Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 81 (1989)
Heft: 4-5

Artikel: Tosbecken mit Querschwelle
Autor: Hager, Willi H. / Sinniger, Richard
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940471

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Tosbecken mit Querschwelle

Willi H. Hager und Richard Sinniger

Zusammenfassung

Ausgehend vom klassischen Wassersprung wird der Einfluss einer durchgehenden Querschwelle auf das Abflussverhalten in Tosbecken diskutiert. Vorerst werden verschiedene Sprungtypen beschrieben, um anschliessend Beziehungen für die konjugierten Tiefen und die Längscharakteristika abzuleiten. Dabei wird der Unterwassererosion spezielle Beachtung geschenkt. Das Bemessungsverfahren wird anhand von Beispielen erläutert.

Résumé: Ressaut hydraulique forcé par seuil

Basé sur la notion du ressaut classique, l'effet d'un seuil transversal sur le comportement d'écoulement dans des bassins dissipateurs est discuté. Tout d'abord, divers types de ressauts sont décrits pour présenter, par la suite, des relations pour les hauteurs conjuguées et les caractéristiques de longueur. L'érosion à l'aval du dissipateur est particulièrement prise en considération. Le procédé de dimensionnement est illustré par des exemples de calcul.

Summary: Stilling basins with transverse baffle sill

Based on the classical hydraulic jump, the effect of a transverse baffle sill on the flow features in stilling basins is discussed. A description of the salient types of flow is presented, by which relations for the sequent depths and the length characteristics may be derived. The effect of tailwater erosion is thereby included. The computational procedure is explained by typical examples.

Einleitung

Unter einem *Tosbecken* versteht man ein zweckmässig ausgeführtes Bauwerk, in dem schnellfliessendes Wasser in eine beruhigte Strömung umgesetzt wird. Letztere lässt sich dann schadlos in ein natürliches Gewässer einleiten, ohne dass es Erosionen durch zu hohe Geschwindigkeiten, zu starke Turbulenzkonzentrationen oder durch allzuhohen Wellenschlag verursachen würde. Tosbecken sind überall dort vorzusehen, wo ein Abfluss das Unterwasser in den erwähnten Unzulässigkeiten schädlich beinflussen könnte.

Unter einem *klassischen Wassersprung* versteht man den Übergang von schiessendem zu strömendem Freispiegelabfluss in einem nahezu horizontalen, prismatischen, glatten Rechteckkanal. Der Fliesszustand im Rechteckkanal lässt sich durch die Froude-Zahl

$$\mathbf{F} = Q/(gB^2h^3)^{1/2} \tag{1}$$

charakterisieren mit Q als Durchfluss, g als Erdbeschleunigung, B als Kanalbreite und h als Wassertiefe. Für $\mathbf{F}>1$ herrscht Schiessen, für $\mathbf{F}<1$ Strömen und für $\mathbf{F}=1$ kritischer Abfluss. Bei letzterem ist die Fliessgeschwindigkeit $V = Q/(Bh)$ identisch mit der Wellengeschwindigkeit $c = (gh)^{1/2}$ eines Flachwasserabflusses.

Bild 1 zeigt schematisch einen Wassersprung. Die Abflussparameter am Sprungfuss sind durch Index «1», diejenigen im Unterwasser durch Index «2» gekennzeichnet. Vernachlässigt man den Einfluss der Wandreibung, so lässt sich durch den Stützkraftsatz eine einfache Beziehung zwischen den konjugierten Wassertiefen h_1 und h_2 mit der Froude-Zahl angeben. Nach *Bélanger* (franz. Forscher 1789–1874) gilt

$$Y^* = h_2/h_1 = \left[\left(1 + 8\mathbf{F}_1^2\right)^{1/2} - 1\right]/2 \simeq \sqrt{2}\mathbf{F}_1 - \tfrac{1}{2} \tag{2}$$

wobei die Approximation für $\mathbf{F}_1 > 2{,}5$ gültig ist. Letztere verbindet das Verhältnis der konjugierten Tiefen Y^* des klassischen Wassersprunges linear mit der Froude-Zahl $\mathbf{F}_1$ im Zuflussquerschnitt.

Bezüglich der Länge des klassischen Wassersprunges muss unterschieden werden zwischen der Rollerlänge L_r und der Sprunglänge L_j. Die erste bezieht sich auf die Längsausdehnung der Deckwalze, während die zweite den Gesamtsprung einschliesst. Im Bereich $4 < \mathbf{F}_1 < 9$, in dem sich Wassersprünge optimal ausbilden, gilt

$$L_r/h_2 \simeq 4{,}5, \qquad L_j/h_2 \simeq 6. \tag{3}$$

Klassische Wassersprünge besitzen somit bezüglich h_2 (oder gar der Zulauftiefe h_1) eine beträchtliche Längsausdehnung, die aber im Vergleich zu einer üblichen Kanallänge klein ist. Solche Sprünge lassen sich deshalb als lokale Phänomene betrachten, in denen, wie eingangs angenommen, Wandreibungsverluste einen untergeordneten Einfluss ausüben.

Die wohl ausserordentlichste Eigenschaft eines Wassersprunges ist die hohe Energiedissipation, also der Umsetzungsgrad von hauptsächlich kinetischer Zulaufenergie in potentielle Unterwasserenergie, verbunden mit der Entwicklung von Turbulenzenergie (visuell durch Wirbelbildung sichtbar), die dann in thermische Energie durch Diffusionsprozesse umgesetzt wird und somit mechanisch verlorengeht. Bezeichnet

$$H = h + \frac{Q^2}{2gB^2h^2} \tag{4}$$

die lokale Energiehöhe, so lässt sich mit Gl. (2) für die *Effizienz* $\eta = (H_1 - H_2)/H_1$ eines klassischen Wassersprunges der Ausdruck (*Sinniger* und *Hager*, 1989)

$$\eta \simeq \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{\mathbf{F}_1}\right)^2 \tag{5}$$

herleiten. Der mechanische Energieverlust nimmt demnach mit zunehmender Froude-Zahl $\mathbf{F}_1$ beträchtlich zu. Um sich

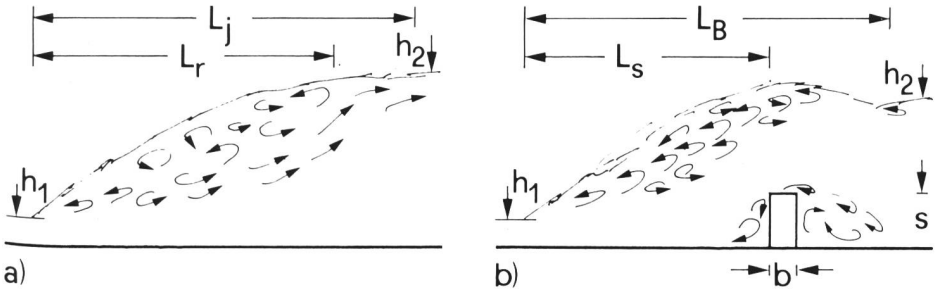


Bild 1. a) klassischer Wassersprung, b) Wassersprung mit Querschwelle.

eine Vorstellung der lokalen Energiedissipation machen zu können, berechnen wir den Energieliniengradienten $J_f = \Delta H / L_j = \eta \cdot H_1 / (6 h_2)$ mit Hilfe der Gl. (2) zu

$$J_f = \eta \left(1 + \mathbf{F}_1^2/2\right) / \left[6\left(\sqrt{2}\,\mathbf{F}_1 - 1/2\right)\right]$$
$$J_f \simeq \mathbf{F}_1 \left[1 - 7/6\,\mathbf{F}_1\right]^2 / \left(12\sqrt{2}\right). \qquad (6)$$

J_f nimmt also fast linear mit der Froude-Zahl $\mathbf{F}_1$ zu. Weiter nehme man an, dass anstelle des Wassersprunges ein sehr rauhes Gerinne von grosser Breite vorliege, bei dem der hydraulische Radius R_h gleich der Wassertiefe h wird. Nach der Gleichung von *Manning-Strickler* wird also $J_f = V_1^2/(K^2 h_1^{4/3}) = \mathbf{F}_1^2 \kappa$ falls der Abfluss die Wassertiefe h_1 aufweist. $\kappa = g/(K^2 h_1^{1/3})$ kann man als Rauhigkeitscharakteristik auffassen. Substituiert man J_f aus Gl. (6), so ergibt sich eine Beziehung für $\kappa(\mathbf{F}_1)$. Unter der Voraussetzung einer typischen Wassertiefe $h_1 = 1$ m folgen dann die in Tabelle 1 angegebenen Werte für K. Daraus wird klar, dass der equivalente K-Wert etwa bei 40 $m^{1/3}s^{-1}$ liegt.

Der klassische Wassersprung ist somit nicht nur effizient und benötigt eine vergleichsweise geringe Unterwassertiefe h_2, sondern entwickelt ebenso relativ geringe Wellen im Unterwasser und ist stabil für $4 < \mathbf{F}_1 < 9$. Der wesentliche Nachteil ist jedoch in der *Empfindlichkeit* gegenüber geringen Unterwasseränderungen und in der beträchtlichen Längenausdehnung L_j zu suchen. Deshalb ist schon zu Beginn dieses Jahrhunderts versucht worden, kompaktere Sprünge durch gezielte Einbauten wie Stufen, Schwellen oder Blöcke hervorzurufen. Erst durch diese baulichen Massnahmen stellt sich der Wassersprung in einem wohldefinierten Tosbecken ein. Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die Vorstellung einer kürzlich an der ETH-Lausanne (EPFL) vollendeten Forschungsarbeit von *Bretz* (1988). Vorerst werden verschiedene Wassersprungtypen bei Anwesenheit einer Querschwelle beschrieben, anschliessend Versuchsresultate mitgeteilt und schliesslich ein Anwendungsbeispiel durchgerechnet.

Wassersprungtypen

Der Abfluss in einem Tosbecken mit Querschwelle wird durch die folgenden Parameter beeinflusst (Bild 1b):

- Zulaufcharakteristik: Froude-Zahl $\mathbf{F}_1$ und Wassertiefe h_1,
- Schwellengeometrie: Schwellenhöhe s und Schwellenbreite b,
- Unterwasser: Wassertiefe h_2,
- Längen: Abstand L_s Sprungfuss bis Schwellenvorderseite und Tosbeckenlänge L_B.

Für gegebene Grössen $\mathbf{F}_1$, h_1, s, b und h_2 ergeben sich dabei die Längen L_s und L_B eindeutig. Es ist demnach zu unterscheiden zwischen dem Zusammenhang von h_2 und ($\mathbf{F}_1$, h_1, s, b) einerseits und den zu einer Unterwassertiefe h_2 zugehörigen Längen andererseits. Wie Voruntersuchungen zeigten, übt die Schwellenbreite b auf den Abfluss einen untergeordneten Einfluss aus, falls sie auf das statisch benötigte Mass beschränkt wird. Weiter geht aus einer Dimensionsanalyse hervor, dass für das Verhältnis der konjugierten Wassertiefen $Y = h_2/h_1$ eine Beziehung der Art

$$Y = f(S, \mathbf{F}_1) \qquad (7)$$

gilt, wobei $S = s/h_1$ die *relative Schwellenhöhe* bezeichnet. Im Vergleich zum klassischen Wassersprung tritt somit der Parameter S neu hinzu.

Betrachten wir nun den Einfluss der drei oben erwähnten Parameter. Dabei sollen zwei der drei Grössen ($\mathbf{F}_1$, Y, S) als fixiert betrachtet und der Einfluss der dritten auf das Abflussbild studiert werden.

1) Einfluss von $\mathbf{F}_1$ (Bild 2): Um S für eine vorgegebene Schwellengeometrie konstant zu halten, wird $\mathbf{F}_1$ durch Veränderung des Durchflusses Q bei fixierter Abflusstiefe h_1 verändert. Für eine kleine Froude-Zahl stellt sich der Wassersprung im Oberwasser der Schwelle ein, letztere übt deshalb keinen direkten Einfluss auf den Sprung aus. Bei Erhöhung von $\mathbf{F}_1$ wandert der Sprung in Richtung Schwelle und erreicht dabei schliesslich einen Grenzzustand, falls das Rollerende genau über der Schwelle steht. Diesen Sprung bezeichnet man als *A-Sprung*. Eine weitere Erhöhung von $\mathbf{F}_1$ drückt den Sprung weiter ins Unterwasser und führt zum *B-Sprung*. Dieser ist kürzer als der A-Sprung und zeichnet sich durch ein sporadisches Auftreten eines zweiten Oberflächenrollers im Unterwasser der Schwelle aus. Wird $\mathbf{F}_1$ noch weiter gesteigert, so wird der Sprungfuss noch näher zur Schwelle gedrückt, er wird also kürzer, und der zweite Oberflächenroller ist nun voll ausgebildet. Die Schwelle hebt den Vorwärtsstrom gegen die Oberfläche, anschliessend stellt sich ein Tauchstrahl ein, der den Boden jedoch noch nicht erreicht. Dieser Sprung wird als *Minimum-B-Sprung* bezeichnet. Eine noch weitere Steigerung von $\mathbf{F}_1$ führt zum *C-Sprung*, bei welchem der Tauchstrahl auf den Unterwasserboden auftrifft. Gleichzeitig stellt sich nun im Unterwasser der Schwelle ein zweiter Wassersprung ein. Dieser wird bei einer Steigerung von $\mathbf{F}_1$ «ausgeblasen», der Abfluss «hüpft» dann über die Schwelle, ohne dass eine bedeutende Energiedissipation eintritt. Der Abfluss über die Schwelle bleibt schiessend, und man bezeichnet ihn als *stehende Welle*. Diese Beschreibung der Abflusstypen zeigt den wesentlichen Einfluss von $\mathbf{F}_1$ und deutet zugleich darauf hin, dass sich nicht durch alle möglichen Abflusstypen eine wirksame Energiedissipation herbeiführen lässt.
2) Einfluss von h_2: wird die Unterwassertiefe h_2 kontinuierlich vom Wert h_2 nach Gl. (2) verkleinert, so stellt sich qualitativ derselbe Fliessvorgang ein, wie er durch eine Vergrösserung von $\mathbf{F}_1$ erzielt wird.
3) Einfluss von S: Besitzt die relative Unterwassertiefe $Y = h_2/h_1$ einen Wert, der leicht kleiner ist als nach Gl. (2), so stellt sich der Wassersprung für einen grossen Wert S oberhalb der Schwelle ein. Bei einer kontinuierlichen Reduktion der relativen Schwellenhöhe wandert der Sprung immer weiter zur Schwelle hin, bis sich wiederum ein C-Sprung einstellt.

Demnach wirkt sich eine Reduktion von Y oder S analog auf die Lage und Form des Sprunges aus wie eine Erhöhung von $\mathbf{F}_1$. Je nach Sprungtyp nimmt demnach Y mit zunehmendem Wert $\mathbf{F}_1$ und abnehmendem Wert S zu. Für $S = 0$ findet man den klassischen Wassersprung als Extremfall.

Neben den bereits beschriebenen Abflusstypen soll der Vollständigkeit halber auch der ausschliesslich von der Schwelle beeinflusste Sprung erwähnt werden, bei dem das Unterwasser keinen Einfluss auf den Sprung besitzt. Letzteres ist in diesem Fall so niedrig, dass sich im Unterwasser

Tabelle 1: Typische Werte für den klassischen Wassersprung.

$\mathbf{F}_1$	(1)	2	4	6	8	10	∞
Y^*	1	2,37	5,18	8,00	10,82	13,65	∞
η(%)	0	9	42	58	68	74	100
J_f(%)	–	2	12	23	34	46	∞
$\kappa \cdot 10^{-3}$	–	5,11	7,39	6,37	5,37	4,60	0
K($m^{1/3}s^{-1}$)	–	44	36	39	43	46	–

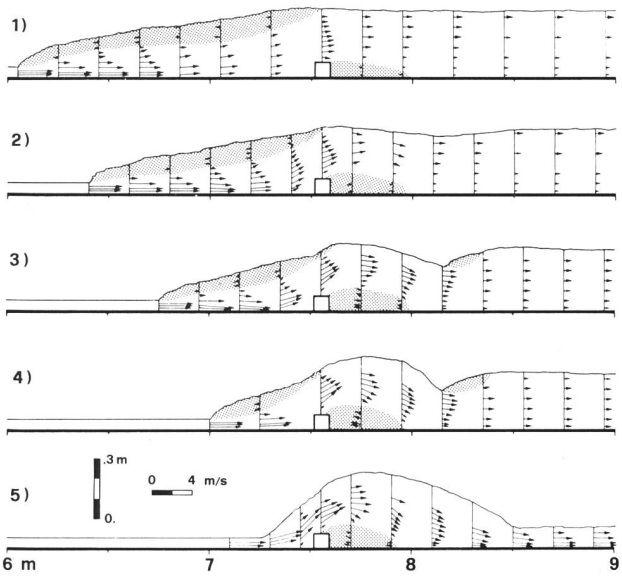
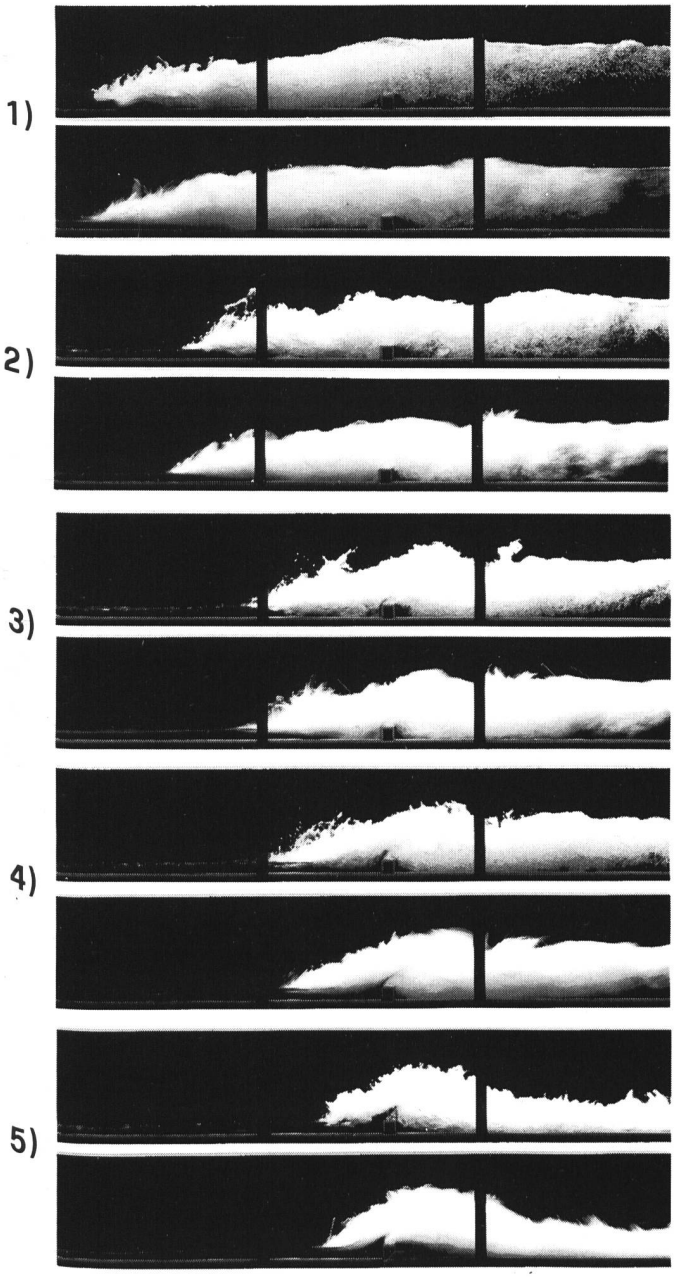


Bild 2. Durch Querschwelle beeinflusster Wassersprung ($\mathbf{F}_1 = 5{,}23$) 1) Typ A, 2) Typ B, 3) Typ Minimum-B, 4) Typ C, 5) Typ stehende Welle.



der Schwelle wieder schiessender Abfluss ausbildet. Deshalb soll dieser Sprung, der sich für (*Bretz,* 1988)

$$S > \frac{1}{6}\,\mathbf{F}_1^{1,65} \tag{8}$$

einstellt, weiter nicht berücksichtigt werden. Bild 3 zeigt Fotografien der in Bild 2 dargestellten Sprungtypen und weist durch Lang- und Kurzzeitbelichtung insbesondere auf den stark turbulenten Abflusscharakter hin.

Dimensionierungshinweise

Im folgenden sollen experimentell abgeleitete Beziehungen für die konjugierten Wassertiefen und für die typischen Längen vorgestellt werden. Die Experimente wurden in einer Rechteckrinne der Breite $B = 50$ cm und der Höhe 70 cm durchgeführt. Sie werden von *Bretz* (1988) ausführlich beschrieben.

Das Verhältnis der konjugierten Wassertiefen Y in einem Tosbecken mit Querschwelle lässt sich durch die folgende Beziehung beschreiben

$$Y = Y^* - \Delta Y_s \tag{9}$$

wobei Y^* das Verhältnis der konjugierten Tiefen eines klassischen Wassersprungs nach Gl. (2) darstellt ($S = 0$) und somit allein von $\mathbf{F}_1$ abhängt, und eines Zusatzterms ΔY_s, der den Einfluss der Schwelle in Rechnung stellt. Letzterer folgt nach *Bretz* (1988) dem Gesetz

$$\Delta Y_s = \alpha \cdot S^{\beta} \tag{10}$$

wobei die Koeffizienten je nach Wassersprungtyp Konstante darstellen. Tabelle 2 gibt die gemittelten Versuchsresultate wieder und zeigt, dass ΔY_s unabhängig von $\mathbf{F}_1$ ist. Dies bedeutet bei Zunahme von S eine Parallelverschiebung der Kurven $Y(\mathbf{F}_1)$ nach rechts. Bild 4 zeigt die Endauswertung für den B-Sprung. Für $S = 0$ sind dabei zwei Kurven eingezeichnet, einerseits $Y^*(\mathbf{F}_1)$ nach Gl. (2) und andererseits die experimentell gefundene Gerade

$$Y(S = 0) = Y^* - \Delta Y_f \tag{11}$$

mit

$$\Delta Y_f = 0{,}11\,\mathbf{F}_1 - 0{,}36. \tag{12}$$

ΔY_f stellt den Einfluss der Wandreibung («friction») dar und ist anlagespezifisch. Für Grossausführungen ist er nicht zu berücksichtigen, da dann Viskositätserscheinungen vernachlässigbar klein werden (*Hager* und *Bremen,* 1989).

Gl. (10) besagt, dass der Unterwasserspiegel h_2 bei Anwesenheit einer Querschwelle gegenüber dem Fall $S = 0$ tiefer liegt, und zwar um so mehr, desto höher die Schwelle ist und je mehr ein Minimum-B-Sprung angestrebt wird. Gleichzeitig mit der Senkung von h_2 steigt auch die Effizienz η des

Tabelle 2: Koeffizienten der Gleichungen (10), (13) und (14) in Abhängigkeit des Wassersprungtyps für $4 < \mathbf{F}_1 < 13$.

Typ	α	β	γ	δ	ε	μ
A	0,40	0,85	6,27	5,75	8,68	11,23
B	0,60	0,75	5,29	5,37	8,44	12,97
B_{min}	0,85	0,65	4,64	4,84	6,93	6,83

Bild 3. Fotografien der in Bild 2 untersuchten Sprungtypen. Belichtungszeit 1/125 s (oben) und 1/4 s (unten).

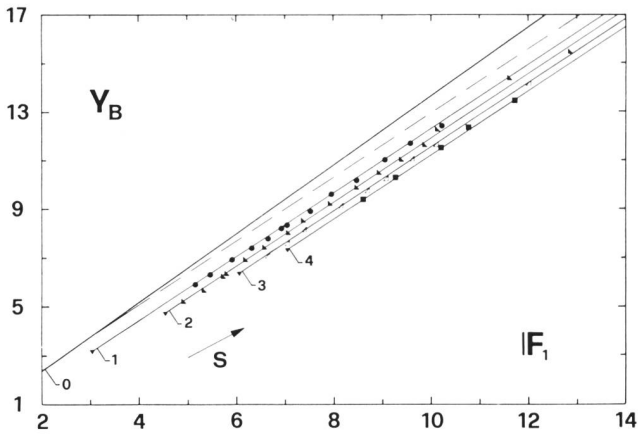
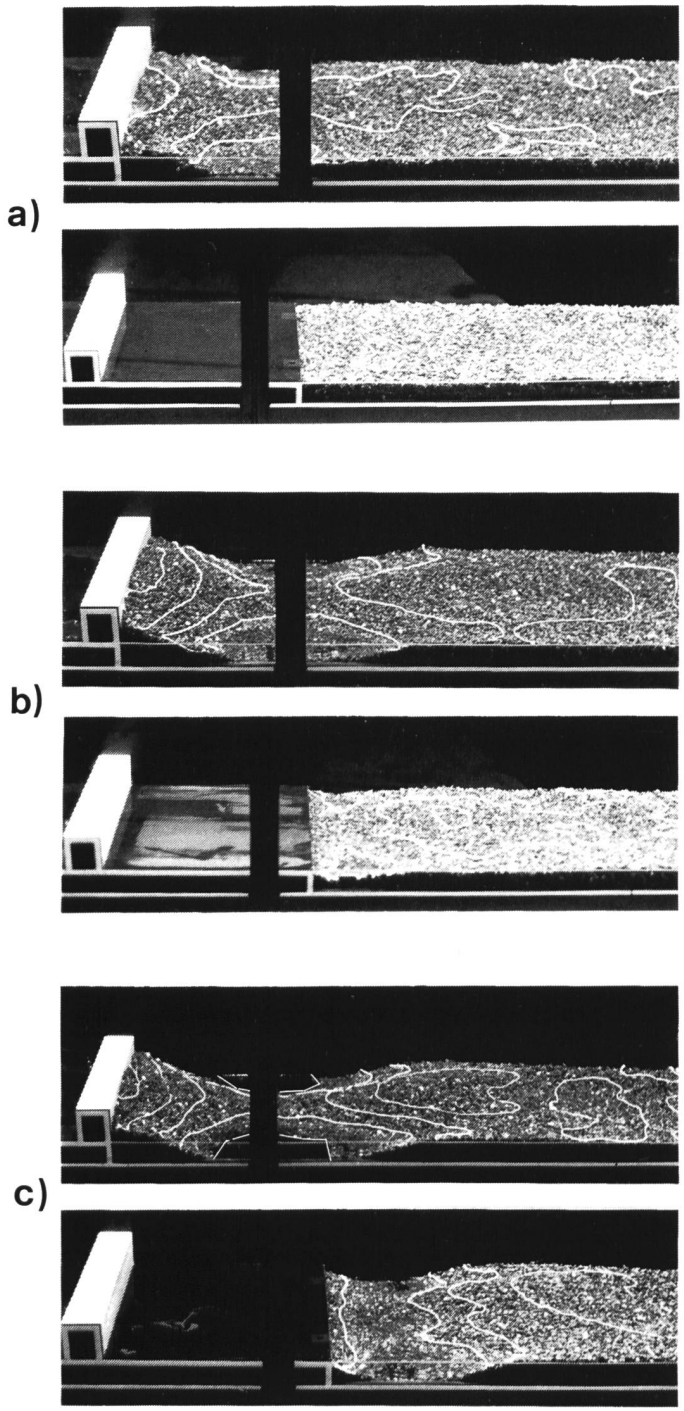


Bild 4. Konjugierte Wassertiefen $Y(\mathbf{F}_1, S)$ für den B-Sprung. (– – –) $S = 0$ bei Berücksichtigung der Wandreibung.



schwellenkontrollierten Wassersprunges. Die Zunahme $\Delta\eta_s$ infolge Schwelle ist jedoch mässig für $4 < \mathbf{F}_1 < 8$ und klein für $\mathbf{F}_1 \geq 8$. Querschwellen erhöhen deshalb den Wirkungsgrad eines Tosbeckens nur unbedeutend.

Wie eingangs bereits festgestellt wurde, ist der Hauptzweck einer Querschwelle die Erhöhung der *Kompaktheit* eines Tosbeckens und die *Stabilisierung* des Wassersprungs. Kompaktheit bedeutet eine Längenreduktion des zu befestigenden Bauwerkes, und die Stabilisierung zielt hin auf eine Unempfindlichkeit des Wassersprunges gegenüber kleinen Variationen der Randbedingungen, also des Durchflusses Q und der Unterwassertiefe h_2.

Nach Bild 1b) bedeuten L_s und L_B die Längen des Sprungfusses bis zur Schwelle resp. bis zum Unterwasserende des Tosbeckens. Beide Längen lassen sich dimensionslos darstellen als $\lambda_s = L_s/h_1$ und $\lambda_B = L_B/h_1$. Experimentell ergeben sich die beiden Parameter allein als Funktion von $\mathbf{F}_1$ durch

$$\lambda_s = \gamma \mathbf{F}_1 - \delta, \tag{13}$$

$$\lambda_B = \varepsilon \mathbf{F}_1 - \mu \tag{14}$$

wobei γ, δ, ε, μ Zahlenwerte nach Tabelle 2 in Abhängigkeit des Sprungtyps sind. Im Vergleich dazu gilt für den klassischen Wassersprung

$$\lambda_r = 6{,}3\,\mathbf{F}_1 - 3{,}6, \tag{15}$$

$$\lambda_j = 8{,}5\,\mathbf{F}_1 - 3{,}0 \tag{16}$$

mit $\lambda_r = L_r/h_1$ und $\lambda_j = L_j/h_1$. Daraus ersieht man eine Verkürzung sowohl von λ_s gegenüber λ_r und von λ_B gegenüber λ_j bei zunehmender $\mathbf{F}_1$-Zahl und bei Änderung des Sprungtyps vom A- nach dem B- nach dem Minimum-B-Sprung. Eine systematische Abhängigkeit der Parameter λ_s und λ_B von der relativen Schwellenhöhe S wurde experimentell nicht festgestellt.

Anwendung der Resultate

Die vorstehenden Resultate könnten zur Ansicht führen, ein Minimum-B-Sprung sei der in allen Fällen zu wählende Sprungtyp. In der Tat, für diesen Sprung stellt sich das tiefste Unterwasser ein, er führt zur höchsten Energiedissipation und ergibt zudem die kürzesten Abmessungen für das Tosbecken. Dieser Tatsache gegenüber steht jedoch die stärkste Beanspruchung der meist ungeschützten Unterwassersohle. Gemäss der Definition des Minimum-B-Sprunges stellt sich im Unterwasser der Querschwelle ein Tauchstrahl ein, der jedoch den Boden noch nicht berührt. Trotzdem sind infolge der erhöhten Turbulenz Erosionen in diesem Bereich zu befürchten. Deshalb wurde von *Bretz* das Tosbecken um die Länge $L_B - L_s$ über die Schwelle hinausgeführt und dadurch ein zusätzlicher Schutz des Bodens im Bereich des Tauchstrahles herbeigeführt.

Bild 5 zeigt typische Erosionsversuche für den A-, den Minimum-B- und den C-Sprung mit und ohne Unterwasser-Bodenbefestigung. Aus diesen Darstellungen wird der Einfluss der über die Schwelle hinausgeführten Bodenbefestigung deutlich. Der Tauchstrahl induziert einen Bodenwirbel zwischen dessen Auftreffpunkt und der oberwasserseitigen Schwelle. Dadurch wird im Bereich des Auftreffpunktes Material erodiert und rückwärts zur Schwelle transportiert. Ein ähnliches Phänomen kann man auf der Windschattenseite

Bild 5. Seitliche Ansicht von Erosionsversuchen für a) A-Sprung, b) Minimum-B-Sprung und c) C-Sprung. Das Tosbecken endet entweder mit der Schwelle (oben) oder wird um $L_B - L_s$ ins Unterwasser weitergeführt (unten).

von Schneezäunen beobachten. Wird hingegen das Tosbecken um die Länge des Bodenwirbels über die Schwelle hinaus verlängert, so stellt sich eine massive Reduktion der Erosion ein. Diese für $\mathbf{F}_1 = 5{,}23$ und $S = 1{,}4$ erzielten Resultate führen zu den Folgerungen:

- Durch die Verlängerung des Tosbeckens um $\Delta L = L_B - L_s$ werden die Bodenerosionen durch den Tauchstrahl beträchtlich reduziert,
- für leicht erodierbare Sohlenmaterialien darf lediglich der A-Sprung vorgesehen werden,
- falls die Sohle wenig erodierbar ist, kann ein B-Sprung in Betracht gezogen werden,
- für ausgesprochen guten Untergrund wie Fels lässt sich der Minimum-B-Sprung in Erwägung ziehen.

Diese Angaben lassen sich nicht einfach quantifizieren, vielmehr sollten sie einen Hinweis auf die Anwendungskriterien geben. Wird die Sohle aber weiter als $L_B - L_s$ über die Schwelle hinausgezogen oder besteht wenig Wahrscheinlichkeit, dass die Bemessungsgrössen überschritten werden, so darf man eher in Richtung des Minimum-B-Sprungs gehen.
Die Wahl des Sprungtyps hängt massgebend von den lokalen Gegebenheiten, der Erfahrung des projektierenden Ingenieurs und der Ausführungsqualität ab.

Beispiel 1

Man betrachte eine Schussrinne der Breite $B = 10$ m, die einen Bemessungsabfluss von $Q = 60\ \mathrm{m^3s^{-1}}$ aufzunehmen hat. Wie ist das Tosbecken auszuführen, falls die Zulauftiefe $h_1 = 0{,}4$ m und die Unterwassertiefe dabei $h_2 = 3{,}7$ m beträgt? Der Unterwasserboden ist als wenig erodierbar anzunehmen.
Mit $Q = 60\ \mathrm{m^3s^{-1}}$, $B = 10$ m und $h_1 = 0{,}4$ m erhält man für $V_1 = 15\ \mathrm{ms^{-1}}$ und $\mathbf{F}_1 = 7{,}6$. Nach *Hager* und *Bremen* (1989) sind bei $q = Q/B > 0{,}1\ \mathrm{m^2s^{-1}}$ die Viskositätseinflüsse vernachlässigbar, also $\Delta Y_f = 0$.
Das Verhältnis der konjugierten Tiefen beträgt $Y = 3{,}7/0{,}4 = 9{,}25$, der Sprungtyp B wird zugrunde gelegt. Nach Gl. (2) beträgt $Y^* = \sqrt{2}\cdot 7{,}6 - 0{,}5 = 10{,}25$, womit $\Delta Y_s = 10{,}25 - 9{,}25 = 1{,}0$. Demnach ergibt sich mit $\Delta Y_s = 0{,}60\cdot S^{0{,}75}$ für $S = 2$ und somit $s = 2\cdot 0{,}4$ m $= 0{,}8$ m als Schwellenhöhe. Die Effizienz des Sprunges beträgt $\eta = 68\,\%$.
Für die charakteristischen Längen des Tosbeckens errechnet man nach den Gleichungen (13) und (14) $\lambda_s = 35$ und $\lambda_B = 51$, also $L_s = 35\cdot 0{,}4 = 14$ m und $L_B = 51\cdot 0{,}4$ m $= 21$ m. Bild 6 zeigt die wesentlichen Abmessungen des Tosbekkens.
Im Vergleich zum klassischen Wassersprung resultiert aus dem Tosbecken mit Querschwelle eine Reduktion von 10 % bezüglich der Unterwassertiefe, eine Erhöhung der Effizienz um 5 % und eine Verkürzung des Sprunges um 17 %.

Beispiel 2

Wie verändert sich der im vorstehenden Beispiel berechnete Wassersprung, falls der Durchfluss Q um $\Delta Q = \pm 10\,\%$ variiert wird und falls sowohl im Oberwasser- wie auch im Unterwasser-Kanal Normalabfluss nach Manning-Strickler angenommen wird?
Für Normalabfluss gilt folgende Durchfluss-Wassertiefen-Beziehung

$$Q = K J_s^{1/2} (Bh)^{5/3} (B+2h)^{-2/3}, \tag{17}$$

womit

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \left[\frac{5}{3}\frac{\Delta h}{h} - \frac{4}{3}\frac{\Delta h}{B+2h}\right] = \frac{1}{3}\left(\frac{5B+6h}{B+2h}\right)\frac{\Delta h}{h}. \tag{18}$$

Mit $\mathbf{F} = Q/(gB^2h^3)^{1/2}$ ergibt sich weiter

$$\frac{\Delta \mathbf{F}}{\mathbf{F}} = \frac{\Delta Q}{Q} - \frac{3}{2}\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta Q}{Q}\left[\frac{B-6h}{2(5B+6h)}\right]. \tag{19}$$

Setzt man die Werte ein, so folgt $\Delta h/h = \pm 0{,}62\cdot 0{,}1 = 0{,}062$ und $\Delta\mathbf{F}/\mathbf{F} = 0{,}073\cdot 0{,}1 = 0{,}007$. Dies bedeutet, dass $\Delta\mathbf{F} \sim 0$. Somit bleiben Y und Y^* nahezu unverändert, also auch ΔY_s und S. Hingegen wird die benötigte Schwellenhöhe $s = 0{,}80$ m $\pm 0{,}05$ m für $\Delta Q/Q = \pm 10\,\%$. Also hat der Abfluss bei $Q = 66\ \mathrm{m^3s^{-1}}$ und $s = 0{,}8$ m eher die Tendenz zu einem Minimum-B-Sprung, während bei $Q = 54\ \mathrm{m^3s^{-1}}$ sich eher ein A-Sprung einstellt. Das Tosbecken mit Querschwelle kann aber die Belastungsänderung aufnehmen, wogegen ein klassischer Wassersprung ($S = 0$) die Position je nach dem K-Wert bedeutend variieren würde.

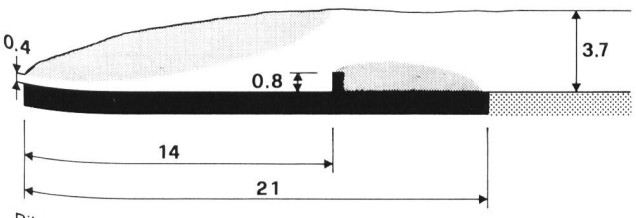


Bild 6. Längsschnitt des Tosbeckens nach Berechnungsbeispiel (Längen in m).

Schlussfolgerungen

Im Gegensatz zum klassischen Wassersprung können sich in Tosbecken mit einer durchgehenden Querschwelle verschiedene Sprungtypen einstellen. Relevant für die Praxis sind der A-, der B- und der Minimum-B-Sprung. Diese Sprünge sind vom Unterwasser her eingestaut und unterscheiden sich durch die Distanz vom Sprungfuss bis zur Schwelle und von den im Unterwasser der Schwelle auftretenden Bodenablösungszonen. Die Wahl eines Sprungtyps steht in Relation mit dem Zustand des natürlichen Unterwasserbodens.
Anhand von ausgedehnten Labormessungen lassen sich Beziehungen aufstellen für die konjugierten Wassertiefen Y und für die charakteristischen Tosbecken-Längsabmessungen. Aus diesen geht der wesentliche Einfluss der Froude-Zahl $\mathbf{F}_1$ und der relativen Schwellenhöhe $S = s/h_1$ klar hervor. Alle Resultate gelten für die üblichen Werte von $\mathbf{F}_1$, sie lassen sich zudem einfach anwenden. Berechnungsbeispiele erläutern das Vorgehen bei typischen Aufgaben der Dimensionierung von Tosbecken.

Literaturnachweis

Bretz N.V. (1988): Ressaut Hydraulique Forcé par Seuil. Communication 2, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Dép. de Génie Civil, EPFL, Lausanne. Ebenfalls erschienen als Dissertation EPFL Nr. 699 (1987).

Hager W. H., Bremen R. (1989): Classical Hydraulic Jump: I Sequent Depths. «Journal Hydraulic Research». Vol. 27, 4.

Sinniger R., Hager W. H. (1989): Constructions Hydrauliques – Ecoulements Stationnaires. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne.

Adresse der Verfasser: *Willi H. Hager,* Dr. sc. tech., dipl. Bauing. ETHZ, VAW, ETH-Zentrum, 8092 Zürich (vormals an der EPFL), und Prof. *Richard Sinniger,* dipl. Bauing. ETHZ, LCH, DGC, EPFL, CH-1015 Lausanne.