



Masterarbeit

Physikalische Modellierung von Muren - ein hydraulisch basierter Ansatz

Bak. Tech. Matthias Johann Müllegger

Institut für Alpine Naturgefahren

Universität für Bodenkultur Wien

Wien, im Oktober 2011

Betreuer

Univ. Prof. DI Dr. nat. techn. Johannes HÜBL

DI Dr. Christian SCHEIDL

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	5
2.	Ziele der Arbeit.....	6
3.	Grundlagen	7
3.1	Mure - Prozessbeschreibung	7
3.2	Grundlagen der physikalische Modellierung im Wasserbau.....	16
4.	Physikalische Modellierung von Muren	24
5.	Distanzmessung mittels Laser	33
6.	Laborversuch	35
6.1	Versuchsaufbau	38
6.2	Versuchsmaterial	43
6.3	Messtechnik und Auswertung	47
6.4	Erfasste Parameter und ihre Genauigkeit	52
6.5	Versuchsdurchführung	53
6.5.1	Granulare Versuchsreihe	54
6.5.2	Viskose Versuchsreihe	63
7.	Resultate	70
7.1	Resultate granular.....	70
7.2	Resultate viskos	73
7.3	Vergleich Ultraschallsensoren mit Lasersensoren	75
8.	Diskussion	79
9.	Zusammenfassung.....	82
10.	Nomenklatur	83
11.	Abbildungen/Tabellen	85
12.	Literaturverzeichnis.....	88

Danksagung

Ich bedanke mich bei meinem Betreuern Prof. Johannes Hübl und Dr. Christian Scheidl für die Betreuung der Masterarbeit. Für den gemeinsamen Bau der Versuchsanlage und die Durchführung der Versuche möchte ich mich bei Dr. Michael Chiari und besonders bei Ing. Friedrich Zott bedanken. Weiteres möchte ich mich bei Dr. Roland Kaitna, Dr. Dirk Proske, Felix Zott, Fabian und Elisa bedanken, welche mit praktischer und/oder theoretischer Arbeit beteiligt waren. Ein Dankeschön an Monika Stanzer für die Hilfe bei organisatorischen Problemen und dem gesamten Team des IAN. Letztendlich dem Tüwi Verein für das soziale Gefüge neben dem Studium, meiner Familie und meinem Freundinnenkreis.

Abstract

The objective of this study is to construct and scale a flume for debris flow experiments. Research on physical models is based on the theory of similarity between nature and model, either by applying mathematical methods or by dimensionless analysis. For the physical model in this study a very simplified dimensionless analyses was chosen. The problems of scaling a small physical model of debris flow still remain a challenge.

The flume model is about 4.5 meters long and has a flow cross section of 0.5 m. The maximum slope of the flume remains 33% due to space limitations within the laboratory. The release mechanism was made to simulate a dam break triggering situation. The flume was adapted to assure a flowing mass, scaled in a Froude range between 0 and 2.9. Additionally to the measurements of the velocities and the flow heights, using ultrasonic sensors combined with laser measurement instruments, a visual analysis of the different flow behaviors was conducted by video cameras. The data sets from the laser-, and ultrasonic sensors were statistically analyzed and the results of these two sensor systems were compared. The reason for this statistical analyze was the large numbers of outliers from the results of the laser sensors.

The used bulk mixture is based on a certain amount of water combined with a typical debris-flow grain size distribution. For our study the dry mass of the solid particles is fixed ($m_s = 370$ kg) and only the water content remains variable. Two bulk mixture setups are defined, accounting for a more granular and viscous flow regime. Depending on the varying water content, different flow velocities and flow heights were measured for each experiment, resulting in a related Froude number. Furthermore a visual analyze has been carried out. The results of this study are water content – Froude number correlation of the two different setups for the physical model. The sampled data show a linear correlation for both setups. The statistical analyze from the sensor systems shows that the laser sensors are not useable for the granular setup.

1. Einleitung

„Wie eine geschlossene Phalanx rückt der *Murgang*, in welchem die Masse des Geschiebes jene des Wassers oft weit überwiegt, und in welchem die Steine vorerst im bunten Durcheinander, hart nebeneinanderliegend und sich berührend, mit Schlamm vermengt fortgeschoben werdend, langsam gleichmäßig heran, alles mit sich reißend,...“ (Forstverein, 1896)

Schon seit Urzeiten sind menschliche Siedlungen von Naturkatastrophen bedroht. Alleine der Vergleich mit einer Phalanx drückt die Angst und den Respekt vor Muren und deren Zerstörungskraft, welche Menschen teils hilflos ausgeliefert waren und sind, aus. Der bautechnische Schutz vor Naturgefahren und das Verständnis, welche Prozesse maßgebend sind, stellt zusätzlich zur Vorhersage, einen wesentlichen Aspekt im Schutzbedürfnis der Menschen dar. Um das Verständnis von komplexen geomorphologischen Prozessen erweitern zu können, werden Versuche im verkleinerten Maßstab verwendet. In der Natur schwer zu beobachtbare Abläufe sind im Labor, auch mit vielen nicht qualifizierbaren und quantifizierbaren Einflüssen, stark vereinfacht modellierbar. Das Interesse, vom Kleinen auf das Große zu schließen, liegt folgende Arbeit zu Grunde.

Unter empirische Forschungsmethoden sind solche Methoden zu verstehen, die zur Informationsgewinnung über die Realität eingesetzt werden können (Stier, 1999). Im Folgenden handelt es sich um ein Laborexperiment. Wobei charakteristisch ist, dass die Umgebung eine künstliche ist. Dabei besteht die Gefahr, dass sich das Versuchsmaterial anders verhält als in seiner natürlichen Umgebung und dass andere Einflussfaktoren als in der Natur eine Rolle spielen.

2. Ziele der Arbeit

Eingebettet in einem größeren Forschungsprojekt, welches das Ziel hat, Grundlagenforschung für Anprallkräfte einer Mure an historische Rundbogenbrücken zu ermitteln, befindet sich die folgende Arbeit. Da ein Naturversuch im Maßstab 1:1 derzeit nicht möglich ist, besteht die Notwendigkeit eines hydraulischen Modellversuchs. Die Aufgabenstellung besteht darin, eine Versuchsrinne für Muren zu konstruieren und nach hydraulischen Gesetzmäßigkeiten zu skalieren. Damit können im Weiteren im verkleinerten Maßstab Anprallversuche durchgeführt werden. Die Rahmenbedingungen für die geometrische Ähnlichkeit der Versuchsanlage stellen die räumlichen Verhältnisse des Labors dar. Es wird angenommen dass hydraulische Modellgesetze für Reinwasser auch auf Murenmaterial angewandt werden können. Speziell wird das Froude'sche Modellgesetz in Betracht gezogen um kinematische Ähnlichkeit zu gewährleisten. Um einen Überblick vom Weg von der Theorie zur Praxis und wieder zur Theorie zu geben, sind in der folgenden Auflistung die Arbeitsschritte angeführt.

- Zusammenfassung und Recherche der maßgeblichen Literatur
- Konstruktion und Bau der Versuchsanlage
- Auswahl und Untersuchungen eines geeigneten Versuchsmaterials
- Durchführung von Versuchen
- Hydraulische Betrachtung der Versuchsanlage und deren Skalierung
- Statistische Auswertung der Versuchsdaten
- Diskussion und Interpretation der Ergebnisse

3. Grundlagen

„Mure, f. (Murgang, m., Murbruch, m. schweiz. Ruffi), Schlamm- und Trümmerstrom, der infolge starker Durchnässung (nach Starkregen, starker Schneeschmelze etc.) vor allem im Hochgebirge zu Tal geht. Muren können mit erheblicher Geschwindigkeit bedeutende Förderweiten erlangen und große Zerstörung hervorrufen“ (Murawski und Meyer, 2010).

3.1 Mure - Prozessbeschreibung

Bei Muren handelt es sich um Massenbewegungen (Genske, 2009). Eine Massenbewegung wiederum ist eine talwärts gerichtete Verlagerung von Gebirgsmassen. Damit ein Hang in Bewegung gerät müssen mechanische und kinematische Bedingungen erfüllt sein. Die mechanische Bedingung ist, dass die treibenden Kräfte gegenüber den Haltenden überwiegen und die kinematische Bedingung, dass sich Bewegungsmechanismen ausbilden können. Außerdem bedarf es eines auslösenden Ereignisses. Die Art, wie sich ein Hang bewegt wird durch die Hydrologie, Geomorphologie und die Geologie im Einzugsgebiet bestimmt. Neben den oben genannten Bedingungen sind nach (Björn, 1996) folgende Grundvoraussetzungen für die Entstehung von Murgängen notwendig.

- Neben einem Feststoffpotential mit einer entsprechenden Wassersättigung muss das Gerinne mindestens ein Gefälle von 27° aufweisen. Wobei bei größeren Einzugsgebieten dies tendenziell geringer ist.
- Als zeitlich variable Voraussetzungen werden die geotechnischen und hydrogeologischen Eigenschaften, die hydrologische Vorbedienung sowie die Bachgeschichte gezählt.
- Die auslösenden Ereignisse können niederschlagsabhängig und niederschlagsunabhängig sein. Als Beispiel für ein niederschlagsabhängiges Ereignis wären als Ursache Gewitter oder Starkregen zu nennen. Ein niederschlagsunabhängiges Ereignis wäre zum Beispiel ein Seeausbruch.

Dikau (1996) teilt eine Mure in drei markante Zonen ein. Diese sind das Sammelgebiet, die Transitzone bzw. Schlucht und als Drittes, die Ablagerungszone (Abbildung 1). Die Feststoffe aus dem Sammelgebiet können aus einer oder aus mehreren Quellen stammen (Balmforth, 2001). Ein Murgang kann sich aus mehreren

Murschüben zusammensetzen, wobei ein Murschub eine einzelne, deutlich ausgeprägte Welle eines Murgangs ist (ONR24800, 2009). Weiteres können sich die Feststoffe langsam und kontinuierlich ansammeln oder alte, schlecht verfestigte Ablagerungen werden bei einem Mureignis mobilisiert (Balmforth, 2001). Auch die Vegetation im Sammelgebiet spielt eine wichtige Rolle, da sie die Disposition von Feststoffen und die Hydrologie im Einzugsgebiet beeinflusst.

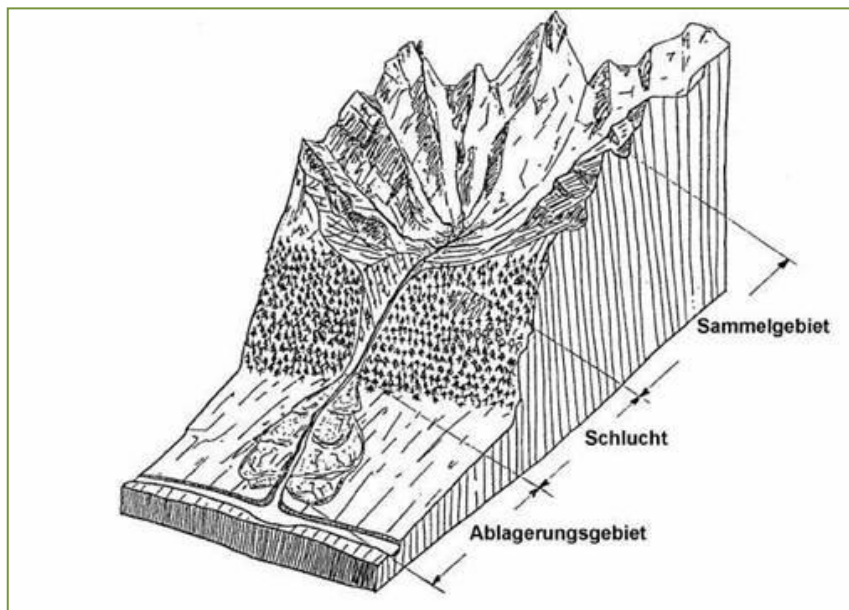


Abbildung 1: Zoneneinteilung einer Mure (Hübl et al., 2003).

Die Mure folgt normalerweise bereits bestehender Abflussrinnen, welche einen stark eingetieften U oder V förmigen Querschnitt aufweisen. In Abbildung 2 ist eine schematische Darstellung einer Mure im Längs- und Querschnitt ersichtlich. Im Längsschnitt kann die Mure in Murschwanz, Murkörper und Murkopf eingeteilt werden (Schatzmann, 2005). Die höchste Abflusstiefe wird normalerweise im Murkopf beobachtet (Balmforth, 2001). In einigen Fällen ist kein Murkopf zu beobachten. Dies kann Zutreffen, wenn der Murkopf beim Auftreffen an einen Schwemmkegel vom Murkörper überholt wird oder wenn das Murenmaterial sehr gut sortiert ist. Der Murkörper kann Blöcke unterschiedlicher Größe mit sich führen. Dabei wurde beobachtet, dass kleine Blöcke auf der Oberfläche zu schwimmen scheinen, wogegen größere Blöcke sich mit der Mure bewegen. Der Murkörper stellt den Teil mit dem größten Transportvolumen dar (Schatzmann, 2005). Der Murschwanz wird mit abnehmender Abflusstiefe und Feststoffkonzentration charakterisiert. Fast ausschließlich in der Transitzone wird Material erodiert, welches in einigen Fällen zu einer signifikante Erhöhung des Murenvolumens führen kann.

Während des Murganges können sich beidseitig abgelagerte Murfirste ausbilden. Wobei in den Murfirsten der Anteil von Blöcken und Steinen größer als im Murkörper selbst ist. Nach dem Murgang bleiben die Murfirste oft bestehen.

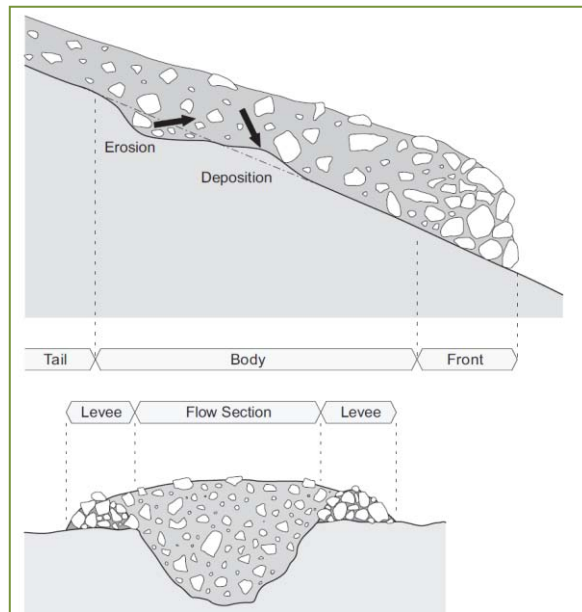


Abbildung 2: Schematischer Längs- und Querschnitt einer Mure (Schatzmann, 2005).

Die Geschwindigkeiten, mit welcher sich Muren bewegen, werden je nach Literatur sehr unterschiedlich angegeben. Sie reichen von weniger als 0,01 m/h (Zepp, 2002) bis 45 m/s (Fischer, 1999). Wobei aber Geschwindigkeiten von 1 m/s bis 10 m/s als gute Durchschnittswerte gelten (Balmforth, 2001).

Abbildung 3 zeigt schematisch die Ausbildung einer Korngrößensegregation (Iverson, 2005). Durch diese bilden sich der grobkörnige, mit niedrigem Porenwasserdruck auszeichnende Murkopf und der flüssigere, feinkörnigere und mit hohem Porenwasserdruck auszeichnende Murschwanz aus. Der flüssigere Murschwanz tendiert dazu, gegen den Murkopf zu drücken. Dieser verhältet sich annähernd wie ein Damm in Bewegung. Außerdem hat der Murkopf einen hohen und der Murschwanz einen niedrigen Reibungswiderstand. Innerhalb des Murkopfes wurde beobachtet, dass eine Zirkulation von größerem Murenmaterial stattfindet. Im Gegensatz dazu zirkuliert im Murkörper kleineres Murenmaterial.

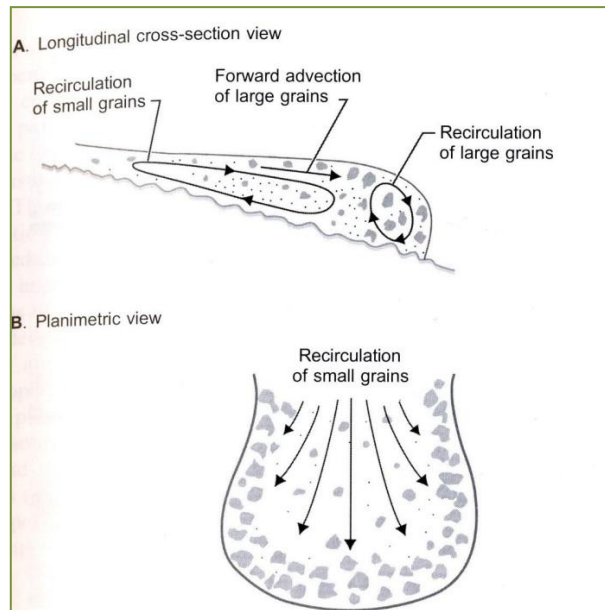


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Korngrößensegregation (Iverson, 2005).

Systematik der Verlagerungsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten

Eine Mure besteht aus den drei Hauptkomponenten Wasser, Feinmaterial und grobe Steine, wobei das Wasser als einziges als Transportmedium wirkt (Weber, 2004). In Abbildung 4 sind die drei Hauptkomponenten in einer Dreiecksgraphik angeordnet. Muren, welche sich aus Feinmaterial und Wasser zusammensetzen, werden auch als Schlammströme oder Schlammuren bezeichnet (Schatzmann, 2005). Bei Lahare handelt es sich um besondere Schlammströme, da diese aus vulkanischem Material bestehen. Hier wird Asche und Auswurfmaterial meist durch heftige Regenfälle mobilisiert. Im Gegensatz dazu, werden Muren welche hauptsächlich aus groben Steinen und Wasser bestehen, als granulare Muren bezeichnet. Bis zu einem Feststoffanteil von 20% handelt es sich um eine fluviale Verlagerungsart, welche je nach Feinanteil in Schwebstofftransport und Geschiebetransport unterschieden wird (ONR24800, 2009).

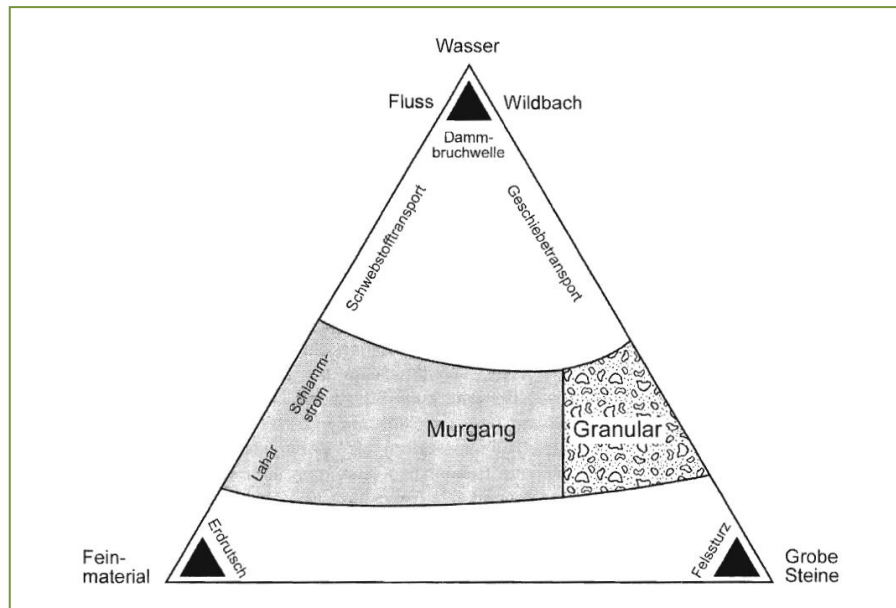


Abbildung 4: Materialzusammensetzung verschiedener Verlagerungsprozesse (Weber, 2004).

Eine weitere Klassifikation teilt Muren in vier Klassen ein (Schatzmann, 2005):

- Granulare Muren
- Viskose Muren
- Schlammuren
- Viskose-granulare Muren

Wie oben beschrieben besteht der granulare Murgang hauptsächlich aus groben Material, wenig feinem Material, und Wasser. Die granulare Mure wird in eine flüssige Phase, welche aus Feinmaterial und Wasser besteht, und einer festen Phase, welche aus dem Grobmaterial besteht, eingeteilt (Takahashi, 1991). Die folgende Auflistung beschreibt den Aufbau einer natürlichen, granularen Mure nach Okuda et al. (1977).

- Die erste Front einer Mure gleicht einer Flutwelle und die Abflusstiefe steigt plötzlich stark an.
- Die größte granulare Akkumulation am Murkopf enthält nur sehr wenig Wasser.
- Die größten Steine befinden sich im Murkopf.

Bei der viskosen Mure wird von einem mehr oder weniger homogenen, laminaren einphasen System ausgegangen (Schatzmann, 2005). Der Anteil des Feinmaterials beträgt mehr als 10% am gesamten Material. Die Porenräume zwischen den größeren, schlecht sortierten Partikeln werden mit feinerem Material und Wasser

ausgefüllt. Dadurch werden die Kollisionskräfte zwischen den gröberen Partikeln gedämpft.

Bei der Schlamm-mure nimmt der Feinanteil weiter zu und der Anteil von grobem Material nimmt weiter ab. Hier kann wieder zwischen einer festen und einer flüssigen Phase unterschieden werden. Interaktionen zwischen den groben Partikeln treten in Abhängigkeit von deren Anteil gelegentlich auf oder sind vernachlässigbar. Ob laminares oder turbulentes Fließverhalten besteht, ist von der Fließhöhe, dem Gefälle, und dem Anteil von feinem Material abhängig.

Die viskose-granulare Mure weist Merkmale von der granularen und der viskosen Mure auf.

Ansätze zur Beschreibung der Rheologie von Murgängen

Die verschiedenen Modelle, welche zur Beschreibung von Muren vorgeschlagen werden, basieren grundsätzlich auf der Erhaltung von Masse und Energie. Als erste Näherung werden aus der Reinwasserhydraulik bekannte Fließgesetze verwendet, wobei die Mure als ein homogenes Fluid mit bestimmten physikalischen Eigenschaften angesehen wird. Wegen der unzureichenden Beschreibung des Fließvorganges unterteilen weitere Ansätze die Mure in eine flüssige und eine feste Phase, den sogenannten Zweiphasenmodellen (Iverson und Denlinger, 1987). Im Folgenden wird auf die Einphasenmodelle genauer eingegangen.

Bei Einphasenmodellen werden der Wasseranteil und die festen Bestandteile einer Mure als ein homogenes Gemisch betrachtet (Tamotsu, 2007). Die Charakteristika solcher „Flüssigkeiten“ können in einem Fließdiagramm oder einem Viskositätsdiagramm dargestellt werden (vgl. Schatzmann, 2005, Kaitna, 2006,...). Bei einem Fließdiagramm wird die Scherfestigkeit in Abhängigkeit von der Scherrate aufgetragen und bei einem Viskositätsdiagramm die Viskosität in Abhängigkeit der Scherrate (siehe Abbildung 5). Bei Newtonischen Flüssigkeiten besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit und Scherrate wobei die dynamische Viskosität η konstant bleibt und proportional zur Schergeschwindigkeit ist (Tamotsu, 2007). Die in der folgenden Aufzählung angeführten Flüssigkeiten sind Beispiele für nicht newtonische Flüssigkeiten (Schatzmann, 2005).

- Scherverdünnendes oder viskoplastisches Fluid
- Scherverdickendes oder dilatantes Fluid
- Cassonplastisches oder Herschel Bulkley Fluid
- Viskoplastisches Bingham-plastisches Fluid

Bei einem scherverdünnendem oder viskoplastischem Fluid nimmt die dynamische Viskosität mit steigender Belastung ab. Bei einer Zunahme der dynamischen Viskosität mit steigender Belastung spricht man von einem scherverdickenden oder einem dilatanten Fluid. Mit zunehmender Scherrate nimmt der Fließwiderstand ab. Dieses Verhalten beschreibt Herschel-Bulkley Flüssigkeiten. Eine Bingham Flüssigkeit verhält sich eigentlich wie eine Newtonische Flüssigkeit, wobei aber die Verformung erst ab einer Mindestscherspannung ein setzt.

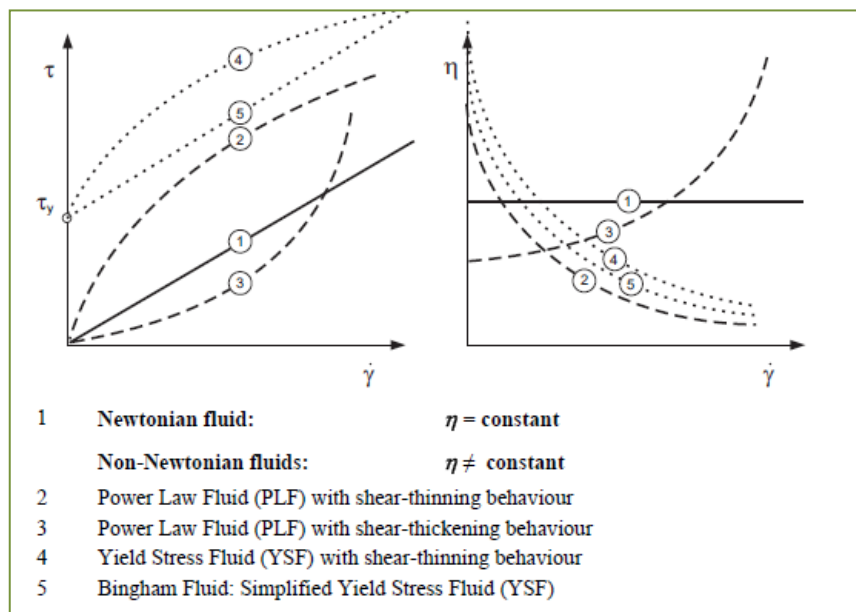


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung von Flüssigkeiten aufgrund von Fließdiagramm (links) und Viskositätsdiagramm (rechts) (Schatzmann, 2005).

Kornverteilung natürlicher Muren

Natürliche Muren können Ton, Schluff, Sand, Kies, Steine Blöcke und organische Materialien aufweisen (Weber, 2004). Die in Abbildung 6 dargestellten Sieblinien stellen in Anbetracht dessen, dass alleine der Lehmgehalt in den Ablagerungsfächern zwischen 0,5% gemessen bei Ereignissen am Mount St. Helen bis 76% bei Ereignissen gemessen in Kalifornien schwankt, nur einen groben Überblick dar (Pérez, 2001).

Die Probleme beim Erstellen von Sieblinien von Murenmaterial sind mannigfaltig (Weber, 2004). Der Ort der Probenahme, ob an der Murfront, am Murkörper, Murschwanz, im Abrissgebiet, Anrissgebiet oder an den Levees hat einen signifikanten Einfluss auf die Kornverteilung. Weiteres gestaltet sich die Probenahme, besonders bei großem Anteil von Steinen und Blöcken, als sehr schwierig.

Abbildung 6 soll an einigen Fallbeispielen die Bandbreite der Sieblinie von natürlichem Murenmaterial geben und grafisch darstellen wo das verwendete Versuchsmaterial einzuordnen ist.

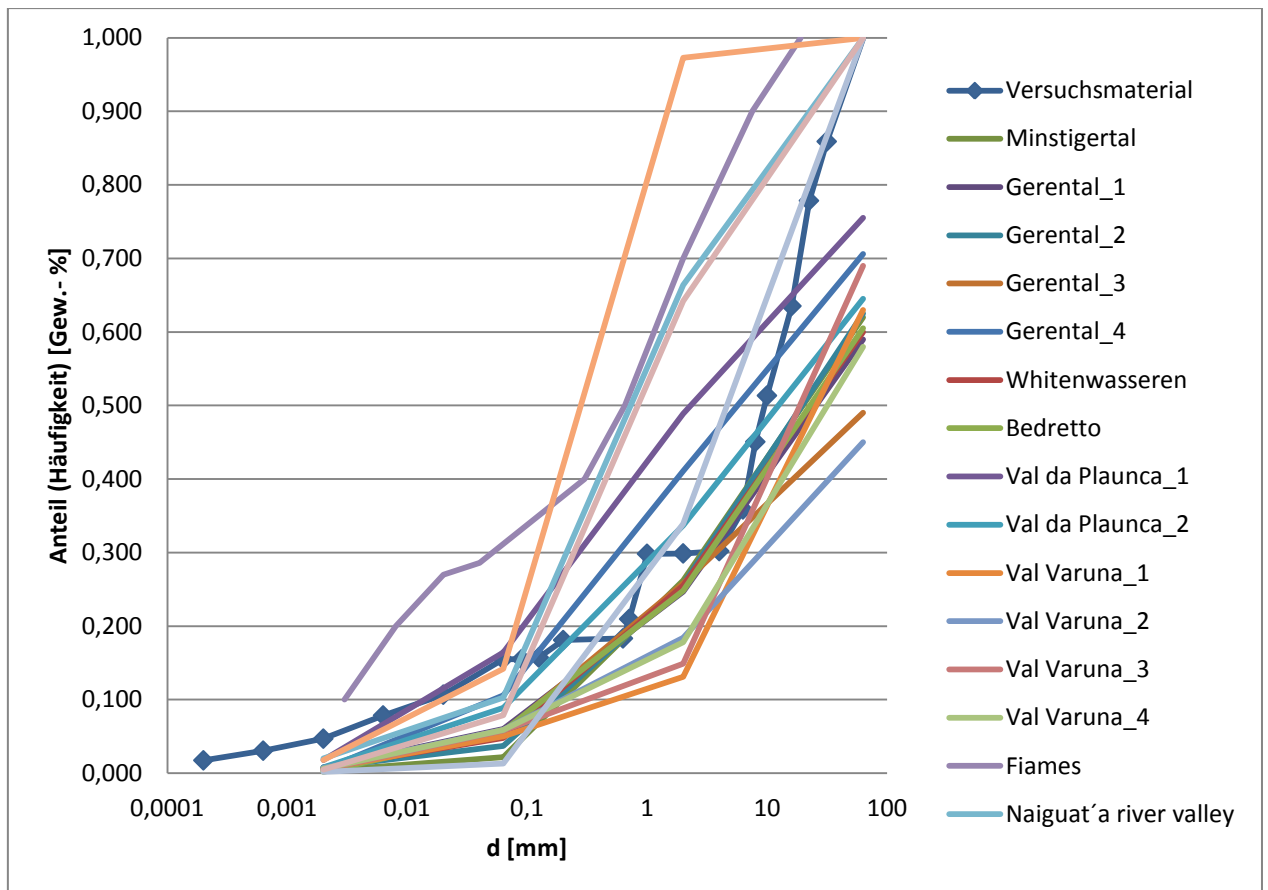


Abbildung 6: Sieblinien von natürlichem Murenmaterial und jene des Versuchsmaterials.

Die Sieblinien mit den Bezeichnungen Minstigertal, Gerental_1 bis 4, Whitenwasseren, Bedretto, Val da Plaunca_1 bis 2, und Val Varuna_1 bis 4 wurden 1987, nachdem im gesamten Schweizer Alpenraum schwere Unwetter Muren verursacht hatten, erstellt (Rickenmann und Zimmermann, 1993). Die Proben stammten hauptsächlich aus dem oberen Gerinnebereich. Aufgrund der geringen genommen Probenvolumina wurden die groben Komponenten visuell abgeschätzt und in die Sieblinie eingerechnet. Die Sieblinie Fiames stammt aus einem Ablagerungsgebiet in den italienischen Dolomiten (D'Agostino et al., 2010). Diese Sieblinie wurde aus einer Kombination von Linienzählungen auf der Oberfläche, direkter Messungen von größeren Blöcken und visuellen Auswertungen erstellt. Die Sieblinien aus dem Naiguat river valley wurden aus dem Matrixmaterial von Muren erstellt, welche im Dezember 1999 abgingen (Pérez, 2001). Die Blöcke, welche diese Muren mittransportierte, hatten ein Gewicht bis zu 40 Tonnen.

3.2 Grundlagen der physikalische Modellierung im Wasserbau

Wenn Strömungsvorgänge zu komplex sind, um sie theoretisch oder analytisch erfassen zu können, werden physikalische Modelle verwendet (Strobl und Zunic, 2006). Das hydraulische Versuchswesen dient zum einem zur Untersuchung von komplexen Fließvorgängen und zum anderen zur Korrektur von Berechnungsformeln (Loiskandl, 2011). Wichtig ist für die Modellierung, ob Modelle mit fester oder beweglicher Sohle, mit oder ohne Bezug zum Grundwasser, notwendig sind. Für die Erklärung der einzelnen Symbole, welche im Text nicht erwähnt werden, siehe Kapitel Nomenklatur.

Ähnlichkeiten

Der Ansatz von Modellversuchen ist, zwischen Natur und Modell eine geometrische, kinematische und dynamische Ähnlichkeit herzustellen (Strobl und Zunic, 2006). Bei der geometrischen Ähnlichkeit werden alle geometrischen Größen mit der gleichen Maßstabszahl M_L von der Natur auf das Modell übertragen (siehe Tabelle 1). Die kinematische Ähnlichkeit bezieht sich auf alle zeitabhängigen Prozesse und die konstante Maßstabszahl M_t stellt den Bezug zwischen Natur und Modell da. Wenn die Maßstabszahl M_F bei der Übertragung der Kräfte von Natur und Modell konstant ist, spricht man von einer dynamischen Ähnlichkeit. Wenn alle diese Kriterien erfüllt sind, spricht man von einer vollständigen Ähnlichkeit. Grundsätzlich ist es nicht möglich eine vollständige Ähnlichkeit zu erreichen. Damit die hydraulischen Vorgänge in der Natur und im Modell vergleichbar sind, muss die Bedingung nach dynamischer Ähnlichkeit der Strömungsvorgänge erfüllt sein.

Tabelle 1: Übersicht Maßstab.

Maßstab	Verhältnis
Längenmaßstab	$M_L = L_{Natur} / L_{Modell}$
Zeitmaßstab	$M_t = t_{Natur} / t_{Modell}$
Kräftemaßstab	$M_F = F_{Natur} / F_{Modell}$

Dimensionslose Kennwerte und deren Größen

Das Prinzip von dimensionslosen Kennwerten ist es, die Komplexität und Anzahl der Variablen, welche einen physikalischen Prozess beeinflussen, zu reduzieren (Ettema, 2000). Hierzu wird die dimensionslose Homogenität verwendet:

„If an equation truly expresses a proper relationship between variables in a physical process, it will be dimensionally homogeneous, each additive term in the equation will have the same units.“ (Ettema, 2000)

Diese dimensionslosen Kennwerte können dazu benutzt werden, um Muren zu klassifizieren und um Grenzen für ein bestimmtes Verhalten festzulegen (Iverson, 1997).

Froude

Die Froude'sche Zahl stellt die Trägheitskraft und die Schwerkraft zueinander dar (Glg. 1). Wobei ρ Dichte des Fluid, h_w Fließhöhe, t die Zeit und g Erdbeschleunigung ist.

$$\frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Schwerkraft}} = \frac{\rho * h_w * t^{-2}}{\rho * g * h_w^3} = \frac{h_w^2}{t^2 * g * h_w} = \frac{v^2}{g * h_w} = Fr^2 \quad (1)$$

Daraus folgt (Glg 2):

$$Fr = \frac{v}{(g * h_w)^{0,5}} \quad (2)$$

Somit ist die Froude'sche Zahl definiert durch das Verhältnis von der Fließgeschwindigkeit v und der Wurzel der Erdbeschleunigung g mal der Fließhöhe h_w . Weiteres beschreibt die Froudezahl die Grenzen des Fließzustandes.

Reynold

Die Reynolds Zahl gibt das Verhältnis der Trägheit zur Zähigkeit an, wobei (Glg. 3) eine abgeleitete Variante für die Gerinnehydraulik zeigt.

$$Re = \frac{\rho * v * R}{\eta} \quad (3)$$

Wobei v die mittlere Geschwindigkeit, η die dynamische Zähigkeit, ρ die charakteristische Dichte des Fluid und R der hydraulische Radius ist, welcher sich aus dem Abflussquerschnitt und dem benetzten Umfang berechnet.

Werden diese beiden dimensionslosen Kennzahlen bei Muren angewendet, muss beachtet werden, dass sie nur für Newtonische Flüssigkeiten gelten. Also setzt man voraus, dass Muren als Einphasenmodelle ohne Grenzschubspannung beschrieben werden. Davies, (1987) schlägt bei Muren folgende Grenzwerte zur Unterscheidung der Regime vor (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Grenzwerte Froude zur Unterscheidung der Regime (Davies, 1987).

Regime	Reynoldszahl	Froudezahl
Sehr turbulent	$Re < 10^5$	$Fr \approx 2$
turbulent	$Re \rightarrow 1500$	$Fr \rightarrow 1,3$
Übergangsbereich	$600 < Re < 1500$	$Fr \rightarrow 0,6$ für breite Gerinne $Fr \rightarrow 0,8$ für schmale Gerinne
Laminarer Bereich	$Re < 600$	$Fr \approx 0,6$ für breite Gerinne $Fr \approx 0,8$ für schmale Gerinne

Wasserbauliche Modellgesetze

Im Wasserbau existiert eine Vielzahl von Modellgesetzen. Neben der Trägheitskraft dominiert je eine weitere Kraft das jeweilige Modellgesetz. Eine Berücksichtigung von allen Kräften im Modell ist nicht möglich (Loiskandl, 2011). Für die modellmäßige Untersuchung von Strömungsvorgängen sind daher die maßgebenden Kräfte festzulegen. Für die dynamische Ähnlichkeit ist die grundlegende Beziehung das zweite Newton'sche Axiom. Zum Beispiel findet bei kompressiblen Fluiden das Mach'sche Modellgesetz Verwendung (Ettema, 2000). Wenn die Trägheits- und Schwerkraft die Strömung maßgebend beeinflussen, kommt das Froude'sche Modellgesetz zur Anwendung (Strobl und Zunic, 2006). Das Reynoldssche Modellgesetz wird gewählt, wenn die Trägheits- und Reibungskräfte die Strömung dominieren.

Froude'sche Modellgesetz

Wie oben beschrieben, geht das Froude'sche Modellgesetz davon aus, dass das Verhältnis zwischen Trägheitskräften und der Schwerkraft im Modell und in der Natur gleich groß ist.

Für die maßstabsgetreue Modellierung bedeutet das nun, dass neben der geometrischen Ähnlichkeit auch die Froudezahl im Modell und in der Natur gleich sein muss. Dadurch ergeben sich folgende abgeleitete Größen:

Tabelle 3: Abgeleitete Größen.

Abgeleitete Größe	Verhältnis
Geschwindigkeiten	$v_r = \sqrt{L_r}$
Längen	$L_r = L_N/L_M$
Flächen	$A_r = L_r^2$
Volumen	$V_r = L_r^3$
Zeit	$t_r = \sqrt{L_r}$
Durchfluss	$Q_r = L_r^{5/2}$

Das Froude'sche Modellgesetz ist das am häufigsten angewandte Ähnlichkeitsgesetz, obwohl sich nicht alle hydraulischen Aufgabenstellungen damit zufriedenstellend lösen lassen (Strobl und Zunic, 2006). Folgende Punkte müssen bei Verwendung des Froude'schen Modellgesetzes für die Anwendung im Wasserbau bedacht werden:

- Eine Strömung, welche in der Natur turbulent ist, muss auch im Modell turbulent sein.
- Bei turbulenten Strömungen ist zu berücksichtigen, ob die Reibungskräfte vernachlässigt werden können oder nicht. Falls nicht, kann die Wahl einer geringeren relativen Rauigkeit oder eine Überhöhung im Modell im Vergleich zur Natur helfen.
- Durch die starke Überrepräsentation der Oberflächenspannung dürfen keine zu kleinen Fließhöhen gewählt werden.
- Im Modell ist der Lufteintrag in die Strömung deutlich geringer als in der Natur.

Reynold'sches Modellgesetz

Wenn die Zähigkeitskräfte in Strömungen eine zentrale Rolle spielen, muss neben der geometrischen Ähnlichkeit auch die Reynolds Zahl im Modell und in der Natur gleich groß sein (Weber, 2004). Ist das im Labor verwendete Fluid ident mit jenem in der Natur, ist das Verhältnis der Geschwindigkeiten reziprok zu jenen der Längen. Dadurch ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten abgeleitete Größen:

Tabelle 4: Abgeleitete Größen.

Abgeleitete Größe	Verhältnis
Geschwindigkeiten	$v_r = \frac{1}{L_r}$
Längen	$L_r = L_N/L_M$
Flächen	$A_r = L_r^2$
Volumen	$V_r = 1/L_r$
Zeit	$t_r = L_r^2$
Durchfluss	$Q_r = L_r$

Ähnlichkeiten und Modellgesetze bei Muren

Aufgrund fehlender Beobachtungen von Muren stellt sich die Herleitung von Ähnlichkeitsbedingungen als sehr schwierig heraus (Iverson et al., 2010). Sehr genaue Daten sind notwendig um Modelle interpretieren zu können und Voraussagen zu treffen. Aber sehr genaue Daten für diesen Zweck sind selten. Der Nutzwert von Felddaten ist typischerweise begrenzt durch unbekannte oder nicht nachvollziehbare Start- und Grenzbedingungen. Die Verwendbarkeit von Labordaten sind typischerweise durch auftretende Skalierungsprobleme begrenzt, vor allem durch die kleine Größe der Modelle. Um einen quantitative Grundlage zu schaffen und um die Physik von Muren beschreiben zu können, ist eine Simplifizierung der Vorgänge notwendig (Iverson, 1997). Darum wurde eine Vielzahl von dimensionslosen Kennzahlen speziell für Muren entwickelt oder bestehende dimensionslose Kennzahlen weiterentwickelt. Die wichtigsten sind: N_{Sav} , N_{Bag} , N_{mass} , N_{Dar} , N_{Rey} , N_{fric} . Diese dimensionslosen Kennzahlen werden verwendet um verschiedene Muren untereinander oder mit Modellen vergleichen zu können. Die Savage Zahl stellt das Verhältnis zwischen der Trägheitsscherspannung und der quasistatischen Scherspannung dar (siehe Glg. 4).

Masterarbeit

$$N_{sav} = \frac{\gamma^2 * \rho_s * \delta}{N * (\rho_s - \rho_f) * g * \tan \emptyset} \quad (4)$$

Ähnlich dazu, beschreibt die Bagnold Zahl das Verhältnis zwischen Trägheitsscherspannung und viskoser Scherspannung (siehe Glg. 5)

$$N_{Bag} = \frac{v_s}{1 - v_s} * \frac{\rho_s * \delta^2 * \gamma}{\mu} \quad (5)$$

Weiteres beschreibt die Mass Zahl den Quotienten zwischen festen und flüssigen Trägheitsverhalten in der Mure (siehe Glg. 6)

$$N_{mass} = \frac{v_s}{1 - v_s} * \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad (6)$$

Die Darcy Zahl beschreibt die Tendenz des Porenwasserdrucks die Interaktionen zwischen den bewegten Partikeln zu puffern (siehe Glg.7)

$$N_{Dar} = \frac{\mu}{v_s * \rho_s * \gamma * k} \quad (7)$$

Von den oben definierten dimensionslosen Kennzahlen können die Reynolds Zahl und die Friction Zahl abgeleitet werden. Eine Version der Reynolds Zahl kann als eine Division zwischen der Bagnold Zahl und der Mass Zahl mathematisch dargestellt werden (siehe Glg. 8).

$$N_{Rey} = \frac{N_{Bag}}{N_{mass}} \quad (8)$$

Die Friction Zahl ergibt sich aus dem Quotienten aus der Bagnold- und der Savage Zahl (siehe Glg. 9).

$$N_{fric} = \frac{N_{Bag}}{N_{sav}} \quad (9)$$

Um ungewollte Skalierungseffekte zu minimieren, soll der Skalierungsfaktor möglichst nahe an 1:1 gehalten werden (Weber, 2004). Die Modellversuche sollen einen allgemeinen Fall beschreiben, sie sind aus diesem Grund nicht die skalierte Abbildung einer konkreten Situation. Daher kann auch kein konkreter Wert für den Maßstab angegeben werden, sondern ein Bereich. In Tabelle 5 sind für einige Parameter Wertebereiche, wie sie in der Natur vorkommen, aufgelistet (Weber, 2004). Die Werte stammen aus der Ursachenanalyse für Hochwasser 1987 und aus dem Illgraben, von der von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL betriebenen Muren-Beobachtungsstation (LHG, 1991).

Tabelle 5: Typische Murenparameter von Schweizer Ereignissen. (Weber, 2004).

Parameter	Wertebereich Feld	Einheit
Mittlere Fließgeschwindigkeiten	2-15	[m/s]
Abflusstiefen	1-6	[m]
Maximal Abflüsse	10-900	[m ³ /s]
Feststoffvolumina	100-200000	[m ³]
Dauer eines Murschubs	3-30	[min]
Länge eines Murschubs	300-3000	[m]

4. Physikalische Modellierung von Muren

Die Anzahl der physikalischen Versuchsmodelle von Muren mit ähnlichen Abmessungen und Zielsetzungen ist sehr übersichtlich. Das folgende Kapitel soll eine kurze Übersicht von einigen Versuchsanlagen geben.

Real Scale Murenversuche im Schesatobel

In Scheastobel, in Voralberg, befindet sich ein 60 ha großer Erosionskessel wo es möglich ist, Muren künstlich aus zu lösen (König, 2006). 2002, 2004 und 2006 wurden hier Versuche durch das Institut für Alpine Naturgefahren (IAN) der Universität für Bodenkultur (BOKU) durchgeführt. Der 2002 durchgeführte Versuch hatte das Ziel, die Möglichkeiten und Probleme von berührungslosen Warnsystemen aufzuzeigen. In Abbildung 7 ist die Sieblinie des Murenmaterial 2002 und des bei diesen Versuchen verwendete Versuchsmaterial dargestellt.

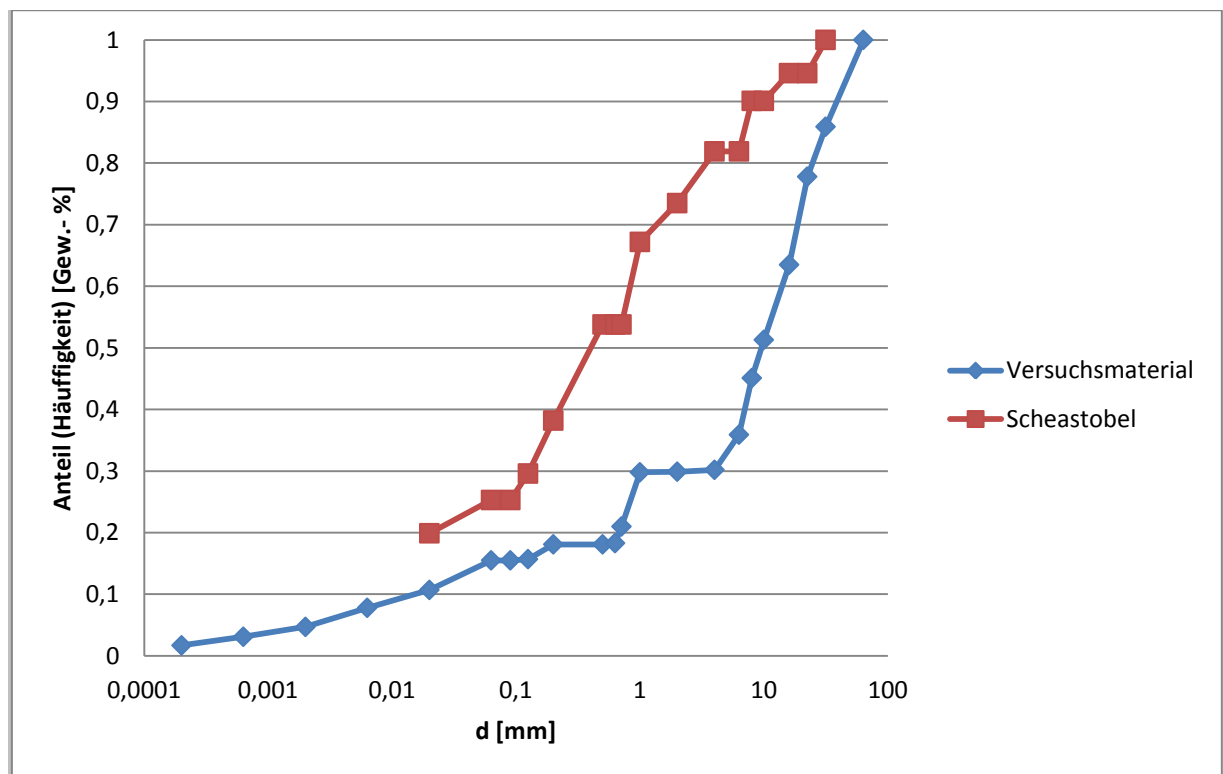


Abbildung 7: Sieblinien Versuchsmaterial und Material in Scheastobel

Bei dem Murversuch 2004 wurde eine Messeinrichtung zur Erfassung von Murdrücken verwirklicht. Weiteres wurde ein Infraschallsensor der speziell zur Frühwarnung von Muren entwickelt wurde, getestet.

Das 2006 ausgelöste Ereignis hatte ein Gesamtvolumen von ca. 1300 m^3 . Der durchgeführte Versuch hatte im Wesentlichen die Aufgabe die Druckwirkung der Mure aufzuzeichnen, sowie die Datenbasis der Infraschall und Seismischen Emissionen zu vergrößern. Die aus den aufgezeichneten Daten der Geophone und des Infraschallsensor erstellten Spektrogramme zeigten charakteristische Frequenzbereiche. Der statische Druck, welcher 2006 gemessen wurde, ist mit den Ansätzen aus dem Erdbau vergleichbar. Die aufgezeichneten dynamischen Drücke haben die Kapazität der Wägezellen überlastet.

U.S. Geological Survey (USGS) Experimental Debris-Flow Fume

Diese Versuchsanlage wurde 1991 vom U.S. Geological Survey erbaut und liegt im U.S. Bundesstaat Oregon (Iverson et al., 1992). Die aus stahlbewehrten Beton bestehende Anlage ist 95 m lang, 2 m breit und mit einer Tiefe von 1,2 m. Die Neigung der Rinne ist 60%. Das Versuchsvolumen beläuft sich auf maximal 20 m^3 , zusätzlich sind Wassersprinkler angebracht. Der Forschungsbereich deckt von der Initialisierung bis zur Ablagerung die gesamte Bandbreite ab. Es wurde unter anderem festgestellt, dass keine neuen rheologischen Gleichungen zu entwickeln sind, sondern das neue Evolutionsgleichungen notwendig sind (Iverson et al., 2010). Laut (Iverson, 1997) liegt die mittlere Froudezahl der Versuche bei 10. Diese Versuchsanlage besteht noch.

Versuchsstand IAN BOKU 1

Diese Versuchsanlage wurde vom Institut für Wildbach- und Lawinenschutz, heute IAN erbaut (Widman, 1994). Die Versuchsanlage war 4 m lang, 0,20 m breit und 0,14 m hoch. Die Neigung der Rinne betrug 20 %. Anschließend an die Rinne kam ein Ablagerungsbecken, mit einer Länge von 1,50 m, einer maximalen Breite von 1,70 m und einem Gefälle von 0 %. In der Mitte des Dammes befand sich eine Geschieberückhaltesperre. Das Versuchsmaterial bestand aus einer Mischung aus Hafnerlehm, Betonschotter und Marchsand bei einem variierenden Wassergehalt von 37,50 Vol.-% bis 62,50 Vol.-%. Die Anlage diente zur Untersuchung von kronenoffenen Geschieberückhaltesperren auf ihre Funktionstüchtigkeit.

Versuchsstand IAN BOKU 2

Die Versuchsanlage wurde vom Institut für Alpine Naturgefahren im Wasserbaulabor des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, kurz IWHW der Universität für Bodenkultur aufgebaut (Hübl und Holzinger, 2003). Die Versuchsanlage war 4 m lang und 0,3 m breit. Das Hauptziel der Anlage war es, den Erkenntnisbereich über Anprallkräfte von Muren an Sperrbauwerken zu erweitern. In Abbildung 8 ist diese Versuchsanlage schematisch dargestellt. Das Versuchsmaterial befand sich im Einlauftrichter und nach Öffnen eines Schiebers bewegte es sich in der Versuchsrinne abwärts, bis es auf das Sperrenmodell traf. Anschließend wurde das Versuchsmaterial in einem Auffangbehälter gesammelt. Das Versuchsmaterial, die sogenannte „Standard Debris Flow Mixture“ bestand aus 40% Hafnerlehm und 60% Wasser. Diesem Fluid wurde in 5 Stufen bis zu 40% Feststoffe beigemischt. Als Feststoffe wurden zwei Sorten von Schotter verwendet, einmal mit einer 4 – 8 mm Kornverteilung und einmal mit einer 2 – 16 mm Kornverteilung. Daraus ergaben sich 9 Materialmischungen. Das Versuchsvolumen betrug $0,1 \text{ m}^3$ und die Gerinneneigung 23,7%.

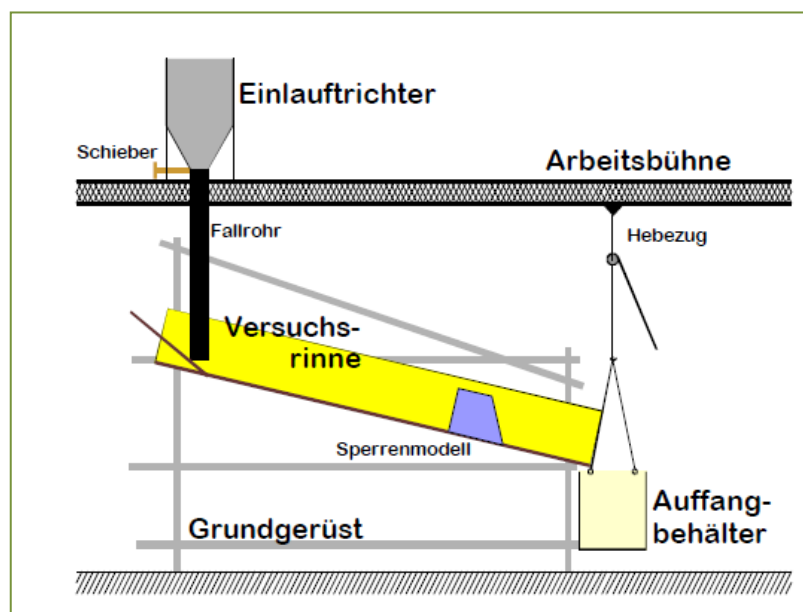


Abbildung 8: Versuchstand IWHW.

Als Ergebnis wurden qualitative Aussagen zum Einfluss der Bauwerksgeometrie auf die Belastungen sowie Ablagerungen getroffen. Außerdem konnte ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Froudezahl und den gemessenen Druckspitzen hergestellt werden. Durch diesen Zusammenhang konnte eine empirische Druckformel für die

maximal auftretende Druckspitze am Bauwerk hergeleitet werden. Die Versuche mit einem Grobkornanteil hatten eine Froudezahl von 1,1 bis 4,4. Jene Versuche mit einem hohen Grobkornanteil waren im Bereich der Froudezahl von 2 bis 13 angesiedelt. Diese Versuchsanlage existiert nicht mehr.

Versuchsrinne WSL

Diese fixe Versuchsrinne steht in der Schweiz, am Eidgenössischen Institut für Wald, Schnee und Landschaft, kurz WSL (WSL, 2011). Die freie Fließstrecke dieser Versuchsanlage ist 5 m lang und 0,78 m breit (Weber, 2004). Die Anlage kann von 0% bis 55% geneigt werden. Das maximale Versuchsvolumen beträgt $0,27 \text{ m}^3$, wobei hauptsächlich natürliches Murenmaterial Verwendung findet. Es wird im Bereich Fließ- und Erosionsverhalten geforscht. Die vier häufig vorgeschlagenen Grundmodelle, laminares-, bzw. turbulentes Fließen, Bingham laminares Verhalten und Kornscherungsmodell, zeigten bei den über 170 durchgeführten Versuchen, die Grenzen ihrer Anwendbarkeit auf. Für das Erosionsverhalten wurde eine Beziehung zwischen dem Erosionsvolumen eines Murschubs und einem Sohlenbelastungsterm hergestellt. Des Weiteren wurden Untersuchungen über den Murenrückhalt in Wildbächen mittels flexiblen Barrieren durchgeführt (Wendeler, 2008). Erste Schritte für ein mögliches Bemessungskonzept wurden geschaffen. Die mittlere Froudezahl der von (Weber, 2004) durchgeführten Versuche betrug 2. Die Anlage steht noch und wird zurzeit für Demonstrationszwecke verwendet (WSL, 2011).

Versuchsanlage Massachusetts Institute of Technology

Die Versuchsrinne stand in den Vereinigten Staaten von Amerika am Massachusetts Institute of Technology (Parsons et al., 2001). Sie war 10 m lang und wies eine verstellbare Neigung von 18,9% bis 27% auf. Das maximale Gewicht des Versuchsmaterials betrug 500 kg und die Sieblinien entsprachen jener von natürlich beobachteten Muren. Mit dieser Versuchsanlage wurden Untersuchungen über den Übergang vom viskosen zum granularen Verhalten durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen auf, wie sich das Testmaterial bei veränderten Materialzusammensetzungen verhält.

Versuchsanlage der Universität von Padua

Diese sehr kleine Versuchsanlage stand in Italien am Institut für Land- und Forstwirtschaft der Universität Padua (D'Agostino et al., 2010). Sie hatte eine freie Fließstrecke von 1,80 m Länge und 0,15 m Breite. Das Versuchsvolumen waren $0,3 \text{ m}^3$. Die Neigung der Versuchsanlage betrug 27%. Es wurde mit natürlichem Murenmaterial mit der Zielsetzung experimentiert, gemeinsam mit computertechnischer Modellierung Formeln für den Auslaufprozess von Muren, speziell in den Dolomiten zu überprüfen. Der Vergleich mit den Resultaten der Laborexperimente und den Felddaten ergab, dass eine energiebasierende Formel für die Auslaufdistanzen von Muren in den Dolomiten die besten Ergebnisse ergibt.

Versuchsanlage Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne

Die Versuchsrinne stand in der Schweiz, an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL). Die 4 m lange und 0,30 m breite Versuchsrinne mit einer maximalen Neigung von 45% wurde zur Untersuchung von Herschel-Bulkley Flüssigkeiten bei einem Dammbruch verwendet (Ancey und Cochard, 2009). Es stellte sich heraus, dass bei großen Neigungen die berechneten Werte über die Abflusstiefe mittels einer Evolutionsgleichung mit jenen der Versuchsrinne übereinstimmen. Wobei Werte, bei geringen Neigungen, sich wesentlich unterschieden. Es wurde mit künstlichem Versuchsmaterial mit einer maximalen Masse von 120 kg experimentiert.

Versuchsanlagen Universität Trento

Diese Versuchsanlage stand in Italien am Institut für Land- und Forstwirtschaft der Universität Trento am Institut für Zivil- und Umwelt Ingenieurwesen (Larcher, 2004). Die Versuchsanlage hatte eine Länge von 6 m und eine Breite von 0,40 m. Die Neigung der Versuchsanlage war von 0 % bis 44% hydraulisch verstellbar. Durch ein Förderband wurde bis zu 5 m/s das Versuchsmaterial vom Ende zum Anfang der Versuchsrinne gefördert (siehe Abbildung 9). Dadurch entstand eine stehende Welle. In dieser Anlage wurde das Wissen zur vertikalen Struktur von hochflüssigen granularen Wasser-Feststoff-Gemische vertieft sowie die vertikale Struktur von Muren. Es wurde eine Gleichung entwickelt, welche zwischen der von Bagnold und der Kinetischen Gleichung liegt. Die Froudezahlen der Versuche lagen zwischen 0,25 und 3,25 für das granulare Versuchsmaterial.

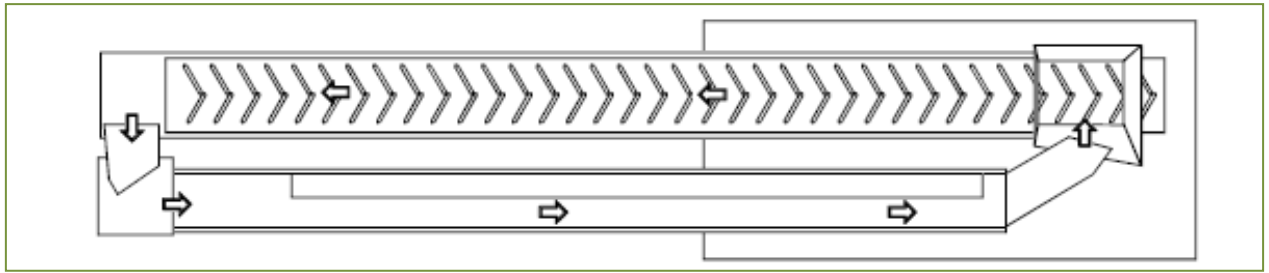


Abbildung 9: Systematische Skizze der Versuchsanlage Universität Trento.

Förderband Versuchsanlage IAN BOKU

Die Anlage (siehe Abbildung 10) steht im Labor des Instituts für Alpine Naturgefahren auf der Universität für Bodenkultur in Österreich. Bei dieser Anlage wird zwischen zwei Plexiglaswänden ein Förderband aufwärts bewegt (Steinwendtner, 1997). Das Förderband stellt die bewegliche Gerinnesohle dar und dadurch kann eine stationäre Abflusswelle erzeugt werden (Schneiderbauer, 2006). Die nutzbare Länge der Versuchsanlage ist 2,50 m, bei einer Breite von 0,11 m und einer Höhe von 0,30 m. Die Anlage ist von 0 % bis 57 % stufenlos verstellbar.



Abbildung 10: Seitenansicht Förderband Versuchsanlage IAN (IAN, 2011).

Steinwendtner (1997) führte mit natürlichem Murenmaterial rheologische Versuche durch. Nähere Details sind in der Arbeit „Untersuchung von Murendynamik“ zu finden. Die Froudezahlen der Versuche betrugen zwischen 0,43 und 3,69. Weiteres wurden von Schneiderbauer (2006) Versuche durchgeführt um die Förderband Versuchsanlage IAN BOKU mit der Versuchstrommel des IAN BOKU miteinander zu

vergleichen. Die Versuche wurden mit künstlichen (Carbopol Ultrez 10R) und natürlichen Murenmaterial durchgeführt. Bei dem künstlichen Material zeigten die Messungen großteils gute Übereinstimmungen mit den durch einen Rheometer bestimmten Werten. Bei dem natürlichen Murenmaterial war eine Vergleichbarkeit der rheologischen Parameter nur beschränkt möglich. Die Froudezahlen der Versuche lagen zwischen 0,16 und 3,20.

Versuchstrommel IAN BOKU

Die Anlage steht im Labor des Instituts für Alpine Naturgefahren (IAN) auf der Universität für Bodenkultur in Österreich. Durch eine rotierende Trommel mit einem Durchmesser von 2,5 m und einer Breite von 0,45 m wurde eine „stehende Welle“ erzeugt (Kaitna, 2006). Die Drehzahl der Anlage beträgt bis zu 20 Umdrehungen pro Minute. Es wurden das Fließverhalten und relevante Energiedissipationsprozesse untersucht. Die Experimente wurden sowohl mit künstlichen als auch mit natürlichen Materialien durchgeführt. In Abbildung 11 ist die Versuchsanordnung ersichtlich. Die Rote Linie stellt die stehende Welle dar. Es wurde die Abflusstiefe, die Geschwindigkeit, der Porenwasserdruck sowie die Scher-, und Normalspannung gemessen. Bei steigender Rotationsgeschwindigkeit der Trommel konnten reibungsdominierte und kollisionsdominierte Fließzustände identifiziert werden. Um eine klare Aussage über den Übergang der Regime treffen zu können, wurde festgestellt, dass mindestens zwei Kennzahlen nötig sind. Die Froudezahlen der Versuche waren zwischen 0,2 und 4,4. Die Versuchsanlage ist fix installiert.

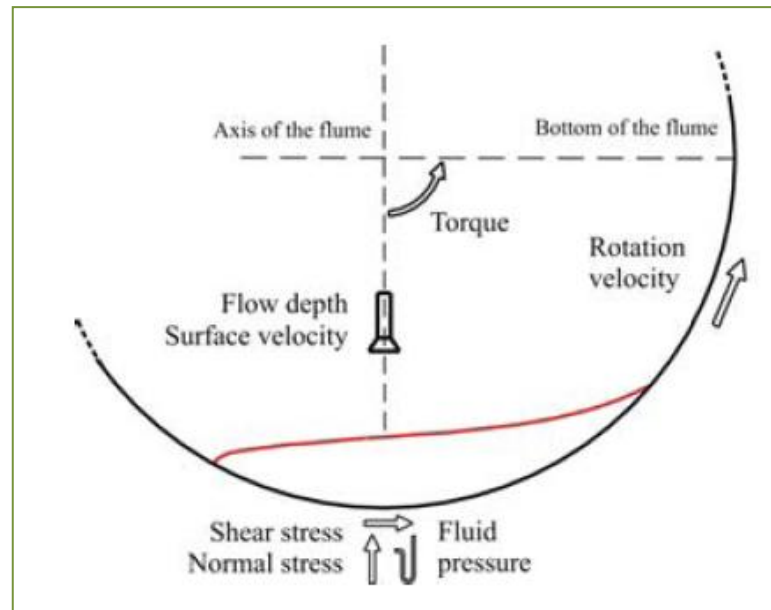


Abbildung 11: Versuchsanordnung der Versuchstrommel BOKU (Kaitna et al., 2007).

Versuchstrommel Berkeley Maytag

Diese Versuchsanlage, welche nach dem Prinzip einer rotierenden Trommel basierte, diente zur Erzeugung einer stehenden Welle. Ihr Standort war in den Vereinigten Staaten vom Amerika, in Berkeley (Hsu et al., 2008). Der Innendurchmesser der Versuchstrommel betrug 0,56 m. Es wurde der Zusammenhang von Solenerosion in Abhängigkeit verschiedener Variablen wie der Korngrößenverteilung oder der Scherspannung untersucht. Die Froudezahlen der Versuche betrugen zwischen 0,01 und 1.

Vergleich der Anlagen

Grundsätzlich lassen sich zwei verschiedene Anlagenkonzepte unterscheiden. Zum Einen jene, die durch eine bewegte Sohle eine stehende Welle regenerieren und zum Anderen wo nur das Versuchsmaterial in Bewegung ist. Außerdem lassen sich Versuchsanlagen dadurch unterscheiden, ob künstliches oder natürliches Versuchsmaterial verwendet wird. Von den Versuchsanlagen mit stehender Sohle ist die Versuchsanlage in Schesatobel die Größte. Gefolgt von der USGS Experimental Debris-Flow. Die mittleren Froudezahlen der Anlage liegen bei 10. Die Nächste ist größenordnungsmäßig die Versuchsanlage MIT, mit unbekannter Froudezahl der durchgeführten Versuche. Gefolgt von der Versuchsanlagen Universität Trento mit einer Länge von 6 m und einen Froudebereich der durchgeführten Versuche von 0,25 bis 3,25. Die Versuchsrinne WSL wies eine Länge von 5 m auf bei einem mittleren Froudebereich von 2. Der zwei Versuchstände IAN BOKU und die Versuchsanlage EPFL haben die gleichen Abmessungen in Länge von 4 m und in der Breite von 0,2 m bis 0,3 m. Wobei der Versuchstand IAN BOKU 2 den größten Froudezahlbereich der durchgeführten Versuche aufweist, nämlich von 2 bis 13. Die Kleinste der hier vorgestellten Versuchsanlagen ist jene der Universität von Padua. Sie wies eine Länge von 1,80 m auf bei unbekannter Froudezahlen. Von den Versuchsanlagen mit bewegter Sohle weist die Versuchstrommel BOKU einen Durchmesser von 2,5 m auf bei einem Froudebereich von 0,2 bis 4,4. Die Versuchstrommel Berkeley Maytag war mit einem Durchmesser von 0,56 m wesentlich kleiner als die der Versuchstrommel BOKU. Der Froudebereich jener betrug von 0,01 bis 1.

5. Distanzmessung mittels Laser

Um Abflusshöhen einer Mure zu messen, können unter anderem optische elektronische Verfahren zum Einsatz kommen. Prinzipiell gibt es vier Methoden um mit Hilfe der Lasertechnik Distanzen zu messen (Hugenschmidt, 2007).

- Pulsmessverfahren
- Strahlenmodulationsverfahren
- Laser-Interferometrie
- Triangulationsverfahren (Baumer Holding AG, 2011)

Das Pulsmessverfahren ist ein Direktverfahren und es wird die Impulslaufzeit vom Sender zum Ziel und zurück zum Empfänger gemessen (Hugenschmidt, 2007). Zur Signalverarbeitungen werden üblicherweise mikroprozessorgesteuerte Verfahren eingesetzt. Es sind Entfernungsmessungen bis zu mehreren tausend km möglich. Die Messauflösungen sind von der zu messenden Distanz abhängig. Bei kurzen Distanzen sind inzwischen Messauflösungen von wenigen mm zu realisieren.

Eine weitere Möglichkeit der Entfernungsmessung sind die Strahlenmodulationsverfahren. Dabei wird eine Amplituden-, Phasen-, Frequenz-, oder Polarisationsmodulation einer zunächst kontinuierlichen Welle vorgenommen. Es wird die Phasenverschiebung der reflektierten Wellen gegenüber ihrer Anfangsphasenlage gemessen.

Bei der Laser-Interferometrie werden quantitative Aussagen über die relative Phasenlage von zwei oder mehreren Wellenfeldern getroffen. Es sind sehr hohe Auflösungen möglich.

Beim Triangulationsverfahren trifft der Laserstrahl auf das Messobjekt und wird von jenem remittiert (siehe Abbildung 12) (Baumer Holding AG, 2011). Der Empfänger, eine Fotodiodenzelle detektiert die Position des Punktes. Der Einfallswinkel wird gemessen und automatisch korrigiert, und dadurch wird die Distanz gemessen.

Masterarbeit

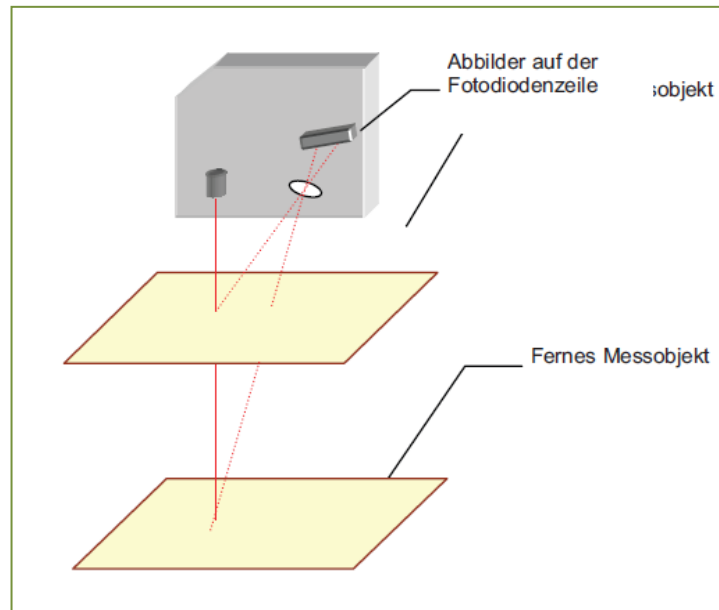


Abbildung 12: Lasersensor, Triangulationsprinzip (Baumer Holding AG, 2011).

6. Laborversuch

Da es zurzeit alleine auf Grundlage theoretischer Überlegungen, horizontale Anprallkräfte zu berechnen bzw. zu modellieren nicht möglich ist, ist es notwendig Laborversuche durchzuführen. Daher wurde eine Versuchsrinne im verkleinerten Maßstab gebaut. Mit dem Bau der Versuchsrinne, dem Versuchsmaterial, der Skalierung, sowie mit der Messtechnik befasst sich folgendes Kapitel.

Prinzipiell besteht die neigungsverstellbare Versuchsanlage aus vier Hauptkomponenten:

- dem Startbehälter,
- dem Öffnungsmechanismus,
- der Rinne und
- den Auffangbehältern.

Der Startbehälter, in welchem sich das Versuchsmaterial befindet, ist mittels einer Klappe von der Rinne wasserdicht getrennt. Nach der Betätigung des Öffnungsmechanismus findet durch ein schnelles Aufschwenken der Klappe ein simulierter „Dammbruch“ statt. Das Versuchsmaterial fließt die Rinne herunter und wird im Auffangbehälter aufgefangen. Dabei werden die Abflusstiefe, sowie die Frontgeschwindigkeit gemessen.

Um im Weiteren die gemessenen Werte im Modell auf die in der Natur umrechnen zu können, ist ein Maßstab notwendig. Die Froude'sche Ähnlichkeit ist für die physikalische Modellierung von Muren eine gute Ausgangslage für das Versuchsdesign (Weber, 2004). Um den Maßstabsfaktor (λ) zu bestimmen werden die gemessenen und bekannten Größen im Modell verwendet. Tabelle 6 zeigt Wertebereiche von verschiedenen Parametern natürlicher Muren auf einen Maßstab von $\lambda = 20$ skaliert. Das heißt, dass die im Labor gemessenen Werte in diesen Bereich liegen sollten. In Tabelle 7 sind die durchschnittlichen Werte jener Parameter der gültigen Versuche aufgelistet und mit dem Maßstabsfaktor $\lambda = 20$ über das Froude'sche Modellgesetz auf denen in der Natur entsprechenden Werte umgerechnet. Es wird hierbei zwischen den viskosen und granularen Versuchen unterschieden. Die mittlere Fließgeschwindigkeit, die Abflusstiefe und die Maximalabflüsse im Labor liegen im Bereich jener natürlicher Muren. Dagegen sind die Dauer und die Länge eines Murschubs im Labor kürzer als in der Natur.

Masterarbeit

Tabelle 6: Wertebereich Feld, Skalierungsfaktor und Felddaten skaliert auf Labormaßstab (Weber, 2004).

Parameter	Wertebereich Feld	Skalierungsfaktor	Felddaten auf Labormaßstab $\lambda=20$ skaliert	Einheit
Mittlere Fließgeschwindigkeiten	2-15	$v_r = \sqrt{L_r}$	0,45-3,35	[m/s]
Abflußtiefen	1-6	$L_r = L_N/L_M$	0,05-0,30	[m]
Maximalabflüsse	10-900	$Q_r = L_r^{5/2}$	0,0056-0,50	[m ³ /s]
Feststoffvolumina	100-200000	$V_r = L_r^3$	0,013-25,00	[m ³]
Dauer eines Murschubs	180-1800	$t_r = \sqrt{L_r}$	40,25-402,52	[s]
Länge eines Murschubs	300-3000	$L_r = L_N/L_M$	15-150	[m]

Tabelle 7: Durchschnittliche Laborwerte.

Parameter	Laborwerte Granular	Entsprechen in der Natur $\lambda=20$	Laborwerte viskos	Entsprechen in der Natur $\lambda=20$	Einheit
Mittlere Fließgeschwindigkeiten	1,37	6,13	1,18	5,28	[m/s]
Abflußtiefen	0,14	2,80	0,06	1,20	[m]
Maximalabflüsse	0,023	41,14	0,025	44,72	[m ³ /s]
Feststoffvolumina	0,20	1600	0,20	1600	[m ³]
Dauer eines Murschubs	13	58,14	12	53,67	[s]
Länge eines Murschubs	58,5	1170	54	1080	[m]

Durchführung Laborversuch

Zum Durchführen eines Laborversuches in der Versuchsrinne sind mehrere Schritte nötig (siehe Abbildung 13). Zuerst wird das Versuchsmaterial vorbereitet. Dabei werden das granulare und das viskose Versuchsmaterial aus verschiedenen Fraktionen prozentuell zusammengemischt. Beim viskosen Versuchsmaterial ist zusätzlich ein mehrtätiges Einsumpfen notwendig. Die Vorbereitung für den durchzuführenden Versuch, besteht aus einer Überprüfung der Messtechnik, das Versuchsmaterial in den Startbehälter transportieren, Wasserzugabe, sowie der Befeuchtung der Rinne. Weiteres wird die Rinne visuell auf eventuelle Undichtheiten kontrolliert. Anschließend folgt die Wassergehaltsbestimmung. Die Datenauswertung erfolgt mittels MatLab[®]. Die berechnete Froudezahl wird in Relation zum Wassergehalt gesetzt. Als letzter Schritt werden die Daten einer statistischen Auswertung unterzogen.



Abbildung 13: Versuchsablaufschema.

6.1 Versuchsaufbau

In Abbildung 14 sind die wesentlichen vier Teile der Versuchsanlage ersichtlich, der Startbehälter, der Öffnungsmechanismus, die Rinne und der Auffangbehälter.

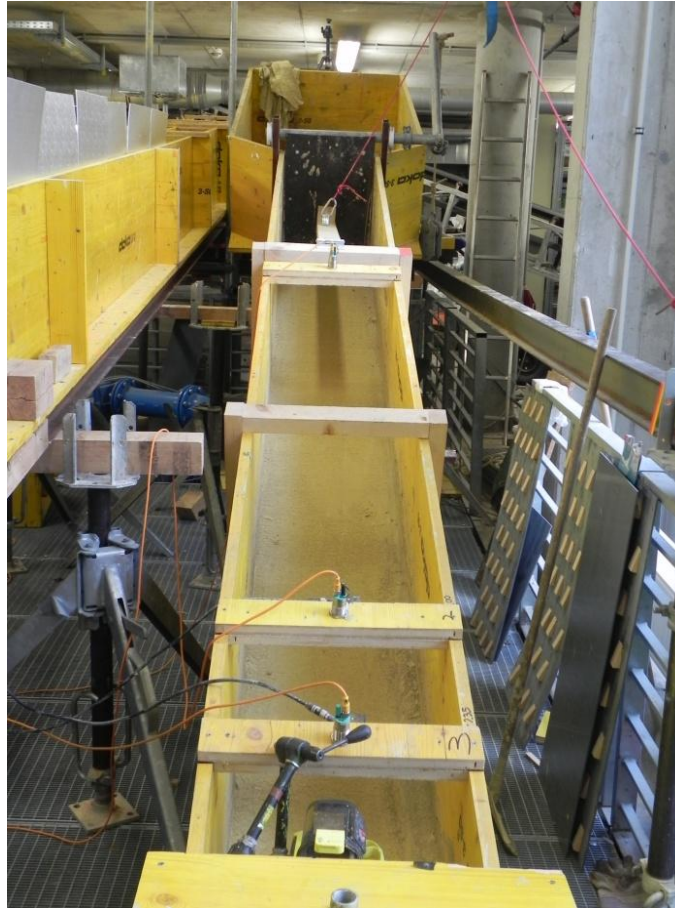


Abbildung 14: Übersichtsdarstellung der Laborrinne.

Die maßgebenden konstruktiven Einschränkungen bei der Bemessung der Versuchsanlage stellten die räumlichen Bedingungen dar. Letztendlich ergaben sich die Abmessungen von 7,5 m in der Länge und 0,95 m in der Breite der gesamten Versuchsanlage. Das Grundgerüst der Rinne besteht aus Doka GmbH Holzschalungsträger und Schalungsplatten. Um die Biegesteifigkeit zu erhöhen, und die Schwingungen möglichst gering zu halten, wurden maßgebliche konstruktive Elemente durch Stahlplatten verstärkt. Weiters sind um die Formstabilität des Rechteckgerinnes zu erhöhen bzw. zu gewährleisten drei Aussteifungsrahmen aus Kantholz angebracht. Um den Verlust von Wasser zu minimieren, wurde das physikalische Modell mit einem wasserfesten Klarlack lackiert und die Fugen mit Silikon abgedichtet. Die Versuchsrinne ist von 0% bis maximal 35% stufenlos verstellbar, dazu ist sie oben drehbar und unten höhenverstellbar gelagert.

In Abbildung 15 ist der Grund- und Aufriss, sowie die Anordnung der Messtechnik, der Versuchsrinne dargestellt. Der Startbehälter ist 2 m lang und weist eine Breite von 0,95 m auf. Zum Startmechanismus hin verjüngt sich dieser unter einem 45° Winkel auf den Fließquerschnitt der Rinne. Bei einer Rinnenneigung von 33% ist das maximale Volumen, welches der Startbehälter aufnehmen kann, $0,33 \text{ m}^3$.

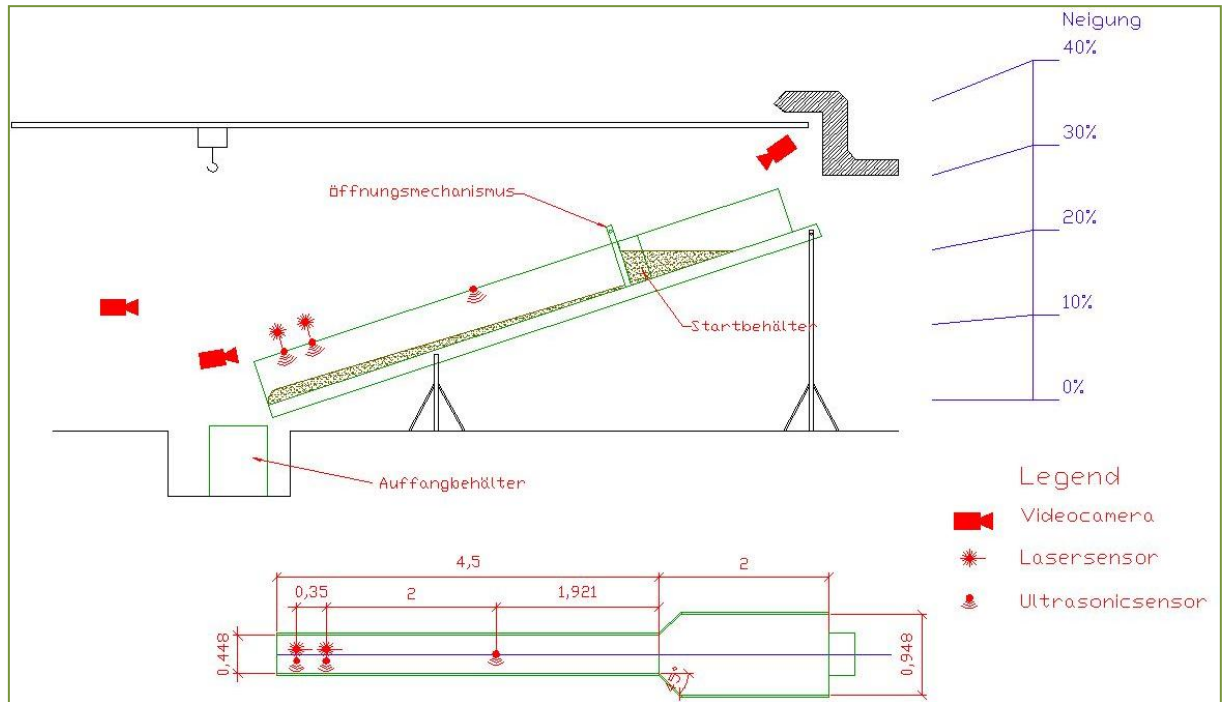


Abbildung 15: Grund- und Aufriss der Versuchsanlage.

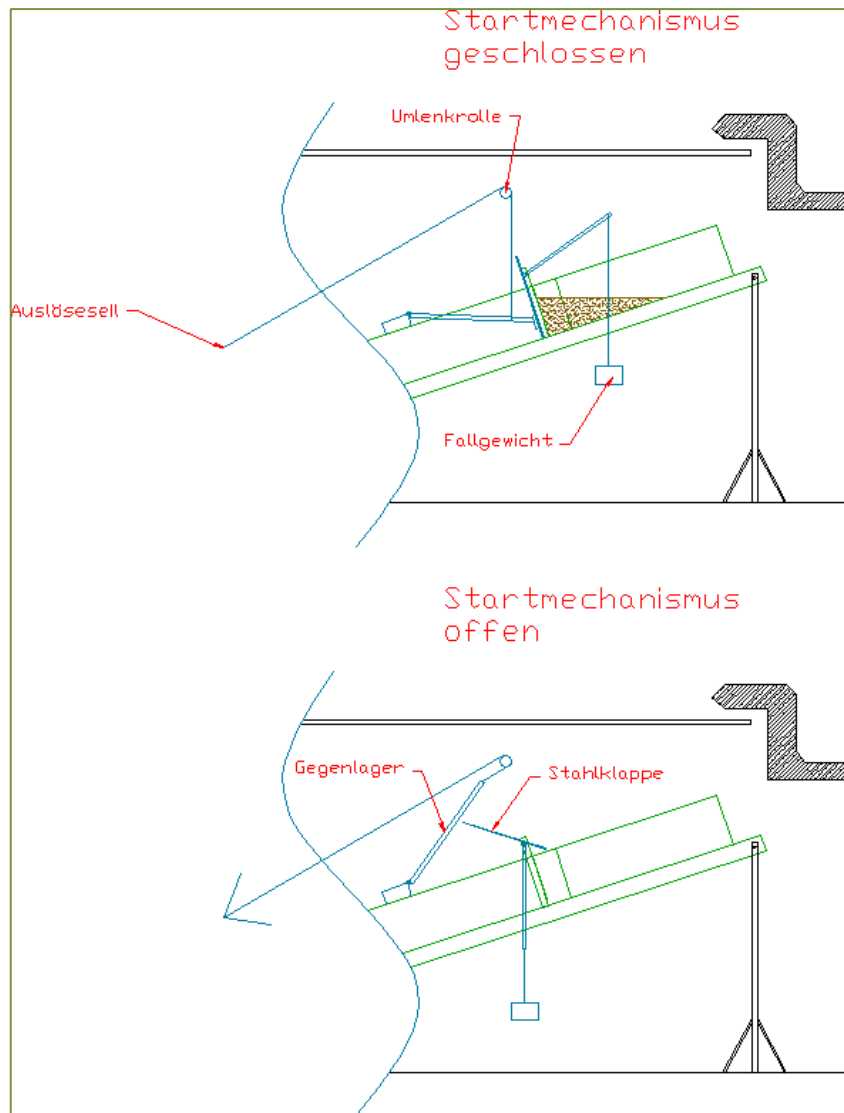


Abbildung 16: Detail Öffnungsmechanismus in geschlossener und offener Stellung.

Die Abdichtung des Startbehälters gegenüber der Rinne erfolgt über eine Stahlplatte, welche durch ein Gegenlager an eine Moosgummidichtung gepresst wird (Abbildung 16 und Abbildung 17). Die Stahlplatte ist oben drehbar gelagert. Im geschlossenen Zustand wirkt über einen Kragarm eine Gegenkraft, welche durch plötzliches Entfernen des Gegenlagers, die Stahlplatte in den geöffneten Zustand überführt. Dadurch wird eine Dammbuchsimulation erzeugt. Durch diese Konstruktion ist eine reproduzierbare und gleichbleibende Öffnungssituation vorhanden.



Abbildung 17: Detail Öffnungsmechanismus.

Der Messkanal hat eine Gesamtlänge von 4,5 m und eine Breite von 0,5 m. Der zur Verfügung stehende Fließquerschnitt ist ein Rechteckprofil mit den Abmessungen 0,45 m in der Breite und 0,5 m in der Höhe. Um Versuche mit unterschiedlichen Rauigkeiten ausführen zu können, sind austauschbare PVC-Platten, welche am Boden der Rinne fixiert werden, mittels Schrauben angebracht.

Am unteren Ende der Versuchsanlage befinden sich zwei Auffangbehälter aus Stahl, mit einem Volumen von je $0,30 \text{ m}^3$. Die Auffangbehälter werden gleichzeitig als Transportbehälter benutzt, um das Versuchsmaterial in den Startbehälter mittels eines Lastenkrans zu transportieren. Um das Entleeren zu vereinfachen, verfügen die Auffangbehälter über einen Schiebemechanismus auf der Unterseite.

Es sind insgesamt drei Messbrücken in der Rinne eingebaut (siehe Abbildung 15). Der Abstand zwischen den Messbrücken beträgt 0,35 m und 2 m. Die unteren zwei Messbrücken tragen je einen Laser- und einen Ultraschallsensor, die Oberste ist nur mit einem Ultraschallsensor bestückt. Um eine visuelle Auswertung zu ermöglichen,

Masterarbeit

sind drei analoge Videokameras an jeweils gleich bleibenden Orten und Aufnahmewinkeln an bzw. vor der Versuchsanlage angebracht.

6.2 Versuchsmaterial

Die Versuche wurden mit zwei verschiedenen Materialzusammensetzungen durchgeführt. Es gab folglich zwei Versuchsreihen:

- eine granulare Versuchsreihe
- und eine viskose Versuchsreihe.

In der folgenden Abbildung 18 sind die Sieblinien des verwendeten Versuchsmaterials für die zwei unterschiedlichen Szenarien dargestellt. Die viskose und die granulare Sieblinie entspricht einer typischen natürlichen Mure. Der Maximalkorndurchmesser ist bei beiden auf $d_{\max} = 63 \text{ mm}$ begrenzt. Der Feinanteil, sprich der Ton aus Stob, betrug 18 Gew.-% der Trockenmasse bei der viskosen Versuchsreihe. Diese 18 Gew.-% Feinmaterial wurden bei den granularen Versuchen nicht hinzugefügt. Die Versuchsmasse betrug bei beiden Versuchen 369,5 kg Trockenmasse zu Beginn der Versuchsreihen, wobei aber eine Abnahme durch Verluste, wie zum Beispiel durch Reinigen der Versuchsrinne oder durch Transportverluste zu beobachten war. Diese Gewichtsverluste wurden nicht quantifiziert und berücksichtigt.

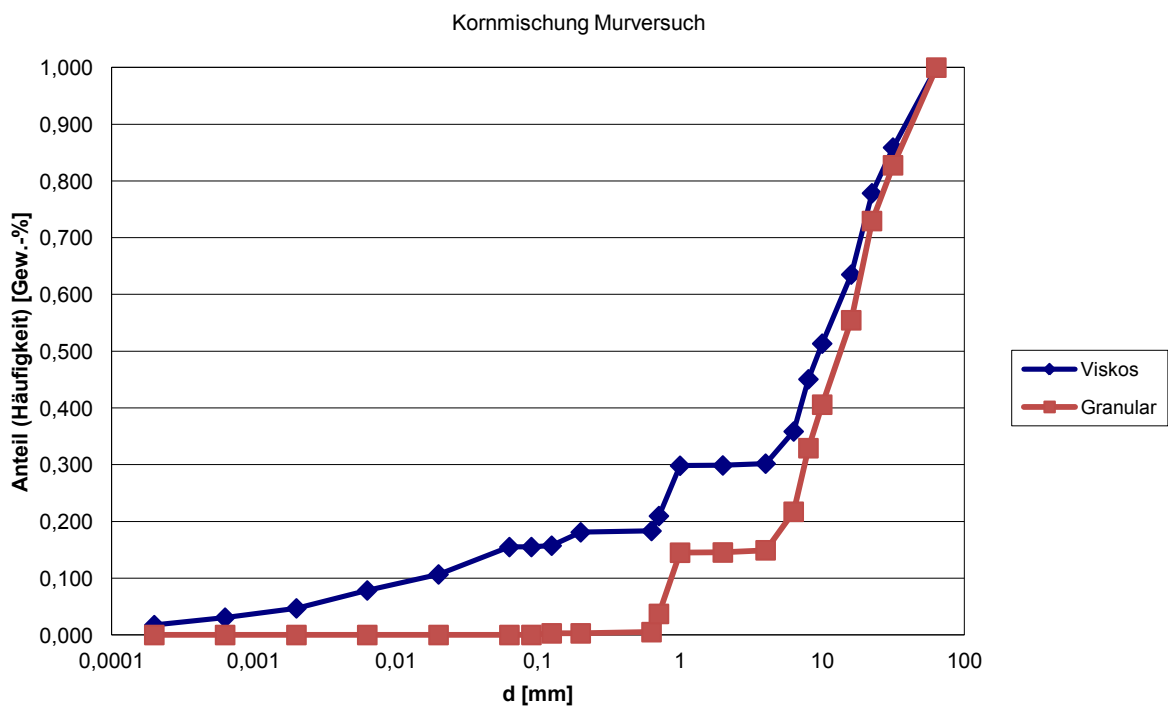


Abbildung 18: Kornverteilungslinien des Versuchsmaterials.

Granulares Versuchsmaterial

Das Versuchsmaterial, mit welcher der granulare Anteil der typischen Sieblinie für einen Murgang nachgebaut wurde, muss mehrere Anforderungen erfüllen. Zum einen muss das Material so geschaffen sein, dass eine Annäherung zu der gewünschten Sieblinie möglichst exakt ist, und zum anderen muss das Größtkorn begrenzt sein (Weber, 2004). Das Größtkorn muss an die Laborverhältnisse angepasst werden. Die Korngrößenverteilung könnte entsprechend den Modellversuchen im Flussbau geometrisch skaliert werden. Dies entspräche einer parallelen Verschiebung der Siebkurven nach links. In Abbildung 19 sind die Sieblinien der einzelnen verwendeten Kornfraktionen abgebildet. Bei den Fraktionen des Rundkorns handelt es sich um kalkfreie, einfach gewaschene Gesteine (SCHERF, 2011). Die Schüttdichten betragen zwischen 1600 kg/m^3 und 1750 kg/m^3 . Das Bruchkorn besteht aus Schöckel Kalkgestein mit einer Schüttdichte von 1800 kg/m^3 .

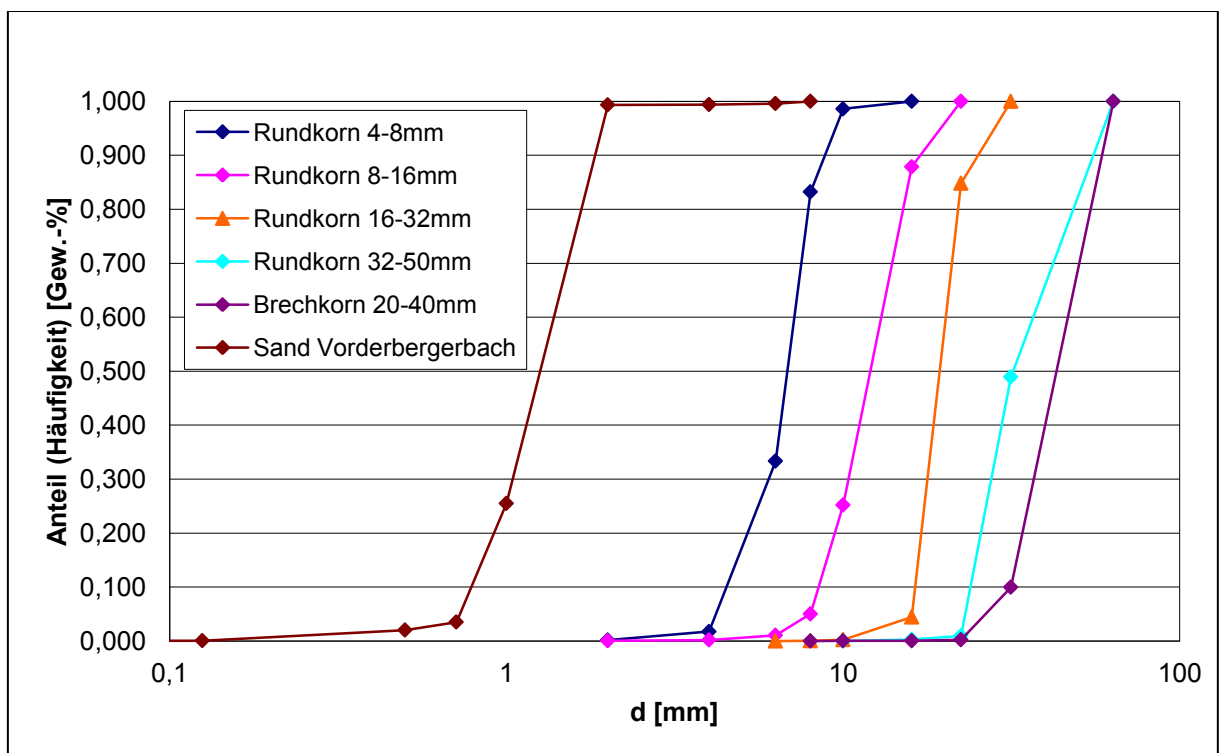


Abbildung 19: Sieblinien Grobkomponenten.

Viskoses Versuchsmaterial

Hierbei handelt es sich um einen feinkörnigen, grauen Ton welcher aus der Marktgemeinde Stooß, Mittelburgenland, stammte (Ottner, 2010). Die Aggregate des Tons sind mit ockerfarbigen Überzügen umgeben. Die Gesamtmineralanalyse erfolgte mittels eines Röntgendiffraktometers, wobei die Mineralphasen qualitativ und semiquantitativ erfasst wurden. Zusätzlich wurden an einigen Proben thermoanalytische Messungen durchgeführt. Durch eine Kombination von Naßsiebung der Fraktionen $>20\text{ }\mu\text{m}$ und automatischer Sedimentationsanalyse wurde die Korngrößenverteilung ermittelt. In Abbildung 20 ist die Sieblinie des Stooßer Tones dargestellt.

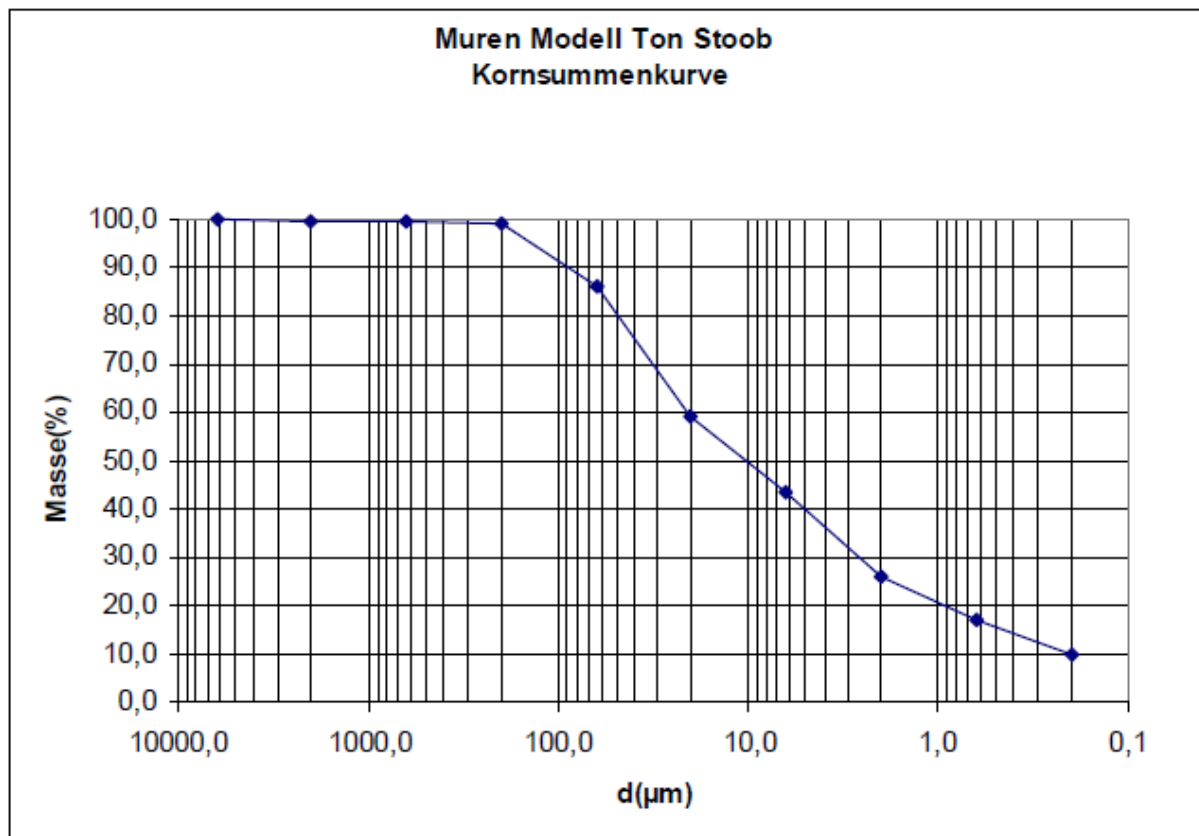


Abbildung 20: Sieblinie Stooßer Ton (Ottner, 2010).

In der folgenden Tabelle 8 ist die gesamtmineralogische Zusammensetzung des Stooßer Tons ersichtlich. Die Schichtsilikate sind mit 61% dominierend. Neben den weiteren Hauptkomponenten Glimmer und Tonminerale, konnten Quarz mit 31%, Plagioklas-Feldspat mit 8% sowie Spuren von Eisenoxid nachgewiesen werden. Muskowit bildet das Hauptmaterial vom Glimmermineral.

Tabelle 8: Gesamtmineralogische Zusammensetzung; Angaben in Masse % (Ottner, 2010).

IAG Lab.-Nr.	Bezeichnung.	Quarz	Schichtsilikate	Feldspat	Goethit	Pyrit
10880	Stoob	31	61	8	Sp	-

Bei der tonmineralogischen Zusammensetzung (siehe Tabelle 9) bildet den Hauptanteil mit 53% das quellfähige Tonmineral Smektit. In gut auskristallisierter Form sowie in schlecht auskristallisierter Form, sogenannter Fireclay, ist Kaolinit mit 24% vorhanden. Als nicht quellfähiges Tonmineral ist Illit vorhanden. Der effektive Smektitgehalt liegt bei 14% (Ottner, 2010).

Tabelle 9: Tonmineralogische Zusammensetzung der Tonfraktion (<2µm); Angaben in Masse% (Ottner, 2010).

IAG Lab.-Nr.	Bezeichnung.	Smektit	Illit	Kaolinit + Fireclay	Chlorit	Mixed layer
10880	Stoob	53	22	24	0	0

Vorbereitung und Wassergehaltsbestimmung des Versuchsmaterials

Die Vorbereitung und Bestimmung des Wassergehaltes des Versuchsmaterials erfolgte bei den zwei verschiedenen Versuchsanordnungen auf unterschiedliche Weisen. Bei der granularen Versuchsreihe wurde das Versuchsmaterial nach Gewichtsprozent zusammengestellt. Die zugegebene Wassermenge wurde über einen vorher geeichten Messbehälter direkt im Startbehälter hinzugefügt, quantifiziert und dadurch die Gewichtsprozent des Wasseranteils berechnet. Bei der viskosen Versuchsreihe wurde der prozentuale Anteil des Stoober Lehms über mehrere Tage eingesumpft um die Masse zu homogenisieren und die quellfähigen Tonminerale mit Wasser zu sättigen. Anschließend erfolgte die Zusammensetzung nach Gewichtsprozent mit dem granularen Versuchsmaterial. Nach jedem viskosen Versuch erfolgte eine sofortige Stichprobenentnahme, um den Wassergehalt in Gew.-% zu bestimmen.

6.3 Messtechnik und Auswertung

Um die Abflusstiefen in Abhängigkeit der Zeit erfassen zu können, wurden drei Ultraschallsensoren und zwei Lasersensoren senkrecht zur Gerinnesohle eingebaut.

Die Lasersensoren sind Produkte der Firma Baumer Holding Ag (Baumer Holding AG, 2011). Die Messungen erfolgten Punktweise mit einem Strahldurchmesser von 2 mm. Die Distanzmessung basiert auf dem Triangulationsprinzip (siehe Kapitel Distanzmessung mittels Laser).

Bei den Ultraschallsensoren handelt es sich um Produkte der Firma Pepperl und Fuchs GmbH (Pepperl und Fuchs GmbH, 2009). Es handelt sich um Einkopfsysteme, wobei der Sensor nacheinander als Sender und Empfänger arbeitet (Pepperl und Fuchs GmbH, 2003). Die Entfernung wird über die Laufzeitdifferenz eines Ultraschallpaketes gemessen. Der Ultraschallsensor misst nicht punktweise sondern in einem bestimmten Messkegel (siehe Abbildung 25).

Die Messgeschwindigkeit beträgt bei den Ultraschall- sowie den Lasersensoren 800 Hertz. Die gesamte Systemkonditionierung, Verstärkung und Speisung der Sensoren, Digitalisierung und das Rechnerinterface erfolgte über einen Datenlogger der Firma HBM Messtechnik. Die Messwerte wurden während der Versuche mit Hilfe des Programmes CATMAN 6.0 aufgezeichnet.

Die Auswertung der aufgezeichneten Daten erfolgte mittels einer MatLab[®] Routine. Die Eingangsparameter stellten die Messkurven der drei Ultraschallsensoren und die zwei Messkurven der Lasersensoren in Abhängigkeit der Zeit dar, welche im ASCII Dateiformat tabellarisch aufgezeichnet wurden. Da der Verdacht von Ausreißern bestand und eine asymmetrische Verteilung vorlag wurden von einer ungeraden Anzahl von Messwerten der Median gebildet (Sachs, 2006). Die Anzahl der Messwert pro Medianpunkt betrug 63 Datenpunkte. Wenn nun der Wert der so geglätteten Kurven eine definierte Höhe überschritt, wurde an dieser Stelle die Zeit genommen (siehe Abbildung 22, welche exemplarisch einen Versuch der granularen Versuchsreihe darstellt).

In der folgenden Abbildung 22 sind die geglätteten Messkurven der Ultraschallsensoren ersichtlich. Die Werte der Lasersensoren wurden aufgrund der vielen Ausreißer für eine weitere Auswertung nicht verwendet. Sie dienten jedoch zur visuellen Kontrolle der Auswertung der Ultraschallsensoren.

Wie in Abbildung 22 ersichtlich, stellten die Abflusshöhen, welche für die Berechnung der Froudezahlen verwendet wurden, die maximalen Werte der geglätteten Kurve dar. Durch die Zeitdifferenz des Durchganges der Murwelle an den Messstellen erfolgte die Berechnung der Geschwindigkeit der Front. Aus den Geschwindigkeiten der Versuchsfront und die maximalen Abflusshöhen der bereinigten Messkurven wurden die Froudezahlen der einzelnen Versuche berechnet. Die Froudezahlen jener Versuche, welche einen nachvollziehbaren und ähnlichen Versuchsablauf hatten, wurden für die viskose und granulare Versuchsreihe auf der Ordinate aufgetragen (siehe Abbildung 42 und Abbildung 43). Dies erfolgte in Abhängigkeit des jeweiligen Wassergehaltes, welcher auf der Abszisse aufgetragen wurde. Für den untersuchten Bereich wurde die Modellannahme der linearen Regression zu Grunde gelegt (Fahrmeir et al., 2009).

In der Abbildung 21 ist der zeitliche Verlauf der Rohdaten als gemessene Abflusshöhen aller fünf Messsensoren dargestellt. Der auf der Abszisse aufgetragene Punktindex entspricht der Messfrequenz. Hier entsprechen 800 Punkte einer Sekunde. Bei den Daten handelt es sich um einen typischen Versuch der granularen Versuchsreihe.

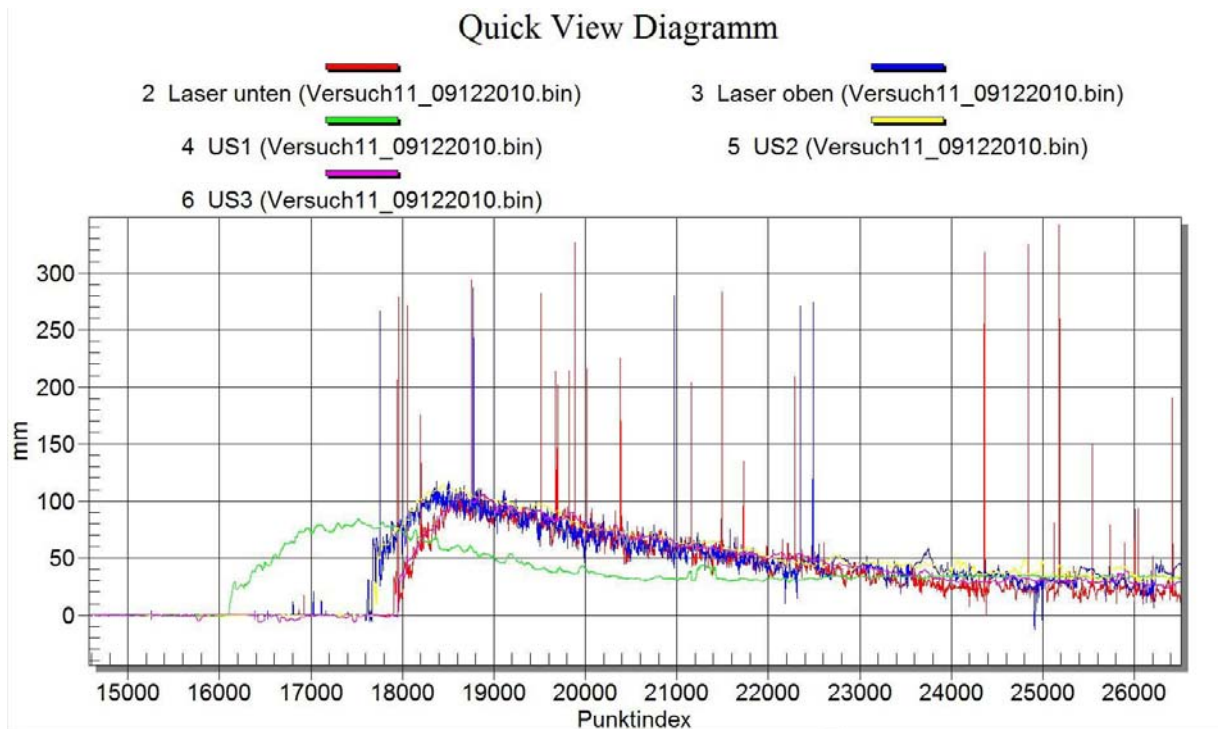


Abbildung 21: Darstellung der zeitlichen Verteilung der Abflusshöhen, Versuch 11 granular.

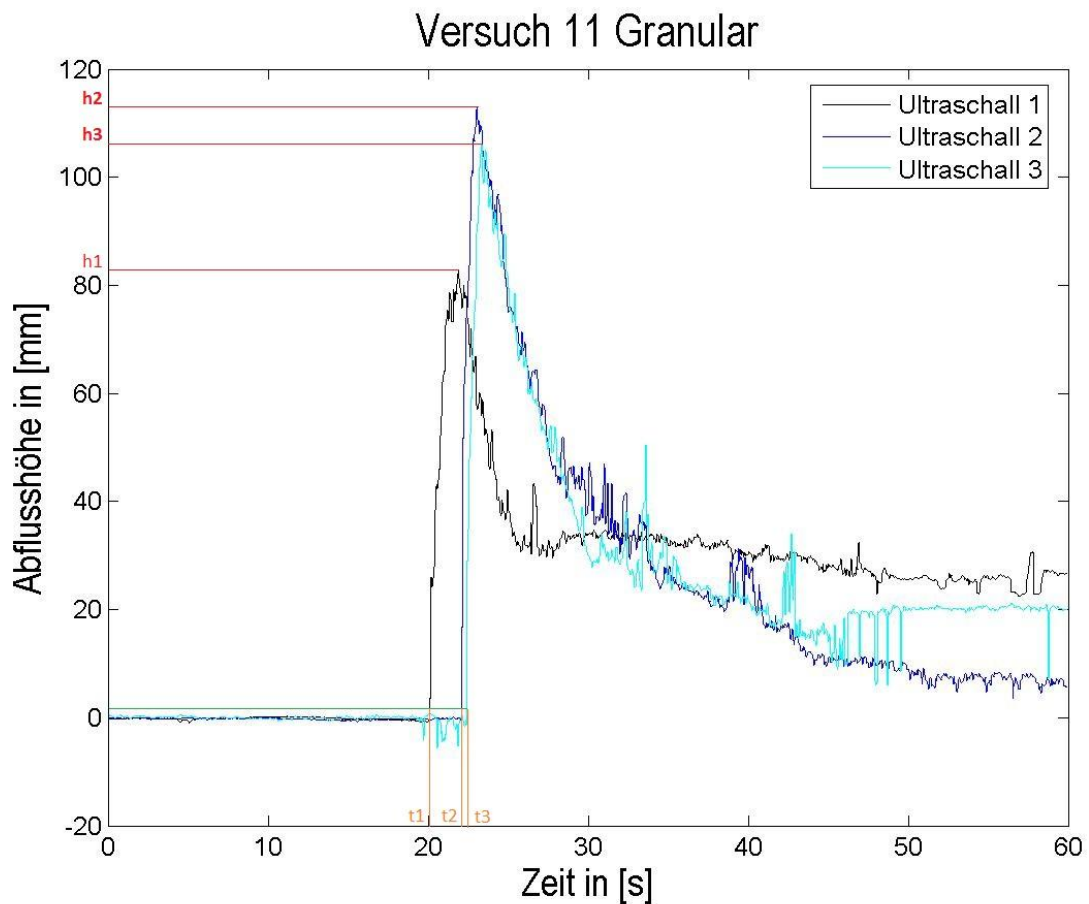


Abbildung 22: Darstellung der geglätteten Daten Versuch 11 granular.

Vergleich Ultraschallsensoren mit Lasersensoren

Die zwei unterschiedlichen Typen der Abstandsmesssensoren reagierten jeweils unterschiedlich auf die zu messende Oberflächen. Um das verschiedene Verhalten der Lasersensoren und der Ultraschallsensoren quantifizieren zu können, wurden die Daten einer statistischen Auswertung mittels MatLab[®] unterzogen. Die originalen Messdaten welche in Abbildung 23 grün dargestellt sind, wurden mittels eines gleitenden Mittelwerts geglättet. Die geglättete Messkurve ist blau dargestellt. Das Anwendungsfenster betrug 63 Messwerte. Die originalen Messdaten wurden anschließend von der geglätteten Funktion abgezogen, und ergaben somit die Residuen, welche rot dargestellt sind. Um die Anschaulichkeit zu verbessern, wurden die Residuen quadriert. In Abbildung 24 sind die quadrierten Residuen dargestellt, wobei blau und grün die Residuen der Lasersensoren sind, und rot, türkis und violett jene der Ultraschallsensoren. Ausgehend von diesen quadrierten Residuen wurden für jeden gültigen Versuch der arithmetische Mittelwert sowie die 0,75 Quartil der Residuen der einzelnen Sensoren für jeden gültigen Versuch errechnet. Ausreißer werden oft als Werte definiert, welche nicht in den Erwartungsbereich fallen (Wikipedia, 2011). Dieser Erwartungsbereich können die 0,25 und 0,75 Quartil sein. Für die auf Ausreißer verdächtigen Werte ist nur mehr die 0,75 Quartil maßgebend. Die 0,75 – Quartile gibt Auskunft über die Größe der Werte im oberen Viertel der Verteilung (Sachs, 2006). Der Mittelwert zeigt wie hoch das mittlere Rauschen der Sensoren ist.

Masterarbeit

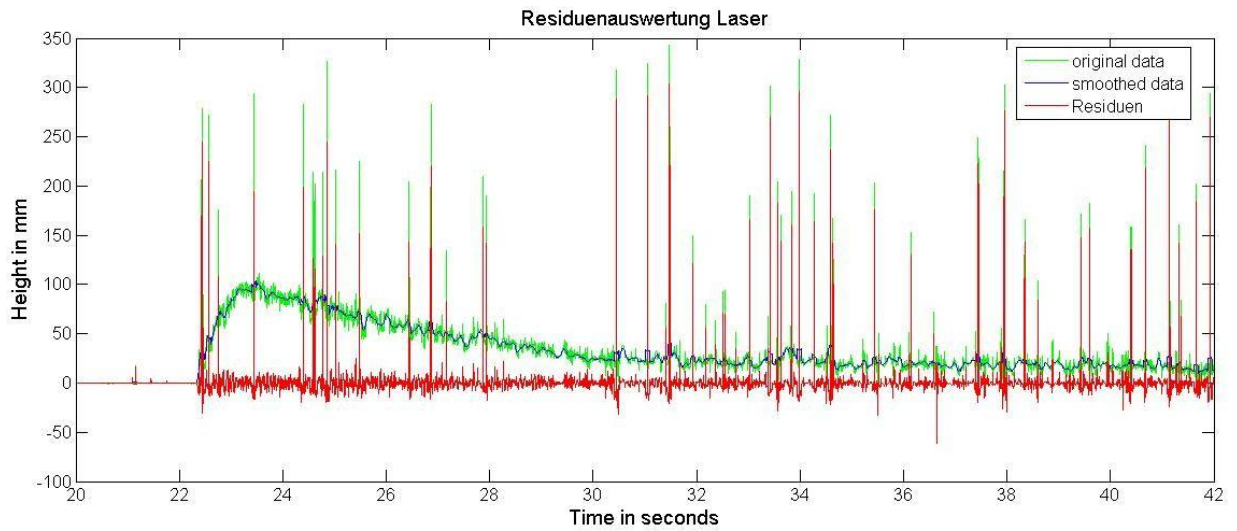


Abbildung 23: Residuenauswertung Versuch 11 des Laser 1, original Kurven, geglättete Kurven, Residuen.

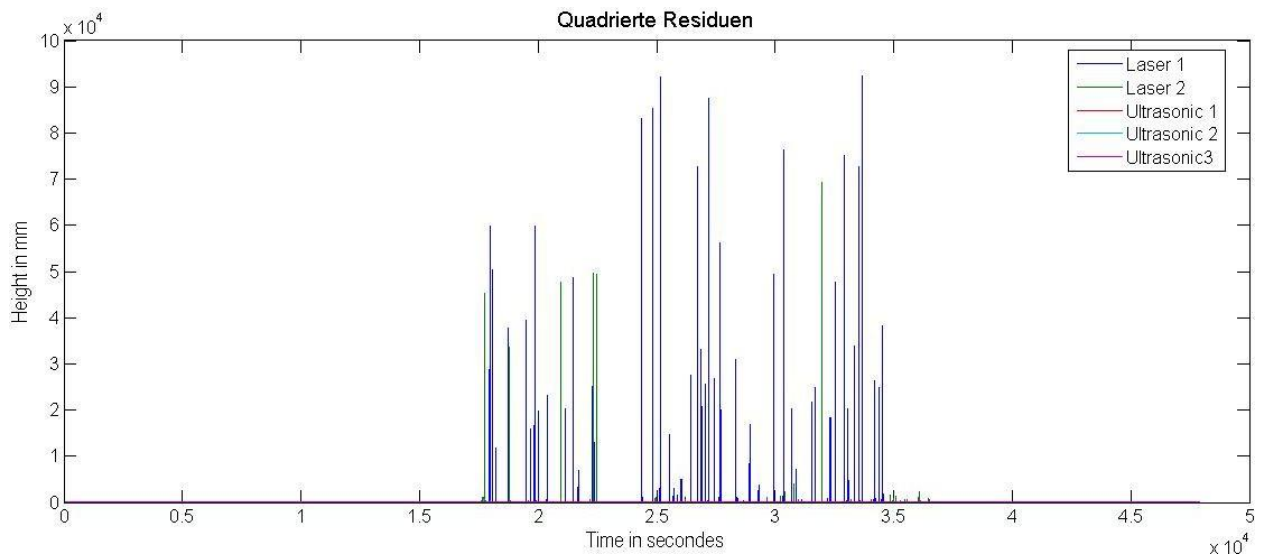
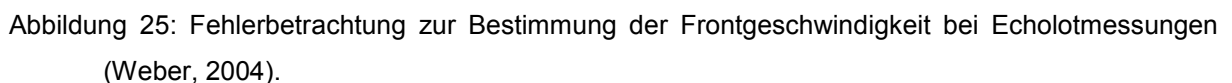


Abbildung 24: Quadrierte Residuen Versuch 11, Laser- und Ultraschallsensoren.

Seite 52

Die Lasersensoren haben einen Erfassungsbereich von 0,1 m bis 0,6 m mit einer Auflösung von 0,15 mm bis 0,67 mm (Baumer Holding AG, 2011). Die Linearitätsabweichung beträgt von 0,05 mm bis 2,00 mm. Je geringer die Messdistanz, desto geringer ist diese Abweichung.



Die Lasersensoren haben einen Erfassungsbereich von 0,1 m bis 0,6 m mit einer Auflösung von 0,15 mm bis 0,67 mm (Baumer Holding AG, 2011). Die Linearitätsabweichung beträgt von 0,05 mm bis 2,00 mm. Je geringer die Messdistanz, desto geringer ist diese Abweichung.

6.5 Versuchsdurchführung

Insgesamt wurden 27 granulare und 15 viskose Versuche durchgeführt. Die Abbildung 26 stellt eine Übersicht der Zusammensetzung des Versuchsmaterials in einem 3 Phasen Diagramm dar. Auf den 3 Achsen des Phasendiagramms ist der Wasseranteil, der granulare Anteil und der viskose Anteil aufgetragen. Der viskose Anteil ist als Anteil des Stoober Tons definiert. Der granulare Anteil stellt das Versuchsmaterials aus dem Sand vom Vorderbergerbach, dem Rundkorn aller Fraktionen sowie den Bruchkorn dar. Das folgende Kapitel wird in einen granularen und einen viskosen Teil unterteilt.

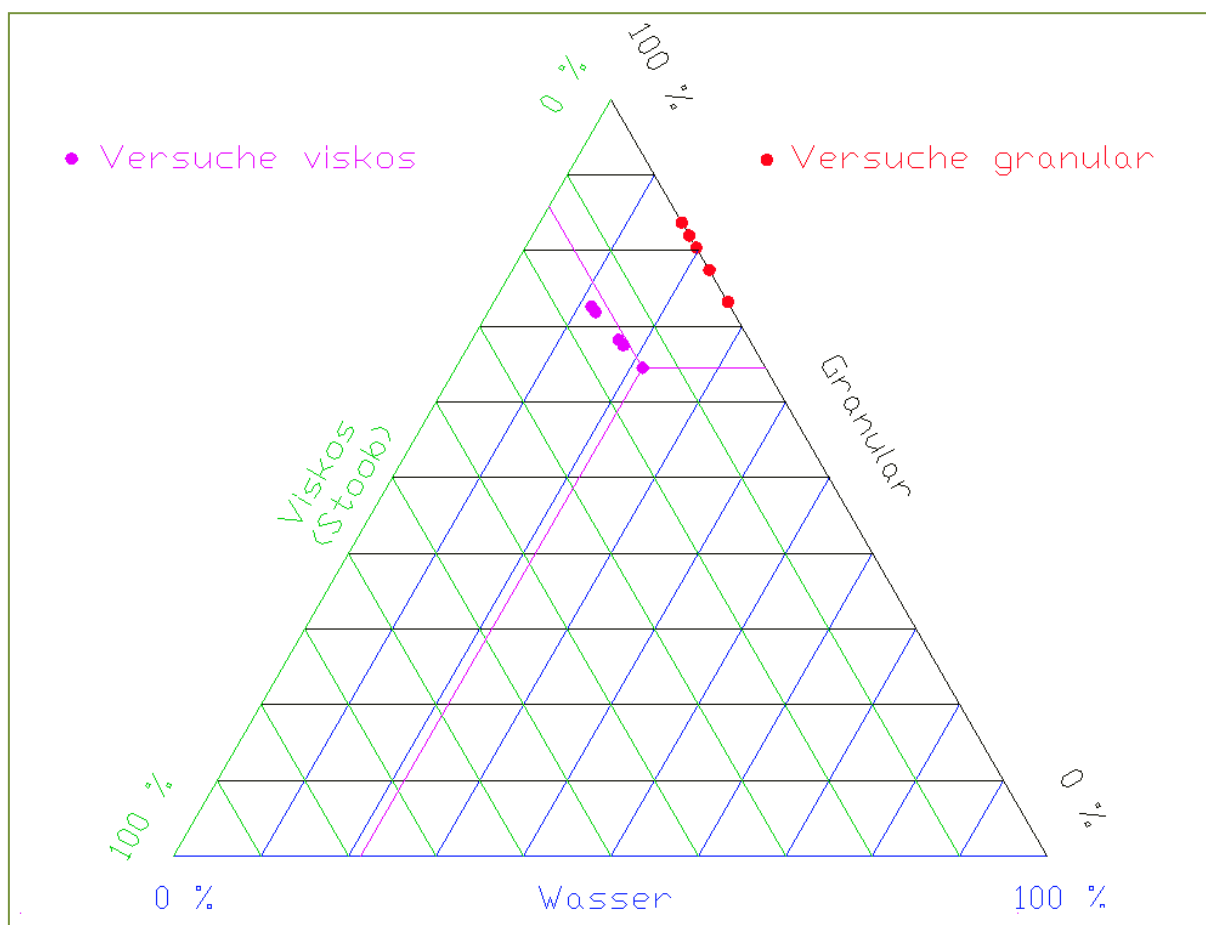


Abbildung 26: 3 Phasen Diagramm Versuchsmaterial.

6.5.1 Granulare Versuchsreihe

Abbildung 27 zeigt das trockene granulare Versuchsmaterial im Startbehälter, wobei der Unterschied zwischen Rundkorn und Bruchkorn sehr gut zu erkennen ist. Einen Überblick über die granulare Versuchsreihe gibt Tabelle 10. In fortlaufender nummerierter Reihenfolge sind zu jedem Versuch die drei wichtigsten Randbedingungen beschrieben. Dabei handelt es sich um die Neigung, die Rauigkeit des Gerinnebodens, und die Startanordnung des Versuchsmaterials. Weiteres sind zu jedem Versuch die Frontgeschwindigkeiten und Froudezahlen zwischen den Sensoren 1 und 2, sowie 2 und 3 ersichtlich. Die in Klammer geführten Werte wurden nicht mit der MatLab© Routine ermittelt, sondern wurden manuell ausgewertet. Bei vielen Versuchen ist die Froudezahl bzw. Frontgeschwindigkeit zwischen den zwei Messabschnitten unterschiedlich. Dadurch ist von keinem konstanten Abflussverhalten auszugehen. Zusätzlich ist in Tabelle 10 die maximale Höhe der einzelnen Murfronten aufgelistet.



Abbildung 27: Granuläres Versuchsmaterial im Startbehälter.

Masterarbeit

Tabelle 10: Versuchsliste Granular.

Versuchsnummer	Neigung	Rauigkeit	Startanordnung	Froude US1US2	Froude US2US3	v_US1 US2	v_US2 US3	Max. Höhe
[/]	[%]	[/]	[/]	[/]	[/]	[m/s]	[m/s]	[mm]
1	31	Doka-Platten	angehäuft	(3,0)	(1,1)	(2,3)	(0,4)	(50,0)
2	31	Doka-Platten	WSP	4,3	4,6	3,0	2,8	39,0
3	31	PVC Platten, Hartholzkeile	angehäuft	1,9	0,3	1,8	0,3	80,4
4	31	PVC Platten, angeschliffen	angehäuft	4,6	4,7	3,2	3,3	48,5
5	31	PVC-Platten, Halbrundleisten	angehäuft, max.	1,9	2,0	1,7	1,6	67,5
6	31	PVC Platten, Halbrundleisten, Hartholzkeile	angehäuft, max.	1,7	1,2	1,5	0,9	67,1
7	31	PVC Platten, Halbrundleisten, Halbrundleisten	angehäuft, max.	1,7	1,4	1,3	1,1	60,9
8	31	PVC Platten, Halbrundleisten, Halbrundleisten	WSP	2,1	2,3	1,7	1,7	56,9
9	31	PVC Platten, Halbrundleisten, Halbrundleisten	angehäuft	1,7	1,6	1,4	1,3	62,4
10	31	PVC Platten, Sand	WSP	1,9	3,1	1,8	2,7	81,2
11	27	PVC Platten, Sand	Standard	1,0	1,0	1,0	1,1	109,6
12	27	PVC Platten, Sand	Standard	1,2	1,2	1,1	1,0	76,6
13	27	PVC Platten, Sand	Standard	2,0	2,2	1,6	1,7	65,5
14	27	PVC Platten, Sand	Standard	0,8	1,0	0,9	1,0	109,6
15	27	PVC Platten, Sand	Standard	0,3	0,4	0,2	0,2	25,9
16	27	PVC Platten, Sand	Standard	0,6	0,3	0,7	0,3	118,3
17	27	PVC Platten, Sand	Standard	2,1	0,2	2,0	0,2	85,4
18	27	PVC Platten, Sand	Standard	2,1	1,4	1,8	2,0	207,4
19	27	PVC Platten, Sand	Standard	0,8	0,8	1,0	1,0	166,2
20	27	PVC Platten, Sand	Standard	0,8	0,8	1,0	1,0	164,3
21	27	PVC Platten, Sand	Standard	1,0	1,1	1,5	1,6	239,8
22	27	PVC Platten, Sand	Standard	1,5	1,3	1,5	1,8	210,3
23	27	PVC Platten, Sand	Standard	1,1	0,9	1,1	0,9	101,6
24	27	PVC Platten, Sand	Standard	1,5	1,5	1,4	1,4	88,6
25	27	PVC Platten, Sand	Standard	1,9	2,4	1,7	2,2	84,6
26	27	PVC Platten, Sand	Standard	1,7	1,7	1,5	1,6	84,0
27	27	PVC Platten, Sand	Standard	1,4	1,8	1,4	1,8	94,8

Wassergehalt

In Abbildung 28 ist der Wassergehalt in Gewichtsprozent (Gew.-%) der einzelnen granularen Versuche dargestellt. Da der Wassergehalt über ein geeichtes Messgefäß bestimmt wurde, weisen einige Versuche den gleichen Wassergehalt auf. Somit ist die Reproduzierbarkeit des Wassergehaltes der einzelnen Versuche gegeben.

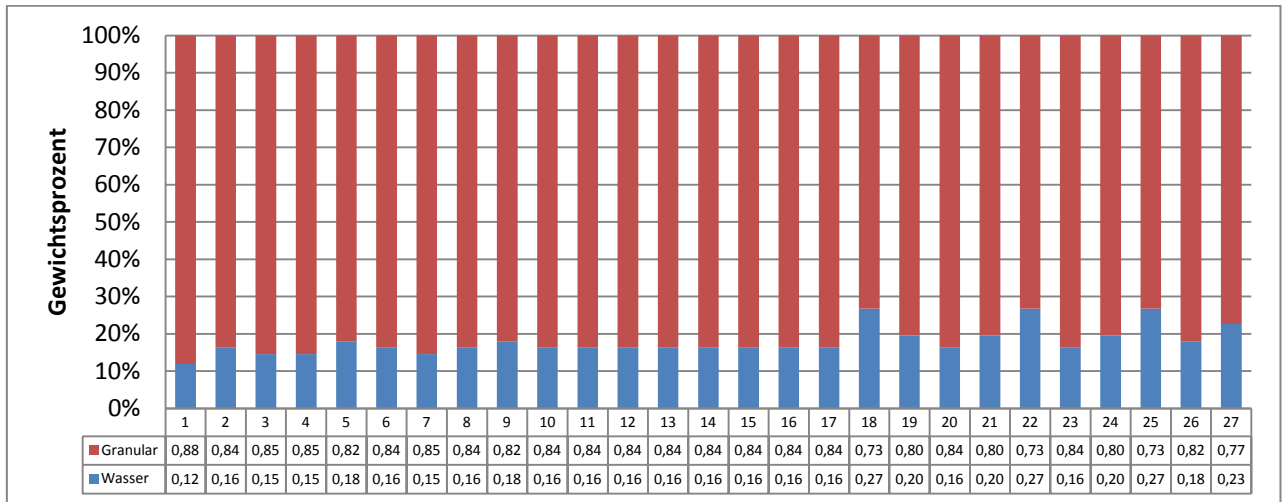


Abbildung 28: Granular – Wasser – Verhältnis.

Gerinneneigung

Die Versuche 1 bis 10 wurden bei einer Gerinneneigung von 31% und die Versuche von 11 bis 27 mit 27% Gerinneneigung durchgeführt. Grund für die Reduzierung der Gerinneneigung waren die zu hohen Froudezahlen der einzelnen Versuche.

Startanordnung

In den Abbildung 29 sind verschiedene Anordnungen des granularen Versuchsmaterials im Startbehälter dargestellt. Abbildung 29a) zeigt eine Startanordnung in der das Versuchsmaterial mittig bis zur maximal möglichen Höhe angehäuft ist und seitlich stark abfällt. Abbildung 29b) zeigt eine Startanordnung in der das Versuchsmaterial an den Wasserspiegel angepasst ist. In der Abbildung 29c) ist die Standard Startanordnung ersichtlich. Das Versuchsmaterial ist mittig leicht angehäuft und fällt seitlich mit einen konstanten Böschungswinkel ab. Ab Versuch 11 wurden alle granularen Versuche mit dieser Startanordnung durchgeführt.

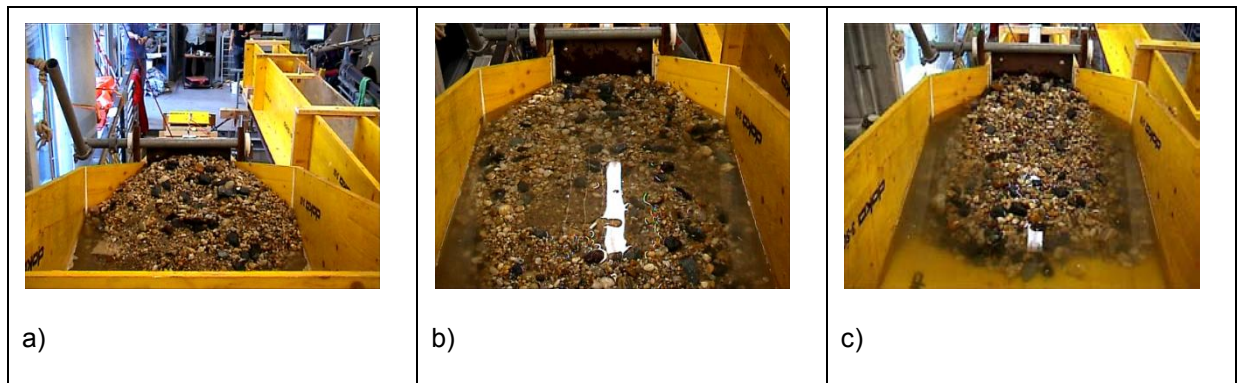


Abbildung 29: Verschiedene Startanordnungen a) Mittig maximale Anhäufung, stark seitlich abfallend
b) Versuchsmaterial auf Wasserspiegel ausgerichtet c) Standardstartanordnung, leichte Anhäufung mittig, seitlich leicht abfallend.

Im Folgenden werden die einzelnen Versuche erörtert, wobei die Einteilung nach der Bodenrauigkeit bzw. Einbauten in der Versuchsrinne erfolgt. Der Wassergehalt der einzelnen Versuche ist Abbildung 28 zu entnehmen.

Versuche 1 und 2

Die Bodenrauigkeit bei den Versuchen 1 und 2 stellte die Oberfläche der DOKA Schalltafeln dar (siehe Abbildung 30 a). Die Frontgeschwindigkeiten lagen zwischen 2 – 3 m/s bei einer Abflusshöhe zwischen 0,04 und 0,05 m. In der Abbildung 30 ist der Versuch 2 bildlich dargestellt. Abbildung 30b) zeigt die Versuchsrinne 0,7 s nach Betätigung des Öffnungsmechanismus und Abbildung 30c) nach 1,26 s. Nach der sichtlich trockenen Front nimmt die Abflusshöhe ab mit gleichzeitiger Erhöhung des Wasseranteils. Dieser Phase folgt eine weitere Abnahme der Fließhöhe mit gleichzeitiger Abnahme der Korngröße. Nach 20 s ist kein Geschiebetransport mehr ersichtlich.



Abbildung 30: Versuch 2 Rinne 26a) bis 26c) chronologische Abfolge des Versuchs 2.

Versuche 3 bis 10

Die Versuche 3 bis 9 wurden mit verschiedenen Bodenrauigkeit und Startanordnungen durchgeführt. Ziel dieser Versuche war es, geringere Froude Zahlen zu erhalten. Außerdem das Abflussverhalten aufgrund des Wassergehaltes des Versuchsmaterials, der Gerinneneigung sowie der Bodenrauigkeit reproduzierbar zu machen. Im Folgenden werden einige ausgesuchte Versuche beschrieben.

Abbildung 31a) zeigt die Bodenrauigkeit von Versuch 3. Hier wurden Hartholzkeile auf den Bodenplatten symmetrisch angeordnet. Es bildete sich eine trockene Front heraus, gefolgt von Versuchsmaterial mit höherem Wassergehalt. Nach Ablauf des Wassers war die Versuchsrinne vollständig bis zu 0,11 m mit Versuchsmaterial überdeckt. Nur wenig Versuchsmaterial erreichte die Auffangbehälter.

Abbildung 31b) zeigt die Bodenrauigkeit von Versuch 4. Hier wurde die PVC Bodenplatte angeschliffen. Dieser Versuch ergab eine Froudezahl von 4,7 somit die höchste der gesamten Versuchsreihe. In der Versuchsrinne blieb fast kein Versuchsmaterial zurück. Nach passieren des Versuchsmaterials folgte noch ein Reinwasserabfluss von wenigen Millimetern.

Bei Versuch 5 wurden drei Halbrundleisten an den angeschliffenen PVC Platten angebracht (siehe Abbildung 31c). Beim Auftreffen der Murfront an den Halbrundholzschwellen entstanden Wellen. Der Wasseranteil nahm mit Ablaufdauer zu. Die maximale Höhe der Murfront war bei der Messstelle 1 größer 0,35 m.

Die Versuche 6 bis 9 hatten als Bodenrauigkeit eine Kombinationen aus dem vorausgegangen Versuchen, wobei die Froudezahlen zwischen 1,2 bis 2,3 lagen und die Abflusshöhen bei 0,06 m.



Abbildung 31: verschiedene Bodenrauhigkeit a) Bodenplatte mit Hartholzkeilen b) Bodenplatte PVC angeschliffen c) Bodenplatte PVC angeschliffen und drei Halbrundhölzer über die gesamte Breite.

Versuch 10

Auf den PVC Bodenplatten war mittels Epoxidharz Sand aus dem Vorderbergerbach (Sieblinie siehe Abbildung 19) aufgebracht. Diese Bodenrauhigkeit ist bei allen folgenden Versuchen verwendet worden. Die Froudezahl zwischen den Messbrücken 2 und 3 betrug bei diesem Versuch 3,1. Um bei den folgenden granularen Versuchen geringere Froudezahlen zu erhalten, wurde die Gerinneneigung auf 27% reduziert.

Versuche 11 bis 13 und 23 bis 27

Diese Versuche wurden mit einem gleich bleibenden Versuchsssetup durchgeführt. Das heißt, die Gerinneneigung, die Bodenrauhigkeit und die Startanordnung wurden bei jedem dieser Versuche möglichst konstant gehalten. Folgende Versuche mit den Versuchsnummern wurden als ungültig definiert: 12,13,14 und 16. Auf diese Versuche wird nicht weiter eingegangen.

In Abbildung 32, ist ein typischer granularer Versuch dargestellt. Abbildung 32a zeigt die Rinne mit befeuchteter Bodenrauhigkeit im geschlossenen Zustand. Kurz nach Betätigung des Öffnungsmechanismus bildete sich eine relativ trockene Murfront aus (siehe Abbildung 32b und Abbildung 32c). Einzelne Steine liefen vor der Murfront ohne Wasser her (siehe Abbildung 32d bis Abbildung 32f). Nach der Murfront stieg der Wassergehalt mit gleichzeitiger Abnahme der Abflusstiefe (siehe Abbildung 32g und Abbildung 32h) sichtlich an. Nach vollständigem Stillstand des Versuchsmaterials (siehe Abbildung 32i), kann Reinwasserabfluss beobachtet werden.

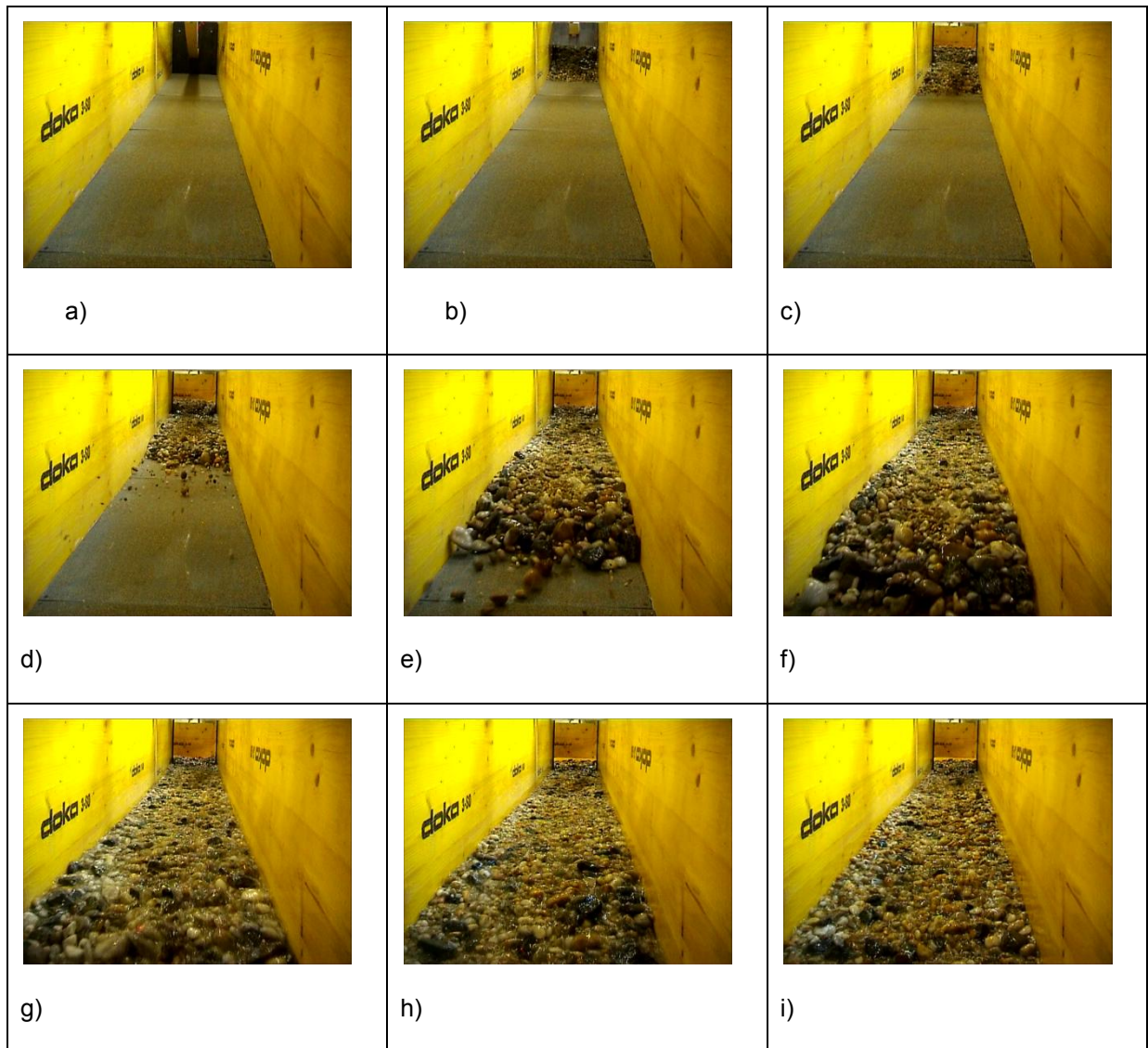


Abbildung 32: Versuch 23 Rinne a) bis i) chronologische Abfolge des Versuchs 23.

In Abbildung 33 ist ebenfalls der Versuch 23, nun aus einer anderen Kameraperspektive dargestellt. Abbildung 33a zeigt das Versuchsmaterial im Startbehälter in der Standardstartanordnung für die granulare Versuchsreihe, wobei der Öffnungsmechanismus noch vollständig geschlossen ist. Kurz nach Betätigung des Öffnungsmechanismus kommt es zu einer Absenkung des vorderen Teiles des Versuchsmaterials, welches die trockene Murfront bildete (siehe Abbildung 33b und Abbildung 33c). Der freie Wasserspiegel erscheint unverändert. Anschließend folgt granulares Material von den Seiten des Startbehälters (siehe Abbildung 33d). Gleichzeitig strömt Wasser seitlich in die Rinne ein (Abbildung 33e und f). Nach dem vollständigen Stillstand des Festmaterials erfolgt Reinwasserabfluss zwischen dem abgelagerten Murenmaterial.

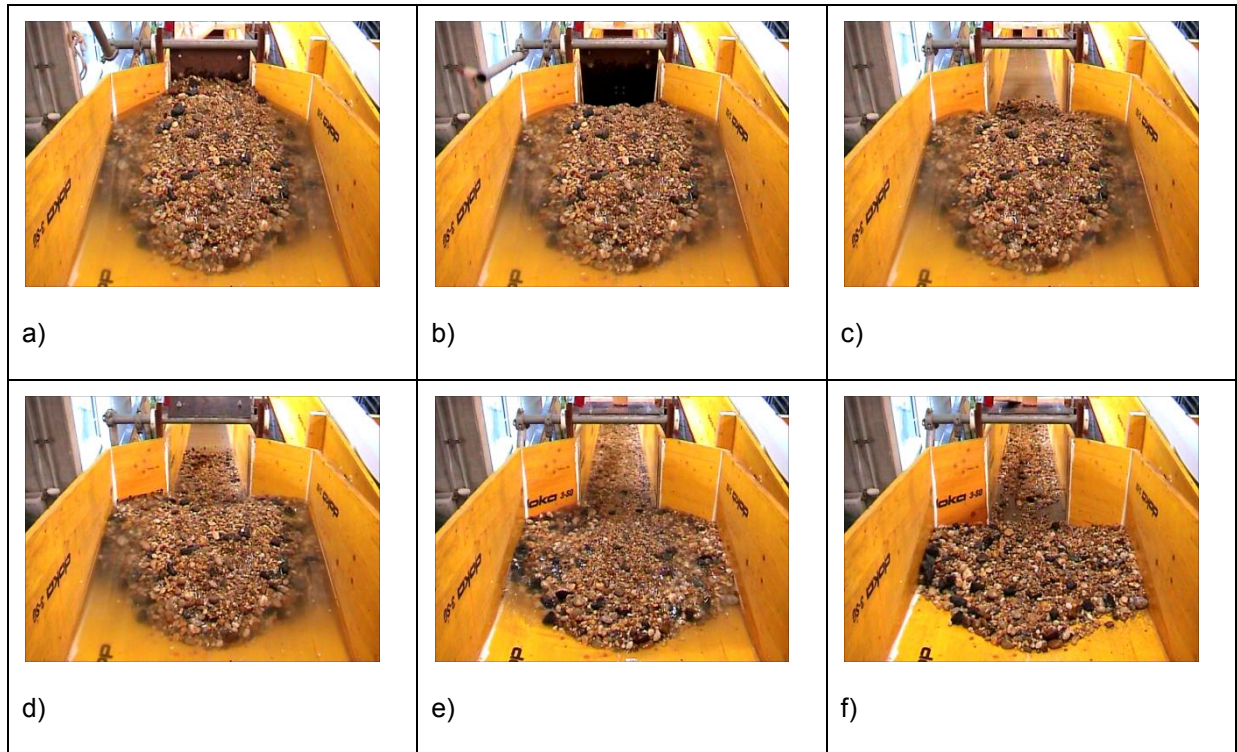


Abbildung 33: Versuch 23 Startbehälter a) bis f) chronologische Abfolge des Versuchs 23.

Versuche 15 bis 22

Bei den Versuchen 15 bis 22 wurde am Ende der Rinne der Querschnitt auf die Hälfte vermindert. Dazu war eine Schichtleimplatte senkrecht zur Rinnenachse eingebaut, um Erfahrungswerte für zukünftige Versuche für den Einbau eines Modells einer Brücke und/oder Anprallplatte zu sammeln. Abbildung 34 zeigt den Versuch aus einer Kameraperspektive oberhalb der Anprallplatte. Abbildung 34a bildet die trockene granulare Front, wobei einzelne Steine gerade auf die Anprallplatte auftreffen, ab. In Abbildung 34b ist ersichtlich wie die Murfront die Anprallplatte erreicht, wobei eine weitere Zunahme des Wassergehaltes, zu beobachten ist (siehe Abbildung 34c). Nachdem die Murfront die Anprallplatte passiert, bildet sich eine Art „Keil“ oberhalb der Platte aus, (Abbildung 34d) und (Abbildung 34e). Das restliche Versuchsmaterial strömt rechts an der Anprallplatte vorbei, wobei wiederum nach Ende des Geschiebetransportes ein geringer Reinwasserabfluss zu beobachten ist, (Abbildung 34f).

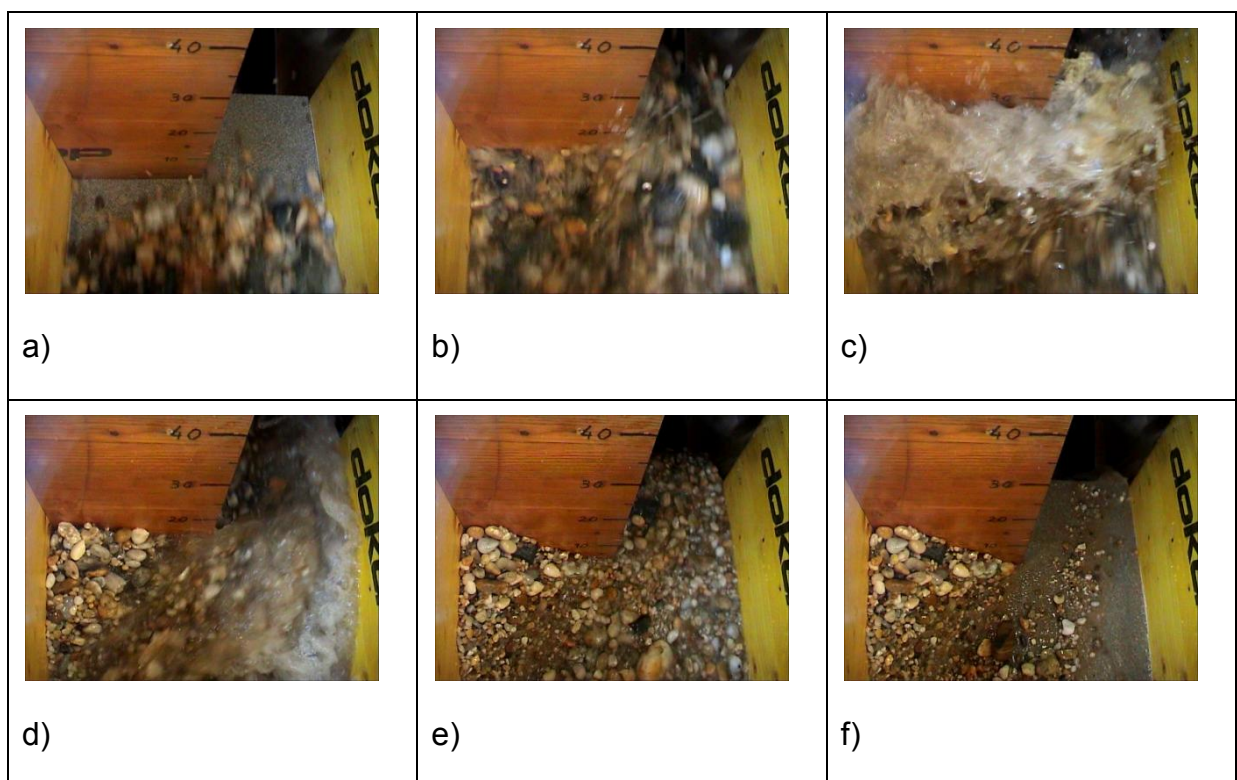


Abbildung 34: Versuch 18 mit Anprallplatte a) bis f) chronologische Abfolge des Versuchs 18.

6.5.2 Viskose Versuchsreihe

In Tabelle 11 sind alle durchgeführten Versuche der viskosen Versuchsreihe ersichtlich. Zu jedem Versuch ist die Neigung, die Rauigkeit der Rinne sowie der Zustand der Rinne (trocken oder feucht) angeführt. Die Neigung beträgt beim ersten Versuch 27%, bei den restlichen 33%. Die Bodenrauigkeit besteht aus PVC Platten bei welchen mittels Epoxid Harz Sand aus dem Vorderbergerbach (Sieblinie siehe Abbildung 19) aufgetragen worden ist. Um Verunreinigungen des Sandes zu minimieren wurde dieser vorher mit einem Sieb mit einer Maschenweite von 2 mm gesiebt. Weiteres sind die Froudezahlen und die Frontgeschwindigkeiten zwischen den Messbrücken 1 und 2 sowie 2 und 3 aufgelistet. Die mittlere Höhe stellt die Höhe der Murfront zwischen den Messbrücken 2 und 3 dar. Für mit xxx markierte Kästchen konnten die Werte nicht ermittelt werden.

Masterarbeit

Tabelle 11: Versuchsliste viskos.

Versuchsnummer	Neigung	Rauigkeit	Rinne	Froude US1US2	Froude US2US3	v_US1 US2	v_US2 US3	Max. height
[/]	[%]	[/]	[/]	[/]	[/]	[m/s]	[m/s]	[mm]
G1	27	PVC Platten, Sand	trocken, sauber	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
G2	33	PVC Platten, Sand	feucht	1,66	1,38	1,43	1,19	75,42
G3	33	PVC Platten, Sand	feucht	0,2100	0,02	0,16	0,02	55,38
G4	33	PVC Platten, Sand	feucht	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
G5	33	PVC Platten, Sand	feucht	2,61	2,86	2,12	2,32	67,13
G6	33	PVC Platten, Sand	feucht	1,69	1,69	1,34	1,35	64,87
G7	33	PVC Platten, Sand	feucht	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
G8	33	PVC Platten, Sand	feucht	1,92	1,99	1,68	1,74	78,02
G9	33	PVC Platten, Sand	feucht	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
G10	33	PVC Platten, Sand	feucht	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
G11	33	PVC Platten, Sand	ausgeschmiert, feucht	1,93	1,62	1,64	1,38	74,37
G12	33	PVC Platten, Sand	ausgeschmiert, feucht	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
G13	33	PVC Platten, Sand	feucht	1,68	1,4797	1,45	1,29	77,09
G14	33	PVC Platten, Sand	feucht	0,4846	0,0000	0,3046	0	23,719
G15	33	PVC Platten, Sand	feucht	1,11	0,2971	0,77	0,20	46,88

Wassergehalt

Im Gegensatz zu der granularen Versuchsreihe wurde bei der viskosen Versuchsreihe der Wassergehalt nach Ausführung der einzelnen Versuche bestimmt. Bei den Versuchen 7, 9, 10 und 12 ist keine Wassergehaltsbestimmung vorgenommen worden. Da das Versuchsmaterial in der Rinne zum Stillstand kam. Dadurch war eine Datenauswertung dieser Versuche nicht möglich. Abbildung 35 zeigt die Versuchsnummer, den Wassergehalt, den viskosen Anteil sowie den granularen Anteil der Versuche, bei denen der Wassergehalt bestimmt wurde.

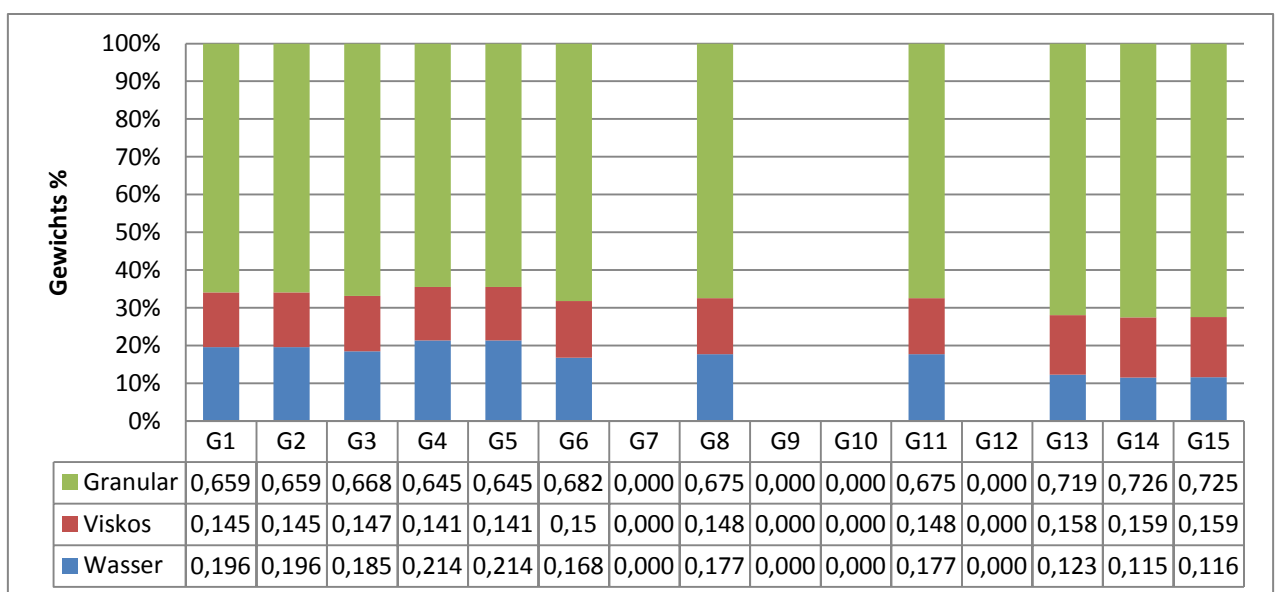


Abbildung 35: Wasser - viskos- granular Verhältnis.

Startanordnung

Im Startbehälter stellte sich durch die Schwerkraft bedingt, eine annähernd waagrechte Oberfläche des Versuchsmateriales ein, welche in Abbildung 36 dargestellt ist.



Abbildung 36: Anordnung Startbehälter viskose Versuchsreihe.

Versuche G1-G4, G7, G9, G10, G12

Die Versuche mit den Versuchsnummern G1 - G4, G7, G9, G10 und G12 wurden als ungültig definiert. Bei den Versuchen G1 und G2 erfolgt die Wassergehaltsbestimmung über eine vorher zugefügte Wassermenge. Die Methode stellte sich jedoch als nicht brauchbar heraus, da die erforderte Genauigkeit nicht gegeben war. Die Versuche mit den Versuchsnummern G2, G4, G7, G9 und G12 erreichten die Messbrücke 3 nicht, womit eine Bestimmung der Froudezahl nicht möglich war. Abbildung 37 zeigt stellvertretend für diese Versuche den Versuch G7. Abbildung 37a zeigt die Versuchsrinne im geschlossenen Zustand. Der Boden der Rinne ist befeuchtet und von vorherigen Versuchen mit einer dünnen Schicht vom

Stoöber Lehm bedeckt. Nachdem der Startmechanismus betätigt ist, bildet sich eine Murfront heraus (siehe Abbildung 37 b). Einzelne Steine lösen sich aus der Murfront heraus und bewegen sich vor der eigentlichen Murfront mit höherer Geschwindigkeit abwärts (siehe Abbildung 37c bis e). Wobei ersichtlich ist, dass größere Steine sich langsamer bewegen und eher zum Stillstand kommen, als kleine Steine. Die Geschwindigkeit nimmt sichtlich ab, und bei Abbildung 37f kommt das Versuchsmaterial zum Stillstand.

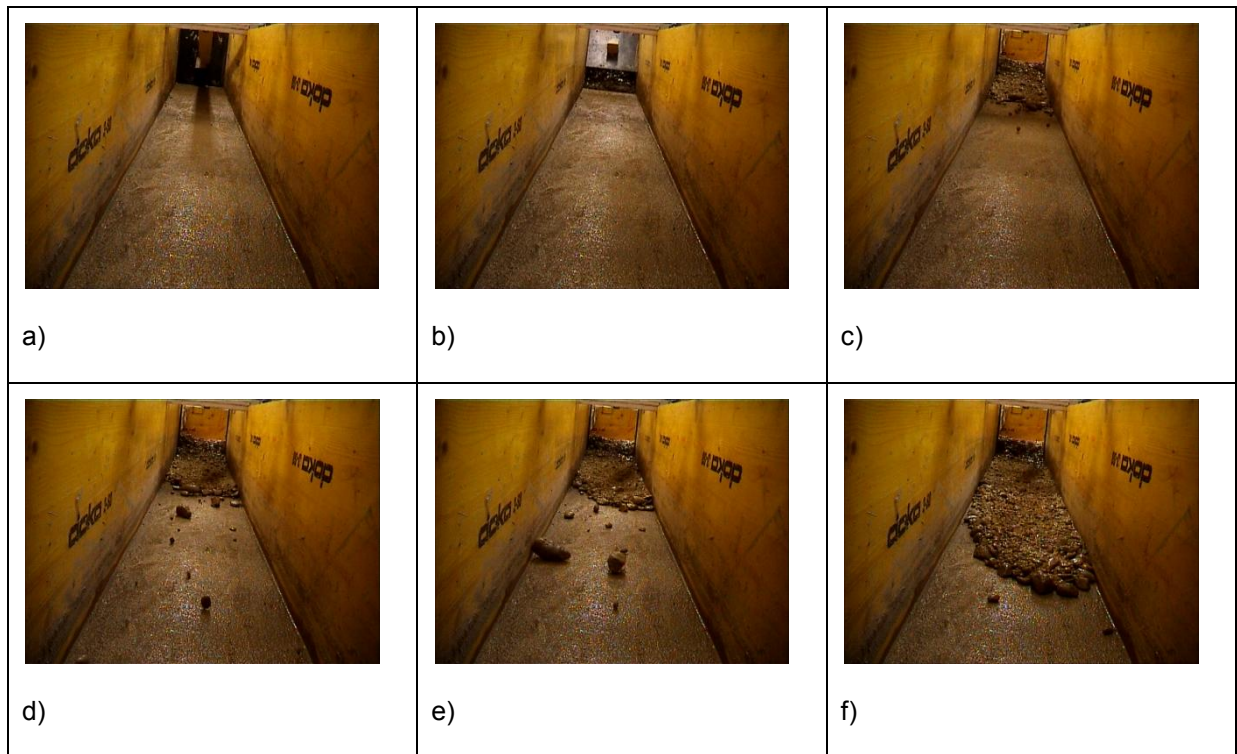


Abbildung 37: Versuch G7 Rinne a) bis f) chronologische Abfolge des Versuchs 7.

Eine bildliche chronologische Abfolge des viskosen Versuches G7 aus der Kameraperspektive hinter dem Startbehälter stellt Abbildung 38 dar. Das viskose Versuchsmaterial befindet sich im Startbehälter, auf Wasserspiegelniveau eingestellt (siehe Abbildung 38b). Nach dem Betätigen des Startmechanismus strömt das Versuchsmaterial, welches sich direkt davor befindet, abwärts (siehe Abbildung 38b). Es kommt zu einer geringen Strömung des seitlichen Versuchsmaterials Richtung abwärts. Der hintere Teil des Versuchsmaterials bleibt bis auf sehr geringe Absenkungen quasi im Stillstand. Nachdem das Versuchsmaterial in der Versuchsrinne zum Stillstand kommt, sind keine weiteren Bewegungen im Startbehälter sichtbar (siehe Abbildung 38c).

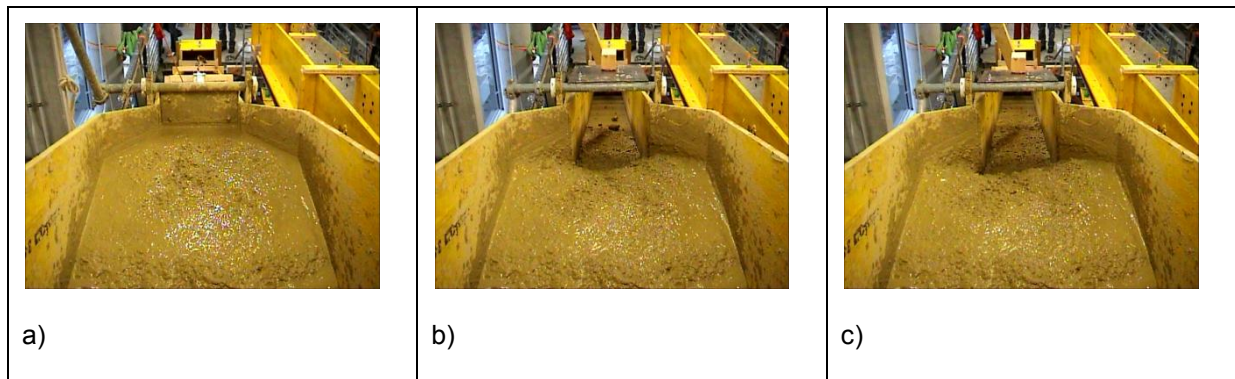


Abbildung 38: Versuch G7 Startbehälter a) bis f) chronologische Abfolge des Versuchs G7.

Versuche G5, G6, G8, G11, G13 – G15

Die Versuche G5, G6, G8, G11, G13 – G15 der viskosen Versuchsreihe wurden mit einem konstanten Versuchssetup durchgeführt. Das heisst die Gerinneneigung, die Bodenrauigkeit und die Anordnung des Versuchsmaterials im Startbehälter wurde für jeden einzelnen Versuch ident ausgeführt. Die einzige veränderliche Variable war der Wassergehalt. Die zwangsweise Verringerung des Versuchsmaterials wurde nicht quantifiziert und qualifiziert. Bei den einzelnen Versuchen wurde auf eine möglichst homogene Durchmischung des Versuchsmaterials sowie auf einen ausreichenden Zeitraum nach der Wasserzugabe für die Wasseraufnahme der Tonminerale geachtet.

In Abbildung 39 ist eine chronologische Bilderfolge eines typischen viskosen Versuches dargestellt. Der Boden der Versuchsrinne ist mit einer dünnen und feuchten Schicht des Stoober Lehms bedeckt (siehe Abbildung 39a). Nachdem betätigen des Öffnungsmechanismus (siehe Abbildung 39b) bewegt sich das Versuchsmaterial abwärts (siehe Abbildung 39c). Einzelne Steine lösen sich von der Front des Versuchsmaterials und eilen voraus, wobei an der Front eine Akkumulation von Steinen größeren Durchmessers zu beobachten ist (in Abbildung 39d) ersichtlich). Außerdem wirkt die Front visuell trockener als das folgende Versuchsmaterial. In Abbildung 39e ist das folgende Versuchsmaterial ersichtlich, welches eine annähernd konstante Abflusshöhe hat. Die Geschwindigkeit verringert sich sichtlich, bis sie komplett zum Stillstand kommt (siehe Abbildung 39f).



Abbildung 39: Versuch G13 Rinne a) bis f) chronologische Abfolge des Versuchs G13.

Abbildung 40 zeigt ebenfalls den Versuch G13, nur aus der Kameraperspektive hinter dem Startbehälter. Abbildung 40a) zeigt den Startbehälter mit dem viskosen Versuchsmaterial kurz nach Betätigen des Startmechanismus. Das Versuchsmaterial strömt im vorderen Drittel in die Versuchsrinne. Die Fließbewegung setzen sich nach hinten fort, wobei das Versuchsmaterial fächerförmig nachströmt (siehe Abbildung 40b). Nachdem ein Großteil des Versuchsmaterials in die Rinne geströmt ist, verlangsamt sich die Fließbewegung zusehends. Abbildung 40c zeigt nach Beendigung der sichtbaren Bewegung das restliche im Startbehälter vorhandene Versuchsmaterial.

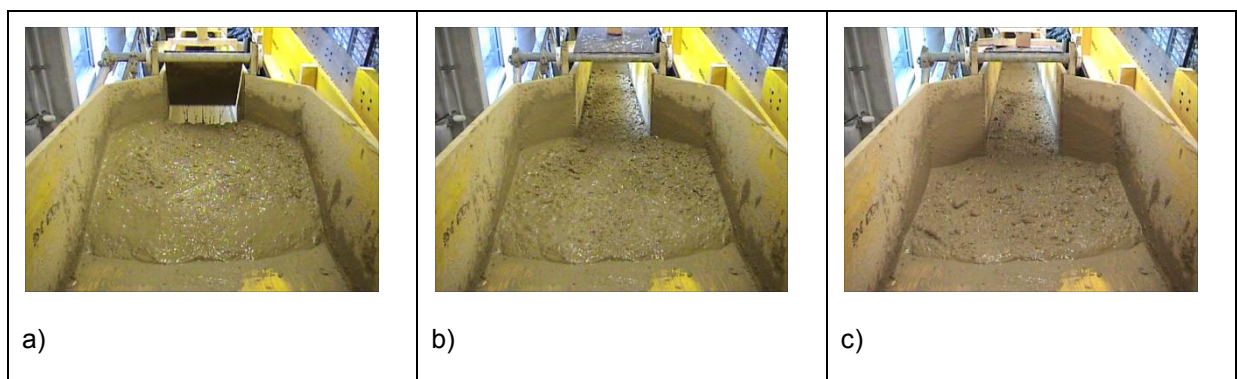


Abbildung 40: Versuch G13 Startbehälter a) bis f) chronologische Abfolge des Versuchs G13.

7. Resultate

Im folgenden Kapitel werden die Resultate der viskosen und der granularen Versuchsreihe vorgestellt.

7.1 Resultate granular

In der Abbildung 42 ist die Froudezahl zwischen den Messbrücken zwei und drei und der Wassergehalt in Gewichtsprozent dargestellt. Die Versuche 11, 23-25 und 27 wurden ohne Anprallplatte und die Versuche 16, 18 bis 22 mit Anprallplatte durchgeführt.

Für alle Versuche konnten wir eine lineare Abhängigkeit zwischen der Froudezahl und den Wassergehalt feststellen (Abbildung 41). Das Bestimmtheitsmaß beträgt bei den Versuchen ohne Stauplatte 0,88 und bei den Versuchen mit Stauplatte 0,99 und für alle gültigen Versuche 0,92. Dies bedeutet, dass ein guter bis sehr guter linearer Zusammenhang zwischen der Froudezahl und dem Wassergehalt besteht. Die Froudezahlen für die Versuche mit Stauplatte weisen bei gleichem Wassergehalt höhere Froudezahlen als die Versuche ohne Stauplatte auf. Es erfolgte ein Rückstauereffekt aufgrund der Anprallplatte, welche zu erhöhten Messwerten der Abflusstiefen führte.

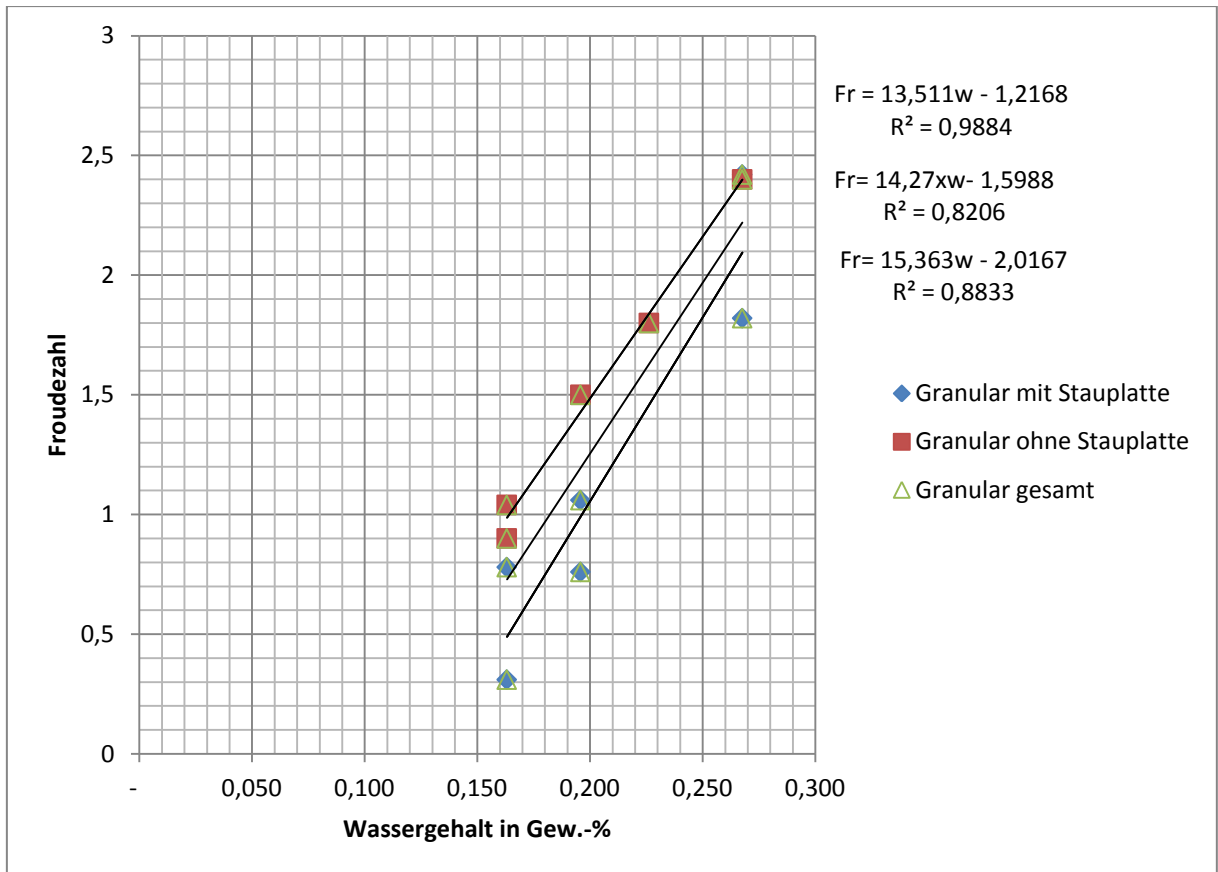


Abbildung 41: Froudezahl – Wasser Abhängigkeit.

In Abbildung 42 ist der Residuenplot der Froude – Wassergehalt Abhängigkeit der gesamten gültigen Versuche der granularen Versuchsreihe grafisch dargestellt. Der Residuenplot gibt Informationen ob Modellverletzungen vorliegen, wobei hier gezeigt wird, wieweit die Residuen um ihren Mittelwert streuen. Es wird dabei zwischen den Residuen der Versuche mit Stauplatte und jener ohne Stauplatte unterschieden. Es ist deutlich sichtbar, dass alle Residuen der Versuche ohne Stauplatte positiv sind und jene ohne Stauplatte bis auf einen Wert negativ. Die Versuche mit Stauplatte weisen eine höhere Streuung auf.

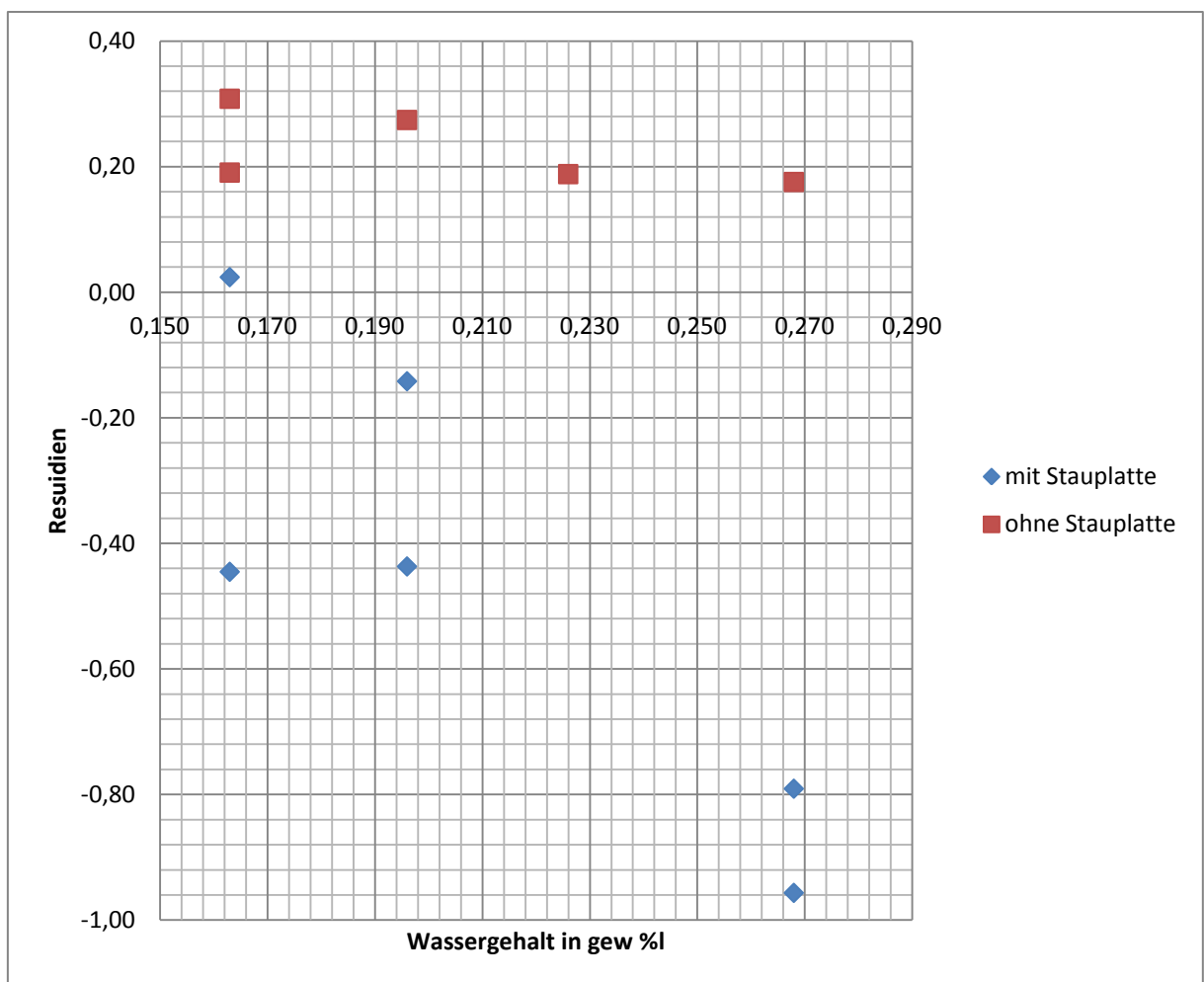


Abbildung 42: Residuenplot der granularen Versuchsreihe.

7.2 Resultate viskos

Wie bei der granularen Versuchsreihe wurde auch bei der viskosen Versuchsreihe die Froudezahlen den jeweiligen Wassergehalten des Versuches (siehe Abbildung 43). Es wurden sieben gültige Versuche durchgeführt. Dabei konnten Froudezahlen zwischen 0 und 2,8 bei einem Wassergehalt von 11,5 Gew.-% bzw. 21 Gew.-% beobachtet werden. Das Bestimmtheitsmaß beträgt hier 0,82.

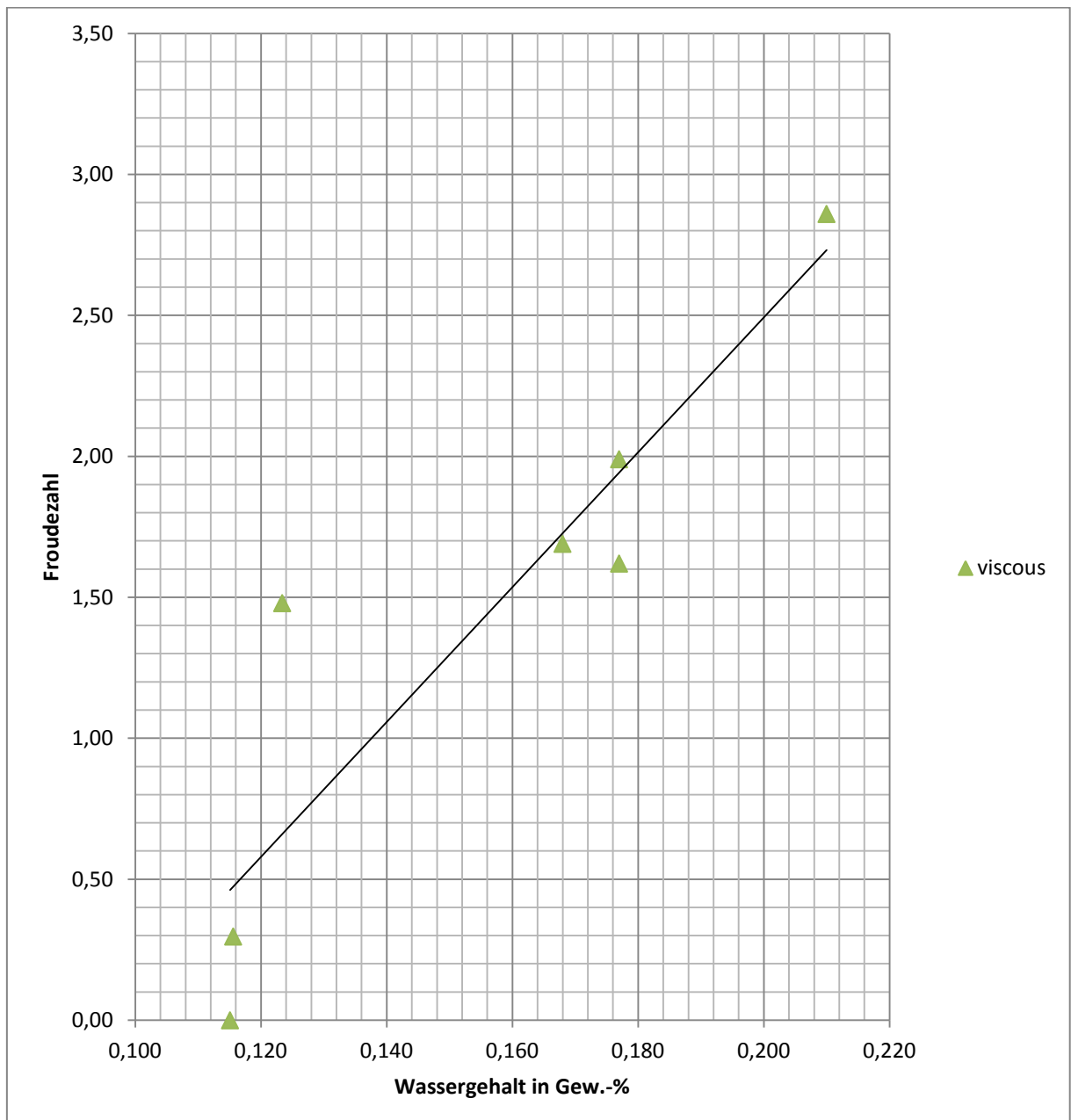


Abbildung 43: Froudezahl – Wasser Abhängigkeit.

In Abbildung 44 ist der Residuenplot der Froude – Wassergehalt - Abhängigkeit der gültigen Versuche der viskosen Versuchsreihe grafisch dargestellt. Die Residuen im unteren Bereich des Wassergehaltes des Versuchsmaterials weisen eine hohe Streuung auf. In diesen Bereich streut auch die dazugehörige Froudezahl zwischen 0 und 1,5 am Größten. Die Streuung nimmt mit zunehmendem Wassergehalt deutlich ab. Die Streuung deutet auf eine linkslastige Heteroskedastizität hin, sprich sie nimmt nach rechts ab. Das heißt, dass viskose Versuche bei einem höheren Wassergehalt weniger streuen als bei einen niedrigen. Wie die Versuche zeigten, kann bei einem Wassergehalt von 12 Gew.-% die Froudezahl zwischen 0 und 1,5 variieren.

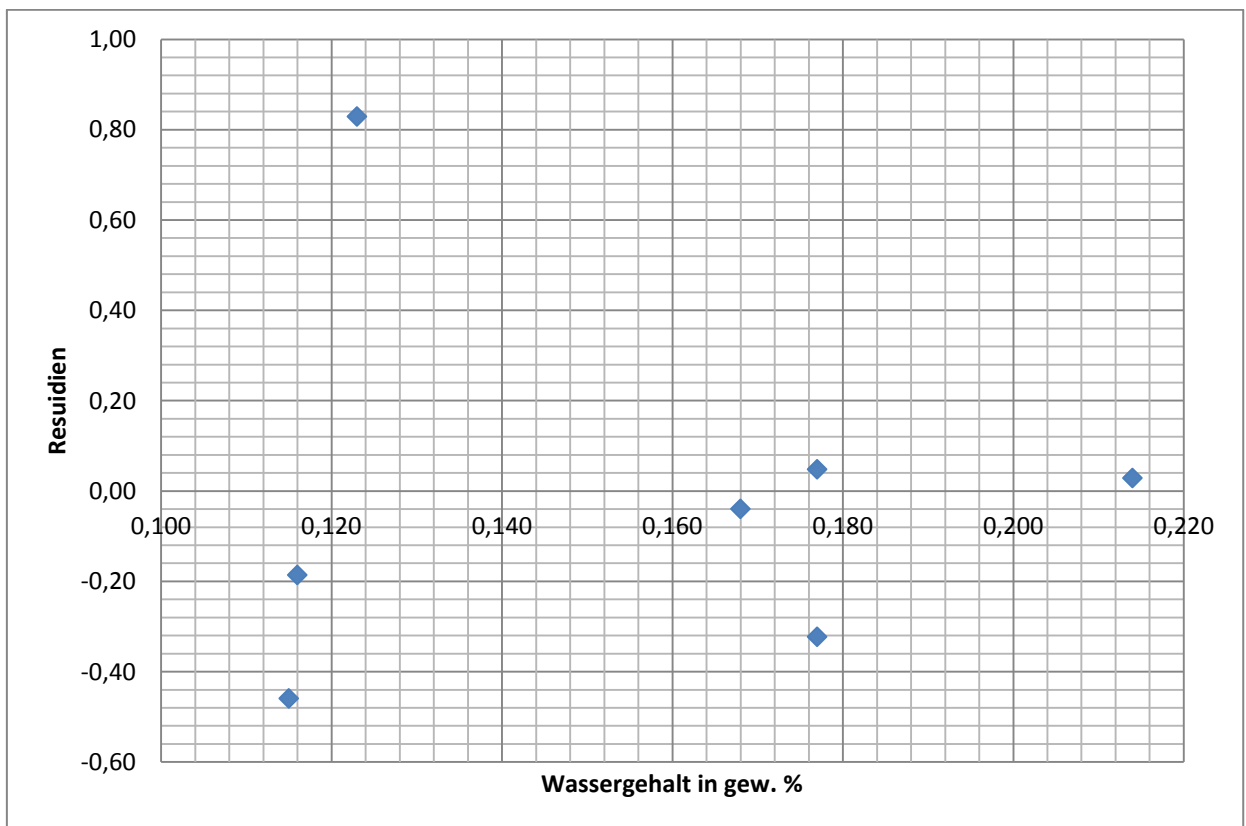


Abbildung 44: Residuenplot der viskosen Versuchsreihe.

7.3 Vergleich Ultraschallsensoren mit Lasersensoren

Die Messwerte der Abflusshöhen der einzelnen Versuche wurden sowohl mit Ultraschallsensoren als auch Lasersensoren gemessen und zeigten unterschiedliche Ergebnisse.

Die visuelle Auswertung zeigte ein höheres Rauschen der Lasersensoren im Vergleich zu den Ultraschallsensoren. Um das Rauschen der Sensoren zu quantifizieren, wurden wie im Kapitel 6.4 beschrieben die Mittelwerte der quadrierten Residuen der Messwerte gebildet. In Abbildung 45 sind diese ersichtlich. Darin sind die granularen, mit Ausnahme von Versuch 27 und viskosen Versuche dargestellt, sowie der Wassergehalt in Gewichtsprozent. Die höchsten Mittelwerte hat bei den granularen Versuchen der Lasers Nr. 1. Bis auf den granularen Versuch mit der Nummer 19 sind die nächsthöchsten Mittelwerte dem Laser 2 zu zuordnen. Die Mittelwerte der Ultraschallsensoren sind im generellen niedriger als jene der Lasersensoren. Bei Versuch 19 und 25 sind für die relativ hohen Mittelwerte des Ultraschallsensors 1 nicht zu eliminierende Ausreißer Schuld. Die Mittelwerte der quadrierten Residuen sind bei der viskosen Versuchsreihe signifikant niedriger als bei der Granularen. Der hohe Mittelwert der Residuen des Ultraschallsensors 1 bei Versuch G5 ist auf einen Ausreißer zurück zu führen. Auch bei der viskosen Versuchsreihe sind die Residuen der quadrierten Mittelwerte im Durchschnitt bei den Lasersensoren höher als bei den Ultraschallsensoren.

Die höheren Mittelwerte der Lasersensoren weisen nun darauf hin, dass das Rauschen der Lasersensoren höher ist, als jenes der Ultraschallsensoren. Besonders bei der granularen Versuchsreihe ist der Unterschied signifikant. Bei den Ultraschallsensoren ist kein Unterschied erkennbar, ob sie auf viskoses oder auf granulares Versuchsmaterial messen. Die Lasersensoren haben im Gegensatz dazu eindeutig eine bessere Datenqualität bei Messungen auf das viskose Versuchsmaterial.

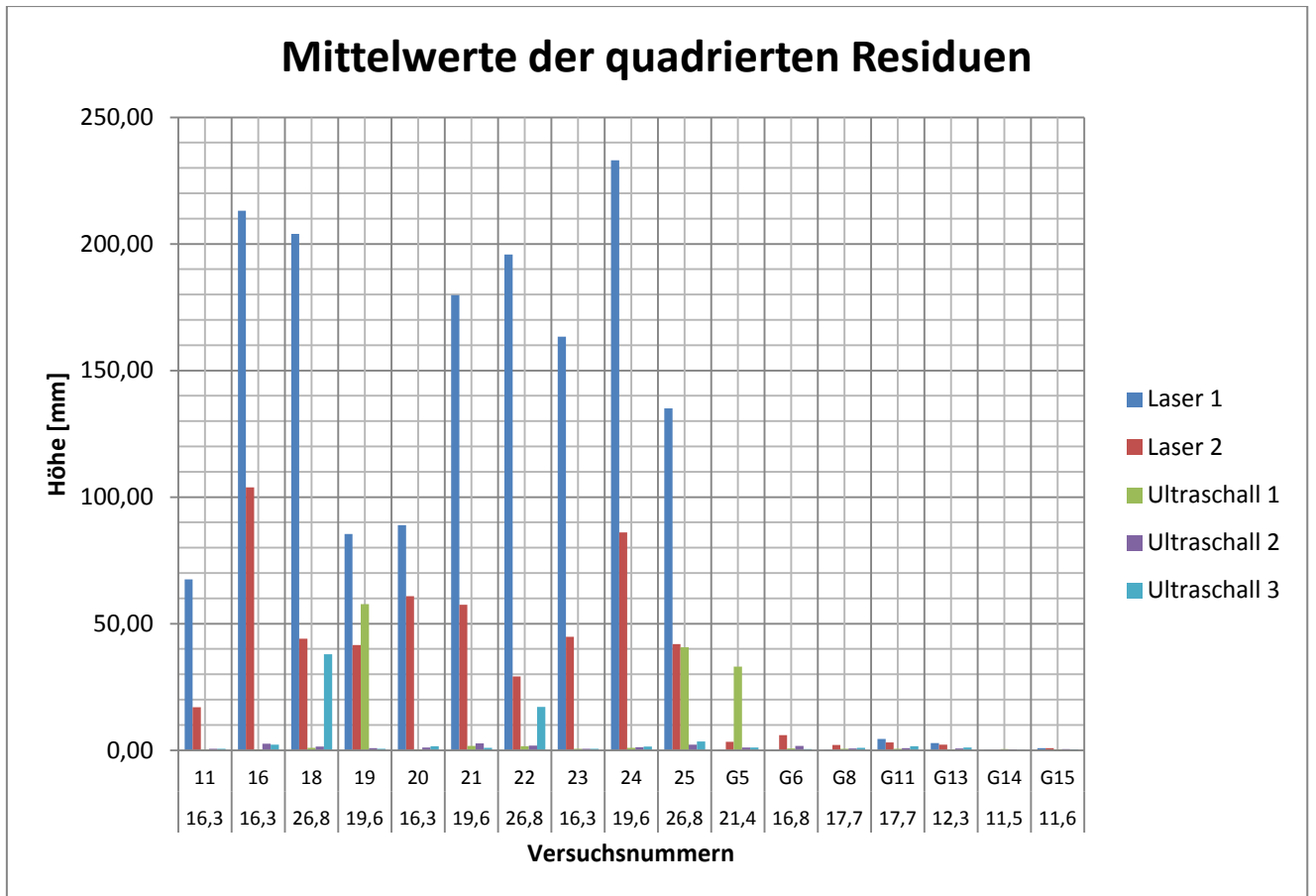


Abbildung 45: Mittelwerte der quadrierten Residuen der Laser- und Ultraschallsensoren sowie der Wassergehalt der einzelnen Versuche.

Um den Verdacht auf mögliche Ausreißer zu quantifizieren bzw. zu bestätigen, wurden wie im Kapitel 6.4 beschrieben, die 0,75 Quartilen der quadrierten Residuen der Messwerte gebildet. In Abbildung 46 sind die 0,75 Quartilen der quadrierten Residuen ersichtlich. Wie bei den Mittelwerten sind auch hier die gültigen granularen, mit Ausnahme von Versuch 27 und viskosen Versuche dargestellt, sowie der Wassergehalt in Gewichtsprozent der einzelnen Versuche. Bei der granularen Versuchsreihe sind die 0,75 Quartilen der Lasersensoren bei jedem Versuch signifikant höher als jene der Ultraschallsensoren. Bei Versuch 24 übersteigt der 0,75 Quartilen Wert der Lasersensoren jenen der Ultraschallsensoren um das 97 fache. Bei der viskosen Versuchsreihe ist kein signifikanter Unterschied zwischen den 0,75 Quartilen der Ultraschallsensoren und Lasersensoren erkennbar.

Das heißt nun, dass der Verdacht auf Ausreißer bei Messungen mittel Laser auf das granulare Versuchsmaterial bestätigt wurde. Die Anzahl der Ausreißer der Messerwerte der Lasersensoren auf granulares Versuchsmaterial ist sehr hoch. Auf viskoses Versuchsmaterial ist die Anzahl dagegen gering. Die Anzahl der Ausreißer ändert sich bei Messungen mittels Ultraschallsensoren auf viskoses oder granulares Versuchsmaterial nicht wesentlich. Die Anzahl der Ausreißer ist gering.

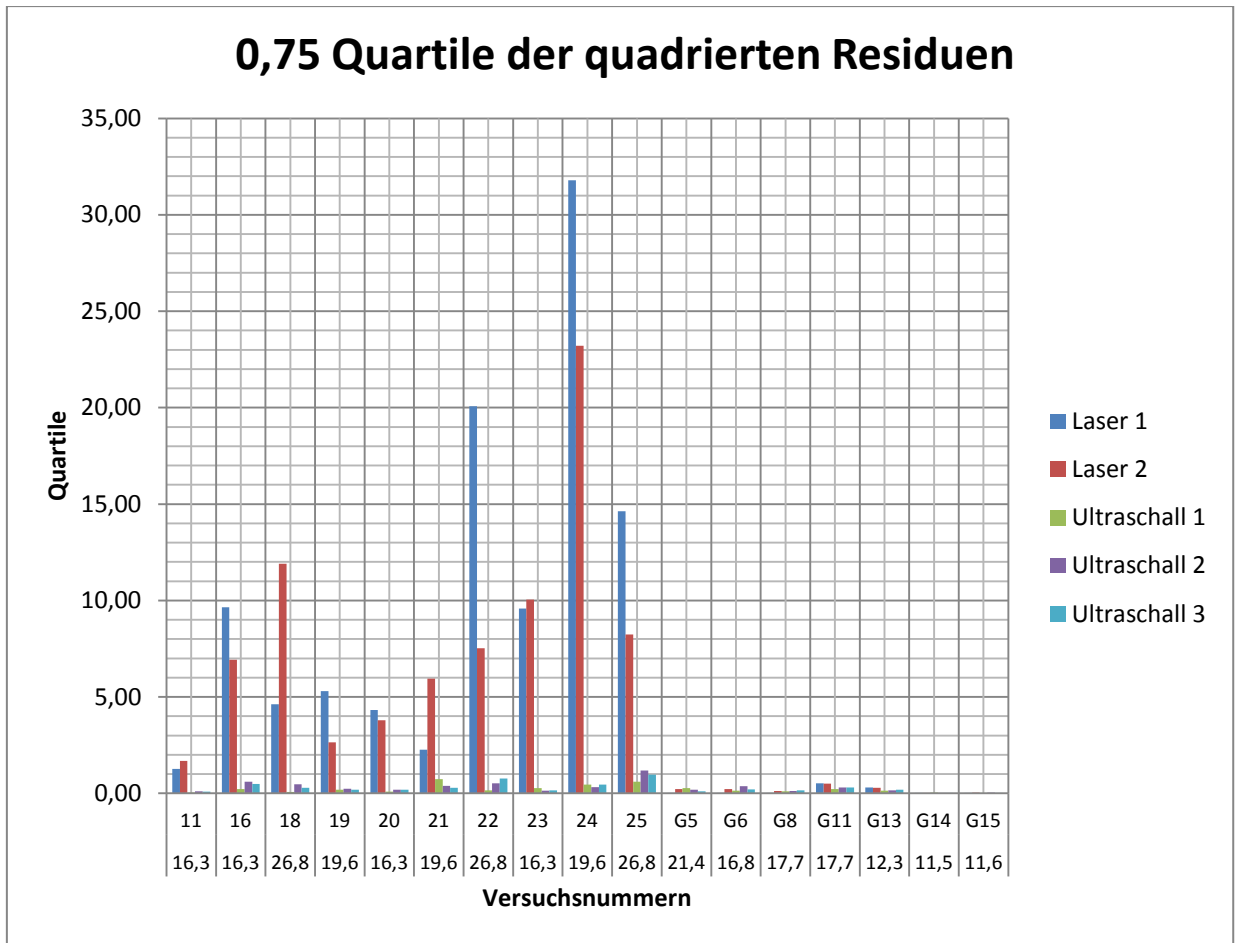


Abbildung 46: 0,75 Quartile der quadrierten Residuen der Laser- und Ultraschallsensoren sowie der Wassergehalt der einzelnen Versuche.

8. Diskussion

Die Konstruktion, der Bau der Versuchsanlage sowie die Durchführung der Versuche, war aufgrund der fehlenden Erfahrung des Projektteams ein „Herantasten“ an auswertbare Ergebnisse. Bei der Durchführung der ersten Versuche war das Hauptproblem die veränderbaren Parameter der Versuchsanlage in den Griff zu bekommen.

Dabei handelt es sich um die Neigung der Anlage, die Anordnung des Versuchsmaterials im Startbehälter, die Gerinnerauigkeit sowie den Wassergehalt des Murenmaterials.

➤ **Startanordnung**

Bezüglich der Anordnung des Versuchsmaterials stellte sich eine gleichbleibende Anordnung innerhalb des Startbehälters als notwendig heraus. Beim viskosen Versuchsmaterial bildete sich eine waagrechte Oberfläche aus. In Abbildung 29c ist die Anordnung des granularen Versuchsmaterials ersichtlich. Dieses ist mittig leicht angehäuft und seitlich leicht abfallend. Die größte Schutthöhe befindet sich direkt am Öffnungsmechanismus.

➤ **Oberflächenrauigkeit**

Um Experimente im gewünschten Froude Bereich durchführen zu können, wurden die Oberflächenrauigkeit, sowie die Neigung geändert. Dabei zeigte eine Änderung der Oberflächenrauigkeit einen signifikanten Einfluss auf das Abflussverhalten. Es stellte sich heraus, dass eine konstante Oberflächenrauigkeit notwendig ist, um ein konstantes reproduzierbares Abflussverhalten in der Rinne zu erhalten. Wie die Versuche zeigten, hatten besonders die bei den granularen Versuchen 3 bis 9 verwendeten Bodenrauigkeiten, siehe Abbildung 31, maßgeblichen Einfluss auf das Abflussverhalten.

➤ **Granulare Versuchsreihe**

Bei vier Kornfraktionen, 4-8 mm, 8-16 mm, 16-132 mm und 32-50 mm handelte es sich um Rundkorn. (Hübl et al., 2003) stellte fest, dass von Muren transportiertes und abgelagertes Material normalerweise nur einen sehr geringen Rundungsgrad aufweist. Eine Untersuchung, wieweit die Kornform des Murenmaterials Einfluss auf das Fließverhalten hat, wäre Gegenstand zukünftiger Forschung.

In Abbildung 41 wird zwischen granularen Versuchen mit und ohne Stauplatte unterschieden. Die Versuche ohne Stauplatte weisen bei gleichem Wassergehalt eine höhere Froudezahl auf als jene mit eingebauter Stauplatte. Es wird daher von einem Rückstau effekt der Stauplatte ausgegangen, welcher die maximale gemessene Abflusshöhe erhöht und somit die Froudezahl reduziert.

➤ **Viskose Versuchsreihe**

Bei der viskosen Versuchsreihe stellte vor allem das Versuchsmaterial eine große Herausforderung dar. Vor der Durchführung der Versuche war ein mehrtätiges Einsumpfen des Versuchsmaterials notwendig. Auch zeigten sich Unterschiede im Abflussverhalten, wenn vorher eine intensive Durchmischung des Versuchsmaterials stattfand. Als Vorteilhaft erwies sich ein sogenannter „Nullversuch“. Dadurch konnte, relativ einfach, eine homogene Durchmischung des Versuchsmaterials produziert werden. Erst durch diese Durchmischung des Versuchsmaterials, war es möglich gültige Experimente durchzuführen.

Wie in Abbildung 43 und Abbildung 44 ersichtlich, war besonders bei einem niedrigen Wassergehalt (um 12%) eine breite Streuung der Froudezahlen vorhanden. Es ist davon auszugehen dass hier der Einfluss der Durchmischung des viskosen Versuchsmaterials wesentlich war. Zukünftig wäre es von Interesse mit verschiedenen viskosen Versuchsmaterialien unter sonst gleich bleibenden Randbedingungen Versuchsserien durchzuführen.

➤ **Vergleich viskos mit granular**

Ein direkter Vergleich der viskosen und granularen Versuchsreihe wurde in dieser Arbeit nicht durchgeführt. Anzumerken ist, dass die gültigen Versuche bei unterschiedlicher Gerinneneigung durchgeführt wurden. Außerdem war die Gerinnerauigkeit bei der viskosen Versuchsreihe modifiziert, da viskoses Versuchsmaterial den Boden der Rinne bedeckte.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Anpassungsgraden, siehe Abbildung 41 und Abbildung 43, zwischen der Froudezahl und dem Wassergehalt ist bei den granularen Versuchsreihen höher als bei der viskosen Versuchsreihe. Eine mögliche Ursache dafür wäre, dass einige viskose Experimente im Grenzbereich zwischen fließen und Stillstand durchgeführt wurden. Die lineare Korrelation ist bei allen

Versuchen gut bis sehr gut. Auf jeden Fall sind die vorliegenden Werte aufgrund der geringen Anzahl der durchgeführten Versuche nicht fundiert genug.

➤ **Geometrie der Anlage**

Weiteres ist anzumerken, dass die Größe und Konstruktion der Versuchsanlage aufgrund der räumlichen Verhältnisse im Labor limitiert war. Es wurde daher auf eine optimale Raumausnutzung in der Planungsphase geachtet. Durch eine Länge von 4,5 m der freien Fließstrecke der Versuchsrinne war es nicht möglich einen stationären und gleichförmigen Abfluss konstant zu gewährleisten. Dies wurde neben der visuellen Wahrnehmung von den verschiedenen Froudezahlen zwischen den oberen und den unteren Abschnitt bestätigt. Hier wäre es in Zukunft sicherlich interessant, eine Versuchsanlage mit wesentlich längerer freier Fließstrecke bei gleicher Breite zu konstruieren.

Um ein höheres Versuchsvolumen zu ermöglichen, wurde der Startbehälter mittels 45° geneigten Seitenwänden vergrößert. Es ist davon auszugehen, dass die spezielle Form des Startbehälters ebenfalls das Verhalten des Versuchsmaterials signifikant beeinflusste. Dadurch und durch eine konstruktionsbedingte Schwelle zur Abdichtung der Öffnungsklappe blieb bei den Versuchen ein Teil des Versuchsmaterials im Startbehälter zurück. Interessant wäre hier, dieselben Versuche, mit einem Startbehälter ohne 45° Seitenwände durchzuführen.

➤ **Messtechnik**

Die Abtastrate der Messwerte von 800 Herz stellte sich sowohl für die Ultraschallsensoren sowie für die Lasersensoren als ausreichend dar. Aufgrund der statistischen Auswertung, siehe Kapitel 7.3, stellte sich heraus, dass die verwendeten Lasersensoren für Abstandsmessungen auf granularem Murenmaterial nicht geeignet sind.

➤ **Conclusio**

Letztendlich hat die Studie gezeigt, dass es mit relativen geringen finanziellen Mitteln möglich ist eine Versuchsanlage dieser Größenordnung für Muren zu bauen und Versuche damit durchzuführen. Ein wünschenswerter nächster Schritt wäre es, Versuchsreihen mit verschiedenen Materialien durchzuführen und eine Versuchsanlage in der Größenordnung der USGS Experimental Debris-Flow Fume zu Bauen und zu Betreiben.

9. Zusammenfassung

Ziele der vorliegenden Arbeit war es eine Versuchsanlage für Muren zu konstruieren und nach der Froude'sche Ähnlichkeit zu skalieren. Die Länge der Versuchsanlage betrug 7,5 m bei einer maximale Breite von 1 m. Die freie Fließstrecke war 4,5 m lang und 0,448 m breit. Die veränderlichen Parameter der Versuchsanlage stellten die Neigung, die Anordnung des Versuchsmaterials im Startbehälter, die Oberflächenrauigkeit sowie der Wassergehalt dar. Es wurden Versuche mit zwei verschiedenen Versuchsanordnungen, granular und viskos, durchgeführt. Mittels Ultraschall- und Lasersensoren wurde die Abflusstiefe der Welle der Versuchsmure an drei Stellen in Abhängigkeit der Zeit gemessen. Dadurch war es möglich die Froudezahlen der einzelnen Versuche zu bestimmen. Die Messwerte der verwendeten Sensoren wurden statistisch ausgewertet und auf deren Brauchbarkeit bei Abflusstiefenmessungen untersucht. Es wurde bei beiden Versuchsanordnungen das Verhältnis von den Froudezahlen in Abhängigkeit des Wassergehaltes dargestellt. Es zeigte sich eine gute lineare Regression zwischen dem Wassergehalt des Versuchsmaterials der einzelnen Versuche und der Froudezahlen. Weiteres wurden die Residuen der zwei Setups betrachtet. Der Wassergehalt der granularen Versuchsreihe betrug zwischen 12 und 27 Gew.-%. Die dazugehörigen Froudezahlen waren im Bereich zwischen 0,31 und 2,42. Der Wassergehalt der viskosen Versuchsreihe betrug zwischen 11,5 und 21 Gew.-%. Die dazugehörigen Froudezahlen waren im Bereich zwischen 0,00 und 2,86 angesiedelt. Zusätzlich wurde eine visuelle Auswertung der Versuche vorgenommen.

Es zeigte sich, dass das Froude'sche Modellgesetz einen einfachen Weg darstellt, um physikalische Modelle für Versuche mit Murenmaterial zu skalieren.

10. Nomenklatur

d_{max}	mm	Maximalkorndurchmesser
F_{Modell}	N	Kraft im Modell
F_{Natur}	N	Kraft in der Natur
Fr	-	Froude
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
h_w	m	Abflusstiefe
k	m ²	Hydraulische Durchlässigkeit
L_{Modell}	m	Länge im Modell
L_{Natur}	m	Länge in der Natur
M_F	-	Kräftemaßstab
M_L	-	Längenmaßstab
M_t	-	Zeitmaßstab
N	-	Anzahl der Körnung über der Gleitfläche
N_{Sav}	-	Savage Zahl
N_{Bag}	-	Bagnold Zahl
N_{mass}	-	Mass Zahl
N_{Dar}	-	Darcy Zahl

Masterarbeit

N_{Rey}	-	Reynolds Zahl
N_{fric}	-	Reibungs Zahl
R_e	-	Reynolds Zahl
R	-	Hydraulischer Radius
t	s	Zeit
t_{Modell}	s	Zeit im Modell
t_{Natur}	s	Zeit in der Natur
v	m/s	Fließgeschwindigkeit
v_S	-	Volumenanteil von granularen Feststoffen
$\varnothing$	-	Böschungswinkel
η	N/mm ²	Dynamische Viskosität
μ	kg/(m*s)	Dynamische Viskosität von Porenflüssigkeit mit suspendierten Feinsedimenten
ρ	kg/m ³	Dichte
δ	kg/m ³	Dichte der Mure
ρ_F	kg/m ³	Dichte des Fluid der Mure
ρ_S	kg/m ³	Feststoffdichte der Mure
γ	1/s	Schiebungsgeschwindigkeit

11. Abbildungen/Tabellen

ABBILDUNG 1: ZONENEINTEILUNG EINER MURE (HÜBL ET AL., 2003).	8
ABBILDUNG 2: SCHEMATISCHER LÄNGS- UND QUERSCHNITT EINER MURE (SCHATZMANN, 2005).....	9
ABBILDUNG 3: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER KORNGRÖßENSEGREGATION (IVERSON, 2005).	10
ABBILDUNG 4: MATERIALZUSAMMENSETZUNG VERSCHIEDENER VERLAGERUNGSPROZESSE (WEBER, 2004)...	11
ABBILDUNG 5: VEREINFACHTE DARSTELLUNG VON FLÜSSIGKEITEN AUFGRUND VON FLIEßDIAGRAMM (LINKS) UND VISKOSITÄSDIAGRAMM (RECHTS) (SCHATZMANN, 2005).	13
ABBILDUNG 6: SIEBLINIEN VON NATÜRLICHEM MURENMATERIAL UND JENE DES VERSUCHSMATERIALS.....	15
ABBILDUNG 7: SIEBLINIEN VERSUCHSMATERIAL UND MATERIAL IN SCHEASTOBEL	24
ABBILDUNG 8: VERSUCHSTAND IWHW.	26
ABBILDUNG 9: SYSTEMATISCHE SKIZZE DER VERSUCHSANLAGE UNIVERSITÄT TRENTO.....	29
ABBILDUNG 10: SEITENANSICHT FÖRDERBAND VERSUCHSANLAGE IAN (IAN, 2011).....	29
ABBILDUNG 11: VERSUCHSANORDNUNG DER VERSUCHSTROMMEL BOKU (KAITNA ET AL., 2007).	31
ABBILDUNG 12: LASERSENSOR, TRIANGULATIONSPRINZIP (BAUMER HOLDING AG, 2011).....	34
ABBILDUNG 13: VERSUCHSABLAUFSHEMA.....	37
ABBILDUNG 14: ÜBERSICHTSDARSTELLUNG DER LABORRINNE.....	38
ABBILDUNG 15: GRUND- UND AUFRISS DER VERSUCHSANLAGE.....	39
ABBILDUNG 16: DETAIL ÖFFNUNGSMECHANISMUS IN GESCHLOSSENER UND OFFENER STELLUNG.	40
ABBILDUNG 17: DETAIL ÖFFNUNGSMECHANISMUS.....	41
ABBILDUNG 18: KORNDISTRIBUTIONSLINIEN DES VERSUCHSMATERIALS.	43
ABBILDUNG 19: SIEBLINIEN GROBKOMPONENTEN.	44
ABBILDUNG 20: SIEBLINIE STOOBER TON (OTTNER, 2010).	45
ABBILDUNG 21: DARSTELLUNG DER ZEITLICHEN VERTEILUNG DER ABFLUSSHÖHEN, VERSUCH 11 GRANULAR.	49
ABBILDUNG 22: DARSTELLUNG DER GEGLÄTTET DATEN VERSUCH 11 GRANULAR.	49
ABBILDUNG 23: RESIDUENAUSWERTUNG VERSUCH 11 DES LASER 1, ORIGINAL KURVEN, GEGLÄTTETE KURVEN, RESIDUEN.....	51
ABBILDUNG 24: QUADRIERTE RESIDUEN VERSUCH 11, LASER- UND ULTRASCHALLSENSOREN.....	51
ABBILDUNG 25: FEHLERBETRACHTUNG ZUR BESTIMMUNG DER FRONTGESCHWINDIGKEIT BEI ECHOLOTMESSUNGEN (WEBER, 2004).....	52
ABBILDUNG 26: 3 PHASEN DIAGRAMM VERSUCHSMATERIAL.	53
ABBILDUNG 27: GRANULARES VERSUCHSMATERIAL IM STARTBEHÄLTER.	54
ABBILDUNG 28: GRANULAR – WASSER – VERHÄLTNIS.	56
ABBILDUNG 29: VERSCHIEDENE STARTANORDNUNGEN A) MITTIG MAXIMALE ANHÄUFUNG, STARK SEITLICH ABFALLEND B) VERSUCHSMATERIAL AUF WASSERSPIEGEL AUSGERICHTET C) STANDARDSTARTANORDNUNG, LEICHTE ANHÄUFUNG MITTIG, SEITLICH LEICHT ABFALLEND.	57
ABBILDUNG 30: VERSUCH 2 RINNE 26A) BIS 26C) CHRONOLOGISCHE ABFOLGE DES VERSUCHS 2.	57

Masterarbeit

ABBILDUNG 31: VERSCHIEDENE BODENRAUHIGKEIT A) BODENPLATTE MIT HARTHOLZKEILEN B) BODENPLATTE PVC ANGESCHLIFFEN C) BODENPLATTE PVC ANGESCHLIFFEN UND DREI HALBRUNDHÖLZER ÜBER DIE GESAMTE BREITE.	59
ABBILDUNG 32: VERSUCH 23 RINNE A) BIS I) CHRONOLOGISCHE ABFOLGE DES VERSUCHS 23.	60
ABBILDUNG 33: VERSUCH 23 STARTBEHÄLTER A) BIS F) CHRONOLOGISCHE ABFOLGE DES VERSUCHS 23.	61
ABBILDUNG 34: VERSUCH 18 MIT ANPRALLPLATTE A) BIS F) CHRONOLOGISCHE ABFOLGE DES VERSUCHS 18.	62
ABBILDUNG 35: WASSER - VISKOS- GRANULAR VERHÄLTNIS.	65
ABBILDUNG 36: ANORDNUNG STARTBEHÄLTER VISKOSE VERSUCHSREIHE.	66
ABBILDUNG 37: VERSUCH G7 RINNE A) BIS F) CHRONOLOGISCHE ABFOLGE DES VERSUCHS 7.	67
ABBILDUNG 38: VERSUCH G7 STARTBEHÄLTER A) BIS F) CHRONOLOGISCHE ABFOLGE DES VERSUCHS G7.	68
ABBILDUNG 39: VERSUCH G13 RINNE A) BIS F) CHRONOLOGISCHE ABFOLGE DES VERSUCHS G13.	69
ABBILDUNG 40: VERSUCH G13 STARTBEHÄLTER A) BIS F) CHRONOLOGISCHE ABFOLGE DES VERSUCHS G13.	69
ABBILDUNG 41: FROUDEZAHL – WASSER ABHÄNGIGKEIT.	71
ABBILDUNG 42: RESIDUENPLOT DER GRANULAREN VERSUCHSREIHE.	72
ABBILDUNG 43: FROUDEZAHL – WASSER ABHÄNGIGKEIT.	73
ABBILDUNG 44: RESIDUENPLOT DER VISKOSEN VERSUCHSREIHE.	74
ABBILDUNG 45: MITTELWERTE DER QUADRIERTEN RESIDUEN DER LASER- UND ULTRASCHALLSENSOREN SOWIE DER WASSERGEHALT DER EINZELNEN VERSUCHE.	76
ABBILDUNG 46: 0,75 QUANTILE DER QUADRIERTEN RESIDUEN DER LASER- UND ULTRASCHALLSENSOREN SOWIE DER WASSERGEHALT DER EINZELNEN VERSUCHE.	78

Masterarbeit

TABELLE 1: ÜBERSICHT MAßSTAB.	16
TABELLE 2: GRENZWERTE FROUDE ZUR UNTERSCHIEDUNG DER REGIME (DAVIES, 1987).	18
TABELLE 3: ABGELEITETE GRÖßEN.	19
TABELLE 4: ABGELEITETE GRÖßEN.	21
TABELLE 5: TYPISCHE MURENPARAMETER VON SCHWEIZER EREIGNISSEN. (WEBER, 2004).	23
TABELLE 6: WERTEBEREICH FELD, SKALIERUNGSFAKTOR UND FELDDATEN SKALIERT AUF LABORMAßSTAB (WEBER, 2004).	36
TABELLE 7: DURCHSCHNITTLICHE LABORWERTE.	36
TABELLE 8: GESAMTMINERALOGISCHE ZUSAMMENSETZUNG; ANGABEN IN MASSE % (OTTNER, 2010).	46
TABELLE 9: TONMINERALOGISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER TONFRAKTION (<2µM); ANGABEN IN MASSE% (OTTNER, 2010).	46
TABELLE 10: VERSUCHSLISTE GRANULAR.	55
TABELLE 11: VERSUCHSLISTE VISKOS.	64

12. Literaturverzeichnis

- ANCEY, C.; COCHARD, S. (2009): The dam-break problem for Herschel-Bulkley viscoplastic fluids down steep flumes. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 158: 18-35.
- BALMFORTH, N. J. (2001): *Geomorphological fluid mechanics*. Berlin u.a.: Springer.
- BAUMER HOLDING AG (2011): *Bedienungshandbuch Laser Distanz Sensor*, Frauenfeld Schweiz: Eigenverlag
- BAUMER HOLDING AG (2011): *Datenblatt Optoelektronische Verfahren OADM20I6580/S14F*, Frauenfeld Schweiz: Baumer
- BJÖRN, O. (1996): *Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse : Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften, NDK*. Basel [etc.] : Birkhäuser.
- WENDELER, C. (2008): *Murgangrückhalt in Wildbächen : Grundlagen zu Planung und Berechnung von flexiblen Barrieren*. Zürich : ETH.
- D'AGOSTINO, V.; CESCA, M.; MARCHI, L. (2010): Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps). *Geomorphology* 115: 294-304.
- DAVIES, R. H. (1987): *Debris flow surges : a laboratory investigation*. Zürich : Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.
- DIKAU, R. (1996): *Landslide recognition : identification, movement and causes*. Chichester [etc.] : Wiley.
- ETTEMA, R. (2000): *Hydraulic modeling : concepts and practice*. Reston, Virginia : ASCE.
- FAHRMEIR, L.; KNEIB, T.; LANG, S. (2009): *Lineare Regressionsmodelle*. Regression. Springer Berlin Heidelberg.
- FAHRMEIR, M. S. (2010): *Statistik : der Weg zur Datenanalyse*. Heidelberg : Springer.
- FISCHER, K. (1999): *Massenbewegungen und Massentransporte in den Alpen als Gefahrenpotential*. Berlin : Gebrüder Borntraeger.
- FORSTVEREIN, Ö. (1896): *Österreichische Vierteljahresschrift für Forstwesen*.
- GENSKE, D. D. (2009): *Massenbewegungen*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- HANDL, A. (2010): *Lineare Regression. Multivariate Analysemethoden*. Springer Berlin Heidelberg.
- HSU, L.; DIETRICH, W. E.; SKLAR, L. S. (2008): Experimental study of bedrock erosion by granular flows. *J. Geophys. Res.* 113: F02001.
- HUGENSCHMIDT, M. (2007): *Lasermesstechnik : Diagnostik der Kurzzeitphysik*. Heidelberg : Springer.
- HÜBL, J. et al. (2003): *ETAlp - Erosion, Transport in Alpinen Systemen "Stummer Zeufen Katalog"*. Wien, Lebensministerium.
- HÜBL J.; HOLZINGER, G. (2003): *Entwicklung von Grundlagen zur Dimensionierung kronenoffener Bauwerke für die Geschiebemanagement in Wildbächen: Kleinmaßstäbliche Modellversuche zur Wirkung von Murbrechern*. WLS Report 50 Band 3. Im Auftrag des BMLFUW VC 7a.
- IAN (2011): <http://www.baunat.boku.ac.at/19160.html> (30.12.2011)
- IVERSON, R. (2005): *Debris-flow mechanics in Debris-flow hazards and related phenomena*. Berlin : Springer-Verlag.
- IVERSON, R. M. (1997): The physics of debris flows. *Rev. Geophys.* 35: 245-296.

- IVERSON, R. M.; COSTA, J. E.; LAHUSEN, R. G. (1992): Debris-Flow Flume at H.J. Andrews Experimental Forest, Oregon: U.S. Geological Survey Open-File Report 92-483. USA, USGS.
- IVERSON, R. M.; DENLINGER, R. P. (1987): The physics of debris-flows -- a conceptual assessment: Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim. International Association of Hydrological Sciences.
- IVERSON, R. M. et al. (2010): The perfect debris flow Aggregated results from 28 large-scale experiments. J. Geophys. Res. 115: F03005.
- KAITNA, R. (2006): Debris flow experiments in a rotating drum. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur
- KAITNA, R.; RICKENMANN, D.; SCHATZMANN, M. (2007): Experimental study on rheologic behaviour of debris flow material. Acta Geotechnica 2: 71-85.
- KÖNIG, U. (2006): Real Scale Murenversuche im Scheastobel: Diplomarbeit. Wien: Universität für Bodenkultur.
- LARCHER, M. (2004): Vertical Structure of High-Concentration Liquid-Granular Flows Italy Faculty of Engineering of the University of Padova.
- LHG, B. U. (1991): Ursachenanalyse der Hochwasser 1987 : Schlussbericht. Bern : Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale.
- LOISKANDL, W. (2011): Skriptum Hydraulik und Hydromechanik. Wien: ILHW – Universität für Bodenkultur .
- MANFRED, H. (2007): Lasermesstechnik : Diagnostik der Kurzzeitphysik. Heidelberg : Springer.
- MURAWSKI, H.; MEYER, W. (2010): Geologisches Wörterbuch. 12. überarbeitete und erweiterte Auflage, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- OKUDA, S. et al. (1977): Synthetic observation on debris flow Observation at valley Kamikamihorziwawa of Mt. Yakedake in 1976.
- ONR 24800 (2009): ONR 24800-Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung.
- OTTNER, F. (2010): Bericht über Mineralanalysen an einer Tonprobe aus Stoob. BOKU.
- PARSONS, J.; WHIPPLE, K.; SIMONI, A. (2001): Experimental Study of Grain-Flow, Fluid-Mud Transition in Debris Flows. Chicago.
- PEPPERL UND FUCHS GMBH (2003): Handbuch Servicematerial Ultra 2001. Mannheim
- PEPPERL UND FUCHS GMBH (2009): Technische Daten Ultraschallsensor UC500-IUR2-V15. Mannheim: Eigenverlag
- PÉREZ, F. L. (2001): Matrix granulometry of catastrophic debris flows (December 1999) in central coastal Venezuela. CATENA 45: 163-183.
- RICKENMANN, D.; ZIMMERMANN, M. (1993): The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. Geomorphology 8: 175-189.
- SACHS, L. (2006): Angewandte Statistik : Methodensammlung mit R. Berlin : Springer.
- SCHATZMANN, M. (2005): Rheometry for large particle fluids and debris flows. Zürich : Eigenverlag der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum.
- SCHERF, (2011):
<http://www.scherf.at/index.php?type=product&namespace=product&category=1&name=Bau> (09.10.2010)
- SCHNEIDERBAUER, S. (2006): Experimentelle Untersuchung von Murschüben in einer vertikal drehenden Trommel und in einem Förderband: Diplomarbeit. Wien: Universität für Bodenkultur.

Masterarbeit

- STEINWENDTNER, H. (1997): Untersuchungen zur Murdynamik: Diplomarbeit. Wien: Universität für Bodenkultur.
- STIER, W. (1999): Empirische Forschungsmethoden. Berlin [etc.] : Springer.
- STROBL, T.; ZUNIC, F. (2006): Wasserbau : aktuelle Grundlagen - neue Entwicklungen. Berlin : Springer.
- TAKAHASHI, T. (1991): Debris flow. IAHR-AIRH monograph series.
- TAMOTSU, T. (2007): Debris flow : mechanics, prediction and countermeasures. London : Taylor & Francis.
- WEBER, D. (2004): Untersuchungen zum Fliess- und Erosionsverhalten granularer Murgänge. Birmensdorf : Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- WIDMAN, G. (1994): Verhalten einer Kronoffenen Sperre bei einem Murgang: Diplomarbeit. Wien: Universität für Bodenkultur.
- WIKIPEDIA (2011): <http://de.wikipedia.org/wiki/Ausrei%C3%9Fer> (08.11.2011)
- WSL (2011): http://www.wsl.ch/fe/lms/projekte/laboruntersuchungen/index_DE (14.10.2011)
- ZEPP, H. (2002): Geomorphologie : eine Einführung. 1. Aufl., Paderborn u.a.: Schöningh.