

## HYDRAULIK VON ABFLUSSMESSBAUWERKEN

Helmut Kobus

## INHALT

1. Die Aufgabe von Abflußmeßbauwerken
  2. Einflußgrößen und Definition der Abflußgleichungen
    - 2.1 Spezifischer Abfluß an Kontrollbauwerken
    - 2.2 Gesamtabfluß an Kontrollbauwerken
    - 2.3 Bauwerke unter Rückstau
    - 2.4 Unverbaute Meßquerschnitte
  3. Hydraulische Typisierung von Abflußmeßbauwerken
  4. Wehre
  5. Gerinne
  6. Sonstige Bauwerke
- Literaturhinweise

## 1. DIE AUFGABE VON ABFLUSSMESSBAUWERKEN

Als Basisdaten für die Planung wasserbaulicher und wasserwirtschaftlicher Maßnahmen sind möglichst genaue und zuverlässige Abflußdaten erforderlich. Diese werden überwiegend aus Wasserstandsmessungen an Pegelanlagen ermittelt und dann anhand der "Abflußkurve" in Angaben über den jeweiligen Durchfluß umgesetzt. Von den in der Bundesrepublik Deutschland betriebenen rund 3800 Pegelmeßstellen werden ca. 60 Prozent regelmäßig zur Durchflußbestimmung herangezogen /9/. Diese Meßstellen sind von ihrer hydraulischen Wirkungsweise her höchst unterschiedlicher Art, wie im folgenden gezeigt wird.

Abflußmeßbauwerke dienen primär dem Zweck, an einem Querschnitt des Gewässers eine eindeutige, zeitlich konstante Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluß herzustellen, so daß aus einer einfachen Wasserstandsmessung der jeweilige Abfluß ermittelt werden kann. Solche Meßbauwerke müssen einer Vielzahl von Anforderungen gerecht werden. Den hy-

draulischen Anforderungen für den Meßbereich steht die Forderung nach Begrenzung der Aufstaueffekte im Hochwasserfall gegenüber. Aus landschaftsgestalterischen Erwägungen sollten sich Meßbauwerke möglichst unauffällig in den Gewässerverlauf einfügen, und auch aus wirtschaftlichen Gründen sind möglichst einfache, wartungsarme Bauwerke zu bevorzugen. Darüber hinaus müssen die Belange der Ökologie, des Fischereiwesens und des Wassersports berücksichtigt werden und in die Gestaltung des Meßbauwerks mit einbezogen werden.

An natürlichen Fließgewässern kann man je nach Abfluß prinzipiell drei Bereiche unterscheiden:

- Niedrigwasserabflußbereich (NQ): Hier ist die Feststellung einer eindeutigen Abflußkurve häufig dadurch erschwert, daß bei niedrigen Wasserständen zufällige Veränderungen der Gewässersohle durch Anlandungs- oder Erosionserscheinungen oder Verkrautungseffekte zu erheblichen zeitlichen Veränderungen dieser Beziehung führen können. Außerdem ist es in diesem Bereich aufgrund unzureichender Wassertiefen oft schwierig, ausreichend genaue Flügelmessungen zur Abflußbestimmung durchzuführen.
- Mittelwasserabflußbereich (MQ): In diesem Bereich werden in der Regel die meisten Naturmeßdaten gewonnen; Flügelmessungen erlauben eine vergleichsweise genaue Abflußbestimmung.
- Hochwasserabflußbereich (HQ): Hier treten in der Praxis oft enorme Schwierigkeiten auf, die in vielen Fällen eine brauchbare Abflußbestimmung mit erträglichem Aufwand erschweren oder gar unmöglich machen. Für den Hochwasserbereich ist es daher in der Regel erforderlich, durch geeignete Überlegungen von den MW-Daten auf die HW-Verhältnisse zu extrapolieren. Hierbei müssen die meist spärlichen HW-Meßdaten durch entsprechende eingrenzende hydraulische Überlegungen ergänzt und abgesichert werden.

Die Abflußmessung in Kanälen und Kanalisationen hat gegenüber dem natürlichen Gewässer den Vorteil, daß hier auf

eine vorgegebene Regelgeometrie des Querschnitts zurückgegriffen werden kann, und daß die Variationsbreite der zu messenden Abflüsse in der Regel eher überschaubar ist. In künstlichen Gerinnesystemen für Brauchwasser, Kühlwasser oder Abwasser ist es meist auch einfacher, ein Meßbauwerk hydraulisch richtig in das Gesamtsystem einzugliedern und einzubauen.

Ziel der vorliegenden Ausführungen ist es, die hydraulische Funktion von Meßbauwerken in zusammenfassender und systematischer Form darzustellen. Hierbei beschränken sich die nachfolgenden Ausführungen auf die grundlegenden hydromechanischen Zusammenhänge, auf die in den weiteren Referaten dieses Lehrgangs Bezug genommen wird.

Für die weiteren Betrachtungen unterscheiden wir prinzipiell drei Typen von Meßstellen:

- (M1) Meßstellen an Kontrollbauwerken (Wehranlagen, etc.). Stauanlagen werden zwar in der Regel nicht eigens zum Zwecke der Abflußbestimmung errichtet, doch bieten andererseits solche flußbaulich erforderliche Kontrollbauwerke eine hydraulisch hervorragende Möglichkeit zur Abflußmessung. Durch das Staubaauwerk ist gewährleistet, daß bei allen Abflüssen bis zum Maximalabfluß der Wasserstand vom Kontrollbauwerk bestimmt wird und damit die Abflußkurve eindeutig definiert werden kann. Diese wird in erster Linie von der Geometrie des Kontrollbauwerks bestimmt und erst sekundär mit von den Anströmverhältnissen oberhalb des Bauwerks beeinflusst.
- (M2) Meßstellen mit Einbauten (Sohlenschwellen, seitliche Begrenzung, etc.). Diese Anlagen erzielen im Niedrigwasserbereich eine eindeutige Abflußbeziehung, da bei niedrigen Abflüssen die Einbauten eine Abflußkontrolle ausüben. Bei mittleren Abflüssen wird die Kontrolle jedoch eingestaut, und im Hochwasserbereich wird der Einfluß der Einbauten auf das Abflußgeschehen vernachlässigbar klein. Anlagen dieser Art finden für

Abflußmeßstellen vorwiegend Anwendung. Jegliche Verbauung des Fließquerschnitts bringt zwangsläufig einen Aufstau- und Rückstauereffekt oberhalb des Bauwerks mit sich, der zwar bei NW-Abflüssen in Kauf genommen werden kann, doch im Hochwasserfall höchst unerwünscht ist. In Bild 1 ist der typische Verlauf der Wasserstands-Abflußkurve in einem Gewässerquerschnitt dargestellt. Während an einem Kontrollbauwerk (M1) im gesamten Abflußspektrum der Wasserstand eindeutig bauwerkskontrolliert ist, läßt sich im Fall einer Meßanlage mit Einbauten ein Meßbereich bei niedrigen Abflüssen identifizieren, bei denen das Bauwerk eine Kontrolle darstellt. Bei größeren Abflüssen machen sich Rückstauereffekte am Meßbauwerk bemerkbar, so daß jetzt der Wasserstand nicht nur vom Bauwerk, sondern auch von den Reibungsverhältnissen unterhalb der Meßstelle abhängig ist. Mit steigendem Abfluß verlieren die örtlichen Einbauten zunehmend an Bedeutung, bis schließlich bei sehr hohen Abflüssen und Wasserständen die örtliche Störung zufolge der Einbauten vernachlässigbar klein wird, so daß die Einbauten sozusagen nur noch als ein Element der Wandrauheit des Gerinnes wirksam sind.

- (M3) Meßstellen im unverbauten Fließquerschnitt. Die Mehrzahl der Pegelmeßstellen an natürlichen Gewässern weist keinerlei Einbauten zur Einengung des Fließquerschnitts auf. Solche Anlagen erzeugen nach oberstrom keinen zusätzlichen Aufstau. Andererseits ergeben sich gerade hier im Niedrigwasserbereich (NQ) oft Probleme mit der Aufstellung einer eindeutigen Abflußkurve. Die Wasserstands-Abflußbeziehung an solchen Meßstellen wird ausschließlich von den Querschnitts- und Reibungsverhältnissen im Bereich der Meßstelle und unterstrom davon bestimmt. Hierzu sei auf die entsprechenden Ausführungen über die Abflußverhältnisse in natürlichen Gerinnen im Referat 1 verwiesen.

## 2. EINFLUSSGRÖSSEN UND DEFINITION DER ABFLUSSGLEICHUNGEN

### 2.1 Spezifischer Abfluß an Kontrollbauwerken

Der Zusammenhang zwischen Wassertiefe und Abfluß an einem Kontrollbauwerk wird bestimmt von der Geometrie des Bauwerks, den Fluideigenschaften sowie der Art der Anströmung des Bauwerks. Den weiteren Betrachtungen werden die in Bild 2 festgelegten Definitionen zugrunde gelegt.

Betrachtungen zum Abflußverhalten an Kontrollbauwerken gehen zunächst stets von einer Betrachtung des spezifischen Abflusses  $q$  ( $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ ) pro Breitereinheit aus: Dies setzt gedanklich voraus, daß der Fließquerschnitt im Anströmbereich und im Bauwerksbereich beidseitig durch senkrechte, parallele Wände begrenzt ist. Für eine solche zweidimensionale Betrachtung läßt sich der spezifische Abfluß in Abhängigkeit von folgenden Einflußgrößen darstellen:

$$q = f(h_1; \frac{w_0}{y_0}; \rho; g; \eta; \sigma; \text{Bauwerksform}) \quad (1)$$

Eine Dimensionsanalyse /2/ dieser Einflußgrößen liefert folgende dimensionslose Beziehung:

$$\mu \equiv \frac{q}{\frac{2}{3} \sqrt{2g} h_1^{3/2}} = f\left(\frac{h_1}{w_0}; \text{Re} \equiv \frac{q}{\eta/\rho}; \text{We} \equiv \frac{q/h_1}{\sqrt{\sigma/\rho h_1}}; \text{Geometrie; Anströmung}\right) \quad (2)$$

Der auf der linken Seite erscheinende dimensionslose Parameter zur Beschreibung des spezifischen Abflusses wird als Abflußbeiwert definiert, der gemäß DIN 4044 mit  $\mu$  bezeichnet wird.

Die strömungsmechanischen Kennzahlen, Reynoldszahl und Weberzahl, charakterisieren den Einfluß von Zähigkeit und Oberflächenspannung auf den Abflußvorgang. Dieser Einfluß ist bei großen Abflüssen und großen Bauwerksabmessungen stets vernachlässigbar, kann jedoch bei kleinen Bauwerken und insbesondere bei Modelluntersuchungen im Labormaßstab von Bedeutung sein. Als Erfahrungswert gilt, daß Ober-

flächenspannungseffekte (Weberzahl) dann vernachlässigt werden können, wenn die Überfallhöhe mehr als 3 bis 5 cm beträgt. Hinsichtlich der Zähigkeitseffekte läßt sich eine solche allgemeine Grenze nicht definieren. Es läßt sich jedoch erwarten, daß an scharfkantigen Bauwerken die Strömung früher vollturbulent und unabhängig von der Reynoldszahl wird als an breittkronigen und rundkronigen Wehren, an denen die jeweilige Grenzschichtentwicklung ein zähigkeits- und damit Re-abhängiges Phänomen ist /6/.

Eine eindimensionale Analyse mit den im Referat 1 dargestellten Gleichungen liefert alternativ für den spezifischen Abfluß

$$q = \frac{2}{3} c_q \sqrt{2g} H_1^{3/2} \quad (3)$$

Dieser Beziehung, in welche die Geschwindigkeitshöhe der Anströmung und somit die Energiehöhe eingeht, steht die ursprünglich von Poleni aufgestellte, einfachere Abflußgleichung auf der Basis der Wassertiefe gegenüber. Die Abflußgleichung nach Poleni lautet in Übereinstimmung mit Gleichung (2)

$$q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} h_1^{3/2} \quad (4)$$

Ein Vergleich der beiden Beiwerte  $c_q$  und  $\mu$  in den Gleichungen (3) und (4) zeigt, daß diese im allgemeinen Fall nicht identisch sind. Lediglich in solchen Fällen, in denen die Geschwindigkeitshöhe im Anströmbereich sehr viel kleiner ist als die Überfallhöhe ( $v_0^2/2g \ll h_1$ ), werden diese beiden Beiwerte identisch.

## 2.2 Gesamtabfluß an Kontrollbauwerken

Zur Ermittlung des Gesamtabflusses an einem Kontrollbauwerk muß nun der jeweilige spezifische Abfluß mit der effektiven Breite  $b_1'$  des Kontrollquerschnitts multipliziert werden. Für ein Bauwerk mit horizontaler Krone erhält man somit die Abflußgleichungen

$$Q = b_1' q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} h_1^{3/2} b_1' \quad (5)$$

oder

$$Q = b_1' q = \frac{2}{3} c_q \sqrt{2g} H_1^{3/2} b_1' \quad (6)$$

In diesen Abflußbeziehungen sind  $\mu$  und  $c_q$  nach wie vor die "zweidimensionalen" Abflußbeiwerte für den Abfluß pro Breitereinheit. Dreidimensionale Randeinflüsse auf den Abfluß wie beispielsweise seitliche Einschnürungen oder Stromablösungen zufolge Flügelmauern oder Pfeilern (siehe Bild 3 und 8) müssen behelfsweise dadurch berücksichtigt werden, daß die in den Gleichungen (5) und (6) angesetzte effektive Breite  $b_1'$  um ein entsprechendes Maß gegenüber der lichten Weite  $b_1$  des Kontrollquerschnitts reduziert wird:

$$b_1' = b_1 - c_b h_1 \quad ; \quad c_b = f(\text{Zulaufgeometrie}) \quad (7)$$

Das Konzept der effektiven Breite  $b_1'$  ist für eine genaue Abflußermittlung unbefriedigend. Statt dessen ist es sinnvoll, "dreidimensionale" Gesamtbeiwerte  $\bar{\mu}$  und  $C_Q$  zu definieren und die Abflußgleichungen auf die tatsächliche lichte Weite  $b_1$  zu beziehen:

$$Q = \frac{2}{3} \bar{\mu} \sqrt{2gh_1} \cdot (h_1 \cdot b_1) = \frac{2}{3} \bar{\mu} \sqrt{2gh_1} \cdot A_1 \quad (8)$$

$$Q = \frac{2}{3} c_Q \sqrt{2gH_1} \cdot (H_1 \cdot b_1) \quad (9)$$

Diese Gesamtbeiwerte eröffnen nun auch die Möglichkeit, Abflußbeziehungen für Kontrollquerschnitte anzugeben, die keine durchgehend horizontale Krone aufweisen. Wenn man in Gleichung (8) jeweils für  $A_1$  die durchflossene Kontrollquerschnittsfläche als Funktion von  $h_1$  einsetzt, dann erhält man für beliebige Querschnittsformen Abflußbeziehungen der Art, wie sie in Bild 4 für einige gebräuchliche Geometrien angegeben sind.

Die hier definierten Gesamtbeiwerte hängen von folgenden Einflußgrößen ab:

$$\bar{\mu}; c_Q = f_{1,2} \left( \frac{h_1}{w_0}; \text{Geometrische Form; Anströmung; (Re; We)} \right) \quad (10)$$

Im allgemeinen werden diese Beiwerte in Abhängigkeit von der relativen Anströmhöhe ( $h_1/w_0$ ) dargestellt. Die geometrische Form des Kontrollbauwerks einschließlich des Zuströmbereichs ist in der Regel fixiert; hingegen können die Anströmverhältnisse in der Natur erheblichen Störeinflüssen ausgesetzt sein und hierdurch zu Änderungen der Beiwerte führen.

### 2.3 Bauwerke unter Rückstau

Die überwiegende Mehrzahl von Abflußmeßstellen enthält Einbauten, die lediglich im Niedrigwasserbereich eine Abflußkontrolle ausüben. Mit größer werdendem Abfluß werden diese Einbauten jedoch vom Unterwasser her eingestaut und verlieren allmählich ihre Kontrollfunktion (siehe Bild 5). Die unterstrom des Bauwerks auftretende Wassertiefe wird vom Gerinne unterhalb des Bauwerks geprägt: Sofern das Bauwerk nicht im Rückstau eines Staubauberks liegt, wird sich aufgrund der Querschnitts- und Reibungsverhältnisse die jeweilige strömende Normalabflußtiefe einstellen.

Für ein gegebenes Bauwerk ist zunächst die Rückstaugrenze von Interesse, von der an die Abflußbeziehung vom Unterwasser mit beeinflußt wird. Diese Grenze ist je nach Bauwerkstyp unterschiedlich. Für belüftete scharfkantige Wehre zeigt sich bereits ein Rückstauereffekt, wenn der Unterwasserstand sich der Höhe der Wehrschneide nähert. Für rundkronige und breitkronige Wehre hingegen kann der Unterwasserstand deutlich über die Höhe der Wehrkrone ansteigen, wobei für horizontale Wehre als erster grober Anhalt dienen kann

$$h_2 \approx 0,5 h_1 \quad (11)$$

Wenn Rückstau auftritt, dann hat dies zur Folge, daß bei einem gegebenen Durchfluß der Wasserstand oberhalb des Bauwerks ansteigt gegenüber dem rückstaufreien Fall. Andererseits bedeutet dies, daß bei gleichem Oberwasserstand der Abfluß unter Rückstau abgemindert ist gegenüber dem rückstaufreien Abfluß. Dieser Effekt kann in der Abflußgleichung pauschal berücksichtigt werden durch einen sogenannten Rückstaubeiwert  $c_R$ . Die Abflußgleichungen lauten somit



$$Q = \frac{2}{3} c_R \bar{u} \sqrt{2g} h_1^{3/2} b_1 \quad (12)$$

$$Q = \frac{2}{3} c_R c_Q \sqrt{2g} H_1^{3/2} b_1 \quad (13)$$

Der Rückstaubeiwert  $c_R$  ist primär abhängig von der relativen Unterwassertiefe:

$$c_R = f\left(\frac{h_2}{w_0}\right) \text{ bzw. } c_R = f\left(\frac{h_2}{h_1}\right) \quad (14)$$

Für Unterwasserstände unterhalb der Rückstaugrenze wird der Rückstaubeiwert ( $c_R = 1$ ); die Abflußbeziehungen sind in diesem Fall identisch mit den Gleichungen (8) und (9). Mit zunehmender relativer Unterwasserhöhe nimmt der Rückstaubeiwert stetig kleiner werdende Zahlenwerte an und strebt schließlich gegen Null.

Es sei darauf hingewiesen, daß das Konzept der Rückstaubeiwerte bei geringfügigem Rückstau und mäßigem Einfluß auf das Abflußgeschehen noch plausible Ergebnisse liefert; hingegen ist die Anwendung dieses Konzepts dann nicht mehr sinnvoll, wenn das Bauwerk stark eingestaut wird und die Überstauhöhen  $h_1$  und  $h_2$  sehr viel größer werden als die Wehrhöhe  $w_0$ .

In Bild 5 ist das Ergebnis von Modellversuchen an Sohlenschwellen dargestellt, welches den zunehmenden Einfluß eines Rückstaus auf das Oberwasser illustriert. Für einen konstant gehaltenen Abfluß im Gerinne wurde der Unterwasserstand sukzessive erhöht. Die Versuchsergebnisse zeigen deutlich zunächst den Bereich des vollkommenen Überfalls, in dem das Bauwerk als Kontrolle wirkt und der Oberwasserstand unabhängig vom Unterwasserstand ist. Im Rückstaubereich zeigt sich dann mit zunehmendem Unterwasserstand auch eine entsprechende Erhöhung des Oberwasserstands. Alle Experimente nähern sich bei sehr großen Wassertiefen asymptotisch dem Grenzfall, daß Unterwasser- und Oberwasser-

stand gleich groß werden. Dieser Grenzfall bedeutet, daß am Bauwerk keine nennenswerte Wasserspiegeldifferenz mehr zu beobachten ist. In diesem Bereich wird die Wasserstands-Abflußbeziehung in erster Linie von den Reibungsverhältnissen im betrachteten Flußabschnitt bestimmt; das Bauwerk selbst wirkt allenfalls noch als örtliche Störung (siehe Bild 5).

#### 2.4 Unverbaute Meßquerschnitte

An Meßstellen ohne jegliche Querschnittsverbauung, wie sie an Pegelanlagen häufig anzutreffen sind, wird keinerlei Abflußkontrolle ausgeübt. An solchen Meßstellen wird die Wasserstands-Abflußkurve bestimmt durch die örtlichen Querschnitts-, Gefälle- und Rauheitsverhältnisse im Bereich der Meßstelle und unterstrom davon. Wie im ersten Referat näher ausgeführt wurde, können hier Einflüsse von Verkrautung, Anlandungs- und Erosionserscheinungen etc. zu starken Veränderungen der Wasserstands-Abflußkurve führen.

### 3. HYDRAULISCHE TYPISIERUNG VON ABFLUSSMESSBAUWERKEN

Eine Abflußkontrolle kann einerseits durch entsprechende Anhebung der Gerinnesohle und andererseits durch entsprechende seitliche Einengung der Gerinnewandung erzielt werden. Bild 6 gibt einen schematisierten Überblick über die Grundelemente von Kontrollbauwerken. Hierbei werden Anhebungen der Gerinnesohle als Wehre bezeichnet, wobei man unterscheidet:

- breitkronige Wehre, die einen horizontal verlaufenden Wehrrücken haben, der breit genug ist, daß sich ein Kontrollbereich mit parallelen Stromlinien unter Grenzabflußbedingungen einstellen kann;
- scharfkantige Wehre, die einen gekrümmten Überfall erzeugen, der sich an der Unterseite von der Wehrschneide ablöst;
- rundkronige Wehre, die mit einer Ausrundung und einem schräg abfallenden Wehrrücken versehen sind, auf dem der Überfallstrahl (schießender Abfluß) geführt wird.

Ganz analog hierzu lassen sich seitliche Querschnittsveränderungen klassifizieren in:

- lange Kontraktionsgerinne, deren Einschnürungsquerschnitt genügend lange parallele Wände aufweist, um parallele Stromlinien unter Grenzabflußbedingungen zu erzeugen;
- scharfkantige Blenden, an denen sich die Strömung strahlförmig ablöst;
- ausgerundete Kontrollgerinne mit entsprechender Führung der Strömung unterhalb des Kontrollquerschnitts.

Diese hydromechanischen Kategorien erlauben eine grobe Klassifizierung von Kontrollbauwerken zur Abflußmessung (Bild 6). In der Regel stellen Meßbauwerke eine Mischung verschiedener Komponenten dar, die sich nach den spezifischen Gegebenheiten des Meßorts sowie nach der Größenordnung des abzudeckenden Meßbereichs richtet. In grober Näherung kann der jeweilige Einsatzbereich so charakterisiert werden, daß für kleinere Abflüsse scharfkantige Wehre, Blenden und Kontraktionsgerinne zum Einsatz gelangen, während für mittlere und größere Abflüsse breitkronige und rundkronige Wehre verwendet werden.

Für die einzelnen Typen von Abflußmeßbauwerken interessieren folgende Größen:

- Abflußgleichung für rückstaufreie Verhältnisse,
- Bereich der Abflußbeiwerte,
- Rückstaugrenze und Rückstaueffekte,
- erforderliche Aufstauhöhe  $\Delta h$ .

Diese Größen hängen natürlich in starkem Maße von der jeweiligen Bauwerksgeometrie ab; im einzelnen werden sie in den nachfolgenden Referaten behandelt. An dieser Stelle sei lediglich zur Groborientierung ein Gesamtrahmen abgesteckt, der insbesondere im Planungsstadium von Interesse ist, wenn verschiedene Bauwerksarten alternativ in Erwägung gezogen werden.

## 4. WEHRE

Als elementarste Wehrform kommt ein breitkroniger, rechteckiger Wehrquerschnitt mit horizontalem Wehrrücken zur Ausführung, dessen oberstromseitige Stirnwand stromlinienförmig ausgerundet ist (Bild 7). Anhand einer eindimensionalen verlustfreien Berechnung der Strömung erhält man die in Bild 7 angegebene Abflußgleichung. Diese entspricht der Gleichung (9) mit einem theoretischen Abflußbeiwert von

$$c_Q = \sqrt{1/3} \quad (15)$$

Voraussetzung für die hydraulische Funktion im gewünschten Sinne ist, daß die Wehrlänge ausreichend groß gewählt wird ( $L \geq (1,5 \div 2) H_{1\max}$ ). Zufolge der Zähigkeitsbedingten Ausbildung einer Grenzschicht auf der Wehrschwelle wird der tatsächliche Abflußbeiwert gegenüber dem rechnerischen Wert mit zunehmender relativer Wehrlänge ( $L/H_1$ ) noch (um einstellige Prozentzahlen) abgemindert /5/.

Für kleinere Abflüsse kommen häufig scharfkantige Wehre zum Einsatz, an denen sich die Strömung an der scharfen Wehrkante ablöst und als freier Überfall in das Unterwasser eintritt (Bild 8). Hierbei ist für einen wohldefinierten und schwankungsfreien Abfluß unabdingbar, daß der Raum unter dem Überfallstrahl belüftet wird, so daß dort immer Atmosphärendruck herrscht. Für den Fall einer Wehrplatte mit horizontaler Schneide über die gesamte Breite eines Rechteckgerinnes gilt die klassische Abflußgleichung von Poleni (Gleichung 4 bzw. 5). Der übliche Bereich von Wehr- und Überfallhöhen liegt bei

$$\begin{aligned} 3 \text{ cm} < h_1 < 80 \text{ cm} \\ 0 < h_1/w_0 < 0,5 \text{ bis } 0,8 \end{aligned} \quad (16)$$

Für diesen Bereich läßt sich der Abflußbeiwert in guter Näherung als lineare Funktion der relativen Überfallhöhe ( $h_1/w_0$ ) darstellen (Bild 8):

$$\mu = 0,611 + 0,075 (h_1/w_0) \quad (17)$$

Das scharfkantige Wehr erlaubt die genauesten Abflußmessungen, da von allen Bauwerkstypen hier die Strömung am eindeutigsten definiert ist. Aus diesem Grund werden scharfkantige Wehre seit mehr als 60 Jahren zur Abflußmessung in Wasserbaulichen Versuchsanstalten und in der Natur herangezogen. Der Abflußbeiwert ist daher aus unzähligen Messungen sehr genau bekannt. Aus konstruktiven Gründen ist der Einsatz dieses Wehrtyps jedoch auf vergleichsweise kleine Abflüsse und Überstauhöhen beschränkt.

Bei größeren Abflüssen und Überstauhöhen kommen rundkronige Wehre zur Ausführung, bei denen für den jeweiligen Ausbauabfluß die Ausrundung zum schräg abfallenden Wehrrücken so ausgebildet wird, daß entlang des Wehrrückens überall Atmosphärendruck herrscht (Bild 9). Dies wird dadurch erreicht, daß der Wehrrücken der Form der Unterkante des überfallenden Freistrahls beim scharfkantigen Wehr angepaßt wird.

Zu einer vorgegebenen Wehrform gibt es jeweils nur einen Abfluß, bei dem der Wehrrücken Atmosphärendruck aufweist. Für diesen jeweiligen Bemessungsabfluß können für horizontale Wehre in Rechteckgerinnen die Abflußgleichungen (4) bzw. (5) herangezogen werden, wobei für mäßige relative Ausbauüberfallhöhen ( $h_{1a}/w_0$ ) wiederum in guter Näherung eine lineare Beziehung für den Ausbau-Abflußbeiwert angegeben werden kann:

$$\mu = 0,76 + 0,115 \cdot \frac{h_{1a}}{w_0} \quad \text{für } (0 < h_1/w_0 < 3) \quad (18)$$

Bei Abflüssen, die den Bemessungsabfluß übersteigen, tritt an der Wehrkrone Unterdruck auf, wobei sich gleichzeitig der Abflußbeiwert erhöht (Bild 9); bei niedrigen Abflüssen herrscht an der Wehrkrone ein Überdruck, wobei der Abflußbeiwert entsprechend abgemindert wird.

Meßwehre werden in der Regel senkrecht zur Flußachse angeordnet, da in diesem Fall die Strömungsbedingungen eindeutig definiert sind. In Flüssen und Kanälen existieren jedoch häufig auch seitlich oder schräg angeströmte Streichwehre

verschiedenartigster Grundrißanordnung, die ebenfalls als Kontrollbauwerke wirken und deshalb grundsätzlich auch für eine Abflußmessung in Frage kommen. Die Strömungsverhältnisse sind hier jedoch wegen des Anströmwinkels und wegen des stets vorhandenen Quergefälles im Kontrollquerschnitt kompliziert. Deshalb wird man ein Meßbauwerk nicht als Streichwehr konzipieren. Andererseits können existierende Streichwehre oft mit Vorteil auch zur Abflußmessung mit herangezogen werden.

## 5. GERINNE

Als "lange" Kontraktionsgerinne werden solche Bauwerke bezeichnet, die einen Mittelabschnitt mit parallelen Wänden und parallelen Stromlinien aufweisen. Für diesen parallelen Mittelabschnitt sollte eine ausreichende Länge  $L$  gewählt werden ( $L \geq (1 \div 2) H_{1\max}$ ). Für einen Rechteckquerschnitt mit Seitenkontraktion mit ausgerundetem Einlauf bei horizontaler Sohle ergibt eine eindimensionale verlustfreie Berechnung (analog zum breitkronigen Wehr) die Abflußgleichung (9) mit einem theoretischen Abflußbeiwert von ( $c_Q = \sqrt{1/3}$ ). Hierbei ist zu beachten, daß die in Gleichung (9) einzusetzende Breite  $b_1$  diejenige im Kontrollquerschnitt ist. Zufolge Zähigkeitseinflüssen (Grenzschichtentwicklung) werden die tatsächlichen Abflußbeiwerte  $c_Q$  gegenüber dem Rechenwert geringfügig abgemindert (wenige Prozent).

"Kurze" Kontraktionsgerinne weisen entweder ausgerundete Formen oder scharfkantige Formen auf. In diese Klasse gehören zahlreiche Meßgerinne mit den unterschiedlichsten geometrischen Formen und Bezeichnungen - so unter anderem Venturigerinne, Khafagigerinne, Parshall flume, cut throat flume, H-flume, etc. Einige geometrische Formen von Kontraktionsgerinnen sind in Bild 10 aufskizziert. Die Abflußbeiwerte von kurzen Kontraktionsgerinnen sind abhängig von der Geometrie des Kontrollquerschnitts und variieren außerdem mit der Wassertiefe der Anströmung.

## 6. SONSTIGE BAUWERKE

Neben den gebräuchlichen Abflußmeßbauwerken kommen in seltenen Fällen auch andere Bauwerksformen für eine Abflußmessung in Frage. Hier sind zu nennen:

- scharfkantige seitliche Blenden (werden jedoch meist nur in Kombination mit scharfkantigen Wehren eingesetzt);
- Ausflußöffnungen in einer Stauwand unterhalb der Wasseroberfläche ("orifices");
- einfacher Absturz ("brink depth method");
- freier Ausfluß aus einem horizontalen Rohr ("California pipe method");
- Schaufelrad- und Propellermeßgeräte.

Darüber hinaus gibt es unzählige Sonderformen von Meßbauwerken mit den verschiedenartigsten Bezeichnungen, oftmals in Kombination mit einer Abflußregulierung. Für nähere Erläuterungen und einen Überblick über alle diese Sonderformen sei auf /3/ verwiesen.

Schließlich eignen sich alle beweglichen Verschlüsse, die der Abflußregulierung dienen, auch zur Abflußmessung. Dies gilt nicht nur für überströmte Klappenwehre, sondern auch für unterströmte Rollen-, Gleit- oder Segmentschütze, insbesondere wenn diese rückstaufrei gefahren werden. In diesem Fall ist für ein gegebenes Bauwerk der Abfluß durch den Oberwasserstand und die Stellung des Verschlussorgans eindeutig bestimmt; im rückgestauten Fall muß zusätzlich auch noch der Unterwasserstand mit erfaßt werden. Die Abflußbeiwerte für solche Verschlüsse lassen sich in vielen Fällen anhand vorliegender Erfahrungswerte näherungsweise angeben; im Bedarfsfall können sie durch Modellversuche oder durch geeignete Kalibriermessungen vor Ort genauer bestimmt werden.

## LITERATURHINWEISE

- /1/ Knapp, F.H.: "Ausfluß, Überfall und Durchfluß im Wasserbau", Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1960.
- /2/ Kobus, H.: "Anwendung der Dimensionsanalyse in der experimentellen Forschung des Bauingenieurwesens", Die Bautechnik, Heft 3, 1974.
- /3/ Bos, M.G., Editor: "Discharge Measurement Structures", Delft Hydraulics Laboratory, publication No 161, 1976.
- /4/ Hanisch, H., Grimm-Strele, J., und Faig, H., et.al.: "Naturmessungen im Wasserbau - Möglichkeiten und Grenzen neuer Meßverfahren", DVWK-Mitteilungsheft Nr. 38, 1977.
- /5/ Ackers, P., et.al.: "Weirs and Flumes for Flow Measurement", John Wiley and Sons, New York, 1978.
- /6/ Kobus, H., et.al.: "Wasserbauliches Versuchswesen", DVWK-Mitteilungsheft Nr. 39, 1978.
- /7/ Herschy, R.W., Editor: "Hydrometry, Principles and Practices", John Wiley and Sons, London 1978.
- /8/ Müller, P., und Kobus, H.: "Hydraulische Entwurfs- und Bemessungskriterien für Sohlschwellen", Wasserwirtschaft, Heft 10, 1981.
- /9/ Rother, K.H.: "Probleme bei Unterhaltung und Ausbau von Meßnetzen", 14. Fortbildungslehrgang Hydrologie, DVWK, 1982.
- /10/ Kobus, H.: "Meßwehre und Meßgerinne", 14. Fortbildungslehrgang Hydrologie, DVWK, 1982.



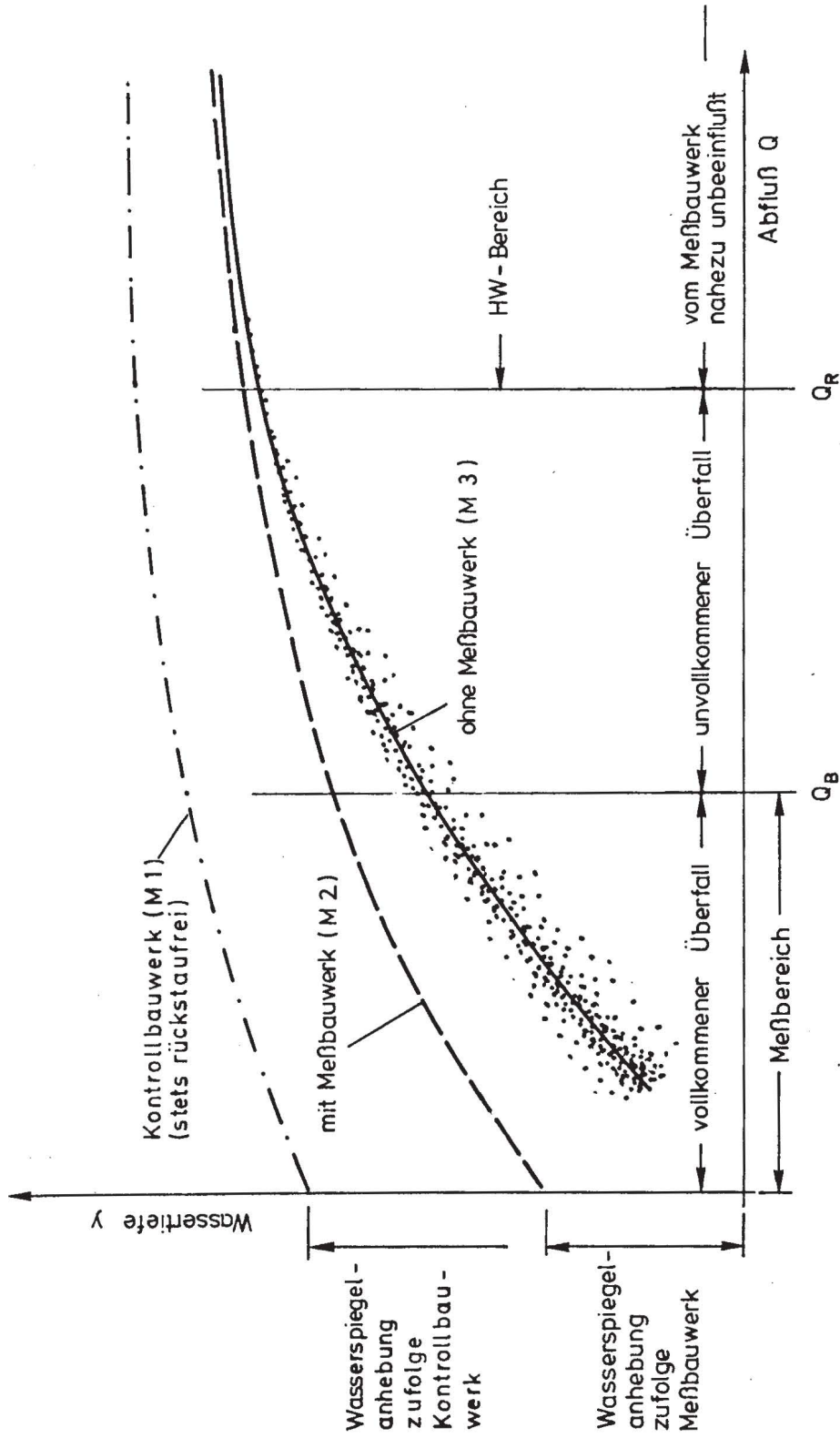
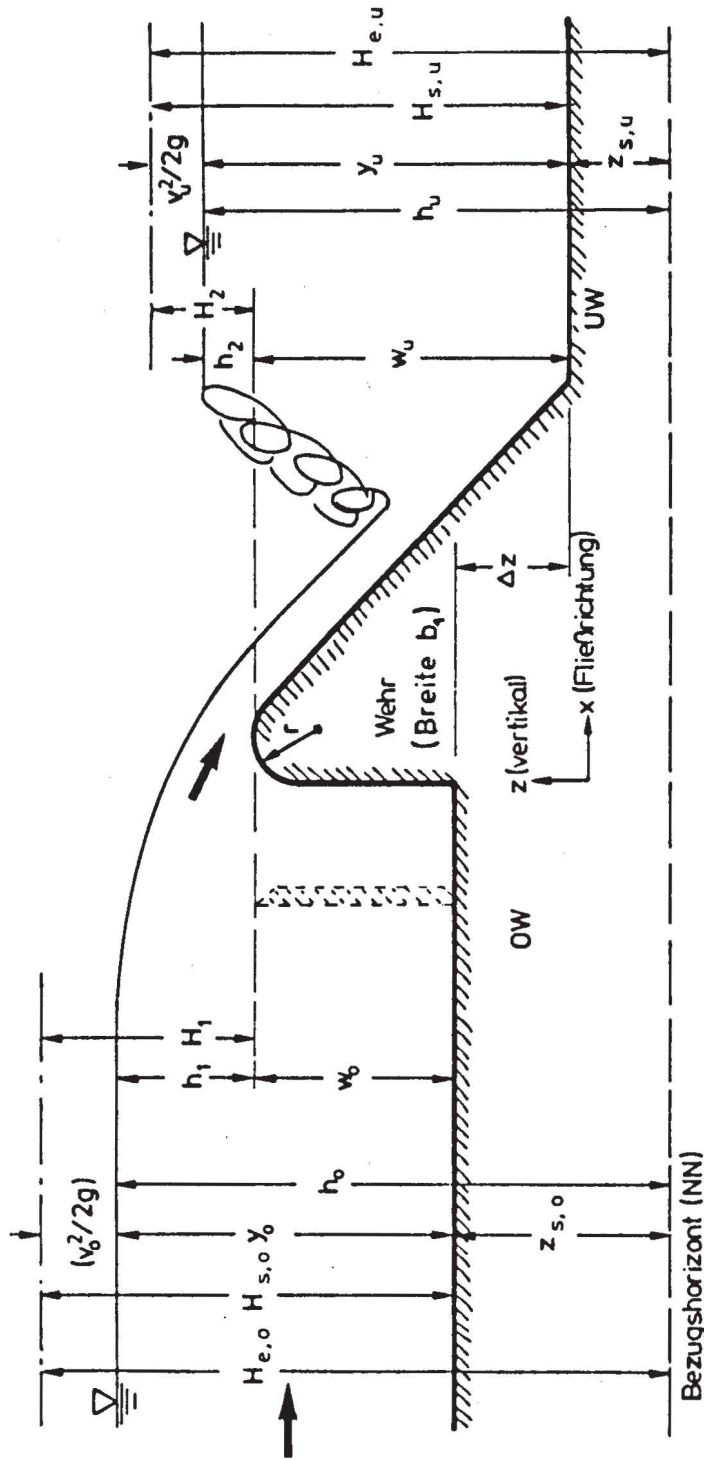
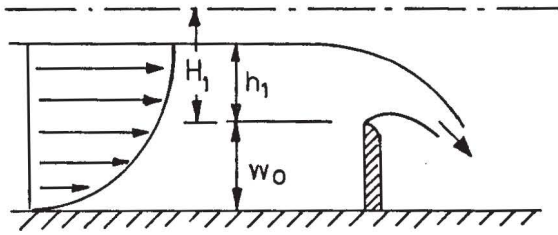


Bild 1: Wasserstands-Abflußbeziehung



In Abweichung von DIN 4044 werden Wassertiefen mit  $y$  bezeichnet, zur Unterscheidung von der Piezometerhöhe  $h$ .

**Bild 2:** Definitionsskizze für Kontrollbauwerke

Betrachtung pro Breitereinheit:

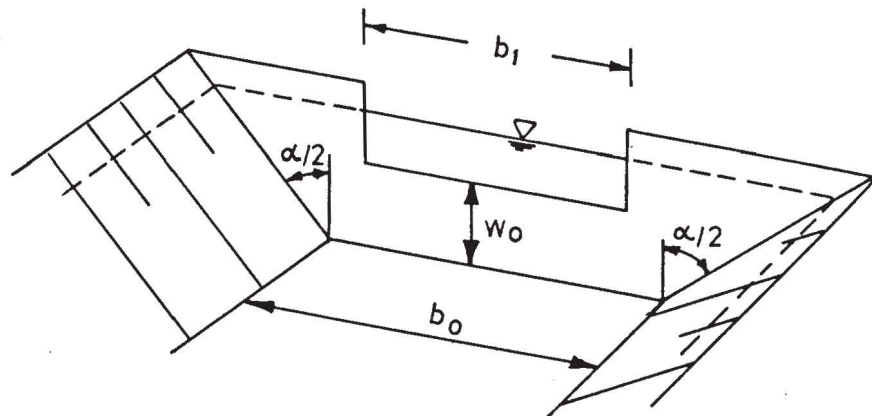
$$\text{Reynoldszahl } Re \equiv \frac{q}{\eta/\rho}$$

$$\text{Weberzahl } We \equiv \frac{q/h_1}{\sqrt{\sigma/\rho h_1}}$$

GWK = Geometrie der Wehrkrone

$$q \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}} \right] = f \left( \frac{h_1}{H_1}; w_0; \rho; g; \eta; \sigma; \text{GWK}; \text{Geschwindigkeitsprofil} \right)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu [-] &\equiv \frac{q}{(2/3)\sqrt{2gh_1} h_1} \\ c_q [-] &\equiv \frac{q}{(2/3)\sqrt{2gH_1} H_1} \end{aligned} \right\} = f_{1,2} \left( \frac{h_1}{w_0}; Re; We; \text{GWK}; \text{Anströmung} \right)$$

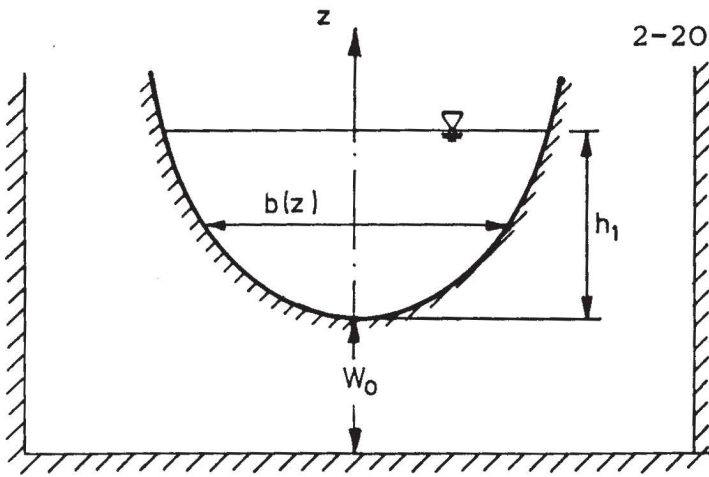
Gesamtabfluß:

$$Q = f \left( \frac{h_1}{H_1}; w_0; b_1; b_0; \alpha; \rho; g; \eta; \sigma; \text{GWK}; \text{Anströmung} \right)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\mu} &= \frac{Q}{(2/3)\sqrt{2gh_1} b_1 h_1} \\ c_Q &= \frac{Q}{(2/3)\sqrt{2gH_1} b_1 H_1} \end{aligned} \right\} = f_{1,2} \left( \frac{h_1}{w_0}; \frac{b_1}{w_0}; \frac{b_0}{w_0}; \alpha; Re; We; \right)$$

GWK; Anströmung )

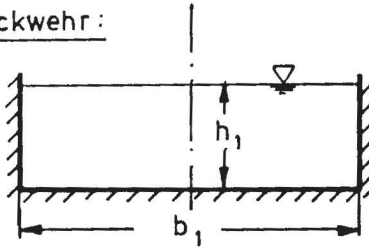
Bild 3: Einflußgrößen der Abflußbeziehung



Eindim. Analyse [3] liefert

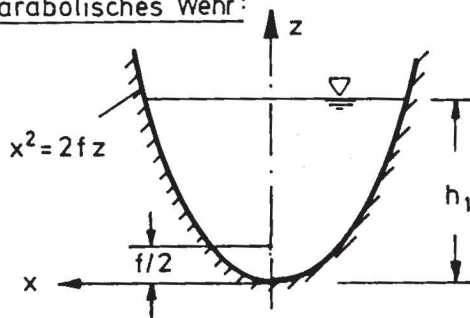
$$Q = \bar{\mu} \cdot \sqrt{2g} \int_0^{h_1} b(z) (h_1 - z)^{1/2} dz$$

Rechteckwehr:



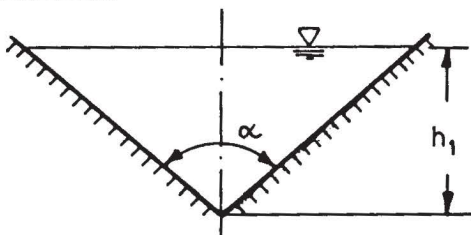
$$Q = \bar{\mu} \cdot (2/3) \sqrt{2g} b_1 h_1^{3/2}$$

Parabolisches Wehr:



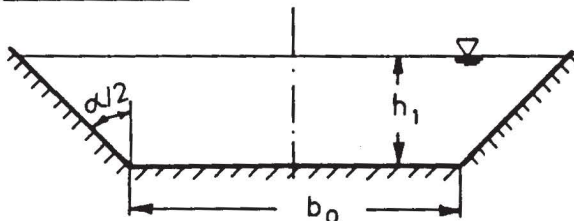
$$Q = \bar{\mu} \cdot (\pi/2) \sqrt{fg} h_1^2$$

Dreieckswehr:



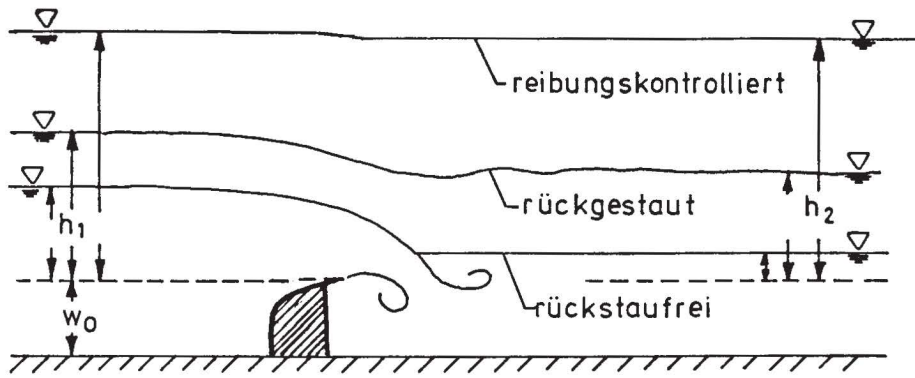
$$Q = \bar{\mu} \cdot (8/15) \sqrt{2g} \cdot \tan(\alpha/2) \cdot h_1^{5/2}$$

Trapezwehr:

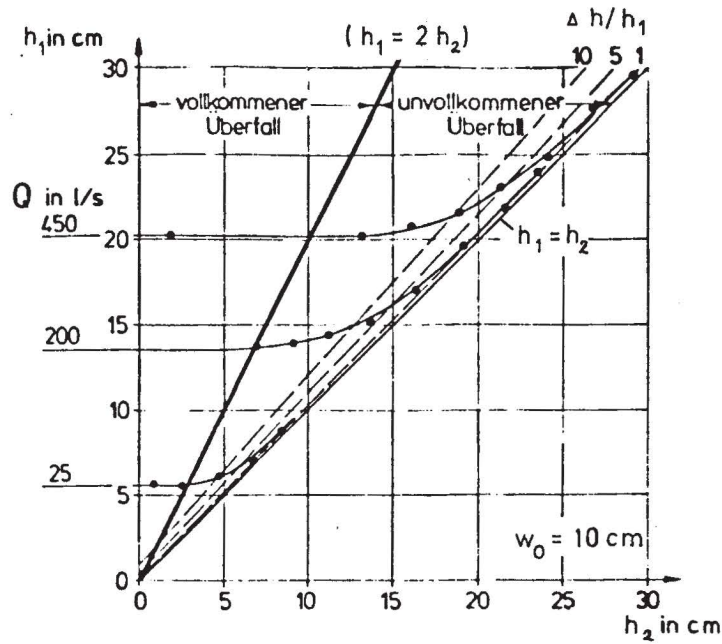


$$Q = \bar{\mu} (2/3) \sqrt{2g} [b_0 + (4/5) h_1 \tan(\alpha/2)] h_1^{3/2}$$

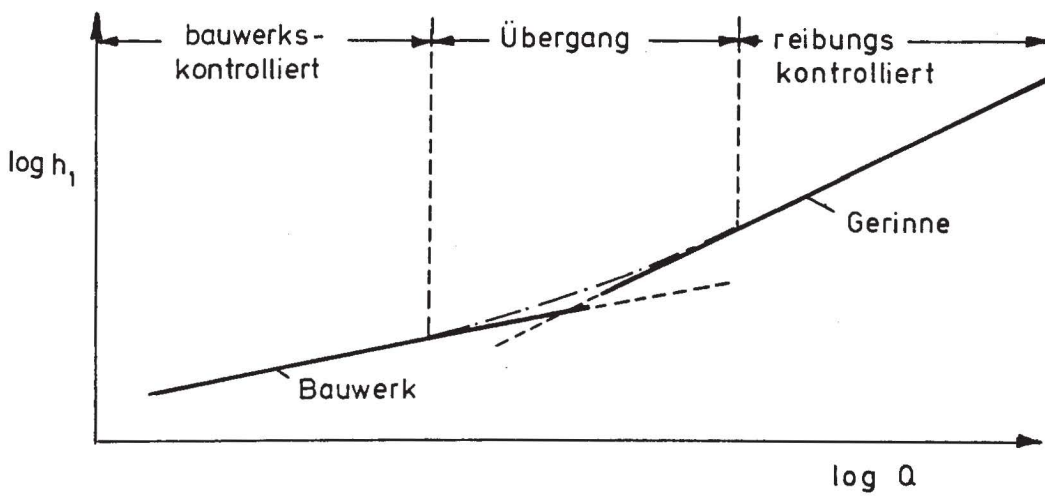
Bild 4 : Querschnittsformen und Abflußbeziehungen für scharfkantige, belüftete Wehre nach [3]



Das Strömungsbild an einer Sohlenschwelle



Ober- und Unterwasserstände bei gegebenen Durchflüssen



Abflußcharakteristik von Sohlenschwellen

Bild 5 : Abflußverhältnisse bei Rückstau

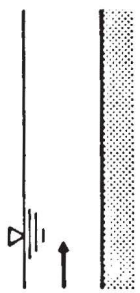
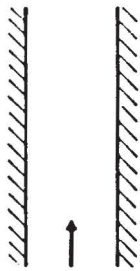
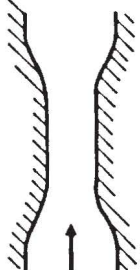
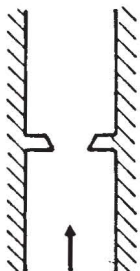
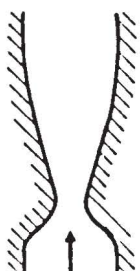
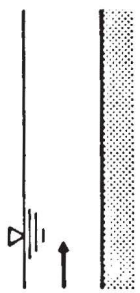
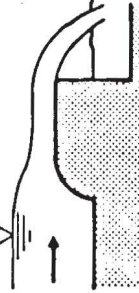
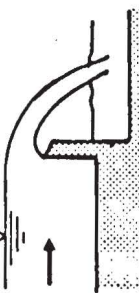


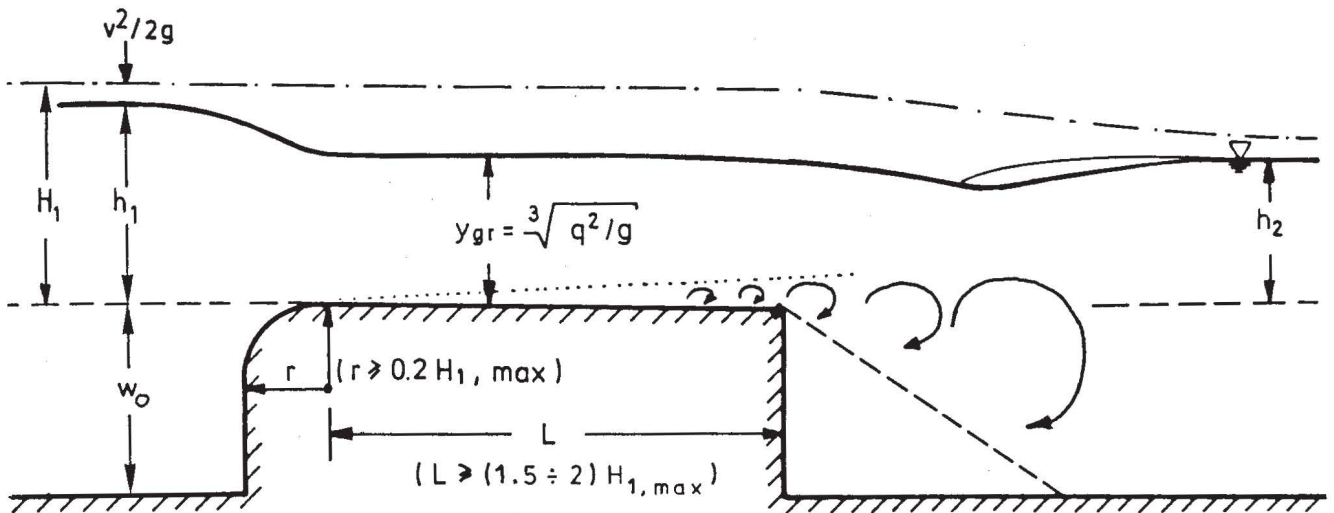
<p>Grundriß</p> <p>Längsschnitt</p>  <p>Durchgehende Sohle</p>	 <p>Konstante Breite</p>	 <p>Langes Kontraktionsgerinne mit konstantem Querschnitt</p>	 <p>Scharfkantige Blende</p>	 <p>Kurze Gerinnekontraktion (Venturi)</p>
 <p>Durchgehende Sohle</p>	<p>Sohlschwellen</p>	<p>Kontraktionsgerinne mit horizontaler Sohle</p>	<p>(Denkbar)</p>	<p>Venturigerinne</p>
 <p>Breitkronig</p>	<p>Sohlschwellen</p>	<p>Kontraktionsgerinne mit Sohlenanhebung</p>	<p>Sohlschwellen</p>	<p>Venturigerinne mit Sohlenanhebung</p>
 <p>Scharfkantig</p>	<p>Meßwehre</p>	<p>(Denkbar)</p>	<p>Gegliederte Meßwehre</p> 	<p>(Denkbar)</p>
 <p>Rundkronig</p>	<p>Typische Flußwehre</p>	<p>(Denkbar)</p>	<p>(Denkbar)</p>	<p>(Denkbar)</p>

Bild 6: Kontrollbauwerke zur Abflußmessung



Theoretische Abflußgleichung (verlustfrei):

$$Q = (2/3) \sqrt{(2/3)g} b_1 H_1^{3/2} \quad \rightarrow \quad c_{Q, \text{theor}} = \sqrt{1/3}$$

Ansatz Gleichung (9):

$$Q = (2/3) c_Q \sqrt{2g} b_1 H_1^{3/2}$$

Wegen Grenzschichtentwicklung ist  $c_Q < c_{Q, \text{theor}}$ .

Abminderung je nach Länge  $L$  bis auf 90% bei  $(L/H_1 = 10)$  [51]

Rückstaugrenze [51]:

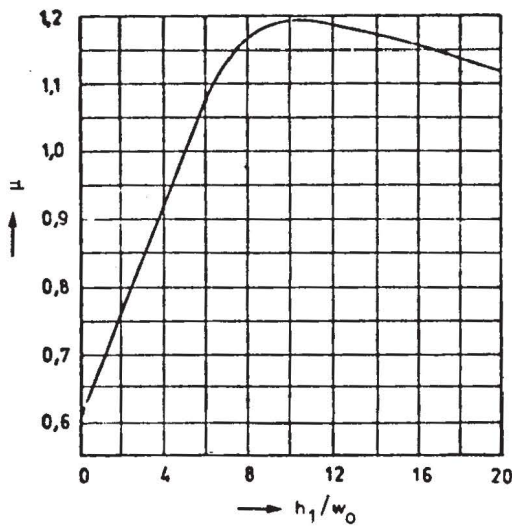
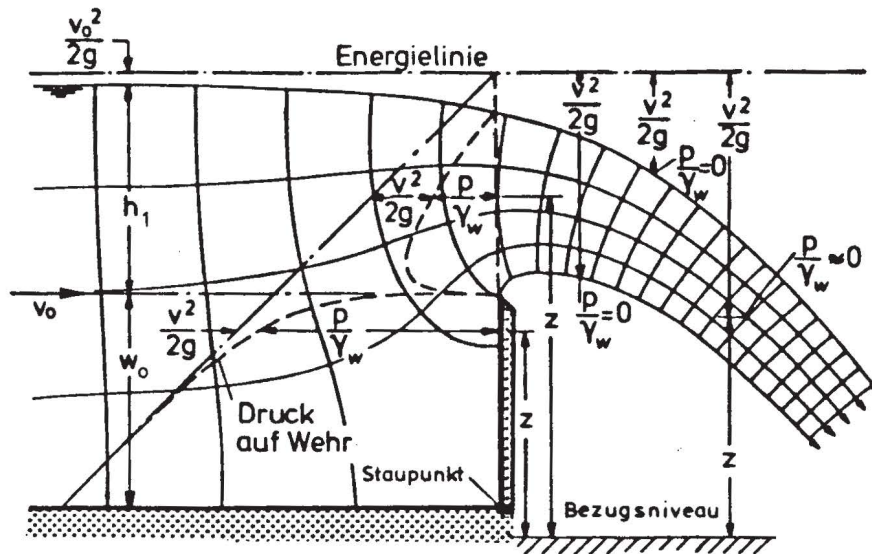
Hohe Schwellen ( $H_1/w_0 \rightarrow 0$ ):  $H_2/H_1$  und  $h_2/h_1 \rightarrow 2/3$

Niedrige Schwellen ( $H_1/w_0 \rightarrow \infty$ ):  $H_2/H_1$  und  $h_2/h_1 \rightarrow 1$

$(H_1/w_0 = 1)$ :  $H_2/H_1$  und  $h_2/h_1 \approx 0.82 \div 0.92$

Bild 7: Breitkronige Wehre

Scharfkantiges, rechteckiges, belüftetes Überfallwehr:



ABFLUSSGLEICHUNG  
(Poleni)

$$q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} h_1^{3/2}$$

Für den Bereich

$h_1/w_0 < 6$  gilt:

$$\mu \approx 0,611 + 0,075 h_1/w_0$$

Gesamtabfluß

$$Q = q \cdot b_1'$$

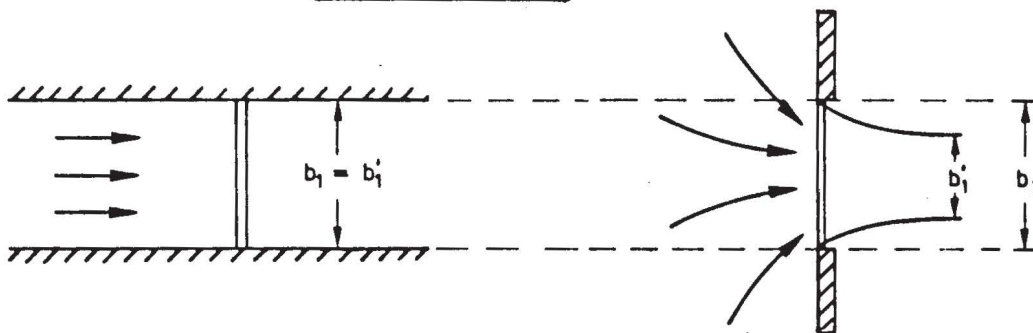
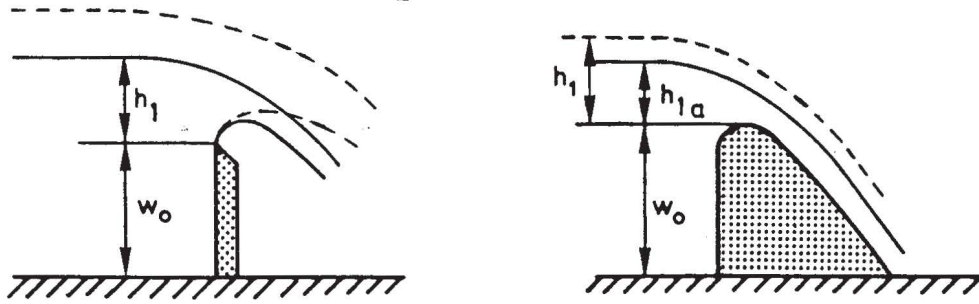


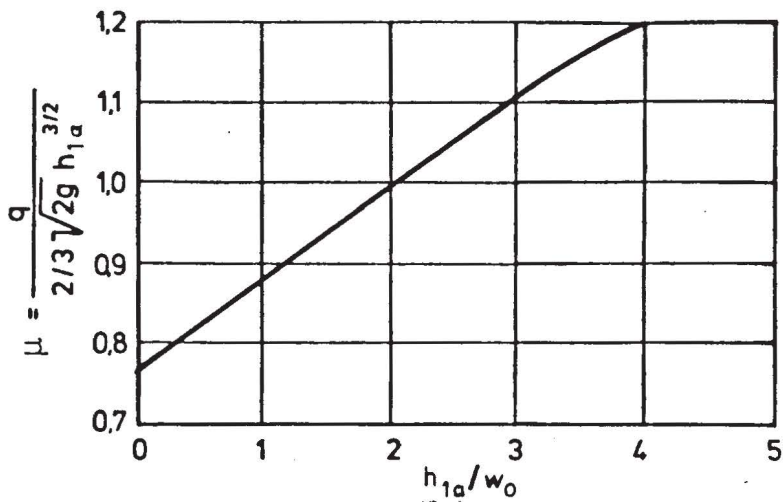
Bild 8: Scharfkantige Wehre



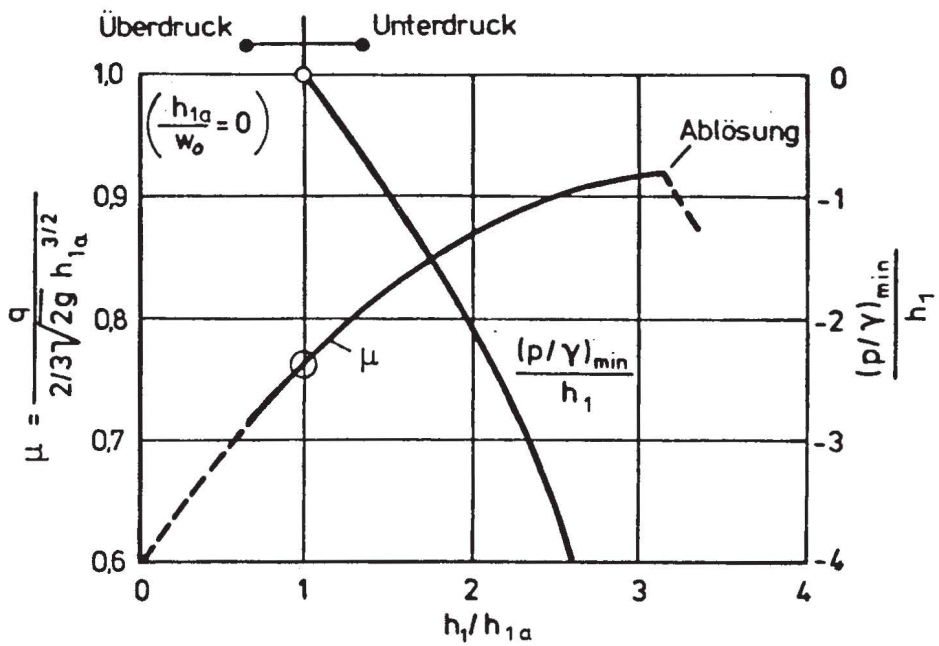


$w_0$  = Wehrhöhe

$h_{1a}$  = Ausbauüberfallhöhe, d.h. entlang des Wehrrückens ist ( $p = p_{atm}$ ).



Ausbau-Abflußwerte für rundkronige Wehrrücken



Abflußbeiwert und Druck entlang des Wehrrückens für ein rundkroniges Wehr der Ausbauüberfallhöhe  $h_{1a}$

Bild 9: Rundkronige Wehre

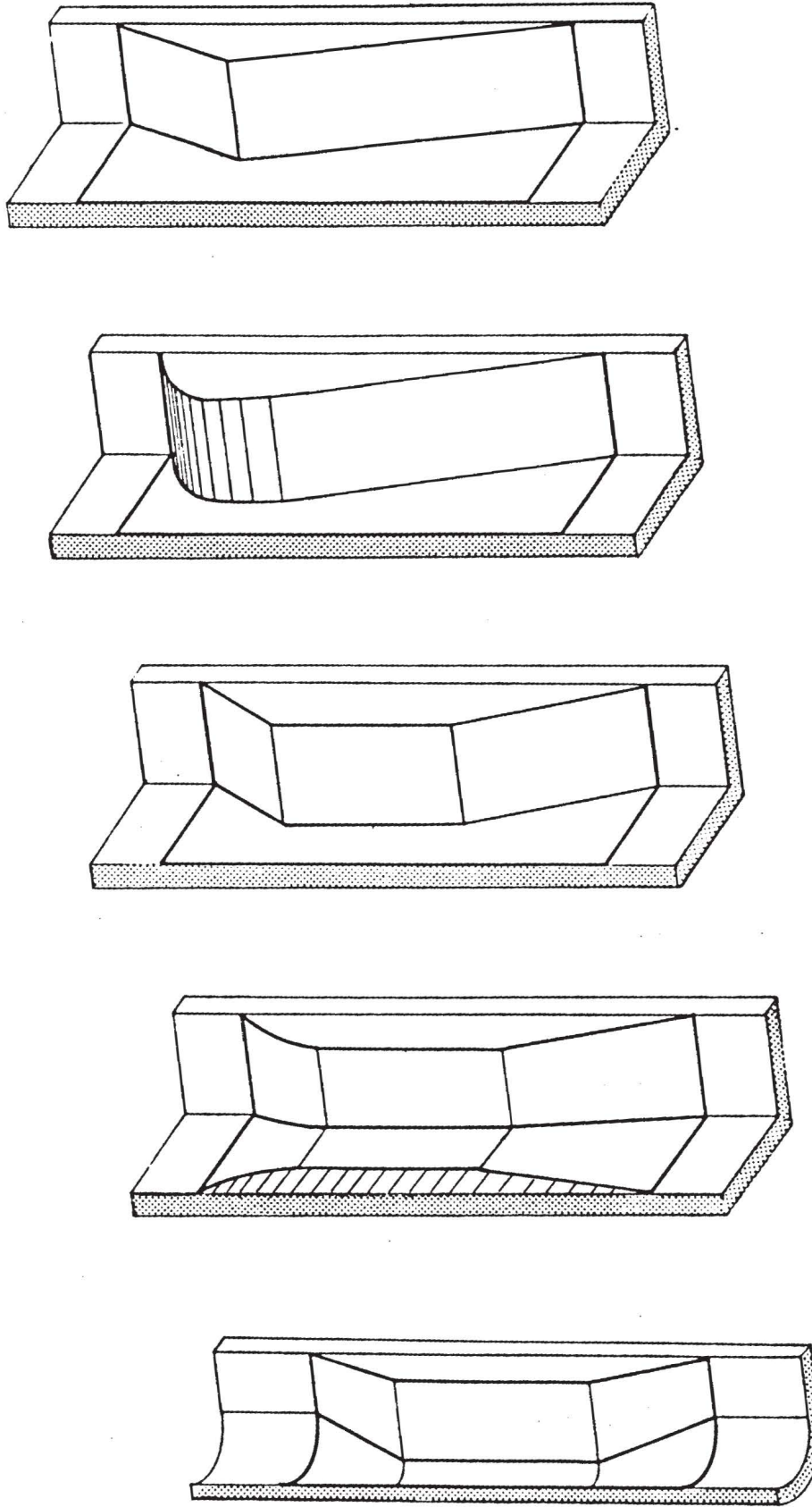


Bild 10: Geometrische Formen von Kontraktionsgerinnen