Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 88 (1996)
Heft: 3-4

Artikel: Geschichte der Dammbruchwelle
Autor: Hager, Willi H. / Chervet, André
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940337

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

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

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

Download PDF: 23.08.2025

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

die Laufschaufeln bzw. die Laufräder erst zu erneuern, wenn dies betriebsbedingt erforderlich wird, und die elektromechanischen Anlagen zu ertüchtigen; die mechanischen Turbinenregler durch elektronische Regler zu ersetzen sowie die Steuerung und Leittechnik für einen unbemannten Betrieb zu erstellen.

Das phasenweise Vorgehen und die Modellversuche erbrachten sehr gute Entscheidungsgrundlagen für die künftigen Investitionen.

Für den Fall einer unerwarteten Turbinenhavarie stehen heute gültige Modellresultate für eine sofortige Umsetzung in die Grossausführung bereits zur Verfügung.

Diese Mehrproduktion ist für eine so alte Anlage wie Klingnau unerwartet tief und somit nicht typisch. Diese Erkenntnis kann für manche optimistische Vorhersage bei anderen Projekten, die dann nach der Modernisierung nicht eingetroffen ist, eine mögliche Erklärung sein.

Die Turbine wurde durch das Büro Straub AG, Rütistrasse 3a, CH-5401 Baden, ausgemessen.

Adressen der Verfasser:
Leonhard Bächli, Aarewerke AG, Kraftwerk Klingnau, CH-5322 Koblenz. *Ludwig Becke,* Colenco Power Consulting AG, Mellingerstrasse 207, CH-5405 Baden.

Geschichte der Dammbruchwelle

Willi H. Hager und André Chervet

Zusammenfassung

Die Entwicklung der mathematischen Hydraulik hängt wesentlich mit den Basisgleichungen der eindimensionalen Strömung zusammen. Anhand von vier ausgewählten Beiträgen zu instationären Kanalströmungen wird diese faszinierende Entwicklung geschildert und die wohl interessanteste Anwendung, eben die Dammbruchwelle, aufgezeigt. Gleichzeitig wird eine kurze Biographie von fünf ausserordentlichen Hydraulikern vorgestellt.

Einleitung

Von allen instationären Flüssigkeitsströmungen stellt die Dammbruchwelle wohl das spektakulärste – gleichzeitig aber das physikalisch am schwierigsten erfassbare – Phänomen dar. In vielen Ländern ist es heute Vorschrift, zu jedem grösseren Wasserbauprojekt auch diesen Katastrophenfall in Erwägung zu ziehen und durch eine Risikoanalyse dessen Auswirkungen auf das Unterwasser zu ermitteln. Die mathematische Basis des Dammbruchproblems wurde vor gut 100 Jahren von *de Saint-Venant* durch die nach ihm benannten Gleichungen geschaffen. Sein geistiger Schüler *Boussinesq* hat das Grundgerüst entwickelt und mit Beobachtungen von *Bazin* verifiziert.

Losgelöst von der französischen Schule schrieb *Ritter* eine erwähnenswerte Publikation, welche jedoch vollständig ausserhalb seines Fachgebiets Baustatik lag. Dank *Forchheimer* ist diese Quelle heute zur Basispublikation des Dammbruchproblems schlechthin geworden, und mit der «Ritterwelle» bezeichnet man eben den von ihm beschriebenen, vereinfachten Bruchvorgang. Die ersten Experimente stammten von *Schoklitsch,* dem Schüler von *Forchheimer,* der dessen Universalwerk später in den Wasserbau übertrug.

Das Ziel dieser Arbeit ist, einerseits die geschichtliche Entwicklung der mathematischen Beschreibung der instationären Strömung nachzuzeichnen und andererseits das Lebensbild von fünf Hydraulikern einer breiteren Öffentlichkeit vorzustellen. Die verwendeten Gleichungsnummern werden für jeden dieser Hydrauliker separat erfasst, und eine Kurzbiographie vermittelt Hintergrundwissen.

Französische Theoretiker

De Saint-Venant (1871) gelang als erstem die Ableitung der eindimensionalen Bewegungsgleichungen von Flüssigkeitsströmungen. Vorerst wies er auf *Lagrange* hin, der für die Ausbreitungsgeschwindigkeit c einer Elementarwelle im Flachwasser den Ausdruck

$$c = (gh)^{1/2} \qquad \text{(V1)}$$

ableitete, mit g als Erdbeschleunigung und h als lokaler Wassertiefe. In einem mit der mittleren Geschwindigkeit V bewegten Fluid wird nach *Scott Russell* (1808–1882) und *Bazin* (1829–1917) sinngemäss

$$c = V \pm (gh)^{1/2}. \qquad \text{(V2)}$$

Vorerst wird die *Kontinuitätsgleichung* abgeleitet, welche durch eine einfache Volumenbetrachtung erhalten wird zu

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial (VF)}{\partial x} = 0. \qquad \text{(V3)}$$

Dabei bedeuten F die Querschnittsfläche, t die Zeit und x die Lagekoordinate.

Als *Impulsgleichung* für kleine Sohlengefälle ergibt sich: Die Gewichtskomponente lautet $(\rho g F dx)\ [d(\xi+h)/dx]\ \Delta t$ mit ξ als Oberflächenlage über einem Referenzniveau, die Druckkomponente ist $[(-\rho g F dx)\ \partial h/\partial x]\ \Delta t$, die Widerstandskomponente wird $(-\rho g W P_h dx)\ \Delta t$ mit W als Einheitswiderstand und P_h als benetztem Umfang und die Inertialkomponente beträgt $(\rho F dx)\ (dV/dt)\ \Delta t = (\rho F dx)\ [\partial V/\partial t + V(\partial V/\partial x)]\ \Delta t$. Durch Gleichsetzen dieser vier Terme entsteht

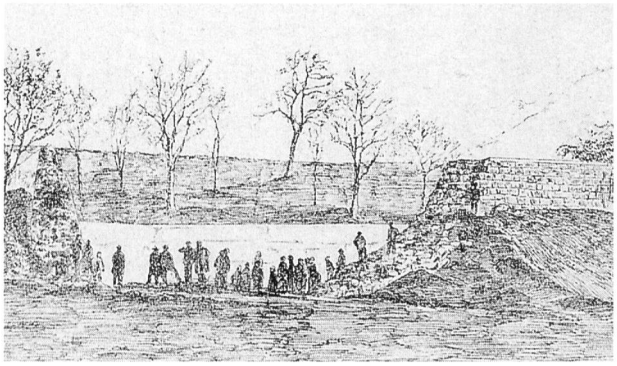


Bild 1. Historischer Dammbruch in Sonzier nahe bei Montreux (L'Ingegneria Civile, Torino 15[1]: 1).

$$\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{P_h}{F}\frac{W}{\rho g} = 0. \qquad \text{(V4)}$$

Es schien *de Saint-Venant* beachtlich, dass die instationäre Bewegungsgleichung sich nur durch den Term $\partial V/\partial t$ von der Stationärgleichung unterscheidet.

De Saint-Venant gelang auf Anhieb die Lösung des Gleichungssystems (V3) und (V4) für den Fall, dass die Reibungskomponente durch die Gewichtskomponente kompensiert wird. Dann nämlich lauten (V3) und (V4) im Rechteckkanal

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hV)}{\partial x} = 0, \qquad \text{(V5)}$$

$$\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = 0. \qquad \text{(V6)}$$

Nimmt man gemäss Erkenntnissen von *Partiot* die Variation der Geschwindigkeit V nur mit der Wassertiefe h an, so lässt sich $\partial h/\partial t$ eliminieren und es folgt $\partial V/\partial h = (g/h)^{1/2}$. Mit der Randbedingung $h\ (V = 0) = H$ folgt durch Integration

$$V = 2(gh)^{1/2} - 2(gH)^{1/2}. \qquad \text{(V7)}$$

Eingesetzt in die Kontinuitätsgleichung folgt schliesslich für die freie Oberfläche $h(x,t)$

$$x = [3(gh)^{1/2} - 2(gH)^{1/2}]t + \psi(h) \qquad \text{(V8)}$$

mit ψ als beliebiger Funktion von h, welche von den Randbedingungen abhängt. Der Fall des Dammbruchs wird nicht behandelt, die Gleichungen (V7) und (V8) stellen aber die korrekten Lösungen dar.

Boussinesq (1877) hat in seinem Monumentalwerk den instationären Abfluss ausführlich behandelt. Im Gegensatz zu *de Saint-Venant* führte er vor allen Termen der Bewegungsgleichung Korrekturfaktoren ein, die die Ungleichförmigkeit der Druck- und Geschwindigkeitsverteilung durch Pauschalkoeffizienten berücksichtigen. Für hydrostatische Druck- und uniforme Geschwindigkeitsverteilung ergibt sich Gleichung (V4).

Für die Lösung durch *Linearisierung der Differentialgleichungen* wird ein anderer Weg beschritten. Bezeichnen (h_o, V_o) Ausgangsgrössen für Wassertiefe und Geschwindigkeit, etwa für Normalabfluss, so werden die Variablen durch $h = h_o + h'$, $V = V_o + V'$ ersetzt und alle Terme $(h'/h_o)^m$ mit $m > 1$ vernachlässigt. Es entsteht dann

$$\frac{\partial h'}{\partial t} + h_o\frac{\partial V'}{\partial x} + V_o\frac{\partial h'}{\partial x} = 0, \qquad \text{(B1)}$$

$$h_o\frac{\partial V'}{\partial t} - V_o\frac{\partial h'}{\partial t} + (gh_o - V_o^2)\frac{\partial h'}{\partial x} = 0 \qquad \text{(B2)}$$

mit h_o, V_o als Normalabflusstiefe und Normalabflussgeschwindigkeit. Durch Elimination der Ableitungen in V' ergibt sich weiter für die Störfunktion $h' = h'(x,t)$

$$\frac{\partial^2 h'}{\partial t^2} + V_o\frac{\partial^2 h'}{\partial t\,\partial x} + (gh_o - V_o^2)\frac{\partial^2 h'}{\partial x^2} = 0. \qquad \text{(B3)}$$

Die allgemeine Lösung dieser linearen Differentialgleichung zweiter Ordnung lautet

$$h' = F_1(x - \omega_1 t) + F_2(x - \omega_2 t) \qquad \text{(B4)}$$

mit F_1, F_2 als beliebige Funktionen, welche die Randbedingungen befriedigen, und

$$\omega_{1,2} = V_o \pm (gh_o)^{1/2} \qquad \text{(B5)}$$

als Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeiten. Eine kleine Welle, welche einem Normalabfluss überlagert wird, pflanzt sich demnach praktisch undeformiert mit den Geschwindigkeiten ω_1 und ω_2 im Kanal fort. Je nachdem, ob ω_2 positiv oder negativ ist, wandern beide Wellenfronten ins Unterwasser oder eine ins Ober- und die andere ins Unterwasser. Der Zustand $\omega_2 = 0$, d.h. $V_o/(gh_o)^{1/2} = 1$, entspricht demnach dem Grenzzustand. Ist das Verhältnis von Fliessgeschwindigkeit V_o zu Wellengeschwindigkeit $(gh_o)^{1/2}$ kleiner als eins, so spricht man von Strömen *(état tranquille)*, sonst von Schiessen *(état torrentueux)*. Daraus leitete *Boussinesq* die wichtige Schlussfolgerung hinsichtlich der Berechnungsrichtung ab: Strömende Abflüsse werden vom Unterwasser beeinflusst und müssen demnach *gegen* die Fliessrichtung berechnet werden, für schiessende Abflüsse gilt das Gegenteil. Heute wird das von *Boussinesq* eingeführte Verhältnis $V_o/(gh_o)^{1/2}$ als Froudezahl nach dem englischen Schiffbauingenieur *William Froude* (1810–1879) bezeichnet. Die voranstehenden Ableitungen gelten dabei für das Rechteckprofil.

Im zweiten Teil bezog sich *Boussinesq* auf Abflüsse mit mässigen Wellenhöhen im Vergleich zur Ausgangstiefe und berücksichtigte damit die Stromlinienkrümmung. Die Bewegungsgleichung lautet dann nach längerer Rechnung

$$\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} - \frac{V}{gh}\frac{\partial h}{\partial t} + \left(1 - \frac{V^2}{gh}\right)\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{V^2 h}{g} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{3}\left(\frac{\partial^3 h}{\partial x^3} + \frac{2}{V}\frac{\partial^3 h}{\partial x^2 \partial t} + \frac{1}{V^2}\frac{\partial^3 h}{\partial x \partial t^2}\right) - \frac{1}{2}\frac{\partial^2 J_s}{\partial x^2}\right] = J_s - J_f. \qquad \text{(B6)}$$

Der in der eckigen Klammer stehende Ausdruck enthält die Krümmungsterme der Oberfläche $h(x)$ und des Bodens $J_s(x)$. Die mathematischen Schwierigkeiten zur Lösung dieser Beziehung sind beachtlich gestiegen.

Die Ritterwelle

Ritter betrachtete einen horizontalen prismatischen Kanal, in welchem eine Wassermasse durch eine Absperrwand gestaut war. Er untersuchte sowohl kontinuierliche wie auch diskontinuierliche Vorgänge, die bei Entfernung der Wand entstehen. Bezeichnet a die Wassertiefe auf der einen Kanalseite und bewegt sich das Wasser auf der anderen Kanalseite mit der Tiefe $a + z$, so errechnet er als Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$c = [g(a + z)]^{1/2}. \qquad \text{(R1)}$$

Beträgt der Unterschied zwischen zwei Wassertiefen Δz, so folgt als entsprechender Unterschied in der Fliessgeschwindigkeit

$$\Delta u = \Delta z\left(\frac{g}{a + z}\right)^{1/2}. \qquad \text{(R2)}$$

Geht man auf Differentialausdrücke über, so ergibt sich bei einer kontinuierlichen Oberfläche für die Geschwindigkeit

$$u = 2[g(a + z)]^{1/2} - 2[ga]^{1/2}. \qquad \text{(R3)}$$

Durch Grenzwertbetrachtung lässt sich zeigen, dass sich die Front einer Welle von der Höhe a mit der Geschwindigkeit

$$u = 2(ga)^{1/2} \qquad \text{(R4)}$$

fortpflanzt. Weiterhin bleibt die Wassertiefe an der Sperrstelle immer gleich $(4/9)a$ und die zugehörige Geschwindigkeit ist $(2/3)(ga)^{1/2}$, also ist der Durchfluss Q durch die Sperrstelle

$$Q = (8/27)B[ga^3]^{1/2}. \qquad \text{(R5)}$$

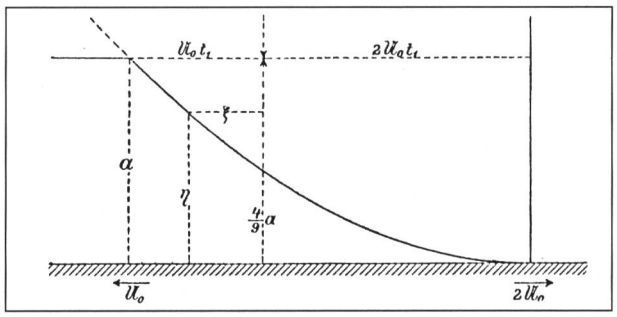


Bild R1. Verhältnisse eines Dammbruchs an der Sperrstelle.

Bild R1 zeigt die Sperrstelle mit einer ursprünglichen Wassertiefe a sowie der positiven Welle, welche sich mit der Geschwindigkeit $c = 2\,(ga)^{1/2}$ ausbreitet und der halben Geschwindigkeit in die negative Richtung. Die Wassertiefe an der Sperrstelle ist wie gesagt konstant gleich $(4/9)a$.

Bezeichnen ξ und η die Koordinaten des Wasserspiegels (Bild R1), so erhält man mit den vorstehenden Gleichungen als allgemeines *Oberflächenprofil*

$$\frac{\eta}{a} = \left(\frac{\xi+2\lambda}{3\lambda}\right)^2 \qquad \text{(R6)}$$

mit $\lambda = u_0 t_1$ als Distanz von der Sperrstelle bis zum Schnittpunkt mit dem Wasserspiegel $\xi = a$. Bei der freien Oberfläche handelt es sich demnach um eine Parabel mit dem Scheitel an der Wellenfront. Beachtlich an *Ritters* Arbeit ist einerseits der Ansatz, welcher weder denjenigen von *de Saint-Venant* noch *Boussinesq* folgt, noch später je von anderen übernommen wurde. Andererseits bleibt die Motivation für *Ritters* Arbeit unklar. Zwar spricht er von Dammbruchkurven, hat jedoch keine weiteren Angaben zu seiner Arbeit gegeben, noch die Problematik in entsprechende Schadenfälle eingebunden. *Ritters* beachtenswerte Publikation bleibt auch die einzige in diesem Problemkreis, und sie wäre wohl weiter nicht bekannt als Ritter-Lösung für die Dammbruchwelle, hätte nicht *Schoklitsch* darauf hingewiesen.

Die Charakteristikenmethode

In seinem *Mémoire sur l'intégration graphique des équations aux dérivées partielles* (1900) stellte *Massau* vorerst die Lösungsmethode allgemein vor und wendete sie anschliessend auf die stetig veränderliche Bewegung von Flüssigkeiten sowie auf das Erddruckproblem an. Die Methode basiert dabei auf den vom französischen Mathematiker *Gaspard Monge* (1746–1818) eingeführten *Charakteristiken,* längs deren die Veränderung der Gesuchten vorgeschrieben ist.

Beim Flüssigkeitsabfluss entsprechen die Charakteristiken der Wellenbewegung den beiden Elementarstörungen, die sich ins Ober- und Unterwasser fortpflanzen. Die Welle kann bei einem Sprung *(mascaret)* auch eine finite Höhe besitzen. Bezeichnet $h_m = F/B$ die mittlere Wassertiefe und B die Wasserspiegelbreite, so ergibt sich im beliebigen Profil anstelle von (V5, V6)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h_m \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial h}{\partial x} = 0, \qquad \text{(M1)}$$

$$\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - J_s + J_f = 0. \qquad \text{(M2)}$$

Diese zwei Gleichungen gelten für den prismatischen Kanal mit infinitesimalen Wellenhöhen. Für grössere Wellenhöhen sind andere Gleichungen anzusetzen. Beschränkt man sich anhand der mit dem Impulssatz gewonnenen Beziehungen auf kleine Wellenhöhen, so folgt für die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit verallgemeinert

$$c = V \pm (gh_m)^{1/2}. \qquad \text{(M3)}$$

Je nachdem ob die Fliessgeschwindigkeit V grösser oder kleiner als die Elementargeschwindigkeit $(gh_m)^{1/2}$ ist, pflanzen sich beide Wellen ins Unterwasser fort (schiessender Abfluss) oder je eine Störung gelangt ins Ober- und Unterwasser (strömender Abfluss). *Massau* kannte offensichtlich die Untersuchungen von *Boussinesq* nicht, der diese Tatsache bereits 1877 klar formulierte.

Nun wandte *Massau* die Methode der Charakteristiken an. Für die gesuchten Funktionen $h_m(x,t)$ und $V(x,t)$ gilt nämlich anhand der Differentialrechnung

$$dh_m = \frac{\partial h_m}{\partial x}\,dx + \frac{\partial h_m}{\partial t}\,dt, \qquad \text{(M4)}$$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x}\,dx + \frac{\partial V}{\partial t}\,dt. \qquad \text{(M5)}$$

Die Determinante des Gleichungssystems (M1, M2) und (M4, M5) lautet

$$\begin{vmatrix} dx & dt & 0 & 0 & dh_m \\ 0 & 0 & dx & dt & dV \\ 1 & 0 & -V/g & -1/g & J_f - J_s \\ V & 1 & -h_m & 0 & 0 \end{vmatrix}. \qquad \text{(M6)}$$

Als Lösung fand *Massau* für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit $dx/dt = c$ nach (M3) sowie

$$dh_m \pm (h_m/g)^{1/2} dV = \mp (gh_m)^{1/2}\,(J_f - J_s)\,dt. \qquad \text{(M7)}$$

Die beiden Gleichungen (M3, M7) beschreiben also die Lösungen entlang der positiven und der negativen Charakteristiken. Die zweite Gleichung wurde nicht in der Form nach *de Saint-Venant* integriert, sondern ein schrittweises Verfahren zur allgemeinen Lösung angegeben. *Massau* fand keine allgemeine Lösung, bezog sich dann jedoch auf den auch von *de Saint-Venant* untersuchten Spezialfall $J_f = J_s = 0$, also den horizontalen, reibungsfreien Rechteckkanal. Dann gilt $h = h_m$ und man findet (V7).

Hier merkt man deutlich den Unterschied zwischen dem Ingenieur *de Saint-Venant* und dem Mathematiker *Massau.* Letzterer studierte eine Reihe von z. T. recht realitätsfremden Fällen, während *de Saint-Venant* durch eine plausible Annahme die vereinfachte Lösung von Kanalwellen erzielte. Beachtlich an *Massau* ist einerseits seine von jeder anderen Autorität losgelöste Forschungstätigkeit (weder *de Saint-Venant* noch *Boussinesq* werden je erwähnt), andererseits seine ausserordentlich umfangreiche und wegweisende Diskussion von Diskontinuitäten. Wenn immer ein Fliesswechsel Strömen-Schiessen oder umgekehrt auftritt, so ergeben sich in der Lösung Sprünge. Wassersprünge *(ressauts hydrauliques)* werden korrekt über den Impulssatz behandelt. Hätte *Massau* mit Ingenieuren zusammengearbeitet, so wären sicherlich die Früchte seiner Ernte noch reicher ausgefallen, heute wird er eher als Aussenstehender der Hydraulik betrachtet.

Experimentelle Verifikation

Die ersten Modellversuche zu Dammbruchwellen wurden von *Schoklitsch* (1917), einem Schüler des berühmten Grazer Hydraulikprofessors *Forchheimer* durchgeführt. *Schoklitsch* (1888–1969) bezog sich dabei auf die Untersuchung von *Ritter* und leitet die wichtigsten Beziehungen vereinfacht nochmals ab. Er verifizierte die Ritter-Lösung durch Vorversuche von *Zeitlinger,* welche sowohl als hydrauli-

sche Übungen im Labor *Forchheimers* angelegt waren als auch durch eigene Versuche. Im Labor benutzte er dabei «glatte» Kanäle von bis zu 26 m Länge mit den Breiten-Höhen-Abmessungen von 96 × 80 mm bis 600 × 250 mm. Ferner wurden Naturgräben bis 1,3 m Breite, 1,0 m Tiefe und bis 150 m Länge zur Überprüfung der Resultate verwendet. Die Breschenbreite b im Verhältnis zur Kanalbreite B wurde variiert zwischen 0,02 und 1,0. Für die Wassertiefe h_0 an der Sperrstelle fand *Schoklitsch*

$$h_0/H = 10^{-0,3\beta} \qquad \text{(S1)}$$

mit H als Ruhewassertiefe und $\beta = b/B \leq 1$ als Breitenverhältnis der Sperrstelle. Für $\beta = 1$, also bei vollständigem Entfernen der Stauwand, folgte $h_0/H = 0,5$, entsprechend einem rund 10 % grösseren Wert als nach *Ritter.*

Für den *Durchfluss* durch den Breschenquerschnitt fand *Schoklitsch*

$$Q = 0,287\beta^{-1/4}\,(gH^3)^{1/2}. \qquad \text{(S2)}$$

Im Vergleich zu *Ritter* ergab sich für $\beta = 1$ lediglich eine Abweichung von 3 %, was als ausserordentlich wenig bezeichnet werden darf. Weitere Versuche beinhalteten die Einflüsse von Unterwasserstau sowie die asymmetrische Ausflussanordnung. Der Sohlenrauheit wurde ein eher kleiner Einfluss auf den Ausflussvorgang zugeordnet.

Zur Ermittlung der *Wellenumrisse* wurden von Mitarbeitern zu vorgegebenen Zeiten an verschiedenen Stellen mit abwaschbaren Farben bestrichene Blechplatten rasch ins Wasser getaucht, womit sich die Oberflächenprofile darauf abzeichneten und anschliessend ausgemessen werden konnten. Ein Vergleich mit der Ritter-Lösung war ausser im Frontbereich gut.

Bezeichnet L die Länge der Staustrecke, so benötigt die negative Welle mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit $(gH)^{1/2}$ die Zeit $t_s = L/(gH)^{1/2}$ bis zum Erreichen der Abschlusswand. Wie Versuche zeigten, bleibt die Wassertiefe an der Sperrstelle konstant bis zur Zeit $2t_s$, um erst dann langsam abzunehmen. Der Entleerungsvorgang ist nach rund $6t_s$ für Kanäle mit glatter Sohle beendet.

Referenzen

Boussinesq, J. (1877). Essai sur la théorie des eaux courantes. Mémoires présentés par divers Savants à l'Académie des Sciences de l'Institut de France Paris *23*(1): 1–660; *24*(2): 1–60.

De Saint-Venant, B. (1871). Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues de rivières et à l'introduction des marées dans leur lit. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris *173:* 147–154; *173:* 237–240.

Massau, J. (1900). Mémoire sur l'intégration graphique des équations aux dérivées partielles. Annales de l'Association des Ingénieurs sortis des Ecoles Spéciales de Gand *23:* 95–214.

Ritter, A. (1892). Die Fortpflanzung von Wasserwellen. Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure *36*(33): 947–954.

Schoklitsch, A. (1917). Über Dammbruchwellen. Kaiserliche Akademie der Wissenschaften Wien, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse. Sitzungsbericht IIa *126*(10): 1489–1514.

De Saint-Venant (1797–1886)

Einer der grossen Mechaniker Frankreichs hat sich neben der Elastizitätstheorie, der Biegung und Torsion auch intensiv mit Flüssigkeitsströmungen beschäftigt. *Adhémar-Jean-Claude Barré de Saint-Venant* wurde am 23. August 1797 im Departement Seine-et-Marne geboren. Er hat seine wissenschaftliche Karriere spät begonnen, und vorher das Leben des praktizierenden Ingenieurs ausgiebig kennengelernt. Seine wichtigsten Arbeiten in der Hydraulik umfassen Beiträge zu den stationären Flüssigkeitsströmungen in Kanälen (1851), die erwähnten Gleichungen der instationären Kanalabflüsse im Jahre 1871 und schliesslich das (1887) posthum veröffentliche Übersichtswerk in Kanalhydraulik.

De Saint-Venant wirkte als ausserordentlicher Mentor für seine Schüler, so insbesondere für *Boussinesq* und *Alfred-Aimé Flamant* (1839–1914), der durch seine «Hydraulique» das eigentliche Vorbild für *Forchheimers* «Hydraulik» wurde. Die Ehrungen, welche *de Saint-Venant* erfahren durfte, waren auch überdurchschnittlich, so etwa 1865 als *Officier de la Légion d'honneur,* und 1868 als Mitglied der *Académie des Sciences.* Nach einem arbeitsintensiven, aber reichen Lebensabend verstarb *de Saint-Venant* fast neunzigjährig am 6. Januar 1886 (Hager 1991).

Hager, W. H. (1991). De Saint-Venant, ein Leben als Ingenieur – ein Leben als Wissenschafter. «Schweizer Ingenieur und Architekt» *109*(9): 193–197.

De Saint-Venant, B. (1851). Sur des formules nouvelles pour la solution des problèmes relatifs aux eaux courantes. «Annales des Mines», Série 4, *20*: 288–353.

De Saint-Venant, B. (1887). Des divers manières de poser les équations du mouvement varié des eaux courantes. «Annales des Ponts et Chaussées» *57*(6): 148–228.

Boussinesq (1842–1929)

Joseph Valentin Boussinesq wurde am 13. März 1842 in Saint-André-de-Sangonis (dép. de l'Hérault) als älterer Sohn des Landwirts *Jacques* und der *Anne-Marie,* geborene *Cavalier,* geboren. Nach der Volksschule und dem Gymnasium in Montpellier wurde er Lehrer, bildete sich aber autodidaktisch in Mathematik weiter. Bereits jetzt absor-

bierten ihn Mathematik und Physik vollständig. Er wurde einer der letzten Universalwissenschafter, insbesondere aber ein Mechaniker ersten Ranges.

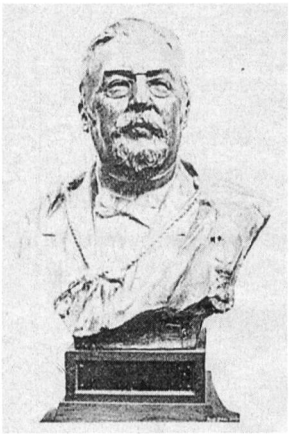
Die Zeit als Lehrer in Agde, Le Vigan und Gap liess ihm genügend freie Zeit zur Abfassung der Promotionsarbeit über die Fortpflanzung des Lichtes und die Dispersionsgesetze. Er legte sie 1867 in Paris der Akademie der Naturwissenschaften vor. Im Zusammenhang mit einer anderen Arbeit über elastische Körper weckte er das Interesse von *de Saint-Venant,* welcher von dieser Zeit an zu seinem Förderer wurde.

Boussinesq war im wahrsten Sinne des Wortes ein Nachtmensch, verschlossen, schwierig zum Erfassen, kompliziert im Ausdruck – ganz im Gegensatz zu seinem Mentor. Seit 1868 beschäftigte er sich auch mit Problemen der Hydromechanik – offensichtlich durch den Kontakt mit *de Saint-Venant*. Dieser verhalf ihm auch zu einer Professorenstelle an der Fakultät der Wissenschaften in Lille.

Das gut 700 Seiten umfassende Monumentalwerk «Eaux courantes» darf als die Hauptarbeit in der Hydraulik betrachtet werden. Daneben nahmen ihn Probleme im Zusammenhang mit der turbulenten Strömung, Wirbeln, Überfällen, Oberflächenspannung neben anderen gefangen. Die komplexen mathematischen Lösungen wurden meist durch geschickte Vereinfachungen und sein mathematisches Feingefühl erarbeitet. Dabei blieb es jedoch nicht, denn häufig wurden die Resultate durch Messungen, insbesondere des grossen *Henri Bazin* (1829–1917), verifiziert.

Zehn Tage nach *de Saint-Venants* Tod wurde *Boussinesq* Mechanikprofessor an der Sorbonne, zur engen Zusammenarbeit kam es leider nicht mehr. 1896 übernahm er die Professur für mathematische Physik und Wahrscheinlichkeitstheorie. Über die familiären Verhältnisse liegen keine Angaben vor, und zwei Ehen wurden nach kurzer Zeit wieder geschieden. Nach einem erfolgreichen, aber eher dunklen Leben, das auch intensives Studium der Literatur, der Religion und der Philosophie beinhaltete, verstarb er am 19. Februar 1929.

Picard, E. (1933). La vie et l'œuvre de Joseph Boussinesq. Académie des Sciences, Institut de France: Paris. Auch erschienen (1936). Discours et notices: 53–127, Académie des Sciences: Paris.



Massau (1852–1909)

Junius Massau wurde am 9. April 1852 in Gosselies (B) geboren. Die Mittelschule besuchte er im Königlichen Atheneum von Mons und trat dann 1868 in die Ingenieurschule von Gent (Gand) ein. Diese schloss er 1874 mit Auszeichnung ab. Er wirkte vorerst als praktizierender Ingenieur im *Corps des Ponts et Chaussées* von Belgien. Bereits 1878 übernahm er Mechanik-Vorlesungen an der Universität von Gent. Später kamen die Unterrichtsgebiete Maschinenbau und Himmelsmechanik dazu. 1884 erhielt er durch ein königliches Dekret den Professorenrang.

Als Auszeichnungen seiner wissenschaftlichen Tätigkeit ehrte man ihn 1894 mit dem Prix Quinquennal in Physik und Mathematik, 1902 wurde er Korrespondent der königlichen Akademie von Belgien, und die Académie des Sciences von Paris überreichte ihm 1906 den *Prix Wilde.* Ende 1908 wurde er *Inspecteur Général* des *Corps.* Sein Leben lang blieb er mit der Universität von Gent verbunden und förderte deren Ruhm, insbesondere mit seiner Arbeit *Mémoire sur l'intégration graphique* (1900). Er war zudem mit der *Association des Ingénieurs sortis des Ecoles Spéciales de Gand* stark verbunden und war 1902–1905 gar deren Präsident.

Der bedeutende Mechaniker wurde als Lehrer geschätzt. Nach seiner Vorlesung am 1. Februar 1909 klagte er über eine Erkältung und erlag dann am 10. Februar 1909 einer Lungenentzündung. Er hinterliess seine Eltern, seine Kollegen und insbesondere seine ihn verehrenden Studenten, denen er ein grosses Vorbild und ein lieber Lehrer war.

Massau zeichnete sich durch drei Eigenschaften aus: ein klares Verständnis der Wissenschaften, eine grosse Originalität seiner Methoden sowie eine extreme *Concision.* Sein *Mémoire* wurde von der Jury als hervorragend gewürdigt. Die Methode liess sich als neues Instrument insbesondere im Ingenieurwesen anwenden. Dabei spielt die Anwendung in der Hydraulik eine spezielle Rolle, auf die eingegangen wird. Seine Resultate publizierte er mit Vorliebe in den Annalen der *Association,* erstens weil er sich mit ihr stark verbunden fühlte, zweitens aber auch weil er mit seinen Kameraden und Schülern so in intellektuellem Kontakt bleiben wollte.

Drei Monate nach dem Tode von *Massau* wurde ein Komitee zu seinem Gedenken gegründet. Aus den zahlreichen Spenden wurden eine Büste für die Universität, ein Grabmal sowie eine Plakette für sein Geburtshaus in Auftrag gegeben, die sein Wirken unvergesslich lassen. *Bouny* (1947) hat sogar versucht, die Masse als physikalische Einheit mit dem Massau anstelle des Gramms einzuführen, wohl ein Unterfangen, das er nicht durchsetzen konnte.

Bouny, F. (1947). Pour l'attribution du nom Massau à l'unité technique de masse. «Annales des Ingénieurs sortis des Ecoles Spéciales de Gand»: 73–97.

Demoulin, A. (1914). Mémoire sur l'intégration graphique des équations aux dérivées partielles. Edition du Centenaire par les soins du Comité National de Mécanique. Enthält Nekrolog und Literaturverzeichnis sowie Kopie eines Briefs an Autor vom 7. September 1904, 9 p.

Divers (1909). Nécrologie – Junius Massau. Annuaire de l'Association des Ingénieurs sortis des Ecoles Spéciales de Gand *2* (Série 5): 174–192.

Divers (1910). A la mémoire de Junius Massau. Annuaire de l'Association des Ingénieurs sortis des Ecoles Spéciales de Gand *3* (Série 5): 409–439.

Massau, J. (1877). Mémoire sur l'intégration graphique et ses applications. «Annales des Ingénieurs sortis des Ecoles Spéciales de Gand» *2*: 13–55; *3*: 203–281; *7*: 53–133; *10*: 1–535; *11*: 485–535; *12*: 185–443.

Massau, J. (1900). Mémoire sur l'intégration graphique des équations aux dérivées partielles. «Annales des Ingénieurs sortis des Ecoles Spéciales de Gand» *23*: 95–214; *1* (Série 3): 135–226; *1* (Série 3): 393–434; *2* (Série 3): 383–436; *3* (Série 3): 65–147.

Schoklitsch (1888–1969)

Geboren am 23. April 1888 in Wolfau (Burgenland), arbeitete *Armin Schoklitsch* vorerst unter der Leitung von Prof. *Philipp Forchheimer* (1852–1933) in Graz. Er promovierte 1913 über ein flussbauliches Thema (*Schoklitsch* 1914) und habilitierte sich 1920. In dieser Zeit hat er namhafte Modellversuche im Fluss- und Wasserbau durchgeführt und auch die bestehenden Anlagen des Instituts erweitert.

1926 wurde er als Professor und Nachfolger von Prof. *Peter Kresnik* (1850–1928) an die frühere Deutsche Technische Hochschule von Brünn (heute Tschechien) gewählt, wo er sich insbesondere der Herausgabe seines in drei Sprachen übersetzten Handbuchs des Wasserbaus (1930) widmete. Darin werden nicht nur wasserbauliche Ingenieurarbeiten vorgestellt, sondern auch die Hydraulik allgemein sowie die damaligen Kenntnisse in der Wasserversorgung und in der Abwassertechnik auf rund 1200 Seiten enzyklopädieartig vorgestellt. Weitere Bücher wie zum Grundbau (1932), zu Tosbecken (1935) und 1937 gar zu Kostenberechnungen im Wasserbau und Grundbau rundeten sein grosses Schaffen ab. Das Tosbeckenbuch ist dabei das früheste dieser Art, und es werden wesentliche Bemessungsgrundsätze durch eine Vielzahl von ausgewählten Modellstudien aufgestellt. *Schoklitsch* und der Schweizer *Charles Jaeger* (1901–1989) haben sich gegen Ende der dreissiger Jahre als wichtige Berichterstatter in der damals führenden deutschen Zeitschrift «Wasserkraft und Wasserwirtschaft» hervorgetan.

Schoklitsch darf als guter Schüler seines Lehrers *Forchheimer* bezeichnet werden, hat er doch das vorwiegend theoretische Wissen seines Lehrers in die Praxis umgesetzt. Bereits 1933 wurde Schoklitsch von der Universität Breslau mit dem Ehrendoktorat geehrt. 1940 kehrte er dann als ordentlicher Professor an die TH Graz zurück und wurde vom November 1944 bis April 1945 Rektor.

Schoklitsch muss in Brünn nicht sonderlich glücklich gewesen sein, wie aus der amerikanischen Übersetzung seines *Wasserbaus* hervorgeht. Jedenfalls schloss er sich dem nationalsozialistischen Gedankengut an und wurde 1942 gar als Gauleiter der Steiermark eingesetzt. Gleichzeitig nahm seine wissenschaftliche Tätigkeit vollständig ab. Am Kriegsende flüchtete er nach Argentinien, weilte vorerst in Tucuman und wurde 1950 an die Cuyo-Universität in San Juan (Argentinien) berufen. Hier gelang ihm in Zusammenarbeit mit zwei seiner Töchter unter «schwierigsten Verhältnissen» die zweite Auflage des Handbuchs des Wasserbaues. Er starb am 9. März 1969. Prof. *Grengg* (1969), einer seiner ehemaligen Schüler und damaliger Wasserbauprofessor von Graz schrieb in seinem Nekrolog: «Das Schicksal aus Beruf und Politik hat eine Rückkehr in die Heimat nicht zugelassen, aber der Repräsentant einer vergangenen Epoche möge nicht nur in Argentinien unvergessen bleiben.»

Grengg, H. (1969). Prof. Dr. techn. Dr. h.c. Armin Schoklitsch. «Bauingenieur» *44* (8): 310.

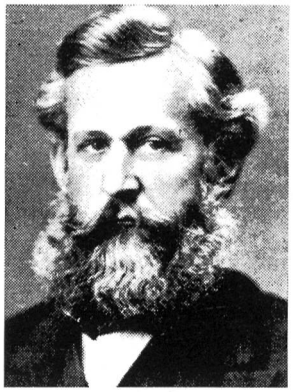
Schoklitsch, A. (1914). Über Schleppkraft und Geschiebebewegung. Engelmann: Leipzig.

Schoklitsch, A. (1926). Geschiebebewegung in Flüssen und an Stauwerken. Springer: Wien.

Schoklitsch, A. (1930). Handbuch des Wasserbaues. Springer: Wien (zweite Auflage 1950).

Schoklitsch, A. (1932). Der Grundbau. Springer: Wien.

Schoklitsch, A. (1935). Stauraumverlandung und Kolkabwehr. Springer: Wien



Ritter (1826–1908)

Georg Dietrich August Ritter wurde am 11. Dezember 1826 in Lüneburg geboren. In den Jahren 1842/43 unternahm er mehrere Reisen nach Amerika. Dann studierte er Maschinenbau an der Polytechnischen Schule Hannover. Nach mehreren Beschäftigungen nahm er 1850 in Göttingen das Studium wieder auf, welches er mit der Promotion abschloss, um vorerst als Lehrer an der Bergwerkschule in Nienburg zu wirken, 1856 dann als Lehrer in angewandter Mathematik und Maschinenbau an der Polytechnischen Schule in Hannover. Seine Ernennung zum Professor erfolgte 1868.

1870 wurde er als Professor für Mechanik an die Polytechnische Schule in Aachen berufen, wo er bis zur Pensionierung im Jahre 1899 blieb. *Ritter* wurde durch Buchwerke bekannt, etwa die in sieben Auflagen erschienene *Technische Mechanik.* Berühmt wurde er vor allem durch das von ihm entwickelte Verfahren zur Bestimmung der Kräfte in einem Tragwerk. Die TH Dresden verlieh ihm «in Würdigung seiner grundlegenden und hervorragenden Arbeiten auf dem Gebiete der technischen Mechanik und Statik der Baukonstruktionen» 1903 den Ehrendoktor. Leider liegen keine Angaben vor, welche die in diesem Zusammenhang besprochene Arbeit in sein Gesamtwerk einordnen würden. Er verstarb am 26. Februar 1908 in seiner Geburtsstadt Lüneburg.

Franke, P. G., Kleinschroth, A. (1987). Lebensbilder in Kurzfassung – Persönlichkeiten des Fachgebietes Hydraulik und Wasserbau aus dem deutschsprachigen Raum. Mitteilung *48*. Inst. Hydraulik und Gewässerkunde, Technische Universität: München.

Ritter, A. (1883). Lehrbuch der analytischen Mechanik. Baumgärtner: Leipzig (2. Auflage).

Ritter, A. (1892). Lehrbuch der technischen Mechanik. Baumgärtner: Leipzig (6. Auflage).

Ritter, A. (1899). Lehrbuch der Ingenieur-Mechanik. Baumgärtner: Leipzig (3. Auflage).

Ritter, A. (1904). Elementare Theorie und Berechnung eiserner Dach- und Brücken-Konstruktionen. Baumgärtner: Leipzig (6. Auflage, 1. Auflage 1862).

Adresse der Verfasser: PD Dr. sc. techn. *Willi H. Hager* und dipl. Bauing. ETH *André Chervet,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, VAW, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.