

# **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]**

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

# Festschrift

zur

Feier des zweiundfünfzigsten Geburtstages  
Seiner Königlichen Hoheit des Grossherzogs

## FRIEDRICH II.

herausgegeben von der

Grossherzoglichen Technischen Hochschule

### FRIDERICIANA

unter dem Rektorate von Dr. Adolf Krazer

INHALT:

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

von

Th. Rehbock



XI 480

# Festschrift

zur

Feier des zweiundfünfzigsten Geburtstages  
Seiner Königlichen Hoheit des Grossherzogs

## FRIEDRICH II.

herausgegeben von der

Grossherzoglichen Technischen Hochschule

### FRIDERICIANA

unter dem Rektorate von Dr. Adolf Krazer

INHALT:

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

von

Th. Rehbock

v.

988 83549,52.1909

Handwritten text, possibly a title or author name, appearing as a faint bleed-through from the reverse side of the page.

Handwritten text, possibly a subtitle or additional information, appearing as a faint bleed-through from the reverse side of the page.

Handwritten text, possibly a name or date, appearing as a faint bleed-through from the reverse side of the page.



## Vorwort.

Trotz allen auf die Erforschung des Abflußproblemcs verwandten Scharfsinnes ist es seither noch nicht gelungen, die Vorgänge, die sich beim Wasserabfluß abspielen, auf theoretischem Wege klarzulegen, weil die Gesetze, unter denen sich der Wasserabfluß vollzieht, sehr verwickelter Natur und noch nicht genügend bekannt sind. Sogar für die einfachste Art des Wasserabflusses, in geraden Rinnen mit unverändertem Querschnitt, ist es noch nicht möglich gewesen, den Einfluß der Reibungswiderstände, die zwischen dem Wasser und den Rinnenwandungen und im Innern des Wassers auftreten, in einwandfreier Weise festzulegen, so daß auch für die stetige gleichförmige Bewegung des Wassers seither nur auf Grund von Erfahrungswerten praktisch brauchbare Formeln gewonnen werden konnten. Bei dem Wasserabfluß über Wehre liegen nun aber die Verhältnisse noch wesentlich schwieriger. Denn bei den Überfällen der Wehre handelt es sich nicht nur um die Festlegung der Bewegungsvorgänge im Innern einer Wassermasse von bekannter Begrenzung, sondern auch um die Bestimmung der äußeren, sehr mannigfaltig gestalteten Begrenzungen selbst. Dadurch wird das ganze Problem noch wesentlich schwieriger, und es kann kaum angenommen werden, daß es glücken wird, eine befriedigende Lösung auf rein theoretischem Wege zu finden. Bei der Klarlegung der Abflußvorgänge bei Wehren wird man daher wohl stets im wesentlichen auf den Weg der Beobachtung angewiesen bleiben. Zahlreiche Forscher haben denn auch schon den Weg des Versuches zur Klärung des Wasserabflusses bei Wehren betreten. Sie haben eine Menge wertvollen Materiales zusammengetragen, ohne daß es indessen seither möglich gewesen ist, alle Erscheinungen, die bei den Überfällen auftreten, vollständig klarzulegen.

Aus wissenschaftlichem Interesse, aber auch zur Förderung des praktischen Wasserbaus, ist es daher erwünscht, daß die Ausbildung der Überfälle bei Wehren noch weiter experimentell untersucht wird.

Im Flußbaulaboratorium der technischen Hochschule zu Karlsruhe sind in den letzten Jahren Einrichtungen erstellt worden, die sowohl als Lehrmittel als auch zur weiteren Erforschung der Abflußvorgänge unter verschiedenen Verhältnissen dienen sollen. Diese neuen Anlagen sind in der vorliegenden Schrift kurz beschrieben worden. An der Hand einer allgemeinen Schilderung der verschiedenen Ausbildung von Überfällen bei Wehren ohne seitliche Zusammenziehung des Strahles ist denn auch Mitteilung über die Ergebnisse der bereits ausgeführten, allerdings noch sehr lückenhaften Versuche gemacht worden, die verschiedene Unterbrechungen

durch die Ergänzung und Verbesserung der Versuchsanlagen und durch die Fortführung früher begonnener Untersuchungen auf anderen Gebieten erleiden mußten.

Die Versuche im Karlsruher Laboratorium sind seither nur bezüglich der Form der Überfälle bei scharfkantigen Wehren mit lotrechter Stauwand, die bisher, soweit dem Verfasser bekannt, nur in ihrem oberen Teile genauer aufgenommen war, zu einem gewissen allerdings auch noch nicht endgültigem Abschlusse gelangt. Die Untersuchungen über die Form der Strahlbildung bei anderen Wehren, über die Bewegungsvorgänge im Wasser und die Größe der Überfallkoeffizienten wurden dagegen erst begonnen. Die vollständige Durchführung der geplanten Versuche wird noch mehrere Jahre in Anspruch nehmen.

Wo die eigenen Untersuchungen noch keinen Aufschluß erteilen konnten, wurde auf ältere Versuche, namentlich auf diejenigen Bazins Bezug genommen.

Die vorliegende Arbeit ist daher nur als eine vorläufige zu betrachten, die einer wesentlichen Erweiterung und Ergänzung durch die noch ausstehenden Versuche bedarf.

Durch die Veröffentlichung der Pläne der im Karlsruher Flußbaulaboratorium hergestellten Versuchseinrichtungen hofft der Verfasser die Erbauung ähnlicher Versuchsanlagen zu veranlassen und Mitarbeiter für die Erforschung des Wasserabflusses über Wehre zu gewinnen.

Karlsruhe, im Mai 1909.

Th. Rehbock.

Die Art, in welcher das Wasser über einen Wehrkörper hintberfließt, ist bei Wehren mit geneigten, gekrümmten, lotrechten oder stufenförmigen Abfallböden sehr verschieden. Da aber durch die Form der Überfälle die Angriffe des Wassers auf den Wehrkörper und das Sturzbett sehr wesentlich bedingt werden, ist es von Wichtigkeit, daß der Ingenieur sich ein klares Bild darüber macht, in welcher Weise sich bei den verschiedenen vorkommenden Wasserführungen die Überfälle ausbilden, um den Angriffen durch richtige Anlage der Wehre und der Sturzbetten Rechnung tragen zu können. Dazu genügt es nicht, die Lage der sichtbaren Oberfläche des Wasserstrahles zu kennen. Vielmehr sollte die vollständige Form des Wasserstrahles und die Bewegung der einzelnen Wasserfäden möglichst genau bekannt sein.

Da dies seither meist nicht der Fall war, und auf Zeichnungen und sogar in Lehrbüchern die Form der Überfälle vielfach falsch angegeben wurde, sollen im folgenden die verschiedenen Arten der Überfälle bei den gebräuchlichsten Wehren in ihrer Form und ihren Eigenschaften beschrieben werden.

Die Ausbildung der Überfälle beim Abfluß von Wasser über Wehre von verschiedener Form ist in den Jahren 1886 bis 1895 in sehr eingehender Weise durch den französischen Ingenieur H. Bazin mit Unterstützung des französischen Ministeriums der öffentlichen Arbeiten untersucht worden, wobei sich Bazin auf die älteren Arbeiten von Boileau<sup>1)</sup>, Fteley und Stearns<sup>2)</sup> und Boussinesq<sup>3)</sup> stützen konnte. Bazin hat dabei der Einwirkung der Form des Strahles und der Druckverhältnisse unter dem Strahle auf den Überfallkoeffizienten ganz besondere Beachtung geschenkt. Das Ergebnis seiner Untersuchungen hat er zunächst in sechs Aufsätzen in einzelnen Jahrgängen der *Annales des ponts et chaussées* (1888—1898) niedergelegt und dann in einem besonderen Werke<sup>4)</sup> in übersichtlicher Weise zusammenfassend bearbeitet, das grundlegend für die Kenntnis der Überfälle geworden ist, und auf dessen Angaben sich auch die folgenden Besprechungen vielfach stützen.

Die Versuche Bazins wurden in einer großen unter dem Boden gelegenen Rinne bei Dijon ausgeführt, die aus dem Kanal von Burgund gespeist wurde. Bei der gewählten Anordnung der Rinne waren die Überfälle nur von oben, nicht aber im Querschnitte sichtbar, und es konnten daher die Vorgänge unterhalb der Oberfläche nicht unmittelbar beobachtet werden. Um die Überfälle auch im Querschnitte sichtbar und dadurch die Vorgänge im Innern des Wassers der Beobachtung zugänglich

1) Boileau, *Traité de la mesure des eaux courantes*, 1854.

2) *Transactions of the American Soc. of Civil Engineers*, 1883.

3) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* 1887.

4) H. Bazin, *Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoirs*, Paris 1898.



zu machen, wurden im Flußbaulaboratorium der Technischen Hochschule zu Karlsruhe Anordnungen getroffen, die es gestatten, die Form der Überfälle im Querschnitte in genauer Weise zu beobachten, sowie die Bewegung der einzelnen Wasserfäden durch eingebrachte Farbstoffe, feste Beimengungen oder eingeblasene Luftbläschen kenntlich zu machen und ihre Richtung und Geschwindigkeit zu bestimmen. Dabei ist die Versuchsanlage so ausgebildet worden, daß es möglich ist, die Untersuchungen auch auf die Umbildung des Strahles nach dem Absturz auf die Sohle der Unterwasserrinne bis zu derjenigen Stelle auszudehnen, an welcher der ruhige Abfluß des Unterwassers beginnt. Gerade dieser Untersuchung wurde ein besonderer Wert beigemessen, weil von der Umbildung des Strahles im Unterwasser die Beanspruchungen des Sturzbettes wesentlich abhängen.

### I. Teil.

## Die Versuchsanlage im Flußbaulaboratorium der Technischen Hochschule zu Karlsruhe.

Zur Ausführung von Überfallversuchen wurde im Flußbaulaboratorium der Technischen Hochschule zu Karlsruhe in den Jahren 1905—1909 eine Anlage erbaut, die es ermöglicht, Wehrmodelle zwischen zwei parallelen Spiegelglaswänden anzubringen und von Wasser überströmen zu lassen. Wegen des beschränkten Raumes war es dabei nötig, die neuen Versuchsanlagen auf die große Versuchsrinne für Flußbauversuche aufzustellen, die schon seit dem Jahre 1902 in Betrieb ist, und deren Ausbildung in der Zeitschrift für Bauwesen 1903 beschrieben wurde. Da diese Versuchsrinne nicht dauernd außer Betrieb gesetzt werden darf, wurden die neuen Anlagen so ausgebildet, daß sie in möglichst einfacher Weise entfernt werden können. Die neuen Einrichtungen für die Ausführung von Überfallversuchen, wie sie nach verschiedenen Änderungen und Erweiterungen nunmehr in Benutzung stehen, sind auf den Tafeln I und II dargestellt.

Wie aus Taf. I, Abb. 1 ersichtlich ist, dient für die Wasserzuführung bei den Überfallversuchen die gleiche Pumpenanlage, die bei den Flußbauversuchen Verwendung findet. Die im Kellerraum des Laboratoriums aufgestellte, durch einen 13-pferdigen Gleichstrommotor betriebene Kreiselpumpe entnimmt das Wasser aus dem Hauptwasserbehälter, der unter dem Fußboden des Laboratoriums in den Keller eingebaut ist, und drückt es durch das Steigrohr in die unter der Decke des Laboratoriums angebrachte wagerechte Rohrleitung, aus der es der großen Rinne für die Flußbauversuche oder einer Rücklaufrohrleitung zugeführt wird, aus denen es wieder in den Hauptwasserbehälter gelangt.

Aus der wagerechten Rohrleitung an der Decke des Laboratoriums, durch welche die Pumpe in geschlossenem Kreislauf je nach der Füllhöhe des Hauptbehälters 60—70 l Wasser in der Sekunde hindurchpreßt, wird das Wasser für die Überfallversuche entnommen. Dazu wurde am Anfang des wagerechten Rohrstranges (Taf. II, Abb. 2) eine neue Rohrleitung abgezweigt, in die ebenso wie in die vorhandene alte Rohrleitung ein Abschlußschieber eingebaut wurde. Durch entsprechende Stellung der beiden Schieber kann ein beliebiger Teil des von der Pumpe zugeführten Wassers durch das abgezweigte Rohr zu der Rinne für die Überfallversuche abgeleitet werden.

Die abgezweigte neue Rohrleitung, die wie die alte Rohrleitung eine lichte Weite von 20 cm besitzt, liegt parallel zu der alten Leitung an der Decke des Laboratoriumsraumes und ist durch einen gekrümmten Rohrstrang, der drei Krümmen enthält, durch Vermittlung eines kleineren Einlaufkastens an ein großes aus Eisenblech hergestelltes Beruhigungsbecken angeschlossen.

Wie die Abbildungen 1 und 2 auf Taf. I und Abb. 1 und 2 auf Taf. II zeigen, führt die Rohrleitung das Wasser in den Einlaufkasten von oben her ein. In dem Einlaufkasten wird das Wasser in zwei Hälften geteilt, welche durch zwei rechteckige Öffnungen von je 400 mm Höhe und 400 mm Breite in die seitlichen Teile des Beruhigungsbeckens fließen.

Das Beruhigungsbecken ist ein Blechkasten von 1,90 m Länge, 1,0 m Breite und 1,3 m Höhe, der wagenartig auf vier walzenförmigen Rädern ruht und auf den Rändern der großen Rinne leicht verschoben werden kann. Dieser Kasten ist durch zwei lotrecht stehende Wände aus gelochten Blechen in drei Teile geteilt, von denen die beiden äußeren zur Beruhigung des Wassers dienen, während der mittlere, in den das Wasser durch die gelochten Blechwände gleichmäßig und ruhig einfließt, durch einen rechteckigen Ausschnitt von 500 mm Breite und 200 mm Tiefe mit der Rinne für die Überfallversuche in Verbindung steht. Der rechteckige Ausschnitt ist mit einem 6 mm starken, sauber bearbeiteten Messingblech mit abgeschrägten Kanten umkleidet und dient zur Messung der abfließenden Wassermenge, wozu eine genaue Bestimmung der Höhe des Wasserspiegels im speisenden Becken über der wahren Überfallkante des rechteckigen Ausschnittes erforderlich ist. Die Einmessung des Wasserspiegels erfolgt durch einen Spitzenmaßstab, dessen Beobachtungsspitze von unten her bis zur Höhe des Wasserspiegels hinaufgeschraubt wird, wobei die Bestimmung der Spitzhöhe durch Ablesung an einem Maßstab mit Nonius erfolgt. Die Höhe der Überfallkante des rechteckigen Ausschnittes wird durch eine Wasserwaage auf den Spitzenmaßstab übertragen. Zur bequemen Beobachtung der Wasserspiegelhöhe dient ferner ein besonders hergestellter Schwimmerpegel, dessen Schwimmer sich in einem Pegelschacht in einer der Ecken des Beruhigungsbeckens bewegt. Dieser Pegelschacht steht durch ein Rohr mit dem mittleren Teil des Beruhigungsbeckens in Verbindung, wie Taf. II, Abb. 2 zeigt. Der Schwimmerpegel (Taf. I, Abb. 3) ist als Uhrpegel so hergestellt, daß der Zeiger einen Weg von 20 mm durchläuft, wenn der Wasserspiegel seine Höhenlage um 1 mm ändert, wobei auch kleine Schwankungen des Wasserspiegels deutlich beobachtet werden können<sup>1)</sup>. Der zweite auf Abb. 2, Taf. II eingezeichnete Pegelschacht ist für die Aufstellung eines selbstzeichnenden Schwimmerpegels vorgesehen.

Über die Überfallkante fließt das Wasser in die Versuchsrinne ein, wobei der sich bildende Strahl frei herunterfällt und von den Seiten her vollständig gelüftet ist. Bei der großen Fallhöhe des Strahles übt die Höhenlage des Unterwasserspiegels in der angeschlossenen Rinnenanlage keinen Einfluß auf die Überfallhöhe aus, was von Wichtigkeit ist, da der Überfall zur genauen Messung der abfließenden Wassermenge benutzt werden soll.

<sup>1)</sup> Der Schwimmerpegel dient nur zur bequemen Bestimmung der kleinen 1 mm nicht erreichenden Wasserspiegelschwankungen, die infolge des ungleichmäßigen Arbeitens der Pumpe bei verschiedenen Belastungen der elektrischen Zentrale auftreten können. Die Ablesung der Überfallhöhen erfolgt sonst am Nonius eines Spitzenmaßstabes oder mit dem Nivellierfernrohr.

Das Wasser gelangt durch eine eiserne Übergangsrinne zunächst in eine 3,70 m lange, mit Winkeleisen armierte Holzrinne von 500 mm Breite und 720 mm Höhe, die zur Beruhigung des Wassers und zur Eichung des Meßüberfalles dient. Zur Beruhigung des über den Meßüberfall fließenden Wassers sind drei unter einem Winkel von  $45^\circ$  aufgestellte Messingsiebe in Holzrahmen, sowie ein aus Holzleisten hergestelltes Schwimmbrett angebracht (Taf. I, Abb. 1 und Taf. II, Abb. 2). Zur Eichung des Meßüberfalles sind an die Holzrinne beiderseits Blechrohre von 12 cm Lichtweite angeschlossen, die je 16 verschließbare Messingdüsen tragen. Zur Eichung des Meßüberfalles wird die Holzrinne an ihrem unteren Ende durch eine Blechwand wasserdicht abgeschlossen.

Die gesamte vom Meßüberfall her zuströmende Wassermenge muß dann durch die an die Holzrinne angesetzten Blechrohre bzw. durch deren Düsen abfließen, wozu eine entsprechende Anzahl der Düsen durch Beseitigung der angeschraubten Deckel geöffnet wird. Sind bei starkem Wasserzufluß alle 32 Düsen geöffnet, so wird die zuströmende Wassermenge in 32 einzelne Strahlen zerlegt, deren Abflußmengen gesondert bestimmt werden können. Durch Addition der durch alle geöffneten Düsen abfließenden sekundlichen Wassermengen wird der Wasserabfluß über das Meßwehr festgestellt. Der Vorteil, der durch die Teilung des Wassers erreicht wird, besteht darin, daß die Messung der Wassermengen der einzelnen Strahlen mit Eichgefäßen von mäßiger Größe mit genügender Genauigkeit möglich ist, während bei Einleitung der ungeteilten Wassermenge in das Eichgefäß bei der Kürze der Füllzeit eine genügende Schärfe der Messung nicht zu erzielen sein würde. Bei der Eichung des Meßüberfalles muß natürlich streng darauf geachtet werden, daß die Wasserspiegelhöhe oberhalb des Meßüberfalles während der ganzen Dauer einer Eichung unverändert bleibt, was sich durch die beiden seitlich vom Überfallauschnitt angebrachten Schützen oder durch eine mit einem Krahn regulierbare Entlastungsleitung erreichen läßt. Bei der Eichung des Meßüberfalles für eine bestimmte Überfallhöhe wird in der Weise verfahren, daß unter strenger Innehaltung der Überfallhöhe der Wasserabfluß aller geöffneten Düsen der Reihe nach mehrmals bestimmt wird.

Zur Bestimmung der Ergiebigkeit der einzelnen Düsen wird der den Düsen entströmende, frei herabfallende Wasserstrahl unter Benutzung eines kleinen Blechrohres in ein zylindrisches Eichgefäß eingeleitet. Aus der Füllzeit und dem bekannten Inhalt des Eichgefäßes kann die Ergiebigkeit der untersuchten Düse in Litern in der Sekunde bestimmt werden. Die Füllzeit wird durch eine Sekundenuhr mit  $\frac{1}{5}$  Sekundenteilung bestimmt, indem man die Uhr in dem Augenblick, in dem der Strahl mit dem Blechrohr aufgefangen wird, in Gang setzt und sie wieder zum Stehen bringt, wenn das Blechrohr nach Füllung des Eichgefäßes fortgezogen wird. Dabei wird das Eichgefäß nicht ganz bis zum obersten Rande gefüllt, weil der Augenblick der vollständigen Füllung nicht genau genug bestimmt werden könnte. Vielmehr wird mit der Füllung aufgehört, wenn der Wasserspiegel bis in den Hals des Meßgefäßes gestiegen ist. Nach Beruhigung des Wasserspiegels wird die Höhe der Füllung an dem im Halse des Gefäßes angebrachten Maßstab (Taf. II, Abb. 5) abgelesen und der Inhalt des Gefäßes aus der Inhaltskurve des Eichungsgefäßes entnommen. Das verwendete Eichungsgefäß faßt 130 l. Bei der stärksten Wasserführung der Düsen von etwa 2 l/Sek. dauert die Füllung daher reichlich 60 Sekunden, wobei sich noch eine Genauigkeit der Eichung der einzelnen Düsen auf  $\frac{1}{2}$  bis 1% erreichen läßt. Da die Fehler bei den einzelnen Düseneichungen sich zum Teil ausgleichen,

ist die Genauigkeit der Eichung des Überfalles eine ausreichende. Bei abnehmendem Abfluß nimmt infolge der längeren Füllzeit des Eichgefäßes die Genauigkeit der Eichung noch zu. Bei der Eichung des Eichgefäßes muß auch auf die Temperatur des Wassers und auf eine gleichmäßige Befuchtung der Wandungen des Eichgefäßes beim Beginn der einzelnen Füllungen Rücksicht genommen werden. Ist die Füllhöhe des Eichgefäßes bestimmt, so wird der Inhalt durch Drehung des Eichgefäßes mittels der in der Achse angebrachten Kurbel in die große Versuchsrinne für Flußbauversuche entleert, worauf das Eichgefäß sofort wieder zu einer neuen Füllung in die richtige Lage gebracht werden kann (Taf. II, Abb. 3). Zur Messung kleinerer Wassermengen kann die Öffnung der Düsen durch Anschrauben eines Mundstückes aus Messing von 32 mm auf 16 mm verengt werden, damit auch bei geringem Abfluß ein geschlossener Strahl entsteht.

Nach Eichung des Meßüberfalles, die wiederholt und mit möglicher Genauigkeit durchgeführt wurde, konnte die Ausführung der Modellversuche erfolgen. Für diese Versuche sind 2 Glasrinnen vorhanden, die eine von 250 mm, die andere von 500 mm lichter Breite. Die schmale Glasrinne (Taf. I, Abb. 1 und 4) wird an die Holzrinne unter Zwischenschaltung einer Blechplatte mit rechteckiger Öffnung, die breite Glasrinne aber unmittelbar an den Abschlußwinkel der Holzrinne angeschlossen.

Die schmale Glasrinne ist aus 4 Kästen von je 1,0 m Länge und 0,5 m Höhe zusammengesetzt und besitzt einen hölzernen Boden. Die Wehrmodelle werden aus Beton, aus Holz oder aus Blechen hergestellt und mit Kitt gegen die Glaswände und den Boden gedichtet. Zur Aufstauung des Unterwassers werden zwei in dem gleichen Falz laufende Bleche mit ausgeschnittenen wagerechten Schlitzten verwendet, durch deren gegenseitige Versetzung die Stauhöhe geändert werden kann.

Die breite Glasrinne (Taf. II, Abb. 1, 2 und 4) ist, abgesehen von den seitlichen Spiegelglaswänden, ganz in Eisen hergestellt. Die Glaswände greifen unten in vertiefte Rinnen ein, in denen sie durch Holzleisten und durch Kitt wasserdicht befestigt sind. Um die Abflußerscheinung bis zur Sohle durch die Glaswände deutlich verfolgen zu können, hat die Rinne einen zweiten beweglichen Boden aus 5 mm starken Eisenblechtafeln erhalten, der beiderseitig dicht an die Glaswände anstößt. (Taf. II, Abb. 4 und 8.) Die Höhe der einzelnen Teile der Rinne beträgt 720 bzw. 500 mm. Die einzelnen Kästen der Rinne können in beliebiger Folge zusammengefügt werden.

In der Mitte des größten Kastens werden die Wehrmodelle aufgestellt. Dazu ist eine 100 mm hohe Messingwand vorhanden, die durch aufgesetzte Messingplatten bis zu 500 mm erhöht werden kann. Diese Messingwand kann aus der lotrechten Lage bis zu 45° stromaufwärts oder stromabwärts gedreht werden, so daß die Neigung der untersuchten dünnwandigen Wehre auch während der Versuche geändert werden kann. Die Messingplatte greift dazu in eine unter dem Rinnenboden gelagerte Messingachse ein, die beiderseitig durch Stopfbüchsen wasserdicht aus dem Kasten herausgeführt ist. (Taf. II, Abb. 1 und 8.) Die Umlegung der Wehrwand erfolgt von den beiden Seiten der Rinne aus durch unter der Rinne hindurch verbundene Kurbeln. Die Feststellung des Wehres kann in jeder gewünschten Lage durch Feststellstifte erfolgen, die in mit 2 Lochreihen versehene Gradbögen eingreifen. Die Wehrtafel schließt durch Lederdichtungen beiderseitig wasserdicht an die Spiegelglastafeln an und kann oben mit Überfallkanten von verschiedener Querschnittsform versehen werden. Für Modellversuche mit Wehren größerer Stärke oder mit verschiedenen geneigten Begrenzungen können Wehrmodelle aus Holz oder Beton an die bewegliche

Messingwand angeschlossen werden. Auch ist ein Wehr aus Messing vorhanden, dessen Gestalt geändert werden kann. Dieses Wehr ist auf Taf. II in Abb. 7 dargestellt. Es besteht aus einer Mittelwand von veränderlicher Höhe, die an die bewegliche Messingwand angeschraubt und mit Gummistreifen, die durch Schrauben seitlich verschoben werden können, wasserdicht an die Glaswände angeschlossen wird. Auf diese Mittelwand können wagerechte, auswechselbare Messingplatten von verschiedener Breite aufgeschraubt werden, an deren Enden gelenkartig befestigte Messingwände anschließen, die durch Auszugsvorrichtungen verlängert werden können, so daß sie bei jeder gewünschten Neigung bis zum Rinnenboden reichen. Dieses Wehr wird mit einem Segeltuchstreifen von der Breite der Wehrlänge (500 mm) überspannt, der an der unteren Innenseite des Wehres mit einer Spannvorrichtung befestigt wird. Durch die Anbringung beliebig geformter Holzleisten auf der wagerechten Wehrkronenplatte, über die das Segeltuch hinübergelegt wird, kann dem Wehre auch eine gewölbte Krone gegeben werden.

Zur Lüftung des Raumes unter dem Strahl können Lüftungsrohre verschiedener Weite und Gestalt durch den Boden der Rinne hindurch von unten her eingeführt werden. Durch diese Lüftungsrohre, die durch einen Schraubenschluß teilweise oder ganz verschließbar sind, kann auch Luft unter den Strahl eingeblasen oder aus dem Raum unter dem Strahl ausgesaugt werden, sodaß die Spannungsverhältnisse unter dem Strahl beliebig geändert werden können. Durch die durchbohrte Wehrschneide wurden außerdem 2 dünne Messingrohre in den Raum unter dem Strahl eingeleitet, die zu Manometern führen und so die Messung der Luftspannung unter dem Strahl gestatten. Die Manometer bestehen aus Glasröhren, die mit einem größeren mit gefärbtem Wasser gefüllten Becken in Verbindung stehen, und durch Änderung ihrer Neigung die Ablesung der Spannungsverhältnisse unter dem Strahl mit jedem gewünschten Genauigkeitsgrad gestatten. In den Tafeln sind die genannten Vorrichtungen nicht zur Darstellung gelangt.

Um die Tiefe des Unterwassers der Wehre beliebig ändern zu können, ist das Ende der Rinne durch ein Schütz mit verstellbarer Schlitzbreite abgeschlossen (Taf. II, Abb. 2 und 6). Das Schütz, das mit einer scharfen wagerechten Überfallkante versehen ist, wird mit einem doppelten Zahnstangentrieb lotrecht verschoben. Bei der höchsten Stellung schließt es die Rinne vollständig ab, bei der tiefsten Stellung aber gibt es den ganzen Rinnenquerschnitt frei. Dabei besteht das Schütz aus zwei aufeinander liegenden Messingplatten, die 450 mm breite und 15 mm hohe Schlitz enthalten. Durch eine Stellschraube am unteren Ende des Schützes können diese beiden Platten bei jeder Stellung des Schützes lotrecht gegeneinander verschoben werden, wobei die Schlitz sich öffnen bzw. schließen. Durch entsprechendes Öffnen der Schlitz kann der Abfluß des Unterwassers in der ganzen Querschnittshöhe bewirkt werden, wodurch die Entstehung unregelmäßiger Strömungen im Unterwasser vermieden wird, wie sie auftreten müßten, wenn der Abfluß des Wassers allein über eine geschlossene Schützwand erfolgen würde. Zur Verlängerung der Unterwasserinne, die bei manchen Untersuchungen erwünscht ist, kann eine Vertauschung der beiden hohen Glaskästen (Taf. II, Abb. 1) erfolgen. Es ist aber auch noch ein weiterer niedriger Kasten von 1,25 m Länge und 400 mm Höhe für diesen Zweck vorhanden, bei dessen Zufügung die Glasrinne allerdings über die große Eisenrinne für die Flußbauversuche vorsteht, so daß die Rückleitung des Wassers nicht unmittelbar in den Hauptwasserbehälter erfolgen kann. Das Wasser muß vielmehr dabei durch einen

Abfallschacht aus Blech in das gußeiserne, unter dem Laboratoriumsboden liegende Meßgefäß eingeleitet werden, aus dem es durch den vorhandenen Überlauf in den Hauptbehälter zurückfließt.

Die Aufnahme der bei den Versuchen entstehenden Wasserstrahlen kann entweder durch unmittelbares Durchzeichnen auf dünne mattierte Glasplatten, die an die Spiegelglasscheiben angelegt werden, oder in genauerer Weise durch Festlegung einzelner Punkte des Strahlbildes durch Messung erfolgen. Letztere geschieht mit Spitzenmaßstäben. Es sind dies lotrecht in Führungen bewegliche und mit Maßstäben versehene Lineale, die am unteren Ende genau in der Achse der Lineale befindliche Spitzen tragen. Wie aus den Abb. 1 auf Taf. I und II hervorgeht, werden die Spitzen entweder von oben auf den Wasserspiegel aufgesetzt, oder von unten aus dem Wasser heraus bis zur Oberfläche gehoben, wobei die Spitze bügelförmig mit dem Lineal verbunden ist. Die Bestimmung der Höhenlage einzelner Punkte der Wasseroberfläche erfolgt dabei durch Ablesung an einem Nonius, der an der Fassung des Lineals befestigt ist, während das Lineal einen durchlaufenden Maßstab trägt, oder aber mit einem Nivellierinstrument unmittelbar am Maßstab des Lineales. Zur bequemen Verstellung der Spitzenmaßstäbe sind bei der großen Glasrinne justierbare Schienen auf den Kastenrändern angebracht, auf denen Längsschlitten laufen, deren Stellung an einem wagerechten Maßstab abgelesen wird. Die Längsschlitten tragen wiederum Querschlitten, die wie die Längsschlitten auf gehobelten Schienen gleiten. Mit Hilfe dieser doppelten Schlitten können die mit Zahnstangentrieb in ihrer Längsrichtung verschiebbaren Spitzenmaßstäbe bequem über jeden Punkt der Rinne gebracht werden. Zur Bestimmung der unteren Begrenzung eines Wasserstrahles ist es zuweilen nötig, die Spitzenmaßstäbe mit besonders geformten Spitzen zu versehen, weil streng darauf zu achten ist, daß durch die Meßinstrumente die Form des Strahlbildes nicht beeinflußt wird.

Bei Aufzeichnung der in der beschriebenen Anlage beobachteten Überfallbilder wurde stets darauf geachtet, den Abflußvorgang dadurch möglichst klar zu veranschaulichen, daß im aufgenommenen Längsschnitt eine Zerlegung der geschnittenen Wasserflächen in den eigentlichen Strahl, der den Wasserabfluß im wesentlichen bewirkt und in Wasserwalzen erfolgte, die unter oder über dem Strahle liegen, und in denen sich das Wasser im wesentlichen in geschlossenen Bahnen bewegt, so daß sie für den Abflußvorgang von keiner erheblichen Bedeutung sind. Bei den Abbildungen der Taf. III ist diese Zerlegung durch die Farbengebung deutlich hervorgehoben, indem die Schnitte durch den Strahl in dunkelblauer Farbe, diejenigen durch die Wasserwalzen aber in hellblauer Farbe angelegt worden sind. Dabei wurde allerdings von der Kenntlichmachung der Wasserwalzen, die sich auch im Oberwasser der Wehre entwickeln, abgesehen, weil diese den unteren Winkel am Fuß des Wehres ausfüllenden Walzen keine Bedeutung besitzen und sehr veränderlich sind.

Die beiderseitigen Begrenzungen des nicht von Wasserwalzen verdeckten Strahles bilden sich streng gesetzmäßig aus und sind bei gleichen Abflußmengen völlig unveränderlich. Sie verlangen eine scharfe Aufnahme, die mit den Spitzenmaßstäben mit jedem gewünschten Genauigkeitsgrad erzielt werden kann. Die Wasserwalzen, die sich unter oder auf den Strahlen bilden, haben dagegen eine weniger scharfe und ständigen Änderungen unterworfenen Begrenzung, so daß bei ihrer Aufnahme kein sehr großer Genauigkeitsgrad gefordert zu werden braucht. Besonders schwierig gestaltete sich die Bestimmung der Grenzen zwischen den Wasserwalzen

und dem Strahl selbst, da die Bewegungsrichtung der benachbarten Wasserfäden des Strahles und der Walzen die gleiche ist. Auch durch Färbung des Strahles lassen sich diese Grenzen, die auch nicht ganz unveränderlich bleiben, nur schwer bestimmen. Durch Beimengung sehr feiner Schwimmkörper konnten aber auch diese Grenzen wenigstens mit einer guten Annäherung bestimmt werden.

Zur ständigen Aufzeichnung der Höhenlage des Oberwasserspiegels wurde ein selbstzeichnender Schwimmerpegel mit veränderlicher Umdrehungsgeschwindigkeit der Aufnahmewalze (Taf. II, Abb. 4) angeschlossen. Die erforderlichen Geschwindigkeitsmessungen erfolgen am besten mit Woltmanschen Flügeln oder Pitotschen Röhren.

Die seither in Karlsruhe zur Ausführung gelangten Überfallversuche bezweckten in erster Linie die Klarlegung des Abfluvorganges bei verschiedenen Wehrformen. Sie wurden größtenteils in einer älteren Rinne von 250 mm Breite durch den Assistenten des Flußbaulaboratoriums Dr.-Ing. Aichel<sup>1)</sup> ausgeführt, wobei die Strahlformen mit großer Sorgfalt bestimmt wurden. Anschließend an diese Aufnahme wurde, nachdem inzwischen die beschriebenen vervollkommenen Anlagen fertiggestellt worden sind, mit der Bestimmung des Überfallkoeffizienten bei verschiedenen Wehrformen begonnen. Dabei wird in der Weise verfahren, daß die Abflußmenge mit Hilfe des genau geeichten Meßwehres, die Überfallhöhe aber durch Messung mit Spitzenmaßstäben festgelegt wird, und daß alsdann für die gegebenen Strahlformen die Überfallkoeffizienten berechnet werden.

Diese sehr zeitraubenden Arbeiten sind indessen noch nicht zum Abschluß gelangt.

## II. Teil.

### Die Ausbildung der Überfälle bei festen Wehren.

Da die Form der Überfälle bei festen Wehren am wesentlichsten durch die Gestalt der Abfallwand bedingt wird, soll die weitere Besprechung des Wasserabflusses über feste Wehre sich an die Gliederung der Wehre nach der Gestalt ihrer Abfallwand anschließen.

Nach der Form ihrer Abfallwand können die festen Wehre in:

1. Schußwehre,
2. Sturzwehre,
3. Stufenwehre

eingeteilt werden.

Schußwehre sind feste Wehre, deren Abfallwand eine so flache Neigung besitzt, daß das über das Wehr strömende Wasser sich nicht vom Wehrkörper trennt, sondern mit demselben dauernd in Berührung bleibt.

Sturzwehre sind feste Wehre, bei denen die Abfallwand lotrecht oder doch so steil angeordnet ist, daß der über die Wehrkrone hinfließende Wasserstrahl sich vom Wehrkörper trennt und frei auf die unterhalb des Wehres gelegene Flußsohle

<sup>1)</sup> Siehe auch dessen Dr.-Ing. Dissertation: »Experimentelle Untersuchungen über den Abfluß des Wassers bei vollkommenen Überfallwehren verschiedener Grundrißanordnung.« München und Leipzig 1907, G. Franzscher Verlag.

oder auf das sie schützende Sturzbett hinabfällt, wobei zwischen dem Wehrkörper und dem fallenden Wasserstrahl ein mit Wasser oder ein teils mit Wasser, teils mit Luft gefüllter Raum vorhanden ist.

Stufenwehre sind feste Wehre, bei denen die Abfallwand aus zwei oder mehreren einzelnen Teilen besteht, die durch wagerechte oder nahezu wagerechte Flächen von einander getrennt sind.

### 1. Der Wasserabfluß bei Schußwehren.

Ist der Abfallboden eines Wehres genügend flach geneigt und durch eine nicht zu scharf gebogene Fläche mit der Wehrkrone verbunden, so bleibt der über das Wehr fließende Wasserstrahl bei jeder Wasserführung mit dem Wehrkörper in Berührung. Sämtliche Wasserfäden besitzen dann eine mit der Abfallwand des Wehres im wesentlichen gleichlaufende Richtung. Der Strahl heißt in diesem Falle aufliegend, und das Wehr ist ein Schußwehr.

Der sich bei einem Schußwehr stets bildende **aufliegende Strahl** besitzt nicht allenthalben die gleiche Stärke. Infolge der mit der Fallhöhe zunehmenden Geschwindigkeit des Wassers muß vielmehr seine Stärke nach unten hin abnehmen, wie Abb. 1

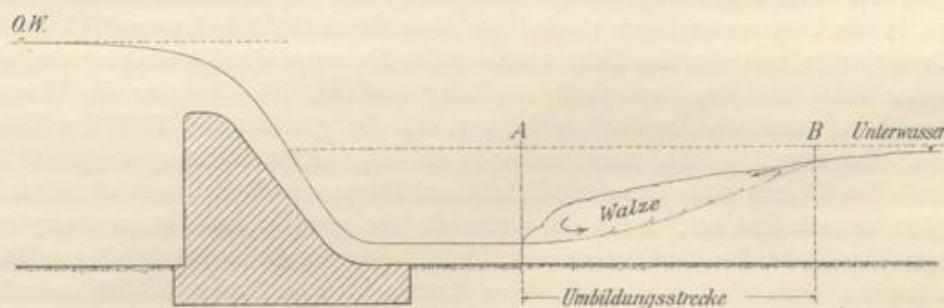


Abb. 1. Querschnitt durch ein Schußwehr.

zeigt. Die Geschwindigkeit des Wassers an einem Punkte des Strahles ist dabei nahezu gleich derjenigen Geschwindigkeit, welche ein Wassertropfen erreichen würde, wenn er von der Spiegelhöhe des Oberwassers unter dem Einfluß der Schwerkraft frei lotrecht hinuntergefallen wäre.

Geht die Wehrkrone ohne Übergangsfläche scharfkantig in den Abschlußboden über, so bleibt der Strahl namentlich bei großen Überfallhöhen nicht aufliegend, da die mit beträchtlicher Geschwindigkeit über die Wehrkrone hinfließenden Wasserfäden nicht plötzlich aus ihrer Richtung abgelenkt werden können. Der Strahl hebt sich vielmehr infolge seines Beharrungsvermögens vom Wehrkörper ab, um sich erst weiter unterhalb wieder auf den Abschlußboden aufzulegen. In diesem Fall verliert das Wehr den Charakter eines reinen Schußwehres. Je flacher geneigt der Abfallboden ist, um so früher wird der Strahl bei einem Wehr mit scharfer Überfallkante unter dem Einfluß der Schwerkraft wieder das Wehr berühren. Der Raum zwischen dem oberen Teil des Abschlußbodens und dem Wasserstrahl ist dabei mit Luft oder ganz oder zum Teil mit einer Wasserwalze mit zur Wehrrichtung gleichlaufender Achse ausgefüllt. Legt sich der abgehobene Wasserstrahl, wie es bei Wehren mit steiler Abfallwand gewöhnlich der Fall ist, überhaupt nicht mehr auf den Wehrkörper auf



so befindet sich zwischen dem Wehrkörper und dem Strahle stets eine Wasserwalze, die auf dem Flußbett oder auf dem das Flußbett schützenden Sturzbett aufruhrt und den Raum unter dem Strahle ganz oder teilweise ausfüllt. Das Wehr geht in diesem Falle in ein reines Sturzwehr über. Füllt dabei die Wasserwalze den Raum unter dem Strahl vollständig aus, so kann man bei oberflächlicher Betrachtung der Erscheinung leicht zu der Ansicht kommen, daß der Wasserstrahl sich nicht vom Wehre trennt und nach unten an Stärke zunimmt. Bei genauerer Untersuchung zeigt sich indessen, daß auch in diesem Fall der eigentliche Strahl, der den Abfluß des Wassers bewirkt, sich vom Wehrkörper löst und nach unten an Stärke abnimmt, und daß die scheinbare Zunahme der Strahlstärke auf die Wasserwalze zwischen dem Strahl und dem Wehrkörper zurückzuführen ist, die nach unten hin an Stärke erheblich zunimmt. Die Abb. 13, 14, 21 und 22 auf Taf. III zeigen dies bei Wehren mit lot-rechter Abfallwand.

Der sich bei den Schußwehren bildende aufliegende Strahl wird am Fuße des Wehres je nach der Ausbildung des unteren Teiles des Abschlußbodens entweder plötzlich oder allmählich in die Richtung der Sohle der Unterwasserrinne bzw. des Sturzbettes abgelenkt, wobei sich die Geschwindigkeit des Wassers nur wenig verringert. Das Wasser schießt demnach am Fuß des Wehres mit einer Geschwindigkeit, die der beim freien Fall bei der nämlichen Fallhöhe erreichten nahezu gleichkommt, in die Unterwasserrinne hinein. Da diese Geschwindigkeit wesentlich größer ist, als diejenige, mit der das Unterwasser weiterhin unter der Einwirkung des Gefälles der Sohle und der Rauigkeit des Bettes abfließt, ist die Höhe des Wasserstrahles dicht unterhalb des Wehres kleiner, als die gewöhnliche Tiefe des Unterwassers. Der Strahl behält, nachdem er in die wagerechte Richtung abgelenkt ist, unterhalb des Wehres seine Geschwindigkeit und Stärke gewöhnlich noch eine Strecke weit fast unverändert bei, wobei die tiefer als der gewöhnliche Unterwasserspiegel liegende Oberfläche des Strahles sichtbar bleibt. Der Strahl besitzt in diesem Falle einen freien Fuß. In Abb. 1 reicht diese Strecke bis zum Punkte A. Stromabwärts von Punkt A aber findet unter dem Einfluß des Unterwassers und der auf dem Strahle sich bildenden Wasserwalze eine schnelle Abnahme der Geschwindigkeit auf diejenige des Unterwassers statt, wobei die Strahlstärke auf die Tiefe des Unterwassers anwächst.

Auf der Umbildungsstrecke steigt die Oberfläche des Strahles zuweilen sehr erheblich an. Die mittlere Steigung der Oberfläche des Strahles auf der Strecke A—B (Abb. 1) wurde in einigen Fällen zu etwa 1:5 ermittelt. Das Wasser fließt demnach nach dem üblichen Sprachgebrauch auf dieser Strecke steil bergauf.

Die Oberfläche des Strahles selbst ist auf der Umbildungsstrecke indessen nicht sichtbar. Sie ist vielmehr durch eine Wasserwalze verdeckt, die von der Oberfläche des Strahles aus gespeist wird. Das an der Oberfläche dieser flachen Walze stromaufwärts fließende Wasser wird durch das unter ihm stromabwärts durchschießende Wasser des eigentlichen Strahles, bevor es zum Punkte A gelangt, zum Stehen gebracht und dann im unteren Teile der Walze stromabwärts mitgerissen, bis es unter dem Einfluß der Schwere, ehe es den Punkt B erreicht, auf seiner geneigten Unterlage wiederum stromaufwärts zurückzufließen beginnt. Dabei tritt das Bild einer vom Strahle getragenen und von ihm in drehende Bewegung versetzten Wasserwalze auf, welche die Umbildungsstrecke des Strahles verdeckt. Über die Lage, die Länge und das Gefälle der Umbildungsstrecke bei verschiedenen Geschwindigkeiten des Strahles

und bei verschiedenen Wassertiefen des Unterwassers und darüber, wie stark die Speisung der Walze vom Strahle her in einer bestimmten Zeit ist, liegen seither noch keine abgeschlossenen Beobachtungen vor<sup>1)</sup>, obschon die Art der Rückbildung des Strahles wegen des Einflusses auf die Ausbildung des Sturzbettes von praktischer Bedeutung ist.

Besonders deutlich tritt das stromaufwärts gerichtete Ende der Wasserwalze bei A in die Erscheinung, weil die Wasserwalze hier mit einem steilen Absturz endet, an dem das Wasser sich in wallender Bewegung befindet. Dieser Absturz wird Wassersprung genannt, weil die Oberfläche des Wassers hier mit einem plötzlichen Sprung stromabwärts ansteigt.

Der Wassersprung liegt bei sonst gleichen Verhältnissen um so weiter vom Wehrfuß entfernt, je größer die Menge und die Fallhöhe des abfließenden Wassers und je kleiner die Unterwassertiefe ist. Bei abnehmenden Wassermengen oder Fallhöhen oder bei zunehmender Unterwassertiefe rückt der Wassersprung daher immer näher an das Wehr heran. Berührt endlich das stromaufwärts gerichtete Ende der Wasserwalze die Oberfläche des auf dem Abschlußboden herunterschießenden Wasserstrahles, so verschwindet der Wassersprung. Am Fuße des Überfalles wird dann nur noch ein allmähliches Ansteigen des Wasserspiegels stromabwärts und eine stromaufwärts gerichtete Oberflächenströmung wahrgenommen, die auch in diesem Falle das Vorhandensein einer auf dem Strahle liegenden Wasserwalze anzeigen. (Abb. 2.) Der Fuß des fallenden Strahles ist durch die Wasserwalze verdeckt. Bei beträchtlicher Unterwassertiefe, namentlich aber dann, wenn der Unterwasserspiegel über der Wehrkrone liegt, wenn demnach das Wehr als Grundwehr wirkt, kann das Gegenfälle unbedeutend werden und sich der Wahrnehmung fast ganz entziehen. Die Wasserwalze besitzt dann einen großen Querschnitt und dreht sich entsprechend langsam. Durch die stromaufwärts gerichtete Oberflächenströmung ist sie aber auch in diesem Fall leicht nachweisbar.

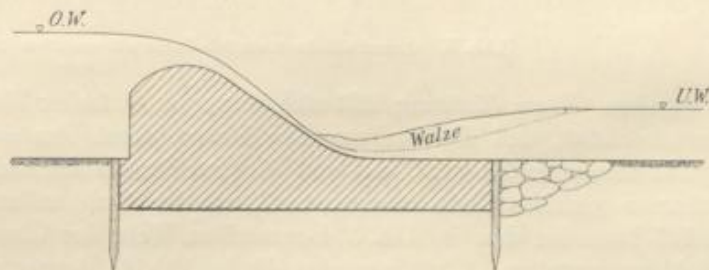


Abb. 2. Querschnitt durch ein Schußwehr.

Liegt am Fuße eines Schußwehres ein unter die Sohle der Unterwasserrinne hinunterreichendes Sturzbecken (Wasserkissen), das die Aufgabe hat, den über das Wehr abschießenden Strahl vom Flußbett abzuheben und dadurch die Angriffe auf die Flußsohle unterhalb des Wehres zu verringern, so kann sich die Umbildung des Strahles zum gleichmäßigen Unterwasserstrom je nach der Querschnittsgestalt des Sturzbeckens und der Stärke, Geschwindigkeit und Richtung des abschießenden Strahles in verschiedener Weise vollziehen. Die auf der Umbildungsstrecke auftretende Erscheinung wird man aber auch hierbei unschwer klarlegen können, wenn

<sup>1)</sup> Die im Flußbaulaboratorium zu Karlsruhe in Angriff genommenen Untersuchungen konnten noch nicht zum Abschluß gebracht werden, da sich für dieselben eine Verlängerung der Versuchsrinne als nötig herausstellte, die erst kürzlich fertiggestellt werden konnte.

man den Wasserquerschnitt in den eigentlichen, die Wasserfortleitung bewirkenden Strahl und in Wasserwalzen zerlegt, die bei dem Abflußvorgange nur eine untergeordnete Rolle spielen. Solche Wasserwalzen können bei vertieften Sturzbecken auf der Umbildungsstrecke entweder nur über dem Strahl, oder nur unter dem Strahl oder endlich über und unter dem Strahle auftreten. Ein Beispiel der zuletzt genannten Art mit zwei Wasserwalzen über und einer Wasserwalze unter dem Strahle zeigt Abb. 3. Die Drehungsrichtung der Walzen ist in der Abbildung durch Pfeile

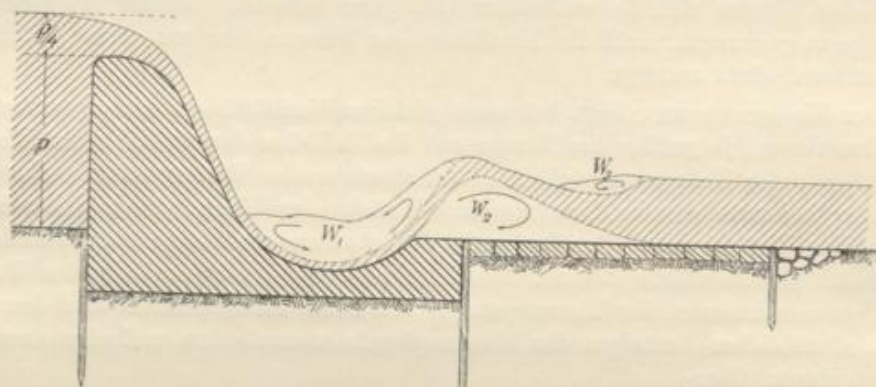


Abb. 3. Querschnitt durch ein Schußwehr mit vertieftem Sturzbecken.

angegeben. Diese Richtung läßt sich immer in einfacher Weise festlegen, wenn man berücksichtigt, daß die Drehung der Walzen durch den an ihnen vorbeifließenden Strahl hervorgerufen wird, und daß die dem Strahle zugekehrte Seite der Walze sich daher im gleichen Sinne bewegen muß, wie der Strahl selbst. Bei stärkerem Wasserabfluß kann bei dem in Abb. 3 dargestellten Wehr der Überfall sich auch noch verwickelter gestalten. Tritt zunächst die in Abb. 4a dargestellte Form des Überfalles

Abb. 4a.

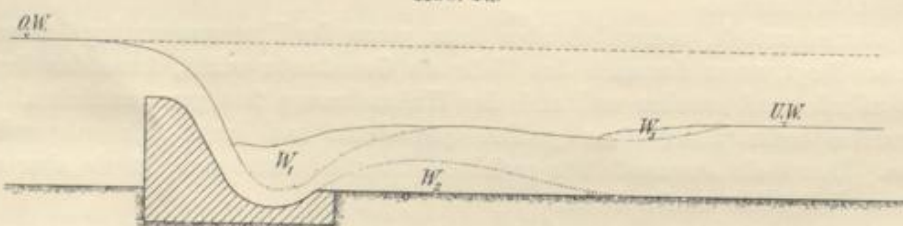


Abb. 4b.

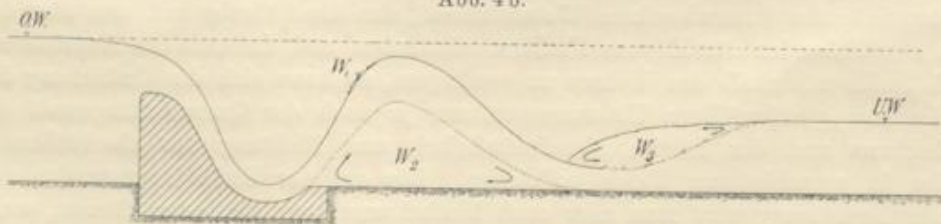


Abb. 4. Ausbildung des Überfalles bei einem Schußwehr mit Sturzbecken.

auf, welche der in Abb. 3 gezeigten verwandt ist, insofern bei ihr drei ähnlich gelagerte Walzen auftreten, so wird bald durch die Gewalt des in das Sturzbecken ein-

schießenden Wassers die Wasserwalze  $W_1$  gänzlich fortgerissen. Der Strahl hebt sich gleichzeitig über der Walze  $W_2$ , die an Höhe stark zunimmt, hoch empor und zeigt einige Zeit hindurch die in Abb. 4b ersichtliche Form eines Wasserberges mit beiderseitigen steilen Begrenzungen. Dieser Wasserberg überschlägt sich dann infolge der ständig zunehmenden Steilheit seiner dem Wehr zugekehrten Oberfläche stromaufwärts, wobei das in das vertiefte Sturzbecken fallende Wasser von neuem die auf dem Strahle liegende Wasserwalze  $W_1$  bildet, während der Strahl wieder die gestreckte Form der Abb. 4a annimmt. Allmählich wird dann diese Walze wieder fortgerissen, und der Strahl bäumt sich wieder zu einem hohen Wasserberge empor. Der ganze Vorgang kann sich in regelmäßiger und schneller Folge wiederholen. Bei Modellversuchen an einem 18 cm hohen Modellwehre bei 10,5 cm Überfallhöhe und einer Unterwassertiefe von 14,5 cm trat der Wasserberg in Zwischenräumen von 9,5 Sekunden bei einem Wehre von 22 cm Höhe aber in Zwischenräumen von 12 Sekunden auf. Bei nur wenig geänderten Wasserständen des Ober- oder Unterwassers wurde die wechselnde Gestalt des Überfallbildes dagegen nicht mehr beobachtet, indem der hohe Wasserberg nicht mehr entstand.

Die verschiedenartige Ausbildung, welche die Überfälle bei nur unwesentlich geänderter Wasserführung zeigen können, und die verschiedene Größe der dabei auftretenden Angriffe zwingen zu großer Vorsicht bei der Ausbildung der Sturzbetten.

Die Modellversuche haben deutlich gezeigt, daß ein vertieftes Sturzbecken insofern günstig wirkt, als es die Entfernung zwischen dem Wehre und dem Ende der Rückbildungsstrecke abkürzt und den schnell fließenden Strahl vom Flußbett am Fuß des Wehres abhebt. Dadurch kann eine Einschränkung der Breite des Sturzbettes ermöglicht werden. Die Angriffe auf einzelne Teile des Sturzbettes können allerdings die bei einem ebenen Sturzbette auftretenden übertreffen.

Soll die Gewalt des auf einem Schußwehre abfließenden Wassers in dem vertieften Wasserbecken selbst vollständig gebrochen werden, was vielfach als der Zweck dieser Wasserbecken bezeichnet wird, so muß dasselbe eine viel größere Breite und Tiefe besitzen, wie es bei dem in den Abb. 3 und 4 dargestellten Wehre der Fall ist. Die Kosten des Wehres werden indessen dadurch infolge der erforderlichen tieferen Gründung nicht unwesentlich vermehrt.

Aus der Art des Wasserabflusses lassen sich Schlüsse auf die Angriffe ziehen, denen die Abfallwand und das Sturzbett eines Wehres von bestimmter Gestalt ausgesetzt sind.

Da bei den Schußwehren das Wasser den Abschlußboden in seiner ganzen Ausdehnung überflutet, ist derselbe allenthalben der schleifenden Wirkung des Wassers und der von ihm mitgeführten festen Stoffe ausgesetzt. Sehr schwere Angriffe wirken indessen auf einen gradlinigen oder schwach gekrümmten Abschlußboden meist auch dann nicht ein, wenn schwere Geschiebe, Eis oder Holz mit über das Wehr gerissen werden, insofern diese Körper nur unter spitzen Winkeln auf den Wehrkörper auftreffen, wobei sie keine erhebliche Stoßwirkung auf den Abschlußboden ausüben vermögen. Ist der untere Teil eines Abschlußbodens zur Überleitung des Wassers in die Richtung der Unterwasserrinne scharf gekrümmt, so vermehrt sich hier die schleifende und stoßende Wirkung der vom Wasser mitgeführten festen Stoffe erheblich, so daß an diesen Stellen eine besonders widerstandsfähige Bekleidung des Wehrkörpers erforderlich wird. Eine solche kann auch in der Höhe des Unterwasserspiegels dann nötig werden, wenn die Umbildungsstrecke des Strahles unmittelbar

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 werden<sup>1)</sup>. 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:

<sup>1)</sup> 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*)<sup>1)</sup> 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-

<sup>1)</sup> 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  $\mu$  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  $\mu$  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:

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

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  $\mu$ -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, Hansen<sup>2)</sup> und Aichel<sup>3)</sup> festgestellt wurde, und wie die in der letzten Zeit ausgeführten genauen Untersuchungen im Karlsruher Laboratorium bestätigt haben.

Der Wert  $\mu$  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  $\mu_0$ -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  $\mu_0$  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.

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

<sup>2)</sup> Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure Bd. 36. S. 1057.

<sup>3)</sup> Die Werte  $\mu$ , 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  $\mu$ -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  $\mu$  ausüben.

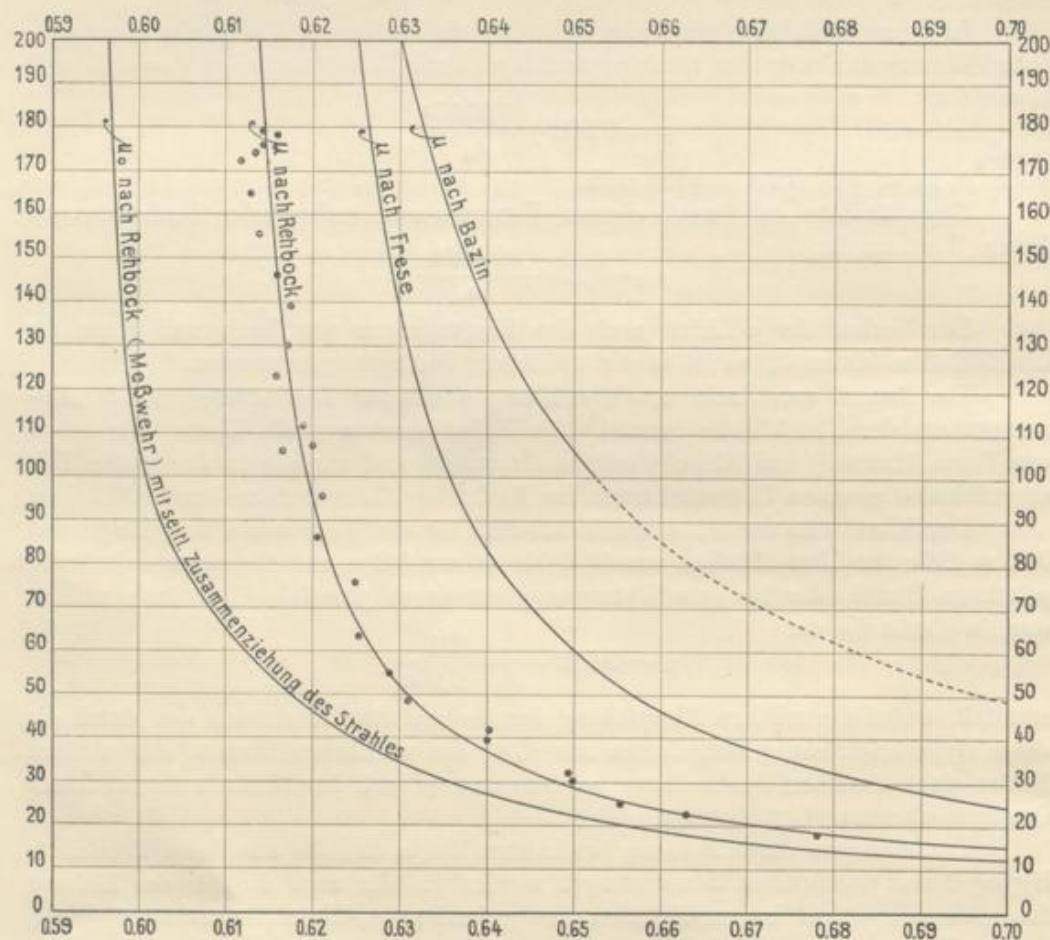


Abb. 5.

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

Die für eine Wehrhöhe von 0,25 m ermittelte, aufgezeichnete  $\mu$ -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  $\mu$ -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  $\text{cbm/Sek.}$  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-

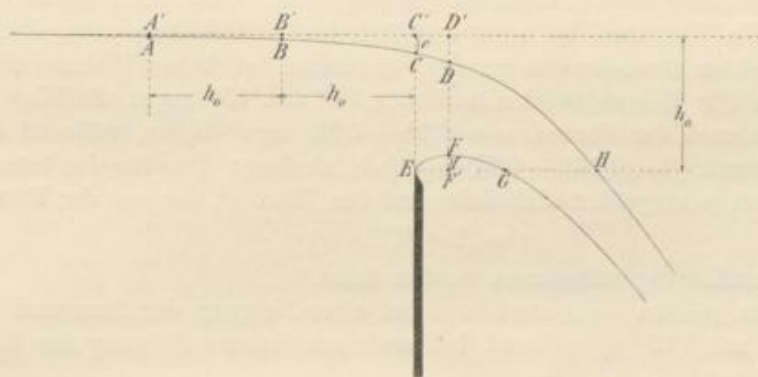


Abb. 6. Querschnitt durch einen gelüfteten Strahl.

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 Wehrschwelle  $E$  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  $\mu$  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  $\alpha$  zur Wagerechten stromabwärts geneigt, so nimmt bei hohen Wehren mit mäßiger Überfallhöhe für Neigungswinkel zwischen  $90^\circ$  und  $45^\circ$  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  $\mu$  vergrößert sich dabei auf den Wert  $\mu'$ , der aus der Formel:

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

mit guter Annäherung entnommen werden kann.

Seinen größten Wert erreicht  $\mu'$  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  $\mu'$  wieder abnimmt.

Wird  $\alpha$  größer als  $90^\circ$ , hängt demnach die Stauwand stromaufwärts über, so wird  $\mu'$  kleiner als  $\mu$ .

Bei Wehren mit abgerundeter Überfallkante übt ein geneigter Vorboden keinen erheblichen Einfluß auf die Größe des Wertes  $\mu$  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  $\mu$  in  $\mu'$  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  $\mu'$  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.

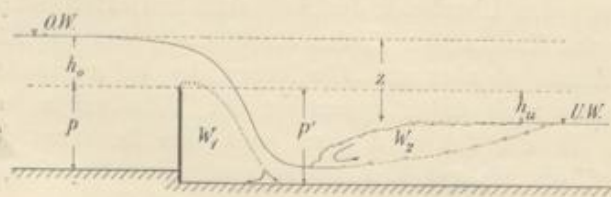


Abb. 7. Querschnitt durch einen wassergefüllten Strahl mit freiem Fuß.

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  $\mu$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\beta$ , 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  $z = h_o - h_u'$  (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 —

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

Diese Formel gibt zuverlässige Werte mit Ausnahme von denjenigen Fällen, bei denen die Werte  $h_o$  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  $\mu$  des gelüfteten freien Strahles die Werte  $\mu'$  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  $\mu'$  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)  $\mu' = \sqrt[3]{1 - \frac{q}{h_0} \cdot \left\{ 1 + 0,04 \frac{h_u}{p} \right\}} \cdot \mu$ .

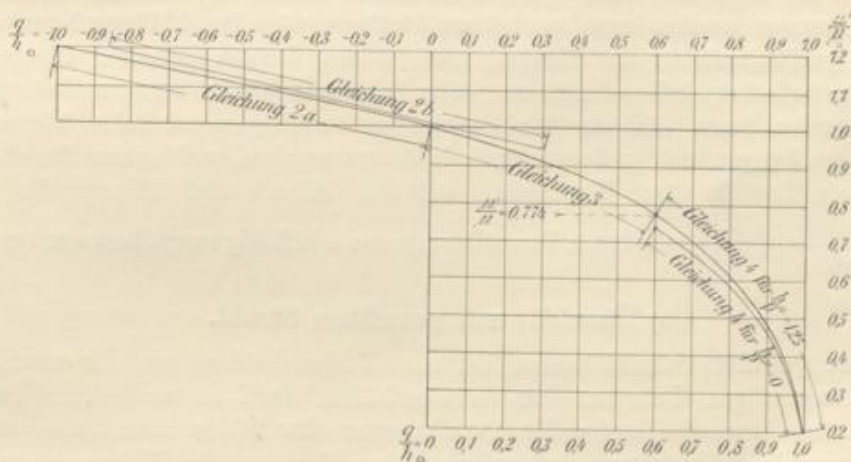


Abb. 9. Darstellung der Abhängigkeit des Überfallkoeffizienten von den Druckverhältnissen unter dem Strahl.

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  $\mu'$  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  $\mu'$  aus der bekannten Größe von  $\mu$ .

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  $\alpha$  gegen die Lotrechte geneigt werden kann. Bei der Wahl eines großen Neigungswinkel  $\alpha$  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  $\alpha$  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.

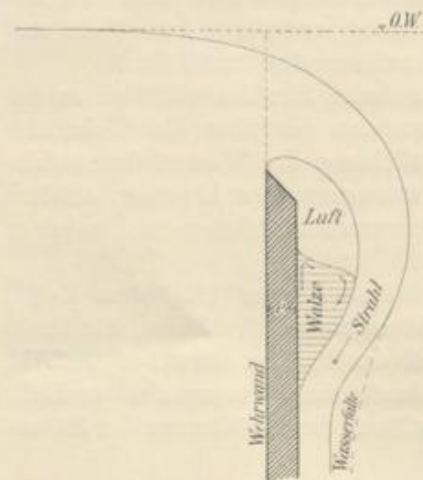


Abb. 10.  
Querschnitt durch einen angeschmiegtten Strahl.

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 bedenten.

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  $\mu'$  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  $\delta$  bis zu 1,3 gefunden. Bei keinen der beschriebenen anderen Strahlformen werden gleichgroße Überfallkoeffizienten beobachtet.

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

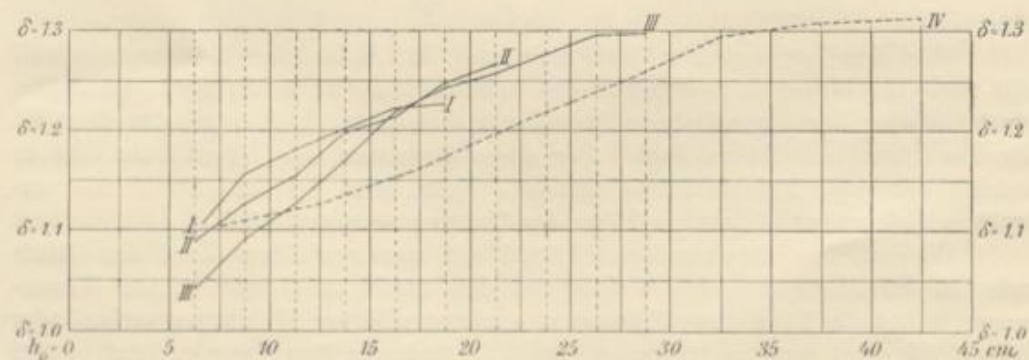


Abb. 11. Zusammenstellung der Werte  $\delta$  für Überfälle mit angeschmiegtem Strahl nach Bazin.

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

Ist bei abgescrägter 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).

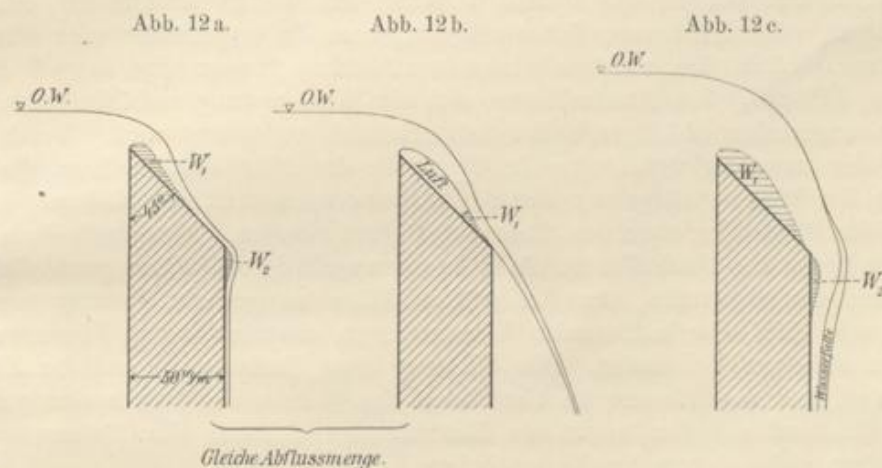


Abb. 12. Ausbildung angeschmiegtor Strahlen bei abgescrögten Wehren.

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 angeschmiegtor 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 angeschmiegtor 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 angeschmiegtor 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 angeschmiegtor 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 angeschmiegtten 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 schwachgeneigten 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.

Erweiterungsanlagen des Flußbau-Laboratoriums  
der Großherzogl. Technischen Hochschule Fridericiana in Karlsruhe.

Abb. 1. Längenschnitt durch die Rinne für Überfall- und Durchflußversuche.

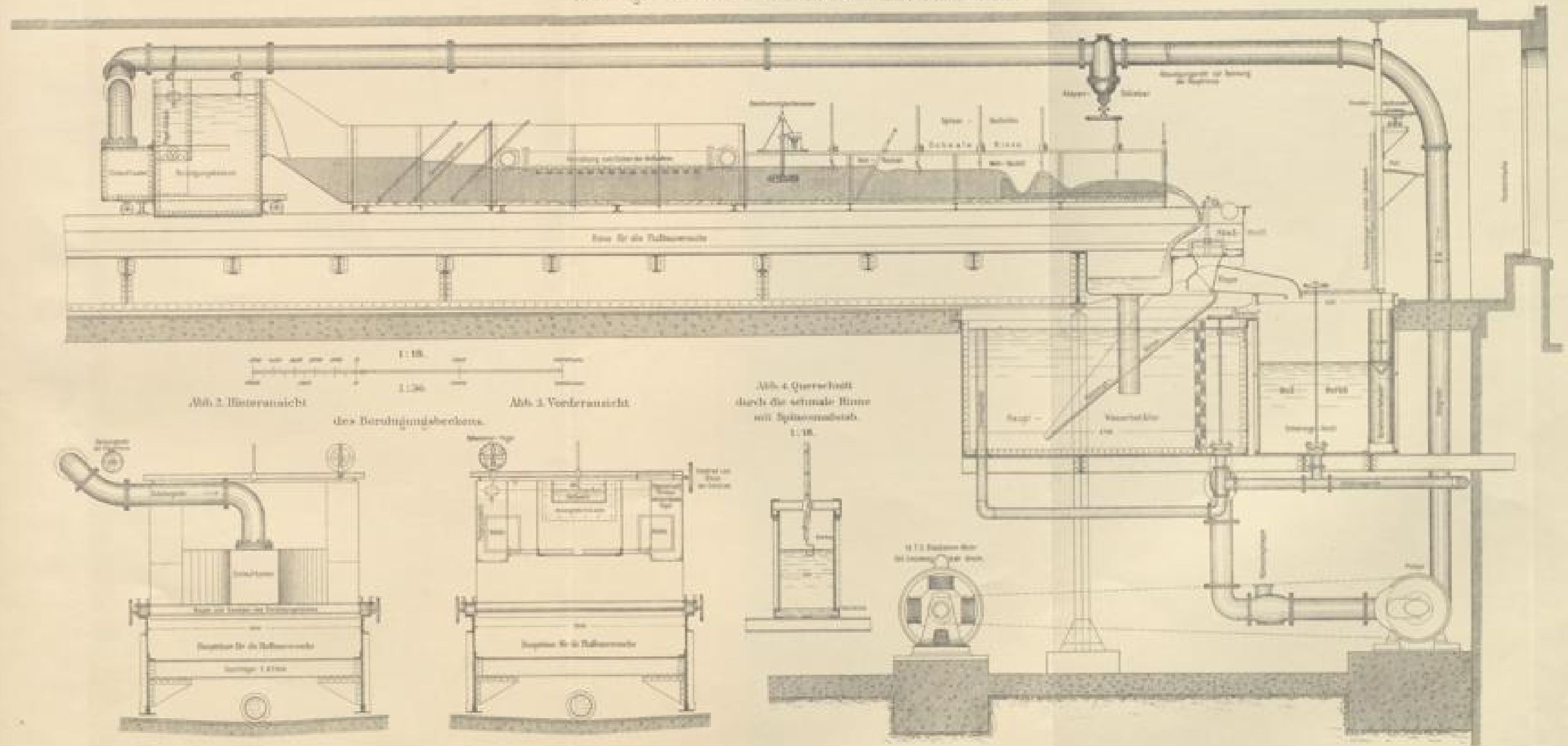


Abb. 2. Rückansicht

Abb. 3. Vorderansicht

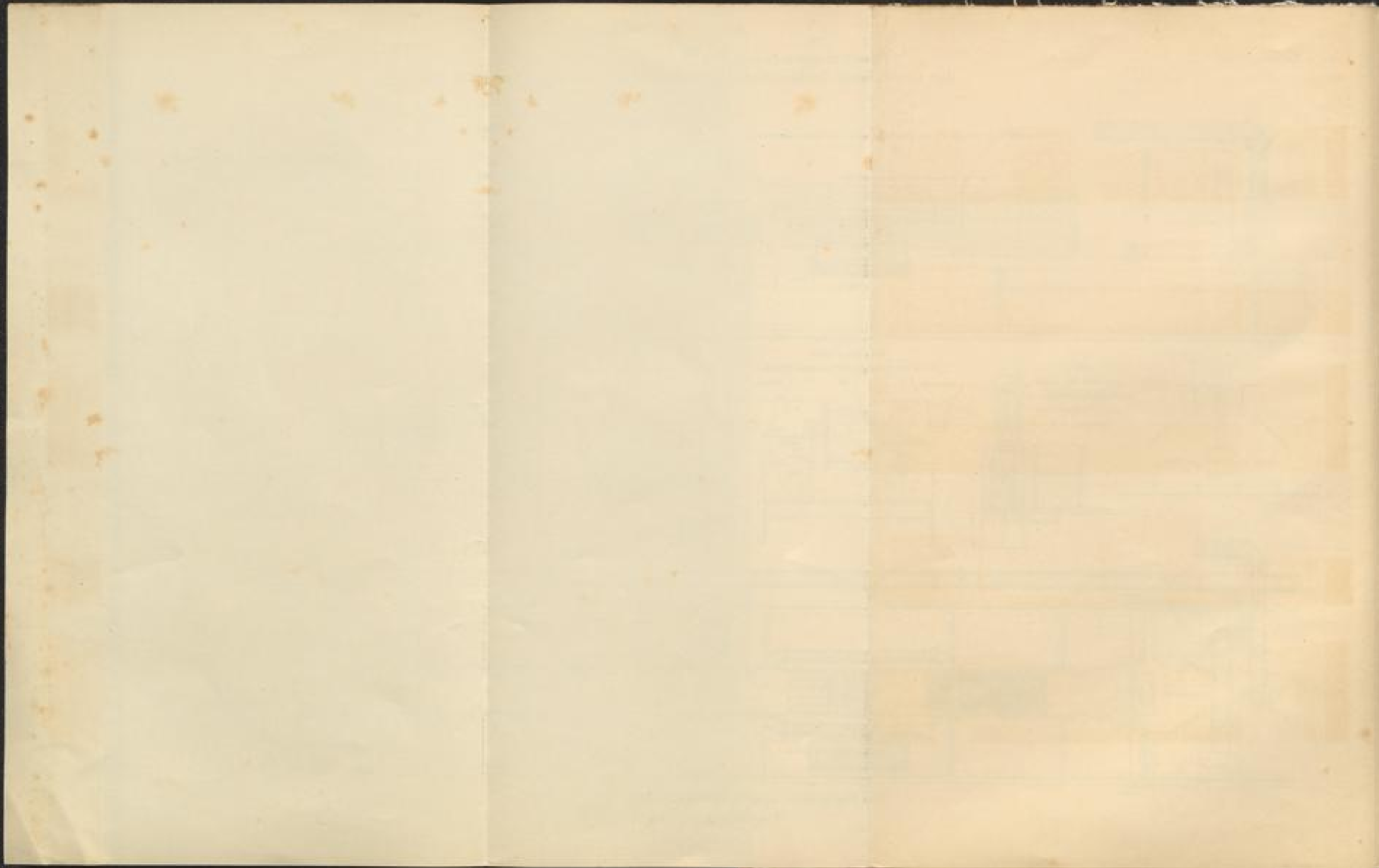
Abb. 4. Querschnitt  
durch die schmale Rinne  
mit Spinnrohr.

des Vorrichtungssystems.

Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin.







Querschnitte durch Überfälle bei Wehren mit steiler Abfallwand.  
I. Wehre mit schiefer Oberfallkante



II. Wehre mit breiter Krone.



Stromseite  
Abfallkante  
Wehrschwelle  
Wehrschwelle

Stromseite

Abfallkante

Stromseite

