Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 108 (1990)
Heft: 25

Artikel: Geschichte des Wassersprungs
Autor: Hager, Willi H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-77460

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: 17.07.2025

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

Geschichte des Wassersprungs

Zwischen der ersten Untersuchung des Wassersprungs und der allgemeinen Anerkennung der Gleichung von Bélanger liegen rund 100 Jahre. Die vorliegende Studie zeigt die Entwicklung sowohl in theoretischer als auch in experimenteller Hinsicht auf und vermittelt darüber hinaus einen Einblick in die Frühzeit der Experimental-Hydraulik.

Some 100 years separate the first investigation on hydraulic jumps from the general acceptance of Bélanger's formula. The present study is intended to show the development of knowledge on hydraulic jumps both in theory and experiment: moreover, insight is given into the early period of experimental hydraulics.

Einleitung

Für den Laien mag es sonderbar erscheinen, im Zeitalter des Energiesparens von einem Phänomen zu sprechen,

VON WILLI H. HAGER, ZÜRICH

welches auch als «Energie-Vernichter» landläufig bekannt ist. Bild 1 zeigt einen Wassersprung, er bewirkt eine abrupte Änderung des Abflusses. In der Tat lässt sich durch einen Wassersprung ein grosser Prozentsatz der mechanischen Energie in nichtmechanische und damit für den Hydrauliker verlorene Energie umsetzen. Da bei der Strömung die Masse zeitlich nicht verändert wird, lässt sich der Energiehaushalt in diesem Falle einfacher durch die Energiehöhe H ausdrücken. Die dissipierte Energie wird durch den Wassersprung vorerst in hochturbulente Wirbelstrukturen umgeformt, welche anschliessend durch Diffusionsprozesse in Wärme umgesetzt werden. Das Phänomen, welches bei schneller fliessenden Gewässern beobachtet werden kann, wird von der charakteristischen Luftaufnahme, verbunden mit dem optisch weiss erscheinenden Wasser-Luft-Gemisch, sowie von einer beträchtlichen Lärmentwicklung und Wellenanfachung begleitet.

Infolge der beachtlichen Energiedissipation wird der Wassersprung in Tosbecken leicht abgeändert und damit effizienter eingesetzt. Unter einem Tosbecken versteht man nach «Meyers Lexikon Technische und Exakte Naturwissenschaften» einen befestigten Teil eines Wasserlaufes zur Verminderung der Strömungsenergie; dadurch wird ein Angriff auf die unbefestigte Flusssohle verhindert.

Trotz verschiedenen Einbauten, die alle darauf hinzielen, das Tosbecken möglichst kurz zu halten und den Wassersprung unter allen Betriebszuständen immer im Becken zu stabilisieren, stellt der eigentliche Wassersprung das Grundelement dieser heute hochentwickelten Technologie der Energiedissipation dar. Bekannt in diesem Zusammenhang ist insbesondere die notwendige Unterwassertiefe h_2, welche sich nach *Bélangers* Formel durch

$$(1) \quad h_2 = (1/2)\, h_1 \left[(1+8F_1^2)^{1/2} - 1 \right]$$

berechnen lässt. Die Geschichte dieser Formel ist dabei erst vor rund 60 Jahren abgeschlossen worden, obwohl sie Bélanger bereits 100 Jahre früher vorschlug. Die nachfolgende, chronologische Darstellung der Entwicklung des Wassersprunges ist unterteilt in die Arbeiten des 19. und 20. Jahrhunderts. Dabei wird im zweiten Teil lediglich die Zeit bis rund 1930 betrachtet. Modernere Beiträge wurden u.a. ausführlich durch *Rajaratnam* (1967) behandelt.

19. Jahrhundert

Die erste Untersuchung über Wassersprünge verdanken wir *Giorgio Bidone* (1781–1839). Als Professor für Hydraulik der Universität Turin interessierte er sich vor allem für die Kontraktion von Wasserstrahlen, den Überfall über Wehre, einschliesslich des ersten Versuches zur Erfassung des Strahlprofils, sowie die Wellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit in Kanälen. Bekannt ist er jedoch insbesondere für seine Studie über den Wassersprung (Bidone, 1820), wovon auch der italienische Name «Salto di Bidone» zeugt. Dabei war der Anlass dieser ersten und seiner 1826 datierten zweiten Arbeit eigentlich die Fortpflanzung von Schwällen in geneigten Kanälen (eine ausführliche Beschreibung der Arbeit von 1826 findet sich bei *Macagno*, 1967). Obwohl die theoretischen Ableitungen für die Schwallhöhe und die Höhe des Wassersprungs falsch waren, verdanken wir Bidone die ersten Experimente, welche durch *Gibson* (1914) und *Safranez* (1927) zusammengestellt wurden.

1819 führte Bidone Experimente in einem gemauerten Kanal mit der Breite 0,325 m durch. Das Gefälle war abschnittweise variabel, betrug jedoch im Mittel etwa 3,5%. Ein zweiter, ähnlicher Kanal wurde ebenfalls verwendet, dessen Sohlgefälle im Mittel 6% war. Insgesamt führte Bidone 16 Experimente, aufgeteilt in vier Serien, durch. Die Froude-Zahl $\mathbf{F}_1 = V_1/(gh_1)^{1/2}$ variierte mit 1,95 bis 2,30 nur wenig.

Man betrachte Bild 2. Falls keine Schwelle im Kanal ist, stellt die zur Sohle Parallele CV die freie Oberfläche dar (Normalabfluss, im Schiessen). Wird die Schwelle mit der Höhe NM in den Kanal gebracht, so stellt sich eine Oberfläche BRPO als Abflussprofil ein. Der Punkt B, also der Sprunganfang (origine du remous), war während der Experimente gut sichtbar. Die Höhe des Sprunges BD sowie dessen Ausdehnung XN hängen von der Schwellenhöhe NM ab. Die wesentlichen Elemente des Problems stellen die Geschwindigkeit und die Richtung der (Zulauf-) Strömung dar. Diese werden in Punkt B geändert, beispielsweise durch die Bahn BRP. Bidone hat also die Existenz der Deckenwalze nicht beobachtet. Jedoch erkannte er experimentell die am Sprungfuss eingetragenen Luftblasen.

Für die Berechnung der Höhe BD nahm er einen Abfluss mit uniformer Geschwindigkeitsverteilung vom Wert V_1 an. Am Sprungfuss B setzt eine abrupte Geschwindigkeitsänderung ein, vergleichbar mit dem Auftreffen des Wasserstrahls auf einen Körper. Die «Sprunghöhe» BD des Strahles beträgt nach Bidone $H_{sp} = V_1^2/(2g) \cdot \cos^2\varphi$, wo-

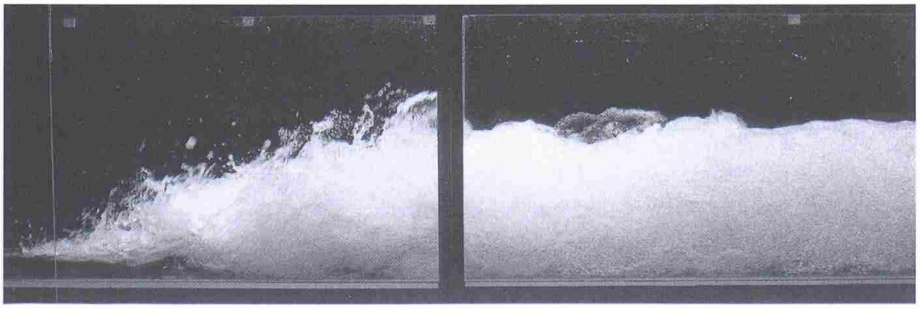


Bild 1. Typischer Wassersprung bei $\mathbf{F}_1 = 5$

bei φ die Neigung des Gerinnes bezeichnet. Der Vergleich mit den Messungen zeigte, dass H_{sp} nach der Rechnung immer grösser ist als nach dem Experiment. Dies ist verständlich, stellt doch H_{sp} für kleine Sohlengefälle die Geschwindigkeitshöhe dar. Demnach rechnete Bidone mit der Erhaltung der Energie. Bidone schlug zwecks besserer Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung eine abgeminderte «Sprunghöhe» $H^*_{sp} = C_{sp} \cdot H_{sp}$ vor, wobei $C_{sp} \leq 1$ die Geschwindigkeitshöhe des Unterwassers berücksichtigt. Anschliessend lässt sich die Distanz AD = NX des Sprungfusses von der Staustelle berechnen, wobei die Überfallformel von Poleni in Rechnung gestellt wurde.

Bélanger (1828), von dem eine Kurzbiographie in der Zeitschrift «Wasser - Energie - Luft», 1989, Heft 5, erschien, wandte in einer ersten, als Autographie erschienenen Arbeit ebenfalls den Energiesatz zur Berechnung der konjugierten Tiefen an. *Bresse* (1868) schrieb jedoch die richtige Beziehung, bekannt als «Gleichung der konjugierten Tiefen nach Bélanger», seinem Vorgänger zu, der sie in der zweiten, 1838 erschienenen Ausgabe seiner Autographie ableitete. Bélanger überprüfte Gl. (1) jedoch nicht mit Experimenten.

Einen wesentlichen Schritt in der Erforschung des Wassersprungs vollzogen *Darcy* und *Bazin* (1865), welche insgesamt 47 Experimente durchführten. Auch sie, wie bereits Bidone, setzten den Schwerpunkt der Studie nicht auf den Wassersprung, sondern in diesem Falle auf den Normalabfluss in Kanälen.

Darcy (1803–1858), welcher das Trinkwasser-Leitungssystem von Paris aufbaute und dabei Untersuchungen über Strömungen in Rohrleitungen und in porösen Medien durchführte, regte 1855 Studien in einem 600 m langen Seitenast des «Canal de Bourgogne» in Dijon an. Obwohl der raschen Verschlechterung seines Gesundheitszustandes gewahr, konnte er seinem Assistenten Henri Emile Bazin (1829–1917) noch Anweisungen geben. Dieser setzte nach dem Tode Darcys die Arbeit fort und publizierte die Resultate nach zehnjähriger Arbeit (Darcy & Bazin 1865).

Bazin, aufgewachsen in Nancy, wurde als Mitglied des «Corps des Ponts et Chaussées» 1854 in Dijon stationiert. Dort traf er Darcy und fragte ihn nach Mitarbeit. Bazin wurde im Laufe der Zeit ein peinlich genauer Beobachter. Er beendete vorerst die hier zu besprechende Arbeit. 1875 wurde Bazin Chef-Ingenieur über das System des «Canal de Bourgogne», 1886 «Inspecteur Général» des Corps des Ponts et Chaussées

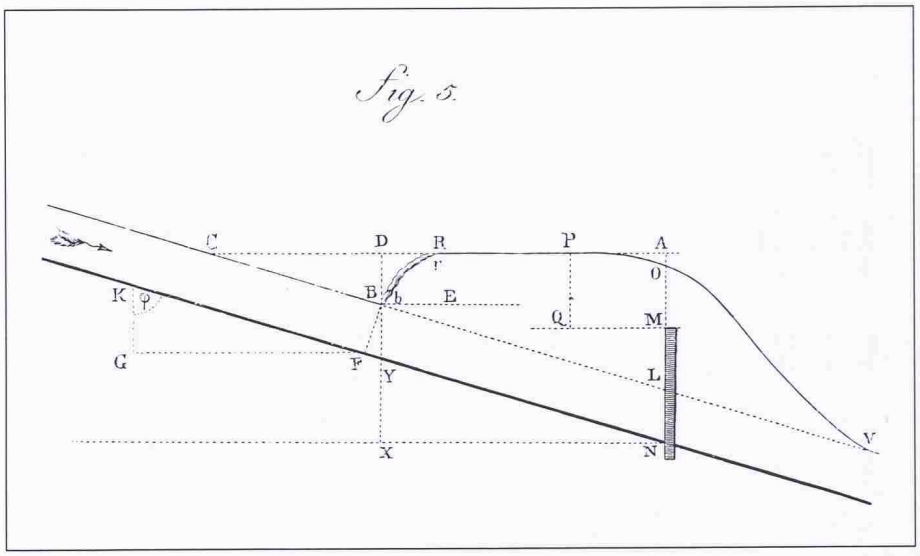


Bild 2. Längsschnitt eines durch eine Querschwelle erzwungenen Wassersprunges (Original-Figur 5 nach Bidone 1820)

in Paris. Gleichzeitig setzte er die wissenschaftlichen Studien fort, welche bei seinem Tode 35 Titel umfassten. Erwähnenswert sind die «Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir» von 1898, welche wiederum zehnjährige Untersuchungen über Wehre und Überfälle zusammenfassen.

Darcy und Bazin (1865) führten die Messungen in einem Rechteckkanal von 2 m Breite und Gefällsabschnitten von 0,49% und 0,8% durch. Bild 4 zeigt typische Wasserspiegelprofile der Serien 89 bis 91. Analog zu Bidone wurden im Kanal Schwellen angeordnet, die einen Aufstau des Oberwassers erzeugten. Die Messprotokolle enthielten den Durchfluss sowie die Wassertiefen an verschiedenen Stellen des Kanals. Die Froude-Zahl $\mathbf{F}_1$ variierte lediglich zwischen 1,48 und 1,82.

In der Einleitung wurde festgehalten, dass sich beim Übergang vom Zustand $V^2/(gh) > 1$ zu $V^2/(gh) < 1$ ein Verlust einstellt, welcher sich aus Reibungsanteil (frottement du liquide contre les parois) und Stossverlust zusammensetzt. Letzterer sei das Resultat des «mouvement tumultueux», ein Ausdruck, der später von *Boussinesq* für Turbulenz gebraucht wurde.

Interessanterweise wurden Wassersprünge mit $1 < V^2/(gh) < 2$ als ondulierend bezeichnet, solche mit $V^2/(gh) > 2$ (bzw. 2,5) hingegen als «parfaitement marqué» dargestellt. Wie heute bekannt ist, stellt sich für $\mathbf{F}_1 > \sqrt{2}$ eine Deckwalze ein, obwohl Oberflächenwellungen noch bis $\mathbf{F}_1 \sim 1{,}75$ sichtbar bleiben. Bild 5 zeigt eine typische Darstellung der beiden Fliesszustände.

Nach dem Hinweis auf den Umstand, dass exakte Spiegelmessungen unmöglich sind, traten Darcy und Bazin (1865) auf eine Berechnungsmethode der konjugierten Tiefen ein. Obwohl ihnen die Arbeiten von Bidone (1820) und Bélanger (1838) bekannt waren, schlugen sie

Bild 3. Henri Philibert Gaspard Darcy (1803–1858) und Henry Emile Bazin (1829–1917)

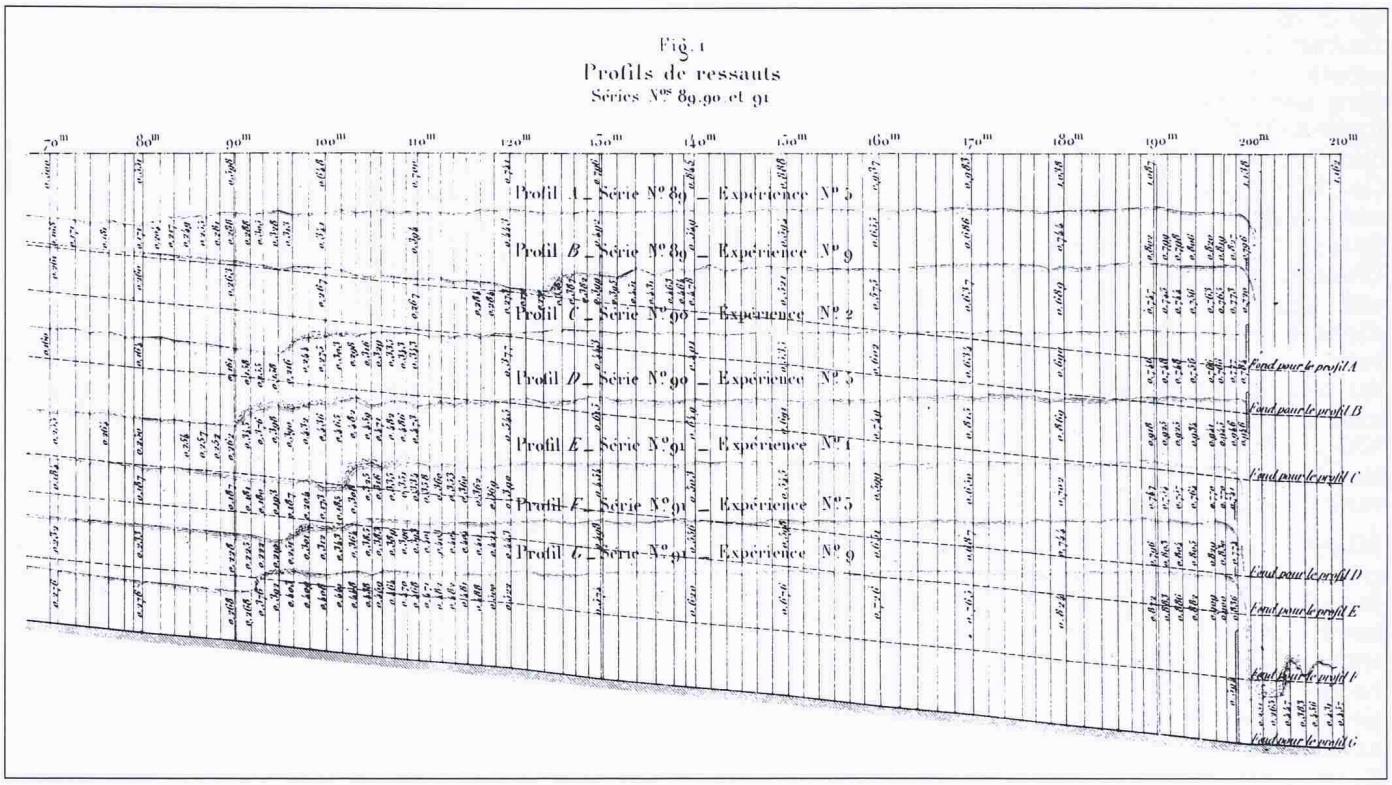


Bild 4. Oberflächenprofile der Serien 89, 90 und 91 nach Darcy und Bazin (1865)

für die Sprunghöhe $\Delta h = h_2 - h_1 - \Delta z$ vor

$$(2) \quad \Delta h = \alpha \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} - \Phi.$$

Dabei bezeichnet $\alpha \sim 1{,}05$ einen Geschwindigkeitskoeffizienten, Φ eine Verlusthöhe und Δz die Differenz der Sohlenhöhe vor und nach dem Sprung. Φ sollte nach Darcy und Bazin eigentlich Null sein; in Tat und Wahrheit wird Φ jedoch um so grösser, desto stärker $\mathbf{F}_1$ anwächst. Dies ist dem Umstand zuzuschreiben, dass anstelle des Impulssatzes der Energiesatz angewandt wurde, welcher für $\alpha = 1$ keine Verluste enthält.

Bresse (1868) beschrieb in seinem Werk «Cours de Mecanique Appliquée» vorerst die Arbeiten von Bidone. Der Wassersprung wird als «ressaut» bezeichnet. Anschliessend wurden die Experimente von Bazin durchgeführt. Wichtiger ist die Diskussion der notwendigen und der hinreichenden Bedingung für die Existenz eines Wassersprungs. Darnach muss sich im Zulauf schiessender, im Unterwasser des Wassersprunges jedoch strömender Abflusszustand einstellen. Weiterhin stellte sich Bresse die Frage nach der Beziehung zwischen dem Abfluss und den den Wassersprung abgrenzenden Wassertiefen. Sie wird durch die Anwendung der Impulssatzes (théorème des quantités de mouvement) beantwortet. Es wird ausdrücklich die mittlere Geschwindigkeit V verwendet, was zu einer Änderung

$$(3) \quad \Delta I = \varrho g (V_1^2 A_1 - V_2^2 A_2) t$$

des Impulses I pro Zeiteinheit führt. Dabei bedeutet ϱ die Dichte und A den Fliessquerschnitt. Als äussere Kräfte werden aufgeführt: 1. Das Gewicht der durch den Wassersprung eingeschlossenen Flüssigkeit, bezogen auf die Achsrichtung; 2. die in Achsrichtung wirkenden Druckkräfte auf das als heute bezeichnete Kontrollvolumen und 3. die Wand-Reibungskräfte. Werden letztere infolge der geringen Längsausdehnung sowie die Gewichtskomponente des Wassersprunges vernachlässigt und betrachtet man einen prismatischen Kanal, so bleiben als Kräfte lediglich die Druckkräfte auf die beiden Begrenzungsseiten des Sprunges. Bezeichnet s den Schwerpunktabstand von der freien Oberfläche, so folgt mit Gl. (3) nach Division durch ($\varrho g t$)

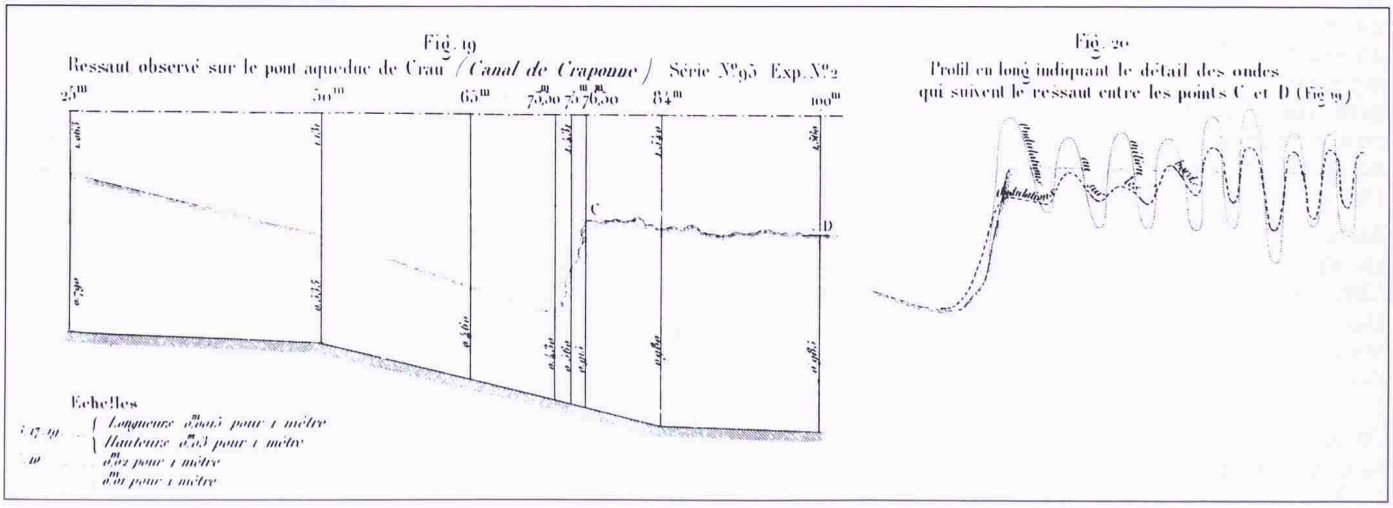


Bild 5. Wassersprung mit Deckwalze (links) und ondulierender Sprung (rechts) nach Darcy und Bazin (1865)

$$(4)\quad \frac{1}{g}(V_1^2A_1 - V_2^2A_2) = (A_2s_2 - A_1s_1).$$

Wird weiterhin $Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$ aufgrund der Kontinuität gefordert, so ergibt sich schliesslich

$$(5)\quad \frac{Q^2}{g}(A_1^{-1} - A_2^{-1}) = (A_2s_2 - A_1s_1).$$

Die beiden Terme in den Klammern kann man auch als bestimmte Integrale bezeichnen von

$$(6)\quad A_1^{-1} - A_2^{-1} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{dA}{A^2},$$

bzw. von

$$(7)\quad A_2s_2 - A_1s_1 = \int_{h_1}^{h_2} d(As) = M_2 - M_1.$$

Dabei entspricht der zweite Ausdruck dem Integral der Momente M bezüglich der Oberfläche. Dieses lässt sich ebenfalls ausdrücken durch

$$(8)\quad dM = Adh + \frac{1}{2}B(dh)^2 \sim Adh.$$

Damit ergibt sich anstelle von Gl. (5) der Ausdruck

$$(9)\quad \frac{Q^2}{g}\int_{h_1}^{h_2} \frac{Bdh}{A^2} = \int_{h_1}^{h_2} Adh$$

wobei B die mit der Wassertiefe h variable Profilbreite darstellt. Anschliessend betrachtete Bresse (1868) das Rechteckprofil mit der konstanten Breite b und findet für

$$\int_1^2 Bdh/(B^2h^2) = B^{-1}\int_1^2 dh/h^2 = -(Bh)^{-1}\Big|_1^2 = (Bh_1)^{-1} - (Bh_2)^{-1}$$

sowie für

$$\int_1^2 Adh = B\int_1^2 hdh = B(h_2^2 - h_1^2),$$

also $2V_1^2h_1/g = h_1(h_1 + h_2)$ mit der Lösung

$$(10)\quad h_2 = -\frac{1}{2}h_1 + \left[\frac{1}{4}h_1^2 + \frac{2V_1^2h_1}{g}\right]^{1/2}.$$

Diese Beziehung ist identisch mit Gl. (1). Als Sprungbedingungen werden explizit angegeben

$$(11)\quad 1 - \frac{V_1^2}{gh_1} < 0 \text{ und } 1 - \frac{V_2^2}{gh_2} > 0,$$

entsprechend $\mathbf{F}_1 > 1$ und $\mathbf{F}_2 < 1$ nach heutiger Schreibweise. Als Verlusthöhe $\Delta H = H_2 - H_1$ findet Bresse den Ausdruck

$$(12)\quad \Delta H = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1h_2}.$$

Ferriday (1895), der unter *Merriman* an der Lehigh-Universität, Bethlehem, Pa. (gegründet 1887), arbeitete, bezeichnete den Wassersprung erstmals als «hydraulic jump». Vor ihm wurde vom «remon» gesprochen, abgeleitet vom französischen Wort «remous». Ferridays erster Beitrag zur Geschichte des Wassersprungs ist eine Auflistung der bis dahin bekannten Arbeiten. Danach ist die Aufstellung der Gleichung der konjugierten Wassertiefen das Verdienst von Bélanger. Zur Arbeit von Bresse wird festgehalten, dass sich die wesentlichen Ableitungen bereits in der ersten Auflage von 1860 befinden.

Das zweite Ziel von Ferridays Arbeit bestand im Vergleich der «Gleichung von Bélanger» mit seinen erst 1916 von Merriman in der Diskussion zu *Kennisons* (1916) Untersuchung publizierten Messwerten. Bei den Versuchen traten jedoch Probleme wie die zeitliche Veränderung des Durchflusses auf, welche eine exakte Messung verunmöglichten. Die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung lieferte die später noch zu diskutierende Formel (14) nach Merriman.

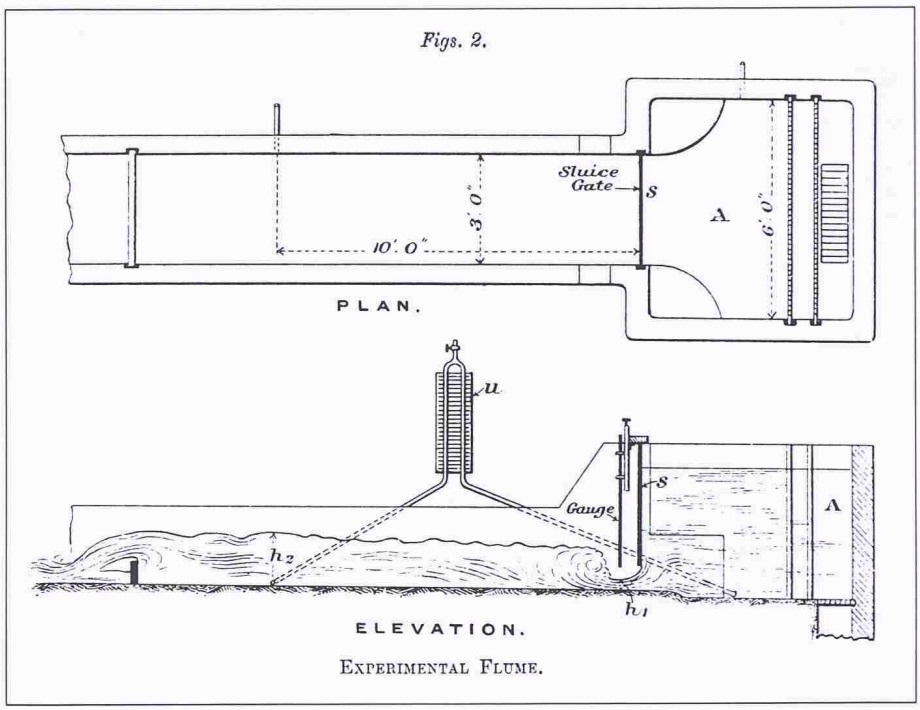


Bild 6. Messanordnung nach Gibson (1914)

20. Jahrhundert

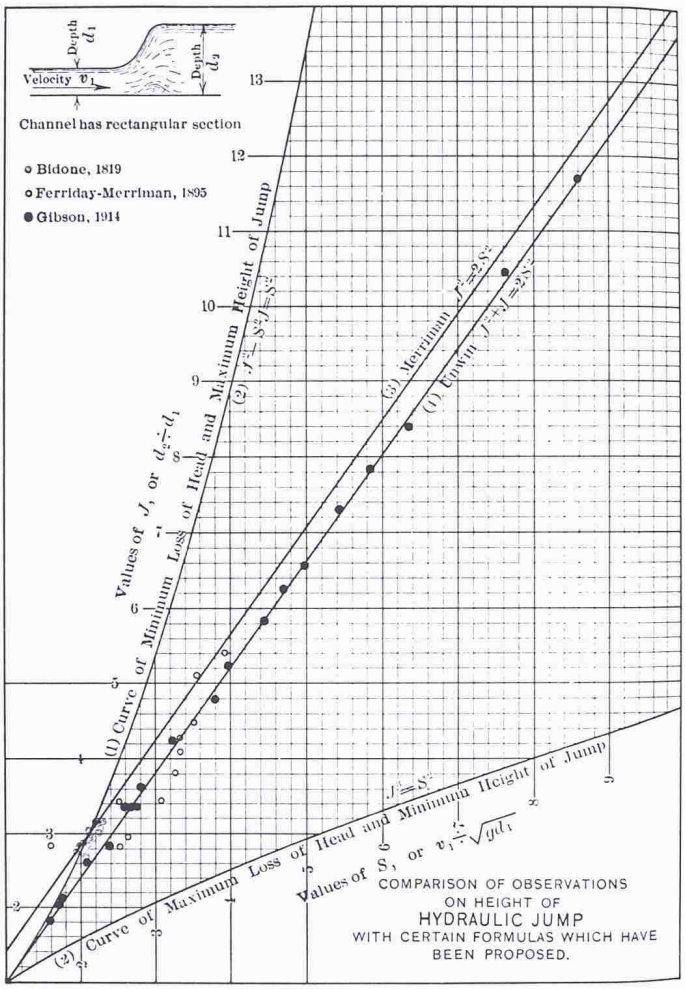
Einen weiteren Beitrag zum Wassersprung leistete *Arnold Hartley Gibson* (1878–1959), welcher als Nachfolger von *Osborne Reynolds* in Manchester (GB) wirkte. Gibson erzeugte den Wassersprung, welchen er als «standing wave» bezeichnete, durch einen oberwasserseitigen Aufstau nach Bild 6. Das Sohlengefälle war nahezu horizontal, die Kanalbreite betrug 90 cm, und Durchflüsse bis zu $Q = 130\ Ls^{-1}$ wurden untersucht. Damit wurden Froude-Zahlen bis zu $\mathbf{F}_1 = 8{,}60$ erzielt.

Die Wassertiefe h_1 wurde mit einem Pegel gemessen, h_2 dagegen mit einem Piezometer, welcher gleichzeitig mit dem Zuflussbassin verbunden war. Dadurch liessen sich nach Gibson unliebsame Wasserspiegeloszillationen dämpfen.

Für die konjugierte Wassertiefe wird Gl. (1) ohne Referenzangabe abgeleitet. Der Vergleich mit den Messwerten fällt sehr gut aus, beträgt doch die maximale Abweichung in h_2 bei insgesamt 21 Experimenten lediglich 3,4%, und das Mittel aller Abweichungen ist sogar kleiner als 1%. Damit hat Gibson einen entscheidenden Beitrag zur Anerkennung der Gleichung (1) nach Bélanger geleistet.

Eine ähnliche Bedeutung wie Gibson in England kommt der Arbeit von Kennison (1916) in den USA zu. Die Anteilnahme an seiner Publikation zeigt das Interesse der damaligen Fachwelt: Die ursprüngliche Arbeit von Kennison nimmt 16 Seiten ein, die Diskussionen inklusive der abschliessenden Stellungnahme durch Kennison jedoch 66 Seiten. Die ursprüngliche Arbeit forderte gerade zu solchen Reaktionen heraus. Kennison scheint all die bereits besprochenen Arbeiten nicht gekannt zu haben und schwankt bei der Berechnung der konjugierten Tiefen zwischen der Formel von Merriman und dem Verlustansatz nach *Borda* für plötzliche Rohrerweiterungen.

Andrews' Diskussion gibt ein vollständiges Zitat der falschen Ableitung nach *Engels* und der richtigen Ableitung für die konjugierten Tiefen nach *Unwin* wieder. Andrews ist sich jedoch ebenfalls nicht sicher, welche Beziehung



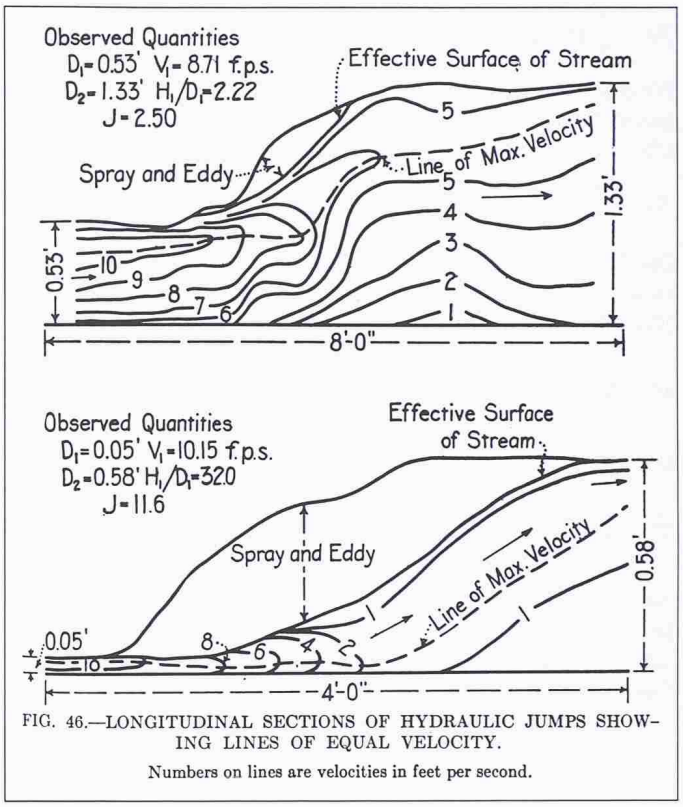


Bild 8. Längsschnitte von Wassersprüngen mit Linien gleicher Geschwindigkeit für $\mathbf{F}_1$ = 2.2 (oben) und $\mathbf{F}_1$ = 8.0 (unten) nach Riegel und Beebe (1917)

Bild 7. Bild 35 nach Kennison (1916). Konjugierte Wassertiefen in Abhängigkeit der Froude-Zahl im Zulaufkanal

nun die Wirklichkeit beschreibt. Als Antwort auf diese Unsicherheit veröffentlichte Kennison in der abschliessenden Stellungnahme Bild 7. Darin eingetragen sind Verhältnisse von Wassertiefen in Abhängigkeit von der Froude-Zahl im Zulaufkanal

(13) $\mathbf{F}_1 = V_1/\sqrt{gh_1}$.

Die oberste Kurve entspricht der Annahme konstanter Energie, die zweite Kurve gibt die Gleichung von Merrimann

(14) $h_2/h_1 = \sqrt{2}\,\mathbf{F}_1$

wieder, die dritte entspricht der Gleichung (1) von Bélanger, und die tiefste Kurve setzt den maximalen Verlust voraus, bei dem die Unterwassertiefe h_2 gleich der kritischen Wassertiefe h_c wird.

Betrachtet man nun Bild 7, das neben den Versuchen von Bidone und den in der Diskussion von Merriman mitgeteilten Versuchspunkten auch diese von Gibson (1914) enthält, so erkennt man die gute Übereinstimmung mit Gl. (1). Die Fachwelt der USA hatte sich somit vom Resultat Bélangers überzeugt.

Der *Miami Conservancy District* (1917) gab zwei Publikationen heraus, wobei sich diejenige von Prof. *Woodward* (1871–1953) von der Universität von Iowa mit Wassersprüngen im Zusammenhang mit Stau- und Senkungskurven beschäftigte. Die zweite Arbeit von *Ross M. Riegel* und *John C. Beebe* soll im folgenden betrachtet werden, da darin neue Versuche aufgeführt sind.

Riegel und Beebe waren die Arbeiten von Gibson (1914) und Kennison (1916) bekannt, wenn auch erst kurz vor der Publikation. Sie führten drei Messserien durch. In Serie 1 (22 Versuche) floss das Wasser aus einem horizontalen Rohr (D = 9in) auf einen 10 Fuss, also 3,05 m breiten Rechteckkanal, womit sich ein sogenannter R-Sprung im sich abrupt verbreiternden Kanal bildete (Rajaratnam 1967). Näherungsweise lässt sich dieses Phänomen mit dem üblichen Wassersprung im prismatischen Kanal vergleichen. Die Froude-Zahl $\mathbf{F}_1$ lag zwischen 2,1 und 8,6.

Die Versuche der Serie 2 wurden in einem leicht divergierenden Rechteckkanal durchgeführt; die insgesamt 31 Einzelversuche umfassende Serie, mit 5,2 cm $< h_1 <$ 26,5 cm und 2 $< \mathbf{F}_1 <$ 4,4, bestätigte Bélangers Gl. (1). In einer dritten Serie wurden «verschiedene Messungen» zusammengefasst.

Als Schlussfolgerungen ihrer Studie fanden Riegel und Beebe:

- der Wassersprung lässt sich als sichere Methode der Geschwindigkeitsreduktion anwenden, um damit Erosionen in Naturkanälen zu reduzieren,
- in einem horizontalen, glatten Kanal verschiebt sich der Sprung beträchtlich bei einer Veränderung der Zulaufgeschwindigkeit oder des Unterwasserstandes,
- die Sprunglänge beträgt rund fünfmal die Sprunghöhe. Dabei ist der Sprungfuss klar definiert, das Sprungende jedoch unbestimmt infolge der pulsierenden Sprungcharakteristik,
- für kleine Werte von $\mathbf{F}_1$ ist der Verlust ΔH gering, während er für grosse Froude-Zahlen zunimmt. Dieser Verlust stellt sich infolge der «disturbances» im Sprung ein,
- die Geschwindigkeit wird längs des Sprunges kontinuierlich verkleinert. Bild 8 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung für zwei typische Sprünge. Alle Sprünge haben eine über dem expandierenden Hauptstrom liegende Zone aus Gischt und Wirbeln.

Die Kenntnisse Riegels und Beebes über Wassersprünge sind damit schon recht umfassend, insbesondere wurden zum erstenmal Angaben über die Wassersprunglänge und die Geschwindigkeitsverteilung formuliert. Die daran anschliessenden Untersuchungen bezo-

gen sich auf den Entwurf von Tosbekken und sollen deshalb hier nicht betrachtet werden.

Obwohl im Vorwort zur Arbeit von *Böss* (1929) ausdrücklich auf die fast zwingende Kenntnis von *Hinds* (1920) der Arbeit von Böss aus dem Jahre 1919 hingewiesen wurde, hinterliess die Abhandlung von Hinds einen nachhaltigen Eindruck in den USA. Dies mag auch am weniger akademischen Charakter des Journals liegen, in dem seine Arbeit veröffentlicht wurde und das damit direkten Einfluss auf den Praktiker ausübte. Die Antwort auf die «Message» war gross: sechs Diskussionsbeiträge!

In einer kurzen Notiz wies *Forchheimer* (1925) auf die Arbeit von *Ritter* (1895) hin, der trotz einer umständlichen Ableitung anscheinend die Gleichung von Bélanger fand. Des weiteren gab er ein Résumé über die Erkenntnisse von Gibson und Kennison. Für den deutschen Sprachraum war *Kochs* und *Carstanjens* Werk (1926) von ausschlaggebender Bedeutung, setzte sich doch der Begriff der Stützkraft

$$(15)\quad S = \varrho g A s + \varrho A V^2 = \varrho A (g s + V^2)$$

durch. Dabei lässt sich S deuten als Summe der statischen und der dynamischen Druckkraft. Für die Berechnung des Wassersprunges im horizontalen prismatischen Kanal gilt demnach die Gleichheit der Stützkräfte in den beiden Begrenzungsquerschnitten, entsprechend $S_1 = S_2$.

Koch (1852–1923), dessen Vorlesung nach seinem Tode von Carstanjen (1856–1934) in Buchform herausgebracht wurde, führte eine Vielzahl von Laborversuchen durch, welche im Buch Aufnahme fanden. Die Versuche 3 und 4 betreffen den Wassersprung. Bei insgesamt acht Experimenten in Kanälen mit der Breite 0,385 m und 0,400 m wurden Froude-Zahlen zwischen 1,40 und 4,78 betrachtet. Bemerkenswert waren die relativ grossen Wassertiefen bis $h_1 = 0{,}3$ m und $h_2 = 0{,}78$ m. Neben freien Wassersprüngen wurden ebenfalls eingestaute Sprünge betrachtet, einschliesslich typischer Geschwindigkeitsverteilungen (Versuche 5 und 6).

Koch (Bild 9) wurde am 15. April 1852 in Steinach (Sachsen-Meiningen) geboren. Er studierte an der polytechnischen Schule in Stuttgart und nahm während der Studienzeit am Feldzug gegen Frankreich 1870/71 teil. Nachdem er seine Studien abgeschlossen hatte, arbeitete er als Ingenieur im Strassen- und Wasserbau. Von 1880 an fand er bei der Iller- und Donaukorrektion ein reiches Arbeitsgebiet, bis er sich neun Jahre später als Mitglied der Kaiserlichen Kanalkommission für den

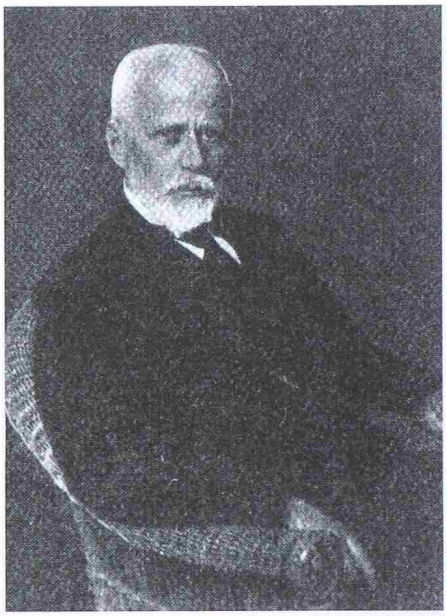


Bild 9. Alexander Koch (1852–1923) und Max Carstanjen (1856–1934)

Bau des Nord-Ostsee-Kanals nach Kiel begab. Von hier aus wurde er 1895 als Professor an die TH Darmstadt berufen. 1905 begann Koch mit der Errichtung des Darmstädter Wasserbaulaboratoriums, das drei Jahre später in Betrieb genommen wurde. Bemerkenswert in diesen Versuchshallen war der 1,8 m hohe Kanal mit Glaswand. Der Name Kochs bleibt verbunden mit dem Wassersprung und dem Ausfluss unter Schützen. 1920 erhielt er für seine wissenschaftlichen Leistungen den Ehrendoktor der TH Berlin. Als beratender Ingenieur wurde er Mitglied des technischen Komitees für den Bau des Panama-Kanals und weilte 1898 selbst in der Landenge. 1916 wurde er zum Bevollmächtigten des Landes Hessen bei der Zentralkommission für die Rheinschiffahrt ernannt. Leider konnte er nach dem Kriege seine Vorlesungsnotizen nicht mehr selbst in Buchform verfassen.

Carstanjen (Bild 9) erblickte 1856 in Duisburg das Licht der Welt. 1875 übersiedelte er nach Zürich, um dort am «Polytechnikum» zu studieren. Nachdem er in Deutschland die Baumeisterprüfung abgeschlossen hatte, arbeitete er vorerst bei der Eisenbahn als Brükkenbauingenieur. Um 1900 wechselte er zum Eisenwasserbau über, wo er seine Erfindung, das Walzenwehr, mit Erfolg zum Einsatz brachte. Bei weiteren Studien über Wehrbauten entstand eine fruchtbare Zusammenarbeit mit A. Koch, welche auch zu dem gemeinsam verfassten Buch «Bewegung des Wassers und dabei auftretende Kräfte» führte. Max Carstanjen wurde 1913 von der TH Dresden mit dem Dr. Ing. E. h. ausgezeichnet.

Weitere Versuche zum Wassersprung veröffentlichte *Lindquist* (1927) anlässlich des 100-Jahr-Jubiläums der Königlichen Technischen Hochschule Stockholm. Insgesamt liegen 17 Experimente vor mit $1{,}37 < \mathbf{F}_1 < 3{,}2$ und relativ grossen Wassertiefen von 10 cm $< h_1 <$ 18 cm, welche Bélangers Gl. (1) bestätigen. Zudem zeigt Lindquist Fotografien von Sprüngen mit $\mathbf{F}_1 = 1{,}40$ (obere Grenze des gewellten Sprunges), $\mathbf{F}_1 = 1{,}71$ (Übergang zum Wassersprung mit Deckwalze), $\mathbf{F}_1 = 2{,}34$ (obere Grenze des sogenannten Vorsprunges) und $\mathbf{F}_1 = 2{,}72$ (beginnender Übergangssprung). Obwohl in den Messprotokollen nicht festgehalten, fand Lindquist für die Sprunglänge $L = 5\,(h_2 - h_1)$. Die weiteren Ausführungen von Lindquist bezogen sich auf Tosbecken.

Abschliessend für die vorliegende Studie soll der Beitrag von *Safranez* stehen, war er doch für den deutschen Sprachraum von weittragender Wirkung. In einer Literaturstudie (Safranez 1927) wurden vorerst die Gleichungen von Böss (1919), Engels (1923) und Johnson und Groat (siehe Diskussionen zu Kennison 1916) zitiert, die alle einen verlustfreien Abfluss voraussetzten und somit zu falschen Formeln der Form

$$(16)\quad h_2/h_1 = (F_1/2)^2[1 + [1 + (8/F_1^2)]^{1/2}]$$

führten. Im Gegensatz dazu zitierte Safranez 1927 die Studien von Unwin (1880), Merriman, des Miami Conservancy District, von Koch und von Stevens (1925), welche alle zum richtigen Resultat gelangten.

In Safranez' zweiter Untersuchung von 1929 wurde neben den bereits erwähnten Arbeiten zudem noch auf *Rehbock* (1928) und auf *Bundschu* (1928) verwiesen. Die Ziele der Versuche von Safranez waren:

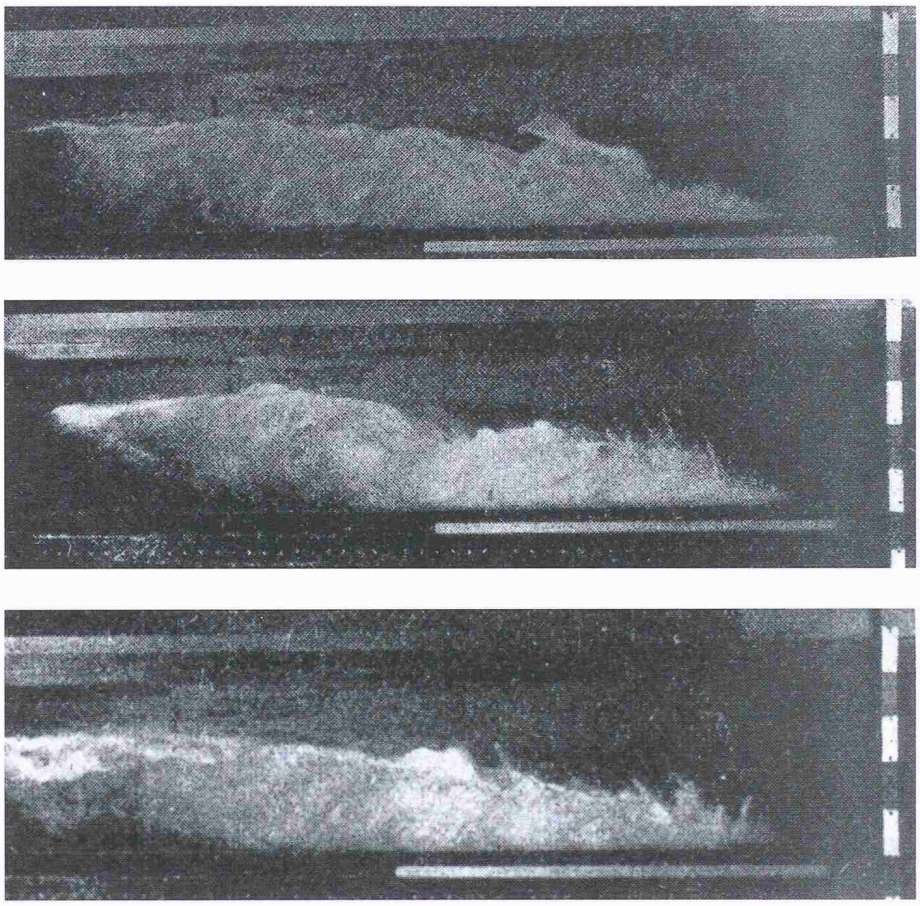


Bild 10. Bildsequenz einer Wassersprungstudie nach Safranez (1929)

- Erforschung des Wassersprunges bis auf höchstmögliche Froude-Zahlen,
- Nachprüfung der Gl. (1) nach Bélanger,
- Länge des Wassersprunges,
- Rauminhalt der Deckwalze und
- Wirkung der Deckwalze auf die Energieumwandlung.

Als Versuchsanlage wurde eine 50 cm breite und 45 cm hohe Rinne benutzt, an deren oberem Ende sich eine scharfkantige Planschütze befand. Maximale Druckhöhen bis zu 1,55 m erlaubten Ausflussgeschwindigkeiten von gut 5 ms^{-1}. Der maximale Durchfluss betrug jedoch nur 39 Ls^{-1}.

In der Folge beschrieb Safranez sein Versuchsvorgehen, also beispielsweise die Messung der Wassertiefen und die Verfahren, mit denen der Durchfluss zu ermitteln war. Seine Tabelle 1 gibt einen Eindruck von der Gewissenhaftigkeit, mit der die Experimente durchgeführt wurden. In Tabelle 2, in der die Versuche ausgewertet sind, erscheint die sogenannte Abflusszahl $\mathbf{R}_1 = V_1/\omega_1$, wobei $\omega_1 = (gh_1)^{1/2}$ die Wellengeschwindigkeit des Zulaufs bedeutet. $\mathbf{R}_1$ bezeichnet die 1927 im Zusammenhang mit Wassersprüngen erstmals eingeführte Froude-Zahl $\mathbf{F}_1$.

Die insgesamt 26 Versuche decken die Bereiche 0,70 cm $< h_1 <$ 5,70 cm und 1,72 $< \mathbf{F}_1 <$ 19,1 ab. Sie bestätigen die Gl. (1) von Bélanger, obwohl die Messung einen meist kleineren Wert h_2 als die

Literatur

Bélanger, J.B. (1828): Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanents des eaux courantes. Carilian-Gœury, Paris

Bidone, G. (1820): «Expériences sur le remous et la propagation des ondes». Memorie della Reale Accademia delle Scienze di Torino, Vol. 25, 21-112 (inkl. 8 Figuren), Torino

Böss, P. (1919): Berechnung der Wasserspiegellage beim Wechsel des Fliesszustandes. Julius Springer, Berlin

Böss, P. (1927): «Berechnung der Wasserspiegellage». Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Heft 284, Verein deutscher Ingenieure, VdI-Verlag GmbH, Berlin

Bresse, J.A.C. (1868): «Cours de Mécanique Appliquée». Seconde Partie: Hydraulique; 2e Edition. Gauthier-Villars, Paris

Bundschu, F. (1928): «Das Wasserauflaufen». Bauingenieur, Vol. 8, Heft 27, 493-497

Darcy, H., und *Bazin H.* (1865): «Recherches Hydrauliques», Parties 1e et 2e, Imprimerie Impériale, Paris

Engels, H. (1923): «Handbuch des Wasserbaus», Vol. 1, 3. Auflage, Breitkopf und Härtel, Leipzig

Ferriday, R. (1895): «The Hydraulic Jump», Engineering News, Vol. 34, Part II, Nr. 2, 28

Forchheimer, P. (1925): «Über den Wassersprung» Wasserkraft, Vol. 20, Nr. 14, 238-239

Gibson, A.H. (1914): «The Formation of Standing Waves in an Open Stream». Minutes of Proceedings, The Institution of Civil Engineers, Vol. 197, 233-242

Hinds, J. (1920): «The Hydraulic Jump and Critical Depth in the Design of Hydraulic Structures». Engineering News-Record, Vol. 85, Nr. 22, 1034-1040; 1921, Vol. 86, Nr. 3, 135; 1921, Vol. 86, Nr. 4, 185-186; 1921, Vol. 86, Nr. 6, 272; 1922, Vol. 88, Nr. 18, 748; 1922, Vol. 88, Nr. 22, 923-924; 1922, Vol. 89, Nr. 21, 855

Kennison, K.R. (1916): «The Hydraulic Jump in Open-Channel Flow at High Velocity», Transactions ASCE, Vol. 80, 338-420

Koch, A., und *Carstanjen, M.* (1926): «Bewegung des Wassers». Springer, Berlin

Lindquist, E. (1927): «Anordningar för effektiv energiomvandling vid foten av överfallsdammar». Skrifter utgivna med anledning av. Kungl. Teknisa Högskolans 100-Ars Jubileum, Stockholm

Miami Conservancy District (1917): «Theory of Hydraulic Jump and Backwater Curves» von S.M. Woodward und «The Hydraulic Jump as a Means of Dissipating Energy» von R.M. Riegel und J.C. Beebe. Technical Reports, Part III, Dayton, Ohio

Rajaratnam, N. (1967): «Hydraulic Jumps». In «Advances in Hydroscience», ed. V.T. Chow. Academic Press, New York

Rehbock, T. (1928): «Die Verhütung schädlicher Kolke bei Sturzbetten». Bauingenieur, Vol. 8, Heft 4, 57-60; Heft 5, 78-81; Heft 14, 249; Heft 50, 926

Ritter, A. (1895): «Beitrag zur Theorie der Wasserschwelle». Zeitschrift VdI, Vol. 39, Nr. 45, 1349-1353

Safranez, K. (1927): «Wechselsprung und die Energievernichtung des Wassers». Bauingenieur, Vol. 7, Heft 49, 898-905

Safranez, K. (1929): «Untersuchungen über den Wechselsprung». Bauingenieur, Vol. 9, Heft 37, 649-651, Heft 38, 668-678

Safranez, K. (1930): «Energieverzehrung der Deckwalze». Bauingenieur, Vol. 10, Heft 20, 352-355

Safranez, K. (1933): «Länge des Wassersprunges». Wasserkraft und Wasserwirtschaft, Vol. 28, Heft 24, 277-282

Stevens, J.C. (1925): «Determining the Energy Lost in the Hydraulic Jump». Engineering-News Record, Vol. 94, Nr. 23, 928-929; 1927, Vol. 98, Nr. 3, 126; 1927, Vol. 98, Nr. 13, 538-539

Unwin, W.C. (1880): Beitrag «Hydraulics» zur Encyclopaedia Britannica, London

Rechnung ergab. Diese Abweichung wird der Wandreibung zugeschrieben. Deshalb, und um die Rechnung einfacher zu gestalten, schlug Safranez die leicht modifizierte, seinen Messwerten angepasste Gleichung

(17) $h_2/h_1 = 1{,}36\,\mathbf{F}_1$

vor, sofern $\mathbf{F}_1 > 2{,}5$. Gl. (17) folgt vorerst Merrimans Beziehung, schneidet dann bei $\mathbf{F}_1 = 9$ Bélangers Gleichung und liegt für höhere $\mathbf{F}_1$ unter Gl. (1). Mit Gl. (17) liegt demnach der erste Versuch vor, den Wandreibungseinfluss in die Rechnung einzubauen.

Weiter untersuchte Safranez (1929) die Länge des Wassersprunges. Der Sprungfuss war einfach festzustellen, als Sprungende wurde die unterwasserseitige Deckwalzenbegrenzung betrachtet, also der Querschnitt, an dessen Oberfläche das Wasser ruht. Beide Querschnitte werden durch den turbulenten Abfluss stark bewegt, trotzdem liessen sich zeitliche Mittelwerte bestimmen. Darnach lässt sich die Deckwalzenlänge L_r angeben zu

(18) $L_r/h_2 = 4{,}5$

oder ebenfalls näherungsweise durch $L_r/h_1 = 6\,\mathbf{F}_1$. Weitere Angaben zur Länge des Wassersprungs folgten durch Safranez (1933).

Neben den Längsangaben beobachtete Safranez (1929) auch die Vorgänge in der Deckwalze selbst. Direktes Aufzeichnen der Deckwalzen-Umrisse auf die Glaswände des Versuchskanals, einschliesslich der Zonen mit Vorwärts- und Rückwärtsbewegung, machten Aussagen über das Deckwalzen-Volumen V_D möglich. Die Messwerte zeigten, dass die Wirkung der Deckwalze nicht nur von V_D abhängt, sondern durch

(19) $V_D = 20Q\Delta H/\mathbf{F}_1$

abgeschätzt werden kann. Dabei sind in dieser dimensionsbehafteten Beziehung [m] und [s] einzusetzen. Weitere Angaben zur «Energieverzehrung» der Deckwalze folgten 1930. Safranez hat damit die Vorgänge im Wassersprung ziemlich ausführlich untersucht.

Zum Abschluss ein Zitat, mit dem er das Wesen des Sprungs treffend charakterisiert: «. . . . trotz des allgemeinen Beharrungszustandes im Abflussvorgang veränderte die heftig bewegte lufterfüllte Deckwalze dauernd Gestalt und Aussehen periodisch. Ständig spritzte das Wasser an verschiedenen Stellen mächtig empor, während die Walze immer wieder ein wenig vor und zurück wanderte, wobei einzelne schmale Schaumstreifen oft weit stromaufwärts über das schiessende Wasser vorzüngelten und aus der Walzenoberfläche heftige Auswürfe nach oben erfolgten.» Bild 10 illustriert seine Betrachtung.

Folgerungen

Diese geschichtliche Übersicht zeigt die Um- und Irrwege am Beispiel des Wassersprunges auf, die nötig waren, bis die uns heute so klaren Zusammenhänge dargestellt werden konnten. Sie erinnert uns aber gleichfalls, wieviel Energie und Wissensdurst erforderlich sind zur Untersuchung von Naturgesetzen. Sie zeigt leider aber nicht die vielfach interessanten Stunden des Findens und der Freude über eine neue Entdeckung.

Adresse des Verfassers: *W.H. Hager*, Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 8092 Zürich.

Wettbewerbe

Centre de Bussigny VD

Ce concours d'idées était organisé par la Municipalité de Bussigny-près-Lausanne. Il était ouvert aux architectes établis dans le canton de Vaud avant le 1er janvier 1989 et reconnus par le Conseil d'Etat. 25 projets ont été rendus. Le jury a décidé d'écarter un projet de la répartition des prix. Résultats:

1er prix (20 000 Fr.): Alain Porta, Aigle; collaborateur: Ch. Gachnang, C. Lehrian

2e prix (10 000 Fr.): Gabriele Rossi, Lausanne; collaborateurs: P. Rouault, G. Biaggi, St. Vallotton

3e prix (18 000 Fr.): Philippe Guyot, Lausanne; collaborateurs: W. Moskal, A. Campana

4e prix (14 000 Fr.): Pierre Bechler, La Sarraz; collaborateurs: S. Francfort, G. Pilet

5e prix (8000 Fr.): De Cocatrix Dunning Versteegh Gland; colaborateurs: P. Keller, L. Grogg, L. Meienhofer, C.-L. Van Osselt, T. Klein, G. Weber

6e prix (6000 Fr.): Gilles Bellmann, Clarens; collaborateurs: M. Pedrolini, P.-Y. Gruaz

7e prix (5000 Fr.): Herbert Marti, Bussigny

Le jury propose à l'organisateur de confier aux auteurs des projets au 1er, 2e et 3e rang une étude complémentaire en vue d'approfondir leurs propositions en tenant compte des critiques du jury.

Jury: J. Helfer, syndic de Bussigny; M. Bevilacqua, architecte, Lausanne; E. Dutoit, conseiller communal, Bussigny; P. von Meiss, architecte, Lausanne; E. Musy, architecte, Lausanne; F. Ramseier, architecte, conseiller communal; G. Rey, ingénieur, Lausanne.

Überbauung Jungfraustrasse in Interlaken BE

Die Gemeinde Interlaken, vertreten durch das Bauinspektorat, die Baudirektion des Kantons Bern, vertreten durch das Hochbauamt, und Herr Otto Affolter, Interlaken, veranstalteten einen öffentlichen Projektwettbewerb für die Überbauung ihrer Grundstücke an der Jungfraustrasse sowie für Gestaltungsideen über den angrenzenden öffentlichen Aussenraum. Teilnahmeberechtigt waren Architekten, die mindestens seit dem 1. Januar 1988 in den Amtsbezirken des Berner Oberlandes Geschäftssitz haben oder heimatberechtigt sind (Frutigen, Interlaken, Niedersimmental, Oberhasli, Obersimmental, Saanen, Thun). Es wurden 18 Projekte beurteilt. Acht Entwürfe mussten wegen schwerwiegender Verletzung von Programmbestimmungen von der Preiserteilung ausgeschlossen werden. Ergebnis:

1. Rang, 1. Preis (17 000 Fr. mit Antrag zur Weiterbearbeitung): Architekturwerkstatt, Thun; Heinz Fahrni, Johannes Saurer, Frank Weber

2. Rang, 2. Preis (13 000 Fr.): Peter Anneler, Thun; Daniel Baum, Thun; Stefan Ringler, Thun

3. Rang, 1. Ankauf (3000 Fr.): Hans-Christian Müller, Bern; Christian Jost, Bern; Fritz Zobrist, Bern

4. Rang, 2. Ankauf (2000 Fr.): Hofer, Meyer, Sennhauser, Spiez; verantwortlich: A. Meyer, B.J. Fischer; Mitarbeiter: M. Koch, H. Sauter, J. Schreiner

5. Rang, 3. Preis (7000 Fr.): Forum 4, AG für Architektur, Interlaken; Mitarbeiter: Bernhard Aeschlimann, Beatrice Lengacher

6. Rang, 4. Preis (5000 Fr.): Klaus Klopfenstein, Oberwil im Simmental; Michael Gerber, Klaus Klopfenstein

7. Rang, 3. Ankauf (1000 Fr.): Hansjörg Straub, Schlieren

8. Rang, 5. Preis (2000 Fr.): Hanspeter von Allmen, Interlaken; Peter Gasser, Interlaken

9. Rang, 6. Preis (1000 Fr.): Anton Schneiter + Xaver Spörri, Lachen

Fachpreisrichter waren Rolf Hesterberg, Bern; Urs Hettich, Kantonsbaumeister, Bern; Roland G. Leu, Feldmeilen; Rolf Reusser, Stadtarchitekt, Thun; Heinrich K. Lohner, Thun, Ersatz.