

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 112 (2020)
Heft: 3

Artikel: Bemessung von klassischen Tosbecken unterhalb von Treppenschussrinnen
Autor: Stojnic, Ivan / Pfister, Michael / Matos, Jorge
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941694>

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: 13.02.2026

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

Bemessung von klassischen Tosbecken unterhalb von Treppenschussrinnen

Ivan Stojnic, Michael Pfister, Jorge Matos, Giovanni De Cesare, Anton Schleiss

Zusammenfassung

Aufgrund des Fortschritts im Talsperrenbau mit Walzbeton (RCC) werden weltweit häufig Treppenschussrinnen erstellt. Nach jeder Schussrinne ist ein hydraulisches Bauwerk zur Energiedissipation vorzusehen, beispielsweise ein Tosbecken. Obwohl die Hydraulik von Treppenschussrinnen in den letzten Jahrzehnten eingehend untersucht wurde, sind aktuell nur wenige Ansätze zur Bemessung von Tosbecken nach einer Treppenschussrinne verfügbar.

Die hier vorgestellten umfangreichen Modellversuche sollen diese Lücke für klassische Tosbecken mit ebener Sohle ohne Einbauten schliessen. Die Experimente zeigen, dass solche Tosbecken unterhalb von Treppenschussrinnen nicht mit den gleichen Ansätzen dimensioniert werden können, wie sie nach glatten Schussrinnen verwendet werden. Ziel dieses Artikels ist es, neue Bemessungsansätze für solche Tosbecken bereitzustellen.

Résumé

Dimensionnement des bassins amortisseurs classiques à l'aval des coursiers en marches d'escalier

Les coursiers en marches d'escalier ont gagné en popularité grâce aux progrès faits dans la construction de barrages en béton compacté au rouleau (BCR). Un ouvrage de dissipation d'énergie tel un bassin amortisseur, doit être considéré à la sortie de chaque coursier. Bien que l'hydraulique des coursiers en marches d'escalier ait été étudiée en détail au cours des dernières décennies, il n'existe actuellement que peu d'approches disponibles pour la conception des bassins amortisseurs à la sortie des coursiers en marches d'escalier. Les nombreux essais détaillés sur modèles physiques présentés visent à combler cette lacune pour les bassins amortisseurs classiques à fond plat sans blocs ou seuils.

Les essais montrent que de tels bassins amortisseurs à la sortie des coursiers en marches d'escalier ne peuvent pas être dimensionnés avec les mêmes approches que celles utilisées à l'aval de coursiers lisses. L'objectif de cet article est de fournir de nouveaux critères de dimensionnement pour tels bassins amortisseurs.

Summary

Design of classical stilling basins preceded by stepped chutes

Advances in dam construction techniques with roller compacted concrete (RCC) significantly increased the number of constructed stepped spillways. Stilling basins are often implemented as an energy dissipator at their end. Although stepped chute hydraulics was extensively investigated in the last decades, only fragmentary design information is currently available for stilling basins preceded by stepped chutes. Therefore, an extensive experimental campaign was performed to study the hydraulic behavior of classical stilling basins downstream of stepped chute. The results of this study indicate that design guidelines for stilling basins developed for smooth chute spillways, and currently used in engineering practice for stepped spillways, are not applicable for stepped chute approach flows.

The aim of this paper is thus to present new practical design guidelines for such stilling basins.

1. Einleitung

Die Einführung von Walzbeton (RCC) in den 1980er-Jahren erhöhte die Anzahl der Hochwasserentlastungen mit Treppenschussrinnen (Bild 1a) weltweit. In neuerer Zeit werden Treppenschussrinnen auch an den Flanken von Schüttböschungen im Fels angeordnet (Bild 1b, Baumann et al., 2006). Der Abfluss auf einer Treppenschussrinne erfährt einen grösseren Energieverlust im Vergleich zur glatten Schussrinne. Trotzdem ist nach einer Treppenschussrinne normalerweise ein Tosbecken zur Energieumwandlung notwendig. Obwohl die Hydraulik von Treppenschussrinnen in den letzten Jahrzehnten eingehend untersucht wurde, befassten sich nur wenige Studien mit der Funktionsweise eines Tosbeckens mit Zufluss aus einer Treppenschussrinne (Stojnic, 2020; Stojnic et al., 2020a, b). In der Praxis wurden bis anhin die Bemessungsrichtlinien für Tosbecken unterhalb von glatten Schussrinnen auch für Treppenschussrinnen verwendet. Da sich die Abflussstruktur aufgrund einer gestuften Oberfläche – respektive wegen deren Makrorauheit – erheblich verändert, ist eine solche Praxis jedoch fraglich.

Aus diesem Grund wurde eine umfassende experimentelle Studie durchgeführt, um die Auswirkung des Treppenschussrinnenzuflusses auf die Funktionsweise eines klassischen Tosbeckens zu untersuchen. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, umfassten die experimentellen Untersuchungen die Strömungsverhältnisse sowohl in Tosbecken unterhalb von glatten als auch von gestuften Schussrinnen. Der vorliegende Beitrag fasst die wichtigsten Ergebnisse zusammen und präsentiert neue Bemessungsansätze für klassische Tosbecken unterhalb von Treppenschussrinnen.

2. Versuchsanlage

Die Experimente wurden im Wasserbau-labor (LCH) der Ecole Polytechnique Fé-

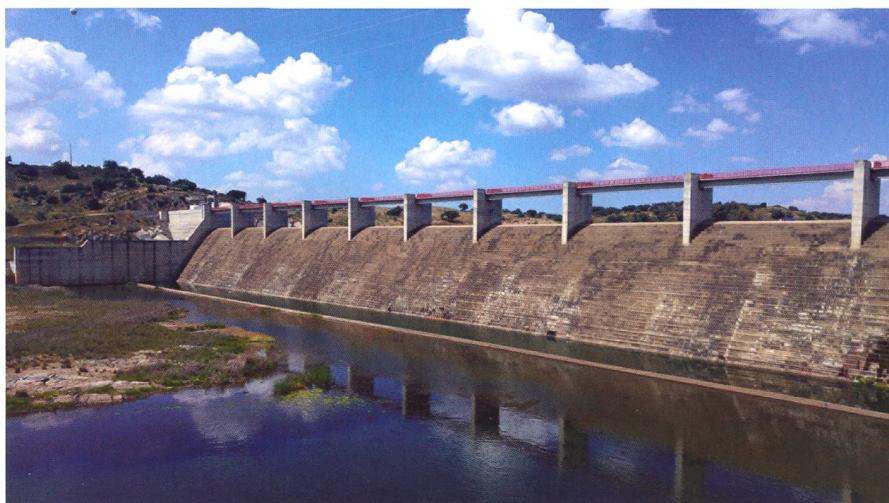


Bild 1: (a) Pedrógão-Staudamm mit Treppenschussrinne, Portugal (I. Stojnic), und (b) Treppenschussrinne mit Tosbecken an der Flanke des Steinschüttdamms des Pumpspeicherwerks Siah Bishe im Iran (M. Katterbach).

dérale de Lausanne (EPFL) unter Verwendung eines physikalischen Modells mit einer glatten oder gestuften Schussrinne durchgeführt. Das physikalische Modell bestand aus folgenden Hauptelementen (Bild 2 und 3): (1) Strahlbox, zur Steuerung der hydraulischen Zuflussbedingungen zur Schussrinne, (2) eine 5,9 m ($\varphi=30^\circ$) oder 4,8 m ($\varphi=50^\circ$) lange und 0,5 m breite und prismatische Schussrinne, entweder mit glatter oder gestufter Sohle, und (3) ein 6,0 m (nach der um $\varphi=30^\circ$ geneigten Schussrinne) oder 6,5 m ($\varphi=50^\circ$) langes, 0,5 m breites und prismatisches klassisches Tosbecken mit horizontaler Sohle und einer Klappe zur Regulierung der Unterwassertiefe.

Die Messkampagne umfasste die Ermittlung der Strömungsbedingungen am Ende der Schussrinne (Luftkonzentrationsprofile, Fließgeschwindigkeitsprofile und -tiefen), Druckschwankungen und Abflusstiefen entlang der Beckensohle sowie strömungsinterne Luftkonzentrationsprofile im Tosbecken. Alle Messungen wurden entlang der Achse des Beckens durchgeführt. Im Tosbecken selbst wurde über dessen gesamte Länge gemessen, ab dem Beginn des Wechselsprungs am Schnittpunkt der Schussrinne mit dem Tosbeckenboden (Bild 3).

Die Werte am Ende der Schussrinne, insbesondere die tiefengemittelte Luftkonzentration C_1 , dienten der Bestimmung

der folgenden Parameter: (1) äquivalente Reinwassertiefe $h_1 = (1 - C_1) y_{90}$, (2) mittlere Fließgeschwindigkeit $V_1 = q/h_1$, sowie (3) Froude-Zahl $F_1 = V_1/(gh_1)^{0.5}$ mit dem spezifischen Abfluss q , der Erdbeschleunigung g , der charakteristischen Fließtiefe y_{90} (definiert bis zu $y(C=0.9)$, Wood et al. 1983), mit:

$$C_1 = \frac{1}{y_{90}} \int_0^{y_{90}} C \, dy \quad (1)$$

Insgesamt wurden 30 Versuche durchgeführt. Diese wurden mit zwei verschiedenen Neigungen der Schussrinne ($\varphi=30^\circ$ und 50°), für zwei unterschiedliche Treppenhöhen ($s=0,03$ und $0,06$ m) sowie einer glatten Sohle und verschiedenen Abflüssen

($0,198 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,364 \text{ m}^2/\text{s}$) durchgeführt. Um die Wirkung eines belüfteten Zuflusses zu beurteilen, wurde die Belüftung an der Strahlbox variiert, um verschiedene Werte C_1 zu erzeugen ($0,15 < C_1 < 0,37$). Die Versuchsreihe mit Treppenschussrinnen umfasste relativ kritische Abflusstiefen $h_c = (q^2/g)^{1/3}$ zwischen $2,70 \leq h_c/\text{s} \leq 7,94$. Am Fusse der Treppenschussrinne herrschte ein quasi gleichmässiger Zweiphasenabfluss, das heisst Normalabfluss.

Für weitere Details zu Versuchsanlage, Instrumentierung und Messprogramm wird auf Stojnic (2020) verwiesen.

3. Ergebnisse

3.1 Länge der Walze und des Wechselsprungs

Die Walzenlänge L_R ist definiert als Distanz zwischen dem Beginn des Wechselsprungs ($x=0\text{m}$, Bild 3) und dem Querschnitt, bei dem die zeitgemittelte Abflusstiefe $\eta(x)$ ein Maximum erreicht. Bild 4 zeigt die gemessenen dimensionslosen Walzenlängen (Index R) L_R/h_2 , aufgetragen gegen F_1 (leere Symbole). Die Werte sind mit $L_R/h_2 \approx 5,0$ praktisch unabhängig von den Zuflussbedingungen und vom Schussrinnentyp (glatt oder gestuft).

Die Länge des Wechselsprungs L , wurde aus den gemessenen Schwankungen η' der Abflusstiefe und dem Druck entlang der Sohle ermittelt (Stojnic, 2020, Stojnic et al., 2020a). Es wurden drei Kriterien zur Bestimmung der Sprunglänge respektive deren Ende berücksichtigt:

- die Schwankungen der Abflusstiefe η' sind um 10 % höher als jene von h_2 ,
- die Schwankungen des Sohldrucks p' sind um 10 % höher sind als jene bei h_2 sowie
- die Druckverteilung entlang der Sohle folgt einer Gauss'schen Verteilung mit einer Schiefe S und einer Kurtosis K von jeweils null.

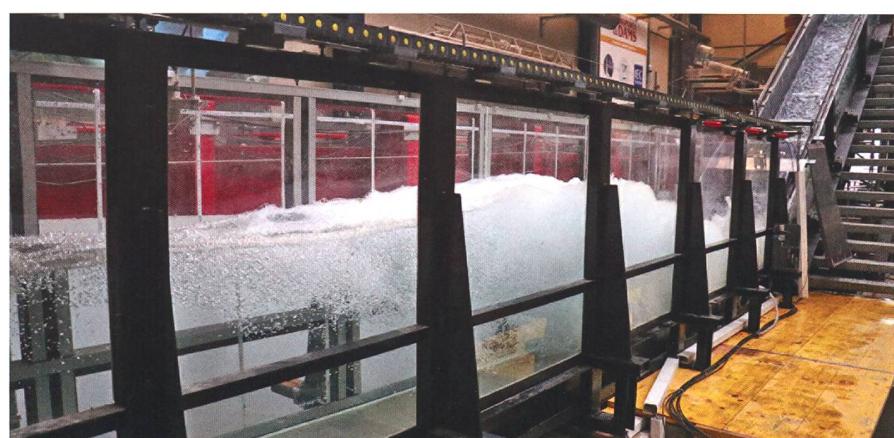


Bild 2: Physikalisches Modell im Wasserbaulabor LCH, EPFL.

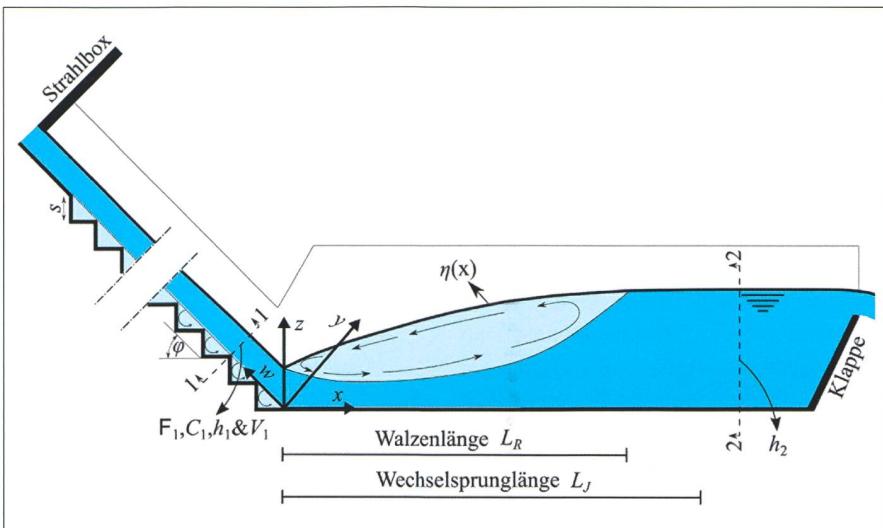


Bild 3: Definitionsskizze mit verwendeter Nomenklatur.

In Bild 4 ist die gemessene dimensionslose Wechselsprunglänge (Index J) L_J/h_2 als Funktion der Froude-Zahl F_1 des Tosbeckenzuflusses aufgetragen (volle Symbole \bullet). Die dimensionslosen Sprunglängen für glatten Zufluss liegen im Bereich $5,4 \leq L_J/h_2 \leq 6,1$, mit einem Mittel von $L_J=5,75h_2$, ähnlich wie bei Peterka (1958). Wechselsprünge mit einem Zufluss aus einer Treppenschussrinne haben grössere L_J/h_2 , nämlich $6,5 \leq L_J/h_2 \leq 7,1$, mit einem Mittel von $L_J=6,70h_2$.

3.2 Abflusstiefen entlang des Tosbeckens

Bild 5 zeigt den Verlauf der dimensionslosen mittleren Abflusstiefe $Z = (\eta - h_1)/(h_2 - h_1)$ entlang des Tosbeckens sowie die charakteristische Abflusstiefe $Z_{90} = (z_{90} - h_1)/(h_2 - h_1)$ aller Tests. Dabei ist η die zeitgemittelte Abflusstiefe, z_{90} die charakteristische Abflusstiefe bis $z(C=0,90)$ und h_2 die mittlere konjugierte Unterwassertiefe (Bild 3).

Die dimensionslosen Abflusstiefen nehmen entlang des Wechselsprungs zu und erreichen ein lokales Maximum am Walzenende, bei $x=L_R$. Danach nimmt die Abflusstiefe wieder leicht ab und erreicht schliesslich den Wert der Unterwassertiefe h_2 . Zuflüsse aus Treppenschussrinnen erhöhen die dimensionslosen Abflusstiefen in der ersten Hälfte der Walze geringfügig, verglichen mit jener der glatten Schussrinne. Der Verlauf der dimensionslosen Abflusstiefen entlang der Walze kann wie folgt beschrieben werden:

$$Z = 1,07 \left(\frac{x}{L_R} \right)^a \quad \frac{x}{L_R} \leq 1,0 \quad (2)$$

$$Z_{90} = 1,12 \left(\frac{x}{L_R} \right)^b \quad \frac{x}{L_R} \leq 1,0 \quad (3)$$

mit $a=0,32$ und $b=0,30$ für Zufluss aus Treppenschussrinnen sowie mit $a=0,39$ und $b=0,36$ für glatte Schussrinnen.

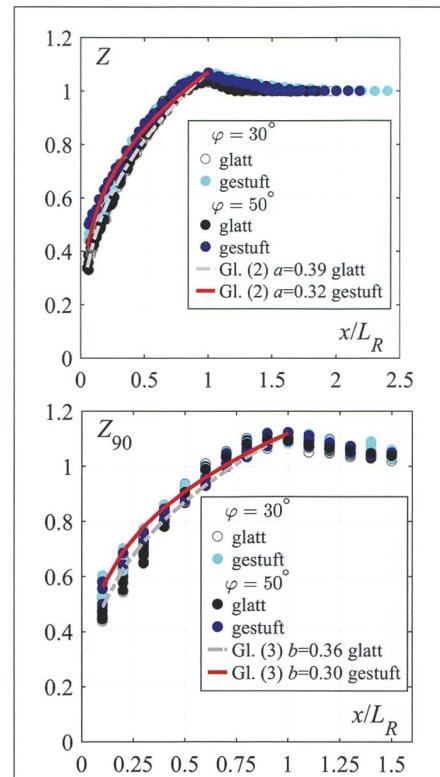


Bild 5: Dimensionslose Abflusstiefen entlang des Tosbeckens versus dimensionslose Koordinate x/L_R , (a) mittlere Abflusstiefe Z mit Gl. (2) und (b) charakteristische Abflusstiefe Z_{90} mit Gl. (3).

In Bild 6 werden die gemessenen konjugierten Abflusstiefenverhältnisse h_2/h_1 mit der Lösung des Impulssatzes für einen prismatischen und horizontalen Kanal verglichen. Diese Lösung führt zu (Bélanger):

$$\frac{h_2}{h_1} = 0,5 \left(\sqrt{1+8F_1^2} - 1 \right) \quad (4)$$

Es ist eine gute Übereinstimmung ersichtlich. Demzufolge kann die konjugierte Unterwassertiefe h_2 , die den Wechselsprung innerhalb des Tosbeckens stabilisiert, mit dem Impulssatz unter Verwendung der äquivalenten Reinwassertiefe h_1 am Schussrinnenende ermittelt werden.

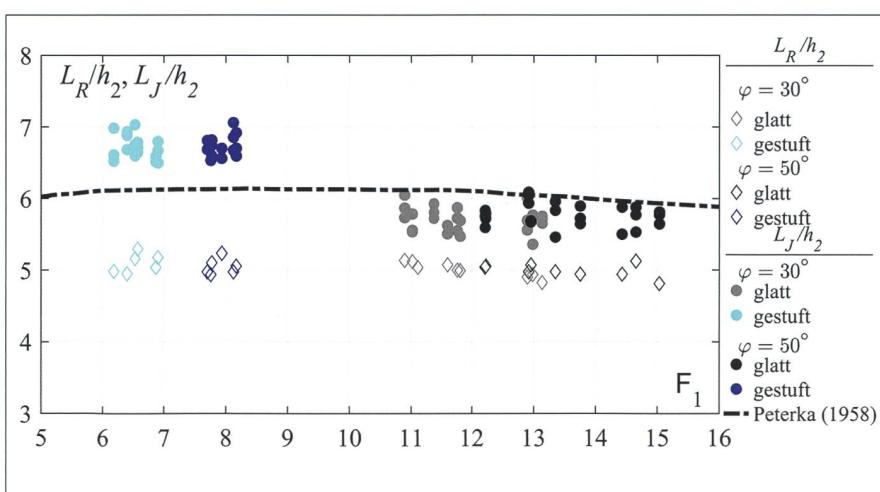


Bild 4: Dimensionslose Walzen- L_R/h_2 und Wechselsprunglänge L_J/h_2 in Funktion der Zufluss-Froude-Zahl F_1 , verglichen mit der Wechselsprunglänge nach Peterka (1958) für glatte Schussrinnen.

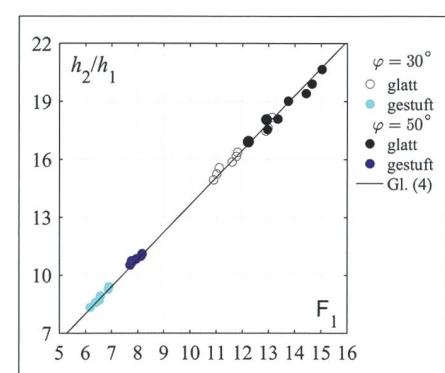


Bild 6: Vergleich der gemessenen konjugierten Abflusstiefen h_2/h_1 mit Gl. (4).

3.3 Sohlendrücke entlang des Tosbeckens

3.3.1 Parameterdefinition

Für die Dimensionierung der Bodenplatten mit ihren Fugen sowie für die Beurteilung des Kavitationspotenzials sind die dynamischen Drücke entlang der Tosbeckensohle massgebend. Daraus kann die hydrodynamische Belastung der Tosbeckensohle abgeleitet werden (Fiorotto und Rinaldo, 1992, Lopardo et al., 1982, Toso und Bowers, 1988). Diese umfasst (1) den zeitlich gemittelten Druck p_m , (2) den dynamischen Druck als Standardabweichung p' , (3) den maximalen Druck p_{max} als 99,9-Perzentil $p_{99,9}$ und (4) den minimalen Druck p_{min} als 0,1-Perzentil $p_{0,1}$. Diese Parameter wurden mit den folgenden Koeffizienten beschrieben:

- zeitlich gemittelter Druck $P_m = (p_m - h_1)/(h_2 - h_1)$,
- dynamische Druckschwankungen $C_P' = p'/(aV_1^2/(2g))$,
- extremer maximaler Druck $C_P^{max} = (p_{max} - p_m)/(aV_1^2/(2g))$ und das 99,9-Perzentil $C_P^{99,9} = (p_{99,9} - p_m)/(aV_1^2/(2g))$, und
- extremer minimaler Druck $C_P^{min} = (p_m - p_{min})/(aV_1^2/(2g))$ und das 0,1-Perzentil $C_P^{0,1} = (p_m - p_{0,1})/(aV_1^2/(2g))$.

Darin ist a der Faktor zur Geschwindigkeitshöhenkorrektur, berechnet mittels des Luftkonzentrations- und Geschwindigkeitsprofils.

3.3.2 Zeitlich gemittelter Sohlendruck

Der normierte und zeitlich gemittelte Druck P_m ist in Bild 7 als Funktion der normierten Koordinate x/L_J aufgetragen. Es kann zwischen drei Fließbereichen unterschieden werden (Stojnic, 2020, Stojnic et al., 2020a):

1. Umlenkungsbereich entlang $x/L_J \leq 0,15$ für $\varphi = 30^\circ$ und $x/L_J \leq 0,18$ für $\varphi = 50^\circ$. Dieser ist gekennzeichnet durch hohe mittlere Drücke infolge der Umlenkung des Wasserstrahls in die Horizontale.

2. Übergangsbereich entlang $0,15 < x/L_J < 1$ für $\varphi = 30^\circ$ und $0,18 < x/L_J < 1$ für $\varphi = 50^\circ$. Die mittleren Drücke sind von der Abflusstiefe abhängig, aber nicht hydrostatisch.

3. Unterwasserbereich entlang $x/L_J \geq 1$.

Der zeitlich gemittelte Druck ist hydrostatisch.

Bei Schussrinnen mit einem Gefälle von $\varphi = 30^\circ$ (glatt oder gestuft) ist die Verteilung des mittleren Wasserdrucks auf der Tosbeckensohle ($x/L_J > 0$) praktisch unabhängig von den Bedingungen des Zuflusses und kann wie folgt beschrieben werden (Bild 7a):

$$P_m = \tanh \left(3,1 \frac{x}{L_J} \right)^{5,9 \frac{x}{L_J} - 0,14}$$

$$\text{für } \varphi = 30^\circ, \text{ glatt und gestuft, } 0,03 \leq \frac{x}{L_J} \leq 1,5 \quad (5)$$

Im Bereich der Umlenkung zu Beginn des Wechselsprungs bei $x/L_J \approx 0$ ist P_m für ein Gefälle von $\varphi = 30^\circ$ nach einer glatten Schussrinne bis zu 2,5 Mal höher als nach einer Treppenschussrinne. Da der mittlere Druck in diesem Bereich hauptsächlich durch die Geschwindigkeit des Zuflusses (Umlenkung des Strahls) bestimmt wird, wurde der Druck zu Beginn des Wechselsprungs (als Werte p^T des ersten Drucktransmitters zu Beginn des Wechselsprungs) mit der kinetischen Energie $aV_1^2/(2g)$ normiert. Dieser normierte mittlere Druck $C_P^T = p^T/(aV_1^2/(2g))$ kann der Tabelle 1 entnommen werden.

Wird das Gefälle der Schussrinne (glatt oder gestuft) auf $\varphi = 50^\circ$ erhöht, vergrößert sich P_m in Bereich der Umlenkung, welche nun ausgedehnter ist ($x/L_J \leq 0,18$ bei $\varphi = 50^\circ$ im Vergleich zu $x/L_J \leq 0,15$ bei $\varphi = 30^\circ$). Diese Veränderung ist ausgeprägter für einen Zufluss aus einer Treppenschussrinne mit einem Gefälle von $\varphi = 50^\circ$. Dabei verschiebt sich auch der Umlenkpunkt stromabwärts ($x/L_J \approx 0,04$ bei $\varphi = 50^\circ$, im Vergleich zu $x/L_J \approx 0$ bei $\varphi = 30^\circ$). Der mittlere Wasserdruck auf die Sohle am Tosbeckenanfang unterhalb von Schussrinnen mit einem Gefälle von $\varphi = 50^\circ$ kann anhand von folgenden Beziehungen bestimmt werden (Bild 7a):

$$P_m = 1,53 - \tanh \left(30 \frac{x}{L_J} \right)^{260 \frac{x}{L_J} - 0,15} \quad \text{für } \varphi = 50^\circ, \text{ gestuft, } \frac{x}{L_J} \leq 0,18 \quad (6)$$

$$P_m = 1,53 - \tanh \left(22 \frac{x}{L_J} \right)^{40 \frac{x}{L_J}} \quad \text{für } \varphi = 50^\circ, \text{ glatt, } 0,03 \leq \frac{x}{L_J} \leq 0,18 \quad (7)$$

Weiter stromabwärts, ab $x/L_J > 0,18$, ist P_m unabhängig vom Gefälle φ der Schussrinne und von den Zuflussbedingungen (glatt oder gestuft) und kann mit Gleichung (5) beschrieben werden (Bild 7a). Der Wert P_m zu Beginn des Wechselsprungs (bei $x/L_J = 0$ für $\varphi = 50^\circ$) kann aus dem Mittelwert der C_P^T -Koeffizienten hergeleitet werden, welche in Tabelle 1 aufgelistet sind.

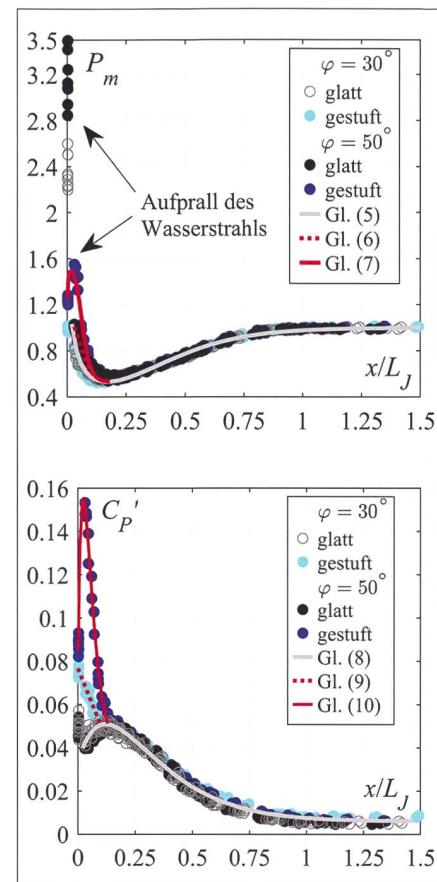


Bild 7: Druckverteilung entlang der Tosbeckensohle als Funktion der normierten Koordinate x/L_J ,
(a) mittlerer Wasserdruck P_m und Gleichungen (5), (6) und (7),
(b) Druckschwankungen C_P' und Gleichungen (8), (9) und (10).

Konfiguration	C_P^T	C_P'	C_P^{max}	$C_P^{99,9}$	C_P^{min}	$C_P^{0,1}$
$\varphi = 30^\circ$, glatt	0,48	0,050	0,32	0,18	0,31	0,17
$\varphi = 30^\circ$, gestuft	0,34	0,076	0,67	0,39	0,30	0,17
$\varphi = 50^\circ$, glatt	0,58	0,050	0,32	0,18	0,32	0,16
$\varphi = 50^\circ$, gestuft	0,41	0,088	1,03	0,18	0,33	0,18

Tabelle 1: Gemessene normierte mittlere Drücke C_P^T , Druckschwankungen C_P' , extreme Maximalwerte C_P^{max} , 99,9-Perzentil ($C_P^{99,9}$), extreme Minimalwerte C_P^{min} und 0,1-Perzentil zu Beginn des Wechselsprungs.

3.3.3 Dynamischer und extremer Sohlendruck

Der Verlauf der Druckschwankungen C_P' entlang der Tosbeckensohle ist in Bild 7b ersichtlich.

Beim Zufluss aus einer glatten Schussrinne ergeben sich bedeutende Druckschwankungen zu Beginn des Wechselsprungs bei $x/L_J \approx 0$ aufgrund der ausgeprägten Strömungsumlenkung. Weiter stromabwärts nehmen die Schwankungen langsam ab und erreichen einen nahezu

konstanten Wert im Unterwasser, was im Einklang mit den Beobachtungen von *Toso und Bowers (1988)* ist. Der Verlauf des Druckschwankungskoeffizienten ist bei glatten Schussrinnen praktisch unabhängig von deren Gefälle φ (Bild 7b).

Die Koeffizienten der extremen Drücke C_p^{max} , $C_p^{99,9}$, C_p^{min} und $C_p^{0,1}$ haben einen ähnlichen Verlauf wie die Druckschwankungen C_p' . Eine detaillierte Analyse dieser Koeffizienten ist in *Stojnic (2020)* und *Stojnic et al. (2020)* zu finden.

Die Extremwertkoeffizienten der Drücke entlang der Tosbeckensohle lassen sich nach einer glatten Schussrinne beschreiben als (Bild 7b):

$$C_p = c - \tanh \left(d \frac{x}{L_J} \right)^{e^{\frac{x}{L_J} + f}}$$

für $30^\circ \leq \varphi \leq 50^\circ$, glatt, $\frac{x}{L_J} \geq 0,03$ (8)

Die Konstanten c , d , e und f sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Bei einem Zufluss aus einer Treppenschussrinne ist der Druckschwankungskoeffizient am Tosbeckeneingang lokal deutlich höher (Bild 7b), und dies sowohl für ein Gefälle von $\varphi=30^\circ$ und $\varphi=50^\circ$. Weiter stromabwärts nehmen die Druckschwankungen für $\varphi=30^\circ$ linear ab und entsprechen den Werten des Zuflusses aus einer glatten Schussrinne entlang $x/L_J \geq 0,1$. Wenn das Gefälle der Treppenschussrinne von $\varphi=30^\circ$ auf 50° erhöht wird, erhöht sich auch der Druckschwankungskoeffizient C_p' im Bereich von $x/L_J \leq 0,13$. Zudem verschiebt sich der Ort der maximalen Druckschwankungen leicht stromabwärts, zur Umlenkung des Strahls bei $x/L_J \approx 0,04$ hin. Dort ergeben sich bei einem Gefälle von $\varphi=50^\circ$ bis doppelte Koeffizienten im Vergleich zum Gefälle von $\varphi=30^\circ$. Verglichen mit dem Zufluss aus einer glatten Schussrinne ergeben sich dreifache Werte. Unterhalb von $x/L_J \geq 0,04$ nimmt der Koeffizient ab und ist ab bei $x/L_J=0,13$ unabhängig von den Zuflussbedingungen (glatt oder gestuft) und dem Gefälle ($\varphi=30^\circ$ oder 50° , Bild 7b).

Bei einem Zufluss aus einer Treppenschussrinne können die ausgeprägten Extremwerte und deren Schwankungen am Tosbeckenanfang mit den folgenden Beziehungen abgeschätzt werden (Bild 7b):

$$C_p = i \frac{x}{L_J} + j$$

für $\varphi=30^\circ$, gestuft, $\frac{x}{L_J} \leq 0,1$ (9)

$$C_p = k - \tanh \left(m \frac{x}{L_J} \right)^{n^{\frac{x}{L_J} + o}}$$

für $\varphi=50^\circ$, gestuft, $\frac{x}{L_J} \leq 0,13$ (10)

Die Konstanten i , j , k , m , n und o sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Weiter stromabwärts, ab $x/L_J > 0,1$ bei $\varphi=30^\circ$ und ab $x/L_J > 0,13$ bei $\varphi=50^\circ$, sind die Extremwertkoeffizienten für Treppenschussrinnen mit denen einer glatten Schussrinne identisch und können mit Gleichung (8) bestimmt werden.

Gleichung	Konstante	C_p'	C_p^{max}	$C_p^{99,9}$	C_p^{min}	$C_p^{0,1}$
(8)	c	1,006	1,034	1,020	1,020	1,015
	d	3,00	3,41	3,31	2,52	2,46
	e	0,31	3,41	1,60	1,80	0,79
	f	0,006	0,060	0,037	0,010	0,010
(9)	i	-0,266	-2,400	-1,650	-0,560	-0,375
	j	0,076	0,604	0,362	0,278	0,175
(10)	k	1,04	1,36	1,24	1,19	1,12
	m	19	28	24	21	18
	n	6	154	28	31	10
	o	0,000	0,020	-0,050	0,070	-0,007

Tabelle 2: Konstanten der Gleichungen (8) bis (10).

3.4 Luftkonzentration und Kavitationspotenzial

Tosbecken sind anfällig für Kavitation und die daraus resultierenden Schäden. Die Kenntnis der Luftkonzentration entlang der Tosbeckensohle ist daher von grösster Bedeutung, da genügend Luft Kavitation dämpft. Bereits geringste Luftkonzentrationen in Sohlen Nähe können diese vor Schäden schützen (Peterka, 1953). Im Bild 8 ist die gemessene Luftkonzentrationsverteilung C_b entlang des Tosbeckenbodens (entlang x/L_J) aufgetragen.

Beim Zufluss aus einer glatten Schussrinne beobachtet man einen markanten Anstieg der Luftkonzentration C_b in Fließrichtung an der Tosbeckensohle. Ein Höchstwert von $C_b \approx 0,11$ wird bei $x/L_J \approx 0,17$ erreicht. Anschliessend verringert sich die Sohlenluftkonzentration gegen das Ende des Wechselsprungs hin ($x/L_J \approx 0,9$) auf einen Wert von null. Die Belüftung des Zuflusses oder das Gefälle der Schussrinne haben keinen signifikanten Einfluss.

Bei einem Zufluss aus einer Treppenschussrinne erhöht sich die Belüftung entlang der Tosbeckensohle für $x/L_J < 0,4$

deutlich, verglichen mit einer glatten Schussrinne. Die Sohlenluftkonzentration beträgt am Beckenanfang bei $x/L_J \approx 0,08$ ungefähr $C_b \approx 0,18$. Weiter stromabwärts nimmt die Sohlenluftkonzentration C_b ab und ist ab $x/L_J \approx 0,4$ identisch mit jener nach dem glatten Zufluss. Wenn das Gefälle der Treppenschussrinne von $\varphi=30^\circ$ auf 50° erhöht wird, erhöht sich auch die Luftkonzentration C_b um durchschnittlich 2 % oberhalb von $x/L_J < 0,4$.

Eine Luftkonzentration an der Sohle von ungefähr 5 % (oder weniger) wird üblicherweise als Schutz vor Schäden erachtet (Peterka, 1958, Rasmussen, 1956, Russell und Sheehan, 1974). Eine Luftkonzentration von 5 % tritt bei Tosbecken mit einem Zufluss aus einer glatten Schussrinne innerhalb von $0,1 \leq x/L_J \leq 0,5$ auf. Der Zufluss aus einer Treppenschussrinne bringt mehr Luft mit und erhöht die Konzentrationen am Tosbeckeneingang deutlich. Deshalb ist ein grösserer Bereich geschützt, nämlich $0 \leq x/L_J \leq 0,5$ (Bild 8). Bereiche $x/L_J > 0,5$ sind auch bei geringen Sohlenluftkonzentrationen wohl kaum mehr durch Kavitation gefährdet (sofern keine Einbauten im Tosbecken vorhanden sind), da die mittleren Sohlendrücke zunehmen und die Druckschwankungen abnehmen (Bild 7).

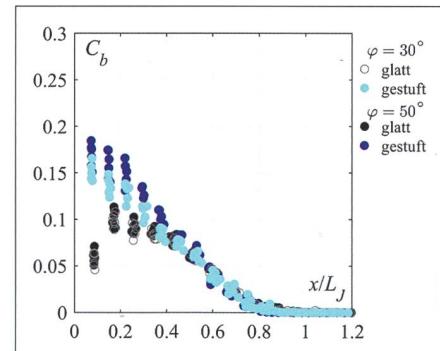


Bild 8: Luftkonzentration C_b entlang der Tosbeckensohle, aufgetragen gegen die normierte Koordinate x/L_J .

4. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Da die Zuflussbedingungen in ein Tosbecken nach Treppenschussrinnen im Vergleich zu jenen nach glatten Schussrinnen unterschiedlich sind, ergeben sich auch andere Strömungszustände und Drücke entlang des Wechselsprungs. Falls für die Bemessung eines Tosbeckens, wie in der Praxis üblich, die Ansätze für Zuflüsse aus glatten Schussrinnen verwendet werden, besteht die Gefahr, dass nach Treppenschussrinnen nicht nur die erforderliche

Tosbeckenlänge unterschätzt wird, sondern auch die gefährlichen Druckschwankungen am Tosbeckenanfang. Diese Praxis hat in der Vergangenheit zu Schadensfällen an Tosbecken unterhalb von Treppenschussrinnen geführt.

Obwohl die Druckschwankungen am Tosbeckenanfang vergleichsweise grösser sind, was bei der Verankerung der Bodenplatten berücksichtigt werden muss, besteht bei Tosbecken unterhalb von Treppenschussrinnen ein geringeres Kavitationspotential, da im Modell in der Nähe der Tosbeckensohle höhere Luftkonzentrationen beobachtet wurden.

Mit den hier vorgestellten Resultaten konnten neue Bemessungskriterien für Tosbecken unterhalb von Treppenschussrinnen erarbeitet werden. Dabei können folgende Empfehlungen bei der Gestaltung von Tosbecken unterhalb von Treppenschussrinnen gemacht werden:

- Für die Berechnung der konjugierten Tiefen des Wechselsprungs bleibt der traditionelle Impulssatz (Gl. 4) auch für Zufluss aus einer Treppenschussrinne gültig, unter Verwendung der äquivalenten Reinwassertiefen. Damit der Wechselsprung im Tosbecken bleibt, muss die Unterwassertiefe der zum Beckenzufluss konjugierten Abflusstiefe entsprechen.
 - Die vorgestellten empirischen Beziehungen für den Verlauf der Abflusstiefen
- entlang des Wechselsprungs (unter Berücksichtigung des Lufteintrags, Gl. (3)) erlauben die erforderliche Höhe der Tosbeckenseitenwände zu bestimmen, und dies sowohl für den Zufluss aus einer glatten als auch aus Treppenschussrinne. Es ist ein angemessenes Freibord sicherzustellen.
- Im Gegensatz zum Zufluss aus glatten Schussrinnen beträgt die Länge des Wechselsprungs nach Treppenschussrinnen nicht 5,4 bis 6,1 h_2 (Mittelwert 5,75 h_2), sondern 6,5 bis 7,1 h_2 (Mittelwert 6,7 h_2). Die erforderliche Tosbeckenlänge ergibt sich mit einem Sicherheitszuschlag von 20 % zur Wechselsprunglänge.
 - Für beide Zuflusstypen wurden empirische Beziehungen zur Ermittlung der Wasserdruckkoeffizienten entlang des Tosbeckenbodens entwickelt. Diese ermöglichen es, die zeitlich mittleren Drücke, deren dynamische Schwankungen sowie die extremen minimalen und maximalen Werte abzuschätzen.
 - Tosbecken unterhalb von Treppenschussrinnen sind wegen des höheren Lufteintrags unter Annahme einer minimal notwendigen Sohlenluftkonzentration von 5 % innerhalb von $0 \leq x/L_J \leq 0,5$ gegen Kavitationsschäden geschützt. Bei Zufluss aus glatten Schussrinnen ist dieser Bereich kürzer,

nämlich $0,1 \leq x/L_J \leq 0,5$. Weiter stromabwärts nimmt das Kavitationspotenzial ab, da sich die Auftretenswahrscheinlichkeit von negativen Drücken verringert.

- Zu Beginn von Tosbecken unterhalb von Treppenschussrinnen treten vergleichsweise höhere Druckschwankungen auf, welche bei der Dimensionierung und Verankerung der Bodenplatten berücksichtigt werden müssen.

Diese Beobachtungen gelten für glatte oder gestufte Schussrinnen mit Neigungen zwischen $\varphi = 30^\circ$ und 50° sowie für Abflüsse im Bereich von relativen kritischen Abflussstiefen von $2,70 \leq h_c/s \leq 7,94$.

Danksagung

Das Projekt wurde vom portugiesischen Nationalfonds *Fundaçao para a Ciência e a Tecnologia* (FCT, PD/BD/113621/2015), dem Wasserbaulabor LCH der EPFL sowie dem Schweizerischen Talsperrenkomitee unterstützt. *Christine Schärer (Holinger AG, Bern)* hat den Erstautor bezüglich der deutschen Vorübersetzung begleitet.

Quellen:

- Baumann A., Arefi F. und Schleiss A.J. (2006). Design of two stepped spillways for a pumped storage scheme in Iran. Hydro 2006, Porto Carras, Greece, CD-ROM.
- Fiorotto, V. und Rinaldo, A. (1992). Fluctuating uplift and lining design in spillway stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 118(4), 578–596.
- Lopardo, R.A., De Lio, J.C., und Vernet, G.F. (1982). Physical modelling on cavitation tendency for macroturbulence of hydraulic jump. *Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures*, (H.S. Stephenson and C.A. Stapleton, eds.), 109–121, Conventry, England.
- Peterka, A.J. (1953). The effect of entrained air on cavitation pitting. *Minnesota International Hydraulic Convention*, 507–518, ASCE, New York, Minneapolis.
- Peterka, A.J. (1958). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. United States Department of the Interior, Denver, Colorado.
- Rasmussen, R.E.H. (1956). Some experiments on cavitation erosion in water mixed with air. *Symposium on Cavitation in Hydrodynamics*, 1–25, National Physical Laboratory, London.
- Russell, S.O. und Sheehan, G.J. (1974). Effect of entrained air on cavitation damage. *Canadian Journal of Civil Engineering* 1(1), 97–107.

- Stojnic, I. (2020). Stilling basin performance downstream of stepped spillways. Ph.D. thesis No. 7481, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland, and Instituto Superior Técnico (IST), Portugal.
- Stojnic, I., Pfister, M., Matos, J. und Schleiss, A.J. (2020a). Influence of smooth and stepped chute approach flow on the performance of a stilling basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, im Druck.
- Stojnic, I., Pfister, M., Matos, J. und Schleiss, A. J. (2020b). Bottom pressure characteristics in a stilling basin downstream of a stepped spillway for two different chute slopes. In « International Symposium on Hydraulic Structures (ISHS2020). » Proceedings of the 8th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures ISHS2020, 12-15 May 2020, Santiago, Chile, R. Janssen und H. Chanson Editors, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Toso, J.W. und Bowers, C.E. (1988). Extreme pressures in hydraulic jump stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 114(8), 829–843.
- Wood, I., Ackers, P. und Loveless, J. (1983). General method for critical point on spillways. *Journal of Hydraulic Engineering* 109(2), 308–312.

Autoren:

- Dr. Ivan Stojnic, Plateforme de constructions hydrauliques (PL-LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), CH-1015 Lausanne und Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa, Lissabon, 1049-001, Portugal.
- Prof. Dr. Michael Pfister, Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (HEIA-FR, HES-SO), CH-1705 Fribourg, Schweiz.
- Prof. Dr. Jorge Matos, CERIS, Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa, Lissabon, 1049-001, Portugal.
- Dr. Giovanni De Cesare, Plateforme de constructions hydrauliques (PL-LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), CH-1015 Lausanne.
- Prof. Dr. Anton Schleiss, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), CH-1015 Lausanne
anton.schleiss@epfl.ch.