

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 96 (2004)
Heft: 7-8

Artikel: Skisprung : allgemeine Bemessungsansätze
Autor: Heller, Valentin / Hager, Willi H. / Minor, Hans-Erwin
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939578>

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: 22.02.2026

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

Skisprung – Allgemeine Bemessungsansätze

■ Valentin Heller, Willi H. Hager, Hans-Erwin Minor

Zusammenfassung

Skisprünge sind ein wichtiger Bestandteil von Hochwasserentlastungsanlagen oder Grundablässen und tragen wesentlich zur Sicherheit solcher Anlagen bei. Wichtig ist bei Skisprüngen die Ausgestaltung des Umlenkelements am Ende der Schussrinne, dem Flip Bucket. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde mit hydraulischen Modellversuchen näher auf dieses Bauwerk eingegangen und damit allgemein gültige Bemessungsansätze formuliert. Es wurden die dynamischen Drücke auf dem Schanzentisch, die Wurfweite des Wasserstrahls sowie die Bedingungen für den Strömungszusammenbruch auf dem Schanzentisch untersucht. Ein Berechnungsbeispiel verdeutlicht die Ergebnisse.

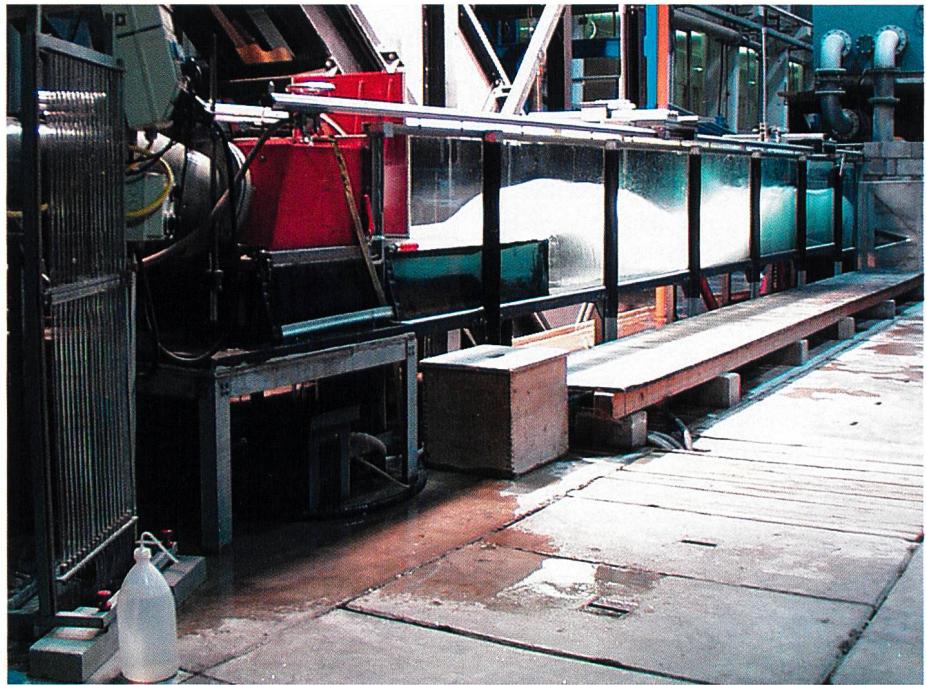


Bild 1. Hydraulische Versuchsanlage in Fließrichtung.

Abstract

Ski jumps are used to control discharges from overflow spillways or bottom outlets. An important issue is the design of the deflection element at the end of the spillway, the flip bucket. In this study this element was model tested to formulate generalized design guidelines. Considerations include the dynamic pressure on the flip bucket, the throw-distance of the jet and the hydraulic condition for flow choking on the flip bucket. Finally, an example illustrates the results.

Schäden, wie z.B. beim Nacimiento Dam in Kalifornien (Vischer und Hager 1998). Mit dieser weiterentwickelten Diplomarbeit an der ETH Zürich (Heller 2004) werden mittels Modellversuchen allgemein gültige Bemessungsansätze formuliert. Untersucht werden folgende drei Fragenkomplexe:

- 1) **Dynamische Druckhöhe:** Auf einem Flip Bucket entsteht ein dynamischer Überdruck, welcher bei der Dimensionierung als zusätzliche Einwirkung auf das Bauwerk berücksichtigt werden muss.
- 2) **Absprungwinkel und Wurfweite:** Bei der Planung eines Skisprungs muss der Auf treffbereich des Wasserstrahls abgeschätzt werden, da sich ein Kolk bildet, welcher die Stabilität der Talflanken oder gar des Bauwerks selber gefährden kann. Mit Hilfe der Wurfparabel eines Massen punkts und dem nachfolgend ermittelten Absprungwinkel wird der Auf treffbereich des Wasserstrahls berechnet.
- 3) **Strömungszusammenbruch:** Damit ein Skisprung planmäßig funktioniert, muss der Durchfluss über den Flip Bucket schiessend ($F > 1$) sein. Sonst wird der Schanzentisch von der Absprungkante her eingestaut und der Strahl prallt an der Skisprungfundation auf. Zudem könnte ein Wechselsprung einen Grundablass

einstauen und zu gefährlichen Zweiphasenströmungen führen. Um dem vorzubeugen, wurden Bemessungsdiagramme für die Grenze zwischen durchgehend schiessendem und zusammenbrechendem Abflusszustand auf dem Flip Bucket ausgearbeitet.

Physikalisches Modell

Die hydraulischen Modellversuche wurden an einem horizontalen Rechteckkanal vorgenommen, wie er bereits von Juon und Hager (2000) beschrieben wurde. Vereinfachend wurde mit einer horizontalen Schussrinne gearbeitet, da die Neigung der Schussrinne nur einen kleinen Einfluss auf die vorgestellten Resultate hat. Der Kanal hat eine Gesamtlänge von rund 7 m, eine Höhe von 0,7 m und eine Breite von 0,499 m. Der Wasserzufluss wird mit einer Strahlbox genau definiert. Um eine Übertragung auf Prototypen zu gewährleisten, wurde der Luftraum unter dem Wasserstrahl künstlich mit einer Öffnung von $0,12 \text{ m} \times 0,05 \text{ m}$ belüftet. Der Zufluss auf der Schussrinne war für die vorliegenden Versuche unbelüftet. Die kreiszylindrische Geometrie des Flip Buckets wurde zehnmal verändert, um so die wesentlichen Parameterkombinationen zu erzielen. In Bild 1 ist die Anlage dargestellt.

Einleitung

Skisprünge wurden in den 1930er-Jahren vom französischen Wasserbauer André Coyne (1891–1960) erstmals erfolgreich eingesetzt. Sie dienen dazu, Abflüsse von Hochwasserentlastungsanlagen oder von Grundablässen sicher, ökonomisch und relativ einfach zu beherrschen. Bis jetzt wurden Skisprünge nur für einzelne Anlagen in Modellversuchen getestet, allgemein gültige Bemessungsansätze sind spärlich vorhanden. So liegt beispielsweise für die Absprungwinkel nur ein analytisch hergeleitetes Bemessungsdiagramm nach Orlov (1974) vor. In der Vergangenheit kam es immer wieder zu unsachgemäßen Dimensionierungen und

Resultate

Untersuchte Parameter

Bild 2 stellt den schematischen Aufbau der Versuchsanlage mit den wichtigsten Parametern dar. Die Experimente wurden durchgeführt unter Variation der drei Größen:

- Umlenkinkel β (10° bis 40°)
- Relativkrümmung h_o/R (0,1 bis 1,0)
- Zufluss-Froudezahl F_o (3 bis 10)

Damit haben sich insgesamt 91 verschiedene Versuche ergeben.

Die Relativkrümmung (h_o/R) setzt sich aus der Zufluss-Wassertiefe h_o und dem Radius R des Flip Buckets zusammen. Die Zufluss-Froudezahl $F_o = V_o/(gh_o)^{1/2}$ beschreibt den Fliesszustand der Strömung. Dazu wird die Fliessgeschwindigkeit V_o und die Wellengeschwindigkeit $c = (gh_o)^{1/2}$ benötigt. Nimmt F_o einen Wert kleiner als 1 an (strömender Fliesszustand), so kann sich eine Störung flussaufwärts ausbreiten, da die Wellengeschwindigkeit c grösser als die Fliessgeschwindigkeit V_o ist. Ist F_o hingegen grösser als 1 (schiessender Fliesszustand), so kann sich eine Störung nicht flussaufwärts ausbreiten, da die Wellengeschwindigkeit c kleiner als die Fliessgeschwindigkeit V_o ist.

Der Ursprung des Koordinatensystems (x, z) liegt auf der Absprungkante. Sie liegt um den Wert s über der Kanalsohle. Die Grösse $w = R(1-\cos\beta)$ bezeichnet die Höhe des Flip Buckets. Die beiden Strahlbegrenzungen oben und unten weisen infolge unterschiedlicher Randgeschwindigkeiten und der durch den Schanzentisch resultierenden Druckumlagerung verschiedene Absprungwinkel oben α_o bzw. unten α_u auf. Die Variablen h_M bzw. h_m beschreiben die Maxima der oberen bzw. der unteren Strahlbegrenzung.

Die Untersuchungen wurden mit drei verschiedenen Modellradien R durchgeführt. Sie sind in den Bildern 4, 6 und 9 jeweils mit den gleichen Farben gekennzeichnet,

Schwarz steht für $R = 0,10$ m, Hellgrau für $R = 0,25$ m und Dunkelgrau für $R = 0,40$ m. In den Legenden der Graphen selbst werden die Symbole nur für die Farbe Schwarz angegeben, für alle anderen Radien gelten die entsprechenden Bezeichnungen.

Druckverteilung

Die Druckhöhe auf dem Schanzentisch setzt sich aus einem statischen und einem dynamischen Druckanteil zusammen. Im horizontalen Zuflusskanal lässt sich der statische Anteil durch die Zuflusswassertiefe h_o annähern. Der dynamische Anteil h_p entsteht infolge der Umlenkung des Durchflusses durch den Flip Bucket. Bild 3 zeigt die wichtigsten Größen für dessen Bestimmung. Der Wert h_{PM} bezeichnet dabei die maximal auftretende dynamische Druckhöhe, die Grösse h_p entspricht dem Betrag der dynamischen Druckhöhe bei den einzelnen Piezometern. Auf die Lage des maximalen dynamischen Drucks x_{PM} wird bei Heller et al. (2004) näher eingegangen.

Die maximal auftretende dynamische Druckhöhe auf einem Flip Bucket kann theoretisch mit der Potentialtheorie bestimmt werden zu

$$h_{PT} = h_o (h_o / R) F_o^2 \quad (1)$$

Unberücksichtigt in Gl. (1) bleibt der Umlenkinkel β . Ist der Wert von β klein, so baut sich in der Praxis der theoretische Maximaldruck h_{PT} nicht vollständig auf und der auf dem Flip Bucket wirkliche vorliegende dynamische Druck h_{PM} liegt tiefer. Dies ist im Bemessungsdiagramm (Bild 4) deutlich zu sehen.

Dargestellt ist auf der Ordinate das Verhältnis der gemessenen dynamischen Maximaldruckhöhe h_{PM} zur theoretisch möglichen dynamischen Maximaldruckhöhe h_{PT} gemäss Gl. (1). Der Ausdruck auf der Abszisse ist eine Kombination von Relativkrümmung (h_o/R) und Umlenkinkel β . Die Daten-

punkte folgen der eingetragenen Potenzfunktion. Ist der Ausdruck auf der Abszisse kleiner als 0,2, so wird der theoretische Maximalwert h_{PT} erreicht; ist er grösser, so kann er abgemindert werden. Es gilt

$$h_{PM} = h_o (h_o / R) F_o^2 \quad \text{für } (h_o / R)(40^\circ / \beta) < 0,2 \quad (2)$$

$$h_{PM} = (1/5) h_o (\beta / 40^\circ) F_o^2 \quad \text{für } (h_o / R)(40^\circ / \beta) \geq 0,2 \quad (3)$$

Eine Zunahme der Relativkrümmung (h_o/R) bewirkt eine Abnahme des Verhältnisses h_{PM}/h_{PT} . Die Maximaldruckhöhe h_{PM} steigt hingegen mit zunehmendem Umlenkinkel β oder mit der Zufluss-Froudezahl F_o . Der lokale Verlauf der Druckverteilung auf dem Schanzentisch wird durch Heller et al. (2004) beschrieben.

Absprungwinkel und Wurfweite

Das Bild 5 zeigt den Verlauf des Wasserstrahls bei Zufluss-Froudezahlen F_o von 3, 5 und 10. Die Strahlbegrenzungen oben bzw. unten $z(x)$ folgen der Wurfparabel eines Massenpunkts mit der Zuflussgeschwindigkeit V_o , der Erdbeschleunigung g , der Absprunghöhe z_o und dem Absprungwinkel α_o bzw. α_u

$$z = z_o + \tan(\alpha)x - gx^2 / (2V_o^2 \cos^2(\alpha)) \quad (4)$$

Der Winkel α steht in Gl. (4) und im Folgenden sowohl für den oberen α_o als auch für den unteren Absprungwinkel α_u . Die theoretisch maximal mögliche Wurfweite ergibt sich bei einem Absprungwinkel von $\alpha = 45^\circ$. Dabei sind Einflüsse von Strahldispersion und Spraybildung eines Wasser-Luft-Gemisches jedoch nicht enthalten. Je nach ihrem Einfluss weicht der absteigende Strahlbereich von der parabolischen Trajektorie des Massenpunkts ab. Allgemein lässt sich die Wurfweite x aus Gl. (4) formulieren zu

$$x = \frac{1}{g} \left(V_o^2 \sin \alpha \cos \alpha + V_o \cos \alpha \sqrt{V_o^2 \sin^2 \alpha + 2g(s + z_o)} \right) \quad (5)$$

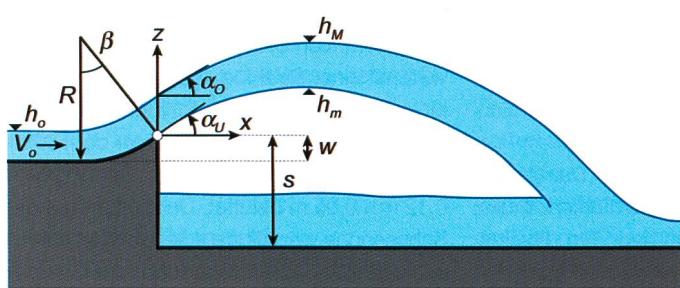


Bild 2. Definitionsskizze der Versuchsanlage mit den untersuchten Größen.

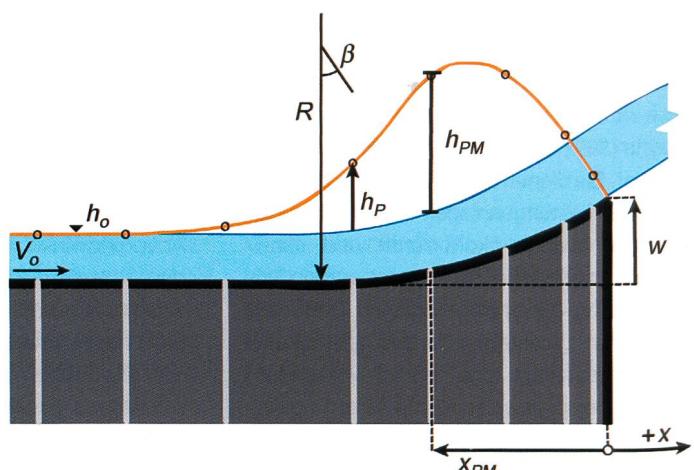


Bild 3. Definitionsskizze Druckkomponenten auf dem Flip Bucket.

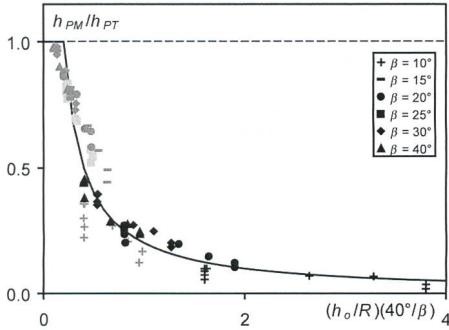


Bild 4. Verhältnis vom maximalen gemessenen dynamischen Druck h_{PM} zum theoretischen maximalen dynamischen Druck h_{PT} in Funktion von $(h_o/R)(40^\circ/\beta)$.

Die Grösse s bezeichnet den Höhenunterschied zwischen der Absprungkante und dem Auftreffbereich des Wasserstrahls (Bilder 2 und 10). Der Absprungwinkel oben α_0 bzw. unten α_u ist in der Regel deutlich kleiner als der Umlenkinkel β . Zudem ist der obere Absprungwinkel α_0 im Mittel rund 10% grösser als derjenige der unteren Strahlbegrenzung α_u . Der Strahl wird also mit zunehmender Flugdistanz infolge Dissipation dicker (Bild 7). Bild 6 zeigt die Beziehungen zwischen den Absprungwinkeln α_0 bzw. α_u und Umlenkinkel β in Abhängigkeit der Relativkrümmung (h_o/R) . Die Absprungwinkel α wurden invers bestimmt, indem alle gemessenen Strahlprofile unter Variation der einzigen freien Grösse α an die Wurfparabel (4) angepasst wurden.

Auf der Ordinate ist das Verhältnis (α/β) aufgetragen, multipliziert mit einem Faktor, welcher die Messpunkte übereinander schiebt und auf 1 normiert (Bild 6). Auf der Abszisse findet sich wieder die Relativkrümmung (h_o/R) . Die Messpunkte in Bild 6 folgen der eingezeichneten Gaußfunktion. Etwas abseits liegen die umkreisten Datenpunkte, welche alle eine Zufluss-Froudezahl F_o kleiner als 4 aufweisen.

Kleine Umlenkinkel β von 10° lassen sich in Bild 6 nur schlecht einpassen, die Diagramme sind deshalb nur für Umlenkinkel $\beta \geq 15^\circ$ gültig.

Bei grosser Relativkrümmung (h_o/R) nimmt das Verhältnis (α/β) deutlich ab. In Bild 7 (a) beträgt der Radius $R = 0,10$ m, in Bild 7 (b) $R = 0,40$ m. Alle anderen Grössen sind bei beiden Abbildungen identisch, nämlich die Zufluss-Froudezahl $F_o = 5$, der Umlenkinkel $\beta = 40^\circ$ und die Zufluss-Wassertiefe $h_o = 0,05$ m. In Bild 7 (a) mit einer Relativkrümmung $(h_o/R) = 0,50$ ist der Absprungwinkel deutlich kleiner als in Bild 7 (b) mit einer Relativkrümmung von $(h_o/R) = 0,125$.

Bei kleinem Umlenkinkel β sind die Unterschiede zwischen Absprungwinkel α

und Umlenkinkel β besonders gross, und sie nähern sich bei grossem Umlenkinkel β immer mehr an. Die Zufluss-Froudezahl F_o hat im untersuchten Bereich $3 < F_o < 10$ keinen Einfluss auf den Absprungwinkel α . Die Wurfweite nimmt mit grösserer Zufluss-Froudezahl F_o trotzdem zu, da sie indirekt über die Zufluss-Geschwindigkeit V_o in Gl. (5) einfliesst.

Die Wurfweite wird nach Shivashankara Rao (1982) bei Modellversuchen gegenüber dem Prototyp immer überschätzt, da im Modell Einflüsse wie Wind oder im Wasser mitgeführte Luft nicht berücksichtigt werden.

Strömungszusammenbruch

Mit Strömungszusammenbruch wird der Abflusszustand bezeichnet, der auf dem Flip Bucket einen lokal strömenden Abfluss ($F < 1$) erzeugt. Als Folge bildet sich auf dem Schanzentisch ein unvollständiger Wechselsprung, der Wasserstrahl prallt relativ nahe dem Flip Bucket auf und gefährdet somit dessen Fun-

dation. Dabei muss unterschieden werden zwischen Strömungszusammenbruch bei Inbetriebnahme, also bei zunehmendem Durchfluss ($Q+$), oder bei Ausserbetriebnahme, also bei Abnahme des Durchflusses ($Q-$). Bild 8 zeigt die Entstehung des Strömungszusammenbruchs im Versuchsmodell bei abnehmendem Durchfluss ($Q-$).

Ob es bei einem bestimmten Abflusszustand zu einem Strömungszusammenbruch kommt, ist hauptsächlich von der Höhe w des Flip Buckets abhängig. Bild 9 (a) zeigt, ab welcher Zufluss-Froudezahl F_o sich schiessender Abflusszustand bei Durchfluss-Steigerung einstellt.

Auf der Ordinate ist das Verhältnis $W+ = w/h_o$ aufgetragen. Je grösser nun die Höhe w des Flip Buckets ist, desto grösser muss die Zufluss-Froudezahl F_o sein, damit der Wechselsprung ausgeblasen wird. Die Messpunkte folgen der eingezeichneten Funktion. In ähnlicher Weise lassen sich die Messpunkte bei Durchflussabnahme ($Q-$)

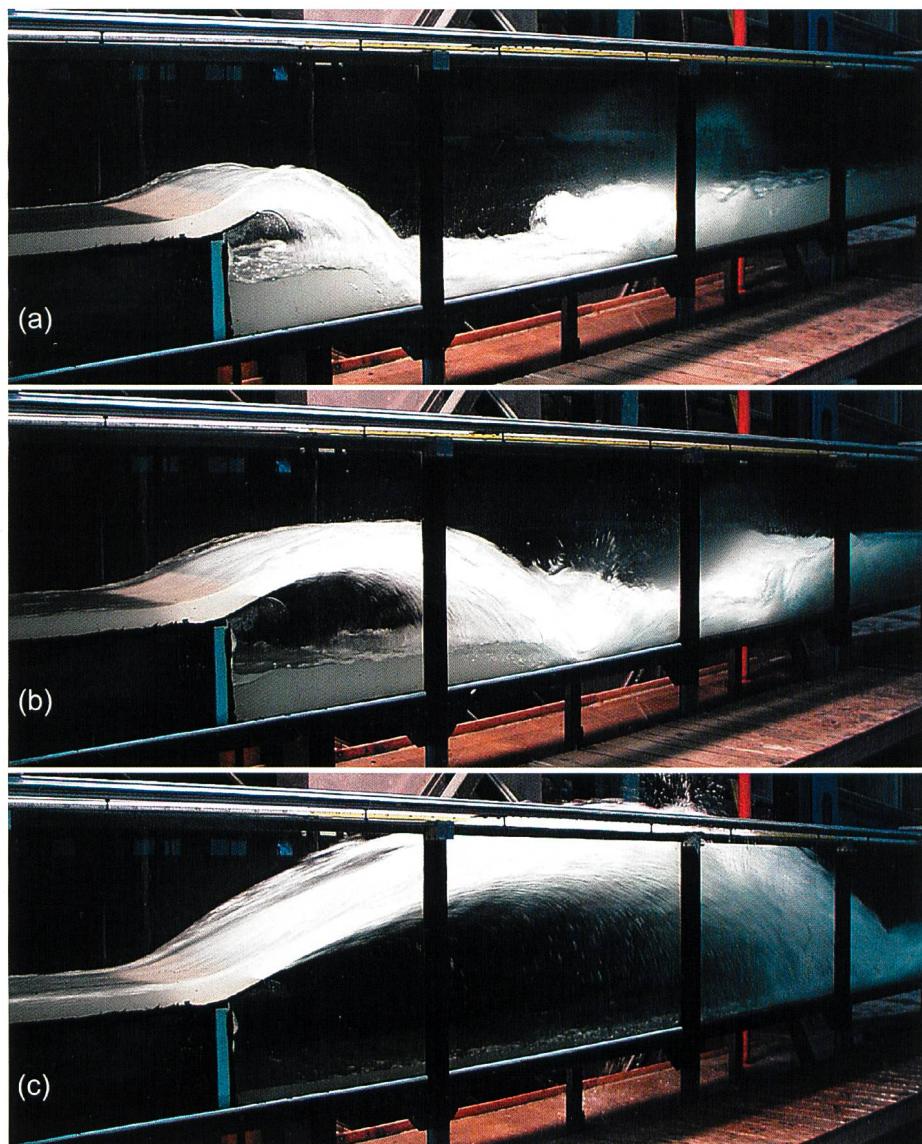


Bild 5. Vergleich zwischen verschiedenen Fließzuständen mit $R = 0,40$ m, $\beta = 30^\circ$, $h_o = 0,05$ m und $F_o =$ (a) 3, (b) 5, (c) 10.



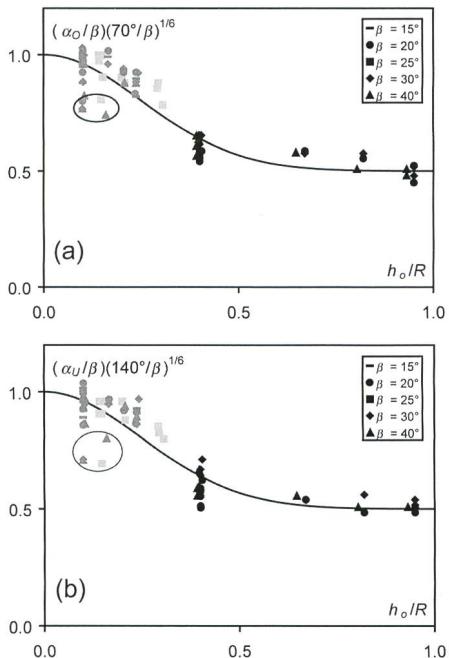


Bild 6. Relativer Absprungwinkel (a) oben $(\alpha_o/\beta)(70^\circ/\beta)^{1/6}$ und (b) unten $(\alpha_U/\beta)(140^\circ/\beta)^{1/6}$ in Funktion der Relativkrümmung h_o/R .

darstellen (Bild 9 b). Es ergeben sich somit die zwei Bedingungen

$$W+ = \frac{w}{h_o} = 0.60(F_o - 1)^{1.2} \quad \text{für } Q+ \quad (6)$$

$$W- = \frac{w}{h_o} = 0.90(F_o - 1)^{0.9} \quad \text{für } Q- \quad (7)$$

Beispiel

Zur Verdeutlichung der Untersuchungsergebnisse wird ein Beispiel anhand eines Prototyps vorgerechnet. Bild 10 zeigt die wichtigsten Abmessungen. Im Beispiel wird von einem totalen Umlenkinkel $\beta + \gamma = 30^\circ + 50^\circ = 80^\circ$ ausgegangen. Im Unterschied zur vorgehenden Untersuchung ist zusätzlich der Nei-



Bild 8. Strömungszusammenbruch bei abnehmendem Durchfluss ($Q-$), für $R = 0,40 \text{ m}$, $\beta = 40^\circ$.

gungswinkel $\gamma = 50^\circ$ der Schussrinne von Relevanz. Er hat jedoch nur auf die Druckmaxima einen Einfluss. Die Zufluss-Wassertiefe sei $h_o = 1,8 \text{ m}$, die Zufluss-Geschwindigkeit $V_o = 25 \text{ m/s}$, der Radius $R = 12 \text{ m}$ und die Schussrinnenbreite $b = 30 \text{ m}$. Die Höhe w der Absprungkante beträgt 10 m. Mit den Vorgaben ergibt sich eine Zufluss-Froudezahl $F_o = 25/(9,81 \cdot 1,8)^{1/2} = 5,95$ und eine Relativkrümmung $(h_o/R) = (1,8/12) = 0,15$. Die Höhe w des Flip Buckets berechnet sich zu $w = 12(1 - \cos\beta) = 1,61 \text{ m}$.

- 1) *Dynamische Druckhöhe:* In der Versuchsanordnung ist die Schussrinne horizontal (Bild 2). Die Schussrinnenneigung im Beispiel bedingt eine zusätzliche Umlenkung. Deshalb wird mit dem totalen Umlenkinkel $\beta + \gamma = 80^\circ$ gerechnet (Bild 10). Die Grösse $(h_o/R)(40^\circ/80^\circ)$ berechnet sich zu $(1,8/12)(40^\circ/80^\circ) = 0,075$, womit die

maximale dynamische Druckhöhe nach Gl. (2) zu $h_{PM} = 1,8(1,8/12)5,95^2 = 9,6 \text{ m}$ wird. Zusammen mit dem statischen Druckhöhenanteil $h_o = 1,8 \text{ m}$ ergibt sich deshalb eine maximale Druckhöhe von 11,4 m.

- 2) *Absprungwinkel und Wurfweite:* Aus Bild 6 a und b lässt sich für eine Relativkrümmung $(h_o/R) = 0,15$ ein Wert $(\alpha_o/\beta)(70^\circ/\beta)^{1/6} = (\alpha_U/\beta)(140^\circ/\beta)^{1/6} = 0,93$ herauslesen. Somit wird der Absprungwinkel oben $\alpha_o = 0,93\beta/(\beta/70^\circ)^{1/6} = 24,2^\circ$ und der Absprungwinkel unten $\alpha_U = 0,93\beta/(\beta/140^\circ)^{1/6} = 21,6^\circ$. Der Absprungwinkel oben α_o ist somit rund 11% grösser als der Absprungwinkel unten α_U . Die Wurfweite wird mit Gl. (5) mit einer totalen Absprunghöhe $s + z_o = s = 10 \text{ m}$ für die untere Strahlbegrenzung bzw. $s + z_o = s + h_o = 11,8 \text{ m}$ für die obere Strahlbegrenzung berechnet. Der Wasserstrahl trifft folglich im Bereich zwischen $x_U = 1/9,81(25^2 \sin 21,6^\circ \cos 21,6^\circ + 25 \cos 21,6^\circ (25^2 \sin^2 21,6^\circ + 2 \cdot 9,81 \cdot 10))^{1/2} = 61,5 \text{ m}$ und $x_O = 1/9,81(25^2 \sin 24,2^\circ \cos 24,2^\circ + 25 \cos 24,2^\circ (25^2 \sin^2 24,2^\circ + 2 \cdot 9,81 \cdot 11,8))^{1/2} = 66,5 \text{ m}$ auf dem Untergrund auf. Die Strahlmächtigkeit hat sich also von 1,8 m auf dem Flip Bucket zu 5 m im Auftreffbereich gesteigert. In Wirklichkeit hängt die Absprunghöhe s im Prototyp von der Wurfweite ab, weshalb ein iteratives Vorgehen nötig ist; die Wurfweite muss in Abhängigkeit der Absprunghöhe s so lange iterativ berechnet werden, bis die Absprunghöhe beim Auftreffbereich tatsächlich s entspricht.
- 3) *Strömungszusammenbruch:* Schliesslich soll noch mit den Gleichungen (6) und (7) überprüft werden, ob es auf dem Schanzentisch zu einem Strömungszusammenbruch kommt. Nach den Glei-

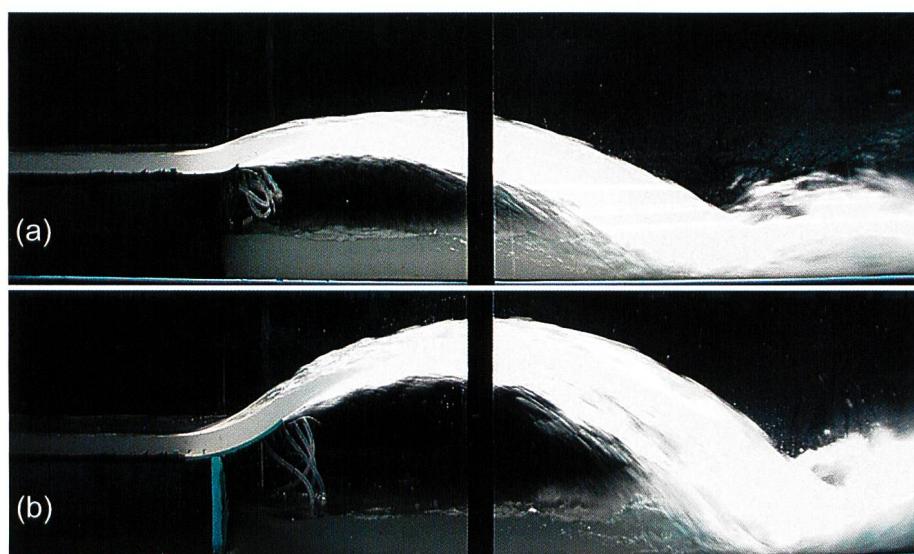


Bild 7. Einfluss vom Radius R auf die Strahltrajektorien für $\beta = 40^\circ$, $F_o = 5$, $h_o = 0,05 \text{ m}$ und (a) $R = 0,10 \text{ m}$, (b) $R = 0,40 \text{ m}$.

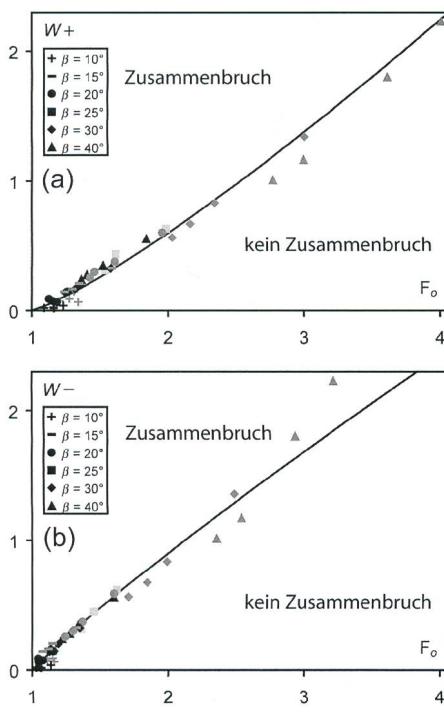


Bild 9. Bemessungsdiagramm für Strömungszusammenbruch bei (a) zunehmendem Durchfluss ($Q+$) und (b) abnehmendem Durchfluss ($Q-$).

chungen (6) und (7) gilt $w/h_o = 1,61/1,8 = 0,89 < 0,60(F_o - 1)^{1,2} = 4,1$ und $w/h_o = 0,89 < 0,90(F_o - 1)^{0,9} = 3,8$. Unter vollem Betrieb besteht keine Gefahr eines Strömungszusammenbruchs.

Wie gross muss nun aber der Durchfluss Q sein, damit der Wechselsprung ausgeblasen wird? Die Gleichung (6) lässt sich nach der Zufluss-Froudezahl $F_o = (w/(0,6h_o))^{5/6} + 1$ auflösen. Mit Hilfe der Kontinuitätsbeziehung $Q = b \cdot h_o \cdot V_o$ und der Definition der Zufluss-Froudezahl $F_o = V_o/(gh_o)^{1/2}$ lässt sich der Durchfluss zu $Q = g^{1/2} \cdot b \cdot h_o^{3/2} \cdot F_o$ berechnen, oder mit der nach F_o aufgelösten Gleichung (6), zu $Q = g^{1/2} \cdot b \cdot h_o^{3/2} \cdot [(w/(0,6h_o))^{5/6} + 1]$. Die Zuflusswassertiefe h_o variiert mit dem Durchfluss Q , womit ein iteratives Vorgehen nötig wird. Zunächst muss eine Wassertiefe, z.B. $h_o = 0,05$ m, angenommen werden. Der Durchfluss wird somit $Q = 9,81^{1/2} \cdot 30 \cdot 0,05^{3/2} \cdot [(1,61/(0,6 \cdot 0,05))^{5/6} + 1] = 30$ m³/s. Unter der vereinfachten Annahme einer konstanten Zuflussgeschwindigkeit $V_o = 25$ m/s für alle Zufluss-Wassertiefen h_o ergibt sich mit dem berechneten Durchfluss Q eine Zufluss-Wassertiefe $h_o = Q/(b \cdot V_o) = 30/(30 \cdot 25) = 0,04$ m. Ein neuer Schätzwert für die Zufluss-Wassertiefe sei $h_o = 0,025$ m. Der Durchfluss wird zu $Q = 9,81^{1/2} \cdot 30 \cdot 0,025^{3/2} \cdot [(1,61/(0,6 \cdot 0,025))^{5/6} + 1] = 19$ m³/s. Die Kontrolle $h_o = 19/(30 \cdot 25) = 0,025$ m stimmt mit der Schätzung $h_o = 0,025$ m überein. Der Wassersprung wird

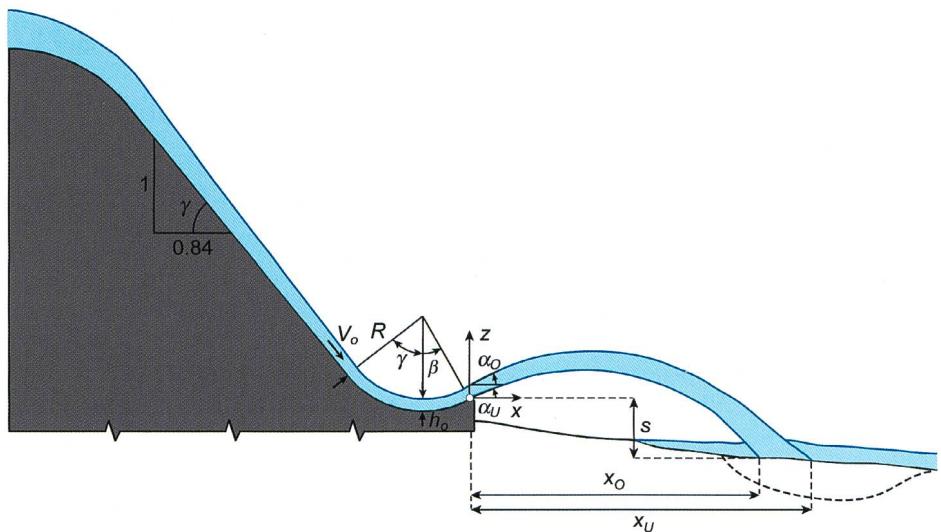


Bild 10. Definitionsskizze für das Berechnungsbeispiel.

folglich beim Durchfluss $Q = 19$ m³/s ausgeblasen. Mit der vereinfachten Annahme einer konstanten Zuflussgeschwindigkeit V_o wird die Reibung auf der Schussrinne vernachlässigt. Der berechnete Durchfluss $Q = 19$ m³/s liegt somit auf der unsicheren Seite.

Schlussfolgerungen

Anhand von hydraulischen Modellversuchen sind allgemein gültige Bemessungsansätze für Skisprünge mit einem kreiszylindrischen Schanzentisch erarbeitet worden. Dabei sind der Umlenkwinkel β des Flip Buckets, die Relativkrümmung (h_o/R) sowie die Zufluss-Froudezahl F_o die wichtigsten Einflussgrößen. Durch systematische Variation dieser drei Größen wurden 91 Versuche durchgeführt. Somit können für die folgenden drei Bereiche Bemessungsgleichungen angegeben werden:

- 1) **Dynamische Druckhöhe:** Mit Bild 4 und insbesondere den Gleichungen (2) und (3) lässt sich der maximale dynamische Druck auf dem Flip Bucket bestimmen. Für $(h_o/R)(40^\circ/\beta) < 0,2$ besitzt demnach die Strahlumlenkung keine Abminderung auf den theoretischen Maximaldruck.
- 2) **Absprungwinkel und Wurfweite:** Mit den aus Bild 6 herausgelesenen Absprungwinkeln α_O bzw. α_U kann der Auftreffbereich des Wasserstrahls durch Einsetzen in Gleichung (5) bestimmt werden. Die Zufluss-Froudezahl F_o hat im untersuchten Bereich einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Absprungwinkel.
- 3) **Strömungszusammenbruch:** Einem allfälligen Strömungszusammenbruch kann mit Bild 9 bzw. den Bedingungen der Gleichungen (6) und (7) begegnet werden. Im Beispiel wird das Bemessungsverfahren erläutert.

Literatur

Heller, V. (2004): Einfluss der Geometrie auf Abfluss über Skisprung. Diplomarbeit an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, unveröffentlicht.

Heller, V., Hager, W.H., Minor, H.-E. (2004): Ski jump hydraulics. Journal of Hydraulic Engineering, submitted.

Jou, R., Hager, W.H. (2000): Flip bucket without and with deflectors. Journal of Hydraulic Engineering 126(11): 837–845.

Orlov, V. (1974): Die Bestimmung des Strahlsteigungswinkels beim Abfluss über einen Sprungschanzenüberfall. Wasserwirtschaft-Wassertechnik 24(9): 320–321.

Shivashankara Rao, K.N. (1982): Design of energy dissipators for large capacity spillways. Brazilian committee of large dams Rio de Janeiro 1: 311–328.

Vischer, D.L., Hager, W.H. (1998): Dam hydraulics. Wiley, Chichester, UK.