

Untersuchungen Über Die Verteilung Der Hydrostatischen Drücke An Wehrkronen Und Rücken Von Ueberfallwehren Infolge Des Abstürzenden Wassers

Hasumi, Michitaro
Forestry Laboratory, Department of Agriculture, Kyusyu Imperial University

<https://doi.org/10.5109/22561>

出版情報：九州大学大学院農学研究院紀要. 3 (4), pp.65-97, 1931-09. Kyushu Imperial University
バージョン：
権利関係：



Journal of the Department of Agriculture, Kyushu Imperial University, Vol. 3, No. 4
September 1, 1931

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE VERTEILUNG DER HYDRO-
STATICHEN DRÜCKE AN WEHRKRONEN UND RÜCKEN
VON UEBERFALLWEHREN INFOLGE DES
ABSTÜRZENDEN WASSERS

Michitaro HASUMI

INHALT

1. Einleitung und Zweck der Untersuchungen.
 2. Der Untersuchung zugrundegelegte Wehrtypen.
 3. Beschreibung der Versuchsanordnung.
 4. Versuchsdurchführung.
 5. Versuchsergebnisse.
 6. Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse im Innern des Wasserkörpers des Zulaufgerinnes knapp oberhalb der Ueberfallkante.
 7. Zusammenstellung der Endergebnisse.
 8. Untersuchung über die Anwendbarkeit des Ähnlichkeitsgesetzes.
 9. Zusammenfassung.
- Literatur.
Tabellen.
Abbildungen.

I. EINLEITUNG UND ZWECK DER UNTERSUCHUNGEN

Die Behandlung der Frage von Ueberfällen bei festen Wehren zählt zu einem der wichtigsten Kapiteln der Hydraulik. Dementsprechend nehmen auch die diesbezüglichen Abhandlungen sowohl wissenschaftlicher, als rein praktischer Natur den ihnen gebührenden Platz in der Fachliteratur ein. Bei näherem Studium derselben fällt jedoch auf, daß sämtliche Bearbeiter dieses Gegenstandes sich fast ausschließlich nur die Lösung der Frage des Wasserabflusses zum

Ziele gesetzt haben. Wenn auch dieser Frage naturgemäß die wichtigste Bedeutung zukommt (wir verweisen hier nur auf die zahlreichen Untersuchungen, die sich mit der Festsetzung der Ueberfallkoeffizienten von Wehren unter den verschiedensten Voraussetzungen befassen), so erscheint uns jedoch die Klärung hinsichtlich der hydrostatischen Druckverhältnisse an Kronen und Rücken von Ueberfallwehren nicht nur vom wissenschaftlichen Standpunkte aus, sondern auch in rein praktischer Beziehung als äußerst wünschenswert. Daß unmittelbar unterhalb der Wehrkronen unter gewissen Voraussetzungen Unterdrücke (Saugwirkungen) auftreten können, ist wohl nichts Neues. Ueber die Verteilung und insbesondere die Größe derselben ist bisher jedoch so gut wie nichts bekannt.

Der Zweck der nachstehenden Untersuchungen ist daher der, diese Frage im Wege des Modellversuches zu klären. Einem Ansuchen des Verfassers entsprechend, erteilte das österr. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft die Bewilligung zur Vornahme der erforderlichen hydraulischen Versuche in der Versuchsanstalt für Wasserbau in Wien, aus welchem Anlaß es den Verfasser drängt, für dieses Entgegenkommen seinen besonderen Dank auszusprechen. Dem Leiter der genannten Versuchsanstalt, Herrn Ministerialrat Ing. RUDOLF EHRENBERGER, sei an dieser Stelle ebenfalls tiefgefühlter Dank für seine Bemühungen um die Durchführung der Laboratoriumsarbeiten gesagt.

2. DER UNTERSUCHUNG ZUGRUNDEGELEGTE WEHRTYPEN

Bevor auf die Beschreibung jener Wehrtypen eingegangen wird, die den gegenständlichen Untersuchungen zugrunde liegen, wollen wir einige allgemeine Bemerkungen über die Einteilung der festen Wehre vorausschicken. Nach der Form ihrer Abfallwand (Wehrücken) können diese nach REHBOCK (14) eingeteilt werden in:

- A) Schußwehre
- B) Sturzwehre
- C) Stufenwehre

Zu A): Schußwehre sind feste Wehre, deren Abfallwände eine so flache Neigung besitzen, daß das über das Wehr strömende Wasser sich nicht vom Wehrkörper trennt, sondern mit demselben dauernd in Berührung bleibt.

Geht die Wehrkrone ohne Uebergangsfläche scharfkantig in den Absturzboden über, so bleibt der Strahl, namentlich bei großer Ueber-

fallhöhe, nicht aufliegend, da die mit beträchtlicher Geschwindigkeit über die Wehrkone hinfließenden Wassersäden nicht plötzlich aus ihrer Richtung abgelenkt werden können. Der Strahl hebt sich vielmehr infolge seines Beharrungsvermögens vom Wehrkörper ab, um sich erst weiter unterhalb wieder auf den Abschüßboden aufzulegen. In diesem Fall verliert das Wehr den Charakter eines reinen Schußwehres. Je flacher geneigt der Abfallboden ist, um so früher wird der Strahl bei einem Wehr mit scharfer Ueberfallkante unter dem Einfluß der Schwerkraft wieder das Wehr berühren. Der Raum zwischen dem oberen Teil des Abschüßbodens und dem Wasserstrahl ist dabei entweder mit Luft, oder ganz oder nur zum Teil mit einer Wasserwalze mit zur Wehrrichtung gleichlaufender Achse ausgefüllt.

Zu B): Sturzwehre sind feste Wehre, bei denen die Abfallwand lotrecht oder doch so steil angeordnet ist, daß der über die Wehrkrone hinfließende Wasserstrahl sich vom Wehrkörper trennt und frei auf die unterhalb des Wehres gelegene Flüßsohle oder auf das sie schützende Sturzbett hinabfällt, wobei zwischen dem Wehrkörper und dem abfallenden Wasserstrahl ein mit Wasser, oder ein teils mit Wasser, teils mit Luft gefüllter Raum vorhanden ist.

Bei diesen Wehren können sich die Ueberfälle in sehr verschiedener Weise ausbilden, je nach den Einflüssen, unter denen sich die Strahlbildung vollzieht. Hierbei unterscheidet REHBOCK nach den auftretenden Strahlformen folgende drei Gruppen:

- a) Ueberfall mit freiem Strahl,
- b) Ueberfall mit gewelltem Strahl,
- c) Ueberfall mit angeschmieгtem Strahl,

je nachdem der Strahl:

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

Zu a) ist zu bemerken, daß beim Ueberfall mit freiem Strahl vier verschiedene Strahlarten entstehen können und zwar:

- 1.) der gelüstete Strahl, bei dem die Luft zwischen Strahl und Wehrücken die Spannung der Außenluft besitzt,
- 2.) der gesenkten Strahl, bei dem die Spannung der eingeschlossenen Luft kleiner als diejenige der Außenluft ist,

- 3.) der gehobene Strahl, bei dem die Spannung der eingeschlossenen Luft größer als diejenige der Außenluft ist und
- 4.) der wassergefüllte Strahl, der keine Luft einschließt.

Zu b) ist zu bemerken, daß der gewellte Strahl fast nur bei Grundwehren, d. h. solche, bei welchen der Unterwasserspiegel höher als die Wehrkrone liegt, vorkommt.

Zu c) wird bemerkt, daß der angeschmiegte Strahl bei schlender Lüftung des Raumes unter dem Strahl bei Wehren mit scharfer Ueberfallkante entsteht. Dieser angeschmiegte Strahl ist dem aufliegenden Strahl bei Schußwehren ähnlich, unterscheidet sich vom letzteren dadurch, daß sich der Strahl in seinem oberen Teil vom Wehrkörper trennt, wobei zwischen dem Wehr und dem Strahl ein Zwischenraum verbleibt, der beim aufliegenden Strahl fehlt. Das Abheben des Strahles erfolgt wie beim freien Strahl unmittelbar an der scharfen Ueberfallkante, indem das Beharrungsvermögen des über die Wehrkante fließenden Wassers eine plötzliche Änderung der Richtung der Wasserfäden verhindert. Der Strahl fällt indessen nicht frei zur Unterwasserrinne hinunter, sondern wird durch den Ueberdruck der Außenluft zum Wehrkörper zurückgebogen, wobei er sich tangential an diesem anschmiegt.

Zu C): Stufenwehre sind feste Wehre, bei denen die Abfallwand aus zwei oder mehreren einzelnen Teilen besteht, die durch wagrechte oder nahezu wagrechte Flächen von einander getrennt sind.

Nach diesen allgemeinen Betrachtungen über die Einteilung der Wehre ihrer Form nach wollen wir zur Beschreibung der den Untersuchungen zugrundegelegten Wehrformen übergehen. Wir haben dabei besonders die auf dem Gebiete der Wildbachverbauung vorkommenden einfacheren Wehrkonstruktionen (Steinkastenwehre, u. s. w.) im Auge, bei welchen die Saugwirkungen unterhalb der Wehrkrone leicht die Ursache von Bauschäden werden können. Da solche Wehrbauten infolge der bei Wildbächen vorkommenden großen Geschiebeführungen in kürzester Zeit mit Geschiebematerial hinterfüllt werden, sind den nachfolgenden Untersuchungen in erster Linie vollständig verschottete Wehre zugrundegelegt.

Aus Gründen der besseren Vergleichsmöglichkeit weisen die Wehrkörper der Modelle in ihren Längsschnitten einen geradlinigen Verlauf auf. Die Neigung der Wehrkörper gegen die Horizontale betrug rund $\alpha = 45^\circ$ und 60° . Die Ueberfallkante war sowohl als scharfe Kante, als auch mit einem eingeklebten Kreisbogen ($r = 100$ mm) ausgebildet. Eine weitere Unterteilung der Versuche wurde in der Weise durch-

geführt, daß die oberhalb des Wehres anschließende sohle (O. W.) einmal horizontal und einmal geneigt ($J = 34\%$) angenommen wurde. Mit Rücksicht auf die geringe Wandrauhigkeit des Modelles (gehobeltes Holz) entspricht dies im ersten Fall (selbstverständlich) strömendem, im zweiten Fall (wie dies noch später nachgewiesen werden wird) schießendem Fließzustand. Auf diese Weise ergaben sich acht Versuchsreihen, die der nachfolgenden Zusammenstellung in Tabelle I zu entnehmen sind. Bei jeder dieser Versuchsreihen wurden die Druck-

Tabelle I. Versuchseinteilung

Sohlenneigung im O. W.	$J = 0\%$				$J = 34\%$			
	$\alpha = 45^\circ$		$\alpha = 60^\circ$		$\alpha = 45^\circ$		$\alpha = 60^\circ$	
Neigungswinkel des Wehrrückens	rund	scharf	rund	scharf	rund	scharf	rund	scharf
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII

verhältnisse an der Sohle in Gerinnemitte für die drei Wassermengen von $Q = 20, 40$ und 60 l/sec untersucht und die zugehörigen Wasserspiegel aufgenommen. In sämtlichen Fällen handelte es sich um nicht belüftete Ueberfälle. Nach der früher angeführten Einteilung der Wehre nach ihrer Form zählen die Wehre der Versuchsreihen I, III, V und VII (Ueberfallkante abgerundet) zu Schußwehren (A), die Wehre mit scharfer Ueberfallkante der Versuchsreihen II, IV und VI zu Sturzwehren mit angeschmiegtem Strahl (B, c), während das Wehr der Versuchsreihe VIII als Sturzwehr mit freiem, gesenktem Strahl (B, a, 2) anzusprechen ist.

3. BESCHREIBUNG DER VERSUCHSANORDNUNG

Die Versuche wurden in dem im breiten und ebenso tiefen hydraulischen Gerinne der Versuchsanstalt für Wasserbau in Wien durchgeführt, und zwar an jener Stelle, an Welcher die Seitenwände des Gerinnes aus 25 mm starken Spiegelglästafeln bestehen, sodaß die Möglichkeit des Einblickes in das Innere des überstürzenden Wasserstrahles gegeben war (Abbildung 1). Aus Gründen der Oekonomie

schien es geboten, nicht die ganze Gerinnebreite von 1 m auszunützen, sondern die nutzbare Breite durch die Errichtung einer lotrechten, hölzernen Zwischenwand auf rund 40 cm (genau $b = 402$ mm) zu ermäßigen. Mit Rücksicht auf die geringe Wandreibung (gehobeltes Holz, bezw. Glas) und den angestrebten Zweck kann diese Breite als vollkommen hinreichend angesehen werden. Der Wehrücken und die Sohlen des Ober- und Unterwassergerinnes bestanden aus Holz. Zur Ermittlung der hydrostatischen Drücke entlang der Sohle flussauf- und abwärts der Ueberfallkante wurden in Dieselbe in Gerinnemitte Löcher gebohrt. Die gegenseitigen Abstände dieser Löcher voneinander waren im allgemeinen ungleich groß, und zwar in unmittelbarster Nähe der Ueberfallkante am kleinsten. In diese Löcher wurden senkrecht zur Sohle dicht anschließende, kurze Kupferröhren mit einem lichten Durchmesser von 5 mm gesteckt, deren obere Mündungsöffnungen genau in der Ebene der Sohle, bezw. des Wehrückens ("flüchtig") lagen. Um dies zu erreichen war in der Gerinnemitte ein 50 mm breiter, bei Versuchsreihe II, IV, VI und VIII 640 mm, bei Versuchsreihe I und V 722 mm, bei Versuchsreihe III und VII 745 mm langer und 3 mm starker Messingstreifen in das Holz "flüchtig" eingelassen und mit seitwärts angeordneten Schrauben mit versenkten Köpfen an die Sohle, bezw. den Wehrücken dicht niedergeschraubt. Dieser Messingstreifen erhielt entsprechend der Asteilung der früher erwähnten Kupfer- (Piezometer-) röhren Löcher, in welche die oberen Enden dieser Röhren eingelötet und genau abgesetzt waren (Abbildung 2). Diese Vorsicht schien deshalb geboten, weil bei den entlang des Wehrückens auftretenden großen Geschwindigkeiten die geringste Unebenheit in der Sohle (z. B. Hervorragen der Röhrenenden oder ausgefranster Rand der Mündungen der Piezometerröhren) unliebsame störende Saug- oder Druckwirkungen zur Folge haben könnte, wie dies auch tatsächlich die Vorversuche zeigten, bei welchen die Kupferröhren einfach durch die in der Holzwand (Wehrücken) vorgebohrten Löcher hindurchgesteckt und mit der Ebene der Sohle dem Augenmaß nach "flüchtig" eingestellt wurden. Von den insgesamt 14-16 Röhren lagen 6 stromaufwärts der Ueberfallkante, während die übrigen 8 bezw. 10 entlang des Wehrückens, anschließend an die Wehrkrone ausgeteilt waren. An die unteren Enden der Röhren waren Gummischläuche und an diese kurze Kupferrohrstücke angeschlossen, die an zwei Stellen durch die rückwärtige Holzwand hindurch führten (Abbildung 3). Um diese beiden Durchgangsstellen

durch die Holzwand wasserdicht zu erhalten, wurden die Kupferröhrchen 1-6, bezw. 7-14 oder 16 in zwei kurze, mit Flanschen an die Holzwand befestigte und abgedichtete Eisenrohrstücke gelegt und die Zwischenräume zwischen den einzelnen Röhrchen mit Blei ausgegossen. Die äußereren Enden der Kupferröhrchen waren zur Vermeidung von Irrtümern mit Nummertafeln versehen, die den Piezometerröhrchen in der Sohle (Wehrücken) entsprachen und mit Holzstöpseln abgestöpselt.

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Durchführung des Messung der Wasserdrücke an der Sohle, bezw. die Ermittlung der gesuchten Piezometerstände gestaltete sich nun verhältnismäßig einfach. Sollte beispielsweise der hydrostatische Druck an der Sohle im Profil des Piezometerröhrchens RI ermittelt werden, so brauchte nur an das mit der Nummertafel 1 bezeichnete Röhrchenende an der rückwärtigen Holzwand (Abbildung 3) nach Entfernen des Holzstöpsels ein längerer Gummischlauch angeschlossen werden, der über das hydraulische Gerinne nach vorn hinüberführte. Dieser Schlauch endigte in eine Glasröhre, die mittels eines Eisenständers in lotrechter Lage (die freie Oberfläche nach oben) gehalten werden konnte, wie dies auf den später folgenden zahlreichen Lichtbildern (Abbildungen 4-20) zu erschen ist. Nach erfolgter Ansaugung des Wassers erhielt man infolge einfacher Heberwirkung die Höhe des jeweiligen Piezometerstandes. Die aufsteigende Glasröhre hatte einen solchen Durchmesser (Querschnitt der Wassersäule = 1 cm²), daß sich die Kapillarwirkung praktisch nicht mehr fühlbar machte. Die absoluten Höhen der Piezometerstände wurden an einem Metallmaßstab mit Millimeterteilung abgelesen, der auf einem vor der äußeren Glaswand wagrecht verschiebbaren Holzwinkel aufgeschraubt war. Letzterer ist ebenfalls auf den folgenden Lichtbildern (mit Ausnahme der Abbildungen 4 und 5) auf der rechten Bildseite zu erkennen. Besondere Aufmerksamkeit mußte dem Umstand zugewendet werden, daß während der Ablesung der Piezometerstände keine Luftblasen im Gummischlauch enthalten waren. Um in dieser Beziehung sicher zu sein, wurde vor jeder Ablesung der Heber durch starkes Absenken des Ableseglaskörpers in Tätigkeit gesetzt und nachher außerdem an einem an der höchsten Stelle des Gummischlauches eingeschalteten Glasrohr genau beobachtet, ob sich dort etwa noch Luftbläschen ansammelten. In diesem Falle mußte der Heber nochmals in Tätigkeit gesetzt werden, damit auch die letzten

Luftblaschen fortgerissen wurden. In der ebengeschilderten Weise wurden die den 14-16 Öffnungen in der Sohle (Wehrücken) entsprechenden Piezometerstände durch Umschalten des langen, über das Gerinne führenden Gummischlauches auf das nächste äußere, in der rückwärtigen Seite der Holzwand ausmündende Röhrchenende festgelegt.

Die jeweilige Festlegung der Wasserspiegel erfolgte mit Hilfe des auf einem Fahrgestell aufmontierten und auf wagrechten Schienen verschiebbaren "Spitzenmaßstabes" (Abbildung 1). Der mittels einer Libelle genau vertikal einstellbare Maßstab trug eine Millimeterteilung. Die Ablesung konnte mit Hilfe eines Nonius auf Zehntelmillimeter genau erfolgen. Das untere Ende des Maßstabes endigte in eine feine Silberspitze, die unter normalen Verhältnissen ein äußerst scharfes Erfassen des Wasserspiegels gestattete. Die Einstellung selbst erfolgte mittels des in Abbildung 1 sichtbaren Handrades (mit Handgriff), dessen Bewegung durch Wurmrad, Spindel, Zahnräder und Zahnstange in einem derartigen Übersetzungsverhältnis auf den Maßstab übertragen wurde, daß man diesen mit großer Schärfe um Bruchteile eines Millimeters heben oder senken konnte. Von der Wehrkrone flußaufwärts war die Einstellung ohne weiteres mit ziemlicher Genauigkeit möglich. Anders gestalteten sich jedoch die Verhältnisse flußabwärts von dieser Stelle. Infolge der ausnahmslos nächst, bzw. unterhalb der Wehrkrone auftretenden, mehr oder minder großen Saugwirkungen zeigte der abstürzende Wasserstrahl in der zur Fließrichtung senkrechten Richtung einen stark wellenförmigen Verlauf (Furchen), wobei die bei größeren Wassermengen ziemlich steil verlaufenden Wellenberge und Wellentäler oft einen Höhenunterschied von mehreren Zentimetern aufwiesen. Daß unter diesen Umständen eine genaue Festlegung des Wasserspiegels nicht möglich war, ist ohne weiteres verständlich. Die in den folgenden zeichnerischen Darstellungen wiedergegebenen Wasserspiegel von der Wehrkrone abwärts tragen daher nur den Charakter grober Näherungen. Auch die im weiteren Verlauf des Absturzes auftretende Erscheinung der Selbstbelüftung des Wassers (6) war einer genauen Festlegung des Wasserspiegels in diesen Teilen des Wehrückens hinderlich. Diese tritt nach den Untersuchungen von EHRENBÄRGER nach Überschreiten einer gewissen Grenzgeschwindigkeit auf und ist auf die abbremsende Wirkung der Luft zurückzuführen. Die folgenden Lichtbilder, insbesondere jene der Abbildungen 10 und 12 lassen ohne weiteres die Schwierigkeit der genauen Festlegung des Wasserspiegels entlang des Wehrückens erkennen.

Auf die Erscheinung des oben angeführten, stark gefurchten Wasserspiegels bei angeschnieinem Strahl macht auch FLAMANT (7) in seiner Hydraulik bei Besprechung von Ueberfällen mit lotrechter Wand aufmerksam und vergleicht den Wasserspiegel treffend mit den "Furchen eines Faltenwurfs" (les plis d'une draperie).

5. VERSUCHSERGEBNISSE

Bevor wir auf die Besprechung der eigentlichen Versuchsergebnisse eingehen, erscheint mit Rücksicht auf das große Gefälle von $J = 34\%$ des Oberwassergerinnes bei den Versuchsreihe V-VIII im Zusammenhang mit der geringen Wandrauhigkeit eine Untersuchung des Fließzustandes des oberhalb des Wehres an kommenden Wassers angezeigt. Bekanntlich unterscheidet man bei der turbulenten Bewegung des Wassers zwischen der strömenden und schießenden Fließart (13), je nachdem die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit ω größer oder kleiner als die mittlere Profilgeschwindigkeit des zu untersuchenden Gerinnes ist. Die Ausdrücke "strömend" und "schießend" decken sich mit den von BELANGER (2) (8) gebrauchten "mild" und "wild," der diesen Fließzuständen entsprechend zwischen "Flüssen" und "Wildbächen" unterscheidet.

Durch Gleichsetzen der Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit $\omega = \sqrt{g \cdot t}$ und der mittleren Profilgeschwindigkeit $v_m = \frac{Q}{F} = \frac{Q}{b \cdot t}$ erhält man

$$\sqrt{g \cdot t} = \frac{Q}{b \cdot t}$$

$$g \cdot t = \frac{Q^2}{b^2 t^2}$$

$$t^3 = \frac{Q^2}{b^2 g} \text{ oder schließlich}$$

$$\text{die Grenztiefe } t = t_{gr} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}} \dots \dots \dots \quad (1),$$

wobei t = Wassertiefe in m,

t_{gr} = Grenztiefe in m,

Q = Wassermenge in m^3/sek ,

F = Fläche des Gerinnes mit einer rechteckigen Form in m^2 ,

b = Gerinnebreite in m,

g = Acceleration der Schwere = 9.81 m

ist.

Wie bereits eingangs erwähnt, wurden bei jeder Versuchsreihe die Untersuchungen für die drei Wassermengen $Q = 20, 40$ und 60 l/sec durchgeführt. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Gerinnebreite von $b = 0.402 \text{ m}$ berechnen sich die Grenztiefen nach der oben abgeleiteten Formel (1)

$$t_{gr} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{0.402 \cdot 9.81}}$$

mit 63, 100 und 131 mm. Ein Vergleich dieser Werte mit den beobachteten Wassertiefen ergibt, daß sich das ankommende Wasser bei den ersten vier Versuchsreihen (Sohle oberhalb des Wehres horizontal) im strömenden, bei den Versuchsreihen V—VIII ($J = 34 \%$) im schießen Fließzustand befand. Hierbei verdient hervorgehoben zu werden, daß im ersten Fall (wagrechte Sohle) das Uebergangsprofil vom Strömen zum Schießen infolge der nachsaugenden Wirkung des abstürzenden Wassers verhältnismäßig weit stromaufwärts rückte.

In den nun folgenden Tabellen II—IX, bezw. Abbildungen 26-33 sind die Beobachtungsergebnisse sowohl tabellarisch als auch zeichnerisch niedergelegt. In den zeichnerischen Darstellungen ist für jede der drei Wassermengen sowohl der Wasserspiegel als auch der Verlauf der Wasserdrücke (Piezometerstände) entlang der Sohle in Gerinnemitte eingetragen. Aus Gründen der Einfachheit und einer größeren Deutlichkeit sind in sämtlichen Schaubildern die Piezometerhöhen grundsätzlich lotrecht über den betreffenden Sohlenpunkten aufgetragen und die erhaltenen Punkte durch vermittelnde Linienzüge mit einander verbunden. Zur Vermeidung falscher Auffassungen sei dies besonders hervorgehoben, weil dadurch die erhaltenen Linienzüge, insbesondere im unteren Teil des Wehrückens, wo die Drücke senkrecht zur Sohle gerichtet sind, eine tiefere Lage einnehmen und sich von den zugehörigen Wasserspiegeln ziemlich weit entfernen. Aber auch bei den zu den Wahrrücken senkrechten Auftragungen der Druckhöhen fallen die Drucklinien im unteren Teil des Wehrückens nicht mit den zugeordneten Wasserspiegellinien zusammen, was auf die früher erwähnte Unmöglichkeit einer genauen Aufnahme des mittleren Wasserspiegels und auf die in den meisten Fällen sicherlich vorhanden gewesene Erscheinung der Selbstbelüftung des Wassers zurückzuführen sein dürfte.

Tabelle II. Beobachtungsergebnisse der Versuchsröhre I.
Sohle horizontal, Kante rund, $\alpha = 45^\circ$.

Rohr Nr. m	Sohle z mm	Q = 20 l/sec				Q = 40 l/sec				Q = 60 l/sec				
		Piezometer- stand Wasserspiegel H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H - z mm	spez. Gewicht des Wassers kg/cm³	hydrostatische Druck $P = \rho \cdot g \cdot h$ kg/cm²	Piezometer- stand Wasserspiegel H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H - z mm	spez. Gewicht des Wassers kg/cm³	hydrostatische Druck $P = \rho \cdot g \cdot h$ kg/cm²	Piezometer- stand H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H - z mm	spez. Gewicht des Wassers kg/cm³	hydrostatische Druck $P = \rho \cdot g \cdot h$ kg/cm²	
-0.700	934	1008				1049				1046		112	0.001	
-0.300	934	1002				1035				1036		102	0.001	
-0.300	934	999.5				1030				1039		38	0.001	
-0.156	1 934	998.6	995	61	0.001	1028	1023	89	0.001	1034.5	1038.5	0.001	0.0112	
-0.106	2 934	993.8	992	58	0.001	1025	1018	84	0.001	1031.6	1031.6	0.001	0.0102	
-0.067	3 934	991.7	988	54	0.001	1020.5	1009	75	0.001	1041.4	1041.4	0.001	0.0088	
-0.046	4 934	989.5	985	51	0.001	1018	1003	69	0.001	1038	1012	78	0.001	
-0.026	5 934	987	979	45	0.001	1015	991	57	0.001	1034.7	995	61	0.001	
-0.005	6 934	984	970	36	0.001	1010	970	36	0.001	1039	971	37	0.001	
+0.032	7 932	977	956	-4.2	0.001	1002.5	892	-40.2	0.001	1022	852	-80.2	0.001	
+0.052	8 920	965	895	-25	0.001	-0.0025	989	843	-77	0.001	-0.0027	792	-128	0.001
+0.085	9 891.8	942	868	6.2	0.001	0.00062	970.5	836	-58	0.001	-0.00058	887	-4.8	0.001
+0.111	10 861.7	915	853	19.3	0.001	0.00193	947	885	-24.3	0.001	0.00243	971.7	386	22.3
+0.145	11 827.3	868	849	21.7	0.001	0.00217	912	863	35.7	0.001	0.00157	939	370	42.7
+0.179	12 791	832.5	812	21	0.001	0.0021	869	829	38	0.001	0.00238	868	843	49
+0.212	13 755.4	793	774	18.6	0.001	0.00156	829	789	33.6	0.001	0.00136	863	802	46.6
+0.246	14 718	753	736.5	18.5	0.001	0.00185	783	751	33	0.001	0.00133	813	763	45
+0.280	15 682.3	714	701	18.7	0.001	0.00187	746	715	32.7	0.001	0.00187	775.6	736	45.7
+0.350	16 609.4	638	622	12.6	0.001	0.00126	664	634	24.6	0.001	0.00246	693	647	37.6

Tabelle III. Beobachtungsergebnisse der Versuchreihe II.
Sohle horizontal, Kante scharf, $\alpha = 45^\circ$.

Profil Nr. n	Rohr Nr. z	Sohle Wasserspiegel mm	Piezometer- stand $H = z + h$ mm	Q = 30 l/sec			Q = 40 l/sec			Q = 60 l/sec			
				hydraulische Druckhöhe $h = H - z$ mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm ³	hydraulischer Druck $P = f \cdot h \cdot \gamma$ kg/cm ²	Wasserspiegel mm	Piezometer- stand $H = z + h$ mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm ³	Wasserspiegel mm	Piezometer- stand $H = z + h$ mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm ³	
-0.700	934	1007					1045				1067		
-0.300	934	999.4					1034				1064		
-0.200	934	997.2					1026				1056		
-0.156	1	934	995.2	993	59	0.0021	1026	1019	35	0.001	1041	107	0.001
-0.106	2	934	992	988	54	0.001	1022	1012	78	0.001	1043	95	0.001
-0.067	3	934	988.5	983	49	0.001	1017	1000	66	0.001	1037	75	0.001
-0.046	4	934	986	976	42	0.001	1014.8	998	54	0.001	1032.5	58	0.001
-0.026	5	934	981.2	964	30	0.001	1008.7	967	33	0.001	1027	29	0.001
-0.015	6	934	977	932	-2	0.001	1002.8	916	-18	0.001	1021	36	0.001
+0.010	7	935.5	972	869	-56.5	0.001	-0.00555	997	812	-93.5	0.001	-127.5	0.001
+0.038	8	865.7	955.8	904	83	0.001	0.00033	984	830	-63.7	0.001	-106.7	0.001
+0.070	9	859.2	918.5	893	33.8	0.001	0.00038	953	907	47.8	0.001	871	11.8
+0.103	10	833	870	847	24	0.001	0.00024	922	884	58	0.001	901	73
+0.139	11	766.7	827.5	897	20.3	0.001	0.00023	871	828	41.3	0.001	856	69.3
+0.171	12	749.8	788	769	19.2	0.001	0.000192	824	787	37.2	0.001	857	57.2
+0.205	13	714	749	733	19	0.001	0.00019	781	748	34	0.001	868	50
+0.232	14	630.6	671	652	11.4	0.001	0.000114	704	666	25.4	0.001	729	36.4

Tabelle IV. Beobachtungsergebnisse der Versuchsstrecke III. Sohle horizontal, Kante rund, $a = 60^\circ$.

Profil nr. m	Rohr Nr.	Sohle Wasserspiegel mm	$Q = 30 \text{ l/sec}$			$Q = 42 \text{ l/sec}$			$Q = 60 \text{ l/sec}$		
			Hydrostatischer Druckhöhe $h = z + h$, mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm ³	Hydrostatischer Druckhöhe $h = 11 - z$, mm	Hydrostatischer Druckhöhe $h = z + h$, mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm ³	Hydrostatischer Druckhöhe $h = 11 - z$, mm	Hydrostatischer Druckhöhe $h = z + h$, mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm ³	Hydrostatischer Druckhöhe $h = z + h$, mm
-0.700	934.5	1009.5				1048.4			1059.5		
-0.300	934.5	1001.5				1034.5			1066		
-0.200	934.5	1000				1030			1055		
-0.156	1	934.5	997.4	62.5	0.001	1028	1014	89.5	1047	112.5	0.001
-0.106	2	934	994.4	59	0.001	1024	1018	84	1047	104.6	0.001
-0.067	3	934	992	56	0.001	1020.5	1009	75	1042	102.3	0.001
-0.026	4	934	990	52	0.001	1016.2	1002	68	1038	101.1	0.001
-0.005	5	934	987.5	46	0.001	1013.5	990	56	1034.5	99.6	0.001
+0.044	6	934	984.3	37	0.001	1009	973	39	1029.3	97.8	0.001
+0.084	7	926	983	-38	0.001	-	991	815	-111	1010	-18.9
+0.088	8	910	955	-53	0.001	-	-	-	-	1010	-2.02
+0.108	9	871	932	22	0.001	970.5	963	29	983	87.6	0.001
+0.132	10	836.5	865	21.5	0.001	960.5	863	26.5	965	86.2	0.001
+0.158	12	751.7	800	15.3	0.001	950.8	842	30	954.4	85.0	0.001
+0.182	13	709.4	757.5	16.6	0.001	940	756	26.6	944	74.5	0.001
+0.209	14	666	712	16	0.001	930.6	752	26	936	70.1	0.001
+0.234	15	624	640	16	0.001	920.4	649	25	934.7	65.9	0.001
+0.288	16	538.4	575	5.6	0.001	900.5	610.5	5.6	946	56.6	0.001

Tabelle V. Beobachtungsergebnisse der Versuchsreihe IV.
Soil horizontal, Kante scharf, $\alpha = 60^\circ$.

Profil Rohr Nr. m	Sohle z mm	$Q = 20 \text{ l/sec}$			$Q = 40 \text{ l/sec}$			$Q = 60 \text{ l/sec}$		
		Piezometer- stand $H = z + h$ mm	Wasserpegel h mm	hydraulische Druckhöhe $h = H - z$ mm	Piezometer- stand $H = z + h$ mm	Wasserpegel h mm	hydraulische Druckhöhe $h = H - z$ mm	Piezometer- stand $H = z + h$ mm	Wasserpegel h mm	hydraulische Druckhöhe $h = H - z$ mm
-0.700	936	1009	999.5		1028	1025	1021	1013	1001	1038
-0.300	936	998	995.5	0.001	1006.5	1001	996.5	991	986	103.5
-0.156	1 934.5	995.8	995	0.001	1005.7	1001	1001	997	991	0.001
-0.106	2 934	992.2	991	0.001	1005.1	1001	1001	997	991	0.001
-0.067	3 934	989	985	0.001	1004.6	1001	1001	996	991	0.001
-0.046	4 934	986	979	0.001	1004.6	1001	1001	995	991	0.001
-0.026	5 934	983	966	0.001	1003.2	1007	966	32	32	0.001
-0.005	6 934	977	934	0.001	1000.3	1000.5	910	-24	0.001	-0.0043
+0.016	7 914.4	969	849	-62.4	0.001	-0.00624	993	770	-141.4	0.001
+0.036	8 877	954.5	877	0	0.001	0.00030	982	797	-80	0.001
+0.060	9 834	924	871	37	0.001	0.0037	964	852	18	0.001
+0.085	10 790	868	814	24	0.001	0.0024	934	858	68	0.001
+0.110	11 747.5	803	766	18.5	0.001	0.00185	889	795	47.5	0.001
+0.135	12 705	756	721	16	0.001	0.0016	804	740	35	0.001
+0.160	13 662	706.5	678	16	0.001	0.0016	749	694	32	0.001
+0.211	14 575.7	649	585	9.3	0.001	0.00091	653	597	21.3	0.001

Profil Rohr Nr. m	Sohle z mm	$Q = 20 \text{ l/sec}$			$Q = 40 \text{ l/sec}$			$Q = 60 \text{ l/sec}$		
		Piezometer- stand $H = z + h$ mm	Wasserpegel h mm	hydraulische Druckhöhe $h = H - z$ mm	Piezometer- stand $H = z + h$ mm	Wasserpegel h mm	hydraulische Druckhöhe $h = H - z$ mm	Piezometer- stand $H = z + h$ mm	Wasserpegel h mm	hydraulische Druckhöhe $h = H - z$ mm
-0.700	936	1009	999.5		1028	1025	1021	1013	1001	1038
-0.300	936	998	995.5	0.001	1006.5	1001	1001	997	991	0.001
-0.156	1 934.5	995.8	995	0.001	1005.7	1001	1001	997	991	0.001
-0.106	2 934	992.2	991	0.001	1005.1	1001	1001	996	991	0.001
-0.067	3 934	989	985	0.001	1004.6	1001	1001	995	991	0.001
-0.046	4 934	986	979	0.001	1004.6	1001	1001	995	991	0.001
-0.026	5 934	983	966	0.001	1003.2	1007	966	32	32	0.001
-0.005	6 934	977	934	0.001	1000.3	1000.5	910	-24	0.001	-0.0043
+0.016	7 914.4	969	849	-62.4	0.001	-0.00624	993	770	-141.4	0.001
+0.036	8 877	954.5	877	0	0.001	0.00030	982	797	-80	0.001
+0.060	9 834	924	871	37	0.001	0.0037	964	852	18	0.001
+0.085	10 790	868	814	24	0.001	0.0024	934	858	68	0.001
+0.110	11 747.5	803	766	18.5	0.001	0.00185	889	795	47.5	0.001
+0.135	12 705	756	721	16	0.001	0.0016	804	740	35	0.001
+0.160	13 662	706.5	678	16	0.001	0.0016	749	694	32	0.001
+0.211	14 575.7	649	585	9.3	0.001	0.00091	653	597	21.3	0.001

hydraulischer Druck
 $P = f_1 h, Y$
 kg/cm^2

spez. Gewicht des Wassers
 γ
 kg/cm^3

hydraulischer Druck
 $P = f_1 h, Y$
 kg/cm^2

spez. Gewicht des Wassers
 γ
 kg/cm^3

hydraulischer Druck
 $P = f_1 h, Y$
 kg/cm^2

spez. Gewicht des Wassers
 γ
 kg/cm^3

hydraulischer Druck
 $P = f_1 h, Y$
 kg/cm^2

spez. Gewicht des Wassers
 γ
 kg/cm^3

hydraulischer Druck
 $P = f_1 h, Y$
 kg/cm^2

spez. Gewicht des Wassers
 γ
 kg/cm^3

hydraulischer Druck
 $P = f_1 h, Y$
 kg/cm^2

Tabelle VI. Beobachtungsergebnisse der Versuchsreihe V.

Sohle geneigt, Kante rund, $a = 45^\circ$.

Profil Nr. m	Rohr Nr. m	Sohle z mm	Wasserspiegel mm	$Q = 20 \text{ l/sec}$			$Q = 40 \text{ l/sec}$			$Q = 60 \text{ l/sec}$			
				Piezometer- stand $H = z + h$ mm	hydraulische höchste $h = H - z$ mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/dm ³	Piezometer- stand $H = z + h$ mm	hydraulische Druckhöhe $h = H - z$ mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/dm ³	Piezometer- stand $H = z + h$ mm	hydraulische Druckhöhe $h = H - z$ mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/dm ³	
-0.700		933.4	977.6				1009			1035			
-0.300		922.4	963				993	988.6		1018.5			
-0.200		919.4	959				987	985	67.8	1012.5	1016	88.8	0.001
-0.152	1	917.2	957.7	958	40.8	0.001	0.00458	0.001	0.0001	0.00078	0.0006	0.00088	
-0.103	2	915.4	956.5	956	49.6	0.001	0.00406	0.001	0.0001	0.00056	0.0006	0.00016	
-0.064	3	914.1	955	953	38.9	0.001	0.00359	0.001	0.0001	0.000589	0.0004	0.000704	
-0.044	4	913.5	954	951	37.5	0.001	0.003175	0.001	0.0001	0.000525	0.0003	0.000105	
-0.024	5	913	952.4	945	32	0.001	0.00213	0.001	0.0001	0.00041	0.0002	0.00042	
-0.002	6	912.5	950.4	937	24.2	0.001	0.00242	0.001	0.0001	0.000232	0.0001	0.000162	
+0.024	7	911	945.3	880	-34	0.001	-0.0031	0.001	-0.0001	-0.0077	0.0072	-0.0125	-0.0001
+0.051	8	898.6	835	835	-43.6	0.001	-0.00436	0.001	-0.0001	-0.00916	0.0075	-0.01536	-0.0001
+0.083	9	892.2	914	893	20.8	0.001	0.00203	0.001	0.0001	0.00138	0.0012	-0.0002	
+0.112	10	844.4	883	866	21.6	0.001	0.00216	0.001	0.0001	0.00296	0.002	0.00296	
+0.149	11	810.8	846	832	21.2	0.001	0.00212	0.001	0.0001	0.00382	0.003	0.00472	
+0.185	12	773.3	808.5	799	21.7	0.001	0.00217	0.001	0.0001	0.00397	0.003	0.00327	
+0.220	13	743.5	775	762	18.5	0.001	0.00185	0.001	0.0001	0.00305	0.002	0.00305	
+0.258	14	709.8	741.5	728	18.2	0.001	0.00182	0.001	0.0001	0.00332	0.002	0.00382	
+0.295	15	676.4	703.5	694	17.6	0.001	0.00176	0.001	0.0001	0.00346	0.002	0.00476	
+0.369	16	638.6	634.7	623	14.4	0.001	0.00144	0.001	0.0001	0.00284	0.001	0.0024	

Tabelle VII. Beobachtungsergebnisse der Versuchsteile VI.

Soil geneigt, Kante schief, $\alpha = 45^\circ$.

Profil m	Rohr Nr.	Sohle z mm	Wasserstand H + h mm	$Q = 20 \text{ l/sec}$		$Q = 40 \text{ l/sec}$		$Q = 60 \text{ l/sec}$	
				Hydrostatisches Gewicht des Wassers $\gamma_{\text{w}} \text{ kg/cm}^3$	hydraulische Druckhöhe $h = H - z$ mm	Hydrostatisches Gewicht des Wassers $\gamma_{\text{w}} \text{ kg/cm}^3$	Wasserdruck H + h mm	Hydrostatische Druckhöhe $h = H - z$ mm	Hydrostatisches Gewicht des Wassers $\gamma_{\text{w}} \text{ kg/cm}^3$
-0.700	913.2	913.2	913.2	97.8	99.5	98.7	101.0	101.8	103.5
-0.390	919.4	919.4	919.4	963.6	958.2	953.3	958.7	958.8	968.8
-0.200	917	917	917	956.6	956	941	936	933	1003
-0.152	2	915.4	915.4	954.9	954.9	40.6	0.001	0.001	0.001
-0.103	3	914.3	914.3	950	950	35.7	0.001	0.001	0.001
-0.064	4	913.5	913.5	944	944	30.5	0.001	0.001	0.001
-0.044	5	913	913	929	929	16	0.001	0.001	0.001
-0.024	6	912.6	912.6	882	882	-30.6	0.001	0.001	0.001
-0.002	7	904	904	818	818	-86	0.001	0.001	0.001
+0.010	8	875.6	875.6	805	805	19.4	0.001	0.001	0.001
+0.037	9	840	840	879	879	39	0.001	0.001	0.001
+0.072	10	835	835	848	848	26	0.001	0.001	0.001
+0.107	11	779	779	814.3	814.3	21	0.001	0.001	0.001
+0.140	12	735	735	754	754	19	0.001	0.001	0.001
+0.176	13	699.2	699.2	733	733	19.8	0.001	0.001	0.001
+0.211	14	659	659	643	643	14	0.001	0.001	0.001
+0.250				662					

hydrostatischer Druck

 $P = 1, h, Y$
 kg/cm^2

spez. Gewicht des Wassers

 γ
 kg/cm^3

hydrostatische Druckhöhe

 $h = H - z$
mm

Piezometerstand

 $H = H + h$
mm

Piezometerstand

 $H = H + h$
mm

Tabelle VIII. Beobachtungsergebnisse der Versuchsstelle VII.
Soile geneigt, Kante rund, $\alpha = 60^\circ$.

Profil Rohr Nr. m	Sohle z mm	$Q = 25 \text{ l/sec}$			$Q = 40 \text{ l/sec}$			$Q = 60 \text{ l/sec}$		
		Wasserstand $H = z + h$ mm	Wasserspiegel mm	hydrostatische druckhöhe $b = H - z$ mm	Wasserstand $H = z + h$ mm	Wasserspiegel mm	hydrostatische druckhöhe $b = H - z$ mm	Wasserstand $H = z + h$ mm	Wasserspiegel mm	hydrostatische druckhöhe $b = H - z$ mm
-0.790	933	977			1009			1034.5		
-0.790	923.2	962.8			993			1017.3		
-0.200	918.7	959			988			1011.5		
-0.152	916.8	958	41.2	0.001	986	985	68.2	0.001	0.00852	0.001
-0.103	915	956.4	41	0.001	984	980	65	0.001	0.005	0.001
-0.064	913.5	955	93.4	0.001	981.5	973	59.5	0.001	0.00595	0.001
-0.044	913	954	95.1	0.001	980	966	53	0.001	0.0053	0.001
-0.024	912.4	952.3	94.7	0.001	977.8	954	41.6	0.001	0.00416	0.001
-0.002	912.1	950	94.9	0.001	974	939	26.9	0.001	0.00369	0.001
+0.045	7	903.8	938	8.15	-58.8	0.001	-0.00588	0.001	-0.01458	-0.02128
+0.067	8	889	925	8.15	-62	0.001	-0.00682	0.001	-0.01412	-0.0223
+0.089	9	819	896	31	0.001	0.0031	933.14	0.001	0.0019	0.001
+0.110	10	815	865	83.3	16	0.001	0.00018	910.5	0.001	0.0013
+0.136	11	773	822	78.9	16	0.001	0.0016	876	0.001	0.00178
+0.162	12	739.7	773	74.8	17.3	0.001	0.00173	834.5	0.001	0.01203
+0.188	13	689	727	70.5	16	0.001	0.0016	794.5	0.001	0.0027
+0.215	14	647	682.5	66.2	15	0.001	0.0015	741	0.001	—
+0.240	15	604.4	640.5	61.9	14.6	0.001	0.00146	691	0.001	0.00176
+0.297	16	519.7	554	52.9	9.3	0.001	0.00093	593	0.001	0.0013

Tabelle IX. Beobachtungsergebnisse der Versuchsreihe VIII.
Sohle geneigt, Kante schief, $\alpha = 60^\circ$.

Profil Rohr- Nr.	Sohle z m	Q = 20 l/sec				Q = 40 l/sec				Q = 60 l/sec			
		Piezometer- stand $H = z + h$ mm	Wasserspiegel mm	hydraulische Druckhöhe $h = H - z$ mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm ³	Piezometer- stand $H = z + h$ mm	Wasserspiegel mm	hydraulische Druckhöhe $h = H - z$ mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm ³	Piezometer- stand $H = z + h$ mm	Wasserspiegel mm	hydraulische Druckhöhe $h = H - z$ mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm ³
-0.700	933.4	978.6				1008				1034.2			
-0.300	922.4	964				991.5				1018.5			
-0.300	919.4	960				987				1012			
-0.152	1	917.2	958.8	59	41.8	0.001	0.00415	985	983	0.001	0.00458	1005	87.8
-0.193	2	915.4	957.4	57	41.6	0.001	0.00416	983	979	0.001	0.00459	1006	83.6
-0.064	3	914.1	955.8	53.5	39.4	0.001	0.00394	980	971	0.001	0.00369	1002	986
-0.044	4	913.5	954.6	50	36.5	0.001	0.00395	978.6	964	0.001	0.00305	1000	975.5
-0.024	5	913	952.8	49.1	35	0.001	0.0028	976	959.5	0.001	0.00275	998	957
-0.002	6	912.8	950	49.0	34	0.001	0.00032	974.4	921	0.001	0.00032	994	919.5
+0.015	7	889	947	910				970	910			990	909
+0.036	8	855	940	908				964	903			985	924.5
+0.060	9	812	931	865				955.8	895			977.2	885
+0.086	10	769	917.6	880				944.3	833			970	882
+0.110	11	727	900	883				932	870			958	876
+0.137	12	684	881	845				915	857			943.5	867
+0.162	13	642	854	819				897	836			928	850
+0.193	14	555.8	795	766				852	790			891	81.5
+0.300			659	—				741	—			81.2	739

Bestimmung der weiteren Regenzeit des Wasserstahles sehr unsicher.

Hinsichtlich der Richtung der Wasserdrücke auf die Sohle (Wehrücken) sei folgende kurze Ueberlegung gestattet: Infolge der Reibung zwischen Wasser und Sohle entsteht ein flussaufwärts gerichteter Widerstand (W), dessen Größe von der Sohlengeschwindigkeit abhängt. Das vertikal nach abwärts gerichtete Gewicht des Wassers (G) lässt sich zerlegen in eine zur Sohle senkrechte und parallele Komponente N und T (Abbildung 23).

Bei gleichförmiger Bewegung, bei welcher $W = T$ ist, kommt keine beschleunigende Kraft parallel zur Sohle zur Wirkung, das heißt die Resultierende aus den drei Kräften W , T und N ist N . Dies ist aber die nur Sohle senkrechte Komponente, woraus folgt, daß der hydrostatische Druck bei gleichförmiger Bewegung senkrecht zur Sohle steht. Im Bereich der Wehrkrone, wo die Bewegung noch eine beschleunigte, somit die Geschwindigkeit im Zunehmen ist, ist der Widerstand W kleiner als die Komponente T . Somit setzt sich in diesem Bereich die Normalkomponente N noch mit der Differenz von $T - W$ zu einer Resultierenden zusammen, die die Richtung des hydrostatischen Druckes gibt. Die Richtung dieser Resultierenden kann naturgemäß nicht mehr senkrecht zur Sohle (Wehrücken) stehen, sondern hängt von der Differenz $T - W$ oder indirekt von W , bezw. von der Sohlengeschwindigkeit, ab. Bedenkt man, daß sich die Geschwindigkeiten im Bereich der Wehrkrone von Profil zu Profil ändern und außerdem noch die Wirkung der Fliehkraft hinzukommt, so ist ohne weiteres einzusehen, daß die Ermittlung der Richtung der hydrostatischen Drücke auf die Sohle (Wehrücken) in diesem Bereich auf große Schwierigkeiten stößt. Aus diesem Grunde wurden daher, wie bereits früher erwähnt, die Piezometerhöhen vertikal über den betreffenden Sohlenpunkten aufgetragen.

Um über die Druckverteilung entlang der Sohle ein richtigeres Bild zu bekommen und zur leichteren Ermittlung der maximalen Unterdrücke wurden in den Tabellen II-IX die hydrostatischen Drücke als Differenzen zwischen den Piezometerständen (H) und den Sohlenkotens (z) berechnet und in den Abbildungen 34-41 von einer wagrechten Grundlinie aus aufgetragen.

wobei H = Piezometerstand in mm.

z = Sohlenkote in mm.

h = Piezometerhöhe (hydrostatische Druckhöhe) in mm.

Die unterhalb dieser Grundlinie fallenden Teile der Linienzüge stellen Unterdrücke (Saugwirkungen) dar. Aus dieser zweiten Darstellung des Druckverlaufes sowie aus den Tabellen können die Drücke sowohl in Millimeter Wassersäule als auch in Kilogramm pro cm^2 abgelesen werden.

Der Zusammenhang zwischen den Piezometerhöhen (hydrostatischen Druckhöhen) h in mm und den spezifischen Drücken (hydrostatischen Drücken) P in kg/cm^2 ergibt sich aus der einfachen Ueberlegung:—

$$h = \frac{P}{f\gamma} \quad \dots \dots \dots \quad (4),$$

$$P = f \cdot h \cdot \gamma \quad \dots \dots \dots \quad (5),$$

wobei

h = Piezometerhöhe (hydrostatische Druckhöhe) in mm,

P = Spezifischer Druck (hydrostatischer Druck) in kg/cm^2 ,

f = Der Querschnitt der Wassersäule in $\text{cm}^2 = 1 \text{ cm}^2$,

γ = Das spez. Gewicht des Wassers in $\text{kg}/\text{cm}^3 = 1 \text{ kg}/\text{dm}^3 = 0.001 \text{ kg}/\text{cm}^3$.

Wird das spez. Gewicht des Wassers angenommen mit

$$\gamma = 1 \text{ kg}/\text{dm}^3 = 0.001 \text{ kg}/\text{cm}^3,$$

so berechnet sich beispielsweise der einer Piezometerhöhe von $h = 100 \text{ mm} = 10 \text{ cm}$ entsprechende spezifische Druck P aus dem Gewicht der Wassersäule von dem Querschnitt $f = 1 \text{ cm}^2$ und der Höhe $h = 10 \text{ cm}$ mit.

$$P = f \cdot h \cdot \gamma = 1 \times 10 \times 0.001 = 0.01 \text{ kg}/\text{cm}^2.$$

Wenngleich das spez. Gewicht des Wassers streng genommen nur bei der Temperatur von $+ 4^\circ\text{C}$ den genauen Wert von $1 \text{ kg}/\text{dm}^3$ hat, so wurde doch dieser Wert auch für das im Versuch verwendete Wasser beibehalten, dessen Temperaturen sich um etwa 15°C herum bewegten. Mit Rücksicht auf den äußerst geringen Ausdehnungskoeffizienten des Wassers ist dies ohne weiteres zulässig.

Der Vollständigkeit halber sind die einzelnen Versuchphasen, und zwar für die beiden extremen Wassermengen von $Q = 20$, und $60 \text{ l}/\text{sek}$ (bei Versuchsreihe III außerdem auch bei $Q = 40 \text{ l}/\text{sek}$) auch im Lichtbild jeweils festgehalten (Abbildungen 4—20). Zur Vermeidung von Irrtümern sei jedoch betont, daß es nicht möglich war, das Glasrohr (Piezometerrohr) unmittelbar an die Glaswand anzustellen, sodaß infolge der auftretenden optischen Parallaxe die in den Lichtbildern sichtbaren Piezometerstände gegenüber der Wehrsohle geringe Höhenverschiebungen aufwiesen.

Sämtlichen Darstellungen über den Verlauf der Drücke entlang der Sohle ist zu entnehmen, daß sich die Wirkung der Fliehkraft im Bereich der Wehrkrone durch starke Druckverminderung an der Sohle (Auftreten von Saugwirkungen) äußert. Im Falle des Vorhandenseins einer scharfen Ueberfallkante pflanzte sich die Saugwirkung sogar noch (allerdings nur auf eine geringe Strecke) flßaufwärts derselben fort. Siehe die Versuchsreihen II, IV und VI. Von der Ueberfallkante nach abwärts nimmt der Wasserdruck auf die Sohle zuerst rasch, später langsamer zu, um sich schließlich der Wasserspiegellinie assymptotisch zu nähern. Es bleibe hier nicht unerwähnt, daß für eine und dieselbe Versuchsreihe die Schnittpunkte der Drucklinien für verschiedene Wassermengen unmittelbar oberhalb der Ueberfallkante sehr nahe zusammenfallen; das heißt, in diesem Bereich ist der Druck auf die Sohle von der Wassermenge nahezu unabhängig.

Zur Versuchsreihe VII (Abbildung 32) ist zu bemerken, daß es bei einer Wassermenge von $Q = 60 \text{ l/sec}$ infolge Ueberwiegens der Fliehkräfte gegenüber der Schwerkraft und des auf der Wasseroberfläche lastenden Atmosphärendruckes zu einer Loslösung des Wasserstrahles vom Wehrrücken kam. Es wurde daher in diesem Ausnahmefall das Unterwasser gestaut, und zwar so hoch (+ 850 mm), daß der Strahl an den Wehrrücken gerade noch angeschniegt blieb (Abbildung 18). Bei Unterschreiten dieser Unterwasserspiegellage wurde infolge der starken Saugwirkung an der Wehrkrone Luft von außen durch den Wasserstrahl hindurchgesaugt, was infolge des Druckausgleiches ein sofortiges Losreißen des Strahles vom Wehrrücken zur Folge hatte.

Bei der Versuchsreihe VIII (Abbildung 33) löste sich infolge der scharfen Ueberfallkante der Wasserstrahl auch schon bei der kleinsten Wassermenge $Q = 20 \text{ l/sec}$ los. Es entstand dadurch zwischen Wehrrücken und Unterseite des Wasserstahles ein luftfüllter Raum, der je nach der Größe der abstürzenden Wassermenge und der Höhe des Unterwasserstandes eine stärkere oder schwächere Verdünnung gegenüber dem äußeren Luftdruck aufwies.

Zur Messung dieser Unterdrücke wurde in der rückwärtigen Holzwand im Bereich zwischen dem Wehrrücken und der unteren Seite des freien Wasserstrahles ein Loch gebohrt, durch dieses luftdicht ein Kupferröhrchen gesteckt und daran ein Gummischlauch mit anschließender Glasröhre angeschaltet. Abbildung 3 läßt den nach abwärts gebogenen, weiß angestrichenen Gummischlauch mit dem daran angeschlossenen und lotrecht nach aufwärts gerichtetem Glasrohr (Piezometerrohr)

deutlich erkennen. Wird dieses Glasrohr, dessen obere Oeffnung höher als die Ausmündung des Kupferröhrchens jenseits der Holzwand gelegen war, mit Wasser gefüllt, so stellt sich für den Fall, als kein Wasser über das Wehr fließt, also bei gewöhnlichem Atmosphärendruck, zufolge des Gesetzes der kommunizierenden Getäße der Wasserspiegel in dem Piezometerrohr auf gleiche Höhe mit der freien Ausmündung des Kupferröhrchens ein. Dieser Stand wird abgelesen. Läßt man den Versuch laufen, sodaß unterhalb des losgelösten Wasserstrahles eine Luftverdünnung eintritt, so ergibt die Differenz zwischen der früheren und der neuen Ablesung den gesuchten Unterdruck h . Mit Beziehung auf die nachstehende schematische Figur (Abbildung 24), in welcher H die Holzwand, K das schief nach aufwärts eingeführte Kupferröhrchen, G den Gummischlauch und P das Piezometer- (Glas-) rohr darstellt, besteht nach den Gesetzen der Hydrostatik die Beziehung:

$$p + h \cdot \gamma = A \quad \dots \dots \dots \quad (6),$$

wenn A den Atmosphärendruck und p den absoluten Druck im luft-
erfüllten Raum bedeuten. Für $\gamma = 1$ ergibt sich die gesuchte Piezo-
meterhöhe mit

$$h = A - p \quad \dots \dots \dots \quad (7).$$

In der Tabelle X sind die der geschilderten Weise ermittelten (relativen) Unterdrücke in Millimeter Wassersäule bei fußfreiem Wasserstrahl, d. h. bei Nichtvorhandensein einer Deckwalze und bei gestautem Unterwasser ausgewiesen und im Abbildung 42 zeichnerisch dargestellt.

Tabelle X. Druckverhältnisse im Raum zwischen Wasserstrahl und Wehrrücke bei der Versuchsreihe VIII.

Tabelle der Unterdrücke h in mm.

Q l/sec	20	40	60
Unterwasser gestaut (+ 636 mm)	2	10.5	22
Strahl fußfrei	1	3	5

Die verhältnismäßig nur geringe Luftverdünnung bei fußfreiem Strahl erklärt sich damit, daß die entlang der Unterseite des Wasserstrahles aus dem vorerwähnten luftverfüllten Raum mitgerissene Luft infolge des steilen Aufpralles des Strahles auf die Unterwasseroberfläche zum größten Teil wieder in diesen Raum aufsteigt. Bei höheren Unterwasserständen

wird ein mehr oder weniger großer Teil der mitgerissenen Luftbläschen in das Unterwasser fortgerissen. Die Abbildungen 19 und 20 geben den losgelösten Wasserstrahl in Lichtbildern wieder.

Der in Abbildung 33 eingetragene Verlauf der Drucklinien bei verschiedenen Wassermengen läßt den Druckabfall auf $h = 0$ mm im Profil der Ueberfallkante schön erkennen. Dieser Druckabfall kennzeichnet die Umwandlung von potentieller Energie in kinetische und hat eine Geschwindigkeitszunahme der Wasserteilchen von der Oberfläche gegen die Sohle hin zur Folge, worauf noch später zurückgekommen werden wird. Damit erklärt sich auch die Absenkung des Wasserspiegels im Profil der Ueberfallkante, was aus dem Kontinuitätsgesetz ($F \cdot v_m = f \cdot V_m$) folgt. Es verdient noch hervorgehoben zu werden, daß bei scharfer Ueberfallkante knapp unterhalb derselben eine Walze auftrat, welche im Lichtbild (Abbildung 21 und 22, Versuchsreihe IV und VI, $Q = 60 \text{ l/sec}$) durch Einführung einer weißen Farblösung sichtbar gemacht wurde.

6. DRUCK- UND GESCHWINDIGKEITSVERHÄLTNISSE IM INNERN DES WASSERKÖRPERS DES ZULAUFGERINNES KNAPP OBERHALB DER UEBERFALLKANTE

Die bisher durchgeföhrten Untersuchungen erstreckten sich auf die Ermittlung der Verteilung die hydrostatischen Drücke entlang der Gerinnesohle, bzw. des Wehrrückens. Im Zusammenhang mit diesen Untersuchungen gewinnt auch die in der Fachliteratur fast gänzlich vernachlässigte Frage der Druck- und Geschwindigkeitsverteilung im Innern des Wasserlaufes besonderes Interesse. Mit Rücksicht auf die in ver- suchstechnischer Beziehung nicht gerade leichte Ermittlung der Drücke im Inneren des Wasserkörpers im Bereich der Wehrkrone, bzw. fluß- abwärts derselben, legten wir den folgenden Untersuchungen bloß die flußaufwärts der Wehrkrone gelegene Gerinnestrecke zugrunde, in welcher sämtliche Drücke positiv bleiben. Sowohl die Geschwindigkeitshöhen, als auch die hydrostatischen Drücke wurden mit Hilfe einer Pitotröhre gemessen, deren Düse in Abbildung 25 schematisch dargestellt ist. Das an die Staudüsenöffnung a angeschlossene Piezometerrohr diente zur Messung der hydrodynamischen Drücke (Geschwindigkeitshöhen h_g), das an b (seitliche Oeffnungen) angeschlossene Glasrohr zur Messung der hydrostatischen Drücke h . Die Düse wies eine derartige Form auf, daß bei den seitlichen Oeffnungen b weder Saug-

noch Druckerscheinungen aufraten. Mathematisch kommt diese Eigenschaft dadurch zum Ausdruck, daß die Konstante k der Eichkurve

den Wert 1 hatte. Die Gleichung dieser Eichkurve, die dazu dient, mit Hilfe der gemessenen Geschwindigkeitshöhen h_g die zugehörigen Geschwindigkeiten v zu ermitteln, lässt sich daher durch eine quadratische Parabel, die durch den Ursprung des Koordinatensystems geht und den Parameter g hat, darstellen. Durch Umformen obiger Beziehung erhält man die Gleichung der Eichkurve in der der gewöhnlichen Parabeldarstellung $y^2 = 2px$ entsprechenden Form mit

$$v^2 = 2 \cdot g \cdot h_g \dots \dots \dots \quad (9)$$

Durch die eben geschilderte Eigenschaft der Pitotröhre ($k = 1$) ergeben die den seitlichen Öffnungen b entsprechenden Piezometerstände unmittelbar die hydrostatischen Drücke in absoluter Größe.

Mit Rücksicht auf die Divergenz der Stromfäden in den verschiedenen Wassertiefen nächst der Wehrkrone mußte bei Durchführung der Pitotmessung größtes Augenmerk darauf gelegt werden, daß die Düsenachse jeweils parallel zu den Stromfäden war. Dieses Ziel wurde mit einer für die vorliegenden Zwecke genügend großen Genauigkeit durch unmittelbare Beobachtung der Richtung der Düse durch die Glaswand hindurch erreicht. Da die beiden Düsenöffnungen a und b eine Entfernung von 40 mm aufwiesen, mußten die Messungen der hydrostatischen Drücke von jenen der Geschwindigkeitshöhen selbstverständlich getrennt durchgeführt werden, indem jeweils vorerst die Öffnung a und dann die Öffnung b in das genaue Meßprofil einzustellen war.

Um dem Einfluß einer eventuellen Abweichung der Richtung der Stromfäden von der Richtung der Düse der Pitotröhre festzustellen, wurden in ein und demselben Profil -0.026 m (R 5) der Versuchsreihe I bei $Q = 60 \text{ l/sec}$ zwei Geschwindigkeitsmessungen für die mittlere Lotrechte durchgeführt; im ersten Fall (parallel zur Sohle) behielt die Düse für alle Meßpunkte ihre Richtung bei, während sie im zweiten Fall dem Augenmaß nach jeweils annähernd parallel zu den Stromfäden eingestellt wurde. In den Tabellen XI und XII bzw. in Abbildung 43 sind die Beobachtungsergebnisse niedergelegt. Ein Vergleich der beiden Tabellen läßt erkennen, daß das Nichtübereinstimmen der Richtung der Stromfäden mit jener der Düse sich hauptsächlich bei der

Tabelle XI. Geschwindigkeitsmessung mittelst der Pitotröhre im Profil -0.026 m (R 5) bei Versuchsreihe I, $Q = 60$ l/sec.

Höhenlage der Öffnung in mm über Sohle		Piezometerstand H mm	Druckhöhe		Anmerkung
			hydrostatische h mm	hydrodynamische Δh mm	
5	939	1114		175	*Düse parallel zur Sohle
15	949	1131		182	
25	959	1137		178	$H = z + h + \frac{v^2}{2g}$
35	969	1137		168	$= z + \Delta h$
45	979	1138		159	$\Delta h = H - z$
55	989	1139		150	
65	999	1138		139	$= h + \frac{v^2}{2g}$
75	1009	1138		129	
85	1019	1138		119	
2. Seitliche Öffnung *					
5	939	995	56		
14.5	948.5	993	44.5		
24.5	958.5	993	34.5		
34.5	968.5	995	26.5		
44.5	978.5	998	19.5		
54.5	988.5	1001	12.5		
64.5	998.5	1006	7.5		
74.5	1008.5	1009	0.5		
84.5	1018.5	1014	-4.5		
94.5	1028.5	1021	-7.5		

Tabelle XII. Geschwindigkeitsmessung mittelst der Pitotröhre im Profil -0.026 m (R 5) bei Versuchsreihe I, $Q = 60$ l/sec.

Höhenlage der Öffnung in mm		Piezometerstand II mm	Drückhöhe		Anmerkung
über Sohle	absolut z		hydrostatische h mm	hydrodynamische Δh mm	
1. Staudüse *					
55	989	1139		149	$\left. \begin{array}{l} \text{Düse Parallel zu den} \\ \text{Stromfäden} \end{array} \right\}$
73	1007	1141		133	$\left. \begin{array}{l} II = z + h + \frac{v^2}{2g} \\ = z + \Delta h \\ \Delta h = II - z \\ = h + \frac{v^2}{2g} \end{array} \right\}$
86	1020	1141		120	
2. Seitliche Öffnung *					
53	987	1011	24		
65	999	1019	20		$\left. \begin{array}{l} H = z + h \\ h = II - z \end{array} \right\}$
80	1014	1024.5	10.5		
90	1024	1030	6		

Ermittlung der hydrostatischen Drücke (h) geltend macht und die Druckmessungen für Punkte in der Nähe der Oberfläche die größten Unterschiede aufweisen. Dagegen ist der Einfluß der Verdrehung zwischen Düse und Stromfäden auf die Düse a ein verschwindender. In Abbildung 43 ist sowohl der Verlauf der hydrostatischen Drücke h als auch der hydrodynamischen Drücke Δh zeichnerisch zur Darstellung gebracht. Durch Bildung der Differenzen von Δh und h bekommt man für jeden Punkt die Geschwindigkeitshöhe

$$h_g = \Delta h - h \dots \dots \dots \quad (10).$$

Durch Auftragen dieser Werte als Abszissen zu den zugehörigen Wassertiefen t als Ordinaten ergibt sich der Verlauf der Geschwindigkeitshöhen für die Mittelvertikale h_g/t . Aus der einfachen Beziehung

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_g} \dots \dots \dots \quad (11)$$

(umgeformte Gleichung der Eichkurve der Pitotröhre) berechnen sich die Geschwindigkeiten v (siehe Tabelle XIII). In Abbildung 43 sind die zusammengehörigen Wertepaare v/t eingetragen, wodurch man die "Vertikelgeschwindigkeitskurve" erhält. Das arithmetische Mittel der v Werte (strichpunktierter Linie) gibt die mittlere Geschwindig-

Tabelle XIII. Ermittlung der Geschwindigkeiten im Profil -0.026 m (R 5) bei Versuchsreihe I, $Q = 60 \text{ l/sec}$.

Tiefe t mm	Geschwindigkeitshöhe h_g mm	Geschwindigkeit v m/sec
0	111	1.48
10	126	1.57
20	132	1.61
30	131	1.60
40	127	1.58
50	124	1.56
60	120	1.54
70	116	1.53
80	112	1.48
90	108	1.46
100	104	1.43

keit der Mittelvertikalen mit $v_m = 1.54 \text{ m/sec}$. Demgegenüber berechnet sich die mittlere Profilgeschwindigkeit V_m , die infolge der Reibung an Wänden und Sohle einen kleineren Werte aufweisen muß, unter Zu-
grundelegung der vorhandenen Wassertiefe $t = 100.7 \text{ mm}$ mit

$$V_m = \frac{0.060}{0.402 \times 0.1007} = 1.48 \text{ m/sec.}$$

Die in gleicher Weise für die Versuchsreihe II bei $Q = 60 \text{ l/sec}$ im Profil -0.046 m (R 4) durchgeführte Geschwindigkeitsmessung (Tabelle XIV, XV und XVI, bzw. Abbildung 44), bei welcher die Düse jeweils parallel zu den Stromfäden eingestellt war, ergab eine mittlere Vertikalgeschwindigkeit $v_m = 1.54 \text{ m/sec}$ gegenüber der mittleren Profilgeschwindigkeit von

$$V_m = \frac{0.060}{0.402 \times 0.0985} = 1.52 \text{ m/sec.}$$

Die gute Uebereinstimmung der mittleren Profilgeschwindigkeiten V_m mit den durch die Pitotröhrenmessungen ermittelten mittleren Vertikalgeschwindigkeiten v_m kann als Beweis dafür angeschen werden, daß die in dem Absenkungsbereich nicht ganz einfach durchzuführenden

Geschwindigkeitsmessungen mit der Pitotröhre einen für den vorliegenden Zweck genügend großen Genauigkeitsgrad aufweisen.

Tabelle XIV. Geschwindigkeitsmessung mittelst der Pitotröhre im Profil - 0.046 m (R 4) bei Versuchsreihe II, $Q = 60$ l/sec.

Höhenlage der Öffnung in mm		Piezometerstand H mm	Druckhöhe		Anmerkung
über Sohle	absolut z		hydrostatische h mm	hydromechanische Δh mm	
1. Staudüse *					
5	939	1110		171	$H = z + h + \frac{v^2}{2g}$ $= z + \Delta h$ $\Delta h = H - z$ $= h + \frac{v^2}{2g}$
	949	1130		181	
25	959	1134		175	
35	969	1137		163	
45	979	1138		150	
55	989	1138		149	
65	999	1138		139	
75	1009	1139		130	
85	1019	1138		119	
95	1029	1138		109	
2. Seitliche Öffnung *					
5	939	992	53		$H = z + h$ $h = H - z$
15	949	989	40		
25	959	989	30		
35	969	991	22		
45	979	994	15		
55	989	998	9		
65	999	1002	3		
75	1009	1008	- 1		
85	1019	1013	- 6		
95	1029	1020	- 9		

Tabelle XV. Geschwindigkeitsmessung mittelst der Pitotröhre im Profil -0.046 m (R 4) bei Versuchsreihe II, $Q = 60$ l/sec.

Höhenlage der Öffnung in mm		Piezometerstand H mm	Druckhöhe		Anmerkung
über Sohle	absolut z mm		hydrostatische h mm	hydrodynamische Δh mm	
1. Staudüse*					
55	989	1139		150	* Dose parallel zu den Stromfadern
85	1019	1140		121	$H = z + h + \frac{v^2}{2g}$ $= z + \Delta h$ $\Delta h = H - z$ $= h + \frac{v^2}{2g}$
2. Seitliche Öffnung*					
18	952	1000	48		
36	970	1009	39		
46	980	1007	27		$H = z + h$
50	984	1009	25		$h = H - z$
60	994	1013	19		
87	1021	1028	7		

Tabelle XVI. Ermittlung der Geschwindigkeiten im Profil -0.046 m (R 4) bei Versuchsreihe II, $Q = 60$ l/sec.

Tiefe t mm	Geschwindigkeitshöhe h_g mm	Geschwindigkeit v m/sec
0	106	1.44
10	124	1.56
20	132	1.61
30	132	1.61
40	129	1.59
50	125	1.57
60	121	1.54
70	117	1.52
80	113	1.49
90	109	1.46
100	104	1.43

Der Darstellung des Druckverlaufes h/t in den Abbildungen 43 und 44 entnehmen wir vor allem die wichtige Tatsache, daß der Verlauf der statischen Drücke im Innern der Profile oberhalb der Wehrkrone ein geradliniger ist. Durch Verlängern der beiden Drucklinien bis zur Sohle erhalten wir die hydrostatischen Drücke für die beiden Sohlenpunkte, welche mit den in den Abbildungen 26 und 27 auf wesentlich anderem Weg gewonnenen (Oeffnungen in der Sohle) vollkommen übereinstimmen, was als eine willkommene Kontrolle angesehen werden darf.

Eine weitere Kontrolle hinsichtlich der Richtigkeit des Druckverlaufes wurde in der Weise angestrebt, daß für die Versuchsreihe II ($Q = 60 \text{ l/sec}$) im selben Profil (-0.046 m , R 4) wie bei der in Abbildung 44 dargestellten Geschwindigkeitsmessung in der rückwärtigen Seitenwand aus Holz in der Höhe von 60 mm über der Sohle ein Loch gebohrt und ein Piezometerrohr durchgesteckt wurde. Der genau ebene (flüchtige) Anschluß an die Seitenwand erfolgte in derselben Weise, wie jener der früher erwähnten vierzehn bzw. sechzehn Piezometerröhrchen an die Sohle mittels eines in die Wand eingelassenen Messingplättchens. Auf diese Weise erhielt man ebenfalls einen in die Druckgerade fallenden Punkt (in Abbildung 44 stark eingeriegelt). Mit Rücksicht auf diese gute Uebereinstimmung konnten wir uns bei den weiteren Druckmessungen im Innern mit dem einen Kontrollpunkt (Piezometeröhre in der vertikalen Seitenwand) begnügen. Die gewonnenen Werte für die Versuchsreihen III und IV sind in den Tabellen XVII und XVIII eingetragen und die bezüglichen Drucklinien in den Abbildungen 28 und 29 (rechts oben) zeichnerisch dargestellt. Sämtliche Druckmessungen bestätigen somit den früher erwähnten geradlinigen Verlauf in einer Lotrechten oberhalb der Wehrkrone.

Auf die früheren beiden Geschwindigkeitsmessungen zurückkommend, verdient besonders hervorgehoben zu werden, daß der Geschwindigkeitsverlauf in der Mittelvertikalen, der mit Rücksicht auf die Regelmäßigkeit des Gerinnes im allgemeinen von einer lotrechten Linie nicht wesentlich abweichen sollte, die früher erwähnte Geschwindigkeitszunahme mit zunehmender Entfernung vom Wasserspiegel (mit Ausnahme der unmittelbar über der Sohle gelegenen weniger verlässlichen Punkte) ohne weiteres erkennen läßt.

Diese bedeutet aber nichts anderes als die versteckte Bestätigung der Anwendbarkeit des Satzes von BERNOULLI auf den vorliegenden Fall. Bekanntermaßen ist nach diesem Satz der in dem von diesem

Tabelle XVII. Ermittlung der Druckverteilung im Profil -0.046 m
(R 4) bei Versuchsreihe III.

Q l/sec	Höhenlage der Öffnung in mm		Piezometerstand $H = z + h$ mm	Druckhöhe $h = H - z$ mm
	über Sohle	absolut z		
40	0	934	1002	68
	60	994	1011	17
	82	1016	(1016)	0
60	0	934	1011	77
	60	994	1024	30
	104	1038	(1038)	0

Tabelle XVIII. Ermittlung der Druckverteilung im Profil -0.046 m
(R 4) bei Versuchsreihe IV.

Q l/sec	Höhenlage der Öffnung in mm		Piezometerstand $H = z + h$ mm	Druckhöhe $h = H - z$ mm
	über Sohle	absolut z		
40	0	934	988	54
	60	994	1005	11
	77	1011	(1011)	0
60	0	934	988	54
	60	994	1016	22
	99.5	1033.5	(1033.5)	0

Autor im Jahre 1738 erschienenen Werk "Hydrodynamica" zum erstenmal veröffentlicht wurde, für jeden Punkt des Profiles die Summe aus Energie der Lage, der Druckenergie und der kinetischen Energie konstant, was durch die Gleichung ausgedrückt wird:

$$z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = k \dots \dots \dots \quad (12).$$

Hierin bedeuten :

z = die absoluten Höhen der betrachteten Punkte (Energie der Lage),

$\frac{P}{\gamma}$ = die hydrostatischen Druckhöhen (Druckenergie),

$\frac{v^2}{2g}$ = die Geschwindigkeitshöhen (kinetische Energie).

Auf unseren Fall angewendet ist k gleichbedeutend mit dem Piezometerstand H der Staudüse (Höhe der Energielinie). Wie der Kolonne 3 der Tabellen XI und XIV zu entnehmen ist, ist dieser Wert (mit Ausnahme der nächst der Sohle gelegenen Punkte) tatsächlich konstant und hat die Größe $k = H = 1138$ mm. Vergleichsweise berechnet sich für die Versuchsreihe II ($Q = 60$ l/sec) der Wert H' für das wesentlich weiter flußaufwärts gelegene Profil bei -0.70 m wie folgt :

$$t = 133 \text{ mm},$$

$$b = 402 \text{ mm},$$

$$V_m = \frac{Q}{f} = \frac{Q}{b \cdot t} = \frac{0.060}{0.402 \times 0.133} = 1.12 \text{ m/sec.}$$

$$h_g = \frac{V_m^2}{2g} = \frac{1.12^2}{2 \times 9.81} = 64 \text{ mm.}$$

$$\text{Sohlenkote : } 934 \text{ mm.}$$

Hieraus folgt :

$$H' = 934 + t + h_g = 934 + 133 + 64 = 1131 \text{ mm.}$$

Die geringe Differenz gegenüber dem vorher gefundenen Wert von $H = 1138$ mm kann seine Erklärung darin finden, daß letzterer Wert unter Zugrundelegung der mittleren Profilgeschwindigkeit und der Beziehung $h_g = \frac{V_m^2}{2g}$ erhalten wurde. Führt man in letzterer Gleichung

den St. VENANT'schen Koeffizienten mit $\alpha = 1.11$ (13) ein, so ergibt sich h_g mit 71 mm und daraus

$$H' = 934 + 133 + 71 = 1138 \text{ mm.}$$

Bei dieser Gelegenheit sei erwähnt, daß BAZIN in seiner klassischen Arbeit "Expériences nouvelles sur l'écoulement en Déversoir" (1) den Satz von BERNOULLI bei Messung der Drücke im Innern

eines freien Ueberfallstrahles ebenfalls bestätigt fand. Auch bei ihm wiesen die Werte A (entsprechend unserem H) in seiner Gleichung

$$z + \frac{P}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} = A$$

für tiefergelegene Punkte kleine Abweichungen nach abwärts auf.

Um einen Ueberblick über die Druckverteilung im Innern des Zulaufgerinnes oberhalb der Ueberfallkante zu bekommen, haben wir für die Versuchsreihe VIII für die maximale Wassermenge von $Q = 60$ l/sec die Linien gleicher Drücke konstruiert (Abbildung 52.) Die dünn ausgezogene Verbindungslinie der Piezometerstände für Punkte der Gerinnesohle gibt für jedes Profil den Druck an der Sohle. Trägt man letztere Größe als Abszisse von der betreffenden Lotrechten aus auf und verbindet den so erhaltenen Punkt mit der Oberfläche (Druck = Null), so bekommt man dadurch den Druckverlauf im Innern für beliebige Lotrechte. Mit Hilfe dieser Drucklinie ist es ohne weiteres möglich, die Höhenlagen jener Punkte in den Lotrechten zu ermitteln, in welchen die Drücke $h = 10, 20 \dots$ mm betragen, indem man auf der betreffenden Abszissenachse, die ihren Nullpunkt im Schnittpunkt mit der jeweiligen Lotrechten hat, die Werte $h = 10, 20 \dots$ mm aufträgt, durch diese Punkte lotrechte Hilfslinien nach aufwärts zieht und die erhaltenen Schnittpunkte mit der Drucklinie auf die Lotrechts hinüberprojiziert. In Abbildung 52 ist die Konstruktion für den Punkt $h = 30$ mm durchgeführt. Die Verbindungslinien von Punkten gleicher Drücke ergibt die gesuchte Linienschar. Hierzu ist zu bemerken, daß streng genommen die Lotrechten durch Senkrechte zur Gerinnesohle ersetzt gehören und dementsprechend die Abszissenachsen eine Neigung von 34 % (Gefälle der Sohle) hätten erhalten sollen. Durch diese die Konstruktion vereinfachende Annahme dürfte jedoch das Gesamtbild der Druckverteilung kaum eine wesentliche Änderung erfahren. Außerdem erscheint es nicht ausgeschlossen, daß der Druckverlauf in einer Lotrechten in unmittelbarster Nähe der Ueberfallkante von einer Geraden etwas abweicht, wie dies BAZIN bei einem freien Ueberfallstrahl und MARCHI (10) bei einem Ueberfallwehr mit lotrechter, flußabwärtiger Begrenzungswand gefunden hat. Allerdings untersuchten die genannten Autoren solche Profile, wo die Fliehkraft im Gegensatz zu dem vorliegenden Fall stark zur Wirkung kommt. In den Abbildungen 45 – 52 haben wir die Linien gleicher Drücke für alle Versuchsreihen bei $Q = 60$ l/sec gezeichnet. Aus diesen Darstellungen der Druckverteilung ersieht man, daß die Drücke im Innern des Zulaufgerinnes zuerst

langsam und erst unmittelbar vor der Ueberfallkante rasch abnehmen. Bei Versuchsreihe VIII (Abbildung 52) sinkt der Druck im Profil der Ueberfallkante auf den theoretischen Wert Null.

7. ZUSAMMENSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Das wichtigste Ergebnis unsrer Untersuchungen liegt jedoch in der Erkenntnis, daß unterhalb der Wehrkrone Unterdrücke (Saugwirkungen) auftreten können, über deren Größen man sich bisher noch keine genaue Vorstellung macht. Um einen Ueberblick über die gesamten diesbezüglichen Versuchsergebnisse zu erhalten, haben wir in Abbildung 53 für jede Versuchsreihe die maximalen Unterdrücke mit den zugehörigen sekundlichen Versuchswassermengen in Beziehung gebracht. Um das Schaubild gegebenenfalls auch für praktische Fälle verwendbar zu machen, sind auf der Abszissenachse auch die auf 1 m Wehrbreite nach der Beziehung

$$Q \text{ l/sec/m} = \frac{Q \text{ l/sec}}{b} = \frac{Q \text{ l/sec}}{0.402} \dots \dots \dots \quad (13)$$

umgerechneten sekundlichen Wassermengen aufgetragen. Dieser Darstellung sind verschiedene interessante Dinge zu entnehmen.

Aus der übersichtlichen Zusammenstellung in Abbildung 53 ersehen wir vor allem, daß die maximalen Unterdrücke unter sonst gleichen Voraussetzungen bei geneigter Sohle des Zulaufgerinnes größer sind als bei wagrechter Sohle. Dies ist ohne weiteres verständlich, wenn man bedenkt, daß die Fliehkraft ($f = m \frac{v^2}{r}$, wobei m = Masse des

Körpers, r = Abstand des Schwerpunktes von der Drehachse, v = Umfangsgeschwindigkeit), welche ja die Ursache dieser Unterdrücke ist, sehr wesentlich von der Zuflüßgeschwindigkeit abhängt. Ferner sieht man, daß die maximalen Unterdrücke mit zunehmender Wassermenge von einer gewissen Grenze angefangen fast geradlinig zunehmen. Allerdings gilt dieser Satz nicht bedingungslos, sondern nur bis zu einer bestimmten, von der Form des Ueberfallwehres abhängigen, oberen Grenze, wie dies aus dem Verlauf der für die Versuchsreihe IV gültigen Linie hervorgeht. Diese Unstetigkeit scheint dann einzutreten, wenn der Wasserstrahl nahezu im Begriffe ist, sich von dem Wehrkörper loszulösen. Bemerkenswert ist der Umstand, daß der oberste Punkt der Versuchsreihe VII ($Q = 60 \text{ l/sec}$) genau in die betreffende Relationslinie hineinfällt, obwohl in diesem Fall der Unterwasserspiegel

im Gegensatz zu allen übrigen Fällen ziemlich hoch gestaut war. Letzteres geschah deshalb, um ein Losreißen des Strahles vom Wehr-rücken zu verhindern.

Ferner verdient der Parallelismus der für wagrechte und geneigte Sohlen gültigen Linien unter sonst gleichen Voraussetzungen hervorgehoben zu werden. Schließlich sei noch erwähnt, daß unter sonst gleichen Verhältnissen im allgemeinen die maximalen Unterdrücke im Falle scharfer Ueberfallkante größer als bei abgerundeter Kante sind. Bei größeren Wassermengen jedoch tritt das Umgekehrte ein, was möglicherweise auf die stärkere Ausbildung der früher erwähnten und in den Abbildungen 21 und 22 in den Lichtbildern gebrachten Wasserwalzen zurückzuführen ist. Die größte Saugwirkung stellte sich bei der Versuchsreihe VII (Sohle geneigt, Kante abgerundet, $\alpha = 60^\circ$) für die maximale Wassermenge $Q = 60 \text{ l/sec}$ mit $h = 236 \text{ mm}$ ein.

Tabelle XIX. Tabelle der maximalen Unterdrücke.

V.R.Nr.	Maximalunterdruck mm		
	$Q = 20 \text{ l/sec}$	$Q = 40 \text{ l/sec}$	$Q = 60 \text{ l/sec}$
I	26	77	128
II	62	103	138
III	56	139	216
IV	62	142	154
V	46	99	154
VI	86	123	158
VII	70	153	236
VIII	Strahl losgelöst		

8. UNTERSUCHUNG ÜBER DIE ANWENDBARKEIT DES ÄEHNLICHKEITSGESETZES

Die moderne Hydraulik bedient sich heute vielfach zur Klärung von Fragen, die einer theoretischen Lösung nicht oder nur schwer zugänglich sind, des Modellversuches, indem man unter Beobachtung gewisser Voraussetzungen ein maßstäblich verkleinertes, dem Bauwerk in der Natur geometrisch ähnliches Modell herstellt, an welchem man die erforderlichen Beobachtungen unmittelbar anstellen kann. Es lag

daher der Gedanke nahe, die in vorstehender Abhandlung des näheren beschriebenen Laboratoriumsversuche als in einem bestimmten verkleinerten Maßstab durchgeführte Modellversuche aufzufassen und deren Ergebnisse in die Natur zu übertragen. Um aus den Ergebnissen von Modellversuchen richtige Schlüsse auf die Naturbauwerke ziehen zu können, muß außer der rein geometrischen auch mechanische Ähnlichkeit bestehen. Nach KREY (9) ist mechanische Ähnlichkeit unter sehr verschiedenen Verhältnissen zu erwarten, je nachdem neben den Trägheitskräften nur Schwerkräfte oder anderseits nur Reibungskräfte vorhanden oder maßgebend sind.

Im ersten Falle (FROUDE'sche Modellähnlichkeit) muß der Bezugswert $\frac{v^2}{l}$ für Modell und Natur gleich sein, d. h. Verhältnis der entsprechenden Geschwindigkeiten (in der Natur und im Modell) muß gleich der Quadratwurzel aus dem Modellmaßstab ($\sqrt{\lambda}$) sein.

Beträgt das lineare Verjüngungsverhältnis zwischen Modell und Natur $1:\lambda$, somit der Modellmaßstab $\frac{L}{l} = \lambda$, und bedeuten l und L zwei beliebige einander entsprechende Längenabmessungen im Modell und in der Natur und v und V ebenfalls zwei einander entsprechende beliebige Geschwindigkeitswerte, so besteht nach obiger Bemerkung im Falle der FROUDE'schen Modellähnlichkeit die Beziehung:

$$\frac{v^2}{l} = \frac{V^2}{L}$$

$$\sqrt{\frac{v}{l}} = \sqrt{\frac{V}{L}}$$

$$\frac{V}{v} = \sqrt{\frac{L}{l}} = \lambda^{0.5} \dots \dots \dots \quad (14).$$

Die Uebertragungsmaßstäbe berechnen sich dann, wenn die großen Buchstaben die Werte in der Natur und die kleinen jene im Modell bedeuten,

$$\text{für Flächen mit} \dots \dots \dots \frac{F}{f} = \frac{L^2}{l^2} = \lambda^2,$$

$$\text{für Wassermengen mit} \dots \dots \dots \frac{Q}{q} = \frac{F \cdot V}{f \cdot v} = \lambda^2 \cdot \lambda^{0.5} = \lambda^{2.5},$$

für Wassermengen bei gleichen Breiten im Modell und in der Natur

$$\text{mit } \frac{Q'}{q'} \frac{B.T.V}{b.t.v} = 1 \cdot \lambda \cdot \lambda^{0.5} = \lambda^{1.5},$$

für Druckhöhen, welche ja lineare Größen sind, ergibt sich der Uebertragungsmaßstab mit.....

$$\frac{H}{h} = \frac{L}{l} = \lambda.$$

Im zweiten Fall, d. h. dann wenn an Stelle der Schwerkrafte nur Reibungskräfte zur Wirkung kommen (REYNOLDS'sche Modellähnlichkeit), muß der Bezugswert v.l für Modell und Natur gleich sein, damit mechanische Aehnlichkeit vorhanden ist.

Für die in Rede stehenden Versuche kann, wenn überhaupt Modellähnlichkeit vorhanden ist, selbstverständlich nur die FROUDE'sche Aehnlichkeit in Betracht kommen. Bei Vorhandensein abgerundeter Wehrkronen, in welchen Fällen die Reibungskräfte gegenüber den Schwerkräften sicherlich nur eine ganz untergeordnete Rolle spielen, dürfte gegen die Anwendung obiger Maßstabsverhältnisse nichts einzuwenden sein. Eine Ueberprüfung des Aehnlichkeitgesetzes unter Verwendung der Ergebnisse der durchgeführten Versuche ist in diesem Fall nicht möglich, weil bei Heranziehung bei den Versuchen mit 20, 40 und 69 l/sec der Radius der Ueberfallkante immer dieselbe Größe beibehielt, während er entsprechend dem Aehnlichkeitgesetz ebenfalls hätte vergrößert werden müssen. Bedeutend unsicherer liegen die Verhältnisse bei Vorhandensein scharfer Ueberfallkanten, bei welchen, wie bereits früher erwähnt, das Auftreten von Wasserwalzen (Reibungsscheinungen) festgestellt werden konnte (ausgenommen Versuchsreihe VIII, bei welcher der Strahl bereits losgelöst ist). Es erscheint daher die Ueberprüfung der Anwendbarkeit obiger Modellregel auf diese Fälle nicht unangezeigt. Die Unterdruckverhältnisse bei 60 l/sec der Versuchsreihe IV weisen eine starke Abweichung gegenüber allen übrigen Fällen auf (Siehe Abbildung 53), daher kann dieser Versuch zur Ueberprüfung des Aehnlichkeitgesetzes nicht heran gezogen werden. Die Ursache dürfte darin liegen, daß der Wasserstrahl fast im Begriffe ist, sich vom Wehrücken loszulösen. Betrachtet man bei den Versuchsreihen II, IV und VI die Versuche mit $Q = 40$, bzw. 60 l/sec als Vorgänge in der Natur und die Versuche mit $q = 20$ l/sec als dazugehörige Modellversuche, so läßt sich auf Grund der früher aufgestellten Beziehungen aus den Wassermengen der Modellmaßstab $\lambda = \sqrt[1.5]{\frac{Q}{q}}$ zurückberechnen.

Da uns in erster Linie die maximalen Unterdrücke (Saugwirkungen) interessieren, sind diese h_{40} , h_{60} , h_{80} , h_{100} in der Tabelle XX Absatz A für $Q = 40$, 60 , 80 und 100 l/sec ausgewiesen (wobei die beiden letzteren Werte durch Extrapolation aus der zeichnerischen Darstellung in Abbildung 53 gefunden wurden) und mit den auf Grund des Ähnlichkeitsgesetzes berechneten Werten h'_{40} , h'_{60} , h'_{80} , h'_{100} verglichen

(Siehe die Quotienten $\frac{h'}{h}$).

Beispielsweise weist der maximale Unterdruck für $q = 20$ l/sec bei der Versuchsreihe II den Wert $h_{20} = 62$ mm auf. Betrachtet man den Versuch bei derselben Versuchsreihe mit $Q = 40$ l/sec als Vorgang in der Natur, so berechnet sich das Uebertragungsverhältnis für Drücke, bzw. Längen nach den obigen Darlegungen mit

$$\lambda_i = \sqrt[1.5]{\frac{40}{20}} = 1.59 \quad \dots \quad (15)$$

und daraus $h'_{40} = \lambda_i \cdot h_{20} = 1.59 \times 62 = 99$ mm.

Demgegenüber betrug der bei $Q = 40$ l/sec direkt beobachtete Wert für den maximalen Unterdruck $h_{40} = 103$ mm oder das Verhältnis $\frac{h'_{40}}{h_{40}} = 0.96$, d.h. der auf Grund des Ähnlichkeitsgesetzes berechnete

Wert von h'_{40} weist gegenüber dem unmittelbar beobachteten Wert h_{40} einen Fehler von 0.04 oder 4 % auf.

In Absatz B der Tabelle XX wurden die maximalen Unterdrücke für $q = 40$ l/sec (h_{40}) und in Absatz C für $q = 60$ l/sec (h_{60}) als Modellwerte aufgefasst und mittels des Ähnlichkeitsgesetzes in die Natur übertragen (h'_{60} , h'_{80} , h'_{100}). Die berechneten Verhältnisse $\frac{h'}{h}$ lassen eine

Beurteilung der Anwendbarkeit des Ähnlichkeitsgesetzes zu. Die größte Abweichung weist der Rechnungswert $h'_{100} = 251$ mm (bei Versuchsreihe VI) gegenüber dem Modellwert $h_{100} = 217$ mm auf ($\frac{h'_{100}}{h_{100}} = 1.16$),

in welchem Fall der Fehler rund 16 % beträgt, obwohl das lineare Verjüngungsverhältnis (Modellmaßstab $\lambda_4 = 2.92$) bloß rund 1:3 beträgt. Aus vorstehenden Ueberlegungen ergibt sich somit, daß im vorliegenden Fall das Ähnlichkeitsgesetz mit großer Vorsicht anzuwenden ist und den gewonnenen Resultaten nur der Charakter von Orientierungswerten beigemessen werden darf.

Tabelle XX. Uebertragung der durch den Versuch gewonnenen Werte der maximalen Unterdrücke h_{z_0} , h_{40} , h_{60} in die Natur mit Hilfe des Ähnlichkeitsgesetzes.

A: Modellwassermenge: $q = 20 \text{ l/sec}$; Wassermenge i. d. Natur: $Q = 40, 60, 80 \text{ u. } 100 \text{ l/sec.}$

V. R.	h_{z_0} mm	$h_{40} = \lambda_1 \cdot h_{z_0}$ mm	h_{60} mm	$\frac{h'_{40}}{h_{40}}$	$h'_{z_0} = \lambda_2 \cdot h_{z_0}$ mm	$\frac{h'_{60}}{h_{60}}$	h'_{80} mm	$\frac{h'_{80}}{h_{80}}$	$W_{100} = \lambda_3 \cdot h_{z_0}$ mm	h_{100} mm	$\frac{h'_{100}}{h_{100}}$	Modellmaßstabe
II	62	99	103	0.96	129	1.38	0.94	156	169	0.92	181	$\lambda_1 = \sqrt[1.5]{\frac{40}{20}} = 1.59$
IV	62	99	142	0.70	—	—	—	—	—	—	—	$\lambda_2 = \sqrt[1.5]{\frac{60}{20}} = 2.08$
VI	86	137	123	1.11	179	158	1.13	217	189	1.15	251	$\lambda_3 = \sqrt[1.5]{\frac{80}{20}} = 2.52$

B: Modellwassermenge: $q = 40 \text{ l/sec}$; Wassermenge i. d. Natur: $Q = 60, 80 \text{ u. } 100 \text{ l/sec.}$

V. R.	h_{40} mm	$h'_{40} = \lambda_4 \cdot h_{40}$ mm	h_{60} mm	$\frac{h'_{40}}{h_{40}}$	$h'_{z_0} = \lambda_5 \cdot h_{z_0}$ mm	h_{80} mm	$\frac{h'_{80}}{h_{80}}$	$h'_{100} = \lambda_7 \cdot h_{40}$ mm	h_{100} mm	$\frac{h'_{100}}{h_{100}}$	Modellmaßstabe
II	103	135	138	0.98	164	169	0.97	190	198	0.96	$\lambda_5 = \sqrt[1.5]{\frac{60}{40}} = 1.31$
IV	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$\lambda_6 = \sqrt[1.5]{\frac{80}{40}} = 1.59$
VI	123	161	158	1.02	196	189	1.04	226	217	1.04	$\lambda_7 = \sqrt[1.5]{\frac{100}{40}} = 1.84$

C: Modellwassermenge: $q = 60 \text{ l/sec}$; Wassermenge i. d. Natur: $Q = 80 \text{ u. } 100 \text{ l/sec.}$

V. R.	h_{40} mm	$h'_{40} = \lambda_8 \cdot h_{40}$ mm	h_{60} mm	$\frac{h'_{40}}{h_{40}}$	$h'_{z_0} = \lambda_9 \cdot h_{z_0}$ mm	h_{80} mm	$\frac{h'_{80}}{h_{80}}$	$h'_{100} = \lambda_{10} \cdot h_{40}$ mm	h_{100} mm	$\frac{h'_{100}}{h_{100}}$	Modellmaßstabe
II	138	167	169	0.99	195	198	0.99	198	198	0.99	$\lambda_8 = \sqrt[1.5]{\frac{80}{60}} = 1.21$
IV	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
VI	158	191	189	1.01	223	217	1.03	217	1.03	1.03	$\lambda_9 = \sqrt[1.5]{\frac{100}{60}} = 1.41$

Diese vorausgeschickt wird im Nachstehenden untersucht, wie sich der maximale Unterdruck für den Fall ergibt, wenn der Versuch für Versuch für $q = 60 \text{ l/sec}$ (150 l/sec/m) der Versuchsreihe VII als Modellversuch z. B. im Maßstab $1:15$ aufgefasst wird. In diesem Fall ist

$$h = 236 \text{ mm.}$$

Daraus ergibt sich

$$H = 236 \times 15 = 3.54 \text{ m.}$$

Dabei kommt pro 1 m Wehrbreite eine Wassermenge zum Abfluß von

$$Q = 15^{1.5} \cdot q = 58.0947 \times 150 = 8714.205 \text{ l/sec/m.}$$

Die Wassertiefe im Profil der Ueberfallkante berechnet sich mit

$$T = 15 \cdot t = 15 \times 0.08 = 1.20 \text{ m.}$$

Diese kurze Berechnung zeigt, daß unter Umständen Saugwirkungen von ganz beträchtlicher Größe (im vorliegenden Fall $1/3$ Atmosphäre) auftreten können.

9. ZUSAMMENFASSUNG

Vorstehende Betrachtung gewinnt besondere Bedeutung im Hinblick auf die Wildbachverbauungen, bei welchen oft nur einfache Wehrkonstruktionen (Steinkastenwehre u. s. w.) zur Ausführung kommen. Bedenkt man, daß die Saugwirkungen während des Wasserabflusses ständig wirken und infolge der Pulsationen des Wassers (wie dies auch die Versuche gezeigt haben) starken plötzlichen Schwankungen unterworfen sind, so kann man sich leicht ein Bild von der Schädlichkeit derselben für das Bauwerk durch Aussaugen des zwischen den größeren Steinen befindlichen feinen Sandes machen. Die Auswahl größerer Steine für die Wehrkrone und deren besonders sorgfältige Verlegung ist daher nicht nur im Hinblick auf die erhöhte Materialabnutzung an dieser Stelle, sondern wie unsere Untersuchungen gezeigt haben, auch vom rein hydraulischen Standpunkt aus besonders wünschenswert.

Werden die Ergebnisse vorstehender Ausführungen kurz zusammengefaßt, so ergeben sich folgende wichtige Tatsachen:

- 1). Die Druckverteilung im Inneren des Wasserlaufes oberhalb der Ueberfallkante weist einen linearen Verlauf auf.
- 2). Im Bereich der Ueberfallkante treten Unterdrücke (Saugwirkungen) auf, über deren Größe man sich bisher noch keine nähere Rechenschaft gegeben hat. Unter gewissen Umständen können sie eine

derartige Größe erreichen, daß die dem Bauwerk schädlich werden können.

- 3). Für die maximalen Unterdrücke knapp unterhalb der Ueberfallkante ließ sich auf empirischen Wege eine gesetzmäßige Abhängigkeit derselben von der Größe der sekundlichen Wassermenge und der Form der Ueberfallkante, bezw. der Neigung des Wehrrückens aufstellen.
- 4). Unter gewissen Verhältnissen pflanzt sich die Saugwirkung von der Ueberfallkante aus in das Oberwassergerinne flußaufwärts fort.

Wir glauben durch vorstehende Untersuchungen nicht nur eine Klärung in theoretischer Beziehung in ein bisher fast gänzlich vernachlässigtes Gebiet der Hydraulik gebracht zu haben, sondern wollen damit auch das Augenmerk der Fachwelt auf die jedenfalls nicht zu unterschätzende praktische Bedeutung dieses Gegenstandes lenken.

LITERATUR

- 1) BAZIN, H., *Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir*. Annales des ponts et chaussées, Bd. XIX, s. 9—65, Paris 1890.
- 2) BELANGER, J. B., *Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent*, s. 31, Paris 1828.
- 3) BÖSS, P., Berechnung der Wasserspiegellage beim Wechsel des Fließzustandes, s. 18-29, Berlin 1919.
- 4) BÖSS, P., Berechnung der Abflußmengen und der Wasserspiegellage bei Abstürzen und Schwellen unter besonderer Berücksichtigung der dabei auftretenden Zusatzspannungen. Wasserbau und Wasserwirtschaft, 15. Jan. Heft 2, s. 13—14 u. 1. Feb. Heft 3, s. 28-33, München u. Berlin 1929.
- 5) BUDAU, A., Kurzgefasstes Lehrbuch der Hydraulik, 2. Aufl., s. 80, Wien u. Leipzig 1920.
- 6) EHRENBERGER, R., Wasserbewegung in steilen Rinnen (Schußtennen) mit besonderer Berücksichtigung der Selbstbelüftung. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau im Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft über ausgeführte Versuche, 6. Folge, Wien 1926.
- 7) FLAMANT, A., *Hydraulique*, s. 91-92, Paris 1909.
- 8) FORCHHEIMER, PH., *Hydraulik*, 2. Aufl., s. 145, Leipzig u. Berlin 1924.
- 9) KREY, H., Grenzen der Uebertragbarkeit der Versuchsergebnisse und Modellähnlichkeit bei praktischen Fließbauversuchen. Zeits. f. angewandte Mathematik und Mechanik, Bd. 5, s. 484—486, Berlin 1925.
- 10) MARCHI, G. DE, Ricerche sperimentali sulle dighe tracimanti. Annali dei Lavori Pubblici (già Giornale del Genio Civile), N. 7, s. 581—620, Roma 1928.
- 11) Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens insbesondere aus den Laboratorien der technischen Hochschulen herausgegeben vom Verein deutscher Ingenieure, Hefte 131, s. 2—4, Berlin 1913.
- 12) Oesterreichischer Ingenieur u. Architekten Kalender, s. 55, 1903.

- 13) REHBOCK, TH., Betrachtungen über Abfluß, Stau- und Walzenbildung bei fließenden Gewässern und ihre Verwertung für die Ausbildung des Ueberfalles bei der Unter-tunnelung der Sihl durch die linksufrige Seebahn in der Stadt Zürich (Untersuchungen aus dem Flußbaulaboratorium der Technischen Hochschule in Karlsruhe), s. 4—6, Berlin 1917.
 - 14) REHBOCK, TH., Die Ausbildung der Ueberfälle beim Abfluß von Wasser über Wehre nebst Beschreibung der Anlage zur Beobachtung von Ueberfällen im Flußbaulaborato-rium zu Karlsruhe. Festschrift zur Feier des zweifünfzigsten Geburtstages Seiner Königlichen Hoheit des Großherzogs Friedrich II. herausgegeben von der Großherzog-lichen Technischen Hochschule Fridericiana unter dem Rektorate von Dr. Adolf Krazer, s. 8—29, 1909.
-

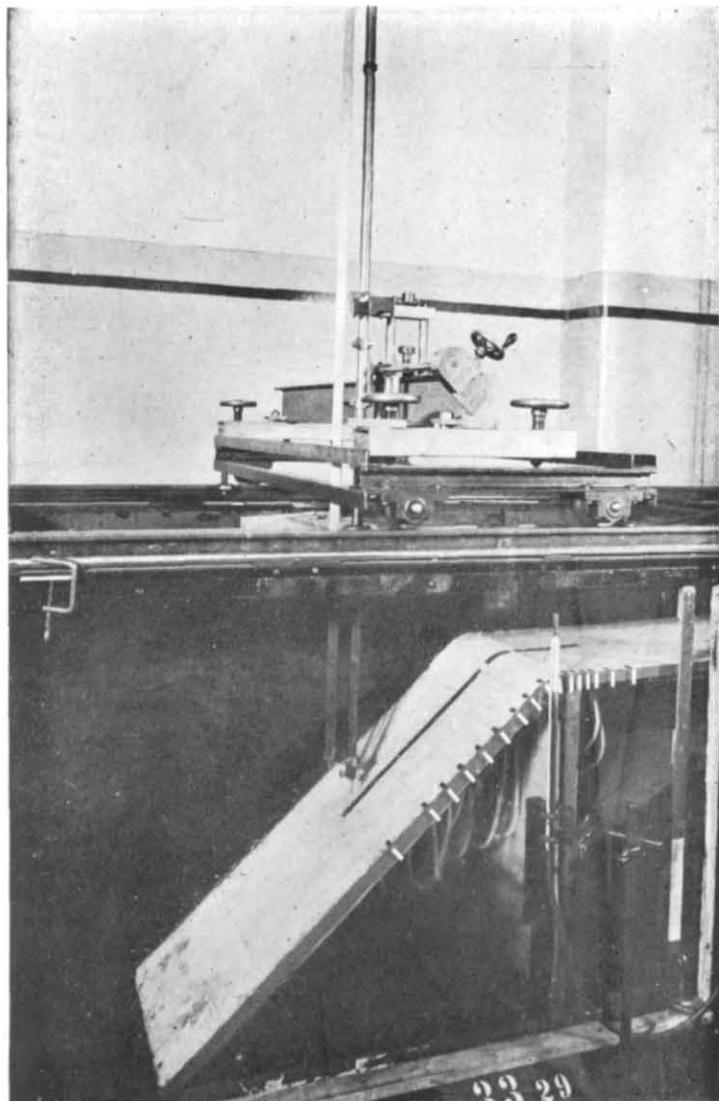


Abb. 1. Gesamtansicht der Versuchsanordnung.

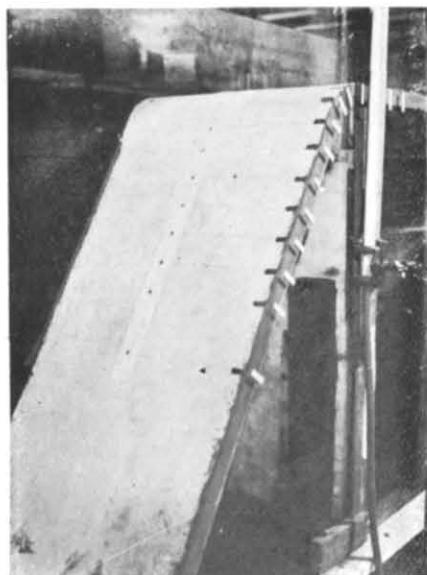


Abb. 2. Ausmündung der Piezometerröhrchen
im Wehrrücken.

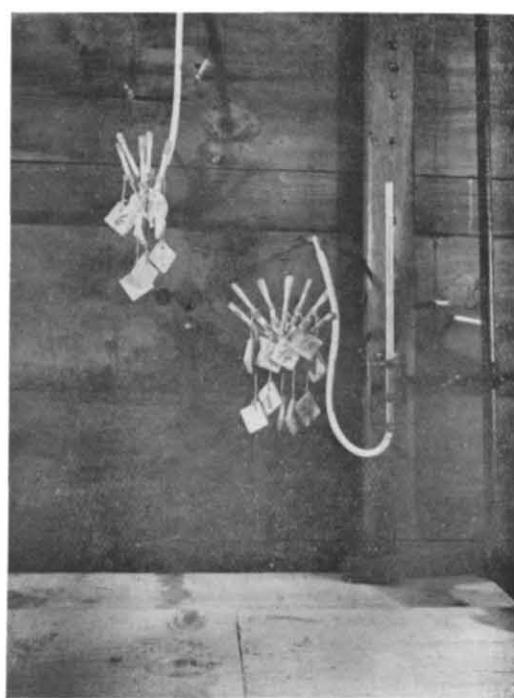


Abb. 3. Ausmündung der Piezometerröhrchen in der
rückwärtigen Holzwand.

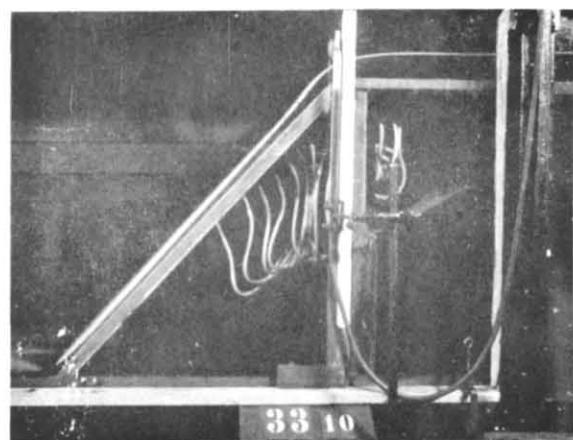


Abb. 4. Versuchsreihe I; $Q = 20 \text{ l/sec}$,
Piezometerrohr R 3.

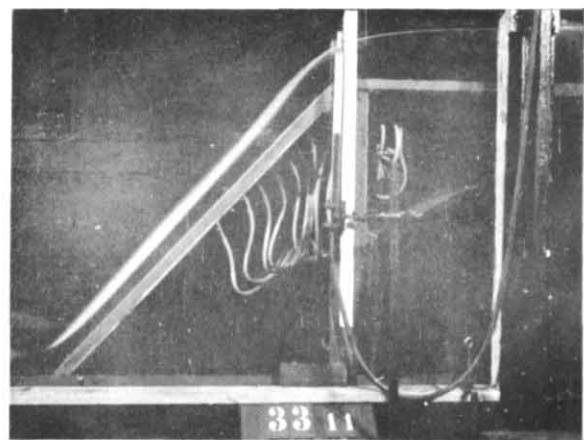


Abb. 5. Versuchsreihe I, $Q = 60 \text{ l/sec}$,
Piezometerrohr R 8.

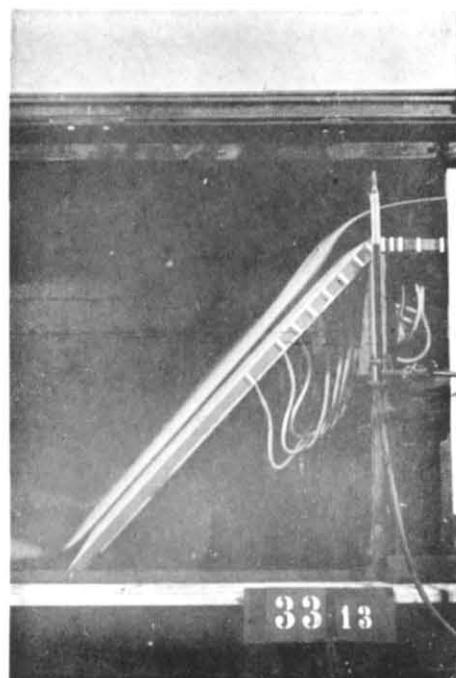


Abb. 6. Versuchsreihe II; $Q = 20 \text{ l/sec}$,
Piezometerrohr R 6.

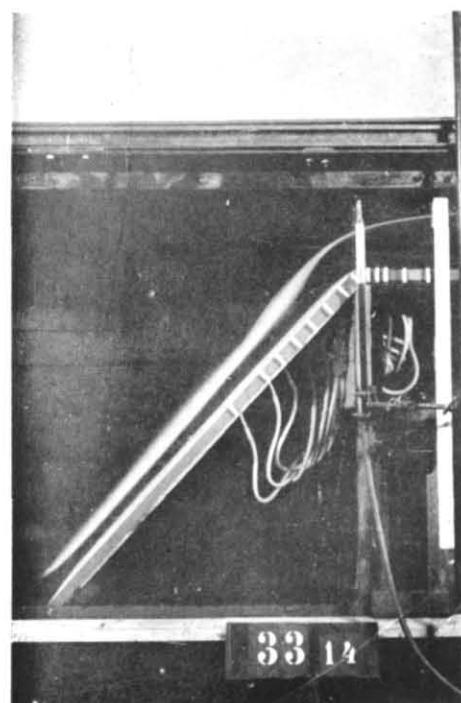


Abb. 7. Versuchsreihe II; $Q = 60 \text{ l/sec}$,
Piezometerrohr R 6.

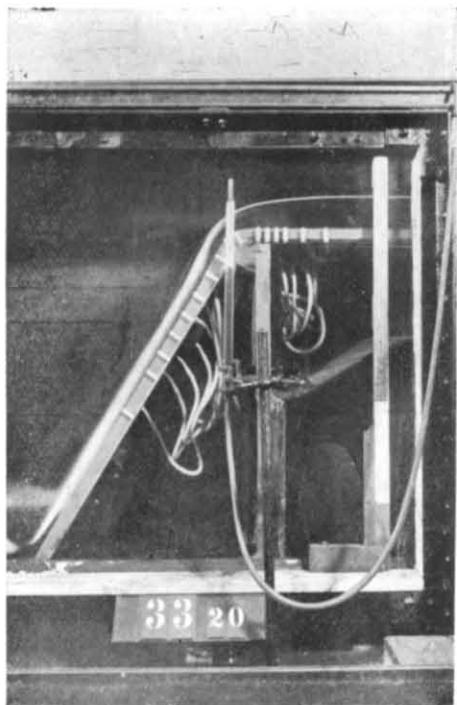


Abb. 8. Versuchsreihe III; $Q = 20$ l/sec,
Piezometerrohr R 8.

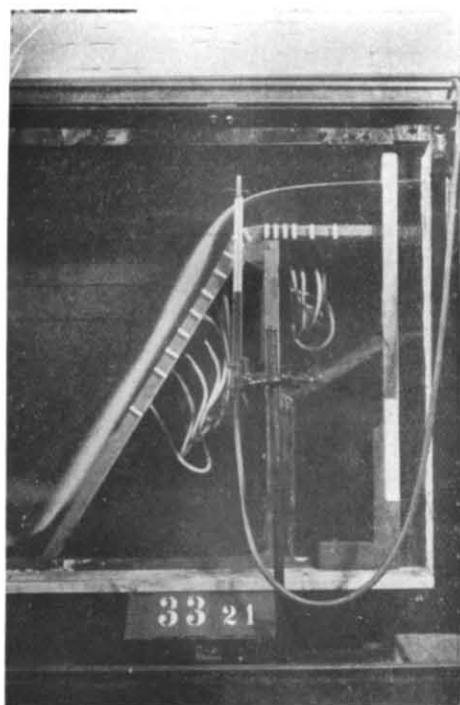


Abb. 9. Versuchsreihe III; $Q = 40$ l/sec,
Piezometerrohr R 8.

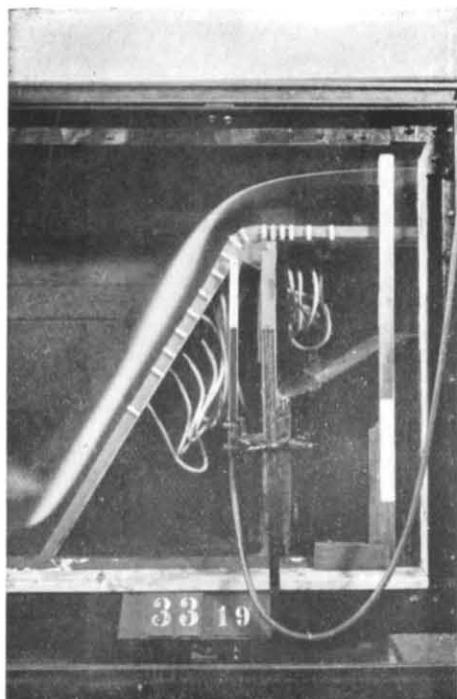


Abb. 10. Versuchsreihe III; $Q = 60$ l/sec,
Piezometerrohr R 8.

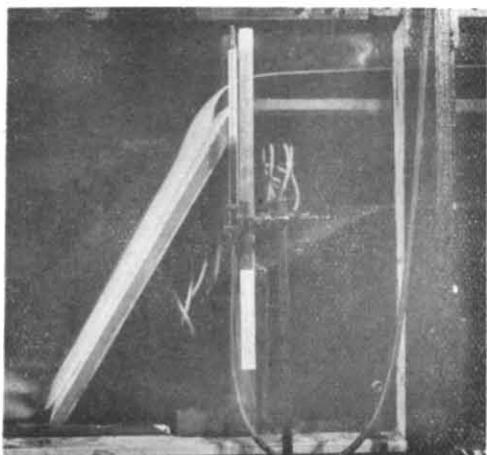


Abb. 11. Versuchsreihe IV; $Q = 20$ l/sec,
Piezometerrohr R 7.

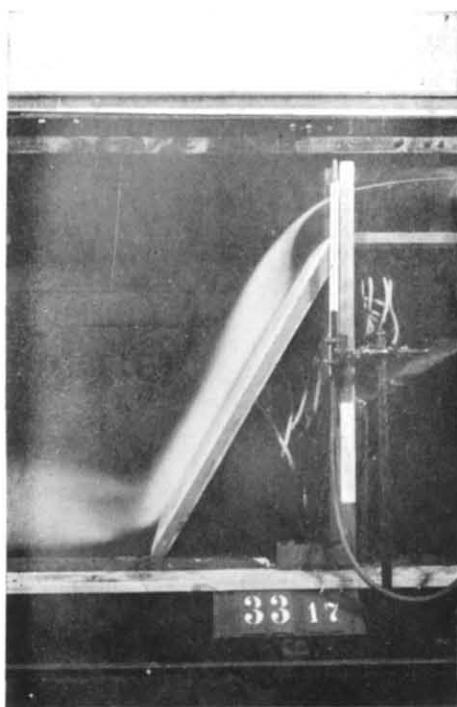


Abb. 12. Versuchsreihe IV; $Q = 60$ l/sec,
Piezometerrohr R 7.

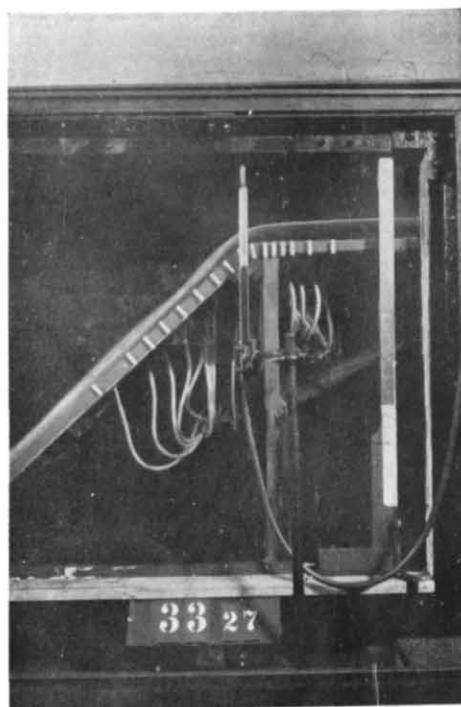


Abb. 13. Versuchsreihe V; $Q = 20$ l/sec,
Piezometerrohr R 8.

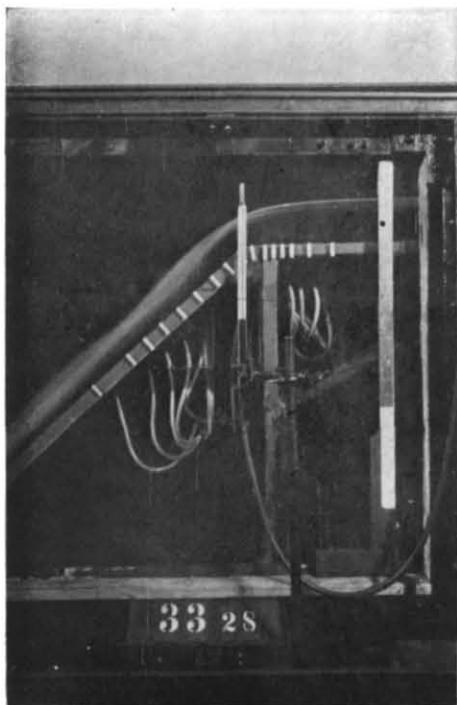


Abb. 14. Versuchsreihe V; $Q = 60$ l/sec,
Piezometerrohr R 8.

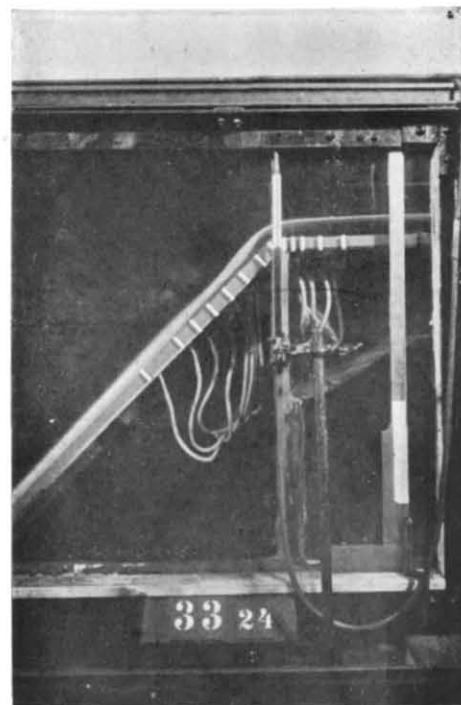


Abb. 15. Versuchsreihe VI; $Q = 20$ l/sec,
Piezometerrohr R 6.

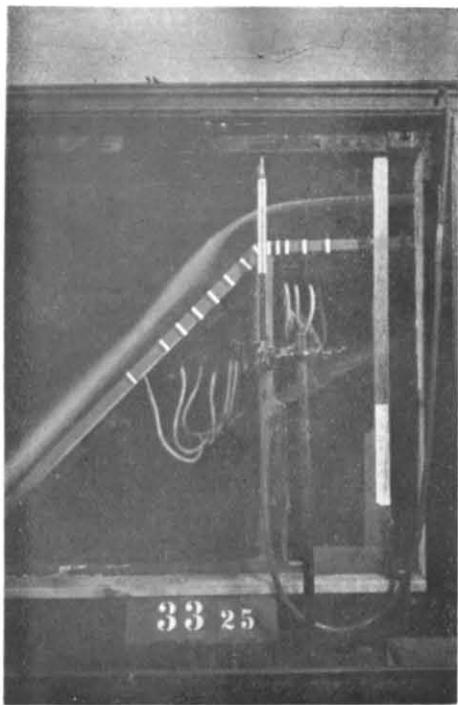


Abb. 16. Versuchsreihe VI; $Q = 60 \text{ l/sec}$,
Piezometerrohr R 6.

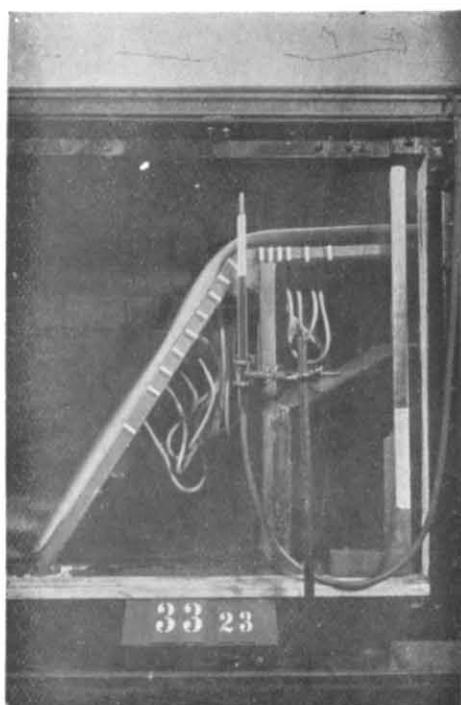


Abb. 17. Versuchsreihe VII; $Q = 20 \text{ l/sec}$,
Piezometerrohr R 7.

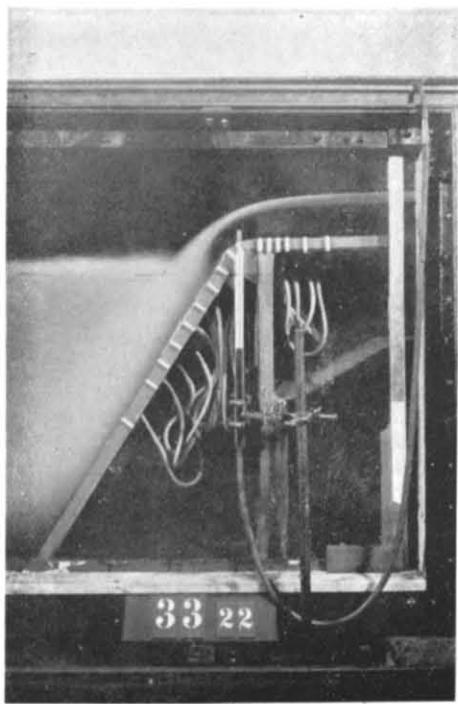


Abb. 18. Versuchsreihe VII; $Q = 60 \text{ l/sec}$,
Piezometerrohr R 7.

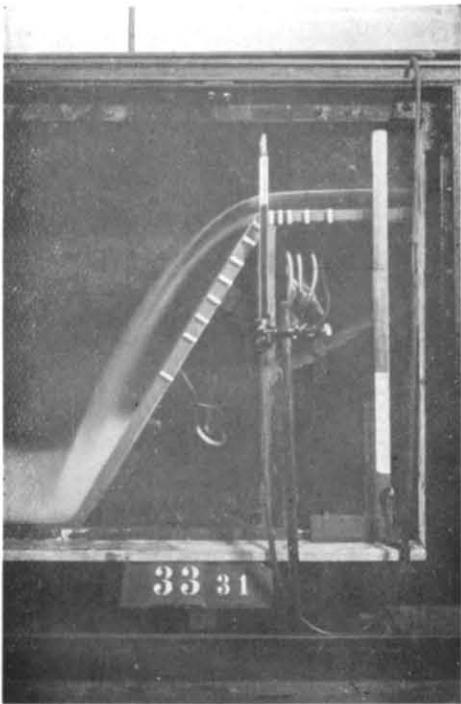


Abb. 19. Versuchsreihe VIII; $Q = 20 \text{ l/sec}$,
Piezometerrohr R 6.

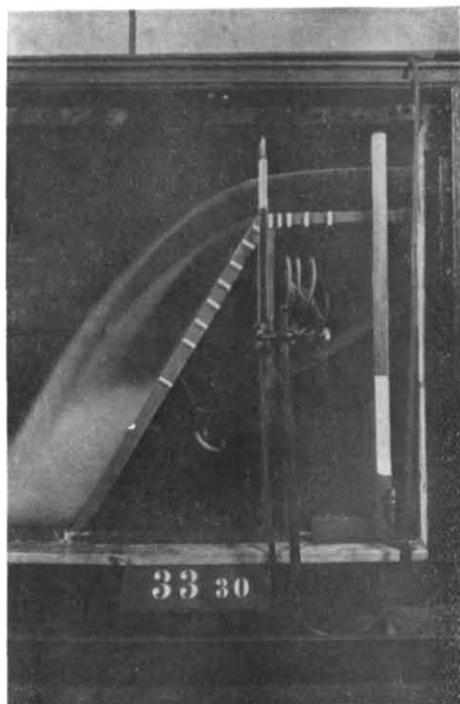


Abb. 20. Versuchsreihe VIII, $Q = 60 \text{ l/sec}$,
Piezometerrohr R 6.



Abb. 21. Walzenbildung unterhalb der Ueberfallkante; Versuchsreihe IV, $Q = 60 \text{ l/sec}$.

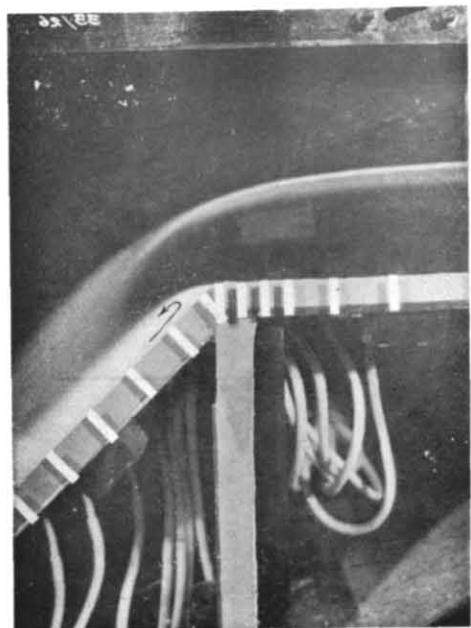


Abb. 22. Walzenbildung unterhalb der Ueberfallkante; Versuchsreihe VI, $Q = 60 \text{ l/sec}$.

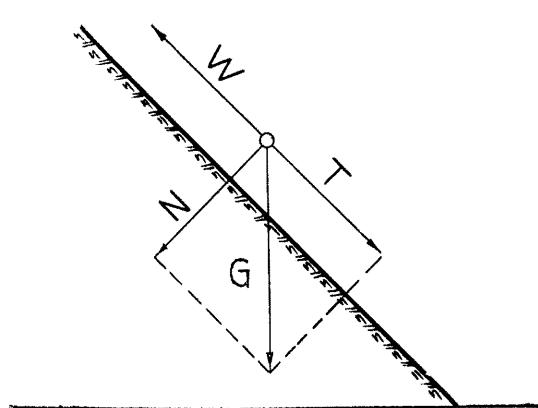


Abb. 23. Kräftezerlegung.

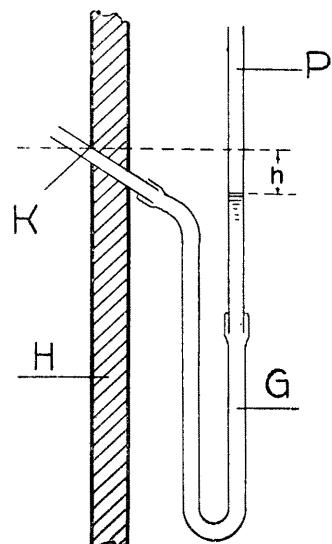


Abb. 24. Piezometerrohr an der rückwärtigen Holzwand.

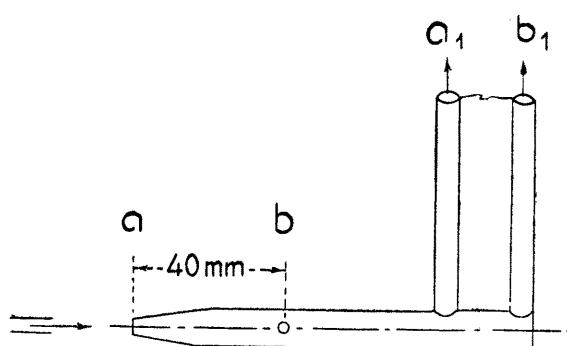


Abb. 25. Düse der Pitotröhre.

Abb. 26 Versuchsreihe I,
Sohle horizontal, Kanter rund, $\alpha = 45^\circ$.

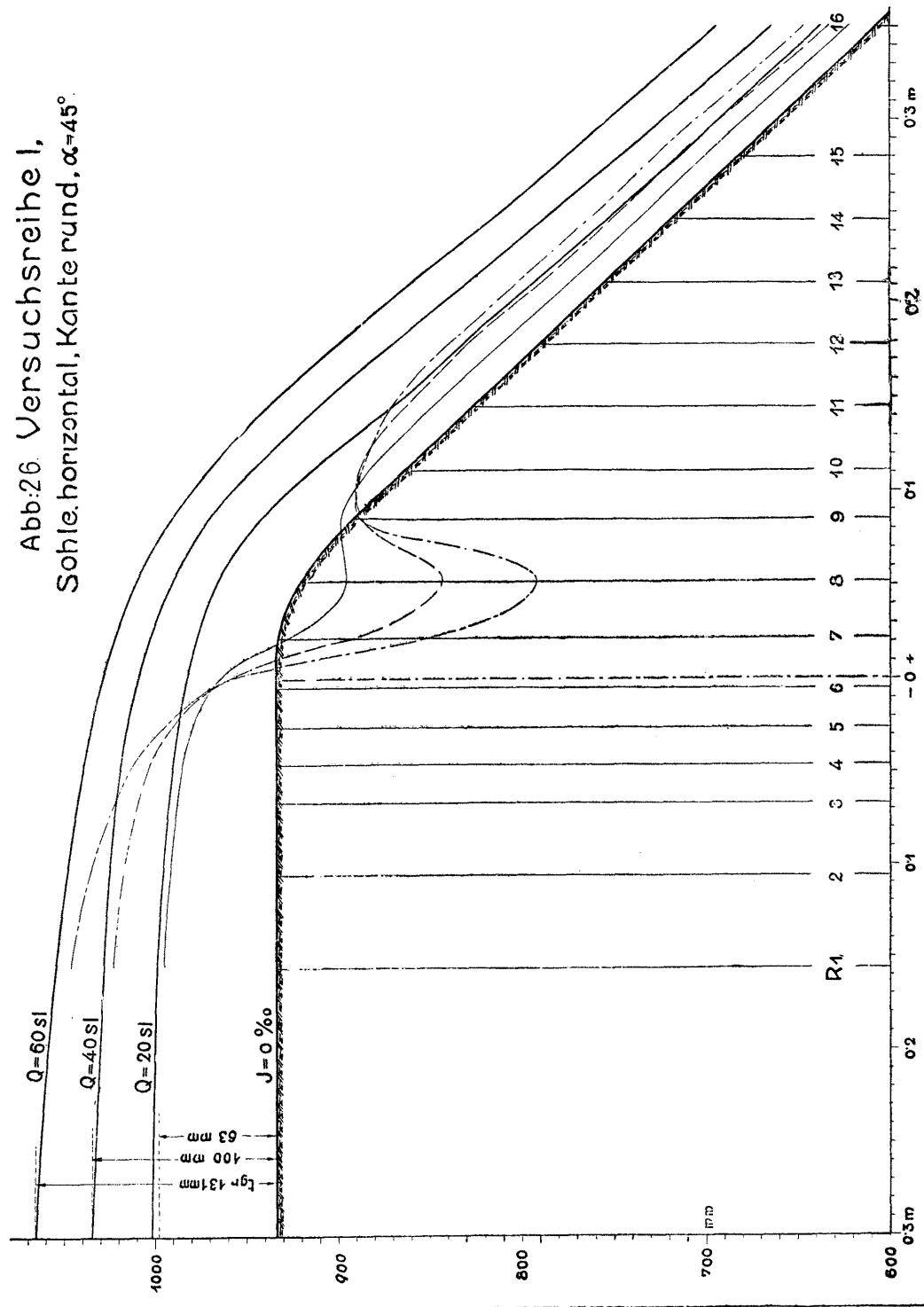


Abb. 27. Versuchsreihe II,
Sohle horizontal, Kante scharf, $\alpha = 45^\circ$.

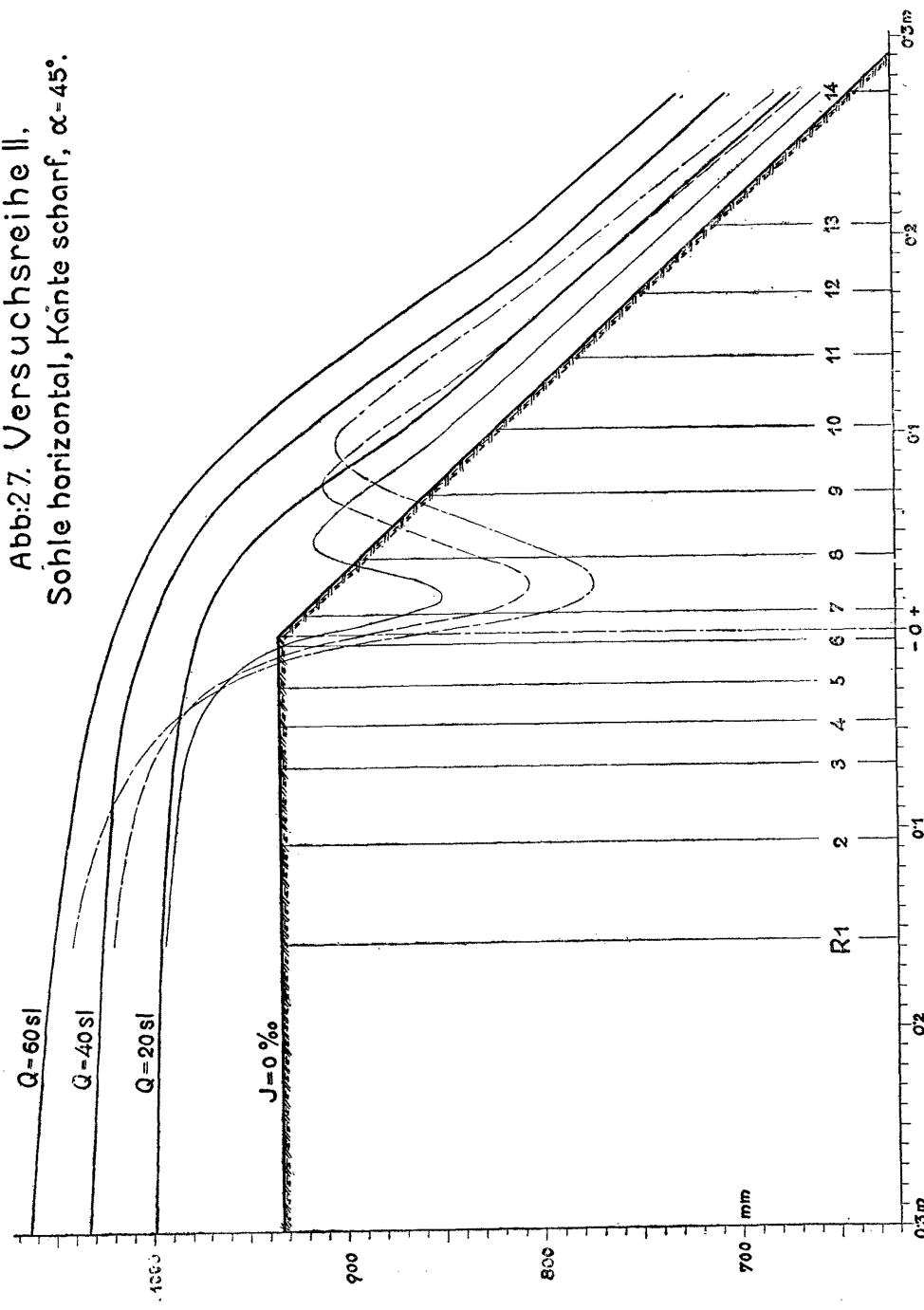


Abb. 28. Versuchsreihe III, Sohle horizontal, Kante rund;
 $\alpha = 60^\circ$

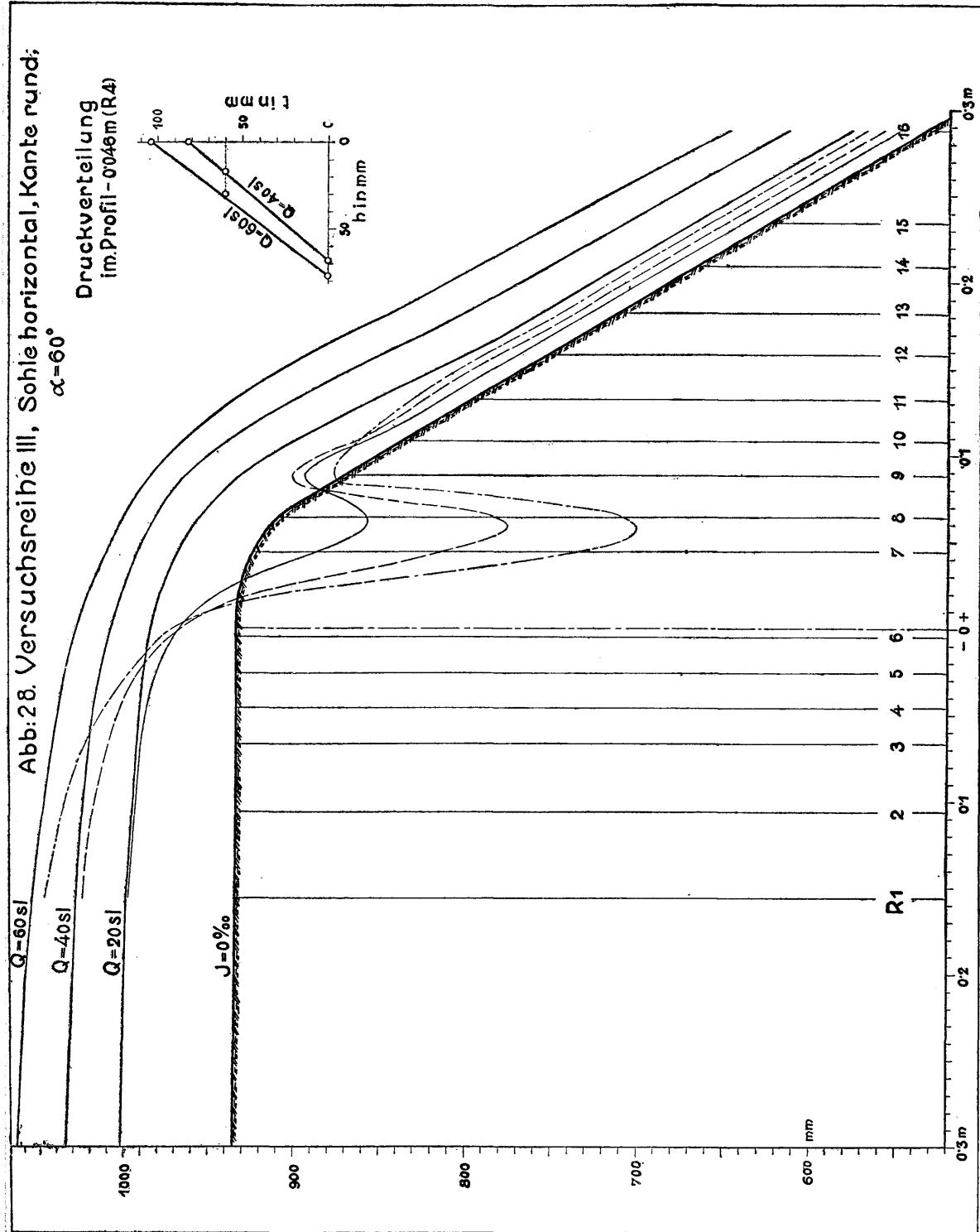


Abb:29. Versuchsreihe IV, Sohle horizontal, Kante scharf,

$\alpha = 60^\circ$.
 Druckverteilung
 im Profil - 0046m (R.4)

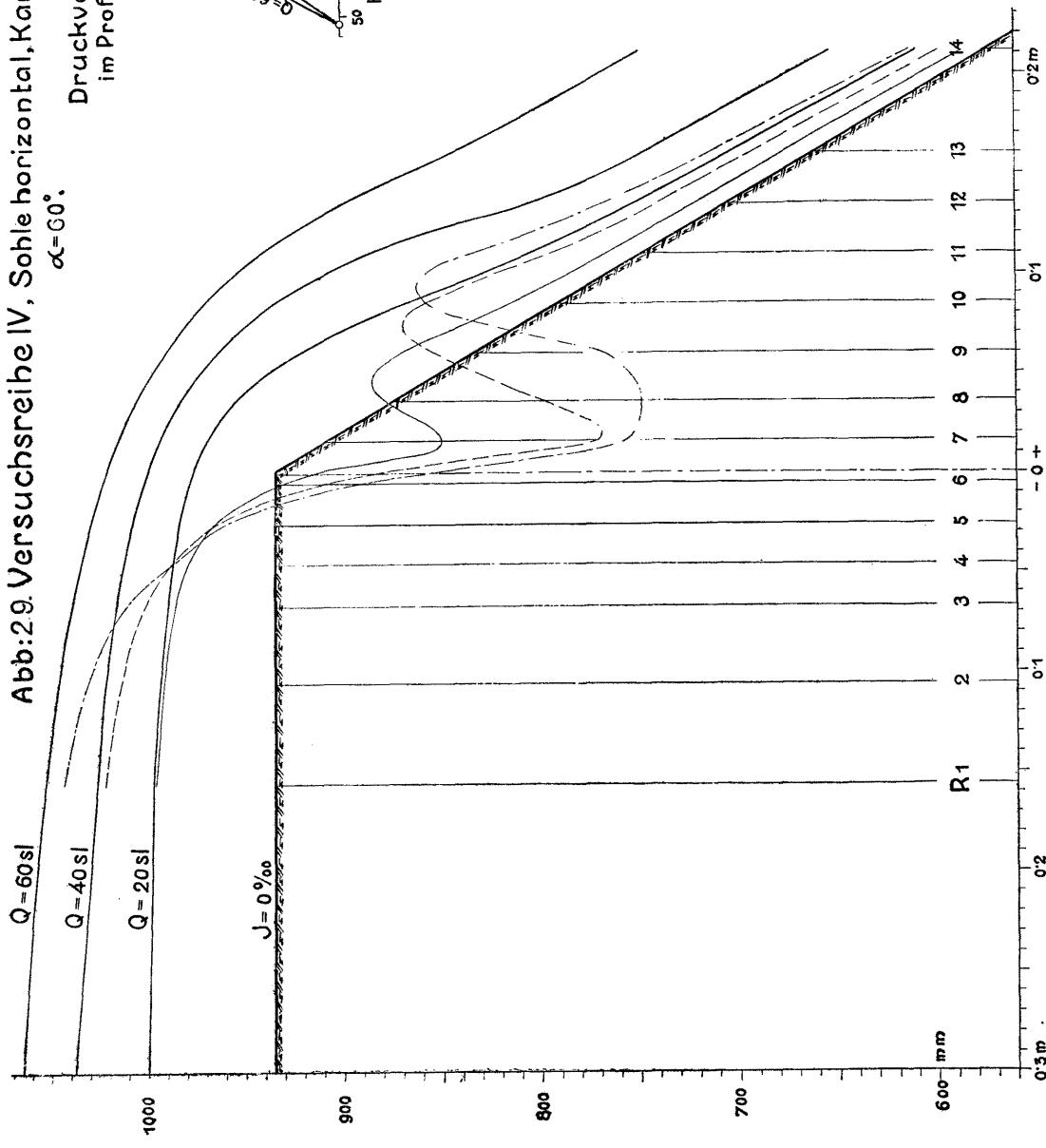


Abb. 30. Versuchsreihe V, Sohle geneigt, Kante rund,
 $\alpha = 45^\circ$

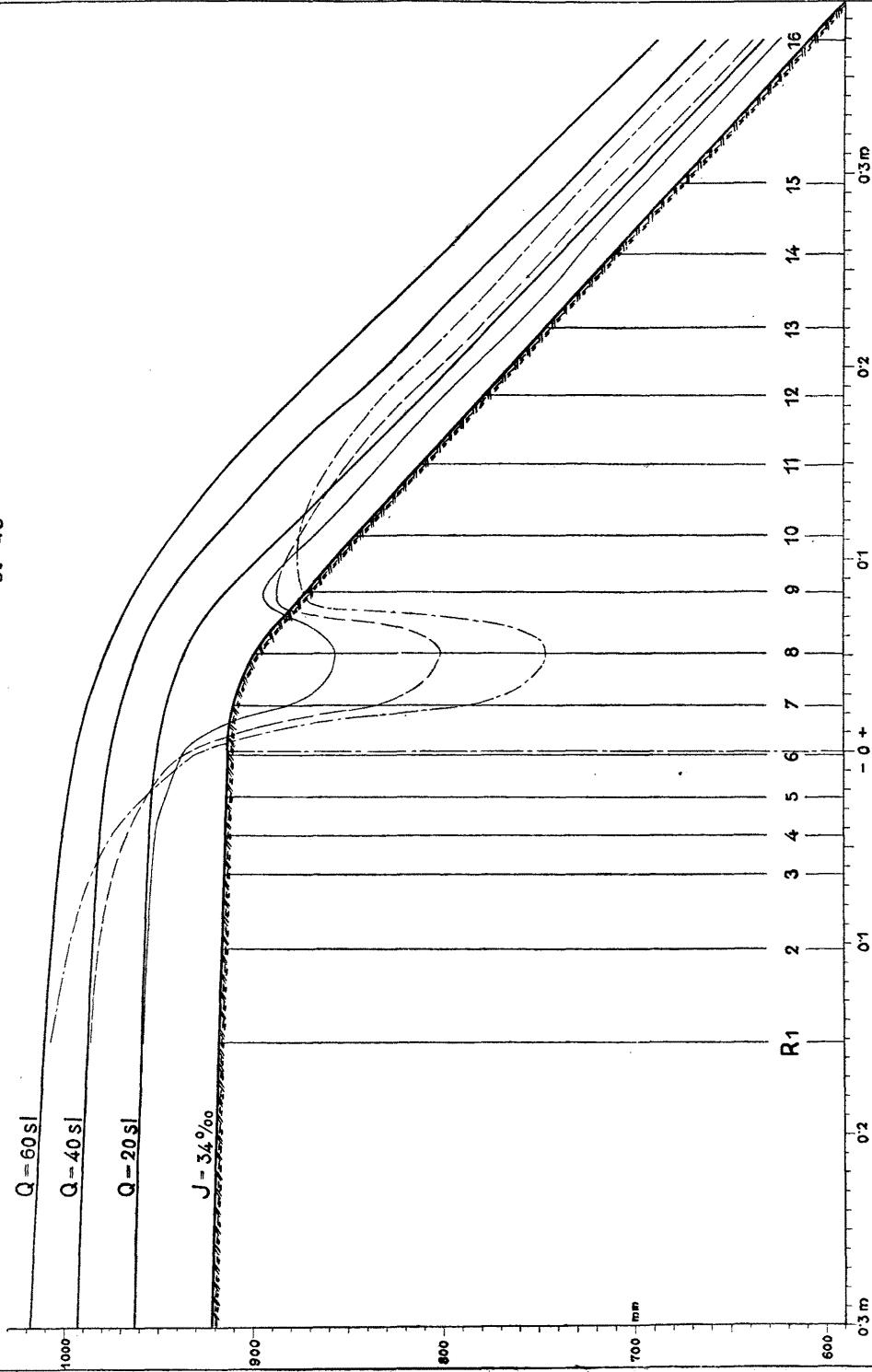


Abb. 31. Versuchsreihe VI.
Sohle geneigt, Kante scharf, $\alpha = 45^\circ$

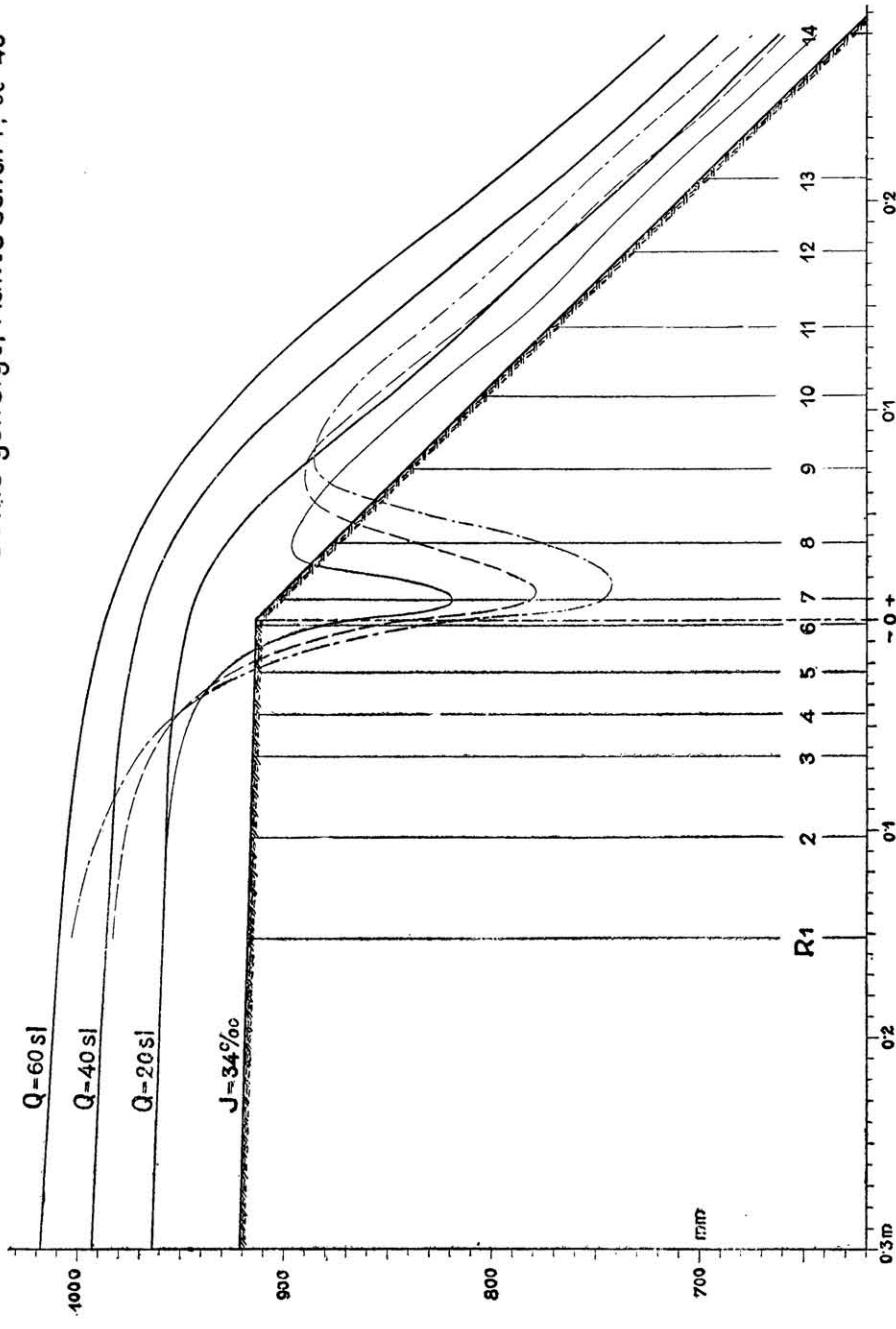


Abb. 32. Versuchsreihe VII,
Sohle geneigt, Kante rund, $\alpha = 60^\circ$.

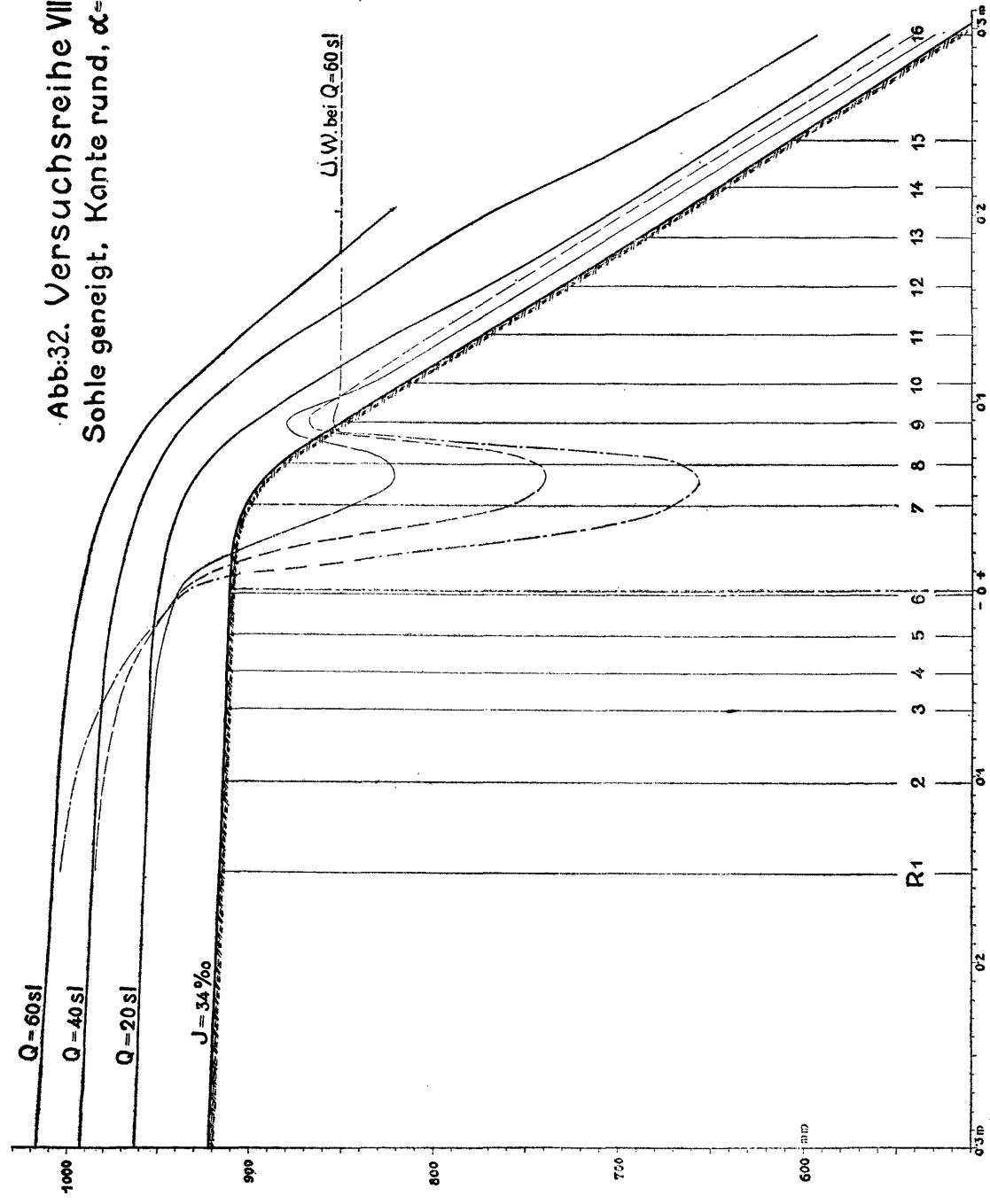


Abb.33. Versuchsreihe VIII, Sohle geneigt, Kante scharf,
 $\alpha = 60^\circ$

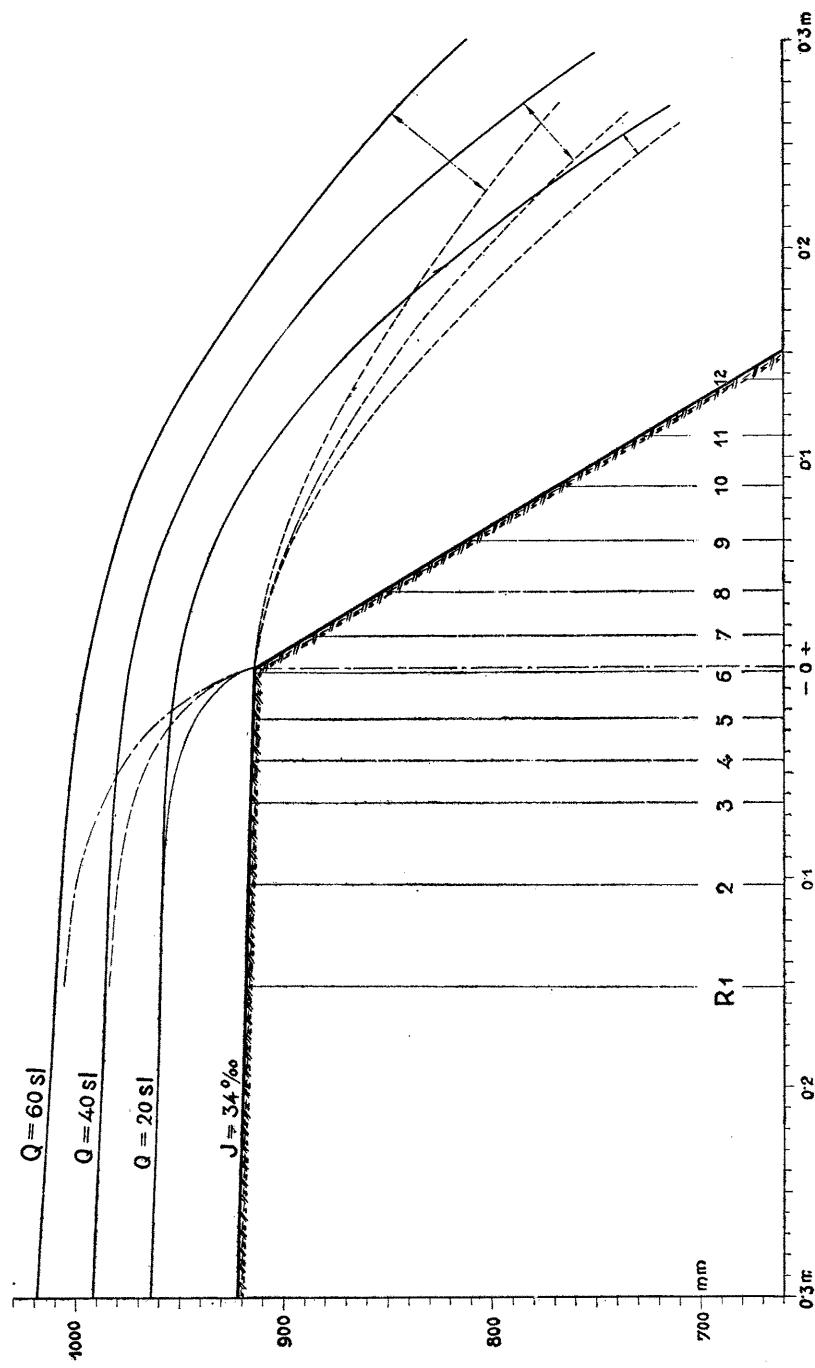


Abb. 34. Verlauf d. Wasserdrücke
entlang der Sohle,
Versuchsreihe I.

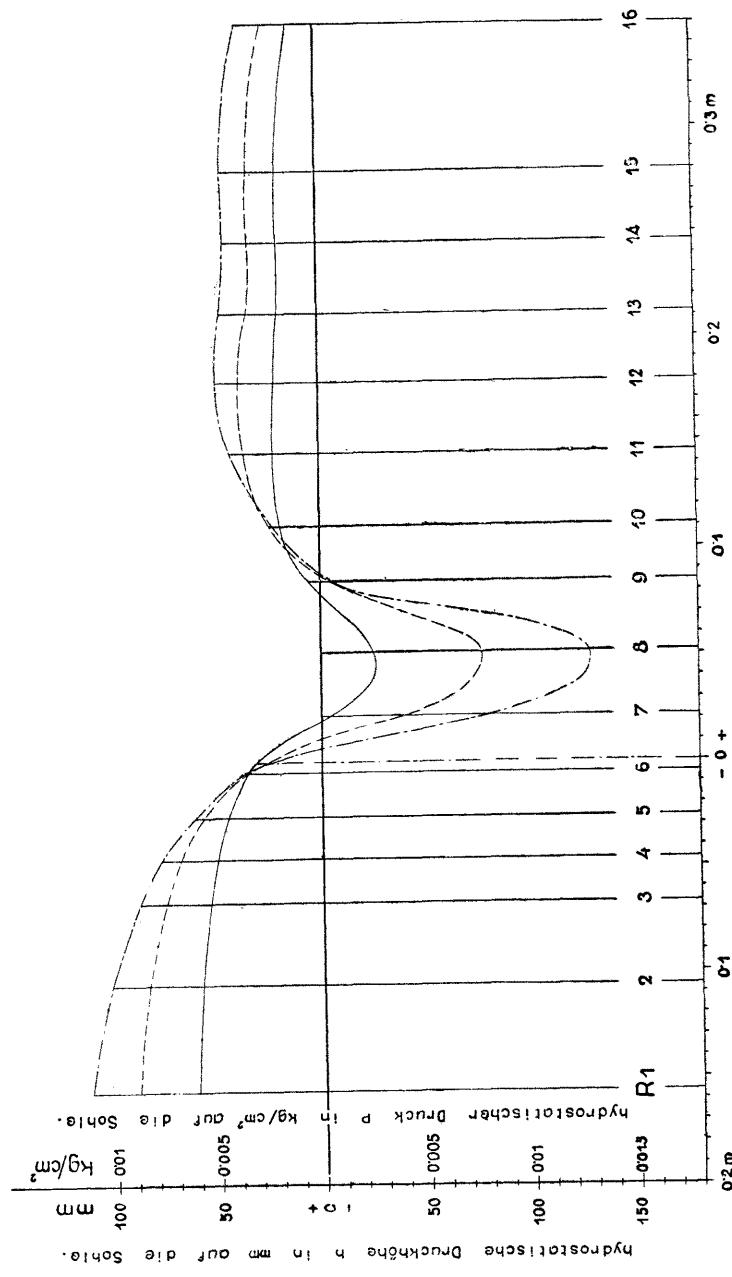


Abb. 35. Verlauf d. Wasserdrücke
entlang der Sohle,
Versuchsreihe II

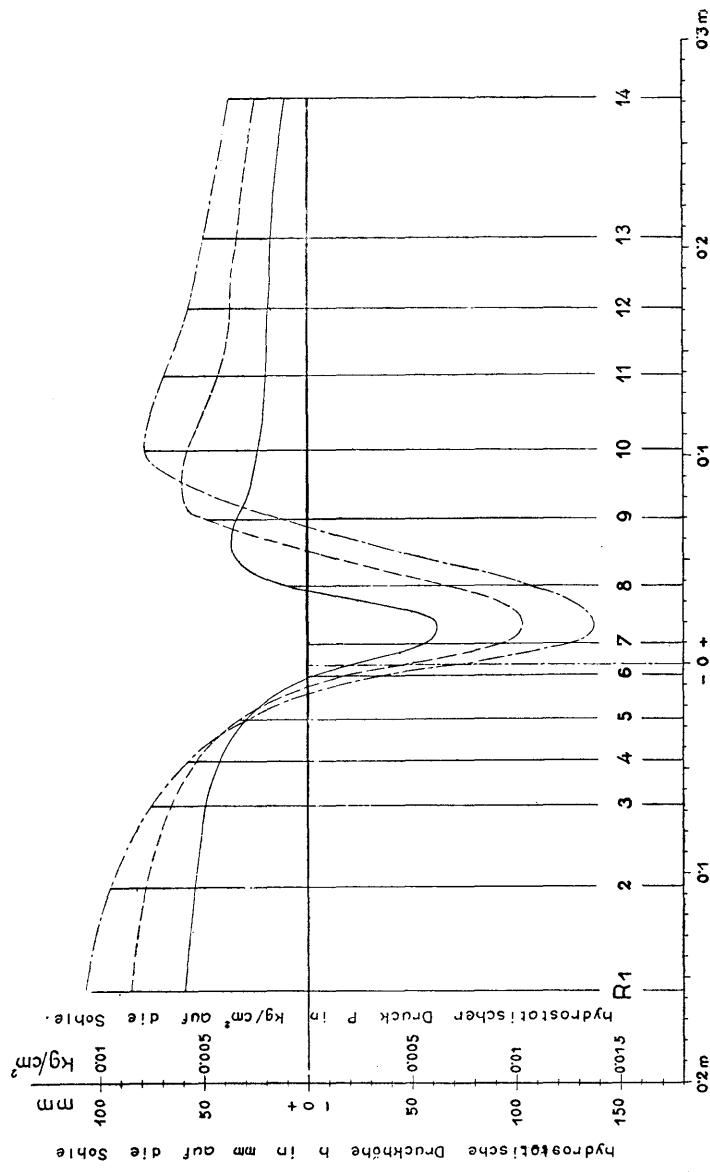


Abb:36. Verlauf d. Wasserdrücke
entlang der Sohle,
Versuchsreihe III.

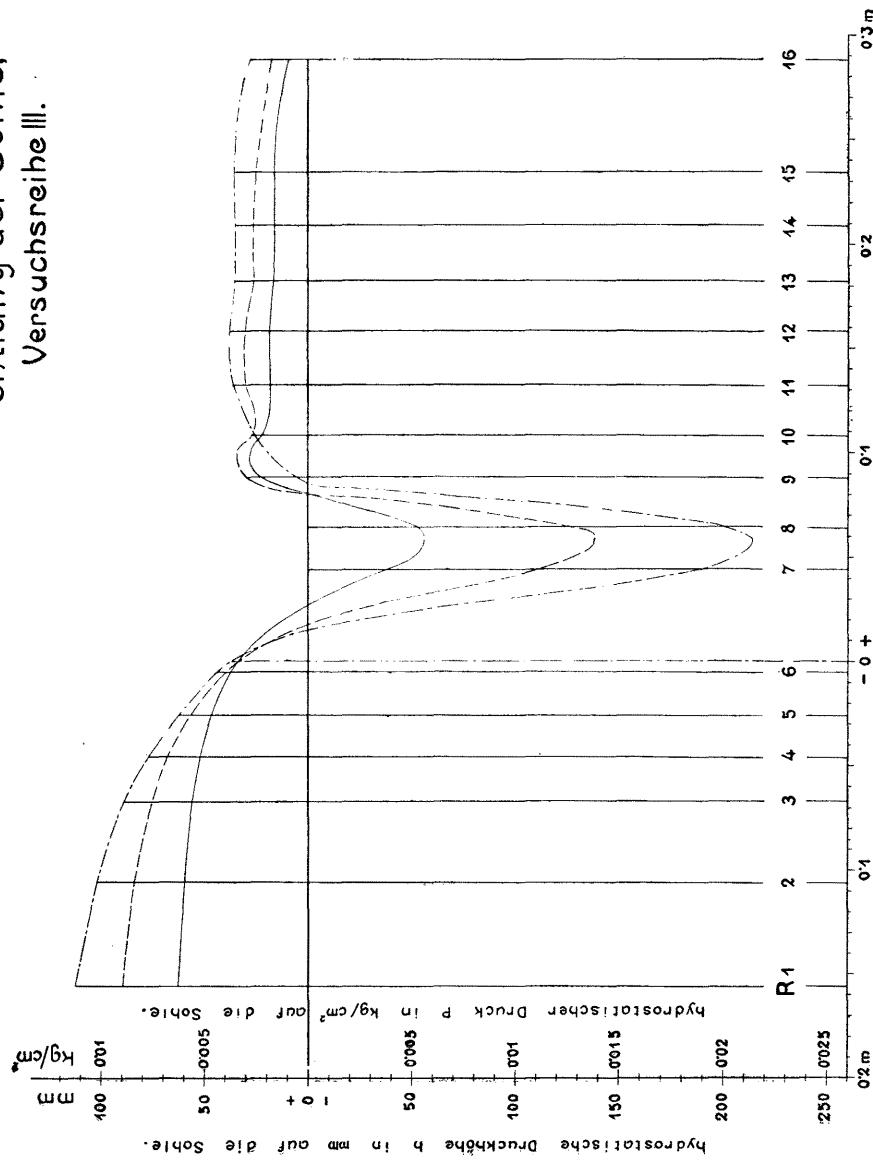


Abb. 37. Verlauf d. Wasserdrücke
entlang der Sohle,
Versuchsreihe IV.

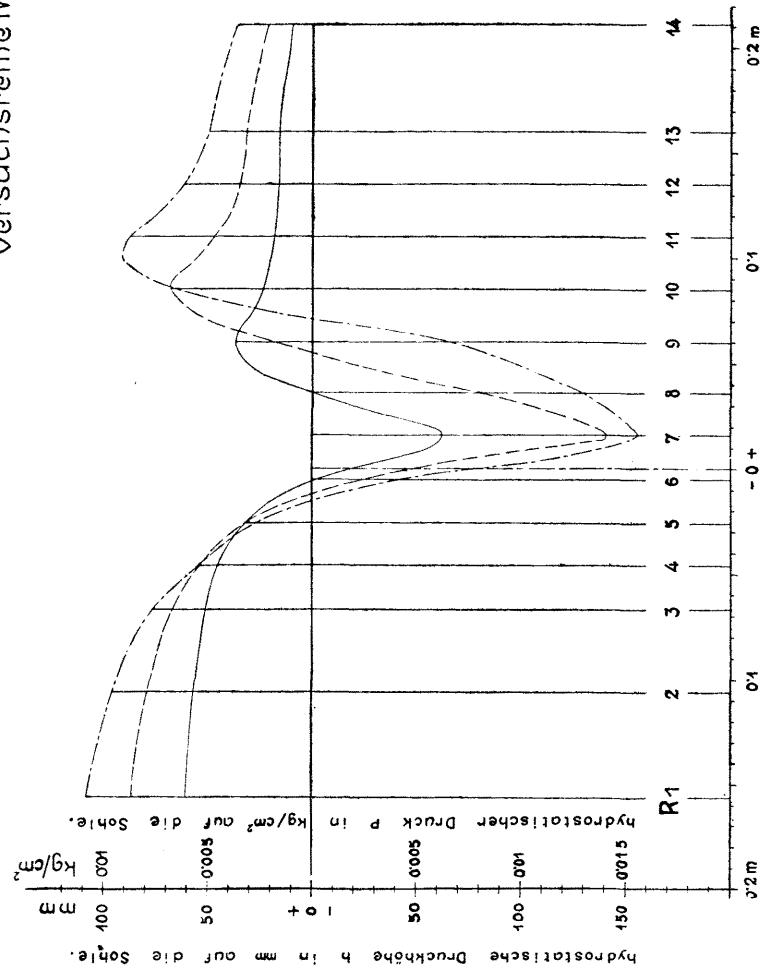


Abb. 38. Verlauf d. Wasserdrücke entlang der Sohle, Versuchsreihe V.

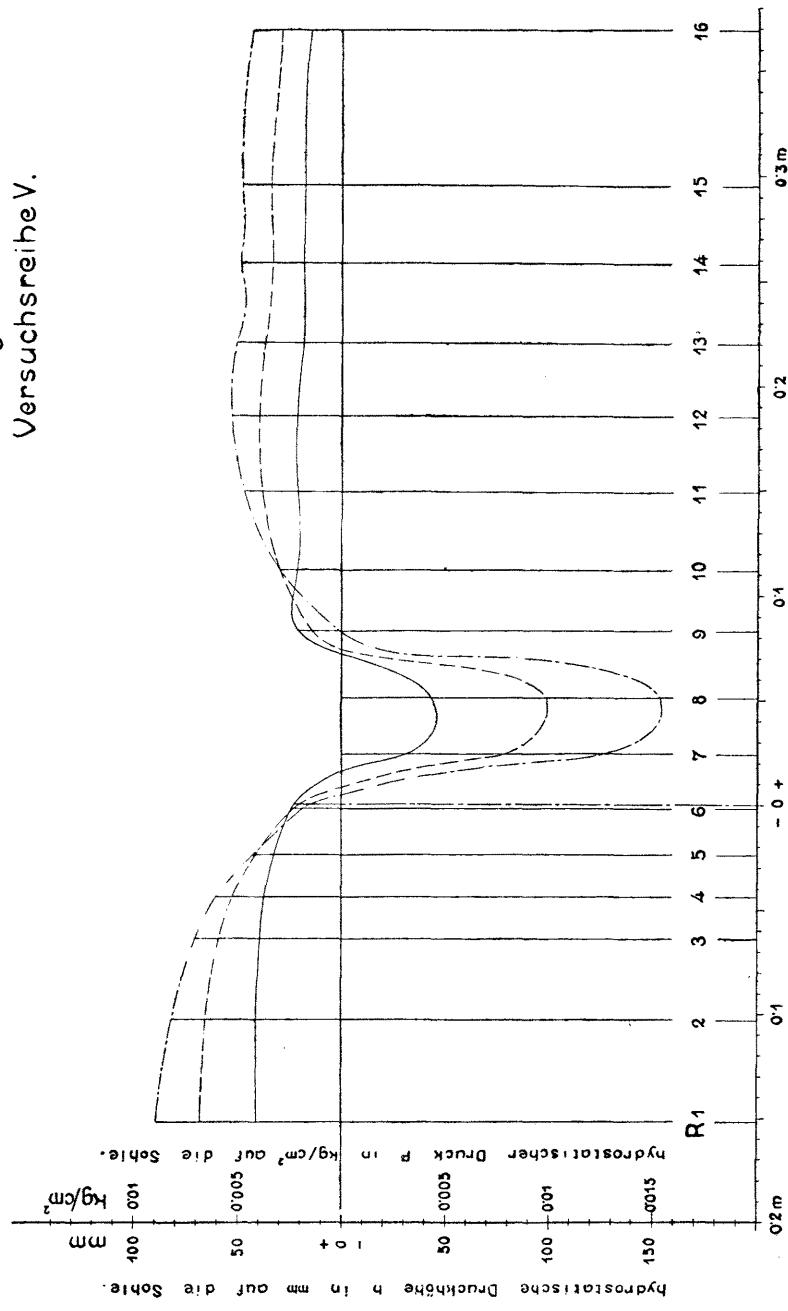


Abb.39. Verlauf d. Wasserdrücke entlang der Sohle, Versuchsreihe VI.

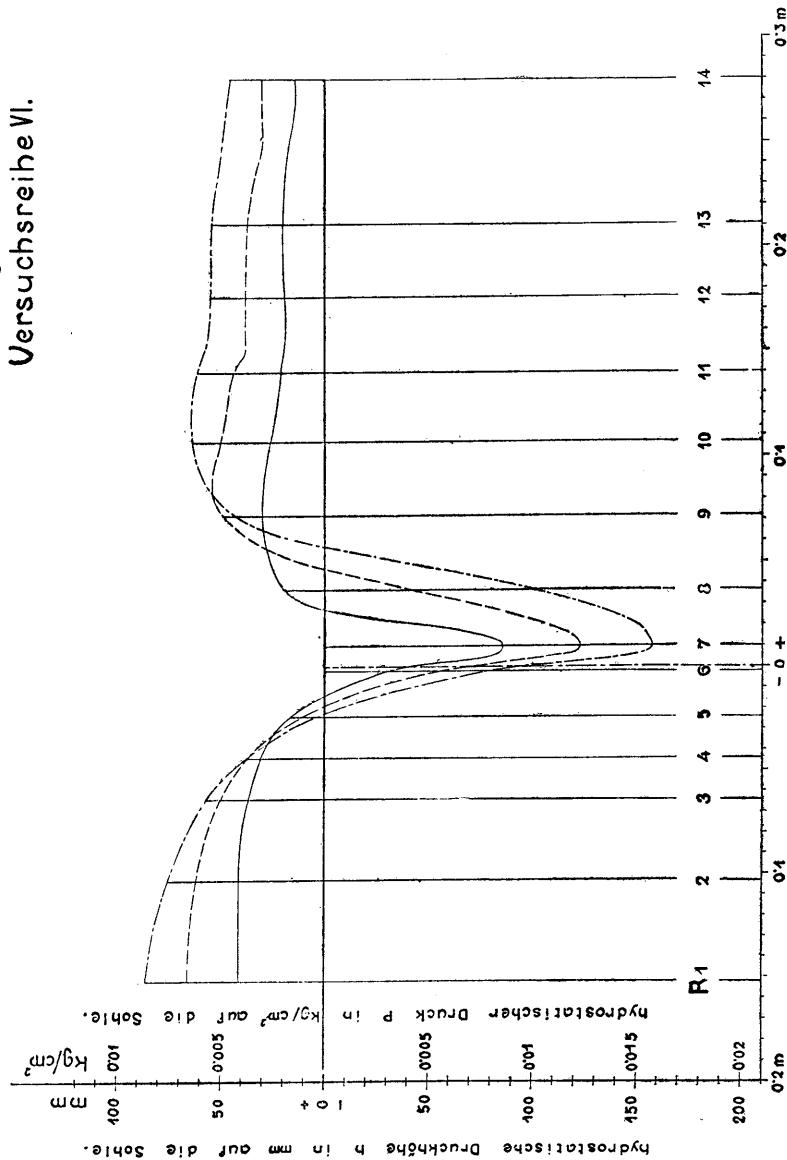


Abb. 40. Verlauf d. Wasserdrücke entlang der Sohle;
Versuchsreihe VII.

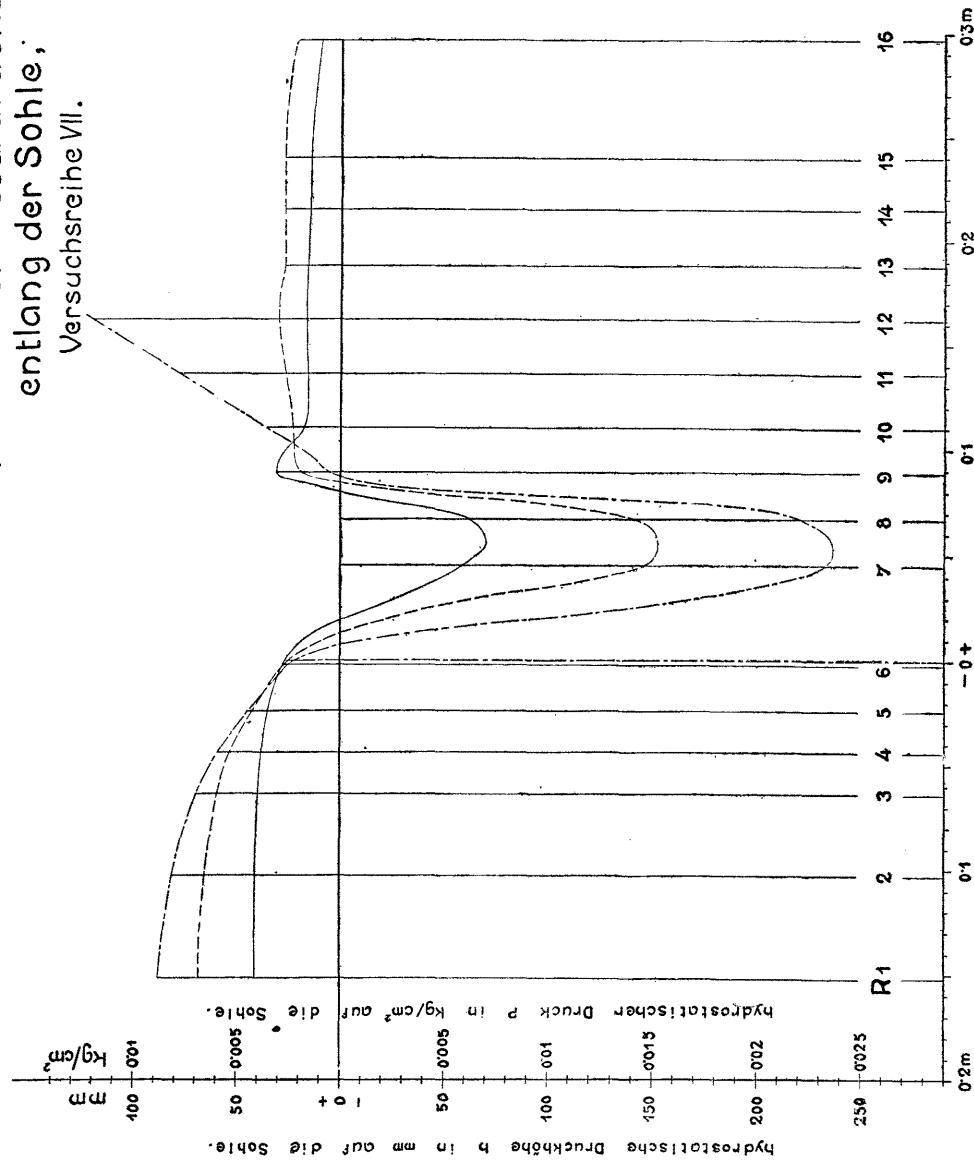
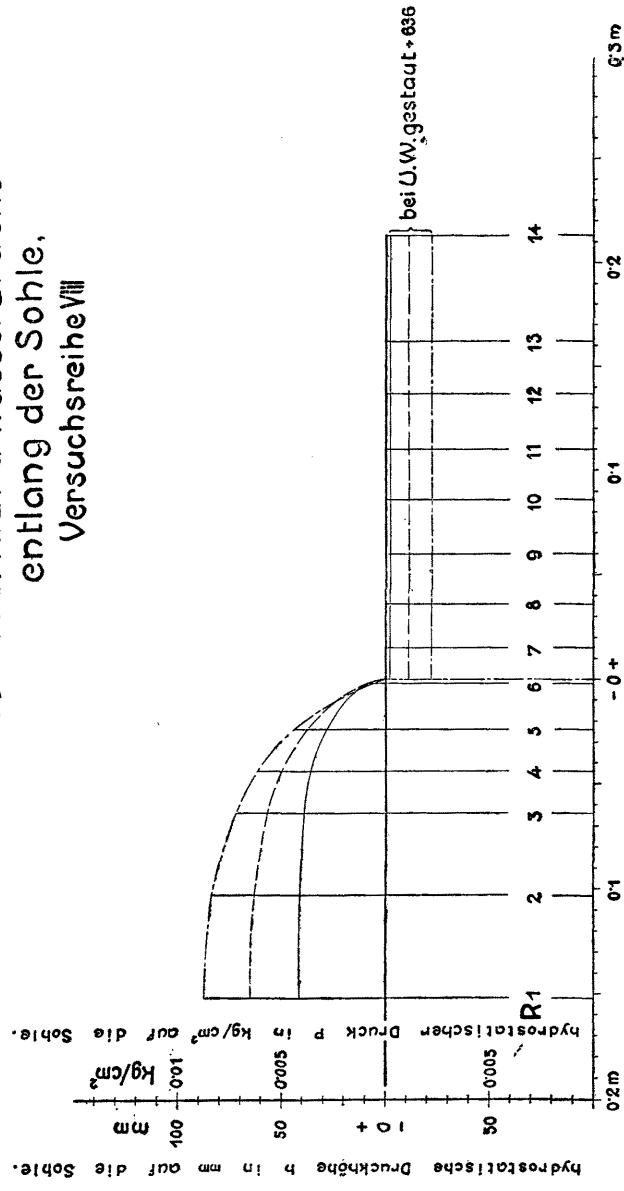


Abb:4.1. Verlauf d. Wasserdrücke
entlang der Sohle,
Versuchsreihe VIII



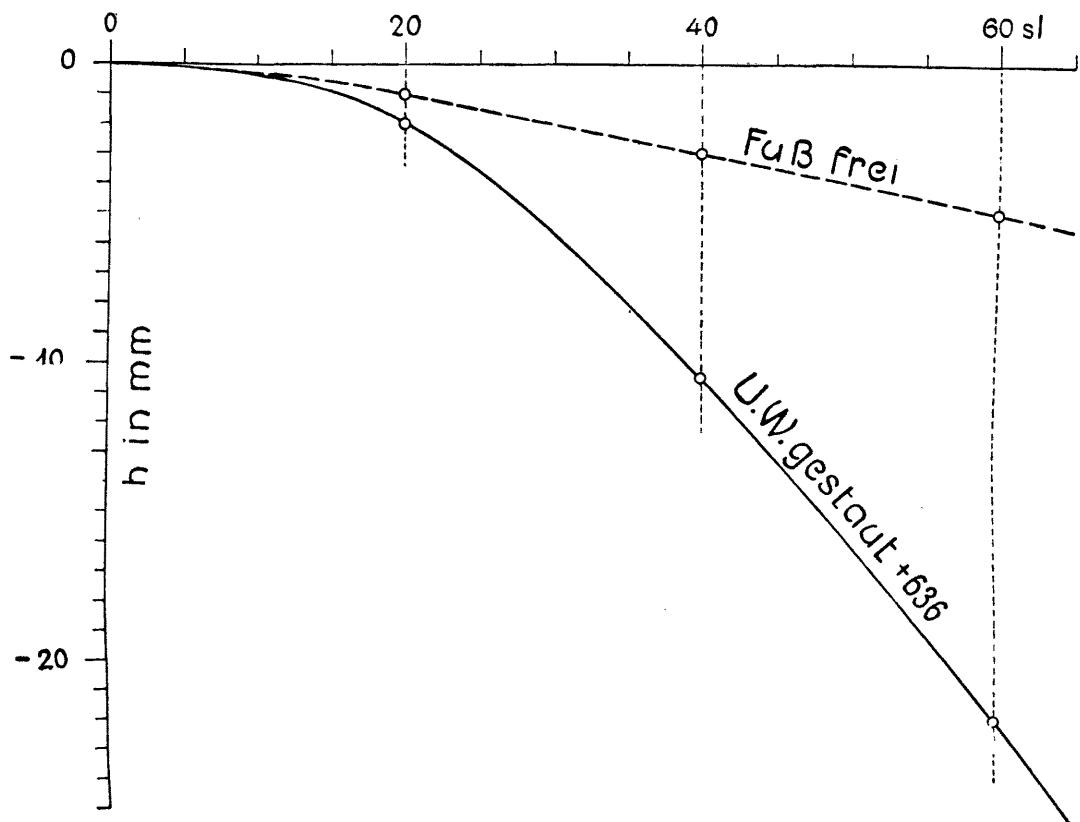
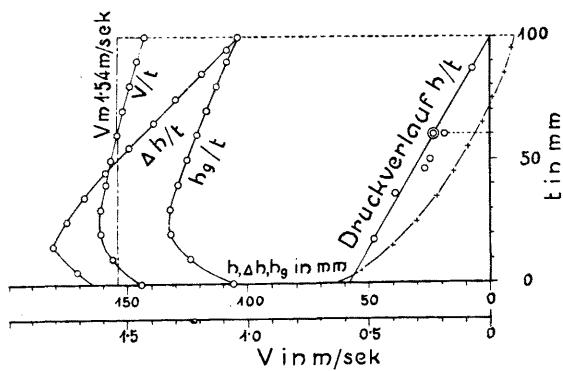


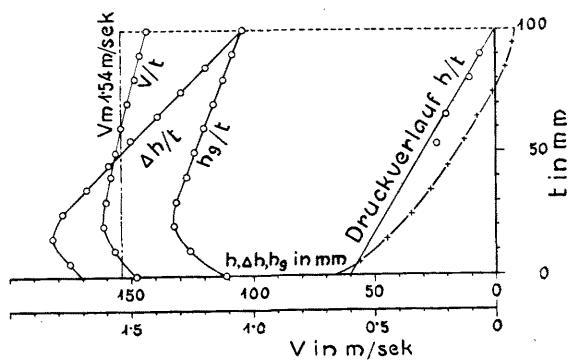
Abb. 42. Unterdrücke h im Zwischenraum zwischen Wehrstücken und Wasserstrahl; Versuchsreihe VIII.



↙ Druckverlauf bei Düse parallel zu den Stromfadén.

↖ Druckverlauf bei Düse parallel zur Sohle.

Abb. 43. Druck- und Geschwindigkeitsmessung mit Hilfe der Pitotröhre im Profil -0.026 m (R 5), Versuchsreihe I, $Q = 60$ l/sec.



↙ Druckverlauf bei Düse parallel zu den Stromfadén.

↖ Druckverlauf bei Düse parallel zur Sohle.

Abb. 44. Druck- und Geschwindigkeitsmessung mit Hilfe der Pitotröhre im Profil -0.046 m (R 4), Versuchsreihe II, $Q = 60$ l/sec.

Abb: 45. Linien gleicher Drücke.

Versuchsreihe I.

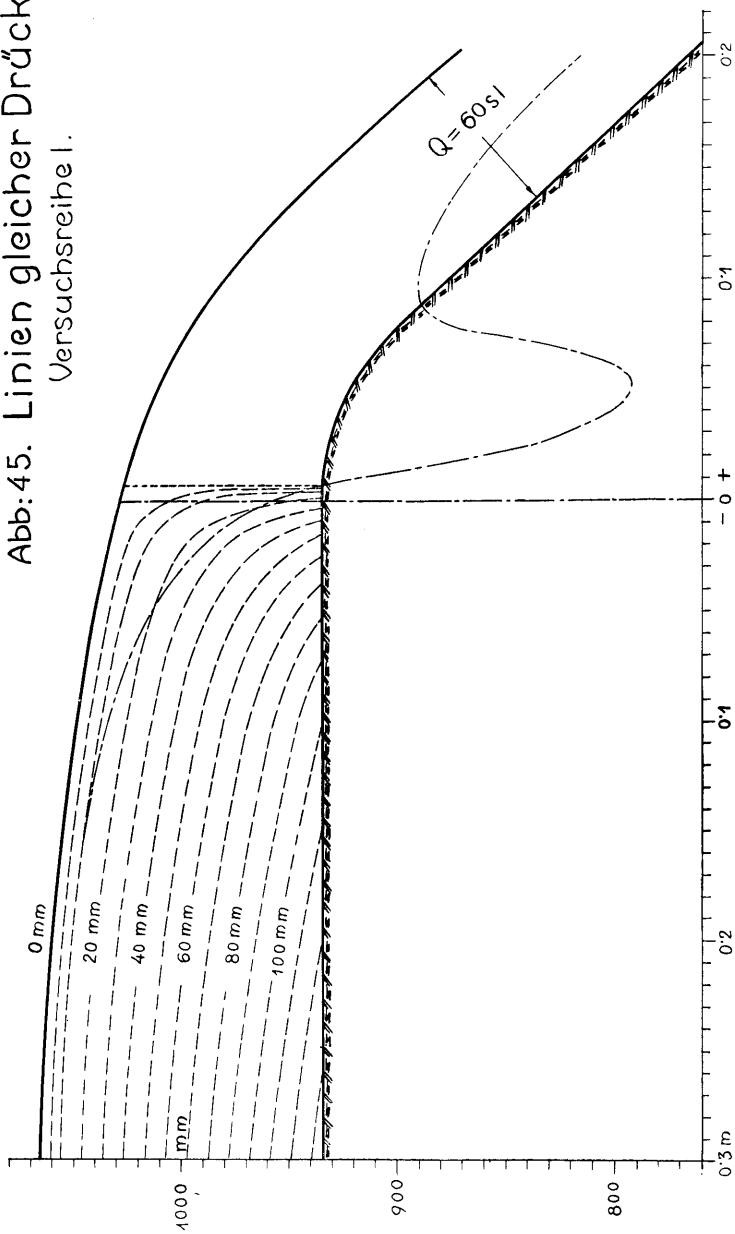


Abb. 46. Linien gleicher Drücke.
Versuchsreihe II.

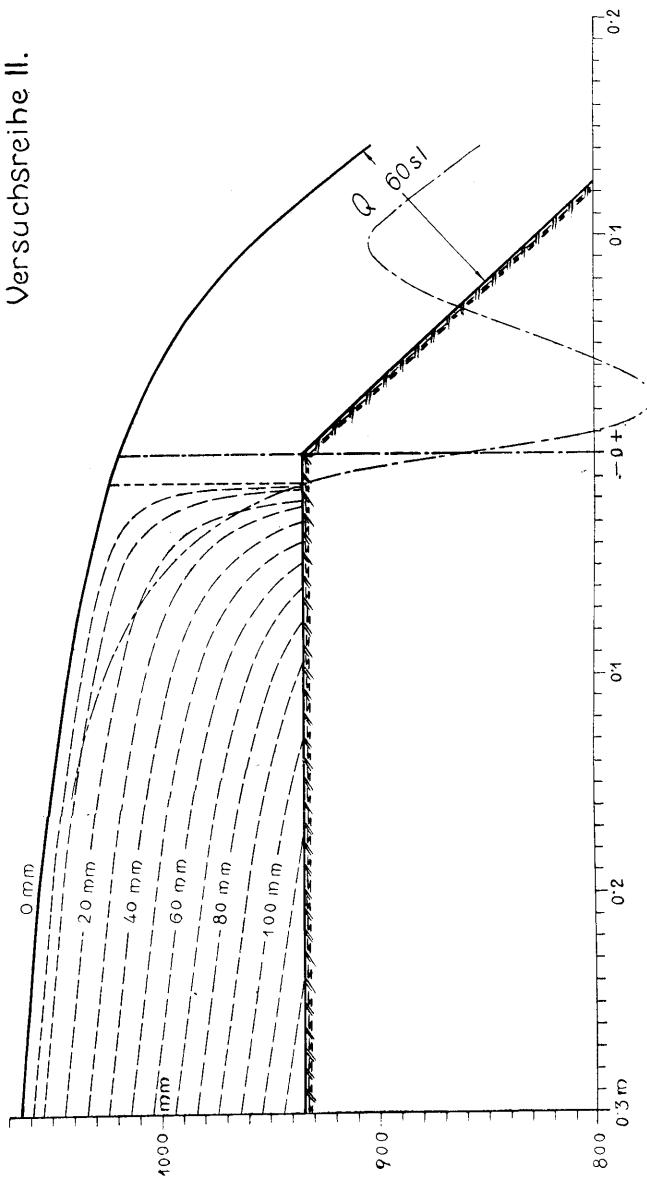


Abb: 47. Linien gleicher Drücke.

Versuchsreihe III.

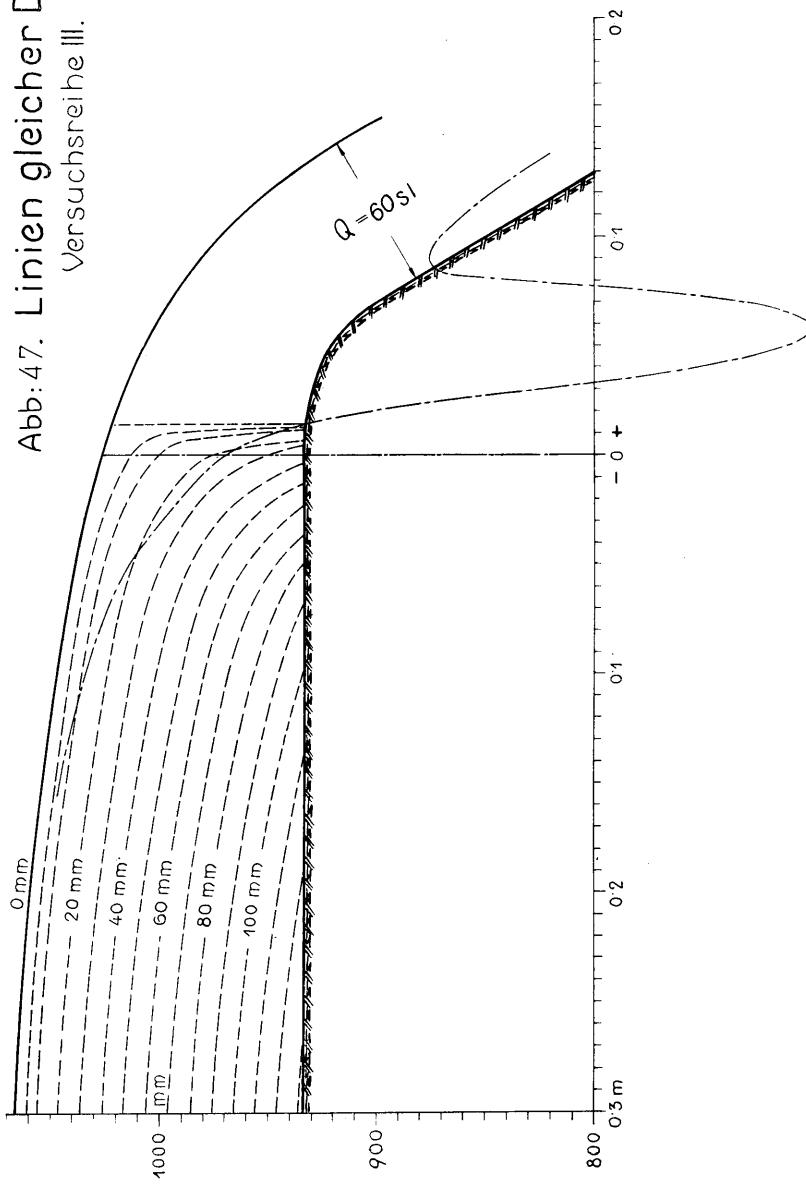


Abb. 48. Linien gleicher Drücke.
Versuchsreihe IV.

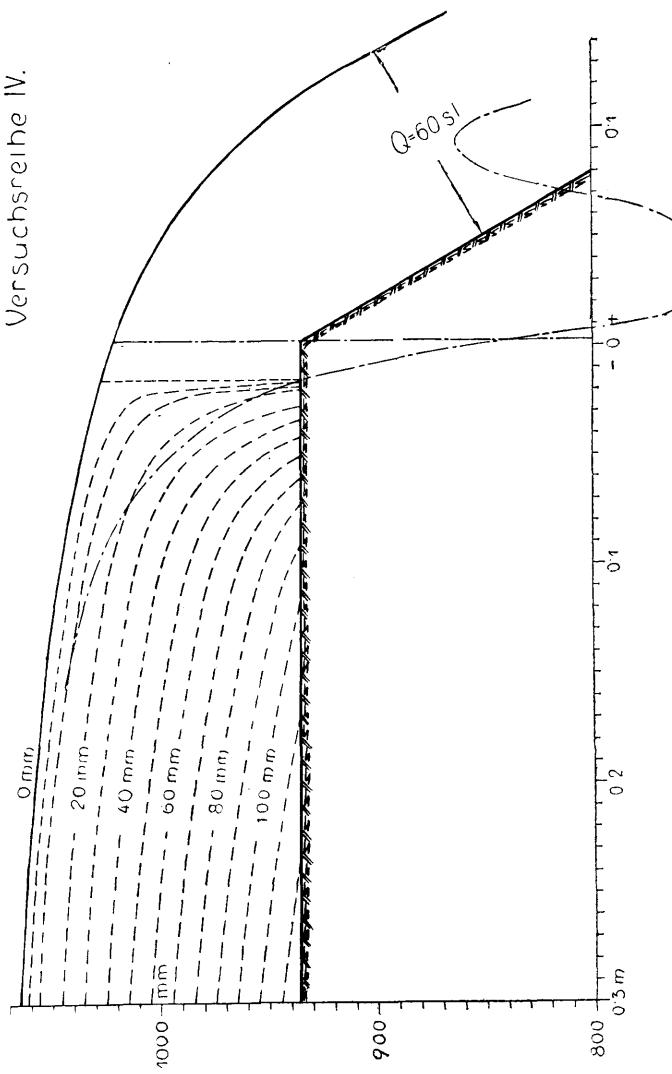


Abb: 49. Linien gleicher Drücke.
Versuchsreihe V.

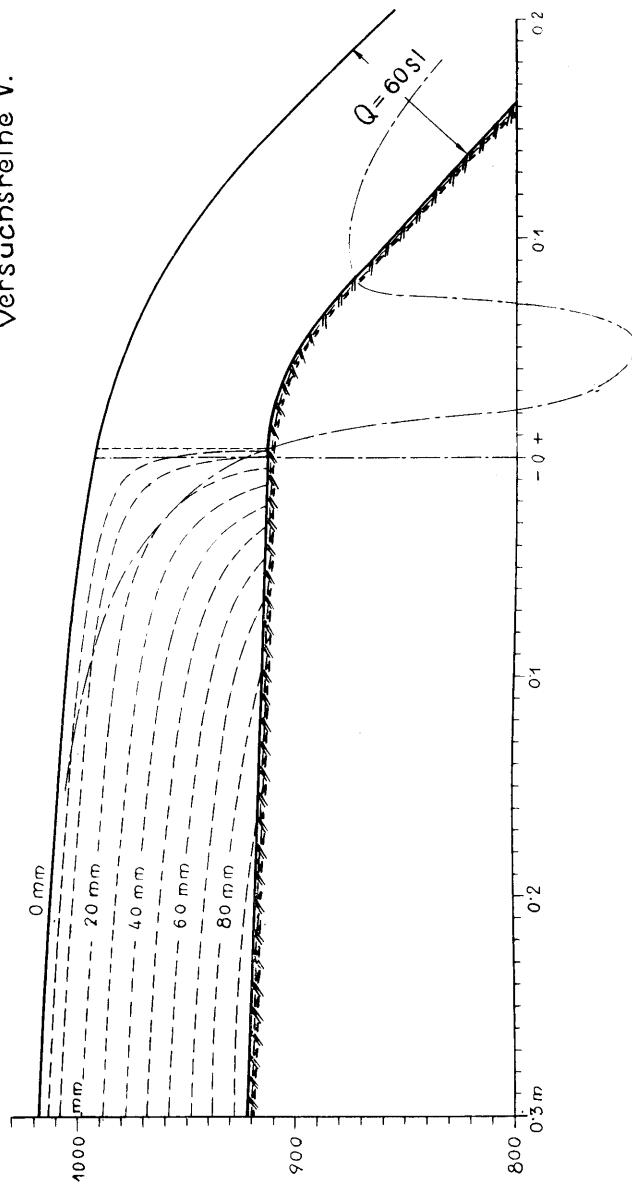


Abb. 50. Linien gleicher Drücke.
Versuchsreihe VI.

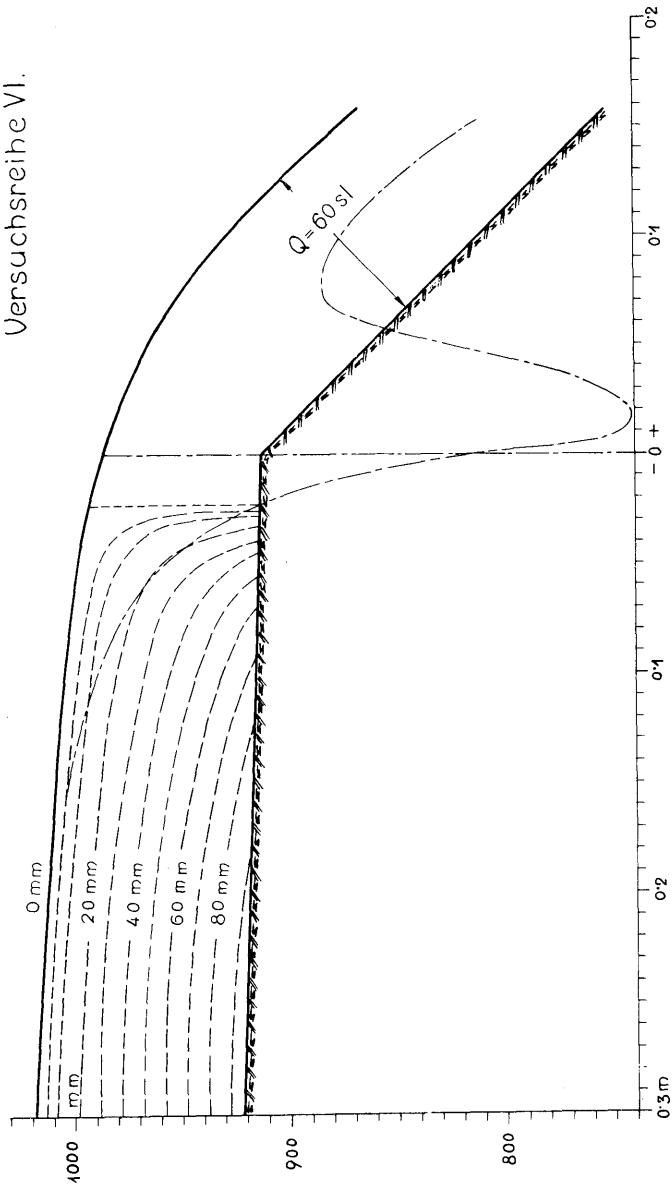


Abb. 51. Linien gleicher Drücke.
Versuchsreihe VII.

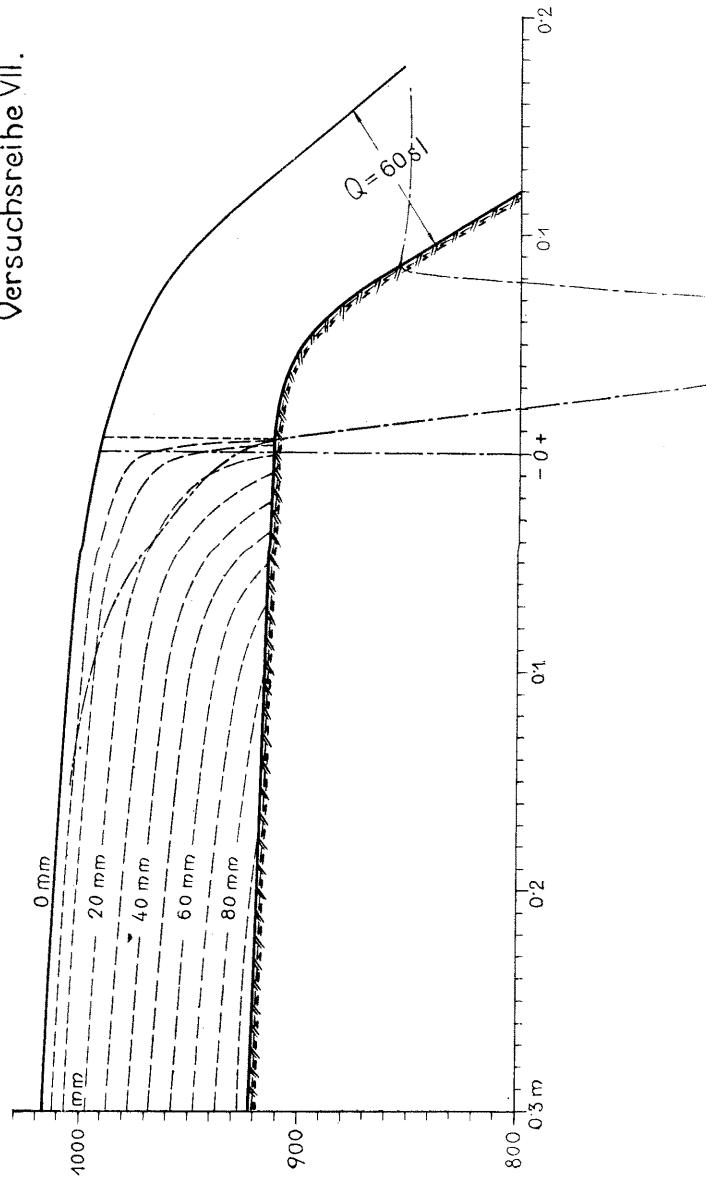
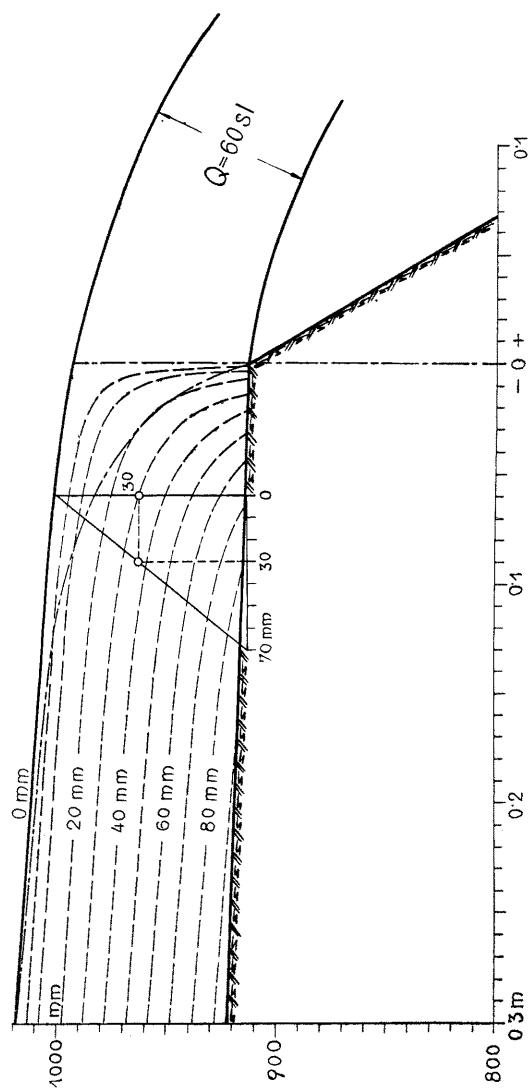


Abb:52. Linien gleicher Drücke.
Versuchsreihe VIII.



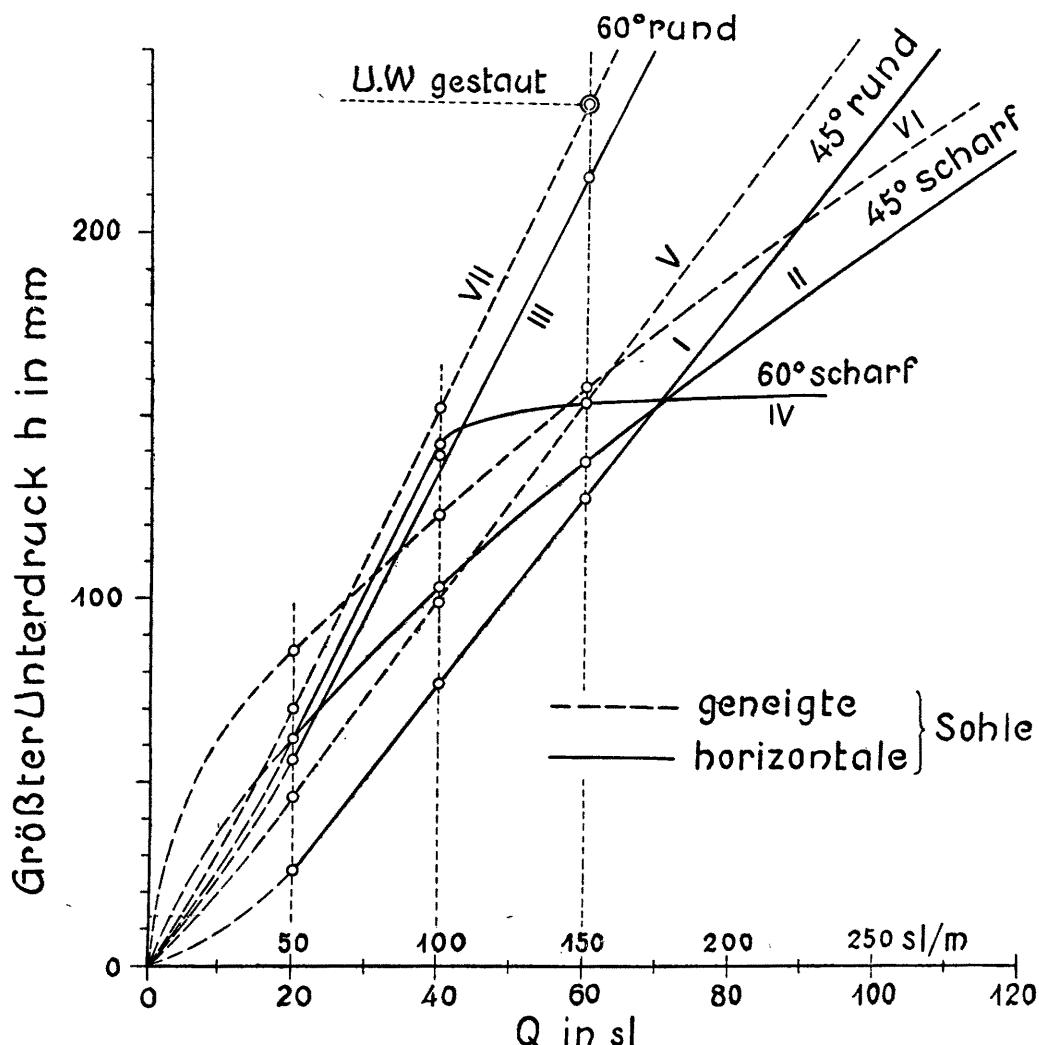


Abb. 53. Beziehung zwischen den maximalen Unterdrücken (nächst Wehrkrone) und den sekundlichen Wassermengen.