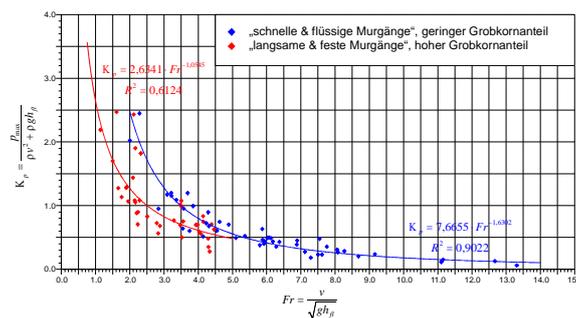
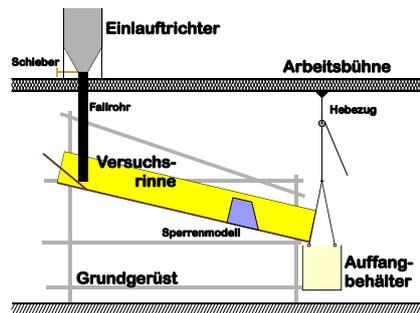


WLS REPORT 50 / Band 3



Im Auftrag:

**Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt
 und Wasserwirtschaft, Sektion VC7a**

Wien, Oktober 2003

Band 3
Kleinmaßstäbliche Modellversuche zur
Wirkung von Murbrechern

Im Auftrag von: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und
Wasserwirtschaft, Sektion VC7a
GZ: 58.110/73-VC7a/98

Projektleitung:	A.o. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. Johannes Hübl
Projektverantwortlicher:	Dipl. Ing. Gerhard Holzinger
Mitarbeiter:	Dipl. Ing. Michael Bacher Mag. Markus Friedrich Peter Mayr Roland Mayr Dipl. Ing. Katharina Platzer Dipl. Ing. Robert Svaton Ing. Friedrich Zott

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Alpine Naturgefahren und forstliches Ingenieurwesen
Arbeitsbereich Wildbach – Lawine - Steinschlag
Peter Jordan Str. 82
A – 1190 Wien

Tel.: +43-1-47654-4350
Fax: +43-1-47654-4390

Report Nr.: 50

Referenz (Literaturzitat): HÜBL, J. & HOLZINGER, G, (2003): Kleinmaßstäbliche Modellversuche zur Wirkung von Murbrechern, WLS Report 50 / Band 3, Universität für Bodenkultur Wien (unveröffentlicht)

Wien, im Oktober 2003

Es soll hier allen, die zum Gelingen dieser Modellversuche beigetragen haben, herzlichster Dank ausgesprochen werden.

Dies betrifft die Firma DOKA Industries, welche uns ihre Produkte – Schalttafeln und Gerüstmaterial – zum Aufbau der Versuchsanlage gratis zur Verfügung gestellt haben. Solche Unterstützung ist bei den knappen Budgets von Universitätsinstituten besonders wichtig.

Das Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau (IWHW) an der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) stellte uns für die Dauer der Modellversuche einen Platz im Wasserbaulabor zur Verfügung. Hier möchte ich auch noch den Mitarbeitern im Wasserbaulabor danken, welche uns bei Problemen mit technischer Unterstützung zur Seite standen und uns regelmäßig mit Werkzeug und ihren Werkstätten ausgeholfen haben. Erwähnt gehört auch die Zusammenarbeit und das Arbeitsklima im Wasserbaulabor, wodurch immer wieder die Motivation gehoben wurde.

Natürlich gebührt ganz besonderer Dank den Mitarbeitern bei der praktischen Durchführung der Modellversuche -

Dipl. Ing. Michael Bacher,
Mag. Markus Friedrich,
Peter Mayr,
Roland Mayr,
Dipl. Ing. Katharina Platzler und
Dipl. Ing. Robert Svaton

- welche während des Sommers 2002 die Versuche gewissenhaft durchführten. Die Arbeit war nicht immer angenehm und leicht, wurde jedoch mit großer Begeisterung ausgeführt.

Ing. Friedrich Zott, unser Institutstechniker, ermöglichte mit seinen Kenntnissen der Messtechnik und mit seinen innovativen Ideen die vorliegenden Ergebnisse aus den Modellversuchen.

Bei der MA 48 am Müllplatz Heiligenstadt konnten wir problemlos das verwendete Versuchsmaterial entsorgen.

Reinhard Lorenz, unterstützte die Versuche mit seinem Wissen im Bereich der Videotechnik.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	5
2	ZUSAMMENFASSUNG	7
3	ZIELSETZUNG	8
4	VERSUCHSANORDNUNG UND -DURCHFÜHRUNG	9
4.1	Aufbau der Versuchsanlage	9
4.1.1	Versuchsrinne	9
4.1.2	Sensorik und Messtechnik	10
4.1.2.1	Ultraschallsensoren	11
4.1.2.2	Druckplatten.....	11
4.1.2.3	Zusätzliche Messungen	12
4.1.2.4	Videoaufzeichnungen	12
4.1.3	Sperrenmodelle.....	12
4.2	Versuchsmaterial	14
4.2.1	Rheologie und Kennzahlen	14
4.2.2	Eigenschaften des verwendeten Feinsediments.....	18
4.3	Versuchsdurchführung	18
4.3.1	Herstellung des Versuchsmaterials.....	21
4.3.2	Durchführung des Einzelversuchs.....	22
4.4	Auswertung der Rohdaten	22
4.4.1	Auswertung der Ultraschallmessung.....	23
4.4.2	Auswertung der Druckmessung	24
5	QUALITATIVE BEURTEILUNG DER MURENDYNAMIK BEI DEN MODELLVERSUCHEN	27
6	ERMITTLUNG VON KENNZAHLEN AUS DEN VERSUCHSDATEN	32
6.1	Untersuchung der Wirkung des Murbrechers.....	32
6.1.1	Möglichkeiten zur Beschreibung der Auswirkung des Bauwerks ...	32

6.1.2	Beschreibung der Auswirkung des Bauwerks in Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie.....	34
6.1.2.1	Betrachtung der Geschwindigkeitsreduktion r_v in Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie.....	35
6.1.2.2	Betrachtung der Relation zwischen den Ablagerungstiefen r_h in Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie	37
6.1.3	Untersuchung eines eventuell vorhandenen Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeitsreduktion und Ablagerungsverhalten	39
6.1.4	Schlussbemerkung zu den Ergebnissen der Untersuchung der Auswirkung des Bauwerks auf die Dynamik der Murwelle	41
6.2	Druckbelastung am Bauwerk.....	42
6.2.1	Maximale Druckspitze am Bauwerk – Betrachtung in Abhängigkeit von der FROUDE-Zahl.....	42
6.2.1.1	Gegenüberstellung von FROUDE-Zahl und Druckfaktor K'_p	42
6.2.1.2	Gegenüberstellung von FROUDE-Zahl und Druckfaktor K''_p	45
6.2.1.3	Vergleich und Diskussion der gefundenen Zusammenhänge....	48
6.2.2	Vergleich der durchgeführten Modellversuche mit vorhandener Literatur zur Druckbelastungen	50
6.2.2.1	Der Murdruck auf Wildbachsperrern nach LICHTENHAHN (1972)	51
6.2.2.2	Die empirische Druckformel nach WATANABE & IKEYA (1981).....	53
6.2.2.3	Die Formel zur Abschätzung der Belastung durch Murstoß nach YU (1992)	55
6.2.2.4	Die Methode zur Ermittlung des Murdrucks nach ARMANINI (1997)	60
6.2.2.5	Diskussion der Ergebnisse des Vergleichs mit Literaturangaben.....	62
7	ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	67
7.1	Erkenntnisse zur Wirkung von Murbrechern auf die Dynamik der Murwelle	67
7.1.1	Auswirkung der Scheibenform	67

7.1.2	Auswirkung des Scheibenabstandes	67
7.2	Erkenntnisse zu den bei Beaufschlagung durch Murgang auftretenden Drücken.....	68
7.2.1	Die Versuchsergebnisse unter dem Gesichtspunkt der bisher gängigen Sperrbemessung	68
7.2.2	Vorschlag einer Formel zur Berechnung der maximal am Bauwerk auftretenden Druckspitze	69
8	VERWENDETE ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN	71
9	LITERATURVERZEICHNIS.....	75
10	VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	79
11	VERZEICHNIS DER TABELLEN.....	83
ANHANG A:	GEMESSENE UND ABGELEITETE WERTE FÜR ALLE VERSUCHE.....	85
A.1	Direkt gemessene Werte	86
A.1.1	Versuchsreihe MV0411-01 bis MV0416-02.....	86
A.1.2	Versuchsreihe MV0425-02 bis MV0514-06.....	86
A.1.3	Versuchsreihe MV0517-01 bis MV0521-02.....	87
A.1.4	Versuchsreihe MV0523-01 bis MV0528-04.....	88
A.1.5	Versuchsreihe MV0605-01 bis MV0610-06.....	88
A.1.6	Versuchsreihe MV0611-01 bis MV0612-04.....	89
A.1.7	Versuchsreihe MV0620-01 bis MV0621-06.....	90
A.1.8	Versuchsreihe MV0624-01 bis MV0625-05.....	90
A.1.9	Versuchsreihe MV0627-01 bis MV0702-02.....	91
A.1.10	Versuchsreihe MV0705-01 bis MV0708-04.....	92
A.1.11	Versuchsreihe MV0710-03 bis MV0710-10.....	92
A.1.12	Versuchsreihe MV0715-01 bis MV0716-06.....	93
A.1.13	Versuchsreihe MV0809-01 bis MV0812-06.....	94
A.1.14	Versuchsreihe MV0813-01 bis MV0819-02.....	94

A.1.15	Versuchsreihe MV0827-01 bis MV0828-04.....	95
A.1.16	Versuchsreihe MV0902-01 bis MV0916-05.....	95
A.1.17	Versuchsreihe MV0917-01 bis MV0918-08.....	96
A.1.18	Versuchsreihe MV0919-01 bis MV0919-08.....	96
A.2	Abgeleitete Werte.....	97
A.2.1	Versuchsreihe MV0411-01 bis MV0416-02.....	97
A.2.2	Versuchsreihe MV0425-02 bis MV0514-06.....	97
A.2.3	Versuchsreihe MV0517-01 bis MV0521-02.....	98
A.2.4	Versuchsreihe MV0523-01 bis MV0528-04.....	99
A.2.5	Versuchsreihe MV0605-01 bis MV0610-06.....	99
A.2.6	Versuchsreihe MV0611-01 bis MV0612-04.....	100
A.2.7	Versuchsreihe MV0620-01 bis MV0621-06.....	101
A.2.8	Versuchsreihe MV0624-01 bis MV0625-05.....	101
A.2.9	Versuchsreihe MV0627-01 bis MV0702-02.....	102
A.2.10	Versuchsreihe MV0705-01 bis MV0708-04.....	103
A.2.11	Versuchsreihe MV0710-03 bis MV0710-10.....	103
A.2.12	Versuchsreihe MV0715-01 bis MV0716-06.....	104
A.2.13	Versuchsreihe MV0809-01 bis MV0812-06.....	105
A.2.14	Versuchsreihe MV0813-01 bis MV0819-02.....	105
A.2.15	Versuchsreihe MV0827-01 bis MV0828-04.....	106
A.2.16	Versuchsreihe MV0902-01 bis MV0916-05.....	106
A.2.17	Versuchsreihe MV0917-01 bis MV0918-08.....	107
A.2.18	Versuchsreihe MV0919-01 bis MV0919-08.....	107
B	FORMELHERLEITUNGEN.....	108
B.1	Berechnungen zur Dichte und den Verhältniszahlen	108
B.2	Berechnungen und Umformungen bei der Druckauswertung	122

1 EINLEITUNG

Seit einigen Dekaden ist der Bautyp „Murbrecher“ eine gängige Maßnahme im Bereich der Wildbachverbauung. Es gibt bereits einige Erfahrung mit dieser Bauweise, allerdings fehlen noch konkrete Dimensionierungsansätze. Dies beruht vor allem darauf, dass es sich bei Murgängen um Fließformen handelt, welche nicht mit den gängigen hydraulischen Ansätzen für NEWTON'sche Flüssigkeiten beschrieben werden können.

Zur Beschreibung bzw. Definition des Phänomens Murgang mag eine der ältesten in Österreich publizierten Arbeiten dazu zitiert werden. HAIDEN (1925) schreibt in seiner Arbeit: *„Unter Murstrom verstehen wir einen nach Überwindung von Bewegungshindernissen in einem Wildbachbette plötzlich in Bewegung geratenen, wasserdurchtränkten Gesteinsbrei.“* Immer wieder findet man in der Literatur im Rahmen anderer Arbeiten Beschreibungen und Definitionen des Prozesses Mure. HAMPEL (1980) schreibt z.B. über Murmaterial, dass eine Mure *„[...] nicht nur aus Geschiebe sondern auch aus Schwebstoff, der irgendwie berücksichtigt werden muß. [...]“* besteht. Normalerweise wird der Begriff der Mure - als Fachterminus im Bereich des Schutzes vor Alpinen Naturgefahren verwendet – im Englischen als *„debris flow“* bezeichnet. Es finden sich aber auch Bezeichnungen wie *„mud flow“* oder *„debris avalanche“*, welche im deutschsprachigen Alpenraum unter den Begriff *„Mure“* fallen. Der Sperrentyp des Murbrechers ist für alle diese Massenbewegungsprozesse als adäquate Schutzmaßnahme geeignet. Als Beispiele für Definitionen in der internationalen Literatur mögen die Beschreibungen von JOHNSON (1970), wo Muren als *„[...] a gravity-induced mass movement intermediate between landsliding and waterflooding, with mechanical characteristics different of either of these processes.“* definiert werden oder VARNES (1978) der von *„[...] a form of rapid mass movement of a body of granular solids, water and air“* spricht, dienen. In der neueren internationalen Literatur scheint die Definition von Iverson (1997) geeignet, den Prozess des Murganges zu beschreiben. Dabei ist *„[...] the necessity of interacting solid and fluid forces [...]“* entscheidend um von einer Mure zu sprechen. Er bezieht sich dabei auf Prozesse, die auftreten *„[...] when masses of poorly sorted sediment agitated and saturated with water, surge down slopes in response to gravitational attraction. [...]“* Ziel dieser Arbeit ist es jedoch nicht, den

Prozess der Murenstehung, sondern die Wirkung von Schutzbauten vom Typ eines Murbrechers zu untersuchen. Dieser kurze Exkurs zur Definition von Muren soll nur dazu dienen, klar festzulegen, um welche Prozesstypen es sich handelt, wenn von Beaufschlagung durch Murgang gesprochen wird.

Es ist wenig Konkretes über die Wirkung von Murbrechern auf die Dynamik von Murwellen bekannt. Ebenso gibt es kaum Erkenntnisse über die tatsächlichen Belastungen von Bauwerken bei Beaufschlagung durch Murgang. Daher sollten mit Hilfe von Modellversuchen neue Erkenntnisse über einerseits die Wirkung, andererseits die Belastung von Murbrechern gewonnen werden.

In der vorliegenden Arbeit werden Modellversuche beschrieben, welche sich auf den Bautyp „Offene Aufgelöste Sperre mit Scheiben“ (*Klassifikation laut Band 2*) beschränken. Die vorliegenden Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchen geben eine Richtung vor, können jedoch noch nicht als allgemein gültige Dimensionierungsregeln betrachtet werden.

In Band 1 dieser Arbeit wird ein kurzer Überblick über in Österreich bereits durchgeführte Modellversuche gegeben, daher sollen diese hier nicht weiter behandelt werden. International betrachtet, ist es momentan in der Murforschung Stand der Technik, Modellversuche einzusetzen. Allerdings beziehen sich ein Großteil dieser Versuche auf rheologische Untersuchungen.

2 ZUSAMMENFASSUNG

Um verbesserte Erkenntnisse zu den im forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung üblichen Bauwerkstyp Murbrecher zu erlangen, wurden im Rahmen dieses Projekts kleinmaßstäbliche Modellversuche durchgeführt. Die Auswertung der Versuchsdaten und die Ableitung von Ergebnissen aus den Modellversuchen gliederte sich in zwei Bereiche. Einerseits wurde untersucht, wie sich das Bauwerk als solches auf die Dynamik der Murwelle auswirkt, andererseits wurde die Einwirkung des Murgangs - in Form der Druckbelastung - auf das Bauwerk behandelt.

Bei der Betrachtung der Auswirkung des Bauwerks auf die Dynamik der Murwelle wurde die Wirkung des Bauwerks als Schutzmaßnahme durch die Geschwindigkeitsreduktion und durch den Rückstau bzw. die Ablagerung hinter dem Bauwerk beschrieben. Untersucht wurde einerseits der Einfluss der Form der verwendeten Scheiben, andererseits die Abhängigkeit des dynamischen Verhaltens von der Öffnungsweite zwischen den Scheiben. Es konnten auf Basis der bei den Versuchen durchgeführten Beobachtungen qualitative Aussagen zum Einfluss der Bauwerksgeometrie getroffen werden, jedoch keine in Zahlen auszudrückenden Regeln aufgestellt werden. Die Geschwindigkeitsreduktion durch das Sperrbauwerk ist nicht so sehr von der Bauwerksgeometrie abhängig wie die Ablagerung eines Teils des Murmaterials. Der Einfluss der Öffnungsweite auf die Ablagerungstendenzen ist allerdings stark von der Form der Scheiben abhängig.

Bei der Untersuchung der bei den Modellversuchen gemessenen Druckspitzen konnte ein eindeutiger Zusammenhang mit der FROUDE-Zahl der Murwelle festgestellt werden. Durch Umformung und Vereinfachung dieses Zusammenhangs konnte eine empirische Druckformel für die maximal am Bauwerk auftretende Druckspitze hergeleitet werden. Diese Formel stellt noch keine allgemeingültige Methode zur Bemessung von Murbrechern dar. Allerdings konnte eine Richtung aufgezeigt werden, welche mit weiteren Versuchsreihen und Druckmessungen bei natürlichen Murgängen weiterverfolgt werden sollte.

3 ZIELSETZUNG

Für die Planung und Dimensionierung von Murbrechern ist einerseits die Wirkung der Konstruktion auf das Verhalten der Murwelle, andererseits die Belastung des Bauwerks durch den Murgang von Interesse. Bei den Versuchen war daher das Ziel sowohl die Wirkung verschiedener Scheibenformen und –abstände zu untersuchen, als auch die am Bauwerk auftretenden Kräfte zu ermitteln.

Da es sich bei Murgängen um Fließvorgänge handelt, die sich durch nicht-NEWTON'sches Verhalten auszeichnen, ist es schwierig, mit den gängigen Methoden der Gerinnehydraulik die Fließprozesse zu berechnen oder simulieren. Daher wird - wie auch im Wasserbau bei komplexeren Fragestellungen - versucht durch Modellversuche neue, verbesserte Antworten auf diese Fragen zu erhalten.

Bei den durchgeführten Modellversuchen war das Hauptziel, Erkenntnisse über das Verhalten von Murwellen beim Auftreffen auf Sperrenbauwerke zu gewinnen. Dabei sollen die aus den Versuchen gewonnenen Werte, Auskunft über das tatsächliche Verhalten in der Natur liefern. Die Idealvorstellung wäre, allgemeingültige Dimensionierungsregeln für Bauwerke dieser Art zu erhalten. Dazu sind jedoch noch umfangreiche Forschungsarbeiten erforderlich, in dieser Arbeit sollen in erster Linie vorhandene Ansätze überprüft und verbessert werden und mögliche Richtungen für die zukünftige Forschung aufgezeigt werden. Ziel für die Zukunft soll es sein - wie im Bauwesen üblich - Belastungsfälle zu definieren, über die die statische Berechnung von Murbrechern ermöglicht wird. Außerdem ist die Idealvorstellung, genauere Aussagen über die Energiedissipation abhängig von der Gestaltung des Bauwerks zu erhalten, um die Bauwerke nach der gewünschten Auswirkung auf die Murwelle gestalten zu können.

4 VERSUCHSANORDNUNG UND -DURCHFÜHRUNG

4.1 Aufbau der Versuchsanlage

Die Versuchsanlage wurde im Wasserbaulabor des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau (IWHW) aufgebaut.

Auf einer aus Gerüstrohren und entsprechenden Verbindungselementen bestehenden Grundeinheit wurde die Versuchsrinne in der Neigung verstellbar montiert. Über der Anlage wurde der Einfülltrichter auf einer erhöhten Arbeitsbühne befestigt. Durch ein Fallrohr wird das Versuchsmaterial zur Murrinne geführt. Am Ende der Rinne wird das Material in einem Auffangbehälter gesammelt. Der Aufbau der Versuchsanlage ist in *Abbildung 1* dargestellt.

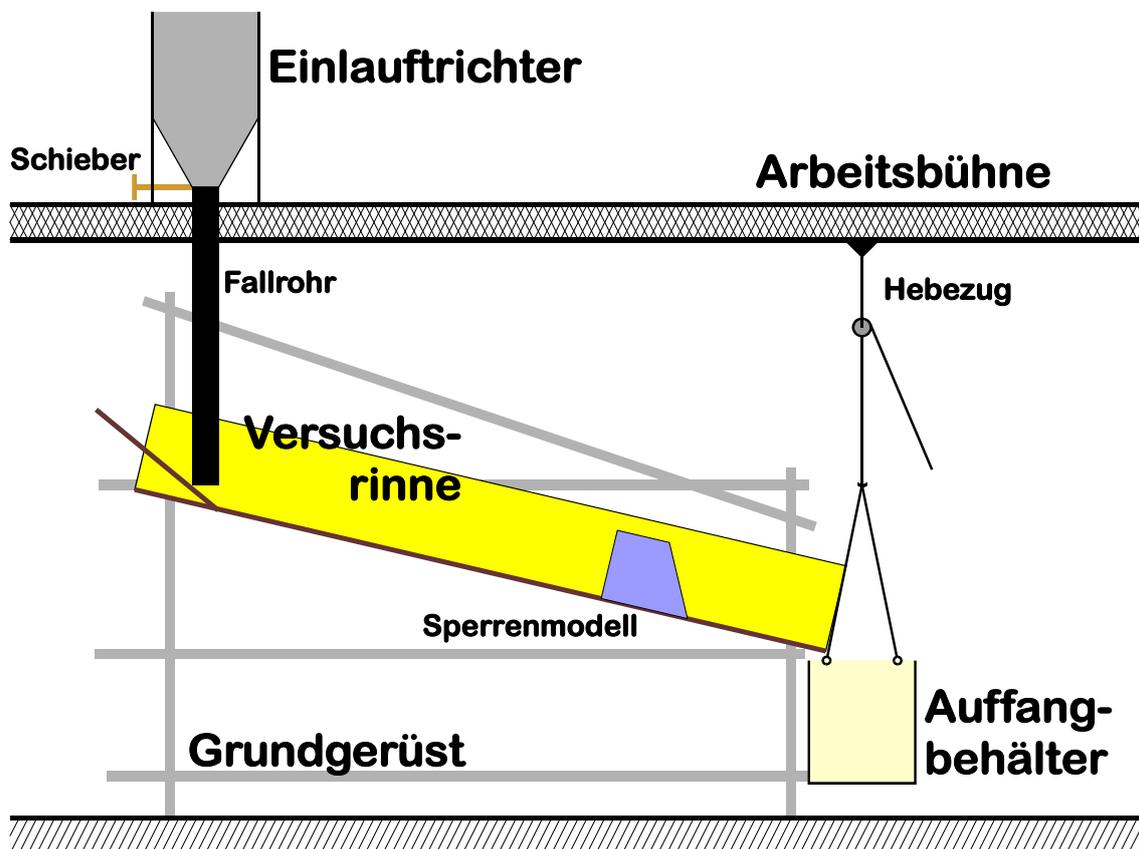


Abbildung 1: Überblicksskizze der Versuchsanlage

4.1.1 Versuchsrinne

Die Versuchsrinne wurde aus mehrschichtverleimten Schaltafeln aufgebaut. Im Bereich des Sperrenmodells wurde eine Seitenwand aus Plexiglas ausgeführt, um Videoaufnahmen der Versuche zu ermöglichen. Die konstruktiven Versteifungen

wurden aus Bauholz ausgefertigt. In *Abbildung 2* ist die Konstruktion der Versuchsrinne dargestellt.

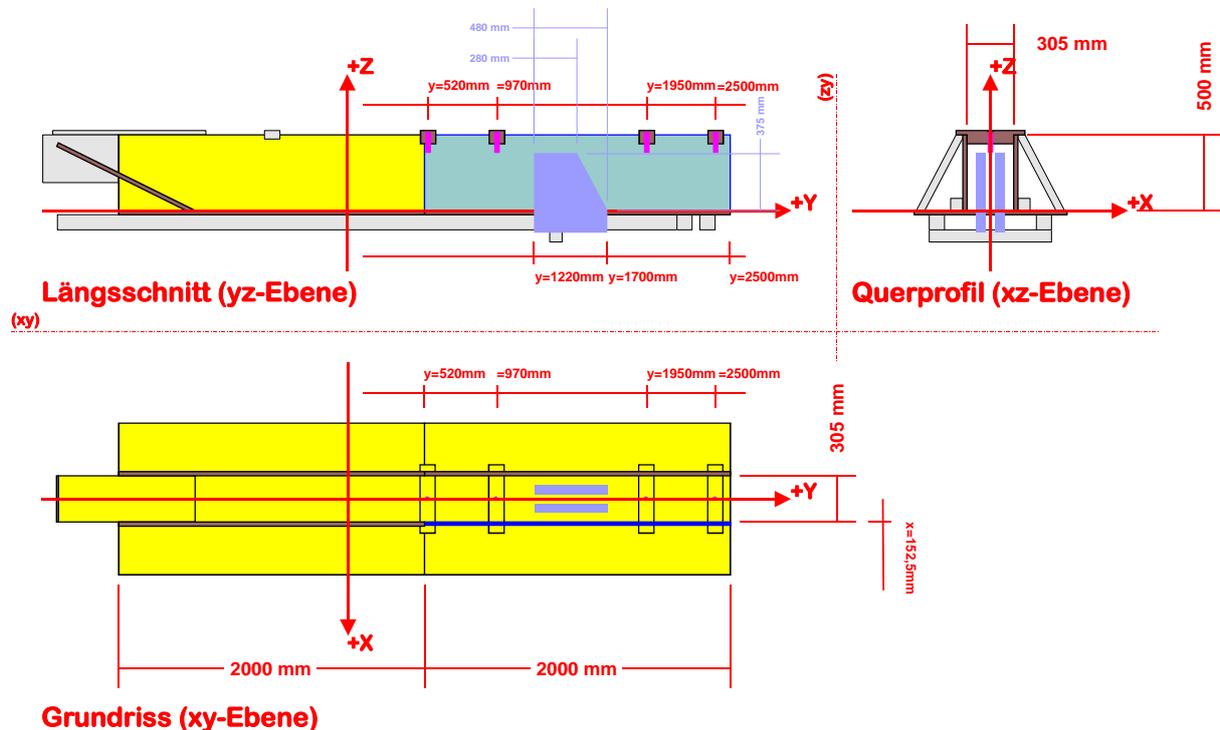


Abbildung 2: Geometrie und Koordinatensystem der Versuchsrinne

4.1.2 Sensorik und Messtechnik

Die Versuchsanlage ist mit diversen Messeinrichtungen ausgestattet, die die Daten für die weiterführende Versuchsauswertung liefern. Zentrale Einheit der Messausstattung sind zwei 8-Kanal-Messkraftverstärker, die mit einem Notebook verbunden sind. An diese sind die im Folgenden beschriebenen Messsensoren angeschlossen. Die Datenaufzeichnung erfolgt mit 400 Hz, wodurch Messungen alle 0,0025 Sek. erreicht werden.

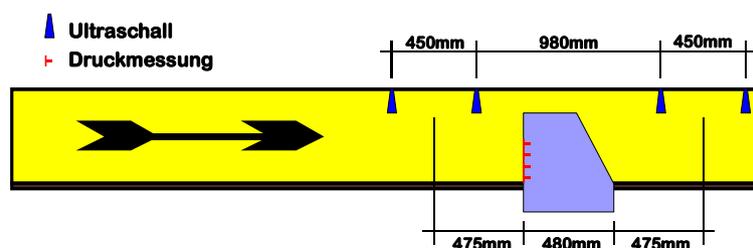


Abbildung 3: Anordnung der Messsensorik in der Versuchsrinne

4.1.2.1 Ultraschallsensoren

Zur Messung der Abflusstiefe kommen Ultraschallsensoren zum Einsatz. Es handelt sich um temperaturkompensierte Sensoren mit Einkopfsystem und Analogausgang. Als Versorgungsspannung benötigen die Sensoren 12V Gleichstrom welcher aus einem Netzgerät bezogen wird.

Es sind zwei Ultraschallpaare über der Murrinne angebracht, ein Paar oberhalb des Sperrenmodells, eines unterhalb (*Abbildung 3*). Aus dem Abstand zwischen den beiden Sensoren eines Paares und dem Zeitunterschied des Durchgangs der Murfront unter den beiden Sensoren, kann die Geschwindigkeit der Mure rückgerechnet werden (*Abbildung 4*).

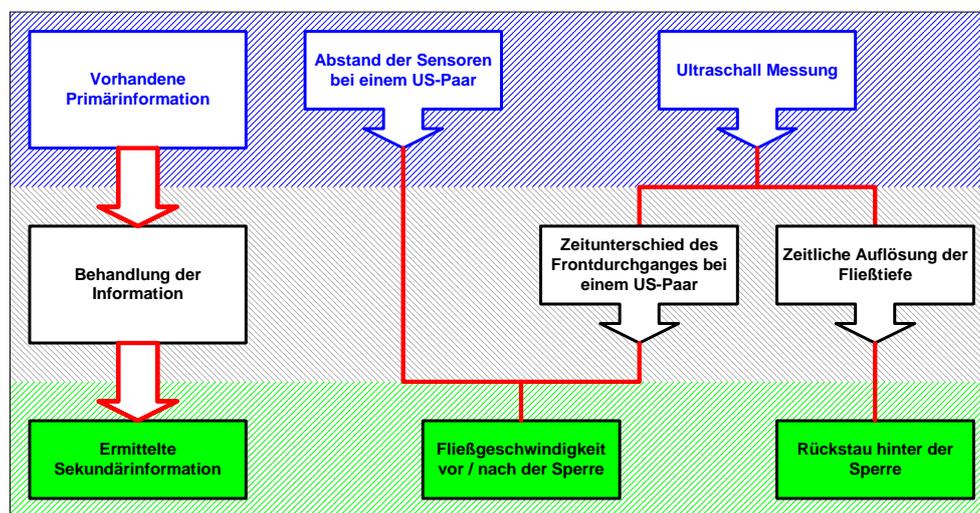


Abbildung 4: Datenermittlung aus der Ultraschallmessung

4.1.2.2 Druckplatten

Zur Messung des an der Sperre auftretenden Drucks, wurden Scheiben konstruiert, die mit Druckplatten ausgestattet sind. Diese Druckplatten leiten den auftretenden Druck auf Wägezellen, die die Ersatzkraft für den jeweiligen Druck messen (*Abbildung 5*). Auf diese Weise kann der auf die Sperre auftretende Druck in vier Höhen in hoher zeitlicher Auflösung gemessen werden.

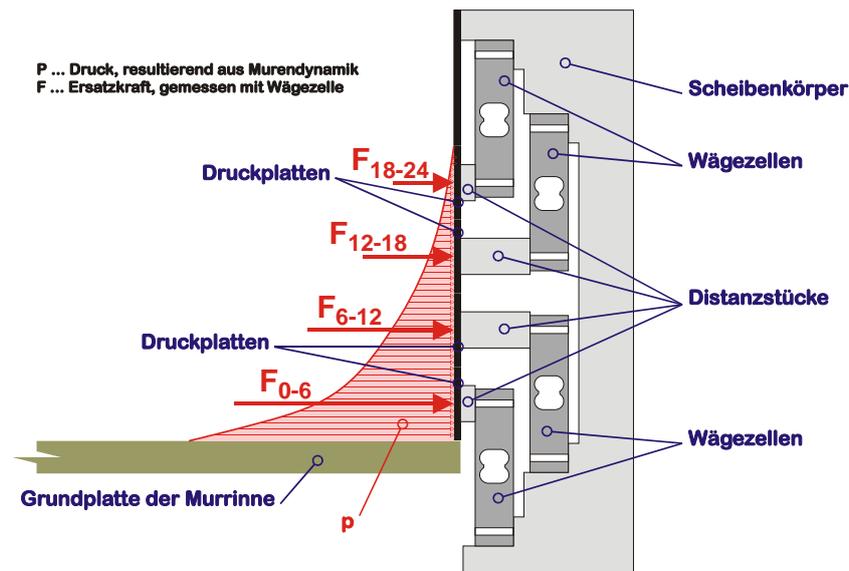


Abbildung 5: Konstruktionsprinzip und Funktionsweise der Druckmessung

4.1.2.3 Zusätzliche Messungen

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Messungen kamen eine weitere Waagezelle zur Messung der Normalspannung unter dem obersten Ultraschallsensor, ein Geophon sowie eine Wägeeinrichtung am Auffangbehälter zum Einsatz. Die Ergebnisse dieser Messungen dienen zur Kontrolle von Einstellungen und zur Entwicklung erweiterter Messverfahren für weiterführende Versuche.

4.1.2.4 Videoaufzeichnungen

Um zusätzliches Material bei der Auswertung zu erhalten wurden die Versuche mit zwei Videoeinheiten beobachtet. Dabei kam eine Kamera über der Versuchsrinne, eine seitlich zum Einsatz. Um die seitliche Videoüberwachung zu ermöglichen, wurde ein Teil der Seitenwand des Murkanals in Plexiglas ausgeführt. In der Versuchsrinne wurden Messmarken zur besseren Auswertung der Videoaufzeichnungen angebracht.

4.1.3 Sperrenmodelle

Bei den Versuchen kamen zwei Typen von Scheiben zum Einsatz. Die Bezeichnung (Typ 1 und Typ 2) ist aus *Abbildung 6* zu entnehmen.

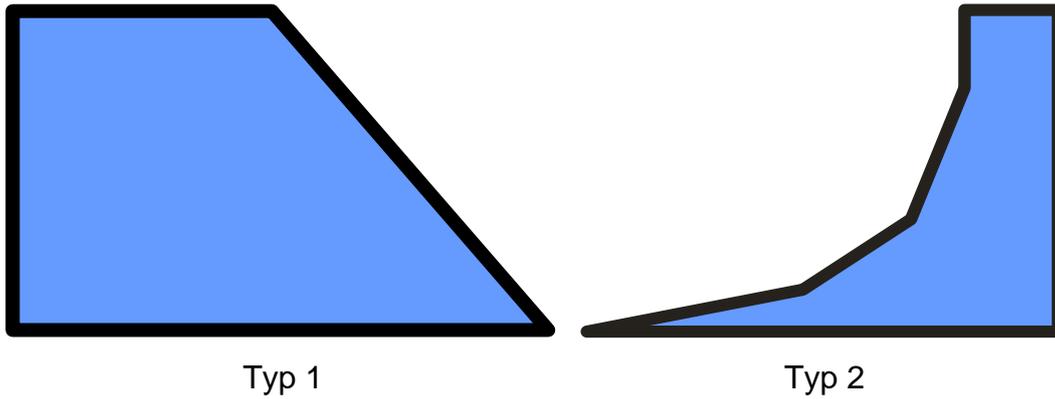


Abbildung 6: Verwendete Scheibentypen

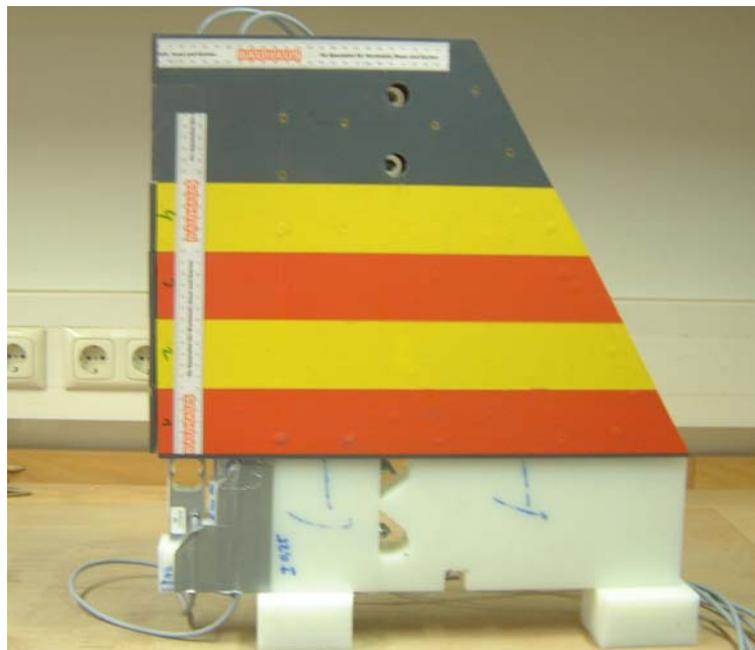


Abbildung 7: Foto einer Modellscheibe (mit eingebauten Wägezellen)

Zusätzlich zu den 2 verschiedenen Scheibentypen kamen Scheiben in unterschiedlichen Stärken zum Einsatz. Dazu wurden in der praktischen Durchführung nach dem Abschluss einer Versuchsreihe die vorhandenen Scheiben verbreitert. Die daraus entstehende Sperrengeometrie ist in *Tabelle 1* und *Abbildung 8* dargestellt.

Verbreiterung	Scheibenstärke	Öffnungsweite	Verhältnis offen : geschlossen
0x	61,0 mm	61,0 mm	1 : 1,0
1x	77,5 mm	50,0 mm	1 : 1,6
2x	94,0 mm	39,0 mm	1 : 2,4

Tabelle 1: Abmessungen der Sperrenmodelle für die verschiedenen Scheibenstärken

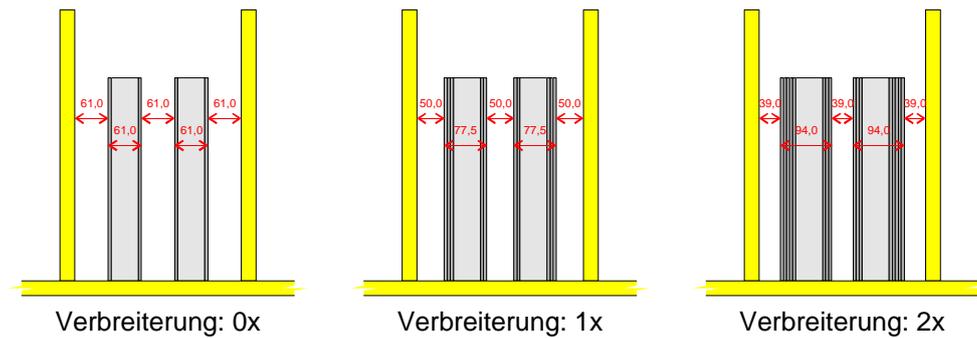


Abbildung 8: Dimensionen der Modellscheiben für die verschiedenen Verbreiterungen

4.2 Versuchsmaterial

Für die Modellversuche wurde die „Standard Debris Flow Mixture“ definiert. Dazu wurden die Materialeigenschaften und die entscheidenden rheologischen Parameter von dokumentierten natürlichen Murenabgängen erhoben (STEINWENDTNER et al., 1997; HÜBL & STEINWENDTNER, 1999; HÜBL & STEINWENDTNER, 2000). Dabei kam eine Förderbandrinne zum Einsatz, welche am Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen an der Universität für Bodenkultur Wien entwickelt wurde (STEINWENDTNER 1997). Diese Untersuchungsmethode wurde um ein Ausbreitmaß erweitert. Dabei handelt es sich um eine Messmethode aus der Betonprüftechnik, welche zur Anwendung mit Murmaterial adaptiert wurde.

4.2.1 Rheologie und Kennzahlen

Aus dem Ergebnis dieser rheologischen Untersuchungen wurden typische Parameter von Murmaterial ermittelt. Die wichtigsten rheologischen Eigenschaften sind Grenzscherubspannung und dynamische Viskosität. Als Kennzahl für die dynamische Viskosität wurde die BINGHAM-Viskosität gewählt, da das BINGHAM-Modell von vielen Autoren in der Literatur zur Beschreibung des Fließverhaltens von Muren vorgeschlagen wird (COSTA, 1988; JORDAN, 1994). Die rheologischen Parameter Grenzscherubspannung τ_Y und BINGHAM-Viskosität η_B für die letztendlich als Versuchsmaterial gewählten Mischungen der „Standard Debris Flow Mixture“ sind in *Abbildung 9* und *Abbildung 10* dargestellt.

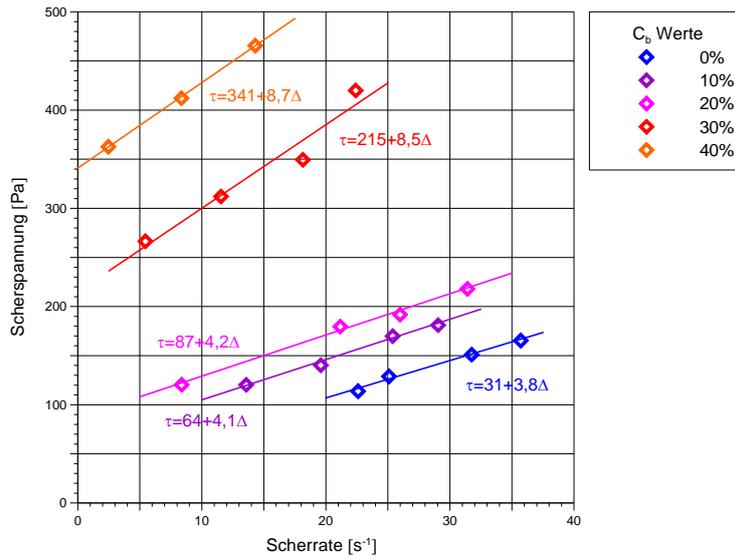


Abbildung 9: Rheogramm der Standard Debris Flow Mixture

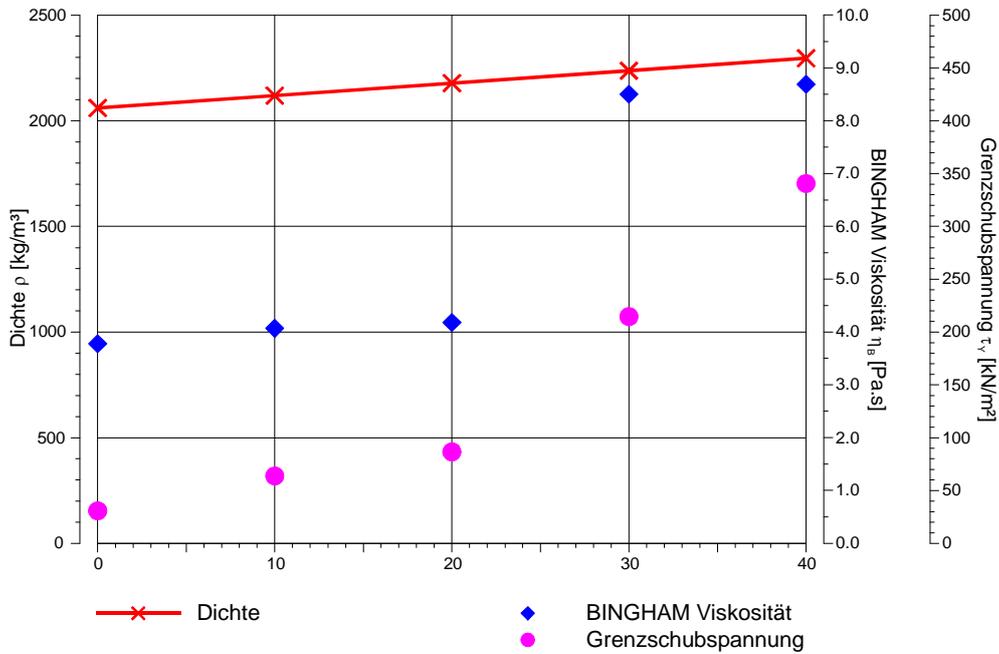


Abbildung 10: Materialeigenschaften der Standard Debris Flow Mixture

Zur praktischen Versuchsdurchführung ergab sich für die Standard Debris Flow Mixture als Fluid eine Mischung aus 40%Vol. Hafnerlehm und 60%Vol. Wasser. Diesem Fluid wurden in 5 Stufen von 0%G bis 40%G Feststoffe beigemischt. Als Feststoff wurde natürlicher Schotter gewählt, wobei zwei Kornverteilungen (4 – 8 mm & 2 – 16 mm) zur Anwendung kamen. Daraus ergaben sich für jede Versuchsanordnung 9 Materialmischungen. Die Zusammensetzung der Versuchsmischungen sind in *Abbildung 11* und *Abbildung 12* dargestellt.

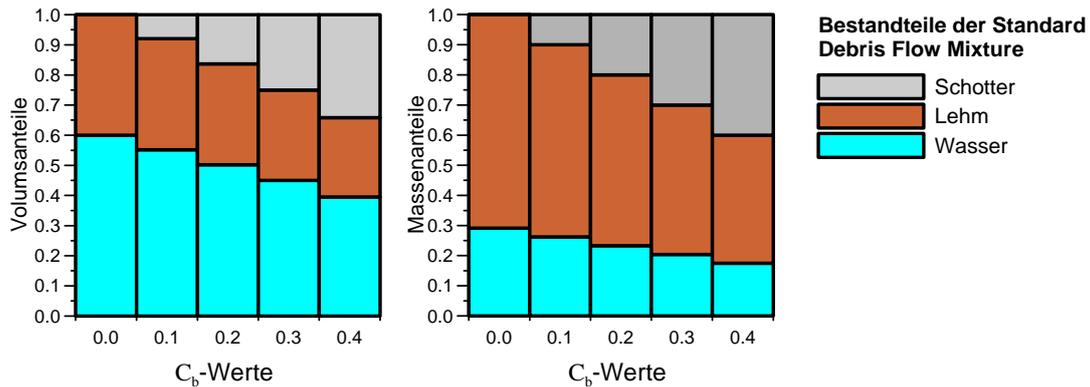


Abbildung 11: Zusammensetzung des Versuchsmaterials für die verschiedenen Feststoffanteile

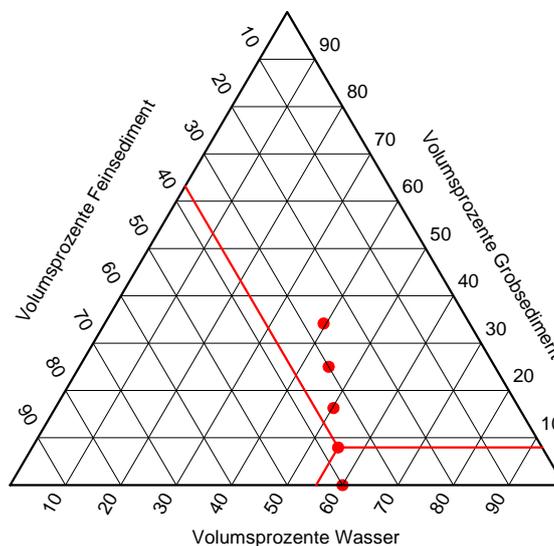


Abbildung 12: Volumetrische Zusammensetzung des Versuchsmaterials für die verschiedenen Feststoffanteile, Darstellung als Ternary-Phase-Diagramm

Dabei kommen folgenden Ausdrücke, wie sie in der Fachliteratur üblich sind zum Einsatz:

- **Murmatrix:** Jener Teil des Murmaterials, welcher eine Mischung aus Wasser und Feinsediment darstellt und als interstitiales Fluid im Murkörper wirkt.
- **Rigid Phase:** Der Anteil an Grobsediment, welcher in der Murmatrix transportiert wird. Matrix und Rigid Phase bilden zusammen das Murmaterial.

Im Folgenden sollen die wichtigsten Kennzahlen und Verhältniswerte für die verschiedenen Mischungen der Standard Debris Flow Mixture sowie die Umrechnungsformeln zwischen diesen dargestellt werden.

Die Dichte der Versuchsmischung hängt ab von den jeweiligen Dichten der drei Komponenten. In *Tabelle 2* sind diese dargestellt.

Komponente der Standard Debris Flow Mixture	Abkürzung bzw. Formelzeichen	Wert
Wasser	ρ_{H_2O}	1.000 kg/m ³
Feinsediment (Lehm)	ρ_f	3.651 kg/m ³
Grobsediment (Schotter)	ρ_c	2.648 kg/m ³

Tabelle 2: Dichte der Komponenten der Standard Debris Flow Mixture

Die Ermittlung der Dichte der Murmatrix bzw. der Gesamtmischung, erfolgt nach folgenden Gleichungen:

$$\rho_{mat} = \frac{3}{5} \rho_{H_2O} + \frac{2}{5} \rho_f \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\rho_{sed} = \rho_c \frac{3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f}{3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f + 2(1 - C_b) \cdot \rho_c} \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\rho_{DF} = \rho_c \cdot \frac{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f}{3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f + 5(1 - C_b) \cdot \rho_c} \quad (\text{Gl. 3})$$

Eine entscheidende Verhältniszahl ist der C_b -Wert. Er beschreibt den Gewichtsanteil der groben Feststoffe (> 2 mm) für das Versuchsmaterial. Der C_V -Wert beschreibt den Volumensanteil aller Feststoffe am Versuchsmaterial. Zur Umrechnung des C_V -Wertes bei bekanntem C_b -Wert nach (Gl. 4) sind die Werte für die Dichte der einzelnen Komponenten (*Tabelle 2*) erforderlich.

$$C_V = \frac{2(1 - C_b) \cdot \rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{5(1 - C_b) \cdot \rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \quad (\text{Gl. 4})$$

Interessant ist auch noch die Volumskonzentration der Grobkomponenten $C_{V,c}$, welche nach (Gl. 5) berechnet werden kann.

$$C_{V,c} = \frac{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{5(1 - C_b) \cdot \rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \quad (\text{Gl. 5})$$

Auf Basis dieser Beziehungen kann die Dichte des Versuchsmaterials auch in der Form

$$\rho_{DF} = \frac{(1 - C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - (2 - 5C_V) \cdot \rho_c}{(2 - 5C_V) \cdot (4 - C_V)} \quad (\text{Gl. 6})$$

in Abhängigkeit von der Volumskonzentration der Feststoffe oder durch die Gleichung

$$\rho_{DF} = \frac{(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)^2 - C_{V,c} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{5(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 6C_{V,c} \cdot \rho_c)} \quad (\text{Gl. 7})$$

in Abhängigkeit von der Volumskonzentration der groben Feststoffe ausgedrückt werden.

4.2.2 Eigenschaften des verwendeten Feinsediments

Beim verwendeten Hafnerlehm handelt es sich um karbonatreichen Ton mit relativ geringem Schichtsilikatanteil. 50 % der Tonfraktion bestehen allerdings aus den sehr quellfähigen Smectiten (3-Schicht Tonminerale). Kaolinit, Illit und Chlorit (2-Schicht Tonminerale) sind hingegen nicht quellbar. Aus *Tabelle 3* ist die exakte Zusammensetzung des verwendeten Materials ersichtlich. Diese Kenndaten für das gewählte Material wurden aus STEINWENDTNER (1997) übernommen, da in dieser Arbeit die ersten Untersuchungen in diese Richtung unternommen wurden.

Mineral	Anteil [Gewichtsprozent]
Quarz	20 %
Schichtsilikate	22 %
Feldspate	8 %
Kalzit	29 %
Dolomit	21 %

Tabelle 3: Gesamtmineralbestand des verwendeten Hafnerlehms (STEINWENDTNER, 1997)

4.3 Versuchsdurchführung

Aus vorangehenden Probeversuchen mit verschiedener Neigung des Versuchskanals sowie unterschiedlicher Menge an Versuchsmaterial wurden die idealen Werte ermittelt. Die eigentlichen Versuche wurden dann mit 100 l Murmaterial und 23,7 % Neigung durchgeführt. Diese Konfiguration stellte die ideale Voraussetzung zum Durchführen der Versuche dar, deckt aber sicherlich nicht alle in der Natur vorkommenden Verhältnisse ab. Da es sich jedoch um die ersten in dieser

Art durchgeführten Versuche handelt, musste eine Versuchsanordnung gefunden werden, die eine problemlose Versuchsdurchführung garantiert.

Mit der oben beschriebenen Versuchsanlage wurden ca. 170 Einzelversuche durchgeführt. Bei den Versuchen mit Druckmessung wurden vier Wiederholungen jeder möglichen Kombination durchgeführt, während beim Scheibentyp 2, bei welchem keine Drücke gemessen wurden, nur 2 Wiederholungen pro Versuchsanordnung stattgefunden haben. Zur Auswertung und Archivierung der Versuchsdaten wurde eine Datenbank angelegt. Jeder durchgeführte Versuch ist über eine eindeutige Versuchs ID festgelegt. In *Tabelle 4* und *Tabelle 5* sind sämtliche durchgeführten Versuche dargestellt.

Versuchs ID	Versuchsordnung				Versuchs ID	Versuchsordnung				Versuchs ID	Versuchsordnung			
	C _b [-]	Material	Sperrtyp	Verbreiterung		C _b [-]	Material	Sperrtyp	Verbreiterung		C _b [-]	Material	Sperrtyp	Verbreiterung
MV0411-01	0,00	0	1	0	MV0605-01	0,00	0	1	1	MV0627-01	0,00	1	1	2
MV0411-02	0,00	0	1	0	MV0605-02	0,00	0	1	1	MV0701-01	0,00	1	1	2
MV0412-01	0,10	1	1	0	MV0605-03	0,10	1	1	1	MV0701-02	0,00	1	1	2
MV0412-02	0,10	1	1	0	MV0605-04	0,10	1	1	1	MV0701-03	0,10	1	1	2
MV0415-01	0,20	1	1	0	MV0610-01	0,20	1	1	1	MV0701-04	0,10	1	1	2
MV0415-02	0,20	1	1	0	MV0610-02	0,20	1	1	1	MV0701-05	0,20	1	1	2
MV0416-01	0,40	1	1	0	MV0610-03	0,30	1	1	1	MV0701-06	0,20	1	1	2
MV0416-02	0,40	1	1	0	MV0610-04	0,30	1	1	1	MV0701-07	0,20	1	1	2
MV0425-02	0,00	0	1	0	MV0610-05	0,40	1	1	1	MV0701-08	0,30	1	1	2
MV0425-03	0,00	0	1	0	MV0610-06	0,40	1	1	1	MV0701-09	0,30	1	1	2
MV0426-01	0,10	1	1	0	MV0611-01	0,00	1	1	1	MV0702-01	0,40	1	1	2
MV0426-02	0,10	1	1	0	MV0611-02	0,00	1	1	1	MV0702-02	0,40	1	1	2
MV0514-01	0,20	1	1	0	MV0611-03	0,10	1	1	1	MV0705-01	0,00	1	1	2
MV0514-02	0,20	1	1	0	MV0611-04	0,10	1	1	1	MV0705-02	0,00	1	1	2
MV0514-03	0,30	1	1	0	MV0611-05	0,20	1	1	1	MV0705-03	0,10	1	1	2
MV0514-04	0,30	1	1	0	MV0611-06	0,20	1	1	1	MV0705-04	0,10	1	1	2
MV0514-05	0,40	1	1	0	MV0612-01	0,30	1	1	1	MV0705-05	0,20	1	1	2
MV0514-06	0,40	1	1	0	MV0612-02	0,30	1	1	1	MV0705-06	0,20	1	1	2
MV0517-01	0,10	2	1	0	MV0612-03	0,40	1	1	1	MV0708-01	0,30	1	1	2
MV0517-02	0,10	2	1	0	MV0612-04	0,40	1	1	1	MV0708-02	0,30	1	1	2
MV0517-03	0,20	2	1	0	MV0620-01	0,10	2	1	1	MV0708-03	0,40	1	1	2
MV0517-04	0,20	2	1	0	MV0620-02	0,10	2	1	1	MV0708-04	0,40	1	1	2
MV0517-05	0,30	2	1	0	MV0620-03	0,20	2	1	1	MV0710-03	0,10	2	1	2
MV0517-06	0,30	2	1	0	MV0621-02	0,20	2	1	1	MV0710-04	0,10	2	1	2
MV0521-01	0,40	2	1	0	MV0621-03	0,30	2	1	1	MV0710-05	0,20	2	1	2
MV0521-02	0,40	2	1	0	MV0621-04	0,30	2	1	1	MV0710-06	0,20	2	1	2
MV0523-01	0,10	2	1	0	MV0621-05	0,40	2	1	1	MV0710-07	0,30	2	1	2
MV0523-02	0,10	2	1	0	MV0621-06	0,40	2	1	1	MV0710-08	0,30	2	1	2
MV0523-03	0,20	2	1	0	MV0624-01	0,10	2	1	1	MV0710-09	0,40	2	1	2
MV0523-04	0,20	2	1	0	MV0624-02	0,10	2	1	1	MV0710-10	0,40	2	1	2
MV0528-01	0,30	2	1	0	MV0624-03	0,20	2	1	1	MV0715-01	0,10	2	1	2
MV0528-02	0,30	2	1	0	MV0624-04	0,20	2	1	1	MV0715-02	0,10	2	1	2
MV0528-03	0,40	2	1	0	MV0625-01	0,20	2	1	1	MV0716-01	0,20	2	1	2
MV0528-04	0,40	2	1	0	MV0625-02	0,30	2	1	1	MV0716-02	0,20	2	1	2
					MV0625-03	0,30	2	1	1	MV0716-03	0,30	2	1	2
					MV0625-04	0,40	2	1	1	MV0716-04	0,30	2	1	2
					MV0625-05	0,40	2	1	1	MV0716-05	0,40	2	1	2
										MV0716-06	0,40	2	1	2

Tabelle 4: Durchgeführte Versuche mit Sperrtyp 1 (Material 0: nur Murmatrix, 1: rigid phase 4 – 8 mm, 2: rigid phase 2 – 16 mm)

Versuchs ID	Versuchsordnung				Versuchs ID	Versuchsordnung				Versuchs ID	Versuchsordnung			
	C _b [-]	Material	Sperrentyp	Verbreiterung		C _b [-]	Material	Sperrentyp	Verbreiterung		C _b [-]	Material	Sperrentyp	Verbreiterung
MV0809-01	0,00	0	2	0	MV0827-01	0,00	0	2	1	MV0917-01	0,00	0	2	2
MV0809-02	0,00	0	2	0	MV0827-02	0,00	0	2	1	MV0917-02	0,00	0	2	2
MV0809-03	0,10	1	2	0	MV0827-03	0,10	1	2	1	MV0918-01	0,10	1	2	2
MV0809-04	0,10	1	2	0	MV0827-04	0,10	1	2	1	MV0918-02	0,10	1	2	2
MV0812-01	0,20	1	2	0	MV0827-05	0,10	1	2	1	MV0918-03	0,20	1	2	2
MV0812-02	0,20	1	2	0	MV0827-06	0,20	1	2	1	MV0918-04	0,20	1	2	2
MV0812-03	0,30	1	2	0	MV0827-07	0,20	1	2	1	MV0918-05	0,30	1	2	2
MV0812-04	0,30	1	2	0	MV0827-08	0,20	1	2	1	MV0918-06	0,30	1	2	2
MV0812-05	0,40	1	2	0	MV0828-01	0,30	1	2	1	MV0918-07	0,40	1	2	2
MV0812-06	0,40	1	2	0	MV0828-02	0,30	1	2	1	MV0918-08	0,40	1	2	2
MV0813-01	0,10	2	2	0	MV0828-03	0,40	1	2	1	MV0919-01	0,10	2	2	2
MV0813-02	0,10	2	2	0	MV0828-04	0,40	1	2	1	MV0919-02	0,10	2	2	2
MV0813-03	0,20	2	2	0	MV0902-01	0,00	0	2	1	MV0919-03	0,20	2	2	2
MV0814-01	0,20	2	2	0	MV0902-02	0,00	0	2	1	MV0919-04	0,20	2	2	2
MV0814-02	0,30	2	2	0	MV0902-03	0,10	2	2	1	MV0919-05	0,30	2	2	2
MV0814-03	0,30	2	2	0	MV0902-04	0,10	2	2	1	MV0919-06	0,30	2	2	2
MV0814-04	0,40	2	2	0	MV0902-05	0,10	2	2	1	MV0919-07	0,40	2	2	2
MV0819-01	0,40	2	2	0	MV0902-06	0,20	2	2	1	MV0919-08	0,40	2	2	2
MV0819-02	0,10	2	2	0	MV0903-01	0,20	2	2	1					
					MV0904-01	0,30	2	2	1					
					MV0916-01	0,30	2	2	1					
					MV0916-02	0,40	2	2	1					
					MV0916-03	0,40	2	2	1					
					MV0916-04	0,40	2	2	1					
					MV0916-05	0,40	2	2	1					

Tabelle 5: Durchgeführte Versuche mit Sperrentyp 2 (Material 0: nur Murmatrix, 1: rigid phase 4 – 8 mm, 2: rigid phase 2 – 16 mm)

4.3.1 Herstellung des Versuchsmaterials

Das in *Kapitel 4.2* beschriebene Versuchsmaterial – die sogenannte „Standard Debris Flow Mixture“ – wurde für die Modellversuche in großen Mengen hergestellt. Als Matrix wurde handelsüblicher Hafnerlehm mit Wasser vermischt und mittels eines Bodenfeuchtemessgeräts der Firma Vitel der volumetrische Wassergehalt eingestellt. Vor der Fertigstellung war eine genügend lange Wartephase von Nöten, um den Tonmineralen die Möglichkeit zum Quellen zu geben. Für die Herstellung von

Versuchsmischungen mit C_b -Werten größer Null, wurde mit Hilfe einer Wägevorrichtung der benötigte Anteil an grobem Sediment beigegeben. Für Versuchsanordnungen mit Korngrößen 4 – 8 mm wurde handelsüblicher Dachriesel verwendet. Um Korngrößen von 2 – 16 mm zu erhalten wurde durch Siebung aus Betonsand der Anteil > 2 mm abgetrennt.



Abbildung 13: Mischen des Versuchsmaterials und Siebung des Grobsediments

4.3.2 Durchführung des Einzelversuchs

Zur Durchführung eines Einzelversuchs wurde - wie oben beschrieben - das Versuchsmaterial hergestellt. Um den Arbeitsaufwand zu reduzieren, wurde dabei das selbe Material für jeweils eine Versuchsreihe verwendet und nach den einzelnen Versuchsdurchgängen durch Zugabe von Schotter der nächst höhere C_b -Wert eingestellt. Entscheidend für die erfolgreiche Versuchsdurchführung war, dass vor Beginn eines Einzelversuchs sämtliche Vorbereitungen sorgfältig durchgeführt wurden und die Sensorik überprüft war, da der eigentliche Versuch nur wenige Sekunden in Anspruch nahm und kein Eingreifen mehr zuließ.

4.4 Auswertung der Rohdaten

Die bei den Versuchen gemessenen Rohdaten liefern die Grundlage zur Ermittlung der relevanten Werte und Parameter in der Versuchsauswertung. Dies

sind einerseits die aus der Ultraschallmessung abgeleiteten Werte, die sich auf Fließ- und Ablagerungstiefe bzw. Geschwindigkeiten beziehen, andererseits die Werte zur Belastung des Bauwerks, welche aus der Druckmessung ermittelt werden können.

4.4.1 Auswertung der Ultraschallmessung

Aus der Ultraschallmessung kann der Durchgang der Murwelle abgelesen werden. Dabei ist zu beachten, dass in den Rohdaten auch der Wellengang, sowie aufspritzendes Material abgebildet sind. Zur weiteren Auswertung müssen die gemessenen Daten überarbeitet und im Vergleich mit den durchgeführten Videoaufnahmen überprüft werden.

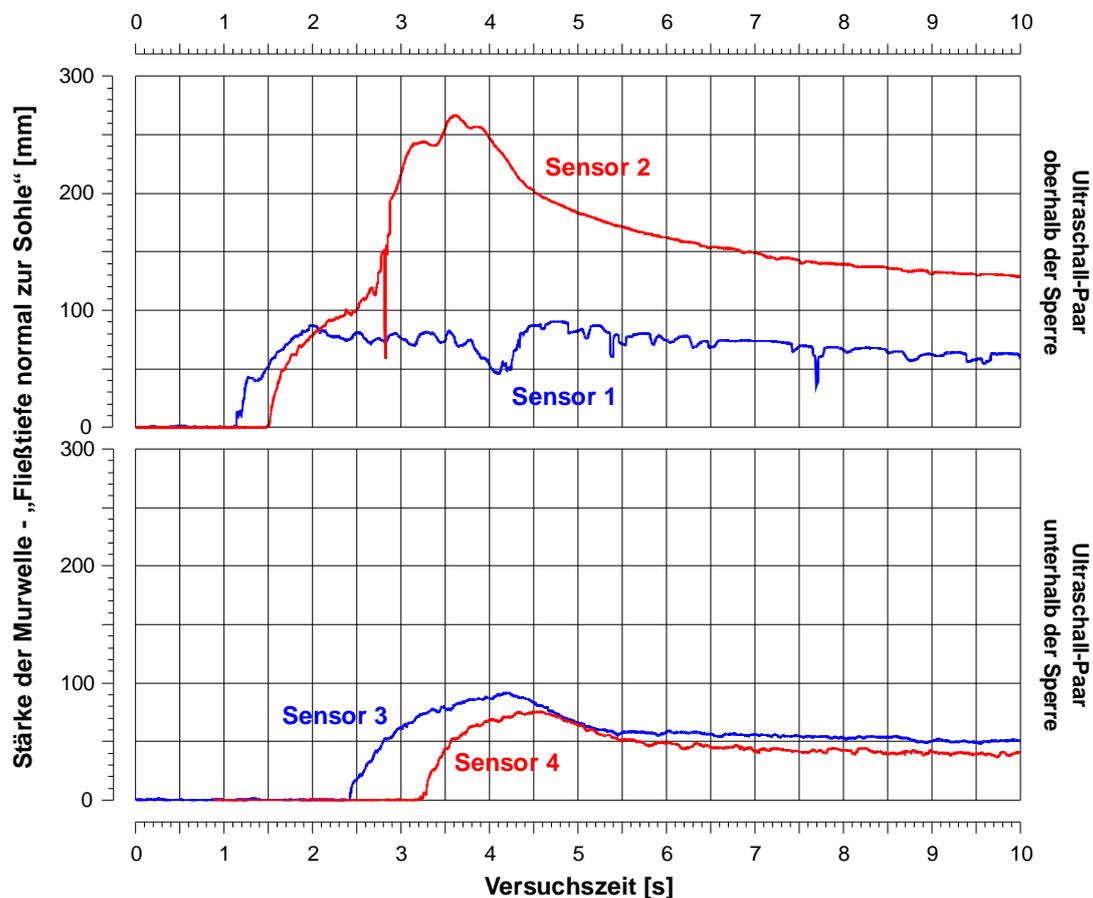


Abbildung 14: Darstellung der Rohdaten aus der Ultraschallmessung anhand des Versuchs MV0514-06

Die Messdaten liefern den Zeitpunkt des Durchgangs der Murfront unter den einzelnen Ultraschallsensoren. Aus dem Zeitunterschied des Durchgangs unter den beiden Ultraschallpaaren und dem bekannten Abstand der Sensoren (*Abbildung 3*) wird die Geschwindigkeit der Murfront berechnet (*Abbildung 15*).

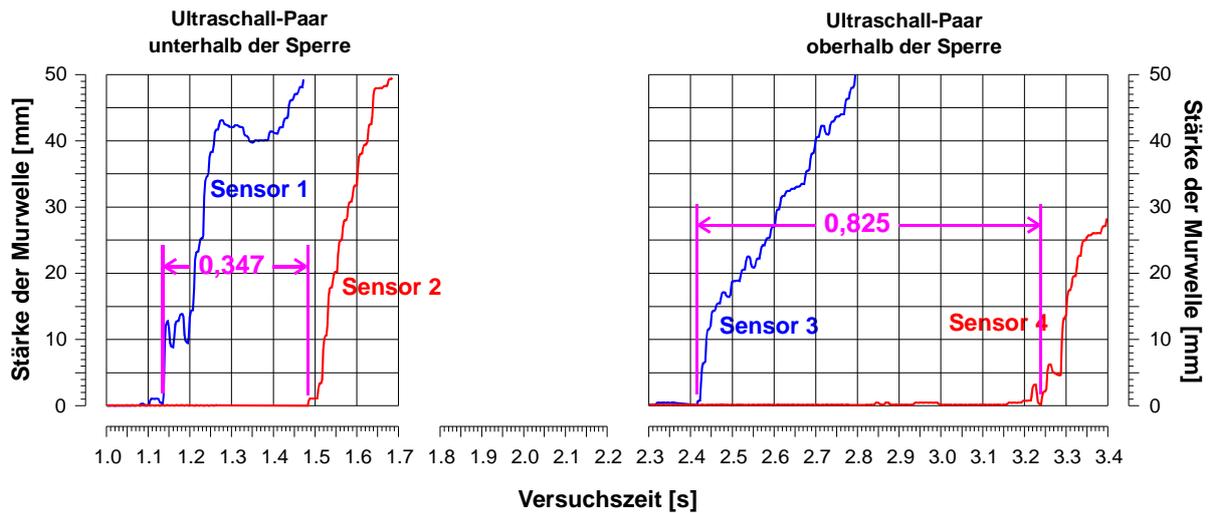


Abbildung 15: Beispiel zur Ermittlung der Geschwindigkeiten aus der Ultraschallmessung

Zur Ermittlung der durchschnittlichen Fließtiefe müssen die Schwankungen infolge des Wellengangs sowie Fehlmessungen oder Störungen durch Spritzen ausgeglichen oder entfernt werden.

Da die Ultraschallsensoren so montiert sind, dass sie die Stärke des Murkörpers parallel zur Sohle (h') messen, musste zur Ermittlung der tatsächlichen Fließtiefe (h_n) aus den Messwerten die Neigung der Versuchsrinne nach (Gl. 8) berücksichtigt werden (Abbildung 16).

$$h_n = h' \cdot \sqrt{1 + I^2} \quad (\text{Gl. 8})$$

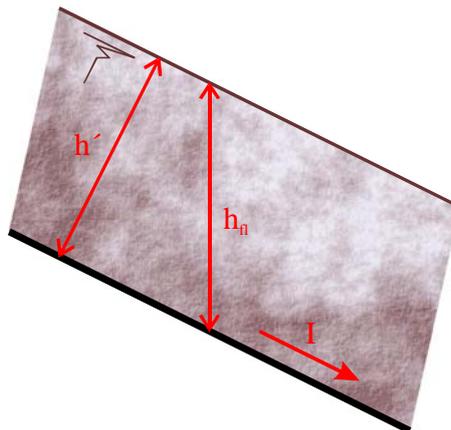


Abbildung 16: Definition der Fließtiefe, Berechnung aus den Messdaten

4.4.2 Auswertung der Druckmessung

Aus der Messung der Kraft [N] wird über die bekannte Größe der Druckplatten der auf die Sperre auftretende Druck [N/m^2] berechnet. Durch die hohe Messrate von 400 Hz ist es möglich, auch kurzfristig auftretende Spitzenbelastungen zu erfassen.

In den folgenden Abbildungen sind sowohl die Rohdaten (*Abbildung 17* und *Abbildung 18*) als auch erste Auswertungen für einzelne Versuche (*Abbildung 19* und *Abbildung 20*) dargestellt.

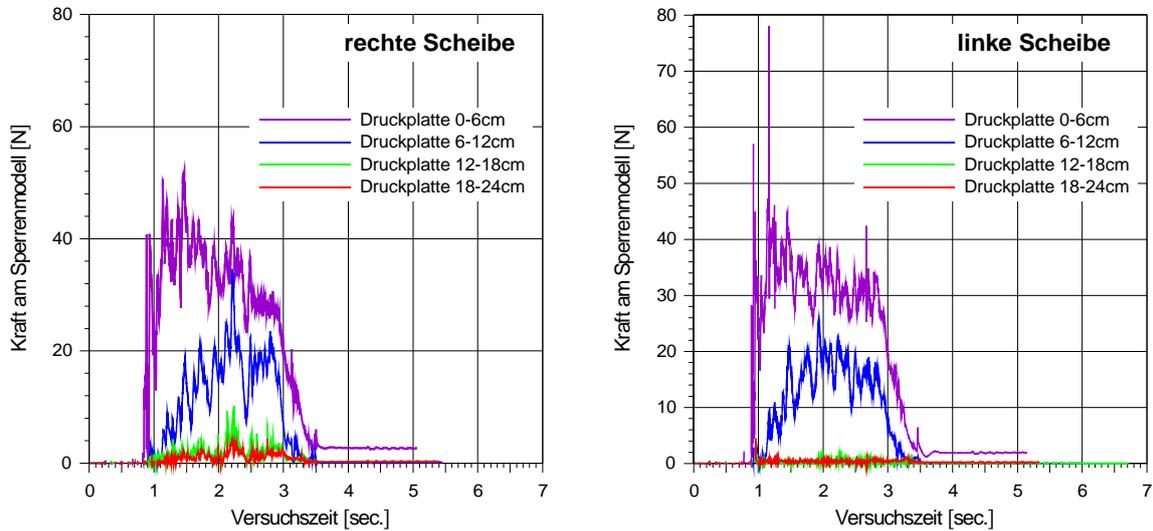


Abbildung 17: Darstellung der Rohdaten aus der Druckmessung anhand des Versuchs MV0411-01

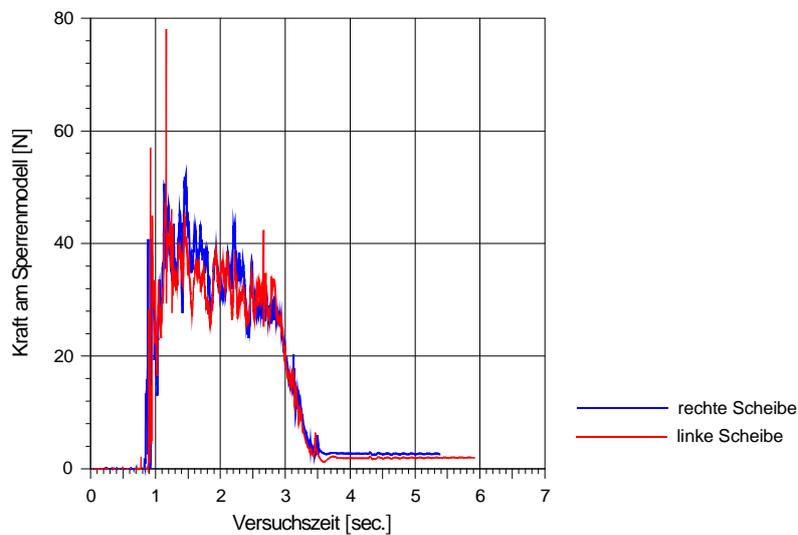


Abbildung 18: Vergleich der untersten Druckmessung der beiden Modellscheiben anhand des Versuchs MV0411-01

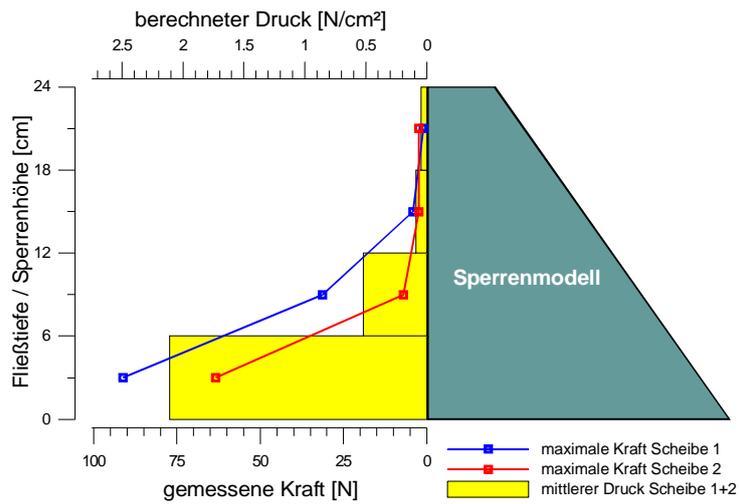


Abbildung 19: Beispiel einer Auswertung der Druckmessung für einen Testversuch

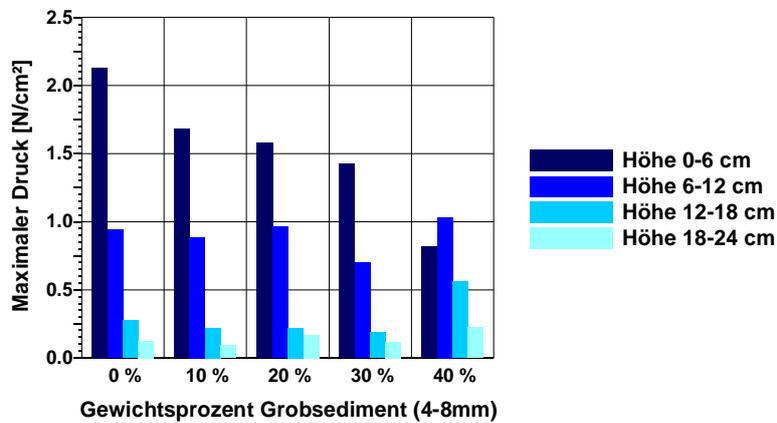


Abbildung 20: Darstellung des maximal gemessenen Drucks für die Versuchereihe MV0411-01 bis MV0416-02

5 QUALITATIVE BEURTEILUNG DER MURENDYNAMIK BEI DEN MODELLVERSUCHEN

Bei der Durchführung der Modellversuche konnten bereits visuell große Unterschiede im Verhalten der einzelnen Mischungen der Standard Debris Flow Mixture festgestellt werden. Deutlich sind diese Unterschiede auch aus den Versuchsvideos zu erkennen. Es zeigten sich zwei komplett unterschiedliche Verhalten beim Auftreffen auf das Sperrbauwerk. Muren, welche verbal als „schnell & flüssig“ bezeichnet werden können, verhielten sich anders als solche, welche sich als „langsam & fest“ beschreiben lassen.

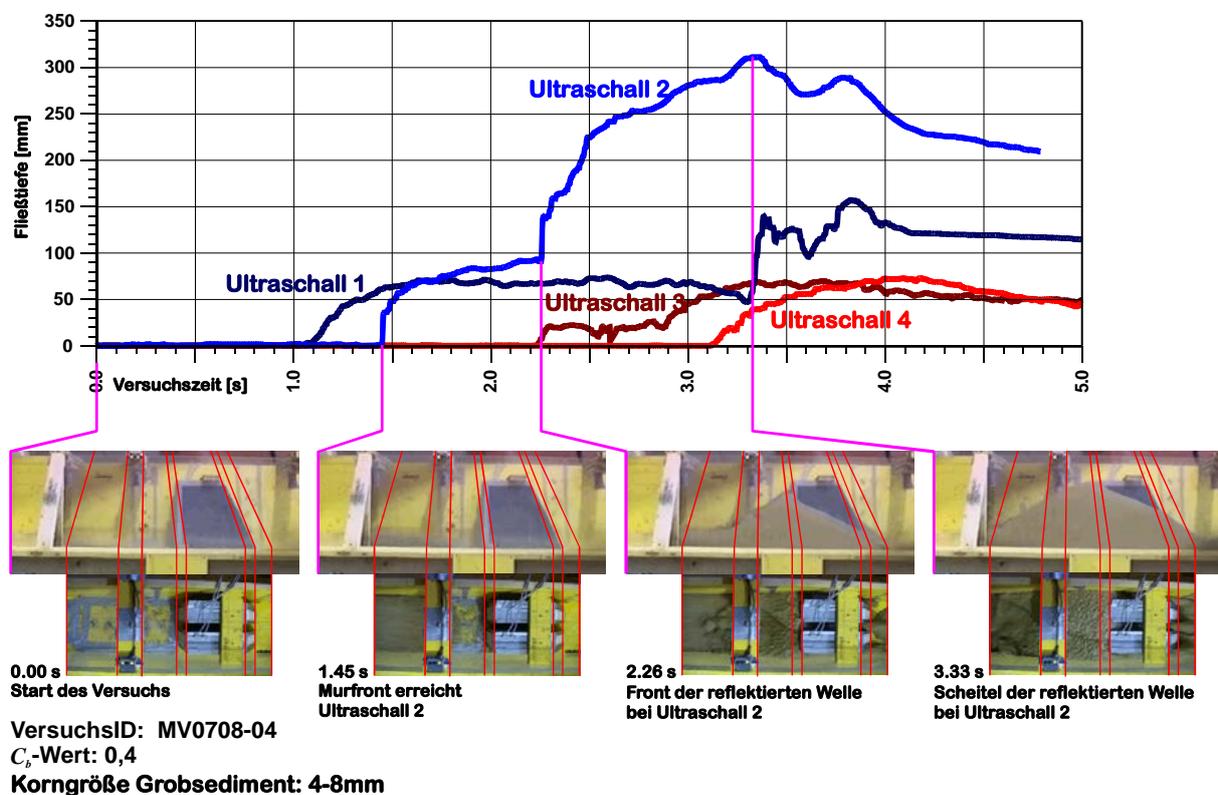


Abbildung 21: Darstellung des dynamischen Verhaltens als reflektierte Welle für einen Beispielversuch

Bei den schnellen und flüssigen Murgängen konnte man feststellen, dass der Massenstrom am Bauwerk wie ein Strahl nach oben abgelenkt wird, während sich bei den festen Murgängen eine reflektierte Welle ausbildete. Es sind dies ähnliche Beobachtungen wie sie bei ARMANINI (1997) als „vertical jet-like bulge“ und als „reflected bore“ beschrieben sind. Das Auftreten der reflektierten Welle ist in

Abbildung 21 anhand der Ultraschallkurven und Einzelbildern aus den Versuchsvideos graphisch dargestellt.

Einen deutlichen Unterschied im dynamischen Verhalten kann man auch allgemein aus der Messung der Abflusstiefe erkennen. In Abbildung 22 sind die gemittelten und geglätteten Fließtiefen unmittelbar ober- und unterhalb des Sperrenmodells für zwei unterschiedliche Versuche dargestellt. Man erkennt wieder den Durchgang der reflektierten Welle am Beispiel des in der Graphik oben dargestellten Versuchs MV0416-02, bei welchem das Versuchsmaterial einen C_b -Wert von 0,4 aufweist. Beim in der Graphik unten dargestellten Versuch MV0411-01 mit einem C_b -Wert von 0,4 zeigt sich, dass es unterhalb des Sperrenbauwerks momentan zu einem kurzfristigen starken Anstieg der Fließtiefe kommt, während oberhalb des Bauwerks die Fließtiefe vom Bauwerk nicht beeinflusst wird.

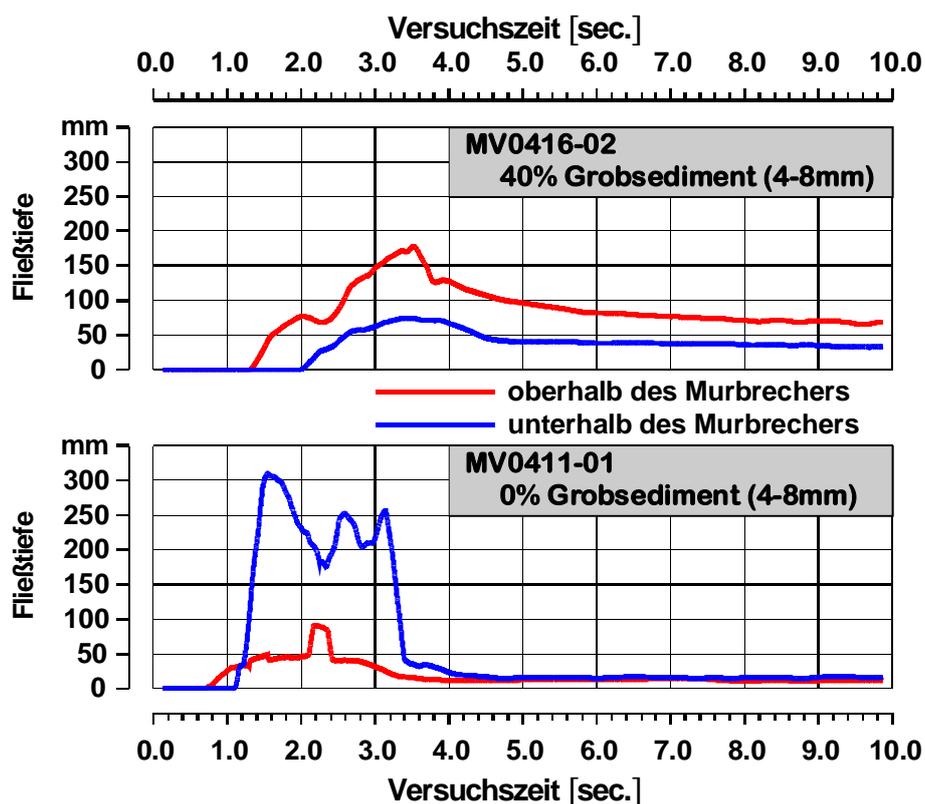


Abbildung 22: Vergleich der gemittelten Fließtiefen ober- und unterhalb des Sperrenmodells für zwei unterschiedliche Versuche

Auch bei der Betrachtung der Ergebnisse der Druckmessung stellten sich Unterschiede heraus. Durch das verschiedene Verhalten beim Auftreffen am Sperrenbauwerk, bilden sich unterschiedliche Druckverläufe aus. Auf dieses Thema

wird in *Kapitel 6.1* näher eingegangen. In *Abbildung 23* ist dies wieder für einen Versuch mit einem C_b -Wert von 0,0 bzw. mit einem C_b -Wert von 0,4 dargestellt.

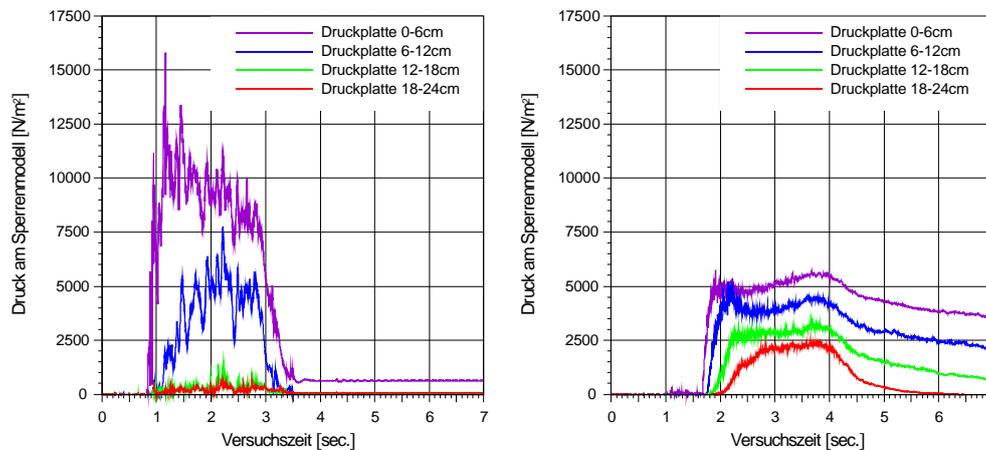


Abbildung 23: Darstellung der über die beiden Scheiben gemittelten Druckverläufe für einen Versuch mit C_b -Wert von 0,0 (links: MV0411-01) und einen mit C_b -Wert von 0,4 (rechts: MV0514-06)

Im folgenden (*Abbildung 24 bis Abbildung 28*) ist für die einzelnen Stufen des C_b -wertes, wie er bei der Standard Debris Flow Mixture auftritt, das dynamische Verhalten der Murwelle beim Auftreffen auf den Murbrecher durch Einzelbilder aus den Versuchsvideos dargestellt.

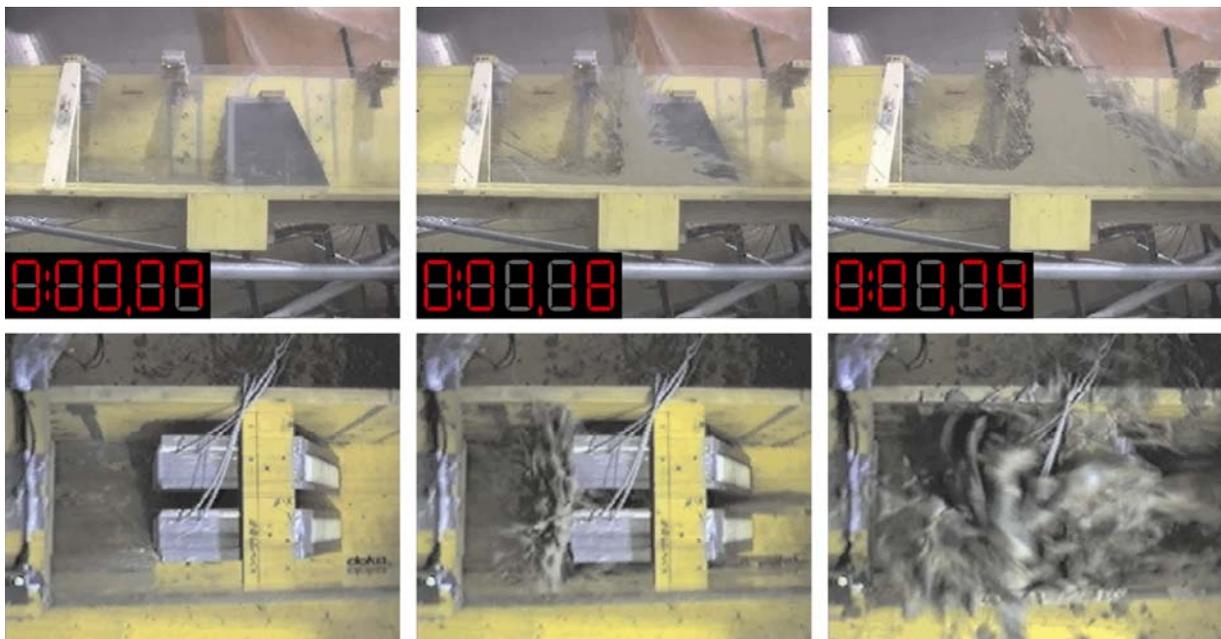


Abbildung 24: Darstellung des dynamischen Verhaltens der Murwelle anhand von Video-Captures für Versuch MV0701-02 mit C_b -Wert 0,0

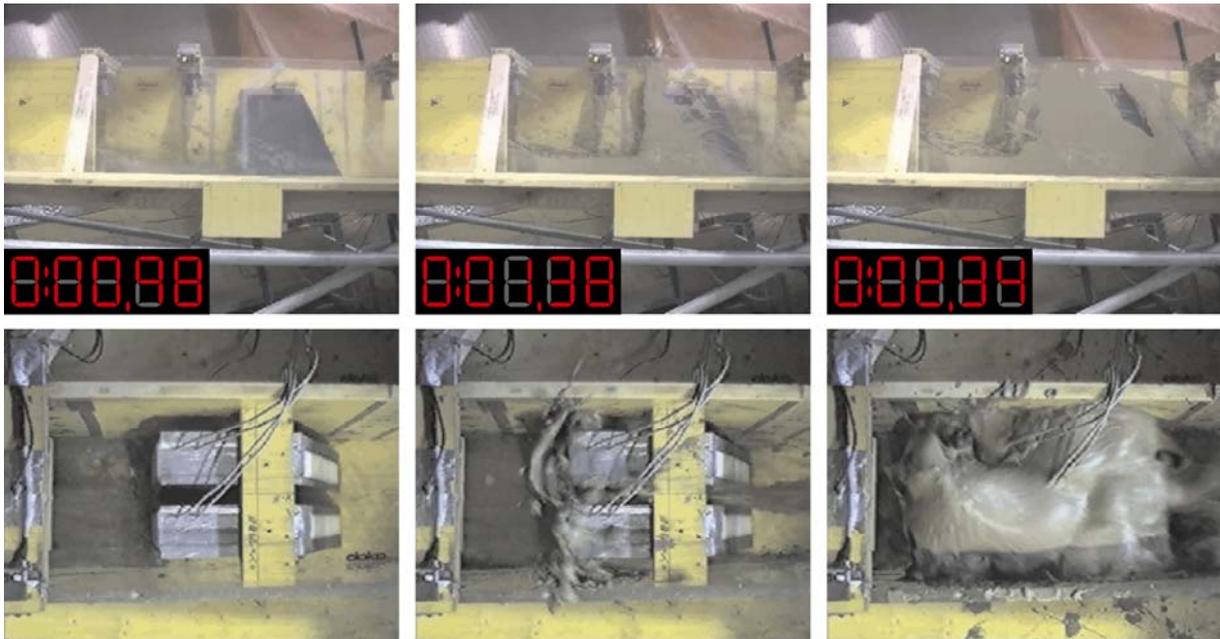


Abbildung 25: Darstellung des dynamischen Verhaltens der Murbelle anhand von Video-Captures für Versuch MV0701-03 mit C_b -Wert 0,1

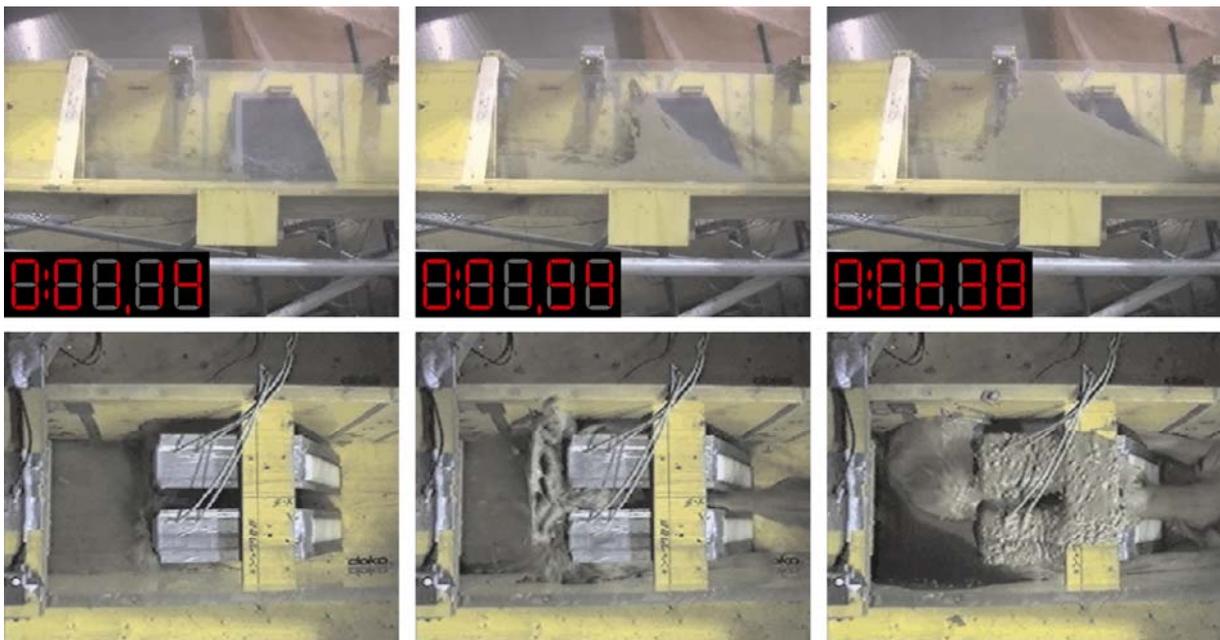


Abbildung 26: Darstellung des dynamischen Verhaltens der Murbelle anhand von Video-Captures für Versuch MV0701-06 mit C_b -Wert 0,2

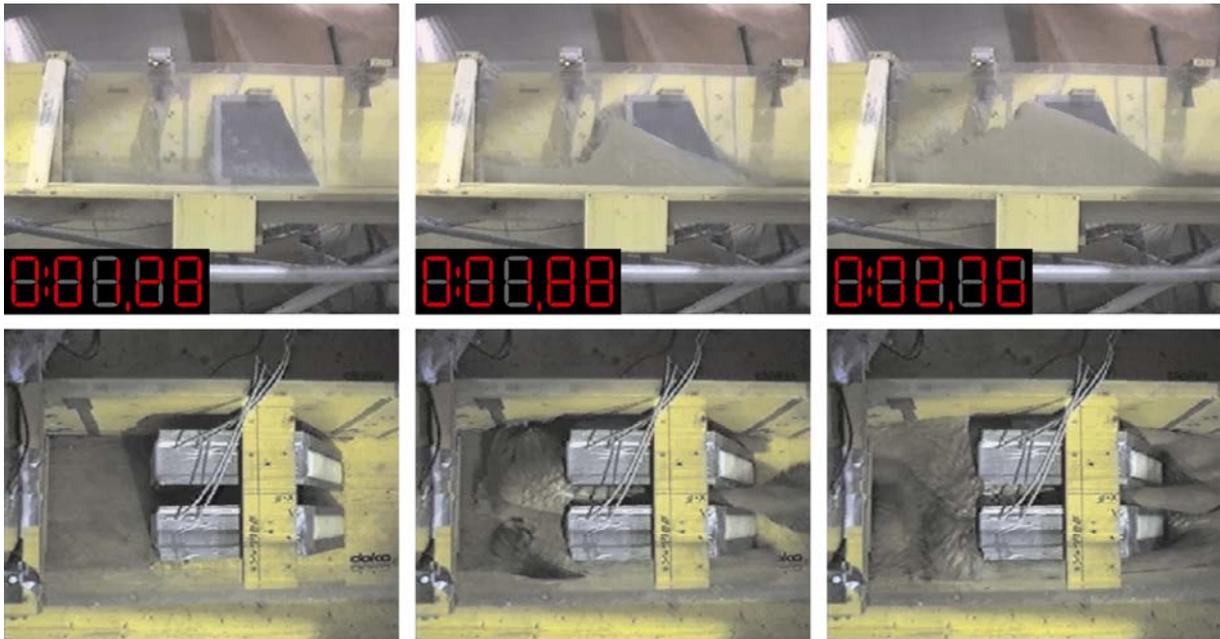


Abbildung 27: Darstellung des dynamischen Verhaltens der Murwelle anhand von Video-Captures für Versuch MV0701-08 mit C_b -Wert 0,3

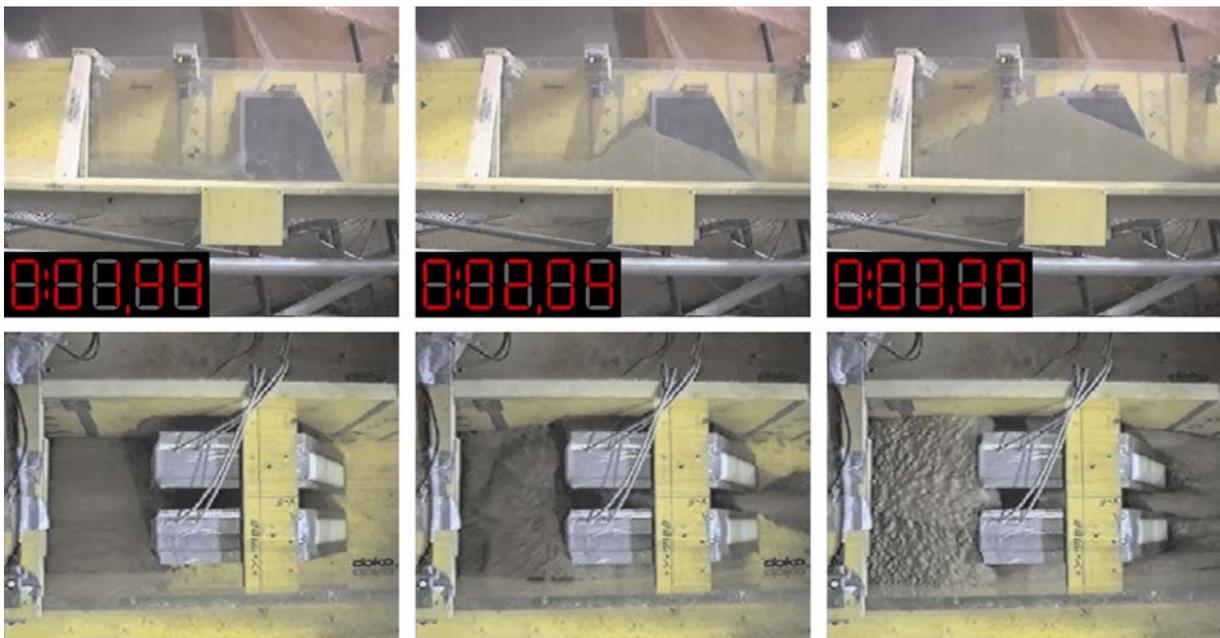


Abbildung 28: Darstellung des dynamischen Verhaltens der Murwelle anhand von Video-Captures für Versuch MV0702-01 mit C_b -Wert 0,4

6 ERMITTLUNG VON KENNZAHLEN AUS DEN VERSUCHSDATEN

6.1 Untersuchung der Wirkung des Murbrechers

6.1.1 Möglichkeiten zur Beschreibung der Auswirkung des Bauwerks

Eine Möglichkeit zur Beschreibung der Wirksamkeit von Murbrechern ist die Geschwindigkeitsreduktion. sie wird ausgedrückt durch den einheitenlosen Wert

$$r_v = \frac{v_2}{v_1} \quad (\text{Gl. 9})$$

welcher das Verhältnis der Geschwindigkeit nach dem Bauwerk zur Geschwindigkeit vor dem Bauwerk darstellt. Die Geschwindigkeitsreduktion wird in *Kapitel 6.1.2* in Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie behandelt, in *Abbildung 29* sind für alle Versuche die Geschwindigkeiten ober- und unterhalb des Bauwerks einander direkt gegenübergestellt, während in *Abbildung 30* die Verteilung der bei den Versuchen gefundenen Geschwindigkeitsreduktionen dargestellt ist.

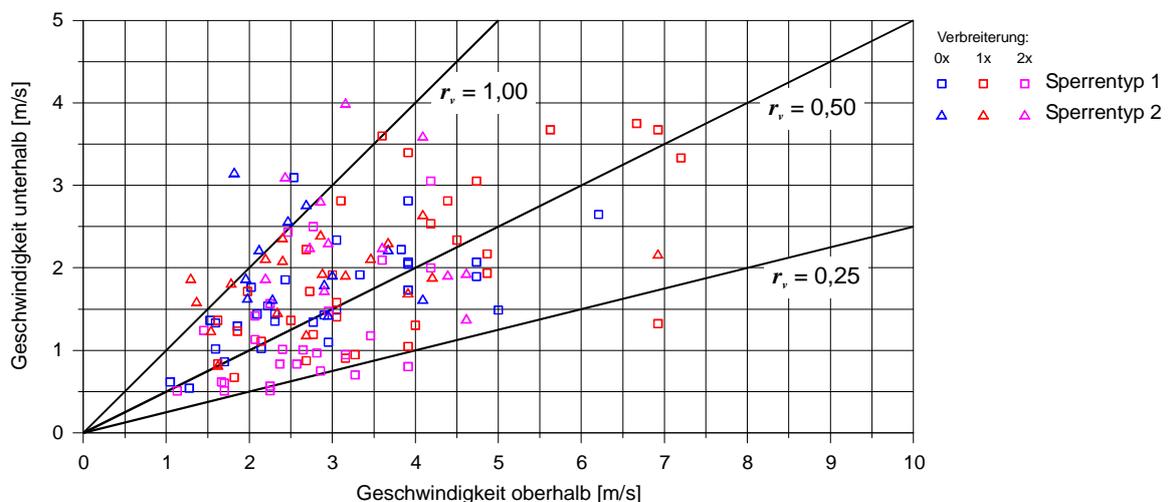


Abbildung 29: Direkte Gegenüberstellung der Geschwindigkeiten ober- und unterhalb des Sperrenmodells

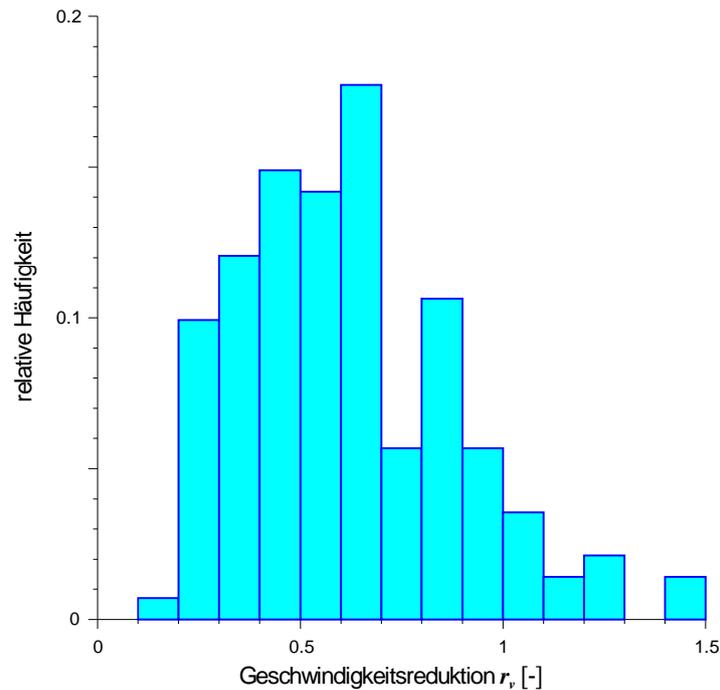


Abbildung 30: Verteilung der bei den Modellversuchen aufgetretenen Geschwindigkeitsreduktion

Weiters kann der Rückstau effekt durch das Sperrenbauwerk betrachtet werden. Durch das Bauwerk kommt es einerseits zu einem kurzfristigen Rückstau, andererseits wird hinter dem Sperrenbauwerk ein Teil der Murfracht abgelagert. Während der kurzfristige Rückstau für die Dämpfung des Scheitels der Durchflussganglinie verantwortlich ist, kann durch das Ablagern eines Teils der Murfracht die Ablagerung am Schwemmkegel verringert werden.

Die Wirkung in Bezug auf das zurückgehaltene Material kann durch die Ablagerungstiefe beurteilt werden. Da es auch bei ungestörtem Fließen zu einer Ablagerung von Material nach Durchgang der Murwelle kommen kann, wurden die Ablagerungstiefen unter- und oberhalb des Sperrenmodells verglichen, woraus sich das Verhältnis der Ablagerungen

$$r_h = \frac{h_{dep,1}}{h_{dep,2}} \quad (\text{Gl. 10})$$

ergibt. Die Ablagerungstiefen sind in *Abbildung 31* direkt gegenübergestellt, das Verhältnis zwischen den Ablagerungen wird im nächsten Kapitel in Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie untersucht, in *Abbildung 32* ist die Verteilung dieses Verhältnisses für alle Versuche dargestellt.

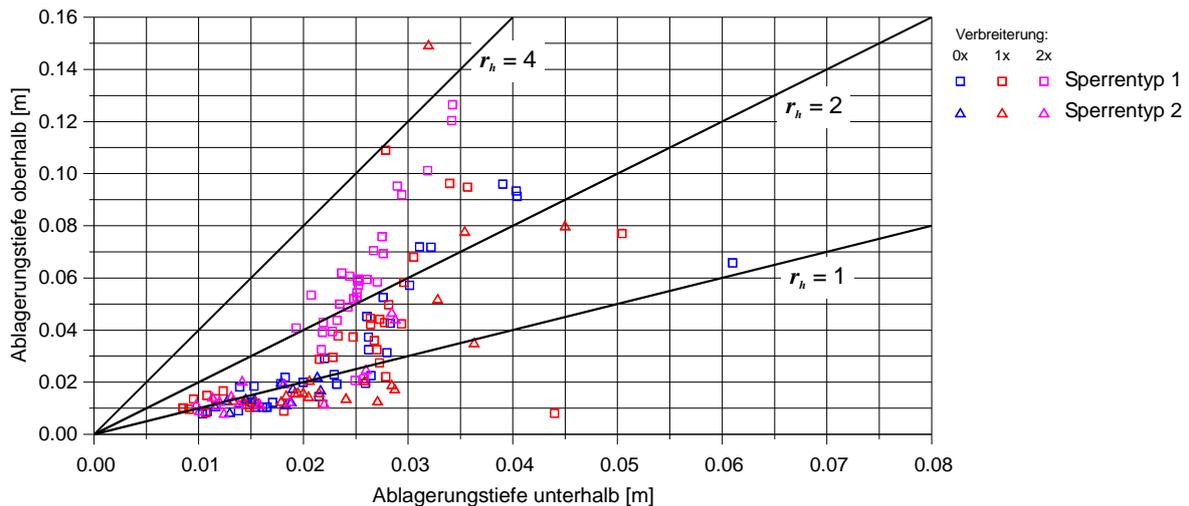


Abbildung 31: Direkte Gegenüberstellung der Ablagerungstiefen ober- und unterhalb des Sperrenmodells

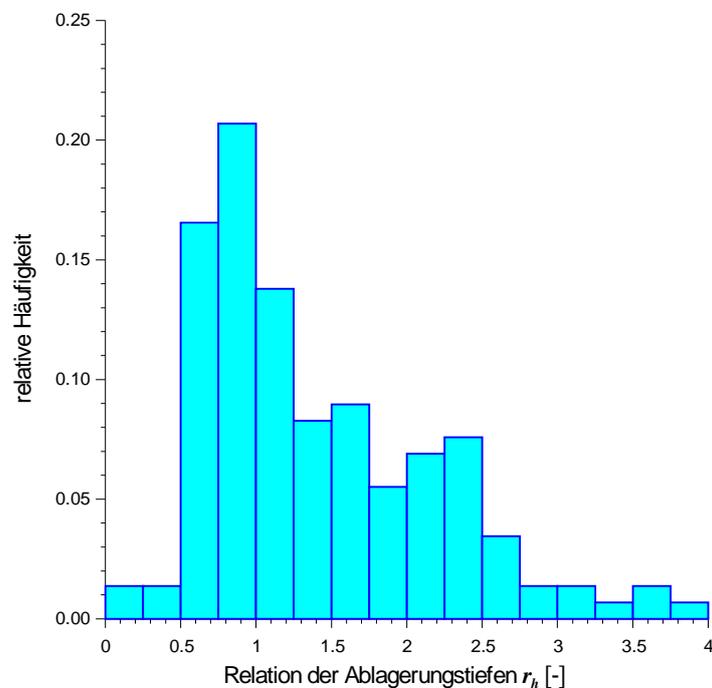


Abbildung 32: Verteilung des bei den Modellversuchen aufgetretenen Verhältnisses zwischen den Ablagerungstiefen ober- und unterhalb des Murbrechers

6.1.2 Beschreibung der Auswirkung des Bauwerks in Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie

Bei den Versuchen wurden drei verschiedene Scheibenstärken bzw. daraus resultierend drei verschiedene Öffnungsweiten (*Kapitel 4.1.3*) untersucht. Diese drei verschiedenen Öffnungsweiten wurden im folgenden getrennt betrachtet, um die Auswirkung des Scheibenabstands beurteilen zu können. Außerdem wurde der maximale Korndurchmesser in Relation zur Öffnungsweite gesetzt, um feststellen zu

können, wieweit hier ein Einfluss auf die Dynamik der Murwelle besteht. Weiters wurde der Einfluss des Bauwerks auch noch in Abhängigkeit von der Relation zwischen dem mittleren Korndurchmesser und der Öffnungsweite betrachtet, um etwaige Zusammenhänge zwischen Sperrengeometrie und Korngrößenverteilung der Mure erkennen zu können. Diese Auswertungen wurden für beide Scheibenformen (*Kapitel 4.1.3*) durchgeführt.

6.1.2.1 Betrachtung der Geschwindigkeitsreduktion r_v in Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie

Bei der Betrachtung der Geschwindigkeitsreduktion konnte festgestellt werden, dass beim Sperrtyp 1 die Mure stärker abgebremst wird als beim Typ 2. Wie zu erwarten, kommt es bei breiteren Scheiben mit geringerem Scheibenabstand zu einer stärkeren Reduktion der Geschwindigkeit (*Abbildung 33*). Allerdings kann man eine sehr hohe Streuung innerhalb der Versuche erkennen (*Abbildung 29*), was darauf schließen lässt, dass nicht alleine die Sperrengeometrie für die Reduktion der Geschwindigkeit verantwortlich ist. Auffallend an den Versuchsdaten ist auch, dass bei einigen Versuchen unterhalb des Bauwerks höhere Geschwindigkeiten als oberhalb des Murbrechers aufgetreten sind. Eine Erklärung hierfür ist anhand der Versuche nur teilweise möglich, allerdings konnte festgestellt werden, dass dieses Phänomen vermehrt bei der Scheibenform des Typs 2 auftritt.

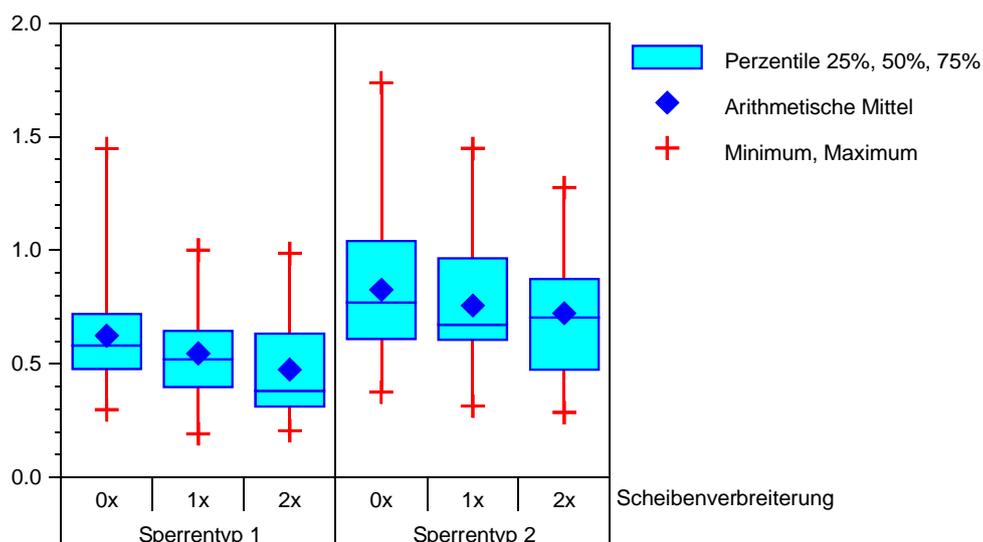


Abbildung 33: Die Geschwindigkeitsreduktion r_v in Abhängigkeit von der Scheibengeometrie

Generell ist zur Geschwindigkeitsreduktion zu bemerken, dass aus den Versuchen kaum Abhängigkeiten vom Material zu erkennen waren. Eigentlich wäre

bei festen Murmischungen eine stärkere Reduktion zu erwarten, es zeigte sich jedoch, dass die Reduktion in etwa bei allen Versuchsmischungen gleich war. Dies mag damit zusammenhängen, dass Muren mit festerem Material grundsätzlich geringere Geschwindigkeiten aufweisen, und somit relativ betrachtet gleich stark gebremst werden wie sehr flüssige und schnelle Murgänge. In *Abbildung 34* ist die Geschwindigkeitsreduktion in Abhängigkeit vom Verhältnis des maximalen Korndurchmessers zur Öffnungsweite dargestellt. Auch hier zeigt sich die starke Streuung innerhalb der Versuchsreihen. Man kann erkennen, dass mit größer werdendem Verhältnis - also mit in Relation zu d_{max} kleinen Öffnungsweiten - die Murwelle stärker gebremst wird. Ein Problem bei der Interpretation ergibt sich allerdings daraus, dass in jenen Versuchen, bei denen ein kleines Verhältnis von d_{max} zu $b_{öff}$ abgebildet wurde (blaue Darstellung in *Abbildung 34*), ein anderes Material verwendet wurde, als bei jenen Versuchen, bei denen ein großes Verhältnis von d_{max} zu $b_{öff}$ abgebildet wurde (rote Darstellung in *Abbildung 34*). Hier drängt es sich auf, durch weitere Versuchsreihen in Folgeprojekten diese Lücke zu schließen, um gesicherte Aussagen treffen zu können.

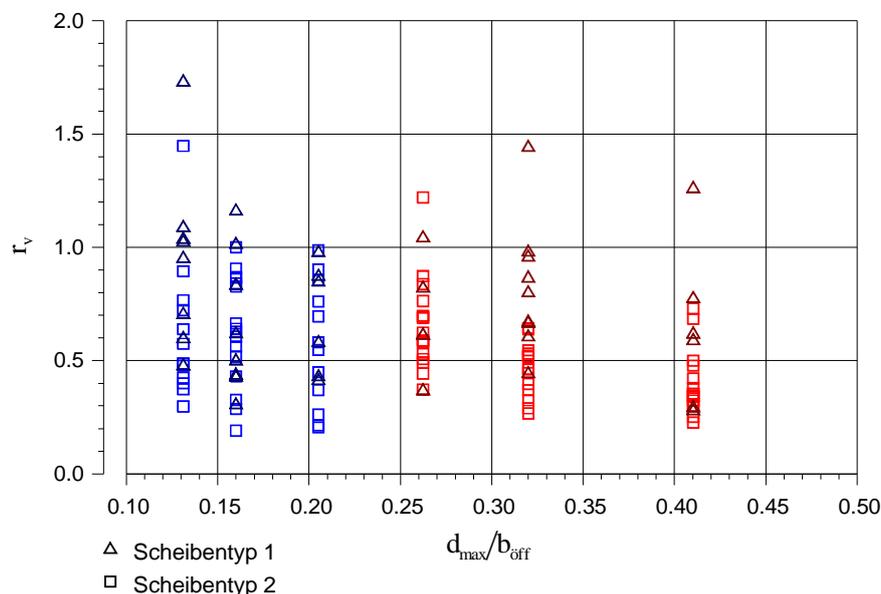


Abbildung 34: Die Geschwindigkeitsreduktion r_v in Abhängigkeit vom Verhältnis des maximalen Korndurchmessers zur Öffnungsweite (blaue Darstellung: Grobsediment 4-8mm, rote Darstellung: Grobsediment 2-16mm)

Ähnlich verhält es sich mit dem Einfluss der Relation zwischen d_{50} und $b_{öff}$ auf die Geschwindigkeitsreduktion. Aber auch hier lassen sich nur qualitative Aussagen treffen, aber zur Festlegung quantitativer Beziehungen sind noch weitere Versuchsreihen nötig.

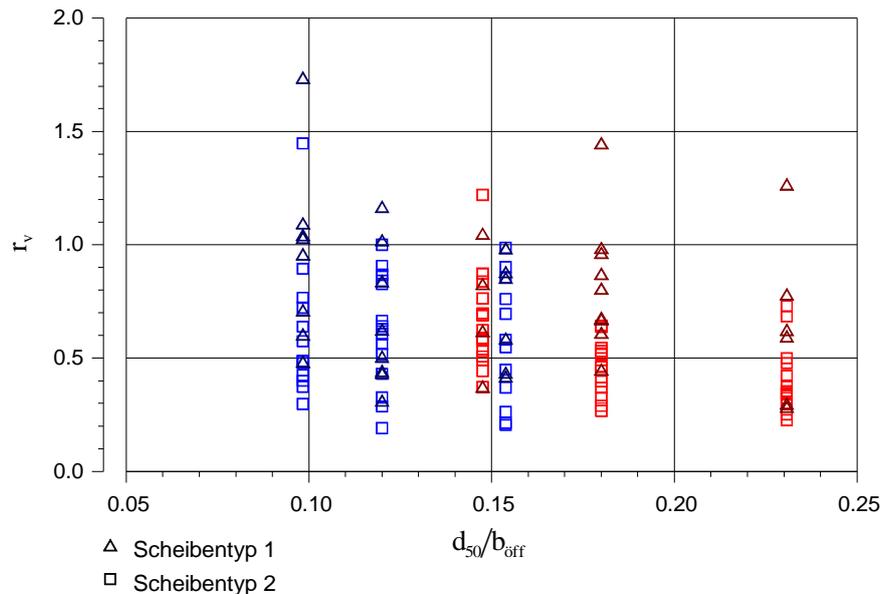


Abbildung 35: Die Geschwindigkeitsreduktion r_v in Abhängigkeit vom Verhältnis des mittleren Korndurchmessers zur Öffnungsweite (blaue Darstellung: Grobsediment 4-8mm, rote Darstellung: Grobsediment 2-16mm)

Sowohl bei der Betrachtung des Scheibenabstandes im Verhältnis zum maximalen Korndurchmesser als auch der Beurteilung in Relation zum mittleren Korndurchmesser kann man erkennen, dass die Geschwindigkeitsreduktion gewisse Abhängigkeiten vom Scheibentyp zeigt. Prinzipiell bestätigt sich die schon bei der allgemeinen Betrachtung getroffene Feststellung, dass beim Scheibentyp 1, die Murwelle stärker gebremst wird (*Abbildung 33*).

6.1.2.2 Betrachtung der Relation zwischen den Ablagerungstiefen r_h in Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie

Betrachtet man nun die Ablagerung hinter dem Sperrenbauwerk - ausgedrückt durch die Relation der Ablagerungstiefe nach Versuchsende ober- und unterhalb des Sperrenmodells – in Abhängigkeit von der Sperrengeometrie, so fällt auf, dass sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Sperrrentypen ergeben (*Abbildung 36*). Aus der graphischen Darstellung zeigt sich, wie zu erwarten, dass bei stärkeren Scheiben bzw. geringeren Abständen dazwischen stärkere Ablagerung hinter dem Bauwerk stattfindet. Allerdings kann man auch erkennen, dass der Einfluss der Öffnungsweite auf die Ablagerung bei Sperrrentyp 1 weitaus größer ist. Speziell bei 2-facher Verbreiterung (*Erklärung zur Verbreiterung siehe Tabelle 1 bzw. Abbildung 8 in Kapitel 4.1.3*) zeigt sich eine bei weitem stärkere Ablagerungstendenz für Sperrrentyp 1. Auffallend ist dabei, dass bei Sperrrentyp 2 der Wert r_h sehr oft unter 1 liegt. Dies bedeutet aber, dass die Ablagerungshöhe unterhalb der Sperre höher ist

als oberhalb. Dies erscheint auf den ersten Blick sehr unwahrscheinlich, lässt sich jedoch dadurch erklären, dass bei dieser Form der Scheiben die Murwelle zwar abgebremst wird aber trotzdem keine zusätzliche Ablagerung stattfindet. Näher darauf eingegangen wird in *Kapitel 6.1.3*.

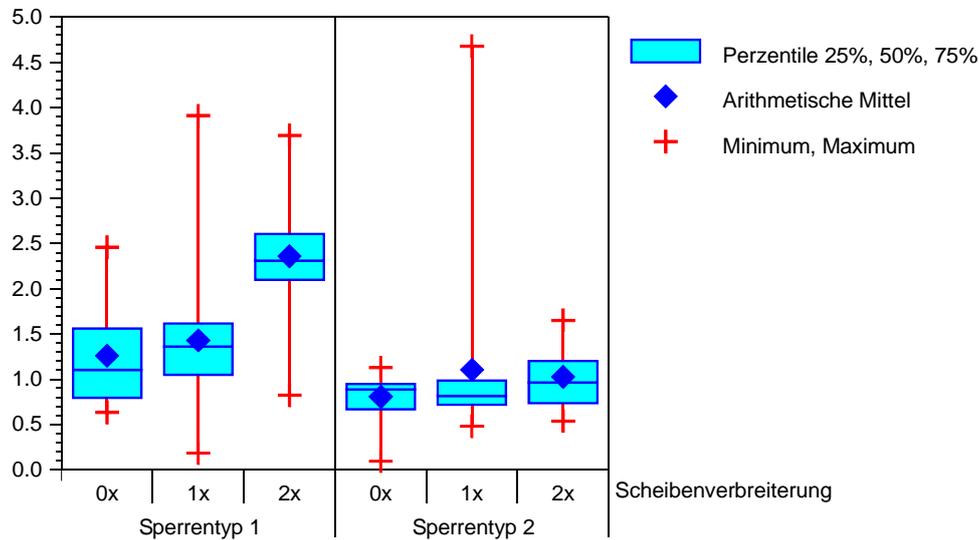


Abbildung 36: Die Relation der Ablagerungstiefen r_h in Abhängigkeit von der Scheibengeometrie

Interessant ist bei der Betrachtung der Ablagerungstiefe, dass die Werte für r_h bei weitem nicht so streuen wie die Geschwindigkeitsreduktion, dafür aber einige extreme Ausreißer auftreten.

Ebenso wie bei der Geschwindigkeitsreduktion wurden auch für die Relation der Ablagerungstiefen r_h ober- und unterhalb des Murbrechers die Abhängigkeiten vom Verhältnis typischer Korndurchmesser zur Öffnungsweite untersucht. In *Abbildung 37* ist für alle Versuche r_h über dem Verhältnis aus d_{max} zu $b_{öff}$ dargestellt. Das bei - im Verhältnis zur Öffnungsweite der Scheiben - größeren maximalen Korndurchmessern mehr Material hinter der Sperre abgelagert wird lässt sich leicht erkennen - und erstaunt nicht wirklich. Allerdings tritt auch hier - wie bei der Untersuchung der Geschwindigkeitsreduktion - der Fall auf, dass dieser Trend sich für beide Arten von Grobanteil (*Erklärung zum verwendeten Material siehe Kapitel 4.2*) auftritt, aber nicht unabhängig vom Material gesehen werden kann. Noch viel deutlicher ist dies bei der Betrachtung in Abhängigkeit von d_{50} zu erkennen (*Abbildung 38*). Bei diesen Betrachtungen zeigt sich wieder der Unterschied zwischen den beiden Sperrtypen, der schon bei der Gesamtbetrachtung (*Abbildung 36*) deutlich zu erkennen war.

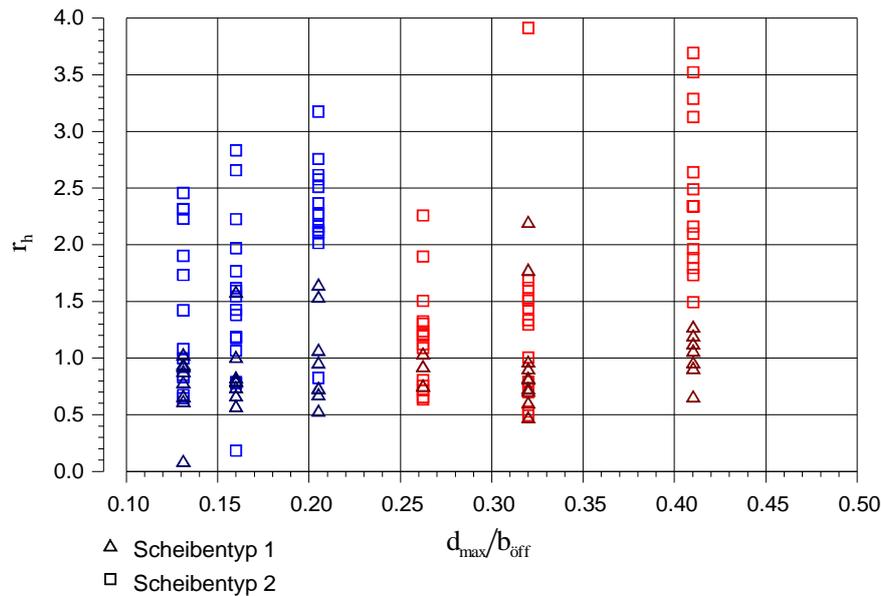


Abbildung 37: Die Relation der Ablagerungstiefen r_h in Abhängigkeit vom Verhältnis des maximalen Korndurchmessers zur Öffnungsweite (blaue Darstellung: Grobsediment 4-8mm, rote Darstellung: Grobsediment 2-16mm)

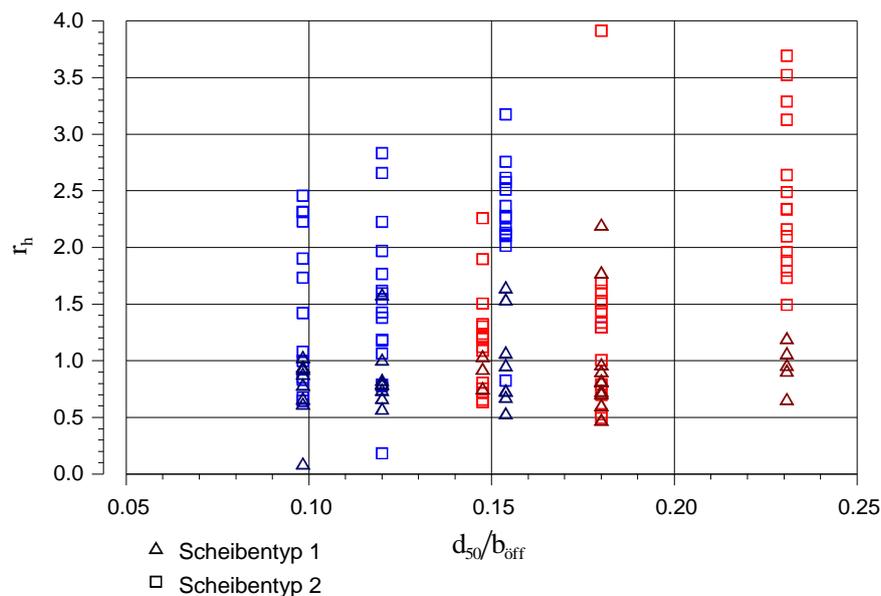


Abbildung 38: Die Relation der Ablagerungstiefen r_h in Abhängigkeit vom Verhältnis des mittleren Korndurchmessers zur Öffnungsweite (blaue Darstellung: Grobsediment 4-8mm, rote Darstellung: Grobsediment 2-16mm)

6.1.3 Untersuchung eines eventuell vorhandenen Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeitsreduktion und Ablagerungsverhalten

Aus den Erfahrungen auf dem Gebiet des Sedimenttransports bzw. aus der Fluidmechanik allgemein ist zu erwarten, dass beim Ablagerungsprozess nicht nur die Einengung sondern vor allem die Geschwindigkeitsreduktion für das Ablagern von Material bedeutend ist. Daher wurde für die Modellversuche die Relation der

Ablagerung der Geschwindigkeitsreduktion gegenübergestellt (*Abbildung 39*). Man kann aus dieser Gegenüberstellung erkennen, dass ein gewisser Einfluss der Geschwindigkeitsreduktion auf das Ablagerungsverhalten vorhanden ist, dieses jedoch nicht alleine dadurch bestimmt wird. Aus der Darstellung für die zwei Arten von dynamischen Verhalten (*Beschreibung in Kapitel 5*) - in links - kann man ersehen, dass der Einfluss der Geschwindigkeitsreduktion nur geringfügig vom generellen dynamischen Verhalten der Murwelle abhängt. Lediglich bei sehr starker Geschwindigkeitsreduktion durch das Bauwerk kann man erkennen, dass es bei sehr „festen“ Murwellen zu einer verstärkten Ablagerung kommt. Dies mag damit zusammenhängen, dass dieses Verhalten speziell bei jenen Murgängen auftritt, welche einen hohen Feststoffanteil aufweisen und daher grundsätzlich schneller zur Ablagerung neigen.

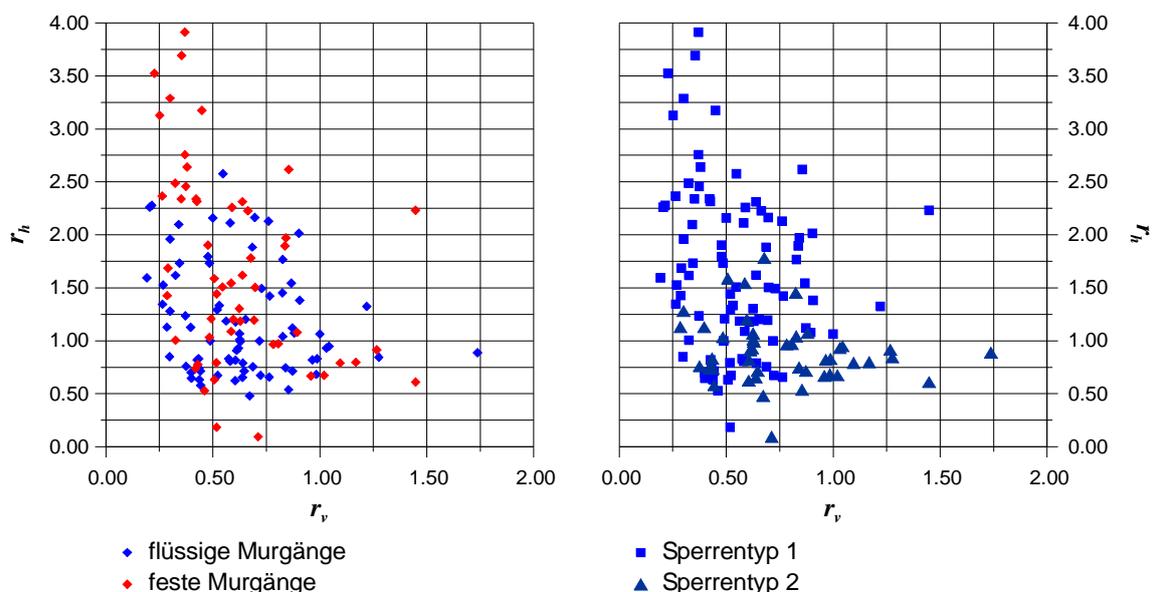


Abbildung 39: Gegenüberstellung von Geschwindigkeitsreduktion r_v und Relation der Ablagerungstiefen r_h für alle Versuche; links getrennte Darstellung für die zwei Arten von dynamischen Verhalten (laut Kapitel), rechts für die beiden Sperrtypen

Betrachtet man die Darstellung des Zusammenhangs zwischen r_v und r_h in Abhängigkeit vom Sperrtyp (*rechte Graphik in Abbildung 39*) stellt sich ein ganz anderes Bild dar. Hier zeigt sich, dass die Relation der Ablagerungstiefen stärker vom Scheibentyp als von der Geschwindigkeitsreduktion abhängt bzw. bei Scheibentyp 2 kaum ein Zusammenhang zwischen r_v und r_h festgestellt werden kann. Vergleicht man diese Feststellungen mit der in *Kapitel 6.1.2.2* festgestellten Tatsache, dass bei Sperrtyp 2 die Ablagerungen unterhalb der Sperre oft höher

waren als oberhalb, so kann daraus geschlossen werden, dass es durch die Geschwindigkeitsreduktion zwar zu einer Ablagerung des Materials kommt, diese jedoch - bedingt durch die Form der Scheibe – unterhalb des Bauwerks stattfindet.

6.1.4 Schlussbemerkung zu den Ergebnissen der Untersuchung der Auswirkung des Bauwerks auf die Dynamik der Murwelle

Abschließend ist zur Wirkung von Murbrechern anzumerken, dass zu diesem Thema noch umfangreiche Untersuchungen nötig sind. Bei dieser Fragestellung muss besonders darauf geachtet werden, dass durch die Vereinfachung und Generalisierung im Modell nicht entscheidende Einflüsse außer acht gelassen werden. Es wurden hier qualitative Erkenntnisse zu Geschwindigkeitsreduktion und Ablagerung gefunden. Für die Umsetzung wäre es jedoch der Idealfall, wenn man quantitative Aussagen zum Einfluss gewisser Kennzahlen aus der Geometrie des Sperrenbauwerks auf dynamische Prozesse treffen könnte. Weitere Versuchsreihen wären so anzulegen, Versuchsreihen wären so anzulegen, dass z.B. quantitative Festlegungen zur Ablagerung oder Geschwindigkeitsreduktion in Abhängigkeit von der Öffnungsweite - oder dem Verhältnis dieser zu typischen Korngrößen – möglich sind.

In den durchgeführten Untersuchungen wurde die Wildholzproblematik nicht behandelt, welche jedoch in der Praxis entscheidenden Einfluss hat. Für zukünftige Untersuchungen, wäre es von entscheidender Bedeutung, eine Möglichkeit zu finden, den Einfluss von Wildholz auch in Modellversuchen zu quantifizieren. Aus den Erfahrungen in der Praxis der Wildbachverbauung ist zu erwarten, dass in diesem Fall die Form der Scheiben für die Wirkung des Murbrechers von großer Bedeutung sein wird.

6.2 Druckbelastung am Bauwerk

6.2.1 Maximale Druckspitze am Bauwerk – Betrachtung in Abhängigkeit von der FROUDE-Zahl

Bei der Betrachtung der maximal am Bauwerk auftretenden Druckspitze wurde nach einheitenlosen Kennzahlen gesucht, welche das Fließverhalten und die auftretenden Druckspitzen beschreiben. Zur Beschreibung des Fließverhaltens wurde die FROUDE-Zahl

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \quad (\text{Gl. 11})$$

herangezogen und zur Beschreibung der Drücke zwei Druckfaktoren

$$K'_p = \frac{P_{\max}}{\rho_{DF} \cdot v^2 + \rho_{DF} \cdot g \cdot h_{fl}} \quad (\text{Gl. 12})$$

und

$$K''_p = \frac{P_{\max}}{\rho_{DF} \cdot v^2} \quad (\text{Gl. 13})$$

definiert, die das Verhältnis aus gemessenem und theoretischem Druck beschreiben. Dabei wird beim Druckfaktor K'_p sowohl der dynamische als auch der hydrostatische Druck berücksichtigt, während beim Wert K''_p nur der dynamische Druck mit dem Gemessenen verglichen wird.

In der Folge wurden diese Kennzahlen gegenübergestellt und nach Gesetzmäßigkeiten untersucht.

6.2.1.1 Gegenüberstellung von FROUDE-Zahl und Druckfaktor K'_p

Für alle Versuche, bei denen Druckmessungen durchgeführt wurden, wurde der Druckfaktor K'_p in Abhängigkeit von der FROUDE-Zahl betrachtet (*Abbildung 40*).

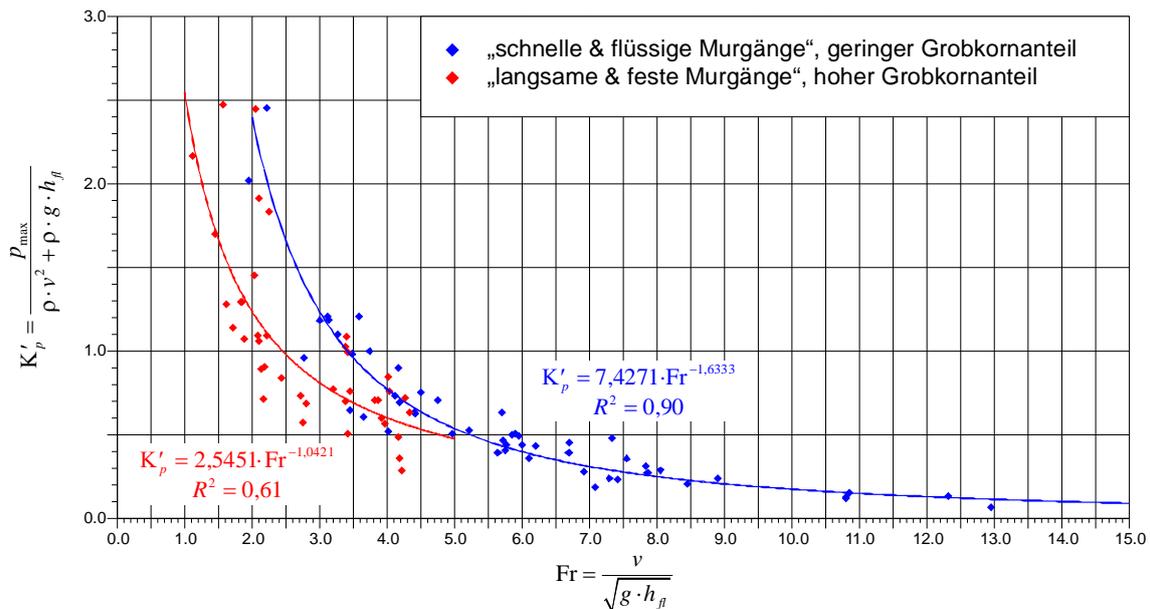


Abbildung 40: Gegenüberstellung von FROUDE-Zahl und Druckfaktor K'_p für die durchgeführten Modellversuche

Dabei zeigte sich, dass ein Zusammenhang zwischen den beiden Werten besteht, welcher sich durch die Gleichung

$$K'_p = \kappa' \cdot Fr^{\xi'} \quad (\text{Gl. 14})$$

mit den beiden (ebenfalls einheitenlosen) Parametern κ' und ξ' beschreiben lässt.

Durch Einsetzen von FROUDE-Zahl und Druckfaktor K'_p in (Gl. 14) ergibt sich durch folgende Umformungen

$$K'_p = \frac{P_{\max}}{\rho_{DF} \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h_{fl}} \wedge K'_p = \kappa' \cdot Fr^{\xi'} \Rightarrow \frac{P_{\max}}{\rho_{DF} \cdot v^2 + \rho_{DF} \cdot g \cdot h_{fl}} = \kappa' \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{\xi'} \quad (\text{Gl. 15})$$

$$\frac{P_{\max}}{\rho_{DF} \cdot v^2 + \rho_{DF} \cdot g \cdot h_{fl}} = \kappa' \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{\xi'} \Rightarrow P_{\max} = (\rho_{DF} \cdot v^2 + \rho_{DF} \cdot g \cdot h_{fl}) \cdot \kappa' \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{\xi'} \quad (\text{Gl. 16})$$

eine Formel für die am Bauwerk maximal auftretende Druckspitze:

$$P_{\max} = \kappa' \cdot \rho_{DF} \cdot (v^2 + g \cdot h_{fl}) \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{\xi'} \quad (\text{Gl. 17})$$

Bei der Herleitung dieser Gleichung für die maximal auftretende Druckspitze stellte sich heraus, dass grundsätzlich zwischen zwei Typen von Murgängen unterschieden werden kann, welche sich qualitativ als „schnell und flüssig“ oder „langsam und fest“ beschreiben lassen. Es stellte sich heraus, dass diese beiden

Typen von Fließverhalten mit den beiden dynamischen Verhalten in *Kapitel 5* korrelieren. In *Tabelle 6* sind die aus den Versuchen ermittelten Parameter κ' und ξ' dafür angegeben. Der Gültigkeitsbereich ist auf FROUDE-Zahlen von 1 bis 15 beschränkt, da dies der durch die Versuche abgedeckte Bereich (*Abbildung 41*) ist.

Dynamisches Verhalten	Fr	κ'	ξ'
	[-]	[-]	[-]
„schnell & flüssig“	>2	7,4271	-1,6333
„langsam & fest“	<5	2,5451	-1,0421

Tabelle 6: Parameter der von der FROUD-Zahl abhängigen Formel zur Bestimmung der maximalen Druckspitze am Bauwerk nach (Gl. 17)

Als Kontrolle wurde für alle Einzelversuche der Druck aus den gemessenen Werten Fließtiefe und Geschwindigkeit nach der obigen Methode (Berechnung nach (Gl. 17), Parameter aus *Tabelle 6*) berechnet. Danach wurde der berechnete dem gemessenen Druck gegenübergestellt bzw. das Verhältnis aus gemessenem und berechnetem Druck für alle Versuche überprüft. Aus *Abbildung 41* ist ersichtlich, dass die berechneten Werte für die meisten Versuche ähnlich den gemessenen Werten sind. Weiters wurde für alle Versuche das Verhältnis aus berechneten und gemessenen Werten betrachtet. Auch hier ist aus *Abbildung 41* zu erkennen, dass dieses für den Großteil der Versuche um 1 liegt. Grundsätzlich kann man aus dieser Betrachtung ablesen, dass die Drücke mit dieser Formel eher über- als unterschätzt werden.

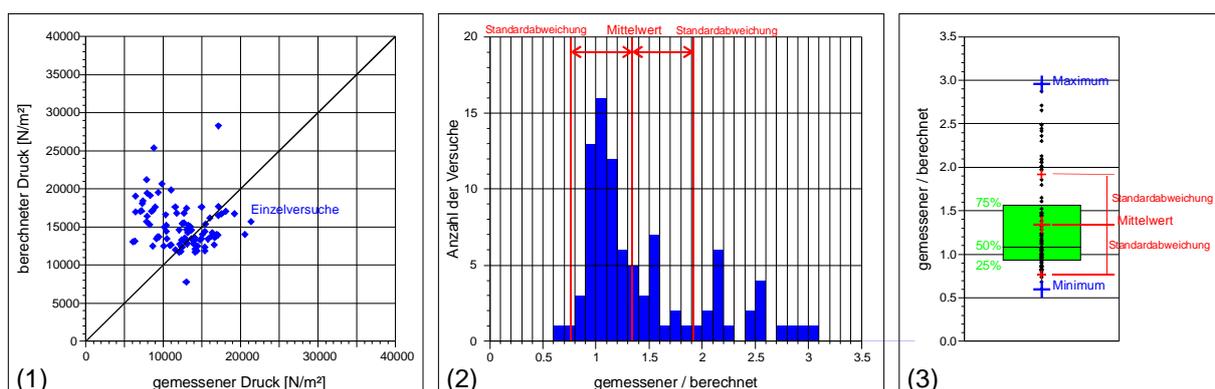


Abbildung 41: Graphische Darstellung der Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Druckspitzen (1), sowie dem Verhältnis daraus (2) & (3) für die Druckformel nach (Gl. 17)

6.2.1.2 Gegenüberstellung von FROUDE-Zahl und Druckfaktor K_p''

Für alle Versuche, bei denen Druckmessungen durchgeführt wurden, wurde auch der Druckfaktor K_p'' in Abhängigkeit von der FROUDE-Zahl betrachtet (Abbildung 42).

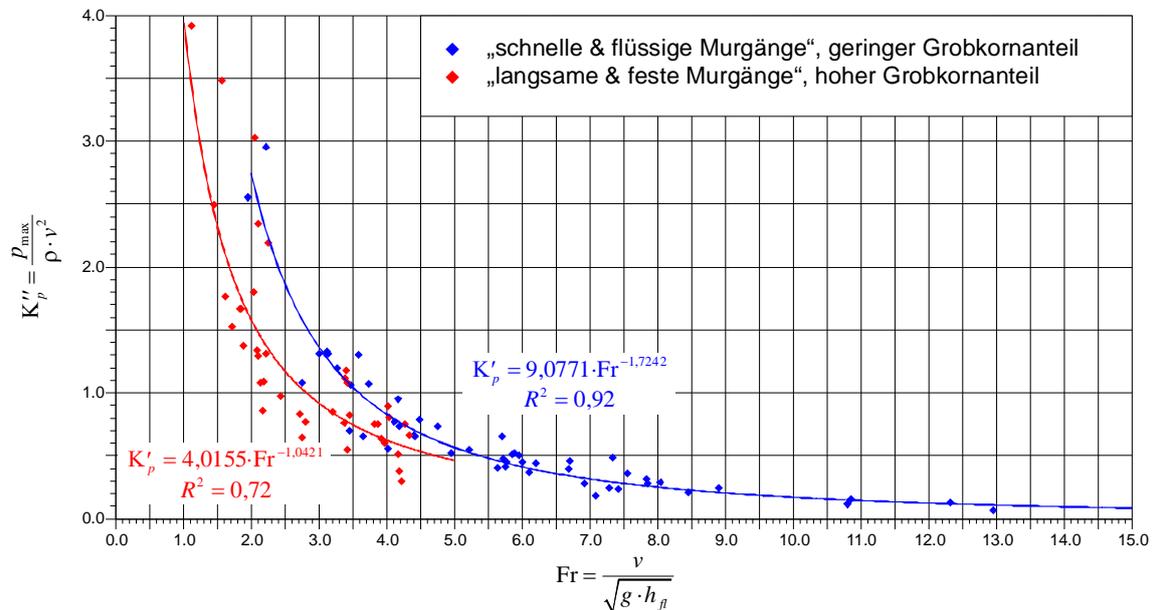


Abbildung 42: Gegenüberstellung von FROUDE-Zahl und Druckfaktor K_p'' für die durchgeführten Modellversuche

Dabei zeigte sich wieder, dass ein Zusammenhang zwischen den beiden Werten besteht, welcher sich durch die Gleichung

$$K_p'' = \kappa'' \cdot Fr^{\xi''} \quad (\text{Gl. 18})$$

mit den beiden (ebenfalls einheitenlosen) Parametern κ'' und ξ'' beschreiben lässt.

Durch Einsetzen von FROUDE-Zahl und Druckfaktor K_p'' in (Gl. 14) ergibt sich durch folgende Umformungen

$$K_p'' = \frac{p_{\max}}{\rho_{DF} \cdot v^2} \wedge K_p'' = \kappa'' \cdot Fr^{\xi''} \Rightarrow \frac{p_{\max}}{\rho_{DF} \cdot v^2} = \kappa'' \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{\xi''} \quad (\text{Gl. 19})$$

$$\frac{p_{\max}}{\rho_{DF} \cdot v^2} = \kappa'' \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{\xi''} \Rightarrow p_{\max} = \rho_{DF} \cdot v^2 \cdot \kappa'' \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{\xi''} \quad (\text{Gl. 20})$$

eine weitere Formel für die am Bauwerk maximal auftretende Druckspitze:

$$p_{\max} = \kappa'' \cdot \rho_{DF} \cdot v^2 \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{\xi''} \tag{Gl. 21}$$

Es stellte sich heraus, dass auch hier wieder zwischen den beiden Typen von Murgängen unterschieden werden kann. In *Tabelle 6* sind die aus den Versuchen ermittelten Parameter κ'' und ξ'' dafür angegeben. Der Gültigkeitsbereich ist auf FROUDE-Zahlen von 1 bis 15 beschränkt, da dies der durch die Versuche abgedeckte Bereich (*Abbildung 41*) ist.

Dynamisches Verhalten	Fr	κ''	ξ''
	[-]	[-]	[-]
„schnell & flüssig“	>2	9,0771	-1,7242
„langsam & fest“	<5	4,0155	-1,3422

Tabelle 7: Parameter der von der FROUDE-Zahl abhängigen Formel zur Bestimmung der maximalen Druckspitze am Bauwerk nach (Gl. 21)

Als Kontrolle wurde wieder für alle Einzelversuche der Druck aus den gemessenen Werten Fließtiefe und Geschwindigkeit nach der obigen Methode (Berechnung nach (Gl. 21), Parameter aus *Tabelle 7*) berechnet. Danach wurden die Gegenüberstellungen wie in *Kapitel 6.2.1.1* durchgeführt, welche in *Abbildung 43* dargestellt sind. Es zeigt sich auch hier eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem Druck. Auch bei dieser Druckgleichung kann man eine Tendenz zum Überschätzen der Drücke erkennen.

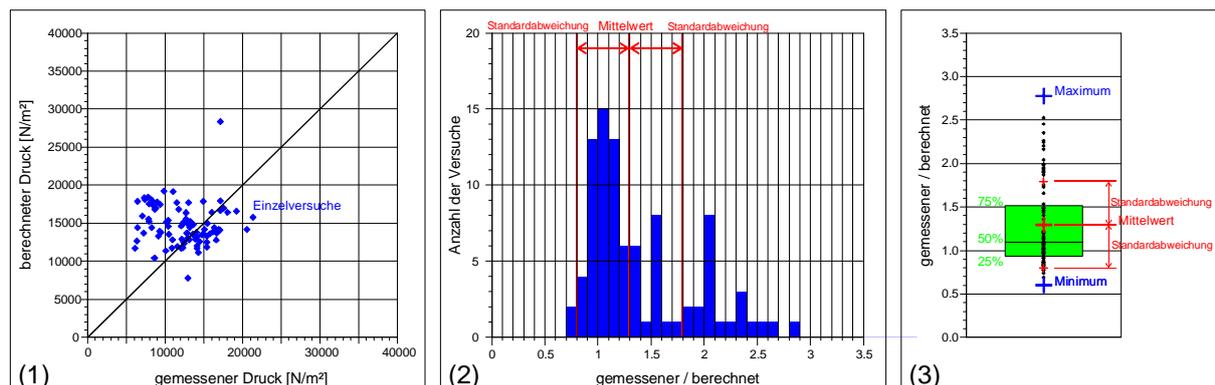


Abbildung 43: Graphische Darstellung der Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Druckspitzen (1), sowie dem Verhältnis daraus (2) & (3) für die Druckformel nach (Gl. 21)

Für den Parameter κ''_p wurde zusätzlich eine Auswertung über alle Versuche – unabhängig von der Materialzusammensetzung – durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass auch hier ein starker Zusammenhang besteht (*Abbildung 44*). Durch Abrunden

des Koeffizienten und des Exponenten kann die gefundene Potentialgleichung in der Form

$$K_p'' = 4,5 \cdot Fr^{-1,2} \quad (\text{Gl. 22})$$

geschrieben werden (*Abbildung 44*) und nach Einsetzen der oben festgelegten Definitionen durch Umformung als vereinfachte Druckgleichung

$$p_{\max} = 4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6} \quad (\text{Gl. 23})$$

vorgeschlagen werden.

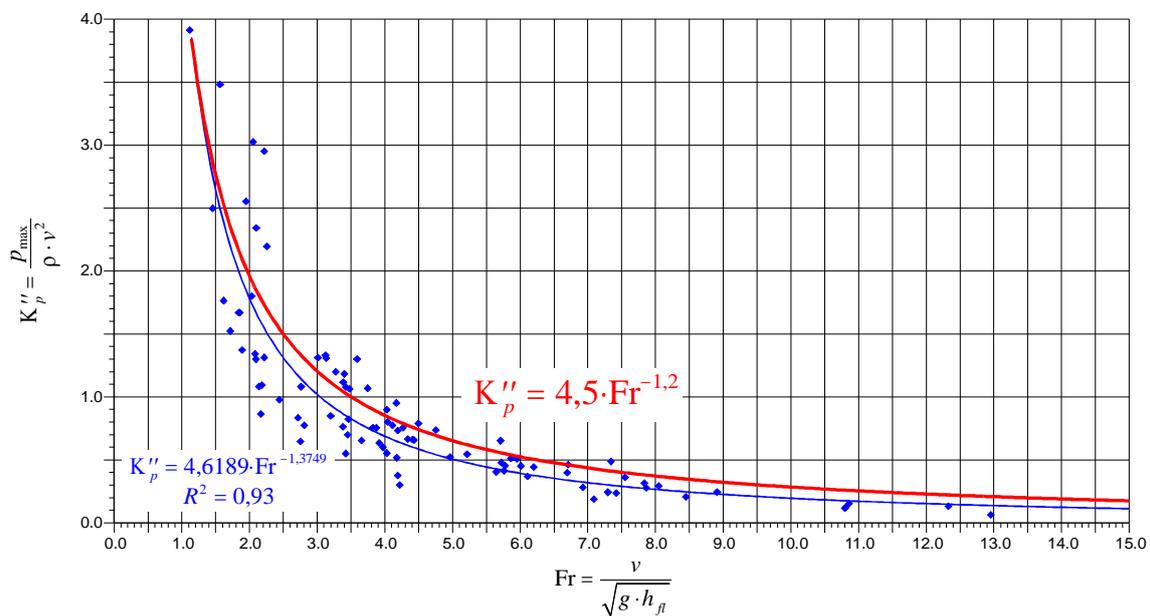


Abbildung 44: Gegenüberstellung von FROUDE-Zahl und Druckfaktor K_p'' für alle Versuche, unabhängig vom Versuchsmaterial

Die Anwendung dieser vereinfachten Druckformel auf die Modellversuche und die statistische Auswertung der Relation zwischen berechneten und gemessenen Werten ist in *Abbildung 45* graphisch dargestellt.

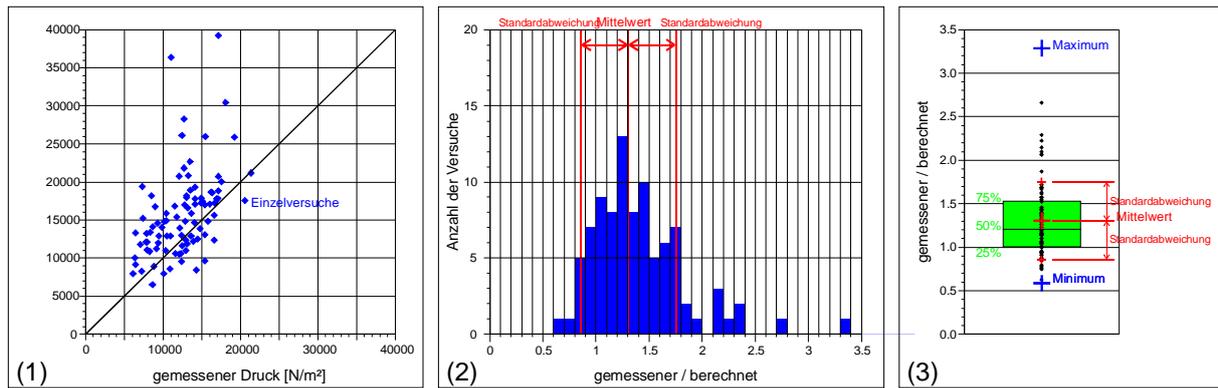


Abbildung 45: Graphische Darstellung der Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Druckspitzen (1), sowie dem Verhältnis daraus (2) & (3) für die Druckformel nach (Gl. 23)

Bei Betrachtung von *Abbildung 45* erkennt man, dass die vereinfachte Druckformel gute Übereinstimmung zeigt. Der Druck wird zwar wieder generell etwas überschätzt, dies entsteht dadurch, dass bei der Vereinfachung von Koeffizient und Exponent die Werte bewusst so gewählt wurden, dass die Formel zur sicheren Seite tendiert. Beim Vergleich mit der Druckgleichungen (Gl. 17) in *Kapitel 6.2.1.1* und der oben vorgestellten Beziehung zwischen FROUDE-Zahl und K_p'' in (Gl. 21) kann man feststellen, dass die Relation zwischen gemessenen und berechneten Drücken bei der Anwendung der vereinfachten Druckformel nach (Gl. 23) weniger Streuung aufweist als die beiden anderen.

6.2.1.3 Vergleich und Diskussion der gefundenen Zusammenhänge

Die hier dargestellten - aus den Modellversuchen abgeleiteten - Formeln zur Berechnung der Druckspitzen an Murbrechern bedürfen noch umfangreicher Überprüfung anhand von Daten aus anderen Versuchen, vor allem aber anhand von gemessenen Drücken bei natürlichen Murgängen. Vorerst soll die Druckformel nach (Gl. 23) zur Berechnung der maximalen Belastung von Murbrechen vorgeschlagen werden, durch weiterführende Untersuchungen und Experimente könnte in Zukunft aus den Zusammenhängen in (Gl. 17) und (Gl. 21) eine Druckformel, die genauer auf das Material eingeht, gefunden werden. Bei der Anwendung der drei Druckgleichungen, zeigt sich außerdem, dass die genaueren Zusammenhänge bei der Anwendung auf die Versuchsdaten ebenso streuen.

Die weiterführenden Untersuchungen und Vergleiche in dieser Arbeit sollen sich auf die vereinfachte Druckformel nach (Gl. 23) beschränken. Um eine Größenordnung der auf diese Art ermittelten Druckspitzen anzugeben, wurden in

Abbildung 46 für verschiedene angenommene Werte die berechnete Druckspitze dargestellt. Dabei handelt es sich um fiktiv angenommene Werte, es wurden jedoch dabei Fließtiefen und Geschwindigkeiten angenommen, wie sie bereits in der Natur beobachtet und in der Literatur beschrieben worden sind (Tabelle 8 und Tabelle 9).

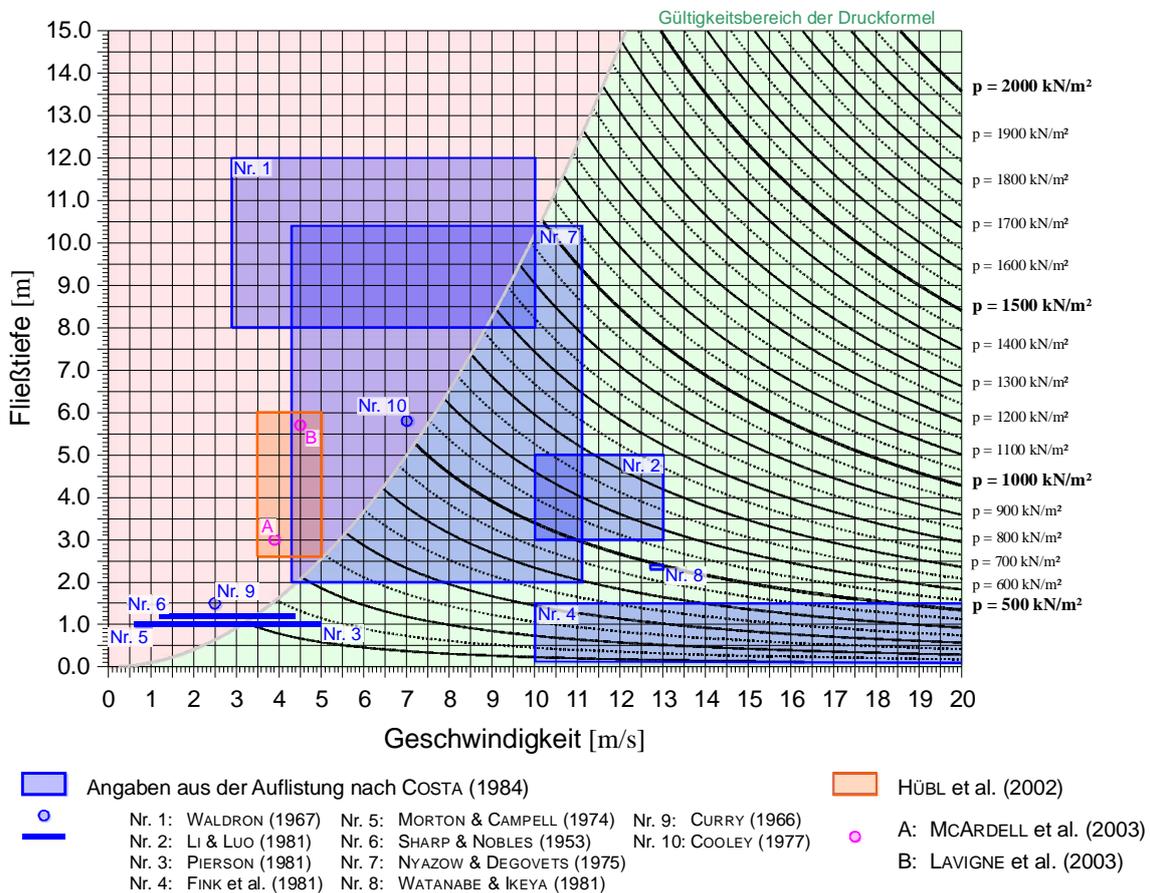


Abbildung 46: Maximale Druckspitze für verschiedene Fließtiefen und Geschwindigkeiten bei einer durchschnittlichen Dichte von 2.150 kg/m^3 ; Beispiele für beobachtete oder gemessene Bereiche von Geschwindigkeit und Tiefe (Erklärung in Tabelle 8 und Tabelle 9)

Gewässer	Ort	Geschwindigkeit [m/s]	Fließtiefe [m]	Dichte [kg/m ³]	geschätzter Druck* [kN/m ²]	Literaturangabe
Rio Reventado	Costa Rica	2,9 - 10,0	8,0 - 12,0	1130 - 1980	400 - 900	WALDRON (1967)
Hunshui Gully	China	10,0 - 13,0	3,0 - 5,0	2000 - 2300	450 - 850	LI & LUO (1981)
Bullock Greek	Neu Seeland	2,5 - 5,0	1,0	1950 - 2130	100 - 150	PIERSON (1981)
Pine Creek	USA	10,0 - 31,1	0,1 - 1,5	1970 - 2030	50 - 700	FINK et al. (1981)
Wrightwood Canyon (1969)	USA	0,6 - 3,8	1,0	1620 - 2130	50 - 100	MORTON & CAMPBELL (1974)
Wrightwood Canyon (1941)	USA	1,2 - 4,4	1,2	2400	150	SHARP & NOBLES (1953)
Lesser Almatinka River	USSR	4,3 - 11,1	2,0 - 10,4	2000	200 - 1000	NIYAZOW & DEGOVETS (1975)
Nojiri River	Japan	12,7 - 13,0	2,3 - 2,4	1810 - 1950	400 - 450	WATANABE & IKEYA (1981)
Mayflower Gulch	USA	2,5	1,5	2530		CURRY (1966)
Dragon Creek	USA	7,0	5,8	2000		COOLEY et al. (1977)

Tabelle 8: Liste der beobachteten und nachgerechneten Murgänge (dargestellt in *Abbildung 46*) aus der Literatur (aufgelistet in COSTA, 1984); *) Druck nach (Gl. 23) berechnet für FROUDE-Zahlen > 1, gerundete Werte, Bereiche ausserhalb des Gültigkeitsbereichs nicht berücksichtigt

Gewässer	Ort	Geschwindigkeit [m/s]	Fließtiefe [m]	Literaturangabe
Wartschenbach	Tirol	3,5 - 5,0	2,6 - 6,0	HÜBL (2002)
Illgraben	Schweiz	3,9	3,0	MCARDELL (2003)
Curah Lengkong River	Indonesien	7,0	5,8	LAVIGNEY et al. (2003)

Tabelle 9: Liste der beobachteten und nachgerechneten Murgänge (dargestellt in *Abbildung 46*) aus der Literatur (HÜBL, 2002, MCARDELL et al., 2003 und LAVIGNEY et al., 2003)

6.2.2 Vergleich der durchgeführten Modellversuche mit vorhandener Literatur zur Druckbelastungen

Zur Druckbelastung durch Murstoß an Bauwerken gibt es bisher nur wenig Arbeiten in der Literatur. Die erste Angabe zum Murdruck an Wildbachsperren findet sich bei LICHTENHAHN (1972). WATANABE & IKEYA (1981) geben eine weitere Formel für den Murdruck an. Aus Modellversuchen leitet YU (1992) eine empirische Formel zur Bestimmung der Druckbelastung an Bauwerken ab. ARMANINI (1997) entwickelte – ebenfalls aus Modellversuchen (ARMANINI & SCOTTON, 1992) hergeleitet – eine weitere Methode zur Druckbestimmung an. Im folgenden sollen diese Arbeiten mit den im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Versuchen verglichen werden. In *Kapitel 6.2.2.5* werden die Ergebnisse dieses Vergleichs gegenübergestellt und diskutiert. Es werden bei den Abkürzungen und Formelzeichen die in dieser Arbeit

eingeführten (*Kapitel 8*) verwendet, auch wenn sie von der Originalliteratur abweichen. Dadurch kann es zu keinen Verwechslungen oder Doppeldeutigkeiten kommen.

6.2.2.1 Der Murdruck auf Wildbachsperrern nach LICHTENHAHN (1972)

In seiner Arbeit zur Berechnung von Wildbachsperrern gibt LICHTENHAHN (1972) an, dass als Lastfall bei Murstoß der 7- bis 11-fache statische Wasserdruck angenommen werden kann. Diese Methode zur Ermittlung des Bemessungsdrucks für den Lastfall Murstoß ist eine gängige Methode in der Praxis der Wildbachverbauung.

Zieht man den maximalen hydrostatischen Wasserdruck heran, so stellt sich dieser an der Sohle ein und lässt sich mit

$$p_{Li} = 7 \div 11 \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h_{fl} \quad (\text{Gl. 24})$$

aus der Fließtiefe berechnen. Wenn dieser so berechnete Druck in Relation zu der aus den Modellversuchen ermittelten Druckformel gebracht wird ergibt sich mit

$$c_{Li} = \frac{P_{\max}}{p_{Li}} \quad (\text{Gl. 25})$$

ein Faktor, durch den ausgedrückt wird, wie weit durch die neu gefundene Druckgleichung der Druck gegenüber LICHTENHAHN (1973) über- oder unterschätzt wird. Durch Einsetzen von (Gl. 23) und (Gl. 24) in (Gl. 25) erhält man nach Umformung die Beziehung

$$c_{Li} = \frac{4,5}{7 \div 11} \cdot \frac{\rho_{DF}}{\rho_{H_2O}} \cdot \frac{v^{0,8}}{(g \cdot h_{fl})^{0,4}} \quad (\text{Gl. 26})$$

welche in der Form

$$c_{Li} = \frac{4,5}{7 \div 11} \cdot \frac{\rho_{DF}}{\rho_{H_2O}} \cdot \text{Fr}^{0,8} \quad (\text{Gl. 27})$$

die Relation zwischen der aus den Modellversuchen abgeleiteten Druckformel und der Druckangabe nach LICHTENHAHN (1973) in Abhängigkeit von der FROUDE-Zahl darstellt. Dieser Zusammenhang ist in *Abbildung 47* graphisch dargestellt, wobei für die Dichte des Murmaterials ein mittlerer Wert von 2.150 kg/m³ gewählt wurde. Es zeigt sich dabei, dass für hohe FROUDE-Zahlen der nach der vorgeschlagenen

Druckformel berechnete Druck bei weitem höher ist als der nach LICHTENHAHN (1973) angeschätzte.

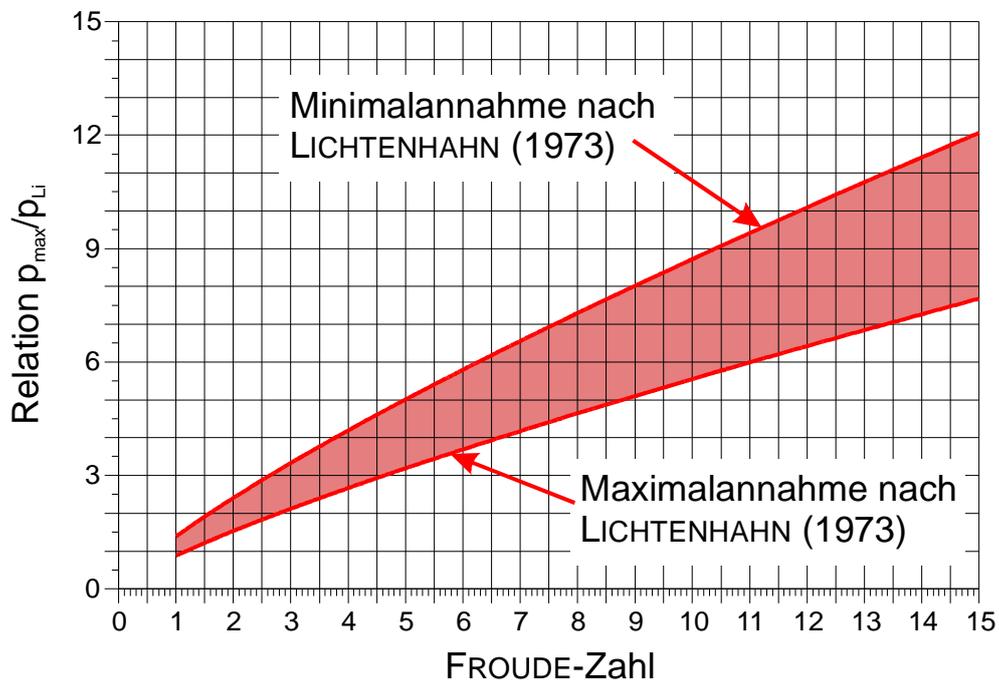


Abbildung 47: Graphische Darstellung der Abhängigkeit der Relation zwischen der aus den Modellversuchen abgeleiteten Druckformel und der Druckangabe nach LICHTENHAHN (1973) von der FROUDE-Zahl

Weiters wurde für jeden Einzelversuch aus der gemessenen Fließtiefe der Murdruck nach LICHTENHAHN (1973) berechnet. Dieser wurde dann den gemessenen Druckspitzen gegenübergestellt (*Abbildung 48*).

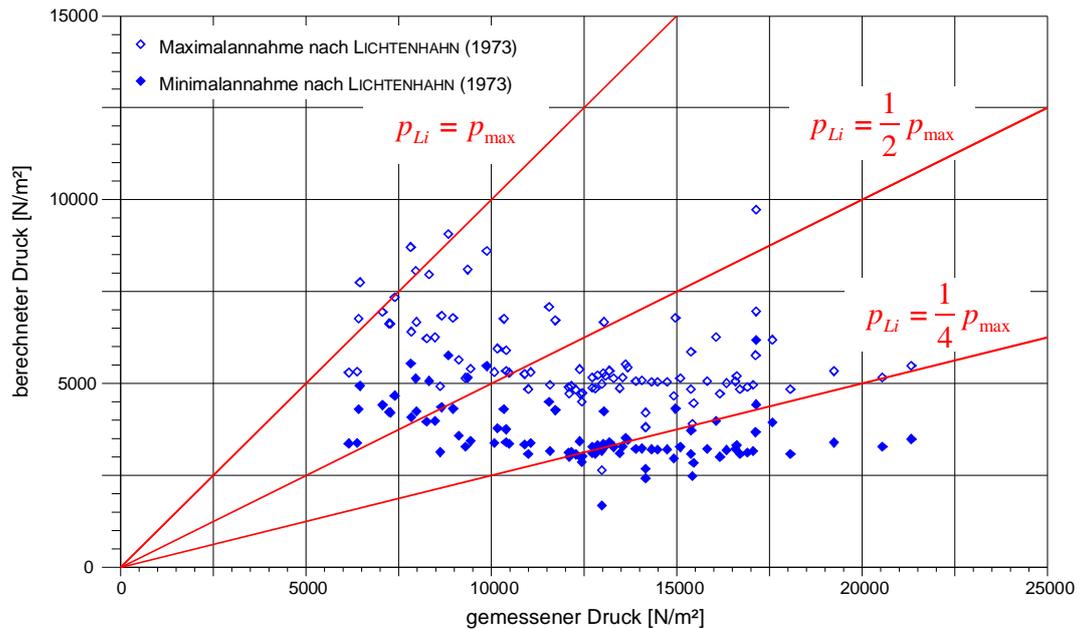


Abbildung 48: Berechnung des Drucks auf das Sperrenmodell nach der Methode nach LICHTENHAHN (1973)

6.2.2.2 Die empirische Druckformel nach WATANABE & IKEYA (1981)

Nach diesen Arbeiten ist die Druckbelastung durch Murgänge proportional zur Wichte des Murmaterials und dem Quadrat der Durchschnittsgeschwindigkeit. Daher kann der Druck in der Form

$$p_{W\&I} = \alpha_{W\&I} \cdot \frac{\gamma_{DF} \cdot v^2}{g} \quad (\text{Gl. 28})$$

oder

$$p_{W\&I} = \alpha_{W\&I} \cdot \rho_{DF} \cdot v^2 \quad (\text{Gl. 29})$$

ausgedrückt werden, wobei $\alpha_{W\&I}$ der „velocity-head“-Koeffizient ist und nach KHERKEULITZE (1967) für laminares Fließen 2,0 gesetzt werden kann. Dieser so berechnete Druck wird wieder in Relation zu der aus den Modellversuchen ermittelten Druckformel gebracht woraus sich mit

$$c_{W\&I} = \frac{p_{\max}}{p_{W\&I}} \quad (\text{Gl. 30})$$

abermals ein Faktor berechnen läßt, durch den ausgedrückt wird, wie weit durch die neu gefundene Druckgleichung der Druck gegenüber WATANABE & IKEYA (1981) über- oder unterschätzt wird. Durch Einsetzen von (Gl. 23) und (Gl. 29) in (Gl. 30) erhält man nach Umformung die Beziehung

$$c_{W\&I} = \frac{9}{2\alpha_{W\&I}} \cdot \frac{(g \cdot h_{fl})^{0,6}}{v^{1,2}} \quad (\text{Gl. 31})$$

welche in der Form

$$c_{W\&I} = 2,25 \cdot \text{Fr}^{-1,2} \quad (\text{Gl. 32})$$

die Relation zwischen der aus den Modellversuchen abgeleiteten Druckformel und der Druckangabe nach WATANABE & IKEYA (1981) in Abhängigkeit von der FROUDE-Zahl darstellt. Dieser Zusammenhang ist in *Abbildung 49* dargestellt. Es zeigt sich, dass in diesem Fall für hohe FROUDE-Zahlen der Druck nach WATANABE & IKEYA (1981) deutlich unter dem der neuen Druckformel liegt, während er für sehr niedrige FROUDE-Zahlen darüber bzw. im Bereich der neuen Druckgleichung liegt.

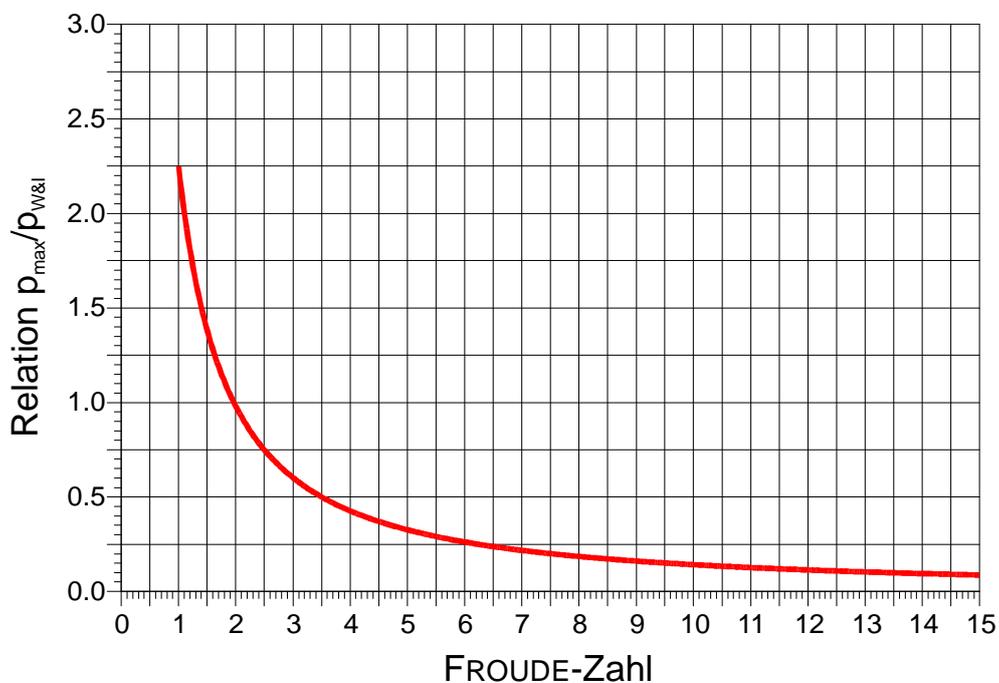


Abbildung 49: Graphische Darstellung der Abhängigkeit der Relation zwischen der aus den Modellversuchen abgeleiteten Druckformel und der Druckformel nach WATANABE & IKEYA (1981) von der FROUDE-Zahl

Weiters wurde für jeden Einzelversuch aus der gemessenen Geschwindigkeit und der bekannten Dichte des Murmaterials der Murdruck nach WATANABE & IKEYA (1981) berechnet. Dieser wurde dann den gemessenen Druckspitzen gegenübergestellt (*Abbildung 50*).

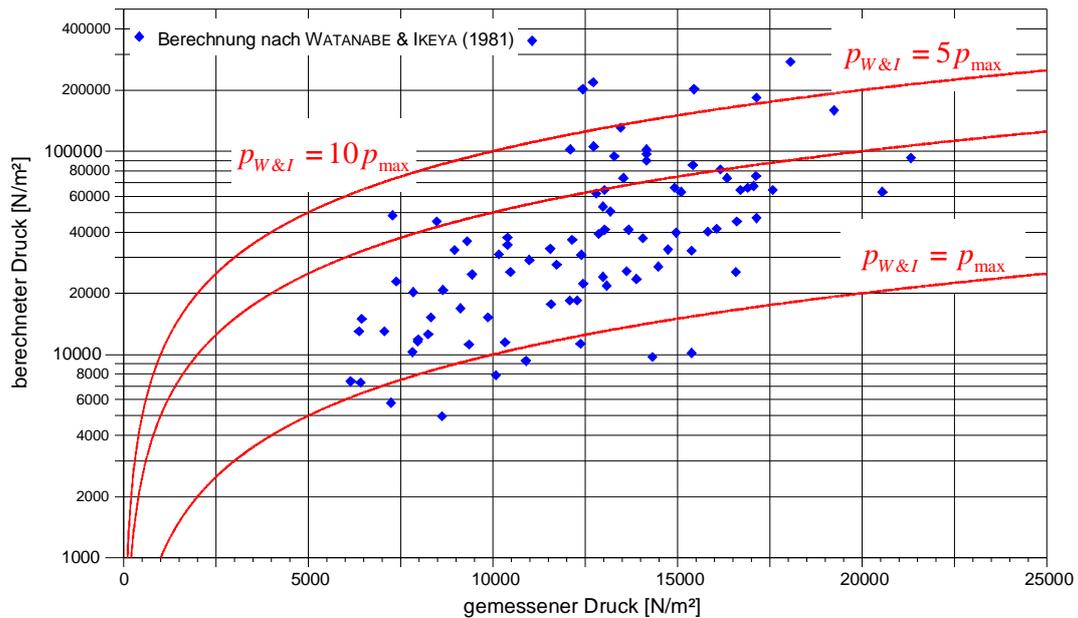


Abbildung 50: Gegenüberstellung des nach WATANABE & IKEYA (1981) berechneten Drucks (in logarithmischer Darstellung) und der gemessenen Druckspitze

6.2.2.3 Die Formel zur Anschätzung der Belastung durch Murstoß nach YU (1992)

In dieser Arbeit wird aufbauend auf der von YU & CHEN (1990) entwickelten empirischen Gleichung für die Geschwindigkeit von Muren

$$v = \frac{\rho_{H_2O} \cdot \sin \theta \cdot v_*}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right) \quad (\text{Gl. 33})$$

sowie durchgeführten Modellversuchen eine Formel für den durch eine Murwelle ausgelösten Druck

$$P_{Yu} = \frac{2\rho_{sed}}{g} \left[\frac{\rho_{H_2O} \cdot \sin \theta \cdot v_*}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right) \right]^2 \quad (\text{Gl. 34})$$

entwickelt (YU, 1992), wobei

$$v_* = \sqrt{g \cdot h_{fl} \cdot \sin \theta} \quad (\text{Gl. 35})$$

für die PRANDTL'sche Schubspannungsgeschwindigkeit steht.

Bei genauerer Betrachtung kann jedoch festgestellt werden, dass diese Formel nicht den Druck in der korrekten physikalischen Einheit [N/m²] liefert, sondern als Einheit [kg/m²] verwendet wird. Daher wurde die Formel mit der Erdbeschleunigung g multipliziert, wodurch sich dann der physikalisch korrekte Druck

$$p'_{Yu} = 2\rho_{sed} \cdot \left[\frac{\rho_{H_2O} \cdot \sin \theta \cdot v_*}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right) \right]^2 \quad (\text{Gl. 36})$$

nach YU (1992), ergibt, der auch durch Einsetzen der in *Kapitel 4.2.1* beschriebenen Beziehungen, in der Form

$$\Rightarrow p'_{Yu} = 2\rho_{sed} \cdot \frac{\rho_{H_2O}^2}{(\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2} \cdot g \cdot h_{fl} \cdot \sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2 \quad (\text{Gl. 37})$$

angeschrieben werden kann. Dieser so berechnete Druck wird wieder in Relation zu der aus den Modellversuchen ermittelten Druckformel gebracht woraus sich mit

$$c_{Yu} = \frac{p_{\max}}{p_{Yu}} \quad (\text{Gl. 38})$$

abermals ein Faktor berechnen läßt, durch den ausgedrückt wird, wieweit durch die neu gefundene Druckgleichung der Druck gegenüber YU (1992) über- oder unterschätzt wird. Durch Einsetzen von (Gl. 23) und (Gl. 37) in (Gl. 38) erhält man nach Umformung die Beziehung

$$c_{Yu} = \frac{4,5}{2} \cdot \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2} \cdot \frac{v^{0,8}}{(g \cdot h_{fl})^{0,4}} \quad (\text{Gl. 39})$$

welche in der Form

$$c_{Yu} = 2,25 \cdot \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2} \cdot \text{Fr}^{0,8} \quad (\text{Gl. 40})$$

die Relation zwischen der aus den Modellversuchen abgeleiteten Druckformel und der Druckangabe nach YU (1992) in Abhängigkeit von der FROUDE-Zahl darstellt. Um diese Funktion ohne die zu messenden Größen Fließtiefe h_{fl} und mittlerem Korndurchmesser d_{50} darstellen zu können, wurde der Faktor

$$k_{d50} = \frac{d_{50}}{h_{fl}} \quad (\text{Gl. 41})$$

eingeführt, welcher den mittleren Korndurchmesser als Teil der Fließtiefe und somit einheitenlos angibt. Somit kann (Gl. 41) in der Form

$$c_{Yu} = 2,25 \cdot \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot (2,4 - \ln k_{d50})^2} \cdot Fr^{0,8} \quad (\text{Gl. 42})$$

geschrieben werden.

Dieser Zusammenhang ist in *Abbildung 51* dargestellt, wobei für Sediment eine mittlere Dichte von 3.300 kg/m^3 und für das Murmaterial wieder die mittlere Dichte mit 2.150 kg/m^3 angenommen wurde. Dargestellt sind für verschiedene Sohlneigungen Bereiche verschiedener einheitenloser Mitteldurchmesser.

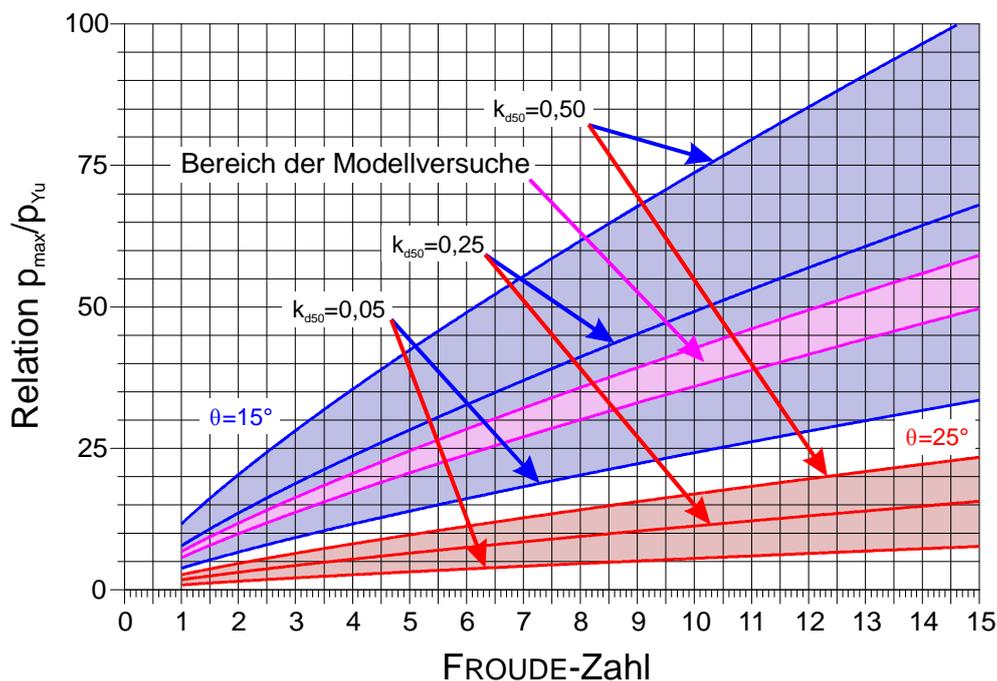


Abbildung 51: Graphische Darstellung der Abhängigkeit der Relation zwischen der aus den Modellversuchen abgeleiteten Druckformel und der Druckformel nach YU (1992) von der FROUDE-Zahl

Dabei erkennt man, dass das Verhältnis zwischen den beiden Formeln zur Berechnung des Murdrucks auf Bauwerke einen weiten Bereich abdeckt. Dieser ist sowohl vom Korndurchmesser als auch von der Sohlneigung abhängig. Weiters spielt die Dichte der transportierten Sedimente eine große Rolle.

Betrachtet man die Sohlneigung, so folgt aus der Tatsache, dass die Neigung in der Form

$$I = \tan \theta \quad (\text{Gl. 43})$$

durch den Tangens des Neigungswinkel ausgedrückt werden kann, dass der Faktor, welcher in (Gl. 42) den Einfluss der Sohlneigung ausdrückt auch als Funktion der Neigung

$$\Rightarrow \frac{1}{\sin^3 \theta} = \sqrt{\left(\frac{1}{I^2} + 1\right)^3} \quad (\text{Gl. 44})$$

angeschrieben werden. Man erkennt aus den Grenzwerten

$$\lim_{I \rightarrow 0} \sqrt{\left(\frac{1}{I^2} + 1\right)^3} = \infty \quad (\text{Gl. 45})$$

und

$$\lim_{I \rightarrow \infty} \sqrt{\left(\frac{1}{I^2} + 1\right)^3} = 1 \quad (\text{Gl. 46})$$

dieser Funktion, dass für Neigungen nahe Null – also die theoretische Annahme einer waagrechten Sohle – der Einfluss der Neigung gegen Unendlich strebt, hingegen in Richtung zur Senkrechten – Neigungswinkel gegen 90° - kein Einfluss der Neigung gegeben ist. Dies ist ein Teil der Erklärung, warum die beiden verglichenen Druckformeln für steilere Sohlen besser übereinstimmen. Aus der Ableitung des von der Neigung abhängigen Faktors nach der Neigung

$$\Rightarrow \frac{\partial \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{I^2} + 1\right)^3} \right\}}{\partial I} = -3 \cdot \sqrt{I^{-8} + I^{-4}} \quad (\text{Gl. 47})$$

kann man erkennen, dass diese Abweichung mit geringer werdender Neigung exponentiell zunimmt. Betrachtet man die möglichen Neigungen für Murgänge, welche bei RICKENMANN (2002) mit 15% - 30% angegeben sind, so sieht man, dass der Einfluss der Neigung zwischen 300-fach und 40-fach liegt.

Bei der Beurteilung des Faktors, welcher den Einfluss des mittleren Korndurchmessers beschreibt, so erkennt man, aus dem Grenzwert

$$\lim_{k_{d50} \rightarrow +0} \frac{1}{(2,4 - \ln k_{d50})^2} = 0 \quad (\text{Gl. 48})$$

für Korndurchmesser, welche sich – in einer theoretischen Überlegung - gegen Null bewegen, dass die Relation zwischen den Druckformeln unendlich groß würde. Für

die – theoretische – Annahme, dass der mittlere Korndurchmesser exakt der Fließtiefe entspricht ergibt sich für diesen Faktor der Wert von 0,1736. In einem Bereich für den mittleren Korndurchmesser von $1/10$ bis zu $1/4$ der Fließtiefe wird die Relation zwischen den beiden Druckformeln zwischen 0,03 und 0,07 mal so hoch, das heißt mehr als verdoppelt (*Abbildung 52*).

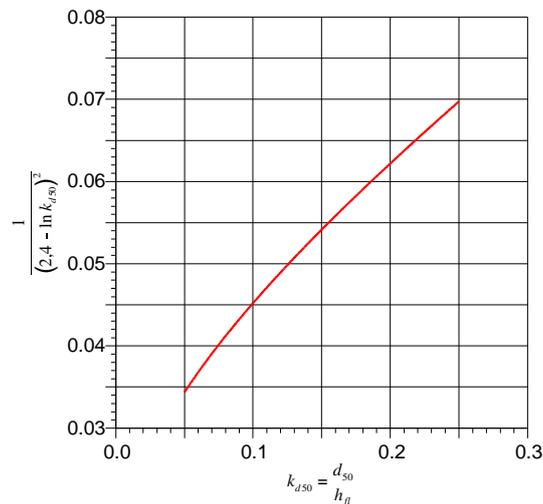


Abbildung 52: Einfluss des Verhältnisses zwischen mittlerem Korndurchmesser und Fließtiefe auf die Relation zwischen der vorgeschlagenen Druckformel und jener nach Yu (1992)

Bedenkt man nun noch, dass die Dichte des Sediments zusätzlich zu der Dichte des Murmaterials linear in die Druckformel nach Yu (1992) eingeht, so zeigt sich, dass auch dies ein gewichtiger Grund für die starken Abweichungen ist.

Zusätzlich zur analytischen Gegenüberstellung der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Murdruckformel, wurde für jeden Einzelversuch aus der gemessenen Geschwindigkeit und der bekannten Dichte des Murmaterials der Murdruck nach Yu (1992) berechnet. Dieser wurde dann den gemessenen Druckspitzen gegenübergestellt (*Abbildung 53*).

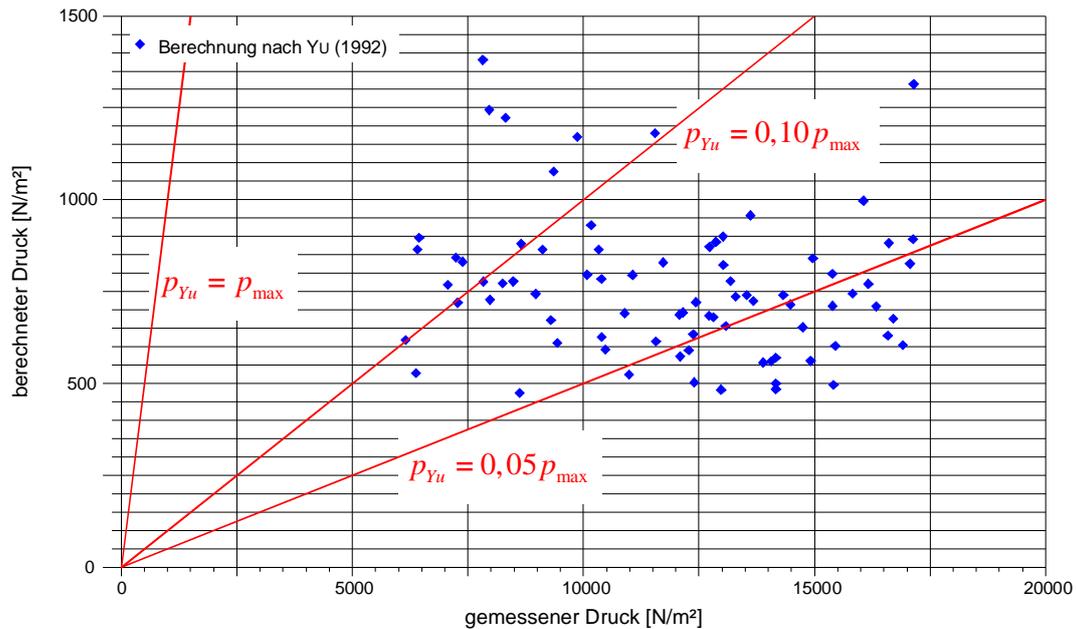


Abbildung 53: Gegenüberstellung des nach YU (1992) berechneten Drucks und der gemessenen Druckspitze

6.2.2.4 Die Methode zur Ermittlung des Murdrucks nach ARMANINI (1997)

ARMANINI (1997) leitet in seiner Arbeit aus Modellversuchen und theoretischen Ansätzen eine Gleichung für die Ersatzkraft des an der Sperre auftretenden Drucks ab. Dabei setzt sich die Kraft

$$F_{Ar} = 4,5 \cdot \gamma_{DF} \cdot h_{fl}^2 \quad (\text{Gl. 49})$$

aus einem Term

$$4 \cdot \gamma_{DF} \cdot h_{fl}^2 \quad (\text{Gl. 50})$$

für den dynamischen und einem Term

$$\frac{1}{2} \cdot \gamma_{DF} \cdot h_{fl}^2 \quad (\text{Gl. 51})$$

für den hydrostatischen Anteil zusammen. Daraus kann abgeleitet werden, dass der Murdruck nach ARMANINI (1997) in der Form

$$p_{Ar} = 4 \cdot \gamma_{DF} \cdot h_{fl} + \gamma_{DF} \cdot h_{fl} \quad (\text{Gl. 52})$$

angeschrieben werden. Zusammengefasst ergibt sich die Schreibweise

$$p_{Ar} = 5 \cdot \rho_{DF} \cdot g \cdot h_{fl} \quad (\text{Gl. 53})$$

wobei die Wichte des Murmaterials γ_{DF} durch die Dichte und Erdbeschleunigung ausgedrückt wurde. Es zeigt sich, dass unter der Annahme, dass die Dichte des Murmaterials in etwa dem Doppelten der Dichte von Wasser entspricht, diese Druckformel im Bereich der Anschätzung nach LICHTENHAHN (1973) liegt (*Kapitel 6.2.2.1*). Es ergibt sich für die Relation zwischen der neuen Druckgleichung und den Angaben nach ARMANINI (1997)

$$c_{Ar} = \frac{P_{\max}}{P_{Ar}} \quad (\text{Gl. 54})$$

die Gleichung

$$c_{Ar} = \frac{9}{10} \cdot \frac{v^{0,8}}{(g \cdot h_{fl})^{0,4}} \quad (\text{Gl. 55})$$

welche in der Form

$$c_{Ar} = 0,9 \cdot Fr^{0,8} \quad (\text{Gl. 56})$$

die Relation zwischen der aus den Modellversuchen abgeleiteten Druckformel und der Druckangabe nach ARMANINI (1997) in Abhängigkeit von der FROUDE-Zahl darstellt. Dieser Zusammenhang ist in *Abbildung 54* dargestellt. Ähnlich wie bei der Anschätzung nach Lichtenhahn (1973) kann man auch hier feststellen, dass für niedrige FROUDE-Zahlen der Druck nach der vorgeschlagenen Methode zwar höher liegt, aber doch ähnliche Größenordnungen aufweist. Für hohe FROUDE-Zahlen jedoch steigt die Relation zwischen den beiden Druckformeln stark an.

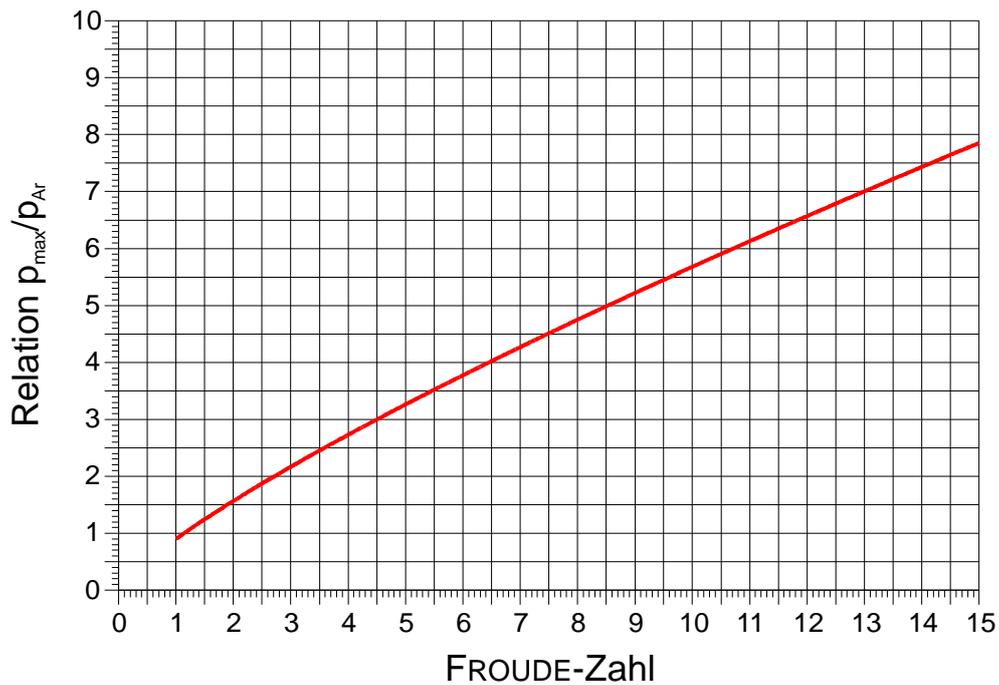


Abbildung 54: Graphische Darstellung der Abhängigkeit der Relation zwischen der aus den Modellversuchen abgeleiteten Druckformel und der Druckangabe nach ARMANINI (1997) von der FROUDE-Zahl

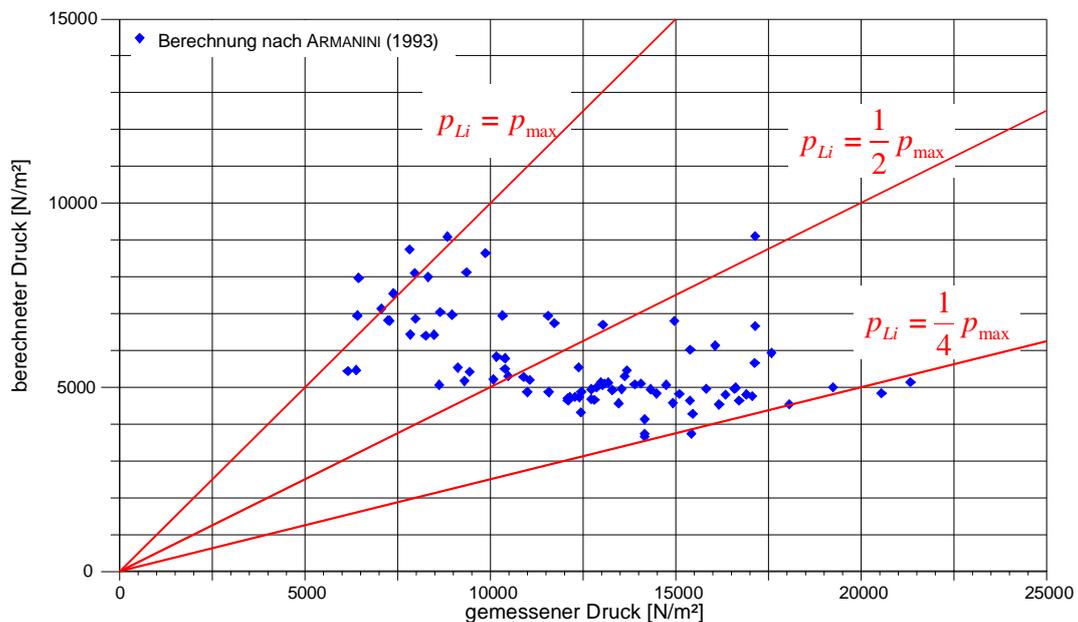


Abbildung 55: Gegenüberstellung des nach ARMANINI (1997) berechneten Drucks und der gemessenen Druckspitze

6.2.2.5 Diskussion der Ergebnisse des Vergleichs mit Literaturangaben

Bei der in den vorigen Kapiteln vorgestellten Methoden zur Ermittlung des Murdrucks zeigen sich einige grundsätzliche Unterschiede im Ansatz.

Während bei LICHTENHAHN (1973) und ARMANINI (1997) nur die Fließtiefe und die Dichte des Murmaterials eingehen, fließt bei WATANABE & IKEYA (1981) die Geschwindigkeit ein. In die empirische Druckformel nach YU (1992) gehen bei weitem mehr Parameter ein. Dies führt dazu, dass beim Vergleich mit den Modellversuchen und der daraus entwickelten Murformel sehr unterschiedliche Ergebnisse gefunden wurden.

Als Erklärung dafür, dass die von der Fließtiefe abhängigen Methoden vor allem bei hohen FROUDE-Zahlen deutlich unter den Modellversuchen liegen, mag dienen, dass hohe FROUDE-Zahlen vor allem bei niedrigen Fließtiefen und hohen Geschwindigkeiten auftreten. Diese niedrigen Fließtiefen ergeben daher sehr niedrige Werte für den hydrostatischen Druck. Unter dem Gesichtspunkt, dass in der Praxis der Wildbachverbauung bei der Abschätzung des Murdrucks mit der Methode nach LICHTENHAHN (1973) zumeist die Sperrhöhe für die Berechnung des hydrostatischen Wasserdrucks herangezogen wird, ergibt sich ein ganz anderer Bezug zur hier vorgeschlagenen Formel, in die die tatsächliche Fließtiefe eingeht. Wenn man in berücksichtigt, dass die ungestörte Fließtiefe oberhalb des Murbrechers nur einen Bruchteil der Sperrhöhe beträgt, kann man sagen, dass die bisher verwendeten Lastannahmen durchaus im Bereich der hier vorgeschlagenen Größenordnung liegen. Auch ARMANINI (1997) schreibt in seiner Arbeit, dass als für die Fließtiefe die Sperrhöhe bzw. die Gerinnetiefe verwendet werden sollte. Geht man von Murgängen aus, welche solch hohe Fließtiefen aufweisen, so wird man sich normalerweise in einem FROUDE-Bereich befinden, wo eine gute Übereinstimmung mit der hier vorgeschlagenen Formel vorliegt.

Anders verhält es sich bei der Druckformel nach WATANABE & IKEYA (1981). Diese liegt bei hohen FROUDE-Zahlen deutlich unter der hier vorgestellten. Bei genauerer Betrachtung der beiden Druckgleichungen erkennt man, dass einer der Hauptunterschiede ist, dass bei WATANABE & IKEYA (1981) die Geschwindigkeit mit ihrem Quadrat in die Formel eingeht, während in der neuen Druckformel der Exponent der Geschwindigkeit kleiner eins ist. Während bei niedrigen Geschwindigkeiten der Einfluss dieses Unterschieds durch die Berücksichtigung der Fließtiefe ausgeglichen wird, führt er bei hohen Geschwindigkeiten zu großen Unterschieden in den nach den beiden Formeln berechneten Drücken. Erwähnt muss an dieser Stelle noch werden, dass der in der Formel nach WATANABE & IKEYA

(1981) verwendete „velocity head“-Koeffizient nach KHERKEULITZE (1967) nur für laminares Fließen gilt.

Einen Sonderfall bei der Behandlung der in der Literatur gefundenen Methoden zur Bestimmung des Murdrucks stellt die empirische Druckformel nach YU (1992) dar. Gründe für die großen Abweichungen zu den durchgeführten Modellversuchen wurden bereits beim Vergleich dieser Formel mit den Modellversuchen besprochen (*Kapitel 6.2.2.3*). Ein Problem bei der Anwendung dieser Formel stellen die zu bestimmenden Parameter dar. YU (1992) schreibt, dass in der theoretisch entwickelten Formel die Dichte des Murmaterials durch die Dichte des Sediments ersetzt wurde, da bei der Anwendung in der ursprünglichen Form

$$P_{Yu} = \frac{2\rho_{DF}}{g} \left[\frac{\rho_{H_2O} \cdot \sin \theta \cdot v_*}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right) \right]^2 \quad (\text{Gl. 57})$$

bis zu 10x mal höhere Drücke gemessen wurden, als nach der Formel berechnet. Die Betrachtungen in *Kapitel 6.2.2.3* und diese Überlegungen lassen darauf schließen, dass die Druckformel nach YU (1992) für Bereiche, welche durch die Versuche, aus denen sie entwickelt wurde, nicht abgedeckt werden, nur bedingt anwendbar ist.

Da einerseits Methoden in der Literatur gefunden wurden, welche den bei den Modellversuchen gemessenen Druck deutlich überschätzen, andererseits welche, die ihn deutlich unterschätzen, sollen die einzelnen Methoden auch noch untereinander verglichen werden.

Daher wurden Drücke, die aus den Daten der Modellversuche nach den verschieden hier aufgezählten Methoden ermittelt wurden, einander gegenübergestellt. Es wurden aber auch analytische Vergleiche der einzelnen Murdruckformeln durchgeführt, um grundsätzliche Zusammenhänge zu erkennen.

Stellt man die Druckformeln, wo der Murdruck nur von der Höhe abhängt, jenen gegenüber, in welche nur die Geschwindigkeit eingeht, so kann man aus der Beziehung

$$\frac{P_{Ar}}{P_{W\&I}} = \frac{5 \cdot \rho_{DF} \cdot g \cdot h_{fl}}{\alpha_{W\&I} \cdot \rho_{DF} \cdot v^2} \quad (\text{Gl. 58})$$

durch Umformen eine Darstellung finden, wo die Relation zwischen dem Murdruck nach ARMANINI (1997) – welcher stellvertretend für die Methoden, die nur von der Fließtiefe abhängen, gewählt wurde – und dem nach WATANABE & IKEYA (1981) als Funktion der FROUDE-Zahl ausgedrückt wird. Aus diesem Zusammenhang

$$P_{Ar} = \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{Fr^2} \cdot P_{W\&I} \quad (\text{Gl. 59})$$

ist ersichtlich, dass bei steigender FROUDE-Zahl der Murdruck nach ARMANINI (1997) gegenüber dem nach WATANABE & IKEYA (1981) verkehrt proportional zum Quadrat der FROUDE-Zahl sinkt. Allerdings ist er bis zu einer FROUDE-Zahl von

$$Fr = \sqrt{\frac{5}{2}} \quad (\text{Gl. 60})$$

noch höher, was einem FROUDE-Bereich von ca 1,0 bis 1,6 entspricht.

In *Abbildung 56* sind die in den vorigen Kapiteln diskutierten und berechneten Drücke noch ein weiteres mal den gemessenen gegenübergestellt. Man kann erkennen, dass die oben besprochenen Zusammenhänge bestätigt werden. Während LICHTENHAHN (1973) und ARMANINI (1997) den Druck unterschätzen, liegen Watanabe & Ikeya (1981) über den gemessenen Werten. Für die starke Abweichung der Ergebnisse aus der Berechnung nach YU (1992) mögen die oben angeführten analytischen Zusammenhänge dienen. Als Bestätigung zeigt sich noch, dass die Berechnungsergebnisse nach der Druckformel nach YU (1992) wieder eindeutig von den anderen abweichen.

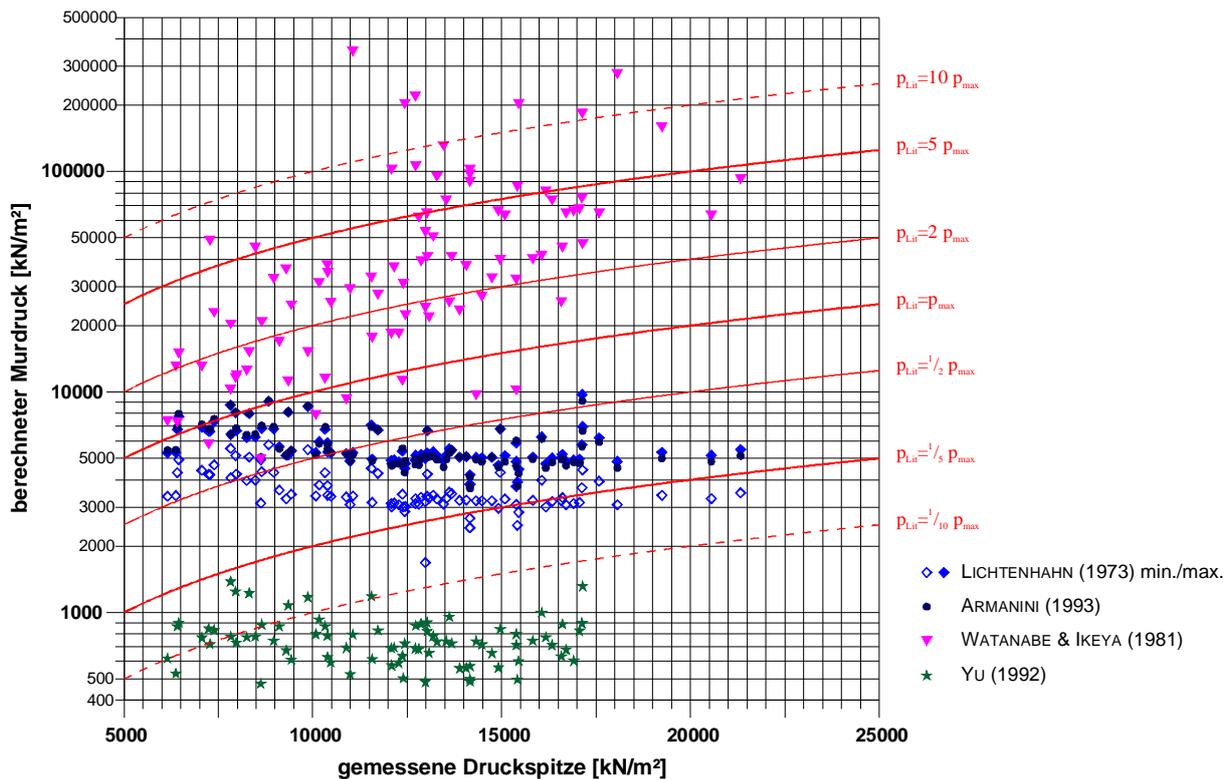


Abbildung 56: Gegenüberstellung des nach allen aufgelisteten Methoden berechneten und bei den Modellversuchen gemessenen Drucks für alle Einzelversuche

Abschließend ist hier noch anzumerken, dass die Formel nach ARMANINI (1997), wenn man die Originalliteratur genauer betrachtet, zwar den Druck in Abhängigkeit von der Fließtiefe angibt, jedoch ursprünglich aus der Beziehung zwischen dynamischem Druck und Frontgeschwindigkeit

$$v = 2\sqrt{g \cdot h_{fl} \cdot \cos \theta} \quad (\text{Gl. 61})$$

entwickelt wurde. Es wird dabei aber auch erwähnt, dass es, wenn auf Grund von Sohlneigung oder Gerinnerauigkeit besonders hohe oder niedrige Geschwindigkeiten auftreten, dieser Beziehung keine Gültigkeit mehr hat. Dies bedeutet dann aber auch, dass es zu Abweichungen in der daraus abgeleiteten Druckformel kommen muss. Unter diesem Gesichtspunkt lässt sich erklären, warum bei sehr hohen Geschwindigkeiten der nach ARMANINI (1997) berechnete Druck den Gemessenen unterschätzt.

7 ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

7.1 Erkenntnisse zur Wirkung von Murbrechern auf die Dynamik der Murwelle

7.1.1 Auswirkung der Scheibenform

Bei den Versuchen wurde die Auswirkung der Scheibenform auf die Dynamik der Murwelle untersucht. Dabei konnte ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden verwendeten Scheibentypen festgestellt werden. In erster Linie wirkt sich die Form der verwendeten Scheiben auf das Ablagerungsverhalten aus. Auch bei der Geschwindigkeitsreduktion wurden Unterschiede festgestellt, welche jedoch nicht so deutlich zu Tage treten wie das unterschiedliche Verhalten beim Ablagerungsprozess.

Als interessante Erkenntnis aus den durchgeführten Versuchen mag gelten, dass bei Scheibenform 2 die Ablagerung - vermutlich bedingt durch die stattfindende Geschwindigkeitsreduktion – vor allem nach dem Bauwerk stattfindet, während beim Scheibentyp 1 die Ablagerung hinter dem Bauwerk stattfindet. Da beim Typ 1 die Ablagerung durch den Rückstau hinter der Sperre verursacht wird, ist der Einfluss der Scheibenstärke bzw. der Öffnungsweite stärker zu erkennen als beim Typ 2. Die Ergebnisse und Zusammenhänge sind insofern vorsichtig zu bewerten, als nur genau diese beiden Formen von Scheiben verwendet wurden. Um allgemein gültige Aussagen zu treffen, würde es noch Versuchsreihen mit weiteren Variationen der Scheibenform bedürfen.

Die durchgeführten Modellversuche bilden nur Murgänge ohne mitgeführtem Wildholz ab. Aus der Aufnahme von beaufschlagten Wildbachsperrern (HÜBL et al., 2003) zeigt sich, dass für komplettes Verlanden bzw. stoppen von Murgängen oder extrem geschiebelasteten Hochwässern das mitgeführte Wildholz von entscheidender Bedeutung ist. Daher wäre es entscheidend für die Herleitung von in der Praxis anwendbaren Regeln zur Gestaltung der Scheibenform, noch weitere Versuchsreihen, welche speziell diese Problematik behandeln, anzulegen.

7.1.2 Auswirkung des Scheibenabstandes

Bei der Untersuchung des Einflusses des Scheibenabstandes - d.h. der Öffnungsweite – auf die Dynamik der Murwelle wurde - wie zu erwarten war –

festgestellt, dass die Murwelle bei geringerer Öffnungsweite stärker abgebremst wird und die Auflandungstendenz hinter der Sperre ansteigt. Für das Verhältnis aus typischen Korndurchmessern und der Öffnungsweite konnte ebenfalls ein Einfluss auf die Dynamik der Murwelle gefunden werden. Allerdings war es auf Basis der Versuchsdaten nicht möglich, eine in Zahlen auszudrückende Regel für diese Zusammenhänge zu definieren. Festgestellt wurde weiters, dass die Öffnungsweite nicht alleine ausschlaggebend ist, sondern ihr Einfluss auf die Dynamik der Murwelle von der Form der Scheiben abhängt.

7.2 Erkenntnisse zu den bei Beaufschlagung durch Murgang auftretenden Drücken

7.2.1 Die Versuchsergebnisse unter dem Gesichtspunkt der bisher gängigen Sperrenbemessung

Neben der Auswirkung des Bauwerks Murbrecher auf die Dynamik der Murwelle (*Kapitel 7.1*), ist für die Planung in der Praxis die Belastung des Bauwerks entscheidend. In dieser Arbeit wurde schon mehrmals die in Österreich übliche Methode erwähnt, als Lastannahme für Belaufschlagung durch eine Mure den 7- bis 11-fachen hydrostatischen Wasserdruck anzusetzen (Lichtenhahn, 1973). Diese Faustformel erscheint sehr simpel, um als Bemessungsgrundlage für einen solchen Lastfall zu dienen. Es ist jedoch zur Zeit kein Bauwerk der Wildbachverbauung bekannt, wo aufgrund der Belastung durch eine Murwelle, ein Murbrecher oder eine andere Offene Sperre der Belastung statisch nicht standgehalten hat. Allerdings ist in diesem Zusammenhang anzumerken, dass viele dieser seit den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts errichteten Wildbachsperren noch nie durch ein Bemessungsereignis belastet wurden. Wie im *Kapitel 6.2.2.5* bereits erwähnt wurde, ist es jedoch gängige Praxis, bei der Ermittlung der Belastung durch Muren anstelle der ungestörten Fließtiefe die Sperrenhöhe zur Berechnung des hydrostatischen Wasserdrucks heranzuziehen. Dadurch ergeben sich vor allem für sehr schnelle Muren bei weitem höhere Werte, wodurch die in der Praxis getroffenen Lastannahmen durchaus zu den bei den Versuchen ermittelten Drücken passen.

7.2.2 Vorschlag einer Formel zur Berechnung der maximal am Bauwerk auftretenden Druckspitze

In dieser Arbeit wird eine Formel zur Berechnung der maximal am Bauwerk auftretenden Druckspitze

$$p_{\max} = 4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6} \quad (\text{Gl. 62})$$

vorgeschlagen. Dabei handelt es sich um eine empirische Formel, welche nicht aus physikalischen Gesetzmäßigkeiten abgeleitet wurde und nur eine Anschätzung darstellt. Der Vorteil dieser Druckformel liegt darin, dass nur die Dichte des Murmaterials, die Geschwindigkeit und Fließtiefe eingehen. Dies sind Werte, welche sich aufgrund von Erfahrungen zumindest in Größenordnungen anschätzen lassen. Die Gültigkeit dieser Formel beschränkt sich auf einen FROUDE-Bereich von 1 bis 15, da dies der durch die Modellgesetze abgedeckte ist. Die simple Form der Druckformel mag dazu verleiten, speziell im Bereich mit sehr niedrigen FROUDE-Zahlen zu extrapolieren, davor muss jedoch unbedingt gewarnt werden. Um den Gültigkeitsbereich abschätzen zu können, können für eine angenommene Geschwindigkeit die minimale Fließtiefe

$$h_{fl} = \frac{v}{g} \quad (\text{Gl. 63})$$

und die maximale Fließtiefe

$$h_{fl} = \frac{v}{15g} \quad (\text{Gl. 64})$$

aus der Definition der FROUDE-Zahl abgeleitet werden. Ebenso kann für eine angenommene Fließtiefe die minimale Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{g \cdot h_{fl}} \quad (\text{Gl. 65})$$

und die maximale Geschwindigkeit

$$v = 15\sqrt{g \cdot h_{fl}} \quad (\text{Gl. 66})$$

aus der Definition der FROUDE-Zahl abgeleitet werden.

Die mit dieser Formel berechnete Druckspitze bedeutet den maximal kurzfristig am Bauwerk auftretenden Druck und stellt keine gleichmäßige Belastung

dar. Außerdem handelt es sich hierbei um eine Formel, welche nur aus Modellversuchen entwickelt wurde. Zwar scheint es, dass die damit berechneten Drücke realistische Werte aufweisen, trotzdem sollte sie mit Messungen an natürlichen Murgängen evaluiert werden.

Um aus dieser Formel auch für Kombinationen aus niedrigen Geschwindigkeiten und hohen Fließtiefen eine gültige Abschätzmethode zu entwickeln, bedarf es noch weiterer Untersuchungen. Einerseits werden noch Versuchsreihen benötigt, bei denen der durch die Standard Debris Flow Mixture abgedeckte Bereich erweitert wird, andererseits ist die Neigung noch zu variieren. Um Versuche für einen größeren Materialbereich zu erhalten, sollten sowohl Versuchsreihen hinzugefügt werden, bei denen die Matrix einen höheren Anteil an Feinsediment aufweist, als auch der Bereich der C_b -Werten nach oben erweitert werden.

8 VERWENDETE ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

In dieser Auflistung finden sich alle Abkürzungen und Formelzeichen, wie sie im vorliegenden Bericht verwendet wurden. Bei Formeln, welche aus der Literatur zitiert wurden, verwenden verschiedene Autoren oft für dieselben physikalischen Größen verschiedene Bezeichnungen. Andererseits verwenden unterschiedliche Autoren die selben Abkürzungen für unterschiedliche physikalische Größen oder definieren manche Werte unterschiedlich. Dies hat seinen Grund in der regionalen Herkunft verschiedener Literatur, ist aber auch durch die unterschiedliche Entstehungszeit zu erklären. Daher finden sich im Text bei zitierten Formeln nicht die Formelzeichen und Abkürzungen, wie sie in der Originalliteratur verwendet werden, sondern jene aus dieser Auflistung.

Es wurde bei der Auswahl verschiedener Abkürzungen für die Darstellung physikalischer Größen oder charakteristischer Kennzahl versucht, sich an übliche Gepflogenheiten in den betroffenen Naturwissenschaften zu halten. Bei Abkürzungen wurde immer vom entsprechenden englischen Begriff ausgegangen.

In dieser Auflistung sind nur jene Abkürzungen und Formelzeichen enthalten, die auch im Bericht vorkommen. Zusätzliche, welche nur in Zwischenberechnungen, welche nicht im Bericht aufscheinen, sind in dieser Liste nicht enthalten. Sollten sie jedoch im Anhang zur Darstellung der Messwerte oder bei der detaillierten Formelherleitung benötigt werden, sind sie an dieser Stelle erklärt.

Im Bericht verwendete Abkürzungen und Formelzeichen:

b_{off}	Öffnungsweite bzw. Abstand zwischen den Modellscheiben	[m]
c_{Ar}	Relation zwischen der vorgeschlagenen Druckformel und dem Murdruck nach ARMANINI (1997)	[kg/m ²]
c_{Li}	Relation zwischen der vorgeschlagenen Druckformel und dem Murdruck nach LICHTENHAHN (1973)	[kg/m ²]
$c_{W\&I}$	Relation zwischen der vorgeschlagenen Druckformel und dem Murdruck nach der empirischen Formel von WATANABE & IKEYA (1981)	[N/m ²]; [kg/(m·s ²)]

c_{Yu}	Relation zwischen der vorgeschlagenen Druckformel und dem einheitenkorrigierten Murdruck nach der empirischen Formel von YU (1992)	[N/m ²]; [kg/(m.s ²)]
C_b	Gewichtsanteil der Grobkomponenten im Fluid	[-]
C_V	Volumskonzentration der Feststoffe im Murmaterial	[-]
$C_{V,c}$	Volumskonzentration der groben Feststoffe (Rigid Phase) im Murmaterial	[-]
d_{50}	mittlerer Korndurchmesser des Grobsediments	[m]
d_{max}	maximaler Korndurchmesser	[m]
Fr	FROUDE-Zahl	[-]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
h'	gemessene Stärke der Murwelle parallel zur Sohle	[m]
$h_{dep,1}$	Ablagerungstiefe oberhalb der Sperre bei Versuchsende	[m]
$h_{dep,2}$	Ablagerungstiefe unterhalb der Sperre bei Versuchsende	[m]
h_{fl}	Fließtiefe	[m]
I	Neigung der Versuchsrinne	[-]
p_{Ar}	Murdruck nach ARMANINI (1997)	[kg/m ²]
p_{Li}	Murdruck nach dem Vorschlag von LICHTENHAHN (1973)	[kg/m ²]
p_{max}	maximale am Bauwerk auftretende Druckspitze	[N/m ²]; [kg/(m.s ²)]
$p_{W\&I}$	Murdruck nach der empirischen Formel von WATANABE & IKEYA (1981)	[N/m ²]; [kg/(m.s ²)]
\hat{p}_{Yu}	einheitenkorrigierter Murdruck nach der empirischen Formel von YU (1992)	[N/m ²]; [kg/(m.s ²)]
P_{Yu}	„Murdruck“ nach der Formel von YU (1992)	[kg/m ²]

r_h	Verhältnis der Ablagerungstiefen ober- und unterhalb des Bauwerks	[-]
r_v	Geschwindigkeitsreduktion durch den Murbrecher	[-]
v	Fließgeschwindigkeit der Murwelle	[m/s]
v^*	Schubspannungsgeschwindigkeit nach PRANDTL	[m/s]
v_1	Fließgeschwindigkeit der Murwelle oberhalb des Bauwerks	[m/s]
v_2	Fließgeschwindigkeit der Murwelle unterhalb des Bauwerks	[m/s]
Δ	Scherrate	[1/s]
K_p''	einheitenloser Druckfaktor ohne Berücksichtigung des theoretischen statischen Druckanteils	[-]
K_p'	einheitenloser Druckfaktor unter Berücksichtigung des theoretischen statischen Druckanteils	[-]
$\alpha_{W\&I}$	„velocity head“-Koeffizient in der Druckformel nach WATANABE & IKEYA (1981)	[-]
η_B	viskoser Widerstandsbeiwert im BINGHAM-Modell; „BINGHAM-Viskosität“	[Pa.s]; [kg/(m.s)]
κ'	Koeffizient in der Druckgleichung mit Berücksichtigung des theoretischen statischen Druckanteils	[-]
κ''	Koeffizient in der Druckgleichung ohne Berücksichtigung des theoretischen statischen Druckanteils	[-]
θ	Neigungswinkel der Sohle	[°]
ρ_{H_2O}	Dichte von Wasser	[kg/m ³]
ρ_c	Dichte der Grobsediments (Schotter)	[kg/m ³]
ρ_f	Dichte des Feinsediments (Lehm)	[kg/m ³]
ρ_{mat}	Dichte der Murmatrix	[kg/m ³]

ρ_{sed}	durchschnittliche Dichte des Sediments in der Mure	[kg/m ³]
ρ_{DF}	Dichte des Murmaterials	[kg/m ³]
τ	Scherspannung	[N/m ²]; [kg/(m.s ²)]
τ_Y	Grenzscherspannung im BINGHAM-Modell	[N/m ²]; [kg/(m.s ²)]
ξ'	Exponent in der Druckgleichung mit Berücksichtigung des theoretischen statischen Druckanteils	[-]
ξ''	Exponent in der Druckgleichung ohne Berücksichtigung des theoretischen statischen Druckanteils	[-]

9 LITERATURVERZEICHNIS

- ARMANINI, A. (1997): On the Dynamic Impact of Debris Flows. Recent Developments on Debris Flows, Lecture Notes in Earth Sciences 64; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Santa Clara, Singapore, Tokyo 1997
- ARMANINI, A. & SCOTTON, P. (1992): Experimental analysis on the dynamic impact of a debris flow on structures. 6th INTERPRAEVENT 1992, Bern 1992, Vol. 6
- COOLEY, M. E., ALDRIDGE, B. N. & EULER, R. C. (1977): Effects of the catastrophic flood of December 1966. North Rim Area. Eastern Grand Canyon. Arizona. US Geol. Surv. Prof. Pap. 980:43
- COSTA, J. E. (1988): Rheologic, geomorphologic and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows and debris flows. Flood geomorphology, Wiley Verlag, New York
- COSTA, J. E. (1984): Physical Geomorphology of Debris Flows. in Developments and Applications of Geomorphology, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1984
- CURRY, R. R. (1966): Observation of alpine mudflows in the Tenmile Range. Central Colorado. Geol. Soc. Am. Bull. 77:771-776
- FINK, J. H., MALIN, M. C., D'ALLI, R. E. & GREELEY, R. (1981): Rheological properties of mudflows associated with the spring 1980 eruptions of Mount St. Helens volcano. Washington. Geophys. Res. Lett. 8 (1):43-46
- HADEN, A. (1925): Über die Berechnung der Murstromdurchflussmengen. Fachliche Verbandszeitschrift der Ingenieure der Wildbachverbauung Österreichs, Heft 2, Beitr. 4
- HAMPEL, R. (1980): Die Murenfracht von Katastrophenhochwässern. Wildbach- und Lawinenverbau Jg. 44 S71-102.
- HÜBL, J., GANAHL, E., HOLUB, M., MOSER, M. & WEHRMANN, H. (2003): WLS-Report 69, Universität für Bodenkultur Wien (vorläufige Rohfassung des Projektberichts, interne Unterlagen)

- HÜBL, J., GANAHL, E., MOSER, M. & SCHNETZER, I. (2002): Dokumentation Wartschenbach. WLS-Report 52, Universität für Bodenkultur Wien (unveröffentlicht)
- HÜBL, J. & STEINWENDTNER, H. (2000): Estimation of rheological properties of viscous debris flows using a conveyor belt. *Physics and Chemistry of the Earth (JPCE)*, Part B, 25, 8, 751-756.
- HÜBL, J. & STEINWENDTNER, H. (1999): Estimation of rheological properties of viscous debris flows using a conveyor belt. In: *European Geophysical Society (Ed.): Geophysical Research Abstracts*, Vol. 1, 4, 875.
- IVERSON, R. M. (1997): *The Physics of Debris Flows*. *Reviews of Geophysics*, 35, 3 p245-296, American Geophysical Union
- JORDAN, R. P. (1994): *Debris Flows in Southern Coast Mountains, British Columbia. Dynamic behaviour and physical properties*. Dissertation, University of British Columbia
- JOHNSON, A. M. (1970): *Physical processes in geology*. Freeman and Cooper, San Francisco. 577p
- KHERKEULITZE, I. I., (1967): Estimation of basic characteristics of mud flow ("sel"). In: *Proc Int Assoc Sci Hydrol Symp Floods Comput*. Vol II. Leningrad. Pp 940-948.
- LAVIGNE, F., TIREL, A., LE FLOCH, D. & VEYRAT-CHARVILLON, S. (2003): A real-time assessment of lahar dynamics and sediment load based on video camera recording at Semeru volcano, Indonesia. *Proceedings of the Third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment Vol.1* p647-658, Davos, Switzerland, September 10-12, 2003. Millpress Rotterdam Netherlands 2003
- LI, J. & LUO, D.; (1981): The formation and characteristics of mudflow and flood in the mountain area of the Dacho River and its prevention. *Z Geomorphol*. 25:470-484

- LICHTENHAHN C. (1973): Die Berechnung von Sperren in Beton und Eisenbeton, Kolloquium über Wildbachsperren, Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, Heft 102 S.91-127.
- MCARDELL, B. W., ZANUTTIG, B., LAMBERTI, A. & RICKENMANN, D. (2003): Systematic comparison of debris-flow laws at the Illgraben torrent, Switzerland. Proceedings of the Third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment Vol.1 p647-658, Davos, Switzerland, September 10-12, 2003. Millpress Rotterdam Netherlands 2003
- MORTON, D. M. & CAMPBELL, R. H. (1974): Spring Mudflows at Wrightwood. Southern California. Q J Eng. Geol. 7:377-384
- NYIAZOW, B. S. & DEGOVETS, A. S. (1975): Estimation of the parameters of catastrophic mudflows in the basins of the Lesser and Greater Almatinka Rivers. Sov. Hydrol. 2:75-80
- PIERSON, T. C. ;(1981) Dominate particle support mechanisms in debris flows at Mount Thomas. New Zealand. and implications for flow mobility. Sedimentology 28:49-60
- RICKENMANN, D. (2002):Über Murgänge in den Alpen. Wasser & Boden, 54/4, 23-26 .Blackwell Verlag, Berlin 2002
- SHARP R. P. & NOBLES, L. H. (1953): Mudflow of 1941 at Wrightwood. Southern California. Geol. Soc. Am. Bull. 64:547-560
- STEINWENDTNER, H., HÜBL, J., WEINMEISTER, H. W. (1997): Experiments on dynamics of viscous debris flows. Landslide Hazard Assessment. Proceedings of the International Symposium, 13-16 July 1997, Xian, 91-98.
- STEINWENDTNER, H. (1997): Untersuchungen zur Muredynamik, Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien
- VARNES, D. J.; (1978): Slope movement types and processes. In: SCHUSTER, R. L. & KRIZEL, R. J. [eds.]: Landslides analyses and control. Transport Res Board Spec Rep 176. Natl Acad Sci. Washington DC. pp11-33
- WALDRON, H. H.; (1967): Debris flow and erosion control problems caused by the ash eruptions of Irazu Volcano. Costa Rica. US Geol. Surv. Bull. 1241-I:I-37

- WATANABE, M. & IKEYA, H. (1981): Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mount Sakurajima. Japan. Erosion sediment transport measurement. Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ.. 133. Florence. S 245-256
- YU, F. C. & CHEN, C. K. (1990): Basic study on the debris flow (II)-Preliminary study on the flow velocity of debris-flow. Journal of Soil and Water Conservation, 21-22:115-142.
- YU, F. C. (1992): A study on the impact force of debris-flow. Proceedings of the National Science Council, Part A: Physical Science and Engineering, Vol. 16, No 1:32-39; National Science Council Taipei, Taiwan.

10 VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abbildung 1:	Überblicksskizze der Versuchsanlage.....	9
Abbildung 2:	Geometrie und Koordinatensystem der Versuchsrinne	10
Abbildung 3:	Anordnung der Messsensorik in der Versuchsrinne	10
Abbildung 4:	Datenermittlung aus der Ultraschallmessung.....	11
Abbildung 5:	Konstruktionsprinzip und Funktionsweise der Druckmessung	12
Abbildung 6:	Verwendete Scheibentypen	13
Abbildung 7:	Foto einer Modellscheibe (mit eingebauten Wägezellen).....	13
Abbildung 8:	Dimensionen der Modellscheiben für die verschiedenen Verbreiterungen	14
Abbildung 9:	Rheogramm der Standard Debris Flow Mixture	15
Abbildung 10:	Materialeigenschaften der Standard Debris Flow Mixture	15
Abbildung 11:	Zusammensetzung des Versuchsmaterials für die verschiedenen Feststoffanteile.....	16
Abbildung 12:	Volumetrische Zusammensetzung des Versuchsmaterials für die verschiedenen Feststoffanteile, Darstellung als Ternary-Phase- Diagramm.....	16
Abbildung 13:	Mischen des Versuchsmaterials und Siebung des Grobsediments.....	22
Abbildung 14:	Darstellung der Rohdaten aus der Ultraschallmessung	23
Abbildung 15:	Beispiel zur Ermittlung der Geschwindigkeiten aus der Ultraschallmessung.....	24
Abbildung 16:	Definition der Fließtiefe, Berechnung aus den Messdaten	24
Abbildung 17:	Darstellung der Rohdaten aus der Druckmessung.....	25
Abbildung 18:	Vergleich der untersten Druckmessung der beiden Modellscheiben	25
Abbildung 19:	Beispiel einer Auswertung der Druckmessung für einen Testversuch.....	26
Abbildung 20:	Darstellung des maximal gemessenen Drucks für die Versuche MV0411-01 bis MV0416-02.....	26
Abbildung 21:	Darstellung des dynamischen Verhaltens als reflektierte Welle für einen Beispielversuch	27
Abbildung 22:	Vergleich der gemittelten Fließtiefen ober- und unterhalb des Sperrmodells für zwei unterschiedliche Versuche	28
Abbildung 23:	Darstellung der über die beiden Scheiben gemittelten Druckverläufe für einen Versuch mit C_b -Wert von 0,0 (links: MV0411-01) und einen mit C_b -Wert von 0,4 (rechts: MV0514-06) ...	29

Abbildung 24:	Darstellung des dynamischen Verhaltens der Murwelle anhand von Video-Captures für Versuch MV0701-02 mit C_b -Wert 0,0	29
Abbildung 25:	Darstellung des dynamischen Verhaltens der Murwelle anhand von Video-Captures für Versuch MV0701-03 mit C_b -Wert 0,1	30
Abbildung 26:	Darstellung des dynamischen Verhaltens der Murwelle anhand von Video-Captures für Versuch MV0701-06 mit C_b -Wert 0,2	30
Abbildung 27:	Darstellung des dynamischen Verhaltens der Murwelle anhand von Video-Captures für Versuch MV0701-08 mit C_b -Wert 0,3	31
Abbildung 28:	Darstellung des dynamischen Verhaltens der Murwelle anhand von Video-Captures für Versuch MV0702-01 mit C_b -Wert 0,4	31
Abbildung 29:	Direkte Gegenüberstellung der Geschwindigkeiten ober- und unterhalb des Sperrenmodells	32
Abbildung 30:	Verteilung der bei den Modellversuchen aufgetretenen Geschwindigkeitsreduktion.....	33
Abbildung 31:	Direkte Gegenüberstellung der Ablagerungstiefen ober- und unterhalb des Sperrenmodells	34
Abbildung 32:	Verteilung des bei den Modellversuchen aufgetretenen Verhältnisses zwischen den Ablagerungstiefen ober- und unterhalb des Murbrechers	34
Abbildung 33:	Die Geschwindigkeitsreduktion r_v in Abhängigkeit von der Scheibengeometrie	35
Abbildung 34:	Die Geschwindigkeitsreduktion r_v in Abhängigkeit vom Verhältnis des maximalen Korndurchmessers zur Öffnungsweite (blaue Darstellung: Grobsediment 4-8mm, rote Darstellung: Grobsediment 2-16mm)	36
Abbildung 35:	Die Geschwindigkeitsreduktion r_v in Abhängigkeit vom Verhältnis des mittleren Korndurchmessers zur Öffnungsweite (blaue Darstellung: Grobsediment 4-8mm, rote Darstellung: Grobsediment 2-16mm)	37
Abbildung 36:	Die Relation der Ablagerungstiefen r_h in Abhängigkeit von der Scheibengeometrie	38
Abbildung 37:	Die Relation der Ablagerungstiefen r_h in Abhängigkeit vom Verhältnis des maximalen Korndurchmessers zur Öffnungsweite (blaue Darstellung: Grobsediment 4-8mm, rote Darstellung: Grobsediment 2-16mm)	39
Abbildung 38:	Die Relation der Ablagerungstiefen r_h in Abhängigkeit vom Verhältnis des mittleren Korndurchmessers zur Öffnungsweite (blaue Darstellung: Grobsediment 4-8mm, rote Darstellung: Grobsediment 2-16mm)	39
Abbildung 39:	Gegenüberstellung von Geschwindigkeitsreduktion r_v und Relation der Ablagerungstiefen r_h für alle Versuche; links getrennte Darstellung für die zwei Arten von dynamischen Verhalten (laut Kapitel), rechts für die beiden Sperrtypen	40

Abbildung 40:	Gegenüberstellung von FROUDE-Zahl und Druckfaktor K'_p für die durchgeführten Modellversuche	43
Abbildung 41:	Graphische Darstellung der Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Druckspitzen (1), sowie dem Verhältnis daraus (2) & (3) für die Druckformel nach (Gl. 17)	44
Abbildung 42:	Gegenüberstellung von FROUDE-Zahl und Druckfaktor K''_p für die durchgeführten Modellversuche	45
Abbildung 43:	Graphische Darstellung der Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Druckspitzen (1), sowie dem Verhältnis daraus (2) & (3) für die Druckformel nach (Gl. 21)	46
Abbildung 44:	Gegenüberstellung von FROUDE-Zahl und Druckfaktor K''_p für alle Versuche, unabhängig vom Versuchsmaterial	47
Abbildung 45:	Graphische Darstellung der Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Druckspitzen (1), sowie dem Verhältnis daraus (2) & (3) für die Druckformel nach (Gl. 23)	48
Abbildung 46:	Maximale Druckspitze für verschiedene Fließtiefen und Geschwindigkeiten bei einer durchschnittlichen Dichte von 2.150 kg/m ³ ; Beispiele für beobachtete oder gemessene Bereiche von Geschwindigkeit und Tiefe (Erklärung in <i>Tabelle 8</i> und <i>Tabelle 9</i>) ..	49
Abbildung 47:	Graphische Darstellung der Abhängigkeit der Relation zwischen der aus den Modellversuchen abgeleiteten Druckformel und der Druckangabe nach LICHTENHAHN (1973) von der FROUDE-Zahl	52
Abbildung 48:	Berechnung des Drucks auf das Sperrenmodell nach der Methode nach LICHTENHAHN (1973).....	53
Abbildung 49:	Graphische Darstellung der Abhängigkeit der Relation zwischen der aus den Modellversuchen abgeleiteten Druckformel und der Druckformel nach WATANABE & IKEYA (1981) von der FROUDE-Zahl	54
Abbildung 50:	Gegenüberstellung des nach WATANABE & IKEYA (1981) berechneten Drucks (in logarithmischer Darstellung) und der gemessenen Druckspitze	55
Abbildung 51:	Graphische Darstellung der Abhängigkeit der Relation zwischen der aus den Modellversuchen abgeleiteten Druckformel und der Druckformel nach YU (1992) von der FROUDE-Zahl	57
Abbildung 52:	Einfluss des Verhältnisses zwischen mittlerem Korndurchmesser und Fließtiefe auf die Relation zwischen der vorgeschlagenen Druckformel und jener nach YU (1992)	59
Abbildung 53:	Gegenüberstellung des nach YU (1992) berechneten Drucks und der gemessenen Druckspitze	60
Abbildung 54:	Graphische Darstellung der Abhängigkeit der Relation zwischen der aus den Modellversuchen abgeleiteten Druckformel und der Druckangabe nach ARMANINI (1997) von der FROUDE-Zahl	62
Abbildung 55:	Gegenüberstellung des nach ARMANINI (1997) berechneten Drucks und der gemessenen Druckspitze	62

Abbildung 56: Gegenüberstellung des nach allen aufgelisteten Methoden berechneten und bei den Modellversuchen gemessenen Drucks für alle Einzelversuche66

11 VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 1:	Abmessungen der Sperrenmodelle für die verschiedenen Scheibenstärken	13
Tabelle 2:	Dichte der Komponenten der Standard Debris Flow Mixture	17
Tabelle 3:	Gesamtmineralbestand des verwendeten Hafnerlehms (STEINWENDTNER, 1997).....	18
Tabelle 4:	Durchgeführte Versuche mit Sperrentyp 1 (Material 0: nur Murmatrix, 1: rigid phase 4 – 8 mm, 2: rigid phase 2 – 16 mm)	20
Tabelle 5:	Durchgeführte Versuche mit Sperrentyp 2 (Material 0: nur Murmatrix, 1: rigid phase 4 – 8 mm, 2: rigid phase 2 – 16 mm)	21
Tabelle 6:	Parameter der von der FROUD-Zahl abhängigen Formel zur Bestimmung der maximalen Druckspitze am Bauwerk nach (Gl. 17)	44
Tabelle 7:	Parameter der von der FROUDE-Zahl abhängigen Formel zur Bestimmung der maximalen Druckspitze am Bauwerk nach (Gl. 21)	46
Tabelle 8:	Liste der beobachteten und nachgerechneten Murgänge (dargestellt in <i>Abbildung 46</i>) aus der Literatur (aufgelistet in COSTA, 1984); *) Druck nach (Gl. 23) berechnet für FROUDE-Zahlen > 1, gerundete Werte, Bereiche ausserhalb des Gültigkeitsbereichs nicht berücksichtigt	50
Tabelle 9:	Liste der beobachteten und nachgerechneten Murgänge (dargestellt in <i>Abbildung 46</i>) aus der Literatur (HÜBL, 2002, McARDELL et al., 2003 und LAVIGNE et al., 2003)	50

ANHANG A: GEMESSENE UND ABGELEITETE WERTE FÜR ALLE VERSUCHE

In den folgenden Auflistungen sind für alle Einzelversuche die gemessenen (*Teil A.2*) sowie die daraus abgeleiteten (*Teil A.1*) Werte dargestellt. In den Tabellen werden die Bezeichnungen, wie sie in Kapitel 8 des Berichts angegeben sind verwendet. Zusätzlich werden folgende Abkürzungen verwendet, welche in Kapitel 8 nicht beschrieben sind, da sie für die Beschreibung der Versuchsauswertung nicht von Bedeutung sind:

- $F_{max, 0-6re}$... maximale an der untersten Druckplatte (0-6cm) der rechten Scheibe gemessene Kraft
- $F_{max, 6-12re}$... maximale an der zweiten Druckplatte (6-12cm) der rechten Scheibe gemessene Kraft
- $F_{max, 12-18re}$... maximale an der dritten Druckplatte (12-18cm) der rechten Scheibe gemessene Kraft
- $F_{max, 18-24re}$... maximale an der vierten Druckplatte (18-24cm) der rechten Scheibe gemessene Kraft
- $F_{max, 0-6li}$... maximale an der untersten Druckplatte (0-6cm) der linken Scheibe gemessene Kraft
- $F_{max, 6-12li}$... maximale an der zweiten Druckplatte (6-12cm) der linken Scheibe gemessene Kraft
- $F_{max, 12-18li}$... maximale an der dritten Druckplatte (12-18cm) der linken Scheibe gemessene Kraft
- $F_{max, 18-24li}$... maximale an der vierten Druckplatte (18-24cm) der linken Scheibe gemessene Kraft
- $p_{max, 0-6re}$... maximale Druckspitze an der untersten Druckplatte (0-6cm) der rechten Scheibe
- $p_{max, 6-12re}$... maximale Druckspitze an der zweiten Druckplatte (6-12cm) der rechten Scheibe
- $p_{max, 12-18re}$... maximale Druckspitze an der dritten Druckplatte (12-18cm) der rechten Scheibe
- $p_{max, 18-24re}$... maximale Druckspitze an der vierten Druckplatte (18-24cm) der rechten Scheibe
- $p_{max, 0-6li}$... maximale Druckspitze an der untersten Druckplatte (0-6cm) der linken Scheibe
- $p_{max, 6-12li}$... maximale Druckspitze an der zweiten Druckplatte (6-12cm) der linken Scheibe
- $p_{max, 12-18li}$... maximale Druckspitze an der dritten Druckplatte (12-18cm) der linken Scheibe
- $p_{max, 18-24li}$... maximale Druckspitze an der vierten Druckplatte (18-24cm) der linken Scheibe
- t_{o1} ... Durchgangszeit der Murwelle unter dem ersten Ultraschallsensor
- t_{o2} ... Durchgangszeit der Murwelle unter dem zweiten Ultraschallsensor
- t_{u1} ... Durchgangszeit der Murwelle unter dem dritten Ultraschallsensor
- t_{u2} ... Durchgangszeit der Murwelle unter dem vierten Ultraschallsensor
- $h'_{dep,US1}$... Stärke der Ablagerungshöhe normal zur Sohle bei Ultraschall 1
- $h'_{dep,US2}$... Stärke der Ablagerungshöhe normal zur Sohle bei Ultraschall 2
- $h'_{dep,US3}$... Stärke der Ablagerungshöhe normal zur Sohle bei Ultraschall 3
- $h'_{dep,US4}$... Stärke der Ablagerungshöhe normal zur Sohle bei Ultraschall 4

A.1 Direkt gemessene Werte

A.1.1 Versuchsreihe MV0411-01 bis MV0416-02

Versuchs ID	$F_{max, 0-6re}$ [N]	$F_{max, 6-12re}$ [N]	$F_{max, 12-18re}$ [N]	$F_{max, 18-24re}$ [N]	$F_{max, 0-6li}$ [N]	$F_{max, 6-12li}$ [N]	$F_{max, 12-18li}$ [N]	$F_{max, 18-24li}$ [N]
MV0411-01	52,1	34,6	10,1	4,6	78,1	25,1	3,4	4,4
MV0411-02	70,4	24,1	8,8	3,6	53,8	23,5	7,7	1,0
MV0412-01	48,5	24,3	7,9	3,4	51,8	28,2	1,6	1,4
MV0412-02	61,6	32,5	7,9	3,1	44,5	21,2	2,1	1,8
MV0415-01	53,1	33,5	6,6	4,0	57,9	35,2	6,9	6,1
MV0415-02	48,5	24,3	7,9	3,4	51,8	28,2	1,6	1,4
MV0416-01	27,2	37,8	20,5	8,1	20,6	24,6	17,5	8,2
MV0416-02	29,9	27,4	15,2	3,6	29,0	31,6	13,9	5,5

Versuchs ID	t_{o1} [sek]	t_{o2} [sek]	t_{u1} [sek]	t_{u2} [sek]	h' [m]	$h'_{dep,US1}$ [m]	$h'_{dep,US2}$ [m]	$h'_{dep,US3}$ [m]	$h'_{dep,US4}$ [m]
MV0411-01	0,715	0,810	1,195	1,413	0,048	0,009	0,010	0,014	0,016
MV0411-02	0,608	0,680	0,903	1,073	0,047	0,007	0,012	0,014	0,015
MV0412-01	0,855	0,953	1,383	1,518	0,033	0,010	0,008	0,014	0,015
MV0412-02	0,805	0,940	1,260	1,495	0,061	0,015	0,019	0,023	0,017
MV0415-01	0,875	1,023	1,490	1,793	0,044	0,015	0,019	0,019	0,019
MV0415-02	0,855	0,950	1,280	1,518	0,033	0,010	0,008	0,016	0,015
MV0416-01	1,150	1,433	2,158	2,600	0,068	0,021	0,070	0,030	0,025
MV0416-02	1,210	1,420	2,135	2,575	0,059	0,026	0,051	0,027	0,025

A.1.2 Versuchsreihe MV0425-02 bis MV0514-06

Versuchs ID	$F_{max, 0-6re}$ [N]	$F_{max, 6-12re}$ [N]	$F_{max, 12-18re}$ [N]	$F_{max, 18-24re}$ [N]	$F_{max, 0-6li}$ [N]	$F_{max, 6-12li}$ [N]	$F_{max, 12-18li}$ [N]	$F_{max, 18-24li}$ [N]
MV0425-02	75,2	52,3	21,4	4,6	56,9	26,1	3,5	3,4
MV0425-03	55,2	34,2	10,2	3,2	54,8	30,2	3,2	1,9
MV0426-01	34,2	39,5	23,1	5,7	39,6	34,4	11,4	11,4
MV0426-02	35,9	26,6	7,4	2,3	37,4	26,5	6,2	4,6
MV0514-01								
MV0514-02	42,3	25,7	17,1	5,5	34,1	28,7	11,2	7,8
MV0514-03	32,3	27,6	11,8	2,7	27,6	26,1	11,1	3,9
MV0514-04	28,6	23,8	11,6	3,8	27,5	24,6	12,7	5,6
MV0514-05	22,1	20,1	12,7	9,4	23,5	21,9	12,8	11,3
MV0514-06	20,9	21,5	12,7	8,2	22,5	19,6	12,8	10,5

Versuchs ID	t_{o1} [sek]	t_{o2} [sek]	t_{u1} [sek]	t_{u2} [sek]	h' [m]	$h'_{dep,US1}$ [m]	$h'_{dep,US2}$ [m]	$h'_{dep,US3}$ [m]	$h'_{dep,US4}$ [m]
MV0425-02	0,575	0,690	0,900	1,120	0,060	0,011	0,014	0,021	0,015
MV0425-03	0,735	0,850	1,083	1,243	0,154	0,013	0,022	0,022	0,018
MV0426-01	0,770	0,860	1,315	1,618	0,045	0,014	0,022	0,026	0,021
MV0426-02	0,848	0,995	1,518	1,710	0,045	0,011	0,036	0,026	0,023
MV0514-01									
MV0514-02	0,890	1,053	1,640	1,975	0,046	0,022	0,044	0,025	0,025
MV0514-03	0,960	1,405	2,018	2,325	0,063	0,016	0,070	0,031	0,029
MV0514-04	1,165	1,460	2,043	2,373	0,062	0,020	0,064	0,059	0,028
MV0514-05	1,223	1,578	2,400	3,350	0,080	0,044	0,094	0,038	0,032
MV0514-06	1,138	1,490	2,410	3,240	0,076	0,044	0,091	0,039	0,031

A.1.3 Versuchsreihe MV0517-01 bis MV0521-02

Versuchs ID	$F_{max, 0-6re}$ [N]	$F_{max, 6-12re}$ [N]	$F_{max, 12-18re}$ [N]	$F_{max, 18-24re}$ [N]	$F_{max, 0-6li}$ [N]	$F_{max, 6-12li}$ [N]	$F_{max, 12-18li}$ [N]	$F_{max, 18-24li}$ [N]
MV0517-01	46,9	32,4	10,7	5,9	45,6	30,9	5,9	2,8
MV0517-02	61,1	29,6	4,2	2,0	54,7	30,1	6,2	4,7
MV0517-03	50,8	38,1	12,8	8,0	54,6	33,7	6,2	2,3
MV0517-04	60,7	32,9	7,3	4,1	51,8	28,9	4,0	3,8
MV0517-05	50,8	42,4	5,2	3,3	47,8	44,9	5,2	3,5
MV0517-06	51,5	36,6	6,7	4,1	50,0	38,7	10,4	5,2
MV0521-01	44,0	45,9	16,2	8,3	47,5	41,2	10,9	10,9
MV0521-02	45,6	35,1	13,2	3,6	39,5	34,2	13,5	2,5

Versuchs ID	t_{o1} [sek]	t_{o2} [sek]	t_{u1} [sek]	t_{u2} [sek]	h' [m]	$h'_{dep,US1}$ [m]	$h'_{dep,US2}$ [m]	$h'_{dep,US3}$ [m]	$h'_{dep,US4}$ [m]
MV0517-01	0,788	0,905	1,205	1,408	0,059	0,008	0,005	0,011	0,008
MV0517-02	0,783	0,898	1,153	1,370	0,046	0,008		0,010	0,010
MV0517-03	0,923	1,038	1,380	1,640	0,043	0,009	0,012	0,017	0,014
MV0517-04	0,768	0,953	1,278	1,520	0,043	0,009	0,008	0,012	0,013
MV0517-05	0,798	0,993	1,435	1,748	0,041	0,009	0,018	0,013	0,014
MV0517-06	0,835	0,990	1,430	1,745	0,044	0,012	0,018	0,015	0,015
MV0521-01	0,898	1,093	1,680	2,013	0,044	0,006	0,019	0,017	0,016
MV0521-02	0,893	1,095	1,695	1,988	0,045	0,012	0,021	0,018	0,016

A.1.4 Versuchsreihe MV0523-01 bis MV0528-04

Versuchs ID	$F_{max, 0-6re}$	$F_{max, 6-12re}$	$F_{max, 12-18re}$	$F_{max, 18-24re}$	$F_{max, 0-6li}$	$F_{max, 6-12li}$	$F_{max, 12-18li}$	$F_{max, 18-24li}$
	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]
MV0523-01	38,4	23,8	9,8	5,7	42,9	22,6	7,5	4,4
MV0523-02	40,1	24,7	7,8	6,2	53,0	20,3	7,9	3,4
MV0523-03	33,6	27,8	7,1	5,4	42,3	28,8	5,6	3,2
MV0523-04	38,0	31,0	14,8	6,6	37,9	29,6	11,4	6,2
MV0528-01	27,6	29,5	11,4	2,3	36,1	29,4	8,3	3,4
MV0528-02	28,3	32,4	10,7	1,9	34,2	28,3	11,9	2,7
MV0528-03	22,9	31,6	16,0	8,0	20,9	25,1	16,2	9,1
MV0528-04	17,3	23,3	14,1	6,7	17,1	19,9	13,4	7,7

Versuchs ID	t_{o1}	t_{o2}	t_{u1}	t_{u2}	h'	$h'_{dep,US1}$	$h'_{dep,US2}$	$h'_{dep,US3}$	$h'_{dep,US4}$
	[sek]	[sek]	[sek]	[sek]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
MV0523-01	0,810	1,025	1,403	1,715	0,044	0,015	0,019	0,025	0,020
MV0523-02	0,833	1,010	1,382	1,528	0,042	0,011	0,028	0,021	0,019
MV0523-03	0,908	1,130	1,605	1,860	0,043	0,012	0,031	0,027	0,023
MV0523-04	0,860	1,013	1,505	1,915	0,044	0,022	0,032	0,026	0,021
MV0528-01	0,888	1,130	1,773	2,120	0,044	0,008	0,041	0,028	0,021
MV0528-02	0,893	1,175	1,873	2,210	0,052	0,016	0,056	0,029	0,027
MV0528-03	1,178	1,608	2,313	3,043	0,076	0,035	0,089	0,039	0,032
MV0528-04	1,058	1,323	2,405	2,928	0,071	0,009	0,010	0,014	0,016

A.1.5 Versuchsreihe MV0605-01 bis MV0610-06

Versuchs ID	$F_{max, 0-6re}$	$F_{max, 6-12re}$	$F_{max, 12-18re}$	$F_{max, 18-24re}$	$F_{max, 0-6li}$	$F_{max, 6-12li}$	$F_{max, 12-18li}$	$F_{max, 18-24li}$
	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]
MV0605-01	49,3	23,7	4,8	6,0	45,7	26,3	3,7	4,9
MV0605-02	66,1	25,0	5,5	2,7	45,6	22,9	2,2	3,5
MV0605-03	39,5	21,8	8,4	3,0	62,5	22,4	2,4	1,9
MV0605-04	45,5	31,0	5,0	3,2	38,3	33,7	2,0	1,5
MV0610-01	33,4	28,1	5,8	3,1	27,3	26,6	2,1	1,5
MV0610-02	29,3	23,9	8,3	2,4	37,2	20,9	2,7	1,5
MV0610-03	25,5	27,3	12,0	3,5	27,4	30,4	5,3	2,3
MV0610-04	26,9	27,6	13,1	4,5	29,1	28,3	5,4	3,1
MV0610-05	21,7	20,6	15,4	10,4	20,4	19,0	6,4	8,6
MV0610-06	21,0	20,2	14,7	10,5	22,4	18,3	6,9	8,7

Versuchs ID	t_{o1} [sek]	t_{o2} [sek]	t_{u1} [sek]	t_{u2} [sek]	h' [m]	$h'_{dep,US1}$ [m]	$h'_{dep,US2}$ [m]	$h'_{dep,US3}$ [m]	$h'_{dep,US4}$ [m]
MV0605-01	0,695	0,775	1,053	1,175	0,043	0,010	0,032	0,026	0,021
MV0605-02	0,830	0,885	1,225	1,433	0,047	0,009	0,035	0,026	0,022
MV0605-03	0,823	0,935	1,263	1,608	0,043	0,017	0,043	0,027	0,025
MV0605-04	0,855	0,920	1,300	1,640	0,043	0,015	0,041	0,026	0,019
MV0610-01	0,823	1,050	1,558	1,820	0,044	0,010	0,042	0,027	0,024
MV0610-02	0,933	1,100	1,725	1,928	0,040	0,021	0,048	0,027	0,025
MV0610-03	0,950	1,193	1,898	2,263	0,049	0,017	0,066	0,030	0,025
MV0610-04	1,013	1,290	1,810	2,140	0,052	0,018	0,057	0,029	0,024
MV0610-05						0,046	0,092	0,035	0,027
MV0610-06						0,041	0,094	0,033	0,027

A.1.6 Versuchsreihe MV0611-01 bis MV0612-04

Versuchs ID	$F_{max, 0-6re}$ [N]	$F_{max, 6-12re}$ [N]	$F_{max, 12-18re}$ [N]	$F_{max, 18-24re}$ [N]	$F_{max, 0-6li}$ [N]	$F_{max, 6-12li}$ [N]	$F_{max, 12-18li}$ [N]	$F_{max, 18-24li}$ [N]
MV0611-01	58,9	31,2	2,7	2,2	59,5	33,4	1,2	5,7
MV0611-02	62,7	29,3	3,2	2,0	60,9	27,4	1,9	1,8
MV0611-03	62,2	31,7	2,6	1,4	64,3	37,2	1,2	1,2
MV0611-04	59,2	29,0	3,0	3,1	56,1	33,8	2,5	1,1
MV0611-05	58,7	31,1	2,8	1,1	58,8	30,5	2,7	1,0
MV0611-06	55,1	36,4	3,2	1,4	62,7	36,1	3,3	1,1
MV0612-01	50,1	27,8	3,3	1,4	47,0	36,6	3,7	1,1
MV0612-02	54,0	32,4	3,3	1,2	47,2	34,9	2,8	1,3
MV0612-03	56,3	41,2	8,1	4,4	48,3	38,1	10,0	3,8
MV0612-04	45,1	40,4	9,4	5,3	45,3	38,9	9,7	4,2

Versuchs ID	t_{o1} [sek]	t_{o2} [sek]	t_{u1} [sek]	t_{u2} [sek]	h' [m]	$h'_{dep,US1}$ [m]	$h'_{dep,US2}$ [m]	$h'_{dep,US3}$ [m]	$h'_{dep,US4}$ [m]
MV0611-01	0,705	0,830	1,043	1,168	0,198	0,007	0,009	0,009	0,008
MV0611-02	0,690	0,758	1,068	1,188	0,207	0,010	0,007	0,005	0,008
MV0611-03	0,778	0,893	1,143	1,275	0,244	0,016		0,012	0,010
MV0611-04	0,795	0,898	1,155	1,315	0,085	0,011	0,007	0,014	0,008
MV0611-05	0,750	0,895	1,168	1,328	0,054	0,015	0,005	0,011	0,010
MV0611-06	0,803	0,910	1,263	1,440	0,041	0,013	0,010	0,011	0,008
MV0612-01	0,855	1,003	1,380	1,665	0,055	0,006	0,008	0,043	0,007
MV0612-02	0,788	0,953	1,308	1,570	0,051	0,007	0,010	0,007	0,008
MV0612-03	0,905	1,068	1,565	1,943	0,048	0,007	0,008	0,010	0,007
MV0612-04	0,915	1,058	1,395	1,893	0,044	0,013	0,009	0,009	0,008

A.1.7 Versuchsreihe MV0620-01 bis MV0621-06

Versuchs ID	$F_{max, 0-6re}$ [N]	$F_{max, 6-12re}$ [N]	$F_{max, 12-18re}$ [N]	$F_{max, 18-24re}$ [N]	$F_{max, 0-6li}$ [N]	$F_{max, 6-12li}$ [N]	$F_{max, 12-18li}$ [N]	$F_{max, 18-24li}$ [N]
MV0620-01	56,4	27,1	8,7	2,9	50,4	22,5	3,0	5,5
MV0620-02	55,1	36,2	20,6	2,2	56,5	31,3	3,0	2,4
MV0620-03	48,5	24,3	7,9	3,4	51,8	28,2	1,6	1,4
MV0621-02	61,9	32,8	8,9	3,2	44,4	32,0	4,9	3,7
MV0621-03	28,7	20,9	6,5	1,0	27,1	19,4	6,3	2,3
MV0621-04	42,9	36,0	14,3	3,7	34,9	37,7	8,6	5,4
MV0621-05	35,8	36,8	20,4	8,9	38,0	26,8	15,2	7,0
MV0621-06	27,4	31,0	20,0	10,6	22,0	29,2	15,5	6,4

Versuchs ID	t_{o1} [sek]	t_{o2} [sek]	t_{u1} [sek]	t_{u2} [sek]	h' [m]	$h'_{dep,US1}$ [m]	$h'_{dep,US2}$ [m]	$h'_{dep,US3}$ [m]	$h'_{dep,US4}$ [m]
MV0620-01	0,713	0,813	1,155	1,348	0,051	0,010	0,029	0,022	0,019
MV0620-02	0,775	0,840	1,180	1,303	0,047	0,011	0,028	0,021	0,019
MV0620-03	0,860	0,953	1,383	1,615	0,034	0,010	0,008	0,014	0,014
MV0621-02	0,845	0,960	1,370	1,800	0,039	0,023	0,075	0,049	0,041
MV0621-03	0,968	1,178	1,800	2,205	0,037	0,008	0,041	0,029	0,020
MV0621-04	0,915	1,095	1,608	1,938	0,043	0,010	0,036	0,024	0,019
MV0621-05	1,053	1,330	1,993	2,530	0,056	0,022		0,027	0,022
MV0621-06	0,983	1,150	2,093	2,608	0,059	0,027		0,027	0,021

A.1.8 Versuchsreihe MV0624-01 bis MV0625-05

Versuchs ID	$F_{max, 0-6re}$ [N]	$F_{max, 6-12re}$ [N]	$F_{max, 12-18re}$ [N]	$F_{max, 18-24re}$ [N]	$F_{max, 0-6li}$ [N]	$F_{max, 6-12li}$ [N]	$F_{max, 12-18li}$ [N]	$F_{max, 18-24li}$ [N]
MV0624-01	46,5	24,2	4,5	1,4	35,4	31,4	3,1	1,4
MV0624-02	48,6	30,3	10,9	1,9	41,7	38,5	3,0	1,5
MV0624-03	44,3	30,2	9,5	1,2	39,0	36,1	3,2	2,4
MV0624-04	39,9	35,8	11,1	6,3	41,6	33,8	5,4	4,1
MV0625-01	52,5	32,6	8,6	2,2	46,2	37,3	4,8	3,4
MV0625-02	47,7	34,2	12,9	4,9	37,9	33,4	6,7	4,7
MV0625-03	54,8	34,2	12,4	3,8	34,0	32,6	10,3	3,2
MV0625-04	29,2	27,2	19,1	9,0	23,5	25,2	13,5	5,3
MV0625-05	28,9	32,8	19,3	9,7	25,3	24,4	14,8	7,2

A.1.10 Versuchsreihe MV0705-01 bis MV0708-04

Versuchs ID	$F_{max, 0-6re}$ [N]	$F_{max, 6-12re}$ [N]	$F_{max, 12-18re}$ [N]	$F_{max, 18-24re}$ [N]	$F_{max, 0-6li}$ [N]	$F_{max, 6-12li}$ [N]	$F_{max, 12-18li}$ [N]	$F_{max, 18-24li}$ [N]
MV0705-01	49,3	30,4	8,2	5,0	47,7	36,9	8,8	6,3
MV0705-02	47,5	39,6	6,3	5,9	42,0	34,1	8,0	6,1
MV0705-03	35,1	37,7	12,7	5,5	42,4	36,7	9,5	7,0
MV0705-04	46,6	39,0	9,9	5,3	56,3	38,2	9,6	5,5
MV0705-05	37,8	35,6	14,9	8,7	40,5	34,2	14,0	7,2
MV0705-06	32,9	35,7	14,2	5,5	36,9	35,7	14,0	5,2
MV0708-01	39,9	32,2	18,2	10,5	32,0	32,2	17,0	9,2
MV0708-02	30,0	34,0	18,2	10,2	31,8	27,0	16,7	8,4
MV0708-03	25,9	26,6	17,2	13,3	25,3	23,0	15,8	11,6
MV0708-04	21,7	23,6	16,3	14,8	23,3	23,4	16,5	14,2

Versuchs ID	t_{o1} [sek]	t_{o2} [sek]	t_{u1} [sek]	t_{u2} [sek]	h' [m]	$h'_{dep,US1}$ [m]	$h'_{dep,US2}$ [m]	$h'_{dep,US3}$ [m]	$h'_{dep,US4}$ [m]
MV0705-01	0,770	0,895	1,233	1,448	0,023		0,040	0,019	0,011
MV0705-02	0,808	0,895	1,225	1,340	0,046	0,009	0,049	0,023	0,020
MV0705-03	0,780	0,963	1,348	1,533	0,048	0,020		0,024	0,022
MV0705-04	0,765	0,928	1,300	1,480	0,043	0,010	0,048	0,024	0,021
MV0705-05	0,828	1,028	1,568	1,855	0,047	0,023	0,053	0,024	0,021
MV0705-06	0,860	1,078	1,593	1,990	0,047	0,016	0,052	0,018	0,020
MV0708-01	0,743	1,053	1,568	1,930	0,046	0,025	0,060	0,023	0,019
MV0708-02	0,888	1,045	1,678	2,278	0,045	0,025	0,058	0,025	0,021
MV0708-03	0,988	1,258	1,985	2,715	0,058	0,025	0,074	0,027	0,020
MV0708-04	1,050	1,448	2,233	3,118	0,068	0,044	0,099	0,031	0,021

A.1.11 Versuchsreihe MV0710-03 bis MV0710-10

Versuchs ID	$F_{max, 0-6re}$ [N]	$F_{max, 6-12re}$ [N]	$F_{max, 12-18re}$ [N]	$F_{max, 18-24re}$ [N]	$F_{max, 0-6li}$ [N]	$F_{max, 6-12li}$ [N]	$F_{max, 12-18li}$ [N]	$F_{max, 18-24li}$ [N]
MV0710-03	59,8	36,5	5,1	3,4	48,9	39,4	6,7	3,6
MV0710-04	49,5	36,6	7,2	5,9	43,4	42,9	6,7	6,5
MV0710-05	52,4	36,3	15,5	5,4	45,9	39,3	9,6	6,7
MV0710-06	39,1	47,9	14,2	5,7	46,1	36,0	10,0	5,6
MV0710-07	32,6	35,6	20,0	13,3	45,4	32,5	16,8	8,8
MV0710-08	34,6	38,7	18,9	9,1	40,2	32,9	14,3	9,0
MV0710-09	30,2	27,4	18,5	11,8	24,7	25,7	14,7	13,0
MV0710-10	21,7	24,5	18,4	12,7	26,5	26,2	15,6	13,1

Versuchs ID	t_{o1} [sek]	t_{o2} [sek]	t_{u1} [sek]	t_{u2} [sek]	h' [m]	$h'_{dep,US1}$ [m]	$h'_{dep,US2}$ [m]	$h'_{dep,US3}$ [m]	$h'_{dep,US4}$ [m]
MV0710-03	0,800	0,908	1,233	1,380	0,044	0,015	0,032	0,021	0,016
MV0710-04	0,810	0,918	1,245	1,470	0,045	0,013	0,038	0,021	0,018
MV0710-05	0,835	0,995	1,450	1,915	0,044	0,011	0,038	0,022	0,019
MV0710-06	0,783	1,000	1,428	1,745	0,046	0,020	0,043	0,023	0,019
MV0710-07	0,865	1,035	1,658	2,105	0,041	0,023	0,069	0,026	0,020
MV0710-08	0,870	1,045	1,758	2,298	0,043	0,023	0,059	0,024	0,019
MV0710-09	1,045	1,245	2,138	2,933	0,055	0,034	0,090	0,029	0,022
MV0710-10	1,108	1,373	2,268	3,153	0,058	0,037	0,093	0,028	0,021

A.1.12 Versuchsreihe MV0715-01 bis MV0716-06

Versuchs ID	$F_{max, 0-6re}$ [N]	$F_{max, 6-12re}$ [N]	$F_{max, 12-18re}$ [N]	$F_{max, 18-24re}$ [N]	$F_{max, 0-6li}$ [N]	$F_{max, 6-12li}$ [N]	$F_{max, 12-18li}$ [N]	$F_{max, 18-24li}$ [N]
MV0715-01	47,5	31,8	9,9	3,9	25,3	29,3	7,4	8,0
MV0715-02	36,4	33,2	10,5	6,0	38,5	28,4	10,3	5,4
MV0716-01	43,8	36,7	10,8	5,9	44,9	36,1	10,9	6,7
MV0716-02	41,8	40,6	13,4	8,3	43,0	37,4	16,0	9,0
MV0716-03	34,6	35,8	17,3	9,6	31,0	38,3	15,8	11,1
MV0716-04	30,9	34,5	17,9	10,0	29,6	31,8	19,0	12,5
MV0716-05	21,7	27,0	17,3	13,2	24,5	22,5	16,4	14,8
MV0716-06	23,5	24,5	18,1	14,4	25,8	24,0	16,8	15,6

Versuchs ID	t_{o1} [sek]	t_{o2} [sek]	t_{u1} [sek]	t_{u2} [sek]	h' [m]	$h'_{dep,US1}$ [m]	$h'_{dep,US2}$ [m]	$h'_{dep,US3}$ [m]	$h'_{dep,US4}$ [m]
MV0715-01	0,798	0,928	1,335	1,718	0,047	0,010	0,051	0,024	0,014
MV0715-02	0,825	0,978	1,583	1,888	0,043	0,015	0,057	0,026	0,020
MV0716-01	0,828	0,970	1,408	1,883	0,042	0,016	0,042	0,021	0,018
MV0716-02						0,020	0,057	0,025	0,020
MV0716-03	0,905	1,093	1,820	2,265	0,046	0,020	0,057	0,025	0,020
MV0716-04	0,948	1,138	1,840	2,380	0,047	0,020	0,057	0,025	0,020
MV0716-05	1,063	1,328	2,373	3,120	0,064	0,061	0,123	0,033	0,025
MV0716-06	1,038	1,238	2,375	3,258	0,061	0,057	0,117	0,033	0,025

A.1.15 Versuchsreihe MV0827-01 bis MV0828-04

Versuchs ID	t_{o1} [sek]	t_{o2} [sek]	t_{u1} [sek]	t_{u2} [sek]	h' [m]	$h'_{dep,US1}$ [m]	$h'_{dep,US2}$ [m]	$h'_{dep,US3}$ [m]	$h'_{dep,US4}$ [m]
MV0827-01	0,855	0,965	1,260	1,430		0,012	0,007	0,017	0,010
MV0827-02	0,783	0,973	1,258	1,420					
MV0827-03	0,828	0,893	1,263	1,470					
MV0827-04	0,828	0,943	1,285	1,550		0,016	0,011	0,019	0,017
MV0827-05	0,828	0,985	1,318	1,505		0,016	0,013	0,021	0,015
MV0827-06						-0,002	0,016	0,019	0,016
MV0827-07	0,893	1,085	1,460	1,768		0,020	0,010	0,020	0,017
MV0827-08	0,850	1,018	1,490	1,868		0,014	0,008	0,023	0,018
MV0828-01	0,918	1,170	1,725	1,973		0,019	0,018	0,028	0,020
MV0828-02	0,960	1,290	1,768	2,050		0,020	0,011	0,025	0,023
MV0828-03	1,050		2,175	2,683		0,017		0,031	0,020
MV0828-04	1,200	1,478	2,180	2,728		0,027	0,051	0,032	0,027

A.1.16 Versuchsreihe MV0902-01 bis MV0916-05

Versuchs ID	t_{o1} [sek]	t_{o2} [sek]	t_{u1} [sek]	t_{u2} [sek]	h' [m]	$h'_{dep,US1}$ [m]	$h'_{dep,US2}$ [m]	$h'_{dep,US3}$ [m]	$h'_{dep,US4}$ [m]
MV0902-01	0,730	0,873	1,183	1,418		0,012	0,007	0,015	0,011
MV0902-02	0,703	0,825	1,148	1,343		0,012	0,013	0,012	0,013
MV0902-03	0,868	0,998	1,363	1,575		0,013	0,009	0,014	0,012
MV0902-04	0,838	1,025	1,388	1,603		0,014	0,009	0,020	0,013
MV0902-05	0,808	1,013	1,350	1,563		0,015	0,012	0,018	0,014
MV0902-06	0,785	0,973	1,380	1,570		0,015	0,016	0,019	0,013
MV0903-01	0,878	1,034	1,488	1,720		0,013	0,005	0,026	0,016
MV0904-01	0,908	1,255	1,723	1,963		0,015	0,017	0,028	0,026
MV0916-01	1,108	1,400	2,025	2,388		0,018	0,034	0,035	0,029
MV0916-02						0,021	0,076	0,035	0,028
MV0916-03	1,140	1,565	2,493	3,120		0,027	0,078	0,044	0,034
MV0916-04						0,011	0,008	0,015	0,013
MV0916-05	0,838	0,945	1,280	1,518					

A.1.17 Versuchsreihe MV0917-01 bis MV0918-08

Versuchs ID	t_{o1} [sek]	t_{o2} [sek]	t_{u1} [sek]	t_{u2} [sek]	h' [m]	$h'_{dep,US1}$ [m]	$h'_{dep,US2}$ [m]	$h'_{dep,US3}$ [m]	$h'_{dep,US4}$ [m]
MV0917-01	0,713	0,898	1,195	1,340		0,011	0,011	0,013	0,010
MV0917-02	0,730	0,895	1,243	1,443		0,020	0,013	0,013	0,014
MV0918-01	0,813	0,970	1,298	1,458		0,012	0,007	0,018	0,013
MV0918-02	0,773	0,883	1,280	1,405		0,019	0,002	0,018	0,016
MV0918-03	0,858	0,960	1,283	1,518		0,011	0,008	0,015	0,014
MV0918-04	0,713	0,918	1,335	1,575		0,012	0,011	0,021	0,019
MV0918-05	0,860	0,958	1,285	1,518		0,011	0,008	0,015	0,014
MV0918-06	0,835	1,060	1,580			0,024	0,014	0,025	
MV0918-07	0,950	1,220	1,923			0,018	0,046	0,028	
MV0918-08	0,940	1,160	1,658	2,033		0,018	0,043	0,028	0,021

A.1.18 Versuchsreihe MV0919-01 bis MV0919-08

Versuchs ID	t_{o1} [sek]	t_{o2} [sek]	t_{u1} [sek]	t_{u2} [sek]	h' [m]	$h'_{dep,US1}$ [m]	$h'_{dep,US2}$ [m]	$h'_{dep,US3}$ [m]	$h'_{dep,US4}$ [m]
MV0919-01	0,790	0,860	1,143	1,388		0,014	0,006	0,013	0,008
MV0919-02	0,683	0,780	1,213	1,538		0,014	0,009	0,011	0,011
MV0919-03									
MV0919-04	0,760	0,885	1,335	1,535		0,012	0,010	0,012	0,010
MV0919-05	0,788	0,940	1,203	1,398		0,011	0,009	0,011	0,010
MV0919-06	0,790	0,900				0,008	0,007	0,012	0,009
MV0919-07	0,870	1,013	1,318	1,430		0,009	0,007	0,010	0,007
MV0919-08	0,855	1,010	1,435	1,695		0,011	0,007	0,010	0,008

A.2 Abgeleitete Werte

A.2.1 Versuchsreihe MV0411-01 bis MV0416-02

Versuchs ID	$p_{max, 0-6re}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12re}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18re}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24re}$ [N/m ²]	$p_{max, 0-6li}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12li}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18li}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24li}$ [N/m ²]
MV0411-01	14234	9443	2768	1245	21328	6871	939	1212
MV0411-02	19243	6598	2407	997	14693	6417	2093	275
MV0412-01	13253	6636	2162	924	14162	7709	440	387
MV0412-02	16823	8869	2161	848	12146	5798	586	501
MV0415-01	14496	9165	1807	1102	15821	9629	1896	1676
MV0415-02	13253	6636	2162	924	14162	7709	440	387
MV0416-01	7425	10328	5613	2204	5619	6708	4786	2248
MV0416-02	8172	7495	4165	971	7936	8647	3808	1494

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	h_{fl} [m]	Fr	p_{max} [N/m ²]	$h_{dep,1}$ [m]	$h_{dep,2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0411-01	4,74	2,07	0,05	6,8	21328	0,010	0,017	0,437	0,634
MV0411-02	6,21	2,65	0,05	9,0	19243	0,012	0,015	0,426	0,819
MV0412-01	4,62	3,33	0,03	7,9	14162	0,010	0,015	0,722	0,676
MV0412-02	3,33	1,91	0,06	4,2	16823	0,019	0,023	0,574	0,830
MV0415-01	3,05	1,49	0,05	4,6	15821	0,020	0,020	0,488	0,998
MV0415-02	4,74	1,89	0,03	8,2	14162	0,010	0,016	0,400	0,647
MV0416-01	1,59	1,02	0,07	1,9	10328	0,072	0,031	0,638	2,312
MV0416-02	2,14	1,02	0,06	2,8	8647	0,053	0,028	0,477	1,902

A.2.2 Versuchsreihe MV0425-02 bis MV0514-06

Versuchs ID	$p_{max, 0-6re}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12re}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18re}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24re}$ [N/m ²]	$p_{max, 0-6li}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12li}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18li}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24li}$ [N/m ²]
MV0425-02	20550	14302	5845	1261	15551	7143	950	916
MV0425-03	15091	9337	2785	883	14986	8250	883	520
MV0426-01	9348	10796	6308	1555	10828	9410	3128	3124
MV0426-02	9815	7281	2034	634	10206	7254	1689	1246
MV0514-01								
MV0514-02	11552	7032	4668	1516	9315	7844	3072	2120
MV0514-03	8835	7539	3231	745	7545	7141	3042	1052
MV0514-04	7824	6515	3171	1046	7520	6710	3469	1520
MV0514-05	6045	5505	3469	2557	6411	5979	3488	3091
MV0514-06	5705	5870	3474	2231	6150	5348	3493	2881

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	h_{fl} [m]	Fr [-]	p_{max} [N/m ²]	$h_{dep,1}$ [m]	$h_{dep,2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0425-02	3,91	2,05	0,06	5,0	20550	0,015	0,021	0,523	0,675
MV0425-03	3,91	2,81	0,16	3,1	15091	0,023	0,023	0,719	0,999
MV0426-01	5,00	1,49	0,05	7,4	10828	0,022	0,026	0,298	0,851
MV0426-02	3,05	2,34	0,05	4,5	10206	0,037	0,026	0,766	1,422
MV0514-01									
MV0514-02	2,77	1,34	0,05	4,1	11552	0,045	0,026	0,485	1,734
MV0514-03	1,01	1,46	0,07	1,3	8835	0,072	0,032	1,447	2,231
MV0514-04	1,53	1,36	0,06	1,9	7824	0,066	0,061	0,894	1,079
MV0514-05	1,27	0,47	0,08	1,4	6411	0,096	0,039	0,374	2,458
MV0514-06	1,28	0,54	0,08	1,5	6150	0,093	0,040	0,425	2,315

A.2.3 Versuchsreihe MV0517-01 bis MV0521-02

Versuchs ID	$p_{max, 0-6re}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12re}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18re}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24re}$ [N/m ²]	$p_{max, 0-6li}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12li}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18li}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24li}$ [N/m ²]
MV0517-01	12806	8864	2920	1625	12466	8454	1620	777
MV0517-02	16707	8101	1158	546	14936	8215	1706	1276
MV0517-03	13893	10402	3503	2187	14917	9200	1699	641
MV0517-04	16583	8979	1996	1119	14142	7906	1104	1036
MV0517-05	13890	11596	1413	897	13068	12256	1418	959
MV0517-06	14058	10004	1838	1123	13669	10562	2839	1408
MV0521-01	12035	12542	4425	2261	12978	11262	2972	2988
MV0521-02	12451	9595	3612	997	10799	9346	3676	673

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	h_{fl} [m]	Fr [-]	p_{max} [N/m ²]	$h_{dep,1}$ [m]	$h_{dep,2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0517-01	3,83	2,22	0,06	5,0	12806	0,009	0,011	0,580	0,807
MV0517-02	3,91	2,07	0,05	5,7	16707	0,008	0,010	0,529	0,750
MV0517-03	3,91	1,73	0,04	6,0	14917	0,012	0,017	0,442	0,715
MV0517-04	2,43	1,86	0,04	3,7	16583	0,009	0,014	0,763	0,657
MV0517-05	2,31	1,44	0,04	3,6	13890	0,018	0,014	0,624	1,304
MV0517-06	2,90	1,43	0,05	4,3	14058	0,018	0,015	0,492	1,210
MV0521-01	2,31	1,35	0,05	3,4	12978	0,019	0,018	0,586	1,088
MV0521-02	2,22	1,54	0,05	3,3	12451	0,022	0,018	0,692	1,196

A.2.4 Versuchsreihe MV0523-01 bis MV0528-04

Versuchs ID	$p_{max, 0-6re}$	$p_{max, 6-12re}$	$p_{max, 12-18re}$	$p_{max, 18-24re}$	$p_{max, 0-6li}$	$p_{max, 6-12li}$	$p_{max, 12-18li}$	$p_{max, 18-24li}$
	[N/m ²]							
MV0523-01	10482	6507	2687	1548	11720	6170	2046	1210
MV0523-02	10967	6759	2142	1696	14477	5541	2168	940
MV0523-03	9192	7609	1951	1473	11571	7857	1536	877
MV0523-04	10390	8478	4034	1812	10357	8077	3123	1706
MV0528-01	7536	8073	3117	641	9868	8035	2275	930
MV0528-02	7731	8854	2926	521	9351	7728	3248	725
MV0528-03	6263	8621	4369	2182	5715	6861	4417	2494
MV0528-04	4721	6371	3851	1820	4679	5434	3658	2110

Versuchs ID	v_1	v_2	h_n	Fr	p_{max}	$h_{dep,1}$	$h_{dep,2}$	r_v	r_h
	[m/s]	[m/s]	[m]	[-]	[N/m ²]	[m]	[m]	[-]	[-]
MV0523-01	2,09	1,44	0,05	3,1	11720	0,020	0,026	0,688	0,755
MV0523-02	2,54	3,09	0,04	3,9	14477	0,029	0,022	1,220	1,323
MV0523-03	2,02	1,76	0,04	3,1	11571	0,031	0,028	0,873	1,121
MV0523-04	2,95	1,10	0,05	4,4	10390	0,032	0,026	0,372	1,237
MV0528-01	1,86	1,29	0,04	2,8	9868	0,043	0,028	0,698	1,504
MV0528-02	1,59	1,33	0,05	2,2	9351	0,057	0,030	0,837	1,897
MV0528-03	1,05	0,62	0,08	1,2	8621	0,091	0,040	0,589	2,259
MV0528-04	1,70	0,86	0,07	2,0	6371	0,010	0,017	0,507	0,634

A.2.5 Versuchsreihe MV0605-01 bis MV0610-06

Versuchs ID	$p_{max, 0-6re}$	$p_{max, 6-12re}$	$p_{max, 12-18re}$	$p_{max, 18-24re}$	$p_{max, 0-6li}$	$p_{max, 6-12li}$	$p_{max, 12-18li}$	$p_{max, 18-24li}$
	[N/m ²]							
MV0605-01	13462	6476	1308	1634	12475	7182	1022	1327
MV0605-02	18065	6836	1495	751	12453	6267	599	967
MV0605-03	10796	5959	2293	810	17064	6117	661	530
MV0605-04	12435	8463	1365	864	10470	9195	545	402
MV0610-01	9115	7677	1572	857	7449	7264	578	418
MV0610-02	8009	6525	2265	661	10165	5723	745	413
MV0610-03	6956	7450	3280	961	7484	8315	1445	629
MV0610-04	7352	7542	3584	1217	7957	7743	1483	848
MV0610-05	5930	5620	4197	2843	5561	5201	1749	2341
MV0610-06	5750	5511	4024	2861	6116	4989	1899	2377

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	h_{fl} [m]	Fr [-]	p_{max} [N/m ²]	$h_{dep,1}$ [m]	$h_{dep,2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0605-01	5,63	3,67	0,04	8,5	13462	0,032	0,027	0,653	1,202
MV0605-02	8,18	2,17	0,05	11,9	18065	0,036	0,027	0,265	1,345
MV0605-03	4,00	1,30	0,04	6,1	17064	0,044	0,027	0,326	1,617
MV0605-04	6,92	1,32	0,04	10,6	12435	0,042	0,026	0,191	1,594
MV0610-01	1,98	1,71	0,04	3,0	9115	0,043	0,028	0,867	1,545
MV0610-02	2,69	2,22	0,04	4,3	10165	0,050	0,028	0,827	1,767
MV0610-03	1,86	1,23	0,05	2,6	8315	0,068	0,031	0,664	2,226
MV0610-04	1,62	1,36	0,05	2,2	7957	0,058	0,030	0,841	1,970
MV0610-05					5930	0,095	0,036		2,658
MV0610-06					6116	0,096	0,034		2,833

A.2.6 Versuchsreihe MV0611-01 bis MV0612-04

Versuchs ID	$p_{max, 0-6re}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12re}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18re}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24re}$ [N/m ²]	$p_{max, 0-6li}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12li}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18li}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24li}$ [N/m ²]
MV0611-01	16105	8524	750	610	16260	9116	337	1554
MV0611-02	17136	8004	871	556	16646	7482	523	493
MV0611-03	17008	8653	716	380	17580	10165	331	341
MV0611-04	16167	7923	831	860	15320	9233	694	296
MV0611-05	16031	8510	766	308	16059	8326	743	280
MV0611-06	15046	9953	885	371	17130	9869	910	290
MV0612-01	13675	7583	898	378	12841	10010	1002	299
MV0612-02	14743	8843	893	317	12884	9548	775	342
MV0612-03	15387	11270	2206	1193	13188	10417	2738	1031
MV0612-04	12313	11034	2580	1461	12373	10642	2660	1150

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	h_{fl} [m]	Fr [-]	p_{max} [N/m ²]	$h_{dep,1}$ [m]	$h_{dep,2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0611-01	3,60	3,60	0,20	2,5	16260	0,010	0,009	1,000	1,064
MV0611-02	6,67	3,75	0,21	4,6	17136	0,010	0,009	0,563	1,187
MV0611-03	3,91	3,40	0,25	2,5	17580		0,012	0,868	
MV0611-04	4,39	2,81	0,09	4,7	16167	0,012	0,015	0,641	0,789
MV0611-05	3,10	2,81	0,06	4,2	16059	0,015	0,011	0,906	1,380
MV0611-06	4,19	2,54	0,04	6,5	17130	0,014	0,012	0,606	1,178
MV0612-01	3,05	1,58	0,06	4,1	13675	0,008	0,044	0,518	0,183
MV0612-02	2,73	1,71	0,05	3,8	14743	0,010	0,008	0,629	1,186
MV0612-03	2,77	1,19	0,05	4,0	15387	0,008	0,011	0,430	0,776
MV0612-04	3,16	0,90	0,05	4,7	12373	0,014	0,009	0,286	1,427

A.2.7 Versuchsreihe MV0620-01 bis MV0621-06

Versuchs ID	$p_{max, 0-6re}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12re}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18re}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24re}$ [N/m ²]	$p_{max, 0-6li}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12li}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18li}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24li}$ [N/m ²]
MV0620-01	15415	7405	2367	789	13761	6142	812	1505
MV0620-02	15047	9896	5628	606	15449	8549	821	654
MV0620-03	13253	6636	2162	924	14162	7709	440	387
MV0621-02	16909	8963	2425	885	12124	8732	1336	1002
MV0621-03	7835	5714	1783	281	7402	5308	1731	632
MV0621-04	11726	9840	3905	1015	9548	10306	2356	1469
MV0621-05	9785	10056	5564	2419	10391	7332	4146	1914
MV0621-06	7477	8479	5472	2901	6023	7985	4225	1737

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	h_n [m]	Fr [-]	p_{max} [N/m ²]	$h_{dep,1}$ [m]	$h_{dep,2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0620-01	4,50	2,34	0,05	6,2	15415	0,030	0,023	0,519	1,294
MV0620-02	6,92	3,67	0,05	10,0	15449	0,029	0,022	0,531	1,335
MV0620-03	4,86	1,94	0,04	8,3	14162	0,010	0,015	0,398	0,700
MV0621-02	3,91	1,05	0,04	6,2	16909	0,077	0,050	0,267	1,527
MV0621-03	2,14	1,11	0,04	3,5	7835	0,042	0,029	0,519	1,441
MV0621-04	2,50	1,36	0,04	3,8	11726	0,037	0,025	0,545	1,508
MV0621-05	1,62	0,84	0,06	2,2	10391	0,022	0,028	0,516	0,792
MV0621-06	2,69	0,87	0,06	3,5	8479	0,027	0,027	0,325	1,005

A.2.8 Versuchsreihe MV0624-01 bis MV0625-05

Versuchs ID	$p_{max, 0-6re}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12re}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18re}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24re}$ [N/m ²]	$p_{max, 0-6li}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12li}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18li}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24li}$ [N/m ²]
MV0624-01	12715	6621	1218	385	9661	8591	855	386
MV0624-02	13288	8277	2976	520	11396	10525	813	406
MV0624-03	12092	8247	2583	323	10644	9875	872	656
MV0624-04	10914	9774	3034	1735	11365	9226	1481	1126
MV0625-01	14340	8913	2344	598	12612	10204	1309	939
MV0625-02	13029	9335	3537	1332	10357	9121	1836	1296
MV0625-03	14964	9355	3388	1033	9303	8920	2806	863
MV0625-04	7973	7430	5211	2470	6420	6873	3682	1438
MV0625-05	7885	8965	5262	2645	6926	6656	4046	1964

A.2.10 Versuchsreihe MV0705-01 bis MV0708-04

Versuchs ID	$p_{max, 0-6re}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12re}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18re}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24re}$ [N/m ²]	$p_{max, 0-6li}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12li}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18li}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24li}$ [N/m ²]
MV0705-01	13461	8298	2235	1375	13044	10086	2395	1712
MV0705-02	12980	10813	1726	1610	11481	9325	2194	1656
MV0705-03	9587	10289	3468	1503	11593	10022	2604	1915
MV0705-04	12744	10645	2704	1435	15384	10438	2619	1504
MV0705-05	10340	9739	4060	2378	11059	9332	3824	1956
MV0705-06	9003	9742	3868	1492	10080	9751	3826	1417
MV0708-01	10890	8800	4963	2879	8745	8789	4654	2505
MV0708-02	8186	9298	4976	2788	8698	7389	4567	2300
MV0708-03	7066	7279	4713	3622	6921	6276	4309	3182
MV0708-04	5931	6447	4459	4039	6359	6397	4514	3890

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	h_n [m]	Fr	p_{max} [N/m ²]	$h_{dep,1}$ [m]	$h_{dep,2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0705-01	3,60	2,09	0,02	7,4	13461	0,041	0,019	0,581	2,113
MV0705-02	5,14	3,91	0,05	7,6	12980	0,050	0,023	0,761	2,130
MV0705-03	2,47	2,43	0,05	3,5	11593	0,021	0,025	0,986	0,830
MV0705-04	2,77	2,50	0,04	4,2	15384	0,049	0,024	0,903	2,014
MV0705-05	2,25	1,57	0,05	3,3	11059	0,054	0,025	0,696	2,163
MV0705-06	2,07	1,13	0,05	3,0	10080	0,053	0,021	0,547	2,576
MV0708-01	1,45	1,24	0,05	2,1	10890	0,062	0,024	0,855	2,615
MV0708-02	2,86	0,75	0,05	4,2	9298	0,060	0,025	0,263	2,366
MV0708-03	1,67	0,62	0,06	2,2	7279	0,076	0,028	0,370	2,757
MV0708-04	1,13	0,51	0,07	1,4	6447	0,101	0,032	0,449	3,175

A.2.11 Versuchsreihe MV0710-03 bis MV0710-10

Versuchs ID	$p_{max, 0-6re}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12re}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18re}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24re}$ [N/m ²]	$p_{max, 0-6li}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12li}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18li}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24li}$ [N/m ²]
MV0710-03	16336	9978	1382	916	13372	10777	1831	986
MV0710-04	13535	10013	1956	1613	11871	11725	1833	1789
MV0710-05	14323	9908	4247	1486	12530	10747	2618	1832
MV0710-06	10672	13078	3875	1561	12607	9833	2731	1543
MV0710-07	8904	9721	5459	3634	12395	8870	4595	2414
MV0710-08	9440	10586	5157	2484	10991	8996	3913	2446
MV0710-09	8249	7480	5046	3220	6753	7024	4003	3548
MV0710-10	5934	6700	5032	3462	7239	7167	4250	3588

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	h_{fl} [m]	Fr [-]	p_{max} [N/m ²]	$h_{dep,1}$ [m]	$h_{dep,2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0710-03	4,19	3,05	0,05	6,3	16336	0,032	0,022	0,729	1,493
MV0710-04	4,19	2,00	0,05	6,2	13535	0,039	0,022	0,478	1,794
MV0710-05	2,81	0,97	0,05	4,2	14323	0,039	0,023	0,344	1,733
MV0710-06	2,07	1,42	0,05	3,1	13078	0,044	0,023	0,685	1,884
MV0710-07	2,65	1,01	0,04	4,1	12395	0,070	0,027	0,380	2,640
MV0710-08	2,57	0,83	0,04	3,9	10991	0,061	0,024	0,324	2,489
MV0710-09	2,25	0,57	0,06	3,0	8249	0,092	0,029	0,252	3,127
MV0710-10	1,70	0,51	0,06	2,2	7239	0,095	0,029	0,299	3,288

A.2.12 Versuchsreihe MV0715-01 bis MV0716-06

Versuchs ID	$p_{max, 0-6re}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12re}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18re}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24re}$ [N/m ²]	$p_{max, 0-6li}$ [N/m ²]	$p_{max, 6-12li}$ [N/m ²]	$p_{max, 12-18li}$ [N/m ²]	$p_{max, 18-24li}$ [N/m ²]
MV0715-01	12986	8701	2717	1076	6915	8008	2009	2192
MV0715-02	9941	9074	2880	1639	10525	7758	2824	1486
MV0716-01	11980	10019	2950	1611	12277	9874	2990	1844
MV0716-02	11433	11080	3660	2272	11737	10217	4361	2456
MV0716-03	9446	9768	4735	2626	8470	10475	4326	3023
MV0716-04	8445	9433	4901	2733	8074	8688	5180	3414
MV0716-05	5936	7386	4730	3620	6692	6160	4483	4034
MV0716-06	6425	6707	4949	3941	7063	6551	4591	4256

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	h_{fl} [m]	Fr [-]	p_{max} [N/m ²]	$h_{dep,1}$ [m]	$h_{dep,2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0715-01	3,46	1,18	0,05	5,0	12986	0,052	0,025	0,340	2,098
MV0715-02	2,95	1,48	0,04	4,5	10525	0,058	0,027	0,500	2,160
MV0716-01	3,16	0,95	0,04	4,8	12277	0,043	0,022	0,300	1,960
MV0716-02					11737	0,059	0,025		2,339
MV0716-03	2,40	1,01	0,05	3,5	10475	0,059	0,025	0,421	2,339
MV0716-04	2,37	0,83	0,05	3,4	9433	0,059	0,025	0,352	2,339
MV0716-05	1,70	0,60	0,07	2,1	7386	0,126	0,034	0,355	3,694
MV0716-06	2,25	0,51	0,06	2,9	7063	0,120	0,034	0,227	3,523

A.2.13 Versuchsreihe MV0809-01 bis MV0812-06

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	$h_{\text{dep},1}$ [m]	$h_{\text{dep},2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0809-01	3,00	1,91	0,008	0,013	0,638	0,653
MV0809-02	4,09	1,62	0,020	0,018	0,396	1,128
MV0809-03	2,69	2,77	0,018	0,019	1,031	0,931
MV0809-04	1,82	3,16	0,014	0,015	1,737	0,886
MV0812-01	2,47	2,57	0,014	0,014	1,043	0,947
MV0812-02	3,67	2,22	0,011	0,018	0,605	0,623
MV0812-03	2,28	1,62	0,010	0,013	0,712	0,801
MV0812-04	2,95	1,43	0,013	0,013	0,484	1,034
MV0812-05	1,96	1,88	0,013	0,019	0,958	0,667
MV0812-06	1,11	1,22	0,017	0,022	1,095	0,790

A.2.14 Versuchsreihe MV0813-01 bis MV0819-02

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	$h_{\text{dep},1}$ [m]	$h_{\text{dep},2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0813-01	5,00	1,88	0,012	0,016	0,375	0,759
MV0813-02	2,90	1,80	0,011	0,012	0,620	0,929
MV0813-03	1,98	1,64	0,022	0,021	0,827	1,041
MV0814-01						
MV0814-02						
MV0814-03						
MV0814-04						
MV0819-01	2,12	2,22			1,049	
MV0819-02						

A.2.15 Versuchsreihe MV0827-01 bis MV0828-04

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	$h_{\text{dep},1}$ [m]	$h_{\text{dep},2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0827-01	4,09	2,65	0,013	0,018	0,647	0,714
MV0827-02	2,37	2,77			1,169	
MV0827-03	6,92	2,17			0,313	
MV0827-04	3,91	1,70	0,016	0,019	0,434	0,832
MV0827-05	2,86	2,40	0,016	0,022	0,840	0,747
MV0827-06			0,016	0,020		0,806
MV0827-07	2,34	1,46	0,021	0,021	0,626	1,011
MV0827-08	2,69	1,19	0,014	0,024	0,444	0,579
MV0828-01	1,78	1,82	0,019	0,028	1,020	0,673
MV0828-02	1,36	1,59	0,021	0,026	1,168	0,798
MV0828-03	-0,43	0,89	0,017	0,032	-2,069	0,531
MV0828-04	1,62	0,82	0,052	0,033	0,507	1,587

A.2.16 Versuchsreihe MV0902-01 bis MV0916-05

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	$h_{\text{dep},1}$ [m]	$h_{\text{dep},2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0902-01	3,16	1,91	0,013	0,015	0,606	0,817
MV0902-02	3,67	2,31	0,013	0,013	0,628	0,991
MV0902-03	3,46	2,12	0,013	0,014	0,612	0,909
MV0902-04	2,40	2,09	0,015	0,020	0,872	0,715
MV0902-05	2,20	2,12	0,015	0,018	0,965	0,819
MV0902-06	2,40	2,37	0,016	0,019	0,987	0,829
MV0903-01	2,88	1,94	0,013	0,027	0,672	0,479
MV0904-01	1,29	1,88	0,018	0,029	1,448	0,610
MV0916-01	1,54	1,24	0,035	0,036	0,807	0,970
MV0916-02			0,078	0,035		2,203
MV0916-03	1,06	0,72	0,080	0,045	0,677	1,781
MV0916-04			0,012	0,016		0,736
MV0916-05	4,21	1,89			0,450	

A.2.17 Versuchsreihe MV0917-01 bis MV0918-08

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	$h_{\text{dep},1}$ [m]	$h_{\text{dep},2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0917-01	2,43	3,10	0,012	0,014	1,276	0,844
MV0917-02	2,73	2,25	0,021	0,014	0,825	1,454
MV0918-01	2,86	2,81	0,013	0,019	0,984	0,682
MV0918-02	4,09	3,60	0,019	0,018	0,880	1,074
MV0918-03	4,39	1,91	0,012	0,016	0,436	0,738
MV0918-04	2,20	1,88	0,012	0,022	0,854	0,538
MV0918-05	4,62	1,94	0,012	0,016	0,419	0,738
MV0918-06	2,00	---	0,025	0,026		0,962
MV0918-07	1,67	---	0,047	0,028		1,650
MV0918-08	2,05	1,20	0,044	0,029	0,587	1,542

A.2.18 Versuchsreihe MV0919-01 bis MV0919-08

Versuchs ID	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	$h_{\text{dep},1}$ [m]	$h_{\text{dep},2}$ [m]	r_v [-]	r_h [-]
MV0919-01	6,43	1,84	0,015	0,013	0,286	1,129
MV0919-02	4,62	1,38	0,014	0,011	0,300	1,280
MV0919-03						
MV0919-04	3,60	2,25	0,013	0,012	0,625	1,068
MV0919-05	2,95	2,31	0,011	0,012	0,782	0,965
MV0919-06	4,09		0,008	0,012		0,664
MV0919-07	3,16	4,00	0,009	0,010	1,267	0,915
MV0919-08	2,90	1,73	0,012	0,010	0,596	1,201

B FORMELHERLEITUNGEN

Da im Bericht die Lesbarkeit stark beeinträchtigt wäre, wenn bei analytischen Umformungen von Gleichungen bzw. beim Einsetzen von Beziehungen zwischen verschiedenen Größen in komplexere Zusammenhänge sämtliche Zwischenschritte angeführt werden, sind hier entscheidende Formelherleitungen detailliert mit den notwendigen Zwischenschritten angeführt.

B.1 Berechnungen zur Dichte und den Verhältniszahlen

1) Zusätzliche Bezeichnungen:

V_{H_2O} ... Volumen des Wasseranteils

V_f ... Volumen des Anteils an Feinsediment

V_c ... Volumen des Anteils an Grobsediment

V_{mat} ... Volumen des Anteils der Murmatrix

V_{sed} ... Volumen des Sedimentanteils

V_{DF} ... Volumen des Murmaterials

M_{H_2O} ... Masse des Wasseranteils

M_f ... Masse des Anteils an Feinsediment

M_c ... Masse des Anteils an Grobsediment

M_{mat} ... Masse des Anteils der Murmatrix

M_{sed} ... Masse des Sedimentanteils

M_{DF} ... Masse des Murmaterials

2) Grundlegende Zusammenhänge:

$$V_{DF} = V_{H_2O} + V_f + V_c \quad (\text{Gl. B1- 1})$$

$$M_{DF} = M_{H_2O} + M_f + M_c \quad (\text{Gl. B1- 2})$$

$$V_{mat} = V_{H_2O} + V_f \quad (\text{Gl. B1- 3})$$

$$V_{sed} = V_f + V_c \quad (\text{Gl. B1- 4})$$

$$M_{mat} = M_{H_2O} + M_f \quad (\text{Gl. B1- 5})$$

$$M_{sed} = M_f + M_c \quad (\text{Gl. B1- 6})$$

$$M_{DF} = M_{mat} + M_c \quad (\text{Gl. B1- 7})$$

$$M_{H_2O} = \rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 8})$$

$$M_f = \rho_f \cdot V_f \quad (\text{Gl. B1- 9})$$

$$M_c = \rho_c \cdot V_c \quad (\text{Gl. B1- 10})$$

$$M_{mat} = \rho_{mat} \cdot V_{mat} \quad (\text{Gl. B1- 11})$$

$$M_{sed} = \rho_{sed} \cdot V_{sed} \quad (\text{Gl. B1- 12})$$

$$M_{DF} = \rho_{DF} \cdot V_{DF} \quad (\text{Gl. B1- 13})$$

$$C_b = \frac{M_c}{M_{DF}} \quad (\text{Gl. B1- 14})$$

$$C_V = \frac{V_{sed}}{V_{DF}} \quad (\text{Gl. B1- 15})$$

$$C_{V,c} = \frac{V_c}{V_{DF}} \quad (\text{Gl. B1- 16})$$

3) Vorgaben durch die Versuchsanordnung:

$$V_{H_2O} = \frac{3}{5} V_{mat} \quad (\text{Gl. B1- 17})$$

$$V_f = \frac{2}{5} V_{mat} \quad (\text{Gl. B1- 18})$$

4) Berechnung der Dichte der Murmatrix - (Gl. 1) in Kapitel 4.2.1:

$$(\text{Gl. B1- 17}) \Leftrightarrow V_{mat} = \frac{5}{3} V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 19})$$

$$(\text{Gl. B1- 18}) \Leftrightarrow V_{mat} = \frac{5}{2} V_f \quad (\text{Gl. B1- 20})$$

$$(\text{Gl. B1- 19}) \wedge (\text{Gl. B1- 20}) \Rightarrow \frac{5}{3} V_{H_2O} = \frac{5}{2} V_f \quad (\text{Gl. B1- 21})$$

$$\Rightarrow V_f = \frac{2}{3} V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 22})$$

$$(\text{Gl. B1- 5}) \wedge (\text{Gl. B1- 8}) \wedge (\text{Gl. B1- 9}) \Rightarrow M_{mat} = \rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + \rho_f \cdot V_f \quad (\text{Gl. B1- 23})$$

$$(\text{Gl. B1- 22}) \wedge (\text{Gl. B1- 23}) \Rightarrow M_{mat} = \rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 24})$$

$$\Rightarrow M_{mat} = \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 25})$$

$$(\text{Gl. B1- 9}) \wedge (\text{Gl. B1- 25}) \Rightarrow M_f = \frac{2}{3} \rho_f \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 26})$$

$$\Rightarrow M_{mat} = \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 27})$$

$$(\text{Gl. B1- 11}) \Rightarrow \rho_{mat} = \frac{M_{mat}}{V_{mat}} \quad (\text{Gl. B1- 28})$$

$$(\text{Gl. B1- 27}) \wedge (\text{Gl. B1- 28}) \Rightarrow \rho_{mat} = \frac{\left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O}}{V_{mat}} \quad (\text{Gl. B1- 29})$$

$$(Gl. B1-3) \wedge (Gl. B1-29) \Rightarrow \rho_{mat} = \frac{\left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f\right) \cdot V_{H_2O}}{V_{H_2O} + V_f} \quad (Gl. B1-30)$$

$$(Gl. B1-22) \wedge (Gl. B1-30) \Rightarrow \rho_{mat} = \frac{\left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f\right) \cdot V_{H_2O}}{V_{H_2O} + \frac{2}{3}V_{H_2O}} \quad (Gl. B1-31)$$

$$\Rightarrow \rho_{mat} = \frac{\left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f\right) \cdot V_{H_2O}}{\frac{5}{3}V_{H_2O}} \quad (Gl. B1-32)$$

$$\Rightarrow \rho_{mat} = \frac{\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f}{\frac{5}{3}} \quad (Gl. B1-33)$$

$$\Rightarrow \rho_{mat} = \frac{3}{5} \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right) \quad (Gl. B1-34)$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{\rho_{mat} = \frac{3}{5}\rho_{H_2O} + \frac{2}{5}\rho_f}} \quad (Gl. B1-35)$$

5) Berechnung der Dichte des Sedimentanteils - (Gl. 2) in Kapitel 4.2.1:

$$(Gl. B1-26) \Rightarrow M_f = \frac{2}{3}\rho_f \cdot V_{H_2O} \quad (Gl. B1-36)$$

$$(Gl. B1-14) \Leftrightarrow M_c = C_b \cdot M_{DF} \quad (Gl. B1-37)$$

$$(Gl. B1-7) \wedge (Gl. B1-37) \Rightarrow M_{DF} = M_{mat} + C_b \cdot M_{DF} \quad (Gl. B1-38)$$

$$\Rightarrow M_{mat} = M_{DF} - C_b \cdot M_{DF} \quad (Gl. B1-39)$$

$$\Rightarrow M_{mat} = (1 - C_b) \cdot M_{DF} \quad (Gl. B1-40)$$

$$\Rightarrow M_{DF} = \frac{1}{1 - C_b} \cdot M_{mat} \quad (Gl. B1-41)$$

$$(Gl. B1- 37)\wedge(Gl. B1- 41) \Rightarrow M_c = C_b \cdot \frac{1}{1-C_b} \cdot M_{mat} \quad (Gl. B1- 42)$$

$$\Rightarrow M_c = \frac{C_b}{1-C_b} \cdot M_{mat} \quad (Gl. B1- 43)$$

$$\wedge(Gl. B1- 27) \Rightarrow M_c = \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O} \quad (Gl. B1- 44)$$

$$(Gl. B1- 6)\wedge(Gl. B1- 36)\wedge(Gl. B1- 44) \Rightarrow M_{sed} = \frac{2}{3} \rho_f \cdot V_{H_2O} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O} \quad (Gl. B1- 45)$$

$$\Rightarrow M_{sed} = \left[\frac{2}{3} \rho_f + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \right] \cdot V_{H_2O} \quad (Gl. B1- 46)$$

$$\Rightarrow M_{sed} = \left(\frac{2}{3} \rho_f + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \rho_{H_2O} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O} \quad (Gl. B1- 47)$$

$$\Rightarrow M_{sed} = \left[\left(\frac{2}{3} + \frac{2}{3} \frac{C_b}{1-C_b} \right) \cdot \rho_f + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \rho_{H_2O} \right] \cdot V_{H_2O} \quad (Gl. B1- 48)$$

$$\Rightarrow M_{sed} = \left[\frac{2}{3} \left(1 + \frac{C_b}{1-C_b} \right) \cdot \rho_f + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \rho_{H_2O} \right] \cdot V_{H_2O} \quad (Gl. B1- 49)$$

$$\Rightarrow M_{sed} = \left(\frac{2}{3} \frac{1}{1-C_b} \cdot \rho_f + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \rho_{H_2O} \right) \cdot V_{H_2O} \quad (Gl. B1- 50)$$

$$\Rightarrow M_{sed} = \frac{1}{1-C_b} \cdot \left(C_b \cdot \rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O} \quad (Gl. B1- 51)$$

$$\Rightarrow M_{sed} = \left[\frac{2(1-C_b) + 2C_b}{3(1-C_b)} \cdot \rho_f + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \rho_{H_2O} \right] \cdot V_{H_2O} \quad (Gl. B1- 52)$$

$$\Rightarrow M_{sed} = \left(\frac{2}{3} \frac{1}{1-C_b} \cdot \rho_f + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \rho_{H_2O} \right) \cdot V_{H_2O} \quad (Gl. B1- 53)$$

$$\Rightarrow M_{sed} = \frac{1}{1-C_b} \cdot \left(\frac{2}{3} \rho_f + C_b \cdot \rho_{H_2O} \right) \cdot V_{H_2O} \quad (Gl. B1- 54)$$

$$\Rightarrow M_{sed} = \frac{1}{1-C_b} \cdot \left(C_b \cdot \rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 55})$$

$$(\text{Gl. B1- 12}) \Rightarrow \rho_{sed} = \frac{M_{sed}}{V_{sed}} \quad (\text{Gl. B1- 56})$$

$$(\text{Gl. B1- 55}) \wedge (\text{Gl. B1- 56}) \Rightarrow \rho_{sed} = \frac{1}{1-C_b} \cdot \left(\frac{2}{3} \rho_f + C_b \cdot \rho_{H_2O} \right) \cdot \frac{V_{H_2O}}{V_{sed}} \quad (\text{Gl. B1- 57})$$

$$(\text{Gl. B1- 10}) \Rightarrow V_c = \frac{M_c}{\rho_c} \quad (\text{Gl. B1- 58})$$

$$(\text{Gl. B1- 22}) \wedge (\text{Gl. B1- 58}) \Rightarrow V_c = \frac{\frac{C_b}{1-C_b} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O}}{\rho_c} \quad (\text{Gl. B1- 59})$$

$$\Rightarrow V_c = \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 60})$$

$$(\text{Gl. B1- 4}) \wedge (\text{Gl. B1- 60}) \Rightarrow V_{sed} = \frac{2}{3} V_{H_2O} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 61})$$

$$(\text{Gl. B1- 22}) \wedge (\text{Gl. B1- 61}) \Rightarrow V_{sed} = \left[\frac{2}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \right] \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 62})$$

$$\Rightarrow \rho_{sed} = \frac{\frac{1}{1-C_b} \cdot \left(C_b \cdot \rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)}{\frac{2}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)} \quad (\text{Gl. B1- 63})$$

$$(\text{Gl. B1- 57}) \wedge (\text{Gl. B1- 63}) \Rightarrow \rho_{sed} = \frac{\frac{1}{1-C_b} \cdot \left(C_b \cdot \rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)}{\frac{2}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)} \quad (\text{Gl. B1- 64})$$

$$\Rightarrow \rho_{sed} = \frac{\frac{1}{1-C_b} \cdot \left(C_b \cdot \rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)}{\frac{2(1-C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)}{3(1-C_b) \cdot \rho_c}} \quad (\text{Gl. B1- 65})$$

$$\Rightarrow \rho_{sed} = \frac{C_b \cdot \rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f}{1 - C_b} \cdot \frac{2(1 - C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)}{3(1 - C_b) \cdot \rho_c} \quad (\text{Gl. B1- 66})$$

$$\Rightarrow \rho_{sed} = \frac{C_b \cdot \rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f}{2(1 - C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)} \cdot 3\rho_c \quad (\text{Gl. B1- 67})$$

$$\Rightarrow \rho_{sed} = 3\rho_c \cdot \frac{C_b \cdot \rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f}{2(1 - C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)} \quad (\text{Gl. B1- 68})$$

$$\Rightarrow \rho_{sed} = 3\rho_c \cdot \frac{\frac{3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f}{3}}{\frac{6(1 - C_b) \cdot \rho_c}{3} + \frac{3C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{3}} \quad (\text{Gl. B1- 69})$$

$$\Rightarrow \rho_{sed} = 3\rho_c \cdot \frac{3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f}{6(1 - C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \quad (\text{Gl. B1- 70})$$

$$\Rightarrow \rho_{sed} = \rho_c \cdot \frac{3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f}{2(1 - C_b) \cdot \rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \quad (\text{Gl. B1- 71})$$

$$\Rightarrow \rho_{sed} = \rho_c \cdot \frac{3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f}{3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f + 2(1 - C_b) \cdot \rho_c} \quad (\text{Gl. B1- 72})$$

6) Berechnung der Dichte des Murmaterials - (Gl. 3) in Kapitel 4.2.1:

$$(\text{Gl. B1- 25}) \wedge (\text{Gl. B1- 41}) \Rightarrow M_{DF} = \frac{1}{1 - C_b} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 73})$$

$$(\text{Gl. B1- 1}) \wedge (\text{Gl. B1- 18}) \wedge (\text{Gl. B1- 60}) \Rightarrow V_{DF} = V_{H_2O} + \frac{2}{3} V_{H_2O} + \frac{C_b}{1 - C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 74})$$

$$\Rightarrow V_{DF} = \left[1 + \frac{2}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \right] \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 75})$$

$$\Rightarrow V_{DF} = \left[\frac{5}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \right] \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 76})$$

$$\Rightarrow V_{DF} = \frac{1}{(1-C_b) \cdot \rho_c} \cdot \left[\frac{5}{3} (1-C_b) \cdot \rho_c + C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \right] \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 77})$$

$$\Rightarrow V_{DF} = \frac{1}{3(1-C_b) \cdot \rho_c} \cdot \left[5(1-C_b) \cdot \rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right] \cdot V_{H_2O} \quad (\text{Gl. B1- 78})$$

$$(\text{Gl. B1- 13}) \Rightarrow \rho_{DF} = \frac{M_{DF}}{V_{DF}} \quad (\text{Gl. B1- 79})$$

$$(\text{Gl. B1- 73}) \wedge (\text{Gl. B1- 78}) \wedge (\text{Gl. B1- 79}) \Rightarrow \rho_{DF} = \frac{\frac{1}{1-C_b} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \cdot V_{H_2O}}{\frac{1}{3(1-C_b) \cdot \rho_c} \cdot \left[5(1-C_b) \cdot \rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right] \cdot V_{H_2O}} \quad (\text{Gl. B1- 80})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f}{\frac{1}{3\rho_c} \cdot \left[5(1-C_b) \cdot \rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right]} \quad (\text{Gl. B1- 81})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{\frac{1}{3} (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{\frac{1}{3\rho_c} \cdot \left[5(1-C_b) \cdot \rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right]} \quad (\text{Gl. B1- 82})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \rho_c \cdot \frac{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f}{5(1-C_b) \cdot \rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \quad (\text{Gl. B1- 83})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \rho_c \cdot \frac{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f}{3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f + 5(1-C_b) \cdot \rho_c} \quad (\text{Gl. B1- 84})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \rho_c \cdot \frac{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f}{C_b \cdot 3\rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f + 5\rho_c - 5C_b \cdot \rho_c} \quad (\text{Gl. B1- 85})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \rho_c \cdot \frac{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f}{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c} \quad (\text{Gl. B1- 86})$$

7) Die Herleitung des C_V -Werts - (Gl. 4) in Kapitel 4.2.1:

$$(Gl. B1- 1) \wedge (Gl. B1- 4) \Rightarrow V_{DF} = V_{H_2O} + V_{sed} \quad (Gl. B1- 87)$$

$$(Gl. B1- 15) \wedge (Gl. B1- 87) \Rightarrow C_V = \frac{V_{sed}}{V_{H_2O} + V_{sed}} \quad (Gl. B1- 88)$$

$$(Gl. B1- 63) \wedge (Gl. B1- 88) \Rightarrow C_V = \frac{\left[\frac{2}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \right] \cdot V_{H_2O}}{V_{H_2O} + \left[\frac{2}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \right] \cdot V_{H_2O}} \quad (Gl. B1- 89)$$

$$\Rightarrow C_V = \frac{\left[\frac{2}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \right] \cdot V_{H_2O}}{\left[1 + \frac{2}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) \right] \cdot V_{H_2O}} \quad (Gl. B1- 90)$$

$$\Rightarrow C_V = \frac{\frac{2}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)}{\frac{5}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)} \quad (Gl. B1- 91)$$

$$\Rightarrow C_V = \frac{\frac{2(1-C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)}{3(1-C_b) \cdot \rho_c}}{\frac{5(1-C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)}{3(1-C_b) \cdot \rho_c}} \quad (Gl. B1- 92)$$

$$\Rightarrow C_V = \frac{2(1-C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)}{5(1-C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)} \quad (Gl. B1- 93)$$

$$\Rightarrow C_V = \frac{\frac{6(1-C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{3}}{\frac{15(1-C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{3}} \quad (Gl. B1- 94)$$

$$\Rightarrow C_V = \frac{6(1-C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{15(1-C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \quad (Gl. B1- 95)$$

$$\Rightarrow C_V = \frac{2(1-C_b) \cdot \rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{5(1-C_b) \cdot \rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \quad (\text{Gl. B1- 96})$$

8) Die Herleitung des $C_{V,c}$ -Werts - (Gl. 5) in Kapitel 4.2.1:

(Gl. B1- 16)^(Gl. B1- 60)^(Gl. B1- 63)^(Gl. B1- 87) \Rightarrow

$$\Rightarrow C_{V,c} = \frac{\frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f\right) \cdot V_{H_2O}}{V_{H_2O} + \left[\frac{2}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f\right)\right] \cdot V_{H_2O}} \quad (\text{Gl. B1- 97})$$

$$\Rightarrow C_{V,c} = \frac{\frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f\right) \cdot V_{H_2O}}{\left[\frac{5}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f\right)\right] \cdot V_{H_2O}} \quad (\text{Gl. B1- 98})$$

$$\Rightarrow C_{V,c} = \frac{\frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f\right)}{\frac{5}{3} + \frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f\right)} \quad (\text{Gl. B1- 99})$$

$$\Rightarrow C_{V,c} = \frac{\frac{C_b}{1-C_b} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f\right)}{\frac{5(1-C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f\right)}{3(1-C_b) \cdot \rho_c}} \quad (\text{Gl. B1- 100})$$

$$\Rightarrow C_{V,c} = \frac{C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f\right)}{5(1-C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f\right)} \quad (\text{Gl. B1- 101})$$

$$\Rightarrow C_{V,c} = \frac{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{5(1-C_b) \cdot \rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \quad (\text{Gl. B1- 102})$$

9) C_b ausgedrückt durch C_V - (Gl. 6) in Kapitel 4.2.1:

$$(Gl. B1- 96) \Rightarrow C_V \cdot [5\rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c)] = 2\rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) \quad (Gl. B1- 103)$$

$$\Rightarrow C_V \cdot (5\rho_c + 3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f - 5C_b \cdot \rho_c) = 2\rho_c + 3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f - 2C_b \cdot \rho_c \quad (Gl. B1- 104)$$

$$\Rightarrow 5C_V \cdot \rho_c + 3C_V \cdot C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_V \cdot C_b \cdot \rho_f - 5C_V \cdot C_b \cdot \rho_c = 2\rho_c + 3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f - 2C_b \cdot \rho_c \quad (Gl. B1- 105)$$

$$\Rightarrow C_b \cdot (3C_V \cdot \rho_{H_2O} + 2C_V \cdot \rho_f - 5C_V \cdot \rho_c) + 5C_V \cdot \rho_c = C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) + 2\rho_c \quad (Gl. B1- 106)$$

$$\Rightarrow C_b \cdot (3C_V \cdot \rho_{H_2O} + 2C_V \cdot \rho_f - 5C_V \cdot \rho_c) = C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) + 2\rho_c - 5C_V \cdot \rho_c \quad (Gl. B1- 107)$$

$$\Rightarrow C_b \cdot (3C_V \cdot \rho_{H_2O} + 2C_V \cdot \rho_f - 5C_V \cdot \rho_c) = C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) + (2 - 5C_V) \cdot \rho_c \quad (Gl. B1- 108)$$

$$\Rightarrow C_b \cdot (3C_V \cdot \rho_{H_2O} + 2C_V \cdot \rho_f - 5C_V \cdot \rho_c) - C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) = (2 - 5C_V) \cdot \rho_c \quad (Gl. B1- 109)$$

$$\Rightarrow C_b \cdot [(3C_V \cdot \rho_{H_2O} + 2C_V \cdot \rho_f - 5C_V \cdot \rho_c) - (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c)] = (2 - 5C_V) \cdot \rho_c \quad (Gl. B1- 110)$$

$$\Rightarrow C_b \cdot (3C_V \cdot \rho_{H_2O} + 2C_V \cdot \rho_f - 5C_V \cdot \rho_c - 3\rho_{H_2O} - 2\rho_f + 2\rho_c) = (2 - 5C_V) \cdot \rho_c \quad (Gl. B1- 111)$$

$$\Rightarrow C_b \cdot [3(C_V - 1) \cdot \rho_{H_2O} + 2(C_V - 1) \cdot \rho_f + (2 - 5C_V) \cdot \rho_c] = (2 - 5C_V) \cdot \rho_c \quad (Gl. B1- 112)$$

$$\Rightarrow C_b \cdot [(C_V - 1) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) + (2 - 5C_V) \cdot \rho_c] = (2 - 5C_V) \cdot \rho_c \quad (Gl. B1- 113)$$

$$\Rightarrow C_b = \frac{(2 - 5C_V) \cdot \rho_c}{(C_V - 1) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) + (2 - 5C_V) \cdot \rho_c} \quad (Gl. B1- 114)$$

$$\Rightarrow C_b = \frac{(2 - 5C_V) \cdot \rho_c}{(2 - 5C_V) \cdot \rho_c - (1 - C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \quad (Gl. B1- 115)$$

10) Die Dichte des Murmaterials ausgedrückt durch C_V - (Gl. 6) in Kapitel 4.2.1:

(Gl. B1- 86)^(Gl. B1- 115)⇒

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \rho_c \cdot \frac{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f}{(2-5C_V) \cdot \rho_c} \cdot \frac{(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c}{(2-5C_V) \cdot \rho_c - (1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \quad (\text{Gl. B1- 116})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f}{2-5C_V} \cdot \frac{(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5}{(2-5C_V) \cdot \rho_c - (1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \quad (\text{Gl. B1- 117})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f}{(2-5C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c)} + 5 \quad (\text{Gl. B1- 118})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f}{(2-5C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5 \left[(2-5C_V) \cdot \rho_c - (1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right]} \quad (\text{Gl. B1- 119})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \cdot \left[(2-5C_V) \cdot \rho_c - (1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right]}{(2-5C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5 \left[(2-5C_V) \cdot \rho_c - (1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right]} \quad (\text{Gl. B1- 120})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \cdot \left[(2-5C_V) \cdot \rho_c - (1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right]}{(2-5C_V) \cdot \left\{ 3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c + 5 \left[\rho_c - (1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right] \right\}} \quad (\text{Gl. B1- 121})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \cdot \left[(2-5C_V) \cdot \rho_c - (1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right]}{(2-5C_V) \cdot \left[3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c + 5(1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right]} \quad (\text{Gl. B1- 122})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \cdot \left[(2-5C_V) \cdot \rho_c - (1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right]}{(2-5C_V) \cdot \left[3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5(1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right]} \quad (\text{Gl. B1- 123})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \cdot \left[(2-5C_V) \cdot \rho_c - (1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right]}{(2-5C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \cdot \left[1 - 5(1-C_V) \right]} \quad (\text{Gl. B1- 124})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(2-5C_V) \cdot \rho_c - (1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{(2-5C_V) \cdot \left[1 - 5(1-C_V) \right]} \quad (\text{Gl. B1- 125})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(2-5C_V) \cdot \rho_c - (1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{(2-5C_V) \cdot (1-5+C_V)} \quad (\text{Gl. B1- 126})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(2-5C_V) \cdot \rho_c - (1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{(2-5C_V) \cdot (C_V - 4)} \quad (\text{Gl. B1- 127})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(1-C_V) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - (2-5C_V) \cdot \rho_c}{(2-5C_V) \cdot (4-C_V)} \quad (\text{Gl. B1- 128})$$

11) C_b ausgedrückt durch $C_{V,c}$ - (Gl. 6) in Kapitel 4.2.1:

$$(\text{Gl. B1- 102}) \Rightarrow C_{V,c} \cdot \left[5(1-C_b) \cdot \rho_c + 3C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right) \right] = C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right) \quad (\text{Gl. B1- 129})$$

$$\Rightarrow C_{V,c} \cdot \left[5\rho_c - C_b \cdot \rho_c + 3C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right) \right] = C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right) \quad (\text{Gl. B1- 130})$$

$$\Rightarrow 5C_{V,c} \cdot \rho_c - C_b \cdot C_{V,c} \cdot \rho_c + 3C_b \cdot C_{V,c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right) = C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right) \quad (\text{Gl. B1- 131})$$

$$\Rightarrow C_b \cdot C_{V,c} \cdot \rho_c + 3C_b \cdot C_{V,c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right) - C_b \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right) = -5C_{V,c} \cdot \rho_c \quad (\text{Gl. B1- 132})$$

$$\Rightarrow C_b \cdot \left[C_{V,c} \cdot \rho_c + 3C_{V,c} \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right) - \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right) \right] = -5C_{V,c} \cdot \rho_c \quad (\text{Gl. B1- 133})$$

$$\Rightarrow C_b \cdot \left[C_{V,c} \cdot \rho_c + 3(C_{V,c} - 1) \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right) \right] = -5C_{V,c} \cdot \rho_c \quad (\text{Gl. B1- 134})$$

$$\Rightarrow C_b = \frac{-5C_{V,c} \cdot \rho_c}{C_{V,c} \cdot \rho_c + 3(C_{V,c} - 1) \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right)} \quad (\text{Gl. B1- 135})$$

$$\Rightarrow C_b = \frac{5C_{V,c} \cdot \rho_c}{-C_{V,c} \cdot \rho_c - 3(C_{V,c} - 1) \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3}\rho_f \right)} \quad (\text{Gl. B1- 136})$$

$$\Rightarrow C_b = \frac{5C_{V,c} \cdot \rho_c}{-C_{V,c} \cdot \rho_c + 3(-C_{V,c} + 1) \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right)} \quad (\text{Gl. B1- 137})$$

$$\Rightarrow C_b = \frac{5C_{V,c} \cdot \rho_c}{3(1 - C_{V,c}) \cdot \left(\rho_{H_2O} + \frac{2}{3} \rho_f \right) - C_{V,c} \cdot \rho_c} \quad (\text{Gl. B1- 138})$$

$$\Rightarrow C_b = \frac{5C_{V,c} \cdot \rho_c}{(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_{V,c} \cdot \rho_c} \quad (\text{Gl. B1- 139})$$

12) Die Dichte des Murmaterials ausgedrückt durch $C_{V,c}$ - (Gl. 7) in Kapitel 4.2.1:

$$(\text{Gl. B1- 86}) \wedge (\text{Gl. B1- 139}) \Rightarrow \rho_{DF} = \rho_c \cdot \frac{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f}{\frac{5C_{V,c} \cdot \rho_c}{(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_{V,c} \cdot \rho_c} \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c} \quad (\text{Gl. B1- 140})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \rho_c \cdot \frac{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f}{\frac{5C_{V,c} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c)}{(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_{V,c} \cdot \rho_c} + 5\rho_c} \quad (\text{Gl. B1- 141})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \rho_c \cdot \frac{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f}{\frac{5C_{V,c} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c \cdot [(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_{V,c} \cdot \rho_c]}{(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_{V,c} \cdot \rho_c}} \quad (\text{Gl. B1- 142})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \rho_c \cdot \frac{(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \cdot [(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_{V,c} \cdot \rho_c]}{5C_{V,c} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c \cdot [(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_{V,c} \cdot \rho_c]} \quad (\text{Gl. B1- 143})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \rho_c \cdot \frac{(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \cdot [(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_{V,c} \cdot \rho_c]}{5\rho_c \cdot [C_{V,c} \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + (1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_{V,c} \cdot \rho_c]} \quad (\text{Gl. B1- 144})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \cdot [(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_{V,c} \cdot \rho_c]}{5[C_{V,c} \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + (1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_{V,c} \cdot \rho_c]} \quad (\text{Gl. B1- 145})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)^2 - C_{V,c} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{5[C_{V,c} \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + (1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_{V,c} \cdot \rho_c]} \quad (\text{Gl. B1- 146})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)^2 - C_{V,c} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{5 \left[3C_{V,c} \cdot \rho_{H_2O} + 2C_{V,c} \cdot \rho_f - 5C_{V,c} \cdot \rho_c + (1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_{V,c} \cdot \rho_c \right]} \quad (\text{Gl. B1- 147})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)^2 - C_{V,c} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{5 \left[C_{V,c} \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - 6C_{V,c} \cdot \rho_c + (1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \right]} \quad (\text{Gl. B1- 148})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)^2 - C_{V,c} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{5 \left[C_{V,c} \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) + (1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - 6C_{V,c} \cdot \rho_c \right]} \quad (\text{Gl. B1- 149})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)^2 - C_{V,c} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{5 \left[(1 - C_{V,c} + C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) - 6C_{V,c} \cdot \rho_c \right]} \quad (\text{Gl. B1- 150})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)^2 - C_{V,c} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{5(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 6C_{V,c} \cdot \rho_c)} \quad (\text{Gl. B1- 151})$$

$$\Rightarrow \rho_{DF} = \frac{(1 - C_{V,c}) \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)^2 - C_{V,c} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{5(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 6C_{V,c} \cdot \rho_c)} \quad (\text{Gl. B1- 152})$$

B.2 Berechnungen und Umformungen bei der Druckauswertung

1) Herleitung der ersten Druckgleichung - (Gl. 17) in Kapitel 6.2.1.1:

- Definition der FROUDE-Zahl - (Gl. 11):

$$\text{Fr} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \quad (\text{Gl. B2- 1})$$

- Definition des Druckfaktors - (Gl. 12):

$$K'_p = \frac{p_{\max}}{\rho_{DF} \cdot v^2 + \rho_{DF} \cdot g \cdot h_{fl}} \quad (\text{Gl. B2- 2})$$

- Grundlegender Zusammenhang - (Gl. 14):

$$K'_p = \kappa' \cdot \text{Fr}^{\xi'} \quad (\text{Gl. B2- 3})$$

- Herleitung der Druckgleichung - (Gl. 17):

$$(\text{Gl. B2- 2}) \wedge (\text{Gl. B2- 3}) \Rightarrow \frac{P_{\max}}{\rho_{DF} \cdot v^2 + \rho_{DF} \cdot g \cdot h_{fl}} = \kappa' \cdot \text{Fr}^{\xi'} \quad (\text{Gl. B2- 4})$$

$$\Rightarrow p_{\max} = \kappa' \cdot \text{Fr}^{\xi'} \cdot (\rho_{DF} \cdot v^2 + \rho_{DF} \cdot g \cdot h_{fl}) \quad (\text{Gl. B2- 5})$$

$$\Rightarrow p_{\max} = \kappa' \cdot \rho_{DF} \cdot (v^2 + g \cdot h_{fl}) \cdot \text{Fr}^{\xi'} \quad (\text{Gl. B2- 6})$$

$$(\text{Gl. B2- 1}) \wedge (\text{Gl. B2- 6}) \Rightarrow p_{\max} = \kappa' \cdot \rho_{DF} \cdot (v^2 + g \cdot h_{fl}) \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{\xi'} \quad (\text{Gl. B2- 7})$$

$$\Rightarrow p_{\max} = \kappa' \cdot \rho \cdot (v^2 + g \cdot h_{fl}) \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{\xi'} \quad (\text{Gl. B2- 8})$$

2) Herleitung der zweiten Druckgleichung - (Gl. 21) in Kapitel 6.2.1.2:

- Definition des Druckfaktors - (Gl. 13):

$$K''_p = \frac{P_{\max}}{\rho_{DF} \cdot v^2} \quad (\text{Gl. B2- 9})$$

- Grundlegender Zusammenhang - (Gl. 18):

$$K''_p = \kappa'' \cdot \text{Fr}^{\xi''} \quad (\text{Gl. B2- 10})$$

- Herleitung der Druckgleichung - (Gl. 21):

$$(\text{Gl. B2- 9}) \wedge (\text{Gl. B2- 10}) \Rightarrow \frac{P_{\max}}{\rho_{DF} \cdot v^2} = \kappa'' \cdot \text{Fr}^{\xi''} \quad (\text{Gl. B2- 11})$$

$$\Rightarrow p_{\max} = \kappa'' \cdot \text{Fr}^{\xi''} \cdot \rho_{DF} \cdot v^2 \quad (\text{Gl. B2- 12})$$

$$\Rightarrow p_{\max} = \kappa'' \cdot \rho_{DF} \cdot v^2 \cdot \text{Fr}^{\xi''} \quad (\text{Gl. B2- 13})$$

$$(Gl. B2- 1) \wedge (Gl. B2- 13) \Rightarrow p_{\max} = p_{\max} = \kappa'' \cdot \rho_{DF} \cdot v^2 \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{\xi''} \quad (Gl. B2- 14)$$

$$\Rightarrow p_{\max} = p_{\max} = \kappa'' \cdot \rho_{DF} \cdot v^2 \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{\xi''} \quad (Gl. B2- 15)$$

3) Herleitung der vorgeschlagenen Druckformel - (Gl. 23) in Kapitel 6.2.1.2:

- Grundlegender Zusammenhang - (Gl. 22):

$$K_p'' = 4,5 \cdot Fr^{-1,2} \quad (Gl. B2- 16)$$

- Herleitung der Druckformel - (Gl. 23):

$$(Gl. B2- 9) \wedge (Gl. B2- 16) \Rightarrow \frac{p_{\max}}{\rho_{DF} \cdot v^2} = 4,5 \cdot Fr^{-1,2} \quad (Gl. B2- 17)$$

$$(Gl. B2- 1) \wedge (Gl. B2- 17) \Rightarrow p_{\max} = 4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^2 \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{-1,2} \quad (Gl. B2- 18)$$

$$\Rightarrow p_{\max} = 4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^2 \cdot \left[\frac{v}{(g \cdot h_{fl})^{\frac{1}{2}}} \right]^{-1,2} \quad (Gl. B2- 19)$$

$$\Rightarrow p_{\max} = 4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^2 \cdot \left[v \cdot (g \cdot h_{fl})^{-\frac{1}{2}} \right]^{-1,2} \quad (Gl. B2- 20)$$

$$\Rightarrow p_{\max} = 4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^2 \cdot \left[v \cdot (g \cdot h_{fl})^{-0,5} \right]^{-1,2} \quad (Gl. B2- 21)$$

$$\Rightarrow p_{\max} = 4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^2 \cdot v^{-1,2} \cdot (g \cdot h_{fl})^{-0,5 \cdot (-1,2)} \quad (Gl. B2- 22)$$

$$\Rightarrow p_{\max} = 4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{2-1,2} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6} \quad (Gl. B2- 23)$$

$$\Rightarrow p_{\max} = 4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6} \quad (Gl. B2- 24)$$

4) Herleitung der Relation zwischen der Druckformel und dem Murdruck nach

LICHTENHAHN (1973) - (Gl. 27) in Kapitel 6.2.2.1:

- Murdruck nach LICHTENHAHN (1973) - (Gl. 24):

$$p_{Li} = 7 \div 11 \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h_{fl} \quad (\text{Gl. B2- 25})$$

- Definition der Relation - (Gl. 25):

$$c_{Li} = \frac{p_{\max}}{p_{Li}} \quad (\text{Gl. B2- 26})$$

- Herleitung der Relation:

$$(\text{Gl. B2- 24}) \wedge (\text{Gl. B2- 26}) \Rightarrow c_{Li} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{p_{Li}} \quad (\text{Gl. B2- 27})$$

$$(\text{Gl. B2- 25}) \wedge (\text{Gl. B2- 27}) \Rightarrow c_{Li} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{7 \div 11 \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h_{fl}} \quad (\text{Gl. B2- 28})$$

$$\Rightarrow c_{Li} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF}}{7 \div 11 \cdot \rho_{H_2O}} \cdot \frac{v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{g \cdot h_{fl}} \quad (\text{Gl. B2- 29})$$

$$\Rightarrow c_{Li} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF}}{7 \div 11 \cdot \rho_{H_2O}} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6-1} \quad (\text{Gl. B2- 30})$$

$$\Rightarrow c_{Li} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF}}{7 \div 11 \cdot \rho_{H_2O}} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{-0,4} \quad (\text{Gl. B2- 31})$$

$$\Rightarrow c_{Li} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF}}{7 \div 11 \cdot \rho_{H_2O}} \cdot \frac{v^{0,8}}{(g \cdot h_{fl})^{0,4}} \quad (\text{Gl. B2- 32})$$

$$\Rightarrow c_{Li} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF}}{7 \div 11 \cdot \rho_{H_2O}} \cdot \left[\frac{v^2}{(g \cdot h_{fl})} \right]^{0,4} \quad (\text{Gl. B2- 33})$$

$$\Rightarrow c_{Li} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF}}{7 \div 11 \cdot \rho_{H_2O}} \cdot \left[\left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^2 \right]^{0,4} \quad (\text{Gl. B2- 34})$$

$$\Rightarrow c_{Li} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF}}{7 \div 11 \cdot \rho_{H_2O}} \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{0,8} \quad (\text{Gl. B2- 35})$$

$$(\text{Gl. B2- 1}) \wedge (\text{Gl. B2- 35}) \Rightarrow c_{Li} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF}}{7 \div 11 \cdot \rho_{H_2O}} \cdot Fr^{0,8} \quad (\text{Gl. B2- 36})$$

$$\Rightarrow c_{Li} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF}}{7 \div 11 \cdot \rho_{H_2O}} \cdot Fr^{0,8} \quad (\text{Gl. B2- 37})$$

5) Herleitung der Relation zwischen der Druckformel und dem Murdruck nach WATANABE & IKEYA (1981) - (Gl. 32) in Kapitel 6.2.2.2:

- Murdruck nach WATANABE & IKEYA (1981) - (Gl. 28):

$$p_{W\&I} = \alpha_{W\&I} \cdot \frac{\gamma_{DF} \cdot v^2}{g} \quad (\text{Gl. B2- 38})$$

- Definition der Relation - (Gl. 30):

$$c_{W\&I} = \frac{p_{\max}}{p_{W\&I}} \quad (\text{Gl. B2- 39})$$

- Herleitung der Relation:

$$(\text{Gl. B2- 24}) \wedge (\text{Gl. B2- 39}) \Rightarrow c_{W\&I} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{p_{W\&I}} \quad (\text{Gl. B2- 40})$$

$$(\text{Gl. B2- 38}) \wedge (\text{Gl. B2- 40}) \Rightarrow c_{W\&I} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{\alpha_{W\&I} \cdot \frac{\gamma_{DF} \cdot v^2}{g}} \quad (\text{Gl. B2- 41})$$

$$(\text{Gl. B2- 41}) \wedge (\gamma_{DF} = g \cdot \rho_{DF}) \Rightarrow c_{W\&I} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{\alpha_{W\&I} \cdot \frac{g \cdot \rho_{DF} \cdot v^2}{g}} \quad (\text{Gl. B2- 42})$$

$$\Rightarrow c_{W\&I} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{\alpha_{W\&I} \cdot \rho_{DF} \cdot v^2} \quad (\text{Gl. B2- 43})$$

$$\Rightarrow c_{W\&I} = \frac{4,5}{\alpha_{W\&I}} \cdot \frac{v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{v^2} \quad (\text{Gl. B2- 44})$$

$$\Rightarrow c_{W\&I} = \frac{4,5}{\alpha_{W\&I}} \cdot v^{0,8-2} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6} \quad (\text{Gl. B2- 45})$$

$$\Rightarrow c_{W\&I} = \frac{4,5}{\alpha_{W\&I}} \cdot v^{-1,2} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6} \quad (\text{Gl. B2- 46})$$

$$\Rightarrow c_{W\&I} = \frac{4,5}{\alpha_{W\&I}} \cdot \frac{(g \cdot h_{fl})^{0,6}}{v^{1,2}} \quad (\text{Gl. B2- 47})$$

$$\Rightarrow c_{W\&I} = \frac{4,5}{\alpha_{W\&I}} \cdot \left(\frac{\sqrt{g \cdot h_{fl}}}{v} \right)^{1,2} \quad (\text{Gl. B2- 48})$$

$$\Rightarrow c_{W\&I} = \frac{4,5}{\alpha_{W\&I}} \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{-1,2} \quad (\text{Gl. B2- 49})$$

$$(\text{Gl. B2- 1}) \wedge (\text{Gl. B2- 49}) \Rightarrow c_{W\&I} = \frac{4,5}{\alpha_{W\&I}} \cdot \text{Fr}^{-1,2} \quad (\text{Gl. B2- 50})$$

$$(\text{Gl. B2- 50}) \wedge (\alpha_{W\&I} = 2) \Rightarrow c_{W\&I} = \frac{4,5}{2} \cdot \text{Fr}^{-1,2} \quad (\text{Gl. B2- 51})$$

$$\underline{\underline{\Rightarrow c_{W\&I} = 2,25 \cdot \text{Fr}^{-1,2}}} \quad (\text{Gl. B2- 52})$$

6) Herleitung der Relation zwischen der Druckformel und dem Murdruck nach

Yu (1992) - (Gl. 42) in Kapitel 6.2.2.3:

- „Murdruck“ nach Yu (1992) - (Gl. 34):

$$P_{Yu} = \frac{2\rho_{sed}}{g} \left[\frac{\rho_{H_2O} \cdot \sin \theta \cdot v_*}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right) \right]^2 \quad (\text{Gl. B2- 53})$$

- Definition der Schubspannungsgeschwindigkeit - (Gl. 35):

$$v_* = \sqrt{g \cdot h_{fl} \cdot \sin \theta} \quad (\text{Gl. B2- 54})$$

- Herleitung der Druckgleichung nach Yu (1992) - (Gl. 37):

$$(Gl. B2- 53) \wedge (Gl. B2- 54) \Rightarrow P_{Yu} = \frac{2\rho_{sed}}{g} \left[\frac{\rho_{H_2O} \cdot \sin \theta \cdot \sqrt{g \cdot h_{fl}} \cdot \sin \theta}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right) \right]^2 \quad (Gl. B2- 55)$$

$$\Rightarrow P_{Yu} = \frac{2\rho_{sed}}{g} \left[\frac{\rho_{H_2O} \cdot \sqrt{g \cdot h_{fl}} \cdot \sin^3 \theta}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right) \right]^2 \quad (Gl. B2- 56)$$

$$\Rightarrow P_{Yu} = \frac{2\rho_{sed}}{g} \cdot g \cdot h_{fl} \cdot \sin^3 \theta \left[\frac{\rho_{H_2O}}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right) \right]^2 \quad (Gl. B2- 57)$$

$$(Gl. B2- 57) \wedge (p'_{Yu} = g \cdot P_{Yu}) \Rightarrow p'_{Yu} = 2\rho_{sed} \cdot g \cdot h_{fl} \cdot \sin^3 \theta \left[\frac{\rho_{H_2O}}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right) \right]^2 \quad (Gl. B2- 58)$$

$$\Rightarrow p'_{Yu} = 2\rho_{sed} \cdot g \cdot h_{fl} \cdot \sin^3 \theta \cdot \left[\frac{\rho_{H_2O}}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} \right]^2 \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2 \quad (Gl. B2- 59)$$

$$(Gl. B1- 72) \Rightarrow \rho_{sed} - \rho_{H_2O} = \rho_c \frac{3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f}{3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f + 2(1 - C_b) \cdot \rho_c} - \rho_{H_2O} \quad (Gl. B2- 60)$$

$$\Rightarrow \rho_{sed} - \rho_{H_2O} = \frac{\rho_c \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f) - \rho_{H_2O} \cdot [3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f + 2(1 - C_b) \cdot \rho_c]}{3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f + 2(1 - C_b) \cdot \rho_c} \quad (Gl. B2- 61)$$

$$\Rightarrow \rho_{sed} - \rho_{H_2O} = \frac{\rho_c \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f) - \rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) + 2\rho_c - 2C_b \cdot \rho_c]}{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) + 2\rho_c - 2C_b \cdot \rho_c} \quad (Gl. B2- 62)$$

$$\Rightarrow \rho_{sed} - \rho_{H_2O} = \frac{\rho_c \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f) - \rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) + 2\rho_c]}{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) + 2\rho_c} \quad (Gl. B2- 63)$$

$$(Gl. B1- 96) \wedge (Gl. B2- 63) \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O}) &= & (Gl. B2- 64) \\ &= \frac{2\rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c)}{5\rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c)} \cdot \frac{\rho_c \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f) - \rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) + 2\rho_c]}{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) + 2\rho_c} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O}) = \\ &= \frac{1}{5\rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c)} \cdot \frac{\rho_c \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f) - \rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) + 2\rho_c]}{1} \end{aligned} \quad (Gl. B2- 65)$$

$$\Rightarrow C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O}) = \frac{\rho_c \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f) - \rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) + 2\rho_c]}{5\rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c)} \quad (Gl. B2- 66)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} = \frac{5\rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c)}{\rho_c \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f) - \rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) + 2\rho_c]} \quad (Gl. B2- 67)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} = \frac{5\rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c)}{\rho_c \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f) - [C_b \cdot \rho_{H_2O} \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) + 2\rho_{H_2O} \cdot \rho_c]} \quad (Gl. B2- 68)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} = \frac{5\rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c)}{\rho_c \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2\rho_f) - C_b \cdot \rho_{H_2O} \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 2\rho_c) - 2\rho_{H_2O} \cdot \rho_c} \quad (Gl. B2- 69)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} = \frac{5\rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c)}{3C_b \cdot \rho_{H_2O} \cdot \rho_c + 2\rho_f \cdot \rho_c - 3C_b \cdot \rho_{H_2O}^2 - 2C_b \cdot \rho_{H_2O} \cdot \rho_f + 2C_b \cdot \rho_{H_2O} \cdot \rho_c - 2\rho_{H_2O} \cdot \rho_c} \quad (Gl. B2- 70)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} = \frac{5\rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c)}{\rho_{H_2O} \cdot (3C_b \cdot \rho_c - 3C_b \cdot \rho_{H_2O} - 2C_b \cdot \rho_f + 2C_b \cdot \rho_c - 2\rho_c) + 2\rho_f \cdot \rho_c} \quad (Gl. B2- 71)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} = \frac{5\rho_c + C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c)}{\rho_{H_2O} \cdot (-3C_b \cdot \rho_{H_2O} - 2C_b \cdot \rho_f + 5C_b \cdot \rho_c - 2\rho_c) + 2\rho_f \cdot \rho_c} \quad (Gl. B2- 72)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} = \frac{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot [-3C_b \cdot \rho_{H_2O} - 2C_b \cdot \rho_f + (5C_b - 2) \cdot \rho_c] + 2\rho_f \cdot \rho_c} \quad (Gl. B2- 73)$$

$$\Rightarrow \frac{\rho_{H_2O}}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} = \frac{\rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c]}{\rho_{H_2O} \cdot [-3C_b \cdot \rho_{H_2O} - 2C_b \cdot \rho_f + (5C_b - 2) \cdot \rho_c] + 2\rho_f \cdot \rho_c} \quad (Gl. B2- 74)$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{\rho_{H_2O} \cdot [-3C_b \cdot \rho_{H_2O} - 2C_b \cdot \rho_f + (5C_b - 2) \cdot \rho_c] + 2\rho_f \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c]} \quad (Gl. B2- 75)$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{-3C_b \cdot \rho_{H_2O} - 2C_b \cdot \rho_f + (5C_b - 2) \cdot \rho_c}{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c} + \frac{2\rho_f \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c]} \quad (\text{Gl. B2- 76})$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{(5C_b - 2) \cdot \rho_c - C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c} + \frac{2\rho_f \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c]} \quad (\text{Gl. B2- 77})$$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \\ &= \frac{(5C_b - 2) \cdot \rho_c}{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c} - \frac{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)}{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c} + \frac{2\rho_f \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c]} \end{aligned} \quad (\text{Gl. B2- 78})$$

(Gl. B1- 86)^(Gl. B2- 78) ⇒

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \\ &= \frac{(5C_b - 2) \cdot \rho_c}{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c} - C_b \cdot \frac{\rho_{DF}}{\rho_c} + \frac{2\rho_f \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c]} \end{aligned} \quad (\text{Gl. B2- 79})$$

(Gl. B1- 86) ⇒

$$\Rightarrow \frac{(5C_b - 2) \cdot \rho_c}{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c} = \frac{(5C_b - 2) \cdot \rho_c}{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c} \cdot \frac{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c}{\rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 80})$$

$$\Rightarrow \frac{(5C_b - 2) \cdot \rho_c}{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c} = \frac{5C_b - 2}{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f} \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 81})$$

(Gl. B1- 86) ⇒

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \frac{2\rho_f \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c]} = \\ &= \frac{2\rho_f \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c]} \cdot \frac{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c}{\rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \cdot \rho_{DF} \end{aligned} \quad (\text{Gl. B2- 82})$$

$$\Rightarrow \frac{2\rho_f \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot [C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c]} = \frac{2\rho_f}{\rho_{H_2O} \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 83})$$

(Gl. B2- 79)(Gl. B2- 81)(Gl. B2- 83) ⇒

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{5C_b - 2}{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f} \cdot \rho_{DF} - C_b \cdot \frac{\rho_{DF}}{\rho_c} + \frac{2\rho_f}{\rho_{H_2O} \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 84})$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \left[\frac{5C_b - 2}{3\rho_{H_2O} + 2\rho_f} - \frac{C_b}{\rho_c} + \frac{2\rho_f}{\rho_{H_2O} \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \right] \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 85})$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{\rho_{H_2O} \cdot \rho_c \cdot (5C_b - 2) - C_b \cdot \rho_{H_2O} \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) + 2\rho_f \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 86})$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{5C_b \cdot \rho_{H_2O} \cdot \rho_c - 2\rho_{H_2O} \cdot \rho_c - 3C_b \cdot \rho_{H_2O}^2 - C_b \cdot \rho_{H_2O} \cdot 2\rho_f + 2\rho_f \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 87})$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{-3C_b \cdot \rho_{H_2O}^2 - C_b \cdot \rho_{H_2O} \cdot 2\rho_f + 5C_b \cdot \rho_{H_2O} \cdot \rho_c - 2\rho_{H_2O} \cdot \rho_c + 2\rho_f \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 88})$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{-(3C_b \cdot \rho_{H_2O}^2 + C_b \cdot \rho_{H_2O} \cdot 2\rho_f - 5C_b \cdot \rho_{H_2O} \cdot \rho_c + 2\rho_{H_2O} \cdot \rho_c) + 2\rho_f \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 89})$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{2\rho_f \cdot \rho_c - \rho_{H_2O} \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + C_b \cdot 2\rho_f - 5C_b \cdot \rho_c + 2\rho_c)}{\rho_{H_2O} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 90})$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{2\rho_f \cdot \rho_c - \rho_{H_2O} \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + C_b \cdot 2\rho_f - 5C_b \cdot \rho_c + 2\rho_c)}{\rho_{H_2O} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 91})$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{2\rho_f \cdot \rho_c - \rho_{H_2O} \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + C_b \cdot 2\rho_f - 5C_b \cdot \rho_c + 5\rho_c) + 3\rho_{H_2O} \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 92})$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{3\rho_{H_2O} \cdot \rho_c + 2\rho_f \cdot \rho_c - \rho_{H_2O} \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f - 5C_b \cdot \rho_c + 5\rho_c)}{\rho_{H_2O} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 93})$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \cdot \rho_c - \rho_{H_2O} \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f - 5C_b \cdot \rho_c + 5\rho_c)}{\rho_{H_2O} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 94})$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \left[\frac{(3\rho_{H_2O} + 2\rho_f) \cdot \rho_c}{\rho_{H_2O} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} - \frac{\rho_{H_2O} \cdot (3C_b \cdot \rho_{H_2O} + 2C_b \cdot \rho_f - 5C_b \cdot \rho_c + 5\rho_c)}{\rho_{H_2O} \cdot \rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \right] \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 95})$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \left[\frac{1}{\rho_{H_2O}} - \frac{C_b \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f - 5\rho_c) + 5\rho_c}{\rho_c \cdot (3\rho_{H_2O} + 2\rho_f)} \right] \cdot \rho_{DF} \quad (\text{Gl. B2- 96})$$

$$(Gl. B1- 86) \wedge (Gl. B2- 96) \Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \left[\frac{1}{\rho_{H_2O}} - \frac{1}{\rho_{DF}} \right] \cdot \rho_{DF} \quad (Gl. B2- 97)$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{\rho_{DF} - \rho_{H_2O}}{\rho_{H_2O} \cdot \rho_{DF}} \cdot \rho_{DF} \quad (Gl. B2- 98)$$

$$\Rightarrow \frac{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} = \frac{\rho_{DF} - \rho_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \quad (Gl. B2- 99)$$

$$\Rightarrow \frac{\rho_{H_2O}}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} = \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{DF} - \rho_{H_2O}} \quad (Gl. B2- 100)$$

$$\Rightarrow \left[\frac{\rho_{H_2O}}{C_V \cdot (\rho_{sed} - \rho_{H_2O})} \right]^2 = \frac{\rho_{H_2O}^2}{(\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2} \quad (Gl. B2- 101)$$

$$(Gl. B2- 59) \wedge (Gl. B2- 101) \Rightarrow p'_{Yu} = 2\rho_{sed} \cdot g \cdot h_{fl} \cdot \sin^3 \theta \cdot \frac{\rho_{H_2O}^2}{(\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2} \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2 \quad (Gl. B2- 102)$$

$$\Rightarrow p'_{Yu} = 2\rho_{sed} \cdot \frac{\rho_{H_2O}^2}{(\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2} \cdot g \cdot h_{fl} \cdot \sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2 \quad (Gl. B2- 103)$$

- Definition der Relation - (Gl. 38):

$$c_{Yu} = \frac{P_{\max}}{p'_{Yu}} \quad (Gl. B2- 104)$$

- Herleitung der Relation:

$$(Gl. B2- 24) \wedge (Gl. B2- 104) \Rightarrow c_{Yu} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{p'_{Yu}} \quad (Gl. B2- 105)$$

$$(Gl. B2- 103) \wedge (Gl. B2- 105) \Rightarrow c_{Yu} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{2\rho_{sed} \cdot \frac{\rho_{H_2O}^2}{(\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2} \cdot g \cdot h_{fl} \cdot \sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2} \quad (Gl. B2- 106)$$

$$c_{Yu} = \frac{4,5}{2} \cdot \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{g \cdot h_{fl}} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2} \quad (\text{Gl. B2- 107})$$

$$c_{Yu} = \frac{4,5}{2} \cdot \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6-1} \quad (\text{Gl. B2- 108})$$

$$c_{Yu} = \frac{4,5}{2} \cdot \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{-0,4} \quad (\text{Gl. B2- 109})$$

$$c_{Yu} = \frac{4,5}{2} \cdot \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2} \cdot \frac{v^{0,8}}{(g \cdot h_{fl})^{0,4}} \quad (\text{Gl. B2- 110})$$

$$c_{Yu} = \frac{4,5}{2} \cdot \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2} \cdot \left(\frac{v^2}{g \cdot h_{fl}} \right)^{0,4} \quad (\text{Gl. B2- 111})$$

$$c_{Yu} = \frac{4,5}{2} \cdot \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2} \cdot (\text{Fr}^2)^{0,4} \quad (\text{Gl. B2- 112})$$

$$c_{Yu} = \frac{4,5}{2} \cdot \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2} \cdot \text{Fr}^{0,8} \quad (\text{Gl. B2- 113})$$

$$c_{Yu} = 2,25 \cdot \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{h_{fl}}{d_{50}} + 2,4 \right)^2} \cdot \text{Fr}^{0,8} \quad (\text{Gl. B2- 114})$$

- Definition des Faktors für den mittleren Korndurchmesser Relation - (Gl. 41):

$$k_{d50} = \frac{d_{50}}{h_{fl}} \quad (\text{Gl. B2- 115})$$

- Einsetzen in die Relation:

$$(Gl. B2-114) \wedge (Gl. B2-115) \Rightarrow c_{Yu} = 2,25 \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot \left(\ln \frac{1}{k_{d50}} + 2,4 \right)^2} \cdot Fr^{0,8} \quad (Gl. B2-116)$$

$$\Rightarrow c_{Yu} = 2,25 \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot (\ln 1 - \ln k_{d50} + 2,4)^2} \cdot Fr^{0,8} \quad (Gl. B2-117)$$

$$\Rightarrow c_{Yu} = 2,25 \frac{\rho_{DF} \cdot (\rho_{DF} - \rho_{H_2O})^2}{\rho_{sed} \cdot \rho_{H_2O}^2} \cdot \frac{1}{\sin^3 \theta \cdot (2,4 - \ln k_{d50})^2} \cdot Fr^{0,8} \quad (Gl. B2-118)$$

- Einfluss der Sohlneigung - (Gl. 45):

$$I = \tan \theta \quad (Gl. B2-119)$$

$$\Rightarrow I = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \quad (Gl. B2-120)$$

$$\Rightarrow \sin \theta = I \cdot \cos \theta \quad (Gl. B2-121)$$

$$\Rightarrow \sin \theta = I \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \theta} \quad (Gl. B2-122)$$

$$\Rightarrow \sin^2 \theta = I^2 \cdot (1 - \sin^2 \theta) \quad (Gl. B2-123)$$

$$\Rightarrow \sin^2 \theta = I^2 - I^2 \cdot \sin^2 \theta \quad (Gl. B2-124)$$

$$\Rightarrow \sin^2 \theta + I^2 \cdot \sin^2 \theta = I^2 \quad (Gl. B2-125)$$

$$\Rightarrow \sin^2 \theta \cdot (1 + I^2) = I^2 \quad (Gl. B2-126)$$

$$\Rightarrow \sin^2 \theta = \frac{I^2}{1 + I^2} \quad (Gl. B2-127)$$

$$\Rightarrow \sin \theta = \sqrt{\frac{I^2}{1 + I^2}} \quad (Gl. B2-128)$$

$$\Rightarrow \sin \theta = \frac{I}{\sqrt{1 + I^2}} \quad (Gl. B2-129)$$

$$\Rightarrow \sin^3 \theta = \left(\frac{I}{\sqrt{1+I^2}} \right)^3 \quad (\text{Gl. B2- 130})$$

$$\Rightarrow \sin^3 \theta = \frac{I^3}{(1+I^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{Gl. B2- 131})$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\sin^3 \theta} = \frac{(1+I^2)^{\frac{3}{2}}}{I^3} \quad (\text{Gl. B2- 132})$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\sin^3 \theta} = \sqrt{\frac{(1+I^2)^3}{I^6}} \quad (\text{Gl. B2- 133})$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\sin^3 \theta} = \sqrt{\left(\frac{1+I^2}{I^2} \right)^3} \quad (\text{Gl. B2- 134})$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\sin^3 \theta} = \sqrt{\left(\frac{1}{I^2} + 1 \right)^3} \quad (\text{Gl. B2- 135})$$

- Ableitung nach der Sohleigung: - (Gl. 47)

$$\frac{\partial \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{I^2} + 1 \right)^3} \right\}}{\partial I} = \frac{\partial \left\{ \left(\frac{1+I^2}{I^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\}}{\partial I} \quad (\text{Gl. B2- 136})$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{I^2} + 1 \right)^3} \right\}}{\partial I} = \frac{\partial \left\{ \left(\frac{1+I^2}{I^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\}}{\partial \left\{ \frac{1+I^2}{I^2} \right\}} \cdot \frac{\partial \left\{ \frac{1+I^2}{I^2} \right\}}{\partial I^2} \cdot \frac{\partial I^2}{\partial I} \quad (\text{Gl. B2- 137})$$

$$\frac{\partial \left\{ \left(\frac{1+I^2}{I^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\}}{\partial \left\{ \frac{1+I^2}{I^2} \right\}} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{1+I^2}{I^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Gl. B2- 138})$$

$$\frac{\partial \left\{ \frac{1+I^2}{I^2} \right\}}{\partial I^2} = \frac{\partial \{1+I^2\}}{\partial I^2} \cdot I^2 - (1+I^2) \cdot \frac{\partial I^2}{\partial I^2} \quad (\text{Gl. B2- 139})$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \left\{ \frac{1+I^2}{I^2} \right\}}{\partial I^2} = \frac{I^2 - (1+I^2)}{I^4} \quad (\text{Gl. B2- 140})$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \left\{ \frac{1+I^2}{I^2} \right\}}{\partial I^2} = \frac{I^2 - I^2 - 1}{I^4} \quad (\text{Gl. B2- 141})$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \left\{ \frac{1+I^2}{I^2} \right\}}{\partial I^2} = -\frac{1}{I^4} \quad (\text{Gl. B2- 142})$$

$$\frac{\partial I^2}{\partial I} = 2I \quad (\text{Gl. B2- 143})$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{I^2} + 1 \right)^3} \right\}}{\partial I} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{1+I^2}{I^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(-\frac{1}{I^4} \right) \cdot 2I \quad (\text{Gl. B2- 144})$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{I^2} + 1 \right)^3} \right\}}{\partial I} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{\sqrt{1+I^2}}{I} \cdot \frac{1}{I^4} \cdot 2I \quad (\text{Gl. B2- 145})$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{I^2} + 1 \right)^3} \right\}}{\partial I} = -3 \cdot \frac{\sqrt{1+I^2}}{I^4} \quad (\text{Gl. B2- 146})$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{I^2} + 1 \right)^3} \right\}}{\partial I} = -3 \cdot \sqrt{\frac{1+I^2}{I^8}} \quad (\text{Gl. B2- 147})$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{I^2} + 1 \right)^3} \right\}}{\partial I} = -3 \cdot \sqrt{I^{-8} + I^{-4}} \quad (\text{Gl. B2- 148})$$

7) Herleitung der Relation zwischen der Druckformel und dem Murdruck nach

ARMANINI (1997) - (Gl. 56) in Kapitel 6.2.2.4:

- Murdruck nach ARMANINI (1997) - (Gl. 53):

$$p_{Ar} = 5 \cdot \rho_{DF} \cdot g \cdot h_{fl} \quad (\text{Gl. B2- 149})$$

- Definition der Relation - (Gl. 25):

$$c_{Ar} = \frac{p_{\max}}{p_{Ar}} \quad (\text{Gl. B2- 150})$$

- Herleitung der Relation:

$$(\text{Gl. B2- 24}) \wedge (\text{Gl. B2- 150}) \Rightarrow c_{Ar} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{p_{Ar}} \quad (\text{Gl. B2- 151})$$

$$(\text{Gl. B2- 149}) \wedge (\text{Gl. B2- 151}) \Rightarrow c_{Ar} = \frac{4,5 \cdot \rho_{DF} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{5 \cdot \rho_{DF} \cdot g \cdot h_{fl}} \quad (\text{Gl. B2- 152})$$

$$\Rightarrow c_{Ar} = \frac{4,5}{5} \cdot \frac{v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6}}{g \cdot h_{fl}} \quad (\text{Gl. B2- 153})$$

$$\Rightarrow c_{Ar} = \frac{9}{10} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6-1} \quad (\text{Gl. B2- 154})$$

$$\Rightarrow c_{Ar} = \frac{9}{10} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{-0,4} \quad (\text{Gl. B2- 155})$$

$$\Rightarrow c_{Ar} = \frac{9}{10} \cdot \frac{v^{0,8}}{(g \cdot h_{fl})^{0,4}} \quad (\text{Gl. B2- 156})$$

$$\Rightarrow c_{Ar} = \frac{9}{10} \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{0,8} \quad (\text{Gl. B2- 157})$$

$$\Rightarrow c_{Ar} = \frac{9}{10} \cdot \text{Fr}^{0,8} \quad (\text{Gl. B2- 158})$$

$$\Rightarrow c_{Ar} = 0,9 \cdot \text{Fr}^{0,8} \quad (\text{Gl. B2- 159})$$

8) Herleitung der Relation zwischen Murdruck nach ARMANINI (1997) und der Druckformel nach WATANABE & IKEYA (1981) - (Gl. 59) in Kapitel 6.2.2.5:

- Definition der Relation - (Gl. 58):

$$(Gl. B2- 38) \wedge (Gl. B2- 150) \Rightarrow \frac{p_{Ar}}{p_{W\&I}} = \frac{5 \cdot \rho_{DF} \cdot g \cdot h_{fl}}{\alpha_{W\&I} \cdot \rho_{DF} \cdot v^2} \quad (Gl. B2- 160)$$

- Umformungen zur Herleitung der Formel für die Relation - (Gl. 59):

$$(Gl. B2- 160) \Rightarrow \frac{p_{Ar}}{p_{W\&I}} = \frac{5 \cdot g \cdot h_{fl}}{\alpha_{W\&I} \cdot v^2} \quad (Gl. B2- 161)$$

$$\Rightarrow \frac{p_{Ar}}{p_{W\&I}} = \frac{5}{\alpha_{W\&I}} \cdot \frac{g \cdot h_{fl}}{v^2} \quad (Gl. B2- 162)$$

$$(Gl. B2- 162) \wedge (\alpha_{W\&I} = 2) \Rightarrow \frac{p_{Ar}}{p_{W\&I}} = \frac{5}{2} \cdot \frac{g \cdot h_{fl}}{v^2} \quad (Gl. B2- 163)$$

$$\Rightarrow \frac{p_{Ar}}{p_{W\&I}} = \frac{5}{2} \cdot \left(\frac{\sqrt{g \cdot h_{fl}}}{v} \right)^2 \quad (Gl. B2- 164)$$

$$\Rightarrow \frac{p_{Ar}}{p_{W\&I}} = \frac{5}{2} \cdot \left(\frac{1}{\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}}} \right)^2 \quad (Gl. B2- 165)$$

$$\Rightarrow \frac{p_{Ar}}{p_{W\&I}} = \frac{5}{2} \cdot \left(\frac{1}{Fr} \right)^2 \quad (Gl. B2- 166)$$

$$\Rightarrow \frac{p_{Ar}}{p_{W\&I}} = \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{Fr^2} \quad (Gl. B2- 167)$$

$$\Rightarrow p_{Ar} = \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{Fr^2} \cdot p_{W\&I} \quad (Gl. B2- 168)$$

