

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Blaser, Frank; Hager, Willi H.

Masstabeffekte und Frontentwicklung an Talsperrenbruchmodellen

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische
Hydromechanik**

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104060>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Blaser, Frank; Hager, Willi H. (1998): Masstabeffekte und Frontentwicklung an Talsperrenbruchmodellen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): 100 Jahre Hubert-Engels-Laboratorium - Hydraulische und numerische Modelle im Wasserbau, Entwicklung-Perspektiven. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 13. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 117-126.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Massstabeffekte und Frontentwicklung an Talsperrenbruchmodellen

Kurzfassung

Die im Zusammenhang mit der Untersuchung von Talsperrenbruchwellen im hydraulischen Modell auftretenden Modelleffekte werden diskutiert. Für die Ausbreitung der Talsperrenbruchwelle auf hydraulisch rauher Sohle werden Versuchsergebnisse sowohl im horizontalen als auch im geneigten Kanal vorgestellt und ein einfaches Berechnungsmodell abgeleitet.

Abstract

Scale effects in a dambreak wave model are discussed and the positive wave front is determined for a dambreak wave in an initially dry downstream channel. Turbulent flow on a rough boundary is considered. The theoretical results are compared with experiments for different bottom slopes.

1 Einleitung

Bei abrupter Abflussfreigabe einer Stauhaltung stellt sich talwärts eine Flutwelle ein, welche zuweilen auch als Talsperrenbruchwelle bezeichnet wird. Schadensfälle, welche ihre Ursache im Versagen einer Talsperre haben, sind zahlreich und häufig auch dokumentiert (Eidgenössisches Amt für Strassen- und Flussbau 1966, Vogel 1981, USCOLD 1988). Da zu solchen Ereignissen naturgemäss keine Messungen vorliegen, sind quantitative Angaben über den Verlauf der Flutwelle selten. Mit dem Ausbau der Wasserkräfte durch die Errichtung grosser Stauanlagen erwuchs für die Unterlieger ein beachtliches Gefährdungspotential. Sogenannte *Ueberflutungskarten* geben Auskunft über die Ankunftszeit der Wellenfront und der maximalen Abflusstiefe, bzw. der Energielinie an einer interessierenden Stelle. Sie sind die Grundlage für den Evakuierungsplan der Bevölkerung im Katastrophenfall (Vischer 1982). Um einigermaßen verlässliche Angaben über die Flutwellenausbreitung für die Erstellung solcher Ueberflutungskarten zu machen, sind seit dem zweiten Weltkrieg Näherungsansätze entwickelt worden, mit denen der Verlauf der Flutwelle überschlägig ermittelt wird. Die Arbeiten auf diesem Gebiet sind mittlerweile zahlreich. Während früher der Versuch im physikalischen Modell, vereinzelt auch im Naturmassstab (Bild 1), oder vereinfachte analytische Ansätze im Vordergrund standen, erfolgen die Berechnungen heute vor allem mit Hilfe von numerischen Verfahren (Hager und Chervet 1996, Hager und Lauber 1996).

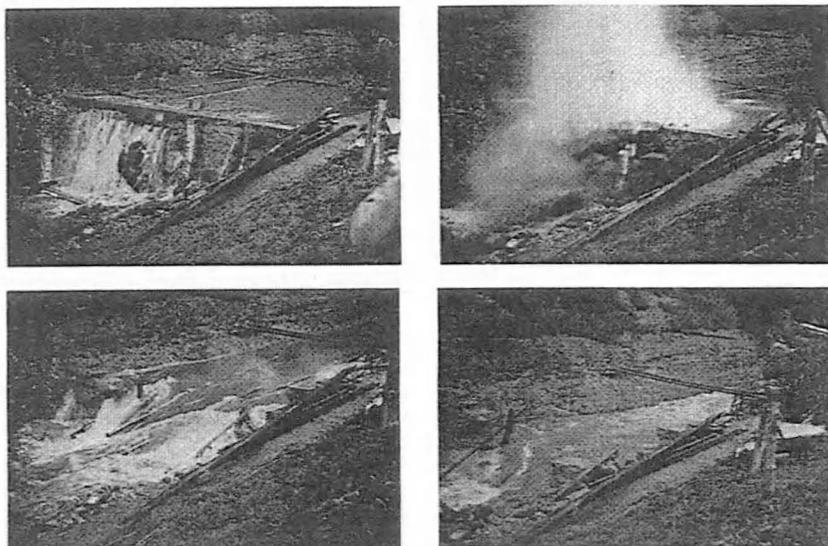


Bild 1 **Unterwassersprengung Schwende (Schweiz) 1943**
 Zeitliche Abfolge des Sperrenbruchs von links nach rechts.

2 Idealisierungen

Das für die Untersuchung verwendete Gerinne weist einen rechteckigen Querschnitt mit einer Breite von 500 mm auf. Dessen Länge beträgt 14 m und ist entlang des gesamten Gerinnes einseitig verglast. Die Neigung des Gerinnes lässt sich zwischen 0 und 50 % variieren.

In der durchgeführten Untersuchung wird stets von einem abrupten und zudem vollständigen Bruch der Talsperre (im Gegensatz zum teilweisen Bruch der Talsperre) ausgegangen (Bild 2). Diese Betrachtung stellt das *Worst-Case*-Szenario in Bezug auf die Geschwindigkeit der Flutwellenausbreitung und die maximalen örtlichen Abflusstiefen dar und wurde für zahlreiche Untersuchungen herangezogen, sowohl im Bereich der Forschung als auch bei konkreten Modelluntersuchungen zu hypothetischen Talsperrenbrüchen. Die Berechnungen der schweizerischen Ueberflutungskarten beruhen ebenfalls auf der Annahme eines abrupten Versagens der verschiedenen Talsperren, obwohl dies für Dämme als konservativ betrachtet werden muss. Der Extremfall eines abrupten Versagens einer Talsperre kann bei einer Staumauer tatsächlich eintreten, so einerseits im Falle eines kriegerischen Angriffs auf Staumauern oder bei unzulänglicher Dimensionierung der Staumauer, bzw. ungenügenden Kenntnissen des anstehenden Untergrundes andererseits (USCOLD 1988).

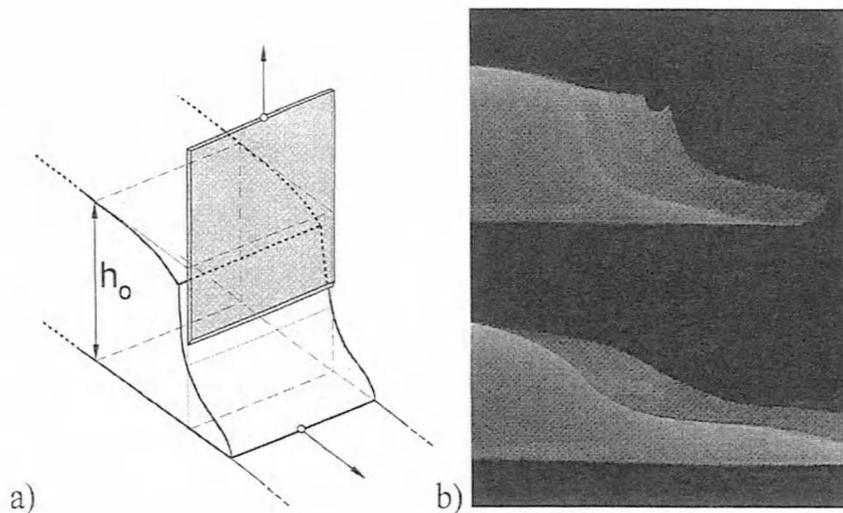


Bild 2 Bruchmechanismus

a) Schemaskizze des Bruchvorgangs infolge einer pneumatisch vertikal nach oben getriebenen Schütze. b) Ansicht der sich nach erfolgtem Bruch ins Unterwasser entwickelnden Flutwelle. Die anfängliche Diskontinuität in der Wasseroberfläche verschwindet zusehends.

3 Modelleffekte

3.1 Modellgesetze

Das geometrisch ähnliche Abbild einer Strömung kann nur dann hinreichend genau in einem wasserbaulichen Modell nachgebildet werden, falls die Wirkung einer die Strömung beeinflussende Kraft wie Gravitation, Viskosität oder Oberflächenspannung gegenüber den anderen dominant ist.

Die durch das Freisetzen der Stauhaltung ausgelöste Strömung ist gravitativ bedingt und unterliegt wie alle Freispiegelabflüsse dem Einfluss der dimensionslosen Zahlen nach Froude und Reynolds. Im Gegensatz zu den Versuchen von Lauber (1997) im glatten Kanal, bei welchen an der Wellenfront kein *Luft eintrag* erfolgte, wird im rauhen Gerinne an der Front des Wellenkörpers stets Luft eingetragen (Bild 3). Aus diesem Grund wird der Strömungsvorgang zumindest lokal auch von der Weberzahl abhängig, da die Luftaufnahme wesentlich von der Oberflächenspannung des Wassers abhängig ist. Wellenbewegungen an der Flüssigkeitsoberfläche werden sowohl von der Gravitation als auch von der Oberflächenspannung des Wassers gegenüber Luft beeinflusst. Je nachdem welcher Einfluss überwiegt, handelt es sich um Schwerewellen oder um Kapillarwellen. Die Talsperrenbruchwelle ist gravitativ bedingt und stellt deshalb eine *Schwerewelle* dar. Es ist möglich, dass sich der

dominanten Schwerewelle kleine Kapillarwellen überlagern, die in diesem Zusammenhang allerdings nicht von Belang sind. Ein relevanter Einfluss der Weberzahl beschränkt sich deshalb ausschliesslich auf den Frontbereich.

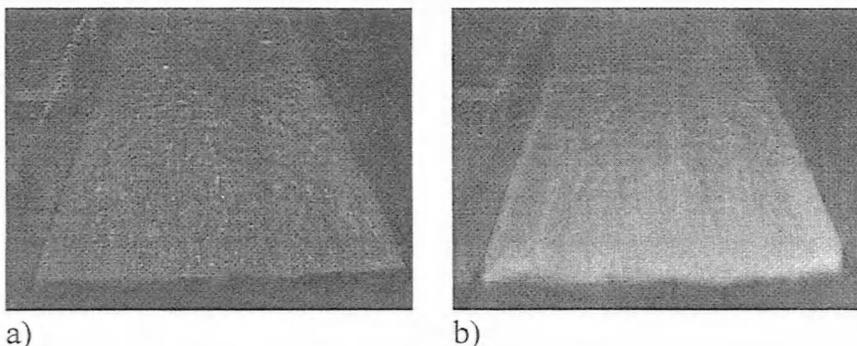


Bild 3 Belüftung der positiven Wellenfront

Positive Wellenfront im a) glatten Kanal ohne Lufteintrag, b) rauhen Kanal mit belüfteter Front.

Da die Aehnlichkeitsgesetze nach Froude, Reynolds und Weber nicht miteinander vereinbar sind, treten bei der Uebertragung der Resultate von einem Modell in ein geometrisch ähnliches, im Längenmassstab sich unterscheidendes Modell Abweichungen im Strömungsgeschehen auf, welche als *Modelleffekte* bezeichnet werden. Die Sicherstellung der Massstabsfreiheit sowie die Abklärung der Anwendungsgrenzen für die Uebertragbarkeit der Resultate ist deshalb von Bedeutung.

3.2 Anwendungsgrenzen des Froudemodells

Bei der Talsperrenbruchwelle wird der Strömungsvorgang in der unmittelbaren Nähe der Sperrstelle vorwiegend durch die Gravitation und Trägheit bestimmt, weshalb Modellähnlichkeit nach Froude angestrebt wird. Die Zeit wird deshalb dimensionslos in der Form $T=t/(h_0/g)^{1/2}$ dargestellt, Distanzen werden mit der initialen Wassertiefe h_0 zu $X=x/h_0$ für die Lagekoordinate und $Y=h/h_0$ für die Wassertiefe normiert, und Geschwindigkeiten durch $V=v/(gh_0)^{1/2}$ ausgedrückt. Dabei werden die Lagekoordinate x von der Sperrstelle aus positiv in die Unterwasserrichtung und die Wassertiefe h senkrecht zum Kanalboden gemessen. Aus der Normierung geht der bedeutende Einfluss der Wassertiefe h_0 an der Sperrstelle hervor. Unterschreitet diese einen gewissen *Minimalwert*, so werden die üblicherweise vernachlässigbaren Einflüsse von Viskosität und Oberflächenspannung signifikant.

Die Einflüsse der Viskosität des Wassers manifestieren sich entlang der festen Berandungen, da dort der Haftbedingung zufolge grosse Geschwindigkeitsgradienten vorliegen. Da im Zusammenhang mit der Untersuchung des *Rauhigkeitseinflusses* auf die Ausbreitung der Talsperrenbruchwelle gerade die Prozesse in den berandungsnahen Bereichen von Bedeutung sind, müssen sie von allfälligen Massstabeffekten befreit sein. Grundsätzlich lässt sich die Abhängigkeit von Reynolds-Effekten durch eine genügend gross gewählte Modellabmessung sicherstellen, so dass der Abfluss in das hydraulisch rauhe Regime zu liegen kommt. Diesem Umstand wurde in verschiedenen Untersuchungen zuwenig Rechnung getragen (Hager und Lauber 1996), indem zu kleine Modellabmessungen verwendet wurden und die daraus gewonnenen Resultate deshalb mit Vorsicht zu interpretieren sind. Systematische Versuche mit unterschiedlichen Initialwassertiefen bei sonst gleichen Randbedingungen erlauben es, den Minimalwert von h_0 auf 300 mm zu fixieren.

Die Frontausbreitungsgeschwindigkeit erweist sich als weitaus sensibler als der maximale örtliche Wasserstand und wurde aus diesem Grund als Kriterium für die Festsetzung der kleinsten, gerade noch zulässigen Modellabmessung herangezogen (Bild 4). Zudem ist die zeitliche Auflösung der eingesetzten Messtechnik wesentlich besser als jene der Abflusstiefenbestimmung. Das verwendete Videosystem erlaubt eine zeitlichen Auflösung von 20 ms, woraus sich die Ankunftszeit der Welle an einer bestimmten Stelle entlang des Kanals auf ± 1 ms genau ermitteln lässt. Die Bestimmung der örtlichen Abflusstiefenmaxima hingegen kann lediglich auf eine Genauigkeit von ± 1 mm bestimmt werden, entsprechend streuen die Messwerte und sind daher wenig verlässlich zur Festlegung der kleinsten, gerade noch zulässigen Modellabmessung.

Der kontinuierliche Benetzungsvorgang an der Wellenfront wird massgeblich durch die Oberflächenspannung der beteiligten Stoffe Wasser, feste Berandung und Luft beeinflusst. Mit abnehmendem Massstab wirkt sich die Oberflächenspannung zunehmend verzögernd auf die Ausbreitung der Flutwelle aus, was ja auch für den Einfluss der Viskosität gilt. Daher sind die für kleine Initialwassertiefen auftretenden, in Bild 4 dargestellten Abweichungen von der Froudeschen Aehnlichkeit sowohl dem Einfluss der Viskosität als auch jenem der Oberflächenspannung zuzuschreiben.

Die Effekte, welche vom Lufteintrag herrühren und ebenfalls von der Oberflächenspannung des Wasser gegenüber Luft bestimmt werden, sind lokal auf den Frontbereich beschränkt und werden in der Untersuchung vernachlässigt, da über den Wellenkopf (*wave-tip*) keine weiterführenden Aussagen aus den Versuchen abgeleitet werden. Die für die Berechnung der Flutwellenfront herangezogene, sogenannte mittlere massgebende Abflusstiefe h_a wird durch den Lufteintrag am Wellenkopf nur unwesentlich beeinflusst.

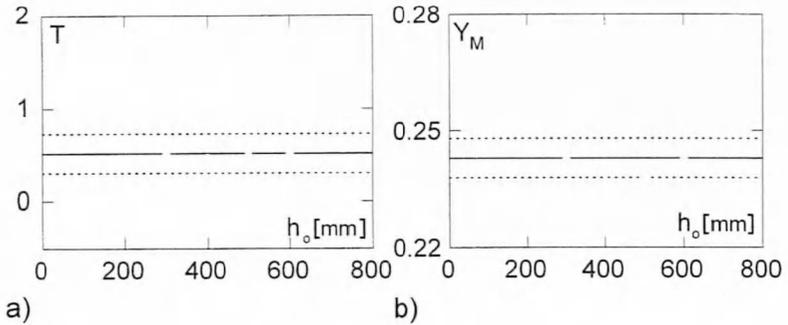


Bild 4 Sicherstellung der Uebertragbarkeit nach Froude

a) Ankunftszeit der Wellenfront an der Stelle $X=15$ in Abhängigkeit der Initialwassertiefe h_0 mit (...) $\pm 2\%$ -Grenze, (b) maximale Abflusstiefe an der Stelle $X=15$ in Abhängigkeit von h_0 .

4 Ausbreitung der positiven Wellenfront

4.1 Experimente

Die Ausbreitung der Talsperrenbruchwelle wird wesentlich durch die Rauigkeit des Gerinnes beeinflusst. Insbesondere trifft dies auf die Geschwindigkeit der Wellenfront zu, welche der kleinen Abflusstiefen wegen einen grossen, relativen hydraulischen Widerstand erfährt. Der Einfluss der Gerinnerauigkeit auf die Ausbreitung der Talsperrenbruchwelle wird in der Literatur eher stiefmütterlich behandelt. Wohl liegen verschiedenste numerische Arbeiten vor, welche - falls der Haftbedingung (*non-slip*-Bedingung) überhaupt Rechnung getragen wird - für die Erfassung des Widerstandes ein mehr oder weniger vereinfachtes Modell heranziehen. In der Literatur fehlt hingegen bis anhin eine systematische, experimentelle Untersuchung mit zuverlässigen Angaben über die den Versuchen zugrundeliegenden Rauigkeiten, so dass numerische Berechnungen auch wirklich kalibriert werden könnten. Für die Untersuchung von Talsperrenbruchwellen wurden oft zu kleinmasstäbliche Modelle herangezogen, die eine Uebertragung der im Versuch gewonnenen Resultate in Frage stellen.

Lauber (1997) schlägt als eine einfache Berechnungsmethode der Wellenfront das Konzept der *mittleren massgebenden Wassertiefe* h_a vor und wendet dieses mit Erfolg auf seine Versuche im glatten Kanal an (äquivalente Sandrauigkeit $k_s = 0.01$ mm). Mit dem Ziel, das Konzept auf rauhe Gerinne zu erweitern, ist der Kanal mit einem gerippten Kunststoffteppich gemäss Bild 5 ausgekleidet, dessen äquivalente Sandrauigkeit $k_s = 2.5$ mm beträgt (Hager und Blaser 1998).

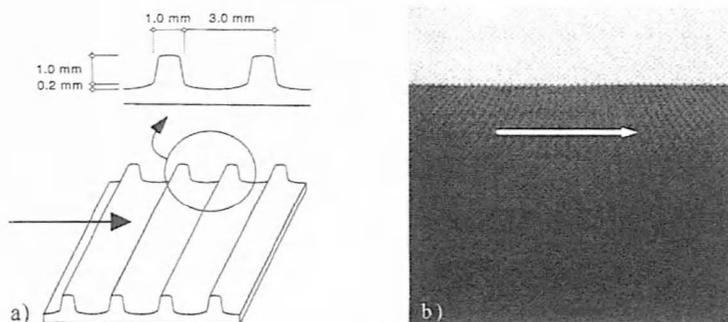


Bild 5 Oberflächenstruktur des eingebauten raunen Kunststoffteppichs

- a) Schemaskizze, äquivalente Sandrauigkeit $k_s = 2.5$ mm.
 b) Ansicht der rauhen Sohle quer zur Strömungsrichtung.

Vergleicht man die Versuche im raunen Gerinne mit jenen im glatten Gerinne, so folgen für grössere Rauigkeiten erheblich *niedrigere Frontgeschwindigkeiten* und entsprechend *grössere Unterwassertiefen* als im glatten Kanal (Bild 6). Der Einfluss äussert sich auch in der Form der Anlaufkurve (Ganglinie), die mit zunehmender Rauigkeit steiler verläuft.

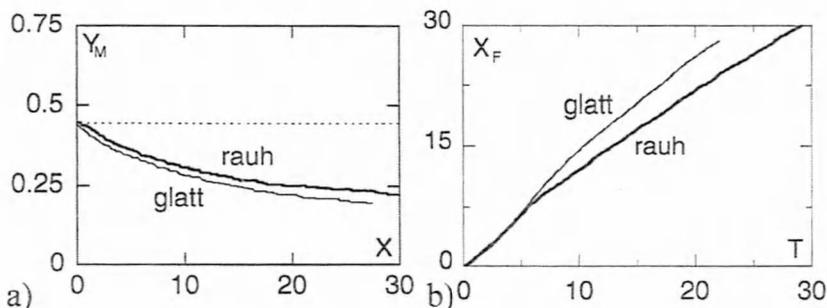


Bild 6 Abflusstiefenmaxima und Frontentwicklung im horizontalen Kanal.

- a) Maximale Abflusstiefen $Y_M(X)$ für den glatten ($k_s = 0.01$ mm) und rauhen Kanal ($k_s = 2.5$ mm), b) Ausbreitung der entsprechenden positiven Wellenfronten $X_F(T)$.

4.2 Berechnungsverfahren

Die Berechnung der Wellenfront wird zweigeteilt (Lauber 1997). In einer ersten Phase nach der Freigabe der Stauhaltung manifestiert sich der Reibungseinfluss nicht. Die Geschwindigkeit kann näherungsweise als vom Gefälle und von der Reibung unabhängig betrachtet werden, weswegen sich die sogenannte

Initialwelle mit nahezu konstanter Geschwindigkeit ausbreitet. Da der Wasserspiegel an der Sperrstelle rasch auf den Wert von $(4/9)h_0$ absinkt, berechnet sich die Geschwindigkeit an der Sperrstelle zu

$$v_I = [2g(5/9)h_0]^{1/2} \quad (1)$$

bzw. mit der Elementarwellengeschwindigkeit $(gh_0)^{1/2}$ normiert zu

$$V_I = 1.05. \quad (2)$$

Die Gleichung der Initialwellenfront lautet daher in dimensionsloser Form

$$X_I = 1.05T. \quad (3)$$

Die Initialwelle wird schliesslich von der *dynamischen Welle* eingeholt. Deren Frontgeschwindigkeit ergibt sich aus den Gleichungen von De Saint-Venant entlang der positiven Charakteristik zu

$$V_D = 2 + (\sin \alpha - J_f)(T - \sqrt{2}) \quad (4)$$

mit dem Gefällswinkel α und dem Reibungsgradienten J_f . Der Reibungsgradient wird nach Darcy-Weisbach

$$J_f = \frac{f}{4R_h} \frac{v^2}{2g}, \quad (5)$$

wobei sich der Reibungsbeiwert f auf rauher Sohle vereinfacht auf

$$f = 4 \left(\log \left(\frac{14.84 R_h}{k_s} \right) \right)^{-2}. \quad (6)$$

Dem hydraulischen Radius R_h wird anstelle der momentanen Abflusstiefe die mittlere massgebende Wassertiefe h_a zugrundegelegt. Sie ist entsprechend den erhöhten Abflusstiefen im rauhen Kanal grösser als im glatten Kanal. Durch Einsetzen von (6) in (5) und entsprechendem Auflösen erhält man für die Frontgeschwindigkeit

$$V_D = \frac{4}{\tau} \left[\sqrt{1 + \tau \left(1 + \frac{j\tau}{2} \right)} - 1 \right] \quad (7)$$

mit $\tau = f(T-2^{1/2})/\delta$ und $j = (\delta/f)\sin\alpha$, wobei $\delta = h_a/h_0$. Die Integration der Gleichung (7) führt auf ein Singularitätsproblem. Unter Zuhilfenahme einer Näherungslösung für (7) folgt die Orts-Zeit-Beziehung der Front

$$X_D = 2\sqrt{2j} \frac{\delta}{f} \left[\tau + \frac{1-\sqrt{2j}}{j} \ln(1 + \tau\sqrt{j/2}) \right]. \quad (8)$$

Die Untersuchung zur Talsperrenbruchwelle auf rauher Sohle wurde für relative Rauigkeiten $\varepsilon = k_s/4h_0$ von 0.0007 bis 0.004 durchgeführt, was einer Variation von ε um den Faktor 6 entspricht. Die Versuche zeigen, dass sich das Ausbreitungsverhalten der Talsperrenbruchwelle innerhalb dieser Bandbreite der relativen Rauigkeit ε nur wenig unterscheidet. Diesen Rauigkeitsverhältnissen ist eine dimensionslose Frontwassertiefe $\delta=0.09$ zugeordnet worden. Die durchgeführten Rechnungen ergeben eine befriedigende Uebereinstimmung mit den Versuchen (Bild 7).

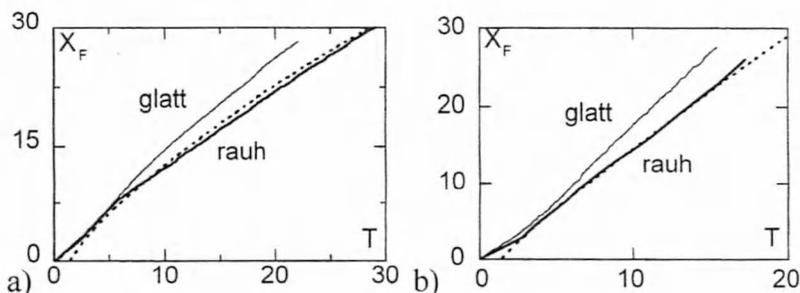


Bild 7 Entwicklung der positiven Wellenfront $X_F(T)$.

Relative Rauigkeit $\varepsilon = k_s/4h_0 = 0.002$, (---) Gl. (8) für $X_D(T)$ im a) horizontalen Kanal, b) 10% geneigten Kanal.

5 Schlussfolgerungen

Durch die Wahl genügend grosser Modellabmessungen gelingt es, Modelleffekt hauptsächlich infolge der Viskosität des Wassers auszuschliessen. Der Einfluss der Oberflächenspannung ist lokal und für die Untersuchung der Flutwellenausbreitung von untergeordneter Bedeutung.

Die Talsperrenbruchwelle wird im rauhen Kanal gegenüber jener im glatten Kanal verzögert. Die Abflusstiefen sind dementsprechend grösser. Das von Lauber (1997) für den glatten Kanal formulierte Konzept der *mittleren massgebenden Wassertiefe* h_a zur Berechnung der Front lässt sich auf den rauhen Kanal sinngemäss übertragen. Die mittlere massgebende Wassertiefe h_a

nimmt mit zunehmender Rauigkeit des Gerinnes zu. Für übliche Rauigkeiten von Gebirgstälern beträgt sie rund 10% der Initialwassertiefe h_0 .

6 Literaturverzeichnis

- Eidgenössisches Amt für Strassen- und Flussbau (1966). Schäden an Talsperren und Entwicklung des Talsperrenbaues. Beilage zum Bericht über die Untersuchungen betreffend die Sicherheit der schweizerischen Stauanlagen. ASF *Bericht* 3117/3118: Bern.
- Hager, W.H., Blaser, F. (1998). Drawdown curve and incipient aeration for chute flow. *Canadian Journal of Civil Engineering* (accepted for publication).
- Hager, W.H. und Chervet, A. (1996). Geschichte der Dammbuchwelle. *wasser, energie, luft* 88 (3/4): 49-54.
- Hager, W.H., Lauber, G. (1996). Hydraulische Experimente zum Talsperrenbruchproblem. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 114 (24): 515-524.
- Lauber, G. (1997). Experimente zur Talsperrenbruchwelle im glatten geneigten Rechteckkanal. *Dissertation* 12115 ETH, Zürich.
- USCOLD (1988). *Lessons from dam incidents, USA*. Committee on failures and accidents to large dams, United States Committee on Large Dams. ASCE: New York.
- Vogel, A. (1981). *Bibliography of the history of dam failures*. Data station for dam failures: Wien.
- Vischer D. (1982). Water alarm organization in Zürich. 14. ICOLD Congress, Rio de Janeiro, Q.52 (R.59): 993-1000.

Frank Blaser, dipl. Bau-Ing. ETH/SIA
Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie (VAW)
ETH-Zentrum
8092 Zürich, Schweiz
e-mail: blaser@vaw.baum.ethz.ch

PD Dr. Willi H. Hager
Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie (VAW)
ETH-Zentrum
8092 Zürich, Schweiz
e-mail: hager@vaw.baum.ethz.ch