

Hydromechanische Untersuchung der Schwallwellen infolge Setzungsfließbrutschungen

Kurzfassung

Die ehemaligen Abraumkippen der heute wassergefüllten Tagebaurestlöcher in der Lausitz und im Mitteldeutschen Raum neigen zu Setzungsfließbrutschungen, wobei gefährliche Schwallwellen entstehen können. Ausgehend von den Ergebnissen der bodenmechanischen Modellierung an der TU Bergakademie Freiberg wurden hydraulische Modellversuche mit einem speziellen Wellengenerator durchgeführt. Die entstehenden Wellen sind Einzelwellen oder Gruppen von Einzelwellen, denen teilweise eine Sunkerscheinung folgt. Als Ergebnis der hydraulischen Untersuchung entstand eine empirische Formel zur Abschätzung der Wellengröße und der Auflaufhöhe am gegenüberliegenden Ufer. Weitere Untersuchungen sollen mit einem numerischen Modell durchgeführt werden.

Abstract

Hydraulic investigation of waves due to landslides (rapid flow slides)

Dumps of the former open-cut minings in the area Lausitz und Northwest Saxonia, which are nowadays lakes, often tend to rapid flow slides due to liquefaction, which are combined with dangerous surge waves. Based on results of a geomechanical model of the Freiberg University of Technology (Bergakademie) the characteristics of the resulting waves were analysed by means of scale modelling with a special type of wave generator. The resulting waves are solitary waves or groups of solitary waves, sometimes followed by a negative surge. An empirical formula to predict wave high and run-up was developed. Further investigations shall be made by means of a numerical model.

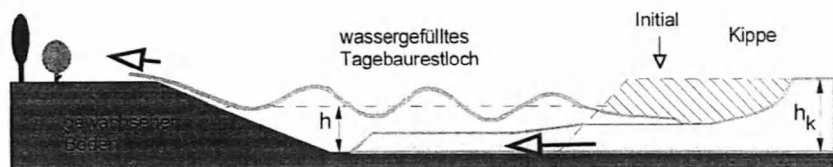


Bild 1: Prinzip der Wellenbildung infolge Setzungsfließbrutschungen an Tagebaurestlöchern.

1 Einführung

Die Folgelandschaften des Braunkohlebergbaues der Lausitz und des Mitteldeutschen Raumes sind von großen Tagebaurestlöchern geprägt, die sich nun, nach Beendigung der Kohleförderung, wieder mit Wasser füllen. Diese entstehenden Seen werden teilweise von Böschungen begrenzt, die aus unverdichtet geschüttetem Kippenmaterial, dem Abraum des Tagebaubetriebes, bestehen. Im wassergesättigten Zustand, der durch den Grundwasseranstieg erreicht wird, neigen diese Böschungen zu Setzungsfließrutschungen. Dabei können plötzlich größere Böschungsabschnitte in den Restlochsee hineinrutschen und meterhohe Wellen erzeugen. Wenn diese Wellen auf gegenüberliegende Ufer auflaufen, können sie verheerende Felsstürze, Hangrutschungen, Lawinen und Eis- oder Geröllniedergänge in Gewässer werden seit langer Zeit von der Menschheit beobachtet. Aufgrund der in der Vergangenheit entstandenen Schäden und des Gefahrenpotentials instabiler Ufer erfolgten vielfach Untersuchungen dieser Problematik (z. B. MILLER 1960, Schnitter 1972, Neuhauser 1979, HUBER 1980 u. a.).

Die Wellenbildung bei den genannten Rutschungsarten unterscheidet sich von der bei Setzungsfließrutschungen aufgrund der folgenden Besonderheiten. Bei Setzungsfließrutschungen finden an der Grenzfläche zwischen Wasser und Rutschkörper nur geringe Durchmischungsprozesse statt. Man kann sie deshalb zu den Rutschungen zählen, bei denen ein kompaktes Volumen aufgrund geologischer Schichtungen in das Gewässer hineingleitet und in erster Linie durch die plötzliche Wasserverdrängung wirksam wird. Das Setzungsfließen findet teilweise oder vollständig unter Wasser statt. Deshalb erfolgt neben der plötzlichen Volumenverdrängung auch die Freigabe eines Volumens unterhalb des Wasserspiegels. Weiterhin findet sowohl das Beschleunigen der rutschenden Masse als auch deren Abbremsen unter Wasser statt. Bei vielen anderen Massenstürzen wird hingegen mit guter Näherung davon ausgegangen, daß die Masse mit einer konstanten Geschwindigkeit in das Gewässer eintaucht.

Die bekannten Modelle der Wellenbildung infolge Rutschungsvorgängen lassen sich somit nicht befriedigend anwenden, und eine allgemeine Theorie für Wellen, die bei Rutschungsvorgängen entstehen, existiert bisher nicht.

Die Wellenbetrachtung läßt sich in die drei Phasen Entstehung, Ausbreitung und Auflaufen der Wellen aufteilen. Im Prozeß der Wellenentstehung erfolgt die teilweise Umwandlung der mechanischen Energie der rutschenden Masse in Wellenenergie und die Masseverdrängung. Daran schließt sich der Energie- und Massetransport während der Wellenausbreitung an. Beim Auftreffen der Wellen auf Ufer oder Bauwerke laufen sie auf bzw. über und können noch in großer Entfernung vom Entstehungsort Schäden bewirken.

Im folgenden soll lediglich die erste Phase ausführlicher dargestellt werden, bezüglich der weiteren Phasen wird auf die Literatur verwiesen. Da die Wellen-

ausbreitung und das Auf- bzw. Überlaufen nicht mehr direkt mit der Rutschung zusammenhängen, sondern nur noch von der entstandenen Welle und den Gewässermerkmalen charakterisiert werden.

2 Theoretische Betrachtungen zur Wellenentstehung

Unter der Wellenentstehung versteht man die Phase vom Beginn der Störung des Normalwasserspiegels bis zur Ausbildung der Wellen in einer über einen gewissen Zeitraum stabilen (wenig veränderlichen) Gestalt. Dabei legt die Welle unter Flachwasserbedingungen bereits einen Weg in der Größenordnung der 100fachen Ruhewassertiefe zurück.

Beim plötzlichen Eintauchen eines Körpers in ein Gewässer wird Wasser verdrängt. Dabei hängt es von der Geschwindigkeit und der Querschnittsfläche des Körpers ab, wieviel Wasser pro Zeiteinheit verdrängt wird.

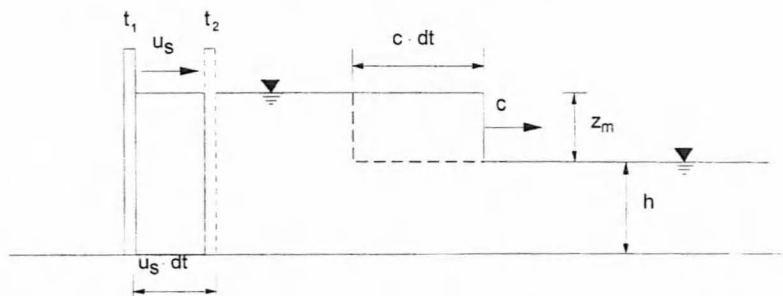


Bild 2: Definitionsskizze für die Wellenbildung infolge der Bewegung einer Wand.

Man kann diesen Vorgang physikalisch einfach beschreiben, wenn man annimmt, daß die Wasserverdrängung durch die horizontale Bewegung einer vertikalen Begrenzungsfläche mit gleichförmiger Geschwindigkeit u_s erfolgt (Bild 2). Werden eine hydrostatische Druckverteilung und ein stehendes Gewässer vorausgesetzt, folgen aus der Kontinuitätsgleichung und der Kräftegleichgewichtsbedingung (bzw. dem Impulssatz) die Geschwindigkeit c und die Höhe z_m einer monoklinen Schwallwelle (vgl. MILLER 1968):

$$c = \sqrt{g \cdot h} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot r \cdot (r+1)} = \sqrt{g \cdot \left(h + \frac{3}{2} \cdot z_m + \frac{z_m^2}{2 \cdot h} \right)} \quad \text{mit } r = \frac{h + z_m}{h} \quad (1)$$

$$0 = (r-1) \cdot \sqrt{\frac{r+1}{2 \cdot r}} - \frac{u_s}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (2)$$

mit der Ausgangswassertiefe h und der Wandgeschwindigkeit u_s . Dasselbe Ergebnis erhält man für die plötzliche Durchflußänderung bei Gerinneströmungen (vgl. MARTIN 1989, RÖHNER 1970).

Praktisch löst sich diese monokline Schwallwelle für bezogene Schwallhöhen $z_m/h < 0,3$ in eine Anzahl von Einzelwellen auf (MARTIN 1989), wobei sich maximale Wasserspiegelauslenkungen von $1,5 \cdot z_m$ ergeben. Für $z_m/h > 0,78$ bildet sich bei der monoklinen Welle eine brandende Front aus. Dabei bleibt die stufenförmige Gestalt nahezu erhalten (Bore). Im Übergangsbereich zwischen Einzelwelle und Bore sind Einzelwellen mit brechender Krone zu beobachten. Modellversuche u. a. von MILLER 1968 bestätigen die Zulässigkeit der vereinfachenden Annahmen beim Modell der bewegten Wand. RÖHNER 1970 untersuchte experimentell Böschungsrutschungen. Er benutzte zur Wellenerzeugung eine geneigte Begrenzungsfläche, die sich horizontal bewegte bzw. um einen Drehpunkt kippte (Bild 3). Die Meßergebnisse stimmten ebenfalls mit der Theorie der Gleichungen (1) und (2) überein.

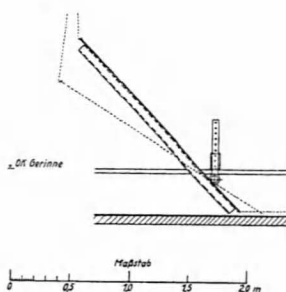


Bild 3: Der von RÖHNER 1970 benutzte Wellengenerator (vertikaler Schnitt).

Wellen, die durch Wasserverdrängung ausgelöst wurden, transportieren neben der Energie auch Masse. Sie zählen damit zu den Translationswellen und besitzen die Gestalt von Einzelwellen(-gruppen) oder brandenden Schwallwellen (Bore).

eitere Ansätze zur Beschreibung von Wellen infolge Rutschungsvorgängen sind in MARTIN 1996 zusammenfassend dargestellt.

3 Versuchsanlage

Im Hubert-Engels-Laboratorium wurde in einem 30 m langen und 0,8 m breiten Wellenkanal ein Wellengenerator und eine Auflaufböschung installiert. Die Wellenmaschine besteht aus drei Platten, welche durch Gelenke verbunden sind, und einem Antriebsmechanismus (Bild 4).

Der zeitliche Verlauf des bodenmechanischen Prozesses der Setzungsfließbruchung wurde für eine Vielzahl von Fällen durch die TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik numerisch simuliert (JENNRICH 1996, VOGT 1991). Als Ergebnisse der bodenmechanischen Modellierung standen für die hydraulischen Untersuchungen die Böschungsgeometrie sowie das Vorgriff- und das Rückgriffvolumen (V_v , V_r) zu verschiedenen Zeitpunkten der Rutschung zur Verfügung (Bild 5). Das Vorgriffvolumen ist das im Verlauf einer Rutschung in den Wasserkörper hineindringende Volumen. Das Rückgriffvolumen entsteht dabei wegen der Massenerhaltung im oberen Böschungsbereich, wobei jeweils nur das unter dem Wasserspiegel befindliche Volumen für die Wellenbildung relevant ist.

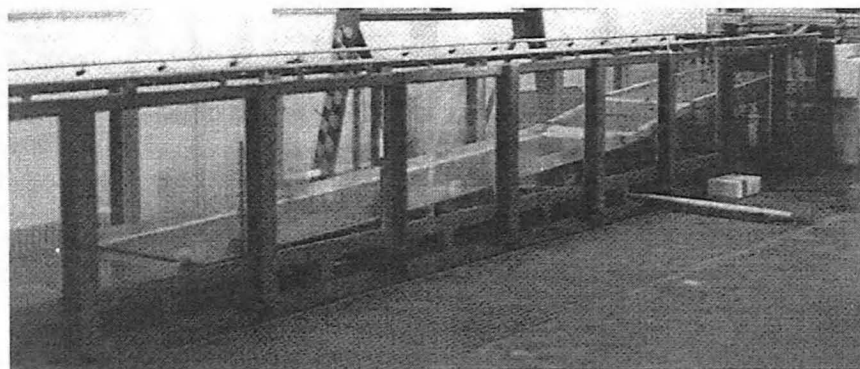


Bild 4: Der Wellengenerator im Wellenkanal des Hubert-Engels-Laboratoriums.

Der Wellengenerator ermöglicht es, mittels einer elektronischen Kurvenscheibensteuerung, die zeitliche Zunahme des Vorgriffvolumens bei einer Rutschung sehr exakt nachzubilden und somit eine entsprechende Welle zu erzeugen. Das Rückgriffvolumen ist durch geometrische Zwänge an das Vorgriffvolumen gekoppelt. Die Kinematik der Böschungsoberfläche läßt sich durch eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung in der ersten Phase und eine gleichmäßig verzögerte Bewegung in der zweiten Phase charakterisieren. Gemessen wurden die Wasserstandsganglinien an verschiedenen Orten sowie die Auflauhöhe auf eine Gegenböschung.

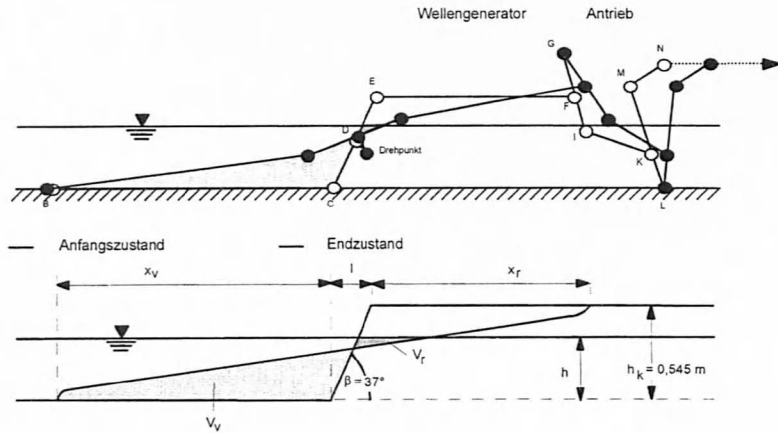


Bild 5: Skizze des Wellengenerators im Hubert-Engels-Laboratorium und Definitionen (überhöhte Darstellung).

Bei den Versuchen wurde der Wasserstand zwischen einem Viertel und der vollen Kippenhöhe ($\frac{1}{4} \cdot h_k < h < h_k$) variiert. In einer weiteren Versuchsserie wurden auch Unterwasserrutschungen bei Wasserständen von $h = 1,125 \cdot h_k$ und $h = 1,25 \cdot h_k$ durchgeführt. Das Vorgriffvolumen und die Dauer der Rutschung wurden in den Bereichen $0,2 < V_v / (b \cdot h^2) < 9$ und $5,6 < t_{\text{end}} \cdot \sqrt{g/h} < 24$ variiert. Die Bewegung des Wellengenerators erfolgte im ersten Viertel der Gesamtdauer der Rutschung gleichförmig beschleunigt und danach gleichförmig verzögert und entsprach den gegebenen bodenmechanischen Abläufen. Für diese mathematisch gut beschreibbare Bewegung gelten die folgenden Gleichungen:

$$V_v(t) = \begin{cases} \frac{a}{2} \cdot t^2 & \text{für } t = 0 \dots t_1 \\ -\frac{a}{6} \cdot t^2 + \frac{4}{3} a \cdot t_1 \cdot t - \frac{2}{3} a \cdot t_1^2 & \text{für } t = t_1 \dots t_{\text{end}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{dV_v(t)}{dt} = \begin{cases} a \cdot t & \text{für } t = 0 \dots t_1 \\ -\frac{1}{3} a \cdot t + \frac{4}{3} a \cdot t_1 & \text{für } t = t_1 \dots t_{\text{end}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{d^2V_v(t)}{dt^2} = \begin{cases} a & \text{für } t = 0 \dots t_1 \\ -\frac{1}{3} a & \text{für } t = t_1 \dots t_{\text{end}} \end{cases} \quad (5)$$

wobei $t_1 = \frac{t_{\text{end}}}{4}$ bei den Untersuchungen galt.

Weitere Parametervariationen wie zum Beispiel größere Vorgriff- oder Rückgriffweiten ($x_v = 2,0$ m, $x_r = 3,155$ m) konnten nicht realisiert werden, da die Durchbiegung der ohnehin schon sehr langen Platten des Wellengenerators sonst zu ungenauen Versuchsbedingungen ergeben hätten. Ein Ausweg dafür wird in der numerischen Modellierung erwartet. Ein weiteres Augenmerk ist auf die Abdichtung des Wellengenerators gegenüber den Gerinnewänden zu richten. Im vorliegenden Versuchsstand erfolgte die Abdichtung durch stumpf gegen die Glaswand stoßende, einzeln justierbare PVC-Streifen, wobei Spaltbreiten kleiner 1 mm erreicht wurden.

4 Ergebnisse

In Abhängigkeit von den Parametern der Rutschung entstehen Initialwellen, die sich nach einiger Zeit in eine Einzelwelle oder eine Gruppe von mehreren Einzelwellen umformen. Lediglich bei einem Wasserstand von der Höhe der Böschung entstanden beinahe sinusförmige Wellen. Ein Grund dafür ist der Einfluß des relativ großen Rückgriffvolumens. Dieses Erscheinungsbild der Wellenentstehung kann als Schwall, dem ein Sunk folgt, bezeichnet werden. Die Sunkerscheinung ist um so ausgeprägter, je größer das Verhältnis von Wasserstand und Böschungshöhe und somit das Rückgriffvolumen ist.

Bei den Untersuchungen wurde ein ebenes Problem vorausgesetzt ($b = 1$). Das Volumen des ersten Wellenberges der Initialwelle bzw. die Summe der Volumina aller Einzelwellen einer Gruppe entspricht ungefähr dem Vorgriffvolumen der Rutschung für Fälle, bei denen das Rückgriffvolumen wesentlich kleiner als das Vorgriffvolumen ist ($h \leq \frac{3}{4} \cdot h_k$). Für Fälle bei denen das Rückgriffvolumen die Größenordnung des Vorgriffvolumens hat ($h \geq h_k$), entspricht das Volumen des ersten Wellenberges ungefähr dem halben Vorgriffvolumen.

Aus den Meßwerten wurde eine Ausgleichsfunktion zur Bestimmung des auf die Wassertiefe bezogenen Wellenmaximums (der maximalen Amplitude der ersten Wellen während der Wellenentstehung) ermittelt:

$$\max\left(\frac{z_{\text{max}}}{h}\right) = 0,350 \cdot \left(\frac{V_v}{h^2 \cdot b}\right)^{1,06} \cdot \left(\frac{\sqrt{h/g}}{t_{\text{end}}}\right)^{0,59}$$

Das Wellenmaximum ist demnach vom Vorgriffvolumen und der Dauer der Rutschung sowie dem Wasserstand und der Erdbeschleunigung abhängig. Der Ort, an dem die Welle ihre maximale Höhe erreicht, ist sehr verschieden und von Wasserstand und Wellenform abhängig, er tritt jedoch innerhalb der Entfernung gleich der 100fachen Wassertiefe vom Entstehungsort auf. Da, wie aus

Kapitel 3 ersichtlich ist, eine Abhängigkeit zwischen V_v und t_{end} bei den durchgeführten Versuchen besteht, ist auch die Angabe der folgenden Ausgleichsfunktion der Meßwerte sinnvoll:

$$\max\left(\frac{z_{\text{max}}}{h}\right) = 0,087 \cdot \left(\frac{V_v}{h^2 \cdot b}\right)^{0,959}$$

Für das Rückgriffvolumen V_v läßt sich ebenfalls ein Einfluß auf die Wellenbildung erkennen, der aber noch nicht quantitativ bestimmt werden konnte, da er nur bei Wasserständen in Höhe der Ausgangsböschung und höher ausreichend wirksam wird und dafür noch nicht genügend Meßdaten vorliegen.

Nach Fertigstellung des Versuchsstandes wurden praktische Fälle bekannt, bei denen die rutschunggefährdete Böschung vollständig überstaut ist, die entstehenden Wellen sich sowohl in als auch entgegen der Rutschrichtung ausbreiten können. Mit dem gegenwärtigen Versuchsstand läßt sich die Größe der rückwärtigen Wellen näherungsweise bestimmen. Weitere Untersuchungen dazu sollen ebenfalls durch ein numerisches Modell erfolgen. Doch zunächst seien einige interessante Beobachtungen am Versuchstand erläutert.

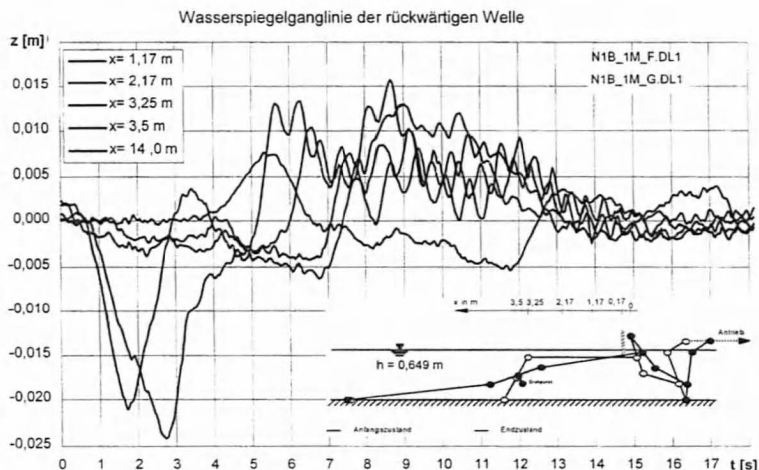


Bild 6: Detaildarstellung der Wasserspiegelganglinien einer rückwärtigen Welle infolge Unterwasserrutschung.

Wenn man von der vereinfachten Vorstellung ausgeht, daß es im Moment der Rutschung zu einer plötzlichen Anhebung und Absenkung des Wasserkörpers in benachbarten Bereichen kommt (Bild 7), so läßt sich mit der Theorie der Überlagerung monokliner Schwallwellen (MARTIN 1989) zeigen, daß sich die

größere Welle entgegen der Richtung, in welche die Böschung rutscht, ausbreitet. Detailliertere Untersuchungen dieses Sachverhaltes wären in einer späteren Forschungsaufgabe wünschenswert.

Es wird zunächst vermutet, daß die sich bei Unterwasserrutschungen nach hinten ausbreitende Welle ungefähr die gleiche Energie und Masse transportiert, wie die sich nach vorn ausbreitende.

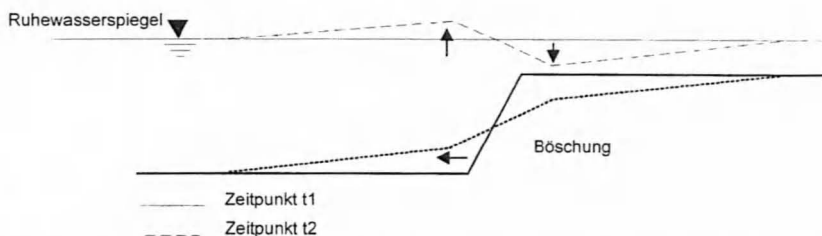


Bild 7: Plötzliche Anhebung und Absenkung des Wasserkörpers in benachbarten Bereichen infolge einer Unterwasserrutschung.

Die hier beschriebenen Grundlagenuntersuchungen wurden auf risikoverdächtige Bereiche des Senftenberger Sees angewendet, für welche ebenfalls Modellmessungen vorliegen, und es ergab sich eine gute Übereinstimmung.

5 Literaturverzeichnis

- [1] ABSCHLUSSBERICHT: Modellversuche zur Wellenbildung bei Setzungsfließrutschungen. TU Dresden, Fak. Bauingenieurwesen, Inst. f. Wasserbau und THM. 1997. unveröffentlicht
- [2] Das, M. M.; Wiegel, R. L.: Waves generated by horizontal Motion of a Wall.- In: Journal of Waterways, Harbors and coastal Engineering Division, Proceedings ASCE, February, 1972, S. 50 - 65.
- [3] Gozali, S.; Hunt, B.: Water waves generated by close landslides.- In: Journal of Hydraulic Research, IAHR Vol. 27, 1989, NO. 1.
- [4] Huber, A.: Schwallwellen in Seen als Folge von Felsstürzen.- In: Mitteilung Nr. 47 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 1980.
- [5] Huber, A.: Massenstürze in Seen, Entstehung, Ausbreitung und Auswirkungen der erzeugten Impulswellen.- In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, TU Dresden, Inst. f. Wasserbau und THM (1996)9, S. 5 - 22.
- [6] Hungr, O.: A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. In: Can. Geotech. J. 32(1995) pp 610-623.
- [7] Hunt, B.: Water waves generated by distant landslides.- In: Journal of Hydraulic Research, IAHR Vol. 26, 1988, NO. 3.

- [8] Jennrich, C.: Darstellung des Forschungsgegenstandes (Setzungsfließen) Abteilung Bodenmechanik, Institut für Geotechnik, TU Bergakademie Freiberg, 1996 (unveröffentlicht).
- [9] Koutitas, C. G. u. a. Finite Element Approach to Waves Due to Landslide.- In: Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 103(Hy9) 1977, Proc. Paper 13218.
- [10] Martin, H.: Plötzlich veränderliche instationäre Strömungen in offenen Gerinnen.- In: G. Bollrich, Technische Hydromechanik /2, Verlag für Bauwesen Berlin, 1989.
- [11] Martin, H.: Konzeption zur Beschreibung von Impulswellen, die durch Gleitbrüche ausgelöst wurden. In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, TU Dresden, Inst. f. Wasserbau und THM (1996)9, S. 23 - 54.
- [12] Miller, R.L.: Experimental determination of run-up of undular and fully developed bore.- In: Journ. of Geophysical Res. 73(1968)14, July 15, pp. 4497-4510.
- [13] Miller, D. J.: Gigant Waves in Lituya Bay, Alaska, 1958.- In: Geological Survey Professional Paper, 354-C, 1960.
- [14] Neuhauser: Modellversuche über die Wirkung von Schwallwellen am Staudamm Gepsatsch.- In: Österreichische Wasserwirtschaft, Jahrgang 31 (1979) Heft 5/6, S. 191 - 201.
- [15] Noda, E.: Water waves generated by Landslides.- In: Journal of Waterways, Harbors and coastal Engineering Division, Proceedings ASCE, November, 1970, S. 835 - 855.
- [16] Pugh, C. A.; Harris, D. W.: Prediction of Landslide-Generated Water Waves.- In: ICOLD, 14. Congrès des Grands Barrages, Rio de Janeiro, 1982, Q. 54, R. 29.
- [17] Raney, D. C.; Butler, H. L. u. a. A Numerical Model for Predicting the Effects of Landslide Generated Waves.- In: US Army Engineers Waterways Experiment Station, Report No. H-75-1, 1975.
- [18] Röhner, M.: Schwallwellen infolge der Bewegung einer Begrenzungsfläche. TU Dresden, Fakultät für Bau-, Wasser-, Forstwesen, Diss., 1970.
- [19] Schnitter, G.: Das Unglück am Vajont.- In: Schweizerische Bauzeitung, H. 39, 1972 .
- [20] Slingerland, R. L.; Voight, B.: Occurrences, properties, and predictive models of landslide generated water waves.- In: Rockslides and Avalanches, Vol. 2, Elsevier Science Publishing, 1979.
- [21] Synolakis, C.E.: The run-up of long waves.- Ph.D. Thesis, California Inst. of Techn., Pasadena, CA. 1986.
- [22] Vogt, A.; Förster, W.: Abschätzung der Rückgriffweite von Setzungsfließbrüchen. In: Neue Bergbautechnik. 21(1991)10/11. S. 366-371.
- [23] Wiegel, R. L.; Noda, E. K.; Kuba, E. M.; Gee, D. M.; Tornberg, G. F.: Water waves generated by Landslide in Reservoirs.- In: Journal of Waterways, Harbors Division, Proceedings ASCE, May 1970, S. 307 - 331.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. Carsten Cherubim
 TU Dresden, Fak. Bauingenieurwesen
 Institut für Wasserbau und THM

01062 Dresden
 E-mail: cher@bbbrs5.bau.tu-dresden.de