

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

II

L. inw.

4425

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000294563

Experimentelle Untersuchungen
über den Abfluss des Wassers bei vollkommenen Überfallwehren
verschiedener Grundrissanordnung

von

Ordulf Georg Aichel
Diplom-Ingenieur.

Meinem lieben Vater

Von der Grossh. Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation.

F. No. 27767



München und Leipzig.

G. Franzscher Verlag:

Jos. Roth, Königl. u. Herzogl. bayer. Hofbuchhändler
1907.

Experimentelle Untersuchungen

über den Einfluss des Harns bei vollkommenen Uterushydronephrosen
verschiedener Grundkrankheiten

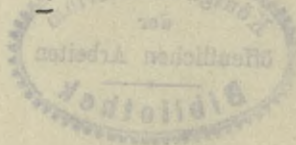
von

Wladimir Georg Aischel
Diplom-Physiker

von der k. k. techn. Hochschule in Karlsruhe
zur Erlangung der Würde eines Doctor-gradus
eingereichte Dissertation.



14425



München und Leipzig:
G. Krausscher Verlag;
des Königl. Königs- u. Herzog. Hofbuchhandl.

1907.

Vorwort.

Meinem lieben Vater

zu eigen.

Vorwort.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Assistent am Flußbaulaboratorium der Technischen Hochschule Karlsruhe, das dem Lehrstuhle für Wasserbau angegliedert ist und unter Leitung des Herrn Professor Th. Rehbock steht. Die zahlreichen und äußerst mannigfaltigen Versuche wasserbaulichen Charakters, bei deren Ausführung ich Herrn Professor Th. Rehbock assistieren durfte, waren aufs beste dazu angetan, mir einen wertvollen Einblick zu gewähren in alle jene Verhältnisse, die den Wasserbauingenieur aufs tiefste interessieren. Nachdem durch größere Neuanlagen zu den experimentellen Untersuchungen auf dem Gebiete des Flußbaues auch solche rein hydraulischen Charakters in das Arbeitsprogramm des Laboratoriums miteinbezogen wurden, war mir Gelegenheit gegeben, mich auch auf diesem Experimentalgebiete leicht orientieren zu können. Die Versuchstätigkeit in dieser letztgenannten Richtung war es auch, die mir die Anregung gab, die Untersuchungen anzustellen, deren Ergebnisse Gegenstand der vorliegenden Mitteilungen sind.

Die Versuche beschäftigten sich mit den Abflußverhältnissen, die bei vollkommenen Überfallwehren ohne Seitenkontraktion mit scharfer Überfallkante herrschen, deren Disposition im Grundriß verschiedenartig ausgebildet ist.

Während für Überfälle, deren Überfallkante normal zur Achse des Gerinnes steht, viele und auch äußerst zuverlässige Versuchsergebnisse vorliegen, ausgeführt von den verschiedensten Experimentatoren, so ist die Zahl der Versuche, die unter veränderten Grundrißdispositionen bis heute ausgeführt und veröffentlicht wurden, sehr gering. In den Lehrbüchern des Wasserbaues finden sich hierüber nur die stets wiederkehrenden Angaben, die Boileau im Jahre 1854 auf Grund von drei Versuchsreihen veröffentlichte. Sonstige Experimentalangaben genannter Art finden sich in der Literatur nicht.

Wenn auch in der Praxis, hauptsächlich der durch größeren Materialaufwand erhöhten Baukosten und der stärkeren Uferangriffe wegen, Wehre, die nicht normal zur Flußachse stehen, gern vermieden werden und besonders in neuerer Zeit durch bewegliche Wehre der verschiedensten Konstruktion in bestimmten Fällen mit Vorteil ersetzt werden können, so leisten ganz oder auf einen Teil ihrer Länge zur Flußachse schief gestellte oder auch gekrümmte feste Wehre vielfach doch sehr schätzbare Dienste. Bei einem solchen Wehre nun ist es von großer Wichtigkeit, den Überfallkoeffizienten zu kennen. Schon Boileaus wenige Versuche über diesen Gegenstand zeigen eine Abhängigkeit des genannten Koeffizienten auch von der Grundrißgestalt des Wehres, eine Abhängigkeit, die schon durch die oberflächlichste Überlegung vermutet werden muß. Es schien mir daher eine nicht nur rein theoretisch hochinteressante Aufgabe, hierüber Versuche anzustellen, sondern ich hoffte auch, weitere für die Praxis verwertbare Resultate zu finden.

Ich hatte mir daher die Aufgabe gestellt, um zur Kenntnis der Änderungen zu gelangen, die der Überfallkoeffizient durch eine veränderte Anordnung der Überfallwand im Grundriß erleidet, systematische Versuche auszuführen, beginnend mit einfachen normalen bzw. schiefen Überfällen und übergehend zu Anordnungen verwickelterer Art.

Da nun systematisch durchgeführte Versuche ihrer großen Zahl wegen sehr zeitraubend sind, die vielen an sich schon im Laboratorium zur Diskussion stehenden Fragen meine verfügbare Zeit vollauf in Anspruch nahmen und nicht zum mindesten dadurch, daß eine langwierige Krankheit bei mir eine fast halbjährige Arbeitsunfähigkeit verursachte, konnte ich die angeführten Versuche nur teilweise durchführen. Der erzielte Grad der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Versuchsergebnisse, der für manche Zwecke wohl ein höherer hätte sein können, wäre mit Hilfe der damals im Laboratorium vorhanden gewesenen Apparate auch bei einer größeren Zahl von Wiederholungen kein höherer geworden; jedenfalls ist er derart, daß die Ergebnisse einen guten Einblick in die Rolle jener einzelnen Faktoren gewähren, die beim Abfluß des Wassers an Überfällen von einschneidender Bedeutung sind.

Sollte die vorliegende Arbeit zur Klärung der bei schiefen Überfällen besonders verwickelten Verhältnisse etwas beitragen, sollte sie vor allem dazu dienen können, das Interesse für hydraulische

Versuchsanstalten zu erhöhen, so wäre damit ein besonderer Erfolg erzielt.

Ich kann nicht schließen, ohne meinem hochverehrten Chef, Herrn Professor Theodor Rehbock, meinen tiefgefühltesten Dank auszusprechen dafür, daß er mir aufs bereitwilligste gestattete, alle nötigen Versuche im Flußbaulaboratorium auszuführen, mir nicht nur die große Zahl von unentbehrlichen Apparaten und sonstigen Utensilien, sondern auch die zu derartigen Arbeiten erforderliche Zeit im reichsten Maße zur Verfügung stellte und mir aufs zuvorkommendste die wertvollsten Ratschläge erteilte. Allein diesem unbegrenzten Entgegenkommen habe ich es zu verdanken, daß es mir möglich war, den größten Teil der beabsichtigten Versuche auszuführen.

Den Herren Geh. Hofrat Professor Dr. Matthäus Haid, Professor Karl Kriemler, sowie Herrn Obergemeter Joseph Bürgin bin ich zu großem Danke verpflichtet für die Unterstützung, die sie mir aufs bereitwilligste gewährten.

Karlsruhe i. B., im April 1907.

O. G. Aichel.

Inhaltsübersicht.

	Seite
Einleitung	1
Erster Abschnitt. Die Versuchsstation.	
1. Die Versuchseinrichtung	4
2. Das Versuchsverfahren:	
a) Der Meßüberfall und seine Eichung	10
b) Die Ausführung der Versuche mit Wehren verschiedener Grundriß- anordnung	20
Zweiter Abschnitt. Die Berechnung der Versuche und deren Ergebnisse.	
1. Die Berechnungsformeln:	
a) Die gebräuchlichsten Berechnungsformeln	26
b) Die Formeln von Bazin:	
α) Die Formel für den rechteckigen Rinnenquerschnitt	35
β) Die Formel für den trapezartigen Rinnenquerschnitt	42
γ) Der Geschwindigkeitshöhenbeiwert α	46
c) Die Formeln von v. Wex	53
2. Die Berechnungsergebnisse der Versuche an normalen und schiefen Überfällen:	
a) Allgemeines	57
b) Umrechnungsformeln	59
c) Die Berechnungsergebnisse nach den Formeln von Bazin:	
α) Die Koeffizienten μ	60
β) Der normale Überfall	62
γ) Die schiefen Überfälle	64
δ) Die Zusammenfassung der Ergebnisse	71
ϵ) Vergleichende Untersuchung	76
d) Die Berechnungsergebnisse nach den Formeln von v. Wex	79
e) Die Berechnungsergebnisse nach den Formeln von Weisbach	82
3. Die Berechnungsergebnisse der Versuche an gebrochenen und ge- krümmten Überfällen:	
a) Gebrochener Überfall Nr. 1	86
b) Gebrochener Überfall Nr. 2	88
c) Gekrümmte Überfälle Nr. 1 und 2	89
Dritter Abschnitt. Nebenversuche.	
1. Strahlaufnahmen	91
2. Die horizontale Ablenkung der Stromlinien	95
3. Die Absenkung des Wasserspiegels in der Vertikalebene der Überfall- kante	99
Schlussbetrachtung	102
Nachtrag	106
Anhang. 1. Versuchstabellen. 2. Atlas mit 13 Tafeln.	

Einleitung.

Die Größe der Stauhöhe und Stauweite bei einem festen von einem Flußufer zum anderen reichenden Wehre hängt bei gegebener Konstruktionshöhe desselben hauptsächlich von der Wasserführung des Flusses ab. Es kann hier die Höhenlage des Oberwassers nicht willkürlich jederzeit reguliert werden. Bei Flüssen mit starken Hochwässern und Eisgang wird daher zu gewissen Zeiten ein hoher Stau eintreten, der den Uferanwohnern nachteilig und gefährlich werden kann. Die Hochwässer können nun auf sehr verschiedenartige Weise schadlos abgeführt werden. Es geschieht dies z. B. dadurch, daß das Wehr in seiner ganzen Ausdehnung oder auch nur teilweise als bewegliches Wehr ausgeführt wird. Zu Zeiten starken Wasserabflusses können die beweglichen Teile entsprechend entfernt werden, so daß das Wasser im größeren Durchflußquerschnitt ohne wesentlich vermehrtem Stau abströmen kann. Die solcher Art ermöglichte Regulierung der Höhenlage des Oberwassers kann auch automatisch geschehen, wie überhaupt die Konstruktionsarten solch beweglicher Wehre sehr mannigfaltig sind. Sie finden besonders in neuerer Zeit recht ausgedehnte Verwendung. Die beweglichen Wehre erfordern indessen eine ständige Überwachung und Kontrolle, verursachen oft hohe Bau- und Reparaturkosten und sind nicht besonders widerstandsfähig. Ist daher eine solch sorgfältige Regulierung des Oberwassers nicht nötig und sprechen nicht andere gewichtige Gründe dagegen, so wird man zur Anlage eines durchweg festen Wehres schreiten, bei dem ein übermäßiger Stau bei Abgang des Hochwassers dadurch vermieden wird, daß man eine größere für den Abfluß des Wassers wirksame Länge wählt. Man erzielt diese Vermehrung der Wehrlänge durch Wahl eines entsprechenden Grundrisses. Die nachstehenden Abbildungen zeigen die gebräuchlichsten Anordnungen:

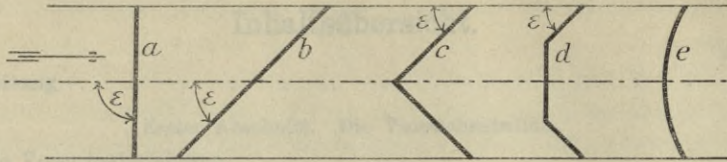


Fig. 1.

a stellt das gewöhnliche Wehr dar, das senkrecht zur Flußachse steht. Es wird gewöhnlich als „gerades“ Wehr bezeichnet, eine Benennung, die nicht sehr zweckmäßig ist; denn jede andere Grundrißform, die aus einer oder mehreren „Geraden“ besteht, verdient diese Bezeichnung mit dem gleichen Recht; um daher Mißverständnisse zu vermeiden und um das Charakteristische dieser Grundrißgestalt, nämlich die senkrechte Stellung zur Flußachse, hervorzuheben, soll im folgenden ein Wehr der Anordnung der Fig. 1a als „normales Wehr“ bezeichnet werden. Es ist von allen anderen Wehren der Fig. 1 am kürzesten, erfordert daher die geringsten Baukosten und wird am häufigsten ausgeführt, besonders bei Flüssen mit geringen Hochwässern und Eisgang.

Fig. 1b stellt das einfache „schiefe Wehr“ dar. Es hat den Vorteil der leichteren Abfuhr der Hochwässer bei geringerem Stau infolge seiner größeren Länge. Diese bewirkt auch, daß auf die Sohle des Flußbettes ein geringerer Angriff ausgeübt wird. Der Winkel zwischen Wehr- und Flußachse kann verschieden gewählt werden, doch dürfte eine Größe des Winkels ε von 20—30 Grad wohl die Grenze bilden. Diese Wehrstellung hat den Nachteil, daß das abströmende Wasser das gegenüberliegende Ufer stark angreift und ist dieses daher durch gute Befestigung vor Unterwaschungen zu schützen und eventuell gleichzeitig etwas auszubiegen. Zur Verminderung dieses Angriffes ist von verschiedenen Ingenieuren vorgeschlagen worden, der Wehrkrone ein Gefälle zu geben, im Falle der Fig. 1b vom rechten zum linken Ufer, wodurch das Wasser wieder etwas dem ungefährdeten linken Ufer zugelenkt würde. Diese Eigenschaft der schiefen Wehre, das Wasser abzulenken, befähigt sie dazu, in Flußkrümmungen angewendet zu werden, um das konkave Ufer vor Unterwaschungen zu schützen.

Man kommt der genannten nachteiligen Eigenschaften dieser einfachen schiefen Wehre wegen zu Anordnungen der Fig. 1c, 1d

oder $1e$, also der „gebrochenen Wehre“ bzw. der „gekrümmten Wehre“. Bei diesen wird das abströmende Wasser der Flußmitte zugeführt, wodurch Ufer und Bett leichter zu unterhalten sind. Es kann auch angenommen werden, daß diese Grundrißgestalten widerstandsfähiger sind als die vorherbesprochenen, wenn man gelten lassen will, daß sie als Sprengwerke wirken und als solche finden sie auch bei Wildbachverbauungen ausgedehnte Verwendung. Die gekrümmte Form e wird bei Flüssen ziemlich häufig angewendet. Das gebrochene Wehr kann auch unsymmetrisch ausgeführt werden, wenn die Stromrichtung des Oberwassers derartig ist, daß es dem einen Wehrrame hauptsächlich zugedrängt wird; durch Verlegung des Scheitels kann dann die Länge dieses Armes gekürzt und so eine gleichmäßigere Verteilung der Wassermassen über beide Arme erzielt werden und damit eine bessere Abfuhr derselben im Unterwasserbett ohne schädlichen Uferangriff.

Die schiefen, gebrochenen und gekrümmten Wehre leisten auch überall dort gute Dienste, wo es sich hauptsächlich darum handelt, das Wasser leicht den abzweigenden Kanälen zuzuleiten; auch werden sie infolge ihrer Stellung durch Stöße antreibender fester Körper, wie Eisschollen, Baumstämme etc., weniger leicht angegriffen.

Die besprochenen Grundrißgestalten können natürlich noch in verschiedener Weise abgeändert oder kombiniert werden, je nachdem es für den speziell vorliegenden Fall gerade am zweckmäßigsten ist.

Unter sonst gleichen Umständen entspricht jeder Grundrißgestalt ein anderer Abflußkoeffizient, was im folgenden nun näher behandelt werden soll.

Noch sei bemerkt, daß in den nachstehenden Ausführungen stets die Erscheinung des Überfallens des Wassers an einem normalen, schiefen, gebrochenen oder gekrümmten Wehre der Einfachheit halber selbst auch als normaler, schiefer etc. Überfall bezeichnet wird.

Erster Abschnitt.

Die Versuchsstation.

1. Die Versuchseinrichtung.

Bevor an die detaillierte Beschreibung der ausgeführten Versuche selbst und ihrer Ergebnisse herangetreten wird, möge hier mit wenigen Worten eine zum Verständnis der Sache unbedingt nötige kurze Beschreibung des Laboratoriums vorhergehen. Eingehendes darüber findet man in dem vom Direktor des Flußbaulaboratoriums, Herrn Professor Th. Rehbock, unter dem Titel: „Das Flußbaulaboratorium der Großh. Technischen Hochschule Fridericiana in Karlsruhe“ veröffentlichten Bericht in der Zeitschrift für Bauwesen vom Jahre 1903.

Die Hauptlaboratoriumsversuche über die Bewegung des Wassers in Flüssen mit beweglicher Sohle, die Wirkung von Einbauten auf dieselbe etc. werden in einer größeren eisernen Rinne ausgeführt. Diese Hauptrinne wird von zwei Blechlängsträgern gebildet, die durch Querträger verbunden sind, welche letztere eine Blechhaut von 5 mm Stärke tragen. Auf diese Weise ist ein trogartiger Behälter von 19 m Länge, 2 m Breite und 0,4 m Tiefe gebildet. Unterhalb dieser Hauptrinne befindet sich an deren Fußende im Keller des Laboratoriumsgebäudes das Hauptreservoir von 6 m³ Inhalt. Eine im Keller aufgestellte, durch elektrischen Motor angetriebene Kreiselpumpe befördert das Wasser aus diesem Hauptsammelbecken in eine Rohrleitung von 200 mm lichtigem Durchmesser, die in einer Höhe von etwa 1,5 m über dem Rinnenrand an der Decke des Arbeitsraumes der Hauptrinne entlang zu einem am Kopfende dieser letzteren befindlichen erhöhten Reservoir führt. Aus diesem kann dann vermittelt eines Schiebers das ganze Wasser

oder auch nur ein Teil desselben in die große Versuchsrinne eingeleitet und durch diese dem Hauptsammelbecken wieder zugeführt werden; der nicht verwendete Teil des Wassers findet durch ein Überlaufrohr seinen Weg ebenfalls wieder zu diesem Hauptbecken zurück. Das Wasser befindet sich demnach in einem geschlossenen Kreislauf. Überfallversuche lassen sich in dieser eben beschriebenen Hauptrinne des Laboratoriums nicht gut ausführen. Dieser Art von Versuchen dient eine im Jahre 1905 nach Angaben von Herrn Professor Th. Rehbock begonnene Ergänzungsanlage zum Laboratorium. Dies ist auf Taf. 1 Fig. 1 und 2 im Grund- und Aufriß dargestellt. Aus der oben erwähnten Hauptrohrleitung, die der Decke des Raumes entlang führt, zweigt eine zweite Leitung von gleichem lichten Durchmesser ab. Das Wasser kann mittelst zweier Schieber in dieselbe geleitet werden. Etwa in der Mitte der großen Hauptversuchsrinne, auf deren Längsträger aufgelagert und auf starken Rollen leicht verschiebbar, ruht der Behälter *B* (Fig. 1 Taf. 1). Er besteht aus 4 mm starkem Eisenblech und besitzt 2,5 m³ Inhalt. An der einen Wand trägt er einen Einlaufkasten *A*, in den die eben erwähnte abgezwigte Rohrleitung einmündet; zwei quadratische, symmetrisch in der Wand des Behälters *A* angebrachte Öffnungen von 0,4 m Seitenlänge stellen die Verbindung von *A* und *B* her. An der gegenüberliegenden Wand von *B* befinden sich zwei weitere quadratische Öffnungen von 0,34 m Seitenlänge; sie sind durch Messingschieber vollkommen dicht verschließbar und dienen als Notablässe für den Fall des Eintretens irgendwelcher Fährlichkeiten in der Versuchsrinne. In der Mitte der gleichen Wand von *B* befindet sich am oberen Ende derselben ein rechteckiger Ausschnitt von 0,35 m Tiefe und 0,64 m Breite. Derselbe dient zur Befestigung der Messingplatte von 6 mm Stärke, die den Eich-Überfall enthält, einen Ausschnitt von 200 mm Tiefe und 500,1 mm Breite mit unter 30 Grad abgeschrägten scharfen Kanten. Die Mutterschrauben zur Befestigung dieser Platte an der Behälterwand haben etwas Spielraum, so daß die untere Kante des Überfalles mit Hilfe einer Setzlibelle oder durch Einnivellierung mit aller erforderlichen Schärfe horizontal gestellt werden kann. Der so gebildete Überfall stellt den sog. Meßüberfall vor; durch ihn wird mittelst Messung der Überfallhöhe die sekundlich an ihm abfließende Wassermenge, die dann gleichzeitig bei dem gerade zur Untersuchung stehenden Überfall verwendet wird, ge-

messen. Diese indirekte Methode der Bestimmung der sekundlich abfließenden Wassermenge, die durch Herrn Professor Rehbock in den Laboratoriumsbetrieb eingeführt wurde, gestattet natürlicherweise ein bedeutend bequemes, rascheres und vor allem sparsameres Arbeiten. Um die Messungen mit möglichster Sicherheit ausführen zu können, wurde danach getrachtet, eine gute Beruhigung des Wassers hervorzubringen. Anfangs wurde hiezu eingebrachte grobe Sackleinwand, durch welche das Wasser passieren mußte, verwendet. Die erreichte Beruhigung war damit allerdings sehr gut; aber einzelne Fasern der Leinwand lösen sich leicht ab, gelangen ins Wasser und damit an die eintauchenden Teile der Meßinstrumente, wodurch vielfache Störungen der Beobachtungen verursacht werden. Außerdem versetzt sich die Leinwand allmählich durch Ansammlung feiner Sinkstoffe, die infolge anderweitiger Versuche niemals ganz abgehalten werden können, was ebenfalls nicht wünschenswert ist. Zur Beseitigung dieser Übelstände ließ Herr Professor Rehbock, um die dem Wasser innewohnende lebendige Kraft zu zerstören, zwei schräg vor die beiden Einströmungsöffnungen zu dem Behälter *B* liegende Bleche anbringen, gegen die sich das Wasser bewegen muß. Dieselben sind in den Grundrissen Fig. 1*b* und 2*b* Taf. 1 angegeben. Sodann wurden noch zwei vertikal stehende, an die kurzen Blechwände *b* anschließende perforierte Bleche von 1,1 m Höhe eingebracht, die weiterhin das Wasser durchströmen muß, um dann erst in die Ausflußöffnung zu gelangen. Diese, im Grundriß schräg gestellten, perforierten Bleche sind in den genannten Figuren durch punktierte Linien kenntlich gemacht. Auf solche Weise war eine vorzügliche Beruhigung hervorgebracht, die allen Anforderungen, die man an eine solche stellen muß, entsprach; es bildet sich eine spiegelglatte Oberfläche des Wassers aus, in die Spitzen sehr genau eingestellt werden können.

Die Überfallhöhen wurden, wie später gezeigt wird, in der Symmetrieebene der Versuchsanlage in genügender Entfernung von der Überfallkante durch Spitzeneinstellung gemessen oder auch durch Ablesung an einem noch näher zu erwähnenden Schwimmerapparat, der seine Aufstellung über dem seitlich im großen Behälter *B* angebrachten, allseitig abgeschlossenen kleineren Behälter von 0,30 zu 0,35 m Querschnitt fand. In diesem befindet sich ein Schwimmer. Ein Rohr von 15 mm Durchmesser führt in die Symmetrieebene des Behälters *B* unter die Stelle, wo die gesuchte Überfallhöhe

sich ausbildet. Vergleichende Untersuchungen haben gezeigt, daß die Höhe des Wasserspiegels in dem Behälter, welcher den Schwimmer birgt, auch in Wirklichkeit unter allen Umständen mit derjenigen oberhalb des Überfalles, wo die Oberfläche noch wagrecht ist, übereinstimmt und somit ein Einfluß etwaiger Geschwindigkeiten vor der Rohröffnung nicht zu bemerken war.

Nach Verlassen des Meßüberfalles strömt das Wasser in die eigentliche Versuchsrinne für Überfälle ein (Fig. 1 Taf. 1). Diese Rinne besteht aus einem im Lichten annähernd 50 cm breiten, 71 cm hohen und 4 m langen Kasten aus ineinander eingefalzten Holzbohlen von 3 cm Stärke. Sie ist mit Winkelschienen armiert und mit Siderosten gestrichen, um ein Verziehen der Bohlen zu verhindern. Fig. 3 Taf. 1 zeigt den Querschnitt der Rinne. In diesem Teile der Anlage befinden sich auch die weiteren Beruhigungsvorrichtungen. Als solche dienen drei in Abständen von etwa 80 cm hintereinander gestellten geneigten Rahmen aus Holzleisten, auf die Drahtnetze gespannt sind. Die Maschenweite beträgt bei dem vordersten 1 mm, bei den beiden folgenden je 2 mm. Diese Beruhigungsrahmen erwiesen sich als ein ebenso einfaches wie zweckmäßiges Mittel.

An diese breite Beruhigungsrinne schloß sich eine schmale Rinne an; sie ist etwa 25 cm im Lichten breit, 43 cm hoch und 3 m lang. In ihr fanden die Tafeln, an denen die Überfälle beobachtet werden sollten, Aufstellung. Auch sie ist mit Winkelschienen verstärkt und mit Siderostenfarbe gestrichen. Beim Übergang von der breiten Rinne in die schmale bildet sich seitliche Kontraktion aus; dadurch werden Unregelmäßigkeiten der Oberfläche hervorgerufen. Diese Kontraktionen wurden durch Anbringung von zugeschrägten Führungswänden aus Holz, die etwa 30 cm in die breite Rinne hineinragten und durch einfaches Annageln befestigt waren, vollkommen beseitigt, so daß also eine Beunruhigung des Wassers an dieser Stelle verhindert wurde. Bei den weniger schief stehenden Überfällen konnte auch noch ein weiteres Drahtnetz in der schmalen Rinne angebracht werden, doch war es entbehrlich, da auch ohne dasselbe schon genügende Beruhigung und Parallellismus der Stromlinien eintrat.

Die Wehrtafeln bestanden aus 4 mm starkem Eisenblech, die eine Wehrhöhe von rund 25 cm erzeugten. Die Längskante, die dazu bestimmt war, die Überfallkante zu bilden, ist wie beim Meß-

überfall auch hier derartig abgeschrägt, daß der an der Kante entstehende Winkel 30 Grad mißt (siehe auch Fig. 6 Taf. 1). Die Kante selbst war fein und sauber bearbeitet und wurde sorgfältig blank gehalten und vor Beschädigungen geschützt. Auch die Flächen der Wehrtafeln waren mit Siderosten gestrichen, um sie vor Rost zu behüten und ihnen die gleiche Rauhigkeit wie den Rinnenwänden zu geben. Ihre Befestigung fanden diese Wehrtafeln in Falzen, die in die Wände und in den Boden der Rinne eingeschnitten waren, wie in Fig. 5 Taf. 1 dargestellt ist. Die sämtlichen Falze des Bodens laufen von derjenigen Nut strahlenförmig aus, die der seitlichen Befestigung des normalen Wehres dient; sie entsprechen den verschiedenen Wehrstellungen, die untersucht werden sollten vom normalen Wehr an bis zu demjenigen, das unter 15 Grad gegen die Rinnenachse geneigt ist, mit Zwischenstellungen in Abständen von je 15 Grad. Bei den Versuchen in breiter Rinne kamen dazu dann noch Falze für gebrochene Wehre. Die Tafeln wurden von oben in die entsprechenden Falze an den Wänden eingelassen, nachdem sämtliche Falze mit gewöhnlichem Glaserkitt ausgefüllt waren. Lag die Tafel satt im Kitt auf und war sie durch Unterstopfung mit kleinen Keilen derart eingestellt, daß ihre Überfallkante genau horizontal stand, so wurde der Kitt überall glatt und mit den Wänden bündig gestrichen. Desgleichen wurden auch die übrigen Falze, die bei einem Versuche nicht gebraucht wurden, zugekittet und glatt gestrichen. Mit Hilfe des Glaserkittes war ein vollkommen wasserdichter Verschuß herzustellen, der durch den einseitigen Wasserdruck nur noch besser zur Wirkung kam. Der gewöhnliche Glaserkitt bildete überhaupt das am meisten angewendete Dichtungsmaterial, mit dem auch die Fugen der Holzrinnen gedichtet waren; er eignet sich vorzüglich zu solchen Dichtungsarbeiten, besonders wenn darauf geachtet wird, daß die Anbringungsstellen gut getrocknet sind. Durch diese ganze Anordnung fanden die Wehrtafeln eine sehr feste, dichte und saubere Aufstellung, bei der in leichtester Weise eine sehr genaue wagerechte Einstellung der Überfallkante erreicht werden konnte. Es bildete dies den Hauptgrund für die Wahl von Holz zur Herstellung der Rinnen. Dazu kam noch, daß die Lüftung des Strahles bei einer Holzrinne auf die bequemste Art vollzogen werden konnte. Es wurde einfach in einer geringen Entfernung stromabwärts von den Seitenfalzen und etwas unterhalb der Überfallkante je ein Loch von etwa 25 mm Durchmesser in die

Gerinnwand gebohrt, wie aus den Fig. 1 *a* und 2 *a*, sowie 3 und 4 Taf. 1 ersichtlich ist. Eine vollständige Ausgleichung des Druckes der Luft unterhalb des Strahles mit demjenigen der äußeren Atmosphäre war solcherart in genügendem Maße gewährleistet. Der Abstand der Falze, die dem normalen Wehre zur Befestigung dienten, vom Ende der Rinne betrug 36 cm. Dem Strahle wurde dadurch auch bei den größten vorkommenden Überfallhöhen in seiner ganzen Ausdehnung eine seitliche und untere Führung gegeben und er konnte sich erst nach allen Seiten ausbreiten, wenn sein Fuß bereits horizontal verlief. Eine Rückwirkung auf den Abflußkoeffizienten fand so nicht mehr statt.

In Fig. 2 Taf. 1 ist die Anordnung dargestellt, wie sie den Versuchen in der breiten Rinne von etwa 50 cm lichter Weite zu Grunde lag. Die an den Behälter *B* anschließenden und für sich abnehmbaren Behälter *C* und *D* finden später bei Besprechung der Eichung des Meßüberfalles nähere Erwähnung. Verschiedener Umstände halber mußte die Versuchsrinne, hier jene schon oben erwähnte, mit Winkelschienen verstärkte Holzrinne von annähernd 4 m Länge und 50 cm lichter Breite direkt an den letzten Behälter *D* angeschlossen werden. Als Einlauf diente eine kurze Ansatzrinne *E* (Fig. 2 *a* Taf. 1) von 20 cm Weite im Lichten. Dahinter fanden, wie aus der nämlichen Fig. 2 *a* ersichtlich, jene schon oben näher beschriebenen Beruhigungsrahmen Aufstellung. Außerdem wurde noch quer auf den ersten dieser Beruhigungsrahmen ein massives, etwa 15 cm breites Blech befestigt, das zur sofortigen Brechung des einströmenden Strahles diente. Die Beruhigung war eine sehr gute. Was die Aufstellung der Wehrtafeln und die Lüftung anbelangt, so wäre hier dasselbe zu sagen, wie soeben bei Besprechung der schmalen Rinne. Erwähnt möge noch werden, daß die Enden der Wehrtafeln durch kräftige Nägel derart fest eingespannt wurden, daß Ausbiegungen durch den Wasserdruck vermieden wurden, die sonst bei sehr schiefen Wehren infolge der stark vergrößerten Spannweiten der Platten auf den Ausflußkoeffizienten Einfluß hätten haben können. Die Entfernung des Rinnenendes von den Falzen, die dem normalen Wehre zur Aufstellung dienten, betrug hier 40 cm.

Nachdem das Wasser in der Versuchsrinne die darin angebrachten Wehrtafeln überströmt hat, verläßt es die Holzrinne und stürzt in die zu Beginn erwähnte Hauptrinne des Laboratoriums. Aus dieser gelangt es durch ein verschließbares Ventil wieder in

das im Keller befindliche Hauptsammelbecken und hat damit seinen Kreislauf geschlossen. Die von der Pumpe gelieferte überschüssige Wassermenge, die zu dem jeweiligen Versuch nicht verwendet wird, und der der Eintritt in die abzweigende Rohrleitung durch den in dieser befindlichen, schon eingangs erwähnten Schieber verwehrt wird verfolgt die Hauptrohrleitung zum Sammelbecken am Kopfende der großen Rinne weiter. Von da findet sie ihren Weg zum Hauptsammelbecken in schon beschriebener Weise zurück, um dann von neuem hochgefördert zu werden.

2. Das Versuchsverfahren.

a) Der Meßüberfall und seine Eichung.¹⁾

Um das bei direkten Wassermengenmessungen nötige gleichzeitige Beobachten mehrerer Apparate zu vermeiden, um Zeit zu sparen und die Messungen bequemer ausführen zu können, werden die Wassermengen auf indirektem Wege gemessen. Das bei einem Überfallversuch verwendete Wasser strömt nacheinander über den sogenannten Meßüberfall und über den zur Untersuchung stehenden Überfall. Zur Bestimmung der pro Sekunde passierenden Wassermenge ist daher lediglich die Beobachtung der Überfallhöhe am Meßüberfall nötig. Außerdem muß aber die Kenntnis des Ausflußkoeffizienten dieses Überfalles vorausgesetzt werden. Um zu dieser Kenntnis zu gelangen, muß der Meßüberfall wenigstens einmal mit größtmöglicher Genauigkeit geeicht werden. Da er seine Stellung stets beibehält, und auch die Art der Zuströmung des Wassers stets die gleiche bleibt, indem an der ganzen Anordnung nichts geändert wird, bleibt das Resultat der Eichung ein für allemal bestehen. Der Meßüberfall ist ein sogenannter Ponceletüberfall, d. h. ein Überfall in dünner Wand, von rechteckiger Form, mit scharfen Kanten und Seitenkontraktion. Die Zufußgeschwindigkeit kann vernachlässigt werden, da das Wasser in großem Querschnitt aufsteigt. Sollte sich bei großen Wassermengen ein Bruchteil der aufwärts gerichteten Geschwindigkeit in die Ausflußöffnung fortpflanzen, so muß dies bei der gleichen Überfallhöhe stets wieder von neuem in gleicher Weise geschehen. Die pro Sekunde abfließende Wassermenge kann man hier also nach der gewöhnlichen Dubuatschen Formel berechnen zu:

¹⁾ Vgl. zu diesem Absatz die Bemerkungen des Nachtrags.

$$Q = \mu_1 \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g \cdot b_1 \cdot h_1^3}, \quad (1)$$

worin bedeuten:

Q die sekundliche Abflußmenge in m^3 ,

h_1 die Überfallhöhe in m ,

μ_1 den Ausflußkoeffizienten,

b_1 die Überfallbreite in m (hier 0,5),

g die Erdbeschleunigung (für Karlsruhe = 9,806 m/sec^2).

Für den Meßüberfall soll stets der Index 1 gelten.

Die Eichung besteht nun darin, Werte des Ausflußkoeffizienten μ_1 bei verschiedenen Überfallhöhen h_1 zu bestimmen; also durch einmalige Messung der Überfallbreite b_1 und jeweilige Beobachtung von h_1 und Q aus obiger Formel den Wert von μ_1 zu berechnen.

Zu diesem Ende müssen natürlich direkt Wassermengenmessungen ausgeführt werden. Die genauesten Resultate bei solcher Art von Messungen erzielt man, wenn es möglich ist, die Wassermenge zu teilen und jeden einzelnen Teil für sich bezüglich seiner Menge zu bestimmen, also kurz, eine Partialmessung, die jeden gewünschten Grad der Genauigkeit zuläßt, je nachdem man die ganze Wassermenge in mehr oder weniger Teile zerlegt. Gegenwärtig ist im Laboratorium gerade eine Anlage fertig gestellt worden, die es gestattet, die ganze Wassermenge in bis zu 32 Teile mittelst eines Systems von Düsen zu zerlegen, die man nach Belieben gleichzeitig oder einzeln in Funktion setzen kann. Die Versuche, die hier besprochen werden sollen, wurden nun zu einer Zeit ausgeführt, als diese Nebenanlage des Laboratoriums noch im Stadium der Entwicklung begriffen war, und es noch an den nötigen Mitteln fehlte, eine solche immerhin kostspielige Einrichtung für die Eichung aufzustellen. Diese mußte daher, so gut es eben möglich war, mit Hilfe der schon vorhandenen Apparate vorläufig vorgenommen werden. Eine Teilung der Wassermenge, die sehr wünschenswert gewesen wäre, fand nicht statt. Der Wasserabfluß mußte im ganzen gemessen werden. Dieser Umstand ist natürlich auf die Schärfe der Versuchsergebnisse von entscheidendem Einfluß gewesen.¹⁾

Die Messung der Überfallhöhe geschieht in der Symmetrieebene des Meßüberfalles in einer Mindestentfernung von etwa 80 cm von

¹⁾ Siehe hierzu die Bemerkungen im Nachtrag.

der Überfallkante, wo sich durch Nivellierung auch bei der größten vorkommenden sekundlichen Wassermenge der Wasserspiegel als horizontal erwiesen hatte. Sie wird durch Einstellung von Metallspitzen in die Höhe des Wasserspiegels erhoben. Diese Spitzen schneiden von unten her in den Wasserspiegel ein, wodurch eine sehr scharfe Messung möglich wird. In Fig. 12 Taf. 1 ist ein solcher Spitzenmaßstab, wie diese Apparate kurz genannt sein mögen, skizziert. Am Stabe, der aus Holz hergestellt ist und quadratischen Querschnitt besitzt, befindet sich der Bewegungstrieb, bestehend aus Zahnstange und -rad. An zwei Seiten ist je ein Zelluloidmaßstab mit Millimeterteilung befestigt. Eine im Führungsgehäuse angebrachte Feder, sowie die Stellschraube sichern die unverrückbare senkrechte Lage gegen die Γ -Schiene, die wiederum durch Schraubzwingen so an ihre Unterlage angepreßt wird, daß der Maßstab vertikal steht. Am Führungsgehäuse befindet sich die Ablesvorrichtung. Außer der in Fig. 13 Taf. 1 abgebildeten Spitze wurden auch solche nach Fig. 14 verwendet. Verfasser hat die Erfahrung gemacht, daß mit solchen Spitzen, die auch Bazin¹⁾ bei seinen Versuchen verwendete (ebenso wie Francis und Zeuner), bei ruhiger Oberfläche ganz vorzügliche Einstellungen zu machen sind, besonders wenn man mit Hilfe einer elektrischen Handlampe die Spitze im Spiegelbild der Lampe auf der Wasseroberfläche erscheinen läßt. Auch bei bewegter Oberfläche gestatten diese Spitzen noch ein weit genaueres und rascheres Arbeiten als von oben in den Wasserspiegel eintauchende Spitzen. Mit einiger Übung kann man mit Leichtigkeit die Spitze sehr genau in die Mittellage des Wasserspiegels einstellen.

Ein weiterer Vorteil der erwähnten Spitzen liegt in der bequemen Einstellung derselben auf die Höhe der Überfallkante. Die Messingplatte, die den Meßausschnitt enthält, ist, wie erwähnt, an der Abschlußwand des Behälters *B* etwas verschiebbar. Durch Lockern der Schraubenmutter, die sie an die Wand pressen, ist eine genaue Horizontierung der Überfallkante mit Hilfe der Setzlibelle möglich. Hat sich nach Abstellung des Zuflusses das Wasser verlaufen, so steht im Behälter *B* der Wasserspiegel um etliche Millimeter höher als die Kante des Überfalles; diese Höhendifferenz wurde jedesmal bestimmt durch Einstellung der Spitze auf die Höhe

¹⁾ Annales des Ponts et Chaussées 1888, tom. 16, p. 398.

der Überfallkante und durch weitere Einstellung auf den ruhenden Wasserspiegel; die Differenz beider Ablesungen gibt den gesuchten Höhenunterschied. Die erstere Einstellung geschah sehr einfach dadurch, daß die Setzlibelle von Überfallkante und Spitze getragen wurde, derart daß auf diese letztere kein Gewicht übertragen wurde, das Deformationen der Spitze hätte verursachen können. Addiert bzw. subtrahiert man, je nach der Lage des Maßstabnullpunktes, diese so bestimmte Höhendifferenz zwischen Wasserspiegel und Überfallkante von jener Ablesung für den Wasserspiegel, die gemacht wird, wenn der Spitzenmaßstab sich am Orte der Überfallhöhenmessung für die Versuche befindet, so erhält man dadurch auch für diesen Ort die Ablesung für die Höhe der Überfallkante. Wird mit dem Nivellierinstrument gearbeitet, so kann die zweite Ablesung gespart werden. Hat man bei irgend einem Versuch mit bestimmter Überfallhöhe den Maßstab auf den Wasserspiegel eingestellt und die zugehörige Ablesung gemacht, so gibt die Differenz derselben mit der Ablesung für die Höhe der Überfallkante die gerade herrschende Überfallhöhe an. Eventuell eintretende Senkungen des ganzen Behälters *B* spielen dabei keine Rolle, da Spitzenmaßstab, Überfallkante und Wasserspiegel sie gleichmäßig mitmachen würden.

Die Überfallhöhe konnte auch mit Hilfe eines nach Angaben von Herrn Professor Rehbock konstruierten Schwimmerapparates bestimmt werden, wie ihn Fig. 11 Taf. 1 zeigt. Am Schwimmer *S* ist eine seidene Schnur befestigt, die um die mit eingeschnittenen Windungen versehene Rolle *R* führt, dieselbe drei bis viermal umschlingt, um dann am anderen Ende das Gegengewicht *G* zu tragen. Der Durchmesser der Rolle ist derartig bemessen, daß eine ganze Umdrehung einer Höhenänderung des Schwimmers von 50 mm entspricht, wozu noch eine kleine Korrektur infolge Ungenauigkeiten der Arbeit und ungenauer Bestimmbarkeit der Dicke des allerdings sehr gleichmäßig gedrehten Fadens tritt. Diese Korrektur wurde mittelst Spitzenmaßstabvergleichung ermittelt und betrug bei den beiden in Verwendung stehenden Apparaten im Mittel + 1,71% bzw. + 0,55% der Ablesung. Die Länge des Zeigers ist derart, daß die Genauigkeit der Ablesung auf $\frac{1}{20}$ mm geht. Mit Hilfe dieser Schwimmerapparate ist die Beobachtung der Überfallhöhen sehr bequem und lassen sich vor allem plötzliche Schwankungen leicht aus größerer Entfernung erkennen. Auf sie allein darf man sich aber nicht verlassen, denn plötzliche Zufälligkeiten, wie Gleiten des Seidenfadens

auf der Rolle durch Anstoßen oder durch sonstige äußere Anlässe, Benetzen des Fadens durch Tropfen und dadurch verursachte Längenänderungen des Fadens etc., können leicht die Beobachtungen störend beeinflussen und Wiederholungen derselben erforderlich machen. Wahrscheinlich aus diesen Gründen mußten leider bei der vorliegenden Arbeit zwei Versuchsreihen ausgeschieden werden. Es empfiehlt sich, Schwimmerapparat und Spitzenmaßstab zur gegenseitigen Kontrolle gleichzeitig zu verwenden, wie es hier bei allen Versuchen in schmaler Rinne und bei den meisten in der breiten Rinne geschehen ist. Die Ermittlung der Ablesung für die Höhe der Überfallkante geschieht am Schwimmerapparat ganz analog wie auf Seite 18 beschrieben mit Hilfe eines Spitzenmaßstabes.

Als Aufnahmegefäß zur Volummessung stand die schmale Holzrinne zur Verfügung, in der später ein Teil der Versuche ausgeführt wurde, und die einen Inhalt von etwa 340 l besitzt. Da die größte Wassermenge, mit der gearbeitet wurde, etwa 65 l/sec. beträgt, so wäre in diesem Falle die Beobachtungszeit nur etwa 5 Sekunden. Dies ist natürlich viel zu wenig, denn die Fehler in der Zeitbeobachtung fallen hier prozentual zu sehr ins Gewicht. Es konnten im ungünstigsten Falle nur noch Wassermengen bis zu etwa 35 bis 40 l/sec. gemessen werden. Die Beobachtung der Wassermenge geschah folgendermaßen: An der Abschlußwand des Behälters *D* (Fig. 2 Taf. 1) war eine kurze Ansatzrinne *E* von 20 cm lichter Weite und 17 cm Länge mit seitlich fortgesetzten Führungswänden angebracht. Darunter stand der Meßkasten, so daß das Wasser aus dem Behälter *D* direkt in denselben fallen mußte. Auf dem Meßkasten war lose verschieblich ein 2 mm starkes Eisenblech von etwa 1 m Länge mit einer senkrecht darauf stehenden, stromabwärts angebrachten Abschlußwand gelegt. Dieses Blech lag unterhalb des oben erwähnten Ansatzgerinnes *E* und diente dazu, den aus *D* austretenden Wasserstrahl von dem Meßkasten abzulenken und seitlich vorbeizuführen. Im gegebenen Augenblick konnte es von Hand fortgezogen werden, wodurch das Wasser in den Meßkasten einströmte; nach Füllung desselben wurde es wieder rasch untergeschoben und das Wasser floß dann wieder am Meßkasten vorbei ab. Um einen Rückstau in den Behälter *D* hinein zu vermeiden, war durch Anbringung von Brettern am Ende der Ansatzrinne die Überfallschwelle derselben um etwa 20 cm erhöht worden, so daß das Wasser etwa 30 cm frei fallen und die Luft jederzeit ungehindert unter den Strahl treten konnte. Rückstau war

dabei nicht zu beobachten. Die Zeitbeobachtung wurde im Augenblick des Wegziehens und des abermaligen Vorstoßens des Bleches vorgenommen durch Ein- bzw. Ausrückung einer Sekundenuhr. Wie bei vielen ähnlichen Messungen tritt der größte Beobachtungsfehler hier bei der Zeitbestimmung ein. Konnte anfangs leicht eine Genauigkeit dieser Beobachtung von 0,5% eingehalten werden, so war dies bei größeren Wassermengen nicht mehr der Fall. Bei Wassermengen von etwa 35—40 l/sec. traten Fehler von 2—3% auf.

An der Stelle seiner Verwendung wurde der Meßkasten in unverrückbarer Lage aufgestellt, gehörig gedichtet, um jedes Ausrinnen zu vermeiden, und genau auskalibriert. Zu diesem letzteren Zwecke war einer der oben beschriebenen Spitzenmaßstäbe mittelst einer Schiene mit dem Kasten fest verbunden. Senkungen des Kastens waren durch Unterklotzung vermieden und wären auch vom Spitzenmaßstab bei Eichung des Kastens sowohl als auch bei den nachfolgenden Verwendungen desselben stets in gleicherweise mit gemacht worden. Die Inhaltsbestimmung geschah derart, daß dem gefüllten Kasten stets ein gleiches gemessenes Wasserquantum mittelst Heber entzogen wurde, worauf die Senkung des Wasserspiegels mit Hilfe des Spitzenmaßstabes bestimmt wurde. Da der Meßkasten zu wiederholten Malen geeicht werden mußte, um Inhaltsänderungen desselben berücksichtigen und geeignete Mittelwerte bilden zu können, behielt der Spitzenmaßstab seine Lage zum Kasten stets in der gleichen Weise für die Dauer der ganzen Eichung des Meßüberfalles bei. Diese gegenseitige Lage von Kasten und Spitzenmaßstab konnte jederzeit durch Einstellung auf eine Marke am Boden des Kastens kontrolliert werden. Mit Vorteil ließen sich bei diesen ganzen Messungen auch die Schwimmerapparate verwenden. Für die gemachten Ablesungen war es dann weiterhin möglich, eine Inhaltskurve des Kastens zu zeichnen. Bei den unteren und den oberen 5 cm etwa wurden regelmäßige Ablesungen in kleinen Entfernungen gemacht, dazwischen nur solche in größeren Abständen. Aus verschiedenen Gründen wurde der Kasten niemals ganz entleert; zur Entleerung dienten mit Gummistöpseln verschließbare Öffnungen. Sollte nun eine Wassermengenbestimmung gemacht werden, so wurde der von der vorhergegangenen Messung noch gefüllte Kasten bis auf einige Zentimeter über dem Boden entleert und hier eine Ablesung für den Wasserspiegel gemacht, dann wurde das oben erwähnte Ablenkungsblech plötzlich unter dem Strahl fortgezogen und, nachdem sich der Kasten bis auf einen kleinen Abstand

vom oberen Rand gefüllt hatte, wieder rasch vorgestoßen unter gleichzeitiger Ein- bzw. Ausrückung der Sekundenuhr. Nach Beruhigung der Oberfläche des nun im Kasten zurückgehaltenen Wassers, zu deren Beschleunigung einige eingesetzte Querbleche dienten, konnte dann in aller Ruhe die zweite Ablesung für den nunmehr gehobenen Wasserspiegel gemacht werden. Mit Hilfe der Inhaltskurve konnte sodann das zu diesen beiden Ablesungen gehörige Volumen des zurückgehaltenen Wassers ermittelt werden.

Während des Füllens des Kastens mußte ein zweiter Beobachter die nötigen Ablesungen zur Bestimmung der Überfallhöhe am Meßüberfall mit Zwischenablesungen machen.

Wie bereits kurz erwähnt, konnten auf die besprochene Art nur Wassermengen bis zu etwa 35—40 l/sec., entsprechend einer Überfallhöhe am Meßüberfall von 12—13 cm wenigstens einigermaßen genau noch bestimmt werden. Darüber hinaus wurden die Beobachtungen zu ungenau. Um nun für das weitere Verhalten des Ausflußkoeffizienten gute Anhaltspunkte zu erhalten, wurden die mit dem Behälter *B* verbundenen Behälter *C* und *D*, die für anderweitige Versuche angefertigt waren, direkt benützt. An der Abschlußwand dieses Behälters *D* ließ sich ein großer, mittelst Handrad vertikal beweglicher Schieber von 50 cm Öffnungsweite anbringen. Durch Schließen desselben, das sich innerhalb von $1/20$ Sekunde bewirken ließ, war es möglich, das Wasser zurückzuhalten und durch Beobachtung der Zeit vom Schluß des Schiebers bis zum Überlaufen des Behälters die in dieser Zeit eingeflossene Wassermenge dem Volumen nach zu bestimmen. In *C* und *D* angebrachte Maßstäbe gestatteten die vor Schluß des Schiebers vorhandenen Wassertiefen in diesen Behältern abzulesen und aus einer für dieselben bestimmten Inhaltskurve ließ sich schließlich das Volumen selbst ermitteln. Mit dieser Methode waren indessen manche Mißstände verknüpft. Dazu gehörte z. B., daß die Ablesung der Wassertiefen wegen der ungenügenden Beruhigung der Oberflächen recht ungenau war, und daß diese in den beiden Behältern keine horizontalen Ebenen bildeten, wie das bei der Inhaltsbestimmung der Fall war, wenn auch stets versucht wurde, solche möglichst hervorzubringen. Ferner tritt der Moment des Gefülltseins im Sinne der Inhaltsbestimmung der Behälter nicht deutlich genug in die Erscheinung, wodurch Ungenauigkeiten in der Zeitbeobachtung hervorgerufen werden. Schließlich wurde mißlich empfunden, daß durch

das Zurückhalten von etwa 1 m^3 Wasser — soviel wurde ungefähr bei jeder Messung aufgefangen — die Druckhöhe der Pumpe langsam abnahm, und sich bald nach Beendigung des Versuchs eine geringere Überfallhöhe einstellte. Das Verschwinden dieser Schwankungen mußte jedesmal abgewartet werden, bevor der Versuch seine Fortsetzung finden konnte. Immerhin ließ sich erkennen, daß auch bei den größeren Wassermengen der Ausflußkoeffizient sein regelmäßig gebildetes Gesetz beibehält. Die Ergebnisse dieses Teiles der Eichung des Meßüberfalles konnten daher gut mitverwendet werden.

Was die Genauigkeit der ermittelten Koeffizienten anbelangt, so ist zu bemerken, daß bei großen Überfallhöhen durch Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Wassermenge erheblichere Ungenauigkeiten im Koeffizienten entstehen, bei kleineren dagegen durch solche bei Bestimmung der Überfallhöhe. Das letztere hängt damit zusammen, daß in Gleichung (1) diese Überfallhöhe in der Potenz 1,5 erscheint. Ist λ der Beobachtungsfehler bei einer Überfallhöhe h_1 , so wird in Gleichung (1) der Ausdruck eingesetzt $(h_1 + \lambda)^{1,5}$, somit wird der Fehler in der Wassermenge, wenn man ihn in % der wahren sekundlichen Wassermenge ausdrückt:

$$\left[\frac{(h_1 + \lambda)^{1,5} - h_1^{1,5}}{h_1^{1,5}} \right] \cdot 100.$$

Vernachlässigt man alle Glieder von λ höher als die 1. Potenz, so wird der prozentuale Fehler in Q:

$$150 \cdot \frac{\lambda}{h_1} \cdot 1)$$

Ist z. B. bei einer Überfallhöhe von $h_1 = 20 \text{ mm}$ diese um $\lambda = 1 \text{ mm}$ (also um 5% ihres wahren Wertes) ungenau bestimmt, so ist die Ungenauigkeit in der sekundlichen Abflußmenge bereits 7,5%.

Die Tabelle 1 gibt die Eichungsergebnisse für den Meßüberfall wieder. Um Weitläufigkeiten zu vermeiden, sind nur die Hauptresultate angegeben; ausgeführt wurden 392 Beobachtungen, wovon im Laufe der Auswertung 46 ausgeschieden werden mußten. Die übrigen 346 wurden in Gruppen derart zusammengefaßt, daß Beobachtungen von annähernd gleicher Überfallhöhe eine Gruppe bil-

1) Siehe auch Hansen, Zeitschrift d. Ver. Deutsch. Ing., Bd. 36, 1893, S. 1096; Weisbach, Experimental-Hydraulik. Freiberg 1855, S. 69.

deten. Für jede dieser Gruppen wurde ein arithmetisches Mittel gebildet und dieses unter h_1 und μ_1 in den entsprechenden Kolonnen der Tabelle 1 eingesetzt. Dieses Zusammenfassen in arithmetische Mittel ist zwar im vorliegenden Falle nicht streng richtig, denn der Zusammenhang zwischen h_1 und μ_1 ist nicht durch eine lineare Funktion gegeben. Um die nachfolgenden Zahlenrechnungen aber nicht allzu umfangreich werden zu lassen, war diese Zusammenfassung angezeigt und auch für die Zwecke, die hier verfolgt werden, genügend genau.

Mit Rücksicht auf das verhältnismäßig Primitive der ganzen Eichung waren natürlich in den Koeffizienten μ_1 starke Abweichungen zu erwarten; und in der Tat traten auch solche bei vereinzelt Beobachtungen in hohem Grade auf. Im allgemeinen sind die Koeffizienten aber sehr gleichmäßig verteilt und zeigen gute Übereinstimmung mit Versuchen von Frese¹⁾ für Wehre mit Seitenkontraktion, wenn hier auch lediglich nur zwei Beobachtungen herangezogen werden konnten und ein direkter Vergleich wegen der eigenartigen Zuströmung des Wassers zum Meßüberfalle nur einen ungefähren Anhalt bieten kann. Für den Überfallhöhenintervall zwischen 10 und 100 mm ist die Eichung am genauesten ausgefallen. Wenn nun auch einzelne Beobachtungen besonders bei größeren Überfallhöhen hie und da etwas abseits liegende Werte ergeben haben, so zeigen die aus den Einzelbeobachtungen auf vorstehende Weise gebildeten Mittelwerte doch einen sehr gesetzmäßigen Verlauf mit durchschnittlichen Abweichungen von nur 0,8—0,9% vom Mittel. Wenn man nun weiter bedenkt, mit welchen Schwierigkeiten die Bestimmung der Werte μ_1 verknüpft war, daß auch bei anderen Experimentatoren häufig ähnliche Abweichungen vorkommen, so kann man den Schluß zulassen, daß die vorgenommene Eichung, wenn keine allzu große Genauigkeit angestrebt zu werden braucht und wenn es sich hauptsächlich um vergleichende Untersuchungen handelt, ganz gute Dienste tut. Was insbesondere diese vergleichenden Untersuchungen anbelangt, sind die mit den erzielten Werten abgeleiteten Ergebnisse, wie später gezeigt werden soll, vollkommen zuverlässig.

Mit Hilfe der genannten Mittelwerte läßt sich nun leicht die Weiterbehandlung auf analytischem Wege vornehmen. Der analy-

¹⁾ Frese, Zeitschrift d. Ver. Deutsch. Ing., Bd. 34, 1890, S. 1285, Tab. 9.

tische Weg ist hier deshalb empfehlenswert, weil von dem Eichungsresultat ja immer wieder Gebrauch gemacht werden muß und sich deshalb mit Hilfe einer Gleichung für μ_1 viel bequemer arbeiten läßt. Außerdem ist ein Ausgleich der Fehler hierbei in viel sicherer Weise möglich. In Fig. 1 Taf. 2 sind die ermittelten Werte von μ_1 in ihrer Abhängigkeit von der Überfallhöhe h_1 graphisch aufgetragen. Man erkennt deutlich das von früheren Experimentatoren erkannte Gesetz, dass der Koeffizient mit Zunahme der Überfallhöhe zuerst rasch, dann langsamer abnimmt. Das Abhängigkeitsgesetz ist offenbar dasjenige der Hyperbel. Braschmann, Bazin, Frese u. a. m. haben, wie später zu erörtern sein wird, direkt das der gleichseitigen Hyperbel angenommen. Wie ein Blick auf Fig. 1 Taf. 2¹⁾ zeigt, scheint die Sachlage damit auch in genügender Schärfe charakterisiert zu sein. In der genannten Figur sind auch die beiden Beobachtungen von Frese angegeben. In der Annahme einer solchen Gestalt der Funktion liegt natürlich eine gewisse Willkürlichkeit; weiterhin wird sich indessen zeigen, daß man bei einer solchen Annahme immerhin ganz sicher fährt. Da auch im vorliegenden Falle nichts dagegen spricht, so wurde auch hier als Änderungsgesetz das der gleichseitigen Hyperbel angenommen, also die allgemeine Form:

$$\mu_1 = a_1 + \frac{b_1}{h_1}, \quad (2)$$

worin μ_1 der Ausflußkoeffizient,
 h_1 die Überfallhöhe und
 a_1 und b_1 Konstante.

Für diese beiden Konstanten a_1 und b_1 lassen sich mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate leicht wahrscheinliche Werte finden, besonders da obige Gleichung in bezug auf die Konstanten linear ist. Es wurde die allerdings nicht scharf zutreffende Annahme gemacht, daß alle Einzelbeobachtungen gleich genau sind; als Gewichte wurden jene Zahlen eingeführt, die angeben, aus wieviel Beobachtungen jedes Mittel zusammengesetzt ist. In Fällen, bei denen sehr genaue Beobachtungen vorliegen und eine möglichst scharfe Ausgleichung erzielt werden soll, würde es angezeigt sein, Gewichte proportional zu $h_1^{3/2}$ einzuführen. Für die Konstanten ergaben sich die folgenden Werte:

¹⁾ Über die Bedeutung der gestrichelten Kurve siehe Nachtrag.

und $a_1 = 0,578 \pm 0,0013$
 $b_1 = 1,33 \pm 0,046.$

In Tabelle 1 ist über die Ausgleichung Näheres zusammengetragen. Der mittlere Fehler der Gewichtseinheit berechnete sich zu $\pm 0,018$; der wahrscheinliche Wert des mittleren Fehlers der beobachteten Mittel gegen die gefundenen Funktionswerte zu $\pm 0,0053$. Fehler, hervorgerufen durch Ungenauigkeiten der Annahme der Funktionsform, bleiben kleiner als Ungenauigkeiten in den Beobachtungen. Die durchschnittlichen Abweichungen der Beobachtungswerte gegen die berechneten Werte betragen $0,6\%$.

Für die Koeffizientenkurve wird demnach die Gleichung angenommen:

$$\mu_1 = 0,578 + \frac{1,33}{h_1}, \quad (3)$$

worin h_1 in Millimeter einzusetzen ist. Die in Fig. 1 Taf. 2 eingezeichnete Kurve ist die graphische Darstellung dieser Gleichung.

Gleichung (1) hat nun unter Einführung sämtlicher Zahlenwerte die Form:

$$Q = \left(0,578 + \frac{1,33}{h_1}\right) \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot 9806 \cdot 500,1} \sqrt{h_1^3}$$

oder

$$Q = 26,992 \sqrt{h_1^3} + 0,62 \sqrt{h_1} \quad (4)$$

worin Q in Liter, h_1 in Dezimeter einzusetzen ist. Von der Gleichung (4) wird indessen nur äußerst selten gebraucht. Da die Überfallhöhen meist direkt mit denen am Meßüberfall verglichen werden, wird Gleichung (3) fast ausschließlich gebraucht.

b) Die Ausführung der Versuche mit Wehren verschiedener Grundrißanordnung.

Nach Passieren des Meßüberfalles strömt das Wasser in die Versuchsrinne ein und fließt nach angemessener Beruhigung mittelst der bereits beschriebenen Drahtnetze über das jeweils zur Untersuchung stehende Wehr. Die Messung der Überfallhöhe an diesem gibt zusammen mit der Überfallhöhe am Meßüberfall, dem Überfallkoeffizienten für das Meßwehr und den Längen der Überfallkanten die zur Berechnung des Koeffizienten für das untersuchte Wehr nötigen Unterlagen. Diese beiden Überfallhöhen wurden bei den Versuchen

in der schmalen Rinne mit Hilfe eines Spitzenmaßstabs unter Kontrollierung mittelst des Schwimmerapparates am Meßüberfall bestimmt. Bei der breiten Rinne dienten dazu die Schwimmerapparate. Nur dann und wann wurde eine Kontrolle mittelst Spitzenmaßstabs gemacht. Bei den ersteren Versuchen wurde eine gehobelte Γ -Schiene von 2,2 m Länge auf die Klötze 1 und 2 (Fig. 1 Taf. 1) gelegt und mit ihnen durch Schraubzwingen fest verbunden. Aufgabe dieser Schiene war es, den Spitzenmaßstab zu tragen, so daß derselbe bequem in der Achse der Rinne verschoben werden konnte. Dies ist von besonderer Wichtigkeit, wie gleich zu zeigen sein wird. Bei kleinen Überfallhöhen ist die Oberfläche des fließenden Wassers von Beginn der Absenkungskurve an stromauf in großer Ausdehnung vollkommen wagrecht. Ein Wasserspiegelgefälle konnte auch bei größeren Überfallhöhen im Bereiche des in Betracht kommenden Teiles der Rinne nicht bemerkt werden. Den Querschnitt, in dem die Absenkungskurve beginnt, bezeichnet Boileau¹⁾ sehr treffend mit Initialquerschnitt (section initiale). Er nimmt an, daß in diesem Querschnitte die Krümmung sämtlicher Stromlinien des Querschnitts beginnt und zwar in der Weise, daß die oberste sich senkt, die unterste am Boden hinreichend sich allmählich von hier an hebt. Ob das letztere tatsächlich schon an dieser Stelle eintritt, konnte er nicht genau genug feststellen. Es wird wohl auch kaum der Fall sein; jedenfalls ist eine derartige Beobachtung in der Tat äußerst schwierig. Stromaufwärts von derjenigen Stelle an, wo die volle Beruhigung des Wassers eingetreten ist und die Stromlinien sich im Zustande des Parallelismus befinden, ist ein allerdings geringes Gegengefälle vorhanden, das schon von Bidone²⁾ bei seinen Versuchen beschrieben wird. Die folgende Tabelle gibt eine Aufnahme des Längsprofils bei einem normalen Überfall in der Rinne von ca. 50 cm Breite bei einer Überfallhöhe von 102,9 mm:

Stromaufwärtige Entfernung v. Wehr	0	12,5	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0	175,0	200,0	225,0	cm
Höhe des Wasserspiegels über der Überfallkante	88,0	100,0	102,0	102,5	102,8	102,9	103,0	102,9	102,9	102,2	99,6	mm

Man erkennt hier deutlich das besagte Verhalten; in einer Entfernung von rund 75 cm von der Überfallkante an ist der Wasser-


¹⁾ Boileau, *Traité de la mesure des eaux courantes*. Paris 1854, p. 57.

²⁾ Bidone, *Memoires de l'Académie des sciences*. Turin 1824, tom. 28.

spiegel horizontal und bleibt es bis zu einer Entfernung von etwa 2 m, von da an beginnt die stromaufwärtige Absenkung infolge des Gegengefälles. Es befindet sich hier hinter dem letzten Beruhigungsrahmen eine Wasserwalze mit einer kurzen stromaufwärtigen Oberflächenströmung. Das Gegengefälle und seine Größe hängt natürlich vollständig von der Anordnung der Beruhigungsvorrichtungen ab, auch ist es nicht unbedingt bei jeder Versuchsanlage vorhanden. Sind die Beruhigungsvorrichtungen mangelhaft, so kann das Gegengefälle recht beträchtlich werden. Steht der Überfall schief zur Stromrichtung, so rückt der Endpunkt des Gegengefälles ein kleines Stück stromab, infolge größerer Zuflußgeschwindigkeit bei gleicher Überfallhöhe. Was die Stelle des Beginns der stromabwärtigen Absenkung anbelangt, so scheint die Entfernung derselben von der Überfallkante an jenem Wehrende, an dem sich der stromauf stumpfe Winkel des Wehres befindet, nicht viel verschieden zu sein von der dem normalen Überfall entsprechenden, wo sie in jedem Längsprofile natürlich gleich ist. Nach dem entgegengesetzten Wehrende zu scheint sie sich indessen besonders bei beträchtlichen Überfallhöhen zu vergrößern. Im 3. Abschnitt wird hierüber Näheres gebracht werden. Bei schiefen Überfällen verkleinert sich die Strecke der horizontalen Ausbildung etwas und ist deswegen auf guten ruhigen Einfluß des Wassers in die Rinne zu achten. Es empfiehlt sich, dafür Sorge zu tragen, daß die Stelle, an der die Überfallhöhen gemessen werden, sich innerhalb des besagten Teiles der Oberfläche befindet. Es können sonst grobe Ungenauigkeiten auftreten. Dies bildet den Hauptgrund dafür, daß Boileau¹⁾ vorschlägt, die Überfallhöhen durch Wasserstandsrohren zu erheben, die vor dem Wehre eintauchen; hierüber wird im 2. Abschnitt noch gesprochen werden. Vor Beginn eines jeden Versuches wurde daher ein kurzes Längennivellement des Wasserspiegels ausgeführt und zwar bei einer kleineren Überfallhöhe, einer mittleren und der jeweils vorkommenden größten. Auf Grund dieser Nivellements wurde die zweckmäßigste Lage des Meßortes ermittelt.

Bei den Versuchen in der breiten Rinne von etwa 50 cm lichter Breite war die Anordnung zur Messung der Überfallhöhen, wie schon eingangs erwähnt, eine andere als wie eben beschrieben. Hier wurden die Überfallhöhen mit Hilfe eines Schwimmerapparates aufgenommen. Wie Fig. 2 Taf. 1 zeigt, befand sich der Schwimmer in einem seit-

¹⁾ Boileau, a. a. O., p. 50.


lich der Versuchsrinne aufgestellten zylindrischen Behälter von 32 cm Durchmesser. Im Boden der Versuchsrinne ist ein Loch angebracht, in dem ein Ansatzstück befestigt ist, mit dessen Hilfe ein Schlauch von 2 cm lichtigem Durchmesser die Verbindung der Rinne mit dem Zylinder herstellt. Der Teil des Schwimmerapparates, der die Ablesevorrichtung, also Kreisskala und Zeiger, trägt, findet seinen Sitz auf einer -Schiene, die unverrückbar auf der Versuchsrinne senkrecht zu deren Achse befestigt ist. Durch diese Anordnung ist man bei den Ableesungen für die Überfallhöhen an ein und denselben Meßort gebunden, falls man nicht eine Reihe von Löchern im Boden anbringt. Um dies letztere zu vermeiden, da es manche Mißstände im Gefolge hat, waren nur zwei Löcher angebracht in Entfernungen von 127 und 187 cm vom normalen Überfall. Mit dem ersteren wurden die Messungen bei den weniger schiefen Überfällen ausgeführt, nämlich dem normalen, dem unter 75, unter 60 und unter 45 Grad geneigten Überfall, mit dem zweiten Loch die übrigen, nachdem sich jeweils durch Nivellements ergeben hatte, daß die Meßorte sich im horizontalen Teil der Oberfläche befanden.

Solche im Boden des Gerinnes angebrachte Öffnungen können eventuell bewirken, daß der Wasserspiegel über der Öffnung sich nicht in gleicher Höhe mit demjenigen im verbundenen Gefäße befindet. Dieser Fall tritt z. B. ein, wenn das Wasser mit sehr großer Geschwindigkeit über die Öffnung hinstreicht oder wenn durch mangelhafte Beruhigungsvorrichtungen die Geschwindigkeiten im Querschnitt ungleichmäßig verteilt oder zur Öffnung senkrechte Beschleunigungskomponenten vorhanden sind oder endlich, wenn sich an der Öffnung in das Wasser hinein ragende Teile befinden. Alle diese Fehlerquellen wurden bei den ausgeführten Versuchen möglichst vermieden. Unterschiede in der Höhe der genannten Wasserspiegel wurden daher auch nicht konstatiert. Bei jedem Versuch wurde die Angabe des Schwimmerapparates durch Messungen mittelst der Spitzenmaßstäbe von Zeit zu Zeit kontrolliert. Hie und da auftretende Differenzen befanden sich innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler.

Das eben beschriebene Verfahren der Überfallhöhenmessung fand auch Anwendung bei den Versuchen an gebrochenen und gekrümmten Überfällen.

Mit einigen Worten ist noch zu erwähnen, auf welche Weise Einsenkungen der Versuchsrinne beobachtet und berücksichtigt wurden. Es war dies besonders bei Anwendung des Schwimmerapparates, wie

in Fig. 2 Taf. 1 ersichtlich, erforderlich; der Teil des Apparates, der die Ablesevorrichtung trägt, macht Senkungen der Rinne mit, der Schwimmer aber nicht und dadurch können Fehler in die Ablesungen kommen. An der Schiene, die den Zeigerapparat trägt, war unverschieblich mit Hilfe von Führungsgehäuse und Stellschraube ein Maßstab angebracht ähnlich dem in Fig. 12 Taf. 1 skizzierten Spitzenmaßstab; des weiteren befand sich im Rinnenquerschnitt der Wehrmitte an der Rinnenwand befestigt eine Nivellierlatte. Vermittelst des Nivellierinstrumentes war es dergestalt möglich, sowohl Senkungen in der Gegend der Wehrtafel als auch solche des Zeigerapparates, also ungleichmäßige Senkungen der Rinne, zu beobachten und bei Berechnung der Überfallhöhe aus den Ablesungen entsprechend zu berücksichtigen. Solche anzubringende Korrekturen stiegen übrigens niemals über 0,4 mm und hätten schließlich auch fast ganz vermieden werden können.

Bei den Versuchen in der schmalen Rinne, wo die Überfallhöhen mittelst Spitzenmaßstabs erhoben wurden, befanden sich ebenfalls feste Maßstäbe sowohl am Meßort der Überfallhöhen als auch über der Überfallwand. Diese Rinne war etwas leichter aufgelagert, lediglich auf drei -Träger N. P. 6¹/₂; es ergaben sich hier daher auch größere Durchsenkungen, die bis zu 1,7 mm betragen.

Auf derartige Weise ermittelt und berücksichtigt sind diese Senkungen ohne Einfluß auf das Ergebnis der Beobachtungen; sie verursachen aber Weitläufigkeiten und vor allem Verzögerungen der Messungen und sollten daher, wenn irgend möglich, ganz vermieden werden.

Die Ermittlung der Ableseung für die Höhe der Überfallkante geschah bei all diesen Versuchen in der Rinne ganz so, wie bereits gelegentlich der Besprechung der Eichung des Meßüberfalles erklärt.

Die Ablesungen am Meßüberfall und in der anschließenden Versuchsrinne wurden gleichzeitig vorgenommen. Geringe Schwankungen des Wasserspiegels treten dann und wann plötzlich ein, wenn im Kreislauf des Wassers irgend eine momentane Störung stattgefunden hat; dieselben verschwinden aber bald wieder und für gewöhnlich arbeitet die Pumpe für die vorliegenden Zwecke vollkommen gleichmäßig. Die Beobachtungen wurden nun derart gemacht, daß auf ein gegebenes Zeichen die Ablesungen gleichzeitig vorgenommen wurden und zwar mehrmals bei der gleichen sekundlichen Wassermenge. Auf diese Weise konnten schlecht übereinstimmende Ab-

lesungen oder grobe Ungenauigkeiten und Versehen durch Vergleich der Ablesungen sofort erkannt und unschädlich gemacht werden; die übrigen Werte wurden zu Mitteln vereinigt. Bei diesem gleichzeitigen Beobachten erwies sich die Arbeit mit den Schwimmerapparaten als sehr bequem, da man in jedem Augenblick Steigen oder Fallen des Wasserspiegels leicht auch aus größerer Entfernung erkennen und eventuell zwei Apparate gleichzeitig im Auge haben und an denselben wenigstens grobe überschlägliche gleichzeitige Ablesungen machen kann. Bei Anwendung der Spitzenmaßstäbe ist es schwieriger, gleichzeitige Ablesungen zu erzielen. Man stellt hier dann am besten von vornherein gleich auf die Mittelstellung des Wasserspiegels ein. Schwankungen in der Zuführung können auch dabei leicht von denen lokaler Art unterschieden werden durch stete mündliche Verständigung der beiden Beobachter.

Ein Überfallversuch gestaltete sich demnach folgendermaßen: Nach Erledigung sämtlicher Vorarbeiten, wie Horizontierung der Überfallkante in der Rinne und Kontrolle der des Meßüberfalles, Ermittlung der Ablesungen für die Höhe der Überfallkanten am Meßüberfall und an dem zur Untersuchung stehenden Wehr, Nivellements der Wasseroberfläche oberhalb des letzteren in der Nähe des Meßortes der Überfallhöhen zur Untersuchung der wagerechten Lage des Wasserspiegels, wurde mit den eigentlichen Ablesungen begonnen. Die Überfallhöhe wurde, mit der größten beginnend, schrittweise um ein kleines Stück von etwa 5 mm erniedrigt durch Verminderung der zufließenden Wassermenge und jedesmal die Ablesungen von neuem ausgeführt. Zur Ermittlung der Einsenkungen hatte der Beobachter an der Versuchsrinne dann noch die jedesmaligen Ablesungen mit dem Nivellierinstrument an den betreffenden Maßstäben der Versuchsrinne, sowie an einem Wandmaßstab zur Kontrollierung des Standortes des Nivellierinstrumentes selbst zu machen. Dazwischen wurden Kontrollmessungen für die Angabe des Schwimmerapparates von Zeit zu Zeit ausgeführt. Nachdem man zur geringsten Überfallhöhe gelangt war, die noch die Ausbildung des freien Strahles gestattete (etwa 7—9 mm), wurde die Wasserzuleitung abgesperrt, die Ablesungen für die Höhen der Überfallkanten nachkontrolliert und die Dimensionen der Überfallwand selbst erhoben. Damit war der eigentliche Hauptversuch beendet und es konnten Nebenaufnahmen und -beobachtungen folgen.

Zweiter Abschnitt.

Die Berechnung der Versuche und deren Ergebnisse.

1. Die Berechnungsformeln.

a) Die gebräuchlichsten Berechnungsformeln.

Wie bekannt, ist es in der Hydraulik nur in den seltensten und günstigsten Fällen möglich, ein Problem auf rein theoretischem Wege zu lösen. Wenn sich auch sämtliche Vorgänge nach gewissen Gesetzen abspielen, so bedarf es doch stets der Einführung eines Erfahrungskoeffizienten, um die aus der reinen Theorie gewonnenen Formeln mit den Ergebnissen der Versuche in Einklang zu bringen. Dies ist teils eine Folge der Schwierigkeiten, die manche Probleme bis auf den heutigen Tag der Theorie entgegenstellen, teils auf das Auftreten von Größen, die sich mathematisch kaum oder doch nur sehr schwer fassen lassen, zurückzuführen. Als solche Größe tritt bei den Flüssigkeiten hauptsächlich die Reibung auf; und zwar die innere Reibung, die durch die Zähigkeit der Flüssigkeit bedingt wird, und die Reibung an den Führungswänden der Rinne, die mit der Rauigkeit der Wandungen zusammenhängt.

Die heute noch allgemein in ihrer ursprünglichen oder mehr oder weniger modifizierten Form für die Berechnung der Abflußmenge bei Überfällen angewandte Dubuatsche Formel nimmt auf die Größe der Kontraktion des austretenden Wasserstrahles keine gesonderte Rücksicht. Infolgedessen hat der in diese Formel einzuführende Erfahrungs-

koeffizient eine doppelte Aufgabe: Er muß erstens die Kontraktion berücksichtigen und zweitens den Einfluß der Reibungen im Innern der Flüssigkeit, wie an den Wandungen. Die Größe dieser verschiedenartigen Widerstände ändert sich nun aber von Fall zu Fall. Speziell weist die Kontraktion je nach der Form der Überfallkante, der Überfallwand und des Strahles selbst, abgesehen vom Einfluß der Zuflußgeschwindigkeit, große Differenzen auf.

Während weiter bei den zur Stromrichtung normalen Überfällen die Strömungsart der Flüssigkeit eine ebene ist, treten, sobald der Überfall schief zur Strömungsrichtung steht, Geschwindigkeitskomponenten auf, die senkrecht zur ursprünglichen Strömungsebene stehen. Die Stromlinien sind in diesem Falle keine ebenen Kurven mehr. Wie später an Hand von Versuchen nachgewiesen werden wird, und wie es auch der natürlichen Anschauung entspricht, fließt das Wasser anfangs bei kleinen Überfallhöhen senkrecht zur Überfallebene ab und sucht dann bei Steigerung der Überfallhöhe mehr und mehr seine ursprüngliche Richtung parallel zur Rinnenachse beizubehalten. Des weiteren überkreuzen sich hier die Stromlinien, indem diejenigen der Oberfläche und ihrer Nähe möglichst unabgelenkt, diejenigen, die direkt an der Überfallwand aufsteigen, möglichst senkrecht zur Überfallkante die Ausflußöffnung zu passieren suchen. Durch diese Gestalt der Stromlinien entstehen der Bewegung weitere Widerstände und es sind weitere Arbeitsverluste hierdurch bedingt, was in der Abnahme der sekundlichen Abflußmenge seinen Ausdruck finden muß. In der Tat zeigen die ausgeführten Versuche eine wesentliche Abnahme des Ausflußkoeffizienten gegenüber demjenigen des normalen Überfalles. Der zu verwendende Erfahrungskoeffizient hat also bei den schiefen Überfällen neben dem Einflusse der (verstärkten oder unverstärkten) Kontraktion und der Reibungen noch die weitere Aufgabe, den Einfluß der doppelten Krümmung der Stromlinien in der Berechnungsformel zu berücksichtigen. Die Schwierigkeiten, die sich einer reinen theoretischen Lösung dieses Problems entgegenstellen, steigern sich hier ganz wesentlich. Solange nun nicht einmal für den einfacheren Fall des normalen Überfalles die Vorgänge völlig klar gestellt sind, ist eine solche rein theoretische Untersuchung zwecklos und es empfiehlt sich daher, von der für den speziell vorliegenden Fall modifizierten Dubuatschen Formel bei Berechnung der sekundlichen Abflußmenge Gebrauch zu machen und zu untersuchen, in welcher Art und Weise sich der

Koeffizient derselben mit der Stellung des Überfalles zur Richtung der Rinnenachse ändert.¹⁾

Unter Fortlassung des Indizes aber unter sonstiger Beibehaltung der Buchstabenbezeichnungen möge die Dubuatsche Formel hier nochmals Platz finden:

$$Q = \mu \cdot \frac{2}{3} b \cdot h \sqrt{2gh}. \quad (1)$$

μ der Ausflußkoeffizient, der als das Produkt von Kontraktions- und Geschwindigkeitskoeffizient anzusehen ist, wird von den französischen Hydraulikern meist zusammengefaßt mit dem Faktor $2/3$. Es mag richtiger sein und ist auch schon von verschiedenen Seiten vorgeschlagen worden, den Koeffizienten auch in seinen Zahlenwerten als das erscheinen zu lassen, was er wirklich ist, und ihn nicht mit einem Faktor multipliziert zu verwenden, der mit dem Wesen des Koeffi-

¹⁾ Mit der reinen theoretischen Behandlung des Problems des Überfalles haben sich schon namhafte Forscher beschäftigt; so zuerst Helmholtz (Wissenschaftliche Abhandlungen, Leipzig 1882, 1. Bd.) und Kirchhoff (Gesammelte Abhandlungen, Leipzig 1882); dann auch Lieckfeldt (Zentralblatt de Bauverwalt. Bd. 23, S. 497), Krey (Ebenda, Bd. 24, S. 625), Navier (De l'hydraulique, S. 45), Boussinesq (Moniteur industriel belge, vol. 16, p. 337, 396, vol. 15, p. 317, vol. 14, p. 229, 352, 366), der sich in eingehender Weise theoretisch auch mit den verschiedenen Strahlformen beschäftigt hat, Kleitz (Ann. d. Ponts et Chaussées, tom. 10, 1885, p. 1157), Hermanek (Sitzungsberichte der K. K. Akademie der Wissenschaften zu Wien, Bd. 112 IIa, 1903, S. 879) u. a. m. Es ist denkbar, daß auf dem zuerst von Helmholtz unter Anwendung der Theorie des Potentials gewiesenen Weg eine Lösung des Überfallproblems ohne willkürliche Annahmen, über deren Zutreffen man in jedem einzelnen Falle im Ungewissen bleibt, erfolgen kann, und daß so wenigstens für den Fall der vollkommenen Flüssigkeit die Größe der Kontraktion erkannt werden könnte. Die Einführung eines Erfahrungskoeffizienten würde dadurch allerdings nicht entbehrlich; es würde dieser indessen eine wesentlich einfachere Rolle spielen, indem er lediglich nur noch den Einfluß der Reibungen auf die Größe der sekundlichen Abflußmenge zu berücksichtigen hätte. Für solche Koeffizienten ließen sich dann aus Versuchen Formeln ableiten, die ein weit ausgedehnteres Gebiet der Gültigkeit haben würden, als diejenigen, mit denen heute operiert werden muß. Wäre also für den speziell vorliegenden Fall die theoretische Größe der Kontraktion, wie sie durch die ganze eigenartige Disposition der Wehranlage bedingt wird, für die vollkommene Flüssigkeit bekannt, so wäre bei Anwendung eines in vorstehender Weise bestimmten Erfahrungskoeffizienten für die Berechnung der Abflußmenge ein bedeutend genaueres Ergebnis zu erzielen, ein Ergebnis, in dem alle auftretenden Widerstände dem Grade ihres Einflusses entsprechend berücksichtigt wären.

zienten nichts zu tun hat. Als solcher wird im folgenden daher nur μ aufgefaßt. Die Wahl des Koeffizienten ist äußerst unsicher, denn in der angeführten Formel ist, wie schon teilweise erwähnt, μ abhängig von der Gestalt der Überfallkante, von der ganzen Anordnung der Wehranlage, d. h. von der Querschnittsform und der Stellung des Wehres zur Gerinnachse, vom Vorhandensein seitlicher Kontraktion, von der Länge der Überfallkante bei nicht zu großen Überfallbreiten, weiter von der Form des Strahles, von der Überfallhöhe und endlich von dem Verhältnis der Abmessungen des Zulaufgerinnes zu denen der Ausflußöffnung, also von der Zuflußgeschwindigkeit. Alle diese Faktoren tragen für sich zur Verminderung oder Vermehrung der Abflußmenge, wie sie sich aus der Formel berechnet, bei, und müssen in Betracht gezogen werden, will man sich vor Enttäuschungen und falschen Schlüssen bewahren. Es haben daher seit jeher namhafte Hydrauliker ihr Augenmerk darauf gerichtet, durch Modifikation der Grundformel selbst, die in der oben mitgeteilten Gestalt nur für einen großen Querschnitt des Zulaufgerinnes im Verhältnis zur Größe der Ausflußöffnung gilt, und durch entsprechende Versuche eine Formel aufzubauen, die ein möglichst ausgedehntes Anwendungsgebiet besitzt. Sie haben versucht, auf diese Weise zu empirischen Formeln für den Koeffizienten zu gelangen, die sich möglichst eng den Erfahrungen anschließen und alle Verhältnisse tunlichst berücksichtigen. Abrundungen an der Überfallkante und geschweifte Wehrprofile bedingen z. B. einen verhältnismäßig großen Koeffizienten. Eingehende Versuche hierüber liegen hauptsächlich von Bazin¹⁾ vor. Ausführliche Versuche über den Einfluß der Überfallbreite und der Zuflußgeschwindigkeit auf den Koeffizienten bei Überfällen mit Seitenkontraktion hat Frese²⁾ veröffentlicht. Er hat gefunden, daß der Koeffizient mit der Überfallbreite wächst und zwar anfangs rasch, dann langsamer nach dem Gesetz der gleichseitigen Hyperbel. Versuche über den Einfluß der Strahlform sind ebenfalls von Bazin,³⁾ aber auch von anderen, veröffentlicht. Zahlreiche Versuche im Karlsruher Flußbaulaboratorium haben bestätigt, daß bei der gleichen Wassermenge der Koeffizient kleiner ist beim freien Strahl und größer beim anliegenden, bei dem

¹⁾ Annales d. Ponts et Chaussées, 1888—98. Siehe auch das Spezialwerk: Bazin, Expériences nouvelles sur l'écoulement en deversoir. Paris 1898.

²⁾ Frese, a. a. O.

³⁾ Bazin, a. a. O.

der Raum unter dem Strahl im Gegensatz zum freien Strahle mit Wasser erfüllt ist. Es hängt dies zusammen mit der Veränderlichkeit der Dichte der Medien zu beiden Seiten des Strahles und der dadurch bedingten Veränderlichkeit der Kontraktion. In welcher Weise die Stellung des Wehres auf den Koeffizienten Einfluß ausübt, soll später gezeigt werden.

Die Abhängigkeit des Koeffizienten von der Überfallhöhe und der Zuflußgeschwindigkeit kommt in den Formeln in verschiedener Weise zum Ausdruck. Die Zuflußgeschwindigkeit wird gewöhnlich durch die Gestalt der gewählten Gleichung berücksichtigt. Mit der Überfallhöhe nimmt der Koeffizient ab und zwar, wie schon öfters erwähnt wurde, zuerst rasch, dann langsamer. Dieses Gesetz hat sich wie bei den vorliegenden Versuchen auch bei sämtlichen bis jetzt veröffentlichten, an vollkommenen Überfällen jeglicher Art ausgeführten Beobachtungen als zutreffend erwiesen. Es kommt auch in den meisten empirischen Formeln zum Ausdruck, die in der bereits zitierten Arbeit Freses, sowie in den Werken von v. Wex¹⁾ und Rühlmann²⁾ zusammengestellt sind. Die hauptsächlichsten Formeln für den Ausfluß des Wassers an vollkommenen Überfällen ohne Seitenkontraktion mögen hier Platz finden. Dabei bezeichne:

b die Überfallbreite,

Q die sekundliche Ausflußmenge,

h die Überfallhöhe,

c die mittlere Zuflußgeschwindigkeit des Oberwassers,

p die Wehrhöhe,

$t = p + h$ die Tiefe des Oberwassers,

e die Strahldicke vertikal über der Überfallkante,

g die Erdbeschleunigung.

Die Formel von Eytelwein³⁾ und Weisbach⁴⁾ lautet:

$$Q = \mu \cdot \frac{2}{3} b \sqrt{2g} \left[\left(h + \frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} \right].$$

¹⁾ v. Wex, Hydrodynamik. Leipzig 1888, S. 4 u. f.

²⁾ Rühlmann, Hydromechanik. Hannover 1880, 2. Aufl., S. 294—310.

³⁾ Eytelwein, Handb. d. Mechanik fester Körper u. d. Hydraulik, 1823.

⁴⁾ In Hülses Maschinen-Enzyklopädie, 1841, 1. Bd., S. 490.

Weisbach¹⁾ ersetzte sie später durch:

$$Q = \mu_0 \left[1,041 + 0,3693 \left(\frac{h}{t} \right)^2 \right] \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2gh},$$

worin μ_0 einen Koeffizienten darstellt, der aus den von Poncelet und Lesbros²⁾ auf Grund ihrer Versuche veröffentlichten Tabellen zu entnehmen ist. Die Zuverlässigkeit der Formel geht also Hand in Hand mit der der genannten Versuche.

Boileau³⁾ führt abweichend von anderen Hydraulikern in seine Formel die Strahldicke e an der Überfallkante ein:

$$Q = \sqrt{\frac{1 - \frac{e}{h}}{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{h}\right)^2}}} \cdot b \cdot h \sqrt{2gh}.$$

Die Resultate dieser Formel weichen selbst bei seinen eigenen Versuchsergebnissen bis zu 6,6% ab.

Clarival⁴⁾ baut auf die Versuche von Castel, Lesbros und Boileau eine Formel auf, die auch keinen eigentlichen Koeffizienten mehr enthält und ungünstig beurteilt wird; sie lautet:

$$Q = \frac{e \sqrt{1 - \frac{e}{h}}}{\sqrt{2(h^2 - e^2)}} \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2gh}.$$

Redtenbacher⁵⁾ folgert aus den Versuchen von Castel⁶⁾ die Formel mit konstantem Ausflußkoeffizienten:

$$Q = 0,443 b \cdot h \cdot \sqrt{2gh}.$$

Naviers⁷⁾ Formel lautet:

$$Q = \mu \cdot \frac{2}{3} \cdot (1 - \vartheta^{3/2}) \cdot b h \sqrt{2gh},$$

1) Weisbach, Experimental-Hydraulik. Freiberg 1855, S. 130.

2) Lesbros, Expériences hydrauliques etc. Paris 1851, p. 488 et 484.

3) Boileau, Traité d. l. mesure etc. Paris 1854, p. 87; siehe auch Bornemann, Zivil-Ingenieur, 1856, 2. Bd., p. 72 u. f.

4) Clarival, Annales des mines, vol. 12, p. 517; Polyt. Zentralblatt, 1858, p. 231.

5) Redtenbacher, Resultate für den Maschinenbau, 1848, 1. Aufl.

6) D'Aubuisson, Hydraulique, No. 72.

7) Navier, De l'hydraulique, p. 45; siehe auch Annales des Ponts et Chaussées, 1870, p. 387.

worin bedeutet:

$$\vartheta = \frac{h - e}{h}.$$

Für μ in dieser Formel gibt Michal¹⁾ aus älteren Versuchen von Bazin abgeleitet die Formel an:

$$\mu = 0,65 + 0,17 \cdot \frac{n}{p_1},$$

worin n die Summe der Seitenlängen der gesamten Ausflußöffnung mit aufgehobener Kontraktion bedeutet, p_1 den Gesamtumfang der Ausflußöffnung.

Francis²⁾ kommt durch seine Versuche am Merrimack zu der Formel:

$$Q = 3,33 (b - 0,10 n h_1) \cdot h_1^{3/2} = \mu \cdot \frac{2}{3} b \sqrt{2g} \cdot h_1^{3/2},$$

worin h_1 die in Rücksicht auf die Zuflußgeschwindigkeit korrigierte Überfallhöhe bedeutet; n die Zahl der Kontraktionen an den Seiten. Es folgt hier:

$$\mu = {}^{3/2} \cdot \frac{3,33}{\sqrt{2g}} = 0,6228,$$

für Überfälle über die ganze Breite des Gerinnes, also ebenfalls ein konstanter Ausflußkoeffizient.

Braschmann³⁾ bestimmt aus 47 Castelschen von Lesbros korrigierten Versuchen die Formel:

$$Q = \left[0,4224 + \frac{0,00053}{h} \right] \cdot b \cdot h \sqrt{2gh}.$$

In dieser Formel läßt sich das Änderungsgesetz von μ mit h bereits deutlich erkennen.

Bornemann⁴⁾ stellt für Überfälle ohne Seitenkontraktion zwei Formeln auf, je nach der Größe der Überfallhöhe (b war bei seinen Versuchen 1,13 m, h 0,07 m bis 0,21 m):

1) Michal, Annales des Ponts et Chaussées, 1870, p. 387.

2) Francis, Lowell Hydr. Exp. etc., Boston 1855, p. 70; auszugsweise Bornemann, Zivil-Ingenieur, 1856, 2. Bd. (1856), p. 163.

3) Braschmann (Deutsch berichtet durch Stüßi), Zivil-Ingenieur, 9. Bd., 1863, S. 450. Weitere Quellenangabe siehe Rühlmann, Hydromechanik, 2. Aufl., Hannover 1880, S. 305.

4) Bornemann, Zivil-Ingenieur, 16. Bd., S. 395/96.

$$Q = \left(0,5673 - 0,1239 \sqrt{\frac{h}{p+h}} \right) \cdot b h \sqrt{2gh}, \text{ wenn } h < \frac{1}{3}p$$

und

$$Q = \left(0,6402 - 0,2862 \sqrt{\frac{h}{p+h}} \right) \cdot b h \sqrt{2gh}, \text{ wenn } h > \frac{1}{3}p.$$

Die Gleichung, die die Ingenieure Fteley und Stearns¹⁾ aus Versuchen am Sudbury ableiten, hat die Form:

$$Q = C \cdot b \cdot h_1^{3/2} + \delta b = \frac{2}{3} \mu b h_1^{3/2} \sqrt{2g},$$

woraus:

$$\mu = \frac{3}{2} \left(\frac{C}{\sqrt{2g}} + \frac{\delta}{h_1^{3/2} \sqrt{2g}} \right) = \left(0,6189 + \frac{0,00022}{h_1^{3/2}} \right) \cdot \frac{3}{2}.$$

Es erscheint hier h_1 im Nenner in der Potenz 1,5, während Braschmann und die folgenden Autoren die 1. Potenz annehmen.

v. Wex²⁾ entwickelt die Formel:

$$Q = \mu \cdot \frac{2}{3} b \sqrt{2g} \left(\frac{h}{s_1 - s} \right) \left(s_1^{3/2} - s^{3/2} \right),$$

worin:

$$s = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{b(p+h)} \right)^2$$

$$s_1 = s + h + \frac{p}{g \cdot h} \left(\frac{Q}{b(p+h)} \right)^2.$$

Für $\frac{2}{3} \mu$ entwickelt v. Wex aus Versuchen von Francis, Fteley und Stearns zwei Gleichungen von der allgemeinen Form:³⁾

$$\frac{2}{3} \mu = a + \beta \cdot \left(\frac{h}{p+h} \right) + \gamma \cdot \frac{1}{h} + \delta \cdot b,$$

worin a , β , γ und δ Konstante sind. Für $\left(\frac{h}{p+h} \right)$ zwischen 0,04066 und 0,19669 soll man die einfachere Formel anwenden können:

$$\frac{2}{3} \mu = 0,4001 + \frac{0,0011}{h} + 0,00048 b \text{ für Metermaß.}$$

Die v. Wexschen Formeln werden später noch eingehender beleuchtet.

1) Description of some experiments on the flow of water etc. Transactions of the Amer. Soc. of Civ. Eng., vol. 12, 1883, p. 80.

2) v. Wex, Hydrodynamik, S. 37. 3) Derselbe, S. 116.

Bazin¹⁾ stellt auf Grund seiner Versuche in Dijon die Formel auf:

$$Q = \left(0,6075 + \frac{0,0045}{h} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{p+h} \right)^2 \right] \cdot b \cdot h \sqrt{2gh}.$$

Frese²⁾ ersetzt hierin die erste Klammer durch den Ausdruck:

$$\mu_0 = 0,6150 + \frac{0,0021}{h}.$$

Schließlich möge noch eine Formel Platz finden, die von Kinzer³⁾ aufgestellt wurde auf Grund eigener Versuche:

$$Q = \left[0,4432 - 0,0777 \left(\frac{h}{p+h} \right) \right] \cdot b \cdot \left(h + \frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} \sqrt{2g}.$$

Äußerst genaue Versuche an Überfällen sind in neuerer Zeit außer von Bazin und Frese von Hansen⁴⁾ ausgeführt und veröffentlicht worden.

Die Resultate der angeführten Formeln weichen sehr von einander ab, was teils auf Ungenauigkeit der Versuche selbst, teils darauf zurückzuführen ist, daß manche Formeln nur für ganz bestimmte Verhältnisse aufgestellt sind. Die Versuche von Bazin und Hansen (diejenigen von Frese beziehen sich auf Überfälle mit Seitenkontraktion) sind, was die Größe des Maßstabes anbelangt, denjenigen analog, die der Verfasser ausgeführt hat. Auf sie mag daher das Hauptgewicht zu Vergleichszwecken gelegt werden. Mit verhältnismäßig kleiner Überfallbreite haben auch Poncelet und Lesbros (0,20 m) gearbeitet. Es scheint indessen, daß sie die Überfallhöhen stets zu groß erhoben haben, denn ihre Koeffizienten sind kleiner als alle anderen bekannt gewordenen, was sich auch im vorliegenden Falle bestätigt hat. Bei ihren Versuchen schloß sich nämlich die Versuchsrinne an einen sehr großen Behälter an und in diesem wurden die Überfallhöhen gemessen. Somit wurde auch der beim Übergang aus dem großen Behälter in die bedeutend schmalere Versuchsrinne unbedingt auftretende Druckhöhenverlust mit in die Überfallhöhe aufgenommen, wodurch diese zu groß, der damit berechnete Koeffizient aber zu klein ermittelt wurde. Auch Castels Versuche

1) Bazin, Ann. des Ponts et Chaussées, 1888, p. 446.

2) Frese, a. a. O., S. 1299.

3) Kinzer, Zeitschrift d. Österr. Ing.- u. Arch.-Ver., Bd. 49, 1897, S. 544.

4) Hansen, Zeitschrift d. Ver. Deutscher Ing., Bd. 36, S. 1057.

wurden in ähnlich kleinen Dimensionen ausgeführt, doch sind sie deshalb etwas unzuverlässig, weil das Wasser mittelst Pumpen in den Oberwasserkanal eingeführt wurde und damit die Genauigkeit der Aufnahme der Überfallhöhen durch mangelhafte Beseitigung der Oberflächenwellen jedenfalls stark gelitten hat.

Bei Überfällen schief zur Stromrichtung herrscht im Vergleich zum normalen Überfall bei gleicher Überfallhöhe wegen des größeren sekundlichen Abflußquantums eine größere Zuflußgeschwindigkeit und damit eine unvollkommenere Kontraktion. Die Zuflußgeschwindigkeit darf bei schiefen Überfällen nicht vernachlässigt werden. Von den in Betracht kommenden Formeln handelte es sich bei Berechnung der ausgeführten Versuche daher hauptsächlich um die Weisbachsche und die Bazinsche. Die letztere ist ihrer Bauart nach bedeutend einfacher und verdient daher den Vorzug. Die vom Verfasser ausgeführten Versuche wurden also nach einer Abflußformel vom Bazinschen Baue berechnet. Da es nun im Laufe der Berechnungen geboten erschien, hie und da Vernachlässigungen und bestimmte Annahmen eintreten zu lassen, so wurden die Berechnungen auch noch mit Hilfe der Weisbachschen Formel durchgeführt.

Die von v. Wex aufgestellten Formeln erwiesen sich für die Berechnungen ebenfalls als sehr einladend, da sie für den allgemeinsten Fall eines Überfallwehres gelten und speziell die Wehranordnung im Grundriß berücksichtigen; am Schlusse dieses Abschnittes finden sie eine nähere Besprechung. Auch mit ihrer Hilfe wurde die Berechnung der Versuche durchgeführt.

b) Die Formeln von Bazin.

a) Die Formel für den rechteckigen Rinnenquerschnitt.

Es bezeichne ein für allemal:

μ den Ausflußkoeffizienten der einfachen Dubuatschen Ausflußformel Gleichung (1),

μ_0 den vom Einflusse der Zuflußgeschwindigkeit befreiten Ausflußkoeffizienten,

g die Erdbeschleunigung beim freien Fall,

h die Überfallhöhe, gemessen an einer Stelle des noch ungesenkten Wasserspiegels,

b_1 die Breite des Gerinnes von rechteckigem Querschnitt,

- b_s die Länge der schief zur Rinnenachse stehenden Überfallkante,
 p die Höhe der Überfallkante über dem Rinnenboden oder die Wehrhöhe,
 ε den spitzen Winkel der Überfallkante mit der Rinnenachse im Grundriß,
 c die mittlere Zuflußgeschwindigkeit des Oberwassers,
 Q die sekundliche Abflußmenge.

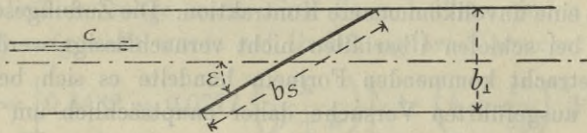


Fig. 2.

Die endlichen Abmessungen der Zulaufrinne bedingen die Größe der Zuflußgeschwindigkeit des ankommenden Wassers. Den Einfluß derselben (sie wirkt bekanntlich verändernd auf die Geschwindigkeit des überfallenden Wassers und damit auf die Kontraktion ein) sucht man dadurch in Rechnung zu stellen, daß man die Zuflußgeschwindigkeit c direkt in die Formel für die Berechnung der sekundlichen Wassermenge Q einführt. Damit entsteht die von Eytelwein und Weisbach herrührende Formel:

$$Q = \mu_0 \cdot \frac{2}{3} b_s \sqrt{2g} \left[\left(h + \frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} \right]. \quad (5)$$

Daß man diese Gleichung ebenso wie die einfache Dubuatsche (1) auch auf schiefe Überfälle anwenden kann, ist klar; denn sie besitzt auf Grund ihrer Herleitung eine allgemeine Gültigkeit für jegliche Art von Überfällen in Rinnen mit rechteckigem Querschnitt. Das Gesetz des Überfallens des Wassers ist eben bei normalen wie bei schiefen, bei gebrochenen wie bei gekrümmten Überfällen, bei solchen mit seitlicher Strahlzusammenziehung wie bei solchen ohne Seitenkontraktion überall das nämliche. Ein Unterschied tritt lediglich in der Größe des Koeffizienten ein.

Die Weisbachsche und Dubuatsche Formel haben eine strenge Gültigkeit, wenn von einer solchen überhaupt ohne weiteres gesprochen werden kann, nur solange als das Wasser die Ausflußöffnung normal passiert; in diesem Falle wird die Zuflußgeschwindigkeit ihrem vollen Betrage entsprechend als Zuschuß zur Überfall-

höhe berücksichtigt. Stellt man sich nun beim schiefen Überfall den Weg eines Wasserteilchens im Grundriß vor, so bewegt es sich anfangs parallel zur Rinnenachse der Ausflußöffnung mit einer bestimmten Geschwindigkeit entgegen. Kurz vor der Ausflußöffnung lenkt es etwas in die Richtung normal zur Überfallkante ein und passiert die Ausflußöffnung unter einem Winkel φ gegen die Wehrnormale, der kleiner als der Wehrwinkel ε ist. Würde im Oberwasser keine Zuflußgeschwindigkeit herrschen, so würde das Wasserteilchen in der Ausflußöffnung eine bestimmte, der reinen Druckhöhe entsprechende Geschwindigkeit erlangt haben und der Winkel φ wäre dann nahezu Null. Durch die ursprünglich schon innegehabte Geschwindigkeit vergrößert sich der Winkel φ . Er kann höchstens gleich dem Wehrwinkel ε werden. Im dritten Abschnitt wird auf Grund von experimentellen Untersuchungen hierüber ausführlich gesprochen werden. Gleichzeitig nimmt auch die Geschwindigkeit des Wasserteilchens in der Ausflußöffnung zu. Die Zunahme dieser Geschwindigkeit hängt auch von der Größe der Zuflußgeschwindigkeit des Wasserteilchens ab. Geschwindigkeitsversuche im Strahle würden hier manche strittige Punkte klarstellen können. Es ist nun höchst wahrscheinlich, daß die Wirkung der Zuflußgeschwindigkeit des Wasserteilchens durch die erfolgte horizontale Ablenkung desselben aus seiner Bahn auf die Geschwindigkeit dieses Teilchens in der Ausflußöffnung nicht geändert wird. Die für den zur Überfallkante normalen Ausfluß wirksame Geschwindigkeitshöhe muß daher gebildet werden aus der Zuflußgeschwindigkeit des Oberwassers, multipliziert mit dem Kosinus des obengenannten Winkels φ , so daß geringe Zuflußgeschwindigkeiten eine verhältnismäßig stärkere Berücksichtigung finden als größere, da die ersteren wegen ihrer größeren Ablenkung aus der Richtung der Rinnenachse verhältnismäßig weniger geschwächt wirken als die letzteren. Bei Überläufen parallel zum Stromstrich kommt dies besonders ausgeprägt zur Geltung. Da nun der Winkel φ von der Überfallhöhe oder der Zuflußgeschwindigkeit abhängig ist, die Funktion, welche diese Abhängigkeit darstellt, aber nur aus einer großen Reihe von experimentellen Spezialuntersuchungen abgeleitet werden kann, da weiterhin übermäßige Überfallhöhen bei schiefen Wehren in der Praxis meist selten vorkommen werden, die Zuflußgeschwindigkeit also meistens in stärkerem Grade zur Wirkung kommt, als es ihrer zum Wehr normalen Komponente entspricht, und da außerdem die Weisbachsche Formel an sich schon

bei schiefen Überfällen wegen der doppelten Krümmung der Stromlinien an ihrer Gültigkeit einbüßt, so wird man sich der Wirklichkeit besser nähern, wenn man die tatsächliche Überfallhöhe um die volle Größe der Zuflußgeschwindigkeitshöhe erhöht. Dadurch wird die Korrektur der Formel einzig und allein der entsprechenden Wahl des Koeffizienten vorbehalten, da es auf keinen Fall möglich ist, die Rolle, welche die Zuflußgeschwindigkeit wirklich spielt, genau zu präzisieren.

Der oben angeführte Koeffizient μ_0 ist vom Einflusse der Zuflußgeschwindigkeit befreit, gilt also für ein sehr großes Zuflußgerinne oder in Fällen, wo der Einfluß der Rinnenbreite verschwindet, für eine sehr große Wehrhöhe bzw. große Tiefe des Oberwassers. Erfahrungen, die an normalen Überfällen gemacht wurden, haben ergeben, daß der Einfluß der mittleren Zuflußgeschwindigkeit auf den Koeffizienten größer ist, als er in der obigen Weisbachschen Formel zum Ausdruck kommt. Man multipliziert daher gewöhnlich die Geschwindigkeitshöhe $\left(\frac{c^2}{2g}\right)$ des Zuflusses mit einem Koeffizienten α , der größer als die Einheit ist und Geschwindigkeitshöhenbeiwert genannt werden soll. Man erhält sonach aus (5) die Gleichung:

$$Q = \mu_0 \cdot \frac{2}{3} b_s \sqrt{2g} \left[\left(h + \alpha \frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\alpha \frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} \right]. \quad (6)$$

Verbindet man mit Bazin¹⁾ diese Gleichung (6) mit der einfachen Dubuatschen Gleichung (1):

$$Q = \mu \cdot \frac{2}{3} b_s \sqrt{2g} \cdot h^{3/2},$$

so erhält man:

$$Q = \mu \cdot \frac{2}{3} b_s \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} = \mu_0 \cdot \frac{2}{3} b_s \sqrt{2g} \left[\left(h + \alpha \frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\alpha \frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} \right].$$

Damit folgt:

$$\mu = \mu_0 \left[\left(h + \alpha \frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\alpha \frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} \right] \cdot \frac{1}{h^{3/2}},$$

$$\mu = \mu_0 \left[\left(1 + \alpha \frac{c^2}{2gh} \right)^{3/2} - \left(\alpha \frac{c^2}{2gh} \right)^{3/2} \right].$$

¹⁾ Bazin, a. a. O., p. 417.

Hiefür kann man annähernd setzen, da $\frac{c^2}{2gh}$ auch bei den schiefen Überfällen, wie später gesehen werden kann, nur selten einige Hundertstel übersteigt und daher die höheren Potenzen von $\frac{c^2}{2gh}$ ganz verschwindend klein werden:

$$\mu = \mu_0 \left[\left(1 + \frac{3}{2} a \cdot \frac{c^2}{2gh} \right) - \left(a \frac{c^2}{2gh} \right)^{3/2} \right].$$

Nun ist aber:

$$c = \frac{Q}{b_1(h+p)} = \frac{\mu \cdot \frac{2}{3} \cdot b_s \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}}{b_1(h+p)} = \mu \cdot \frac{2}{3} \left(\frac{b_s}{b_1} \right) \frac{h}{h+p} \sqrt{2gh},$$

$$\frac{c^2}{2gh} = \frac{4}{9} \mu^2 \left(\frac{b_s}{b_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{h}{h+p} \right)^2 = \frac{4}{9} \mu^2 \cdot \left(\sin \varepsilon \frac{h}{h+p} \right)^2.$$

Dies oben eingesetzt gibt:

$$\mu = \mu_0 \left[\left(1 + \frac{3}{2} a \cdot \frac{4}{9} \mu^2 \left(\frac{h}{\sin \varepsilon (h+p)} \right)^2 \right) - \left(a \cdot \frac{4}{9} \mu^2 \left(\frac{h}{\sin \varepsilon (h+p)} \right)^2 \right)^{3/2} \right],$$

und somit:

$$\mu = \mu_0 \left[\left(1 + \frac{2}{3} \mu^2 a \left(\frac{h}{\sin \varepsilon (h+p)} \right)^2 \right) - \left(\frac{4}{9} \mu^2 a \left(\frac{h}{\sin \varepsilon (h+p)} \right)^2 \right)^{3/2} \right]. \quad (7)$$

Durch die bei den vorstehenden Operationen vollzogene Verbindung der Formeln von Dubuat und Weisbach ist eine wesentliche Vereinfachung der letzteren erzielt. Gleichung (6) ist in Bezug auf Q , wenn c durch Q ausgedrückt wird, vom 6. Grad. Die Auflösung ist daher auf direktem Wege nicht ohne weiteres durchführbar. Durch die gleiche Annäherung, die in der eben durchgeführten Rechnung zur Unterdrückung der Potenz $^{3/2}$ der Klammer $\left(1 + a \frac{c^2}{2gh} \right)$ führte, kann die Gleichung zwar auf den 3. Grad in Bezug auf Q reduziert werden. Würde man weiterhin in der eckigen Klammer der Gleichung (6) den Subtrahenden vernachlässigen, so würde diese Gleichung in Bezug auf Q quadratisch, also schon bedeutend einfacher, aber für den praktischen Gebrauch doch immer noch recht unhandlich werden. Mit Gleichung (7) für μ ist dagegen ein in Bezug auf Q äußerst einfacher Ausdruck erreicht. Die eckige Klammer ist aller-

dings noch einigermaßen kompliziert und es muß gesucht werden, dieselbe etwas zu vereinfachen. Es fragt sich da hauptsächlich, ob nicht der Subtrahend unterdrückt werden könnte oder, was dasselbe ist, der Subtrahend des Klammerausdruckes der Gleichung (6). Bei normalen und weniger schiefen Überfällen überhaupt kann diese Unterdrückung ohne weiteres stattfinden, denn in solchen Fällen ist der Subtrahend im Vergleich zum Minuenden vollständig unbedeutend. Bei den sehr schiefen Überfällen ist dies nicht von vornherein gesagt, denn hier nimmt der Ausdruck $\left(\alpha \frac{c^2}{2gh}\right)$ beträchtlichere Werte an; die mit Vernachlässigung dieses Gliedes berechneten Koeffizienten μ_0 erscheinen zu klein. Um die Stärke des Einflusses der genannten Vernachlässigung zu untersuchen, wurde bei den ausgeführten Versuchen der Koeffizient μ_0 auch nach der strengen Weisbachschen Gleichung (5) berechnet. Es möge hier schon auf die Tabellen 3, 8, 11 und 14 hingewiesen werden. In der mit Δ Weisbach bezeichneten Kolonne derselben sind die Differenzen eingetragen zwischen μ_0 berechnet nach Gleichung (7) unter Vernachlässigung des Subtrahenden und μ_0 berechnet nach der Weisbachschen Gleichung (6). Die nächste Kolonne enthält die Differenzen angegeben in Prozenten von μ_0 nach Gleichung (7). Hie und da auftretende kleinere Unregelmäßigkeiten im Gange der Differenzen sind hervorgerufen durch Abrundungen im Laufe der zahlenmäßigen Auswertung. Man erkennt, daß beim normalen Überfall der Tabelle 3 und den weniger schief gestellten Überfällen der Tabellen 8 und 11 die Differenzen erst bei größeren Überfallhöhen und dann erst in der 3. Dezimale auftreten; im ungünstigsten Falle betragen sie bei dem um etwa 45 Grad geneigten Überfalle 0,0038 oder 0,68‰. Bei dem sehr schiefen Überfall der Tabelle 14 werden die Differenzen bedeutender. Es ist aus den Tabellen zu erkennen, daß die Unterschiede bei abnehmender Größe von ε anwachsen und zwar zwischen $\varepsilon = 90^\circ$ und $\varepsilon = 45^\circ$ langsam, bei kleineren Winkeln ε schneller. Bei kleinen Überfallhöhen bleiben die Abweichungen aber auch bei sehr schiefen Wehren unbedeutend; und nur bei großen Überfallhöhen und sehr schiefen Wehren fallen sie ins Gewicht. Für die hier zu verfolgenden Zwecke und um den Einklang mit anderen Autoren nicht ganz aufzugeben, kann es aus den dargelegten Gründen gestattet werden, auch bei schiefen Überfällen den besprochenen Subtrahenden zu vernachlässigen, zumal diese Vernachlässigung auf das allgemeine Wesen der Ergebnisse ohne Einfluß ist

und die Zahlenrechnungen wesentlich vereinfacht. Es ist indessen stets im Auge zu behalten, daß der Koeffizient etwas zu klein erscheint. Ein weiterer Grund, der für die Vereinfachung der Gleichung (7) spricht, wird sich gleich ergeben.

Die letzte Gleichung (7) nimmt nun die einfache Gestalt an:

$$\mu = \mu_0 \left[1 + \frac{2}{3} \mu^2 \alpha \left(\frac{1}{\sin \varepsilon} \cdot \frac{h}{(h+p)} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Mit $\sin \varepsilon = 1$, also für den normalen Überfall geht diese Gleichung selbstverständlich in die Form derjenigen über, die Bazin und Frese anwenden.

Für den Wert von $\left(\frac{2}{3} \mu^2 \right)$ in der eckigen Klammer des Ausdruckes (8) setzt man, wenn es sich lediglich um normale Überfälle handelt, gewöhnlich einen konstanten Mittelwert. Hiezu ist man berechtigt, denn erstens kann μ beim normalen Überfall bei nicht zu kleinen Überfallhöhen h als nahezu konstant angesehen werden und dann ist zweitens der gemachte Fehler wegen des meistens kleinen Ausdruckes von $\left(\frac{h}{h+p} \right)^2$ hier nicht von besonders großem Gewichte. Frese¹⁾ gibt z. B. als konstanten Wert an:

$$\frac{2}{3} \mu^2 = \frac{2}{3} \cdot 0,6^2 = 0,24 \approx 0,25.$$

Bei den schiefen Überfällen ist die Angabe eines solchen konstanten Mittelwertes nicht möglich, denn ein Blick auf die Fig. 2—7 Taf. 2 und Fig. 1 Taf. 4 zeigt sofort die große Veränderlichkeit von μ mit h . Hier wären große Fehler zu erwarten.

Will man nun weiter in einem gegebenen Falle den Koeffizienten μ für die Dubuatsche Gleichung (1) rückwärts berechnen aus Gleichung (8), so ist diese letztere nach μ aufzulösen. Sie ist in Bezug auf μ quadratisch. Bezeichnet:

$$\frac{2}{3} \alpha \left(\frac{1}{\sin \varepsilon} \cdot \frac{h}{h+p} \right)^2 = \tau,$$

so erhält man aus (8):

$$\mu = \frac{1}{2\tau \cdot \mu_0} + \sqrt{\left(\frac{1}{2\tau \cdot \mu_0} \right)^2 - \frac{1}{\tau}}. \quad (9)$$

¹⁾ Frese, a. a. O.

Hätte man die Vernachlässigung, die zu Gleichung (8) führte, nicht gemacht, so wäre (9) für den Gebrauch sehr umständlich geworden, denn Gleichung (7) ist in Bezug auf μ vom 3. Grad; auch aus diesem Grunde empfiehlt sich daher die gemachte Vereinfachung.

β) Die Formel für den trapezartigen Rinnenquerschnitt.

(3) Die Versuche in der schmalen Rinne von etwa 25 cm lichter Breite wurden ausgeführt nach Beendigung der Vorversuche und nachdem die Rinne anderweitigen Zwecken im Flußbaulaboratorium gedient hatte und lange Zeit teils trocken teils naß gestanden. Trotzdem dieselbe gestrichen und mit Winkelschienen verstärkt war, konnte ein Verziehen des Holzes nicht vermieden werden, so daß sich ein Querschnitt gebildet hatte, wie ihn Fig. 4 Taf. 1 angibt. Die beiden Holzwände waren bezüglich der Symmetrieachse des Querschnitts gleichermaßen ausgewichen und zwar gleichmäßig auf die ganze in Betracht kommende Länge der Rinne hin. Diesen Querschnitt behielt die Rinne definitiv bei. Da es nicht mehr möglich war die Unregelmäßigkeit vollkommen zu beseitigen, so mußte mit ihr entsprechend gerechnet werden. Der Querschnitt war im oberen Teile fast vollkommen trapezförmig, im unteren rechteckig und zwar annähernd bis zu der Höhe, in der die Überfallkanten gewöhnlich zu liegen kamen. Die kleinen Abweichungen von dieser Gestalt waren ganz belanglos. Würde man nun diese etwas komplizierte Gestalt vernachlässigen und bei Berechnung der Versuche in die Formeln lediglich die Länge der Überfallkante einführen, so würde μ_0 fehlerhaft erscheinen, und zwar wirkt dieser Fehler einseitig, er läßt den so berechneten Koeffizienten zu groß erscheinen. Der Fehler würde beim normalen Überfall merklicher ins Gewicht fallen als bei den stark schiefen Überfällen. Er würde beim normalen Überfall bei den dort beobachteten Überfallhöhen 0,04% anwachsend bis 0,9% betragen, bei dem unter etwa 15 Grad gegen Rinnenachse geneigten Überfall aber 0,03% bis 0,4% des richtig berechneten Wertes von μ_0 . Da nun Gewicht darauf gelegt werden muß, gerade beim normalen Überfall möglichst genau zu rechnen, da sich nur hiebei durch Vergleiche mit anderweitigen Versuchen ein Urteil über die Genauigkeit der Resultate bilden läßt, so wurden für die Versuche in der schmalen Rinne die Berechnungen durchgeführt mit Berücksichtigung der nicht rechteckigen Gestalt des Rinnenquerschnitts.

Die Gleichung (8) ändert sich hiebei etwas ab und es soll deren Anpassung auf diese neuen Verhältnisse hier kurz vorgeführt werden.

Bezeichnet wie in nachstehender Figur

a_s die untere Trapezseite oder die Länge der Überfallkante in der Rinne,

b_s die obere Trapezseite,

h die Überfallhöhe,

so lautet für diesen Fall die einfache Dubuatsche Ausflußgleichung mit den sonstigen früheren Bezeichnungen:

$$Q = \mu \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{3a_s + 2b_s}{5} \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}. \quad (10)$$

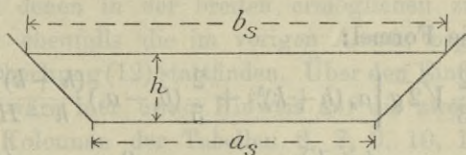


Fig. 3.

Die Weisbachsche Gleichung kann man für diesen Fall auf eine Form bringen, ähnlich der von (5).

Es seien in nachstehender Figur

a_s und b_s die untere bzw. obere Seite einer Trapezöffnung in dünner Wand,

h und H die entsprechenden Tiefen unter dem noch ungesenkten Wasserspiegel,

$k = \frac{c^2}{2g}$ die mittlere Geschwindigkeitshöhe des zuströmenden Wassers.

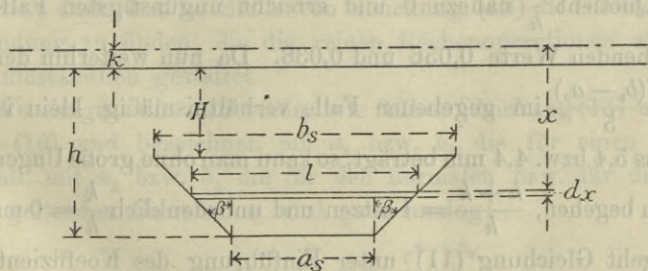


Fig. 4.

Dann ist mit den eingeschriebenen Bezeichnungen:

$$dQ = v \cdot l \cdot dx = \sqrt{2gx} (a_s + 2(h+k-x) \cdot \operatorname{tg} \beta) dx$$

$$Q = \int_{H+k}^{h+k} \sqrt{2gx} (a_s + 2(h+k-x) \operatorname{tg} \beta) dx.$$

Und da:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{b_s - a_s}{2(h-H)}$$

und
$$\int_{H+k}^{h+k} \sqrt{2gx} dx = \frac{2}{3} \sqrt{2g} [(h+k)^{3/2} - (H+k)^{3/2}]$$

$$\int_{H+k}^{h+k} x \sqrt{2gx} dx = \frac{2}{5} \sqrt{2g} [(h+k)^{5/2} - (H+k)^{5/2}],$$

so bildet sich die Formel:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left[a_s (h+k)^{3/2} + \frac{2}{5} (b_s - a_s) \frac{(h+k)^{5/2}}{h-H} - \right. \\ \left. - \left(a_s + (b_s - a_s) \frac{h+k}{h-H} \right) (H+k)^{3/2} + \frac{3}{5} (b_s - a_s) \frac{(H+k)^{5/2}}{h-H} \right]$$

für die Ausflußmenge durch eine trapezförmige Öffnung. Für den vollkommenen Überfall mit $H=0$ wird:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left\{ (h+k)^{3/2} \left[a_s + \frac{2}{5} (b_s - a_s) \frac{h+k}{h} \right] - k^{3/2} \left[b_s + \frac{2}{5} (b_s - a_s) \frac{k}{h} \right] \right\}. \quad (11)$$

Der Quotient $\frac{h+k}{h}$ ist nahezu gleich 1 und erreicht bei den ausgeführten Versuchen im ungünstigsten Falle des schiefst gestellten Überfalles 1,08; beim nächstfolgenden nur noch 1,04. Ebenso ist der Quotient $\frac{k}{h}$ nahezu 0 und erreicht ungünstigsten Falles die entsprechenden Werte 0,056 und 0,038. Da nun weiterhin der Ausdruck $\frac{2(b_s - a_s)}{5}$ im gegebenen Falle verhältnismäßig klein ist und höchstens 5,4 bzw. 4,4 mm beträgt, so kann man ohne große Ungenauigkeiten zu begehen, $\frac{h+k}{h} = 1$ setzen und unbedenklich $\frac{k}{h} = 0$ machen.

Damit geht Gleichung (11) unter Einführung des Koeffizienten μ_0 über in die der Gleichung (5) ähnlich gebauten:

$$Q = \mu_0 \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \left[\frac{3a_s + 2b_s}{5} \left(h + \frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} - b \cdot \left(\frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} \right].$$

Setzt man den Bruch $\frac{3a_s + 2b_s}{5}$ vor die Klammer, so wird:

$$Q = \mu_0 \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot \frac{3a_s + 2b_s}{5} \left[\left(h + \frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} - \beta \left(\frac{c^2}{2g} \right)^{3/2} \right], \quad (12)$$

worin:

$$\beta = \frac{5b_s}{3a_s + 2b_s}.$$

μ_0 ist der vom Einfluß der Zuflußgeschwindigkeit befreite Ausflußkoeffizient.

Um Vergleiche der bei den Versuchen in dieser Rinne erzielten Resultate mit denen in der breiten ermöglichen zu können, muß natürlich hier ebenfalls die im vorigen Absatz begründete Vereinfachung von Gleichung (12) stattfinden. Über den Einfluß derselben auf die Resultate wäre hier unter Hinweis auf die zwei mit Δ Weisbach bezeichneten Kolonnen der Tabellen 2, 7, 9, 10, 12 und 13 dasselbe wie dort zu sagen; hinzuzufügen ist nur, daß die Unterschiede hier etwas stärker sind, da β in Gleichung (12) zwar nahezu 1 ist, aber doch immerhin eine Kleinigkeit größer ist. Unter Einführung des Geschwindigkeitshöhenbeiwertes α erhält man demnach die Gleichung:

$$Q = \mu_0 \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} \frac{3a_s + 2b_s}{5} \left(h + \alpha \frac{c^2}{2g} \right)^{3/2}. \quad (13)$$

Es erscheint überflüssig noch besonders zu bemerken, daß natürlicherweise die gemachten Vernachlässigungen unzulässig sind bei Trapezen, bei denen nicht wie hier zwischen den parallelen Seiten rein zufällige Differenzen geringen Grades sondern große Unterschiede auftreten; dann hat an Stelle von Gleichung (13) die Gleichung (11) Anwendung zu finden, die die reinen Rechenoperationen allerdings recht umständlich gestaltet.

Vereinigen wir nun wieder wie früher Gleichung (13) mit Gleichung (10) und bezeichnen mit a_s bzw. b_s die für einen schiefen Überfall, mit a_1 bzw. b_1 die für den normalen bzw. für die Rinne selbst geltenden Breiten, so wird ganz analog:

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \alpha \frac{c^2}{2gh} \right)^{3/2}$$

oder

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{3}{2} \alpha \frac{c^2}{2gh} \right).$$

Bezeichnet ferner F den Querschnitt des Oberwassers in der Rinne, dessen unterer Teil rechteckig, dessen oberer Teil trapezförmig mit der unteren Parallelseite a_1 und der oberen b_1 , so wird die Zuflußgeschwindigkeit

$$c = \frac{Q}{F}$$

und mit Rücksicht auf (10)

$$\frac{c^2}{2gh} = \frac{4}{9} \mu^2 \left(\frac{3a_s + 2b_s}{5} \cdot \frac{h}{F} \right)^2$$

und damit:

$$\mu = \mu_0 \left[1 + \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \mu \alpha \frac{3a_s + 2b_s}{5} h \cdot \frac{1}{F} \right)^2 \right]. \quad (14)$$

Für die breite Rinne von etwa 50 cm Breite, die keine Veränderungen erlitten hatte, gilt also Gleichung (8), für die schmale von etwa 25 cm Breite die Gleichung (14).

γ) Der Geschwindigkeitshöhenbeiwert α .

Es handelt sich nun um die Definierung des Geschwindigkeitshöhenbeiwertes α . Für den normalen Überfall liegen über diesen Gegenstand eingehende Versuche von Bazin¹⁾ aus dem Jahre 1886 vor, die den ausgesprochenen Zweck hatten, den Einfluß der beschränkten Abmessungen des Zulaufkanales auf die Größe des Ausflußkoeffizienten darzutun. Bazin kommt auf Grund dieser Versuche zu dem Schluß, daß man mit hinreichender Genauigkeit bei größeren Überfallhöhen und Wehrhöhen setzen könne: $\alpha = 1,66$ und $\frac{2}{3} \mu^2 \alpha = 0,55$. Diese Werte wendet auch Frese²⁾ bei Überfällen mit Seitenkontraktion an. Fteley und Stearns geben für α im Mittel 1,5 an.³⁾ Die Größe von α ist nun keineswegs konstant, sondern ist abhängig von der Wehrhöhe und der Überfallhöhe. Bazin sagt hierüber:

1. Die Werte von α nehmen ab, in dem Maße als sich die

¹⁾ Bazin, Ann. des Ponts et Chaussées, 1888, tom. 16, p. 393 u. f.

²⁾ Frese, a. a. O., S. 1299.

³⁾ Fteley und Stearns, a. a. O., p. 11.

Wehrhöhe verringert und gehen bei ein und derselben Wehrhöhe bei alleiniger Änderung der Überfallhöhe durch ein Maximum.

2. Die Werte von $\left(\frac{2}{3}\mu^2 a\right)$, denen eine geringere Veränderlichkeit mit der Wehrhöhe anhaftet, nähern sich einander in dem Maße als die Überfallhöhe zunimmt.

Dieses komplizierte Verhalten hängt mit den Eigenschaften des Ausflußkoeffizienten μ zusammen, aus dem a und $\left(\frac{2}{3}\mu^2 a\right)$ abgeleitet worden sind. Die Bestimmung von a kann nur geschehen auf Grund vergleichender Überfallversuche bei verschiedenen Wehrhöhen. Bazin vergleicht seine Versuche bei Wehrhöhen von 0,75, 0,50, 0,35 und 0,24 m mit jenen bei einer Wehrhöhe von 1,13 m, welche letztere die Höhe seines Meßüberfalles war, der für die ersteren Versuche diente.

Der in Gleichung (8) mit μ_0 bezeichnete Koeffizient gilt zufolge seiner Herleitung für einen Zuflußkanal von unendlichen Abmessungen, in dem die Zuflußgeschwindigkeit Null herrscht oder da, wie die Erfahrung mit genügender Genauigkeit gelehrt hat, beim normalen Überfall ohne Seitenkontraktion der Ausflußkoeffizient bei ein und derselben Wehrhöhe und Überfallhöhe von der Breite des Zuflußkanales oder der Länge der Überfallkante unabhängig ist, für eine unendlich große Wehrhöhe. Die für die vorgenannten verschiedenen Wehrhöhen berechneten Ausflußkoeffizienten müssen sich also sämtlich durch entsprechende Wahl des Wertes von a von einer einzigen Koeffizientenlinie ableiten lassen können, eben von derjenigen, die für eine sehr große Wehrhöhe gilt, und welche für diesen Fall die graphische Darstellung der Änderung des Koeffizienten mit der Überfallhöhe bildet. Durch Versuche läßt sich diese genannte Koeffizientenlinie wenigstens näherungsweise ableiten.

Diese Annahme setzt nun Bazin in Stand, Werte von a dadurch zu bestimmen, daß er die Koeffizienten, die für die kleineren Wehrhöhen berechnet wurden, vergleicht mit denjenigen beim Überfall von 1,13 m Wehrhöhe, aber, wohlgermerkt, jeweils bei der gleichen sekundlichen Abflußmenge. Bezeichnet:

μ'_0 den Ausflußkoeffizienten der einfachen Dubuatschen Formel Gleichung (1) bei sehr großer Wehrhöhe,

μ'_1 denjenigen beim Überfall mit 1,13 m Wehrhöhe,

μ'_2 denjenigen beim Überfall mit einer der anderen von Bazin

angewandten Wehrhöhen aber bei der gleichen Abflußmenge wie bei μ_1 und μ'_0 ,

β den Wert von $\frac{c^2}{2gh}$,

α den vorläufig unbekanntem Geschwindigkeitshöhenbeiwert, so läßt sich setzen:

$$\mu_1 = \mu'_0 \left(1 + \frac{3}{2} \alpha \frac{c_1^2}{2gh_1} \right) = \mu'_0 \left(1 + \frac{3}{2} \alpha \beta_1 \right),$$

und

$$\mu_2 = \mu'_0 \left(1 + \frac{3}{2} \alpha \frac{c_2^2}{2gh_2} \right) = \mu'_0 \left(1 + \frac{3}{2} \alpha \beta_2 \right).$$

Dies sind zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten, nämlich μ'_0 und α , die sich also nun ermitteln lassen.

Es liegt nun der Gedanke nahe, bei den schiefen Überfällen analog zu verfahren. Setzt man den hypothetischen Fall eines unendlich großen Rinnenquerschnittes mit der Zuflußgeschwindigkeit Null, so kann nunmehr die Schiefstellung des Wehres keinen Einfluß auf den Koeffizienten ausüben; dieser muß vielmehr den Wert desjenigen für das normale Wehr annehmen, denn das Wasser wird in diesem Falle auch wirklich normal zur Überfallkante abfließen. Es ist dies jener Fall, wie er bei sehr kleinen Überfallhöhen beobachtet wird. Für das normale Wehr ist aber nach den gründlichen Versuchen von Bazin der Wert von α bereits bekannt, mithin auch μ_0 hierfür berechenbar. Bei der gleichen sekundlichen Abflußmenge ließe sich dann für das schiefe Wehr ein Wert von α berechnen, der den für dieses sich ergebene μ in den Wert μ_0 des normalen Wehres überführt und das Gewicht angibt, das der Zuflußgeschwindigkeit beizulegen wäre. Schließlich könnte man der Bequemlichkeit halber die Berechnung auch durchführen für gleiche Überfallhöhen.

Natürlich ist für solche Berechnungen die vereinfachte Gleichung (8) nicht mehr anwendbar, man müßte auf Gleichung (7) zurückgreifen. Nun ist aber die Form von Gleichung (7), in Bezug auf μ und α vom 3. Grad, für die praktische Anwendung recht umständlich und wird es noch mehr, wenn μ oder α explizit dargestellt werden. Eine überschlägliche Berechnung ergab, daß man zu sehr großen Werten von α kommt, zwischen 1 und 100 variierend, die der gewöhnlichen Anschauung durchaus nicht entsprechen; und es ist, wie

die folgende Überlegung zeigt, auch klar, daß die vorgeschlagene Berechnungsmethode für a keineswegs tatsächlich eintretende Werte liefern kann. Das wirkliche Verhalten beim Abflusse an schiefen Überfällen ist ein wesentlich komplizierteres als bis hierher angenommen wurde.

Die eben gemachten Darlegungen basieren auf der Annahme, daß die ganze bei schiefen Überfällen in einem bestimmten Falle nötig werdende Änderung des Koeffizienten im Vergleich zum normalen Überfall allein vom Einflusse der Zuflußgeschwindigkeit herrührt. Dieser Einfluß ist aber nicht der einzige. Die später des näheren noch zu besprechenden Figuren 6 bis 11 Taf. 9 zeigen die mittlere Abweichung des Wassers gegen die Wehnormalen in der Symmetrieebene der Rinne als Funktion der Überfallhöhe aufgetragen. Man ersieht, daß schon bei verhältnismäßig geringen Überfallhöhen das Wasser nicht mehr senkrecht zur Überfallkante abfließt, sondern mehr und mehr seine ursprünglich innegehabte Bewegungsrichtung parallel zur Rinnenachse beizubehalten sucht. Die Ablenkung ist ferner längs der Überfallkante verschieden und am Wehrende beim stromaufstumpfen Wehrwinkel am größten. Untersuchungen, die allerdings keine zahlenmäßige Niederlegung gestatteten, haben ferner gezeigt, daß in der Nähe der Überfallkante die Stromlinien weniger von der Wehnormalen abweichen als an der Oberfläche. Die Stromlinien überkreuzen sich daher. Alles dies hängt natürlich wesentlich von der Größe der Zuflußgeschwindigkeit ab. Jedenfalls nimmt die Querschnittsfläche des Strahles eine verhältnismäßig sehr komplizierte Gestalt an, eine Gestalt, bei der die Voraussetzung, die zur Aufstellung der Gleichung (1) von Dubuat und aller ihrer Modifikationen führte, nämlich die Voraussetzung des Parallelismus der Stromlinien im Grundriß durchaus nicht mehr erfüllt ist. Mit anderen Worten, die vorliegenden Formeln geben die tatsächlichen Verhältnisse nicht richtig wieder. Da die theoretischen Grundlagen der heutigen Hydraulik bislang die Aufstellung besserer Formeln nicht zulassen, so ist man zur Anwendung der bisher üblichen Gleichungen gezwungen und muß durch entsprechende Wahl der Größe des Koeffizienten diesen Mangel an theoretischer Genauigkeit möglichst zu kompensieren suchen.

Noch ein weiterer Umstand ist zu erwähnen. Durch die Wände des Gerinnes erhält der Strahl eine Art Führung, die in der Praxis wohl auch stets vorhanden sein wird. Durch die mehr oder weniger starke Ablenkung der Stromlinien aus der Richtung der Rinnenachse

staut sich der Strahl teilweise an einer der Führungswände, was äußerlich erkennbar wird, durch Auftreten einer Art von Wasserwulst. Es ist dies in Fig. 1 Taf. 10, die einen Strahl bei einem um 45 Grad schief gestellten Überfall im Grundriß darstellt, an der rechten Seite kenntlich gemacht. Diese Stauung des Strahles bewirkt einen Rückstau, der jedenfalls zur Verkleinerung des Koeffizienten zu seinem Teile beiträgt. Auch dieser Umstand läßt sich theoretisch schwer fassen.

Beim normalen Überfall ist weiterhin die Verteilung der mittleren Geschwindigkeiten einer Vertikalen über die Ausflußöffnung in Bezug auf Größe und Richtung eine vollständig gleichmäßige auf die ganze Länge der Überfallkante hin. Bei den schiefen Überfällen, wo die Wassertiefen über der Überfallkante derselben entlang abnehmen (schräg in Richtung des fließenden Wassers gedacht), herrscht in jeder Vertikalen eine andere mittlere Geschwindigkeit, die, wie schon bemerkt, auch jeweils eine veränderte Richtung besitzt. Es ist nun einleuchtend, daß jedenfalls die Art der Geschwindigkeitsverteilung über die Ausflußöffnung hin Einfluß auf die Größe des Koeffizienten nehmen muß. Zu diesem Schluß kommt auch Frese bei Überfällen mit seitlicher Kontraktion.

Alles dies sind Verhältnisse sehr komplizierter Natur, die durchaus keine genügende Berücksichtigung in der eingangs erwähnten Methode zur Bestimmung von a finden. Es bleibt dieselbe daher unanwendbar.

Die Zuflußgeschwindigkeit ist nach Gleichung (8) zu berücksichtigen durch einen Ausdruck proportional zu:

$$\left(\frac{b_s}{b_1} \cdot \frac{h}{h+p}\right)^2 = \left(\frac{1}{\sin \varepsilon} \cdot \frac{h}{h+p}\right)^2.$$

Erfahrungsgemäß läßt sich beim normalen Überfall die ganze in einem bestimmten Falle notwendig werdende Korrektur des Ausflußkoeffizienten mit hinreichender Genauigkeit diesem Ausdruck proportional setzen, während die schiefen Überfälle eine solche Annahme a priori nicht zulassen. Bis zu welchem Grade der Genauigkeit man sich durch eine solche Annahme dem tatsächlichen Verhalten nähert, ob man die besprochene Korrektur durch einen neuen Ausdruck proportional zu $\left(\frac{h}{h+p}\right)^2$ berücksichtigen kann, wobei Gleichung (7) die etwas umständliche Gestalt annehmen würde:

$$\mu = \mu_0 \left[\left(1 + \frac{2}{3} \mu^2 \alpha \left(\frac{1}{\sin \varepsilon} \cdot \frac{h}{h+p} \right)^2 \right) - \left(\frac{4}{9} \mu^2 \alpha \left(\frac{1}{\sin \varepsilon} \cdot \frac{h}{h+p} \right)^2 \right)^{3/2} + \zeta \left(\frac{h}{h+p} \right)^2 \right], \quad (7a)$$

oder Gleichung (8):

$$\mu = \mu_0 \left[1 + \frac{2}{3} \mu^2 \alpha \left(\frac{1}{\sin \varepsilon} \cdot \frac{h}{h+p} \right)^2 + \zeta' \left(\frac{h}{h+p} \right)^2 \right], \quad (8a)$$

worin ζ und ζ' Zahlengrößen bedeuten, die vom Winkel ε und jedenfalls auch von der Rinnenbreite abhängig sind, alles das sind Fragen, die lediglich auf Grund zahlreicher Versuche beantwortet werden können, indem systematisch jeweils für ein und dieselbe Wehrstellung vergleichende Untersuchungen durch Änderung der Rinnenbreite und hauptsächlich der Wehrhöhe angestellt werden. Solcherweise würde eine direkte Bestimmung des Wertes des Geschwindigkeitshöhenbeiwertes α für jede einzelne Wehrhöhe und jede einzelne Wehrstellung ermöglicht, eines Wertes, der dann zu erkennen geben würde, ob der durch Schiefstellung an sich schon vergrößerten Zuflußgeschwindigkeit auch ein vermehrter Einfluß auf den Ausflußkoeffizienten zukommt.

Da Verfasser nicht in der Lage war, solche systematische Versuchsreihen mit verschiedenen Wehrhöhen, die einen großen Aufwand an Zeit erfordert hätten, durchzuführen, konnten die erwähnten Punkte nicht genügend klar gestellt werden und es mußte zur weiteren Berechnung angenommen werden, daß die Gleichung (8) bzw. (7) die Sachlage genügend genau charakterisiert und daß der Wert von α für normale Überfälle auch auf schiefe Überfälle Anwendung finden könne.

Der von Bazin aufgestellte Mittelwert $\alpha = \frac{5}{3}$ kann für die vorliegenden Versuche der geringen Wehrhöhe wegen natürlich nicht in Betracht kommen, denn bei seiner Aufstellung wurde besonders den größeren Wehrhöhen mehr Gewicht beigelegt, um ihm eine bessere praktische Anwendbarkeit zu sichern. Im vorliegenden Falle sind die Werte für die Wehrhöhe von 24 cm ausschlaggebend, da diese Höhe vollkommen der hier angewandten entspricht. Geringe Unterschiede von einigen Millimetern kommen dabei nicht in Betracht. Für diese Wehrhöhe gibt Bazin den Mittelwert 1,38 an,

abgeleitet für Überfallhöhen bis zu 44 cm. Es möge hier die Tabelle Platz finden, die Bazin¹⁾ über α veröffentlicht.

Überfallhöhe in m	Geschwindigkeitshöhenbeiwert α bei einer Wehrhöhe von			
	$p = 0,75$ m	$p = 0,50$ m	$p = 0,35$ m	$p = 0,24$ m
0,10	—	—	0,98	1,08
0,12	—	—	1,25	1,23
0,14	—	1,41	1,40	1,31
0,16	—	1,63	1,53	1,37
0,18	2,27	1,74	1,59	1,39
0,20	2,48	1,79	1,63	1,41
0,22	2,52	1,80	1,63	1,41
0,24	2,52	1,79	1,63	1,41
0,26	2,44	1,77	1,61	1,40
0,28	2,36	1,75	1,59	1,39
0,30	2,28	1,73	1,58	1,39
0,32	2,24	1,71	1,57	1,38
0,34	2,16	1,69	1,57	1,38
0,36	2,13	1,68	1,56	1,38
0,38	2,12	1,67	1,55	1,38
0,40	2,10	1,66	1,55	1,38
0,42	2,07	1,65	—	—
0,44	2,02	—	—	—
Mittel:	2,21	1,70	1,56	1,38

Man erkennt aus dieser Tabelle, daß von einem gewissen Grenzwerte an mit abnehmender Überfallhöhe α wesentlich kleiner wird. Die Überfallhöhen bei den vom Verfasser ausgeführten Versuchen gehen von etwa 0,01 m an bis höchstens zu 0,17—0,18 m. Bei Bestimmung von α spielen Ungenauigkeiten wegen der Kleinheit des Ausdruckes $\left[\frac{2}{3} \mu^2 \left(\frac{1}{\sin \varepsilon} \cdot \frac{h}{h+p} \right)^2 \right]$, auch bei schiefen Überfällen, keine allzu große Rolle, und es kann daher für die Wehrhöhe von 24 cm als angemessener Mittelwert für das genannte Überfallhöhen-

¹⁾ Bazin, Ann. des Ponts et Chaussées, 1888, tom. 16, p. 434.

Intervall der einfache Wert $\alpha = 1,0$ angesehen werden, d. h. die Zuflußgeschwindigkeit wird durch Einführung der einfachen Geschwindigkeitshöhe berücksichtigt.

Um nun Vergleiche anstellen zu können mit den Versuchsergebnissen anderer Experimentatoren, besonders mit denen von Boileau, der auch für schiefe Überfälle einige Ergebnisse veröffentlicht, die sich aber auf andere Wehrhöhen beziehen, so sind für die anderen Wehrhöhen der vorerwähnten Tabelle für das gleiche Intervall der Überfallhöhen Mittelwerte bestimmt worden, wie folgt:

Wehrhöhe p in m	0,75	0,50	0,35	0,24
Geschwindigkeits- höhenbeiwert α	1,50	1,21	1,10	1,00

Die graphische Darstellung Fig. 7 Taf. 3 zeigt diese Werte und daß man sie bis zur Wehrhöhe von 0,5 m mit einer Genauigkeit, die den vorliegenden Zwecken vollkommen entspricht, einkleiden kann in die Form der Geraden:

$$\alpha = 0,81 \cdot (1 + p), \quad (15)$$

worin p in Meter einzusetzen ist.

c) Die Formeln von v. Wex.

Anschließend an die vorausgehende Betrachtung der Formeln von Bazin mögen hier einige Bemerkungen Platz finden über die Formeln, die v. Wex im Jahre 1864 aufstellte und im Jahre 1888 zusammenhängend in seiner Hydrodynamik¹⁾ zugleich mit interessanten Betrachtungen über die bis dahin angestellten Versuche in größerem Maßstabe, besonders derjenigen von Fteley und Stearns, veröffentlichte. Seite 33 ist die fragliche Formel bereits aufgeführt.

v. Wex rügt an den bis dahin aufgestellten Gleichungen über den Abfluß des Wassers an Überfällen jedenfalls mit Recht, daß sie auf die Dimensionen und die ganze Konfiguration des Überfallwehres nicht genügend Rücksicht nehmen, daß sie den hydraulischen Druck auf die Überfallwand und die Ausflußöffnung nicht dem Maße seines Einflusses entsprechend berücksichtigen, und daß solcherweise

¹⁾ v. Wex, Hydrodynamik. Leipzig 1888, Verlag von Engelmann.

dem anzubringenden Koeffizienten neben seinen natürlichen Funktionen auch noch die Korrektur der Konstruktionsfehler der Berechnungsformel zugemutet wird und sucht Gleichungen aufzustellen, in denen alle Verhältnisse dem Grade ihres Einflusses entsprechend Rücksicht finden. Den Bemerkungen zu Beginn dieses Abschnittes über den heutigen Stand der Theorie der Überfälle entsprechend, ist aber natürlich auch er gezwungen, bestimmte Annahmen zu machen, die mit der Wirklichkeit nicht vollkommen übereinstimmen.

Bei Berechnung der auf die ganze Wehranlage und die Ausflußöffnung wirkenden Kräfte zerlegt v. Wex den dem Wehre zufließenden Wasserkörper durch eine horizontale Ebene in der Höhe der Überfallkante. Mit Hilfe dieser beiden Wasserkörper bestimmt er dann getrennt die hydraulischen Drücke auf Ausflußöffnung und Überfallwand, indem in beiden Teilen des Wasserquerschnitts die mittlere Geschwindigkeit c herrschen soll. Natürlicherweise ist dies eine unvollkommene Annahme, denn bekanntlich ist durch vielfache Versuche besonders in neuerer Zeit festgestellt, daß die sogenannte mittlere Geschwindigkeit nur an einer Stelle des Querschnittes auftritt. Die mittleren Geschwindigkeiten der oben erwähnten Wasserkörper sind also jedenfalls verschieden und hängen ganz vom Querschnitt des Gerinnes ab.

Der hydraulische Druck des unteren Wasserkörpers gegen die feste Überfallwand wird, wie beim Stoße des isolierten Wasserstrahles, angegeben. Der Stoß des in einer Rinne gegen eine feste Wand fließenden Wassers mag theoretisch wohl ebenso groß sein, als derjenige eines isolierten Wasserstrahles, der denselben Querschnitt wie das Wasser in der Rinne besitzt. Da das auftreffende Wasser aber im Gegensatz zum isolierten Strahl nur nach einer Seite hin ausweichen kann, so wird ein Teil der Stoßkraft auch auf den Boden und die Seitenwände der Rinne übertragen, so daß nicht der ganze Betrag der Stoßkraft dazu verwendet wird, das Wasser in die Ausflußöffnung zu drängen. Jedenfalls treten hier Arbeitsverluste ein, die ihren Ausdruck in einem Koeffizienten kleiner als 1 finden müßten. Der für den erwähnten hydraulischen Druck angegebene Ausdruck ist also jedenfalls zu groß. Der hydraulische Druck auf die feste Wehrwand wird weiter nach v. Wex gegen die Ausflußöffnung hin abgelenkt und in seine Komponente in der Richtung der mittleren Stromlinie zerlegt. Diese Komponente bewirkt einen vermehrten Abfluß, für welchen ihre horizontale Komponente in

Rechnung kommt. Die Wirkung dieser letzteren Komponente soll an der Wehrkrone am größten, am Wasserspiegel gleich Null nach dem Gesetz der Geraden sein. Dabei wird als mittlerer Ablenkungswinkel der Stromlinien ein Winkel eingeführt, der den Winkel zwischen der Horizontalebene durch die Überfallkante und der Stauwand des Wehres halbiert. Bei einer lotrechten Stauwand ist dieser Winkel demnach 45 Grad. Dies ist natürlich wiederum eine willkürliche Annahme. Nichts spricht z. B. bis heute dagegen, daß die Stromlinien sich nach der einen oder anderen Richtung sozusagen zusammendrängen und damit die mittlere Stromlinie in dem einen oder anderen Sinne verschieben. Es läßt sich überhaupt nicht gut von einem mittleren Ablenkungswinkel sprechen, denn eine exakte Definition kann für denselben nicht gegeben werden. Auch die Annahme des Verteilungsgesetzes des Druckes ist ganz willkürlich.

Alles dies sind Annahmen, die man wohl gelten lassen kann, doch darf nicht außer acht gelassen werden, daß sie nur grobe Annäherungen an die Wirklichkeit darstellen. Die v. Wexschen Formeln wurden hier eingehender beleuchtet, weil sie in vielen Lehrbüchern der Hydraulik und des Wasserbaues speziell als sehr empfehlenswerte, weil auf viel besseren wissenschaftlichen Grundlagen beruhende Formeln aufgeführt werden. Unsere heutigen Kenntnisse über die inneren Vorgänge beim Überfall sind noch recht dürftige. Die neuerdings wieder an verschiedenen Orten aufgenommenen Versuche werden hoffentlich hier Klärung schaffen. Bis dahin darf deshalb nicht vergessen werden, daß auch dem bei den v. Wexschen Formeln einzuführenden Koeffizienten die Aufgabe zufällt, die in die Formel eingeführten ungenauen oder angenäherten Annahmen zu korrigieren. Die besprochenen Formeln haben daher vor den bisher gebräuchlichen nichts voraus. Günstig wirkt allerdings, daß sie die Wehrdimensionen und die ganze Konfiguration der Wehranlage im Grundriß wenigstens einigermaßen berücksichtigen. Bei ihrer Anwendung in der Praxis wirkt störend ihr recht umständlicher Bau, doch kann man ja von einer Formel, die alle in Betracht kommenden Verhältnisse berücksichtigen soll, unmöglich eine sehr einfache Gestalt verlangen.

Die vom Verfasser ausgeführten Versuche wurden auch nach den v. Wexschen Formeln berechnet, da es die einzigen sind, die speziell auch für schiefe und gebrochene Wehre etc. aufgestellt wurden.

Es bezeichne in nachstehender Figur:

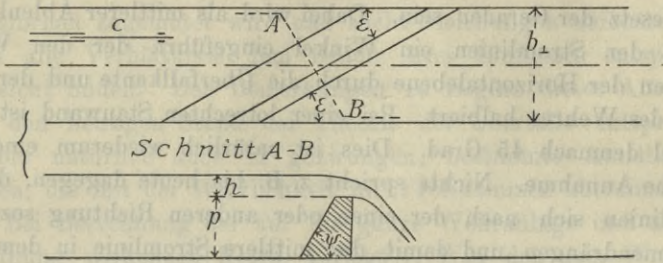


Fig. 5.

- b_1 die Breite der rechteckigen Zufußrinne,
- p die Höhe der Überfallwand oder des Wehres,
- c die mittlere Zufußgeschwindigkeit,
- h die Überfallhöhe,
- Q die sekundliche Abflußmenge,
- ψ den Neigungswinkel der Vorderböschung des Wehres gegen die Horizontalebene,
- ε den Winkel der Längsrichtung des Wehres mit der Rinnenachse im Grundriß,
- g die Erdbeschleunigung,
- μ den Ausflußkoeffizienten,

so lautet die Formel von v. Wex¹⁾ für diesen allgemeinen Fall des vollkommenen Überfalles:

$$Q = \mu \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{b_1}{\sin \varepsilon} \sqrt{2g} \left(\frac{h}{s_1 - s} \right) \left[s_1^{3/2} - s^{3/2} \right],$$

worin:

$$s_1 = s + h + \frac{2p}{g \cdot h} \left(\frac{Q}{b_1(p+h)} \right)^2 \sin^2 \varepsilon \cdot \cos^2 \left(\frac{\psi}{2} \right)$$

$$s = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{b_1(p+h)} \right)^2 \cdot \sin^2 \varepsilon.$$

Besteht das Wehr wie bei den vorliegenden Versuchen aus einer vertikalen Wand, so wird $\psi = 90$ Grad; $\frac{\psi}{2} = 45$ Grad und es ändert sich lediglich s_1 um in:

¹⁾ v. Wex, a. a. O., S. 42.

$$s_1 = s + h + \frac{p}{g \cdot h} \left(\frac{Q}{b_1(p+h)} \right)^2 \cdot \sin^2 \varepsilon.$$

Für ein zur Stromrichtung normales Wehr mit $\varepsilon = 90$ Grad gehen obige Formeln über in die bereits auf Seite 33 mitgeteilten. v. Wex hat in seinem Werke dann noch weiterhin Formeln für unvollkommene Überfälle, Grundschleusen und Ausleitungen in Kanäle etc. aufgestellt und möge hiefür auf sein interessantes Buch verwiesen werden.

2. Die Berechnungsergebnisse der Versuche an normalen und schiefen Überfällen.

a) Allgemeines.

Bevor zur Besprechung der Versuchsergebnisse selbst übergegangen wird, möge hier die Bemerkung Platz finden, daß sich die ausgeführten Versuche lediglich auf den sogenannten freien Strahl beziehen, auf jenen Strahl, den die französischen Hydrauliker durchweg als „nappe libre“ bezeichnen. Bei diesem ist der Raum unterhalb des Strahles zwischen Abfallwand, Unterfläche des Strahles und den Rinnenwänden im oberen Teil mit Luft erfüllt, im unteren befindet sich eine sogenannte Wasserwalze, deren Drehungssinn sich durch ihren ständigen Kontakt mit dem Strahle ergibt. Der Strahl reißt beständig Luft aus dem erwähnten Raume mit sich fort; es muß deshalb dafür gesorgt werden, daß sich dieselbe stets wieder leicht und vollkommen ersetzen kann. Dazu dienten bei den ausgeführten Versuchen für jede Überfallstellung zwei Löcher von 25 mm Durchmesser, von denen je eines in jede Wand der Rinne gebohrt war, so zwar, daß die Führung des Strahles durch dieselben nicht beeinflußt wurde. In Fig. 1 und 2 Taf. 1, sowie Fig. 3 und 4, sind diese Löcher sowie die besprochene Form des Strahles ersichtlich. Bei den schiefen Überfällen, bei denen sich die Wasserwalze unter dem Strahl in äußerst lebhafter Bewegung befindet, ist ganz besonders auf eine hinreichende Lüftung Bedacht zu nehmen, da hier die Luft namentlich bei großen Überfallhöhen starken Verlusten ausgesetzt ist. Unter den vielen und mannigfaltigen Formen, die ein überfallender Strahl annehmen kann, besitzt der freie Strahl die größte Stabilität

und Ruhe. Bei dieser Strahlform sind daher die zuverlässigsten Resultate zu erwarten. Bei Wehren, die in der Natur in großem Maßstabe ausgeführt werden, wird die Lüftung wohl meist eine recht unvollkommene sein und die Wasserwalze unter dem Strahl kann leicht den ganzen Raum unter demselben ausfüllen. Es hat dies, wie sowohl Untersuchungen von Bazin, Hansen u. a. m. zeigen, als auch Versuche im Flußbaulaboratorium und solche von Herrn Geh. Hofrat Prof. Brauer zu erkennen gaben, eine ganz bedeutende Zunahme des Koeffizienten zur Folge, wohl hauptsächlich infolge Verminderung der Kontraktion. Die Bestimmung dieser Zunahme des Koeffizienten müßte Gegenstand einer gesonderten experimentellen Untersuchung sein, durch welche auch klar gestellt werden könnte, ob ein bestimmtes Verhältnis, das zwischen dem Koeffizienten des normalen Überfalles und irgend einem schiefen für den Fall des freien Strahles besteht, auch in gleicher Weise ohne weiteres für den unten benetzten Strahl Geltung hat, den Bazin und andere Franzosen mit „nappe noyée en dessous“ bezeichnen. (Die Benennung „unten benetzter Strahl“ wurde von Herrn Prof. Th. Rehbock eingeführt.) Die meisten bekannt gewordenen Versuche beziehen sich auf den freien Strahl, wohl hauptsächlich seiner Stabilität wegen. Bei den nachfolgenden Besprechungen wird auch nur diese Strahlform behandelt werden.

Am Boden der Rinne geht der Strahl in seinen zu diesem Boden parallelen Teil über. Infolge der durch den Fall erlangten Geschwindigkeit besitzt dieser eine geringere Dicke bzw. Tiefe als es dem Gefälle des Rinnenbodens entspricht. Unter Ausbildung des sogenannten Wassersprunges erhebt sich die Oberfläche dieses unteren Strahlteiles zu derjenigen des Unterwassers, deren Höhenlage im gleichen Gerinne durch die Größe der Wasserführung sowie durch das Gefälle und die Rauigkeit der Rinnenwände bedingt wird. Das Unterwasser übt auf den Ausflußkoeffizienten solange keinen Einfluß aus, als der sich unterhalb des Strahles bildende Wassersprung nicht an den Fuß des Strahles heranrückt. Die Versuche wurden daher bei ungestautem Unterwasser ausgeführt. Der Strahl behält seine Führung durch die Wände der Rinne so lange bei, bis er in den horizontalen Teil am Rinnenboden übergegangen ist. Dann erst verläßt das Wasser die Rinne, wie es die Fig. 1 und 2 Taf. 1 für den normalen Überfall darstellen. Auch dieser Einfluß der Unterwassertiefe auf den Ausflußkoeffizienten kann nur Gegenstand einer besonderen Untersuchung sein.

Bei sehr kleinen Überfallhöhen, etwa bei solchen von 7—8 mm, schmiegt sich der Strahl vollkommen an die Abfallwand an und ist von hier an die Ausbildung des freien Strahles ausgeschlossen. Auch hier findet eine starke Zunahme des Koeffizienten statt; es befindet sich hier anscheinend eine Stelle der Unstetigkeit im Verlauf der Koeffizientenänderung. Da, wie schon früher erwähnt, weiterhin die Messung dieser kleinen Überfallhöhen mit großen prozentualen Meßfehlern behaftet ist, so liegt hier die Gültigkeitsgrenze aller ermittelten Koeffizientenlinien.

b) Umrechnungsformeln.

Wie bei der Beschreibung der Versuchsanlage ausgeführt, fließt ein und dasselbe sekundliche Wasserquantum sowohl über den Meßüberfall als über den zur Untersuchung stehenden Überfall in der Rinne. Für den Meßüberfall gilt die schon des öfteren erwähnte Gleichung (1):

$$Q_1 = \mu_1 \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b_1 \cdot h_1^{3/2},$$

und für den zu untersuchenden Überfall die ähnliche:

$$Q = \mu \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b_s \cdot h^{3/2}.$$

Und da:

$$Q_1 = Q,$$

so wird:

$$\mu = \mu_1 \cdot \left(\frac{b_1}{b_s}\right) \cdot \left(\frac{h_1}{h}\right)^{3/2}.$$

Und da weiter für μ_1 durch die Eichung des Meßüberfalles die Formel (3) Seite 20 aufgestellt wurde, so dient zur Ermittlung des gesuchten Ausflußkoeffizienten μ die Gleichung:

$$\mu = \left(0,578 + \frac{1,33}{h_1}\right) \cdot \left(\frac{b_1}{b_s}\right) \cdot \left(\frac{h_1}{h}\right)^{3/2}, \quad (16)$$

worin:

$b_1 = 500$, 1 mm die Breite des Meßüberfalles,

b_s die Länge der Überfallkante am zu untersuchenden Wehr,

h_1 und h die entsprechenden Überfallhöhen.

Dies sind alles durch Beobachtung festzulegende Größen. Bei der schmalen Rinne, die keinen regelmäßigen rechteckigen Querschnitt

hatte, tritt mit den Bezeichnungen auf Seite 43 an Stelle von b die Länge $\frac{3a_s + 2b_s}{5}$. Bei Anwendung der Formeln von v. Wex und Weisbach war, da in diesen die Zuflußgeschwindigkeit c direkt auftritt, auch noch die Berechnung von Q , der Wassermenge selbst, nötig.

c) Die Berechnungsergebnisse nach den Formeln von Bazin.¹⁾

a) Die Koeffizienten μ .

Gehen wir nun zu den Ergebnissen der Berechnung der Versuche nach den verschiedenen Formeln selbst über.

Für jede Wehrstellung wurde zuerst nach der im vorhergehenden Absatz abgeleiteten Formel (16) der Koeffizient μ der einfachen Dubuatschen Ausflußgleichung (1) berechnet und in den Tabellen 2—20¹⁾ für alle Versuche zusammengetragen. Auf Taf. 2 Fig. 2—7¹⁾ findet man dieselben in ihrer Abhängigkeit von der Überfallhöhe h verzeichnet und zwar gilt Fig. 7 für das normale Wehr mit $\varepsilon = 90$ Grad, jede weitere der Fig. 6—2 bezieht sich auf einen Überfall, bei dem die Neigung der Wehrtafel gegen die Rinnenachse (also der Winkel ε) um etwa 15 Grad verringert ist. Die genauen Maße für den Winkel ε wurden bestimmt aus den mit möglichster Genauigkeit gemessenen Dimensionen der Rinne und der Überfallkante. Die geringelten Punkte gehören den Versuchen in der schmalen Rinne von etwa 25 cm lichter Breite an, die ausgefüllt angegebenen denen in der breiten Rinne mit entsprechend 50 cm. Man erkennt sofort, daß der Koeffizient bei allen Wehrstellungen anfangs rasch, später langsamer abnimmt, das bekannte, noch von allen Experimentatoren gefundene Resultat, solange deren Versuchsergebnisse nicht durch außerordentliche Umstände, wie z. B. zu große Zuflußgeschwindigkeiten, stark beeinflusst wurden. Beim normalen und den nächstfolgenden beiden Überfällen ist auch das von Bazin bereits angezeigte Verhalten erkennbar, daß bei großen Überfallhöhen die Koeffizienten wieder etwas zunehmen, für diese also ein Minimum besteht, dessen Lage je nach der Wehrhöhe Verschiebungen erleidet, da das Bestehen des Minimums hauptsächlich dem Einflusse der Zuflußgeschwindigkeit zuzuschreiben ist. Die in den Fig. 2—7

¹⁾ Vgl. hiezu sowie über die Bedeutung der in die Figuren eingezeichneten gestrichelten Kurven den Nachtrag.

Taf. 2 dargestellten Kurven sollen lediglich den allgemeinen Verlauf der Koeffizientenänderung kennzeichnen; sie wurden zwar mit der größtmöglichen Sorgfalt eingezeichnet, stellen aber keine eigentliche Ausgleichung dar. Schon ein oberflächlicher Vergleich der Beobachtungspunkte läßt erkennen, daß die Koeffizienten bei gleicher Überfallhöhe für das normale Wehr am größten sind und für jedes folgende kleiner werden. Noch besser läßt sich dies Verhalten ersehen aus Taf. 4a, in der die erwähnten Linienzüge auf den gleichen Koordinatenursprung bezogen sind. Wie schon früher gesagt, ist es klar, daß bei geringen Überfallhöhen der Einfluß der Wehrstellung verschwinden muß, was auch in dieser Figur durch die Vereinigung der Linienzüge in ihrem unteren Ende zum Ausdruck kommt. Mit steigender Überfallhöhe findet eine steigende Abnahme der Koeffizienten statt.

Es ist auch weiterhin erklärlich, daß die Rinnenbreite auf den Koeffizienten Einfluß nehmen muß, denn die Ablenkung der Wasserfäden aus ihrer ursprünglichen Strömungsrichtung parallel zur Rinnenachse kann sich bei dem Überfall in der breiten Rinne ungestörter ausbilden als bei dem in der schmalen. Daher treten bei gleichen Überfallhöhen in der schmalen Rinne die kleineren Koeffizienten für schiefe Überfälle auf. Ein Vergleich dieser Koeffizienten mit Versuchsergebnissen, die sich auf andere Wehrhöhen beziehen, ist natürlich nicht statthaft; es sollen daher jetzt die Koeffizienten μ zufolge des im vorhergehenden Kapitel unter Absatz *b* Gesagten vom Einfluß der Zuflußgeschwindigkeit befreit werden.

Dazu dient also die den Bazinschen Formeln analog gebildete Gleichung (8) Seite 41 für die Versuche in der breiten Rinne und Gleichung (14) Seite 46 für diejenigen in der schmalen Rinne. Die Hauptergebnisse dieser Zahlenrechnungen sind wiederum in den Tabellen 2—20 zusammengestellt. Der besseren Übersichtlichkeit halber wurden die Zwischenergebnisse der Rechnung fortgelassen. Als K sind die Werte der eckigen Klammern in den Gleichungen (8) bzw. (14) angegeben, also die an μ anzubringenden Gesamtkorrekturen. Die Verzeichnung der Koeffizienten μ_0 in ihrer Abhängigkeit von der Überfallhöhe h hat auf Taf. 3 Fig. 1—6 stattgefunden mit μ_0 als Abszissen und h als Ordinaten.

β) Der normale Überfall.

Betrachten wir zunächst die Versuchsergebnisse am normalen Überfall. Man erkennt (Fig. 6 Taf. 3¹⁾), daß die Beobachtungen einen recht regelmäßigen Verlauf nehmen und Abweichungen von höchstens 1% vom Mittel vorkommen, eine Genauigkeit, die für die vorliegenden vergleichlichen Zwecke als vollkommen genügend angesehen werden muß. Nur bei den Beobachtungen Nr. 5, 23, 25, 28 und 29 Tabelle 2 scheinen Unregelmäßigkeiten vorgekommen zu sein. Ungenauigkeiten bis zu 1% des Koeffizienten kommen übrigens bei fast allen Beobachtern vor, und scheint es, als ob diese Genauigkeitsgrenze nicht leicht herabzudrücken sei. Bei Betrachtung der Koeffizienten μ_0 ersieht man, daß das bei den Koeffizienten μ vorhanden gewesene Minimum wie naturgemäß hier verschwindet. Weiterhin ist zu erkennen, daß ein Einfluß der Breite der Rinne auf den Koeffizienten nicht hervortritt. Auch dieses Resultat ist bis jetzt noch von den meisten Experimentatoren bestätigt worden, solange die Versuchsergebnisse nicht durch zu große Rauigkeit der Gerinnwände getrübt wurden. Im vorliegenden Falle leistete der Anstrich der Wände mit Siderosten sehr gute Dienste, da diese Farbe einen sehr hohen Grad der Glätte erzeugt. In der Gegend der Überfallhöhe $h = 150$ mm scheinen die Koeffizienten der Beobachtungen Nr. 26 – 32 Tabelle 3 für die breite Rinne etwas kleiner zu sein als die entsprechenden der schmalen Rinne, doch ist dies sicher auf Beobachtungsfehler zurückzuführen. Nimmt man nämlich an, daß die Rinnenbreite auf den Koeffizienten Einfluß nimmt, so könnte infolge der Reibung des Wassers an den Rinnenwänden der Koeffizient bei zunehmender Rinnenbreite höchstens zunehmen, nicht aber wie hier um eine Kleinigkeit abnehmen. Für Beobachtungsfehler sprechen auch die in die gleiche Figur eingezeichneten Versuchsergebnisse von Hansen, deren Zahlenwerte in Tabelle 5 zu finden sind. Hansen²⁾ hat bei seinen Versuchen indirekte Wassermengenmessungen gemacht durch Messung der Druckhöhe über einem System von sehr genau geeichten abgerundeten Ansatzstücken, die im Boden eines größeren Behälters angebracht waren. Bei diesen Hansenschen Versuchen waltete die außerordentlichste Sorgfalt, so daß sie jedem Anspruche auf Genauigkeit genügen. Sie be-

1) Die Bedeutung der auf Taf. 3 in die Figuren eingezeichneten gestrichelten Kurven ist im Nachtrage erklärt.

2) Hansen, a. a. O.

ziehen sich auf eine Wehrbreite von 1082,5 mm und eine Wehrhöhe von 514,0 mm. Ein Blick auf Fig. 6 Taf. 3 zeigt, daß die hier vorliegenden Versuche mit denen von Hansen vorzüglich übereinstimmen. Nur der Punkt Nr. 1 Tabelle 5 liegt abseits, derselbe wird aber auch von Hansen selbst bei Zusammenfassung seiner Resultate außer acht gelassen und scheint dieser daher nicht so zuverlässig zu sein. Auch die Übereinstimmung mit den Versuchen von Boileau (Tabelle 4 Nr. 1—20), die mit verschiedenen aus Tabelle 4 ersichtlichen Wehrbreiten und -höhen ausgeführt wurden, ist durchweg gut; die Punkte Nr. 18—20 Tabelle 4, die sich auf kleine Wehrhöhe (206,0 mm) und kleine Breite (292,0 mm) beziehen, liegen allerdings ganz abseits; wie indessen später bei Besprechung der Versuchsergebnisse an schiefen Überfällen zu zeigen sein wird, ist dies eine Folge der Art und Weise, wie Boileau die Überfallhöhen gemessen hat.

Sehr schlecht ist nun die Übereinstimmung mit den Versuchen von Bazin (Tabelle 6 Nr. 1—16). Dieselben beziehen sich auf eine Wehrhöhe von 240,0 mm und eine Wehrbreite von 1997,0 mm. Auch die anderen von Bazin¹⁾ veröffentlichten Versuchstabellen für andere Wehrhöhen liefern keine besser übereinstimmenden Ergebnisse; die Bazinschen Koeffizienten fallen durchweg zu groß aus. Hierauf bezüglich stellte Hansen²⁾ Versuche an mit Turbinenleiträdern verschiedener Abmessungen und Schaufelwinkel, die in den Boden seines großen Versuchsbehälters eingesetzt wurden und bestimmte den Ausflußkoeffizienten der Leiträder experimentell für den Fall, daß der Wasseraustritt nicht durch die Anwesenheit des Laufrades beeinflusst wird. Es ergab sich dabei, daß bei Anwendung seiner eigenen Überfallkoeffizienten der Ausflußkoeffizient der Turbinenleiträder sich ganz richtig als annähernd konstant (etwa zwischen 0,99 und 0,98) ergab, während er, mit Hilfe der Bazinschen Überfallkoeffizienten berechnet, stark variabel und größer als 1 ausfällt, was nicht der Fall sein kann. Daraus schließt Hansen, daß bei den Bazinschen Versuchen jedenfalls unbemerkte Störungen vorgekommen seien.

Es liegt nun der Einwand nahe, daß mit den Koeffizienten auch die in Kapitel 1 dieses Abschnittes, Seite 52—53, abgeleiteten Werte für den Geschwindigkeitshöhenbeiwert a fehlerhaft sind; hier ist aber wiederum zu bedenken, daß ein Fehler in a keinen großen

1) Bazin, a. a. O., p. 420—426.

2) Hansen, a. a. O., S. 1096.

Einfluß auf μ_0 ausübt wegen der Kleinheit des Ausdrucks, der mit ihm multipliziert erscheint. Die schon vorgeführten Zahlenwerte für a können daher immerhin weitergeführt werden, ohne daß dieselben die Genauigkeit stark beeinträchtigen.

Die zahlreichen Versuche von Poncelet und Lesbros¹⁾ geben Werte für μ_0 , die meistens kleiner sind als die hier und von Hansen ermittelten. Eine Erklärung hiefür ergibt sich in der Versuchsanordnung der genannten Experimentatoren und ist dieselbe im Absatz a des ersten Kapitels dieses Abschnittes auf Seite 34 schon erklärt worden. Auch die Castelschen Versuche finden sich dort kurz beleuchtet.²⁾

Weitere Versuche konnten nicht zum Vergleich herangezogen werden, da sie sich auf Wehrhöhen beziehen, für welche die für a abgeleitete Gleichung (15) Seite 53 keine Gültigkeit mehr hat. Doch wird dies noch gelegentlich der Besprechung der Versuchsergebnisse nach den Formeln von v. Wex geschehen.

Erwähnt möge hier noch werden, daß die Koeffizienten für die schmale Rinne stets direkt mit denen für die breite Rinne verglichen werden, trotzdem wie im Kapitel 1 unter b, β dieses Abschnittes behandelt, der Querschnitt der schmalen Rinne nicht streng rechteckig war. Es ist indessen mit großer Wahrscheinlichkeit anzunehmen, daß die hiefür berechneten Werte der Koeffizienten wegen der nur sehr geringen Trapezoidalität des Querschnitts von denen für streng rechteckige Rinne nur unmerklich abweichen werden.

γ) Die schiefen Überfälle.³⁾

Bei den schiefen Überfällen sind die am Koeffizienten μ infolge des Einflusses der Zuflußgeschwindigkeit anzubringenden Gesamtkorrekturen natürlicherweise stets größer, ist doch durch Schiefstellung des Wehres eine vergrößerte Zuflußgeschwindigkeit erzeugt, was sich im Erscheinen des reziproken Wertes des Sinus des Winkels ε in der Klammer des Ausdruckes (8) kund tut. Es ist dies auch in den Tabellen 7—15 für schiefe Überfälle in den Kolonnen der Werte K ersichtlich. Die Gesamtkorrektur K wächst mit der Schiefstellung

1) Poncelet und Lesbros, Expériences etc. Paris 1832.

2) Hauptquelle d. Vers. v. Castel: Memr. de l'Acad. des sciences de Toulouse, tom. 4, 1837.

3) Vgl. hiezu die Bemerkungen des Nachtrags.

des Wehres und mit der Überfallhöhe. Auch bei diesen Beobachtungen an schiefen Überfällen ist eine befriedigende gegenseitige Übereinstimmung vorhanden und läßt sich eine Gesetzmäßigkeit der Koeffizientenabnahme mit Überfallhöhe und Wehrstellung leicht erkennen. Nur hie und da treten bei einzelnen Beobachtungen Unregelmäßigkeiten auf, die in den Fig. 1—5 Taf. 3 leicht zu erkennen sind. Beobachtungen mit so großen Unregelmäßigkeiten wie z. B. Nr. 21, 29 und 23 Tabelle 8 (Fig. 5) läßt man am besten aus der Betrachtung fort.

Die Fig. 2 und 4 Taf. 3 für $\varepsilon = 30^{\circ} 26'$ und $59^{\circ} 45'$ geben nur Versuche in der schmalen Rinne wieder. Die entsprechenden in der breiten sind mißglückt aus Ursachen, die nachträglich nicht mehr mit Sicherheit erkannt werden konnten. Die berechneten Koeffizienten zeigten hier einen stark unregelmäßigen Verlauf und standen auch nicht im Einklang mit den entsprechenden Ergebnissen aller anderen Versuche; mit Sicherheit war nur zu erkennen, daß es sich hier um starke Beobachtungsfehler handelte. Es bot sich später nicht mehr die Gelegenheit, diese Versuchsreihen durch Neuaufnahmen zu ersetzen und so machte sich ihr Fehlen besonders bei der späteren Zusammenfassung der Resultate recht ungünstig bemerkbar.

Der auf Taf. 3 jeweils aus den Punkten $h = 0$ $\mu_0 = 0,6$ gezogene strich-punktierte Linienzug stellt die Abhängigkeit der Überfallhöhe h_1 am Meßüberfall von der gleichzeitig auftretenden Überfallhöhe h an demjenigen Überfall dar, für den auf der betreffenden Tafel die Abszisse 0,6 gilt, von der der Linienzug ausgeht; die h_1 sind als Abszissen, die h als Ordinaten, beide im gleichen Maßstab, aufgetragen. Diese Linien dienen lediglich zur leichteren Ermittlung von Überfallhöhen, die gleichen sekundlichen Wassermengen zugehören für verschieden schiefe Überfälle.

In Fig. 2 und 3 Taf. 3 sind Versuchsergebnisse von Boileau¹⁾ an schiefen Überfällen mitgeteilt; die zugehörigen Zahlenwerte finden sich in Tabelle 15, Nr. 1—12.

Der Einfluß der Rinnenbreite auf den Koeffizienten μ_0 verschwindet beim normalen Überfall, ist größer bei dem Überfall mit ε annähernd 45 Grad und wieder geringer beim schiefsten Überfall mit ε annähernd 15 Grad. Es steht dies auch im Einklang mit der natürlichen Anschauung, wenn es auch wegen der geringen Überfall-

¹⁾ Boileau, a. a. O., p. 141, Tabelle 37.

höhen beim letzteren Überfall nicht sehr deutlich zum Ausdruck kommt. Beim Vergleich mit den Versuchen Boileaus ist man geneigt, anzunehmen, daß der Einfluß der Rinnenbreite auf den Ausflußkoeffizienten auch noch fortbesteht, bei Breiten, die größer sind als 50 cm, auf welche sich die vom Verfasser ausgeführten Versuche teilweise beziehen. Die Übereinstimmung bei kleineren Überfallhöhen der Boileauschen Versuche (z. B. der Nr. 1, 2 und 7, 8 Tabelle 15) ist ja noch verhältnismäßig gut. Bei Fig. 2 Taf. 3 ist zu beachten, daß hier Boileaus Beobachtungen mit $\varepsilon = 26^{\circ} 40'$ eigentlich Zwischenwerte der Fig. 1 und 2 Taf. 3 darstellen, die Unterschiede hier also in Wirklichkeit noch um eine Kleinigkeit größer sind, als sie in Fig. 2 erscheinen. Daß die Boileauschen Koeffizienten aber später so groß werden und ihr Verlauf ein so merkwürdig gestreckter ist, das liegt an der Art und Weise, wie Boileau seine Versuche ausführte. Aus seinem schon des öfteren zitierten Werke geht hervor, daß er überhaupt ohne Lüftung gearbeitet hat, indem er von der Voraussetzung ausging, daß in der Praxis stets nur eine mangelhafte Lüftung vorhanden sein wird. Die einmal unter den Strahl eingedrungene Luft (dieses Eindringen wurde ihr durch den Körper eines Wasserstandsrohres erleichtert) war von der äußeren Atmosphäre vollkommen abgeschlossen, konnte sich daher nicht in genügendem Maße ersetzen und stand also unter einem geringeren Druck als die Außenluft. Auf derartig gebildete freie Strahlen beziehen sich sämtliche Versuche Boileaus über diesen Gegenstand. Für normale Überfälle teilt er die folgende Tabelle mit¹⁾, aus der ersichtlich ist, von welchen Überfallhöhen an der freie Strahl je nach der Größe der Wehrhöhe aufhört zu existieren:

Wehrhöhe p in mm	Grenzüberfallhöhe für die Ausbildung des freien Strahles mm
200	70
250	95
300	115
350	135
400	155
450	180
500	200
600	280

¹⁾ Boileau, a. a. O., p. 67, Tabelle 8.

Es wurde schon in der Einleitung zu diesem Kapitel bemerkt, daß dem unten benetzten Strahl ein bedeutend größerer Ausflußkoeffizient zukommt als dem freien Strahl. Beim normalen Wehr geht der freie Strahl bei einer gewissen Überfallhöhe und abgeschlossener Lüftung über die ganze Länge der Überfallkante gleichzeitig in den unten benetzten über. Bei den schiefen Überfällen ist dies anders. Die zwischen Strahl und Abfallwand befindliche Wasserwalze ist in lebhafter Bewegung begriffen; die ganze Konfiguration des überfallenden schiefen Strahles bedingt, daß, wie später noch des näheren erläutert werden wird, die Tiefe des Wassers unter dem Strahle (also die Tiefe der Wasserwalze) in der Nähe des Wehrendes beim stromab stumpfen Grundrißwinkel am größten ist; es bildet sich hier eine Art Wasserberg. Die Fig. 1a Taf. 10 gibt bei einem Überfall, der um 45 Grad gegen die Rinnenachse geneigt ist, bei einer Überfallhöhe von 83,0 mm den Grundriß des überfallenden Strahles an. Die Höhenkurven haben Abstände von 10 mm, die punktiert gezeichneten solche von 2 mm. Konstruiert wurden sie mit Hilfe dreier Längennivellements, wovon eines in der Vertikalebene der Rinnenachse, das zweite in einer Ebene mit 10 cm Abstand von der linken und das dritte in einer solchen mit 10 cm Abstand von der rechten Rinnenwand ausgeführt wurde. An der rechten Rinnenwand bildet sich infolge Auflaufens des Strahles an diese Wand eine Art Wasserwulst aus, der auf der Oberfläche des Strahles aufliegt und nach unten, im horizontalen Querschnitt gemessen, an Ausdehnung zunimmt. Von diesem Wasserwulst wurden nur einige Maße aufgenommen, im übrigen sind die Höhenkurven für denselben durch Einschaltung freihändig aufgezeichnet. An die linke Rinnenwand schließt sich der Strahl bogenförmig an. Hier gibt die Stelle *C* einen Ort an, an dem die unter dem Strahl befindliche Wasserwalze denselben andauernd durchbricht. Eben diese Stelle ist es, an der sich zwischen Abfallwand und Unterfläche des Strahles jener oben erwähnte Wasserberg bildet. Die Aufnahme Fig. 1b Taf. 10, die einen Vertikalschnitt längs der Abfallwand darstellt, läßt diese Überhöhung der Oberfläche der Walze an der besagten Stelle gut erkennen. Bei steigender Überfallhöhe wächst wie beim normalen Überfall die Tiefe der durch den Strahl abgeschlossenen Wasserwalze. An der Stelle, an der sich der erwähnte Wasserberg vorfindet, wird von der abgeschlossenen Walze die Höhe der Überfallkante zuerst erreicht und überschritten; es ist somit

hier bereits der unten benetzte Strahl vorhanden, wenn sich am entgegengesetzten Wehrende noch der freie Strahl vorfindet. Bei weiterem Ansteigen der Überfallhöhe bildet sich dann der unten benetzte Strahl allmählich vollständig auf die ganze Überfalllänge aus. Ohne Lüftung tritt dieser Zeitpunkt schon verhältnismäßig bald ein, bei genügender Lüftung erst bei sehr großen Überfallhöhen.

In dem Maße nun als der Strahl vom freien allmählich in den unten benetzten übergeht, in dem Maße wird sich auch der Ausflußkoeffizient allmählich aber merklich vergrößern müssen. Bei Boileaus Beobachtungen Fig. 2 und 3 Taf. 3 tritt dieses Verhalten der Koeffizienten auch sehr deutlich in Erscheinung, indem die betreffenden Beobachtungspunkte beinahe senkrecht übereinander liegen und bedeutend größere Koeffizienten angeben als die anderen dort verzeichneten Punkte, die dem vollkommen freien Strahl angehören. Bei normalen Überfällen kann der Einfluß ungenügender Lüftung auf den Koeffizienten nicht so stark sein, weil sich eben hier der freie Strahl immer noch auf die ganze Länge der Überfallkante gleichzeitig vorfindet, erst plötzlich in den unten benetzten übergeht und weil hier überhaupt das Phänomen des Abflusses viel sanfter erscheint.

Ein weiterer Grund dafür, daß Boileaus Koeffizienten nicht sehr zuverlässig sind, liegt in der Art, wie er die Überfallhöhen gemessen hat. Diese Messung bewirkte Boileau mittelst eines oben und unten offenen Rohres, das permanent direkt vor der Überfallwand aufgestellt war; die Höhe der Wassersäule in dieser Röhre wurde durch Einstellung mit Hilfe eines Schlittens bestimmt und abgelesen. Die auf solche Weise erhobenen Überfallhöhen sind infolge des hydraulischen Druckes, der im Wehrwinkel vor der Wand herrscht, zu groß. Boileau¹⁾ selbst bestimmte sogar experimentell, daß die so ermittelten Überfallhöhen bei

einer Wehrhöhe von 206 mm im Mittel um 2,6% $\left(\frac{1}{38}\right)$,

„ „ „ 328 „ „ „ „ 1,5% $\left(\frac{1}{67}\right)$,

„ „ „ 609 „ „ „ „ 0,4% $\left(\frac{1}{250}\right)$

¹⁾ Boileau, a. a. O., p. 60—61.

zu groß erscheinen gegenüber den durch Nivellement bestimmten. Die Differenzen unterliegen Schwankungen je nach der Größe der Zuflußgeschwindigkeit. Versuche der Ingenieure Fteley und Stearns¹⁾ haben das Verhalten der Wassersäule in einem derartigen Rohre noch deutlicher gezeigt.

Der vorher erwähnte Mangel an Lüftung läßt den Koeffizienten zu groß erscheinen, die eben besprochene unrichtige Erhebung der Überfallhöhe läßt ihn zu klein erscheinen. Wie stark und in welchem Sinne diese beiden Fehler ins Gewicht fallen, läßt sich nachträglich natürlich nicht mehr bestimmen. Da bekanntlich bei all diesen Fällen die Lüftung eine entscheidende Rolle spielt und einen starken Einfluß auf den Koeffizienten besitzt, wie vielfache Versuche darge-
tan haben, so ist mit großer Wahrscheinlichkeit anzunehmen, daß sie die Koeffizienten stärker beeinflusst hat als die unrichtig bestimmte Überfallhöhe. Man wird daher den Schluß zulassen dürfen, daß auch bei schiefen Überfällen von einer Rinnenbreite von etwa 50 cm an, wenigstens innerhalb der bei den besprochenen Versuchen vorgekommenen Überfallhöhen, der Einfluß dieser Breite aufhört, da die Boileauschen Versuche sich auf Rinnenbreiten von nahezu 1 m beziehen. Es erklärt sich nun auch, weshalb die Versuche von Boileau an normalen Überfällen besser mit allen anderen übereinstimmen. Bei kleinen Überfallbreiten, wie bei den Nr. 18—20 Tabelle 4, muß die Einstellung des Rohres vor die Überfallwand natürlich großen Einfluß ausüben; daher liegen diese Punkte in der Fig. 6 Taf. 3 auch abseits. Bei allen anderen, in dieser Figur verzeichneten Boileauschen Versuchen war die Rinnenbreite bedeutend größer, so daß hier der Einfluß des Rohres nicht so groß sein konnte; dazu kommt noch, wie schon erwähnt, der hier etwas geringere Einfluß der ungenügenden Lüftung. Jedenfalls wären hier ergänzende Versuche mit größeren Rinnenbreiten nötig; dieselben lassen sich aber nur ausführen, wenn eine genügend große sekundliche Wassermenge zur Verfügung steht, die auch bei schiefen Überfällen mit ihren langen Überfallkanten eine entsprechend große Überfallhöhe erzeugen läßt.

Es sei hier noch darauf hingewiesen, auf welcher eigentümlichen Weise Boileau die Koeffizienten für seine Versuche berechnete. Die zur Messung der Überfallhöhe eingetauchte Röhre versperrt einen

¹⁾ Fteley und Stearns, a. a. O.

Teil der Ausflußöffnung und erzeugt störende stehende Wellen. Zur Berechnung von μ führt nun deswegen Boileau¹⁾ nicht die faktische Länge der Überfallkante ein, sondern eine korrigierte. Diese Korrektion wurde folgendermaßen bestimmt: Es wurden direkte Wassermengenmessungen ausgeführt bei gleichen Überfallhöhen einmal mit und einmal ohne Vorhandensein des Wasserstandsrohres und dann eine Länge der Überfallkante berechnet, welche im ersteren Falle einzuführen wäre, damit sich die gleiche sekundliche Wassermenge rechnerisch ergeben würde, als sie es im zweiten Falle wirklich war. Für eine Röhre von 15 mm äußerem und 13 mm innerem Durchmesser (die untere Öffnung war zum Schutze gegen Schwankungen der Wassersäule auf 1 mm Durchmesser verengt) wurde so eine Korrektion von 21 mm berechnet; für eine andere von 10 mm äußerem Durchmesser betrug sie 13 mm. Um dieses Maß von 21 bzw. 13 mm wird nun stets die wirkliche Länge der Überfallkante vermindert und damit μ berechnet. In den Tabellen 4 und 15, die Boileaus Versuche wiedergeben, ist jedesmal diese korrigierte Länge (*largeur réduite* aus Boileaus Tabellen) mit angegeben. Diese Art der Berechnung von μ ist natürlich keineswegs genau. Aus einer Bemerkung Seite 51 seines Werkes geht hervor, daß das besprochene Rohr an der Überfallwand aber in genügendem Abstände von der Seitenwand der Rinne aufgestellt war. An die Rinnenwand selbst angelehnt, ergaben sich die Überfallhöhen etwas zu klein. Durch Einbringung dieses vor der Überfallkante stehenden Rohres wird nun ganz unnötigerweise seitliche Kontraktion hervorgerufen, die zusammen mit dem Hindernis in Gestalt des Rohrkörpers selbst die Überfallhöhe beeinflussen muß. Es ist klar, daß der Koeffizient μ nur mit Hilfe der faktischen „wirksamen“ Länge der Überfallkante zu berechnen ist und nicht mittelst einer fingierten, wie es bei den Boileauschen Rechnungen der Fall ist. Die in den Tabellen 4 und 15 angeführten Versuche von Boileau wurden daher alle neu berechnet und diese Ergebnisse sind dort aufgeführt.

Aus dem Gesagten geht jedenfalls hervor, daß die Zuverlässigkeit der Boileauschen Versuche an schiefen Überfällen nicht sehr groß ist. Es ist dies um so bedauerlicher, als bisher keine Versuche mit solchen Überfällen veröffentlicht wurden, die zum Vergleich hätten herangezogen werden können.

¹⁾ Boileau, a. a. O., p. 84.

δ) Die Zusammenfassung der Ergebnisse.

Im folgenden soll nun gezeigt werden, wie man zu einem zusammenfassenden Resultat der vorbesprochenen Versuchsergebnisse auf analytischem Wege gelangen kann. Die Methode der kleinsten Quadrate leistet hierbei eine sehr schätzenswerte und bequeme Hilfe bei Bestimmung der unbekanntten Konstanten jener Funktionen, durch welche das Gesetz der Änderung des Ausflußkoeffizienten mit der Überfallhöhe dargestellt werden soll. Wenn die Art dieses Gesetzes nicht auf rein mathematischem Wege hergeleitet werden kann oder wenn von vornherein keine Annahmen über dieses Gesetz gemacht werden können, so muß in solchen und ähnlichen Fällen die eine der beiden Variablen (hier z. B. μ_0) als Funktion der anderen (hier h) dargestellt werden derart, daß dieselbe aus den steigenden Potenzen dieser letzteren gebildet wird. Man hätte also hier den Ausdruck:

$$\mu_0 = a + a_1 h + a_2 \cdot h^2 + a_3 \cdot h^3 + \dots,$$

mit den unbekanntten Konstanten a, a_1, a_2, a_3, \dots .

Es wird sich nun bei sehr vielen Fragen in der Ingenieurpraxis ergeben, und es war auch hier der Fall, daß die fragliche Funktion die Sachlage nur dann genügend genau wiedergibt, wenn ziemlich viel Glieder der obigen Summe mitgeführt werden; damit steigt aber die reine Rechenarbeit zur Bestimmung der unbekanntten Konstanten ganz ungeheuer. In solchen Fällen, solange es die anzustrebende Genauigkeit gestattet, ist es ratsam, über die Gestalt der Funktion von vornherein eine bestimmte Annahme zu machen, wodurch die Zahlenrechnungen ganz bedeutend gekürzt werden.

Im vorliegenden Falle z. B. läßt sich leicht erkennen, daß das Gesetz der Änderung von μ_0 mit h mit genügender Schärfe als das der Hyperbel angesehen werden kann. Beim normalen Überfall wird schon von Braschmann, v. Wex, Bazin, Frese und anderen (siehe erstes Kapitel dieses Abschnittes Absatz a) direkt das Gesetz der gleichseitigen Hyperbel angenommen. Für die Koeffizienten der schiefen Überfälle läßt sich ebenfalls als Änderungsgesetz mit genügender Schärfe das der Hyperbel ansehen, wie auch ein Blick auf Taf. 3 vermuten läßt. Für kleine Überfallhöhen nähern sich die Beobachtungspunkte mehr oder weniger einer Parallelen zur Achse der μ_0 . Daher ist die Annahme gerechtfertigt, Hyperbeln zu setzen, deren eine Asymptote jeweils der μ_0 -Achse parallel ist. Die allgemeine Gestalt der Gleichung der ungleichseitigen Hyperbel mit

einer zur $\mu_0 =$ Achse parallelen Asymptote ist im Koordinatensystem μ_0, h :

$$\mu_0 = A + \frac{B}{h + C} + h \cdot D,$$

worin A, B, C und D vorläufig unbekannte Konstanten sind, μ_0 Abszissen, h Ordinaten. Die Zahl der Konstanten ist nun hier noch groß und bedingt deren Bestimmung noch eine ausgedehnte Zahlenrechnung, besonders, wenn sehr viele Beobachtungspunkte vorliegen; weiter ist diese Form als Summe dreier Glieder für den praktischen Gebrauch recht unhandlich. Es fragt sich daher, ob nicht irgendwelche Vereinfachungen eintreten können. Von den obigen Konstanten bedeutet A den Abstand des Schnittpunktes der schiefen Asymptote mit der Abszissenachse der μ_0 vom Ursprung des Koordinatensystems, B die Summe der Quadrate der Hyperbelhalbachsen multipliziert mit dem vierten Teil des Sinus jenes Winkels, den die positive Richtung der schiefen Asymptote mit der negativen Richtung der μ_0 -Achse oder der zweiten Asymptote bildet, C den Abstand der zur μ_0 -Achse parallelen Asymptote von dieser Achse selbst und endlich D die Cotangente des bei B genannten Winkels.

Von diesen vier Konstanten der Gleichung können C oder D unterdrückt werden. Vernachlässigt man C , so erhält man eine Schar ungleichseitiger Hyperbeln, die sämtlich die Achse der μ_0 zur einen Asymptote haben. Unterdrückt man D , so erhält man ein System gleichseitiger Hyperbeln. Dabei bleibt im ersteren Falle die Unbequemlichkeit der drei Summenglieder bestehen. Eine überschlägliche Rechnung ergab, daß die Hyperbeln des zweiten Systems sich den einzelnen Beobachtungen besser anschließen als die des ersteren. Es ergab sich, daß bei sämtlichen Überfällen das Gesetz der Änderung von μ_0 mit h durch dasjenige der gleichseitigen Hyperbel mit vollkommen genügender Schärfe dargestellt wird. Da nun weiter mit großer Wahrscheinlichkeit anzunehmen ist, daß bei großen Überfallhöhen auch bei den ganz schiefen Überfällen der Koeffizient μ_0 sich jeweils einem bestimmten Festwerte nähern wird, beim normalen Überfall z. B. liegt dieser Festwert schon beinahe innerhalb der bei den ausgeführten Versuchen erreichten Grenzen für die Überfallhöhen, so ist anzunehmen, daß schon der Natur der Sache wegen das Gesetz der gleichseitigen Hyperbel besser entsprechen wird als das der ungleichseitigen. Es wird demnach die Form festgesetzt:

$$\mu_0 = a + \frac{b}{h + c} \quad (17)$$

Es möge hier bemerkt werden, daß natürlicherweise durch eine solche mehr oder weniger willkürliche Annahme eines bestimmten Gesetzes der Natur Gewalt angetan wird; solche Festsetzungen sind indessen zur Vereinfachung der ganzen Behandlung überall dort angezeigt, wo eine große Genauigkeit nicht erreicht zu werden braucht oder infolge der Natur der Messungen nicht erreicht werden kann. Solange aber die Fehler die durch ungenügende Annahme der Funktionsform hervorgerufen werden, kleiner bleiben als direkte Beobachtungsfehler, solange können gegen derartige Festsetzungen keine Bedenken erhoben werden. Man hat nur immer stets die Grenzen der Gültigkeit im Auge zu behalten und sich streng vor Extrapolation zu hüten, denn alle auf solche Weise aufgestellten Formeln haben nur Wert als Interpolationsformeln.

Die Konstanten der vorgesetzten Gleichung können nun am zuverlässigsten mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden, also bekanntlich derart, daß die Summe der Fehlerquadrate zu einem Minimum wird. Die erwähnte Methode sollte bei ähnlichen Rechnungen niemals außer acht gelassen werden. Wenn auch wie bei den vorliegenden Versuchen die erreichte Genauigkeit keine allzu große ist und es daher auch unrichtig wäre, eine zu feine Ausgleichung vornehmen zu wollen, so ist doch auch in solchen Fällen die Methode der kleinsten Quadrate empfehlenswerter als irgend eine andere Ausgleichungsart, denn sie verdient unter allen Umständen das größere Vertrauen; man kann sich ja gegebenenfalls mit einer ersten Annäherung begnügen.

Die vorstehende Gleichung (17) ist in Bezug auf die Konstanten nicht linear. Zur Bestimmung dieser letzteren führt man möglichst genaue Näherungswerte ein und berechnet sich nach den Grundsätzen der Methode der kleinsten Quadrate¹⁾ hiezu wahrscheinliche Verbesserungen. Auf diese Weise ergaben sich für die Koeffizienten μ_0 die folgenden Gleichungen (die Mitteilung der Zwischenergebnisse der Zahlenrechnung würde im vorliegenden den Zusammenhang stören und mögen daher fortgelassen werden):

¹⁾ Siehe auch Helmert, Ausgleichsrechnung etc. Leipzig 1872, S. 131.

Nr.	Wehrwinkel ε	Breite Rinne	Wehrwinkel ε	Schmale Rinne
1	90° 0'	$\mu_0 = 0,616 + \frac{0,49}{h - 8,3}$	90° 0'	$\mu_0 = 0,616 + \frac{0,49}{h - 8,3}$
2	74° 54'	$\mu_0 = 0,600 + \frac{0,86}{h - 5,1}$	75° 17'	$\mu_0 = 0,600 + \frac{0,86}{h - 5,1}$
3	—	—	59° 45'	$\mu_0 = 0,555 + \frac{3,26}{h + 11,0}$
4	44° 39'	$\mu_0 = 0,526 + \frac{5,32}{h + 20,4}$	44° 10'	$\mu_0 = 0,476 + \frac{8,72}{h + 27,9}$
5	—	—	30° 26'	$\mu_0 = 0,351 + \frac{21,66}{h + 52,8}$
6	14° 56'	$\mu_0 = 0,227 + \frac{33,80}{h + 62,6}$	14° 23'	$\mu_0 = 0,111 + \frac{52,13}{h + 79,8}$

(18)

In sämtliche Gleichungen ist h in mm einzusetzen. Beim normalen Überfall Nr. 1 wurden alle Beobachtungen (Fig. 6 Taf. 3 und Tabelle 2, 3 und 5) für die verschiedenen Breiten als gleichwertig angesehen. Bei Nr. 2 ergab sich, daß auch hier in beiden Fällen der breiten und schmalen Rinne eine Gleichung angesetzt werden konnte. Wie schon früher erwähnt, mußten die Nr. 3 und 5 vorstehender Zusammenstellung für die breite Rinne wegen vorgekommener Unregelmäßigkeiten ausscheiden.

Die in den Figuren auf Taf. 3 eingezeichneten ausgezogenen Kurven sind die graphischen Darstellungen obiger Hyperbelgleichungen, und erkennt man, daß sie sich den Beobachtungen auch bei kleinen Überfallhöhen gut anpassen. Auf Taf. 4 b sind dieselben auf den gleichen Koordinatenursprung bezogen. Im unteren Teile weichen die Linienzüge etwas voneinander ab; es liegt dies daran, daß die Messungen bei den sehr kleinen Überfallhöhen überhaupt ungenauer sind und hier nicht so gut übereinstimmen. Die in diese Figur eingezeichneten Kurvenpunkte bestimmen Linien gleicher Wassermengen pro Sekunde; es wird durch dieselben ersichtlich gemacht, wie bei ein und derselben Abflußmenge je nach der Wehrstellung sowohl Überfallhöhe als Abflußkoeffizient abnehmen. Die erwähnten Punkte gehören jeweils Abflußmengen in Abständen von 5 zu 5 dm³/sec. an.

Es handelt sich nun weiter darum, die vorstehenden Gleichungen zu vereinigen, um eine einzige Interpolationsformel zu erhalten, die

die Berechnung der Koeffizienten für Zwischenwerte der Wehrstellungen gestattet. Zu dem Ende sind die Werte der einzelnen Konstanten a , b und c in ihrer Abhängigkeit von der Wehrstellung, also z. B. vom Sinus des Winkels ε , in Fig. 1 Taf. 5 aufgezeichnet. Man erkennt aus derselben, daß von den vorgenannten Konstanten jede für sich ein ganz bestimmtes Gesetz verfolgt. Durch Aufstellung der Gleichungen für diese Änderungsgesetze ließe sich erreichen, für die ganze Kurvenschar eine einzige Gleichung aufzustellen. Die entsprechenden Kurven müssen sich jeweils auf der Ordinate $\sin 90^\circ = 1,0$ schneiden, um für die beiden Rinnenbreiten für den normalen Überfall nur je eine Gleichungskonstante zu erhalten. Die in Fig. 1 Taf. 5 eingezeichneten Kurven entsprechen den Gleichungen:

Konstante	Breite Rinne	Schmale Rinne
a	$\sin \varepsilon = 4,695 a^2 - 2,043 a + 0,480$ oder $a = 0,218 + \sqrt{\frac{\sin \varepsilon}{4,695} - 0,055}$	$\sin \varepsilon = 1,692 a^2 + 0,259 a + 92,058$ oder $a = -0,077 + \sqrt{\frac{\sin \varepsilon}{1,692} - 0,113}$
b	$b = 65,60 \sin^2 \varepsilon - 127,03 \sin \varepsilon + 62,18$	$b = 93,65 \sin^2 \varepsilon - 184,96 \sin \varepsilon + 92,06$
c	$c = 88,1 - 95,9 \sin \varepsilon$	$c = 110,9 - 118,7 \sin \varepsilon$

(19)

Die in Fig. 1 Taf. 5 für die Konstante a in breiter Rinne eingezeichnete gestrichelte Kurve stellt lediglich eine graphische Ausgleichslinie dar. Ständen weiterhin genügend viele Versuche bei mehreren Rinnenbreiten zur Verfügung, so ließen sich dann wiederum diese Gleichungen auf ähnliche Weise vereinigen, und würde sich so zum Schluß eine allgemeine Formel ergeben, die die Abhängigkeit des Koeffizienten von der Überfallhöhe, der Wehrstellung und der Rinnenbreite in sich vereinigt.

Dies Verfahren scheidet hier an der ungenügenden Zahl von Beobachtungen. Berechnet man z. B. aus den vorstehenden Gleichungen (19) wieder rückwärts, den jeweiligen Wehrstellungen entsprechend, die Konstanten a , b und c der Gleichungen (18) für die Koeffizienten μ_0 und zeichnet diese Kurven gemeinsam auf, so erkennt man, daß sie mit den ursprünglichen Linienzügen schlecht übereinstimmen. Sie werden erst bei Überfallhöhen von etwa 30—80 mm an einigermaßen brauchbar. In ihren unteren Teilen überschneiden sich die Kurven sogar teilweise, was nicht der Fall

sein darf. Der Grund hiefür liegt nicht etwa an den ursprünglichen Einzelbeobachtungen selbst, sondern lediglich daran, daß Beobachtungen an zu wenig Wehrstellungen vorliegen, mithin die Zahl der überschüssigen Beobachtungen zur Aufstellung der Gleichungen (19) zu gering ist und daher eine genügende Ausgleichung nicht erreicht werden kann. Beachtet man, daß die Überfallhöhen h , die Koeffizienten μ_0 und der Sinus des Wehrwinkels ε im räumlichen Koordinatensystem $h, \mu_0, \sin \varepsilon$ eine Fläche bestimmen und daß die Schnittkurven dieser Fläche mit Ebenen senkrecht zur μ_0 -Achse Kurven vierten Grades vorstellen, zu deren befriedigenden Festlegung stets eine große Anzahl von Punkten nötig ist, so wird das soeben besprochene Verhalten der Gleichungskonstanten a, b und c bei der rückwärtigen Rechnung erklärlich.

e) Vergleichende Untersuchung.

Um nun trotzdem zu einem für die Praxis einigermaßen verwertbaren Resultat zu gelangen, sollen jetzt die Koeffizienten μ_0 der schiefen Überfälle direkt verglichen werden mit denen des normalen Überfalles. Bezeichnet:

μ_0^1 den Koeffizienten für den normalen Überfall,

μ_0^s denjenigen für irgend einen schiefen aber bei der gleichen Überfallhöhe,

so ist:

$$\psi = \frac{\mu_0^s}{\mu_0^1}$$

diejenige Zahl, mit der μ_0^1 zu multiplizieren ist, um den Koeffizienten μ_0^s des entsprechenden schiefen Überfalles zu erhalten. Da nämlich, wie schon gezeigt worden ist, der Koeffizient des normalen Überfalles unabhängig ist von der Breite der Rinne, so kann man die an einem schiefen Überfall abströmende sekundliche Wassermenge dadurch bestimmen, daß man einen normalen Überfall von gleicher Länge wie der schiefe annimmt; den hierbei anzuwendenden Koeffizienten des vorgesezten normalen Überfalles hat man dann aber noch mit einer gewissen Verhältniszahl, eben der oben abgeleiteten Zahl ψ , zu multiplizieren, die in jedem Falle kleiner als 1 ist. Diese Verhältniszahlen waren mit Hilfe der für μ_0 aufgestellten Gleichungen (18) leicht zu ermitteln und sind sie in Fig. 2 Taf. 5 graphisch

abgebildet. In ihren unteren Teilen sind die Linienzüge auf graphischem Wege korrigiert worden, um die schon im vorhergehenden Absatz besprochenen Unregelmäßigkeiten einigermaßen auszugleichen. Die Linien nehmen hier meist den für die eine Kurve gestrichelt angegebenen Verlauf. Die Kurven sind solche dritten Grades. Richtig ist natürlich, daß mit abnehmender Überfallhöhe bis $h = 0$ der Wert von ψ sich dem Werte $\psi = 1,0$ nähert.

Man erkennt bei Betrachtung der genannten Figur, daß ψ keineswegs konstant ist, sondern großen Änderungen mit Überfallhöhe und Wehrstellung unterworfen ist. Boileau¹⁾ gibt für ψ berechnet mittelst seiner Koeffizienten μ für die einfache Dubuatsche Abflußformel bei einer Wehrstellung von $\varepsilon = 45$ Grad den Wert $\psi = 0,942$, bei einer solchen von $\varepsilon = 25$ Grad den Wert $\psi = 0,911$ an. Diese Zahlenwerte sind es, die in den meisten Lehrbüchern²⁾ der Hydraulik und des Wasserbaues wiedergegeben werden. Die Angabe solcher konstanter Mittelwerte ist aber gar nicht möglich; sie können nur einer ganz rohen Annäherung genügen. Eine genaue Aufstellung der Gleichungen der Kurven von ψ ist ihren Grades wegen untunlich. Jedenfalls wird man sich der Wirklichkeit mit größerer Annäherung anschließen als durch Angabe konstanter Mittelwerte, wenn man an Stelle der mehr oder weniger geschweiften Kurven angemessen gelegte Gerade einführt, die alle durch den Punkt $\psi = 1,0$; $h = 0$ gehen, wie es die Fig. 2 Taf. 5 angibt. Bei sehr kleinen Überfallhöhen kann man eventuell dann ψ immer noch vernachlässigen. Man sieht, daß mit Ausnahme der ganz schiefen Überfälle die Unterschiede der Geraden gegen die ursprünglichen Kurven zwar nicht verschwindend, aber doch immerhin so klein sind, daß sie mit der in der Praxis nötigen Genauigkeit vernachlässigt werden können. Diese Vernachlässigung ist im Vergleich zu den Ungenauigkeiten, die bei Annahme konstanter Mittelwerte begangen werden, vollständig verschwindend. Die Gleichungen der Geraden ergeben sich hier in der Form:

$$h = c(1 - \psi) \tag{20}$$

zu:

1) Boileau, a. a. O., p. 143.

2) Siehe z. B. Meiszner, Die Hydraulik von Dr. Hederich, Jena 1894, S. 277, 2. Aufl.; Deutsch, Der Wasserbau. Leipzig 1906, S. 141.

Nr.	Wehrwinkel ε	Breite Rinne	Wehrwinkel ε	Schmale Rinne
1	74° 54'	$h = 6579,0 (1 - \psi)$	75° 17'	$h = 6579,0 (1 - \psi)$
2	—	—	59° 45'	$h = 1923,1 (1 - \psi)$
3	44° 39'	$h = 1250,0 (1 - \psi)$	44° 10'	$h = 892,9 (1 - \psi)$
4	—	—	30° 26'	$h = 531,9 (1 - \psi)$
5	14° 56'	$h = 362,3 (1 - \psi)$	14° 23'	$h = 304,9 (1 - \psi)$

(21)

In Fig. 3 Taf. 5 sind die Werte der Gleichungskonstanten ϱ der obigen Gleichung (20), wie sie sich aus den Gleichungen (21) ergeben, in ihrer Abhängigkeit von der Wehrstellung, hier vom Sinus des Wehrwinkels ε , aufgezeichnet; durch sie lassen sich leicht regelrechte Linienzüge ziehen. Es hat keinen besonderen Wert, die Änderung von ϱ mit $\sin \varepsilon$ hier analytisch festzulegen, denn ϱ könnte man leicht innerhalb größerer Grenzen variieren lassen. Mit Hilfe der in Fig. 3 Taf. 5 eingezeichneten Linien läßt sich für die Konstante ϱ der Gleichung (20) folgende Interpolationstabelle¹⁾ angeben:

Wehrwinkel ε in Grad	Konstante ϱ für breite Rinne	Konstante ϱ für schmale Rinne
15	362	305
20	475	390
25	595	455
30	700	532
35	840	610
40	1025	740
45	1250	893
50	1510	1175
55	1795	1480
60	2275	1923
65	2980	2625
70	4125	3940
75	6579	6579

Nimmt man, wie gelegentlich der Besprechung der Boileau-schen Versuche gesagt worden ist, an, daß Versuche mit größeren Rinnenbreiten als den vom Verfasser hier angewandten keine abweichenden Resultate zutage gefördert hätten, so können die in

¹⁾ Vgl. die einschlägige Bemerkung des Nachtrags.

der Kolonne für die breite Rinne erscheinenden Gleichungskonstanten ϱ auch für große Breiten der Gerinne angenommen werden.

Unter dem ausdrücklichen Vorbehalt, daß die vorstehende Tabelle nur eine ganz grobe Annäherung an die Wirklichkeit darstellt, daß sie also lediglich den Wert einer Faustregel besitzt, unter diesem Vorbehalte kann sie auch zur Anwendung in der Praxis dienen. Hiefür erhält dann die Gleichung (20) die Gestalt:

$$250 \cdot \frac{h}{p} = \varrho \cdot (1 - \psi), \quad (22)$$

worin $\frac{h}{p}$ das Verhältnis von Überfallhöhe zu Wehrhöhe vorstellt, ϱ einen aus der ersten Kolonne der vorstehenden Tabelle zu entnehmenden Wert. $\frac{h}{p}$ dürfte höchstens 0,62 werden und bei sehr schiefen Überfällen entsprechend niedriger sein.

Die beiden letzten Figuren 4 und 5 Taf. 5 stellen im Koordinatensystem ψ , $\sin \varepsilon$ (ψ als Abszissen, $\sin \varepsilon$ als Ordinaten) Linien gleicher Überfallhöhen dar. Sie sind aus Fig. 2 Taf. 5 konstruiert für die Versuche in schmalen und breiter Rinne. Sämtliche Linien, die ungefähr hyperbelartigen Charakter besitzen, vereinigen sich im Punkte $\psi = 1,0$, $\sin \varepsilon = 0,0$. Im räumlichen Koordinatensystem h , ψ , $\sin \varepsilon$ stellen sie Schnitte von zur Achse der h senkrechten Ebenen mit jener Fläche dar, die durch die Kurven der Fig. 2 Taf. 5 bestimmt wird. Die gegenseitigen Abstände der Linien gleicher Überfallhöhen nehmen mit wachsender Überfallhöhe ab. Die Fig. 4 und 5 Taf. 5 können ebenfalls bei Beachtung ihrer Gültigkeitsgrenzen für die Praxis zu Interpolationszwecken dienen. Ihr Gebrauch ist bequemer als der der soeben mitgeteilten Tabelle.

d) Die Berechnungsergebnisse nach den Formeln von v. Wex.

Wie bereits im ersten Kapitel dieses Abschnittes ausführlich dargelegt, hat v. Wex Formeln aufgestellt, die insbesondere die Grundrißgestalt des Wehres berücksichtigen, also eigens für schiefe Überfälle bestimmt sind. Die betreffenden Formeln sind auf Seite 56 wiedergegeben. Es ist nun interessant, zu erfahren, welchen Änderungen durch Schiefstellung des Wehres der für diese Formeln berechnete Koeffizient unterworfen ist.

Zu dem Ende sind sämtliche Versuche nach diesen v. Wexschen Formeln berechnet worden. Die dafür erhaltenen Koeffizienten sind in den Tabellen Nr. 2—16 neben dem Koeffizienten μ_0 aufgeführt und in den Figuren 1—6 Taf. 6 graphisch dargestellt. Die Versuche wurden, in Folge der bei Berechnung des Koeffizienten μ_0 gemachten Erfahrungen lediglich graphisch ausgeglichen, da es auch hier aus schon erwähnten Gründen nicht möglich gewesen wäre, eine befriedigende zusammenfassende Interpolationsformel zu erhalten. Die in den Figuren der Taf. 6 eingezeichneten Linien sind daher lediglich als Ausgleichslinien zu betrachten, denen eine analytische Charakteristik nicht zukommt. Auf Taf. 4 c sind dieselben auf den gleichen Koordinatenursprungspunkt bezogen.

In Fig. 6 Taf. 6,¹⁾ die die Versuche am normalen Überfall wiedergibt, sind auch die entsprechend umgerechneten Versuchsergebnisse von Hansen, sowie einige Boileausche Versuche wiedergegeben. Die gute Übereinstimmung mit den vom Verfasser ausgeführten Versuchen tritt auch hier wieder in Erscheinung. Des weiteren sind in Fig. 6 Taf. 6 Versuche eingetragen, die von den Ingenieuren Fteley und Stearns am Sudbury ausgeführt worden sind. Die Zahlenwerte sind dem Werke von v. Wex²⁾ entnommen und in Tabelle 16 zusammengestellt unter Fortlassung der Versuche bei größeren Überfallhöhen als 200,0 mm. Die Versuche beziehen sich auf Rinnenbreiten von 1,525 m und 5,790 m, sowie Wehrhöhen von 1,083 m, 1,996 m und 0,966 m, wie auch in Tabelle 16 bemerkt. Aus dem vorgenannten Graphikon (Fig. 6 Taf. 6) ist zu ersehen, daß die Versuche von Fteley und Stearns bei größeren Überfallhöhen mit den übrigen dort verzeichneten Versuchen verhältnismäßig befriedigende Übereinstimmung ergeben. Die Koeffizienten von Fteley und Stearns bei kleineren Überfallhöhen hingegen sind durchweg zu groß. Fteley und Stearns haben ihre Versuche mit großer Sorgfalt und Gewissenhaftigkeit ausgeführt, doch ist es immerhin wahrscheinlich, daß die auftretenden Differenzen im Versuchsverfahren ihren Grund haben. Die Überfallhöhen wurden nämlich bestimmt durch Messung der Wasserstandshöhen einmal in einem Rohre, das sechs Fuß engl. vor dem Wehre stand und das andere Mal in einem solchen, das direkt vor der Überfallwand selbst aufgestellt war. Von

¹⁾ Die Bedeutung der gestrichelten Kurve geht aus dem Nachtrage hervor.

²⁾ v. Wex, a. a. O., Tabelle Nr. 2.

den beiden so erhobenen Überfallhöhen wurde das Mittel als maßgebende Überfallhöhe angesehen und in die veröffentlichten Tabellen eingetragen.¹⁾ Es liegt daher nahe, diese unteren Beobachtungswerte nicht zu berücksichtigen.

Versuche von Francis²⁾ konnten der großen Überfallhöhen wegen leider nicht zum Vergleich herangezogen werden.

Der Koeffizient des normalen Wehres scheint von Überfallhöhen von etwa 100 mm an konstant zu bleiben und zwar gleich 0,60.

In den Tabellen 2—15 befindet sich neben der Kolonne der v. Wexschen Koeffizienten eine, die die Differenzen dieser Koeffizienten gegen diejenigen μ_0 angibt, welche Differenzen weiterhin in Prozenten von μ_0 angegeben sind. Diese Differenzen sind im allgemeinen sowohl im positiven wie im negativen Sinne recht beträchtlich und betragen bis zu 14,5% beim schiefsten untersuchten Überfall der Tabelle 13. Die Differenzen sind natürlich veränderlich mit der Überfallhöhe, sie variieren aber auch mit der Wehrstellung. So sind die Differenzen negativ beim normalen Überfall Tabelle 2 und 3 (bis zu 2,9% und 3,4%), beim Überfall mit $\varepsilon = 75^\circ 17'$ Tabelle 7 (2,5%) in schmaler Rinne, und mit $\varepsilon = 74^\circ 54'$ Tabelle 8 (3,1%) in breiter Rinne, sowie beim Überfall mit $\varepsilon = 59^\circ 45'$ Tabelle 9 (1,8%) in schmaler Rinne. Beim Überfall mit $\varepsilon = 44^\circ 39'$ in breiter Rinne sind die Differenzen noch durchweg negativ Tabelle 11 (erreichen noch 1,5%), aber schon beim annähernd gleichgestellten Überfall in schmaler Rinne Tabelle 10 mit $\varepsilon = 44^\circ 10'$ beginnen sie positiv zu werden, um dann weiterhin durchweg positiv zu bleiben und größere Beträge anzunehmen. Einzelne auftretende Schwankungen im Gange der Differenzen rühren von Abrundungen im Laufe der zahlenmäßigen Auswertung her. Daß die Differenzen bei gleichgestellten Überfällen zwischen breiter und schmaler Rinne einige Unterschiede aufweisen, hat seinen Grund darin, daß bei Anwendung der v. Wexschen Formeln bei der schmalen Rinne die Trapezoidalität des Querschnitts vernachlässigt wurde, da hierfür die v. Wexschen Formeln zu umständlich werden. Es wurde mit der wirklichen Überfalllänge gerechnet. Am meisten interessieren ja schließlich auch die Resultate der Versuche in der breiten Rinne.

¹⁾ Fteley und Stearns, Transact. of the Amer. Soc. of Civ. Eng. Vol. 12. 1883, p. 80.

²⁾ Francis, Lowell Hydr. Exp. etc. Boston 1855.

Die Kurven, welche die Änderung des Koeffizienten mit der Überfallhöhe darstellen, liegen im Falle von v. Wex näher aneinander als im Falle der Koeffizienten μ_0 . Es ist dies auch deutlich beim Vergleich der Taf. 4 b mit 4 c erkennbar. Der von den beiden äußersten Kurven eingeschlossene Flächenraum ist auf Taf. 4 c bedeutend kleiner als auf Taf. 4 b. Es ist dies teilweise darauf zurückzuführen, daß in den v. Wexschen Formeln die Zuflußgeschwindigkeit nur in ihrer zum Wehr senkrechten Komponente Berücksichtigung findet, sich deshalb auch größere Koeffizienten herausrechnen. Immerhin zeigen auch die v. Wexschen Koeffizienten ganz bedeutende und nicht zu vernachlässigende Abnahmen mit der Schiefstellung des Wehres.

In Fig. 7 Taf. 6 sind weiterhin noch die Verhältnisse der Koeffizienten für einen schiefen Überfall zu denen des normalen Überfalles bei gleicher Überfallhöhe, also die schon im vorhergehenden Absatz angeführten Verhältniszahlen ψ , in ihrer Abhängigkeit von der Überfallhöhe h , aufgezeichnet in Gestalt der im Punkte $\psi = 1,0$; $h = 0$ zusammenlaufenden Linienzüge. Die Verhältniszahlen ψ sind durchweg kleiner als für die Koeffizienten μ_0 . Es folgt daher, daß beim Gebrauch der Formeln von v. Wex der hiebei für den normalen Überfall anzuwendende Koeffizient mit einer geringeren Verhältniszahl ψ zu multiplizieren ist, um den für einen schiefen Überfall gültigen Koeffizienten zu erhalten (oder auch die sekundliche Abflußmenge) als wie beim Gebrauch der Formel (8). Es würde dies auch bestehen bleiben, wenn man in der Formel (8) nur die zur Überfallkante normale Komponente der Zuflußgeschwindigkeit berücksichtigt hätte. Die Formel von v. Wex ist daher der Formel (8) überlegen, insofern die Fehler in der Bestimmung von ψ weniger ins Gewicht fallen.

e) Berechnungsergebnisse nach den Formeln von Weisbach.¹⁾

Endlich soll noch untersucht werden, wie sich die Koeffizienten verhalten, welche die Formeln von Weisbach liefern, also die Gleichung (5) für die breite und Gleichung (10) für die schmale Rinne.

Schon im ersten Kapitel dieses Abschnittes Absatz b wurde gelegentlich der Ableitung der dortigen Formeln darauf hingewiesen, daß es nötig wurde, die Versuche auch nach den strengen Formeln von Weisbach zu berechnen, um Rechenschaft über die dort ge-

¹⁾ Vgl. hiezu den Nachtrag.

machten Vernachlässigungen geben zu können. Es ist dort schon auf die Tabellen 2—15 hingewiesen, die in der betreffenden Spalte den Koeffizienten μ_0 nach den eben erwähnten Weisbachschen Formeln führen; in der Spalte Δ_{Weisbach} sind die Differenzen gegen die Koeffizienten μ_0 nach den Bazinschen Formeln in Prozenten der letzteren angegeben. Diese Differenzen sind durchweg positiv und wachsen auch hier mit der Überfallhöhe. Was ihr Wachstum mit der Neigung des Überfalles zur Rinnenachse anbelangt, so ist dasselbe anfangs gering und nimmt erst bei den sehr schiefen Überfällen beträchtlicher zu und überschreitet hier, aber auch erst bei den größeren Überfallhöhen, 1,0 ‰. Da diese sehr schiefen Überfälle in der Praxis nur ganz selten oder gar nicht zur Ausführung kommen werden, erkennt man die Berechtigung an, wie schon im ersten Kapitel dieses Abschnittes ausführlich klargelegt wurde, die Berechnungen nach den einfacheren Bazinschen Formeln vornehmen zu können.

Die Fig. 1—6 Taf. 7 stellen die Weisbachschen Koeffizienten graphisch dar, auch sind hier wieder Versuche von Boileau und Hansen angegeben. Die eingezeichneten ausgezogenen Kurven sind Ausgleichslinien, die mit größtmöglicher Sorgfalt konstruiert wurden. Die eingangs erwähnten Differenzen der Weisbachschen Koeffizienten gegen die Bazinschen sind bedeutend geringer als die der v. Weixschen gegen die letzteren; es zeigen die in die Taf. 7 eingezeichneten Kurven daher einen vollständig analogen Verlauf wie die der Taf. 3. Noch deutlicher ist dies aus Taf. 4 d ersichtlich, wo die Kurven alle auf den gleichen Koordinatenursprung bezogen sind. Es liegt dies natürlich daran, daß die Weisbachschen Koeffizienten bei Berechnung der Koeffizienten nach den Bazinschen Formeln ja sozusagen in vereinfachter Weise mitbenützt worden sind. Es wurde hier gleichzeitig versucht, die graphische im Verhältnis zur analytischen natürlich recht grobe Ausgleichung derart vorzunehmen, daß die Linienzüge für kleine Überfallhöhen zusammenlaufen.

Auch hier sind in Fig. 7 Taf. 7 Linien eingezeichnet, welche die schon des öfteren erwähnten Verhältniszahlen ψ in ihrer Abhängigkeit von der Überfallhöhe h darstellen. Auch diese Linien zeigen nahezu den gleichen Verlauf wie diejenigen, die für die Bazinschen Koeffizienten berechnet wurden.

Man kann daher für die Weisbachschen Koeffizienten, wenn keine große Genauigkeit zu erstreben ist, auch die Gleichungen (18) Seite 99 für die Koeffizienten und die Tabelle Seite 78 zur Be-

stimmung von ψ anwenden unter Berücksichtigung der Wehrhöhe $p \approx 250$ mm.

Es interessiert nun noch, zu erfahren, wie sich die Verhältniszahl ψ mit der Zuflußgeschwindigkeit bei den verschiedenen gestellten Überfällen im vorliegenden Falle ändert. In den zitierten Tabellen 2 bis 15 findet man vor der Kolonne der Weisbachschen Koeffizienten eine, welche die Geschwindigkeitshöhen, also die Höhen $\left(\alpha \frac{c^2}{2g}\right)$, die bei den jeweiligen Überfallhöhen h auftreten, angibt. Fig. 1 Taf. 8 stellt Linien dar, welche die Abhängigkeit der Geschwindigkeitshöhen von der Überfallhöhe, also Funktionen $\left(\alpha \frac{c^2}{2g}; h\right)$, angeben.¹⁾

Es sind Kurven von annähernd hyperbelartigem Charakter und ist deutlich zu sehen, wie die Zuflußgeschwindigkeit infolge Schiefstellung des Überfalles zunimmt. Die Kurve für den normalen Überfall und den nächstfolgenden mit $\varepsilon = 74^\circ 54'$ bzw. $\varepsilon = 75^\circ 17'$ fallen fast vollständig zusammen. Ganz ähnliche Kurven wie diese ergeben sich übrigens, wenn man die in den Tabellen 2—15 gleichfalls angegebenen an den Koeffizienten μ nach den Bazinschen Formeln anzubringenden Korrekturen K , zur Berechnung der Koeffizienten μ_0 , in ihrer Abhängigkeit von der Überfallhöhe h aufträgt.

In Fig. 2 Taf. 8 sind nun weiterhin Kurven aufgetragen, die die Funktionen $\left(\alpha \frac{c^2}{2g}; \psi\right)$ darstellen und aus denen ersichtlich ist, wie der mit dem Weisbachschen Koeffizienten für den normalen Überfall zu multiplizierende Faktor ψ (berechnet für Weisbachsche Koeffizienten) sich mit der durch Schiefstellung des Überfalles vergrößerten Zuflußgeschwindigkeit ändert. Diese Kurven sind konstruiert worden aus Fig. 7 Taf. 7 und Fig. 1 Taf. 8. Man erkennt aus dem sofortigen steilen Ansteigen dieser Linien, daß die Änderung der Verhältniszahlen ψ absolut nicht im wesentlichen auf Konto Zuflußgeschwindigkeit zu setzen ist. (Man beachte, daß α hier immer nahezu gleich 1 ist.) Beim Überfall mit ε annähernd 75 Grad geht die Kurve z. B. schon sehr bald in eine zur Achse der $\left(\alpha \frac{c^2}{2g}\right)$ parallele Gerade über;

¹⁾ Da α im vorliegenden mit dem Werte 1,0 als vollkommen identisch angesehen werden kann, so läßt sich der Wert $\left(\alpha \frac{c^2}{2g}\right)$ als die Geschwindigkeitshöhe selbst ansprechen.

und auch bei den anderen Wehrstellungen ändert sich ψ nur sehr langsam mit der Geschwindigkeitshöhe. Es ist hier an das zu erinnern, was schon früher gelegentlich der Besprechung des Geschwindigkeitshöhenbeiwertes α erwähnt wurde, nämlich, daß die starke Änderung des Koeffizienten bei Schiefstellung des Überfalles teilweise zurückzuführen ist auf die vollkommen veränderte Art des Wasserabflusses, die in den Formeln nicht berücksichtigt werden kann und daher dem Koeffizienten auch die Aufgabe der Richtigestellung der Formel zugewiesen wird.

Die auf den Kurven vermerkten Punkte gehören jeweils gleichen Überfallhöhen an; sie zeigen, wie durch Schiefstellung des Wehres bei gleichbleibender Überfallhöhe sowohl ψ als $\left(\alpha \frac{c^2}{2g}\right)$ sich ändern.

Da die Formeln von Weisbach sich auch heute noch einer ausgedehnten Anwendung erfreuen, so sind in Fig. 3 und 4 Taf. 8 wie im Falle der Bazinschen Koeffizienten so auch hier für die Versuche in schmalen und breiter Rinne Linien gleicher Überfallhöhen konstruiert im Koordinatensystem ψ (als Abszissen), $\sin \varepsilon$ (als Ordinaten). Sie zeigen einen mehr oder weniger geschweiften Verlauf, was übrigens bei den entsprechenden Kurven für die Bazinschen Koeffizienten nicht berücksichtigt wurde. Neben der Überfallhöhe h , für die jede Kurve gilt, sind auch die Verhältnisse $h' = \frac{h}{p}$ der Überfallhöhe zur Wehrhöhe angegeben. Beachtet man wohl die Grenzen der Gültigkeit und Genauigkeit, und daß die Art der Anwendbarkeit der Ergebnisse auf große Verhältnisse noch nicht nachgewiesen ist, so kann die Fig. 4 Taf. 8 sehr wohl zu Interpolationszwecken in der Praxis verwendet werden.

3. Die Berechnungsergebnisse der Versuche an gebrochenen und gekrümmten Überfällen.

a) Gebrochener Überfall Nr. 1.

Da die schiefen einfachen Wehre aus Gründen, die in der Einleitung schon Erwähnung fanden, in der Praxis gern vermieden und durch andere Grundrißgestalten ersetzt werden, so wurden auch zwei verschiedenartig gebrochene und zwei gekrümmte Überfälle untersucht.

Die Überfallwand des einen untersuchten gebrochenen Überfalles hatte folgenden Grundriß:

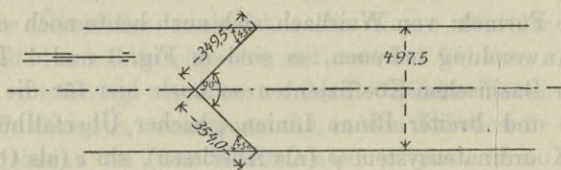


Fig. 6.

Zufälligerweise konnte der Scheitelpunkt des Wehres nicht genau in die Rinnenachse gelegt werden; doch ist der dadurch hervorgerufene Unterschied von 4,5 mm in den Teillängen der Überfallkante nicht beträchtlich. Die Zahlenergebnisse zur Berechnung des Koeffizienten μ_0 bei diesem Überfalle sind in Tabelle 17 zusammengestellt und in Fig. 1 Taf. 9 graphisch aufgetragen. Sie zeigen in der Gegend der Überfallhöhe $h = 100$ mm einen etwas unregelmäßigen Verlauf, was vielleicht auf unbemerkte Störungen während des Versuches zurückzuführen ist. Die eingezeichnete Kurve entspricht der Hyperbelgleichung:

$$\mu_0 = 0,525 + \frac{3,17}{h + 5,6} \quad (23)$$

worin h in Millimeter einzusetzen ist.

Vergleicht man die Koeffizienten μ_0 dieses Überfalles, welche wie die noch folgenden nach der Bazinschen Formel (8) berechnet wurden, mit den entsprechenden des schiefen Überfalles mit ε annähernd 45 Grad in Fig. 3 Taf. 3 bzw. Fig. 2 Taf. 4, so erkennt man,

daß die Koeffizienten μ_0 für den gebrochenen Überfall anfangs etwas kleiner sind als diejenigen des entsprechenden einfachen schiefen Überfalles in der schmalen Rinne, bei steigender Überfallhöhe werden sie indessen größer und nähern sich schließlich den Koeffizienten μ_0 des entsprechenden schiefen Überfalles in der breiten Rinne. Man ersieht also, daß bei kleineren Überfallhöhen etwa bis zu $0,3p$ Verhältnisse bestehen, die fast die nämlichen sind, als wenn die vertikale Symmetrieebene durch die Rinnenachse ersetzt gewesen wäre durch eine feste glatte Wand. Es bestehen hier überhaupt auch ganz beträchtliche äußerliche Ähnlichkeiten mit dem entsprechenden einfachen schiefen Überfall, auf die im nächsten Abschnitt noch zurückzukommen ist. Daß die Verhältnisse bei größeren Überfallhöhen sich ändern, ist erklärlich. Die Versuche mit diesem gebrochenen Überfall sollten in einer Rinne nachkontrolliert werden, die mindestens doppelt so breit ist als die hier verwendet gewesene. Der verhältnismäßig geringen, im Flußbaulaboratorium geförderten sekundlichen Wassermenge wegen verbietet sich hier dieses Unternehmen.

In Fig. 1 Taf. 9 sind auch Versuche von Boileau eingetragen, deren Zahlenwerte Tabelle 15 Nr. 13—16 wiedergibt.¹⁾ Sie beziehen sich auf eine Rinnenbreite von 960,3 mm und eine Wehrhöhe von 433 mm. Die Koeffizienten zeigen, wie alle Boileauschen, ein sehr starkes Wachstum mit der Überfallhöhe und nähern sich bedeutend den Koeffizienten für den einfachen, entsprechend schiefen Überfall in breiter Rinne der Fig. 3 Taf. 3. Man muß indessen auch hier die Bemerkungen über Boileaus Versuche im vorigen Kapitel beachten. Ferner sei hier angegeben, daß Boileau die beiden Wehrteile im Scheitel durch einen Kreisbogen von 72 mm Bogenlänge, 65 mm Sehnenlänge und 45,9 mm Radius verbunden hatte, weil in der Praxis Wehre mit solchen scharfen Mauerecken gerne vermieden werden. Um direkte Vergleiche mit den schiefen Überfällen anstellen zu können, ist es indessen ratsam, diese Abrundung nicht anzubringen, sondern hiemit gesonderte Versuche auszuführen. Es ist sicher, daß die Abrundung des Scheitels des Wehrwinkels zur Vergrößerung des Koeffizienten beiträgt, wie es die Boileauschen Versuche auch zeigen.

Jedenfalls geht aus den Versuchsergebnissen hervor, daß der von Boileau aufgestellten Regel zugestimmt werden kann:

¹⁾ Boileau, a. a. O., p. 145, Tabelle 38.

„Die bei dem hier behandelten, einfach unter 45 Grad gebrochenen Überfall abfließende sekundliche Wassermenge läßt sich berechnen wie bei einem gleich geneigten, gewöhnlichen, einfachen, schiefen Überfall im gleichen Gerinne.“

Ob diese Regel in entsprechend abgeänderter Gestalt auch auf gebrochene Wehre der gleichen Art, aber mit anderem Scheitelwinkel angewendet werden kann, ist bei stumpfen Scheitelwinkeln wahrscheinlich, bei spitzen dagegen nicht ohne weiteres zu sagen.

b) Gebrochener Überfall Nr. 2.

Beim zweiten untersuchten gebrochenen Überfall bestand die Überfallwand aus drei Teilen, von denen der eine senkrecht zur Rinnenachse zu stehen kam, während die beiden äußeren Wehrteile sich unter 45 Grad an die Rinnenwände anschlossen. Fig. 9 Taf. 1 zeigt diese Anordnung im Grundriß. Die aus den Versuchen berechneten Koeffizienten sind in Tabelle 18 zusammengestellt und in Fig. 2 Taf. 9 graphisch aufgetragen. Sie zeigen einen sehr regelmäßigen Verlauf. Die eingezeichnete Kurve entspricht der Hyperbelgleichung:

$$\mu_0 = 0,515 + \frac{4,00}{h + 19,3} \quad (24)$$

Für kleine Überfallhöhen ist der Koeffizient μ_0 im Verhältnis zu dem des entsprechenden, einfachen, schiefen Überfalles mit ε annähernd 45 Grad anscheinend zu klein ermittelt. Bei größeren Überfallhöhen liegen die Koeffizienten zwischen denen, die für die breite bzw. schmale Rinne beim vorgenannten, entsprechenden, einfachen, schiefen Überfall ermittelt wurden. Es ist indessen sicher, daß die Längen der einzelnen Teile der Überfallkante hier eine große Rolle spielen, ebenso wie ihr gegenseitiges Verhältnis und dasjenige zur Rinnenbreite. Bei einem derartig gebrochenen Überfall wäre erforderlich, einen Koeffizienten anzugeben, mit dem die unter getrennter Berücksichtigung der normalen und der schiefen Teile des Wehres berechnete Abflußmenge multipliziert werden müßte, um die tatsächlich abfließende zu erhalten. Da indessen keine Versuche mit größeren Rinnenbreiten ausgeführt werden konnten, so soll auf eine weitere Besprechung dieser Ergebnisse nicht eingegangen werden.

c) Gekrümmte Überfälle Nr. 1 und 2.

Die Grundrisse der Wehrtafeln, die bei den Versuchen mit gekrümmten Überfällen Anwendung fanden, sind in den Fig. 7 und 8 Taf. 1 angegeben. Beim gekrümmten Überfall Nr. 1 betrug der Radius der Überfallkante 347 mm, bei dem Nr. 2 dagegen 523 mm. Die rechnerischen Ergebnisse sind in den Tabellen 19 und 20 enthalten. Fig. 3 und 4 Taf. 9 geben dieselben graphisch wieder.

Mit Ausnahme der Versuchsnummern 9—14 Tabelle 19 und Nr. 10 und 28 Tabelle 20 sind die Ergebnisse zuverlässig, doch zeigen auch sie zu Anfang eine raschere Abnahme des Koeffizienten, als dies im allgemeinen bei den einfachen schiefen Überfällen der Fall war. Die in die Fig. 4 und 3 eingezeichneten Kurven entsprechen den Gleichungen:

$$\mu_0 = 0,560 + \frac{1,24}{h + 1,3} \quad (25)$$

und

$$\mu_0 = 0,587 + \frac{1,10}{h - 2,0}. \quad (26)$$

Gleichung (25) gilt für den gekrümmten Überfall Nr. 1, Gleichung (26) für den Nr. 2.

Wie zu erwarten war, sind die Koeffizienten μ_0 , die sich für den stärker gekrümmten Überfall Nr. 1 ergeben, kleiner als diejenigen für den flacheren Nr. 2. Im ersteren Falle ist die gegenseitige Störung der Stromlinien beim Abflusse eine stärkere als im zweiten und es wird dadurch eine Verringerung des Koeffizienten hervorgerufen. Die Koeffizienten des Überfalles Nr. 1 nähern sich bei nicht zu kleinen Überfallhöhen, wie ein Vergleich mit den entsprechenden Figuren der Taf. 3 bzw. 4 zeigt, den Koeffizienten μ_0 für das einfache schiefe Wehr mit ε annähernd 45 Grad in breiter Rinne, diejenigen des gekrümmten Überfalles Nr. 2 liegen zwischen denen der schiefen Überfälle mit ε annähernd 75 Grad in breiter Rinne und mit ε annähernd 60 Grad in schmaler Rinne.

Der Winkel, welchen die Tangente an den Endpunkten der Überfallkante mit der Rinnenwand einschließt, beträgt beim gekrümmten Überfall Nr. 1, $45^\circ 47'$, bei dem Nr. 2, $61^\circ 35'$. Beachtet man weiter unter Vergleich der Fig. 2 Taf. 4 mit den Fig. 3 und 4 Taf. 9, daß die Versuche an einem schiefen Überfall mit $\varepsilon = 60^\circ$ in breiter Rinne ausfallen mußten, Versuche, die wahrscheinlich Koeffi-

zienten ergeben hätten, die größer sind als diejenigen bei $\varepsilon = 60^\circ$ in schmäler Rinne der Fig. 2 Taf. 4, so kann man also auf Grund der vorliegenden Versuche die folgende Regel aufstellen:

„Die an einem gekrümmten Überfalle abfließende sekundliche Wassermenge läßt sich berechnen wie bei einem einfachen schiefen Überfall, dessen Überfallkante unter dem gleichen Winkel wie die gekrümmte in die Gerinnwand einschneidet, dessen Länge gleich der entwickelten Länge der gekrümmten Überfallkante ist.“

Mit aller Sicherheit konnte diese Regel zwar nicht erkannt werden, da zu wenig Versuchsergebnisse mit verschiedenen großen Krümmungsradien vorliegen und bei den vorliegenden Abweichungen bei kleinen Überfallhöhen auftreten; insbesondere konnte nicht konstatiert werden, ob die zitierte Regel auch noch für solche Fälle gilt, in denen die Überfallkante schärfer als unter 45 Grad in die Rinne wand einschneidet; doch ist dies wohl auch kaum zu erwarten. Es scheint indessen, als ob vorstehende Regel in der Praxis, solange keine zu große Genauigkeit verlangt wird, in Ermanglung von Besserem ganz gut verwendet werden kann.

Es wurde unterlassen, die eben besprochenen Versuche mit gebrochenen und gekrümmten Überfällen auch nach den Formeln von v. Wex und Weisbach zu berechnen, da hierbei keine weiteren neuen Beziehungen zutage gefördert wären. Nur in Fig. 5 Taf. 9 sind noch die Verhältniszahlen ψ der Koeffizienten nach der Bazinschen Formel zu denen μ_0 des normalen Überfalles verzeichnet, wie sie sich durch Division der betreffenden Gleichungen für μ_0 ergeben. Man erkennt auch aus ihnen das besagte Verhalten der Koeffizienten, sowie Stellen vorgekommener Unregelmäßigkeiten.

Dritter Abschnitt.

Nebenversuche.

1. Strahlaufnahmen.

Es mögen nun einige Mitteilungen folgen über Nebenaufnahmen, die im Anschlusse an die vorbesprochenen Versuche gemacht wurden.

Bei Beschreibung der Versuchsanlage im ersten Abschnitt wurde bemerkt, daß die Stelle in der Versuchsrinne, an der die Wehrtafeln ihre Aufstellung fanden, sich so nahe am Ende dieser Rinne befand, daß der Strahl für den normalen Überfall im Bereiche seiner ganzen Ausdehnung auch für die größten hier vorkommenden Überfallhöhen die Führung durch die Rinnenwände beibehielt; nach Übergang in den horizontalen Teil am Boden der Rinne konnte er sich erst frei ausbreiten, indem er dann das Ende der Rinne erreichte. Aus den Fig. 1 und 2 Taf. 1 ist dies ersichtlich. Um nun zu sehen, welche Veränderungen das Unterwasser in der Rinne durch Schiefstellung des Wehres erleidet, wurden die Wehrtafeln, so weit als zugänglich war, um noch einigermaßen genau die Überfallhöhe beobachten zu können, stromauf gerückt und befestigt. Die Fig. 1 a, 2, 3 und 4 e Taf. 10 zeigen nun die Lage des Wassersprunges, der im Unterwasser zur Ausbildung kommt. In Fig. 1 a ist die Wehrtafel unter 45 Grad gegen die Rinnenachse geneigt, in Fig. 2 unter 60 Grad, in Fig. 3 unter 30 Grad und Fig. 4 e zeigt den einfach gebrochenen Überfall Nr. 1.

Bei sämtlichen Aufnahmen ist das Unterwasser ungestaut gewesen.

In den drei ersten Fällen schlägt das Wasser wie naturgemäß eine mehr oder weniger schräge Richtung gegen die eine Rinnenwand ein und wird von derselben zurückgeworfen, überschlägt sich

sogar teilweise, wobei sich ziemlich nahe am Strahlende eine Art Wasserberg *A* bildet, der in den Figuren durch die höhenlinienartigen Kurven angegeben ist. Das Wasser schlägt von hier aus eine Richtung ein, die schräg stromab auf die gegenüberliegende Rinnenwand zu gerichtet ist. Infolge dieses Überströmens bildet sich ein Wassersprung aus, der schräg stromab zieht, seine Lage natürlich je nach der Überfallhöhe verändert und bei sehr schief gestellten Wehren, wie im Falle der Fig. 3, ziemlich nahe am Fuße des Strahles liegt. Die dem Strahle gegenüberliegende Rinnenwand ist starken Angriffen ausgesetzt.

Das Wasser gelangt dann im weiteren Verlaufe an die linke Rinnenwand und wird von dieser abermals zurückgeworfen, wodurch sich ein zweiter Wassersprung ausbildet, der gleichfalls wieder schräg stromab der gegenüberliegenden, nunmehr rechten (den Figuren auf Taf. 10 entsprechend) Rinnenwand zustrebt. Es entsteht durch den Anprall des Wassers an die linke Rinnenwand auch hier wieder ein Wasserberg *B*, der indessen nicht mehr die Höhe wie der bei *A* erreicht, da die Gewalt des Wasseranpralles sich nun schon bedeutend vermindert hat. Durch diesen zweiten Anprall des Wassers ist auch die linke Rinnenwand Angriffen ausgesetzt und müßte gegebenenfalls befestigt werden, wenn auch ihre Verteidigung nicht so stark zu sein braucht wie die der rechten bei *A*. Dieses besprochene Spiel wiederholt sich noch einigemal, allerdings wesentlich abgeschwächt und findet bei dem sehr schief gestellten Wehre der Fig. 3 bald sein Ende in Gestalt des letzten etwas stromab gekrümmten Wassersprunges. Staut man das Unterwasser etwas auf, so rückt der erste Wassersprung bald sehr nahe an den Fuß des Strahles heran.

Im Falle der Fig. 4e für den gebrochenen Überfall bildet sich auf ganz ähnliche Weise wie eben besprochen ein gebrochener Wassersprung mit stromauf gerichtetem Scheitel aus. Die bei dem einfachen schiefen Überfall durch die Rinnenwand ausgeübte Wirkung wird hier durch das vom anderen Wehrteile entgegenkommende Wasser ausgeübt. Der erwähnte Wasserberg *A* bildet sich hier, wenn auch nicht so ausgesprochen wie dort, im Scheitel des Wassersprunges aus. Etwas weiter stromabwärts bildet sich noch ein zweiter Wassersprung aus, dessen einzelne Schenkel schon etwas gekrümmt sind, und der überhaupt ganz bedeutend sanfter als der erste ist. Der Vorteil, den diese Grundrißgestalt gegenüber den einfachen schiefen Wehren besitzt in Bezug auf die Sicherheit der Kanalwände, liegt auf

der Hand; die gleichen Vorteile kommen auch den ähnlich, aber öfters gebrochenen sowie den gekrümmten Wehren zu. Minard¹⁾ weist schon in seinem ausführlichen Werke darauf hin, daß es bei den einfach gebrochenen Wehren leicht zu Ablagerungen des Geschiebes in Form von Inseln kommen kann, wenn der Winkel, den die beiden Wehrrarme einschließen, sehr klein ist. In diesem Falle begegnen sich die von den beiden Wehrramen abkommenden Wässer fast direkt; es bildet sich dadurch jene schon beschriebene buckelartige Erhebung des Unterwassers in verstärktem Maße aus. Die hierdurch erzeugte Vergrößerung des Wasserquerschnittes vermindert die mittlere Geschwindigkeit in demselben und dadurch können Ablagerungen hervorgebracht werden.

Um zu zeigen, wie verwickelt die Abflußverhältnisse bei Überfällen mit solcherart verändertem Grundriß sind, und daß diese Komplikationen unmöglich in einfache Formeln gekleidet werden können, sind auf Taf. 10 einige Strahlaufnahmen für gebrochene und gekrümmte Überfälle wiedergegeben. Dieselben wurden nach Handrissen angefertigt und sollen nur als skizzenhafte Darstellungen dienen. Die sämtlichen Figuren stellen horizontale Schnitte durch den Strahl vor. Die Abstände der Schnittebenen von der Ebene der Überfallkante sind in den Erklärungen auf Taf. 10 angegeben.

In Fig. 4 a und 4 b beträgt die Überfallhöhe 140,0 mm. In Fig. 4 a liegt die Schnittebene 75 mm über der Überfallkante und zeigt diese Figur deutlich die Einziehung des Strahles nach dem Wehrscheitel zu. In Fig. 4 b liegt die Schnittebene 20 mm unterhalb der Überfallkante. Man erkennt, daß die Unterfläche des Strahles sich sehr weit in den Wehrwinkel hineinzieht und sozusagen zwei Gehungslinien enthält, die gebildet werden durch die Durchdringungen der drei einzelnen Teile der Strahlunterfläche. Auf der Außenfläche des Strahles liegt in der Rinnenachse ein Wasserwulst, der annähernd mit Wehrhöhe beginnt. Die Fig. 4 c—4 e stellen analoge Schnitte dar nur bei einer kleineren Wassermenge pro Sekunde; die Überfallhöhe beträgt hier nur 36,0 mm. Die Schnittlinie der Fig. 4 c ist ähnlich, nur etwas flacher als bei Fig. 4 a. Fig. 4 d stellt einen Horizontalschnitt in der Höhe der Überfallkante dar. Es hat hier an der Außenfläche des Strahles bereits der Wasserwulst etwas angesetzt.

¹⁾ Minard, Cours de Construction des ouvrages qui établissent la navigation des rivières et des canaux. Paris 1841, p. 107.

Die Unterfläche zieht sich sehr nahe an den Scheitelpunkt der Überfallkanten heran. In Fig. 4 e ist der Wasserwulst schon vollständig ausgebildet; die Unterfläche des Strahles ist vom Scheitelpunkt und den Abfallwänden schon weiter entfernt. Die Schnittflächen, die in dieser Figur innerhalb des durch Überfallwand und Strahlunterfläche abgeschlossenen Raumes auftreten, bestimmen je einen Wasserberg, der sich hier auf die gleiche Weise ausbildet, wie schon beim einfachen schiefen Überfall erwähnt wurde; nämlich dadurch, daß die Walze unter dem Strahl nach der Mitte der Rinne zu mehr Ausbreitungsmöglichkeit hat. Die Oberfläche dieser Wasserwalze zeigt infolgedessen ein Gefälle nach der Rinnenmitte zu, wie es auch in Fig. 1 b Taf. 10 für den einfachen schiefen Überfall erkenntlich ist. In Fig. 4 b Taf. 10 hat der genannte Wasserberg eine solche Höhe erreicht, daß die dortige horizontale Schnittfläche ihn an einer Stelle schneidet, wo er noch mit dem Strahl vereinigt ist.

Die eben besprochenen Figuren 4 zeigen eine in die Augen springende Ähnlichkeit mit ebensolchen Schnittfiguren, die man für die einfachen schiefen Überfälle erhalten würde; man braucht nur die vertikale Symmetrieebene der Rinnenachse durch die feste Rinnenwand zu ersetzen. Der Wasserwulst z. B. zeigt genau dieselbe Gestalt, wie in Fig. 1 a durch Höhenkurven angegeben wurde und am entgegengesetzten Ende ist in vollkommen gleicher Weise die Abrundung des Strahles ausgebildet. Der unterhalb des Strahles sich bildende Wasserberg entsteht auch beim einfachen schiefen Überfall, und gerade er ist es, der bedingt, daß der Strahl bei genügend großer Überfallhöhe am stromab stumpfen Wehrwinkel bereits unten benetzt sein kann, während er weiter gegen das andere Wehrende zu noch vollkommen frei ist. Bei Besprechung der Boileauschen Versuche wurde schon auf die Wirkung hingewiesen, die dieses Verhalten des Strahles auf den Ausflußkoeffizienten ausübt. Im Falle der Fig. 4 b würde ein Längsprofil, aufgenommen in der Nähe der Rinnenwand, einen unten benetzten Strahl, ein Längsprofil in der Mitte der Rinne (oder auch der einzelnen Wehrteile) dagegen einen freien Strahl zeigen. Bei Versuchen mit diesem gebrochenen Überfall ist es schwierig, infolge der soeben erklärten Verhältnisse eine genügend wirksame Lüftung zu erzielen und so geht der Koeffizient bei Überfallhöhen von etwa 150 mm an langsam in den größeren, für den unten benetzten Strahl über. In der Fig. 1 Taf. 9 ist dieses Verhalten zwar noch nicht deutlich erkennbar, es ist aber möglich,

daß der dort sichtbare, etwas unregelmäßige Verlauf der Koeffizienten bei mittlerer Überfallhöhe, auf den schon hingewiesen wurde, auf zeitweilig ungenügend wirkende Lüftung zurückzuführen ist.

Fig. 5 Taf. 10 stellt einen Horizontalschnitt 20 mm unterhalb der Überfallkante beim doppelt gebrochenen Überfall dar. Des stumpfen Winkels an der Bruchstelle wegen tritt hier kein auf der Außenfläche des Strahles liegender Wasserwulst auf, doch ist auch hier wieder die starke Einziehung der Unterfläche des Strahles zu erkennen, die infolge der Wasseranhäufung an den Bruchpunkten der Überfallkante auftritt, sowie eine Abrundung und Verdünnung an den Wehrenden. An Bruchpunkten der Überfallkante ist die Kontraktion des Strahles in der Vertikalebene der Winkelhalbierenden anscheinend etwas geringer als in Vertikalebenen normal zur Überfallkante. Rundet man die scharfen vertikalen Kanten ab, wie das bei wirklichen Ausführungen meistens der Fall sein wird, so werden sowohl der äußere Wasserwulst als die starke innere Einziehung des Strahles allmählich verschwinden. Bei dem Boileauschen Versuche am einfach gebrochenen Überfall war der Wasserwulst indessen gleichwohl noch vorhanden, trotzdem der Kreisbogen von 45,9 mm Radius, der die beiden geraden Teile der Überfallkante verband, einen ganz beträchtlichen Teil der letzteren einnahm.

Fig. 6 Taf. 10 endlich stellt einen Horizontalschnitt 60 mm unterhalb der Überfallkante beim gekrümmten Überfalle vor. Es ist hier nichts besonders Charakteristisches zu bemerken. Der Schnitt ist der Krümmung der Überfallkante entsprechend natürlicherweise ebenfalls gekrümmt. Die Strahldicke ist in der Symmetrieebene etwas größer als in der Nähe der Rinnenwände; an diese selbst schließt sich der Strahl mit sehr geringen Abrundungen an.

2. Die horizontale Ablenkung der Stromlinien.

Es wurde schon des öfteren darauf hingewiesen, daß das Wasser bei schiefen Überfällen nur bei sehr kleinen Überfallhöhen, im Grundriß gedacht, normal zur Überfallkante abfließt; solange also die Zuflußgeschwindigkeit noch unbedeutend ist, da diese die Größe der Ablenkung der Stromlinien bedingt. Bei größeren Überfallhöhen und infolgedessen größeren Zuflußgeschwindigkeiten suchen die Stromlinien ihre einmal innegehabte Richtung parallel zur Rinnenachse

beizubehalten. Bei sehr großen Überfallhöhen erleiden sie nur noch eine sehr geringe Ablenkung.

Die Größe der Ablenkung muß natürlich auch von der Rinnenbreite abhängen; denn stellt man sich z. B. ein sehr schmales Gerinne vor bei beträchtlicher Überfallhöhe, so kann das Wasser infolge der innigeren Führung durch die Rinnenwände nur mit sehr geringer Ablenkung aus seiner ursprünglichen Richtung überfließen und entgegengesetzt verhält es sich bei großen Breiten der Rinne. Es ergibt sich also, daß bei geringen Rinnenbreiten die Größe der Ablenkung des abströmenden Wassers abhängig ist von der Rinnenbreite und der Zuflußgeschwindigkeit. Bei großen Breiten der Rinne tritt der Einfluß dieser Breite selbst in den Hintergrund, und ist hier die Größe der Ablenkung lediglich von der Größe der Zuflußgeschwindigkeit abhängig.

Daß das Wasser schon bei verhältnismäßig unbeträchtlichen Überfallhöhen nicht mehr normal zum Wehr abfließt, läßt sich in der Natur leicht beobachten. So gibt auch Minard¹⁾ an, daß er oft beobachten konnte, wie die Stromlinien bis zur stromabwärtigen Kante der Wehrkrone hin parallel zum allgemeinen Stromstrich blieben und daß sie dann nicht normal zum Wehre abbogen, sondern nur etwas gegen die Wehnormale zu ablenkten.

Um nun zu untersuchen, wie groß in Wirklichkeit diese Ablenkung ist, wurde ein Apparat konstruiert, der in den Fig. 10 a und 10 b Taf. 1 im Grund- und Aufriß dargestellt ist, ein Apparat, der in ähnlicher Weise auch von Frese bei Überfällen mit Seitenkontraktion benutzt wurde. An einem vertikal stehenden Lineal a ist eine Kreisskala b befestigt, deren Teilung in Graden ausgeführt ist. Unterhalb der Kreisskala ist an einem Zapfen drehbar befestigt ein längerer Halter c vom eingezeichneten zugespitzten Querschnitt. Dieser Halter trägt an seinem unteren Ende eine Spitzenschraube s_1 mit Gegenmutter. Dieser Spitzenschraube s_1 steht am unteren Zapfen des Lineals a eine weitere Spitze vertikal gegenüber. Diese beiden Spitzen dienen zur möglichst reibungslosen Befestigung des Flügels d , der aus einem dünnen zugespitzten Blech besteht mit dem in der Figur eingezeichneten Querschnitt. Der Flügel ist selbst Träger eines Zeigers z_1 , der auf die Kreisskala hinaufreicht. Der drehbare und mittelst einer Stellschraube s_2 feststellbare Halter des Flügels

¹⁾ Minard, a. a. O., p. 107.

trägt ebenfalls einen Zeiger z_2 , der Ablesungen auf der Kreisskala gestattet. Der Flügel d stellt sich in Richtung des strömenden Wassers ein und mit Hilfe der auf der Skala am Zeiger z_1 abzulesenden Stellung desselben kann der Flügelhalter von Hand so eingestellt werden, daß die Ablesung am Zeiger z_2 derjenigen am Zeiger z_1 entspricht und so der Körper des Flügelhalters keinen zu großen Einfluß auf die Stromlinien ausübt und die Ablesungen beeinträchtigt. Das Lineal, das den ganzen Apparat trägt, ist oben in geeigneter Weise mittelst eines Führungsschiebers nach zwei Richtungen verschieblich mit einem Befestigungslinal verbunden, welches letzteres fest auf den Rinnenwänden aufruhet. Vor Beginn der Ablesungen muß eine solche für die Richtung der Rinnenachse gemacht werden zur Bestimmung des Nullpunktes. An Stellen, wo die Stromlinien stark gekrümmt sind, ist die Einstellung des Flügelhalters nicht der Ablesung am Zeiger z_1 des Flügels gemäß zu machen, sondern nach dem Aussehen, den der geringe Stau des Halters besitzt, um sicher zu sein, daß er nicht schief zu den Stromlinien steht.

Bei den Versuchen, die hier mitgeteilt werden sollen, wurde der Apparat annähernd in der Mitte der Überfallkante aufgestellt stromabwärts von derselben; so zwar, daß der Flügelhalter so nahe als möglich an die Abfallwand der Wehrtafel herangerückt wurde. Der Höhe nach geschah die Einstellung des Apparates derartig, daß die Spitzenschraube s_1 samt ihrer Mutter am Halter aus dem Strahl herausragte und sich in dem Luftraume unterhalb des Strahles befand. Auf diese Weise wurde ein Stau durch den verdickten Körper der Schraubenmutter vermieden. Der Flügel durchschnitt demnach vollständig den Strahl. Nur bei größeren Überfallhöhen und Strahldicken wurde der Schraube der Eintritt in den Strahl gestattet, da hier die Flügelhöhe von 80 mm nicht mehr ausreichte und ein Stau durch die Schraubenmutter bei den großen Strahldicken nicht mehr von großem Einflusse sein konnte.

Der Flügel folgt leicht jeder Richtungsänderung der Stromlinien. Nur bei den kleinen Überfallhöhen bis zu 25 mm bei den weniger schiefen und bis zu 10—15 mm bei den stark schiefen Überfällen werden die Resultate der Ablesungen nicht mehr so zuverlässig, da die geringe Geschwindigkeit des Wassers dann nicht mehr genügt, die Masse des Flügels leicht zu bewegen. Hier kann man dann aber immerhin die Ablesungen leicht nachkontrollieren nach den Richtungen, welche die Linien besitzen, die durch Einschneiden

des Flügels auf dem Wasserspiegel erzeugt werden. Bei größeren Überfallhöhen schwankt der Flügel immer leicht hin und her und ist es nicht schwierig, einen Mittelwert abzulesen. Diese Ablesung stellt natürlich nur einen Mittelwert der Ablenkungen der Stromlinien dar, denn in Wirklichkeit überkreuzen sich die zu einer Vertikalen gehörigen Linien etwas, wie schon früher erwähnt wurde.

Die erhaltenen Ablesungen sind in Tabelle 21 für die schmale Rinne und Tabelle 22 für die breite zusammengestellt. In den Fig. 6—11 Taf. 9 sind sie in ihrer Abhängigkeit von den gleichzeitig bestimmten Überfallhöhen h graphisch aufgetragen. Man erkennt aus den Figuren, daß die Stromlinien schon von verhältnismäßig geringen Überfallhöhen an sich parallel zur Rinnenachse einzustellen suchen; und zwar auch schon bei Überfällen, die nur wenig gegen dieselbe geneigt sind. Bei den stark schiefen Überfällen ist der mittlere Winkel der Stromlinien zur Wehnormalen infolge der vergrößerten Zuflußgeschwindigkeit schon sehr bald ein beträchtlicher und wächst hier mit der Überfallhöhe in gesteigertem Maße. Der Winkel, der sich als Endstellung auszubilden sucht, ist die Ergänzung des Winkels ε zu 90 Grad.

Die in die Fig. 6—11 Taf. 9 eingezeichneten Beobachtungspunkte verlaufen ziemlich regelmäßig, wenn auch einzelne von ihnen starke Beobachtungsfehler aufweisen. So ist es wohl auch auf Beobachtungsfehler zurückzuführen, wenn die Linien der Fig. 10 und 11 einen so merkwürdig geschweiften Verlauf nehmen. Diese in die Figuren eingezeichneten gestrichelten Linienzüge sollen lediglich den allgemeinen Verlauf der Änderung der Ablenkung mit der Überfallhöhe kennzeichnen.

Man erkennt weiterhin, daß bei gleicher Überfallhöhe die Ablenkungen der Stromlinien aus der Richtung der Rinnenachse in der schmalen Rinne geringer sind als in der breiten. Die Größe dieser Unterschiede zeigt bei den verschiedenen Wehrstellungen keine sehr wesentlichen Differenzen, trotzdem eigentlich anzunehmen wäre, daß dieselben bei den sehr schief gestellten Überfällen geringer sein müßten. Die Beobachtungen der Fig. 8 für die breite Rinne enthält jedenfalls größere Ungenauigkeiten. Sonst sind hier im allgemeinen die Beobachtungen in breiter Rinne zuverlässiger.

Die in die gleichen Figuren eingezeichneten strich-punktirten Linien haben zu Abszissen wiederum die mittleren Winkel zwischen Wehnormalen und Stromlinien, zu Ordinaten aber die den Über-

fallhöhen entsprechenden Zuflußgeschwindigkeitshöhen. In ihrem sanften Ansteigen erkennt man, daß die Stromlinien mit zunehmender Zuflußgeschwindigkeit sehr rasch in die unabgelenkte Richtung parallel zur Rinnenachse zurückkehren und zwar auch bei den weniger schief gestellten Überfällen. Hier zeigt sich, welche große Rolle die Zuflußgeschwindigkeit beim ganzen Vorgange des Abflusses spielt.

Aus der Lage der Höhenlinien im Grundrisse der Fig. 1 a Taf. 10 zur Überfallkante ist auch ziemlich deutlich ersichtlich, wie die Ablenkung der Stromlinien nach der rechten Rinnenwand zu abnehmen und auf welche Weise die Abrundung des Strahles an der linken Rinnenwand entsteht. Die Ablenkung der Stromlinien aus der Richtung der Rinnenachse ist nur für den mittleren Teil der Überfallkante konstant, an den Wehrenden ändert sich ihre Größe.

3. Die Absenkung des Wasserspiegels in der Vertikalebene der Überfallkante.

Als weitere Nebenversuche wurden Aufnahmen gemacht über die Absenkung des Wasserspiegels in der Vertikalebene der Überfallkante in der breiten Rinne für freie Strahlen. Ausgeführt wurden sie durch Einwägung des Wasserspiegels an drei Punkten und Messung der jeweils herrschenden Überfallhöhe. Die Aufnahmen dieser Art sind sehr schwierig auszuführen und erfordern einen großen Aufwand an Zeit; unbeträchtliche Schwankungen in der Überfallhöhe erzeugen schon beträchtlichere Schwankungen in der Höhenlage des Wasserspiegels über der Überfallkante. Außerdem erzeugt ein in den Strahl eingebrachter Gegenstand der großen, hier herrschenden Geschwindigkeit wegen einen stärkeren Aufstau. Um diesen zu vermeiden, wurden die Messungen vorgenommen mit Hilfe scharfer Spitzen, die von außen in den Wasserspiegel einschnitten. Als Beobachtungspunkt diente der Punkt vertikal über dem Mittelpunkt der Überfallkante, sowie die entsprechenden Punkte zweier Vertikalebenen in Abständen von je 100 mm von den Rinnenwänden. Die Stellung der Überfallwand war hier wie bei allen ausgeführten Versuchen so, daß der stromauf spitze Wehrwinkel links der Stromrichtung liegt.

Die Beobachtungen sind in Tabelle 23 zusammengestellt. Aus derselben ist sowohl die Strahlstärke, gemessen vertikal über der Überfallkante, als auch die Größe der Absenkung an den Beob-

achtungspunkten zu entnehmen. Trotz der Schwierigkeit dieser Messungen läßt sich immerhin erkennen, daß die Wasserspiegellinie vertikal über der Überfallkante bei einfachen schiefen Überfällen keine Gerade ist. Die Absenkung ist vielmehr im allgemeinen dem stromauf spitzen Winkel des Wehres zu größer als nach dem anderen Wehrende zu. Es erhellt dies aus den großen prozentualen Differenzen zwischen der viert- und der drittletzten Kolonne der Tabelle 23. Die Differenzen zwischen dieser letzteren Kolonne und der nächstfolgenden sind bedeutend geringer; deswegen machen sich auch die Beobachtungsfehler hier mehr geltend.

Die Wasserspiegellinie vertikal über der Überfallkante ist also bei einer Anordnung der Wehrtafel wie in Fig. 1a Taf. 10 vom rechten Wehrende an nur wenig geneigt. Über die Mitte der Überfallkante hinaus, dem linken Wehrende zu, fällt sie dann aber merklich ab. Es ist dies Verhalten in der eben genannten Figur mit Hilfe der Höhenlinien dargestellt; ebenso kommt es auch in Fig. 1b Taf. 10 zum Ausdruck.

Was die Abhängigkeit der Größe der Absenkung von der Wehrstellung anbelangt, so lassen die vorliegenden Beobachtungen leider keinen sicheren Schluß zu.

In der letzten Kolonne der Tabelle 23 ist jeweils der Wert $(0,15 h)$ angegeben. Es ist dies die Größe der Absenkung auf der Überfallkante, wie sie für den normalen Überfall im Falle des freien Strahles gewöhnlich angenommen wird, eine Beziehung, die aus den vielfachen, für diesen Überfall von den verschiedensten Beobachtern und unter den verschiedensten Verhältnissen ausgeführten Versuchen abgeleitet ist. Man erkennt beim Vergleich dieser Kolonne mit den davorstehenden, daß bedeutende Unterschiede gegen die Werte $(0,15 h)$ vorhanden sind, Unterschiede, die im allgemeinen im Vergleich zu den Werten der dritt- und vorletzten Kolonne bei kleineren Überfallhöhen positiv, bei größeren negativ ausfallen, wenn man den Werten $(0,15 h)$ das Minuszeichen gibt. Mehr läßt sich indessen auch hierüber nicht mit Sicherheit aussagen.

Die Absenkung erstreckt sich, von der Überfallkante an gerechnet, stromauf bei schiefen Überfällen, anscheinend ebenso weit wie bei den normalen, wenigstens im Bereiche derjenigen Rinnenhälfte, die den stromauf stumpfen Wehrwinkel enthält; dem anderen Wehrende zu scheint sie sich etwas weiter stromauf zu ziehen. Der Wasserspiegel geht ganz allmählich in die Horizontale über, daher

ist die Lage des Beginns der Absenkung nur ganz ungefähr bestimmbar und demgemäß ist auch in Fig. 1a Taf. 10 die oberste Höhenlinie nur als skizzenhafte zu betrachten. Ebenso schwierig ist es auch, festzustellen, ob die horizontale Ablenkung der Stromlinien gleichzeitig mit der Absenkung beginnt. Bei kleinen Überfallhöhen scheint dies der Fall zu sein, bei großen dagegen erfolgt die horizontale Ablenkung erst an einem Orte, an dem die Absenkung bereits begonnen hat.

Es möge noch bemerkt werden, daß die Unsicherheit und Schwierigkeit der Messung der Absenkung des Strahles es verbietet, dieselbe nach dem Beispiele von Boileau in die Berechnungsformeln einzuführen, was noch um so untunlicher ist, wenn wie hier die Absenkung längs der Überfallkante hin Änderungen unterworfen ist.

Schlussbetrachtung.

Das Erwähnenswerteste der ausgeführten Versuche und ihrer Ergebnisse wäre hiemit berichtet und möge zum Schluß nur noch bemerkt werden, daß mit dem Vorgeführten die Versuche selbstverständlich bei weitem nicht abgeschlossen sind. Wenn die bei schiefen Überfällen sich abspielenden Vorgänge auch einigermaßen geklärt worden sind, so ist das für die reine Praxis verwertbare Material doch verhältnismäßig gering und harret hier noch ein weites Versuchsfeld der Bearbeitung. Mit wenigen Worten mögen im folgenden diejenigen Versuche gestreift werden, die mit in den Bereich der vorliegenden Untersuchungen hätten gezogen werden sollen, die aber aus schon erwähnten Gründen nicht zur Ausführung gelangen konnten.

Vor allem müßten die Versuche selbst, nachdem vollkommenere Apparate zur Verfügung stehen, wiederholt werden mit einer größeren Anzahl von Wehrstellungen, um dadurch eine genügende Zusammenfassung sämtlicher Ergebnisse ermöglichen zu können, was ja hier nicht in dem gewünschten Grade zu erreichen war. Von großer Bedeutung sind dabei Versuche mit verschiedenen Wehrhöhen, damit eine sichere Bestimmung des Geschwindigkeitshöhenbeiwertes a vor sich gehen kann. Auch die Verwendung einer größeren sekundlichen Wassermenge, als sie im Laboratorium der Karlsruher Hochschule zur Verfügung steht, wäre von Nutzen, um auch mit beträchtlichen Breiten der Rinnen arbeiten zu können. Die beschriebenen Versuche betrafen lediglich Überfälle mit freiem Strahl, bei dem also die äußere Atmosphäre ungehindert unter den Strahl treten kann. Dieser Fall wird sich in der Praxis auch oft vorfinden, indem durch unregelmäßig gestaltete Flußbetten, durch Öffnung des Strahles an dem Wehrende, an dem sich der stromauf spitze Winkel befindet, oder auch durch andere Umstände die unter dem Strahl fortgerissene Luft sich ersetzen kann. Sehr häufig wird dies aber nicht möglich sein können und es bildet sich dann der schon beschriebene, unten benetzte Strahl aus. Weiter wird das Unterwasser oft beträchtliche

Tiefe besitzen, so daß unvollkommene Überfälle entstehen und im äußersten Falle auch wellenförmige Strahlarten zur Ausbildung gelangen können. Ein der Praxis mehr entsprechender Fall als derjenige des Überfalles mit scharfer Kante ist der, bei welchem der Wehrrücken gekrümmt ist und ein mehr oder weniger abgerundetes und geschweiftes Profil besitzt; es wird dadurch eine starke Zunahme des Koeffizienten verursacht. Alles das sind Verhältnisse, die auch für Überfälle verschiedenster Grundrißdispositionen noch zu untersuchen wären und klarstellen müßten, ob die durch Schiefstellung des Überfalles hervorgerufene Verkleinerung des Koeffizienten gegenüber dem des entsprechenden normalen Überfalles auch bei solchen abgeänderten äußeren Verhältnissen den vorliegenden Versuchsergebnissen entsprechend prozentual bestehen bleibt. Weiter sind Versuche an gebrochenen und gekrümmten Überfällen verschiedenster Grundrißform aber bei größeren Rinnenbreiten als denjenigen der beschriebenen Versuche auszuführen. Von besonderer Wichtigkeit wäre es, die Versuche in bedeutend größerem Maßstabe anzustellen, als der hier angewendete es war. Dadurch ließe sich erkennen, ob Ergebnisse von Versuchen in kleinem Maßstabe direkt oder vermittelt einer analytischen Funktion auf größere Verhältnisse übertragen werden dürfen.

Wichtig sind weiter Untersuchungen an Überfällen, die parallel zum Stromstrich stehen und als Überläufe allgemein bezeichnet werden; es sind dies ständige Aggregate einer jeden Wasserkraftanlage und gehören bei städtischen Kanalisationen zu den gewöhnlichsten Erscheinungen. Die Wahl des Ausflußkoeffizienten ist hier infolge Mangels an Versuchen eine äußerst unsichere und doch hängt viel von der richtigen Wahl desselben ab. Meist ist der Ingenieur dabei gezwungen, mehr oder weniger schätzungsweise zu arbeiten. Der zum Stromstrich parallele Überfall ist das dem normalen Überfalle entgegengesetzte Extrem der schiefen Überfälle, aber trotzdem von ganz anderer Art, weil nur ein Teil des Wassers über das Wehr strömt. Als Extrem der schiefen Überfälle betrachtet, besitzt der parallele Überfall unendlich lange Überfallkante, aber endliche Zuflußmenge und -geschwindigkeit. Die Strahldicke über der Überfallkante nimmt von einem gewissen endlichen Betrage allmählich bis Null ab. Dieser Fall mit unverhältnismäßig langer Überfallkante hat mehr wissenschaftliche als praktische Bedeutung. Es war daher gedacht, den parallelen Überfall dadurch herzustellen, daß an den Seitenwänden

der Rinnen rechteckige Öffnungen und an diese scharfkantige Poncelet-Ausschnitte angebracht würden, während in der Rinne selbst ein gewöhnlicher Überfall zur Ausbildung kommen sollte. Nachdem dieser letztere bezüglich seines Ausflußkoeffizienten für sich allein untersucht war, also nach Erledigung der im vorhergehenden beschriebenen Versuche, könnte gleichzeitig mit ihm der seitliche Poncelet-Überfall in Funktion treten. Durch Messung der Überfallhöhe am ersteren Überfall in dem unteren Teil der Rinne könnte dann die über diesen fließende sekundliche Wassermenge bestimmt, durch Subtraktion derselben von der mittelst der Überfallhöhe am Meßüberfall berechneten sekundlichen Gesamtwassermenge diejenige gefunden werden, die die Seitenöffnung passiert und daraus verbunden mit der an dieser Seitenöffnung vor Beginn der Absenkung gemessenen Überfallhöhe der Ausflußkoeffizient für diese selbst berechnet werden. Da derselbe wahrscheinlich von der Zuflußgeschwindigkeit des in der Rinne vorbeifließenden Wassers große Abhängigkeit zeigen wird, so sollte dieselbe variiert werden können, entweder durch Verstärkungen des Gefälles im Teile der Seitenöffnung oder durch Einbau von den bereits untersuchten schiefen Überfällen. Die Messung der Überfallhöhe am Wehr in der Rinne muß sehr genau sein und daher ist hier derselbe Zustand möglichst zu erreichen, wie er bei der vorhergehenden Untersuchung also ohne Gefälle des Rinnenbodens, geherrscht hat; zu stark vergrößerte Zuflußgeschwindigkeiten beeinträchtigen die Genauigkeit der Messung sehr. Wie aus den vorliegenden Versuchsergebnissen, besonders aus denen am schiefsten Überfalle, zu ersehen ist, wird bei dem parallelen Überfall eine starke Abnahme des Ausflußkoeffizienten eintreten, zumal hier der Ausfluß mit seitlicher Kontraktion verwirklicht ist und zwar ist dieselbe an den beiden Enden des Überfalles verschieden ausgebildet, so daß die Mittellinie des Strahles im Grundriß betrachtet eine Ablenkung stromabwärts erfährt. Diese Ablenkung wird vornehmlich von der Zuflußgeschwindigkeit abhängen. Durch Untersuchung also ein und derselben Öffnung einmal als gewöhnlicher normaler Überfall mit Seitenkontraktion, wobei die Zuflußgeschwindigkeit möglichst zu unterdrücken ist, kann die Abhängigkeit des Koeffizienten von der Überfallhöhe allein ermittelt werden, durch darauf folgende Untersuchung wiederum derselben Öffnung, nun aber als Seitenöffnung an der Rinne angebracht und so als Überlauf wirkend, kann die dadurch erfolgte Änderung des Koeffizienten durch Variierung der Zuflußgeschwindig-

keit in der Rinne als Funktion dieser selbst dargestellt und so die Wirkung jedes einzelnen Einflusses studiert werden. Durch entsprechende Anordnung könnte die Länge des Überlaufes in der Art des Wasserzolles verändert werden.

Hieran würden sich dann Versuche an schiefen, gebrochenen und gekrümmten Überfällen mit Seitenkontraktion anschließen, bei denen die ganze Wassermenge die Überfallöffnung passieren muß; sowie an schief oder parallel gestellten Schützenöffnungen. Seitenkontraktion wird in der Praxis durch Ausführung erhöhter vom Wasser nicht überronnener Flügelwände hervorgebracht.

Vorgesehen war weiter, zu untersuchen, welche Abflußkoeffizienten rechenartigen Einbauten und Verengerungen des Durchflußprofils zukommen, die senkrecht oder schief zur Stromrichtung stehen, und in welchem Grade dadurch Gefällsverluste auftreten. Von Wichtigkeit sind diese Untersuchungen zur Bestimmung der Wirkungsweise der Einbauten in Flüssen, z. B. Buhnen, oder bei Wasserkraftanlagen, wo die Rechen stets einen Teil des Gefälles verzehren, namentlich bei schiefem Einbaue, wie dies z. B. bei der Kraftanlage in Rheinfelden der Fall ist.

Bei schiefen Wehren wird hie und da die Anordnung getroffen, die Wehrkrone nicht horizontal sondern geneigt zu verlegen. Es geschieht dies, wie schon in der Einleitung erwähnt, um das Wasser vom gefährdeten Ufer wieder etwas abzulenken und dessen Verteidigung leichter ausüben zu können. Natürlicherweise wird dadurch der Ausflußkoeffizient stark beeinflußt und es wäre interessant, zu erfahren, in welcher Art und Weise solch veränderte Kronenanordnung zu berücksichtigen ist.

Endlich kommen in der Praxis häufig Kombinationen der verschiedensten Wehrarten vor, die teils normal teils schief oder parallel zur Stromrichtung stehen und würden dementsprechende experimentelle Untersuchungen sehr wertvolle Aufschlüsse liefern.

Nachtrag.

Nachdem die vorliegende Arbeit in all ihren Teilen schon abgeschlossen war, konnte erst eine genaue Eichung des Meßüberfalles nach dem auf S. 11 kurz beschriebenen Verfahren erfolgen. Die verfügbare Zeit ließ es nicht zu, dem neuen Ergebnis dieser Eichung entsprechend, eine vollständige Umarbeitung der notwendigen Berechnungen durchzuführen. Da außerdem die Ergebnisse der Untersuchungen, besonders was die vergleichenden Resultate anbelangt, nur unwesentlich beeinflusst werden, so mögen die folgenden Bemerkungen den neuen Verhältnissen Rechnung tragen.

Die neu gefundenen Werte für die Abflußkoeffizienten des Meßüberfalles sind folgende:

h_1	12,9	13,1	16,1	20,7	20,5	21,3	25,5	25,9	29,5
μ_1	0,684	0,678	0,656	0,644	0,654	0,645	0,646	0,641	0,643
h_1	29,6	30,3	40,5	50,5	61,3	71,2	80,7	92,3	102,7
μ_1	0,637	0,639	0,623	0,616	0,612	0,608	0,606	0,600	0,600
h_1	113,9	124,3	130,5	140,9	150,8	161,3	170,6	—	—
μ_1	0,600	0,600	0,597	0,596	0,600	0,597	0,596	—	—

Die Überfallhöhe h_1 ist in dieser Tabelle in mm gedacht. In Fig. 1 Taf. 2 ist eine gestrichelte Linie eingezeichnet, welche als Ausgleichslinie dieser neuen Werte zu denken ist. Die neue Eichung besitzt eine Genauigkeit von etwa 0,5%. Man erkennt, daß die Ausgleichslinie der ursprünglichen Eichung zu kleine Werte für die Koeffizienten μ_1 ergibt. Es mag dies wohl eine Folge des primitiven Verfahrens sein, das dieser Eichung zu Grunde lag. Von einer Überfallhöhe von etwa 25 mm an ist die prozentuale Vergrößerung, welche die Koeffizienten zu erfahren haben, nahezu konstant gleich 1,5%. Bei kleinen Überfallhöhen geht die neue Ausgleichslinie in die ursprüngliche über.

Mit den eben besprochenen Koeffizienten sind natürlich auch die der übrigen untersuchten Wehre zu klein ermittelt worden. In den letzten Kolonnen der entsprechenden Tabellen 2—14 sind die neu berechneten Werte eingetragen und ebenso in die entsprechenden Figuren der Tafeln 2 und 3 (Dubuat bzw. Bazin) neue Ausgleichslinien gestrichelt eingezeichnet. Es ergibt sich für den normalen Überfall Fig. 6 Taf. 3, daß die Koeffizienten μ_0 um etwa 1,5% größer sein müssen als ursprünglich ermittelt. Dieser Wert ist auch hier für Überfallhöhen von etwa 25 mm an nahezu konstant. Die so außerordentlich scharfe Übereinstimmung der Ergebnisse an diesem Überfall mit denjenigen von Hansen verschwindet nun etwas; immerhin liegen die neu ermittelten Koeffizienten bedeutend näher an den Hansenschen Versuchsergebnissen als an den Bazinschen. Dort betragen die Unterschiede etwa — 1,5%, hier aber etwa + 3,0%. Die Koeffizienten der schiefen Überfälle erfahren prozentuale Vergrößerungen, die mit der Überfallhöhe stärker variieren als beim normalen Überfall. Sie betragen hier, wie aus Taf. 3 zu entnehmen, bis zu:

1,8%	bei $\varepsilon \sim 75^\circ$	in schmäler	und breiter Rinne,
1,9%	" $\varepsilon \sim 60^\circ$	" "	Rinne,
2,2%	" $\varepsilon \sim 45^\circ$	" "	und 1,7% in breiter Rinne,
2,5%	" $\varepsilon \sim 30^\circ$	" "	" "
2,1%	" $\varepsilon \sim 15^\circ$	" "	" " 1,9% " " "

Des weiteren sind die Koeffizienten für den normalen Überfall nach den Formeln von v. Wex neu umgerechnet und in Tabelle 2 und 3 in den letzten Kolonnen eingetragen, sowie in Fig. 6 Taf. 6 in Gestalt der gestrichelten Ausgleichslinie verzeichnet. Dieselbe ergibt Werte, die zwischen den Versuchsergebnissen von Hansen und denen von Fteley und Stearns liegen. Die prozentuale Vergrößerung der Koeffizienten beträgt hier im Durchschnitt etwa 1,6%. Für die schiefen Überfälle ist die Vergrößerung etwa die gleiche wie bei den nach den Bazinschen Formeln berechneten Koeffizienten.

Da die Koeffizienten nach den Formeln von Weisbach nicht stark von jenen abweichen, die nach den Bazinschen Formeln berechnet sind, so kann in Bezug auf die Korrektur der Weisbachschen Koeffizienten auf das dort Mitgeteilte verwiesen werden.

Auf die Verhältniszahlen ψ , die ein Hauptinteresse verdienen, weil mit ihnen multipliziert die Koeffizienten für den normalen Über-

fall in die der entsprechenden schiefen Überfälle übergehen, ist dies neue Eichungsergebnis von keinem sehr großen Einflusse und sie können daher nahezu unverändert beibehalten werden.

Die Untersuchungsergebnisse, die sich auf die Zuflußgeschwindigkeiten Fig. 1 und 2 Taf. 8 sowie auf deren Einfluß auf die horizontale Ablenkung der Stromlinien beziehen, erleiden nur ganz unwesentliche Änderungen, die das Resultat nicht erheblich berühren.

Was die gebrochenen und gekrümmten Überfälle anbelangt, so kann auf jene Überfälle verwiesen werden, welche durch die auf Seite 88 und 90 angegebenen Regeln bestimmt werden.

Karlsruhe i. B., im August 1907.

O. G. Aichel.

Berichtigung.

Die zweite Fußnote auf Seite 21 muß lauten:

- ²⁾ Bidone, Mémoires de l'Académie des sciences. Turin 1820, tom. 25.

Anhang.

Versuchs-Tabellen.

Tabellen-Verzeichnis.

- Tab. 1. Eichung des Meßüberfalles.
 „ 2. Normaler Überfall in schmaler Rinne.
 „ 3. „ „ „ breiter „ „
 „ 4. Versuche von Boileau an normalen Überfällen.
 „ 5. „ „ Hansen am „ Überfall.
 „ 6. „ „ Bazin „ „ „
 „ 7. Schiefer Überfall $\varepsilon = 75^{\circ} 17'$ in schmaler Rinne.
 „ 8. „ „ $\varepsilon = 74^{\circ} 54'$ „ breiter „
 „ 9. „ „ $\varepsilon = 59^{\circ} 45'$ „ schmaler „
 „ 10. „ „ $\varepsilon = 44^{\circ} 10'$ „ „ „
 „ 11. „ „ $\varepsilon = 44^{\circ} 39'$ „ breiter „
 „ 12. „ „ $\varepsilon = 30^{\circ} 26'$ „ schmaler „
 „ 13. „ „ $\varepsilon = 14^{\circ} 23'$ „ „ „
 „ 14. „ „ $\varepsilon = 14^{\circ} 56'$ „ breiter „
 „ 15. Versuche von Boileau an schiefen und gebrochenen Überfällen.
 „ 16. „ „ Fteley und Stearns an normalen Überfällen.
 „ 17. Überfall unter 45° einfach gebrochen Nr. 1.
 „ 18. „ „ „ doppelt „ Nr. 2.
 „ 19. Gekrümmter Überfall Nr. 1.
 „ 20. „ „ „ Nr. 2.
 „ 21. Horizontale Ablenkung des Wassers in schmaler Rinne.
 „ 22. „ „ „ „ „ breiter „
 „ 23. Absenkung des Wasserspiegels in der Vertikalebene der Überfallkante in breiter Rinne.

Erklärungen zu den Tabellen.

Index 1 bezeichnet durchweg den Meßüberfall.

Zeichen mit anderem Index gelten für den Vergleichsüberfall.

Tabelle 1.

h_1 = Überfallhöhe in Millimeter

μ_1 = Ausflußkoeffizient der Dubuatschen Formel Gleichung (1), Seite 11.

Tabelle 2—20.

h = Überfallhöhe in Millimeter.

μ = Ausflußkoeffizient der Formel von Dubuat Gleichung (1), Seite 28.

μ_0 = " " " " Bazin " (8), " 41.

bzw. " (14), " 46.

μ_{Wex} = " " " " v. Wex " 56.

$\mu_{\text{Weisb.}}$ = " " " " Weisbach " (6), " 38.

K = Korrektionsglied zur Beseitigung des Einflusses der Zufußgeschwindigkeit.

$\left(\frac{c^2}{2g}\right)$ = Geschwindigkeitshöhe des Zufusses in Millimeter.

b_s = Länge der schiefen Überfallkante in Millimeter.

b_1 = Rinnenbreite in Millimeter.

p = Wehrhöhe in Millimeter.

α = Geschwindigkeitshöhenbeiwert.

Q = Sekundliche Abflußmenge in Kubikdezimeter.

ε = Winkel der Überfallkante mit der Rinnenachse in Grad.

Die letzten 4 (Tabelle 2 und 3) bzw. 3 (Tabelle 7—14) Kolonnen geben die Berechnungen nach dem neuen Eichungsergebnis des Meßüberfalles (siehe Nachtrag) wieder.

In Tabelle 2—13 bedeutet b_s für die schmale Rinne den in die Gleichung (14) einzuführenden Mittelwert: $\frac{3a_s + 2b_s}{5}$.

Tabelle 21—22.

φ = Winkel der Stromlinien gegen die Normale zur Überfallkante in Grad.

Tabelle 23.

Sämtliche Maße in Millimeter.

Atlas.

Verzeichnis der Tafeln.¹⁾

- Tafel 1. Versuchsanlage und Apparate.
- „ 2. Eichung des Meßüberfalles.
Ausflußkoeffizienten der Dubuatschen Formel Gleichung (1).
- „ 3. Ausflußkoeffizienten der Bazinschen Formel Gleichung (8) u. (14).
- „ 4, a—d Zusammenhängende Darstellung der Ausflußkoeffizienten.
- „ 5. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse nach den Formeln von Bazin.
- „ 6. Ausflußkoeffizienten nach der Formel von v. Wex.
- „ 7. Ausflußkoeffizienten nach der Formel von Weisbach Gleichung (6)
- „ 8. Zuflußgeschwindigkeit etc.
- „ 9. Ausflußkoeffizienten für gebrochene und gekrümmte Überfallwehre.
Horizontale Ablenkung der Stromlinien.
- „ 10. Strahlaufnahmen.

¹⁾ Vgl. Nachtrag.

Erklärungen zu den Tabellen.

Atlas.

Die Tabellen sind gewöhnlich in zwei

Zeilen gedruckt, die obere Zeile enthält die

Formeln der Tabellen.

Die

1. Tabelle enthält die Formeln der

2. Tabelle die Formeln der

3. Tabelle die Formeln der

4. Tabelle die Formeln der

5. Tabelle die Formeln der

6. Tabelle die Formeln der

7. Tabelle die Formeln der

8. Tabelle die Formeln der

9. Tabelle die Formeln der

10. Tabelle die Formeln der

Akademische Buchdruckerei von F. Straub in München.

Die

11. Tabelle die Formeln der

12. Tabelle die Formeln der

13. Tabelle die Formeln der

14. Tabelle die Formeln der

15. Tabelle die Formeln der

16. Tabelle die Formeln der

17. Tabelle die Formeln der

18. Tabelle die Formeln der

19. Tabelle die Formeln der

20. Tabelle die Formeln der

21. Tabelle die Formeln der

22. Tabelle die Formeln der

23. Tabelle die Formeln der

24. Tabelle die Formeln der

25. Tabelle die Formeln der

26. Tabelle die Formeln der

27. Tabelle die Formeln der

28. Tabelle die Formeln der

29. Tabelle die Formeln der

30. Tabelle die Formeln der

Tabelle 1.

Tabelle über die Eichung des Mess-Überfalles.

Lfd. Nr.	Anzahl der Beobacht.	h_1 in mm	μ'_1 (beobachtet)	μ_1 (berechnet)	$\mu'_1 - \mu_1 = \lambda$	λ in $\%$	$\lambda \cdot \lambda$	$\lambda \cdot \lambda \cdot g$
1	17	10,00	0,7105	0,7106	- 0,0001	0,01	0,0000	0,00000
2	5	13,88	0,6733	0,6736	- 0,0003	0,04	0,0000	0,00000
3	8	19,69	0,6543	0,6454	+ 0,0089	1,36	0,0008	0,00064
4	5	25,90	0,6191	0,6293	- 0,0102	1,65	0,0010	0,00050
5	12	30,71	0,6237	0,6213	+ 0,0024	0,39	0,0001	0,00012
6	7	35,75	0,6144	0,6152	- 0,0008	0,13	0,0000	0,00000
7	12	41,08	0,6080	0,6104	- 0,0024	0,39	0,0001	0,00012
8	8	45,30	0,6078	0,6074	+ 0,0004	0,07	0,0000	0,00000
9	12	50,95	0,5983	0,6041	- 0,0058	0,97	0,0003	0,00036
10	12	60,92	0,5974	0,5999	- 0,0025	0,42	0,0001	0,00012
11	4	66,30	0,6020	0,5981	+ 0,0039	0,65	0,0002	0,00008
12	15	70,91	0,5944	0,5968	- 0,0024	0,40	0,0001	0,00015
13	8	75,56	0,5897	0,5956	- 0,0059	1,00	0,0003	0,00024
14	30	80,91	0,5899	0,5945	- 0,0046	0,78	0,0002	0,00060
15	15	85,20	0,5942	0,5937	+ 0,0005	0,08	0,0000	0,00000
16	42	92,04	0,5923	0,5925	- 0,0002	0,03	0,0000	0,00000
17	36	102,57	0,5911	0,5910	+ 0,0001	0,02	0,0000	0,00000
18	34	112,97	0,5958	0,5898	+ 0,0060	1,00	0,0004	0,00136
19	22	122,84	0,5999	0,5889	+ 0,0110	1,80	0,0012	0,00264
20	24	131,89	0,5873	0,5882	- 0,0009	0,15	0,0000	0,00000
21	8	143,74	0,5878	0,5873	+ 0,0005	0,08	0,0000	0,00000
22	8	153,58	0,5847	0,5867	- 0,0020	0,34	0,0000	0,00000
23	8	164,23	0,5787	0,5862	- 0,0075	1,30	0,0006	0,00048
24	10	171,62	0,5817	0,5858	- 0,0041	0,69	0,0002	0,00020
25	2	194,37	0,5758	0,5849	- 0,0091	1,58	0,0008	0,00016
							0,00064	0,00777

Rechteckiger Überfall mit Seitenkontraktion $b = 500,1$ mm.

Normaler Überfall.
ε = 90°0'.

Schmale Rinne.

Tabelle 2.

Lfd. Nr.	h_1	μ_1	h	b_2	μ Dubuat	K	μ_0	μ Weibach	$(-)\Delta W_{\text{ex}}$	ΔW_{ex} in 0/0	$\frac{c^2}{\alpha} \frac{2}{g}$	μ Weibach	$\Delta W_{\text{Weibach}}$	$\Delta W_{\text{Weib.}}$ in 0/0	Berechnung nach dem neuen Eichungsergebnis		
															μ^1	μ^0	μ^{Wex}
1	5,4	0,8235	7,7	250,2	0,9667	1,0006	0,9661	0,9571	0,0090	0,9	0,003	0,9664	0,0003	0,03	0,824	0,967	0,957
2	9,9	0,7119	16,2	250,4	0,6798	1,0012	0,6784	0,6713	0,0071	1,1	0,013	0,6787	0,0003	0,04	0,712	0,679	0,671
3	13,4	0,6770	18,8	250,4	0,8136	1,0023	0,8118	0,7970	0,0148	1,9	0,029	0,8116	0,0002	0,02	0,677	0,814	0,797
4	16,5	0,6584	26,6	250,5	0,6432	1,0027	0,6404	0,6313	0,0091	1,4	0,047	0,6406	0,0002	0,03	0,664	0,646	0,637
5	19,0	0,6478	29,9	250,5	0,6574	1,0034	0,6551	0,6444	0,0107	1,7	0,069	0,6554	0,0003	0,05	0,656	0,666	0,652
6	23,4	0,6347	36,9	250,6	0,6396	1,0047	0,6366	0,6252	0,0114	1,8	0,117	0,6369	0,0003	0,05	0,646	0,651	0,636
7	27,0	0,6272	42,2	250,7	0,6403	1,0060	0,6365	0,6241	0,0124	2,0	0,169	0,6368	0,0003	0,05	0,640	0,653	0,636
8	31,0	0,6209	48,5	250,8	0,6327	1,0074	0,6280	0,6151	0,0129	2,1	0,239	0,6283	0,0003	0,05	0,633	0,645	0,628
9	34,5	0,6165	53,8	250,9	0,6311	1,0087	0,6256	0,6122	0,0134	2,2	0,314	0,6260	0,0004	0,06	0,629	0,644	0,624
10	37,9	0,6131	58,9	251,0	0,6305	1,0101	0,6242	0,6103	0,0139	2,3	0,398	0,6248	0,0006	0,09	0,625	0,643	0,621
11	41,4	0,6101	64,1	251,0	0,6357	1,0115	0,6238	0,6091	0,0147	2,4	0,496	0,6243	0,0005	0,08	0,622	0,643	0,620
12	46,4	0,6067	71,2	251,1	0,6310	1,0138	0,6230	0,6122	0,0148	2,4	0,659	0,6276	0,0006	0,10	0,618	0,648	0,613
13	51,2	0,6040	78,7	251,2	0,6310	1,0159	0,6211	0,6058	0,0153	2,5	0,838	0,6218	0,0007	0,11	0,615	0,643	0,615
14	53,9	0,6027	82,5	251,3	0,6334	1,0172	0,6227	0,6067	0,0160	2,6	0,951	0,6245	0,0008	0,13	0,614	0,645	0,617
15	56,7	0,6015	86,5	251,3	0,6353	1,0185	0,6237	0,6058	0,0179	2,9	1,076	0,6245	0,0008	0,13	0,612	0,647	0,617
16	61,5	0,5997	93,6	251,4	0,6354	1,0208	0,6224	0,6057	0,0167	2,8	1,308	0,6235	0,0011	0,15	0,610	0,647	0,613
17	66,7	0,5980	101,2	251,5	0,6363	1,0234	0,6217	0,6070	0,0147	2,4	1,587	0,6229	0,0012	0,19	0,609	0,648	0,613
18	71,6	0,5966	108,0	251,6	0,6401	1,0259	0,6240	0,6066	0,0174	2,8	1,879	0,6253	0,0013	0,21	0,607	0,652	0,616
19	76,8	0,5954	115,3	251,7	0,6431	1,0286	0,6252	0,6076	0,0176	2,8	2,217	0,6268	0,0016	0,26	0,606	0,655	0,616
20	80,5	0,5946	120,7	251,7	0,6435	1,0304	0,6245	0,6080	0,0165	2,7	2,471	0,6260	0,0015	0,24	0,605	0,655	0,616
21	86,9	0,5934	129,9	251,8	0,6448	1,0337	0,6238	0,6060	0,0178	2,9	3,014	0,6251	0,0013	0,21	0,604	0,656	0,615
22	98,4	0,5915	145,2	252,1	0,6546	1,0401	0,6294	0,6114	0,0166	2,8	3,347	0,6261	0,0020	0,32	0,603	0,658	0,615
23	101,2	0,5912	150,3	252,1	0,6480	1,0411	0,6284	0,6114	0,0180	2,9	3,921	0,6318	0,0024	0,35	0,602	0,666	0,620
24	107,8	0,5904	158,8	252,2	0,6548	1,0448	0,6264	0,6050	0,0174	2,8	4,151	0,6248	0,0024	0,39	0,601	0,659	0,620
25	110,7	0,5901	163,1	252,2	0,6543	1,0462	0,6254	0,6079	0,0175	2,8	4,795	0,6295	0,0028	0,45	0,600	0,667	0,618
26	114,6	0,5897	169,9	252,3	0,6468	1,0474	0,6175	0,6015	0,0160	2,6	5,442	0,6208	0,0033	0,53	0,600	0,665	0,616
27	120,2	0,5891	176,0	252,4	0,6585	1,0512	0,6264	0,6085	0,0179	2,9	6,086	0,6298	0,0034	0,54	0,599	0,670	0,617
28	125,4	0,5887	181,6	252,5	0,6690	1,0548	0,6343	0,6167	0,0176	2,8	6,720	0,6384	0,0041	0,65	0,599	0,680	0,625

$\rho = 243,5$; $K = \left[1 + \left(\sqrt{\frac{3}{g}} \mu \alpha \frac{3\alpha s + 2b_2}{5} \cdot h \cdot \frac{1}{F} \right)^2 \right]$ nach Gl. (14), Seite 46.

$\alpha = 1,0$; $b_2 =$ mittlere Breite: $\frac{3a_2 + 2b_2}{5}$ (in den folgenden Tabellen mit b_s bezeichnet).

Normaler Überfall.
 $\varepsilon = 90^{\circ} 0'$.

Breite Rinne.

Tabelle 3.

Lfd. Nr.	h_1	μ_1	h	μ Dubnat	K	μ_0	μ_{Wex}	$(-)\Delta W_{ex}$	ΔW_{ex} in $\%_0$	$\frac{c^2}{\alpha} \frac{1}{2g}$	$\mu_{Weisbach}$	$(+)\Delta W_{weib.}$	$\Delta W_{weib.}$ in $\%_0$	Berechnung nach dem neuen Eichungsergebnis			
														μ^1	μ^0 Dubnat	μ^0	$\mu^1 W_{ex}$
1	6.51	0.7817	6.29	0.8274	1.0008	0.8271	0.8212	0.0059	0.7	0.001	0.8274	0.0008	0.04	0.782	0.828	0.827	0.821
2	14.88	0.6708	14.00	0.7014	1.0009	0.7008	0.6932	0.0076	1.1	0.009	0.7010	0.0002	0.03	0.673	0.704	0.704	0.694
3	18.21	0.6509	17.90	0.6714	1.0014	0.6704	0.6569	0.0135	2.0	0.016	0.6707	0.0003	0.04	0.658	0.679	0.678	0.669
4	22.27	0.6376	21.99	0.6532	1.0019	0.6519	0.6430	0.0089	1.4	0.027	0.6522	0.0003	0.05	0.648	0.664	0.663	0.653
5	27.98	0.6255	27.60	0.6418	1.0027	0.6401	0.6299	0.0102	1.6	0.050	0.6403	0.0002	0.05	0.638	0.654	0.652	0.641
6	32.30	0.6184	32.54	0.6320	1.0036	0.6297	0.6190	0.0107	1.7	0.077	0.6300	0.0003	0.05	0.631	0.645	0.642	0.631
7	38.08	0.6129	37.27	0.6363	1.0046	0.6334	0.6211	0.0123	1.9	0.113	0.6337	0.0003	0.05	0.625	0.649	0.646	0.633
8	43.70	0.6084	42.65	0.6285	1.0062	0.6246	0.6110	0.0136	2.2	0.163	0.6249	0.0003	0.05	0.620	0.643	0.640	0.629
9	48.57	0.6054	47.88	0.6317	1.0068	0.6274	0.6119	0.0155	2.5	0.214	0.6277	0.0003	0.05	0.617	0.644	0.639	0.624
10	53.60	0.6028	52.05	0.6332	1.0080	0.6282	0.6133	0.0149	2.4	0.277	0.6286	0.0004	0.06	0.614	0.645	0.640	0.624
11	58.31	0.6008	56.59	0.6319	1.0091	0.6262	0.6106	0.0156	2.5	0.343	0.6264	0.0002	0.06	0.612	0.644	0.638	0.621
12	63.61	0.5989	61.91	0.6300	1.0105	0.6234	0.6073	0.0161	2.6	0.432	0.6240	0.0006	0.10	0.610	0.642	0.635	0.618
13	68.62	0.5974	66.44	0.6303	1.0117	0.6230	0.6063	0.0167	2.7	0.519	0.6236	0.0006	0.10	0.608	0.642	0.634	0.616
14	74.59	0.5959	72.45	0.6256	1.0132	0.6175	0.6004	0.0171	2.8	0.638	0.6181	0.0006	0.10	0.606	0.637	0.628	0.610
15	79.56	0.5948	77.12	0.6265	1.0146	0.6175	0.6000	0.0175	2.8	0.750	0.6182	0.0007	0.11	0.605	0.638	0.628	0.610
16	83.06	0.5941	80.36	0.6275	1.0156	0.6179	0.6001	0.0178	2.9	0.835	0.6187	0.0008	0.13	0.604	0.638	0.628	0.609
17	88.54	0.5931	85.67	0.6264	1.0171	0.6159	0.5977	0.0182	3.0	0.976	0.6167	0.0008	0.13	0.603	0.637	0.626	0.607
18	93.91	0.5922	90.44	0.6299	1.0187	0.6184	0.5992	0.0192	3.1	1.156	0.6193	0.0009	0.14	0.602	0.640	0.628	0.609
19	98.56	0.5915	94.66	0.6317	1.0201	0.6192	0.6000	0.0192	3.1	1.270	0.6203	0.0009	0.14	0.602	0.642	0.629	0.609
20	103.23	0.5909	99.00	0.6325	1.0215	0.6192	0.5992	0.0195	3.2	1.421	0.6204	0.0012	0.19	0.601	0.643	0.629	0.609
21	108.72	0.5903	104.09	0.6334	1.0232	0.6190	0.5992	0.0198	3.2	1.609	0.6203	0.0013	0.21	0.600	0.644	0.629	0.608
22	114.05	0.5897	109.14	0.6338	1.0248	0.6179	0.5979	0.0200	3.2	1.802	0.6195	0.0016	0.26	0.600	0.644	0.628	0.607
23	119.69	0.5892	114.11	0.6362	1.0266	0.6197	0.5994	0.0203	3.3	2.022	0.6213	0.0016	0.26	0.599	0.647	0.630	0.608
24	124.57	0.5887	118.68	0.6364	1.0281	0.6190	0.5985	0.0205	3.3	2.219	0.6206	0.0016	0.26	0.598	0.647	0.629	0.607
25	130.66	0.5882	124.40	0.6364	1.0299	0.6179	0.5974	0.0205	3.3	2.479	0.6198	0.0019	0.31	0.598	0.647	0.629	0.606
26	134.52	0.5880	128.72	0.6315	1.0308	0.6126	0.5925	0.0201	3.3	2.631	0.6145	0.0019	0.31	0.598	0.642	0.622	0.601
27	139.74	0.5876	133.14	0.6351	1.0326	0.6151	0.5945	0.0206	3.4	2.891	0.6170	0.0021	0.31	0.598	0.646	0.625	0.603
28	145.85	0.5872	138.81	0.6358	1.0344	0.6146	0.5939	0.0207	3.4	3.187	0.6167	0.0021	0.34	0.597	0.647	0.625	0.603
29	149.63	0.5870	142.67	0.6338	1.0354	0.6121	0.5916	0.0205	3.3	3.370	0.6142	0.0021	0.34	0.597	0.645	0.622	0.600
30	155.03	0.5867	147.61	0.6348	1.0371	0.6121	0.5916	0.0205	3.3	3.653	0.6144	0.0023	0.38	0.597	0.646	0.622	0.600
31	160.57	0.5864	152.08	0.6395	1.0391	0.6155	0.5945	0.0210	3.4	3.965	0.6180	0.0025	0.41	0.596	0.650	0.625	0.603
32	167.93	0.5860	158.99	0.6395	1.0413	0.6141	0.5932	0.0209	3.4	4.377	0.6165	0.0027	0.44	0.596	0.650	0.625	0.602

$$p = 249,5 \text{ mm}; \quad b_2 = 497,5 \text{ mm.} \quad K = \left[1 + \frac{1}{8} \mu^2 \alpha \left(\frac{1}{\sin \varepsilon} \cdot \frac{h}{h+p} \right)^2 \right] \text{ nach Gl. (8), Seite 41.}$$

$\alpha = 1,0$

Versuche von Hansen am normalen Überfall.

Aus der Zeitschrift d. Ver. deutsch. Ingen. Bd. 36. S. 1095.

Lfd. Nr.	h	Q	μ_{Dubuat}	$K_{\text{Gl. (8) nach}}$	μ_0	μ_{Wex}	ΔW_{ex}	ΔW_{ex} in $\frac{0}{10}$	$\alpha \frac{c^2}{2g}$	μ_{Weisbach}	$\Delta W_{\text{Weisbach}}$	$\Delta W_{\text{Weisb.}}$ in $\frac{0}{10}$
1	51,4	22,909	0,6150	1,0026	0,6134	0,6054	—	0,0080	1,3	0,088	0,6135	+ 0,0001
2	82,3	46,971	0,6224	1,0061	0,6186	0,6072	—	0,0114	1,8	0,332	0,6187	+ 0,0001
3	129,7	98,690	0,6275	1,0131	0,6193	0,6047	—	0,0146	2,4	1,133	0,6198	+ 0,0005
4	168,4	139,832	0,6330	1,0200	0,6206	0,6044	—	0,0162	2,6	2,246	0,6215	+ 0,0009
5	204,2	188,004	0,6374	1,0269	0,6207	0,6088	—	0,0169	2,7	3,666	0,6220	+ 0,0013

 $p = 514,0$ mm; $b_1 = 1082,5$ mm; $\alpha = 1,23$.

Versuche von Bazin am normalen Überfall.

Aus: Ann. d. Ponts et Chaussées 1888. Tome 16. P. 426. Série No. 10.

Lfd. Nr.	h	$(\frac{2}{3}\mu)$	μ_{Dubuat}	$K_{\text{Gl. (8) nach}}$	μ_0
1	90,4	0,4454	0,6681	1,0223	0,6585
2	98,1	0,4491	0,6796	1,0255	0,6569
3	102,6	0,4411	0,6617	1,0262	0,6448
4	110,3	0,4446	0,6669	1,0294	0,6478
5	119,3	0,4484	0,6726	1,0333	0,6509
6	128,5	0,4528	0,6792	1,0374	0,6547
7	133,1	0,4482	0,6880	1,0384	0,6474
8	140,6	0,4503	0,6912	1,0415	0,6485
9	147,7	0,4544	0,6816	1,0450	0,6522
10	156,5	0,4548	0,6822	1,0483	0,6507
11	163,1	0,4580	0,6795	1,0504	0,6469
12	170,3	0,4524	0,6786	1,0529	0,6445
13	179,0	0,4573	0,6859	1,0573	0,6488
14	190,1	0,4589	0,6883	1,0617	0,6483
15	196,6	0,4623	0,6934	1,0650	0,6511
16	201,7	0,4613	0,6919	1,0666	0,6487

 $p = 240,0$ mm; $b_1 = 1997,0$ mm; $\alpha = 1,0$.

Schmale Rinne.

Schiefer Überfall.
 $\varepsilon = 75^{\circ} 17'.$

Lfd. Nr.	h_1	μ_1	h	b_s	μ Dubuat	$K_{Gl. (14)}$	μ_0	μ_{Wex}	$(-)\Delta W_{ex}$	ΔW_{ex} in $\%_0$	$\alpha \frac{c^2}{2g}$	μ Weisbach	Δ Weisbach	Δ Weisb. in $\%_0$	Berechnung n. d. neuen Eichungsergebnis	
															μ'	μ' Dubuat
1	8,9	0,7270	14,2	259,0	0,6965	1,0010	0,6958	0,6894	0,0064	0,9	0,009	0,6959	0,0001	0,01	0,727	0,697
2	11,3	0,6954	18,6	259,1	0,6356	1,0014	0,6347	0,6284	0,0063	1,0	0,018	0,6348	0,0001	0,02	0,695	0,635
3	14,0	0,6728	22,2	259,2	0,6501	1,0020	0,6488	0,6414	0,0074	1,1	0,030	0,6490	0,0002	0,03	0,676	0,659
4	18,2	0,6509	28,4	259,2	0,6443	1,0031	0,6423	0,6333	0,0090	1,4	0,060	0,6424	0,0001	0,02	0,659	0,650
5	22,8	0,6362	35,6	259,3	0,6289	1,0045	0,6261	0,6166	0,0097	1,6	0,106	0,6264	0,0003	0,05	0,647	0,640
6	26,9	0,6274	41,5	259,4	0,6312	1,0059	0,6275	0,6166	0,0109	1,7	0,163	0,6278	0,0003	0,05	0,640	0,637
7	31,8	0,6198	49,2	259,6	0,6204	1,0076	0,6158	0,6046	0,0112	1,8	0,249	0,6162	0,0004	0,06	0,640	0,643
8	35,4	0,6155	54,3	259,6	0,6242	1,0090	0,6186	0,6064	0,0122	2,0	0,327	0,6190	0,0004	0,06	0,632	0,638
9	39,2	0,6119	61,0	259,7	0,6212	1,0108	0,6145	0,6020	0,0125	2,0	0,440	0,6151	0,0006	0,10	0,624	0,633
10	43,1	0,6088	65,7	259,8	0,6229	1,0122	0,6154	0,6021	0,0133	2,2	0,537	0,6159	0,0005	0,08	0,621	0,635
11	49,2	0,6050	75,5	259,9	0,6124	1,0146	0,6036	0,5906	0,0130	2,2	0,741	0,6042	0,0006	0,10	0,616	0,624
12	54,8	0,6023	83,2	260,0	0,6193	1,0174	0,6087	0,5949	0,0138	2,3	0,968	0,6094	0,0007	0,11	0,613	0,631
13	58,9	0,6006	89,4	260,1	0,6176	1,0192	0,6059	0,5921	0,0138	2,3	1,152	0,6069	0,0010	0,11	0,612	0,629
14	64,0	0,5988	96,7	260,2	0,6196	1,0217	0,6065	0,5924	0,0141	2,3	1,408	0,6177	0,0012	0,20	0,610	0,631
15	71,3	0,5967	106,8	260,3	0,6251	1,0254	0,6096	0,5952	0,0144	2,4	1,824	0,6110	0,0014	0,23	0,607	0,631
16	75,3	0,5957	113,3	260,4	0,6199	1,0271	0,6035	0,5905	0,0130	2,5	2,065	0,6050	0,0015	0,25	0,606	0,620
17	80,0	0,5947	118,9	260,4	0,6304	1,0299	0,6131	0,5966	0,0155	2,5	2,390	0,6137	0,0016	0,26	0,605	0,613
18	84,1	0,5939	125,3	260,5	0,6269	1,0318	0,6076	0,5925	0,0151	2,5	2,678	0,6093	0,0017	0,28	0,605	0,641
19	91,2	0,5926	135,5	260,7	0,6277	1,0353	0,6063	0,5920	0,0143	2,4	3,222	0,6083	0,0020	0,33	0,603	0,638
20	95,5	0,5920	142,0	260,8	0,6261	1,0373	0,6035	0,5894	0,0141	2,3	3,570	0,6057	0,0022	0,36	0,602	0,637
21	100,7	0,5913	148,7	260,9	0,6317	1,0403	0,6072	0,5933	0,0139	2,3	4,018	0,6097	0,0025	0,41	0,602	0,643
22	103,6	0,5909	152,8	261,0	0,6321	1,0418	0,6067	0,5929	0,0138	2,3	4,239	0,6094	0,0027	0,45	0,601	0,643
23	109,1	0,5903	160,5	261,1	0,6336	1,0446	0,6066	0,5917	0,0149	2,4	4,823	0,6093	0,0027	0,45	0,600	0,644
24	116,2	0,5895	170,7	261,2	0,6339	1,0480	0,6049	0,5900	0,0149	2,5	5,533	0,6079	0,0030	0,50	0,599	0,645

$$p = 247,8 \text{ mm}; \quad K = \left[1 + \left(\sqrt{\frac{3}{8}} \mu \alpha \frac{3\alpha s + 2b_s}{5} h \cdot \frac{1}{l'} \right)^2 \right]$$

$$\alpha = 1,0; \quad b_s = \frac{3\alpha s + 2b_s}{5}$$

Lfd. Nr.	h_1	μ_1	h	μ Dabnat	K nach Gl. (8)	μ_0	μ_{Wex}	$(-)\Delta W_{\text{ex}}$ in $^{\circ}/_0$	ΔW_{ex} in $^{\circ}/_0$	$\frac{c^2}{2g}$	μ_{Weisbach}	$(+)\Delta W_{\text{Weisb.}}$	$\Delta W_{\text{Weisb.}}$ in $^{\circ}/_0$	Berechnung d. neuen Eichungsergebnis	
														μ'	μ' Dabnat
1	7,83	0,7473	7,59	0,7599	1,0004	0,7596	0,7588	0,0058	0,8	0,002	0,7596	0,0000	0,00	0,747	0,760
2	13,73	0,6746	13,42	0,6775	1,0008	0,6770	0,6711	0,0059	0,9	0,007	0,6771	0,0001	0,02	0,678	0,680
3	19,02	0,6478	18,55	0,6379	1,0013	0,6371	0,6307	0,0064	1,0	0,018	0,6374	0,0003	0,05	0,656	0,638
4	22,99	0,6357	22,17	0,6515	1,0020	0,6502	0,6425	0,0077	1,2	0,029	0,6506	0,0004	0,06	0,646	0,662
5	26,85	0,6275	25,89	0,6431	1,0025	0,6415	0,6325	0,0090	1,4	0,044	0,6419	0,0004	0,06	0,640	0,649
6	33,97	0,6171	32,83	0,6304	1,0037	0,6280	0,6174	0,0106	1,7	0,081	0,6285	0,0005	0,08	0,630	0,643
7	39,46	0,6114	38,11	0,6255	1,0048	0,6225	0,6113	0,0112	1,8	0,121	0,6230	0,0005	0,08	0,624	0,641
8	44,65	0,6078	42,88	0,6268	1,0059	0,6231	0,6113	0,0118	1,9	0,168	0,6232	0,0001	0,02	0,619	0,639
9	49,94	0,6046	47,91	0,6245	1,0070	0,6201	0,6070	0,0131	2,1	0,224	0,6206	0,0005	0,08	0,616	0,636
10	54,31	0,6025	52,31	0,6186	1,0080	0,6137	0,6002	0,0135	2,2	0,278	0,6142	0,0005	0,08	0,614	0,630
11	60,01	0,6002	57,34	0,6236	1,0094	0,6178	0,6035	0,0143	2,3	0,345	0,6182	0,0004	0,06	0,611	0,635
12	63,87	0,5989	61,29	0,6183	1,0103	0,6120	0,5973	0,0147	2,4	0,422	0,6123	0,0003	0,05	0,610	0,630
13	69,37	0,5972	66,41	0,6188	1,0118	0,6116	0,5964	0,0152	2,5	0,521	0,6123	0,0007	0,11	0,608	0,622
14	74,86	0,5958	71,99	0,6132	1,0131	0,6052	0,5898	0,0154	2,5	0,629	0,6057	0,0005	0,08	0,606	0,624
15	79,74	0,5947	76,07	0,6194	1,0146	0,6105	0,5943	0,0162	2,7	0,739	0,6109	0,0004	0,07	0,605	0,630
16	85,74	0,5936	81,89	0,6172	1,0162	0,6073	0,5909	0,0164	2,7	0,884	0,6080	0,0007	0,12	0,604	0,628
17	88,79	0,5930	85,06	0,6137	1,0169	0,6035	0,5870	0,0165	2,7	0,961	0,6089	0,0004	0,07	0,603	0,624
18	94,49	0,5921	90,39	0,6143	1,0186	0,6030	0,5863	0,0174	2,8	1,120	0,6038	0,0008	0,13	0,602	0,623
19	100,29	0,5913	95,27	0,6198	1,0204	0,6074	0,5900	0,0174	2,9	1,298	0,6082	0,0008	0,13	0,601	0,630
20	104,45	0,5908	99,29	0,6186	1,0216	0,6056	0,5882	0,0174	2,9	1,431	0,6066	0,0010	0,17	0,601	0,629
21	105,27	0,5907	104,12	0,5828	1,0205	0,5711	0,5640	0,0171	3,0	1,426	0,5723	0,0012	0,21	0,601	0,593
22	114,32	0,5897	107,24	0,6299	1,0250	0,6146	0,5962	0,0184	3,0	1,789	0,6137	0,0017	0,28	0,600	0,641
23	122,16	0,5890	114,48	0,6301	1,0274	0,6133	0,5946	0,0187	3,1	2,092	0,6147	0,0017	0,28	0,598	0,641
24	126,63	0,5886	119,10	0,6263	1,0286	0,6088	0,5904	0,0184	3,0	2,270	0,6105	0,0017	0,28	0,598	0,637
25	130,70	0,5882	122,62	0,6282	1,0299	0,6100	0,5914	0,0186	3,1	2,446	0,6116	0,0016	0,26	0,598	0,639
26	136,90	0,5878	128,05	0,6306	1,0319	0,6111	0,5922	0,0189	3,1	2,727	0,6126	0,0015	0,25	0,598	0,641
27	139,75	0,5876	131,12	0,6275	1,0326	0,6077	0,5891	0,0186	3,1	2,854	0,6097	0,0020	0,33	0,598	0,638
28	145,96	0,5872	137,70	0,6219	1,0342	0,6014	0,5833	0,0181	3,0	3,139	0,6084	0,0020	0,33	0,597	0,633
29	146,36	0,5872	141,52	0,6394	1,0359	0,5803	0,5621	0,0182	3,0	3,104	0,5823	0,0020	0,34	0,597	0,610
30	154,70	0,5867	144,39	0,6392	1,0374	0,6145	0,5898	0,0189	3,1	3,606	0,6109	0,0022	0,36	0,597	0,642
31	161,52	0,5863	149,47	0,6392	1,0401	0,6145	0,5949	0,0196	3,2	3,995	0,6166	0,0021	0,34	0,596	0,650
32	164,88	0,5861	153,89	0,6308	1,0405	0,6063	0,5877	0,0186	3,1	4,156	0,6088	0,0025	0,41	0,596	0,641
33	160,70	0,5863	152,28	0,6169	1,0382	0,5942	0,5765	0,0177	3,0	3,881	0,5972	0,0030	0,50	0,596	0,627
34	170,79	0,5859	157,90	0,6396	1,0430	0,6133	0,5946	0,0187	3,1	4,527	0,6161	0,0028	0,45	0,596	0,650

$$p = 254,1 \text{ mm}; \quad b_s = 515,3 \text{ mm}; \quad K = \left[1 + \frac{1}{8} \mu^2 \alpha \left(\frac{1}{\sin \varepsilon} \cdot \frac{h}{(h+p)} \right)^2 \right]$$

$$\alpha = 1,0; \quad b_2 = 497,5 \text{ mm};$$

Schiefer Überfall.
 $\varepsilon = 59^{\circ} 45'$.

Schmale Rinne.

Tabelle 9.

Lfd. Nr.	h_1	μ_1	h	b_s	μ_{Dubuat}	$K_{\text{Gl. (14)}}$	μ_0	μ_{Wex}	$(-)\Delta_{\text{Wex}}$ in 0/0	Δ_{Wex} in 0/0	μ_{Weisbach}	Δ_{Weisbach}	$\Delta_{\text{Weisb.}}$ in 0/0	Berechnung n. d. neuen Eichungsergebnis		
														μ_1	μ_0	
1	5,8	0,8066	7,7	289,6	0,9106	1,0007	0,9100	0,9106	+0,0006	0,1	0,004	0,9101	0,0001	0,01	0,807	0,911
2	9,6	0,7161	13,9	289,8	0,7093	1,0013	0,7084	0,7014	0,0070	0,9	0,012	0,7085	0,0001	0,01	0,716	0,709
3	14,5	0,6695	21,1	289,9	0,6880	1,0025	0,6865	0,6486	0,0077	1,2	0,035	0,6865	0,0002	0,03	0,672	0,661
4	18,8	0,6486	27,3	290,0	0,6392	1,0037	0,6369	0,6283	0,0086	1,4	0,068	0,6371	0,0002	0,03	0,656	0,659
5	23,1	0,6355	33,2	290,1	0,6417	1,0053	0,6383	0,6298	0,0095	1,6	0,116	0,6385	0,0002	0,03	0,646	0,644
6	28,1	0,6253	40,6	290,2	0,6203	1,0070	0,6159	0,6083	0,0096	1,8	0,191	0,6162	0,0003	0,05	0,638	0,643
7	30,8	0,6211	44,5	290,3	0,6161	1,0081	0,6112	0,6011	0,0101	1,7	0,242	0,6115	0,0003	0,05	0,634	0,628
8	35,3	0,6156	51,0	290,3	0,6107	1,0100	0,6046	0,5942	0,0104	1,7	0,342	0,6050	0,0004	0,07	0,628	0,623
9	38,8	0,6123	55,8	290,4	0,6114	1,0116	0,6044	0,5936	0,0108	1,8	0,434	0,6049	0,0005	0,08	0,624	0,616
10	42,8	0,6091	61,6	290,5	0,6073	1,0135	0,5992	0,5884	0,0108	1,8	0,555	0,5997	0,0005	0,08	0,621	0,611
11	46,3	0,6067	66,4	290,6	0,6077	1,0152	0,5986	0,5879	0,0107	1,8	0,676	0,5994	0,0008	0,13	0,618	0,609
12	52,1	0,6035	74,6	290,7	0,6060	1,0181	0,5952	0,5845	0,0107	1,8	0,905	0,5960	0,0008	0,13	0,615	0,606
13	55,8	0,6019	80,2	290,8	0,6007	1,0198	0,5891	0,5784	0,0108	1,8	1,068	0,5900	0,0009	0,15	0,613	0,611
14	61,8	0,5995	88,2	290,9	0,6045	1,0232	0,5908	0,5800	0,0108	1,8	1,371	0,5919	0,0011	0,19	0,610	0,601
15	67,1	0,5979	95,7	291,1	0,6030	1,0260	0,5878	0,5774	0,0104	1,8	1,668	0,5892	0,0014	0,24	0,609	0,601
16	70,6	0,5969	100,6	291,1	0,6029	1,0279	0,5865	0,5762	0,0103	1,8	1,882	0,5880	0,0015	0,26	0,608	0,614
17	75,6	0,5956	107,7	291,2	0,6015	1,0305	0,5837	0,5738	0,0099	1,7	2,208	0,5854	0,0017	0,29	0,606	0,597
18	80,8	0,5945	115,6	291,3	0,5964	1,0331	0,5773	0,5680	0,0093	1,6	2,570	0,5790	0,0017	0,30	0,605	0,593
19	85,5	0,5936	120,8	291,5	0,6064	1,0363	0,5852	0,5759	0,0093	1,6	2,949	0,5873	0,0021	0,36	0,604	0,587
20	89,7	0,5929	126,0	291,5	0,6110	1,0390	0,5880	0,5787	0,0093	1,6	3,303	0,5903	0,0023	0,39	0,603	0,597
21	91,0	0,5927	130,1	291,5	0,5948	1,0385	0,5728	0,5644	0,0094	1,5	3,670	0,5752	0,0024	0,42	0,603	0,582
22	94,8	0,5921	135,3	291,6	0,5956	1,0406	0,5724	0,5643	0,0081	1,4	3,615	0,5749	0,0025	0,44	0,602	0,582
23	98,8	0,5915	140,5	291,7	0,5980	1,0430	0,5733	0,5656	0,0077	1,3	4,067	0,5758	0,0025	0,44	0,601	0,580
24	101,9	0,5911	145,1	291,8	0,6025	1,0448	0,5708	0,5635	0,0073	1,3	4,351	0,5738	0,0025	0,44	0,601	0,580
25	108,1	0,5904	152,7	291,9	0,6025	1,0484	0,5747	0,5677	0,0070	1,2	4,985	0,5776	0,0029	0,50	0,600	0,588
26	113,8	0,5897	161,2	292,0	0,5990	1,0511	0,5699	0,5637	0,0062	1,1	5,561	0,5730	0,0031	0,54	0,600	0,580
27	117,8	0,5894	165,9	292,1	0,6038	1,0538	0,5730	0,5671	0,0059	1,0	6,022	0,5763	0,0033	0,57	0,599	0,581
28	124,0	0,5888	174,7	292,3	0,6024	1,0569	0,5700	0,5650	0,0050	0,9	6,717	0,5735	0,0035	0,61	0,598	0,578

$p = 243,5 \text{ mm}$;

$\alpha = 1,0$.

Lfd. Nr.	h_1	μ_1	h	b_s	μ Dubuat	$K_{GL(1+)}$ nach	μ_0	μ Wex	$\pm \Delta W_{ex}$	ΔW_{ex} in 0/0	$\frac{\alpha}{2g} c^2$	μ Weisbach Δ Weisbach	$\Delta W_{eish.}$ in 0/0	Berechnung n.d. neuen Eichungsergebnis			
														μ_1	μ Dubuat	μ_0	
1	7,4	0,7572	8,3	359,2	0,7049	1,0012	0,7041	0,7003	-0,0088	0,5	0,004	0,7044	0,0003	0,04	0,757	0,705	0,704
2	10,8	0,7008	13,3	359,4	0,7135	1,0024	0,7122	0,7060	-0,0062	0,9	0,017	0,7125	0,0003	0,04	0,701	0,714	0,712
3	12,8	0,6816	16,1	359,4	0,6723	1,0029	0,6707	0,6649	-0,0058	0,9	0,026	0,6710	0,0003	0,04	0,682	0,672	0,671
4	16,4	0,6589	20,2	359,4	0,6707	1,0029	0,6687	0,6616	-0,0071	1,1	0,049	0,6690	0,0003	0,04	0,664	0,676	0,675
5	20,7	0,6421	25,8	359,5	0,6419	1,0052	0,6386	0,6314	-0,0072	1,1	0,090	0,6389	0,0003	0,05	0,652	0,651	0,648
6	23,8	0,6338	29,8	359,7	0,6289	1,0065	0,6249	0,6179	-0,0070	1,1	0,129	0,6252	0,0003	0,05	0,644	0,639	0,635
7	27,1	0,6270	34,1	359,8	0,6174	1,0079	0,6126	0,6057	-0,0069	1,1	0,181	0,6180	0,0004	0,06	0,639	0,629	0,624
8	30,6	0,6214	38,7	359,8	0,6073	1,0095	0,6015	0,5946	-0,0069	1,1	0,248	0,6019	0,0004	0,07	0,634	0,619	0,613
9	33,9	0,6172	42,9	359,9	0,6025	1,0112	0,5958	0,5889	-0,0069	1,2	0,332	0,5963	0,0005	0,08	0,630	0,615	0,608
10	36,7	0,6142	46,3	360,0	0,6022	1,0127	0,5946	0,5878	-0,0068	1,1	0,395	0,5952	0,0006	0,10	0,627	0,614	0,606
11	40,3	0,6110	50,8	360,1	0,5996	1,0147	0,5909	0,5843	-0,0066	1,1	0,501	0,5915	0,0006	0,10	0,623	0,611	0,602
12	44,7	0,6077	57,7	360,2	0,5753	1,0167	0,5659	0,5604	-0,0055	1,0	0,646	0,5666	0,0007	0,12	0,620	0,587	0,577
13	50,4	0,6044	64,2	360,3	0,5835	1,0204	0,5719	0,5664	-0,0055	1,0	0,878	0,5728	0,0009	0,16	0,616	0,595	0,582
14	54,1	0,6026	69,7	360,5	0,5816	1,0223	0,5592	0,5550	-0,0042	0,8	1,042	0,5602	0,0010	0,18	0,614	0,582	0,569
15	58,8	0,6006	74,7	360,6	0,5817	1,0257	0,5671	0,5628	-0,0043	0,8	1,287	0,5684	0,0013	0,23	0,611	0,592	0,577
16	60,8	0,5999	77,9	360,6	0,5737	1,0266	0,5588	0,5549	-0,0039	0,7	1,392	0,5603	0,0015	0,27	0,610	0,583	0,568
17	67,7	0,5978	85,3	360,7	0,5821	1,0314	0,5644	0,5611	-0,0033	0,6	1,799	0,5660	0,0016	0,28	0,608	0,592	0,573
18	72,1	0,5965	91,4	360,9	0,5791	1,0344	0,5598	0,5573	-0,0025	0,4	2,449	0,5616	0,0018	0,32	0,607	0,589	0,569
19	76,7	0,5954	97,2	361,0	0,5782	1,0375	0,5572	0,5555	-0,0017	0,3	2,821	0,5593	0,0021	0,38	0,606	0,588	0,566
20	81,8	0,5943	104,2	361,1	0,5725	1,0406	0,5501	0,5493	-0,0008	0,1	3,249	0,5524	0,0023	0,42	0,604	0,582	0,559
21	86,8	0,5934	111,3	361,3	0,5657	1,0435	0,5421	0,5426	-0,0003	0,1	3,727	0,5446	0,0025	0,46	0,603	0,575	0,550
22	92,3	0,5925	119,3	361,4	0,5580	1,0466	0,5332	0,5346	-0,0014	0,3	4,164	0,5358	0,0026	0,49	0,602	0,567	0,541
23	96,8	0,5918	124,7	361,5	0,5599	1,0496	0,5335	0,5356	-0,0021	0,4	4,661	0,5324	0,0030	0,53	0,602	0,569	0,542
24	101,8	0,5911	131,4	361,7	0,5573	1,0527	0,5294	0,5326	-0,0021	0,4	5,198	0,5318	0,0033	0,57	0,602	0,567	0,538
25	106,8	0,5905	137,6	361,8	0,5582	1,0561	0,5285	0,5326	-0,0041	0,8	5,775	0,5292	0,0036	0,62	0,601	0,568	0,537
26	112,0	0,5899	144,4	361,9	0,5568	1,0594	0,5256	0,5306	-0,0050	0,9	6,141	0,5252	0,0037	0,68	0,600	0,563	0,529
27	115,3	0,5896	149,2	362,0	0,5563	1,0611	0,5215	0,5272	-0,0057	1,1	6,503	0,5268	0,0040	0,76	0,599	0,565	0,531
28	118,2	0,5893	152,4	362,1	0,5559	1,0633	0,5228	0,5291	-0,0073	1,2	7,045	0,5202	0,0041	0,80	0,599	0,569	0,524
29	122,9	0,5889	159,5	362,2	0,5560	1,0655	0,5161	0,5234	-0,0073	1,4	7,511	0,5143	0,0041	0,80	0,599	0,569	0,524
30	126,9	0,5885	165,7	362,3	0,5444	1,0672	0,5102	0,5177	-0,0075	1,5			0,0041	0,80	0,599	0,569	0,524

$p = 243,5 \text{ mm}$;

$\alpha = 1,0$.

Breite Rinne.

Lfd. Nr.	h ₁	μ ₁	h	μ _{Dubnat}	K _{nach Gl. (8)}	μ ₀	μ _{W_{ex}}	(-)ΔW _{ex} in 0/0	ΔW _{ex} α c ² / 2 g in 0/0	μ _{W_{eisbach}}	(+)ΔW _{eisb.}	ΔW _{eisb.} in 0/3	Berechnung n.d. neuen Eichungsergebnis	
													μ' ₁	μ' ₀
1	8,72	0,7801	7,04	0,7275	1,0005	0,7271	0,7234	0,0037	0,5	0,002	0,7272	0,0001	0,730	0,728
2	14,24	0,6712	11,11	0,6881	1,0011	0,6874	0,6837	0,0037	0,5	0,009	0,6876	0,0002	0,674	0,690
3	19,80	0,6450	15,25	0,6740	1,0021	0,6726	0,6679	0,0047	0,7	0,020	0,6729	0,0003	0,654	0,682
4	23,01	0,6357	17,93	0,6528	1,0025	0,6512	0,6446	0,0066	1,0	0,030	0,6513	0,0001	0,646	0,663
5	29,17	0,6235	22,45	0,6523	1,0038	0,6498	0,6422	0,0076	1,2	0,058	0,6500	0,0002	0,636	0,663
6	38,82	0,6122	30,30	0,6271	1,0061	0,6233	0,6152	0,0081	1,3	0,124	0,6236	0,0003	0,624	0,656
7	43,65	0,6085	34,29	0,6173	1,0074	0,6128	0,6046	0,0082	1,3	0,169	0,6131	0,0003	0,620	0,625
8	49,16	0,6051	38,61	0,6141	1,0090	0,6086	0,6002	0,0084	1,4	0,232	0,6090	0,0004	0,616	0,620
9	53,09	0,6031	41,66	0,6129	1,0102	0,6067	0,5981	0,0086	1,4	0,284	0,6071	0,0004	0,614	0,617
10	58,94	0,6006	46,15	0,6123	1,0121	0,6050	0,5962	0,0088	1,5	0,373	0,6056	0,0006	0,611	0,623
11	64,25	0,5987	50,45	0,6078	1,0139	0,5995	0,5908	0,0087	1,5	0,467	0,6001	0,0006	0,609	0,615
12	69,56	0,5972	54,55	0,6074	1,0158	0,5980	0,5893	0,0087	1,5	0,574	0,5987	0,0007	0,608	0,608
13	74,36	0,5959	58,17	0,6084	1,0176	0,5978	0,5891	0,0087	1,5	0,682	0,5987	0,0009	0,606	0,618
14	79,38	0,5948	61,51	0,6159	1,0197	0,6040	0,5951	0,0089	1,5	0,809	0,6050	0,0010	0,605	0,614
15	84,31	0,5938	66,49	0,5989	1,0221	0,5865	0,5784	0,0081	1,4	0,936	0,5875	0,0010	0,604	0,609
16	88,30	0,5931	69,95	0,5942	1,0225	0,5811	0,5733	0,0078	1,3	1,050	0,5823	0,0012	0,603	0,596
17	94,71	0,5921	74,73	0,5967	1,0252	0,5821	0,5745	0,0076	1,3	1,254	0,5834	0,0013	0,602	0,590
18	99,14	0,5915	78,13	0,5972	1,0270	0,5815	0,5742	0,0073	1,3	1,506	0,5829	0,0014	0,602	0,591
19	105,33	0,5907	83,11	0,5953	1,0294	0,5783	0,5713	0,0070	1,2	1,632	0,5799	0,0016	0,601	0,588
20	109,23	0,5902	86,29	0,5937	1,0310	0,5759	0,5692	0,0067	1,2	1,782	0,5776	0,0017	0,601	0,586
21	114,39	0,5897	90,70	0,5900	1,0329	0,5712	0,5650	0,0062	1,1	1,932	0,5730	0,0018	0,600	0,581
22	120,22	0,5891	94,92	0,5881	1,0356	0,5727	0,5669	0,0058	1,0	2,252	0,5748	0,0021	0,599	0,582
23	125,41	0,5887	99,16	0,5915	1,0377	0,5700	0,5646	0,0054	0,9	2,490	0,5722	0,0022	0,598	0,577
24	131,02	0,5882	103,59	0,5910	1,0400	0,5683	0,5633	0,0050	0,9	2,765	0,5706	0,0023	0,598	0,577
25	135,15	0,5879	107,16	0,5882	1,0416	0,5647	0,5601	0,0046	0,8	2,971	0,5672	0,0025	0,598	0,574
26	140,13	0,5876	110,50	0,5928	1,0441	0,5677	0,5635	0,0043	0,7	3,249	0,5704	0,0027	0,598	0,575
27	145,74	0,5872	114,90	0,5925	1,0465	0,5662	0,5624	0,0038	0,7	3,563	0,5691	0,0029	0,598	0,575
28	151,20	0,5869	119,79	0,5879	1,0484	0,5607	0,5577	0,0030	0,5	3,870	0,5638	0,0031	0,597	0,570
29	155,35	0,5866	122,37	0,5927	1,0507	0,5644	0,5613	0,0028	0,4	4,195	0,5674	0,0033	0,597	0,573
30	161,60	0,5863	126,97	0,5946	1,0536	0,5614	0,5622	0,0022	0,4	4,538	0,5679	0,0035	0,597	0,573
31	166,13	0,5861	130,99	0,5946	1,0552	0,5604	0,5587	0,0017	0,3	4,825	0,5640	0,0036	0,596	0,570
32	169,75	0,5859	133,30	0,5947	1,0572	0,5626	0,5612	0,0014	0,2	5,082	0,5664	0,0038	0,596	0,571

p = 252,0 mm; b_s = 708,0 mm.

α = 1,0; b₁ = 437,5 mm.

Schmale Rinne.

Lfd. Nr.	h_1	μ_1	h	b_s	μ Dubuat	\bar{K} Gl. (14)	μ_0	μ Wex	$\pm \Delta$ Wex	Δ Wex in 0/0	$\frac{c^2}{a \frac{2g}{}}$	μ Weisbach	Δ Weisbach	Berechnung n.d. neuen Eichungsergebnis		
														μ'	μ' Dubuat	μ' 0
1	5,6	0,8147	4,1	494,1	1,3160	1,0012	1,3150	1,3002	-0,0148	1,5	0,003	1,3150	0,0000	0,815	1,316	1,315
2	8,8	0,7287	8,0	494,3	0,8505	1,0019	0,8489	0,8424	-0,0065	0,8	0,010	0,8491	0,0002	0,729	0,851	0,849
3	12,9	0,6808	12,9	494,4	0,6886	1,0031	0,6865	0,6820	-0,0045	0,7	0,027	0,6868	0,0003	0,681	0,689	0,687
4	17,0	0,6501	17,0	494,5	0,6635	1,0044	0,6606	0,6557	-0,0049	0,7	0,055	0,6609	0,0003	0,662	0,670	0,666
5	22,8	0,6362	23,1	494,7	0,6307	1,0077	0,6258	0,6218	-0,0040	0,6	0,119	0,6262	0,0004	0,637	0,641	0,636
6	28,4	0,6248	28,8	494,8	0,6184	1,0110	0,6116	0,6081	-0,0035	0,6	0,213	0,6121	0,0005	0,630	0,630	0,623
7	33,2	0,6180	33,7	494,9	0,6106	1,0142	0,6021	0,5992	-0,0029	0,5	0,321	0,6027	0,0006	0,630	0,623	0,614
8	37,1	0,6096	38,2	495,1	0,5984	1,0167	0,5837	0,5819	-0,0018	0,3	0,428	0,5844	0,0007	0,626	0,605	0,595
9	42,1	0,6096	43,3	495,2	0,5902	1,0205	0,5783	0,5774	-0,0009	0,2	0,594	0,5793	0,0010	0,621	0,602	0,589
10	45,3	0,6074	47,1	495,3	0,5785	1,0227	0,5656	0,5669	+0,0013	0,2	0,716	0,5667	0,0011	0,619	0,611	0,576
11	51,2	0,6040	53,6	495,5	0,5718	1,0275	0,5565	0,5556	-0,0009	0,2	0,979	0,5578	0,0016	0,619	0,590	0,580
12	56,3	0,6016	59,3	495,6	0,5616	1,0313	0,5446	0,5468	+0,0022	0,4	1,243	0,5462	0,0013	0,615	0,580	0,564
13	61,0	0,5998	64,6	495,8	0,5510	1,0351	0,5363	0,5405	+0,0042	0,8	1,518	0,5382	0,0019	0,611	0,565	0,546
14	65,6	0,5983	69,5	496,0	0,5532	1,0391	0,5324	0,5379	+0,0055	1,0	1,820	0,5345	0,0021	0,609	0,563	0,541
15	70,3	0,5970	74,9	496,0	0,5474	1,0429	0,5248	0,5315	+0,0067	1,2	2,155	0,5271	0,0023	0,608	0,557	0,533
16	74,8	0,5958	80,5	496,2	0,5378	1,0463	0,5140	0,5221	+0,0081	1,6	2,498	0,5166	0,0026	0,606	0,546	0,523
17	76,8	0,5954	82,6	496,3	0,5379	1,0481	0,5132	0,5219	+0,0087	1,7	2,665	0,5136	0,0030	0,605	0,547	0,519
18	81,2	0,5944	87,3	496,4	0,5372	1,0521	0,5106	0,5206	+0,0100	1,9	3,037	0,5052	0,0033	0,604	0,539	0,510
19	86,4	0,5934	93,6	496,5	0,5301	1,0562	0,5019	0,5132	+0,0113	2,2	3,528	0,5010	0,0035	0,603	0,536	0,505
20	90,3	0,5928	98,1	496,7	0,5271	1,0595	0,4975	0,5101	+0,0126	2,5	3,915	0,5010	0,0037	0,602	0,535	0,502
21	95,2	0,5920	103,4	496,8	0,5265	1,0639	0,4949	0,5088	+0,0139	3,1	4,436	0,4986	0,0040	0,601	0,529	0,499
22	99,3	0,5914	108,0	496,9	0,5248	1,0675	0,4916	0,5068	+0,0152	3,1	5,008	0,4956	0,0045	0,601	0,529	0,498
23	108,7	0,5909	113,3	497,1	0,5205	1,0710	0,4860	0,5024	+0,0164	3,4	5,401	0,4904	0,0045	0,600	0,524	0,488
24	106,6	0,5905	117,1	497,2	0,5159	1,0729	0,4808	0,4979	+0,0171	3,6	5,736	0,4837	0,0049	0,600	0,525	0,486
25	112,6	0,5899	123,5	497,3	0,5164	1,0785	0,4788	0,4977	+0,0189	3,9	6,514	0,4837	0,0049	0,599	0,520	0,479
26	116,7	0,5895	128,8	497,5	0,5111	1,0813	0,4726	0,4925	+0,0199	4,2	7,038	0,4837	0,0051	0,599	0,527	0,474
27	122,8	0,5889	135,9	497,6	0,5084	1,0862	0,4680	0,4894	+0,0214	4,6	7,881	0,4777	0,0051	0,599	0,527	0,474
28	127,1	0,5885	142,0	497,8	0,5007	1,0885	0,4600	0,4821	+0,0220	4,8	8,454	0,4855	0,0055	0,598	0,509	0,466
29	130,5	0,5883	146,2	497,9	0,4983	1,0909	0,4568	0,4798	+0,0231	5,0	8,948	0,4824	0,0056	0,598	0,507	0,463
30	132,5	0,5881	149,3	498,0	0,4988	1,0916	0,4523	0,4755	+0,0232	5,1	9,212	0,4850	0,0057	0,598	0,502	0,459
31	136,9	0,5878	154,3	498,1	0,4932	1,0952	0,4503	0,4746	+0,0243	5,4	9,897	0,4861	0,0058	0,598	0,502	0,457
32	141,6	0,5875	161,8	498,4	0,4826	1,0966	0,4401	0,4649	+0,0248	5,6	10,541	0,4460	0,0059	0,598	0,480	0,446

$p = 244,5$ mm
 $\alpha = 1,0$.

Schiefer Überfall.

$\varepsilon = 140' 23''$.

Schmale Rinne.

Lfd. Nr.	h_1	μ_1	h	b_s	μ_{Dubnat}	$K_{\text{Gl.}(14)}^{\text{nach}}$	μ_0	μ_{Wex}	ΔW_{ex}	ΔW_{ex} in $0/0$	$\alpha \frac{c^2}{2g}$	μ_{Weisbach}	$\Delta W_{\text{Weisbach}}$	$\Delta W_{\text{Weisbach}}$ in $0/0$	Berechnung n. d. neuen Eichungsergebnis		
															μ'_1	μ'_{Dubnat}	μ'_0
1	9,4	0,7191	6,0	1009,9	0,6983	1,0026	0,6965	0,6947	- 0,0018	0,3	0,011	0,6965	0,0000	0,00	0,719	0,698	0,697
2	17,0	0,6561	9,8	1010,0	0,7422	1,0077	0,7366	0,7357	- 0,0009	0,1	0,050	0,7370	0,0004	0,05	0,662	0,749	0,743
3	24,5	0,6322	14,8	1010,3	0,6666	1,0137	0,6576	0,6601	+ 0,0025	0,4	0,135	0,6582	0,0006	0,09	0,644	0,679	0,669
4	30,0	0,6223	18,2	1010,5	0,6517	1,0193	0,6394	0,6440	+ 0,0046	0,7	0,234	0,6404	0,0010	0,16	0,635	0,665	0,652
5	35,0	0,6160	21,4	1010,7	0,6375	1,0250	0,6220	0,6292	+ 0,0072	1,2	0,356	0,6234	0,0014	0,22	0,628	0,650	0,633
6	38,6	0,6124	23,7	1010,8	0,6298	1,0294	0,6118	0,6209	+ 0,0091	1,5	0,464	0,6135	0,0017	0,27	0,624	0,642	0,623
7	45,1	0,6075	27,3	1011,1	0,6280	1,0391	0,6140	0,6276	+ 0,0136	2,2	0,727	0,6161	0,0021	0,34	0,619	0,650	0,625
8	49,2	0,6050	30,6	1011,2	0,6101	1,0439	0,5844	0,6001	+ 0,0157	2,7	0,894	0,5872	0,0028	0,48	0,616	0,621	0,594
9	52,5	0,6033	33,0	1011,4	0,5986	1,0485	0,5709	0,5887	+ 0,0178	3,1	1,063	0,5744	0,0035	0,61	0,614	0,609	0,580
10	58,0	0,6010	36,7	1011,5	0,5903	1,0568	0,5586	0,5793	+ 0,0207	3,7	1,387	0,5624	0,0038	0,68	0,612	0,601	0,568
11	65,0	0,5985	41,3	1011,9	0,5840	1,0683	0,5467	0,5727	+ 0,0260	4,8	1,878	0,5515	0,0045	0,88	0,610	0,595	0,555
12	71,0	0,5968	46,1	1012,1	0,5636	1,0769	0,5234	0,5527	+ 0,0293	5,6	2,359	0,5289	0,0055	1,00	0,608	0,574	0,531
13	77,0	0,5953	50,5	1012,3	0,5437	1,0866	0,5096	0,5423	+ 0,0327	6,4	2,911	0,5158	0,0062	1,20	0,606	0,564	0,517
14	80,0	0,5947	53,0	1012,5	0,5447	1,0909	0,4994	0,5340	+ 0,0403	6,9	3,062	0,5074	0,0080	1,60	0,605	0,554	0,507
15	91,8	0,5925	62,3	1013,0	0,5232	1,1093	0,4716	0,5119	+ 0,0438	8,5	4,537	0,4795	0,0079	1,68	0,603	0,532	0,478
16	95,5	0,5920	64,7	1013,1	0,5241	1,1166	0,4693	0,5123	+ 0,0430	9,2	5,025	0,4778	0,0085	1,81	0,602	0,533	0,476
17	100,2	0,5913	68,0	1013,3	0,5220	1,1253	0,4658	0,5100	+ 0,0461	10,0	5,676	0,4729	0,0090	1,94	0,602	0,531	0,470
18	105,0	0,5907	71,7	1013,5	0,5166	1,1334	0,4559	0,5044	+ 0,0486	10,7	6,375	0,4656	0,0098	2,10	0,601	0,525	0,462
19	112,4	0,5899	76,1	1013,7	0,5224	1,1498	0,4544	0,5092	+ 0,0548	12,1	7,598	0,4658	0,0114	2,52	0,600	0,531	0,460
20	121,0	0,5891	84,3	1014,2	0,4995	1,1603	0,4305	0,4872	+ 0,0567	13,2	9,012	0,4426	0,0121	2,81	0,599	0,508	0,436
21	131,6	0,5882	94,3	1014,7	0,4779	1,1736	0,4072	0,4649	+ 0,0577	14,2	10,920	0,4198	0,0126	3,10	0,598	0,494	0,431
22	141,5	0,5875	99,6	1014,9	0,4902	1,1978	0,4093	0,4686	+ 0,0593	14,5	13,148	0,4223	0,0130	3,18	0,598	0,499	0,416

$p = 262,8 \text{ mm}$

$\alpha = 1,0$.

Tabelle 14.

Schiefer Überfall.
 $\varepsilon = 14^{\circ} 56'$.

Breite Rinne.

Lfd. Nr.	h_1	μ_1	h	μ Dubuat	K nach Gl. (8)	μ_0	μ_{Wex}	ΔW_{ex} in $^{\circ}/_0$	$\Delta W_{ex} \frac{c^2}{2g}$	μ Weisbach	$\Delta W_{Weisbach}$ in $^{\circ}/_0$	Berechnung n. d. neuen Eichungsergebnis	
												μ'_1	μ' Dubuat
1	24,06	0,6332	8,95	0,7224	1,0060	0,7181	0,7154	-0,0027	0,036	0,7125	-0,0056	0,644	0,735
2	33,84	0,6173	12,82	0,6853	1,0107	0,6780	0,6795	0,0015	0,2	0,6801	0,0021	0,630	0,699
3	42,61	0,6092	16,64	0,6462	1,0156	0,6363	0,6400	0,0037	0,6	0,6398	0,0030	0,47	0,659
4	53,57	0,6028	20,68	0,6505	1,0238	0,6355	0,6414	0,0059	0,9	0,6379	0,0024	0,38	0,647
5	58,89	0,6006	23,33	0,6235	1,0273	0,6070	0,6163	0,0093	1,5	0,6096	0,0026	0,43	0,635
6	74,55	0,5959	29,66	0,6147	1,0409	0,5905	0,6037	0,0132	2,2	0,5920	0,0015	0,25	0,606
7	97,54	0,5917	39,06	0,6044	1,0643	0,5679	0,5913	0,0254	4,1	0,5715	0,0036	0,64	0,602
8	114,08	0,5897	46,98	0,5776	1,0806	0,5345	0,5642	0,0297	5,6	0,5400	0,0055	1,03	0,600
9	132,80	0,5881	55,20	0,5681	1,1020	0,5155	0,5529	0,0374	7,3	0,5232	0,0077	1,49	0,598
10	155,51	0,5866	64,82	0,5642	1,1306	0,4990	0,5480	0,0490	9,8	0,5082	0,0092	1,84	0,597

$p = 256,0$ mm; $b_s = 1931,5$ mm.

$\alpha = 1,0$; $b_r = 497,5$ mm.

Tabelle 15.

Versuche von Boileau an schiefen und gebrochenen Überfällen.

Aus Boileaus Tabellen Nr. XXXVII und XXXVIII.

Boileau, Traité de la mesure des eaux courantes. Paris 1854. Pag. 141 et 145.

Lfd. Nr.	Bemerkungen	Ver- suchs- Nr.	h	Q	μ Dabaat	K Gl. (8) nach	μ_0	$\alpha \frac{c^2}{2g}$	μ Weisb.	Δ Weisbach	Δ Weisb. in ‰
1	Tabelle Nr. XXXVII. $p = 434,0$ $\alpha = 1,16$	1	62,5	34,568	0,5885	1,0086	0,5785	0,348	0,5788	+	0,0003
2		2	89,7	60,048	0,5895	1,0163	0,5800	0,943	0,5809	+	0,0009
3		3	120,0	92,949	0,5897	1,0261	0,5747	2,018	0,5764	+	0,0017
4		4	136,0	113,313	0,5958	1,0323	0,5772	2,833	0,5794	+	0,0022
5		5	157,0	140,031	0,5936	1,0398	0,5709	4,025	0,5738	+	0,0029
6		6	186,0	181,802	0,5977	1,0514	0,5686	6,165	0,5725	+	0,0040
			b _s = 1284,0; Largeur réduite: 1263,0 mm; b _z = 908,1 mm								
7	Tabelle Nr. XXXVIII. $p = 458,0$ $\alpha = 1,18$	1	55,0	48,370	0,5704	1,0150	0,5620	0,508	0,5573	-	0,0047
8		2	70,5	62,647	0,5678	1,0229	0,5551	0,998	0,5511	-	0,0040
9		3	89,7	91,090	0,5752	1,0355	0,5555	1,965	0,5527	-	0,0028
10		4	114,0	131,923	0,5815	1,0537	0,5518	3,779	0,5511	-	0,0007
11		5	137,0	173,597	0,5808	1,0715	0,5491	6,047	0,5434	+	0,0013
12		6	152,5	207,747	0,5918	1,0876	0,5442	8,240	0,5475	+	0,0033
			b _s = 2017,0; Largeur réduite: 1996,0 mm; b _z = 920,1 mm								
13	Einfach gebrochener Überfall 1 : 1	1	87,7	58,446	0,5695	1,0143	0,5615	-	-	-	-
14		2	115,0	88,151	0,5721	1,0224	0,5595	-	-	-	-
15		3	141,0	120,625	0,5766	1,0312	0,5592	-	-	-	-
16		4	165,0	154,450	0,5832	1,0402	0,5607	-	-	-	-
			b _s = 1338,0; b _z = 960,3 mm								

Tabelle 16.

Versuche von Fteley und Stearns an normalen Überfällen.

Aus: v. Wex, Hydrodynamik, 1888. Tab. Nr. II.
 Trans. of the Am. Soc. of civ. Eng. Vol. XII. 1883.

Lfd. Nr.	Nummer der Versuche	h		c		Q		μ_{Wex}
		in engl. Fuß	in mm	in engl. Fuß	in engl. Kubikfuß	in Litern		
11	5	0,1509	46,0	0,054	1,007	28,45	0,6369	
27	10	0,23035	70,4	0,098	1,8685	52,85	0,6246	
38	11	0,33685	102,8	0,168	3,284	93,10	0,6181	
43	18	0,42425	129,0	0,233	4,6365	131,00	0,6145	
56	22	0,4305	131,2	0,237	4,736	133,90	0,6143	
63	28	0,5116	156,0	0,301	6,134	173,30	0,6124	
73	36	0,5477	167,0	0,331	6,796	192,00	0,6114	
88	37, 41, 44	0,60076	183,0	0,375	7,8093	221,30	0,6105	
		$p = 3,56 \text{ Fuß}$ 1,083 m		$b_1 = 5,0 \text{ Fuß}$ 1,525 m				
97	10	0,4685	142,5	0,151	20,178	570,00	0,6122	
107	9	0,6460	197,0	0,239	32,685	925,50	0,6099	
		$p = 6,55 \text{ Fuß}$ 1,996 m		$b_1 = 19,0 \text{ Fuß}$ 5,790 m				
117	30	0,0746	22,8	0,023	0,3652	10,31	0,6675	
123	29	0,0991	30,2	0,034	0,5498	15,54	0,6555	
131	24	0,1225	37,4	0,046	0,7526	21,27	0,6518	
140	20, 21	0,16385	49,9	0,069	1,1536	32,65	0,6431	
151	17, 19	0,21826	66,6	0,1033	1,7507	49,60	0,6328	
163	14, 15	0,25325	77,2	0,1265	2,1598	61,10	0,6252	
17	12, 13	0,32605	99,5	0,180	3,1448	89,10	0,6215	
18	6, 8, 9	0,48443	147,5	0,3117	5,696	161,00	0,6168	
		$p = 3,17 \text{ Fuß}$ 0,966 m		$b_1 = 5,0 \text{ Fuß}$ 1,525 m				

Tabelle 17.

Breite Rinne.

Überfall unter 45° einfach gebrochen. Nr. 1.

Lfd. Nr.	h_1	μ_1	h	μ_{Dubuat}	K nach Gl. (8)	μ_0
1	6,32	0,7696	5,54	0,7638	1,0003	0,7635
2	12,41	0,6849	9,42	0,7362	1,0009	0,7355
3	17,69	0,6530	13,52	0,6948	1,0016	0,6936
4	22,55	0,6369	17,52	0,6612	1,0024	0,6595
5	27,45	0,6264	21,53	0,6411	1,0033	0,6389
6	31,53	0,6201	24,91	0,6277	1,0042	0,6252
7	37,99	0,6130	30,32	0,6112	1,0056	0,6077
8	43,08	0,6089	34,26	0,6103	1,0070	0,6061
9	48,35	0,6055	38,54	0,6048	1,0085	0,5997
10	52,51	0,6033	41,92	0,6013	1,0097	0,5955
11	58,82	0,6006	46,97	0,5984	1,0116	0,5915
12	64,08	0,5988	51,45	0,5916	1,0132	0,5839
13	69,18	0,5973	55,88	0,5849	1,0148	0,5763
14	73,80	0,5961	59,83	0,5805	1,0163	0,5712
15	78,24	0,5950	63,62	0,5769	1,0178	0,5668
16	83,85	0,5939	68,63	0,5701	1,0196	0,5591
17	88,92	0,5930	72,92	0,5676	1,0215	0,5557
18	93,51	0,5923	76,77	0,5660	1,0230	0,5532
19	99,55	0,5914	81,23	0,5704	1,0255	0,5562
20	103,94	0,5909	85,24	0,5656	1,0270	0,5507
21	110,29	0,5901	89,42	0,5746	1,0299	0,5579
22	115,12	0,5896	92,72	0,5799	1,0321	0,5618
23	118,79	0,5893	95,17	0,5842	1,0339	0,5650
24	124,76	0,5887	100,10	0,5823	1,0362	0,5619
25	130,29	0,5883	104,30	0,5839	1,0386	0,5622
26	134,31	0,5880	108,06	0,5792	1,0399	0,5570
27	140,40	0,5875	113,29	0,5762	1,0422	0,5528
28	145,40	0,5872	117,34	0,5758	1,0442	0,5514
29	150,79	0,5869	121,56	0,5764	1,0465	0,5508
30	155,79	0,5866	126,12	0,5725	1,0482	0,5461
31	162,24	0,5863	131,20	0,5731	1,0509	0,5453

$p = 253,4 \text{ mm};$

$b_s = 703,5 \text{ mm}$ (Gesamte Überfall-Länge).

$\alpha = 1,0;$

$b_z = 497,5 \text{ mm}$ (Rinnen-Breite).

Breite Rinne.

Überfall unter 45° doppelt gebrochen. Nr. 2.

Lfd. Nr.	h_1	μ_1	h	μ_{Dubuat}	K nach Gl. (8)	μ_0
1	5,58	0,8156	5,48	0,7003	1,0002	0,7001
2	9,26	0,7212	8,35	0,7038	1,0005	0,7035
3	16,53	0,6583	15,23	0,6220	1,0012	0,6213
4	21,31	0,6403	19,36	0,6178	1,0019	0,6167
5	25,58	0,6299	23,28	0,6063	1,0026	0,6047
6	30,97	0,6209	28,10	0,6003	1,0035	0,5982
7	35,75	0,6143	32,40	0,5949	1,0045	0,5923
8	39,92	0,6113	36,35	0,6016	1,0053	0,5848
9	45,72	0,6071	41,48	0,5871	1,0067	0,5832
10	51,21	0,6040	46,40	0,5851	1,0080	0,5804
11	55,55	0,6016	50,48	0,5803	1,0091	0,5750
12	60,11	0,6001	54,65	0,5784	1,0103	0,5725
13	67,08	0,5979	60,93	0,5771	1,0122	0,5702
14	71,59	0,5966	65,33	0,5719	1,0134	0,5643
15	76,74	0,5954	70,26	0,5681	1,0149	0,5598
16	81,27	0,5944	74,48	0,5662	1,0162	0,5572
17	86,92	0,5934	79,84	0,5633	1,0178	0,5534
18	90,24	0,5928	82,80	0,5636	1,0188	0,5532
19	96,32	0,5919	88,23	0,5642	1,0207	0,5527
20	102,07	0,5911	93,22	0,5659	1,0226	0,5534
21	106,87	0,5905	98,05	0,5615	1,0240	0,5483
22	111,53	0,5900	101,81	0,5653	1,0256	0,5511
23	117,84	0,5893	107,74	0,5633	1,0276	0,5482
24	120,84	0,5891	110,47	0,5632	1,0285	0,5476
25	127,00	0,5885	116,13	0,5624	1,0305	0,5458
26	131,89	0,5882	120,78	0,5609	1,0320	0,5435
27	135,44	0,5879	124,18	0,5596	1,0330	0,5417
28	143,20	0,5874	130,51	0,5641	1,0359	0,5446
29	147,53	0,5871	135,41	0,5579	1,0368	0,5381
30	153,97	0,5867	139,87	0,5662	1,0396	0,5446
31	157,78	0,5865	143,26	0,5664	1,0409	0,5442
32	162,34	0,5863	147,97	0,5630	1,0420	0,5403

 $p = 251,3 \text{ mm}; \quad b_s = 598,5 \text{ mm}$ (Gesamte Überfall-Länge). $\alpha = 1,0; \quad b_z = 497,5 \text{ mm}$ (Rinnen-Breite).

Breite Rinne.

Gekrümmter Überfall Nr. 1.

Lfd. Nr.	h_1	μ_1	h	μ_{Dubuat}	K nach Gl. (8)	μ_0
1	8,42	0,7355	7,99	0,7174	1,0004	0,7171
2	12,84	0,6813	12,37	0,6496	1,0008	0,6492
3	18,28	0,6506	17,57	0,6225	1,0014	0,6217
4	23,95	0,6334	22,97	0,6081	1,0021	0,6068
5	27,89	0,6256	26,60	0,6056	1,0028	0,6040
6	33,73	0,6174	32,22	0,5963	1,0038	0,5940
7	38,71	0,6123	36,70	0,5980	1,0048	0,5952
8	43,13	0,6088	40,84	0,5957	1,0057	0,5923
9	48,75	0,6053	45,93	0,5968	1,0070	0,5927
10	53,95	0,6027	50,87	0,5935	1,0082	0,5887
11	58,07	0,6009	54,59	0,5944	1,0093	0,5890
12	63,69	0,5989	59,79	0,5937	1,0107	0,5874
13	69,79	0,5971	65,55	0,5915	1,0123	0,5842
14	74,36	0,5959	69,88	0,5898	1,0136	0,5819
15	79,52	0,5948	75,08	0,5846	1,0149	0,5760
16	83,93	0,5943	79,34	0,5830	1,0161	0,5738
17	90,14	0,5928	84,65	0,5873	1,0180	0,5769
18	94,67	0,5921	89,15	0,5842	1,0193	0,5732
19	99,75	0,5914	94,03	0,5826	1,0207	0,5708
20	105,49	0,5907	98,99	0,5859	1,0226	0,5730
21	107,85	0,5904	101,24	0,5853	1,0233	0,5720
22	114,45	0,5897	107,26	0,5861	1,0253	0,5715
23	120,23	0,5891	112,79	0,5846	1,0270	0,5692
24	123,58	0,5888	116,16	0,5826	1,0279	0,5667
25	129,39	0,5881	121,06	0,5859	1,0299	0,5689
26	135,11	0,5879	126,59	0,5845	1,0316	0,5666
27	140,46	0,5875	131,28	0,5863	1,0333	0,5673
28	146,56	0,5871	137,35	0,5833	1,0350	0,5635
29	151,07	0,5869	140,48	0,5901	1,0369	0,5691
30	156,18	0,5866	145,82	0,5862	1,0382	0,5647
31	165,77	0,5861	153,11	0,5953	1,0419	0,5714

 $p = 252,4 \text{ mm};$ $b_s = 554,7 \text{ mm}$ (Entwickelte Wehrlänge). $\alpha = 1,0;$ $b_i = 497,5 \text{ mm}$ (Rinnen-Breite). $r = 347,1 \text{ mm}$ (Radius der Überfallkante).

Breite Rinne.

Gekrümmter Überfall Nr. 2.

Lfd. Nr.	h_1	μ_1	h	μ_{Dubuat}	K nach Gl. (8)	μ_0
1	8,01	0,7435	7,64	0,7699	1,0004	0,7696
2	13,06	0,6796	12,74	0,6803	1,0008	0,6798
3	19,11	0,6474	18,70	0,6451	1,0014	0,6442
4	22,79	0,6362	22,09	0,6430	1,0019	0,6418
5	27,98	0,6255	27,20	0,6295	1,0027	0,6278
6	33,28	0,6179	32,28	0,6239	1,0036	0,6216
7	38,03	0,6129	36,80	0,6211	1,0045	0,6183
8	43,57	0,6085	42,15	0,6169	1,0056	0,6134
9	48,66	0,6053	46,85	0,6180	1,0068	0,6138
10	49,37	0,6049	51,15	0,5532	1,0063	0,5498
11	59,39	0,6004	57,11	0,6141	1,0093	0,6085
12	63,43	0,5990	60,95	0,6134	1,0105	0,6071
13	70,03	0,5970	67,07	0,6143	1,0120	0,6070
14	73,93	0,5961	70,86	0,6127	1,0130	0,6049
15	79,82	0,5947	76,51	0,6113	1,0146	0,6024
16	83,58	0,5940	80,19	0,6097	1,0156	0,6003
17	88,72	0,5930	85,14	0,6084	1,0170	0,5982
18	94,54	0,5921	90,34	0,6114	1,0188	0,6001
19	100,02	0,5914	95,53	0,6112	1,0204	0,5989
20	104,10	0,5911	99,36	0,6114	1,0216	0,5985
21	109,65	0,5902	104,82	0,6091	1,0231	0,5954
22	115,57	0,5896	110,40	0,6091	1,0248	0,5944
23	119,06	0,5892	113,21	0,6129	1,0260	0,5974
24	125,19	0,5887	119,31	0,6103	1,0278	0,5938
25	129,81	0,5883	123,50	0,6114	1,0292	0,5941
26	134,48	0,5880	128,22	0,6092	1,0305	0,5912
27	139,40	0,5876	132,19	0,6138	1,0322	0,5946
28	143,38	0,5873	138,05	0,5996	1,0325	0,5808
29	151,64	0,5868	143,31	0,6161	1,0360	0,5947
30	155,81	0,5866	146,67	0,6195	1,0375	0,5971
31	165,72	0,5861	156,33	0,6170	1,0403	0,5931

$p = 252,7 \text{ mm}$; $b_s = 518,5 \text{ mm}$ (Entwickelte Länge der Überfallkante).
 $a = 1,0$; $b_{\perp} = 497,5 \text{ mm}$ (Rinnen-Breite).
 $r = 522,8 \text{ mm}$ (Radius der Überfallkante).

Versuche über die horizontale Ablenkung des Wassers aus der Richtung der Wehr-Normalen.

Schmale Rinne.

$\varepsilon = 75^0$			$\varepsilon = 60^0$			$\varepsilon = 45^0$			$\varepsilon = 30^0$		
Lfd. Nr.	h	φ	Lfd. Nr.	h	φ	Lfd. Nr.	h	φ	Lfd. Nr.	h	φ
1	23,6	0,0	1	6,8	0,0	1	18,1	0,0	1	9,6	0,0
2	31,9	0,0	2	12,7	1,0	2	25,4	0,0	2	14,2	1,0
3	38,7	0,0	3	32,7	3,0	3	31,3	3,0	3	19,2	3,0
4	54,0	2,5	4	42,8	6,0	4	38,2	6,0	4	24,0	5,0
5	61,5	2,0	5	51,6	7,0	5	44,3	7,0	5	29,9	5,0
6	68,7	3,0	6	64,3	8,0	6	51,0	6,0	6	34,7	4,0
7	76,9	4,0	7	78,8	10,0	7	56,8	7,0	7	39,8	7,0
8	83,9	5,0	8	96,5	15,5	8	64,1	8,5	8	46,1	9,5
9	90,1	5,5	9	113,1	16,5	9	70,8	9,0	9	51,6	10,5
10	98,3	7,0	10	132,1	17,0	10	77,1	11,0	10	56,6	11,0
11	105,7	7,0	11	137,5	17,0	11	83,3	13,0	11	61,4	16,0
12	110,8	6,0				12	89,4	14,5	12	67,7	17,0
13	116,6	8,0				13	95,0	17,0	13	73,0	19,0
14	123,6	7,5				14	100,5	16,0	14	77,8	20,4
15	130,4	9,0				15	108,6	20,5	15	83,8	21,0
16	137,3	8,5				16	115,9	22,0	16	88,9	26,0
17	143,2	11,0				17	122,7	25,0	17	93,0	28,0
18	146,2	11,0							18	98,7	29,5
									19	102,2	30,0

φ = Horizontal-Ablenkungswinkel in Grad.

h = Überfallhöhe in mm.

Versuche über die horizontale Ablenkung des Wassers aus der Richtung
der Wehr-Normalen.

Breite Rinne.

$\varepsilon = 75^0$			$\varepsilon = 60^0$			$\varepsilon = 45^0$			$\varepsilon = 30^0$			$\varepsilon = 15^0$		
Lfd. Nr.	h	φ	Lfd. Nr.	h	φ	Lfd. Nr.	h	φ	Lfd. Nr.	h	φ	Lfd. Nr.	h	φ
1	28,0	0,0	1	25,5	0,0	1	17,7	0,0	1	26,2	0,0	1	17,1	0,0
2	41,0	0,0	2	34,0	0,0	2	25,7	0,0	2	33,2	0,5	2	31,6	1,0
3	50,0	0,5	3	40,7	1,0	3	34,7	1,0	3	39,7	2,0	3	49,2	4,0
4	59,5	1,0	4	45,0	0,5	4	42,7	3,5	4	45,7	2,5	4	63,1	10,0
5	70,5	1,5	5	55,0	1,0	5	50,2	4,5	5	52,2	4,5	5	70,8	12,0
6	78,0	2,0	6	57,7	3,0	6	57,2	5,5	6	59,7	9,5	6	78,6	14,0
7	86,0	3,5	7	63,5	1,5	7	66,2	7,0	7	65,2	12,0	7	87,1	18,5
8	97,5	4,0	8	72,5	2,5	8	71,2	7,5	8	73,2	14,5	8	97,1	22,0
9	107,0	5,0	9	82,0	3,0	9	74,2	8,0	9	78,7	16,5	9	105,1	23,5
10	118,5	5,5	10	89,5	3,5	10	79,1	8,5	10	85,7	18,0	10	113,1	25,5
11	128,0	6,0	11	92,4	2,5	11	82,8	9,5	11	93,2	19,5	11	119,1	26,5
12	137,5	7,0	12	98,5	4,5	12	91,2	11,0	12	100,7	21,0			
13	146,0	7,5	13	109,0	4,5	13	99,6	12,0	13	108,7	22,0			
			14	110,4	4,5	14	105,7	13,5						
			15	118,5	5,5	15	112,7	14,5						
			16	124,2	5,5	16	123,7	15,0						
			17	127,0	5,5	17	134,7	17,0						
			18	133,0	6,0									
			19	141,7	7,0									
			20	148,5	7,5									

 φ = Horizontal-Ablenkungswinkel in Grad. h = Überfallhöhe in mm.

Versuche über die Absenkung des Wasserspiegels in der Vertikalebene der Überfallkante.

Wehr- Winkel ε	Lfd Nr.	h	Strahlstärken über der Überfallkante gemessen in Längsprofilen mit den Abständen von Rinnen-Achse:			Absenkung des Wasser- spiegels bis zur Überfall- kante für die gleichen Profile			(0,15 h)
			100 mm links	0	100 mm rechts	100 mm links	0	100 mm rechts	
74° 54'	1	52,1	43,5	42,5	41,5	8,6	9,6	9,6	7,8
	2	79,0	67,4	67,0	66,7	11,6	12,0	12,3	11,9
	3	107,1	92,7	92,4	92,2	14,4	14,7	14,9	16,1
	4	137,0	116,8	116,8	116,5	20,2	20,2	20,5	20,5
	5	156,8	135,7	136,1	136,5	21,1	20,7	20,3	23,5
60° 05'	6	17,2	12,6	—	13,5	4,6	—	3,7	2,6
	7	48,2	38,7	39,0	38,6	9,5	9,2	9,6	7,2
	8	74,2	60,8	61,8	62,5	13,4	12,4	11,7	11,1
	9	102,2	82,6	84,7	86,5	19,6	17,5	17,7	15,4
	10	127,2	104,1	108,1	109,8	23,1	19,1	17,4	19,1
29° 59'	11	19,2	15,2	15,5	16,0	4,0	3,7	3,2	2,9
	12	34,2	28,0	28,4	27,6	6,2	5,8	6,6	5,1
	13	52,2	44,1	44,2	44,2	8,1	8,0	8,0	7,9
	14	72,2	60,7	61,3	61,1	12,0	11,4	11,6	10,9
	15	93,2	77,0	79,9	79,6	16,2	13,3	13,6	14,0
	16	109,2	91,0	92,0	93,0	18,2	17,2	16,2	16,4
44° 39'	17	18,7	15,6	16,0	15,2	3,1	2,7	3,5	2,8
	18	34,7	29,2	29,7	29,1	5,5	5,0	5,6	5,2
	19	49,7	42,0	42,9	42,0	7,7	6,8	7,7	7,5
	20	67,2	56,0	57,6	56,9	11,2	9,6	10,3	10,1
	21	82,7	69,0	70,8	70,2	13,7	11,9	12,5	12,4
	22	97,2	81,2	83,0	83,5	16,0	14,2	13,7	14,6
	23	104,7	84,0	89,0	88,1	20,7	15,7	16,6	17,2
	24	129,7	108,0	111,0	113,0	21,7	18,7	16,7	21,0



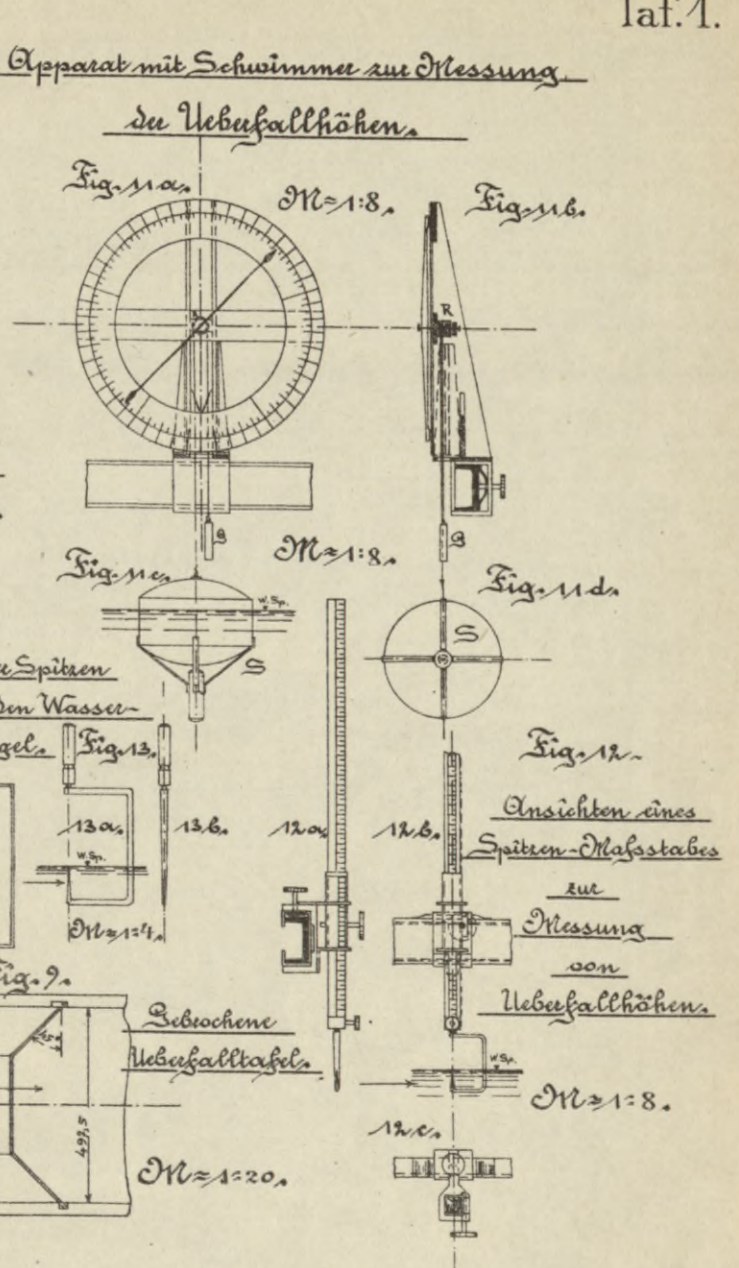
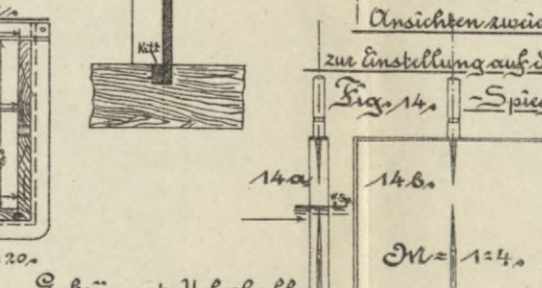
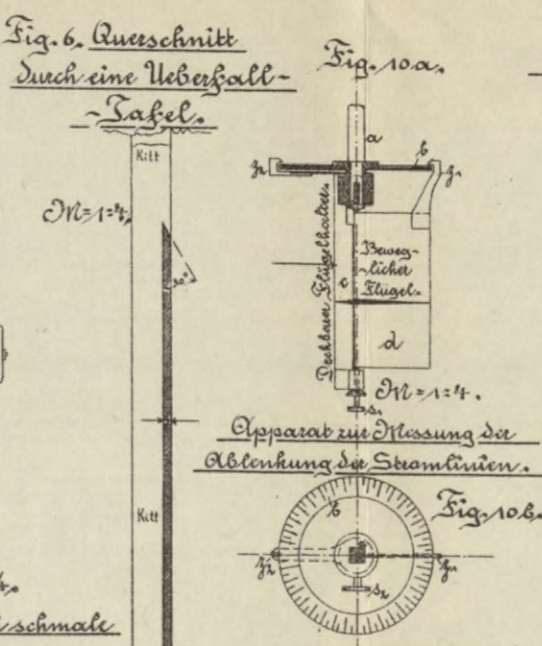
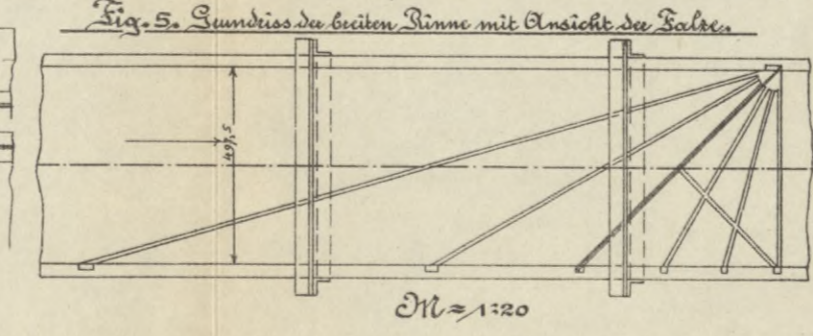
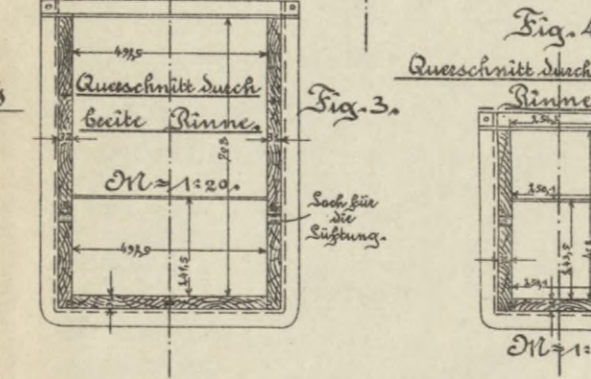
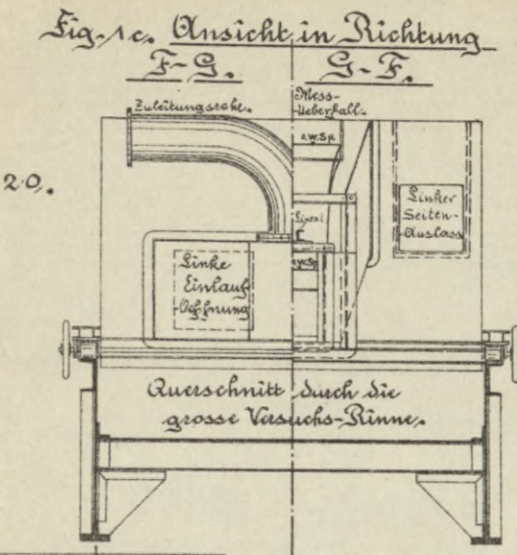
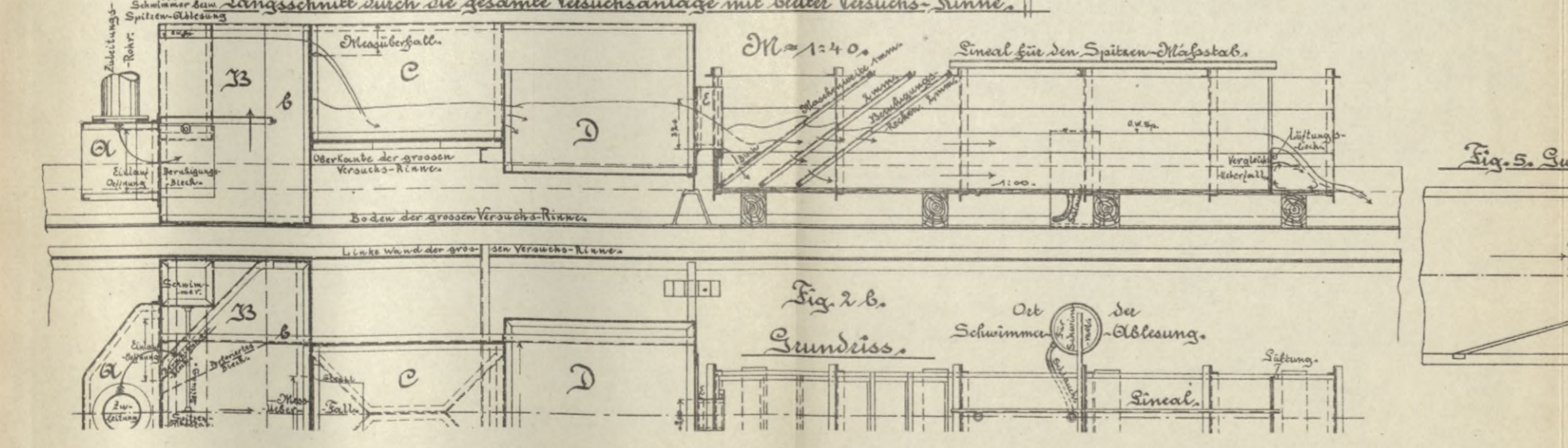
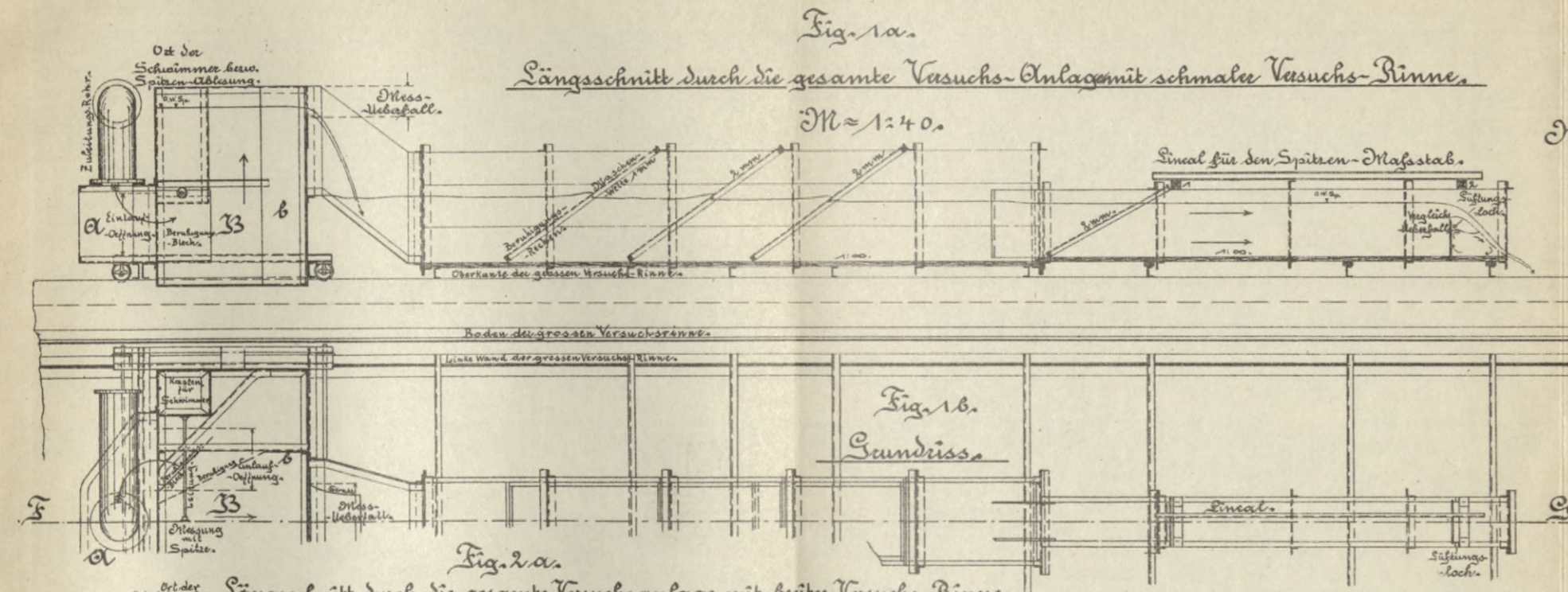
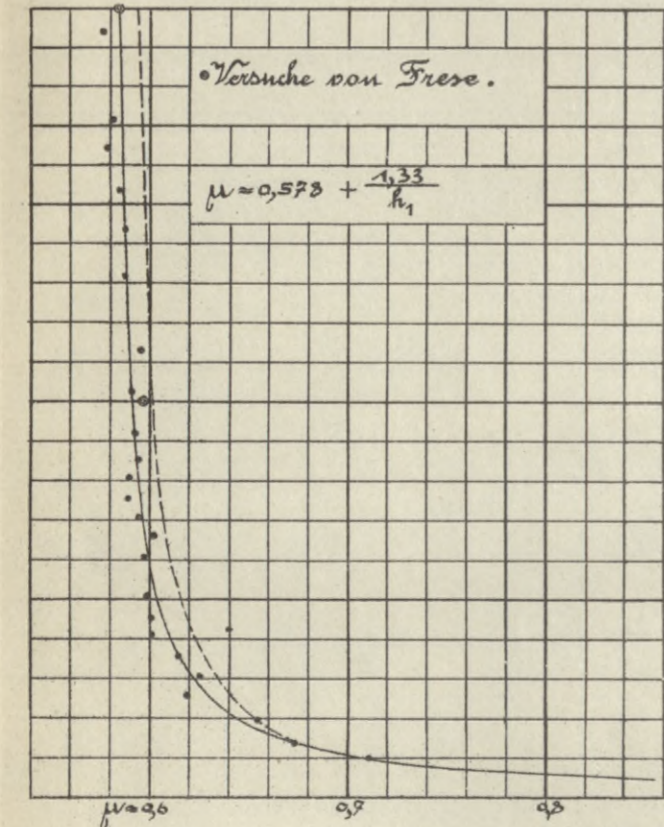


Fig. 1.
 Kurve der Ausfluss Koeffizienten μ des
 Mess-Überfallens berechnet für die Formel

von Dubuat:

$$Q = \mu \cdot \frac{2}{3} G \cdot h_1 \cdot \sqrt{g h_1}$$



Die Bedeutung der gestrichelten Kurven
 ist aus dem Nachtrage zu ersehen.

Ausfluss-Koeffizienten μ der schiefen vollkommenen Überfälle berechnet für die Formel von Dubuat Gl. (1).

Fig. 2.

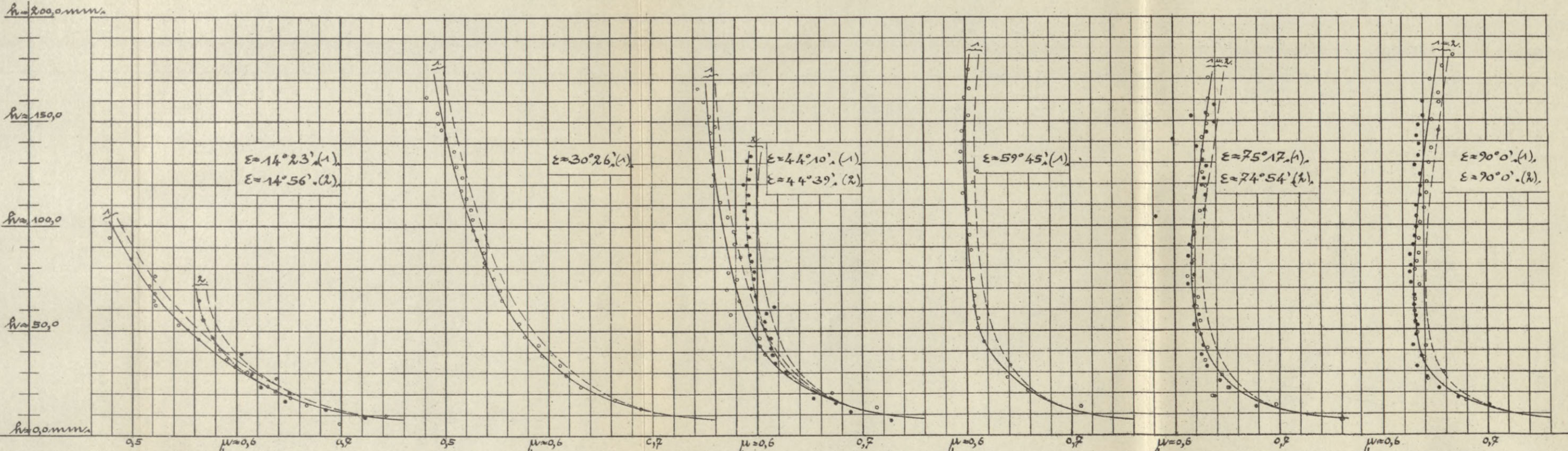
Fig. 3.

Fig. 4.

Fig. 5.

Fig. 6.

Fig. 7.



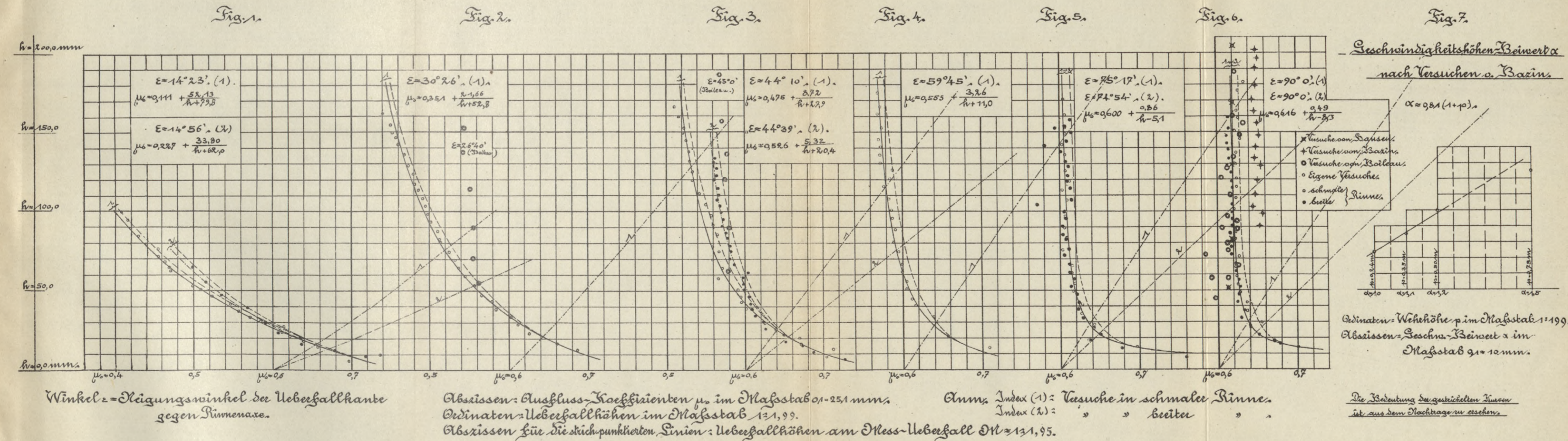
Winkel ϵ = Neigungswinkel der Überfall-
 -Kante gegen Binnenaxe.

Abzissen: Ausfluss-Koeffizienten μ im Maßstab 0,1 = 25,7 mm.
 Ordinaten: Überfallhöhen im Maßstab 1 = 1,97.

Anm. Index (1) = Versuche in schmaler Rinne,
 Index (2) = " " breiter " "

BIBLIOTEKA
KRAKÓW
Politechniczna

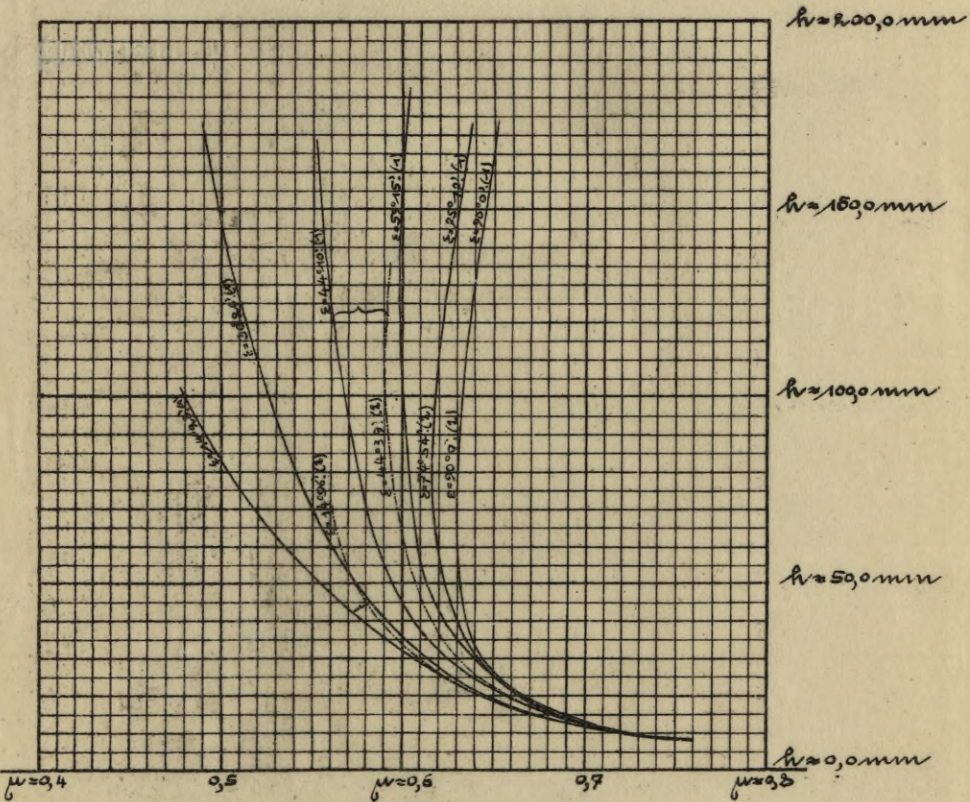
Ausfluss-Koeffizienten μ_0 für schiefe vollkommene Ueberfälle berechnet für die Formeln von Bazin Gl. (8) und (14).





Taf. 4 a.

Koeffizienten nach der Formel von Dubuat



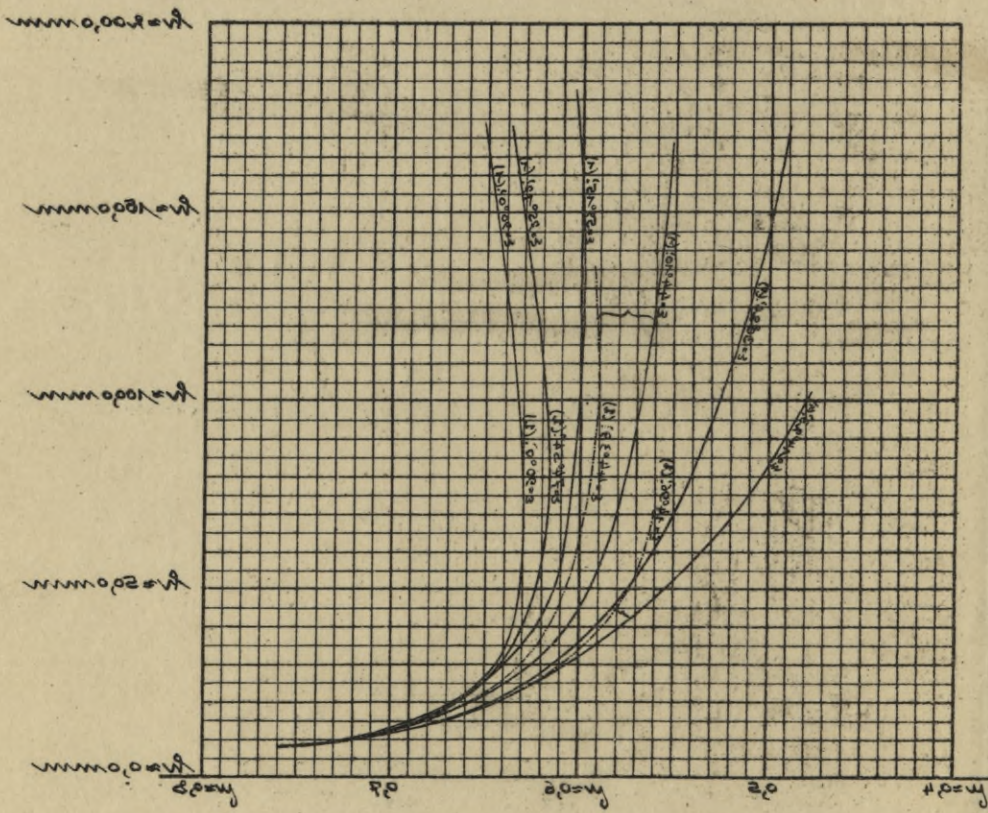
Abzissen = 0,1 = 25,2 mm

Ordinaten = 1 : 1,97.



Tab. 48.

Stężeń wody w jeziorach przy różnych temperaturach

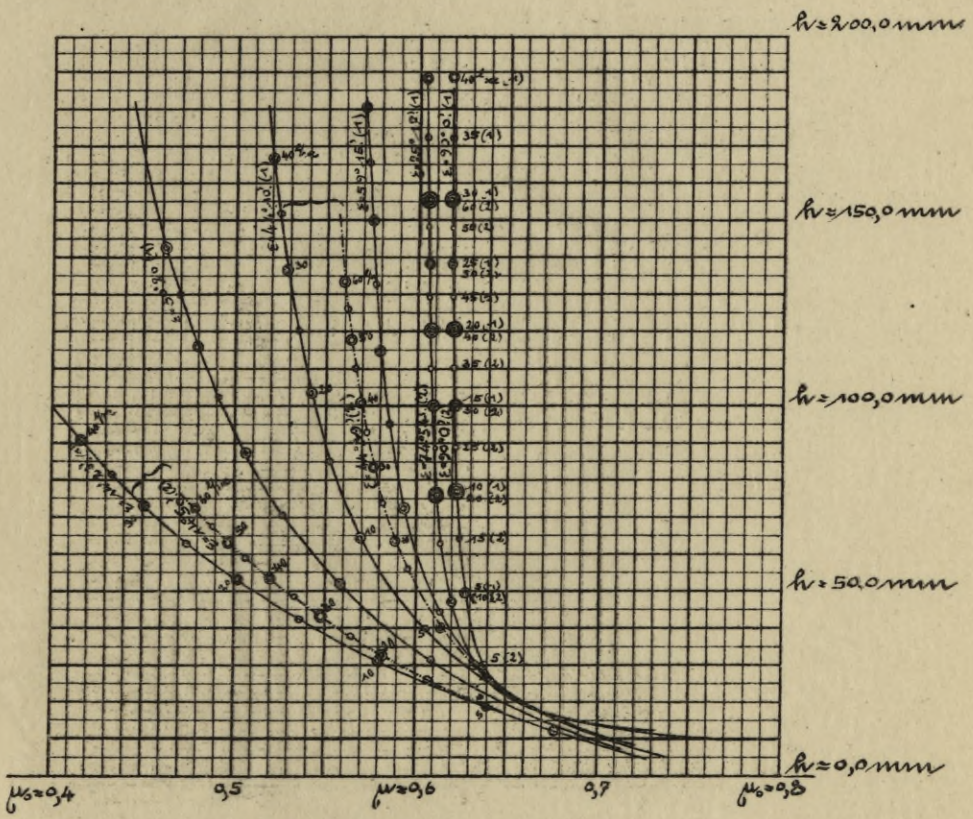


Przebieg = 1 = 100%
 Przebieg = 0,7 = 70%



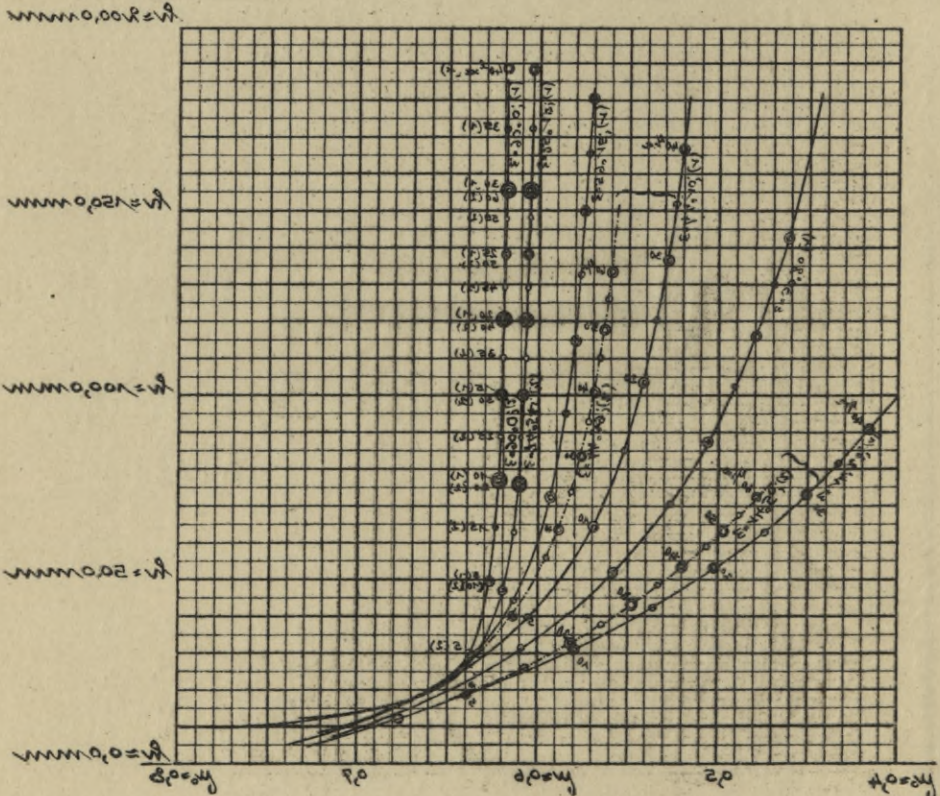
Taf. 4b.

Koeffizienten nach den Formeln von Basin.



Abszissen $\pm 0,1 = 25,1 \text{ mm}$
 Ordinaten $\pm 1 = 1,99$.

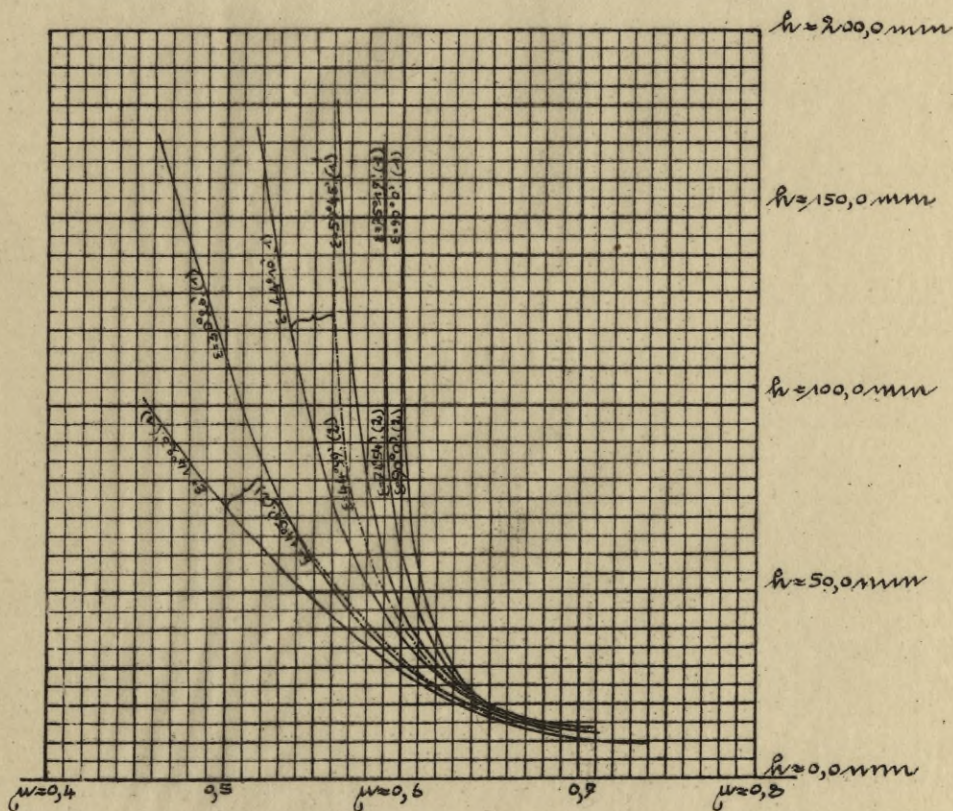
Stoffkoeffizienten nach den Formeln von Borsini



© Borsini = 1 : 100
 Dimensionen = 0,25 : 1 mm

Taf. 4c.

Koeffizienten nach den Formeln von o. Wax,

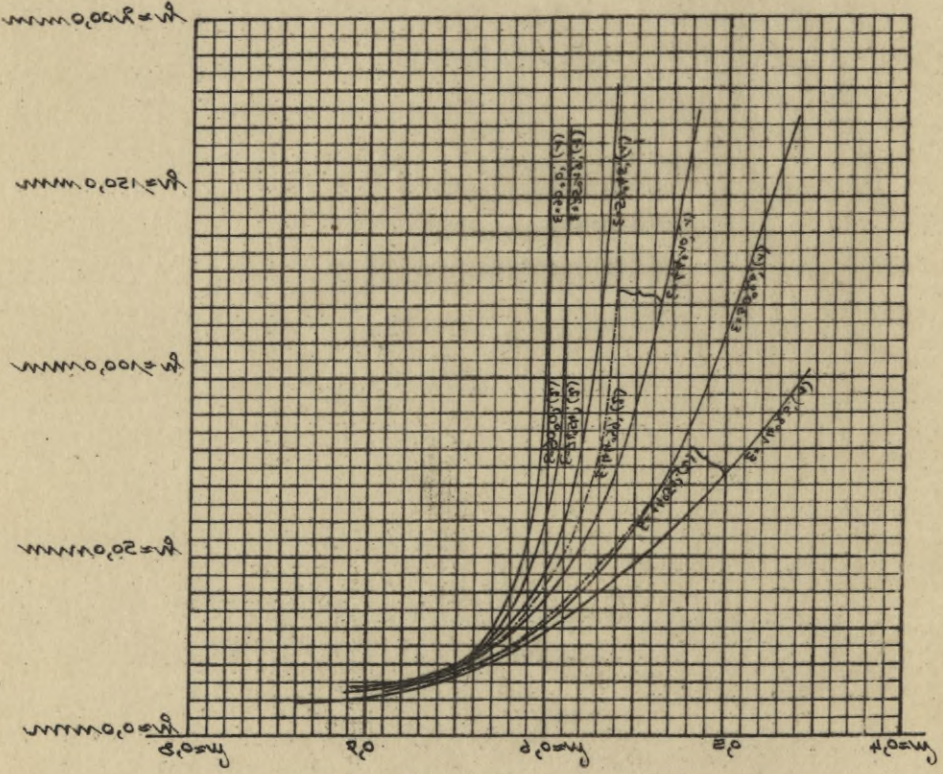


Abzissen = 0,1 = 25,0 mm

Ordinaten $\approx 1 : 1,99$.



Stoßkoeffizienten nach dem Zornen von v. Weiz.

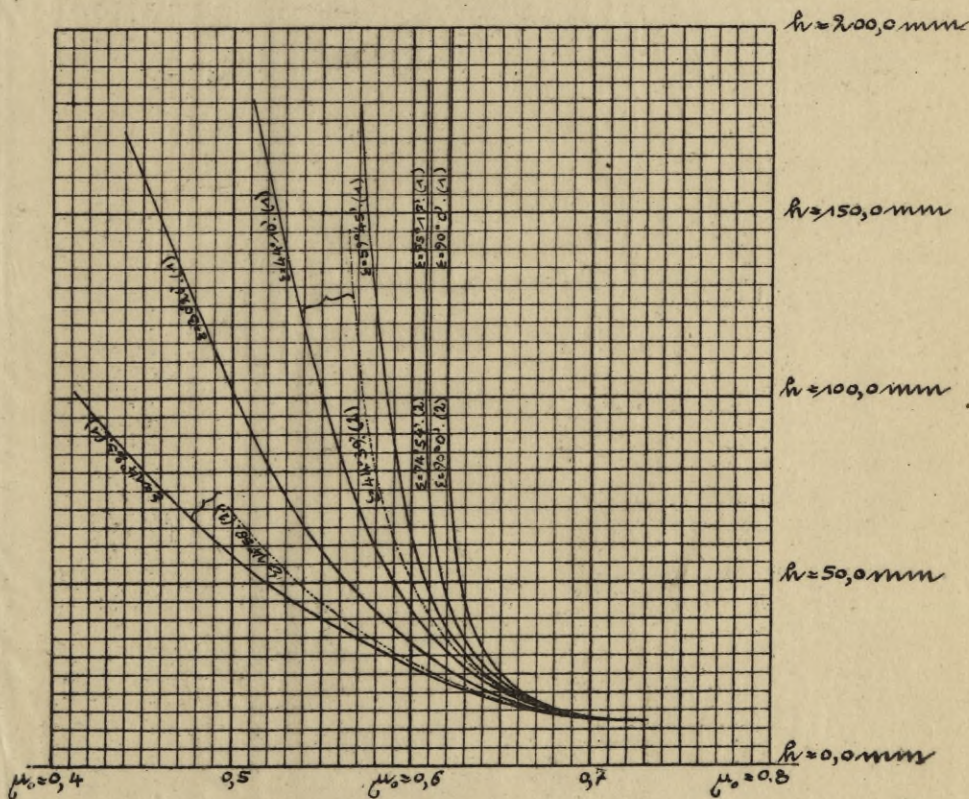


© Dr. v. Weizsäcker
 1920, 0,02 = 0,020 mm



Taf. 4d.

Koeffizienten nach den Formeln von Weisbach.

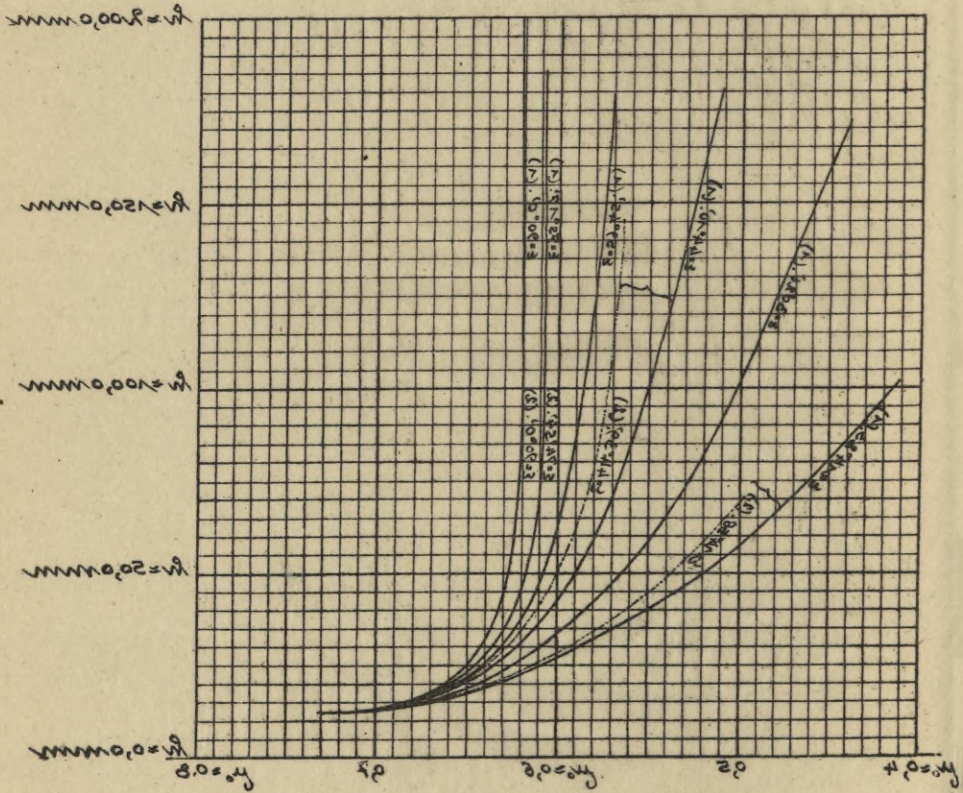


Abzissen = 0,1 = 25,1 mm

Ordinaten = 1 = 1,97.



Kraftlinien nach dem Sommer von Weisbach.



© Dr. Ing. v. Weisbach

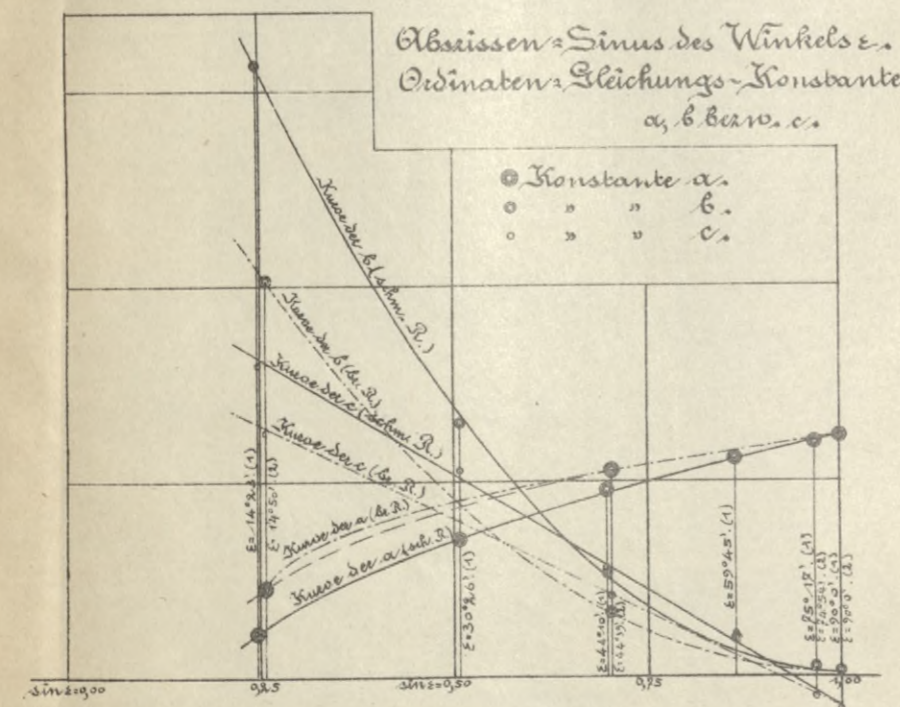
© Dr. Ing. v. Weisbach



Fig. 1.

Die Konstanten der Gleichung $\mu = a + \frac{b}{h+c}$

Index (1) : Versuche in schmaler Rinne (ausgezogen).
 Index (2) : " " breiter " (strich-punktiert).

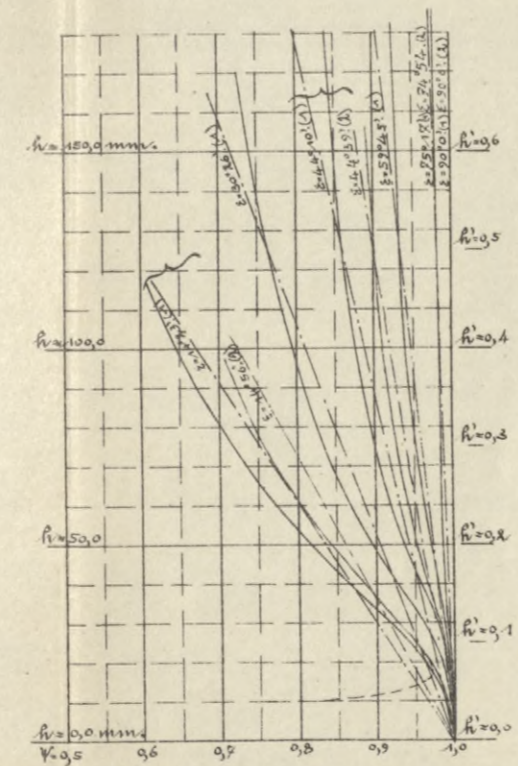


Mafsstäbe : $\left\{ \begin{array}{l} \text{Für } \sin \epsilon = 0,1 = 10,0 \text{ mm} \\ \text{ " } \alpha = 0,1 = 5,0 \text{ " } \\ \text{ " } b = 1,0 = 1,5 \text{ " } \\ \text{ " } c = 1,0 = 0,5 \text{ " } \end{array} \right.$

Fig. 2.

Vergleich der Ausfluss-Koeffizienten mit denen des normalen Überfalles.

Index (1) : Schmale Rinne.
 Index (2) : Breite "

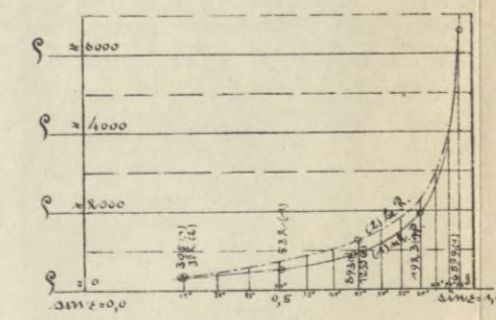


Abszissen : Faktor V im Mafsstab 1:9,9 mm.
 Ordinaten : Überfallhöhe im Mafsstab 1:1,98 bzw. Weh Höhe im Mafsstab 0,1:12,1 mm.

Fig. 3.

Graphische Darstellung der Gleichungs-Konstanten Q.

Index (1) : Schmale Rinne.
 Index (2) : Breite "



Abszissen : Sinus des Winkels ϵ .
 $M = 0,1 = 5 \text{ mm}$.
 Ordinaten : Konstante Q der Gleichung : $h = Q(1-V)$.
 $M = 1000 = 5,1 \text{ mm}$.

Anm. ϵ bedeutet den Winkel der Überfallkante mit der Rinneaxe im Grundriss.

Fig. 4. Linien gleicher Überfallhöhen für die schmale Rinne.

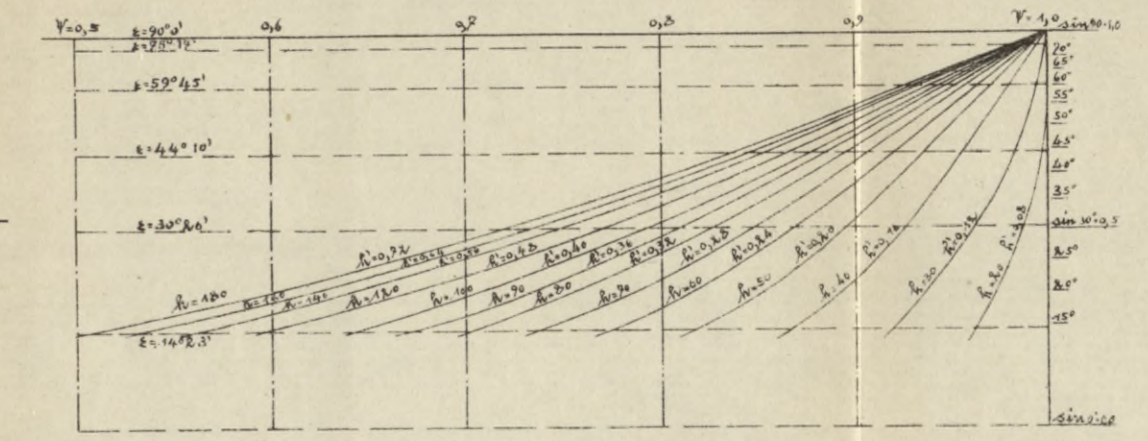
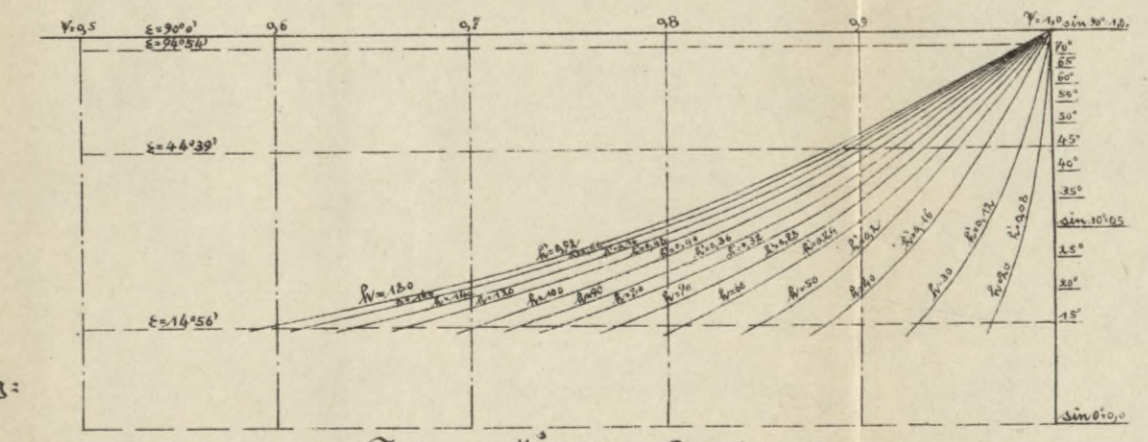


Fig. 5. Linien gleicher Überfallhöhen für die breite Rinne.

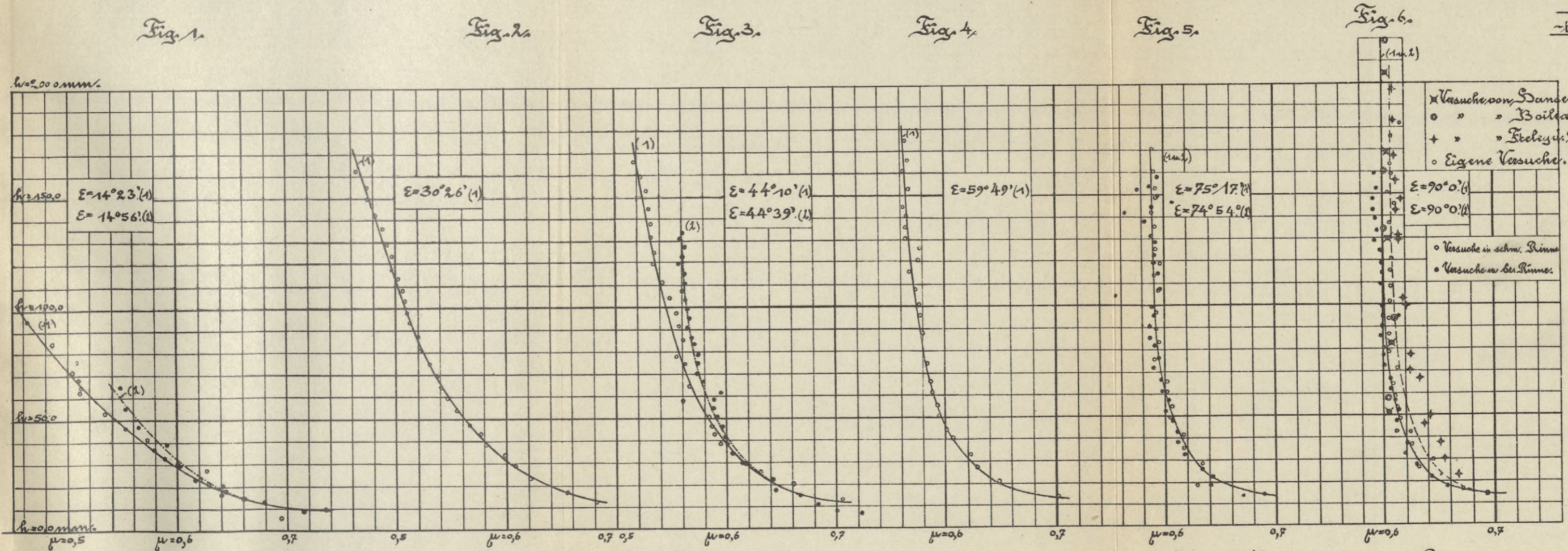


Abszissen : Faktoren $\frac{u_0^2}{u_0^2} = V$ im Mafsstab 0,1:25 mm.
 Ordinaten : Sinus des Wehewinkels ϵ im Mafsstab 0,1:25,1 mm.
 zu Fig. 4 u. 5.

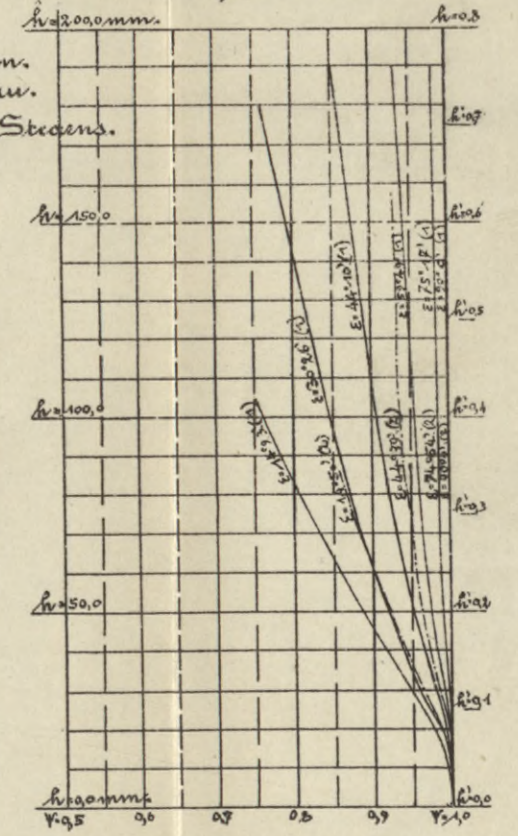


Ausfluss-Koeffizienten μ für schiefe vollkommene Ueberfälle berechnet nach den Formeln von v. Weis.

Fig. 7.



Vergleich der Ausfluss-Koeffizienten mit denen des normalen Ueberfalles.



Winkel ϵ = Neigungswinkel der Ueberfallkante gegen Rinneaxe.

Abscissen = Ausfluss-Koeffizienten μ . $M = 0,1 = 25,0 \text{ mm}$
 Ordinaten = Ueberfallhöhen h im Maßstab $1:1,99$.

Anm. Index (1) = Versuche in schmaler Rinne (ausgezogen).
 Index (2) = " " breite " (strich-punktiert).

Abscissen = Faktor γ im Maßstab $0,1:10,0 \text{ mm}$.
 Ordinaten = Ueberfallhöhe h . $M = 1,199$.
 Ordinaten = Ueberfallhöhe = h . $M = 0,1:12,6 \text{ mm}$.
 Weirhöhe

Ausfluss-Koeffizienten μ_0 für schiefe vollkommene Ueberfälle berechnet nach den Formeln von Weisbach.

Fig. 7.

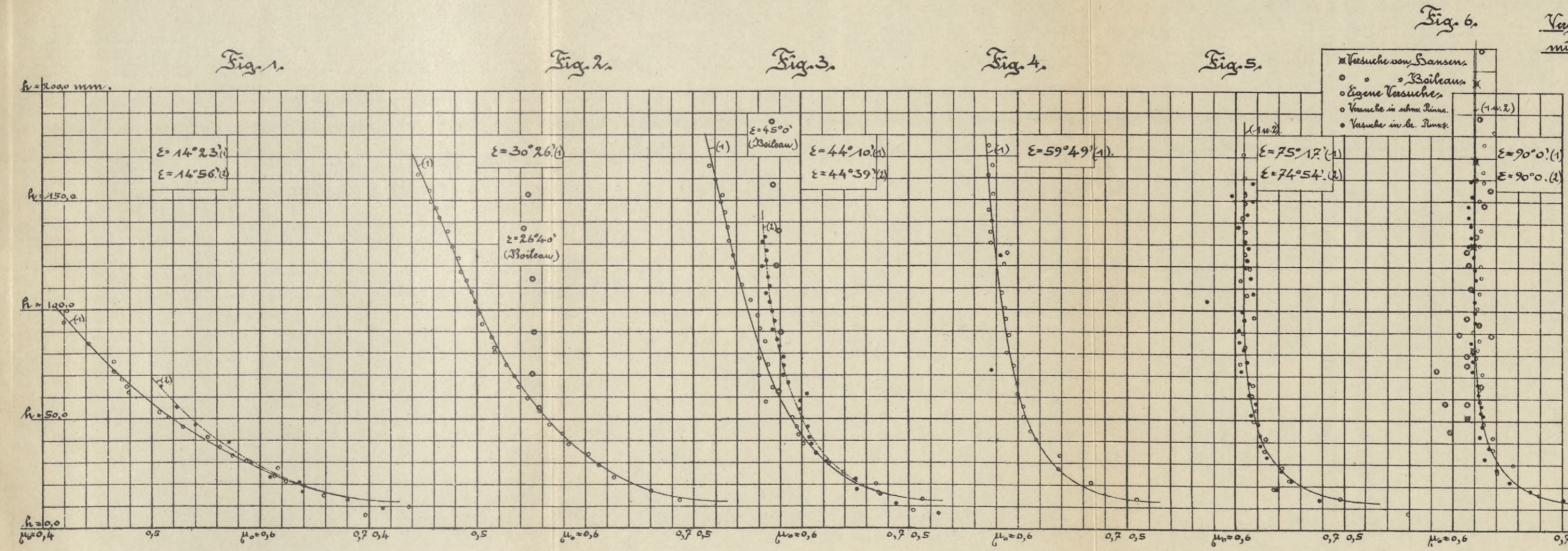
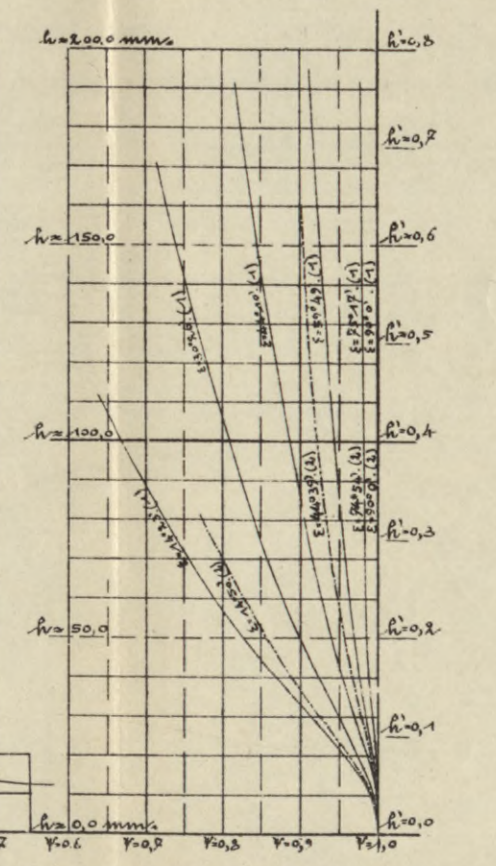


Fig. 6. Vergleich der Ausfluss-Koeffizienten mit denen des normalen Ueberfalles.



Winkel ϵ = Neigungswinkel des Ueberfalles gegen Rinnenaxe.

Abszissen = Ausfluss-Koeffizienten μ_0 , $Dl = 9,1 = 25,1 \text{ mm}$
 Ordinaten = Ueberfallhöhen im Maßstab 1:1,97.

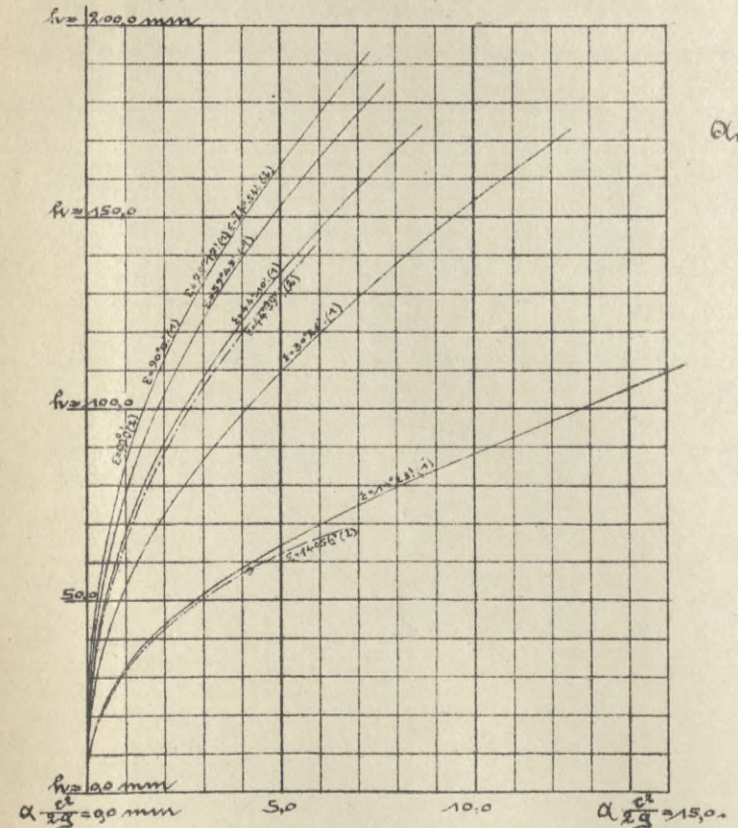
Anm. Index (1) = Versuche in schmaler Rinne (ausgezogen),
 Index (2) = " " breiter " (strich-punktiert).

Abszissen = Faktor γ , $Dl = 9,1 = 25,1 \text{ mm}$
 Ordinaten = Ueberfallhöhen h , $Dl = 9,1 = 25,1 \text{ mm}$
 $\frac{h}{\gamma} = h'$ im $Dl = 9,1 = 25,1 \text{ mm}$.



Fig. 1.

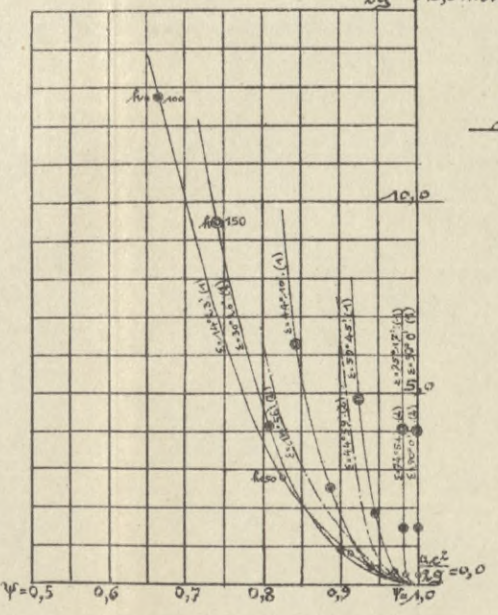
Graphische Darstellung der Aenderung der Zufluss-Geschwindigkeit mit der Ueberfallhöhe.



Abzissen: Zufluss-Geschwindigkeitshöhen, $M = 5 : 1$.
Ordinaten: Ueberfallhöhen im Masstab $1 : 2,02$.

Fig. 2.

Graphikon der Aenderung des Quotienten Ψ mit der Zufluss-Geschwindigkeit nach den Formeln von Weisbach.



Abzissen: Koeffizienten-Quotient $\frac{h_{10}}{h_1} = \Psi$, $M = 0,1-10,0$ mm.
Ordinaten: Zufluss-Geschwindigkeitshöhe, $M = 4,95 : 1$.

Fig. 3.

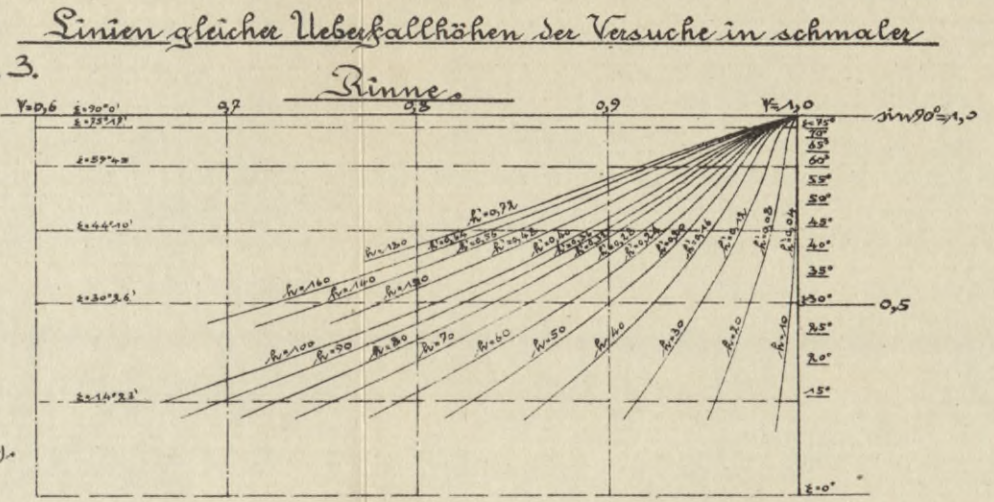
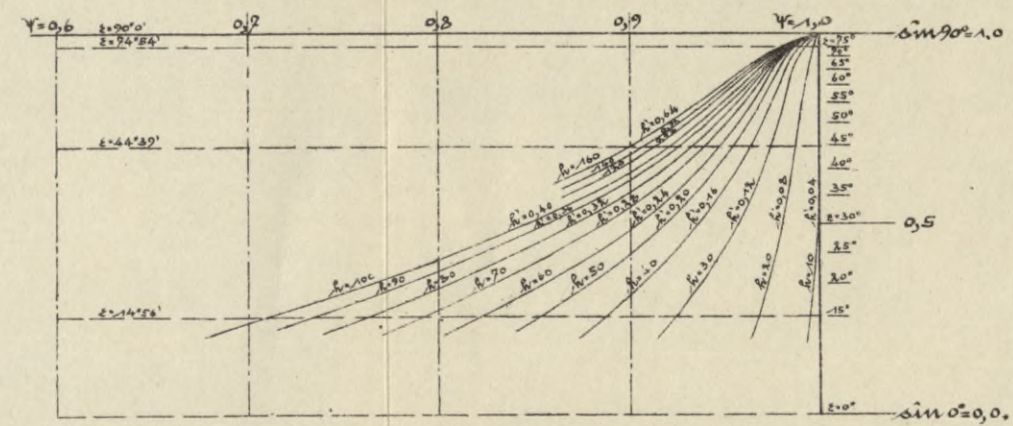


Fig. 4. Linien gleicher Ueberfallhöhen für breite Rinne.

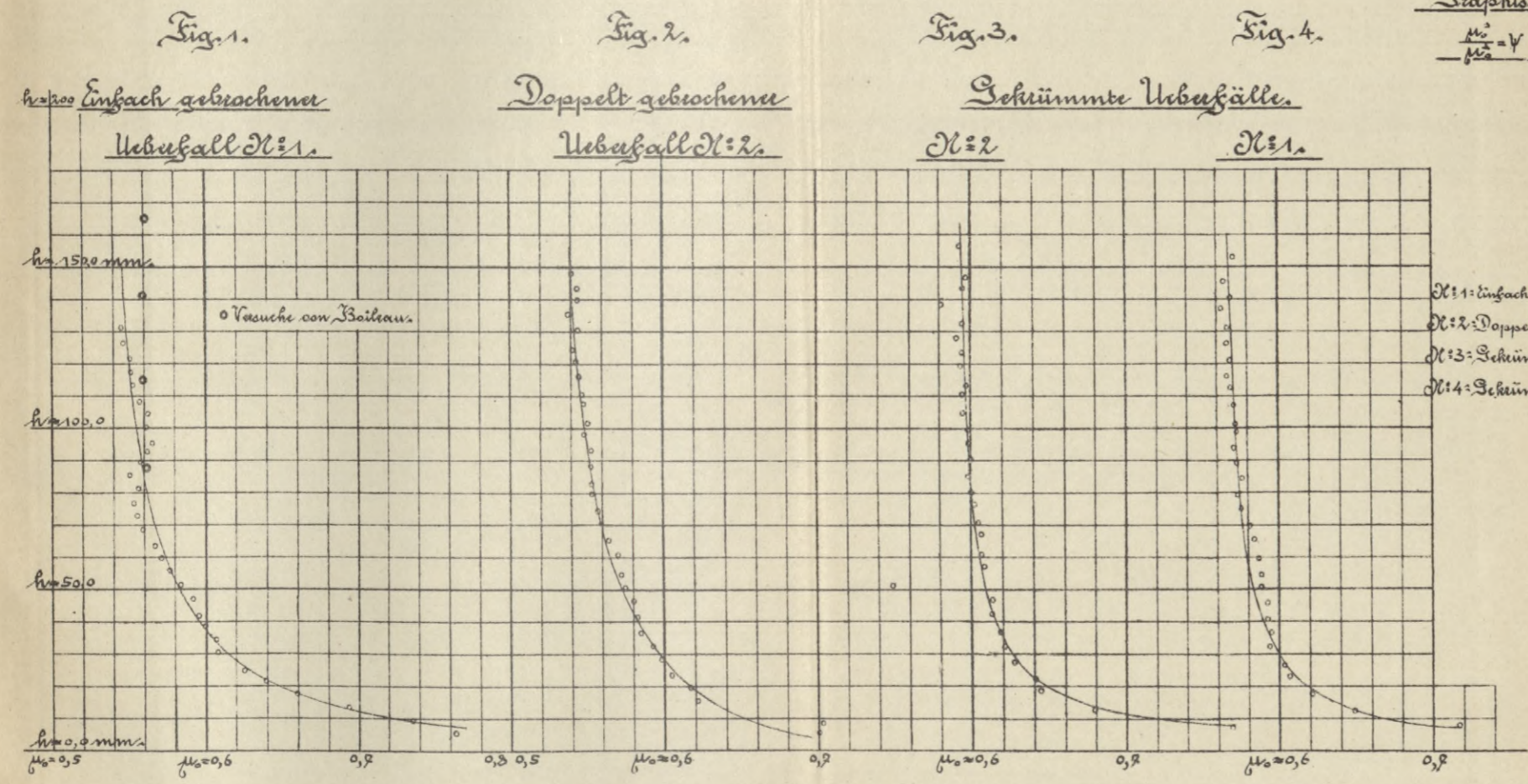


Zu Fig. 3 u. 4. Abzissen: Koeffizienten-Quotient $\frac{h_{10}}{h_1} = \Psi$ im Masstab $0,1-10,0$ mm.
Ordinaten: Sinus des Wehrtungswinkels α , $M = 0,1-4,9$ mm.

Fig. 3 u. 4 gelten für die Formeln von Weisbach.



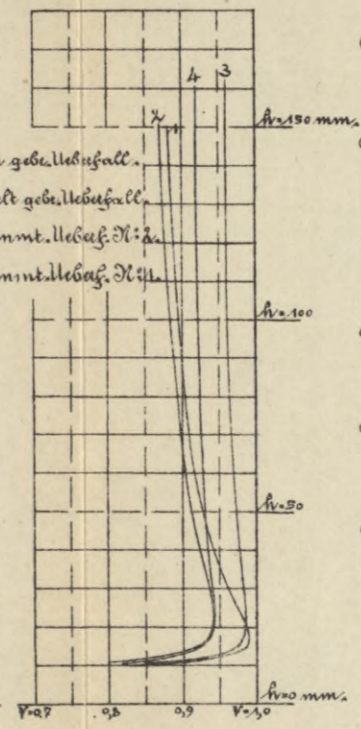
Ausfluss-Koeffizienten μ_0 bei gebrochenen und gekrümmten Ueberfällen.



Abzissen: Ausfluss-Koeffizienten μ_0 im Maßstab $0,1 \approx 249 \text{ mm}$.
 Ordinaten: Ueberfallhöhen h im Maßstab $1:2$.

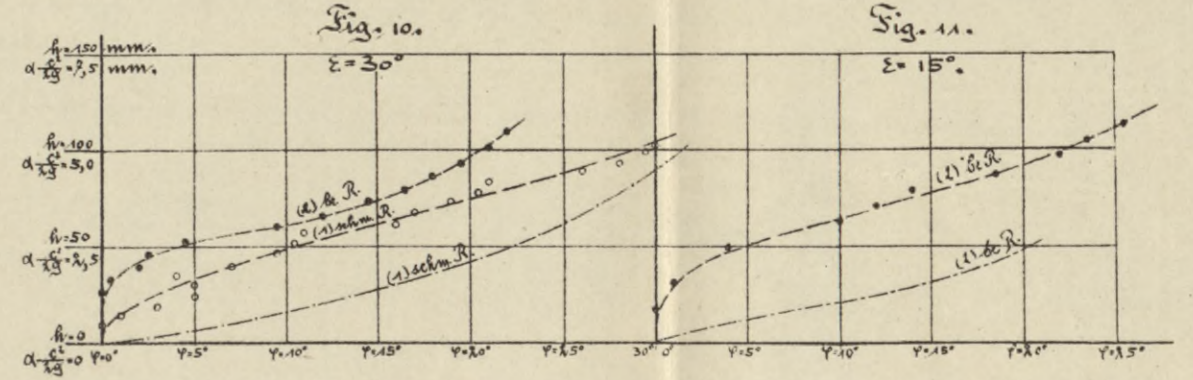
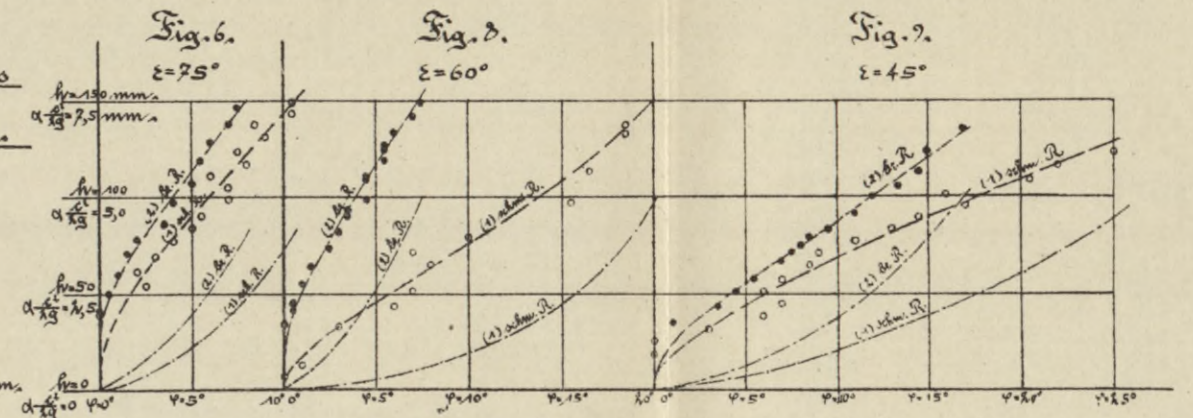
Fig. 5.

Graphische Darstellung des Faktors $\frac{\mu_0}{\mu_0^2} = \psi$ für nebenstehende Fig. 1-4.



Abzissen: Faktor ψ . $Dh = 0,1 = 10 \text{ mm}$.
 Ordinaten: Ueberfallhöhen. $Dh = 1:2$.

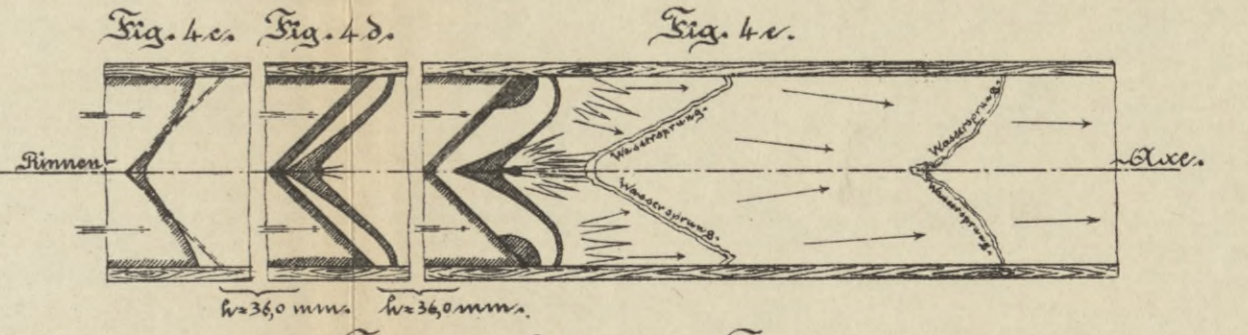
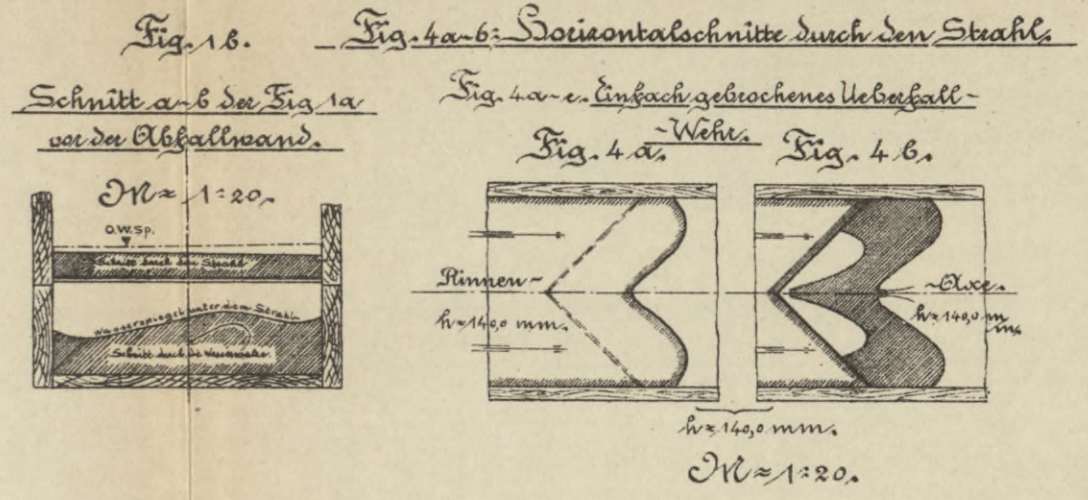
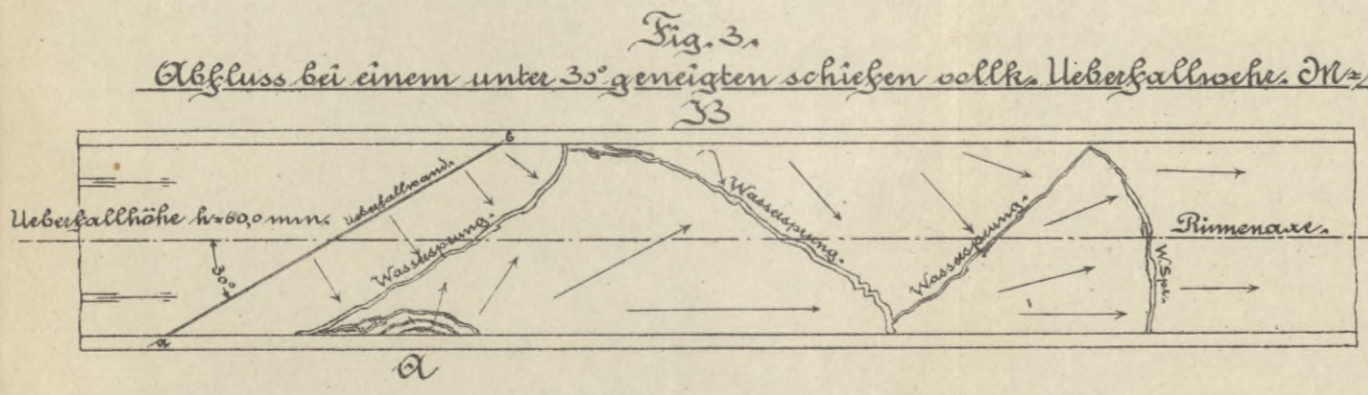
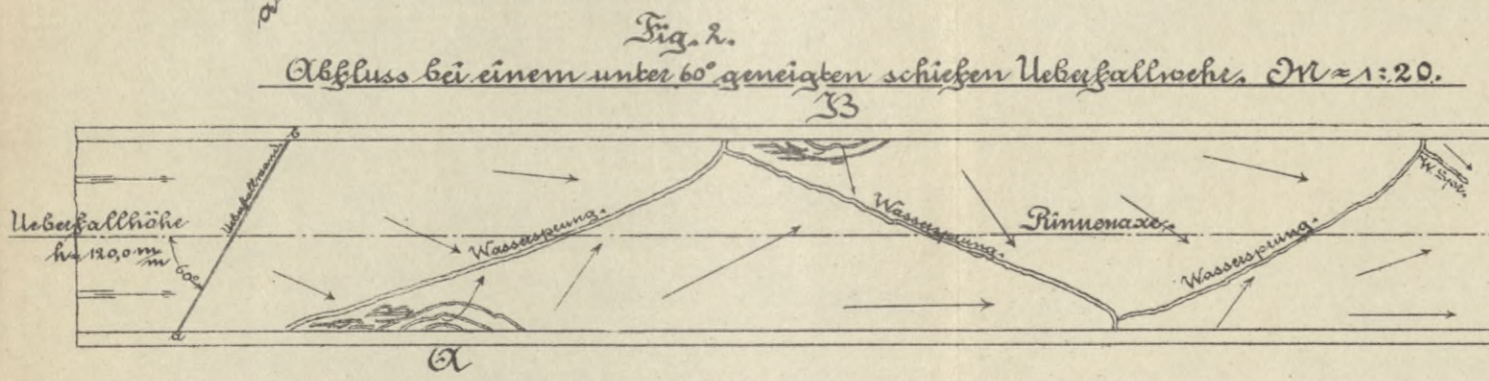
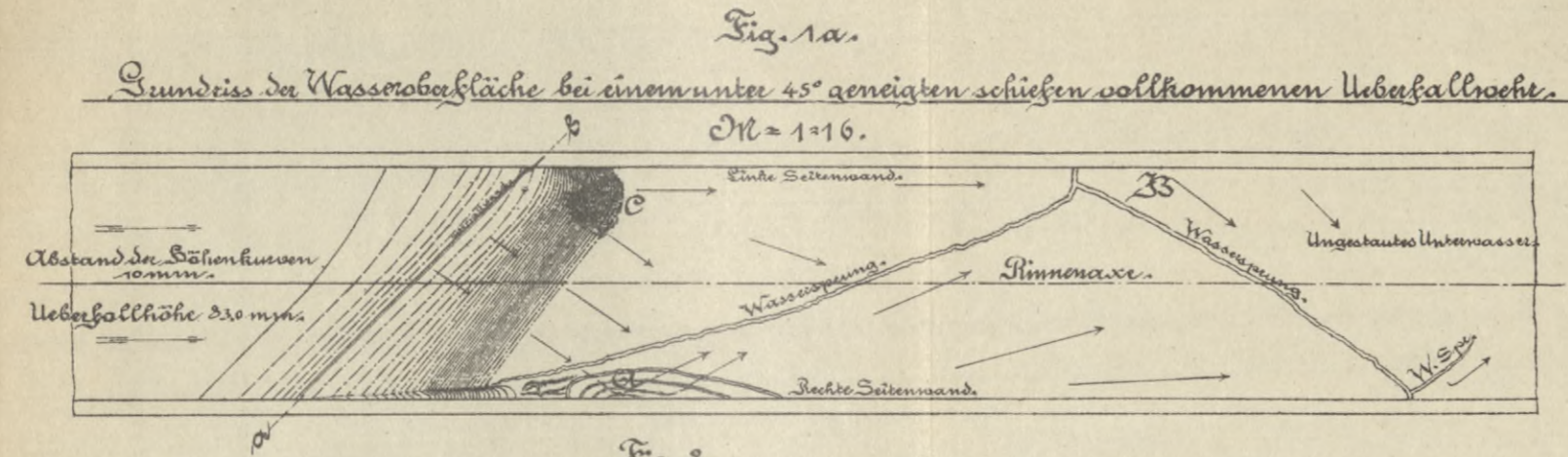
Versuche über die Ablenkung des Wassers bei schiefen Ueberfällen.



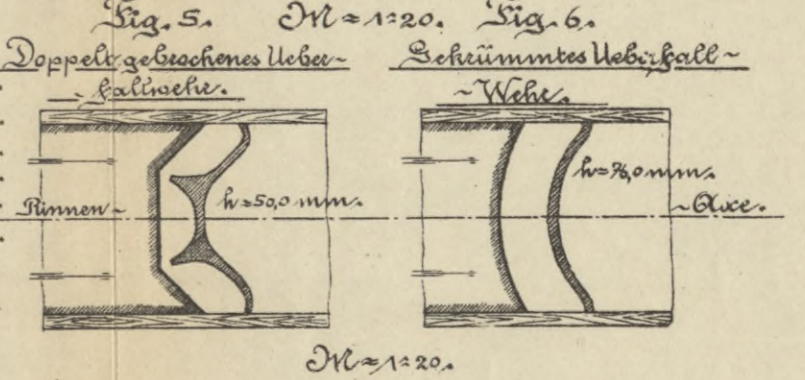
Abzissen: Mittlere Ablenkungswinkel der Stromlinien in der Ebene der Rinnenaxe gegen die Wehr-Normale. $10 \approx 249 \text{ mm}$.
 Ordinaten: Ueberfallhöhen im Maßstab $1:4$.
 bzw. Zufluss-Geschwindigkeitshöhen im Maßstab $5:1$.

Anm. Index (1): Versuche in schmaler Rinne
 Index (2): " " breiter



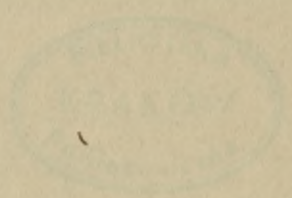


- Erklärungen zu Fig. 4a-b.
- Fig. 4a: " 20 " unter " " "
 - Fig. 4b: " 40 " über " " "
 - Fig. 4c: " " in Höhe der " " "
 - Fig. 4d: " 120 mm unter " " "
 - Fig. 5: " 20 " " " "
 - Fig. 6: " 60 " " " "

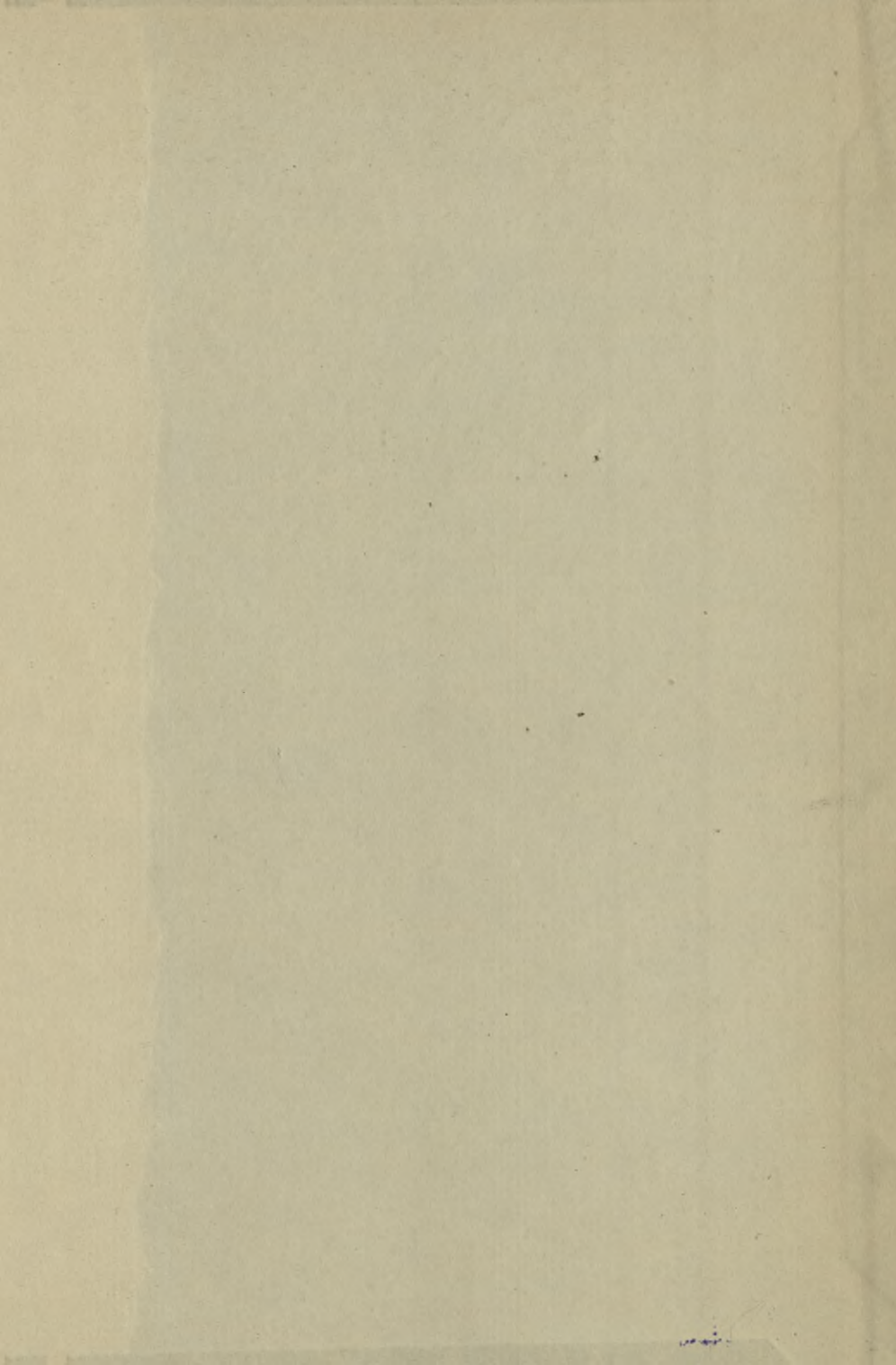


BIBLIOTEKA
KRAKÓW
Politechniczna

S. 61



6-86



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000294563