

# Beiträge zur Normung der Wehre für die Abflussmessung in offenen Gerinnen

Autor(en): **Engel, F.V.A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **81 (1963)**

Heft 43

PDF erstellt am: **02.08.2023**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-66898>

## Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## Beiträge zur Normung der Wehre für die Abflussmessung in offenen Gerinnen

Von F. V. A. Engel, Consulting Engineer, Workington, Cumberland, England

DK 627.133

### 1. Einleitung

Zur Abflussmessung in offenen Gerinnen liegen eine Reihe nationaler Normen vor, die sich fast ausschliesslich auf das Ueberfallwehr beziehen. Erst seit 1956, als in München auf einer Tagung des Hauptausschusses ISO/TC 30, der sich bisher nur mit der Mengenmessung in geschlossenen Rohrleitungen mittels Differenzdruckgeräten befasst hatte, ein Unterausschuss zur Abflussmessung in offenen Gerinnen geschaffen wurde, sind Normenentwürfe für Wehre auf breiter Grundlage ausgearbeitet worden.

In den letzten dreissig Jahren erschienen mehrere Forschungsarbeiten, die zum Teil wesentlich über die Ansätze hinausgehen, die ursprünglich für die Normen grundlegend waren. Diese sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Danach wurden einheitliche Abflussgleichungen für verschiedene Wehrarten aufgestellt, was nur durch ein rationelles Erfassen der einzelnen Beiwerte möglich war. Ausserdem wurden auf Grund der Ähnlichkeitsgesetze und der da gültigen Kennzahlen die strömungstechnischen Vorgänge besser erfasst. Diese Kennzahlen sollten zum Abgrenzen der Bereiche herangezogen werden, innerhalb welcher die Abflusszahlen als konstant betrachtet werden dürfen, wie es schon seit langem für Blenden und Venturirohre in geschlossenen Rohrleitungen geschieht. Andere Arbeiten haben zur Normung dadurch wesentlich beigetragen, dass sie den Einfluss der geometrischen Gestalt und ausschlaggebender Abmessungen der Wehre zeigten. Da aber ein eingehendes Studium vieler Veröffentlichungen erkennen lässt, wie wenig die schon z. T. seit über dreissig Jahren gewonnenen Forschungsergebnisse berücksichtigt werden, soll im vorliegenden Beitrag versucht werden, wichtige Entwicklungsschritte und neuere Erkenntnisse zum Wehrproblem eingehend darzustellen.

### 2. Entwicklungsschritte im Aufbau der Wehrgleichungen

Tabelle 1 zeigt, dass die in den verschiedenen Normen angegebenen Abflussgleichungen der Poleni-Weisbach-Gleichung entsprechen. Erstaunlich ist dabei, dass selbst in mo-

dernen Lehrbüchern immer noch die Ableitung dieser Gleichung gebracht wird, obwohl wiederholt von berufener Seite auf die physikalischen und mathematischen Unzulänglichkeiten hingewiesen wurde, z. B. E. Jacoby [20] (1931); F. Eisner [34] (1932); und neuerdings F. H. Knapp [27] (1960).

J. Weisbach [40] verallgemeinerte die an sich richtige Gleichung für den Ausfluss aus einer rechteckigen Seitenöffnung und übertrug sie auf einen «Wandeinschnitt», d. h. ein Ueberfallwehr. Er teilt die Fläche des Ueberfallstrahles in der Ebene der oberen Wehrkante in eine Anzahl Querschnittselemente auf und nimmt an, dass die Geschwindigkeiten in den einzelnen Querschnittselementen entsprechend der Torricelli-Gleichung proportional  $\sqrt{2gh}$  sind. Als Integrationsgrenzen wurden die Wehroberkante und die Höhe des Oberwasserspiegels gewählt und zwar an einer Stelle, an der der Spiegel noch nicht abgesenkt ist. Bild 1 zeigt die wirkliche Geschwindigkeitsverteilung über einem scharfkantigen Ueberfallwehr nach Messergebnissen von C. Keutner [24]. Wie ersichtlich, ist die Annahme von Weisbach nicht richtig.

Eine Kritik der Weisbach-Gleichung wurde neuerdings (1960) von F. H. Knapp [27] ausgesprochen. Er sagt: «Die Integration zwischen den Grenzen 0 und  $h_0$  setzt voraus, dass die örtlich veränderlichen Geschwindigkeiten  $v_2$  waagrecht verlaufen und ferner, dass der Ueberfallstrahl im Schnitt 2 (Bild 1) die Höhe  $h_0$  besitzt... Parallele Stromfäden im Schnitt 2 erzeugen jedoch eine hydrostatische Druckverteilung, die wiederum eine konstante Geschwindigkeit  $v_2$  im Strahlquerschnitt 2 bedingt und mit der angenommenen Geschwindigkeitsverteilung nach der Torricellischen Gleichung nicht in Einklang gebracht werden kann.»

Diese Kritik des Ansatzes von Weisbach, der die Wehrgleichung als Ausfluss aus einer Seitenöffnung behandelt, sollte wesentlich weiter gehen. Nach C. Jaeger [21] hatte bereits J. Boussinesq das «Extremalprinzip» auf die Abflussvorgänge bei Ueberfallwehren angewandt. Wegen der Krümmung der Stromfäden wurde das Verfahren von Bélanger,

Tabelle 1. Uebersicht der Normen zur Abflussmessung mit Ueberfallwehren

Land	Jahr	Herausgeber und Bezeichnung	Wehrarten und Abflussgleichung			Schrifttum
			Ueberfall ohne Seitenkontraktion	Ueberfall mit Seitenkontraktion	Besondere Wehrart	
Schweiz	1924	S. I. A. Techn. Norm Nr. 109	Rehbock und S. I. A.	S. I. A.	—	[35]
Grossbritannien	1935	British Standards Institution. BS No. 599 Pump tests	Rehbock	Hamilton Smith	V-Wehre (Thomson-Wehr) Tabellen mit Eich- werten für verschiedene Ueberfallhöhen	[5]
Deutschland	1936	VDI. «Wassermengen- Messregeln»	Rehbock und S. I. A.	—	Venturikanäle werden erwähnt, jedoch fehlen nähere Angaben	[39]
Frankreich	1954	Société Hydro- technique de France. Code d'Essais Fascicule No. 5 *)	Bazin (1888) Rehbock (1929) S. I. A. (1924)	Hégly S. I. A.	—	[36]

\*) Zweite Auflage; die erste Auflage war dem Verfasser nicht zugänglich.

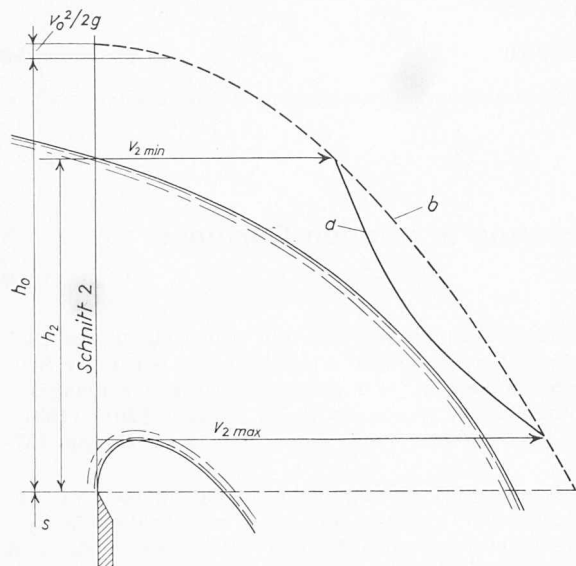


Bild 1. Geschwindigkeitsverteilung im Schnitt 2 über einem scharfkantigen Ueberfallwehr nach Keutner, Kurve a, verglichen mit der aus dem Torricelli-Weisbach-Ansatz berechneten Kurve b

$h_0$  = gemessene Höhe des Oberwasserspiegels

$h_2$  = gemessene Höhe des Wasserspiegels über der Wehrraute

das für breittkronige Wehre (nach Bild 3b) den Maximaldurchfluss als massgeblich einführt, nicht auf scharfkantige Ueberfälle ausgedehnt. In mehreren Arbeiten hatte Jaeger nachgewiesen, dass das Extremalprinzip nicht nur, wie ursprünglich angenommen wurde, für parallel verlaufende Stromfäden, sondern auch für stark gekrümmte Strombahnen gültig ist. Mit dem Nachweis der «Simultanität» des Maximaldurchflusses und des Minimums der Energiehöhe (Satz von Bélanger-Böss) hat Jaeger den Weg für einheitliche Wehrgleichungen gewiesen. Demnach ist die «kritische Tiefe» das physikalische Hauptkennzeichen der Abflussvorgänge bei allen Ausführungsarten frei abfließender Wehre («vollkommener Ueberfall»).

In einem Beitrag zur «Berechnung des Ueberfalls» behandelt W. Bleines [2] die beiden Auslegungen des Extremalprinzips. Diese sind zum Verständnis der im letzten Abschnitt zu behandelnden einheitlichen Abflussgleichungen ausschlaggebend. Nach Bleines sagt das Extremalprinzip folgendes aus:

a) «Ist im Oberwasser eines für den Abfluss kritischen Querschnittes (Wehr, Stromenge) eine bestimmte Höhe der Energielinie (Energiehorizont) gegeben, die nicht durch kleine Änderungen des Unterwasserstandes beeinflussbar ist, so nimmt die Abflussmenge den aus dem Bernoullischen Theorem berechneten Grösstwert ( $Q_{max}$ ) an.

b) Ist die durch einen kritischen Querschnitt abfließende Wassermenge gegeben, so nimmt die Energielinie hier die kleinste Höhe ( $H_{min}$ ) ein, die nach dem Bernoullischen Theorem gerade noch möglich ist. Voraussetzung ist, dass überhaupt Fließwechsel eintritt.» ( $Q_{max}$  und  $H_{min}$  treten nach Jaeger bei der gleichen kritischen Wassertiefe [Strahlstärke] auf).

Auf Grund dieser Aussage sollen scharfkantige Ueberfallwehre (Bild 3a) und Wehre langer Bauart (Bilder 3b und 3c) betrachtet werden. Das Ueberfallwehr ist durch den Begriff «scharfkantig» hinreichend in seinen geometrischen Massen festgelegt. A. H. Jameson [23] hat allerdings der Kantenbreite einen wesentlichen Einfluss zugeschrieben, was durch neuere Untersuchungen von P. Bravo [3] nicht bestätigt wurde. Selbstverständlich soll die Wehrraute, um dauerhaft zu sein, nicht schneidenartig ausgebildet werden, sondern eine gewisse Breite haben. Die Oberkante ist rechteckig (square-edged) auszuführen, der ein kurzer waagerechter Teil folgt.

Eine weitere, bisher wenig beachtete Erkenntnis ist F. Eisner [7] zu verdanken. Er zeigte, dass die Abflusszahl

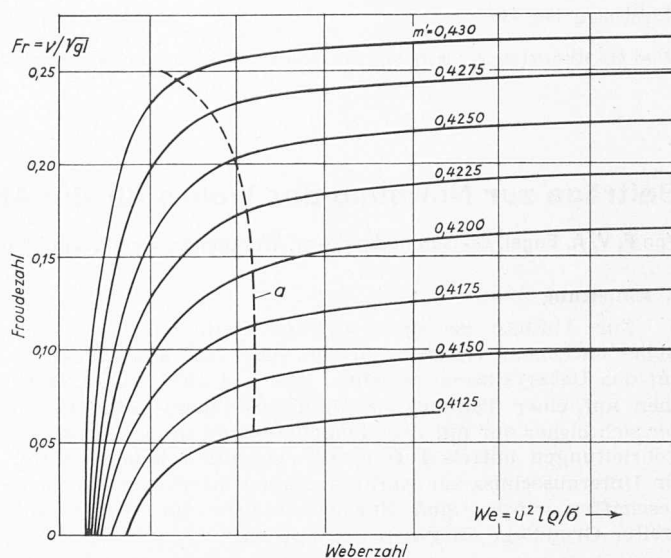


Bild 2. Eisner-Diagramm für Ueberfallwehre. Kurven gleicher Abflusszahlen  $m'$  mit der Froudezahl als Ordinate und der Weberzahl als Abszisse. Die Froudezahl ist durch die von F. Eisner aufgestellte Beziehung nach Tabelle 2 definiert (Für die Weberzahlen ist der Abszissenmasstab nicht festgelegt).

der Ueberfallwehre wesentlich durch die Froudezahl im Oberwasser gekennzeichnet ist (s. Anhang und Tabelle 2). Solange nämlich das «Öffnungsverhältnis»  $h_E/(h_E + s)$ , Bild 3a, und ein bestimmter, jedem Öffnungsverhältnis zugeordneter Zahlenwert der Froudezahl innerhalb vorgeschriebener Grenzen liegen, ist die Abflusszahl nahezu konstant. Zähigkeitseinflüsse (Reynoldszahl) und Oberflächenspannungseinflüsse (Weberzahl) sind innerhalb bestimmter Toleranzgrenzen bedeutungslos. Die Weberzahl ist durch  $u^2 \cdot l \cdot \rho / \sigma$  gegeben. (Im ursprünglichen Eisner-Diagramm wurde die Quadratzahl aus dem reziproken Wert der hier benutzten Weberzahl als Abszisse aufgetragen.)

Bild 2 zeigt, dass erst bei kleinen Weberzahlen (und kleinen Reynoldszahlen) die Froudezahl für konstante Abflusszahlen  $m'$  (als Parameter) beträchtlich abnimmt. Dies ergibt sich daraus, dass kleine Weberzahlen und kleine Reynoldszahlen im allgemeinen mit sehr kleinen Öffnungsverhältnissen verknüpft sind und dass die Zahlenwerte des Öffnungsverhältnisses auf die Froudezahl einen überwiegen Einfluss ausüben.

In verschiedenen Normen wurde der in Bild 2 durch die gestrichelte Kurve a näherungsweise angedeutete Bereich durch einen Kleinstwert der noch zulässigen Ueberfallhöhe abgegrenzt. Diese Massnahme ist jedoch nur innerhalb enger Temperaturgrenzen einwandfrei. Auch bei den anderen Wehrarten, insbesondere den breittkronigen Wehren, sollten die messtechnisch günstigsten Bereiche durch dimensionslose Kenngrössen gekennzeichnet werden.

Im vorliegenden Hauptteil wurden nur einige der Entwicklungsschritte im Aufbau der Wehrgleichungen behandelt. Weitere Beiträge sind in Tabelle 2 aufgenommen. Um das Studium der Originalarbeiten zu erleichtern, wurde meist die Bezeichnungsweise, die die einzelnen Verfasser benutzten, beibehalten. Die Bilder 3a, b und c für Ueberfallwehre, breittkronige Wehre und Venturikanäle enthalten für die massgeblichen Grössen alle in der Tabelle 2 benutzten Bezeichnungen. Dadurch können die verschiedenen Abflussgleichungen besser miteinander verglichen werden. Weitere Einzelheiten findet man ausserdem in den beiden folgenden Hauptteilen.

### 3. Wehre langer Bauart

Bei den Wehren langer Bauart, also bei solchen nach den Bildern 3b und 3c, ist das Zusammenspiel der geometrischen Gestalt mit den strömungstechnischen Einflüssen wesentlich verwickelter als bei Ueberfallwehren. Bei ihnen

können Ablösung, Kontraktion, Grenzschichteinflüsse und die Besonderheiten des geometrischen Profils sowie die geometrischen Ausmasse den Konstanzbereich der Abflusszahl wesentlich einschränken oder zu stark veränderlichen Abflusszahlen über den gewünschten Messbereich führen. Bei der Vielgestaltigkeit der Wehre langer Bauart ist es verständlich, dass dadurch das Aufstellen von Normen ausserordentlich erschwert wird.

Bisher sind bei allen Untersuchungen der Abflussvorgänge an Wehren langer Bauart die meisten Grössen als bezogene Grössen dargestellt worden. Diese erfassen einerseits die Ueberfallhöhe, andererseits die geometrischen Wehrabmessungen, wie Breite  $L$  und Höhe  $s$  der Krone (Bild 3b) oder den Abrundungsradius  $r$  (Bild 3c). Dadurch werden aber strömungstechnische Eigenschaften mit geometrischen Abmessungen verknüpft und bestehende Unterschiede in unzulässiger Weise verwischt. Deshalb sollten alle Normen zur Abflussmessung mittels Wehren langer Bauart genaue Angaben über geometrische Gestalt und Masse des Wehrkörpers enthalten. Ausserdem ist der Konstanzbereich der Abflusszahlen durch entsprechende Froudezahlen, Weberzahlen oder Reynoldszahlen zu kennzeichnen. In dieser Hinsicht sind leider auch neuere Arbeiten zur Wehrforschung unvollständig, wodurch die nötigen Vorarbeiten zum Aufstellen der Normen sehr erschwert werden. Hinzu kommt, dass in den Versuchsberichten meist wichtige Angaben fehlen, wodurch es oft unmöglich ist, geometrische Einflüsse von den rein strömungstechnischen zu trennen.

Im folgenden werden einige Richtlinien aufgestellt und auf weitere noch erforderliche Untersuchungen hingewiesen. Als Beispiel sei das Wehr mit waagerechter Krone, rechteckiger Oberkante und mit senkrechter Stirnfläche auf der Oberwasserseite untersucht, wie es in Bild 3b dargestellt ist. Bild 4 zeigt den Verlauf des Wasserspiegels über der Wehrkrone nach Angaben von H. J. Tracy [38] (S. 5, Fig. 2) in bezogenen Grössen. Interessant ist, dass die Wasserspiegel-lage für verschiedene Ueberfallhöhen und Längen der Wehrkrone über einen grossen Bereich nahezu denselben Verlauf zeigt. Eine Ausnahme bildet die Kurve für  $h/L = 0,073$ , die eine einzelne stehende Welle aufweist. Im Bereich  $h/L$  von 0,083 bis 0,40 sind die Abflusszahlen konstant. Mit  $h/L > 0,40$  steigt die Abflusszahl infolge der Stromfadenkrümmung stark an. Diese Wehre verhalten sich nicht mehr wie solche langer Bauart. Damit werden aber, im Gegensatz zu langen Wehren, die Abflusszahlen auch von der Gestalt der Absturzkante gegen das Unterwasser abhängig. Der untere Wert von  $h/L$  der Konstanzgrenze wird erreicht, sobald sich eine stehende Welle bildet. Diese Sonderart eines hydraulischen Sprungs (gewellter Sprung) ist durch niedrige Reynoldszahlen und niedrige Froudezahlen gekennzeichnet. Zu beachten ist, dass infolge der Ablösung (Kontraktion), wie sie schon von C. Keutner [25] beobachtet wurde, und infolge der Grenzschichtwirkung die wirksame Ueberfallhöhe wesentlich kleiner als die gemessene ist, wodurch sich die beobachtete Abnahme der Abflusszahlen erklären lässt. Der Einfluss der Grenzschicht bei Wehren mit langer Krone wurde neuerdings (1962) theoretisch von G. W. Hall [17] untersucht.

H. Bretschneider [4] hat drei solcher Wehre mit den Böschungswinkeln 1:1, 1:1,5 und 1:2 jeweils für drei Wehrhöhen von 25, 50 und 75 cm untersucht. Bild 5 zeigt die

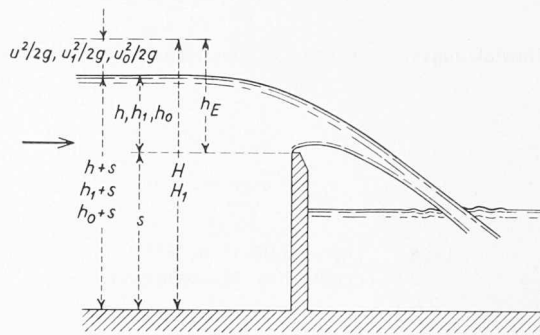


Bild 3a. Ueberfallwehr

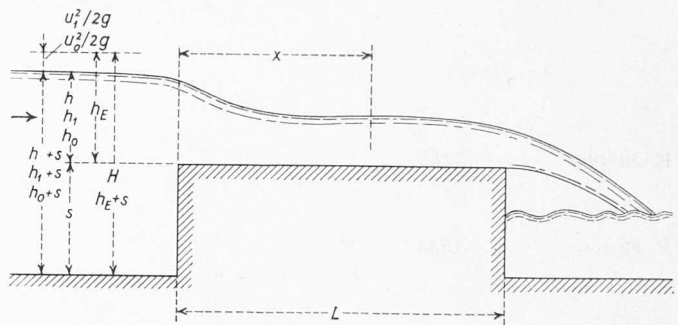


Bild 3b. Breitkroniges Wehr

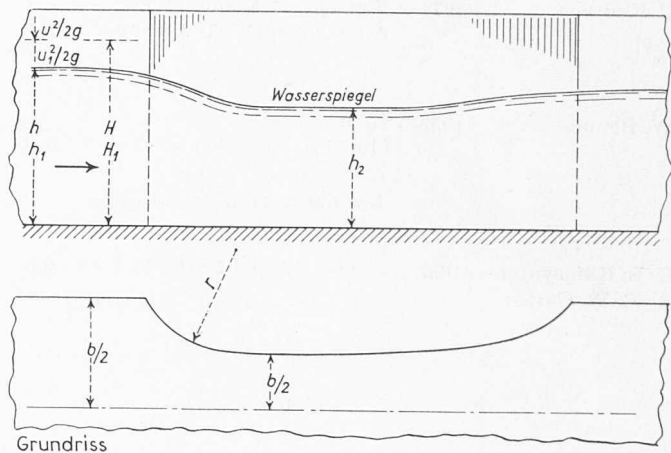


Bild 3c. Venturikanal

Bilder 3a, 3b, 3c. Übersicht der gleichbedeutenden Bezeichnungen für die massgeblichen Grössen in den Abflussgleichungen der Tabelle 2.

Bild 4. Verlauf der Wasserspiegel-lage über einem breitkronigen Wehr mit  $h/L$  als Parameter nach H. J. Tracy. Die stehende Welle (gestrichelte Kurve) stammt aus der Arbeit von Tracy.  $t$  = Tiefe des Wassers über der Wehrkrone.

Kurve a: stehende Welle für sehr rauhe Wehrkrone nach Keutner

$h/L = 0,13$ ;  $L/s = 4$ ;  $s = 0,5$  m

Kurve b: stehende Welle für breitkroniges Wehr mit Böschung 1:1 nach Bretschneider (Bild 3b entnommen).

$h/L = 0,139$ ;  $L/s = 2$ ;  $s = 0,5$  m

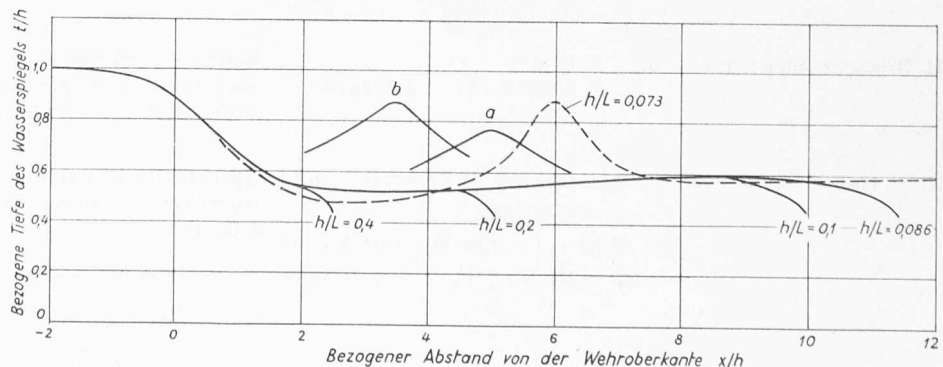




Tabelle 2. Entwicklungsschritte und Einzelbeiträge zu den Wehrgleichungen

Verfasser	Jahr	Abflussgleichung	Kennzeichnende Glieder in den Abflussgleichungen	Wehrarten	Schrift- tum
C. C. Inglis	1928	$Q = 3,09 C b_2 H^{3/2}$ (englisches Masssystem)	$C$ = experimentell ermittelte Abflusszahl zwischen 0,96 und 0,99; abhängig von der Breite des engsten Quer- schnitts	Venturikanäle ohne oder mit Boden- schwelle	[19]
A. H. Jameson	1930	$Q = C x^{3/2} \sqrt{g} b_2 h_1^{3/2}$ mit: $x^3 - [3x - 2] (b_1/b_2)^2 \times$ $\times [(h_1 + s)/h_1]^2 = 0$	Vereinfachte Gleichung für rechteckige Kanal- und Ein- schnürungsquerschnitte. Beiwert $x^{3/2}$ zur Berücksich- tigung der Zulaufgeschwin- digkeit $x^{3/2} = (2/3)^{3/2} C_v$ s. Tabelle 3, Spalte III	Venturiwehre, Grenz- fälle: Venturikanal ohne Bodenschwelle und breitkroniges Wehr ohne Seiten- kontraktion	[22]
E. Jacoby	1931	$Q = C b h_E^{3/2}$ $h_E = h_1 + u_1^2/2g$ ; $h_E = \alpha h_{kr}$	$h_{kr}$ = kritische Tiefe (n. Ja- coby, Grenztiefe)	Scharfkantige Ueber- fallwehre, Dachwehre oder Dreieckwehre	[20]
F. Eisner	1933	$Q = m' b \sqrt{2g} h_E^{3/2}$ $F_r = m' \sqrt{2} h_E/(h_E + s)$	Die Abflusszahl $m'$ wird als Funktion der auf das Ober- wasser bezogenen Froude- zahl gekennzeichnet (Rey- nolds- und Weberzahlen als weitere Kenngrößen für das Gebiet stark veränderlicher Beiwerte)	Scharfkantige Ueber- fallwehre. Abfluss- zahlen nach Rehbock werden analysiert s. Bild 2	[7]
C. Keutner	1934	Weisbach-Gleichung und Ansätze nach E. Jacoby.	Experimentell ermittelte Abflusszahlen breitkroniger Wehre verschiedener Bau- länge (s. Bild 7)	Breitkronige Wehre	[25]
W. Bleines	1953	$q =$ $(1,533 h_o + 1,205 u_o^2/2g)^{3/2}$ mit: $u_o = q/(h_o + s)$ Lösung mittels Iterations- verfahren	Berechnung der Abfluss- menge auf Grund des Extre- malprinzips nach Bélanger- Böss	Scharfkantige Ueber- fallwehre	[2]
C. E. Kindsvater u. R. W. Carter	1959	$Q = (2/3) \sqrt{2g} C_e b_e h_e^{3/2}$ mit: $b_e = b + K_b$ ; $h_e = h + K_h$ ; $C_e = f(b_2/b_1, h/w)$	Wirksame Höhe $h_e$ und Breite $b_e$ werden eingeführt, um Zähigkeit und Ober- flächenspannungseinflüsse zu berücksichtigen. Abfluss- zahl $C_e$ aus Diagrammen zu entnehmen, ebenso $K_b$ (Bild 10); $K_h = 0,003$ engl. Fuss = const.	Ueberfallwehr mit Seitenkontraktion. Auch für $b_2/b_1 = 1$ gültig, d. h. für Wehre ohne Seiten- kontraktion	[26]
F. V. A. Engel u. W. Stainsby	1958 bis 1962	$Q =$ $(2/3)^{3/2} C C_v C_k \sqrt{3} \sqrt{g} b_1 h_1^{3/2}$  $Q = (2/3)^{3/2} C C_v \sqrt{g} b_2 h^{3/2}$  $Q = (2/3)^{3/2} C C_v \times$ $\times [1 - (1 - C_k^{1/2})/2]^{3/2} \sqrt{g} b_1 h_1^{3/2}$	Einheitliche Abfluss- gleichungen mit besonderen Beiwerten für Zulaufge- schwindigkeit und Kontrak- tion (s. Tabelle 3)	Scharfkantige Ueber- fallwehre ohne Seiten- kontraktion  Venturikanäle  Breitkronige Wehre	[14]  [15]
H. Bretschneider	1961	$q_{max} = Q/b_1 =$ $= 1,705 C (h_1 + u_1^2/2g)^{3/2}$	Einfluss stehender Wellen über der Wehrkrone auf die Abflusszahl (Bilder 5 u. 6)	Breitkronige Wehre mit geneigter Böschung auf Ober- wasserseite	[4]
G. W. Hall	1962	$Q = (2/3)^{3/2} C \sqrt{g} b_1 H^{3/2}$ mit: $C = 1 - 0,069 \times$ $\times (L/H - 1 + 2,84 R_H^{1/4})^{0,8} R_H^{-0,2}$ $R_H = U_t H/\nu$ ; $U_t = (2g H/3)^{1/2}$	Abflusszahl $C$ abhängig von Kontraktion und Grenz- schicht	Breitkronige Wehre	[17]

Wasserspiegellage für stehende Wellen. In einem Fall (mit  $h = 15,44$  cm) senkt sich der Wasserspiegel gleichmässig über die ganze Wehrlänge ab, wobei das Wasser nahezu über die ganze Wehrkrone schiessend abfließt. Da bei stehenden Wellen die Tiefe wesentlich die kritische Tiefe überschreitet, sollte wenigstens zweimal Fließwechsel eintreten. Ob dies zutrifft, kann nur dann entschieden werden, wenn gleichzeitig auch die Höhe einer unter dem Wellenberg befindlichen Wasserwalze gemessen wird.

Bretschneider stellte fest, dass mit dem Erscheinen der stehenden Welle die Abflusszahl stark veränderlich wird und mit abnehmender Ueberfallhöhe mehr oder weniger abnimmt, wie es Bild 6 zeigt. Diese Charakteristik ist mit der des Venturirohres vergleichbar. Sie ist gegenläufig zu derjenigen des scharfkantigen Wehres, bei dem mit abnehmender Höhe die Abflusszahl zunimmt. Ein entsprechendes Verhalten zeigt die Messblende in geschlossenen Rohrleitungen.

Die einzelne stehende Welle, Bild 5, die Bretschneider [4] an einem Wehr mit glatter Krone beobachtet hat, wurde auch in Bild 4 (Kurve a) eingezeichnet. Da die Aenderung im Fließzustand, nämlich das Verschwinden der stehenden Welle, mit dem Beginn des Konstanzbereiches der Abflusszahl zusammenfällt (s. [4] S. 72 bis 74 und S. 78 bis 81), ist es wichtig festzustellen, welche Einflussgrößen diesen Zustand am besten kennzeichnen. Die Versuchsergebnisse nach Tracy beziehen sich alle auf Wehre mit glatten Kronen und senkrechter Stirnwand auf der Oberwasserseite, während bei Bretschneider die Wehrböschung 1:1 betrug. Es ist möglich, dass sich daraus die örtliche Lage der Kurve b erklären lässt, während bei Tracy und Keutner die Lage des Wellenberges Reibungseinflüssen zuzuschreiben ist. Bei den Versuchen von Keutner mit sehr rauher Wehrkrone ist ausserdem die relative Höhe des Wellenberges wesentlich kleiner als in den beiden andern Fällen.

Nach den verschiedenen an den Kurven angeschriebenen Zahlenwerten erscheint es unwahrscheinlich, dass das Verhältnis  $h/L$  als Kennzeichen für die einzelne stehende Welle massgebend ist. Der  $h/L$ -Wert, bei dem die stehende Welle beobachtet wurde, beträgt nach Tracy 0,073, nach Keutner 0,130 und nach Bretschneider 0,139. Offensichtlich wäre es unzumutbar, für die untere Grenze des Konstanzbereiches der Abflusszahl den Wert  $h/L$  zu wählen. Wahrscheinlich werden die Abflussvorgänge bis zum Beginn des Konstanzbereiches, d. h. dem Verschwinden stehender Wellen, durch Grenzschichteinflüsse beherrscht. Deshalb sollte für diese Abflussvorgänge die Reynoldszahl als kennzeichnende Grösse benutzt werden (G. W. Hall).

C. Keutner hatte bei einem Wehr mit sehr rauher Oberfläche noch für  $h/s = 0,52$  ( $L/s = 4$ ) eine stehende Welle beobachtet, die ebenfalls in Bild 4 eingezeichnet ist. Da aber der Verlauf der Wasserspiegellage für glatte und rauhe Wehrkronen bis zum Querschnitt, in dem die kritische Tiefe erreicht wurde, der gleiche war, erhielt Keutner gleiche Werte der Abflusszahlen.

Die von Tracy und Bretschneider untersuchten Parameter  $h/s$  und  $h/L$  sind strömungstechnische Kenngrößen. Die Untersuchungen von Keutner sind deshalb so wichtig, weil er den Einfluss der Wehrgeometrie untersucht hat.

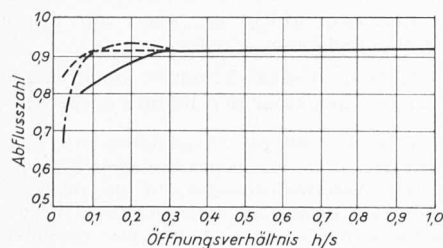


Bild 6. Abflusszahl eines breitkronigen Wehres mit Böschungsneigung 1:1 und verschiedenen Wehrrhöhen  $s$  nach Bretschneider. Ausgezogene Linie  $s = 0,25$  m; strichpunktierte Linie  $s = 0,50$  m; gestrichelte Linie  $s = 0,75$  m

Bild 7 (rechts). Abflusszahl breitkroniger Wehre abhängig von der relativen Länge  $L/s$  der Krone nach Keutner. Höhe der Krone über Kanalsole  $s = 0,5$  m. Die gestrichelte Kurve gibt den ungefähren Verlauf der Abflusszahl für Wehre kleiner Baulängen. Entsprechend dem Ansatz von E. Jacoby (s. Tabelle 2) ist die Abflusszahl  $C$  durch die Gleichung bestimmt:  
 $Q = C b h_e^{3/2}$

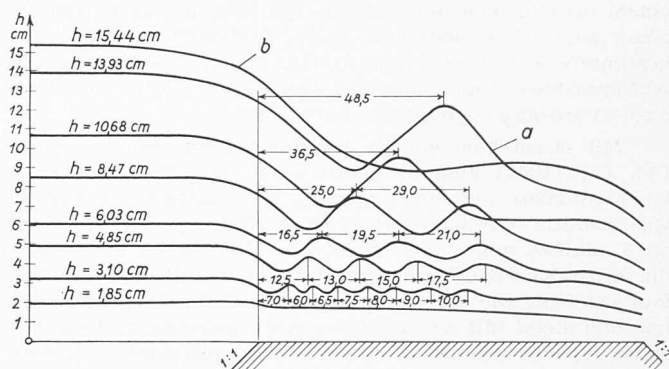


Bild 5. Verlauf des Wasserspiegels über einer Wehrkrone mit Böschungswinkel 1:1 für verschiedene Ueberfallhöhen nach Bretschneider.

Kurve a: Grenzlage für stehende Wellen

Kurve b: Untere Grenze für gleichmässigen und abfallenden Verlauf des Wasserspiegels. Beginn des Konstanzbereiches der Abflusszahl

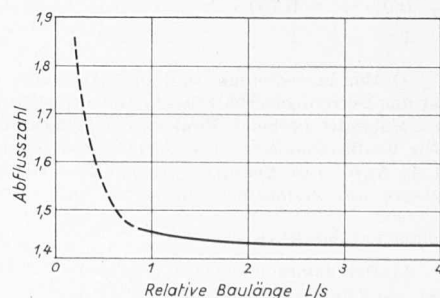
Durch systematische Versuche an Wehren verschiedener Baulängen wurde der Einfluss der relativen Baulänge auf die Abflusszahl ermittelt, wie aus Bild 7 ersichtlich ist. Die  $L/s$ -Werte lagen zwischen 0,2 und 4. Nach Keutner ergeben sich nahezu gleichbleibende Abflusszahlen für  $L/s = 2,4$  bis 4. Für  $L/s = 1,6$  liegt die Abflusszahl nahezu 1 % höher. Lässt man  $\frac{1}{2}\%$  als Toleranz zu, so ist bei breitkronigen Wehren eine relative Baulänge von mindestens 2 zu fordern. Eigenartigerweise sind diese wichtigen Ergebnisse bisher nicht genügend beachtet worden.

Vom Standpunkt einer Norm genügt es, die Oeffnungsverhältnisse abzugrenzen, deren Zahlenwerte leicht zu übersehen sind. Keutner gibt als untere Grenze 0,1 und als obere 0,55 an. Keutner benutzt  $h_e$  im Ausdruck für das Oeffnungsverhältnis. Für kleinere und mittlere Oeffnungsverhältnisse kann jedoch auch  $h/s$  mit einem etwas niedrigeren Wert anstelle 0,55 benutzt werden.

$h/L$  ist durch die obere Grenze  $h/s$  und die einschränkende Bedingung  $L/s \geq 2$  zu ersetzen. Danach genügt es, ein breitkroniges Wehr im Sinn einer Norm durch eine rein geometrische Beziehung  $L/s$ , eine strömungstechnische Kenngrösse  $h/s$  und durch die Reynoldszahl (anstelle der unteren Grenze für  $h/s$ ) zu definieren. Die geometrischen Ausmasse der Konstruktion sollten also an erster Stelle stehen.

Zu den Wehren langer Bauart gehören auch Venturikanäle [1], [9], [11], [19], [22], [29] (Bild 3c). Diese zeichnen sich durch hohe Messgenauigkeit aus. Weiter ist die Verbauung des Kanalquerschnittes gering, weshalb der Stau des Oberwasserspiegels für einen gegebenen Höchstwert des Abflusses im Vergleich mit den breitkronigen Wehren oder den Ueberfallwehren wesentlich niedriger ist.

Sir Claude Inglis [19] hatte schon 1928 Richtlinien für bevorzugte Abmessungen von Venturikanälen gegeben. Um eine bestimmte und konstante Abflusszahl zu erhalten, forderte er, dass die Länge des engsten Querschnitts zweieinhalbmal die grösste Höhe des Oberwassers betragen sollte. Unter diesen Verhältnissen liegen die Abflusszahlen zwischen 0,96 und 0,99, je nach der Weite des engsten Querschnitts. Die Abflusszahl 0,96 bezieht sich auf einen Venturikanal mit



einem engsten Querschnitt von 150 mm, die Zahl 0,99 für einen solchen von 3000 mm. Jedem Querschnitt ist also eine bestimmte Abflusszahl zuzuordnen. Die niedrigen Werte der Abflusszahlen sind wahrscheinlich auf eine Grenzschicht oder «Verdrängungsschicht» zurückzuführen.

Mit Ausnahme einiger Versuchsreihen des Verfassers [8], [9] (1932) sind die meisten neueren Untersuchungen an Venturikanälen mit unzureichender Länge des engsten Querschnitts durchgeführt worden. Bei zu kurzer Länge wird, ähnlich wie bei breitkronigen Wehren kurzer Bauart, die kritische Tiefe beim Venturikanal im divergenten Auslauf erreicht. Die Abflusszahl wird alsdann stark verändert und steigt mit zunehmender Abflussmenge steil an. Beispiele für Venturikanäle kurzer Bauart und solche mit einer Bodenschwelle wurden in einer eingehenden Abhandlung von E. Blau [1] behandelt.

#### 4. Einheitliche Abflussgleichungen für scharfkantige Ueberfallwehre und Wehre langer Bauart

Vom Normenstandpunkt aus spielen einheitliche Abflussgleichungen eine wichtige Rolle. Jedes Vereinheitlichen liegt ja von vornherein im Sinn der Normung. Für die wichtigsten Bauarten soll nachfolgend die Zahl der zu berücksichtigenden Gleichungen dadurch verringert werden, dass diese auf einen Hauptansatz zurückgeführt werden. Die wenigen noch erforderlichen Beiwerte lassen sich alsdann sinngemäss erklären und einordnen. Ausserdem wird durch diese Gleichungen bei den in Zukunft noch durchzuführenden Forschungsarbeiten das Hauptaugenmerk auf bestimmte Einflussgrössen gerichtet. Bisher war es meist üblich, die verschiedensten Einflüsse ohne Unterschied in einem einzigen Beiwert zusammenzufassen. Da oft wesentliche Angaben in den Versuchsberichten fehlen, ist es heute leider meist unmöglich, wertvolles Versuchsmaterial nach neueren Gesichtspunkten auszuwerten.

Ein weiterer Vorteil einheitlicher Wehrgleichungen liegt darin, dass sie die Auswahl der am besten geeigneten Wehrtypen erleichtern (s. Stainsby und Engel [37]). Der durch die Verbauung des freien Querschnitts des Wasserstromes hervorgerufene Stau kann für alle Wehrtypen auf den des Venturikanals zurückgeführt werden, der verhältnismässig einfach zu berechnen ist.

Tabelle 3. Beiwerte der einheitlichen Abflussgleichungen

Oeffnungs- verhältnis <sup>1)</sup>	Kontrakt.- zahl	Zulauf- geschw. beiwert <sup>2)</sup>	Geschw.- beiwert f. Ueberfall- wehr	Geschw.- beiwert be- zogen auf $b_2/b_1 = 0$
	$C_k$	$C_v$	$C_v C_k \sqrt{3}$	$\frac{C_v C_k \sqrt{3}}{1,0583}$
I	II	III	IV	V
0	0,611	1,0	1,0583	1,0
0,1	0,612	1,0022	1,0623	1,0038
0,2	0,616	1,0092	1,0765	1,017
0,3	0,622	1,0209	1,0999	1,039
0,4	0,631	1,0387	1,1355	1,073
0,5	0,644	1,0636	1,1886	1,123
0,6	0,662	1,0979	1,2589	1,190
0,7	0,687	1,1466	1,3648	1,290
0,8	0,722	1,2188	1,5244	1,440
0,9	0,781	1,3401	1,8126	1,713
1	1	1,8372	3,182	3,01

1) Für breitkronige und Ueberfallwehre ohne Seitenkontraktion ist das Oeffnungsverhältnis ein Höhenverhältnis, d. h.  $h/(h+s)$ , mit  $s$  = Höhe des höchsten Punktes der Wehrkrone über der Kanalsohle. Für Venturikanäle ist das Oeffnungsverhältnis ein Breitenverhältnis, d. h.  $b_2/b_1$ . Für Venturiwehre mit Bodenschwelle oder breitkronige Wehre mit Seiteneinschnürung ist das Oeffnungsverhältnis durch folgenden Ausdruck gegeben  $\frac{h}{h+s} \cdot \frac{b_2}{b_1}$ .

2) Der Jameson-Beiwert, s. Tabelle 2, berechnet sich aus Spalte III wie folgt:  $x^{3/2} = (\frac{2}{3})^{3/2} C_v$ .

Die einheitlichen Abflussgleichungen nach Engel und Stainsby [12], [13], [14], [15] in Tabelle 2 stützen sich im wesentlichen auf die Gleichung nach A. H. Jameson, in welcher die Zulaufgeschwindigkeit durch einen getrennten Beiwert erfasst wird. Für rechteckigen Kanalquerschnitt im Oberwasser und rechteckigen engsten Querschnitt für Venturikanäle ohne Bodenschwelle ist die Abflussgleichung in Tabelle 2 angegeben. Für verschiedene Oeffnungsverhältnisse können die Zulaufgeschwindigkeitsbeiwerte  $C_v$  der Tabelle 3 entnommen werden. Die eben erwähnte Gleichung ist ein Sonderfall eines ebenfalls von Jameson vorgeschlagenen allgemeineren Ansatzes, der für beliebige Gestalt des Zulaufkanals und des engsten Querschnitts gilt. Die Gleichungen in den Arbeiten [10], [11] sind jedoch recht verwickelt, und es muss auf die Originalarbeit [22] verwiesen werden.

Jameson hatte bei seiner Ableitung das Extremalprinzip herangezogen, aber nur Wehre langer Bauart behandelt. Auf Grund der Arbeiten von Jaeger [21] haben Engel und Stainsby die Gedankengänge von Jameson auch auf scharfkantige Ueberfallwehre ausgedehnt. Der Verfasser [10] hatte schon 1935 darauf hingewiesen, dass die Abflussgleichung für Ueberfallwehre sich nicht in einem Arbeitsgang rein mathematisch ableiten lässt. Dies liegt daran, dass mit einfachen mathematischen Ansätzen die massgebliche Kontraktionszahl nicht genau berechnet werden kann<sup>1)</sup>. Die mathematischen Methoden, die zum Ermitteln der Kontraktionszahl und des Beiwertes für die Zulaufgeschwindigkeit herangezogen werden müssen, sind grundsätzlich verschiedenen.

Die einheitlichen Wehrabflussgleichungen für scharfkantige Ueberfallwehre und breitkronige Wehre, in denen die Kontraktionszahlen eine wesentliche Rolle spielen, sind analog der Gleichung für Venturikanäle aufgebaut. Dies ist eine Uebereinkunft, für die ein mathematischer Beweis fehlt.

Die drei einheitlichen Wehrgleichungen sind in Tabelle 2 angegeben. Wie ersichtlich, ist der Ausdruck

$$(2/3)^{3/2} C_v \sqrt{g} b_1 h_1^{3/2}$$

allen drei Gleichungen gemeinsam, wobei in der Gleichung für den Venturikanal  $b_2$  anstatt  $b_1$  gesetzt wird. Das ist notwendig, da Seitenkontraktion vorliegt. Ausserdem ist auf Grund einer weiteren Uebereinkunft in die Gleichung für das Ueberfallwehr der Zahlenfaktor  $\sqrt{3}$  eingeführt worden, um in den drei Gleichungen denselben Zahlenwert  $(2/3)^{3/2}$  zu erhalten.

Zu beachten ist, dass die Kontraktionszahl  $C_k$ , wie bereits erwähnt, vom Oeffnungsverhältnis abhängig ist, s. Tabelle 3. Dort ist in einer weiteren Spalte der Gesamtbeiwert für Ueberfallwehre aufgenommen, um einen Vergleich mit den Beiwerten zu erleichtern, die in den bisher üblichen Gleichungen für Ueberfallwehre ohne Seitenkontraktion benutzt wurden (Bild 9).

Der Beiwert für breitkronige Wehre nach Tabelle 2 ist entsprechend einem Vorschlag von G. W. Hall [17] entwickelt worden. Engel und Stainsby [15] haben diesen Ansatz für zwei Beispiele überprüft. Die berechneten Abflusszahlen stimmen sehr gut mit den Versuchsergebnissen von Bazin und Bretschneider überein. Ob der im Aufbau etwas komplizierte Beiwert allgemein gültig ist, kann nur durch weitere Untersuchungen entschieden werden.

In den drei einheitlichen Wehrgleichungen nach Engel und Stainsby [14] ist ausser den einzelnen bereits besproche-

1) M. Réthy [33] hatte bereits 1894 die Abhängigkeit der Kontraktionszahl vom Oeffnungsverhältnis berechnet. Erstaunlicherweise werden jedoch in den meisten Veröffentlichungen nur die Ableitung der Kontraktionszahl nach von Mises [30] erwähnt. Diese beiden Verfasser benutzten konforme Abbildungen. Ueber den gesamten Bereich der Oeffnungsverhältnisse kamen sie zu denselben Zahlenwerten. Elementare Ansätze nach J. Hermanek [16], L. A. Ott [31] und A. Koch [28] führten zu unterschiedlichen Ergebnissen. Die Zahlenwerte nach Hermanek sind zu gross [14]. Das Verfahren von Koch ist nicht für den gesamten Bereich der Oeffnungsverhältnisse anwendbar. Nur für das Oeffnungsverhältnis Null ergibt sich der richtige Wert der Kontraktionszahl 0,611.



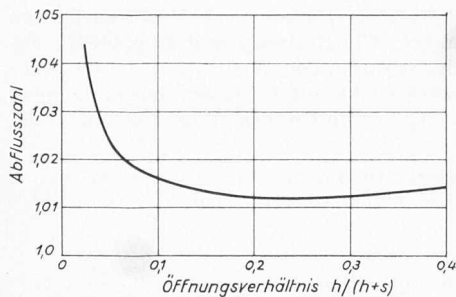


Bild 8. Abflusszahl  $C$  für scharfkantige Ueberfallwehre ohne Seitenkontraktion, berechnet aus dem S. I. A.-Beiwert in Abhängigkeit vom Öffnungsverhältnis.

Bild 9. Vorgeschwindigkeitsbeiwerte nach S. I. A. und Bazin, verglichen mit den Beiwerten nach Tabelle 3. Kurve a: Bazin-Beiwert bez. auf  $C_v$ . Kurve b: Bazin-Beiwert. Kurve c: S. I. A.-Beiwert. Die Beiwerte der Kurven b und c sind auf den  $C_v C_k \sqrt{3}$ -Beiwert der Tabelle 3, Spalte V bezogen.

nen Beiwerten die Abflusszahl  $C$  enthalten. Sie berücksichtigt strömungstechnische Einflüsse, beispielsweise die Geschwindigkeitsverteilung im Oberwasser, und soll so lange beibehalten werden, als das Turbulenzproblem noch nicht vollständig gelöst ist.

Bei Ueberfallwehren spielt die Oberflächenspannung eine Rolle, wie sie im Beiwert nach Rehbock [32] und auch in dem der S. I. A.-Norm [35] berücksichtigt ist. Diese Beiwerte wurden in den beiden Ansätzen durch Anpassen der Versuchswerte über einen grossen Messbereich ermittelt. Sie enthalten deshalb auch alle strömungstechnischen Einflüsse und können zur Berechnung der Abflusszahl  $C$  herangezogen werden. Multipliziert man z. B. die in der Tabelle S. 15 der S. I. A.-Norm in der zweiten Spalte gegebenen Zahlenwerte mit  $\sqrt{3}$  und dividiert man diese Werte durch den gesamten Beiwert  $C_v C_k \sqrt{3}$  aus Tabelle 3, so erhält man den in Bild 8 dargestellten Kurvenverlauf. Dieser Verlauf entspricht durchaus den  $m'$ -Werten nach Bild 2 bei konstanter Froudezahl.

Für kleine Öffnungsverhältnisse sind Oberflächenspannungs- und gegebenenfalls auch Zähigkeitseinflüsse für den Verlauf der Kurve ausschlaggebend. Für mittlere und grössere Öffnungsverhältnisse ist der Beiwert  $C$  grössenordnungsmässig nahezu gleich 1. Der leichte Anstieg der Kurve für Öffnungsverhältnisse grösser als 0,2 lässt sich durch den Aufbau des Ausdrucks in der S. I. A.-Norm erklären, der die Zulaufgeschwindigkeit berücksichtigt.

In Bild 9 werden die Zulaufgeschwindigkeitsbeiwerte nach Bazin und der S. I. A.-Norm mit dem  $C_v C_k \sqrt{3}$ -Beiwert verglichen, und zwar mit dem bezogenen Beiwert Tabelle 3, Spalte V. Der Ausdruck nach Bazin

$$1 + [0,55 h^2 / (h + s)^2]$$

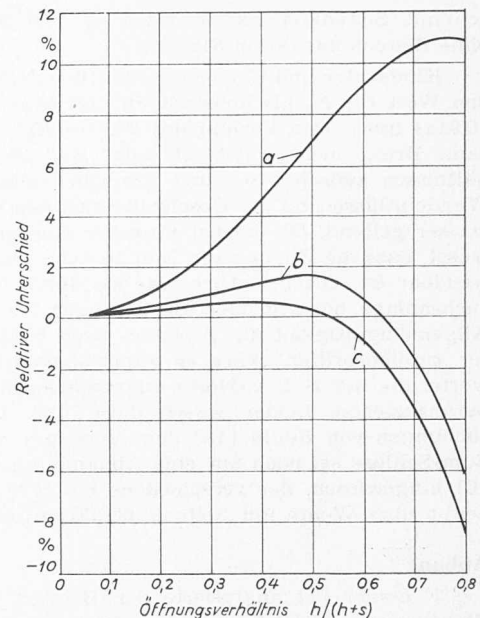
unterscheidet sich etwas von dem S. I. A.-Wert, der lautet

$$1 + [0,5 h^2 / (h + s)^2]$$

Der Unterschied im Zahlenfaktor kommt in den beiden Kurven b und c in Bild 9 zum Ausdruck. Zu beachten ist, dass beide Ansätze auch die Veränderlichkeit der Kontraktionszahl mit dem Öffnungsverhältnis enthalten. Vergleicht man nämlich den Jameson-Ausdruck für die Zulaufgeschwindigkeit  $C_v$ , Tabelle 3, Spalte III, mit dem Ansatz nach Bazin, so zeigt der Verlauf der Kurve a in Bild 9 nahezu die gleiche Veränderlichkeit mit dem Öffnungsverhältnis wie die Kontraktionszahl  $C_k$  nach Tabelle 3, Spalte II.

Ueber einen grossen Bereich der Öffnungsverhältnisse liegen die S. I. A.-Werte günstiger als die nach dem Bazin-Ansatz. Bis zu einem Öffnungsverhältnis von 0,4 erklärt der leichte Anstieg der Kurve c in Bild 9, der durch den Näherungsansatz bedingt ist, den Verlauf der Abflusszahl in Bild 8. Anhand dieser Beispiele sollte gezeigt werden, wie die einheitlichen Wehrgleichungen herangezogen werden können, um die verschiedenen bis heute benutzten Abflussgleichungen kritisch zu bewerten. Die neuen Wehrgleichungen sollen besonders als Ausgangsgleichungen für die weiteren Untersuchungen der Abflussvorgänge an Wehren dienen.

Die einheitlichen Abflussgleichungen lassen sich bis jetzt noch nicht auf Ueberfallwehre mit Seitenkontraktion anwen-



den. Dies liegt z. T. daran, dass Strahlkontraktion sowohl durch die waagerechte Ueberfallkante als auch die beiden Seiteneinschnürungen hervorgerufen wird.

In der S. I. A.-Norm sind Breitenverhältnisse von  $b_2/b_1 = 1$  bis 0,3 angeführt. C. E. Kindsvater und R. W. Carter [26] gehen sogar noch weiter, indem sie den ganzen möglichen Bereich der Seitenkontraktion zwischen 1 und 0 erfassen. Ihre allgemeine Gleichung ist in Tabelle 2 gegeben. Sie führen neben der auch schon von Rehbock [32] vorgeschlagenen wirksamen Ueberfallhöhe auch noch eine «wirksame» Breite ein. Diese beiden Kenngrössen sollen Zähigkeit und Oberflächenspannungseinflüsse mitberücksichtigen. Dadurch soll die Abflusszahl  $C_e$  in der neuen Gleichung unabhängig von Oberflächen- und Zähigkeitseinflüssen werden, ein Kennzeichen, das die beiden Forscher besonders hervorheben. Nach der Ansicht des Verfassers dürfte es jedoch zweckmässig sein, strömungstechnische Einflüsse in der Abflusszahl  $C$  zu erfassen, etwa entsprechend einer Kurve nach Bild 8. In der Praxis ist es wünschenswert, die gemessenen Grössen, insbesondere die Ueberfallhöhe, ohne weitere Korrektur zu benutzen.

Im Bereich, der in den S. I. A.-Normen vorgeschrieben ist, betragen die Unterschiede gegenüber dem Ansatz nach Kindsvater und Carter etwa 2 %. Die S. I. A.-Kurven mit  $b_2/b_1$  als Parameter liegen fast für den ganzen Bereich der  $h/s$ -Werte tiefer als die Abflusszahlen nach Kindsvater und Carter. Für das Ueberfallwehr ohne Seitenkontraktion sind jedoch die S. I. A.-Abflusszahlen grösser. Diese Unterschiede können u. a. darauf zurückgeführt werden, dass die Versuche im Georgia Institute of Technology an Kanälen und Wehren mit zu kleinen Ausmassen durchgeführt wurden. Nur bei zwei Versuchsreihen betrug die Höhe der Wehrkante über der Kanalsohle 440 mm; bei vielen Versuchen lag sie nur bei  $s = 91,6$  mm. Die Kanalbreite bei den Weh-

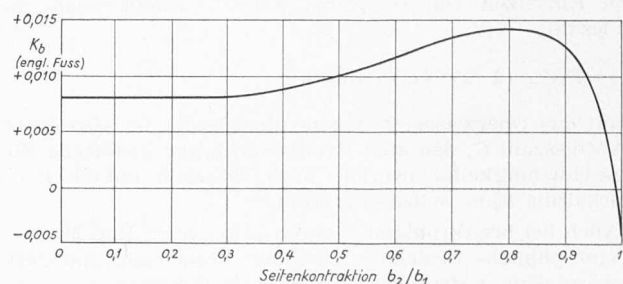


Bild 10. Zusatzglied  $K_b$  (engl. Fuss) zum Berechnen der «wirksamen» Breite des Ueberfallwehres mit Seitenkontraktion abhängig vom Breitenverhältnis  $b_2/b_1$  nach Kindsvater und Carter (Abflussgleichung s. Tabelle 2).



ren mit Seitenkontraktion mass rd. 550 mm, bei Wehren ohne Seitenkontraktion 818 mm.

Kindsvater und Carter nehmen für alle Wehrverhältnisse den Wert für  $K_h$  als konstant an und zwar  $K_h = 0,003$  Fuss (0,9144 mm). Den Verlauf des Wertes  $K_b$ , der für die wirk-same Breite massgeblich ist, zeigt Bild 10. Bei Breitenver-hältnissen zwischen 0,6 und 1 machen sich wahrscheinlich Wandeinflüsse und die Geschwindigkeitsverteilung im Ober-wasser geltend. Die beiden Forscher sind sich durchaus be-wusst, dass die Kurve nach Bild 10 noch nicht allgemein an-wendbar ist. Offensichtlich war sie durch die in ihrer Ver-suchsanlage herrschenden Bedingungen beeinflusst. Um die Allgemeingültigkeit des Ansatzes nach Kindsvater und Car-ter zu überprüfen, wäre es wünschenswert, die Versuchs-werte, die der S. I. A.-Norm zugrundeliegen, zum Vergleich heranzuziehen. Leider waren diese und auch die Unter-suchungen von Hégly [18] dem Verfasser nicht zugänglich. Zum Schluss sei noch auf eine Abhandlung von J. G. Burnell [6] hingewiesen, der verschiedene bis 1929 vorliegende Ar-beiten über Wehre mit Seitenkontraktion untersuchte.

## Anhang

F. Eisner [7] analysierte den Beiwert in der Rehbock-Gleichung für Ueberfallwehre und folgerte, dass die Abfluss-zahl im wesentlichen durch die Froudezahl gekennzeichnet ist. Seine vor 30 Jahren entwickelten Gedankengänge stellten mit dieser Erkenntnis einen der wichtigsten Fortschritte der Wehrforschung dar. Damit wird nämlich das scharfkantige Ueberfallwehr mit den Wehren langer Bauart, die durch eine im engsten Querschnitt des Wasserstromes auftretende Froudezahl Eins gekennzeichnet sind, auf gemeinsame Grundlagen zurückgeführt. Eisner ging von einer Gleichung aus, die im Aufbau der Poleni-Weisbach-Gleichung entsprach, und erhielt die in Tabelle 2 angegebene spezifische Froude-zahl  $F_r$ . Auf Grund der einheitlichen Abflussgleichungen lässt sich dieser Ausdruck für die Froudezahlen vereinfachen. Setzt man nämlich für alle Beiwerte  $m$ , so kann die Gleichung aufgestellt werden:

$$Q = m \sqrt{g} b_1 h_1^{3/2}$$

woraus dann die auf das Oberwasser bezogene Froudezahl erhalten wird zu

$$F_r = m \frac{h}{h + s}$$

Bei Venturikanälen ist, entsprechend der anderen Defi-nition des «Öffnungsverhältnisses», das Breitenverhältnis  $b_2/b_1$  (Bild 3c) einzusetzen. Soll der Abfluss für ein gegebenes  $h_1$  einen Höchstwert annehmen, so muss die Froudezahl im engsten Querschnitt  $F_{r2} = u_2 / \sqrt{g h_2}$  gleich 1 sein. Die grösste Abflussmenge beträgt:

$$Q_{max} = (2/3)^{3/2} C C_v \sqrt{g} b_2 h_1^{3/2}$$

Die auf das Oberwasser bezogene Froudezahl ist:

$$F_{r1} = u_1 / \sqrt{g h_1} = \frac{Q_{max}}{b_1 h_1 \sqrt{g h_1}}$$

Durch Einsetzen von  $Q_{max}$  und Kürzen erhält man die Froudezahl:

$$F_{r1} = (2/3)^{3/2} C C_v (b_2 / b_1)$$

Die auf das Oberwasser bezogene Froudezahl ist also durch die Abflusszahl  $C$ , den zum Breitenverhältnis gehörigen Zu-laufgeschwindigkeitsbeiwert  $C_v$  nach Tabelle 3 und das Brei-tenverhältnis  $b_2/b_1$  selbst bestimmt.

Auch bei breittkronigen Wehren [15a] nach Bild 3b lässt sich eine ähnliche Beziehung zwischen Froudezahl und Oeff-nungsverhältnis aufstellen. Diese besteht nur dann, wenn die Zähigkeitseinflüsse oder Einflüsse der Stromfadenkrümmung die Abflusszahl  $C$  nicht beeinflussen. Das selbe gilt für Ven-turikanäle hinsichtlich der Beziehung zwischen Froudezahl und Breitenverhältnis  $b_2/b_1$ .

Die Froudezahl ist bei der Planung von Messwehrbauten ein wichtiges Hilfsmittel. Wie Stainsby und Engel [37] ge-zeigt haben, lässt sich der durch den Wehreinhau verursachte Anstau des Oberwassers leicht mit Froudezahlen berechnen, die auf verschiedene Querschnitte des Wasserstromes be-zogen sind.

Adresse des Verfassers: Dr.-Ing. F. V. A. Engel «Baucis» 8, Seaton Road, Workington, Cumberland, England.

## Literaturverzeichnis

Es sind nur Veröffentlichungen angeführt, die zum Ver-ständnis des vorliegenden Beitrags erforderlich sind. Weitere Hinweise können dem umfassenden Werk von S. Kolupaila entnommen werden: «Bibliography of Hydrometry», Uni-versity of Notre Dame Press, Notre Dame, Indiana, 1961.

- [1] E. Blau: Die modellmässige Untersuchung von Venturikanälen verschiedener Grösse und Form. «Veröffentl. d. Forschungs-anstalt f. Schifffahrt, Wasser- und Grundbau», Nr. 8, Akademie-Verlag, Berlin 1960.
- [2] W. Bleines: Berechnung des Ueberfalls über das scharfkantige Plattenwehr auf Grund des Extremalprinzips. «Die Wasser-wirtschaft», 43 (1953), Heft 4, S. 97—102.
- [3] P. Bravo: Influence of Fluid Properties Related to Thickness of Weir Crest. M. Sc. Diss. Georgia Inst. of Technology, April 1960.
- [4] H. Bretschneider: Abflussvorgänge bei Wehren mit breiter Krone. Ein Beitrag zur Berechnung des Abflusses bei breittkronigen Wehren unter Berücksichtigung der Oberflächenform des Wasserspiegels, der Geschwindigkeits- und Druckverteilung des Wassers über der Wehrkrone. (Dissertation T. U. Berlin) Mitt. Nr. 53 Inst. f. Wasserbau und Wasserwirtschaft, Berlin 1961 (insbesondere S. 72).
- [5] British Standard 599: 1939 Pump Tests. British Standards Institution, London 1939.
- [6] J. G. Burnell: Fully Contracted Weirs. «Journ. of Engineers», Australia, Bd. 1 (Transactions of the Institution, Bd. X) S. 361—369.
- [7] F. Eisner: Ueberfallversuche in verschiedener Modellgrösse. Masstabeinfluss und Auswertungsverfahren. Mitt. Preuss. Vers. Anstalt f. Wasserbau u. Schiffbau, Berlin, Heft 11, Berlin 1933.
- [8] F. V. A. Engel: Non-Uniform Flow of Water; Problems and Phenomena in Open Channels With Side Contractions. «The Engineer» (London), Bd. 155 (1933) S. 392—394, 429—430, 456—457.
- [9] F. V. A. Engel: The Venturi Flume. «The Engineer» (London), Bd. 158 (1934) S. 104—107 und S. 131—133.
- [10] F. Engel: Der heutige Stand der Wehrforschung. «Arch. f. Techn. Messen», ATM-Blatt T 141 — T 144 (Nov. 1935).
- [11] F. Engel: Abflussgleichungen für Venturikanäle. «Deutsche Wasserwirtschaft», Bd. 32 (1937) Nr. 6 S. 110—113.
- [12] F. V. A. Engel and W. Stainsby: Velocity of Approach Factors in Unified Weir Equations. «Proc. Instn. Civ. Engrs.» Bd. 9 (Febr. 1958) S. 165—179. «Diskussion» Bd. 10 (Aug. 1958) S. 580—590.
- [13] F. V. A. Engel and W. Stainsby: Weirs for Flow Measurements in Open Channels. «Water and Water Engineering», Bd. 62 (1958) Nr. 746, S. 142—146; Nr. 747, S. 190—197; Nr. 748, S. 238—243; Nr. 749, S. 291—295; Nr. 750, S. 338—343.
- [14] F. V. A. Engel and W. Stainsby: On the Meaning of Unified Weir Equations Related to Weirs for Measurements of Open Channel Flow. «The Engineer» (London) Bd. 212 (1961) S. 513—520.
- [15] F. V. A. Engel and W. Stainsby: Broad-Crested Weirs. Some Notes on Discharge Coefficients. «The Engineer» (London) Bd. 214 (1962) S. 537—538.
- [15a] F. V. A. Engel and W. Stainsby: Broad-Crested Weirs. Brief an den Herausgeber der Zeitschrift «The Engineer» (London) Bd. 215 (1963) S. 724—725.
- [16] J. Hermanek: Theorie des freien Ausflusses von Flüssigkeiten an Mündungen und Ueberfällen. «Sitzungsber. Akad. Wiss.» Wien, Mathem. Naturw. Klasse Bd. 112 (1903) S. 879—925.
- [17] G. W. Hall: Analytical Determination of the Discharge Charac-teristics of Broad-Crested Weirs Using Boundary Layer Theory. «Proc. Instn. Civ. Engrs.» (London) Bd. 22 (June 1962) S. 177—190.
- [18] V.-M. Hégly: Expériences sur des déversoirs à nappe libre avec contraction latérale. «Annales des Ponts et Chaussées», 91. Jahrgang, 11. Reihe, Bd. 65 (1921) Nr. 6, S. 290—389.

- [19] C. C. Inglis: Notes on Standing Wave Flumes and Flume Meter Falls. Gov. of Bombay, Public Works Department, Techn. Paper Nr. 15, Bombay 1928.
- [20] E. Jacoby: Die Berechnung der Stauhöhe bei Wehren. Kommissions-Verlag Walter u. Rapa, Riga 1931 (insbesondere S. 2).
- [21] C. Jaeger: Technische Hydraulik. Verlag Birkhäuser, Basel 1949.
- [22] A. H. Jameson: The Development of the Venturi Flume. «Water and Water Engineering» Bd. 32 (1930) Nr. 375, S. 105–107.
- [23] A. H. Jameson: Flow Over Sharp-Edged Weirs: Effect of Thickness of Crest. «Journ. Instn. Civ. Engrs.» Bd. 31 (1948/49) S. 36–55. «Diskussion» Bd. 32 Supplement Nr. 8 (1949) S. 525–530.
- [24] C. Keutner: Abfluss-Untersuchungen und -Berechnungen für Ueberfälle an scharfkantigen Wehren (ein Beitrag zur Wassermengenmessung mittels scharfkantiger Wehre). «Mitt. a. d. Gebiete d. Wasserbaus und der Baugrundforschung», Heft 4, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1931.
- [25] C. Keutner: Strömungsvorgänge an breitkronigen Wehrkörpern und an Einlaufbauwerken. «Der Bauingenieur» Bd. 15 (1934) Nr. 37/38, S. 366–371 und Nr. 39/40, S. 389–392.
- [26] C. E. Kindsvater und R. W. Carter: Discharge Characteristics of Rectangular Thin-Plate Weirs. «Trans. ASCE», Bd. 124 (1959) Abhandl. Nr. 3001, S. 772–801. Diskussionsbeiträge S. 802–822.
- [27] F. H. Knapp: Ausfluss, Ueberfall und Durchfluss im Wasserbau. Eine angewandte Hydraulik auf physikalischer Grundlage. Verlag G. Braun, Karlsruhe 1960 (s. S. 218–220).
- [28] A. Koch: Von der Bewegung des Wassers und den dabei auftretenden Kräften. Herausgegeben von M. Carstanjen, Verlag Julius Springer, Berlin 1926.
- [29] G. de Marchi, F. Contessini und V. Calderini: Dispositivi per la misura della portata dei canali con minime perdite di quota. Sonderdruck des Istituto di idraulica e costruzioni idrauliche. Techn. Hochschule Mailand, Sonderdrucke Nr. 17, 25 u. 26 (1937).
- [30] R. von Mises: Berechnung von Ausfluss und Ueberfallzahlen. «Z. VDI.» Bd. 61 (1917) Nr. 21, S. 447–452; Nr. 22, S. 469–474 und Nr. 23, S. 493–498.
- [31] L. A. Ott: Ausfluss, Durchfluss und Ueberfall. «Wasserkraft und Wasserwirtschaft» Bd. 27 (1932), Heft 18, S. 205–210.
- [32] T. Rehbock: Wassermessung mit scharfkantigen Ueberfallwehren. «Z. VDI.» Bd. 73 (1929) Nr. 24, S. 817–823.
- [33] M. Réthy: Strahlformen incompressibler reibungsloser Flüssigkeiten. «Math. Annalen» Bd. 46 (1895) S. 249–272.
- [34] L. Schiller und F. Eisner: Strömungslehre der Rohre und offenen Gerinne auf experimenteller Grundlage. (Abdruck aus dem IV. Band, Teil 4 des Handbuchs der Experimentalphysik). Akademische Verlags-Gesellschaft, Leipzig 1932 (insbesondere S. 389 und 393).
- [35] S. I. A. Technische Norm Nr. 109 (1924). Normen für Wassermengenmessungen bei Durchführung von Abnahmeversuchen an Wasserkraftmaschinen. Generalsekretariat d. S. I. A., Zürich 1924.
- [36] Société hydrotechnique de France: Code d'essais No 5. Mesure des débits par déversoirs, réservoirs étalonnés, écran mobile, écran salé (Allen), appareils déprimogènes. 2. Aufl., Paris 1954.
- [37] W. Stainsby and F. V. A. Engel: A Comparison of Backwater Effects due to the Various Types of Weirs. Ann. Bull. 1961, International Commission on Irrigation and Drainage. New Delhi (India), 1961, S. 11–19.
- [38] H. J. Tracy: Discharge Characteristics of Broad-Crested Weirs. «Geological Survey Circular» 397, Washington 1957.
- [39] VDI-Wassermengenmessregeln: Regeln für Wassermengenmessungen bei Abnahme von Wasserkraftmaschinen. VDI-Verlag, Berlin 1936.
- [40] J. Weisbach: Lehrbuch der theoretischen Mechanik. 5. Aufl. Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig 1875 (insbes. S. 957; S. 976; S. 981 und S. 992).

## Die Spannungs- und Dehnungsverhältnisse bei Beton

DK 539.31:666.97

Von Dr. Heinrich Brandenberger, Ing., Zürich

Zunächst sei festgestellt, dass die Deformation von Beton nicht allein durch die Längsdehnung beim Längszug festgelegt ist. Nicht nur, dass beim Längszug eine Querkontraktion nach der Poissonschen Zahl auftritt, sondern es sind auch plastische Verformungen bei einer Ueberbeanspruchung vorhanden. Nach Zurücklegung kleiner bleibender Verformungen tritt auch bei Beton wie bei Metallen eine Erhöhung der Elastizitätsgrenze ein. Bild 1 zeigt nach H. Rüsch [1] dieses Verhalten bei Beton, wobei  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_5$  das elastische Verhalten nach einem Elastizitätsmodul anzeigt, während  $\alpha_4$  das plastische Verhalten darstellt, das nach einem Plastizitätsmodul verläuft. Daraus geht hervor, dass die bleibenden Verformungen nicht nach dem  $E$ -Modul, sondern ebenso wie bei Metallen nach einem Plastizitätsmodul vor

sich gehen, während das elastische Verhalten, wie noch gezeigt werden soll, von der erhöhten Elastizitätsgrenze nach einem bestimmbar elastizitätsmodul stattfindet.

Auf Bild 2 sind gemessene Verformungen für verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten nach Glanville [2] aufgezeichnet. Daraus ist zu ersehen, dass der Fließwiderstand auch beim festen Material, wie bei einer Flüssigkeit, mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit steigt.

Auf Bild 3 ist eine verzögert-elastische oder -anelastische Verformung nach H. Rüsch [1] dargestellt. Die anelastische Verformung ist dabei auch in einem Zeitraum von einem Monat noch nicht beendet.

Mit Hilfe der bisherigen Elastizitätstheorie, welche nach dem Hookeschen Gesetz äussere Spannungen gleich innere Spannungen setzt, war es nicht möglich, weder die Querkontraktion beim Längszug zu erklären, noch innere Span-

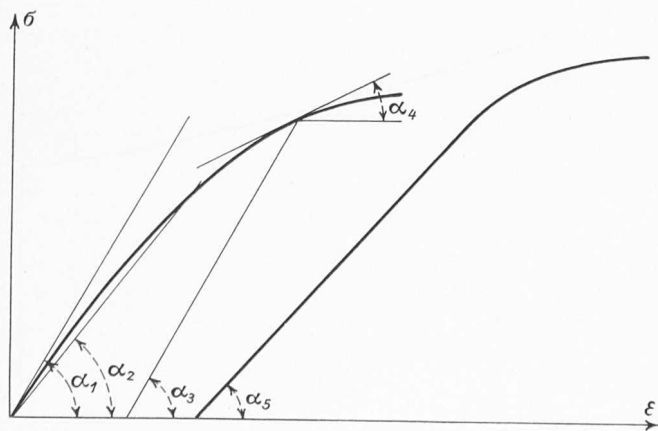


Bild 1. Die verschiedenen Definitionen des  $E$ -Moduls (nach H. Rüsch)

Bild 2 (rechts). Versuch zur Bestimmung des wahren  $E$ -Moduls durch Extrapolation der für verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten gemessenen Verformungen (nach Glanville)

