

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Die Ausbildung der Überfälle beim Abfluss von Wasser über Wehre nebst Beschreibung der Anlage zur Beobachtung von Überfällen im Flussbaulaboratorium zu Karlsruhe

Rehbock, Theodor

[Leipzig], [1909]

2. Der Wasserabfluss bei Sturzwehren

[urn:nbn:de:bsz:31-289019](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-289019)

am Wehrfuße beginnt, d. h. dann, wenn der Fuß des Strahles verdeckt ist. In diesem Falle erreicht die stromaufwärts gerichtete Oberflächenströmung der auf dem Strahle liegenden Wasserwalze zuweilen eine solche Geschwindigkeit, daß schwimmende Gegenstände wie Holzstämme oder Eis, die infolge ihres Auftriebes in die Wasserwalze über dem Strahl gelangt sind, mit großer Gewalt stromaufwärts mitgerissen und durch den fallenden Strahl hindurch gegen den Wehrkörper angeschleudert werden¹⁾. Diese Angriffe können auf die Abfallwand eines Wehres sehr nachteilig wirken, zumal derselbe Körper wiederholt in die Gegenströmung der Wasserwalze gelangen kann, so daß er hintereinander zahlreiche Stöße gegen den Abschlußboden ausüben vermag, bevor er endlich im Strahle bleibt und zum Abtreiben kommt. Die Zerstörung einzelner Holzwehre wird auf diese von Schwimmkörpern ausgeübten Stöße zurückgeführt.

Die Angriffe, die vom Wasser und den von ihm mitgeführten Festkörpern auf die Sohle der Unterwasserrinne ausgeübt werden, sind dicht am Fuße des Wehres am stärksten. Sie nehmen mit der Wassermenge, mit der Menge, Größe und Härte der mitgeführten Festkörper, mit der Fallhöhe und mit zunehmender Steilheit des Abschlußbodens zu. Gemildert werden diese Angriffe durch eine allmähliche Ablenkung des Wasserstrahles in die Richtung des Unterwasserbettes auf einer gekrümmten Übergangsstrecke oder durch die Aufstauung des Unterwassers, welche letztere aber erst dann wirksam werden kann, wenn der Wassersprung verschwindet.

Treten schwere Angriffe auf die Flußsohle meist auch nur dicht am Fuße eines Wehres auf, so ruft das Wehr doch einen vermehrten Angriff auf das Unterwasserbett noch weiter unterhalb hervor und zwar bis zu derjenigen Stelle, an der die Umbildungsstrecke endigt. Bei einer Bettsohle, die sich vorher im Gleichgewichtszustande befand, können daher Auskolkungen bis zu dieser Stelle erwartet werden, wenn die Sohle nicht durch ein Sturzbett befestigt wird.

Bei Wehren mit vertieften Sturzbecken geht die zweckmäßige Befestigung der Flußsohle unterhalb des Wehres unmittelbar aus der Gestalt des Abflußbildes des Wassers hervor, indem hier stärkere Angriffe außer im Sturzbecken selbst an derjenigen Stelle auftreten, an welcher der Wasserstrahl am unteren Ende der Walze W_2 zum zweiten Male auf die Sohle der Unterwasserrinne auftritt. An dieser Stelle ist daher eine gute Befestigung der Flußsohle erforderlich, während unter der Wasserwalze W_2 selbst eine Befestigung fehlen kann, da hier nur eine mäßig starke stromaufwärts gerichtete Strömung auftritt, die zuweilen sogar Auflandungen veranlaßt. Es muß allerdings auch darauf Rücksicht genommen werden, daß sich die starken Angriffen ausgesetzten Stellen bei Änderungen im Wasserabfluß verschieben können.

2. Der Wasserabfluß bei Sturzwehren.

Bei den Sturzwehren, die eine lotrechte oder doch eine steile Abfallwand besitzen, können sich die Überfälle in sehr verschiedener Weise ausbilden, je nach den Einflüssen, unter denen sich die Strahlbildung vollzieht.

Diese verschiedenen Überfälle lassen sich zunächst nach den auftretenden Strahlformen in die folgenden drei Gruppen zusammenfassen:

¹⁾ S. Joseph P. Frizell, Waterpower, S. 28.

- a) Überfälle mit freiem Strahl,
- b) Überfälle mit gewelltem Strahl,
- c) Überfälle mit angeschmiegttem Strahl,

je nachdem der Strahl:

- a) ohne Berührung mit der Abfallwand frei zum Sturzbette hinunterstürzt,
- b) ohne steilen Absturz mit wellenförmiger Oberfläche in das Unterwasser übergeht oder
- c) sich nach vorübergehender Trennung vom Wehrkörper wieder an diesen anschmiegt.

a) Überfälle mit freiem Strahl.

Der freie Strahl ist die bei Sturzwehren am häufigsten auftretende Strahlform. Bei ihm ist der zwischen dem Wehrkörper und dem Strahle vorhandene Raum in seinem unteren Teile stets mit Wasser gefüllt. Der obere Teil enthält entweder Luft oder gleichfalls Wasser. Ist Luft unter dem Strahle vorhanden, so kann dieselbe die gleiche, eine kleinere oder eine höhere Spannung besitzen, als die Außenluft.

Dabei entstehen vier wesentlich voneinander verschiedene Strahlarten und zwar:

- a) der gelüftete Strahl, bei dem die eingeschlossene Luft die Spannung der Außenluft besitzt,
- β) der gesenkte Strahl, bei dem die Spannung der eingeschlossenen Luft kleiner als diejenige der Außenluft ist,
- γ) der gehobene Strahl, bei dem die Spannung der eingeschlossenen Luft größer als diejenige der Außenluft ist,
- δ) der wassergefüllte Strahl, der keine Luft einschließt.

a) **Der gelüftete Strahl** (*nappe libre*)¹⁾ entsteht, wenn der Lufteintritt in den Raum zwischen Wehr und Strahl unbehindert ist. Er ist als die Grundform des Überfalles bei einem Sturzwehr zu betrachten. Die Verbindung der Außenluft mit der Luft unter dem Strahl findet entweder an den Enden des Wehres von den Seiten her oder auch wohl durch den Strahl selbst hindurch statt, wenn derselbe infolge kleiner Unregelmäßigkeiten der Überfallkante oder infolge anderer Störungen stellenweise aufreißt. Eine Verbindung der Außenluft mit dem Raum unter dem Strahle ist zur Erhaltung eines gelüfteten Strahles deshalb erforderlich, weil der fallende Strahl aus dem unter ihm liegenden Raume beständig Luft herausreißt, die ersetzt werden muß, wenn nicht eine Verdünnung der Luft eintreten soll, welche die Form des Strahlbildes ändern würde. Das Fortreißen von Luft aus dem Raume unter dem Strahle erfolgt an derjenigen Linie, in der die Unterfläche des fallenden Strahles die Oberfläche der Wasserwalze, die sich unter jedem freien Strahl vorfindet, berührt. An dieser Schnittlinie werden unausgesetzt kleine Luftblasen in die Berührungsfläche zwischen Strahl und Wasserwalze hineingerissen, die zum Teil in die Wasserwalze gelangen und aus dieser wieder in den lufteerfüllten Raum unter dem Strahl aufsteigen, zum Teil aber infolge des Auftriebes in das untere Strahlende eindringen, aus dem sie in die freie Außenluft entweichen.

Die Querschnittsgestalt des gelüfteten Strahles ist, wie die aller sich bei Überfällen über Wehre ausbildenden Strahlen, abhängig von der Querschnittsgestalt des Wehres, von der Rauigkeit der Wehroberfläche, von der Gestalt der Zu- und Ab-

¹⁾ Die eingeklammerten Bezeichnungen sind die von Bazin gewählten.

leitungsrinne des Wassers, von der Menge des in der Zeiteinheit über ein Wehrstück von bestimmter Länge fließenden Wassers und von der Größe des herrschenden Luftdruckes. Von diesen verschiedenen Einflüssen sind die zuerst genannten bei einer bestehenden Wehranlage meist keinen oder doch nur geringen Änderungen innerhalb kurzer Zeitabschnitte unterworfen, so daß sie das Querschnittsbild des Strahles nicht oder doch höchstens ganz unwesentlich verändern können. Auch durch Schwankungen in der Größe des zu beiden Seiten des Strahles herrschenden gleichen Luftdruckes wird die Form des Strahles wohl kaum jemals in wahrnehmbarer Weise beeinflußt werden. Eine erhebliche Änderung des Strahlquerschnittes bei einem bestimmten Wehre ist daher ausschließlich bei Änderungen der sekundlich abfließenden Wassermenge (Q) zu erwarten, mit der sich allerdings das Bild des ganzen Abflußvorganges sehr wesentlich ändert, wie die Abb. 5 und 10, sowie 17 und 18 auf Taf. III zeigen, die den Querschnitt durch zwei Wehre bei verschiedenen Abflußmengen darstellen.

Eine besonders regelmäßige und keinerlei zufälligen Änderungen unterworfen Form zeigt die Ausbildung des oberen Teiles eines gelüfteten Strahles bei Wehren, die eine scharfe Überfallkante und eine lotrechte Begrenzung an der dem Oberwasser zugekehrten Seite besitzen. Solche Wehre werden daher gewöhnlich als Meßwehre verwandt, zumal da für sie die Überfallkoeffizienten μ für verschiedene Überfallhöhen h_0 am genauesten bestimmt worden sind. Die Querschnittsform des überfallenden Strahles ist bei diesen Wehren oberhalb des Einflußgebietes des Unterwassers bei verschiedenen Wasserführungen Q nahezu ähnlich, indem alle Abmessungen des Strahlquerschnittes sich etwa proportional zu dem Werte $Q^{\frac{2}{3}}$ ändern. Nur die Tiefe des Oberwassers, welche die Zuflußgeschwindigkeit des Wassers zum Wehre hin bedingt, übt insofern einen Einfluß auf den Querschnitt des Strahles aus, als dieser bei niedrigen Wehrhöhen eine etwas flachere Lage annimmt, als bei hohen Wehren. Auch auf die bei einer bestimmten Überfallhöhe über ein Wehr von der Länge l fließenden Wassermenge:

$$\text{Gl. 1.} \quad Q = \frac{2}{3} \mu \cdot l \cdot \sqrt{2g} [(h_0 + \mathcal{h})^{\frac{3}{2}} - h^{\frac{3}{2}}]$$

ist die Wehrhöhe von Einfluß, insofern die Werte \mathcal{h} und μ von der Wehrhöhe p abhängig sind.

Der Wert \mathcal{h} in Gl. 1 bedeutet das Maß derjenigen Hebung des Oberwasserspiegels eines Wehres, welche die gleiche Vergrößerung der Geschwindigkeit des überfallenden Wassers hervorrufen würde, wie die Geschwindigkeit u des dem Wehre zuströmenden Oberwassers. Es kann gesetzt werden: $\mathcal{h} = \alpha \cdot \frac{u^2}{2g}$, worin $u = \frac{Q}{l(p + h_0)}$ ist, wenn die Breite der Oberwasserrinne der Wehrlänge l entspricht.

Diese Gleichung kann durch Reihenentwicklung unter Vernachlässigung der sehr kleinen Glieder höherer Ordnung in die bequemere Form:

$$\text{Gl. 2.} \quad Q = \frac{2}{3} \mu \cdot l \cdot \sqrt{2g} \cdot h_0^{\frac{3}{2}} \left\{ 1 + k \left(\frac{h_0}{h_0 + p} \right)^2 \right\}$$

umgestaltet werden.

Bazin hat nachgewiesen, daß der Wert k in dieser Gleichung nicht konstant ist, sondern mit der Wehrhöhe zu und mit der Überfallhöhe abnimmt, was die Versuche im Karlsruher Laboratorium bestätigt haben.

Bazin wählte indessen für die Aufstellung einer einfachen Formel als Mittelwert:

$$k = 0,55,$$

wodurch die Gleichung 2 übergeht in:

$$\text{Gl. 3.} \quad Q = \frac{2}{3} \mu \cdot l \cdot \sqrt{2g} \cdot h_0^{\frac{3}{2}} \left\{ 1 + 0,55 \left(\frac{h_0}{h_0 + p} \right)^2 \right\}.$$

In dieser Gleichung ermittelte Bazin für ein Wehr von 2 m Breite ohne seitliche Zusammenziehung des Strahles und für Überfallhöhen zwischen $h_0 = 0,1$ und $h_0 = 0,6$ m:

$$\mu = 0,608 + \frac{0,0045^1}{h_0}$$

wobei h_0 in m eingeführt werden muß.

Frese änderte auf Grund eigener Versuche und vorliegender Beobachtungen diesen Wert um in:

$$\mu = 0,615 + \frac{0,0021}{h_0}.$$

Der Verlauf der μ -Linien nach den Ermittlungen von Bazin und Frese für Überfallhöhen bis zu 0,2 m ist in die Abbildung 5 eingetragen worden.

Die Formel von Bazin wurde seither vielfach zur Bestimmung von Wassermengen aus der Überfallhöhe benutzt. Sie liefert aber zu große Werte, wie schon von Frese, Hansen²⁾ und Aichel³⁾ festgestellt wurde, und wie die in der letzten Zeit ausgeführten genauen Untersuchungen im Karlsruher Laboratorium bestätigt haben.

Der Wert μ in der Gl. 3 wurde nämlich für ein Wehr von 0,5 m Länge und 0,25 m Höhe für Überfallhöhen von 0,01 bis nahezu 0,2 m und für einen vollständig gelüfteten Strahl, der bis zum Unterwasserbett durch parallele Glaswände geführt war, in Karlsruhe zu:

$$\mu = 0,609 + \frac{0,001}{h_0 - 0,004}$$

ermittelt, wobei die mittlere Abweichung der beobachteten Werte von den durch die obige Hyperbelgleichung festgelegten nur $\frac{1}{4}\%$ des wirklichen Wertes, der mittlere Fehler einer einzelnen Beobachtung bei Berechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate aber nur $\frac{1}{3}\%$ beträgt.

Die einzelnen durch Messung bestimmten Werte und die aus ihnen abgeleitete Hyperbel sind in die Abb. 5 eingetragen worden, in der auch die bei der Eichung des gleichfalls 0,5 m langen Meßüberfalles gefundene μ_0 -Linie eingezeichnet wurde. Da das Meßwehr die beträchtliche Höhe von 1,08 m besitzt und der Strahl seitliche Zusammenziehung aufweist, fließt das Wasser aus dem großen Beruhigungsbecken nur langsam zu. Der Wert μ_0 konnte daher unter Vernachlässigung der Zuflußgeschwindigkeit aus der einfachen Dubuat'schen Formel:

$$Q = \frac{3}{2} \mu_0 \cdot l \cdot \sqrt{2g} \cdot h_0^{\frac{3}{2}}$$

ermittelt werden.

¹⁾ Bazin benennt im Gegensatz zu der in Deutschland gebräuchlichen Bezeichnung den Wert $\frac{2}{3} \cdot \mu$ der Gleichungen 1, 2 und 3 mit μ . Die von Bazin angegebenen Werte von μ mußten daher mit $\frac{3}{2}$ multipliziert werden, um die für die Gleichungen 1, 2 und 3 brauchbaren Werte zu erhalten.

²⁾ Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure Bd. 36. S. 1057.

³⁾ Die Werte μ , die von Aichel im Karlsruher Laboratorium gefunden wurden, sind — scheinbar wegen nicht genügender Lüftung des Strahles — auch etwas größer ermittelt worden, als bei den neueren Versuchen, die größtenteils durch die Assistenten Flügel und Buisson ausgeführt wurden.

Die erheblichen Abweichungen, welche die aufgetragenen μ -Linien nach den Bazin'schen und den im Karlsruher Laboratorium angestellten Beobachtungen erkennen lassen, können nicht allein auf die verschiedenen Breiten der Versuchswehre zurückgeführt werden, die — namentlich bei kleinen Überfallhöhen — keinen erheblichen Einfluß auf die Größe des Wertes μ ausüben.

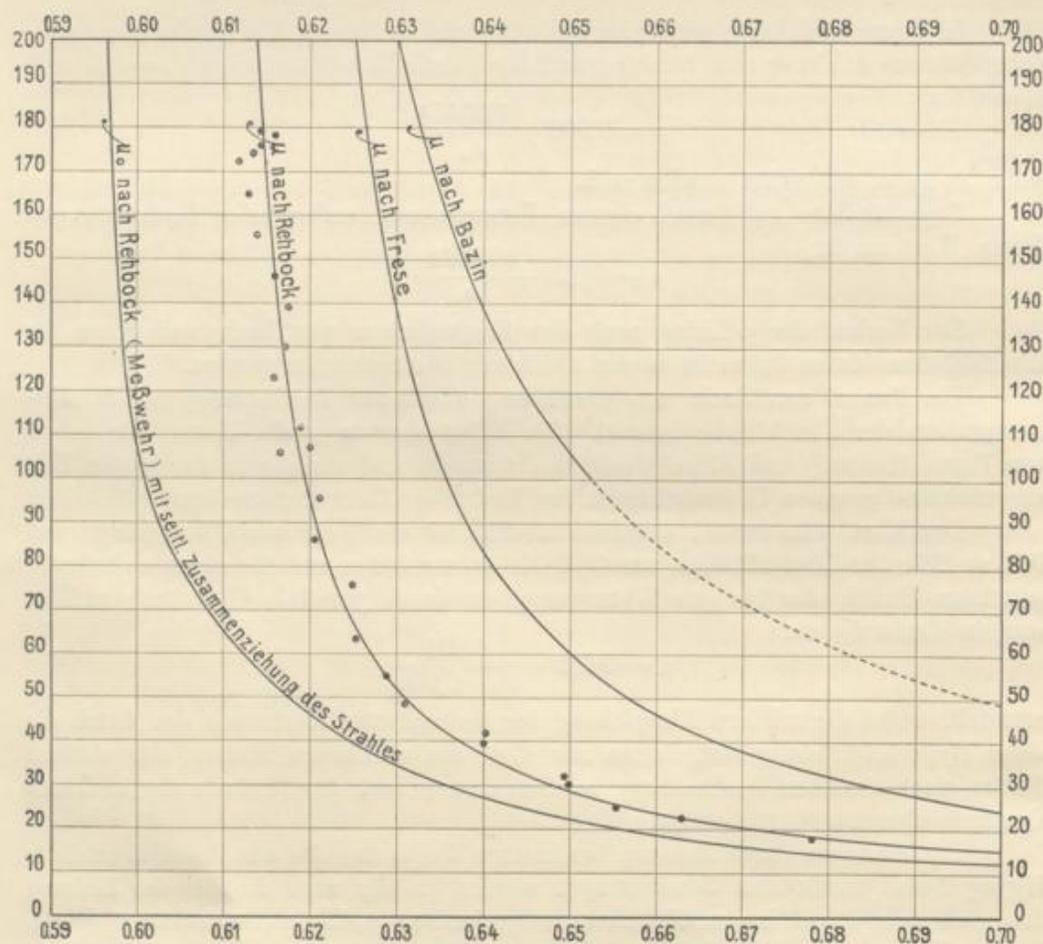


Abb. 5.

Auftragung der Linien der Überfallkoeffizienten μ für scharfkantige Wehre mit lotrechter Stauwand bei gelüftetem Strahl.
Ordinaten: Überfallhöhen in mm. Abszissen: Werte von μ .

Die für eine Wehrhöhe von 0,25 m ermittelte, aufgezeichnete μ -Linie gibt bei Verwendung der Gl. 3 für andere Wehrhöhen keine ganz zuverlässigen Werte. Bei größeren Wehrhöhen sind die der Abb. 5 entnommenen Werte etwas — allerdings nur um den Bruchteil eines Hundertstel — zu klein, während bei niedrigeren Wehren, die aber wegen der schwierigen Lüftung des Strahles nicht als Meßwehre benutzt werden sollten, die Werte der μ -Linie — bei größeren Überfallhöhen nicht unerheblich — zu groß sind.

Abgesehen von den Überfällen über sehr niedrige Wehre dürfte die überfließende Wassermenge bei einem gutgelüfteten lotrechten Blechwehr aber stets mit genügender Genauigkeit aus der Gleichung:

$$\text{Gl. 4.} \quad Q = \left(0,406 + \frac{0,002}{3h_0 - 0,012} \right) l \cdot \sqrt{2g} \cdot h_0^{\frac{3}{2}} \left\{ 1 + 0,55 \left(\frac{h_0}{h_0 + p} \right)^2 \right\}$$

gefunden werden, in welche die Werte l , g , h_0 und p in m eingesetzt werden müssen, um die Wassermenge in cbm/Sek. zu erhalten.

Die Querschnittsform des oberen Teiles eines gelüfteten Strahles bei einem scharfkantigen Wehr ist in Abb. 6 dargestellt. Wie aus dieser Abbildung zu er-

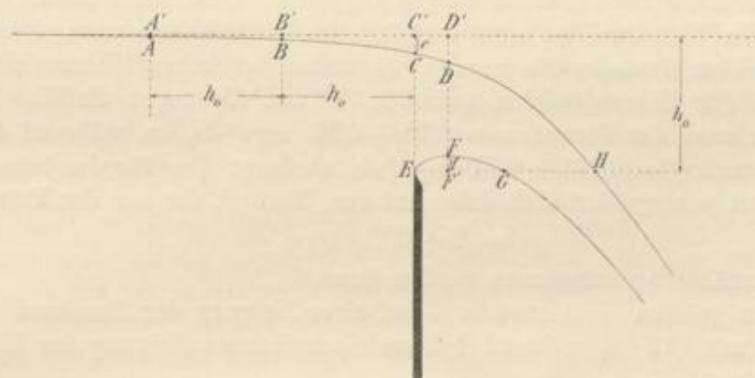


Abb. 6. Querschnitt durch einen gelüfteten Strahl.

sehen ist, beginnt die Senkung des Oberwasserspiegels bereits erheblich stromaufwärts vom Wehre. An dem Punkte, der um das Zweifache der Überfallhöhe h_0 oberhalb des Wehres liegt, übersteigt die Senkung AA' bei nicht zu geringer Wehrhöhe schon den Wert $0,01 \cdot h_0$. In einer Entfernung h_0 stromaufwärts der Wehrkante ist die Senkung BB' auf rund $0,04 \cdot h_0$ angewachsen, und lotrecht über der Wehrkante beträgt sie bereits $0,15 \cdot h_0$, so daß das Abflußprofil über der Wehrscheide E nur die Höhe $CE = 0,85 \cdot h_0$ besitzt.

Die Senkung der Wasseroberfläche nimmt dann rasch zu und erreicht bereits in einer Entfernung von $1,40 \cdot h_0$ stromabwärts von der Überfallkante den Wert h_0 , so daß hier die Strahloberfläche in der Höhe der Wehrkante liegt.

Die Unterfläche des freien Strahles, deren Gestalt sich mit geeigneten Meßgeräten gleichfalls an Modellwehren mit großer Schärfe bestimmen läßt, steigt von der Überfallkante aus infolge der Kontraktionswirkung der Wehroberkante zunächst nach oben an. Sie erreicht ihre höchste Lage etwa in einer Entfernung von $0,25 \cdot h_0$ stromabwärts von der Überfallkante im Punkt F , der etwa um $0,11 \cdot h_0$ über der Wehroberkante liegt. Die lotrecht gemessene Stärke des Strahles DF beträgt an dieser Stelle nur etwa $\frac{2}{3} \cdot h_0$. Im Punkt G , d. h. in einer Entfernung $EG = 0,7 \cdot h_0$ stromabwärts der Überfallkante E hat sich die Unterfläche des Strahles wieder zur Höhe der Wehrkrone gesenkt. Den weiteren, etwa einer Parabellinie folgenden Verlauf des Strahles zeigen die Abb. 5 und 10 auf Taf. III.

Von besonderer Wichtigkeit ist die Kenntnis der Werte $CC' = c$ und $FF' = f$, insofern die Größe des Überfallkoeffizienten μ mit zunehmender Spiegelsenkung des Oberwassers c und mit abnehmender Kontraktion f zunimmt. Bei scharfkantigen Wehren mit lotrechter Stauwand schwanken bei einem gelüfteten Strahl die Werte c und f bei gegebener Überfallhöhe h_0 nur innerhalb enger Grenzen und zwar nur infolge der verschiedenen Zufußgeschwindigkeiten des Oberwassers, wie sie bei

verschiedenen Wehrhöhen auftreten. Beide Werte, namentlich aber der Wert von c , nehmen bei abnehmender Wehrhöhe ab. So wurde bei ungeänderter Wasserführung bei Abnahme der Wehrhöhe eine Verminderung des Wertes c von $0,15 \cdot h_0$ auf $0,13 h_0$ und darunter beobachtet.

Wesentliche Änderungen der Werte c und f treten auf, wenn die dem Oberwasser zugekehrte Wehrseite aus der lotrechten in eine geneigte Lage übergeht. Bazin hat darüber genaue Untersuchungen angestellt, denen das folgende entnommen wurde. Ist die Wehrwand bei sonst ungeänderten Verhältnissen unter dem Winkel α zur Wagerechten stromabwärts geneigt, so nimmt bei hohen Wehren mit mäßiger Überfallhöhe für Neigungswinkel zwischen 90° und 45° gegen die Wagerechte der Wert c etwa nach der Formel: $c = (0,15 + 0,06 \cdot \text{ctg} \alpha) \cdot h_0$ zu, während der Wert f nach der Formel: $f = (0,112 - 0,07 \cdot \text{ctg} \alpha) \cdot h_0$ abnimmt. Der für das lotrechte Wehr geltende Wert μ vergrößert sich dabei auf den Wert μ' , der aus der Formel:

$$\mu' = (1 + 0,11 \cdot \text{ctg} \alpha) \cdot \mu$$

mit guter Annäherung entnommen werden kann.

Seinen größten Wert erreicht μ' bei einer Neigung der Stauwand unter $1:2$ ($\alpha = 26\frac{1}{2}^\circ$) mit $1,12 \cdot \mu$, während bei noch schwächerer Neigung der Wert von μ' wieder abnimmt.

Wird α größer als 90° , hängt demnach die Stauwand stromaufwärts über, so wird μ' kleiner als μ .

Bei Wehren mit abgerundeter Überfallkante übt ein geneigter Vorboden keinen erheblichen Einfluß auf die Größe des Wertes μ aus.

Die Ausbildung der stromabwärts gekehrten Seite des Wehres ist ohne Einfluß auf die Form des oberen Teiles des freien Strahles, solange der Strahl ohne Berührung über das Wehr hinübergeht. Bei wagerechter oberer Begrenzung des Wehres, wie sie bei Bretter- und Balkenwehren häufig vorkommt, kann der Strahl erst dann die Wehrkrone berühren, wenn die Stärke der lotrechten Stauwand e den Wert $\frac{h_0}{2}$ übersteigt.

Ist e größer als $\frac{2}{3} h_0$, so legt sich der Strahl stets auf das Wehr auf, wobei sofort eine wesentliche Änderung der Strahlform und der Größe des Überfallkoeffizienten eintritt. In diesem Falle geht bei einer scharfkantigen Krone der Wert μ in μ' über, wobei:

$$\mu' = \left(0,7 + 0,185 \frac{h_0}{e}\right) \cdot \mu$$

wird. Bei Abrundung der Kanten des Wehres wächst die Größe von μ' an, und zwar höchstens bis zu 14 % über denjenigen Wert, der bei scharfkantiger Begrenzung der Wehrkrone auftritt.

Bei einem Sturzwehr mit wagerechter Krone und auf dieser aufliegendem Strahl ist die Ähnlichkeit in der Ausbildung des oberen Teiles auch des gelüfteten Strahles bei verschiedenen Wasserführungen keine vollkommene, weil der Einfluß der unveränderlichen Breite der Wehrkrone sich bei wechselnden Überfallhöhen in verschiedener Weise auf das Bild des Strahlquerschnittes geltend machen muß. Bei Wehrkronen mit im Verhältnis zur Strahlstärke beträchtlicher Breite zeigt der Strahl über dem größten Teile der Wehrkrone eine nur wenig fallende, ebene oder auch gewellte Oberfläche, die durch eine kurze Strecke mit starkem Spiegelgefälle mit dem nahezu wagerechten Oberwasserspiegel des Wehres in Verbindung steht.

Der in der beschriebenen Weise in seinem oberen Teile ausgebildete gelüftete Strahl fällt bei genügend hohen Wehren unter dem Einflusse der beim Überfall über das Wehr erhaltenen wagerechten Geschwindigkeitskomponente und der lotrecht nach unten wirkenden Schwerkraft nach den Gesetzen des freien Falles weiter hinab, wobei seine Schwerlinie etwa nach einer Parabel mit lotrechter Achse gekrümmt ist. Beim Aufschlagen auf die wagerechte oder nahezu wagerechte Sohle des Unterwasserbettes wird der fallende Wasserstrahl scharf stromabwärts abgelenkt, wobei er mit fast unverringelter Geschwindigkeit gleichlaufend zur Sohle fortschießt. Wie bei den früher besprochenen Schußwehren ist die Geschwindigkeit des in die Richtung des Bettes abgelenkten Strahles größer und seine Tiefe daher kleiner als diejenige des Wassers in der anschließenden Unterwasserrinne.

Bei nicht allzu großer Tiefe des Unterwassers schießt der Strahl dann noch eine bestimmte Strecke, deren Länge von der Wassermenge, der Fallhöhe, der Unterwassertiefe und der Gestalt sowie der Rauigkeit des Sturzbettes abhängig ist, in nahezu ungeänderter Stärke in der Unterwasserrinne fort, ehe sich die Umbildung des Strahles in der bei Besprechung der Schußwehre beschriebenen Weise zum gewöhnlichen Unterwasser vollzieht.

Endet die durch eine Wasserwalze verdeckte Umbildungsstrecke stromaufwärts mit einem Wassersprung, wobei die Oberfläche des fallenden Strahles bis zum Übergang in die wagerechte Lage sichtbar bleibt, so entsteht der **gelüftete Strahl mit freiem Fuß** (*nappe libre à ressaut éloigné*), der auf Taf. III in Abb. 5 und 17 für kleine Überfallhöhen, in Abb. 10 und 18 für größere Überfallhöhen dargestellt ist. Bei dem gelüfteten Strahl mit freiem Fuß übt die Höhenlage des Unterwasserspiegels keinen Einfluß auf die Form des fallenden Strahles und auf die Größe des Überfallkoeffizienten aus.

Der Raum zwischen dem gelüfteten Strahl und der Wehrwand ist in seinem unteren Teile mit Wasser gefüllt, indem an der Aufschlagstelle des Strahles auf die Sohle der Unterwasserrinne ein Teil des Wassers dem Wehre zu stromaufwärts abgelenkt wird.

Das zwischen dem Wehrkörper und dem fallenden Strahl eingeschlossene Wasser wird durch den vorbeischießenden Strahl und durch das auf dem Sturzbett stromaufwärts zugeführte Wasser in eine lebhafte drehende Bewegung versetzt, indem der untere Teil des Wassers dem Wehrfuß zufließt und an diesem hochsteigt, um an der Oberfläche zum fallenden Strahl zurückzuzießen, von dem es wieder nach unten abgelenkt wird. Aus der dadurch entstehenden sich ständig drehenden Wasserwalze wird dem Strahl an der Berührungsfäche in der Zeiteinheit ebenso viel Wasser zugeführt, als derselbe beim Auftreffen auf das Sturzbett stromaufwärts abgibt. Mit zunehmender Abflußmenge wachsen die Querschnittsabmessungen der eingeschlossenen Wasserwalze beträchtlich an, wie ein Vergleich der Abb. 5 und 10 auf Taf. III, die beim nämlichen Wehre aufgenommen wurden, zeigt.

Falls ein seitliches Abfließen des Wassers aus dem Raume zwischen Strahl und Wehr durch rechtwinklig zur Wehrachse in der Höhe der Wasserwalze angebrachte Abschlußwände verhindert wird, steht die Oberfläche der eingeschlossenen Wasserwalze, wie bei klarem Wasser vielfach auch durch den fallenden Strahl hindurch erkannt werden kann, nicht unbeträchtlich höher, als die Oberfläche des auf der Sohle der Unterwasserrinne stromabwärts fortschießenden Wassers. Die Oberfläche der Walze steht dabei nicht wagerecht, sondern fällt vom Wehrkörper zum Strahle hin ab.

Durch den Druck des vom Strahl eingeschlossenen Wassers wird das untere Ende des Strahles aus der Parabelform heraus stromabwärts abgelenkt, wie die Abb. 5 und 10 auf Taf. III erkennen lassen.

Ist ein seitlicher Abfluß des zwischen dem Wehrkörper und dem Strahl eingeschlossenen Wassers an den Enden des Strahles möglich, wie es dann der Fall ist, wenn die Breite der Unterwasserrinne die Länge des Wehres übertrifft, so senkt sich die Oberfläche der Wasserwalze nach den Enden des Strahles hin, und es entwickelt sich am Fuß des Wehres entlang von der Wehrmitte nach den beiden Seiten hin eine kräftige Strömung.

Je größer bei ungeänderter Abflußmenge die Unterwassertiefe und je rauher die Oberfläche des Sturzbettes ist, desto näher rückt, wie bei den Schußwehren, auch bei den Sturzwehren der Wassersprung an das Wehr heran. Verschwindet der Wassersprung ganz, indem sich die Wasserwalze auf den Fuß des fallenden Wasserstrahles auflegt, so entsteht der **gelüftete Strahl mit verdecktem Fuß** (*nappe libre influencée par l'aval*), bei dem der fallende Strahl an seinem unteren Ende durch zwei sich in entgegengesetztem Sinne drehende Wasserwalzen hindurchschießt, wie auf Taf. III die Abb. 11 und 19, sowie für eine im Verhältnis zur Überfallhöhe sehr bedeutende Unterwassertiefe Abb. 8 zeigen. Bei dem gelüfteten Strahl mit verdecktem Fuße können die Abflußverhältnisse des Unterwassers einen Einfluß auf die Ausbildung des fallenden Strahles ausüben, wie schon daraus geschlossen werden kann, daß die Wasserwalze zwischen dem Strahl und dem Wehr, die vom Unterwasser durch den Strahl vollständig getrennt ist, bei zunehmender Unterwassertiefe ihre Gestalt ändert, indem der Wasserspiegel der Walze sich hebt. Diese Hebung kann sogar soweit fortschreiten, daß zuletzt der mit Luft gefüllte Raum vollständig verschwindet, indem die Wasserwalze den Raum unter dem Strahle vollständig ausfüllt. Das Kennzeichen des gelüfteten Strahles geht dabei allerdings verloren, da selbst dann, wenn eine Verbindung zwischen dem Raum unter dem Strahle und der Außenluft hergestellt wird, keine Luft unter den Strahl treten würde.

Ist der Luftzutritt unter den Strahl nicht ungehindert, ist vielmehr der Raum unter dem Strahl an den beiden Seiten durch Flügelwände ohne Öffnungen luftdicht abgeschlossen, so kann die Luft in diesem Raume eine andere Spannung besitzen wie die Außenluft. Die Belastung des Strahles durch den Luftdruck ist dann auf seinen beiden Seiten nicht die gleiche, und der Abflußvorgang wird dadurch noch verwickelter.

Gewöhnlich besitzt die abgeschlossene Luftmenge eine geringere Spannung als die Außenluft, da der Strahl Luft aus dem luftgefüllten Raume herausreißt. Dabei entsteht ein Überdruck der Außenluft, durch den der Strahl näher an die Abfallwand des Wehres herangedrückt wird. Der gelüftete Strahl geht dabei in den gesenkten Strahl über.

β) Der **gesenkte Strahl** (*nappe déprimée*) besitzt einen wenig beständigen Charakter, so daß genaue Beobachtungen bei ihm auf Schwierigkeiten stoßen. Bei der Entstehung dieser Strahlform aus dem gelüfteten Strahl durch allmähliche Verringerung der unter dem Strahl eingeschlossenen Luftmenge beim völligen Abschluß oder bei Einschränkung der Lüftung wird eine allmähliche Hebung der Oberfläche der Wasserwalze unter dem Strahl beobachtet, die als ein Aufsaugen des Wasserspiegels durch die Verdünnung der auf der Wasserwalze ruhenden Luft aufgefaßt werden kann. Bei ungeändertem Unterwasserstande steigt der Wasserspiegel unter

dem Strahl oft ganz erheblich an und zwar um so höher, je größer die Menge des abfließenden Wassers und daher auch der von ihm mitgerissenen Luft ist.

Bei einer bestimmten Abflußmenge und einer feststehenden Unterwassertiefe überschreitet bei einem gegebenen Wehr die Hebung des Wasserspiegels ein bestimmtes Maß indessen nicht. Ist bei eingeschränkter Lüftung dieses Maß erreicht, so tritt gewöhnlich ein Beharrungszustand ein, bei dem nur noch so viel Luft fortgerissen wird, als neu in den Raum unter dem Strahl eintreten kann. Bei vollkommen abgeschlossener Lüftung wird dagegen, nachdem die Luftverdünnung unter dem Strahl und die Hebung der Oberfläche der Wasserwalze ein gewisses Maß erreicht hat, der Strahl durch den Überdruck der Außenluft durchbrochen, wobei die Spannung der Luft unter dem Strahl plötzlich auf diejenige der Außenluft ansteigt. Es entsteht dann der gelüftete Strahl, und der Spiegel der Wasserwalze unter dem Strahl fällt auf die dieser Strahlart entsprechende Höhe zurück. Die Wiederholung dieses Vorganges führt zu einem ständigen Wechsel zwischen dem gelüfteten und dem gesenkten Strahl.

Ein solcher Wechsel zwischen dem gelüfteten und dem gesenkten Strahl wird z. B. bei bestimmten Abflußmengen bei dem Wehr der Fabrik Schlechtau der Firma E. Holtzmann & Cie. im Murgtal oberhalb der Station Weisenbach beobachtet. Steht bei diesem Wehre der Oberwasserspiegel 0,5–0,7 m über der Wehrkrone, so reißt das Wasser unter dem beiderseitig durch Flügelmauern abgeschlossenen Strahl Luft fort, wobei der Strahl die gesenkte Form annimmt und der Wasserspiegel unter dem Strahl allmählich ansteigt. Die dabei eintretende Druckverminderung entspricht im Höchstmaße dem Druck einer Wassersäule von etwa 0,5 m Höhe oder $\frac{1}{20}$ Atmosphäre. Plötzlich schießt dann an irgend einer Stelle des Überfalles mit einem lauten donnerartigen Geräusch Luft unter den Wasserstrahl, wobei derselbe sich in seiner ganzen Länge hebt und infolge der Senkung der schäumenden Wasserwalze zwischen der Wehrwand und dem Wasserstrahl dunkler färbt. Der ganze Vorgang wiederholt sich in regelmäßigen Zeitabständen, die bei einer Überfallhöhe von 0,6 m 10 Sekunden betragen und bei geringeren Überfallhöhen kürzer werden.

Bei der durch den Überdruck der Außenluft bewirkten Senkung des Strahles nimmt die Größe der Kontraktion (f) des Strahles ab, das Oberflächengefälle oberhalb der Überfallkante (c) aber zu. Die Menge des bei ungeänderter Überfallhöhe abfließenden Wassers muß daher gegenüber der Abflußmenge bei dem gelüfteten Strahl zunehmen. In der Tat wird denn auch eine Zunahme des Überfallkoeffizienten beobachtet, die bis auf 10% anwachsen kann. Den Querschnitt durch gesenkte Strahlen zeigen auf Taf. III die Abb. 4, 12 und 20.

7) Der **gehobene Strahl**, der von Bazin nicht erwähnt wird, entsteht aus dem gelüfteten Strahle, wenn bei seitlichem luftdichtem Abschluß die eingeschlossene Luft eine höhere Spannung besitzt als die Außenluft. Diese Strahlform wird nur selten beobachtet. Sie kann bei Abschluß der Lüftung und schnell abnehmender Abflußmenge aus dem gelüfteten Strahl entstehen, wenn die Querschnittsfläche des luft erfüllten Raumes unter dem Strahl beim gelüfteten Strahl bei der gleichen Abnahme des Wasserabflusses sich verkleinern würde, was ein Entweichen von Luft bedingt. Ist das Entweichen der Luft bei allseitigem luftdichtem Abschluß unmöglich, so ist eine größere Luftmenge unter dem Strahl vorhanden, als es bei dem gelüfteten Strahl der Fall sein würde. Es findet daher eine Verdichtung der Luft, und gleichzeitig, durch diese bewirkt, eine Hebung des Strahles statt, wobei der Strahl sich zuweilen, namentlich bei kleinen Abflußmengen und großen Fallhöhen, auffallend gerade

streckt. Dabei fällt der Spiegel der Wasserwalze unter dem Strahl, wie die Abb. 6 und 9 auf Taf. III zeigen, und der Überfallkoeffizient wird kleiner als beim gelüfteten Strahl. Auch bei ungeändertem Abfluß kann der gehobene Strahl entstehen, wenn der Unterwasserspiegel schnell aufgestaut wird.

In sehr schöner Weise läßt sich der gehobene Strahl experimentell durch Einblasen von Luft unter einen an den beiden Enden luftdicht abgeschlossenen freien Strahl erzeugen, wobei der Strahl in seinem unteren Teile auch schon oberhalb der eingeschlossenen Wasserwalze eine deutliche Gegenkrümmung zeigen kann.

Sowohl der gesenkte als auch der gehobene Strahl kann mit freiem oder mit verdecktem Fuß vorkommen.

δ) Der **wassergefüllte Strahl** (*nappe noyée en dessous*) ist eine bei Wehren sehr häufig auftretende und daher wichtige Strahlform, die entstehen kann:

- a) aus dem gelüfteten Strahl, wenn bei genügender Hebung des Unterwasserspiegels die Wasserwalze den Raum unter dem Strahl vollständig ausfüllt, nachdem die eingeschlossene Luft durch die Lüftungsöffnungen entwichen ist;
- b) aus dem gesenkten Strahl, wenn bei fehlender Lüftung und zunehmender Abflußmenge die Luft unter dem Strahl vollständig fortgerissen ist;
- c) aus dem gewellten Strahl durch Senkung des Unterwasserspiegels.

Auch der wassergefüllte Strahl kann mit freiem und mit verdecktem Fuß vorkommen.

Der wassergefüllte Strahl mit freiem Fuß (Taf. III, Abb. 13 und 21) entsteht nur dann, wenn die Stauhöhe z den Wert $0,75 p'$ erreicht oder übersteigt, und wenn ferner der Unterwasserspiegel um kein größeres Maß unter der Wehrkrone steht, als der Oberwasserspiegel über derselben liegt. Dabei ist die Wehrhöhe p' über der Sohle der Unterwasserrinne zu messen.

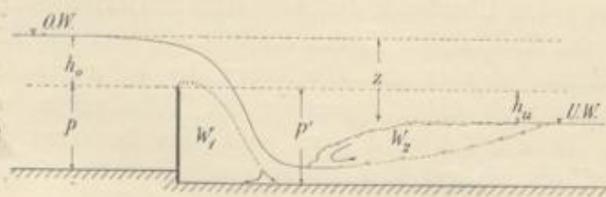


Abb. 7. Querschnitt durch einen wassergefüllten Strahl mit freiem Fuß.

Nach den Bezeichnungen der Abb. 7 sind demnach die folgenden beiden von Bazin gefundenen und durch Versuche in Karlsruhe bestätigten Bedingungen zu erfüllen, wenn der wassergefüllte Strahl mit freiem Fuß entstehen soll:

1. $z \geq 0,75 \cdot p'$
2. $h_o > h_u$

Aus diesen beiden Bedingungen folgt ferner, daß diese Strahlform erst dann entstehen kann, wenn die Überfallhöhe h_o den Wert $0,375 \cdot p'$ übersteigt.

Wie beim gelüfteten Strahl übt auch beim wassergefüllten Strahl, solange der Fuß frei ist, die Höhenlage des Unterwasserspiegels keinen Einfluß auf die Größe des Überfallkoeffizienten aus.

Für dünnwandige, lotrechte Wehre mit scharfer Überfallkante ist nach Bazin der Überfallkoeffizient

$$\mu' = \alpha \cdot \mu$$

worin μ der Überfallkoeffizient für den gelüfteten Strahl nach der Bazin'schen Formel ist, und:

$$\alpha = 0,878 + 0,128 \cdot \frac{p'}{h_0} \text{ gesetzt wird.}$$

Für den Grenzwert $\frac{h_0}{p'} = 0,375$ erreicht α seinen größten Wert mit 1,19; für $\frac{h_0}{p'} = 1$ ist auch $\alpha = 1$; für größere Werte von $\frac{h_0}{p'}$ wird α kleiner als 1.

Der wassergefüllte Strahl mit freiem Fuß kann auch dann noch auftreten, wenn der Unterwasserspiegel über der Wehrkrone steht, wobei das Wehr ein Grundwehr wird. Voraussetzung für das Freibleiben des Strahlfußes von der Wasserwalze ist auch in diesem Fall, daß die Stauhöhe z des Wehres größer als $0,75 p'$ ist. Der Überfallkoeffizient ist dabei nach Bazin gleichfalls:

$$\mu' = \alpha \cdot \mu.$$

Der wassergefüllte Strahl mit verdecktem Fuß (Taf. III, Abb. 14 und 22) kann gleichfalls bei Überfall- und bei Grundwehren vorkommen. Dazu ist erforderlich, daß:

1. $z < 0,75 \cdot p'$
2. $h_0 > h_u$.

Steht der Unterwasserspiegel so tief unter der Wehrkrone, daß $h_u > h_0$ wird, so entsteht entweder die angeschmiegte Form des Strahles, oder es tritt Luft unter den Strahl und es bildet sich der gesenkte Strahl.

Bei dem wassergefüllten Strahl mit verdecktem Fuß liegen die Verhältnisse weniger einfach als bei den Überfällen mit freiem Fuß, insofern bei ihm die Höhenlage des Unterwasserspiegels auch auf die Form des oberen Teiles des Strahles einwirkt. Bei der Bestimmung des Überfallkoeffizienten ist daher auf den Wert h_u Rücksicht zu nehmen.

Wird der Überfallkoeffizient für den wassergefüllten Strahl mit verdecktem Fuß bei einem **Überfallwehr**

$$\mu' = \beta \cdot \mu$$

gesetzt, so ist nach Bazin

$$\beta = 1,05 + 0,15 \cdot \frac{h_u}{h_0}.$$

Mit Ausnahme von denjenigen Fällen, in denen das Unterwasser nur ganz unbedeutend (weniger als $\frac{p'}{40}$) über der Wehrkrone steht, liefert diese Formel Werte für β , die höchstens 1,5% von den durch Beobachtung ermittelten Werten abweichen.

1) Bazin hat diesen Wert genauer zu: $\alpha = 0,845 + 0,176 \cdot \frac{p'}{h_0} - 0,016 \left(\frac{p'}{h_0}\right)^2$ bestimmt. Für alle vorkommenden Werte von h_0 aufwärts bis zu $h_0 = 2,5 \cdot p'$ stimmen die aus der angegebenen linearen Gleichung berechneten Werte genügend genau mit den Werten der parabolischen Grundgleichung überein.

Steht der Unterwasserspiegel über der Wehrkrone, so daß das Wehr als **Grundwehr** wirkt, so tritt stets der wassergefüllte Strahl auf, wenn die Stauhöhe $z = h_0 - h_u'$ (nach Abb. 8) $\frac{3}{10}$ der Wehrhöhe p' übersteigt. Ist die Abfallhöhe z kleiner als $\frac{1}{3}$ der

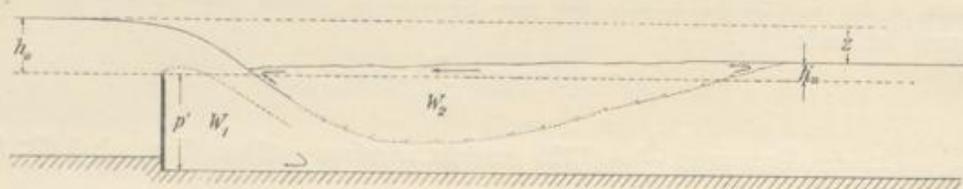


Abb. 8. Querschnitt durch einen wassergefüllten Strahl mit verdecktem Fuß.

Wehrhöhe p' , so bildet sich stets der gewellte Strahl aus. Bei Abfallhöhen, die zwischen $\frac{3}{10} p'$ und $\frac{1}{3} p'$ liegen, kann sowohl der wassergefüllte als auch der gewellte Strahl vorkommen, wobei zuweilen bei ungeänderten Abflußverhältnissen ein beständiger Wechsel zwischen beiden Strahlarten erfolgt.

Der Fuß des wassergefüllten Strahles ist bei einem als Grundwehr wirkenden Wehre dann verdeckt, wenn die Stauhöhe z kleiner als $\frac{3}{4}$ der Wehrhöhe p' ist.

Bei Grundwehren tritt demnach auf:

1. der wassergefüllte Strahl mit freiem Fuß, wenn:

$$z > 0,75 \cdot p';$$

2. der wassergefüllte Strahl mit verdecktem Fuß, wenn:

$$0,75 \cdot p' > z > 0,3 p';$$

3. der wassergefüllte Strahl mit verdecktem Fuß oder der gewellte Strahl, wenn:

$$0,3 p' > z > \frac{1}{3} p';$$

4. der gewellte Strahl, wenn:

$$\frac{1}{3} p' > z.$$

Ist der Überfallkoeffizient bei einem wassergefüllten Strahl mit verdecktem Fuß bei einem Grundwehr

$$\mu' = \gamma \cdot \mu,$$

so ist — ebenfalls nach Bazin —

$$\gamma = 1,05 \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{h_u'}{p'} \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{z}{h_0}}.$$

Diese Formel gibt zuverlässige Werte mit Ausnahme von denjenigen Fällen, bei denen die Werte h_0 und h_u sehr klein sind.

Bei allen besprochenen Arten von freien Strahlen bei dünnwandigen scharfkantigen Wehren ändert sich die Größe des Überfallkoeffizienten sehr wesentlich mit der Strahlsenkung c und der Kontraktion f .

Die Werte von c und f wiederum sind abhängig von der Differenz des Luftdruckes zu beiden Seiten des Strahles. Bazin hat nun gefunden, das durch Messung dieser Druckdifferenz ein sehr gutes Mittel erhalten wird, um aus der bekannten Größe μ des gelüfteten freien Strahles die Werte μ' für sämtliche anderen Arten von freien Strahlen bei dünnwandigen lotrechten Wehren mit scharfer Überfallkante zu bestimmen.

Wird durch q die Höhe einer Wassersäule bezeichnet, welche dem Überdruck der Luft bzw. des Wassers unmittelbar unter dem Strahl gegenüber dem Druck der Außenluft entspricht, so daß demnach bei einem Überdruck von $\frac{1}{100}$ Atmosphären der Wert $q = \frac{10,3}{100} = +0,103$ m gesetzt werden muß, bei einer Luftverdünnung um $\frac{1}{100}$ Atmosphäre aber $q = -0,103$ m sein würde, so berechnet sich der Wert μ' nach Bazin aus den folgenden Gleichungen:

1. Für $\frac{q}{h_0} = 0$ (verdeckter Fuß) $\mu' = \mu$.
- 2a. Für $\frac{q}{h_0} < 0$ (verdeckter Fuß) $\mu' = \left\{ 1 - 0,235 \frac{q}{h_0} \left(1 + 7 \frac{q}{h_0} \right) \right\} \cdot \mu$.
- 2b. Für $\frac{q}{h_0} < 0,3$ (freier Fuß) $\mu' = \left\{ 1,01 - 0,22 \frac{q}{h_0} \right\} \cdot \mu$.
3. Für $0 < \frac{q}{h_0} < 0,6$ (verdeckter Fuß) $\mu' = \left\{ 1 - 0,235 \cdot \frac{q}{h_0} \left(1 + \frac{q}{h_0} \right) \right\} \cdot \mu$.
4. Für $\frac{q}{h_0} > 0,6$ (verdeckter Fuß) $\mu' = \sqrt[3]{1 - \frac{q}{h_0} \cdot \left\{ 1 + 0,04 \frac{h_u}{p} \right\}} \cdot \mu$.

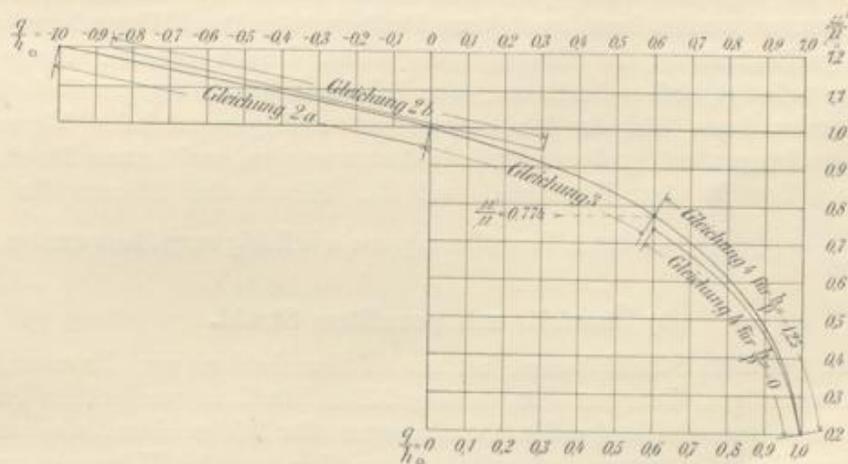


Abb. 9. Darstellung der Abhängigkeit des Überfallkoeffizienten von den Druckverhältnissen unter dem Strahl.

In Abb. 9 sind diese Werte graphisch dargestellt, und zwar so, daß zu den Werten $\frac{q}{h_0}$ als Abszissen die Werte $\frac{\mu'}{\mu}$ als Ordinaten aufgetragen wurden.

Dabei wurde der aus der Gl. 4 abgeleitete Teil der Kurve, der von dem veränderlichen Werte $\frac{h_u}{p}$ abhängig ist, zweimal aufgetragen, und zwar für die Werte $\frac{h_u}{p} = 0$ und $\frac{h_u}{p} = 1,25$, da diese Werte als Grenzwerte betrachtet werden können, so daß die richtige Kurve für einen bestimmten Fall zwischen den beiden aufgetragenen Kurven liegt. Die geringe Entfernung der beiden aufgetragenen Kurven läßt erkennen, daß der Einfluß der Größe $\frac{h_u}{p}$ auf μ' nur gering ist. Ohne erheblichen Fehler könnte

die Gleichung 4 denn auch durch die von $\frac{h_u}{p}$ unabhängige Gleichung:

$$\mu' = 1,02 \sqrt[3]{1 - \frac{q}{h_0}} \cdot \mu$$

ersetzt werden.

Die Abb. 9 gestattet für einen bekannten Wert von q das Abgreifen des Wertes $\frac{\mu'}{\mu}$ und dadurch die Bestimmung von μ' aus der bekannten Größe von μ .

Die Bestimmung des Wertes q , des Überdruckes der Luft, bzw. des Wassers unmittelbar unter dem Strahl wird am einfachsten durch Bestimmung des Höhenunterschiedes des Wasserspiegels in den beiden Schenkeln einer U-förmigen Glasröhre festgelegt, von denen der eine mit der Außenluft, der andere aber durch eine Rohrleitung mit dem Raume unmittelbar unter dem Strahl in Verbindung steht.

Im Karlsruher Laboratorium ist der mit der Außenluft verbundene Schenkel als Gefäß von erheblicher Querschnittsgröße ausgebildet worden, sodaß Änderungen in der Höhenlage des Wasserspiegels im anderen, aus einer dünnen Glasröhre hergestellten Schenkel keinen merklichen Einfluß auf die Füllhöhe dieses Gefäßes ausüben. Da die Lage des Wasserspiegels in diesem Gefäße demnach als unveränderlich angenommen werden kann, genügt zur Festlegung der Druckhöhenchwankungen die alleinige Beobachtung des Wasserspiegels in dem dünnen Glasrohr. Dieses Glasrohr ist so befestigt, daß es leicht um jeden beliebigen Winkel α gegen die Lotrechte geneigt werden kann. Bei der Wahl eines großen Neigungswinkel α können die Druckschwankungen mit großer Schärfe bestimmt werden, weil einem Druckunterschied vom Gewicht einer Wassersäule von der Höhe h eine Ablesungslänge von $\frac{h}{\sin(90 - \alpha)}$ entspricht, die durch Vergrößerung von α beliebig vergrößert werden kann.

b) Überfälle mit gewelltem Strahl.

Der gewellte Strahl kommt fast nur bei Grundwehren vor. Er entsteht bei einem dünnwandigen Wehr aus dem wassergefüllten Strahl mit verdecktem Fuß gewöhnlich dann, wenn bei steigenden Abflußmengen oder infolge einer Aufstauung des Unterwassers der Höhenunterschied zwischen dem Ober- und dem Unterwasserspiegel, die Stauhöhe x , sich auf $0,16 p'$ bis $0,2 p'$ verringert hat. Aus dem gewellten Strahl entsteht dagegen umgekehrt der wassergefüllte Strahl erst dann, wenn der Wasserabfall bis auf $x = 0,28 p'$ bis $0,3 p'$ zugenommen hat. Zwischen den genannten Grenzwerten von x sind demnach beide Strahlarten möglich. Zuweilen wird sogar bei ungeänderten Abflußverhältnissen ein wiederholter Wechsel der einen Strahlform in die andere beobachtet, ohne daß sich ein Grund für die Änderung der Strahlbildung erkennen läßt. Entsteht der gewellte Strahl aus dem wassergefüllten Strahl mit verdecktem Fuß, so hebt sich der Strahl über die ihn verdeckende, meist große Wasserwalze; die Oberfläche des Strahles wird sichtbar. Im Schnitt rechtwinklig zur Wehrachse krümmt sich die Oberfläche nach einer Wellenlinie, die ihre Lage nicht verändert. Gewöhnlich lassen sich 2—3 parallel zum Wehre verlaufende Wellenberge unterscheiden, deren Scheitel über dem Unterwasserspiegel liegt, während die Wellentäler unter die Unterwasseroberfläche hinunterreichen. Die erste und höchste Welle schließt sich unmittelbar an den Absturz des Wehres an.

Stromabwärts nimmt die Höhe der einzelnen Wellen schnell ab. Die einzelnen Wellen kehren ihre steilere Seite dem Oberwasser zu. Diese Seite besitzt zuweilen eine solche Steilheit, daß sich durch das auf ihnen zurückfließende Wasser kleine flache Wasserwalzen ausbilden, die aber die Gesamterscheinung des Strahles nur wenig beeinflussen.

Unter dem gewellten Strahle befindet sich eine meist sehr umfangreiche Wasserwalze, deren Querschnitt etwa die Form eines rechtwinkligen Dreieckes besitzt. Die dem Strahle zugekehrte Hypothense dieses Dreieckes ist schwachgewellt, aber in ihrem genauen Verlauf schwer bestimmbar. Den gewellten Strahl bei einem dünnwandigen Wehr mit scharfer Überfallkante zeigt Taf. III, Abb. 15.

Wie beim wassergefüllten Strahle mit verdecktem Fuß kann $\mu' = \gamma \cdot \mu$ gesetzt werden, worin:

$$\gamma = 1,05 \left(1 + \frac{1}{3} \frac{h_u'}{p'} \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{x}{h_0}} \text{ ist.}$$

In ganz ähnlicher Weise bildet sich auch bei Wehren mit breiter Krone der gewellte Strahl aus, wie Abb. 23 auf Taf. III zeigt.

c) Überfälle mit angeschmiegtm Strahl.

Bei fehlender Lüftung des Raumes unter dem Strahl entsteht bei Wehren mit scharfer Überfallkante zuweilen eine weitere bemerkenswerte Strahlform, der **angeschmiegte Strahl** (*nappe adhérente*), die dem aufliegenden Strahl der Schußwehre ähnlich ist, die sich aber von diesem dadurch unterscheidet, daß sich der Strahl in seinem oberen Teile vom Wehr trennt, wobei zwischen dem Wehr und dem Strahl ein Zwischenraum verbleibt, der beim aufliegenden Strahl fehlt.

Das Abheben des Strahles erfolgt wie beim freien Strahl unmittelbar an der scharfen Überfallkante, indem das Beharrungsvermögen des über die Wehrkante fließenden Wassers eine plötzliche Änderung der Richtung der Wasserfäden verhindert. Der Strahl fällt indessen nicht frei zur Unterwasserrinne hinunter, sondern wird durch den Überdruck der Außenluft zur Wehrwand zurückgebogen, wobei er sich tangential an diese anschmiegt.

Der bei einer lotrechten Abfallwand in seinem oberen Teil, dem Kopf, überhängende Strahl zeigt in diesem Fall eine faltenförmige Oberfläche, die Bazin mit einem wehenden Vorhange vergleicht. Der Fuß des Strahles kann frei (Taf. III, Abb. 1—3) oder bei hohen Unterwasserständen durch eine Wasserwalze verdeckt (Taf. III, Abb. 7) sein. In letzterem Falle wird die Form des Strahles von der Höhenlage des Unterwasserspiegels beeinflußt.

Je nachdem der Raum zwischen der Abfallwand des Wehres und dem oberen Teile des fallenden Strahles ganz, zum Teil oder überhaupt nicht mit Wasser gefüllt ist, entsteht:

1. der angeschmiegte Strahl mit wassergefülltem Kopf (Taf. III Abb. 1);
2. der angeschmiegte Strahl mit teilweise wassergefülltem Kopf (Taf. III Abb. 2);
3. der angeschmiegte Strahl mit luftgefülltem Kopf (Taf. III Abb. 3).

Von diesen drei verschiedenen Strahlarten ist der Strahl mit wassergefülltem Kopf der am häufigsten vorkommende und beständigste. Der Strahl mit teilweise

wassergefülltem Kopf tritt auch zuweilen als beständiger Strahl auf, während der Strahl mit luftgefülltem Kopf nur als Übergangsform zum freien Strahl zu betrachten ist und meist keinen längeren Bestand hat.

1. Der angeschmiegte Strahl mit wassergefülltem Kopf (Taf. III Abb. 1) kann aus dem gelüfteten Strahl entstehen, wenn bei bestimmten Überfallhöhen die Lüftung unterbrochen wird. In diesem Falle geht der Strahl zunächst durch allmähliche Verminderung der unter dem Strahle eingeschlossenen Luftmenge in den gesenkten Strahl über, der nach Beseitigung aller Luft unter dem Strahl die Form des wassergefüllten Strahles annimmt. Der auf diese Weise entstandene wassergefüllte Strahl ist aber gleichfalls nur eine Übergangsform, indem sofort nach seiner Entstehung der Fuß des Strahles sich an die Abfallwand anschmiegt, womit die Ausbildung des angeschmiegtten Strahles beendet ist. Durch den beschriebenen Entwicklungsvorgang kann ein beständiger angeschmiegtter Strahl indessen nur dann entstehen, wenn sich die Überfallkante genügend weit stromaufwärts von der Abfallwand befindet, und wenn außerdem die auf die Längeneinheit des Wehres sekundlich überfließende Wassermenge innerhalb bestimmter Grenzen liegt.

Besteht das Wehr aus einer sehr dünnen Blechwand ohne obere Abschrägung, so daß die Überfallkante in der Ebene der Abfallwand gelegen ist, so ist der entstehende angeschmiegte Strahl nicht beständig, er wechselt vielmehr mit dem freien gelüfteten Strahl ab, indem der Fuß des Strahles in dem Augenblick, in dem er die Wehrwand berührt, sofort wieder von dieser abspringt.

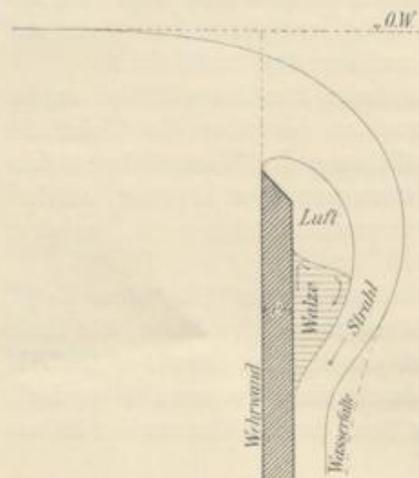


Abb. 10.
Querschnitt durch einen angeschmiegtten Strahl.

auf h_0 verkleinern, weil der Überfallkoeffizient während des Umbildungsvorganges beständig zunimmt. Die Grenzwerte h_0' und h_0'' gehen dabei in die wesentlich kleineren Werte h_0' und h_0'' über.

Ist bei Abflussumengen zwischen Q' und Q'' der angeschmiegte Strahl aus dem gelüfteten einmal entstanden, so kann bei langsamen Änderungen des Wasserabflusses der angeschmiegte Strahl auch bei Abflussumengen bestehen bleiben, die außerhalb der Grenzwerte Q' und Q'' liegen, und zwar abwärts bis zu den kleinsten Abflussumengen

Liegt dagegen die Überfallkante nach Abb. 10 um die Stärke der Wehrwand (e) stromaufwärts von der Abfallwand, so kann ein beständiger angeschmiegtter Strahl entstehen, wenn der Wert e im Verhältnis zu der Wehrhöhe p' genügend groß ist, und wenn ferner der sekundliche Wasserabfluß für 1 m Wehrlänge zwischen den Grenzwerten Q' und Q'' liegt, denen beim gelüfteten Strahl die Überfallhöhen h_0' und h_0'' entsprechen. Ist die Überfallhöhe h_0 kleiner als h_0' oder größer als h_0'' , so kann sich auch bei abgeschrägter Wehrkrone und bei Unterbrechung der Lüftung der angeschmiegte Strahl nicht aus dem gelüfteten Strahl entwickeln. Zwischen den Überfallhöhen h_0' und h_0'' beim gelüfteten Strahl entwickelt sich aber der angeschmiegte Strahl, wobei sich auch bei ungeänderten Abflussumengen die Überfallhöhen von h_0

und aufwärts bis zu einem weiteren Grenzwerte Q''' , dem beim angeschmiegtten Strahl die Überfallhöhe h_o''' und beim gelüfteten Strahle die Überfallhöhe h_o'' entspricht.

Der angeschmiegte Strahl mit wassergefülltem Kopf kann ferner auch dadurch entstehen, daß ein Wehr mit lotrechter Abfallwand und stromaufwärts gegen diese zurücktretender Überfallkante von einer zunächst sehr kleinen und dann allmählich anwachsenden Wassermenge überströmt wird. Der Strahl bleibt dann dauernd angeschmiegt, bis die Überfallhöhe den Grenzwert h_o''' erreicht, bei dem der Strahl sich vom Wehr löst und in den wassergefüllten Strahl übergeht. Bei Überfallhöhen unter h_o' ist der angeschmiegte Strahl aber wenig beständig, insofern er schon bei Erschütterungen oder bei der Berührung mit einem festen Körper in den gesenkten Strahl übergehen kann.

Ist e im Verhältnis zu p' sehr klein (etwa $e = 4$ m/m bei $p' = 250$ m/m) so kann sich der angeschmiegte Strahl nur auf die zuletzt beschriebene Weise und nicht aus dem freien Strahl bilden.

Die Grenzwerte der Überfallhöhen h_o' , h_o'' und h_o''' für den gelüfteten, bzw. h_o' , h_o'' und h_o''' für den angeschmiegtten Strahl stehen bei Strahlen mit freiem Fuß jedenfalls in einer festen, aber durch Versuche noch nicht genügend geklärten Abhängigkeit von den Werten e und p' , bei Strahlen mit verdecktem Fuße auch von der Stauhöhe z .

Für zwei untersuchte Fälle wurden im Karlsruher Laboratorium für Strahlen mit freiem Fuß die folgenden Werte ermittelt:

Wehr Nr.	e in mm	p' in mm	Q	h_o' in mm	h_o'' in mm	Q''	h_o'' in mm	h_o''' in mm	Q'''	h_o''' in mm	h_o''' in mm
I	8	125	0,0137	36,8	31,4	0,0204	47,9	40,9	0,0221	50,5	43,4
II	50	285	0,0666	107,0	90,5	0,0873	127,5	107,5	0,1027	141,5	119,0

worin die Werte Q die Wassermengen in cbm/Sek für 1 m Wehrlänge bedeuten.

Bazin hat den Wert:

$$h_o'' = 0,8 \cdot e + \frac{p'}{3,5}$$

angegeben.

Wird das Unterwasser so hoch aufgestaut, daß kein freier Wassersprung auftritt und eine Wasserwalze den Fuß des Strahles verdeckt, so ist die Überfallhöhe, bis zu welcher der angeschmiegte Strahl entstehen kann, kleiner als der Wert h_o'' für den Strahl mit freiem Fuß. Der obere Grenzwert der Überfallhöhe, bis zu welcher der angeschmiegte Strahl entstehen kann, wird bei dem Strahl mit verdecktem Fuß um so kleiner, je höher der Unterwasserspiegel steht.

Die bei dem angeschmiegtten Strahl mit wassergefülltem Kopf den Raum zwischen der Abfallwand des Wehres und dem Strahl ausfüllende kleine Wassermenge besitzt die Form einer Wasserwalze mit parallel zur Wehrkrone verlaufender Achse. Sie wird von dem fallenden Strahl in drehende Bewegung versetzt, wobei das Wasser an der Seite der Wehrwand emporsteigt.

2. Der angeschmiegte Strahl mit teilweise wassergefülltem Kopf (Taf. III Abb. 2) entsteht, wenn bei der Bildung des angeschmiegtten Strahles aus dem gesenkten Strahl eine kleine Luftmenge im Kopf des Strahles zurückbleibt oder wenn nach dessen Bildung eine kleine Luftmenge in den Kopf des Strahles eintritt.

Die Wasserwalze im Kopf des Strahles füllt dann, wie Abb. 10 zeigt, nur noch einen Teil des Raumes zwischen dem Strahl und der Abfallwand des Wehres aus.

Diese Strahlart ist nicht so beständig, wie die Form mit vollständig wassergefülltem Kopf, weil die im Kopf des Strahles eingeschlossene Luftmenge dadurch vermindert wird, daß Luftbläschen vom Wasser mitgerissen werden, sodaß allmählich der Strahl mit wassergefülltem Kopf entsteht. Der Strahl mit teilweise wassergefülltem Kopf kann indessen, namentlich bei kleineren Überfallhöhen, doch zuweilen eine erhebliche Dauer besitzen, wenn die an der Berührungsstelle zwischen der Oberfläche der Wasserwalze und dem Strahl fortgerissenen Luftbläschen nicht in die Außenluft entweichen, sondern infolge ihres Auftriebes wieder in den Kopf des Strahles zurückkehren.

3. Der angeschmiegte Strahl mit luftgefülltem Kopf (Taf. III Abb. 3) entsteht, wenn unter den angeschmiegten Strahl soviel Luft eingedrungen ist, daß die Wasserwalze vollständig verschwunden ist. Dieser Strahl ist sehr wenig beständig und geht meist unmittelbar nach seiner Bildung durch Eindringen weiterer Luft unter den Strahl in den gesenkten oder gelüfteten Strahl über.

Bei den angeschmiegten Strahlen treten besonders große Überfallkoeffizienten μ' auf. Die genaue Größe derselben läßt sich indessen nur für genau festliegende Wehrformen ermitteln, da die Ausbildung der Abfallwand namentlich aber die Form der Überführung der Wehrschneide in die Abfallwand Einfluß auf den Überfallkoeffizienten ausüben kann.

Wird für den einfachsten Fall, bei dem das Wehr aus einer lotrecht stehenden Tafel mit stromabwärts fallender oberer Abschrägung gebildet wird, $\mu' = \delta \cdot \mu$ gesetzt, so wurde bei verschiedenen im Karlsruher Laboratorium ausgeführten Versuchen Werte δ bis zu 1,3 gefunden. Bei keinen der beschriebenen anderen Strahlformen werden gleichgroße Überfallkoeffizienten beobachtet.

Für einige Wehrformen mit unter einem Winkel von 45° stromabwärts abgesehrägten Schneiden hat Bazin für verschiedene Überfallhöhen, die in dem graphischen Plane Abb. 11 zusammengestellten Werte von δ gefunden.

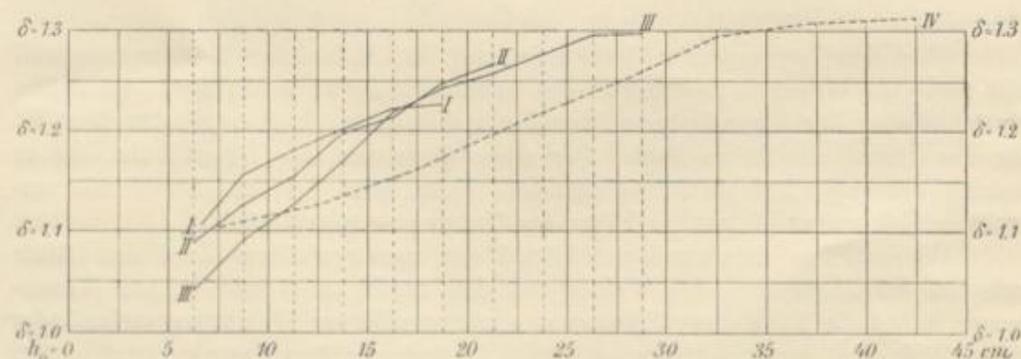


Abb. 11. Zusammenstellung der Werte δ für Überfälle mit angeschmiegtem Strahl nach Bazin.

I.	Wehrstärke	$e = 10$ cm,	Wehrhöhe	$p' = 35$ cm.
II.	"	$e = 10$ "	"	$p' = 50$ "
III.	"	$e = 10$ "	"	$p' = 75$ "
IV.	"	$e = 15$ "	"	$p' = 113$ "

Die aufgetragenen Linien für die Werte δ bei verschiedenen Überfallhöhen zeigen — jedenfalls infolge kleiner Beobachtungsfehler — keinen streng stetigen Verlauf, sie lassen aber erkennen, daß bei den untersuchten Wehrformen die Werte von δ mit zunehmender Überfallhöhe stark ansteigen, was bei den in Karlsruhe untersuchten schwächeren Wehren nicht beobachtet wurde.

Ist bei abgeschrägter Wehrkrone die Überfallhöhe im Verhältnis zur Wehrstärke nur gering, so kann sich der Strahl auch schon an die Wehrkrone anschmiegen, während er sich vor der Abfallwand entweder als freier Strahl weiterentwickelt (Abb. 12b) oder zum zweiten Male dem Wehrkörper anschmiegt (Abb. 12a und 12c).

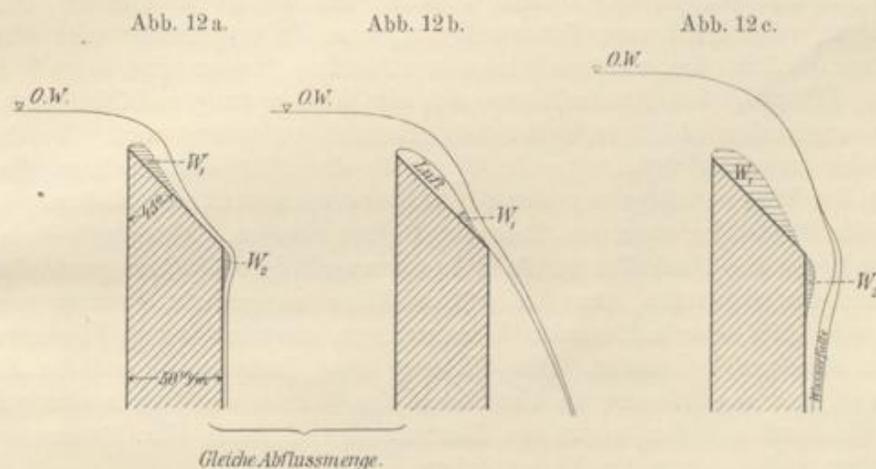


Abb. 12. Ausbildung angeschmiegener Strahlen bei abgeschrägten Wehren.

Steigt die Überfallhöhe über das in Abb. 12c dargestellte Maß an, so findet ein Anschmiegen an die Wehrkrone nicht mehr statt, und es entsteht die früher besprochene Form des nur an die Abfallwand angeschmiegenten Strahles, indem sich die beiden Wasserwalzen W_1 und W_2 zu einer einzigen Walze vereinigen.

Bei Wehren mit scharfkantig begrenzter, wagerechter Krone kann ebenfalls der an die Krone angeschmiegte Strahl auftreten, indem sich der Strahl an der Schnittlinie der Stauwand mit der Wehrkrone vom Wehrkörper abhebt und sich erst weiter stromabwärts wieder auf die Wehrkrone auflegt, wobei sich zwischen dem Strahl und der Wehrkrone eine flache Wasserwalze ausbildet. Ist die Kante zwischen der Stauwand und der Krone abgerundet, so wird die Walze dadurch verkleinert und bei starker Abrundung ganz zum Verschwinden gebracht. Der Strahl bleibt dann anliegend. An der Kante zwischen der Wehrkrone und der Abfallwand hebt sich der an die Krone angeschmiegte Strahl bei scharfkantiger Begrenzung zum zweiten Male vom Wehrkörper ab, worauf er entweder frei zur Flußsohle hinabstürzt oder sich nochmals an den Wehrkörper anschmiegt. Das Abheben des Strahles kann auch hier durch eine genügend starke Abrundung der Überfallkante verhindert werden, wobei der angeschmiegte Strahl in den aufliegenden übergeht.

Bei dem auf Taf. III in den Abb. 16—23 dargestellten Wehr, das schwach abgerundete Kanten besitzt, wurden auf der Wehrkrone zuweilen noch kleine und flache Wasserwalzen beobachtet und bei der in Abb. 16 dargestellten Überflutungshöhe wurde auch eine kleine Wasserwalze im Kopfe des Strahles beobachtet, so daß

diese Abbildung streng genommen nicht einen aufliegenden, sondern einen angeschmiegteten Strahl zeigt. Die nur kleinen und sehr flachen Walzen konnten in ihren Begrenzungen indessen nicht genau genug aufgenommen werden und sind daher in die Abbildungen nicht eingezeichnet worden.

3. Der Wasserabfluß bei Stufenwehren.

Bei den Stufenwehren wird das Wasser in einzelnen, durch wagerechte Abschußböden getrennten Abstürzen von der Wehrkrone zur Flußsohle geleitet. Die Geschwindigkeit, mit der das Wasser unterhalb des Wehres im Flußbett zum Abfluß kommt, wird dabei wesentlich verringert, wenn die wagerechten oder schwach geneigten Abschußböden, welche die lotrechten Abstürze trennen, eine so große Breite besitzen, daß auf jedem Abschußboden sich ein Wassersprung ausbilden kann, wobei die wagerechte Abflußgeschwindigkeit erheblich verkleinert wird. Durch eine rauhe oder stromabwärts ansteigende Oberfläche der Abschußböden kann die Entfernung der Wassersprünge von den Absturzwänden verkürzt und dadurch die erforderliche Breite der einzelnen Stufen verkleinert werden. Aber auch dann noch muß die Breite der Abschußböden die Höhe der zugehörigen Abstürze gewöhnlich um ein Mehrfaches übertreffen, wenn bei größeren Wassermengen ein Wassersprung entstehen soll. Bei sehr bedeutenden Wassermengen entstehen keine Wassersprünge auf den einzelnen Wehrstufen. Die Wirkung eines Stufenwehres auf die Abflußgeschwindigkeit des Wassers im Unterkanal des Wehres bleibt dann eine geringe. Dieser Umstand und der bedeutende Materialaufwand lassen die Stufenwehre im allgemeinen nicht als zweckmäßig erscheinen.