiff$ ist der Zeitunterschied zwischen den Messungen. $distance$ bezeichnet den Abstand zwischen den Sensorenpaaren und ist mit 8 mm konstant. Die Geschwindigkeit $velo$ ergibt sich aus der Division von $distance$ und $timeDiff$. In den *if*-Schleifen werden die Randbedingungen für Geschwindigkeit ($velo_lim1$ als positive Grenze und $velo_lim2$ als negative Grenze) und Korrelation ($acor_lim$) definiert.

Kreuzkorrelation:

Diese Funktion ermittelt die Korrelation von 2 Signalwellen $(x(t), y(t))$, die zu unterschiedlichen Zeiten Signale senden.

$$1.2 \quad R_{xy}(t_1, t_2) = E\{X(t_1) * Y(t_2)\}$$

R_{xy} ist dabei den Korrelationswert. t_1 und t_2 die Zeitwerte an denen die Messpunkte X und Y liegen. E ist der Erwartungswert aus dem Produkt von X und Y . Die diskrete Kreuzkorrelation R_{S1S2} ermittelt die Korrelationswerte bei der eine Signalwelle um einen Wert (n) verschoben wird. Bei einer systematischen Verschiebung nimmt n die Werte einer Folge an (... -2, -1, 0, 1, 2, ...).

$$1.3 \quad R_{S1S2}[n] = (S1 * S2)[n] = \sum S1[m] S2[m+n]$$

Dabei werden 2 Signalwellen ($S1$ und $S2$) miteinander verglichen, indem ein Teil aus den beiden Signalwellen ausgeschnitten wird. In diesem Fenster wird nun eine Signalwelle $S2$ systematisch um einen Zeitwert (n) verschoben. m bezeichnet den Zeitwert von dem aus die Funktion gestartet wird. Bei jeder Verschiebung werden die Messpunkte zum gleichen Zeitpunkt miteinander multipliziert und mit den nächsten multiplizierten Messpunkten addiert. Die dadurch erhaltene Summe ergibt die Korrelation für den Wert, um den die Signalwelle $S2$ verschoben wurden. Der n -Wert bei dem die Korrelation ein Maximum erreicht, ist der gesuchte *Lag*-Wert. Hier sind sich die beiden Signale am ähnlichsten (Meinke, Gundlach, 1992).

```

Fs = 9600;           % Measurement frequency
distance = 0.008;    % Distance from each sensor to the next
d = 2.45;            % diameter of the drum

% Select the following  CHANGE THIS
rpm = 5; % speed of the drum in rounds per minute ( it can be 3,5,7,9)
drumspeed = ((pi*d*rpm)/60 ); % speed of the drum in meter per second
window = time_windowmax(:,:)*0.1; % window size for crosscorrelation,
steps = 9600; % step length of the floating window
velo_lim1 = drumspeed ; % exclude unrealistic velocity values to be replaced with NaNs
velo_lim2 = -drumspeed; % exclude unrealistic velocity values to be replaced with NaNs
acor_lim = 0.2; % exclude correlation results of low correlation coefficient
start = 1; % start with floating window at this data point (usually 1)

```

Abbildung 18: Darstellung eines Bereichs des „Auswertungsskripts_2“, in dem die Parameter für die Geschwindigkeitsberechnungen eingegeben werden können. Erklärungen der Variablen im Text.

Die Parameter, welche der Versuchsaufbau vorgibt:

F_s: bezeichnet die Messfrequenz und gibt an wie viele Messungen pro Sekunde durchgeführt werden

distance: beschreibt den Abstand zwischen den Leitfähigkeitssensoren eines Levels

d: ist der Durchmesser der Trommel

Die Parameter, welche die Hauptbedingungen für die Auswertungen darstellen:

rpm: Hier musste die Trommelgeschwindigkeit in Umdrehungen pro Minute eingegeben werden. Es wurden Versuche mit 3, 5, 7, 9 rpm in unterschiedlicher Reihenfolge durchgeführt.

window: An dieser Stelle des Skripts konnte die Fenstergröße eingestellt werden und zwar in der Anzahl der Messwerte. Bei einer Messfrequenz von 9600 Hz entspricht der Wert 9600 einer Fenstergröße von 1 Sekunde.

steps: Damit wurde die Schrittweite des Fensters definiert. Auch hier gilt, dass man diese Zahl auch in der Anzahl der Messwerte angibt. Wählt man diesen Wert sehr klein, schreitet das Programm mit sehr kleinen Schritten die Versuchsreihe ab. Daraus folgt, dass sich zwar die Anzahl der ermittelten Geschwindigkeiten erhöht. Allerdings vermindert sich auch deren Korrelation. Als Ergebnis erhält man Geschwindigkeitswerte, die „verschmiert“ erscheinen (Abbildung 21). Zudem erhöht sich die Rechenzeit um ein Vielfaches. Umgekehrt erhält man durch einen sehr hohen Wert zwar Geschwindigkeiten mit einer hohen Korrelation, allerdings nur sehr wenige davon. Mit 9600, also wie die oben genannte eine Sekunde, ist der Wert, womit die besten Ergebnisse erzielt werden konnten.

start: Hier wird der Startzeitpunkt in der Messreihe festgelegt, und er nimmt den Wert 1 an. Mit der Erhöhung dieses Wertes steigt das Skript an einem späteren Zeitpunkt der Messung ein.

Die Parameter, die die Randbedingungen definieren:

acor lim: Vom Autor als Korrelationsgrenzwert bezeichnet, beschreibt dieser Wert die Grenze, unter welcher Ergebnisse von Berechnungen ausgeschieden werden. Anders formuliert stellt dieser Wert den minimalen Korrelationskoeffizienten dar, welchen eine Geschwindigkeitsmessung haben muss, um als Ergebnis anerkannt zu werden. Der Korrelationsgrenzwert ist ein Maß für die Qualität der Auswertung.

velo lim1: ist die Geschwindigkeitsgrenze, welche unrealistische positive Werte aussondert. Die dafür verwendete Geschwindigkeit wurde mit der Trommelgeschwindigkeit festgelegt.

velo lim2: ist die Geschwindigkeitsgrenze, welche unrealistische negative Werte aussortiert. Die dafür verwendete Geschwindigkeit wurde mit der negativen Trommelgeschwindigkeit festgelegt.

drumspeed: Über die Formel der Bahngeschwindigkeit ($\omega = \pi \cdot d \cdot \text{rpm} / 60$), wobei π die Kreiszahl, d der Durchmesser in m und rpm die Umdrehungen pro Minute abkürzt, wurde die Rotation der Trommel in Meter pro Sekunde errechnet.

```
% Loop for level 1
start_loop = start;
for hl = 1:wins
    stop = start_loop + (window-1);
    wintime = time(start_loop:stop);
    avwintime = mean(wintime);
    windat1 = Sensor1(start_loop:stop);
    windat2 = Sensor2(start_loop:stop);
    % get velocity
    [velo, acor_m] = getVelo(windat1, windat2, distance, acor_lim, velo_lim1, velo_lim2);
    vel(hl,1,1) = avwintime;
    vel(hl,2,1) = velo;
    vel(hl,3,1) = abs(acor_m);
    start_loop = start_loop+steps;
end
```

Abbildung 19: Die Befehlszeilen beschreiben, wie das Programm durch das wiederholte Anwenden der *getVelo*-Funktion (Schleifen) die Geschwindigkeiten des Level 1 in die Matrix *vel* einträgt. Erklärung der Variablen im Text.

In der obigen Abbildung ist ersichtlich wie Matlab die Anzahl der Werte bestimmt, bei denen diese Geschwindigkeiten bei beiden Sensoren gemessen wurden (*wins*). Zudem werden die exakten Zeitpunkte, wann sie gemessen wurden (*avwintime*), die Geschwindigkeit (*velo*) und die dazugehörige Korrelation (*abs (acor_m)*) hinzugefügt. Die Variablen *windat1* und *windat2* zeigen die Änderung der Leitfähigkeit bei den Sensoren 1 und 2.

Im dritten Schritt wurden die Daten gefiltert. Zuerst werden die Signale durch die schnelle Fourier-Transformation von einer periodischen Zeitfunktion in Sinussignale umgerechnet. Damit kann festgestellt werden, ob ein periodisch auftretender Ausschlag in der Messreihe auftritt und welche Frequenz dieser aufweist. Diese Frequenzen, die zwischen 45 und 55 Hz auftraten, wurden mithilfe einer Fast-Fourier-Transformation bestimmt und mit dem MatLab-Befehl *cut* herausgeschnitten. (Meinke, Gundlach, 1992)

```

%% Isolierung aus Sensor1

Fs = 9600; %Sampling frequency
signal_1 = Sensor1;
L = length(signal_1);
T = 1/Fs; %Sampling period
%t = (0:L-1)*T; %Time vector

figure
subplot(2,1,1);
plot(time,signal_1);
title ('original signal');

%X = S + 2*randn(size(t)); %Random Noise
Y = fft(signal_1);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;

cut1 = 45; %Hz
cut2 = 55; %Hz
% cut3 = 0; %Hz
% cut4 = 10; %Hz

```

Abbildung 20: Hier sieht man die Befehle für eine schnelle Fourier-Transformation (FFT) für Sensor 1. F_s ist die Messfrequenz, die mit 9600 festgelegt ist. *signal_1* bezeichnet die Messwerte aus Sensor 1. L beschreibt die Länge der Signalwelle von Sensor 1 und T die Aufnahme der Messwerte alle 0,001 Sekunden. Mit den Variablen $P1$ und $P2$ werden die Bereiche der Frequenzen, wo sich eine gleichmäßige Welle ausbildet, ermittelt.

Im vierten Schritt zeigt das Programm die ersten Ergebnisse der Berechnungen. Hier konnten die Signalwellen der Sensoren 1 bis 8 eingesehen werden.

Im fünften Skript wurden die Geschwindigkeiten der jeweiligen Levelhöhe geplottet. Zudem ist die Beziehung der Korrelation zur Geschwindigkeit und die Entwicklung der Korrelation während des Versuchs erkennbar.

Außerdem sind in einem Plot die Mittelwerte der Geschwindigkeit pro Level angegeben. Es erfolgte eine Unterscheidung nach arithmetischem und numerischem Mittel. Zudem wurden die Geschwindigkeiten mit -1 multipliziert, da die Messfinne - wie oben erwähnt - seitenverkehrt eingebaut werden musste.

Im sechsten Schritt wurden die Standardabweichungen vom jeweiligen Mittelwert und Messlevel berechnet.

Das siebte Skript bereinigt die bisherigen Berechnungen um die Trommelgeschwindigkeit. Dadurch erhalte ich als Ergebnis die Geschwindigkeiten, die die Teilchen in der Masse erzielt haben. Andernfalls würden im Geschwindigkeitsprofil am untersten Level negative Geschwindigkeiten aufscheinen.

Im achten Schritt wurden die Bahngeschwindigkeiten pro Level errechnet und damit dem Umstand Rechnung getragen, dass mit aufsteigendem Level sich der Abstand zur

Trommelmitte verringert. Somit verändert sich die mittlere Geschwindigkeit pro Levelhöhe um die jeweilige Bahngeschwindigkeit pro Level. Zudem berechnete ich noch die minimalen und maximalen Geschwindigkeiten. Die Aufteilung der Bahngeschwindigkeiten auf den jeweiligen Level ergab allerdings keine signifikante Änderung zu den im vorherigen Skript berechneten Werten.

Im vorletzten Schritt berechnete MatLab die durchschnittlichen und maximalen Korrelationen. Damit lieferte das Programm zwei Anhaltspunkte, um die Parameter für ein Best-Practice-Modell einzustellen. Diese Berechnungen dienten dazu, in einer Feinabstimmung erste Geschwindigkeitsprofile mit möglichst geringen Standardabweichungen zu generieren.

Im letzten Schritt ließ ich MatLab Histogramme zur Geschwindigkeitsverteilung pro Level ausrechnen, um festzustellen, ob der Mittelwert oder der Median bessere Durchschnittswerte liefert. Jedoch sind auch hier die Unterschiede nur geringfügig, wodurch eine Entscheidung im Hinblick auf die bessere Eignung eines Wertes nicht möglich ist.

Diese Arbeitsschritte wurden für jede der vier Geschwindigkeiten pro Material und für unterschiedliche Fenstergrößen, unterschiedliche Fensterabstände und für unterschiedliche Korrelationsgrenzwerte angewandt, um eine bestmögliche Variante zu finden. Da die Geschwindigkeitsprofile normiert werden, können auch unterschiedliche Einstellungen bei der Berechnung der Kreuzkorrelation verwendet werden.

Praktisches Vorgehen:

Zu Beginn wurde mit einer Datenauswertung „von unten“ begonnen, um an die beste Einstellung der Parameter zu gelangen. Der Parameter *window* (Fenstergröße) wurde zunächst auf einen Bruchteil und im weiteren Verlauf auf ein Vielfaches der Messfrequenz eingestellt. Mit der Erhöhung der Fenstergröße wurden eine Verbesserung der Ergebnisse erzielt.

Eine Erhöhung des Parameters *step* (Abstand zwischen den Fenstern) um das Hundertfache zeigte dabei nennenswerte Änderungen, indem das oben genannte „Versmieren“ in den ermittelten Geschwindigkeiten nicht mehr sichtbar war. Geschwindigkeitswerte reihten sich nun konstanter entlang der x-Achse auf.

Die Geschwindigkeitsbegrenzungen (*velo_lim1* und *velo_lim2*) schieden die Ausreißer auf der Geschwindigkeitsskala aus. Dabei wurde die Trommelgeschwindigkeit als Grenze eingezogen und mit der Formel 1.2 ermittelt,

$$1.4 \quad v_{Trommel} = \frac{\pi \cdot d \cdot rpm}{60}$$

wobei die Variablen π die Kreiszahl, d den Durchmesser der Trommel und rpm die Anzahl der Runden, die die Trommel in einer Minute absolviert, darstellen. Die Division durch 60 ist notwendig um die Geschwindigkeit der Trommel $v_{Trommel}$ in Meter pro Sekunde angeben zu können. Diese Geschwindigkeit wurde zur Berechnung der oberen und unteren Begrenzung verwendet.

Dennoch sind die Ergebnisse noch nicht zufriedenstellend, da einerseits wenige Geschwindigkeiten ermittelt wurden und diese andererseits eine niedrige Korrelation aufwiesen.

In einem zweiten Anlauf nahm ich die Fenstergröße über die gesamte Versuchsdauer an und führte dann Berechnungen mit einem Bruchteil dieses Wertes durch. Nach einigen Berechnungen stellten sich bei allen Geschwindigkeiten mit einer Fenstergröße (*window*) von 1/10 der Versuchsdauer sehr plausible Ergebnisse ein.

Da die Messfrequenz 9600 Hz beträgt, muss diese mit der Versuchsdauer in Sekunden multipliziert werden. Beispielsweise hat der Versuch mit Kies bei einer Trommelgeschwindigkeit von 7 Umdrehungen pro Minute (*rpm*) 354 Sekunden gedauert. Somit wurden über knapp 6 Minuten 3.398.400 Messungen durchgeführt. Die Fenstergröße beträgt bei diesem Versuch somit 339.840.

Um ein Geschwindigkeitsprofil mit realistischen Werten zu erstellen, musste ich nun die Positionshöhe der Messlevel als Fließhöhe bestimmen und die Trommelgeschwindigkeit aus den Messdaten herausrechnen. Daher unterscheiden sich die gemessenen Geschwindigkeitswerte von denen im Geschwindigkeitsprofil.

Um ein Geschwindigkeitsprofil mit möglichst geringen Abweichungen und andererseits einer großen Anzahl an Werten zu erhalten, wurden die Werte für die maximalen und durchschnittlichen Korrelationen herangezogen.

Da die ersten 11 Werte in der Zeitspalte der Variable *Time* unplausible Werte beinhalteten, wurden diese herausgeschnitten. Damit konnte auch ein Sicherheitsabstand zum Versuchsbeginn eingebaut werden.

Die Grenze für die Qualität der Auswertung stellt der Korrelationsgrenzwert (*acor_lim*) dar. Die Fenstergröße (*window*) der Kreuzkorrelation ist bei allen Versuchen 1/10 der gesamten Versuchsdauer. Somit bewegt sich diese je nach Durchlauf zwischen 290000 und 310000 Messwerten oder 30 und 32 Sekunden Messdauer.

4. Ergebnisse

Allgemeine Beobachtungen

Durch die Drehbewegung des Feststoff-Wasser-Gemischs (Suspension) in der Trommel wird eine „ewige“ Mure erzeugt. Dieser ungleichförmig stationäre Abfluss lässt sich mit der Bewegung von Ketten an Raupenfahrzeugen vergleichen. Ein Blick von oben auf das sich im Kanal befindliche Gemisch zeigt, dass Teilchen an der Oberfläche der Masse kontinuierlich nach vorne über die Murfront transportiert werden und mit lateralen Trajektorien überflossen werden. In hinteren Teil wird das Material wieder in die Versuchsmischung eingebracht. Diese treten insbesondere bei höheren Rotationsgeschwindigkeiten der Trommel auf.

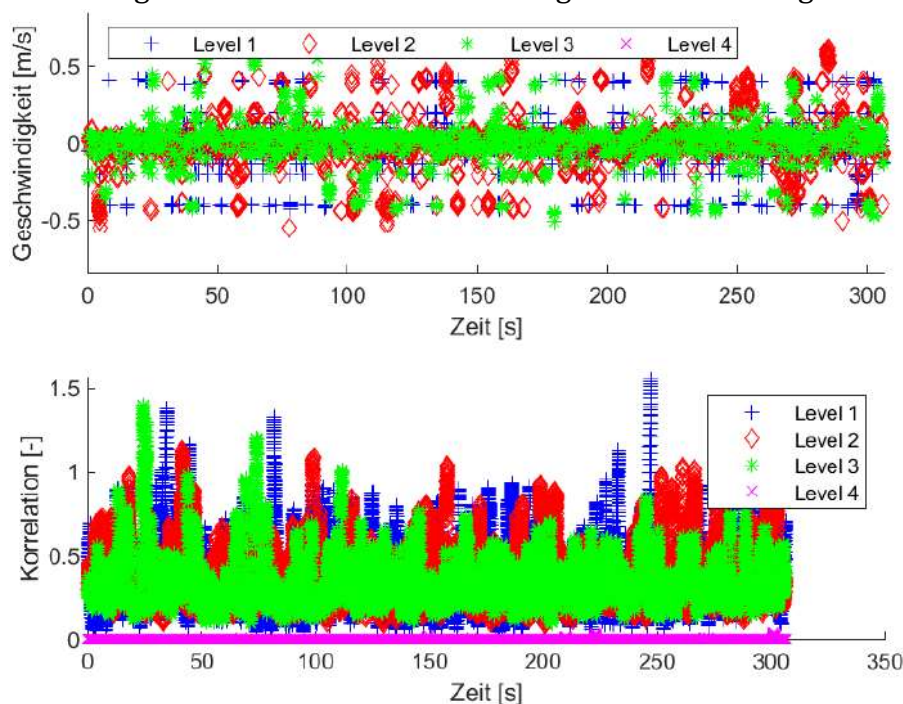
4.1. Geschwindigkeiten und Korrelationen

Diese Kapitel befasst sich im Detail mit dem Einfluss der Auswertungsparameter (*steps*, *window*, *acor_lim*) sowie den erzielten Anpassungen dieser Parameter. Zunächst wird auf

die Ergebnisse der Versuche mit Keramikugeln näher eingegangen. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der Ergebnisse der Versuche mit Kies.

4.1.1. Anpassung der Parameter

Als Beispiel für die Anpassung der Parameter dient der Versuchsdurchlauf mit dem Material Keramik bei einer Trommelgeschwindigkeit von 3 Umdrehungen pro Minute (U/min). Wie in Abschnitt 3.3. beschrieben, habe ich die Auswertung der Daten mit einer kleinen Fenstergröße begonnen. Als Ausgangspunkt nahm ich mit 9600 Datenpunkten den der Messfrequenz an (d.h. 1 Sekunde). Der Einfluss eines kleinen *step*-Werts ist in Abbildung 20 ersichtlich. Dabei weisen die Werte eine hohe Streuung auf. Das Erscheinungsbild der Ergebnisse der Versuche wirkt in der Grafik „verschmiert“. Eine Ermittlung einer konstanten Geschwindigkeit ist kaum möglich.



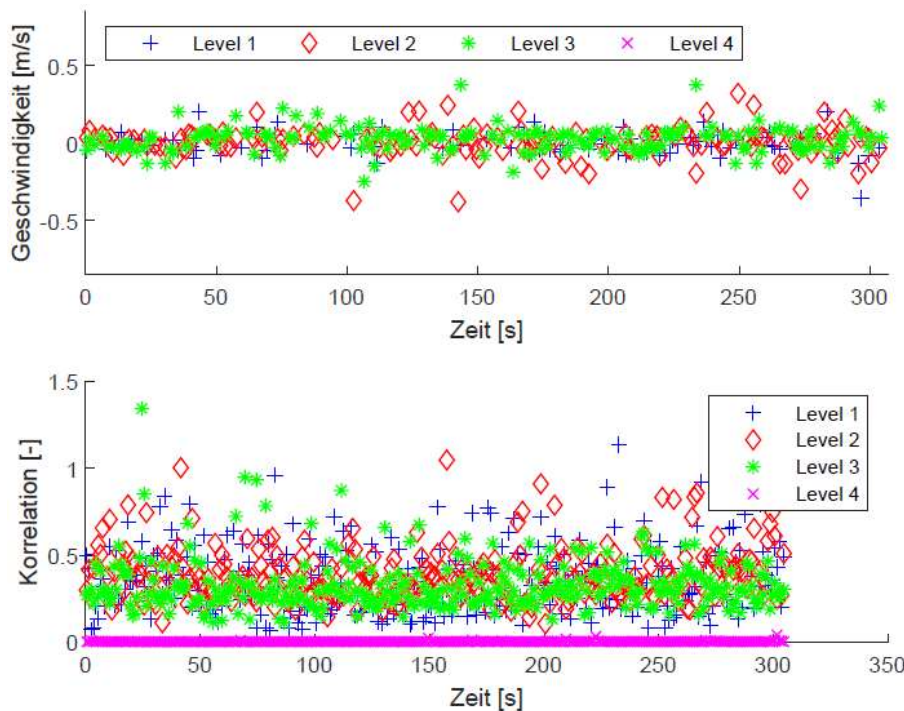
a.) Berechnete Geschwindigkeiten bei Fenstergröße von 1 Sekunden und einer Schrittweite von 1/10 Sekunde.

b.) Berechnete Korrelationen der Geschwindigkeiten mit einem Korrelationsgrenzwert von 0,2.

Abbildung 21: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 3 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 1 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.

Die Werte des Diagramms (a) wurden bei einer Fenstergröße von 9600 und einer Schrittweite von 96 gewonnen. In Diagramm (b) sind die Korrelationen der Geschwindigkeiten dargestellt. Der Korrelationsgrenzwert beträgt 0,2, somit liegen die Werte von Level 4 darunter.

Wenn man die Schrittweite (*step*) auf 9600 erhöht, verbessert sich die Streuung, allerdings ist die Anzahl der Geschwindigkeiten stark reduziert. Abbildung 22 stellt die Ergebnisse einer größeren Schrittweite bei gleicher Fenstergröße dar.



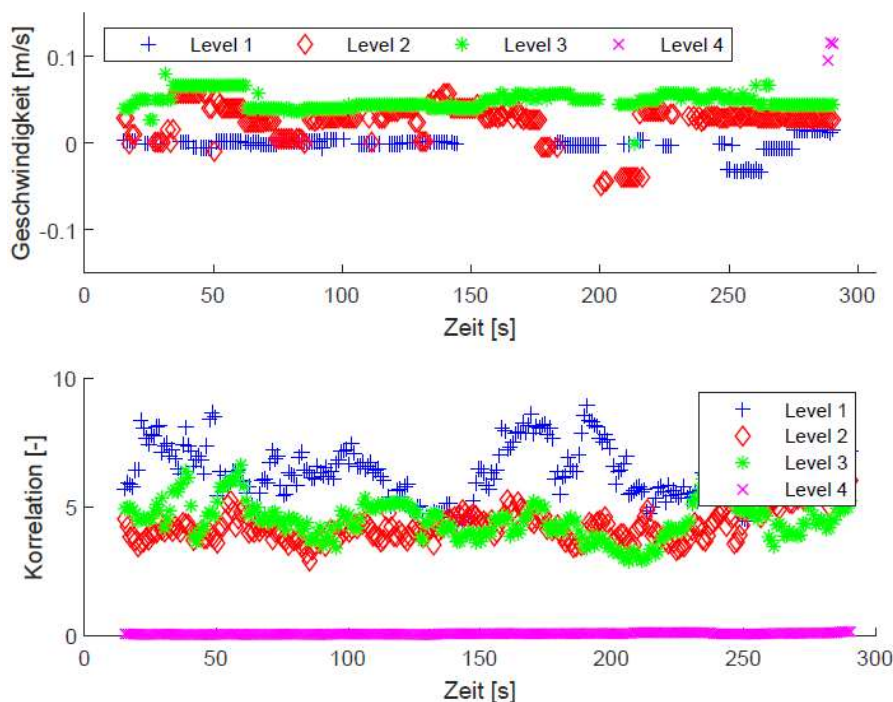
a.) Berechnete Geschwindigkeiten bei Fenstergröße von 1 Sekunden und einer Schrittweite von 1 Sekunde.

b.) Berechnete Korrelationen der Geschwindigkeiten mit einem Korrelationsgrenzwert von 1,5.

Abbildung 22: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 3 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 1 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.

Durch eine Vergrößerung des Fensters erhöht sich die Anzahl der Werte und zusätzlich kann der Korrelationsgrenzwert für die Auswertung erhöht werden. Die Resultate einer Erhöhung der Fenstergröße sind in den nachfolgenden Diagrammen in Abbildung 23 ersichtlich.

4.1.2. Ergebnisse der Versuche mit Wasser-Keramik-Gemisch



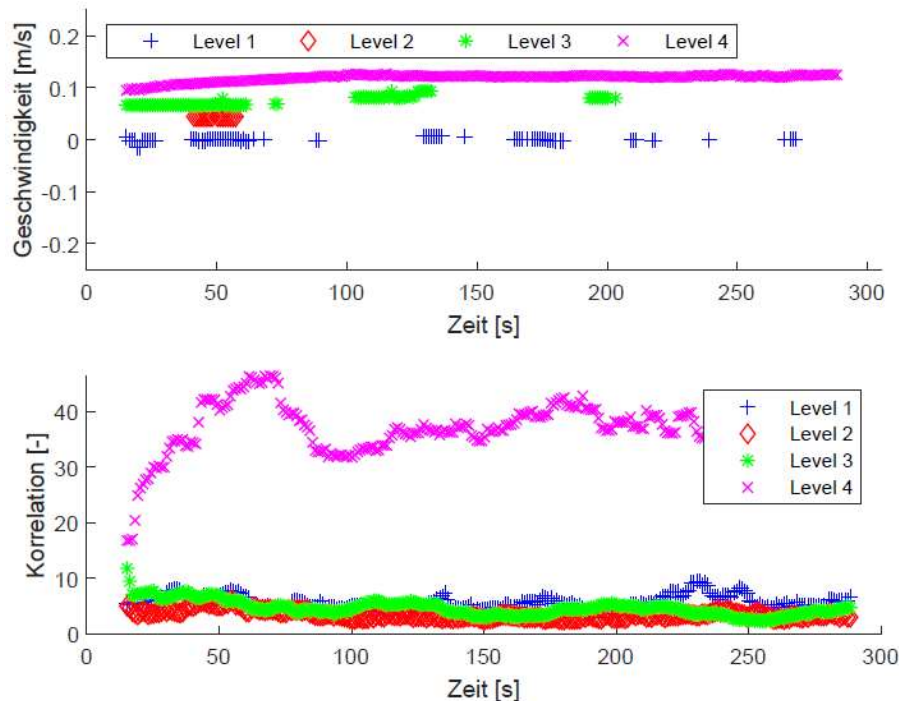
a.) Berechnete Geschwindigkeiten bei Fenstergröße von 30,89 Sekunden und einer Schrittweite von 1 Sekunde.

b.) Berechnete Korrelationen der Geschwindigkeiten mit einem Korrelationsgrenzwert von 1,5.

Abbildung 23: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 3 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 30,89 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.

Wie man gut sehen kann, zeigen die Level 1 bis 3 Messergebnisse über den gesamten Versuchszeitraum. Einige Messwerte von Level 2 befinden sich im negativen Bereich (ab 200 Sekunden). Für die Geschwindigkeiten des 4. Levels wurden nur Geschwindigkeiten mit einer sehr niedrigen Korrelation gemessen, welche auch noch weit streuen. Grund dafür könnte sein, dass es bei einer niedrigen Trommelgeschwindigkeit nur zu minimalen Umströmung der Messsensoren in Level 4 kommt. Die Fenstergröße von 30,89 sec entspricht 296569 Datenpunkten.

Einen Hinweis auf die geringe Umströmung des Level 4 bei 3 U/min als Grund für die schlechten Messwerte bietet der Durchlauf mit einer Trommelgeschwindigkeit von 5 U/min in Abbildung 24:



a.) Berechnete Geschwindigkeiten bei Fenstergröße von 30,53 Sekunden und einer Schrittweite von 1 Sekunde.

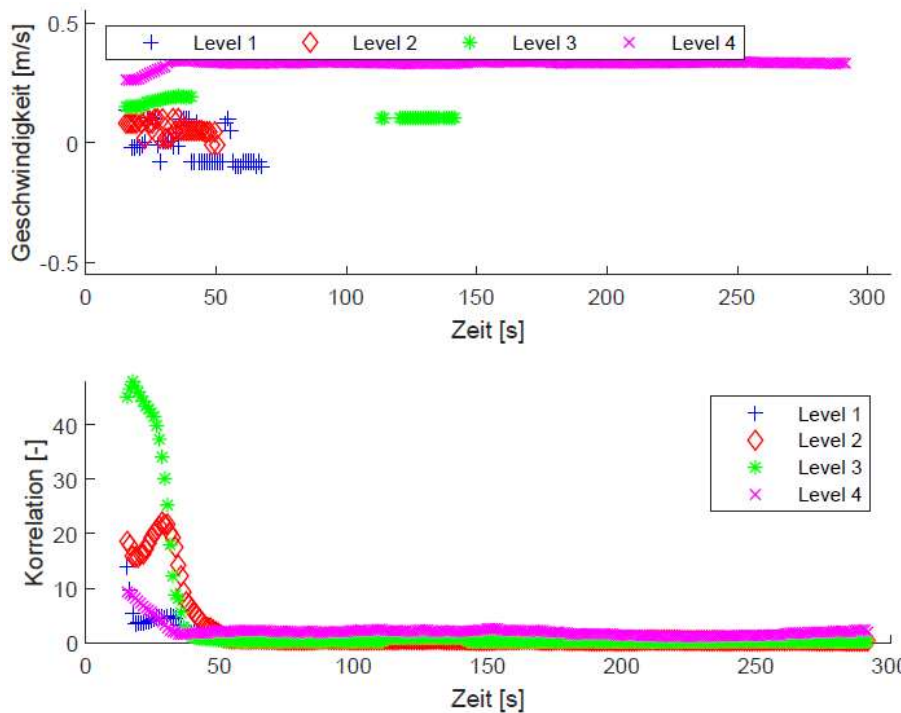
b.) Berechnete Korrelationen der Geschwindigkeiten mit einem Korrelationsgrenzwert von 5,04.

Abbildung 24: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 5 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 30,89 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.

Für die auf Level 4 gemessenen Geschwindigkeitswerte konnte bei einer Versuchsdurchführung mit 5 U/min eine hohe Konstanz dokumentiert werden. Die Geschwindigkeiten insgesamt zeigen keine Ausreißer, allerdings einige Unterbrechungen in den Levels 1 bis 3. In der unteren Grafik ist die ansteigende Korrelation der Werte von Level 4 sichtbar, während die Level 1 bis 3 niedrigere Korrelationen aufweisen.

Die Fenstergröße von 30,53 sec entspricht 293155 Datenpunkten.

Die anhaltend gute Messung bei Level 4 wird auch bei den Messungen bei 7 U/min sichtbar, wie in Abbildung 25 ersichtlich:

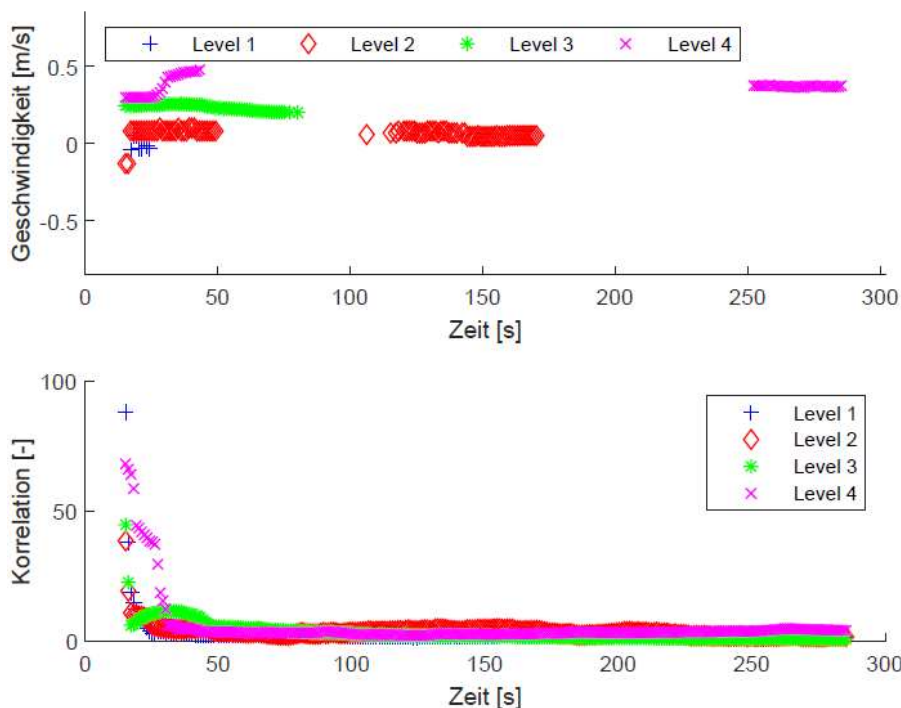


a.) Berechnete Geschwindigkeiten bei Fenstergröße von 30,87 Sekunden und einer Schrittweite von 1 Sekunde.

b.) Berechnete Korrelationen der Geschwindigkeiten mit einem Korrelationsgrenzwert von 5,04.

Abbildung 25: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 7 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 30,89 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.

Allerdings streuen hier die Geschwindigkeitswerte des Levels 1 stark. Die Werte der Level 2 und 3 streuen etwas weniger. Zudem sind die Korrelationswerte über alle Level sehr niedrig. Für das Material Keramik ist diese Messreihe jene mit dem niedrigsten Korrelationsgrenzwert. Die Fenstergröße von 30,87 sec entspricht 296383 Datenpunkten.



a.) Berechnete Geschwindigkeiten bei Fenstergröße von 30,18 Sekunden und einer Schrittweite von 1 Sekunde.

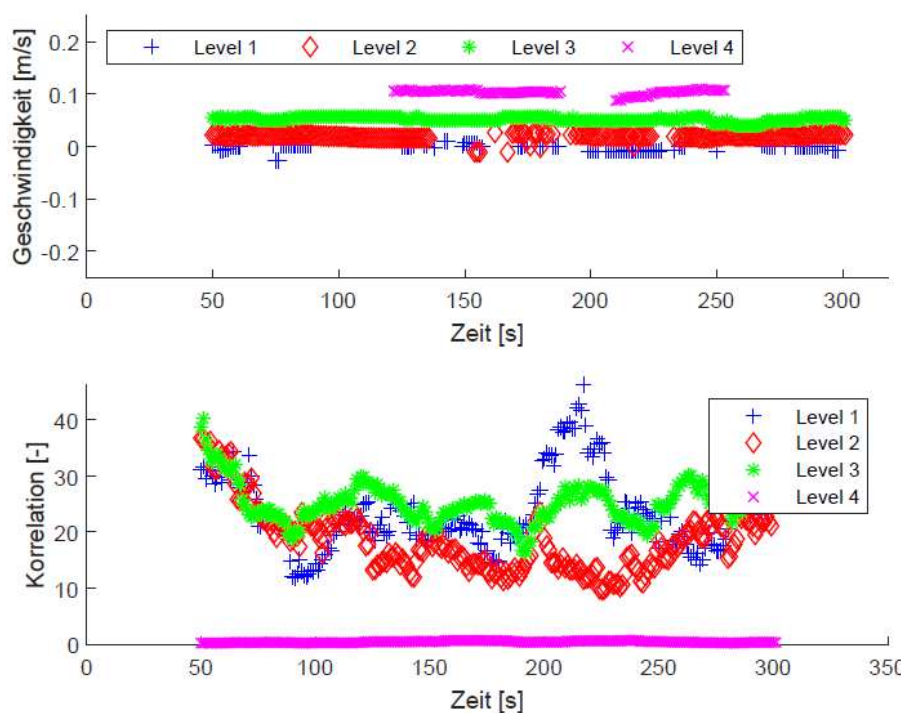
b.) Berechnete Korrelationen der Geschwindigkeiten mit einem Korrelationsgrenzwert von 3,82.

Abbildung 26: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 9 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 30,18 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.

In Abbildung 26 sieht man die gemessenen Geschwindigkeiten bei 9 U/min in der oberen Grafik. Wie schon bei den Messungen mit 7 U/min (Abbildung 25) ist auch hier die Ausbeute an Geschwindigkeiten sehr gering. Zudem ist eine starke Streuung bei den Leveln 1, 2 und 4 ersichtlich. Hier beginnen die Korrelationen der einzelnen Level sehr hoch und vermindern sich anschließend auf einen gemeinsamen ähnlichen Wert. Die Fenstergröße von 30,18 sec entspricht 289732 Datenpunkten.

4.1.3. Ergebnisse der Versuche mit Wasser-Kies-Gemisch

Die Auswertungen der Daten, die aus den Versuchen mit dem Material Kies gewonnen wurden, zeigen ähnliche Ergebnisse wie bei den Versuchen mit Keramik im Hinblick auf die Qualität. Auch hier kam es zu einer Entwicklung der Auswertung, die in einer Festlegung der Fenstergröße auf 1/10 der Versuchsdauer und einen *step*-Wert von 9600 mündete. In den folgenden Diagrammen ist die Trommelgeschwindigkeit nicht berücksichtigt.



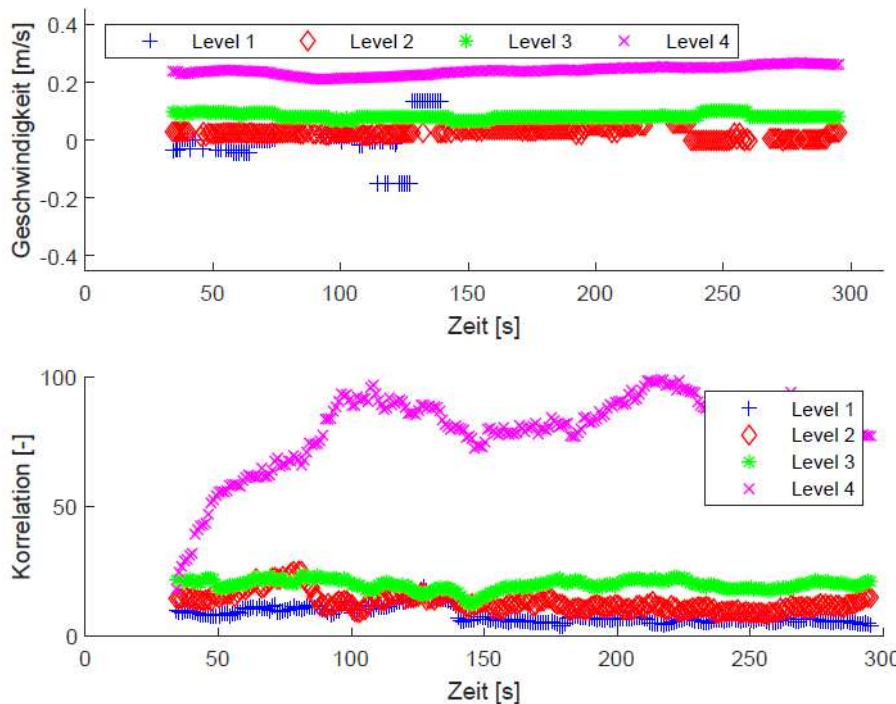
a.) Berechnete Geschwindigkeiten bei Fenstergröße von 31,79 Sekunden und einer Schrittweite von 1 Sekunde.

b.) Berechnete Korrelationen der Geschwindigkeiten mit einem Korrelationsgrenzwert von 0,46.

Abbildung 27: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 3 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 31,79 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.

In Abbildung 27 sind die durchgehend verlaufenden Geschwindigkeiten des Levels 3 auffallend, während die Messungen der Level 1, 2 und 4 Unterbrechungen aufweisen. Außerdem weist das Messlevel vier im Vergleich zu anderen Leveln niedrigere

Korrelationen auf. Dies war bereits bei Verwendung der Keramikugeln zu beobachten. Ohne die Geschwindigkeiten des Levels 4 wäre der Korrelationsgrenzwert über 10. Die Fenstergröße von 31,79 sec entspricht 305192 Datenpunkten.



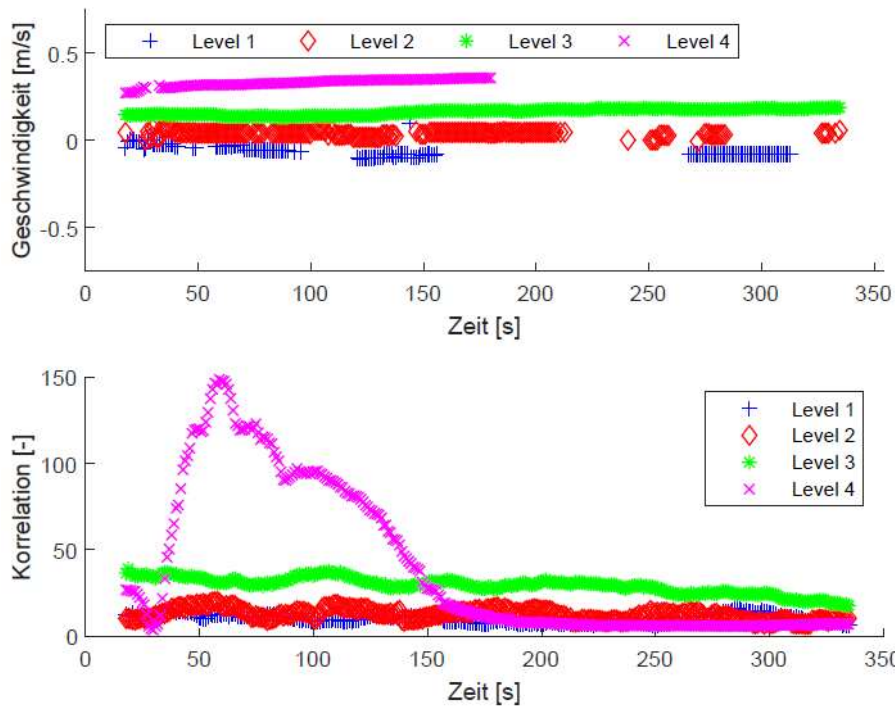
a.) Berechnete Geschwindigkeiten bei Fenstergröße von 31,26 Sekunden und einer Schrittweite von 1 Sekunde.

b.) Berechnete Korrelationen der Geschwindigkeiten mit einem Korrelationsgrenzwert von 8,02.

Abbildung 28: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 5 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 31,26 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.

Abbildung 28 stellt die Ergebnisse der Auswertung bei 5 U/min dar. Sie weisen starke Ähnlichkeiten zu den Messungen mit Keramik bei gleicher Trommelgeschwindigkeit auf. Allerdings zeigt hier das Level 3 auch durchgehende Geschwindigkeitswerte. Die Messungen auf Level 2 haben nur wenige Unterbrechungen und Ausreißer. Auch Level 1 beginnt mit einem konstanten Verlauf. Es tauchen im weiteren Versuchsverlauf allerdings einige Ausreißer auf, und die Korrelation der weiteren Werte sinkt nach knapp der Hälfte der Versuchsdauer unter den Grenzwert von 8,02. Die Fenstergröße von 31,26 sec entspricht 289732 Datenpunkten.

Die Geschwindigkeitsmessung bei 7 U/min zeigt folgendes Bild.



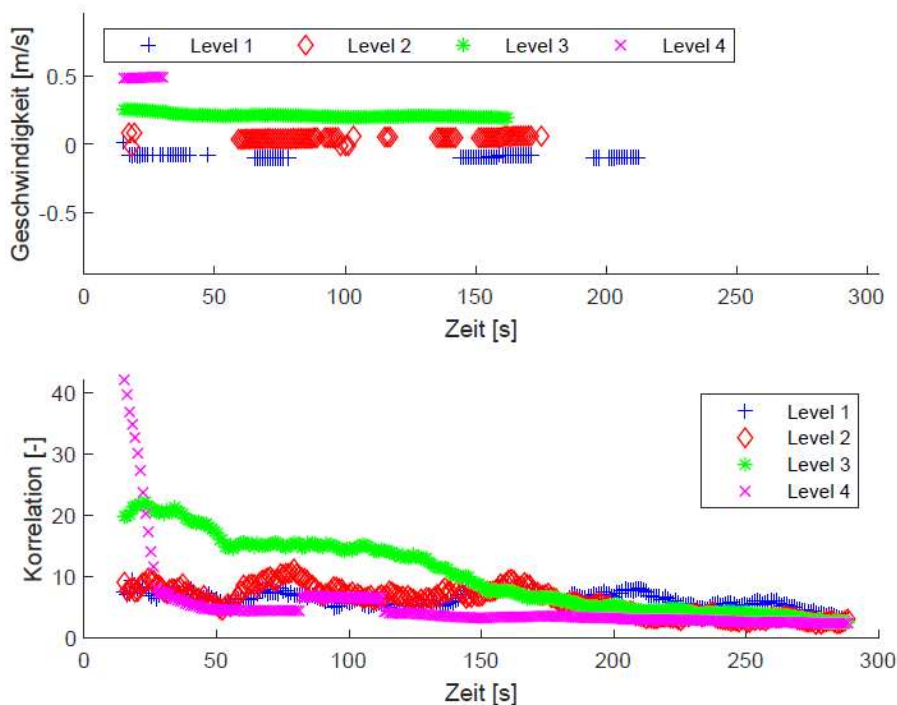
a.) Berechnete Geschwindigkeiten bei Fenstergröße von 35,42 Sekunden und einer Schrittweite von 1 Sekunde.

b.) Berechnete Korrelationen der Geschwindigkeiten mit einem Korrelationsgrenzwert von 10,22.

Abbildung 29: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 7 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 31,26 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.

Im Geschwindigkeits-/Zeitdiagramm zeigt sich die Konstanz der Messungen in Level 3 und in den ersten 100 Sekunden bei den anderen Levels mit einigen kleinen Unterbrechungen. Deutlich erkennbar ist ein zunächst starker Anstieg der Korrelation bei Level 4, gefolgt von einem Rückgang unter der des Levels 3.

Diese Beobachtung ist auch bei den Messungen bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 9 U/min ersichtlich (Abbildung 30). Die Fenstergröße von 35,42 sec entspricht 340022 Datenpunkten.



a.) Berechnete Geschwindigkeiten bei Fenstergröße von 30,45 Sekunden und einer Schrittweite von 1 Sekunde.

b.) Berechnete Korrelationen der Geschwindigkeiten mit einem Korrelationsgrenzwert von 7,07.

Abbildung 30: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 9 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 31,26 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.

Auch hier sinkt die Korrelation von Level 4 stark ab, während jene von Level 3 kontinuierlich abfällt. Je länger der Versuch dauert, desto weniger Werte werden gemessen. Die Fenstergröße von 30,45 sec entspricht 292301 Datenpunkten.

4.2. Geschwindigkeitsprofile

Aus den im vorigen Kapitel beschriebenen Geschwindigkeiten lassen sich durch die Bildung von Mittelwerten und Medianen Geschwindigkeitsprofile erstellen. Die folgenden Abbildungen zeigen die Geschwindigkeitsprofile, welche aus den Versuchen mit beiderlei Material gewonnen wurden. Diese wurden um die Trommelgeschwindigkeit bereinigt wie im Kapitel 3.3 Datenauswertung beschrieben. Außerdem sind Tabellen aufgelistet, die die Mittelwerte und deren Standardabweichungen in Zahlen darstellen.

4.2.1. Geschwindigkeitsprofile Keramik-Wasser Gemisch

In Abbildung 31 sind die Geschwindigkeitsprofile mit 3 U/min zu sehen. Bei beiden Geschwindigkeitsmitteln, Median und Mittelwert, ist das Geschwindigkeitsprofil bei Level 3 (0,056 m) leicht zurückgesetzt. Damit weisen die Profile einen leichten konvexen Knick auf.

Die negativen Geschwindigkeiten, welche in Level 2 (0,041 m) für die hohe Standardabweichung sorgen, könnten ein Hinweis auf die beobachtete innere Rotationsbewegung sein.

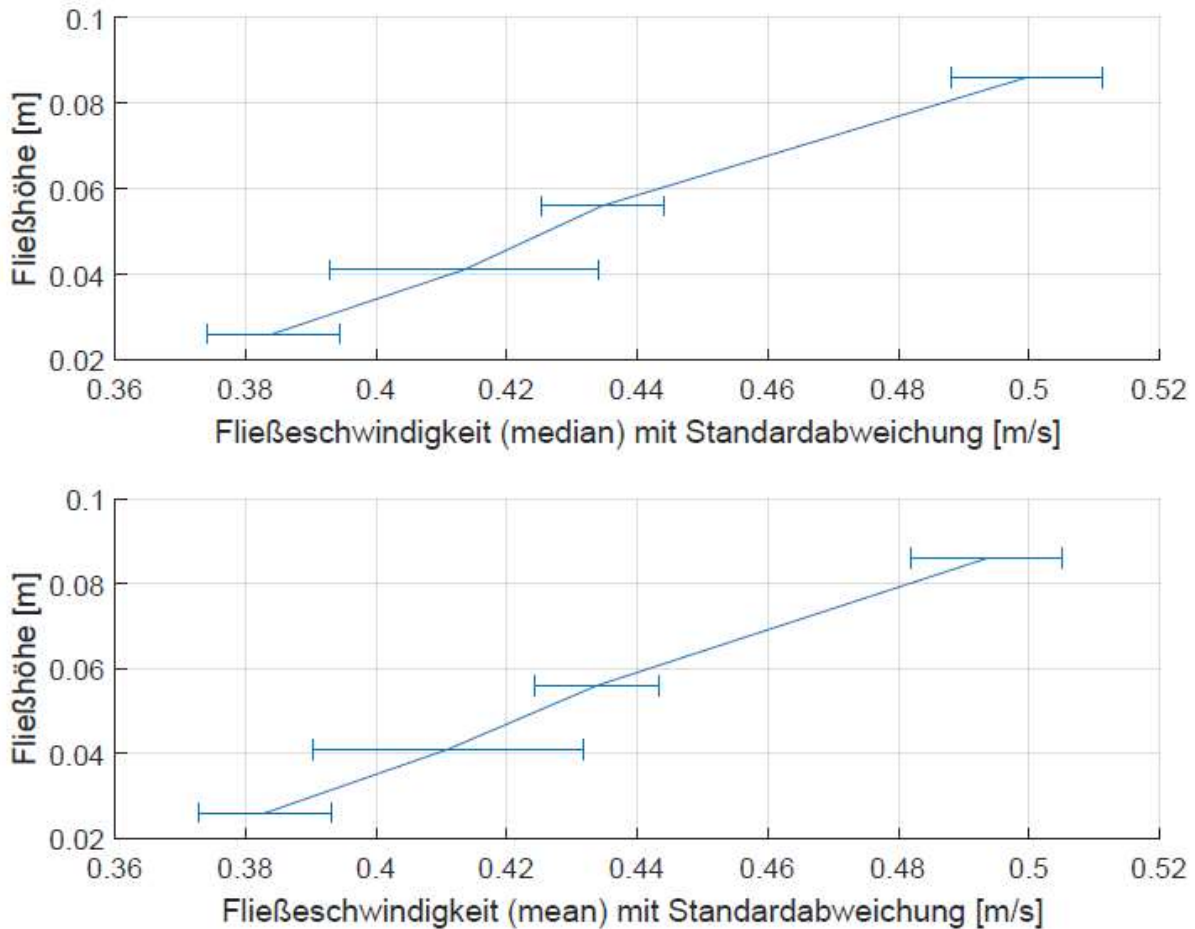


Abbildung 31: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 3 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.

Tabelle 4: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 3 U/min; max_v die maximale Geschwindigkeit, min_v die minimale Geschwindigkeit, mean_v bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und median_v den Medianwert der Geschwindigkeit. Die Spalten max_korr bezeichnen die maximale Korrelation, mean_korr die mittlere Korrelation und stdt die Standardabweichung.

3 U/min	max_v [m/s]	mean_v [m/s]	median_v [m/s]	min_v [m/s]	max_korr [-]	mean_korr [-]	stdt [-]
Level 1	0.400	0.383	0.384	0.352	8.933	6.334	0.010
Level 2	0.442	0.411	0.413	0.335	6.575	4.320	0.021
Level 3	0.465	0.434	0.435	0.384	6.636	4.514	0.009
Level 4	0.501	0.494	0.500	0.480	0.153	0.069	0.012
Mittelwert:	0.452	0.430	0.433	0.388	5.574	3.809	0.013

Das Geschwindigkeitsprofil der Versuche mit 5 U/min (Abbildung 32) weist einen leicht konkaven Knick auf, da die Geschwindigkeit des Levels 2 etwas weiter „vorne“ liegt. Zudem ist die Standardabweichung in diesem Level sehr gering.

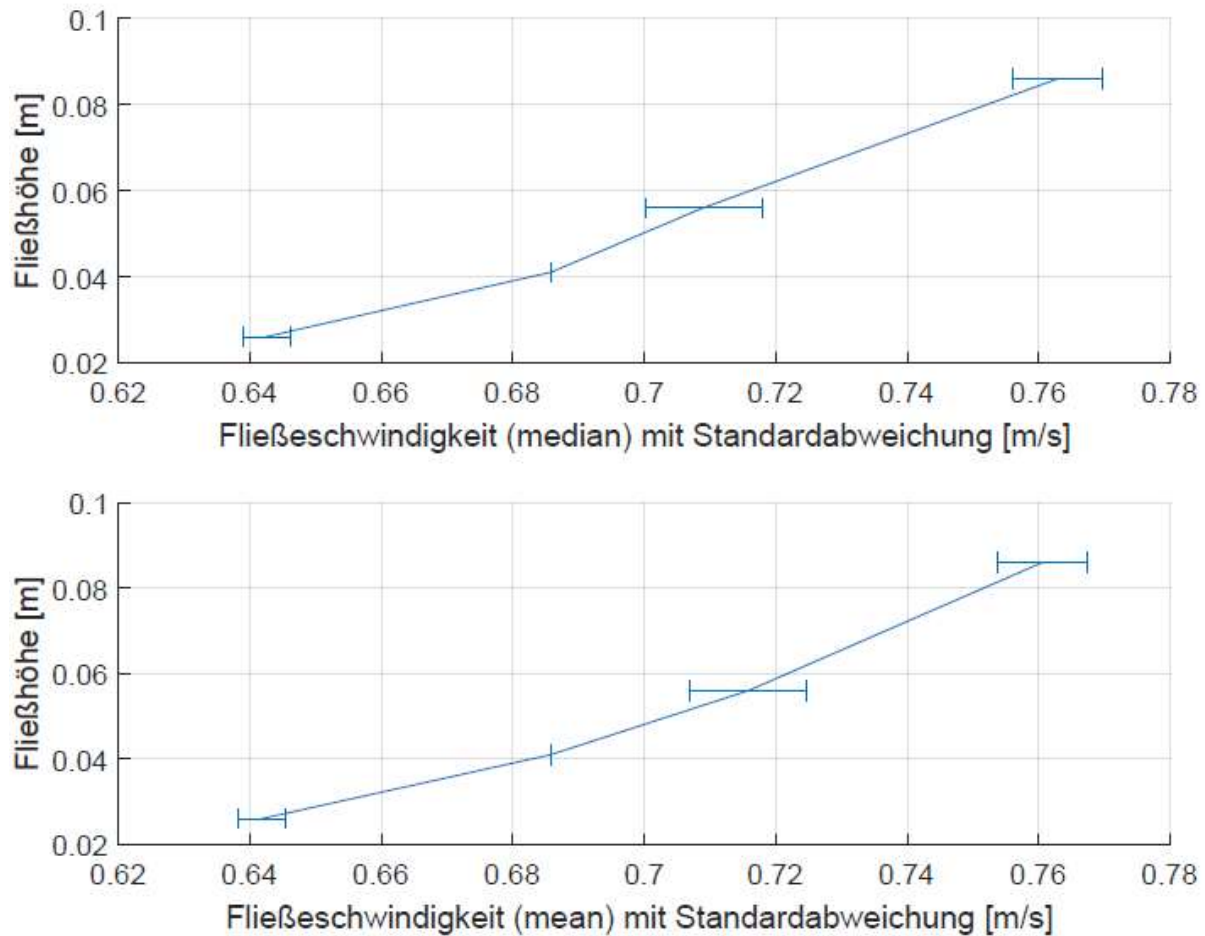


Abbildung 32: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 5 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.

Tabelle 5: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 5 U/min; max_v ist die maximale Geschwindigkeit, min_v die minimale Geschwindigkeit, mean_v bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und median_v den Medianwert der Geschwindigkeit. Die Spalten max_korr bezeichnen die maximale Korrelation, mean_korr die mittlere Korrelation und stdt die Standardabweichung.

5 U/min	max_v [m/s]	mean_v [m/s]	median_v [m/s]	min_v [m/s]	max_korr [-]	mean_korr [-]	stdt [-]
Level 1	0.648	0.642	0.642	0.627	9.475	5.592	0.004
Level 2	0.686	0.686	0.686	0.686	5.996	3.492	0.000
Level 3	0.735	0.716	0.709	0.707	11.779	4.629	0.009
Level 4	0.768	0.761	0.763	0.736	46.381	36.431	0.007
Mittelwert:	0.709	0.701	0.700	0.689	18.408	12.536	0.005

Das Geschwindigkeitsprofil bei 7 U/min (Abbildung 33) zeigt wieder einen konvexen Knick. Dieser ist stärker ausgeprägt als bei 3 U/min.

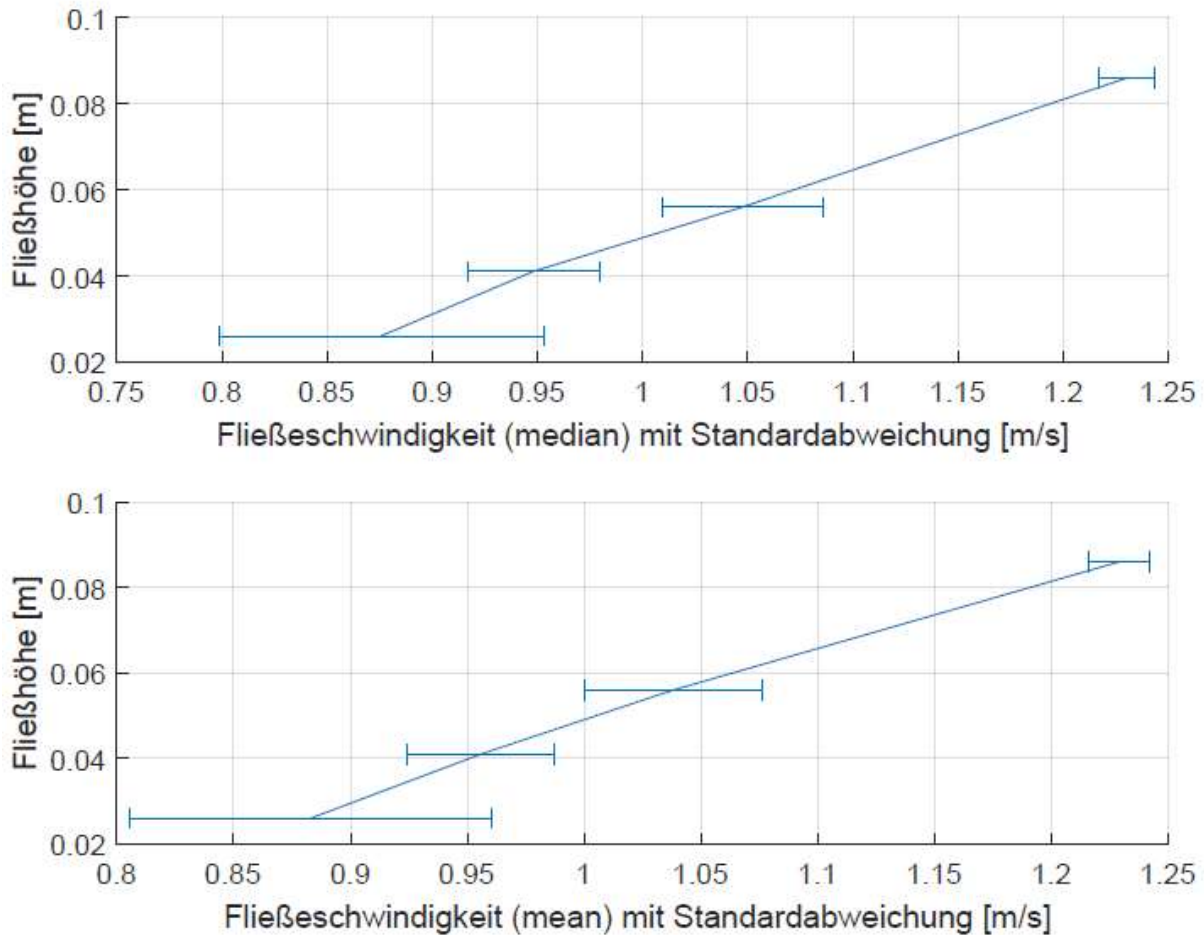


Abbildung 33: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 7 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.

Tabelle 6: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 7 U/min; max_v ist die maximale Geschwindigkeit, min_v die minimale Geschwindigkeit, mean_v bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und median_v den Medianwert der Geschwindigkeit. Spalten max_korr bezeichnen die maximale Korrelation, mean_korr die mittlere Korrelation und stdt die Standardabweichung.

7 U/min	max_v [m/s]	mean_v [m/s]	median_v [m/s]	min_v [m/s]	max_korr [-]	mean_korr [-]	stdt [-]
Level 1	1.032	0.883	0.876	0.798	13.947	1.024	0.077
Level 2	0.998	0.956	0.948	0.887	22.152	2.060	0.031
Level 3	1.092	1.038	1.048	1.000	47.912	3.005	0.038
Level 4	1.241	1.229	1.230	1.158	9.327	2.121	0.013
Mittelwert:	1.091	1.026	1.025	0.961	23.334	2.052	0.040

Bei den Versuchen mit 9 U/min (Abbildung 34) ist die Verformung des Geschwindigkeitsprofils am deutlichsten sichtbar.

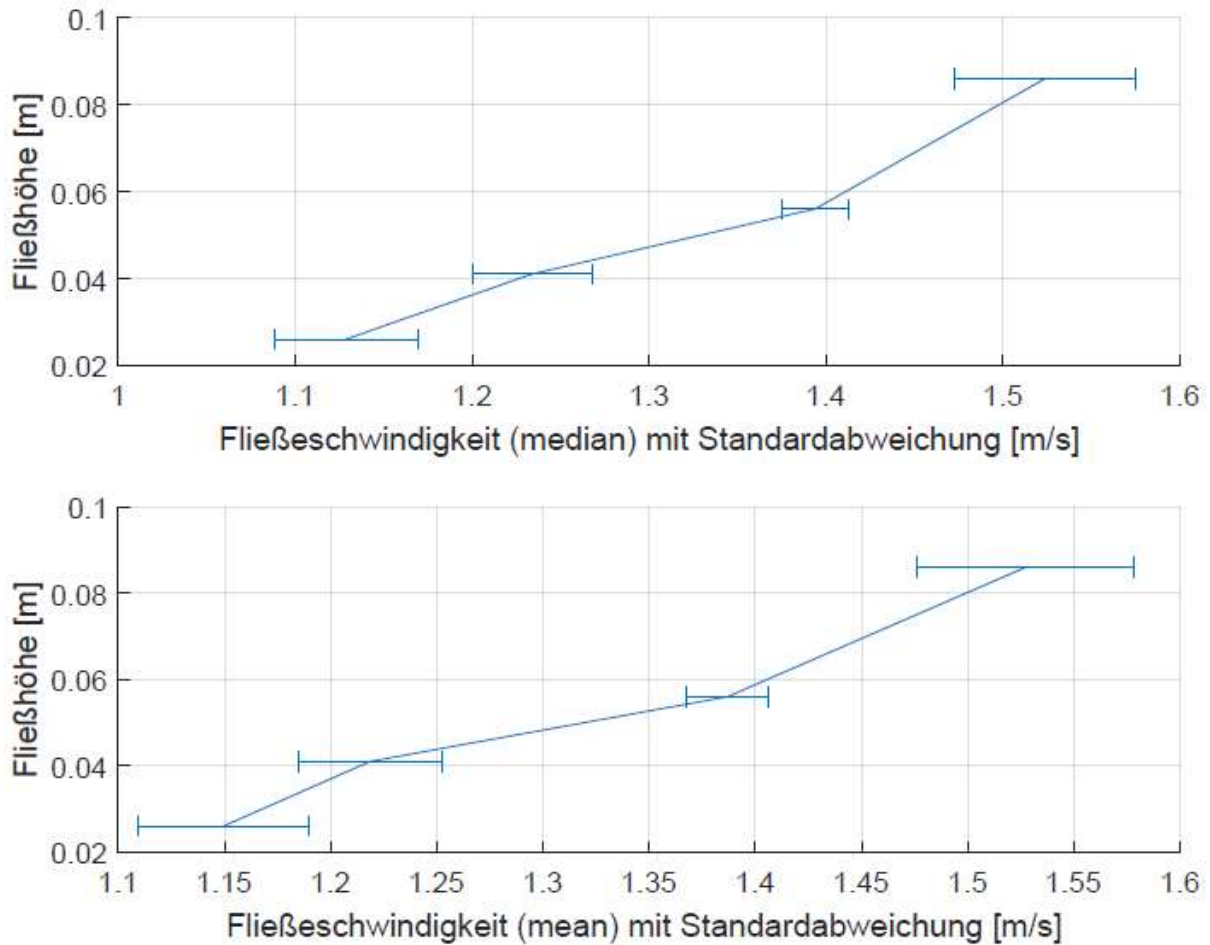


Abbildung 34: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 9 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.

Tabelle 7: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 9 U/min; max_v ist die maximale Geschwindigkeit, min_v die minimale Geschwindigkeit, mean_v bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und median_v den Medianwert der Geschwindigkeit. Die Spalten max_korr bezeichnen die maximale Korrelation, mean_korr die mittlere Korrelation und stdt die Standardabweichung.

9 U/min	max_v [m/s]	mean_v [m/s]	median_v [m/s]	min_v [m/s]	max_korr [-]	mean_korr [-]	stdt [-]
Level 1	1.205	1.150	1.129	1.110	87.984	2.627	0.040
Level 2	1.254	1.219	1.234	1.023	38.530	3.581	0.034
Level 3	1.411	1.387	1.394	1.355	44.707	3.139	0.019
Level 4	1.632	1.527	1.524	1.452	68.148	5.534	0.051
Mittelwert:	1.375	1.321	1.320	1.235	59.842	3.720	0.036

4.2.2. Geschwindigkeitsprofile Wasser-Kies-Gemisch

Das Geschwindigkeitsprofil bei 3 U/min (Abbildung 35) mit dem Material Kies zeigt wiederum einen konvexen Knick der Kurve bei Level 2 (0.041 m).

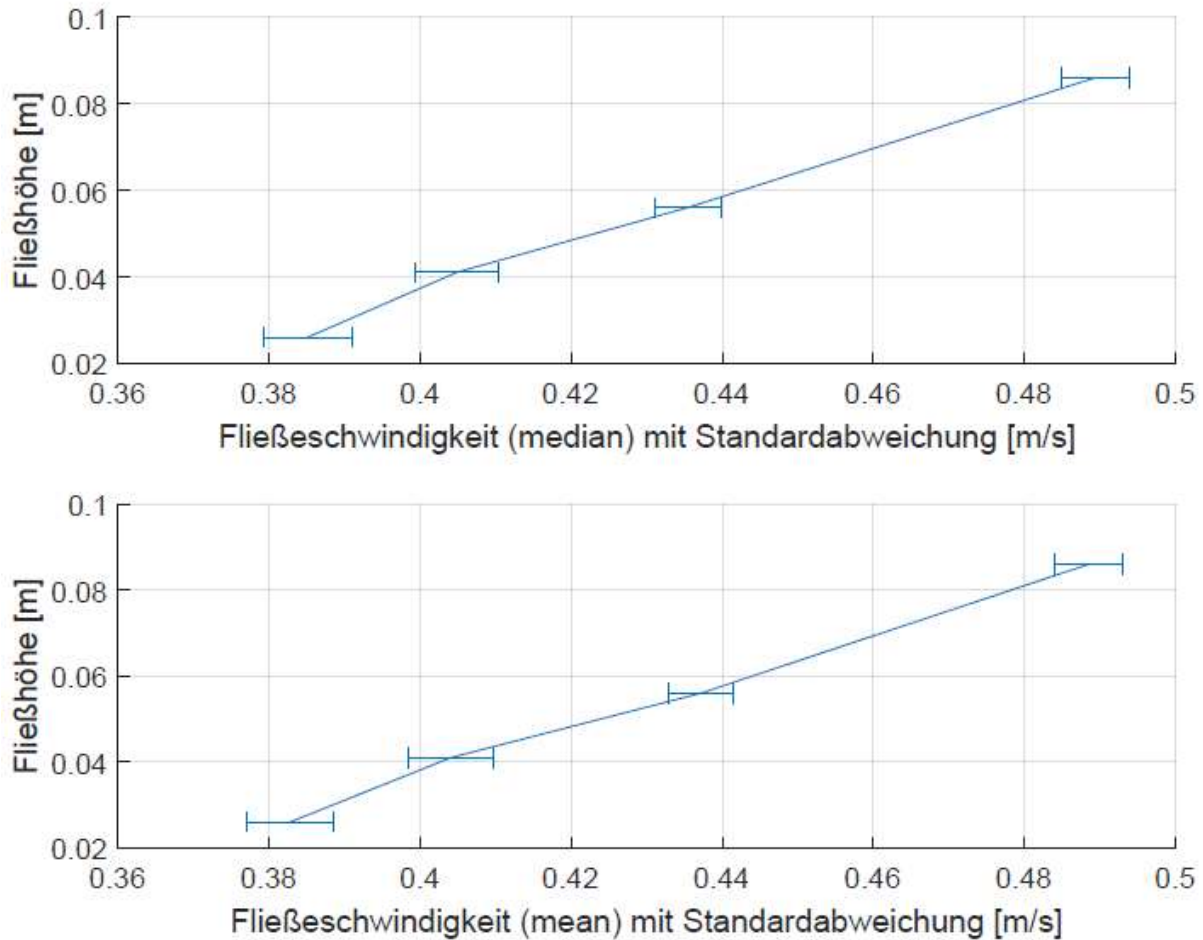


Abbildung 35: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 3 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.

Tabelle 8: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 7 U/min; max_v ist die maximale Geschwindigkeit, min_v die minimale Geschwindigkeit, mean_v bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und median_v den Medianwert der Geschwindigkeit. Die Spalten max_korr bezeichnen die maximale Korrelation, mean_korr die mittlere Korrelation und stdt die Standardabweichung.

3 U/min	max_v [m/s]	mean_v [m/s]	median_v [m/s]	min_v [m/s]	max_korr [-]	mean_korr [-]	stdt [-]
Level 1	0.395	0.383	0.385	0.358	46.273	23.405	0.006
Level 2	0.411	0.404	0.405	0.374	36.707	18.579	0.006
Level 3	0.442	0.437	0.435	0.425	40.213	25.328	0.004
Level 4	0.495	0.488	0.489	0.473	0.757	0.461	0.005
Mittelwert:	0.436	0.428	0.429	0.407	30.987	16.943	0.005

Bei den Geschwindigkeitsprofilen mit 5 U/min (Abbildung 36) ist darauf hinzuweisen, dass die Standardabweichung in Level 1 sehr groß ist. Daher ist eine Beschreibung der Ausbuchtung des Profils im Level 2 schwierig da diese sowohl konvex wie auch konkav sein könnte.

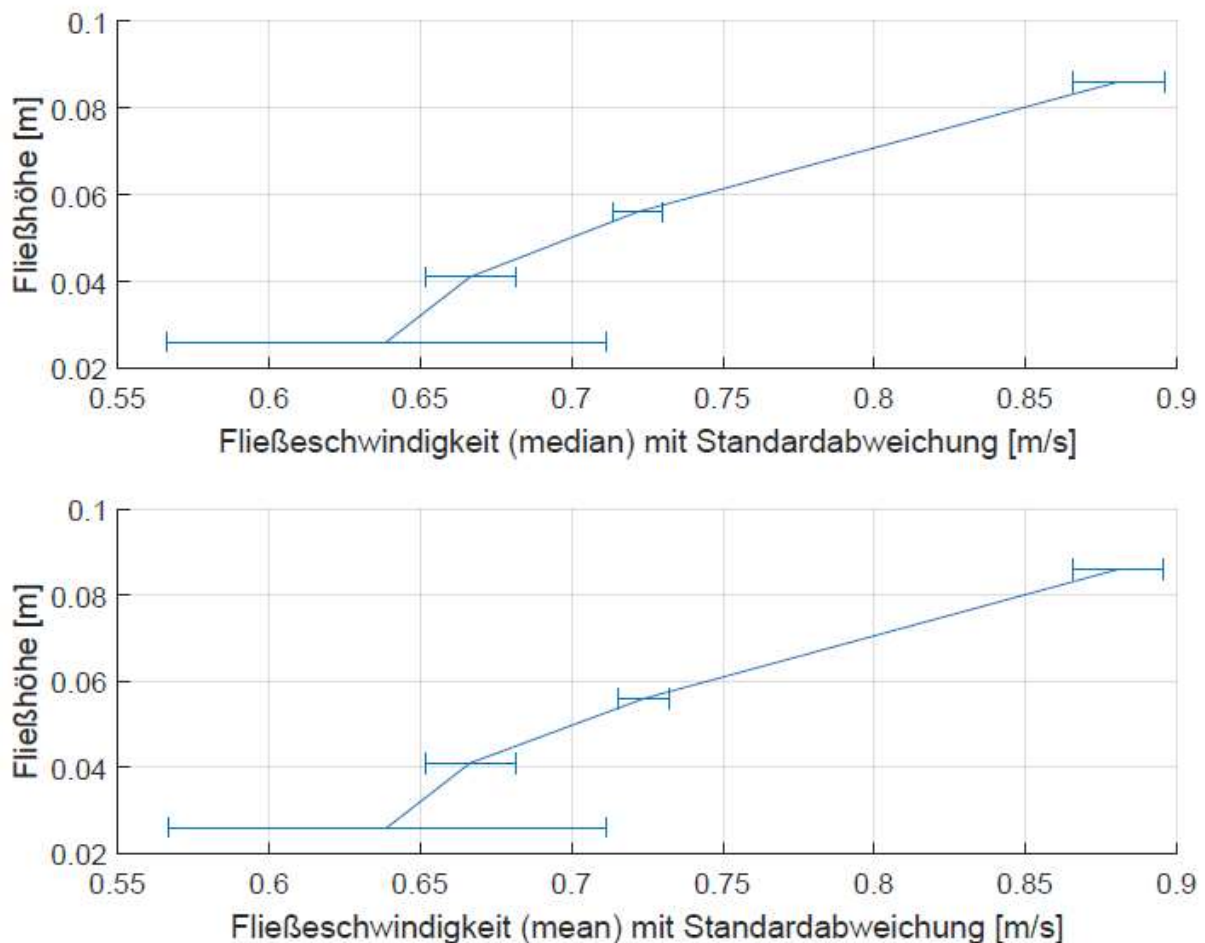


Abbildung 36: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 5 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.

Tabelle 9: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 7 U/min; max_v ist die maximale Geschwindigkeit, min_v die minimale Geschwindigkeit, mean_v bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und median_v den Medianwert der Geschwindigkeit. Die

Spalten max_korr bezeichnen die maximale Korrelation, mean_korr die mittlere Korrelation und stdt die Standardabweichung.

5 U/min	max_v [m/s]	mean_v [m/s]	median_v [m/s]	min_v [m/s]	max_korr [-]	mean_korr [-]	stdt [-]
Level 1	0.776	0.639	0.639	0.492	18.683	8.025	0.073
Level 2	0.699	0.666	0.666	0.638	24.982	13.166	0.015
Level 3	0.742	0.724	0.722	0.708	23.432	19.727	0.008
Level 4	0.909	0.881	0.881	0.850	98.899	79.779	0.015
Mittelwert:	0.782	0.727	0.727	0.672	41.499	30.174	0.028

Die Kurve der Geschwindigkeitsprofile bei 7 U/min (Abbildung 37) weist eine leichte konkave Krümmung bei Level drei (0.056 m) auf.

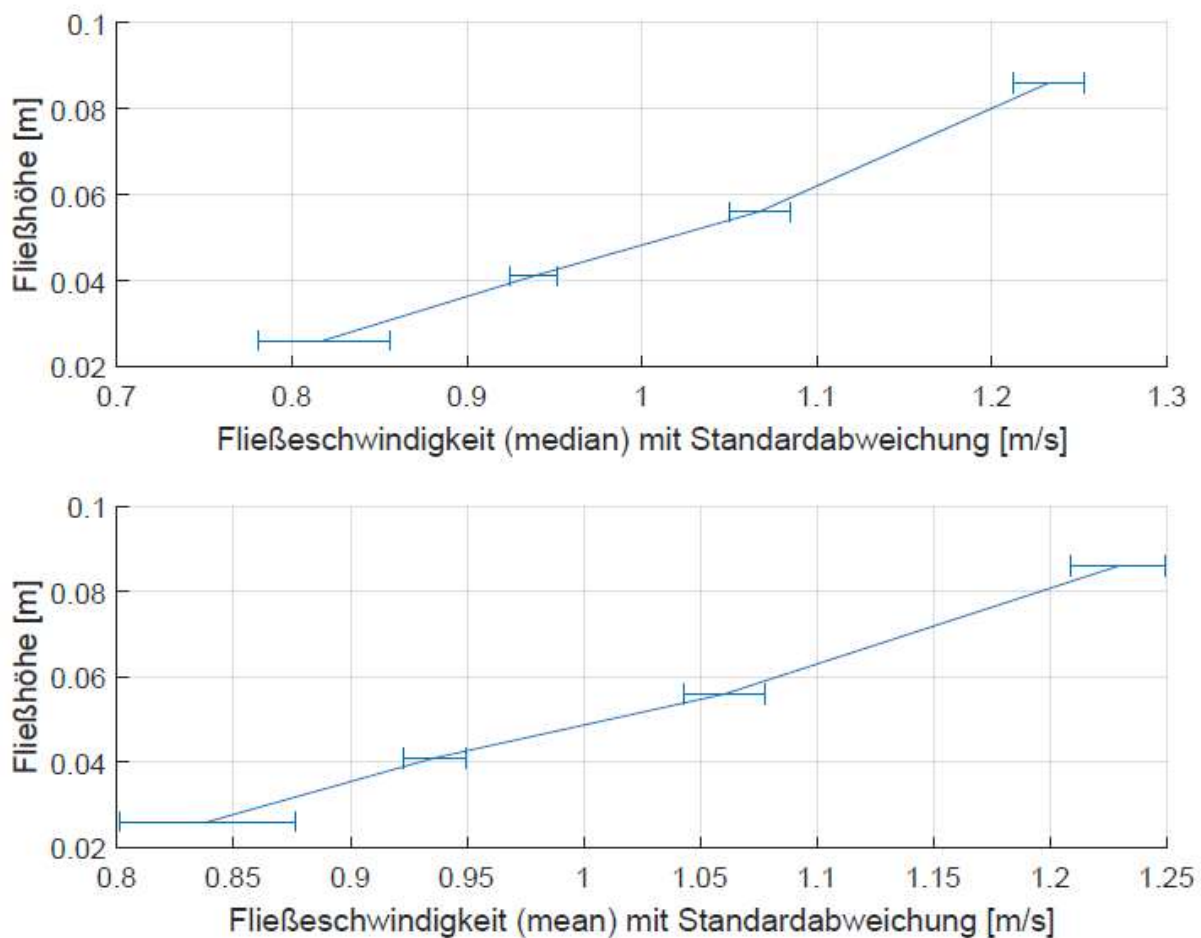


Abbildung 37: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 7 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.

Tabelle 10: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 7 U/min; max_v ist die maximale Geschwindigkeit, min_v die minimale Geschwindigkeit, mean_v bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und median_v den Medianwert der Geschwindigkeit. Die

Spalten max_korr bezeichnen die maximale Korrelation, mean_korr die mittlere Korrelation und stdt die Standardabweichung.

7 U/min	max_v [m/s]	mean_v [m/s]	median_v [m/s]	min_v [m/s]	max_korr [-]	mean_korr [-]	stdt [-]
Level 1	0.997	0.839	0.818	0.790	15.864	10.237	0.037
Level 2	0.977	0.936	0.938	0.891	20.141	12.580	0.013
Level 3	1.086	1.061	1.067	1.032	39.080	29.360	0.017
Level 4	1.255	1.229	1.233	1.170	148.626	39.024	0.020
Mittelwert:	1.079	1.016	1.014	0.971	55.928	22.800	0.022

Das Geschwindigkeitsprofil bei 9 U/min (Abbildung 38) zeigt einen nahezu linearen Verlauf. Allerdings ist auch hier ein leicht konvexer Knick bei Level 2 (0.041m) erkennbar.

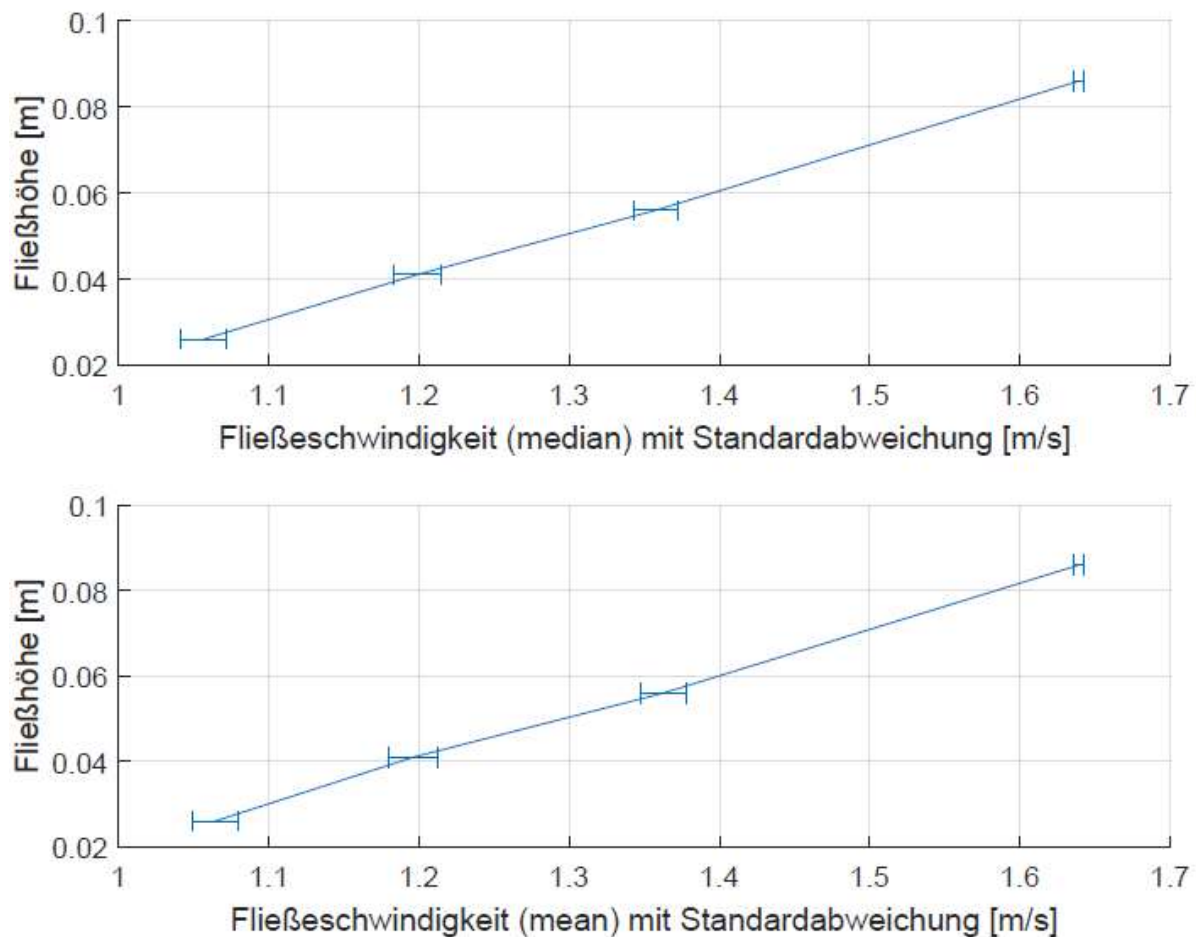


Abbildung 38: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 9 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.

Tabelle 11: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 7 U/min; max_v ist die maximale Geschwindigkeit, min_v die minimale Geschwindigkeit, mean_v bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und median_v den Medianwert der Geschwindigkeit. Die

Spalten max_korr bezeichnen die maximale Korrelation, mean_korr die mittlere Korrelation und stdt die Standardabweichung.

9 U/min	max_v [m/s]	mean_v [m/s]	median_v [m/s]	min_v [m/s]	max_korr [-]	mean_korr [-]	stdt [-]
Level 1	1.167	1.064	1.057	1.051	9.315	6.272	0.015
Level 2	1.235	1.196	1.199	1.134	11.208	5.997	0.016
Level 3	1.408	1.363	1.358	1.345	22.199	10.015	0.015
Level 4	1.644	1.639	1.639	1.635	42.032	4.931	0.003
Mittelwert:	1.363	1.316	1.313	1.291	21.189	6.804	0.012

5. Diskussion

5.1. Plausibilität der Ergebnisse

Nach erfolgreicher Einstellung der Parameter für die Datenauswertung, konnten auf nahezu allen Leveln durchgehende Messreihen aufgezeichnet werden. Diese Messreihen zeigten in den meisten Fällen konstante Geschwindigkeiten an. Messwerte in den negativen Bereichen können als Anzeichen für eine innere Verformung der granularen Masse gesehen werden (bspw. Abbildung 25). Die Form der Geschwindigkeitsprofile liefern einen weiteren Hinweis, dass das Messsystem (Messfinne) funktioniert. Die Messergebnisse zeigen deutlich höhere Geschwindigkeiten in den höheren Leveln im Vergleich zum bodennahen Level 1.

Der Wechsel zwischen den konkaven und konvexen Formänderungen der Geschwindigkeitsprofile lässt darauf schließen, dass es zu einer unterschiedlichen Durchmischung des jeweiligen Materials kommt. Hier ist eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit anzunehmen.

Die in der Arbeit von Kaitna et al. (2014) gemessenen Geschwindigkeiten in einer Trommel mit einem Radius von 4 m (University of California at Berkeley) wurden bei Trommelgeschwindigkeiten zwischen 0.62 und 1.68 m/s aufgenommen und sind mit den hier gewonnenen Geschwindigkeiten vergleichbar. Im Rahmen dieser Versuche wurde unter anderem eine Mischung aus Kies mit einem Korndurchmesser von 4 mm und Wasser bei Trommelgeschwindigkeiten von 0.62, 0.83, 1.25 und 1.68 m/s verwendet. Wenn man die Versuche nach Geschwindigkeit aufsteigend ordnet (Versuchsnummer) ist ersichtlich, dass die ersten 3 Trommelgeschwindigkeiten von Kaitna et al. annähernd den Trommelgeschwindigkeiten der letzten 3 Versuche von Mader entsprechen, wie in Tabelle 12 ersichtlich.

Tabelle 12: Trommelgeschwindigkeiten der vorliegenden Studie und die Geschwindigkeiten der Studie Kaitna et al. (2014).

Trommelgeschwindigkeiten:	Mader 2020	Kaitna 2014
Versuchsnummer	in m/s	in m/s
1	0.39	0.62
2	0.64	0.83
3	0.89	1.25
4	1.2	1.68

Die Trommelgeschwindigkeit betrug bei diesen Versuchen in Berkeley zwischen 0.62 und 1.68 m/s und bei den Versuchen in Wien zwischen 0.39 und 1.2 m/s. Die Mischung bestand, wie in der vorliegenden Studie aus Kies mit einem Durchmesser von 4 mm und Wasser.

Trotz der unterschiedlichen Skalen, unterschiedlicher basaler Rauigkeiten und Wassergehalte sind die Ergebnisse ähnlich und unterstützen die Annahme, dass der hier untersuchte Prototyp zur Messung von Fließprofilen plausible Ergebnisse liefert.

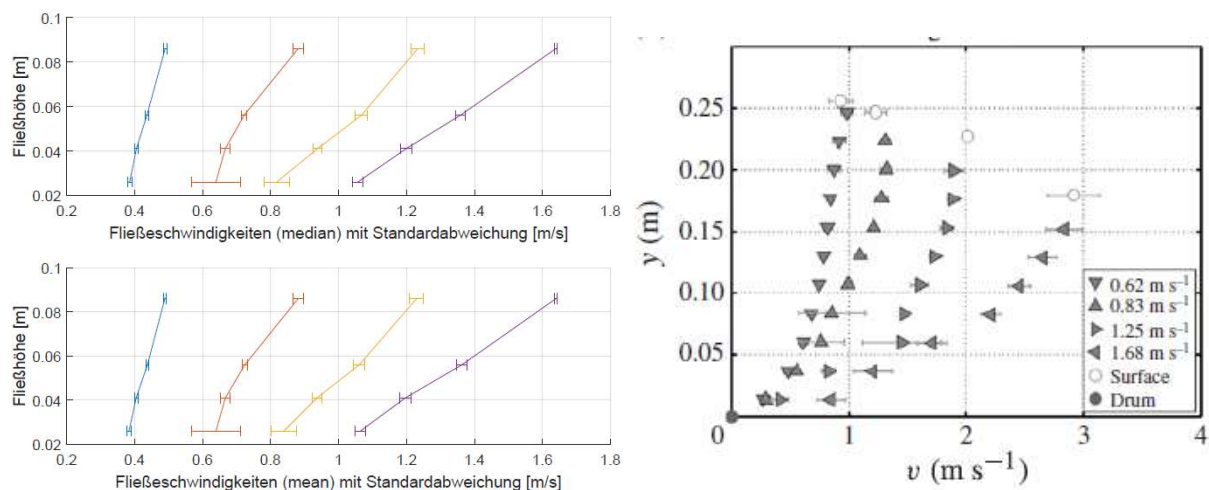


Abbildung 39: : Links: Geschwindigkeitsprofile der Kies-Wasser-Mischung mit 0.39 (blau), 0.65 (rot), 0.89 (gelb) und bei 1.2 (violett) m/s sichtbar, aufgenommen von Mader. Rechts: Profile von publiziert in Kaitna et al. (2014) mit den Geschwindigkeiten mit 0.62 (liegendes Dreieck), 0.83 (stehendes Dreieck), 1.25 (rechtsweisendes Dreieck) und 1.68 (linksweisendes Dreieck) m/s. (Kaitna et al., 2014)

5.2. Vorteil der Messfinne

Um die dynamischen Prozesse innerhalb eines Massenverlagerungsprozesses zu beschreiben, ist es wichtig, die Geschwindigkeit der Feststoffanteile zu kennen. Kaitna et al. (2014) ist es gelungen mit einem einzelnen Sensor Geschwindigkeiten in verschiedenen Höhen zu messen und so Daten für die Erstellung eines Geschwindigkeitsprofils zu gewinnen. Die Messfinne erlaubt es, Geschwindigkeiten in unterschiedlichen Höhen simultan zu messen. Dies ist wichtig, da die bereits erwähnten Prozesse zu Änderungen der Schichtung im Untersuchungsmaterial führt – Stichwort:

innere Verformung. Im Vergleich dazu liefern Untersuchungen wie jene von SanVitale und Bowman (2016) Geschwindigkeitsmessungen mit Hilfe von optischen Messverfahren („particle image velocimetry“ oder „particle tracking velocimetry“), die von der Oberfläche bzw. von den Randbereichen der Massenverlagerung aufgenommen wurden. Für die Erstellung eines allgemeinen Geschwindigkeitsprofils müssen daher Annahmen über die Geschwindigkeitsverteilung im Inneren der Masse herangezogen werden. (SanVitale et al. 2016). Der Vorteil ist aber, dass instantane Geschwindigkeitsvektoren abgeleitet werden können, während bei der vorliegenden Methode nur die mittlere Geschwindigkeit für ein Zeitfenster (Korrelationsfenster) berechnet werden kann. Der hier getestete Profiler eignet sich daher nicht für die Messung der granularen Temperatur der einzelnen Partikel.

Im Labor ist eine Variation der Messfinnenposition durch den Drehtisch bei dieser Versuchsanordnung vorteilhaft. Hierdurch wird die Gewinnung von Messdaten zur Erstellung von Geschwindigkeitsprofilen nicht nur in der Mitte des Gerinnes, sondern auch an den Rändern sowie an der Front und am Hinterteil der bewegten Masse ermöglicht.

5.3. Kritik

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Funktionsweise einer Messfinne für die simultane Geschwindigkeitsmessung in unterschiedlichen Höhen überprüft. Dabei ergaben sich sehr gute Messreihen bei Keramik und Kies mit 3 Umdrehungen pro Minute und zusätzlich bei Kies mit 5 und 7 Umdrehungen pro Minute. Aus diesen Messreihen ließen sich außerdem noch Geschwindigkeitsprofile ermitteln, die erste Hinweise auf das Fließverhalten und das Phänomen der inneren Verformung innerhalb einer Mure geben können.

Auch wenn die Funktionalität des Messgeräts damit bewiesen ist, offenbarten sich auch einige Verbesserungsmöglichkeiten bei der Trommel, in der die Versuche durchgeführt wurden, als auch am Messgerät selbst.

Es wurden 2 Versuchsreihen durchgeführt, wobei die Ergebnisse der ersten Reihe nicht zufriedenstellende Werte lieferten. Dies ist auf eine fehlerhafte Funktionsweise der Sensoren, insbesondere der des Level 1, zurückzuführen. Erst durch ein „Aufrauen“ mit Hilfe eines Schleifgerätes wurden die Messergebnisse besser (Abbildung 11). Allerdings sind auch hier immer wieder Unterbrechungen in den einzelnen Leveln sichtbar (Abbildung 26). Diese können durch die lange Versuchsdauer verursacht worden sein. Eine Möglichkeit, um zukünftige Unterbrechungen zu vermeiden besteht beispielsweise in die Verwendung anderer Materialien bzw. einer anderen Mischung. Eine Verbesserung der Versuche mit Keramik – Wasser – Mischung brachte die Zugabe von Kaolin (0,15 kg). Um ein Geschwindigkeitsprofil zu erhalten, welches Messwerte in mehr als 4 Höhen liefert, wäre eine Messfinne mit einem geringeren Levelabstand zu konstruieren. Daraus würde eine höhere Anzahl an Leveln resultieren. Dies würde wiederum zu mehr Messwerten führen, die für die Ermittlung weiterer Geschwindigkeitsprofile herangezogen werden können.

Außerdem kann die Messfinne Geschwindigkeiten nur in horizontaler Richtung messen. Die Anordnung der Elektrodenpaare könnte für einen Einsatz in einer Trommel angepasst werden oder eine Serie von Sensorenpaaren in horizontaler Richtung eingebaut wird. Bei der Datenauswertung ist anzumerken, dass die optimale Fenstergröße (*window*) mit 1/10 der Versuchsdauer einen hohen Wert annimmt. Die Minimierung der Fenstergröße könnte mit einer höheren Messfrequenz (*Fs*) erreicht werden. Anzunehmen ist, dass damit auch die Schrittgröße (*step*) verändert und die Versuchsdauer verkürzt werden kann. Mit einer kleineren Fenstergröße könnte sich auch die Korrelation der Messungen verbessern.

6. Conclusio

Das Ziel dieser Arbeit war es, herauszufinden, ob eine neue Methode zur Geschwindigkeitsmessung Werte liefert, die einen Hinweis darauf geben, wie die Prozesse, die innerhalb einer gesättigten granularen Suspension stattfinden, ablaufen.

Zu diesem Zweck wurde in einer Trommel eine Mischung aus Keramik, Kaolin und Wasser sowie eine Mischung aus Kies und Wasser in Bewegung gebracht und dadurch ein stabiler Murgang erzeugt. In dieser Mischung wurde eine Messfinne mit 5 Paaren von Leitfähigkeitssensoren, welche über eine Höhe von 11.6 cm Änderungen der Leitfähigkeit messen, platziert.

Diese Messmethode lieferte gute Ergebnisse mit dem Keramik-Kaolin-Wasser-Gemisch bei einer Trommelgeschwindigkeit von 3 Umdrehungen pro Minute und mit dem Kies-Wasser-Gemisch bei einer Trommelgeschwindigkeit von 3, 5 und 7 U/min.

Somit lassen sich die Fragestellungen wie folgt beantworten:

- Funktioniert das Messgerät (=Messfinne), um Geschwindigkeiten in unterschiedlichen Höhen innerhalb der Mure zu messen?

Die Messfinne kann die Veränderung der Leitfähigkeit im Medium messen und mithilfe der Kreuzkorrelation können zudem plausible Geschwindigkeiten bestimmt werden.

- Für welches Material ist diese Methode am besten geeignet?

Mit Kies sind eindeutig die besseren Werte erreicht worden als mit den Keramik-Wasser-Gemisch.

- Welche Trommelgeschwindigkeit ist am besten geeignet für Messungen?

Die besten Ergebnisse wurden bei einer Trommelgeschwindigkeit von 3, 5 und 7 Umdrehungen pro Minute erzielt.

- Welche Fenstergrößen, Schritte und Korrelationsgrenzen sind für ein gutes Ergebnis geeignet?

Die kleinste mögliche Fenstergröße (*window*) ist ein Zehntel der gesamten Versuchsdauer. Als Schrittgröße (*step*) wurde 1 sec gewählt. Als optimale Korrelationsgrenze (*acor_lim*) wurde der kleinste Mittelwert verwendet. Beispielsweise bedeutet das für den Versuch mit dem Material Kies und einer Trommelgeschwindigkeit von 5 U/min, dass die Fenstergröße (*window*) 31,26 sec (entspricht 300130 Datenpunkten), die Schrittgröße (*step*) 1 sec (entspricht 9600 Datenpunkten) und der Korrelationsgrenzwert (*acor_lim*) von 8,02.



Abbildung 40: Trommel mit Autor 2020

Die Entwicklung dieser Messmethode wurde mit dieser Arbeit vorangetrieben und durch weitere Schritte können die Forschungen im Bereich „Murgangprozess“ neue spannende Erkenntnisse und Daten liefern. Deshalb sind zusätzliche Arbeiten und Bereitstellung von Ressourcen in diese Richtung nicht nur empfehlenswert, sondern unbedingt notwendig.

Quellenverzeichnis

Ancey, C. 2007. Plasticity and geophysical flows: a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 142(1), 4–35. doi:10.1016/j.jnnfm.2006.05.005, Wissenschaftlicher Artikel

Beucher, O. 2019. *Signale und Systeme: Theorie, Simulation, Anwendung*, doi: 10.1007/978-3-662-58044-8 © Springer Verlag, Fachbuch

Condrau, C., Kaitna, R., Scheidl, C., 2019. Numerischer Simulationsvergleich zwischen RAMMS-DF und DAN3D anhand eines Multi-Source-Murgangs im Bergell unter Berücksichtigung der Erosion, Masterarbeit am Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien, Departament für Bautechnik und Naturgefahren

Heil, K., 2017. Flow Behaviour of Snow in a Rotating Drum, Masterarbeit am Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien, Department für Bautechnik und Naturgefahren

Iverson, R.M., 1997. The Physics of Debris Flows, *Reviews of Geophysics*, 35, 3 / August 1997; doi:10.1029/97RG00426, Wissenschaftlicher Artikel

Iverson, R. M., 2015. Scaling and design of landslide and debris-flow experiments, Elsevier B.V.; doi:10.1016/j.geomorph.2015.02.033, Wissenschaftlicher Artikel

Iverson, R. M., & Denlinger, R. P. 2001. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B1), 537-552, Wissenschaftlicher Artikel

Iverson, R. M., Logan, M., LaHusen R. G., Berti, M., 2010. The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. *Journal of Geophysical Research*; doi:10.1029/2009JF001514, Wissenschaftlicher Artikel

Kaitna, R., Rickenmann, D., Schatzmann, M., 2007. Experimental study on rheologic behaviour of debris flow material, Research Paper Springer Verlag; doi: 10.1007/s11440-007-0026-z, Wissenschaftlicher Artikel

Kaitna, R., Dietrich, W. E., Hsu, L., 2014. Surface slopes, velocity profiles and fluid pressure, *Journal of Fluid Mechanics*, doi:10.1017/jfm.2013.675. © Cambridge University Press, Wissenschaftlicher Artikel

Kaitna, R., Palucis, M. C., Hill K. M., Dietirch, W. E., 2016. Effects of coarse grain size distribution and fine particle content on pore fluid pressure and shear behavior in experimental debris flows; *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*; Res. Earth Surf., 121, doi:10.1002/2015JF003725, Wissenschaftlicher Artikel

Kwapinska M., Saage G., Tsotsas E., 2005. Mixing of particles in rotary drums: A comparison of discrete element simulations with experimental results and penetration models for thermal processes, Elsevier B.V.; doi: 10.1016/j.powtec.2005.08.038, Wissenschaftlicher Artikel

Meinke, H. H., Gundlach, F. W.; Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Band 1, Grundlagen 5. Auflage, 1992. ISBN 978-3-642-58104-5 (eBook), hrsg. von Kai Lange und Karl-Heinz Löcherer © Springer Verlag, Fachbuch

Nagl, G., Hübl, J., Kaitna, R., 2020. Velocity profiles and basal stresses in natural debris flows, Article in Earth Surface Processes and Landforms, doi:10.1002/esp.4844, Wissenschaftlicher Artikel

ONR 24800, 2009. Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung, Richtlinie

Pierson T.C, 1986. Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. In: Abrahams AD (ed.). Hillslope Processes. Allen and Unwin, Boston, USA, p. 269-296, Wissenschaftlicher Artikel

Rickenmann D, 2014. Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen. WSL, 9, 105, ISSN 2296-3456, Wissenschaftlicher Artikel

Saint-Gobain NorPro 2017. Datasheet- sgnorpro-denstone-2000-support-media, <https://www.norpro.saint-gobain.com/sites/imdf.norpro.com/files/sgnorpro-denstone-2000-support-media.pdf> abgerufen am 17.05.2020 um 12:30

SanVitale, N., Bowman, E. T., 2016. Visualization of dominant stress-transfer mechanisms in experimental debris flows of different particle-size distribution, Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, Can. Geotech. doi:10.1139/cgj-2015-0532, Wissenschaftlicher Artikel

Stiny, J., 1910. Die Muren – Versuch einer Monographie mit besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in den Tiroler Alpen, Verlag der Wagner'schen Universitätsbuchhandlung in Innsbruck, Fachbuch

Weber, D., 2004. Untersuchungen zum Fließ- und Erosionsverhalten granularer Murgänge, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. 336 S., Dissertation an der ETH Zürich

Sizemore, J., Mueller, J. P., Kunze, K.-K., 200 MatLab für Dummies, 1. Auflage 2016. ISBN 978-3-527-71167-3 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Fachbuch

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Seitliche Betrachtung einer Mure mit der Unterteilung in Murkopf, Murkörper und Murschwanz (nach Piersson, 1986, zitiert in Rickenmann, 2014, modifiziert von Condrau, 2019)	4
Abbildung 2: „Murendreieck“, Drei-Phasen-Diagramm, welches die verschiedenen hohen Anteile an Fein-, Grobmaterial und Wasser und die dazu gehörenden Massenverlagerungsprozesse zeigt, laut ONR 24800, (2009, modifiziert nach Zimmermann, 1990)	5
Abbildung 3: Abstrahierte Darstellung möglicher Geschwindigkeitsprofile. (a) Gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil mit Gleiten über die gesamte Fließhöhe. (b) Strömungsprofil über starres Bett ohne Bewegung an der Basis, aber mit interner Verformung. (c) Kombination von Gleiten und innerer Verformung (a+b). (d) Bewegung über ein erodierbares Bett. (Nagl et al., 2020)	7
Abbildung 4: Die Geschwindigkeitsverteilung in einer granularen Welle, die in einer Trommel erzeugt wurde. Die Nummern unterteilen die Suspension in Murfront (1), Murkörper (2) und in Murschwanz (3). Die schwarzen Punkte zeigen die Stellen, an denen mit dem Sensor gemessen wurde. Die Bewegungsrichtung der Teilchen wird durch die schwarzen Pfeile veranschaulicht. (Kaitna et al., 2014)	8
Abbildung 5: Links Oberfläche des Geschwindigkeitssensors, rechts die Versuchsanlage (Trommel) mit dem Geschwindigkeitssensor (a), dem Porenwasserdrucksensor (b), der Wägezelle (c), dem 2D- Laserscanner (d) und der digitalen Videokamera (e) (Kaitna et al., 2014)	9
Abbildung 6: Geschwindigkeitsvektoren in einer Partikelmasse, simuliert mit der Discret-Element-Method. Im vergrößerten Abschnitt werden nur bestimmte Vektoren dargestellt. (Kwapinska et al. 2005).	10
Abbildung 7: (a) Versuchsanordnung von Georg Nagl am Gadriabach, Italien im Gerinne und (b) mit der Position der Normalspannungs- und Porenwasserdrucksensoren (blau) und der Geschwindigkeitssensoren (grün) (Nagl et al., 2020)	10
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Trommel, wobei (a) die Lasersensoren zur Höhenmessung, (b) die Normalspannungs- und Schubspannungssensoren, (c) einen Temperatursensor in der bewegten Masse, (d) einen Temperatursensor für die Umgebungsmessung, (e) eine Kamera, (f) eine granulare Suspension (g) eine Rauigkeit mit einer Dicke von 2 mm, (h) einen Besen und (i) einen Stahlrahmen zur Sicherung der Trommel darstellen. Nicht alle aufgezählten Sensoren sind maßgebend für die Ergebnisse dieser Arbeit. (Kaitna et al. 2007, modifiziert von Heil et al. 2017)	11
Abbildung 9: Links die Halterung für die Messfinne und rechts die Kunststoffrollen mit verstellbaren Schrauben zur Höheneinstellung.....	12
Abbildung 10: Drehtisch mit Stahlrohr und Messfinne ohne Verkabelung.....	13
Abbildung 11: Auf Halterung montierte Messfinne von hinten.....	13
Abbildung 12: Unterer Teil der Messfinne mit den bearbeiteten Leveln 1 – 5.	14
Abbildung 13: Keramikkekulder Firma Saint-Gobain NorPro (links) Flussskies der Fa. Raschhofer (rechts).....	15
Abbildung 14: Kornverteilungskurve des 4/8er Kies.....	16

Abbildung 15: Messsystem in der Trommel unmittelbar vor dem Versuchsstart.....	17
Abbildung 16: Überblick über die Arbeitsschritte bei der Datenauswertung.....	19
Abbildung 17: Anwendung der Kreuzkorrelation mit MatLab im „getVelo.m“-Skript. Weitere Erklärung der Variablen im Text.	20
Abbildung 18: Darstellung eines Bereichs des „Auswertungsskripts_2“, in dem die Parameter für die Geschwindigkeitsberechnungen eingegeben werden können. Erklärungen der Variablen im Text.....	21
Abbildung 19: Die Befehlszeilen beschreiben, wie das Programm durch das wiederholte Anwenden der <i>getVelo</i> -Funktion (Schleifen) die Geschwindigkeiten des Level 1 in die Matrix <i>vel</i> einträgt. Erklärung der Variablen im Text.....	23
Abbildung 20: Hier sieht man die Befehle für eine schnelle Fourier-Transformation (FFT) für Sensor 1. <i>Fs</i> ist die Messfrequenz, die mit 9600 festgelegt ist. <i>signal_1</i> bezeichnet die Messwerte aus Sensor 1. <i>L</i> beschreibt die Länge der Signalwelle von Sensor 1 und <i>T</i> die Aufnahme der Messwerte alle 0,001 Sekunden. Mit den Variablen <i>P1</i> und <i>P2</i> werden die Bereiche der Frequenzen, wo sich eine gleichmäßige Welle ausbildet, ermittelt.	24
Abbildung 21: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 3 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 1 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.....	27
Abbildung 22: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 3 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 1 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.....	28
Abbildung 23: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 3 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 30,89 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.....	29
Abbildung 24: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 5 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 30,89 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.....	29
Abbildung 25: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 7 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 30,89 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.....	30
Abbildung 26: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 9 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 30,18 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.....	31
Abbildung 27: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 3 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 31,79 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.....	31
Abbildung 28: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 5 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 31,26 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.....	32
Abbildung 29: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 7 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 31,26 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.....	33

Abbildung 30: (a) Berechnete Geschwindigkeiten auf Level 1 (rot) bis 4 (rosa) bei 9 U/min für eine Korrelationsfenstergröße von 31,26 sec für die komplette Versuchsdauer; (b) Korrelationskoeffizienten pro Level, über die Dauer des Versuchs.....	34
Abbildung 31: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 3 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.	35
Abbildung 32: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 5 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.	36
Abbildung 33: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 7 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.	37
Abbildung 34: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 9 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.	38
Abbildung 35: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 3 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.	39
Abbildung 36: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 5 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.	40
Abbildung 37: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 7 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.	41
Abbildung 38: In den Abbildungen sind 2 Geschwindigkeitsprofile bei 9 U/min jeweils für den Median und den Mittelwert der Geschwindigkeiten pro Level zu sehen. Auf der y-Achse sieht man die Fließhöhe und auf der x-Achse die Fließgeschwindigkeiten.	42
Abbildung 39: : Links: Geschwindigkeitsprofile der Kies-Wasser-Mischung mit 0.39 (blau), 0.65 (rot), 0.89 (gelb) und bei 1.2 (violett) m/s sichtbar, aufgenommen von Mader. Rechts: Profile von publiziert in Kaitna et al. (2014) mit den Geschwindigkeiten mit 0.62 (liegendes Dreieck), 0.83 (stehendes Dreieck), 1.25 (rechtsweisendes Dreieck) und 1.68 (linksweisendes Dreieck) m/s. (Kaitna et al., 2014).....	44
Abbildung 40: Trommel mit Autor.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 41: Trommel mit Autor 2020	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unterscheidung der Wildbachprozesse laut ONR 24800 (2009), gekürzt:	6
Tabelle 2 zeigt die Abstände der Messlevel zum Gerinneboden und zum darauffolgenden Level:.....	14
Tabelle 3 zeigt die physikalische Eigenschaften des Versuchsmaterials:.....	16
Tabelle 4: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 3 U/min; max_v die maximale	

Geschwindigkeit, <i>min_v</i> die minimale Geschwindigkeit, <i>mean_v</i> bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und <i>median_v</i> den Medianwert der Geschwindigkeit. Die Spalten <i>max_korr</i> bezeichnen die maximale Korrelation, <i>mean_korr</i> die mittlere Korrelation und <i>stdt</i> die Standardabweichung.....	35
Tabelle 5: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 5 U/min; <i>max_v</i> ist die maximale Geschwindigkeit, <i>min_v</i> die minimale Geschwindigkeit, <i>mean_v</i> bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und <i>median_v</i> den Medianwert der Geschwindigkeit. Die Spalten <i>max_korr</i> bezeichnen die maximale Korrelation, <i>mean_korr</i> die mittlere Korrelation und <i>stdt</i> die Standardabweichung.....	36
Tabelle 6: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 7 U/min; <i>max_v</i> ist die maximale Geschwindigkeit, <i>min_v</i> die minimale Geschwindigkeit, <i>mean_v</i> bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und <i>median_v</i> den Medianwert der Geschwindigkeit. Die Spalten <i>max_korr</i> bezeichnen die maximale Korrelation, <i>mean_korr</i> die mittlere Korrelation und <i>stdt</i> die Standardabweichung.....	37
Tabelle 7: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 9 U/min; <i>max_v</i> ist die maximale Geschwindigkeit, <i>min_v</i> die minimale Geschwindigkeit, <i>mean_v</i> bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und <i>median_v</i> den Medianwert der Geschwindigkeit. Die Spalten <i>max_korr</i> bezeichnen die maximale Korrelation, <i>mean_korr</i> die mittlere Korrelation und <i>stdt</i> die Standardabweichung.....	38
Tabelle 8: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 7 U/min; <i>max_v</i> ist die maximale Geschwindigkeit, <i>min_v</i> die minimale Geschwindigkeit, <i>mean_v</i> bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und <i>median_v</i> den Medianwert der Geschwindigkeit. Die Spalten <i>max_korr</i> bezeichnen die maximale Korrelation, <i>mean_korr</i> die mittlere Korrelation und <i>stdt</i> die Standardabweichung.....	39
Tabelle 9: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 7 U/min; <i>max_v</i> ist die maximale Geschwindigkeit, <i>min_v</i> die minimale Geschwindigkeit, <i>mean_v</i> bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und <i>median_v</i> den Medianwert der Geschwindigkeit. Die Spalten <i>max_korr</i> bezeichnen die maximale Korrelation, <i>mean_korr</i> die mittlere Korrelation und <i>stdt</i> die Standardabweichung.....	40
Tabelle 10: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 7 U/min; <i>max_v</i> ist die maximale Geschwindigkeit, <i>min_v</i> die minimale Geschwindigkeit, <i>mean_v</i> bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und <i>median_v</i> den Medianwert der Geschwindigkeit. Die Spalten <i>max_korr</i> bezeichnen die maximale Korrelation, <i>mean_korr</i> die mittlere Korrelation und <i>stdt</i> die Standardabweichung.....	41
Tabelle 11: Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeiten für das Keramik-Wasser Gemisch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 7 U/min; <i>max_v</i> ist die maximale Geschwindigkeit, <i>min_v</i> die minimale Geschwindigkeit, <i>mean_v</i> bezeichnet den Mittelwert der Geschwindigkeit und <i>median_v</i> den Medianwert der Geschwindigkeit. Die	

Spalten <i>max_korr</i> bezeichnen die maximale Korrelation, <i>mean_korr</i> die mittlere Korrelation und <i>stdt</i> die Standardabweichung.....	42
Tabelle 12: Trommelgeschwindigkeiten der vorliegenden Studie und die Geschwindigkeiten der Studie Kaitna et al. (2014).....	44