



# Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

## BELASTUNG EINES MURBRECHERS: ABGELEITET AUS LABORVERSUCHEN

### IMPACT FORCES ON A DEBRIS FLOW BREAKER: DERIVED FROM LABORATORY EXPERIMENTS

Gerhard Holzinger<sup>1</sup> und Johannes Huebl<sup>2</sup>

#### ZUSAMMENFASSUNG

Aus Modellversuchen, bei denen die Drücke auf Modelle von Murbrechern gemessen wurden, konnte ein Zusammenhang zwischen der Froude-Zahl und den auftretenden Druckspitzen gefunden werden. Auf Basis dieser Auswertung wurde eine einfache empirische Formel zur Berechnung der maximal am Bauwerk auftretenden Druckspitzen abgeleitet. In diese hier vorgeschlagene Formel gehen die Dichte des Murmaterials, die Fließtiefe und die Geschwindigkeit ein. Dies sind Größen, welche sich – zumindest in Größenordnungen – abschätzen lassen. Bei Vergleich mit gängigen Methoden zur Ermittlung der Bauwerksbelastung zeigt sich, dass die vorgeschlagene Formel bei niedrigen Froude-Zahlen mit den bisher getroffenen Annahmen gute Übereinstimmung zeigt, jedoch bei hohen Froude-Zahlen weitaus höhere Drücke ergibt.

**Key words:** Muren, Sperrenbemessung, Modellversuche

#### ABSTRACT

From model tests, with which the pressure occurring at models of debris flow breakers were measured, a dependence between the Froude number and the arising pressure peaks could be found. On the basis of this evaluation a simple empirical formula was derived for the computation of the pressure peaks maximally arising at the structure. This formula suggested here, needs only the density of the debris flow material, the flow depth and the velocity. These are values, which can easily, at least in orders of magnitude, be estimated. In comparison with usual methods to the determination the impact on structures, it shows up that the suggested formula with low Froude numbers shows good correspondence with the so far used methods, however with high Froude numbers far higher pressure values results in it.

**Key words:** Debris-flow, checkdam design, model experiments

---

1 Senior Researcher, Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen an der Universität für Bodenkultur Wien, Peter Jordanstrasse 82, 1190 Wien, Österreich (Tel.: +43-1-47654-4378; Fax: +43-1-47654-4390; email: gerhard.holzinger@boku.ac.at)

2 Institutsvorstand, Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen an der Universität für Bodenkultur Wien, Peter Jordanstrasse 82, 1190 Wien, Österreich (Tel.: +43-1-47654-4352; Fax: +43-1-47654-4390; email: johannes.huebl@boku.ac.at)

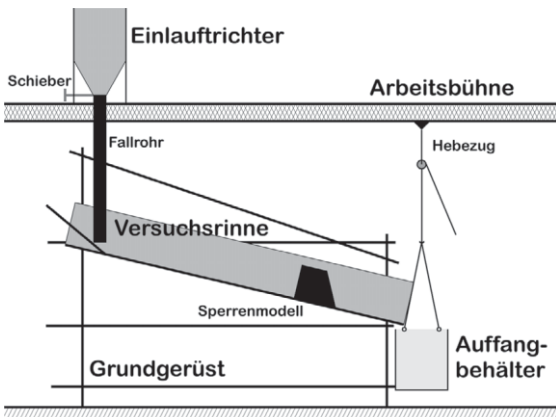
## EINLEITUNG

Zur Bemessung von Bauwerken zum Schutz vor Muren ist die dementsprechende Druckbelastung die entscheidende Eingangsgröße. Im Gegensatz zum Wasserdruck, wo es umfangreiche Berechnungsmethoden aus der Gerinnehydraulik gibt, existieren keine exakten Lastannahmen für diesen Belastungsfall bei Wildbachsperrern. Es wird zwar in der Praxis für Belastung durch eine Mure der 7 – 11-fachen statischen Wasserdruck angesetzt (LICHTENHAHN, 1973). Dabei handelt es sich jedoch nur um eine Faustformel. Weiters ist zu beachten, dass dieser Vorschlag für bereits - teilweise oder ganz - verlandete Vollwandsperrern gemacht wurde. Seit den 70er Jahren des 19. Jahrhunderts sind in Österreich im Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung offene Bauwerke zur Geschiebebewirtschaftung in Verwendung, in den 80er Jahren taucht erstmals der Bautyp Murbrecher auf. Mittlerweile existieren solche Bauwerke in den meisten Ländern, in denen solche Naturgefahren relevant sind. Daher ist es von enormer Wichtigkeit, Grundlagen zur Dimensionierung solcher Bauwerke zu schaffen. Um Erkenntnisse über die auftretenden Belastungen bei der Beaufschlagung eines Murbrechers zu gewinnen, wurden kleinmaßstäbliche Modellversuche durchgeführt.

## VERSUCHSANORDNUNG

### Aufbau der Anlage

Die Versuchsanlage wurde im Wasserbaulabor des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau (IWHW) an der Universität für Bodenkultur 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



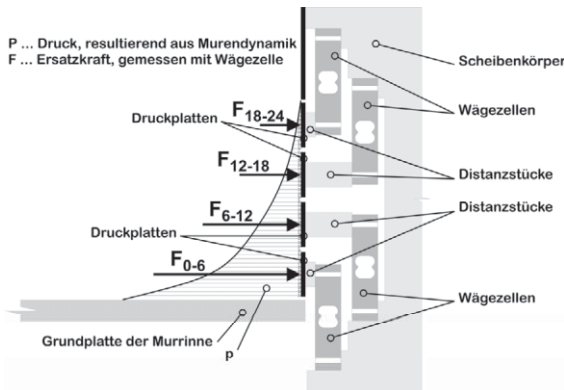
Versuchsmaterial zur Murrinne geführt. Am Ende der Rinne wird das Material in einem Auffangbehälter gesammelt. Die Versuchsrinne wurde aus mehrschichtverleimten Schaltafeln aufgebaut. Im Bereich des Sperrmodells wurde eine Seitenwand aus Plexiglas ausgeführt, um Videoaufnahmen der Versuche zu ermöglichen. Die konstruktiven Versteifungen wurden aus Bauholz ausgefertigt.

Abb. 1: Aufbau der Versuchsanlage

Fig. 1: Set up of the experiment facilities

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.

Zur Messung der Abflusstiefe kommen Ultraschallsensoren zum Einsatz. Es handelt sich um temperaturkompensierte Sensoren mit Einkopfsystem und Analogausgang. 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. Auf diese Weise kann der auf die Sperre auftretende Druck in vier Höhen in hoher zeitlicher Auflösung gemessen werden. 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.

**Abb. 2:** Schema der Druckmessung  
**Fig. 2:** Scheme of the pressure measurement

## Versuchsmaterial

Für die Modellversuche wurde die „Standard Debris Flow Mixture“ definiert. Dazu wurden die Materialeigenschaften von verfügbaren natürlichen Murenabgänge gesammelt und die entscheidenden rheologischen Parameter erhoben (STEINWENDTNER et al., 1997; HÜBL & STEINWENDTNER, 1999; HÜBL & STEINWENDTNER, 2000). 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 bis 40 Gewichtsprozent 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. 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.

**Tab. 1:** Bestandteile des verwendeten Hafnerlehms  
**Tab. 1:** Components of the used potter's clay

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

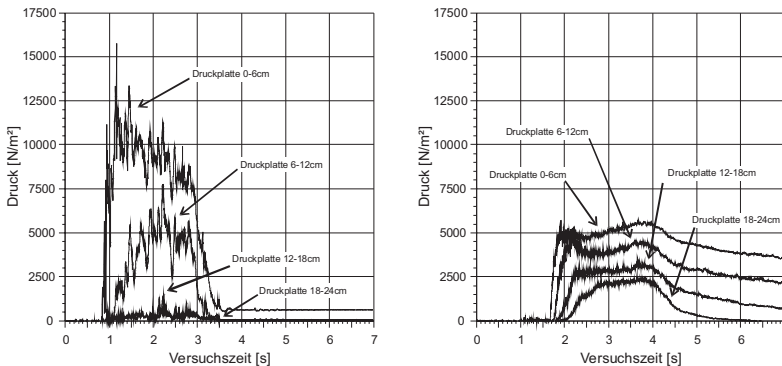
## Versuchsdurchführung

Aus vorangehenden Probeversuchen wurde die ideale Konfiguration der Versuchsanlage ermittelt. Es wurden dann mit 100 l Murmaterial und 23,7 % Neigung ca. 100 Einzelversuche durchgeführt. Diese Versuchsannahmen decken 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.

## DRUCKBELASTUNG AM BAUWERK

Aus den bei den Versuchen gemessenen Druckverläufen wurde die maximal aufgetretenen Druckspitzen für jeden Versuch ermittelt (Abb. 3). Diese Druckspitzen wurden danach auf Regelmäßigkeiten und Zusammenhänge untersucht und anderen Versuchsdaten gegenübergestellt. Dabei konnte eine Abhängigkeit der Druckspitze von der Froude-Zahl gefunden werden.



**Abb. 3:** Beispiel für den Druckverlauf bei den Versuchen (Versuche: MV0411-01 links, MV0514-06 rechts)  
**Fig. 3:** Example for the temporal pressure distribution with the experiments (Experiments: MV0411-01 left, MV0514-06 right)

### Maximale Druckspitze am Bauwerk in Abhängigkeit von der Froude-Zahl

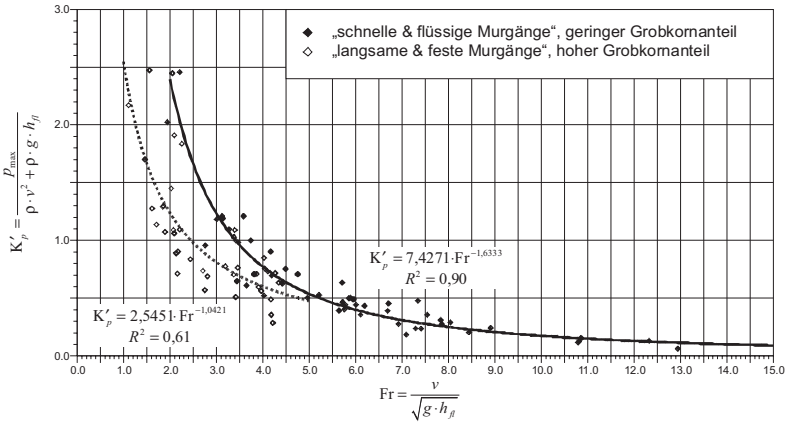
Bei der Betrachtung der maximal am Bauwerk auftretenden Druckspitze wurde nach einheitenlosen Kennzahlen gesucht, welche das Fließverhalten und die auftretenden Druckspitzen beschreiben. Zur Beschreibung des Fließverhaltens wurde die Froude-Zahl gewählt, welche den Zusammenhang von Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit beschreibt. Zur einheitenlosen Darstellung des Druckes wurde zwei Druckfaktoren

$$K'_p = \frac{p_{\max}}{\rho v^2 + \rho g h_{fl}} \quad (1)$$

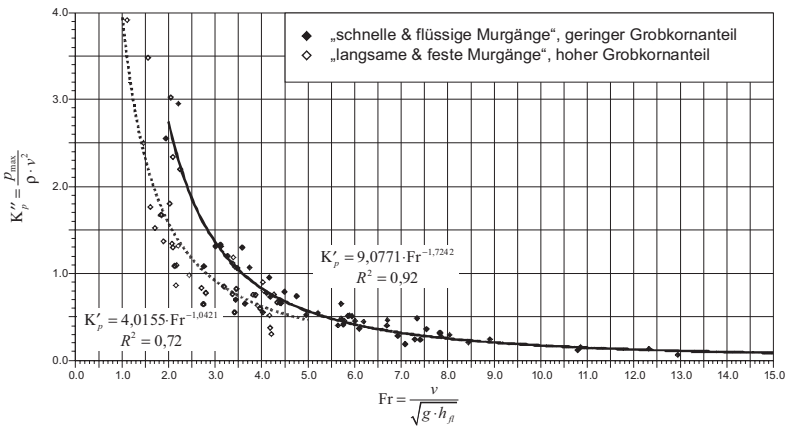
und

$$K''_p = \frac{p_{\max}}{\rho v^2} \quad (2)$$

definiert, welche das Verhältnis aus gemessenem und theoretischem Druck beschreiben. Dabei bedeutet  $p_{\max}$  die maximal gemessene Druckspitze [N/m<sup>2</sup>],  $\rho$  die Dichte des Murmaterials [kg/m<sup>3</sup>],  $g$  die Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>],  $v$  die Frontgeschwindigkeit [m/s] und  $h_{fl}$  die Fließtiefe [m]. In der Folge wurden diese beiden einheitenlosen Kennzahlen gegenübergestellt und nach Gesetzmäßigkeiten untersucht.



**Abb. 4:** Zusammenhang zwischen Froude-Zahl und einheitenlosem Druckfaktor  $\mathbf{K}'_p$   
**Fig. 4:** Relationship between Froude-number and dimensionless pressure coefficient  $\mathbf{K}'_p$



**Abb. 5:** Zusammenhang zwischen Froude-Zahl und einheitenlosem Druckfaktor  $\mathbf{K}''_p$   
**Fig. 5:** Relationship between Froude-number and dimensionless pressure coefficient  $\mathbf{K}''_p$

Dabei zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen diesen einheitenlosen Zahlen durch folgende Potenzformeln beschrieben werden kann (Abb. 4 und Abb. 5).

$$\mathbf{K}'_p = \kappa' \cdot \text{Fr}^{\xi'} \quad (3)$$

und

$$\mathbf{K}''_p = \kappa'' \cdot \text{Fr}^{\xi''} \quad (4)$$

Setzt man nun die Definition der Druckfaktoren  $\mathbf{K}'_p$  und  $\mathbf{K}''_p$  sowie der Froude-Zahl in diese ein, ergeben sich nach Umformung für die maximale Druckspitze die Gleichungen

$$P_{\max} = \kappa' \cdot \rho \cdot \left( v^2 + g \cdot h_f \right) \cdot \left( \frac{v}{\sqrt{g \cdot h_f}} \right)^{\xi'} \quad (5)$$

und

$$p_{\max} = \kappa'' \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \left( \frac{v}{\sqrt{g \cdot h_{fl}}} \right)^{\xi''} \quad (6)$$

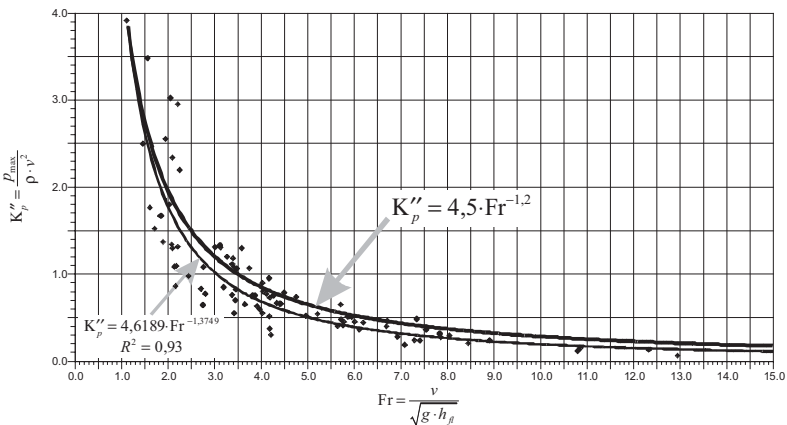
mit den Koeffizienten  $\kappa'$  und  $\kappa''$  sowie den Exponenten  $\xi'$  und  $\xi''$ .

Bei der Auswertung der Versuchsdaten stellte sich heraus, dass klar zwischen zwei Arten von Murgängen unterschieden werden kann. Eine eindeutige Trennung ist möglich zwischen schnellen und flüssigen Murgängen und festen und langsamen Murgängen. In Tabelle 1 sind Werte für die beiden Parameter der Druckformel für die beiden Typen von Murgängen angegeben.

**Tab. 1:** Werte für die Parameter der Druckgleichungen  
**Tab. 1:** Values for the parameters of the pressure equations

Dynamisches Verhalten	Anteil an groben Feststoffen	$\kappa'$	$\kappa''$	$\xi'$	$\xi''$
„schnell & flüssig“	gering	7,4271	9,0771	-1,6333	-1,7242
„langsam & fest“	hoch	2,5451	4,0155	-1,0421	-1,3422

Da diese Auswertungen nur auf Modellversuchen beruhen und der Vergleich mit gemessenen Drücken bei natürlichen Murabgängen noch aussteht, wurde auch versucht, eine einfachere Form für den Druck an Murbrechern zu entwickeln. Dazu wurde der Druckfaktor ohne Unterscheidung zwischen verschiedenen Typen von Murgängen der Froude-Zahl gegenübergestellt (Abb. 6).



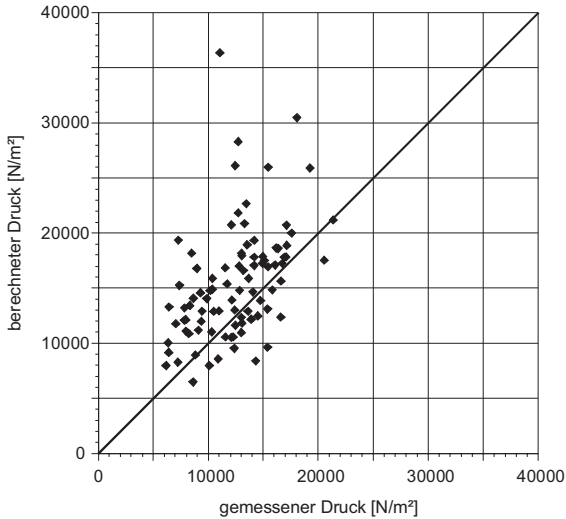
**Abb. 6:** Zusammenhang zwischen Froude-Zahl und einheitenlosem Druckfaktor  $K_p''$  für alle Versuche  
**Fig. 6:** Relationship between Froude-number and dimensionless pressure coefficient  $K_p''$  for all experiments

Da diese Druckformel nur eine Annäherung der maximal auftretenden Drücke darstellt, wurden der Koeffizient und der Exponent abgerundet, wodurch sich die vereinfachte allgemeine Druckformel

$$p_{\max} = 4,5 \cdot \rho \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{fl})^{0,6} \quad (7)$$

ergibt. Mit dieser Formel wurde für alle durchgeführten Modellversuche der Druck aus den gemessenen Werten Geschwindigkeit und Fließtiefe sowie der bekannten Dichte des

verwendeten Materials berechnet (Abb. 7). Man kann erkennen, dass prinzipiell eine gute Übereinstimmung besteht, allerdings liegen die berechneten Werte etwas über den gemessenen. Dies kommt daher, dass bei der Herleitung der Druckformel der Koeffizient und Exponent so gewählt wurde, dass, um zusätzliche Sicherheit zu erhalten, der Druck leicht überschätzt wird.



**Abb. 7:** Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Druckspitzen für alle Versuche  
**Fig. 7:** Comparison of measured and calculated pressure peaks for all experiments

### Vergleich der Ergebnisse mit Literaturangaben

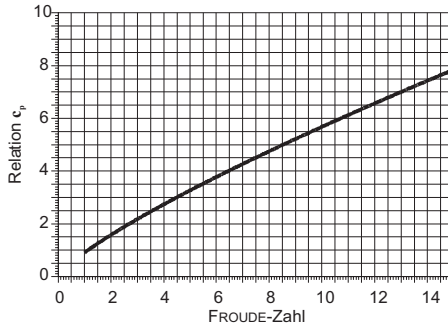
In der Literatur wurden mehrere Möglichkeiten gefunden, den Murdruck zu berechnen. LICHTENHAHN (1973) schlägt pauschal den 7- bis 11-fachen hydrostatischen Wasserdruck als Lastannahme für Murstoß vor. Eine Formel für den Druck an Bauwerken findet sich bei ARMANINI (1997). Der dynamische Druck wird dabei in der Form

$$p = 4 \cdot \rho \cdot g \cdot h_{fl} \tag{8}$$

angegeben wird, wobei vorgeschlagen wird, zum dynamischen Druck den statischen zu addieren. Dadurch ergibt sich eine Berechnungsmethode, bei der der Murdruck in der Mitte des von LICHTENHAHN (1973) vorgeschlagenen Bereichs liegt. Daher soll im weiteren nur die Druckformel nach ARMANINI (1997) betrachtet werden. Setzt man die in dieser Arbeit vorgeschlagene Druckformel in Relation zur dieser Formel so ergibt sich mit

$$c_p = \frac{9}{10} \cdot \frac{v^{0,8}}{(g \cdot h_{fl})^{0,4}} \tag{9}$$

eine Abhängigkeit von der Froude-Zahl, welche in Abb. 7 dargestellt ist.



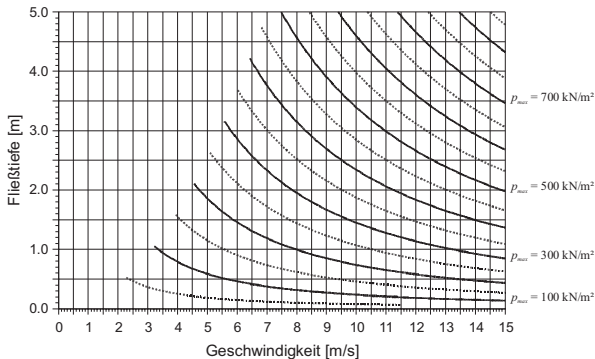
**Abb. 8:** Abhängigkeit der Relation zwischen der vorgeschlagenen Druckformel und jener nach Armanini (1997) von der Froude-Zahl

**Fig. 8:** Dependence of the relation between the suggested pressure formula and that of Armanini (1997) on the Froude-Zahl

Es zeigt sich, dass mit steigender Froude-Zahl, die hier vorgeschlagene Druckformel deutlich über der nach ARMANINI (1997) liegt. Dies ist damit zu begründen, dass im Bereich hoher Froude-Zahlen eine niedrige Fließtiefe aber hohe Fließgeschwindigkeit vorliegt. Betrachtet man die Arbeit von ARMANINI (1997) genauer, so zeigt sich, dass die nur von der Fließtiefe abhängige Formel aus einer theoretischen Annahme abgeleitet wurde, wo in eine von der Frontgeschwindigkeit abhängige Druckbeziehung eine Zusammenhang zwischen Fließtiefe und Frontgeschwindigkeit eingesetzt wurde. Es wird erwähnt, dass dieser für Verhältnisse, wo sehr hohe Geschwindigkeiten auftreten seine Gültigkeit verliert. Dies mag als Erklärung dafür dienen, dass bei sehr hohen Froude-Zahlen eine starke Abweichung zwischen den beiden Formeln auftritt.

### Druckberechnung nach der vorgeschlagenen Druckformel

Um einen Eindruck zu erhalten, welche Größenordnung an Drücken bei der Anwendung dieser neuen Druckformel auftreten, wurde für fiktive Annahmen von Fließtiefe und Geschwindigkeit der Druck nach dieser Formel berechnet (Abb. 8).



**Abb. 9:** Nach der vorgeschlagenen Formel berechnete Druckspitzen bei einer Materialdichte von 2150 kg/m<sup>3</sup>

**Fig. 9:** Pressure peaks, calculated by the suggested formula with a material density of 2150 kg/m<sup>3</sup>

## DISKUSSION UND AUSBLICK

Es wird hier eine Formel zur Berechnung der maximal an einem Murbrecher auftretende Druckspitze vorgeschlagen. Die Überprüfung dieser Formel zeigt, dass die berechneten Druckspitzen durchaus sinnvolle Werte darstellen. Kritisch muss jedoch angemerkt werden, dass die Formel nur auf Basis von Daten aus Modellversuchen entwickelt wurde. Um eine allgemein gültige Formel zur Anschätzung der Druckbelastung an Murbrechern zu erhalten, ist es unbedingt nötig, Messdaten aus natürlichen Murgängen zu erhalten. Da die Versuche nur mit einem Teilbereich des in der Natur möglichen Murmaterials durchgeführt wurden, sollten noch weitere Versuchsreihen mit verändertem Material angelegt werden. Zusätzlich zu anderen Materialzusammensetzungen fehlen auch noch Versuche mit anderen Neigungen. Durch weitere Versuche ist vor allem der Bereich für Froude-Zahlen unter 1 abzudecken.

Der Vergleich mit den zur Zeit in der Praxis üblichen Methode der Lastanschätzung nach LICHTENHAHN (1973) sowie der Druckformel nach ARMANINI (1997) zeigt für langsame Murgänge gute Übereinstimmung. Hier muss angemerkt werden, dass ARMANINI (1997) vorschlägt, die Gerinnetiefe, bzw. Sperrenhöhe in die Formel einzusetzen. In der Praxis der Wildbachverbauung wird bei der Anwendung der Methode nach LICHTENHAHN (1973) meist ebenfalls die Sperrenhöhe als Bezug für den hydrostatischen Wasserdruck herangezogen. Dies gleicht aus, dass für Muren mit hoher Froude-Zahl, welche nach der neuen Druckformel weitaus höhere Drücke errechnet werden als bei den klassischen Methoden, da bei solchen Muren sehr niedrige Fließtiefen auftreten. Dadurch kommen die Drücke, welche mit der vorgeschlagenen Druckformel berechnet werden in jenem Größenordnungsbereich zu liegen, der momentan in der Praxis zur Bemessung von Murbrechern angesetzt wird.

## LITERATUR

- Armanini, A. (1997): "On the Dynamic Impact of Debris Flows." in *Recent Developments on Debris Flows, Lecture Notes in Earth Sciences 64*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Santa Clara Singapore, Tokyo 1997
- Hübl, J., Holzinger, G. (2003): "Kleinmaßstäbliche Modellversuche zur Wirkung von Murbrechern", *WLS Report 50 / Band 2*, Universität für Bodenkultur Wien (unveröffentlicht)
- Hübl, J., Steinwendtner, H. (2000): "Estimation of rheological properties of viscous debris flows using a conveyer 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 conveyer belt." *European Geophysical Society (Ed.): Geophysical Research Abstracts*, Vol. 1, 4, 875.
- Lichtenhahn, C. (1973): "Die Berechnung von Sperren in Beton und Eisenbeton." *Kolloquium über Wildbachsperren, Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien*, Heft. 102, 91-127.
- 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 1997, 91-98.
- Steinwendtner, H. (1997): „Untersuchungen zur Murendynamik.“. *Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien*, Wien 1997.