九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

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：

KYUSHU UNIVERSITY

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

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE VERTEILUNG DER HYDROSTATISCHEN 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 Aehnlichkeitsgesetzes.
9. Zusammenfassung.
Literatur.
Tabellen.
Abbildungen.

1. 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 (Wehrrücken) 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 Wasserfäden nicht plötzlich aus ihrer Richtung abgelenkt werden können. Der Strahl hebt sich vielmehr infolge seines Beharrungsvermögens vom Wehrkörper ab, um sich erst weiter unterhalb wieder auf den Abschußboden 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 Abschußbodens 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 Flußsohle 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. Hiebei unterscheidet REHBOCK nach den auftretenden Strahlformen folgende drei Gruppen:

a) Ueberfall mit freiem Strahl,
b) Ueberfall mit gewelltem Strahl,
c) Ueberfall mit angeschmiegtem 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 gelüftete Strahl, bei dem die Luft zwischen Strahl und Wehrrücken die Spannung der Außenluft besitzt,
2.) der gesenkte 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 fehlender 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 Wehrrücken 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 Aenderung der Richtung der Wasserfäden verhindert. Der Strahl fällt indessen nicht frei zur Unterwasserrinne hinunter, sondern wird durch den Ueberdruck der Außenluft zum Wehrrücken zurückgebogen, wobei er sich tangentiell 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 verschotterte Wehre zugrundegelegt.

Aus Gründen der besseren Vergleichsmöglichkeit weisen die Wehrrücken der Modelle in inren Längenschnitten einen geradlinigen Verlauf auf. Die Neigung der Wehrrücken gegen die Horizontale betrug rund $\alpha = 45°$ und $60°$. Die Ueberfallkante war sowohl als scharfe Kante, als auch mit einem eingelegten Kreisbogen ($r \doteq 100$ 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.	$J = 0\,‰$				$J = 34\,‰$			
Neigungswinkel des Wehrrückens	$\alpha = 45°$		$\alpha = 60°$		$\alpha = 45°$		$\alpha = 60°$	
Ausbildung der Ueberfallkante	rund	scharf	rund	scharf	rund	scharf	rund	scharf
Versuchsreihe Nr.	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/sek 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 1 m 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 Spiegelglastafeln 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 Wehrrücken 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 Kupferröhrchen mit einem lichten Durchmesser von 5 mm gesteckt, deren obere Mündungsöffnungen genau in der Ebene der Sohle, bezw. des Wehrrückens ("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 des Holz "flüchtig" eingelassen und mit seitwärts angeordneten Schrauben mit versenkten Köpfen an die Sohle, bezw. den Wehrrücken dicht niedergeschraubt. Dieser Messingstreifen erhielt entsprechend der Austeilung der früher erwähnten Kupfer- (Piezometer-) röhrchen Löcher, in welche die oberen Enden dieser Röhrchen eingelötet und genau abgefeilt waren (Abbildung 2). Diese Vorsicht schien deshalb geboten, weil bei den entlang des Wehrrückens auftretenden großen Geschwindigkeiten die geringste Unebenheit in der Sohle (z. B. Hervorragen der Röhrchenenden oder ausgefranster Rand der Mündungen der Piezometerröhrchen) unliebsame störende Saug- oder Druckwirkungen zur Folge haben könnte, wie dies auch tatsächlich die Vorversuche zeigten, bei welchen die Kupferröhrchen einfach durch die in der Holzwand (Wehrrücken) vorgebohrten Löcher hindurchgesteckt und mit der Ebene der Sohle dem Augenmaß nach "flüchtig" eingestellt wurden. Von den insgesamt 14-16 Röhrchen lagen 6 stromaufwärts der Ueberfallkante, während die übrigen 8 bezw. 10 entlang des Wehrrückens, anschließend an die Wehrkrone ausgeteilt waren. An die unteren Enden der Röhrchen 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 äußeren Enden der Kupferröhrchen waren zur Vermeidung von Irrtümern mit Nummertafeln versehen, die den Piezometerröhrchen in der Sohle (Wehrrücken) entsprachen und mit Holzpfropfen 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 R1 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 ersehen 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 cm^2), 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 Ableseglasrohres 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

Luftbläschen fortgerissen wurden. In der ebengeschilderten Weise wurden die den 14-16 Oeffnungen in der Sohle (Wehrrücken) 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 vertikel 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, Zahnrad und Zahnstange in einem derartigen Uebersetzungsverhältnis 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, bezw. 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 Wehrrückens hinderlich. Diese tritt nach den Untersuchungen von EHRENBERGER nach Ueberschreiten 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 Wehrrückens erkennen.

Auf die Erscheinung des obenangeführten, stark gefurchten Wasserspiegels bei angeschmiegtem 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 Faltenwurfes" (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 ankommenden 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 $\omega = \sqrt{g.t}$ und der mittleren Profilgeschwindigkeit $v_m = \frac{Q}{F} = \frac{Q}{b.t}$ erhält man

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

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

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

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

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/sek durchgeführt. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Gerinnebreite von b = 0.402 m berechnen sich die Grenztiefen nach der oben abgeleiteten Formel (1)

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

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 schießenden Fließzustand befand. Hiebei 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 Wehrrückens, 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 Wehrrückens 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 Versuchsreihe I. Sohle horizontal, Kante rund, $\alpha = 45°$.

Profil m	Rohr Nr.	Sohle z mm	Q = 20 l/sek Wasserspiegel mm	Piezometerstand H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H − z mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm³	hydrostatischer Druck P = f.h.γ kg/cm²	Q = 40 l/sek Wasserspiegel mm	Piezometerstand H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H − z mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm³	hydrostatischer Druck P = f.h.γ kg/cm²	Q = 60 l/sek Wasserspiegel mm	Piezometerstand H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H − z mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm³	hydrostatischer Druck P = f.h.γ kg/cm²
−0.700		934	1008					1049					1066.5				
−0.300		934	1002					1035					1066				
−0.200		934	999.5					1030					1059				
−0.156	1	934	998.8	995	61	0.001	0.0061	1028	1023	89	0.001	0.0089	1054.5	1046	112	0.001	0.0112
−0.106	2	934	993.8	992	58	0.001	0.0058	1025	1018	84	0.001	0.0084	1048.5	1036	102	0.001	0.0102
−0.067	3	934	991.7	988	54	0.001	0.0054	1020.5	1009	75	0.001	0.0075	1041.4	1022	88	0.001	0.0088
−0.046	4	934	989.5	985	51	0.001	0.0051	1018	1003	69	0.001	0.0069	1038	1012	78	0.001	0.0078
−0.026	5	934	987	979	45	0.001	0.0045	1015	991	57	0.001	0.0057	1034.7	995	61	0.001	0.0061
−0.005	6	934	984	970	36	0.001	0.0036	1010	970	36	0.001	0.0036	1029	971	37	0.001	0.0037
+0.022	7	932.2	977	928	− 4.2	0.001	−0.00042	1002.5	892	−40.2	0.001	−0.00402	1022	852	− 80.2	0.001	−0.00802
+0.052	8	920	965	895	−25	0.001	−0.0025	989	843	−77	0.001	−0.0077	1009	792	−128	0.001	−0.0128
+0.085	9	891.8	942	898	6.2	0.001	0.00062	970.5	886	− 5.8	0.001	−0.00058	990.5	887	− 4.8	0.001	−0.00048
+0.111	10	863.7	915	883	19.3	0.001	0.00193	947	888	24.3	0.001	0.00243	971.7	886	22.3	0.001	0.00223
+0.145	11	827.3	868	849	21.7	0.001	0.00217	912	863	35.7	0.001	0.00357	939	870	42.7	0.001	0.00427
+0.179	12	791	832.5	812	21	0.001	0.0021	869	829	38	0.001	0.0038	898	840	49	0.001	0.0049
+0.212	13	755.4	793	774	18.6	0.001	0.00186	829	789	33.6	0.001	0.00336	860	802	46.6	0.001	0.00466
+0.246	14	718	753	736.5	18.5	0.001	0.00185	788	751	33	0.001	0.0033	813	763	45	0.001	0.0045
+0.280	15	682.3	714	701	18.7	0.001	0.00187	746	715	32.7	0.001	0.00327	775.6	728	45.7	0.001	0.00457
+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	0.001	0.00376

Tabelle III. Beobachtungsergebnisse der Versuchsreihe II. Sohle horizontal, Kante scharf, $\alpha = 45°$.

Profil	Rohr Nr.	Sohle	Q = 20 l/sek					Q = 40 l/sek					Q = 60 l/sek				
		z	Wasserspiegel	Piezometer-stand $H = z + h$	hydrostatische Druckhöhe $h = H - z$	spez. Gewicht des Wassers γ	hydrostatischer Druck $P = f.h.\gamma$	Wasserspiegel	Piezometer-stand $H = z + h$	hydrostatische Druckhöhe $h = H - z$	spez. gewicht des Wassers γ	hydrostatischer Druck $P = f.h.\gamma$	Wasserspiegel	Piezometer-stand $H = z + h$	hydrostatische Druckhöhe $h = H - z$	spez. Gewicht des Wassers γ	hydrostatischer Druck $P = f.h.\gamma$
m		mm	mm	mm	mm	kg/cm³	kg/cm²	mm	mm	mm	kg/cm³	kg/cm²	mm	mm	mm	kg/cm³	kg/cm²
−0.700		934	1007					1048					1067				
−0.300		934	999.4					1034					1064				
−0.200		934	997.2					1028					1056				
−0.156	1	934	995.2	993	59	0.001	0.0059	1026	1019	85	0.001	0.0085	1051	1041	107	0.001	0.0107
−0.106	2	934	992	988	54	0.001	0.0054	1022	1012	78	0.001	0.0078	1043	1029	95	0.001	0.0095
−0.067	3	934	988.5	983	49	0.001	0.0049	1017	1000	66	0.001	0.0066	1037	1009	75	0.001	0.0075
−0.046	4	934	986	976	42	0.001	0.0042	1014.8	988	54	0.001	0.0054	1032.5	992	58	0.001	0.0058
−0.026	5	934	982	964	30	0.001	0.0030	1008.7	967	33	0.001	0.0033	1027	963	29	0.001	0.0029
−0.005	6	934	977	932	− 2	0.001	−0.0002	1002.8	916	−18	0.001	−0.0018	1021	898	− 36	0.001	−0.0036
+0.010	7	925.5	972	869	−56.5	0.001	−0.00565	997	832	−93.5	0.001	−0.00935	1015	798	−127.5	0.001	−0.01275
+0.038	8	895.7	955.8	904	8.3	0.001	0.00083	984	830	−65.7	0.001	−0.00657	1002	789	−106.7	0.001	−0.01067
+0.070	9	859.2	918.5	893	33.8	0.001	0.00338	955	907	47.8	0.001	0.00478	982	871	11.8	0.001	0.00118
+0.103	10	823	870	847	24	0.001	0.0024	922	881	58	0.001	0.0058	950	901	78	0.001	0.0078
+0.139	11	786.7	827.5	807	20.3	0.001	0.00203	871	828	41.3	0.001	0.00413	904	856	69.3	0.001	0.00693
+0.171	12	749.8	788	769	19.2	0.001	0.00192	824	787	37.2	0.001	0.00372	857	807	57.2	0.001	0.00572
+0.205	13	714	749	733	19	0.001	0.0019	781	748	34	0.001	0.0034	808	764	50	0.001	0.0050
+0.272	14	640.6	671	652	11.4	0.001	0.00114	704	666	25.4	0.001	0.00254	729	679	38.4	0.001	0.00384

Tabelle IV. Beobachtungsergebnisse der Versuchsreihe III. Sohle horizontal, Kante rund, $\alpha = 60°$.

Profil m	Rohr Nr.	Sohle z mm	Q = 20 l/sek Wasserspiegel mm	Piezometerstand H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H − z mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm³	hydrostatischer Druck P = f.h.γ kg/cm²	Q = 40 l/sek Wasserspiegel mm	Piezometerstand H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H − z mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm³	hydrostatischer Druck P = f.h.γ kg/cm²	Q = 60 l/sek Wasserspiegel mm	Piezometerstand H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H − z mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm³	hydrostatischer Druck P = f.h.γ kg/cm²
−0.700		934.5	1009.5					1048.4					1067				
−0.300		934.5	1001.5					1034.5					1066				
−0.200		934.5	1000					1030					1059.5				
−0.156	1	934.5	997.4	997	62.5	0.001	0.00625	1028	1024	89.5	0.001	0.00895	1055	1047	112.5	0.001	0.01125
−0.106	2	934	994.4	993	59	0.001	0.0059	1024	1018	84	0.001	0.0084	1047	1036	102	0.001	0.0102
−0.067	3	934	992	990	56	0.001	0.0056	1020.5	1009	75	0.001	0.0075	1042	1023	89	0.001	0.0089
−0.046	4	934	990	986	52	0.001	0.0052	1016.2	1002	68	0.001	0.0068	1038	1011	77	0.001	0.0077
−0.026	5	934	987.5	980	46	0.001	0.0046	1013.5	990	56	0.001	0.0056	1034.5	996	62	0.001	0.0062
−0.005	6	934	984.3	971	37	0.001	0.0037	1009	973	39	0.001	0.0039	1029.3	978	44	0.001	0.0044
+0.044	7	926	968	888	−38	0.001	−0.0038	991	815	−111	0.001	−0.0111	1010	737	−189	0.001	−0.0189
+0.064	8	910	955	857	−53	0.001	−0.0053	979.5	782	−128	0.001	−0.0128	999.8	708	−202	0.001	−0.0202
+0.088	9	871	932	893	22	0.001	0.0022	963	900	29	0.001	0.0029	983	876	5	0.001	0.0005
+0.108	10	836.5	898.5	858	21.5	0.001	0.00215	936.5	863	26.5	0.001	0.00265	965	862	25.5	0.001	0.00255
+0.132	11	794	852	812	18	0.001	0.0018	898.2	824	30	0.001	0.0030	934.4	830	36	0.001	0.0036
+0.158	12	751.7	800	770	18.3	0.001	0.00183	853	782	30.3	0.001	0.00303	893	790	38.3	0.001	0.00383
+0.182	13	709.4	757.5	726	16.6	0.001	0.00166	800	736	26.6	0.001	0.00266	844	745	35.6	0.001	0.00356
+0.209	14	666	712	682	16	0.001	0.0016	752	692	26	0.001	0.0026	798	701	35	0.001	0.0035
+0.234	15	624	664	640	16	0.001	0.0016	708.4	649	25	0.001	0.0025	747	659	35	0.001	0.0035
+0.288	16	538.4	575	647	8.6	0.001	0.00086	610.5	556	17.6	0.001	0.00176	646	566	27.6	0.001	0.00276

Tabelle V. Beobachtungsergebnisse der Versuchsreihe IV. Sohle horizontal, Kante scharf, $\alpha = 60^0$.

Profil	Rohr Nr.	Sohle	Q = 20 l/sek					Q = 40 l/sek					Q = 60 l/sek				
			Wasserspiegel	Piezometerstand	hydrostatische Druckhöhe	spez. Gewicht des Wassers	hydrostatischer Druck	Wasserspiegel	Piezometerstand	hydrostatische Druckhöhe	spez. Gewicht des Wassers	hydrostatischer Druck	Wasserspiegel	Piezometerstand	hydrostatische Druckhöhe	spez. Gewicht des Wassers	hydrostatischer Druck
				$H = z + h$	$h = H - z$	γ	$P = f.h.\gamma$		$H = z + h$	$h = H - z$	γ	$P = f.h.\gamma$		$H = z + h$	$h = H - z$	γ	$P = f.h.\gamma$
m		z mm	mm	mm	mm	kg/cm³	kg/cm²	mm	mm	mm	kg/cm³	kg/cm²	mm	mm	mm	kg/cm³	kg/cm²
−0.700			1009					1047.5					1067				
−0.300		936	999.5					1037.8					1065				
−0.200			998					1028					1057				
−0.156	1	934.5	995.8	995	60.5	0.001	0.00605	1025	1021	86.5	0.001	0.00865	1053	1043	108.5	0.001	0.01085
−0.106	2	934	992.2	991	57	0.001	0.0057	1021	1013	79	0.001	0.0079	1045	1030	96	0.001	0.0096
−0.067	3	934	989	985	51	0.001	0.0051	1015.6	1001	67	0.001	0.0067	1038	1011	77	0.001	0.0077
−0.046	4	934	986	979	45	0.001	0.0045	1011	988	54	0.001	0.0054	1033.5	988	54	0.001	0.0054
−0.026	5	934	983	966	32	0.001	0.0032	1007	966	32	0.001	0.0032	1028	961	27	0.001	0.0027
−0.005	6	934	977	931	− 3	0.001	−0.0003	1000.5	910	− 24	0.001	−00.024	1022	891	− 43	0.001	−0.0043
+0.016	7	911.4	969	849	−62.4	0.001	−0.00624	993	770	−141.4	0.001	−0.01414	1013.5	756	−155.4	0.001	−0.01554
+0.036	8	877	954.5	877	0	0.001	0.0000	982	797	− 80	0.001	−0.0080	1004	748	− 129	0.001	−0.0129
+0.060	9	834	924	871	37	0.001	0.0037	964	852	18	0.001	0.0018	989	767	− 67	0.001	−0.0067
+0.085	10	790	868	814	24	0.001	0.0024	934	858	68	0.001	0.0068	970.6	857	67	0.001	0.0067
+0.110	11	747.5	803	766	18.5	0.001	0.00185	889	795	47.5	0.001	0.00475	938	836	88.5	0.001	0.00885
+0.135	12	705	756	721	16	0.001	0.0016	804	740	35	0.001	0.0035	902	767	62	0.001	0.0062
+0.160	13	662	706.5	678	16	0.001	0.0016	749	694	32	0.001	0.0032	846	712	50	0.001	0.0050
+0.211	14	575.7	619	585	9.3	0.001	0.00093	653	597	21.3	0.001	0.00213	753	612	36.3	0.001	0.00363

Tabelle VI. Beobachtungsergebnisse der Versuchsreihe V. Sohle geneigt, Kante rund, $\alpha = 45°$.

Profil	Rohr Nr.	Sohle	Q = 20 l/sek					Q = 40 l/sek					Q = 60 l/sek				
			Wasserspiegel	Piezometerstand	hydrostatische Druckhöhe	spez. Gewicht des Wassers	hydrostatischer Druck	Wasserspiegel	Piezometerstand	hydrostatische Druckhöhe	spez. Gewicht des Wassers	hydrostatischer Druck	Wasserspiegel	Piezometerstand	hydrostatische Druckhöhe	spez. Gewicht des Wassers	hydrostatischer Druck
		z		$H = z + h$	$h = H - z$	γ	$P = f.h.\gamma$		$H = z + h$	$h = H - z$	γ	$P = f.h.\gamma$		$H = z + h$	$h = H - z$	γ	$P = f.h.\gamma$
m		mm	mm	mm	mm	kg/cm³	kg/cm²	mm	mm	mm	kg/cm³	kg/cm²	mm	mm	mm	kg/cm³	kg/cm²
−0.700		933.4	977.6					1009					1035				
−0.300		922.4	963					993					1018.5				
−0.200		919.4	959					988.6					1012.5				
−0.152	1	917.2	957.7	958	40.8	0.001	0.00408	987	985	67.8	0.001	0.00678	1010	1006	88.8	0.001	0.00888
−0.103	2	915.4	956.5	956	40.6	0.001	0.00406	984	981	65.6	0.001	0.00656	1006	997	81.6	0.001	0.00816
−0.064	3	914.1	955	953	38.9	0.001	0.00389	982	973	58.9	0.001	0.00589	1003	984.5	70.4	0.001	0.00704
−0.044	4	913.5	954	951	37.5	0.001	0.00375	980	966	52.5	0.001	0.00525	1000	974	60.5	0.001	0.00605
−0.024	5	913	952.4	945	32	0.001	0.0032	978	954	41	0.001	0.0041	997	955	42	0.001	0.0042
−0.002	6	912.8	950.4	937	24.2	0.001	0.00242	974.8	936	23.2	0.001	0.00232	994	931	18.2	0.001	0.00182
+0.024	7	911	945.3	880	−31	0.001	−0.0031	969	834	−77	0.001	−0.0077	987.2	786	−125	0.001	−0.0125
+0.051	8	898.6	935	855	−43.6	0.001	−0.00436	959.5	800	−98.6	0.001	−0.00986	977.5	745	−153.6	0.001	−0.01536
+0.083	9	872.2	914	893	20.8	0.001	0.00208	943	886	13.8	0.001	0.00138	962	872	− 0.2	0.001	−0.00002
+0.112	10	844.4	883	866	21.6	0.001	0.00216	918	874	29.6	0.001	0.00296	942	874	29.6	0.001	0.00296
+0.149	11	810.8	846	832	21.2	0.001	0.00212	885	849	38.2	0.001	0.00382	913	858	47.2	0.001	0.00472
+0.185	12	773.3	808.5	799	21.7	0.001	0.00217	844.6	817	39.7	0.001	0.00397	875	830	52.7	0.001	0.00527
+0.220	13	743.5	775	762	18.5	0.001	0.00185	810	780	36.5	0.001	0.00365	840	794	50.5	0.001	0.00505
+0.258	14	709.8	741.5	728	18.2	0.001	0.00182	772	743	33.2	0.001	0.00332	799	758	48.2	0.001	0.00482
+0.295	15	676.4	703.5	694	17.6	0.001	0.00176	734	711	34.6	0.001	0.00346	763	724	47.6	0.001	0.00476
+0.369	16	608.6	631.7	623	14.4	0.001	0.00144	662	637	28.4	0.001	0.00284	687	651	42.4	0.001	0.00424

Tabelle VII. Beobachtungsergebnisse der Versuchsreihe VI. Sole geneigt, Kante scharf, $\alpha = 45°$.

Profil m	Rohr Nr.	Sohle z mm	Q = 20 l/sek Wasserspiegel mm	Piezometerstand H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H − z mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm³	hydrostatischer Druck P = f. h. γ kg/cm²	Q = 40 l/sek Wasserspiegel mm	Piezometerstand H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H − z mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm³	hydrostatischer Druck P = f. h. γ kg/cm²	Q = 60 l/sek Wasserspiegel mm	Piezometerstand H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H − z mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm³	hydrostatischer Druck P = f. h. γ kg/cm²
−0.700		933.2	978					1010					1035				
−0.300		921.5	963.6					993					1018.2				
−0.200		919.4	959.5					988.7					1011.8				
−0.152	1	917	958.2	958	41	0.001	0.0041	986	983	66	0.001	0.0066	1008.8	1003	86	0.001	0.0086
−0.103	2	915.4	956.6	956	40.6	0.001	0.00406	983.5	977	61.6	0.001	0.00616	1004	990	74.6	0.001	0.00746
−0.064	3	914.3	954.9	950	35.7	0.001	0.00357	981	964	49.7	0.001	0.00497	1000	970	55.7	0.001	0.00557
−0.044	4	913.5	953	944	30.5	0.001	0.00305	978.3	951	37.5	0.001	0.00375	997	951	37.5	0.001	0.00375
−0.024	5	913	951	929	16	0.001	0.0016	974.5	924	11	0.001	0.0011	993	915	2	0.001	0.0002
−0.002	6	912.6	947	882	−30.6	0.001	−0.00306	970	857	− 55.6	0.001	−0.00556	987.4	833	− 79.6	0.001	−0.00796
+0.010	7	904	942.2	818	−86	0.001	−0.0086	965.5	781	−123	0.001	−0.0123	982.5	746	−158	0.001	−0.0158
+0.037	8	875.6	927	895	19.4	0.001	0.00194	954.3	833	− 42.6	0.001	−0.00426	972	776	− 99.6	0.001	−0.00996
+0.072	9	840	892	870	30	0.001	0.0030	929	889	49	0.001	0.0049	951.2	883	43	0.001	0.0043
+0.107	10	805	848	831	26	0.001	0.0026	893	855	50	0.001	0.0050	921.5	869	64	0.001	0.0064
+0.140	11	770	811.3	791	21	0.001	0.0021	855	814	44	0.001	0.0044	887	831	61	0.001	0.0061
+0.176	12	735	773	754	19	0.001	0.0019	811	773	38	0.001	0.0038	843.2	790	55	0.001	0.0055
+0.211	13	699.2	733	719	19.8	0.001	0.00198	768	736	36.8	0.001	0.00368	797	753	53.8	0.001	0.00538
+0.280	14	629	662	643	14	0.001	0.0014	691	659	30	0.001	0.0030	717	674	45	0.001	0.0045

Tabelle VIII. Beobachtungsergebnisse der Versuchsreihe VII. Sohle geneigt, Kante rund, $\alpha = 60^{\circ}$.

Profil	Rohr Nr.	Sohle	Q = 20 l/sek					Q = 40 l/sek					Q = 60 l/sek				
			Wasserspiegel	Piezometerstand	hydrostatische Druckhöhe	spez. Gewicht des Wassers	hydrostatischer Druck	Wasserspiegel	Piezometerstand	hydrostatische Druckhöhe	spez. Gewicht des Wassers	hydrostatischer Druck	Wasserspiegel	Piezometerstand	hydrostatische Druckhöhe	spez. Gewicht des Wassers	hydrostatischer Druck
		z		$H = z + h$	$h = H - z$	γ	$P = f \cdot h \cdot \gamma$		$H = z + h$	$h = H - z$	γ	$P = f \cdot h \cdot \gamma$		$H = z + h$	$h = H - z$	γ	$P = f \cdot h \cdot \gamma$
m		mm	mm	mm	mm	kg/cm³	kg/cm²	mm	mm	mm	kg/cm³	kg/cm²	mm	mm	mm	kg/cm³	kg/cm²
−0.700		933	977					1009					1034.5				
−0.300		922.2	962.8					993					1017.3				
−0.200		918.7	959					988					1011.5				
−0.152	1	916.8	958	958	41.2	0.001	0.00412	986	985	68.2	0.001	0.00682	1008.9	1005	88.2	0.001	0.00882
−0.103	2	915	956.4	956	41	0.001	0.0041	984	980	65	0.001	0.0065	1005.1	996	81	0.001	0.0081
−0.064	3	913.5	955	953	39.5	0.001	0.00395	981.5	973	59.5	0.001	0.00595	1002.3	983	69.5	0.001	0.00695
−0.044	4	913	954	951	38	0.001	0.0038	980	966	53	0.001	0.0053	1000	972	59	0.001	0.0059
−0.024	5	912.4	952.3	947	34.6	0.001	0.00346	977.8	954	41.6	0.001	0.00416	996.8	956	43.6	0.001	0.00436
−0.002	6	912.1	950	940	27.9	0.001	0.00279	974	939	26.9	0.001	0.00269	992.8	937	24.9	0.001	0.00249
+0.045	7	903.8	938	845	−58.8	0.001	−0.00588	960.5	758	−145.8	0.001	−0.01458	979.6	671	−232.8	0.001	−0.02328
+0.067	8	887	925	825	−62	0.001	−0.0062	950	745	−142	0.001	−0.0142	968	667	−220	0.001	−0.0220
+0.089	9	849	896	880	31	0.001	0.0031	933.8	868	19	0.001	0.0019	955	855	6	0.001	0.0006
+0.110	10	815	865	833	18	0.001	0.0018	910.5	838	23	0.001	0.0023	933	851	36	0.001	0.0036
+0.136	11	773	822	789	16	0.001	0.0016	876	800	27	0.001	0.0027	906	851	78	0.001	0.0078
+0.162	12	730.7	773	748	17.3	0.001	0.00173	834.5	761	30.3	0.001	0.00303	873	851	120.3	0.001	0.01203
+0.188	13	689	727	705	16	0.001	0.0016	794.5	716	27	0.001	0.0027	842				
+0.215	14	647	682.5	662	15	0.001	0.0015	741	674	27	0.001	0.0027	—				
+0.240	15	604.4	640.5	619	14.6	0.001	0.00146	691	632	27.6	0.001	0.00276	—				
+0.297	16	519.7	554	529	9.3	0.001	0.00093	593	541	21.3	0.001	0.00213	851				

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

Profil m	Rohr Nr.	Sohle z mm	Q = 20 l/sek Wasserspiegel mm	Piezometerstand H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H − z mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm³	hydrostatischer Druck P = f. h. γ kg/cm²	Q = 40 l/sek Wasserspiegel mm	Piezometerstand H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H − z mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm³	hydrostatischer Druck P = f. h. γ kg/cm²	Q = 60 l/sek Wasserspiegel mm	Piezometerstand H = z + h mm	hydrostatische Druckhöhe h = H − z mm	spez. Gewicht des Wassers γ kg/cm³	hydrostatischer Druck P = f. h. γ kg/cm²
−0.700		933.4	978.6					1008					1034.2				
−0.300		922.4	964					991.8					1018.5				
−0.200		919.4	960					987					1012				
−0.152	1	917.2	958.8	959	41.8	0.001	0.00418	985	983	65.8	0.001	0.00658	1009.5	1005	87.8	0.001	0.00878
−0.103	2	915.4	957.4	957	41.6	0.001	0.00416	983	979	63.6	0.001	0.00636	1006	999	83.6	0.001	0.00836
−0.064	3	914.1	955.8	953.5	39.4	0.001	0.00394	980	971	56.9	0.001	0.00569	1002	986	71.9	0.001	0.00719
−0.044	4	913.5	954.6	950	36.5	0.001	0.00365	978.6	964	50.5	0.001	0.00505	1000	975.5	62	0.001	0.0062
−0.024	5	913	952.8	941	28	0.001	0.0028	976	950.5	37.5	0.001	0.00375	998	957	44	0.001	0.0044
−0.002	6	912.8	950	921	8.2	0.001	0.00082	973.4	921	8.2	0.001	0.00082	994	919.5	6.7	0.001	0.00067
			o. u.					o. u.					o. u.				
+0.015	7	889	947 910					970 910					990 909				
+0.036	8	855	940 908					964 903					985 904.5				
+0.060	9	812	931 895					955.8 895					977.2 895				
+0.086	10	769	917.6 880					944.3 883					970 882				
+0.110	11	727	900 863					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				
+0.213	14	555.8	795 766					852 790					891 815				
+0.300			659 —					741 —					812 730				

Bestimmung der unteren Begrenzung des Wasserstrahles sehr unsicher.

Hinsichtlich der Richtung der Wasserdrücke auf die Sohle (Wehrrücken) 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 Bereiche 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. Dis Richtung dieser Resultierenden kann naturgemäß nicht mehr senkrecht zur Sohle (Wehrrücken) 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 (Wehrrücken) 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 Sohlenkoten (z) berechnet und in den Abbildungen 34-41 von einer wagrechten Grundlinie aus aufgetragen.

$$H = z + h \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2),$$

$$h = H - z \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3),$$

wobei H = Piezometerstand in mm,
z = Sohlenkote in mm,
h = Piezometerhöhe (hydrostatische Druckhöhe) in mm.

Die unterhalb diese 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 :—

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

$$P = f.\,h.\,\gamma \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5),$$

wobei h = Piezometerhöhe (hydrostatische Druckhöhe) in mm,
P = Spezifischer Druck (hydrostatischer Druck) in kg/cm^2,
f = Der Querschnitt der Wassersäule in $cm^2 = 1\ cm^2$,
γ = Das spez. Gewicht des Wassers in $kg/cm^3 = 1\ kg/dm^3 = 0.001\ kg/cm^3$.

Wird das spez. Gewicht des Wassers angenommen mit

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

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

$$P = f.\,h.\,\gamma = 1 \times 10 \times 0.001 = 0.01\ kg/cm^2.$$

Wenngleich das spez. Gewicht des Wassers streng genommen nur bei der Temperatur von + 4°C den genauen Wert von $1\ kg/dm^3$ hat, so wurde doch dieser Wert such 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 Versuchsphasen, und zwar für die beiden extremen Wassermengen von Q = 20, und 60 l/sek (bei Versuchsreihe III außerdem auch bei Q = 40 l/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 Bereiche 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) flußaufwärts 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 Bereiche 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 $Q = 60$ l/sek 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 Ausnahmfall das Unterwasser gestaut, und zwar so hoch (+ 850 mm), daß der Strahl an den Wehrrücken gerade noch angeschmiegt blieb (Abbildung 18). Bei Unterschreiten dieser Unterwasserspiegellage wurde infolge der starken Saugwirkung an derWehrkrone 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 $Q = 20$ l/sek los. Es entstand dadurch zwischen Wehrrücken und Unterseite des Wasserstahles ein lufterfüllter 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 Gefäße 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 Gesetzes der Hydrostatik die Beziehung:

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

wenn A den Atmosphärendruck und p den absoluten Druck im lufterfüllten Raum bedeuten. Für $\gamma = 1$ ergibt sich die gesuchte Piezometerhöhe mit

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

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 Wehrrücken bei der Versuchsreihe VIII.

Tabelle der Unterdrücke h in mm.

Q l/sek	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 lufterfüllten Raum mitgerissene Luft infolge des steilen Aufpralles des Strahles auf die Unterwassersohle 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 zarückgekommen 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, $Q = 60$ l/sek) durch Einführung einer weißen Farblösung sichtbar gemacht wurde.

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

Die bisher durchgeführten Untersuchungen erstreckten sich auf die Ermittlung der Verteilung die hydrostatischen Drücke entlang der Gerinnesohle, bezw. 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 versuchstechnischer Beziehung nicht gerade leichte Ermittlung der Drücke im Inneren des Wasserkörpers im Bereich der Wehrkrone, bezw. flußabwärts 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 Pitoröhre 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 bed den seitlichen Oeffnungen b weder Saug-

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

$$h = k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

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 $y^2 = 2\,px$ entsprechenden Form mit

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

Durch die eben geschilderte Eigenschaft der Pitotröhre ($k = 1$) ergeben die den seitlichen Oeffnungen 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 Oeffnung a und dann die Oeffnung b in das genaue Meßprofil einzustellen war.

Um den 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 $Q = 60$ l/sek 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 bezw. 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 Pitoröhre im Profil −0.026 m (R 5) bei Versuchsreihe I, Q = 60 l/sek.

Höhenlage der Öffnung in mm		Piezometerstand H mm	Druckhöhe		Anmerkung
über Sohle	absolut z		hydrostatische h mm	hydrodynamische Δh mm	
		1. Staudüse *			*Düse parallel zur Sohle
5	939	1114		175	
15	949	1131		182	
25	959	1137		178	$H = z + h + \frac{v^2}{2g}$
35	969	1137		168	
45	979	1138		159	$= z + \Delta h$
55	989	1139		150	$\Delta h = H - z$
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		$H = z + h$
64.5	998.5	1006	7.5		$h = H - z$
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/sek.

Hönenlage der Öffnung in mm		Piezometer-stand	Drückhöhe		Anmerkung
über Sohle	absolut z	H mm	hydrostatische h mm	hydrodynamische △h mm	
			1. Staudüse *		* Düse Parallel zu den Stromfäden
55	989	1139		149	$H = z + h + \frac{v^2}{2g}$
73	1007	1141		133	$= z + \triangle h$
86	1020	1141		120	$\triangle h = H - z$
			2. Seitliche Öffnung *		$= h + \frac{v^2}{2g}$
53	987	1011	24		
65	999	1019	20		$H = z + h$
80	1014	1024.5	10.5		$h = H - z$
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 △h zeichnerisch zur Darstellung gebracht. Durch Bildung der Differenzen von △h und h bekommt man für jeden Punkt die Geschwindigkeitshöhe

$$h_g = \triangle h - h \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10).$$

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

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

(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 (strichpunktierte Linie) gibt die mittlere Geschwindig-

Tabelle XIII. Ermittlung der Geschwindigkeiten im Profil −0.026 m (R 5) bei Versuchsreihe I, Q = 60 l/sek.

Tiefe t mm	Geschwindigkeitshöhe h_g mm	Geschwindigkeit v m/sek
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	1.51
80	112	1.48
90	108	1.46
100	104	1.43

keit der Mittelvertikalen mit $v_m = 1.54$ m/sek. Demgegenüber berechnet sich die mittlere Profilgeschwindigkeit V_m, die infolge der Reibung an Wänden und Sohle einen kleineren Werte aufweisen muß, unter Zugrundelegung der vorhandenen Wassertiefe t = 100.7 mm mit

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

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

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

Die gute Uebereinstimmung der mittleren Profilgeschwindigkeiten V_m mit den durch die Pitotröhrenmessungen ermittelten mittleren Vertikalgeschwindigkeiten v_m kann als Beweis dafür angesehen 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/sek.

Höhenlage der Öffnung in mm		Piezometerstand	Druckhöhe		Anmerkung
über Sohle	absolut z	H mm	hydrostatische h mm	hydrodynamische △h mm	
			1. Staudüse *		*Düse parallel zur Sohle
5	939	1110		171	
	949	1130		181	
25	959	1134		175	
35	969	1137		168	$H = z + h + \frac{v^2}{2g}$
45	979	1138		159	$= z + \triangle h$
55	989	1138		149	$\triangle h = H - z$
65	999	1138		139	$= h + \frac{v^2}{2g}$
75	1009	1139		130	
85	1019	1138		119	
95	1029	1138		109	
			2. Seitliche Öffnung *		
5	939	992	53		
15	949	989	40		
25	959	989	30		
35	969	991	22		
45	979	994	15		$H = z + h$
55	989	998	9		$h = H - z$
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/sek.

Höhenlage der Öffnung in mm		Piezometerstand H mm	Druckhöhe		Anmerkung
über Sohle	absolut z		hydrostatische h mm	hydrodynamische $\triangle h$ mm	
		1. Staudüse*			* Düse parallel zu den Stromfaden
55	989	1139		150	$H = z + h + \frac{v^2}{2g} = z + \triangle h$
85	1019	1140		121	$\triangle h = H - z = h + \frac{v^2}{2g}$
		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/sek.

Tiefe t mm	Geschwindigkeitshöhe h_g mm	Geschwindigkeit v m/sek
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 l/sek) 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 bezw. 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 eingeringelt). Mit Rücksicht auf diese gute Uebereinstimmung konnten wir uns bei den weiteren Druckmessungen im Innern mit dem einen Kontrollpunkt (Piezometerröhre in der vertikalen Seitenwand) begnügen. Die gewonnenen Werte für die Versuchsreihen III and 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/sek	Höhenlage der Öffnung in mm über Sohle	Höhenlage der Öffnung in mm absolut z	Piezometerstand H = z + h mm	Druckhöhe h = H − z mm
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/sek	Höhenlage der Öffnung in mm über Sohle	Höhenlage der Öffnung in mm absolut z	Piezometerstand H = z + h mm	Druckhöhe h = H − z mm
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:

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

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/sek) der Wert H' für das wesentlich weiter flußaufwärts gelegene Profil bei -0.70 m wie folgt:

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

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

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

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

Sohlenkote: 934 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/sek die Linien gleicher Drücke konstruiert (Abbildung 52.) Die dünnausgezogene 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 Drucke h = 10, 20 ... mm betragen, indem man auf der betreffenden Abszissenachse, die ihren Nullpunkt im Schnittpunkt mit der jeweiligen Lotrechten hat, die Werte h = 10, 20 ... mm aufträgt, durch diese Punkte lotrechte Hilfslinien nach aufwärts zieht und die erhaltenen Schnittpunkte mit der Drucklinie auf die Lotrechts hinüberprojektiert. In Abbildung 52 ist die Konstruktion für den Punkt h = 30 mm durchgeführt. Die Verbindungslinien von Punkten gleicher Drücke ergibt die gesuchte Linienschar. Hiezu 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 Aenderung 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/sek 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 ENDERGEBNISSE

Das wichtigste Ergebnis unserer Untersuchungen liegt jedoch in der Erkenntnis, daß unterhalb der Wehrkrone Unterdrücke (Saugwirkungen) auftreten können, über deren Größen man sich bisher noch keine genaue Vorstellung machte. 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

$$Q\ \mathrm{l/sek/m} = \frac{Q\ \mathrm{l/sek}}{b} = \frac{Q\ \mathrm{l/sek}}{0.402} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (13)$$

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 Zuflußgeschwindigkeit 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 giltigen Linie hervorgeht. Diese Unstetigkeit scheint dann einzutreten, wenn der Wasserstrahl nahezu im Begriffe ist, sich von dem Wehrrücken loszulösen. Bemerkenswert ist der Umstand, daß der oberste Punkt der Versuchsreihe VII (Q = 60 l/sek) 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 Wehrrücken zu verhindern.

Ferner verdient der Parallelismus der für wagrechte und geneigte Sohlen giltigen 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, $\alpha = 60°$) für die maximale Wassermenge $Q = 60$ l/sek mit $h = 236$ mm ein.

Tabelle XIX. Tabelle der maximalen Unterdrüke.

V.R.Nr.	Maximalunterdruck mm		
	Q = 20 l/sek	Q = 40 l/sek	Q = 60 l/sek
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 AEHNLICHKEITSGESETZES

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 Beuwerk 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 Aehnlichkeit bestehen. Nach KREY (9) ist mechanische Aehnlichkeit 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:

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

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

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

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

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

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

für Wassermengen bei gleichen Breiten im Modell und in der Natur mit ..... $\frac{Q'}{q'} \frac{B.T.V}{b.t.v} = 1.\lambda.\lambda^{0.5} = \lambda^{1.5}$,

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 Schwerkräfte 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 Aehnlichkeitsgesetzes 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/sek der Radius der Ueberfallkante immer dieselbe Größe beibehielt, während er entsprechend dem Aehnlichkeitsgesetz ebenfalls hätte vergrößert werden müssen. Bedeutend unsicherer liegen die Verhältnisse bei Vorhandensein scharfer Ueberfallkanten, bei welchen, wie bereits früher erwähnt, das Auftreten von Wasserwalzen (Reibungserscheinungen) 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/sek der Vesuchsreihe IV weisen eine starke Abweichung gegenüber allen übrigen Fällen auf (Siehe Abbildung 53), daher kann dieser Versuch zur Ueberprüfung des Aehnlichkeitsgesetzes nicht heran gezogen werden. Die Ursache dürfte darin liegen, daß der Wasserstrahl fast im Begriffe ist, sich vom Wehrrücken loszulösen. Betrachtet man bei den Versuchsreihen II, IV und VI die Versuche mit $Q = 40$, bezw. 60 l/sek als Vorgänge in der Natur und die Versuche mit $q = 20$ l/sek 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/sek ausgewiesen (wobei die beiden letzteren Werte durch Extrapolation aus der zeichnerischen Darstellung in Abbildung 53 gefunden wurden) und mit den auf Grund des Aehnlichkeitsgesetzes 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/sek bei der Versuchsreihe II den Wert $h_{20} = 62$ mm auf. Betrachtet man den Versuch bei derselben Versuchsreihe mit Q = 40 l/sek als Vorgang in der Natur, so berechnet sich das Uebertragungsverhältnis für Drücke, bezw. Längen nach den obigen Darlegungen mit

$$\lambda_1 = \sqrt[1.5]{\frac{40}{20}} = 1.59 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (15)$$

und daraus $h'_{40} = \lambda_1 \cdot h_{20} = 1.59 \times 62 = 99$ mm.

Demgegenüber betrug der bei Q = 40 l/sek 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 Aehnlichkeitsgesetzes 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/sek (h_{40}) und in Absatz C für q = 60 l/sek (h_{60}) als Modellwerte aufgefasst und mittels des Aehnlichkeitsgesetzes in die Natur übertragen (h'_{60}, h'_{80}, h'_{100}). Die berechneten Verhältnisse $\frac{h'}{h}$ lassen eine Beurteilung der Anwendbarkeit des Aehnlichkeitsgesetzes zu. Die größte Abweichung weist der Rechnungswert $h'_{100} = 251$ mm (bei Versuchsreihe VI) gegenüber dem Modellwert $h_{100} = 217$ mm auf $\left(\frac{h'_{100}}{h_{100}} = 1.16\right)$, 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 Aehnlichkeitsgesetz 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_{20}, h_{40}, h_{60} in die Natur mit Hilfe des Aehnlichkeitsgesetzes.

A: Modellwassermenge: $q = 20$ l/sek; Wassermenge i. d. Natur: $Q = 40, 60, 80$ u. 100 l/sek.

V. R.	h_{20} mm	$h'_{40} = \lambda_1 . h_{20}$ mm	h_{40} mm	$\frac{h'_{40}}{h_{40}}$	$h'_{60} = \lambda_2 . h_{20}$ mm	h_{60} mm	$\frac{h'_{60}}{h_{60}}$	$h'_{80} = \lambda_3 . h_{20}$ mm	h_{80} mm	$\frac{h'_{80}}{h_{80}}$	$h'_{100} = \lambda_4 . h_{20}$ mm	h_{100} mm	$\frac{h'_{100}}{h_{100}}$	Modellmaßstäbe
II	62	99	103	0.96	129	138	0.94	156	169	0.92	181	198	0.91	$\lambda_1 = \sqrt[1.5]{\frac{40}{20}} = 1.59$
IV	62	99	142	0.70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$\lambda_2 = \sqrt[1.5]{\frac{60}{20}} = 2.08$ $\lambda_3 = \sqrt[1.5]{\frac{80}{20}} = 2.52$
VI	86	137	123	1.11	179	158	1.13	217	189	1.15	251	217	1.16	$\lambda_4 = \sqrt[1.5]{\frac{100}{20}} = 2.92$

B: Modellwassermenge: $q = 40$ l/sek; Wassermenge i. d. Natur: $Q = 60, 80$ u. 100 l/sek.

V. R.	h_{40} mm	$h'_{60} = \lambda_5 . h_{40}$ mm	h_{60} mm	$\frac{h'_{60}}{h_{60}}$	$h'_{80} = \lambda_6 . h_{40}$ mm	h_{80} mm	$\frac{h'_{80}}{h_{80}}$	$h'_{100} = \lambda_7 . h_{40}$ mm	h_{100} mm	$\frac{h'_{100}}{h_{100}}$	Modellmaßstäbe
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: $q = 60$ l/sek; Wassermenge i. d. Natur: $Q = 80$ u. 100 l/sek.

V. R.	h_{60} mm	$h'_{80} = \lambda_8 . h_{60}$ mm	h_{80} mm	$\frac{h'_{80}}{h_{80}}$	$h'_{100} = \lambda_9 . h_{60}$ mm	h_{100} mm	$\frac{h'_{100}}{h_{100}}$	Modellmaßstäbe
II	138	167	169	0.99	195	198	0.99	$\lambda_8 = \sqrt[1.5]{\frac{80}{60}} = 1.21$
IV	—	—	—	—	—	—	—	
VI	158	191	189	1.01	223	217	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 $q = 60$ l/sek (150 l/sek/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

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

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 Materialabnützung 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. Wasserkraft 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 Flußbauversuchen. 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 Untertunnelung 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 Flußbaulaboratorium zu Karlsruhe. Festschrift zur Feier des zweiundfünfzigsten Geburtstages Seiner Königlichen Hoheit des Großherzogs Friedrich II. herausgegeben von der Großherzoglichen Technischen Hochschule Fridericiana unter dem Rektorate von Dr. Adolf Krazer, s. 8—29, 1909.

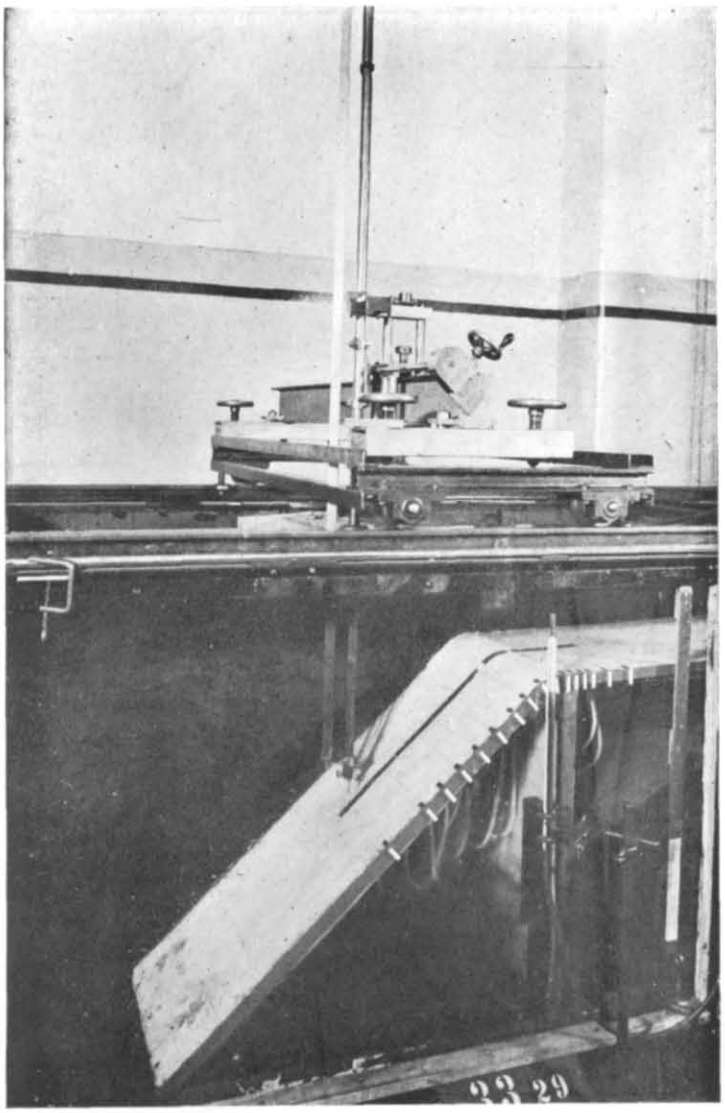


Abb. 1. Gesamtansicht der Versuchsanordnung.

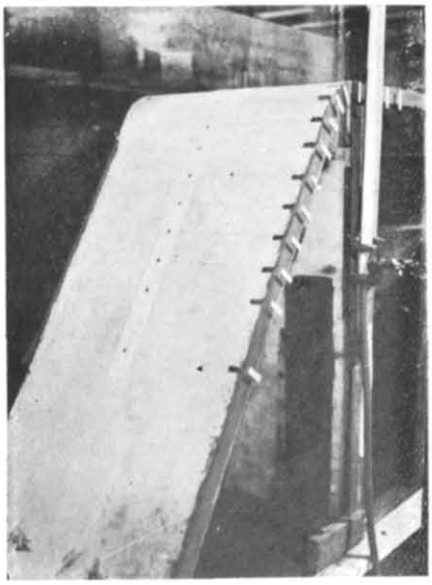


Abb. 2. Ausmündung der Piezometerröhrchen im Wehrrücken.

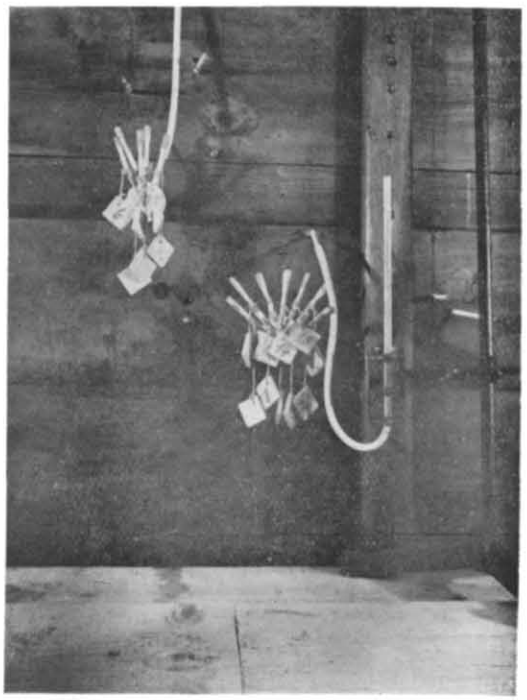


Abb. 3. Ausmündung der Piezometerröhrchen in der rückwärtigen Holzwand.

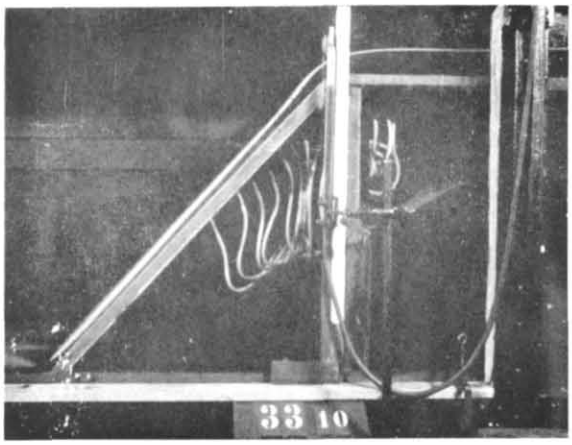


Abb. 4. Versuchsreihe I; Q = 20 l/sek, Piezometerrohr R 8.

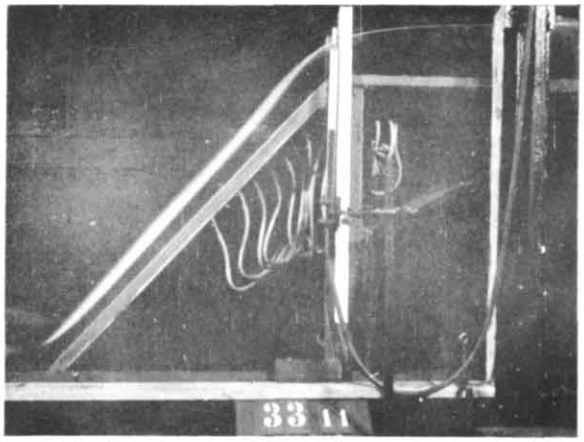


Abb. 5. Versuchsreihe I, Q = 60 l/sek, Piezometerrohr R 8.

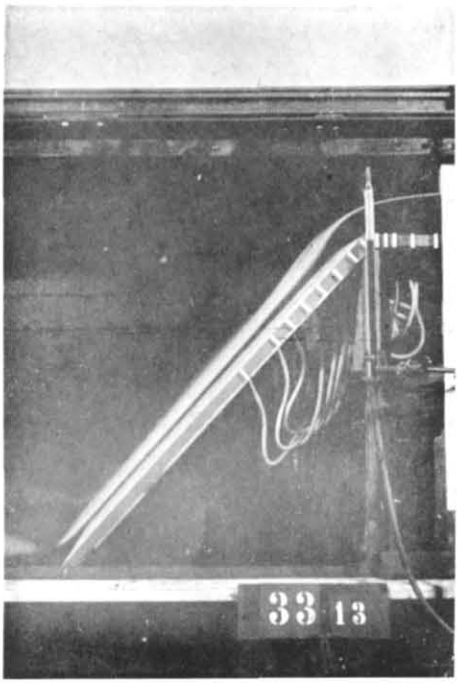


Abb. 6. Versuchsreihe II; Q = 20 l/sek, Piezometerrohr R 6.

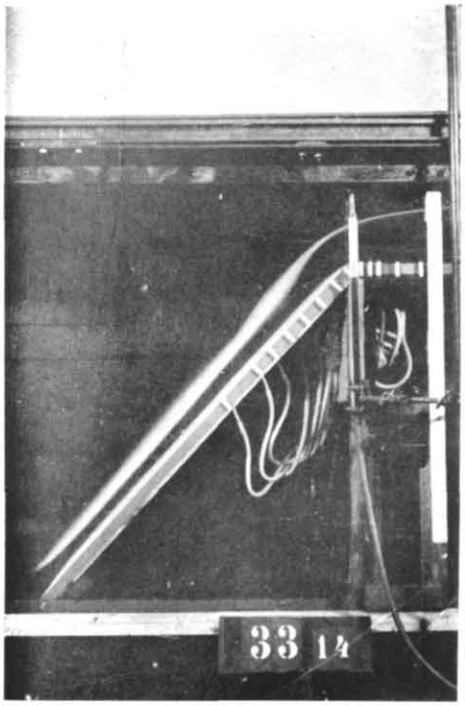


Abb. 7. Versuchsreihe II; Q = 60 l/sek, Piezometerrohr R 6.

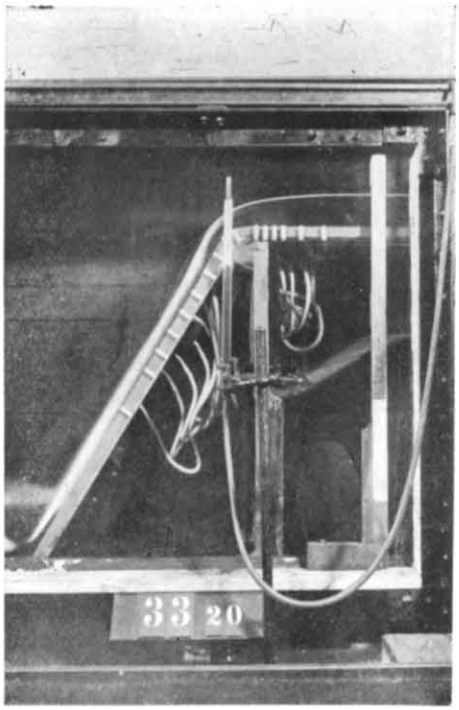


Abb. 8. Versuchsreihe III; Q = 20 l/sek, Piezometerrohr R 8.

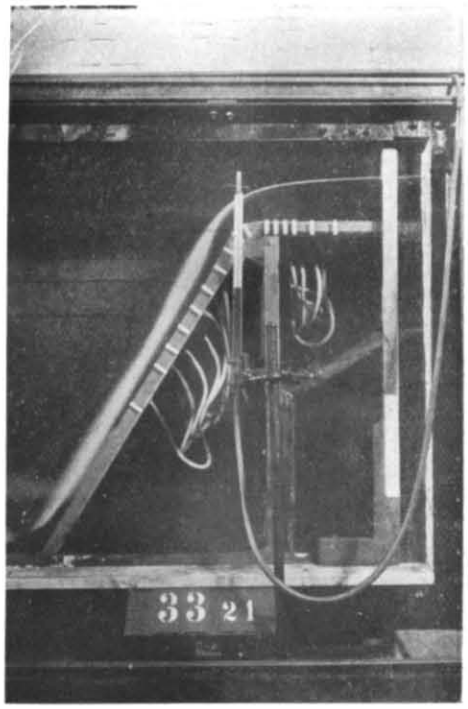


Abb. 9. Versuchsreihe III; Q = 40 l/sek, Piezometerrohr R 8.

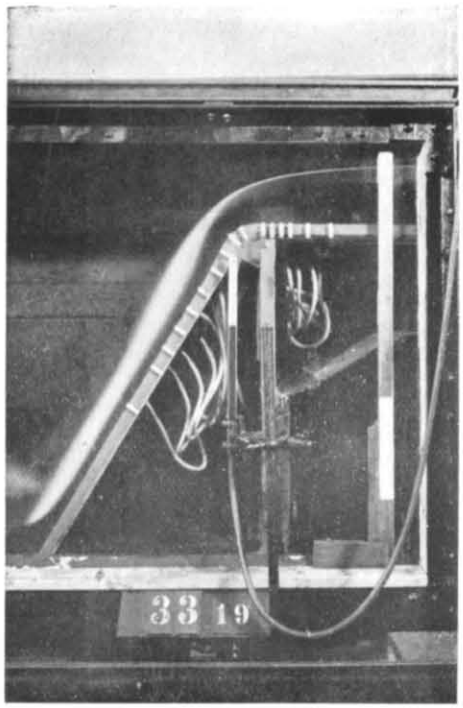


Abb. 10. Versuchsreihe III; Q = 60 l/sek, Piezometerrohr R 8.

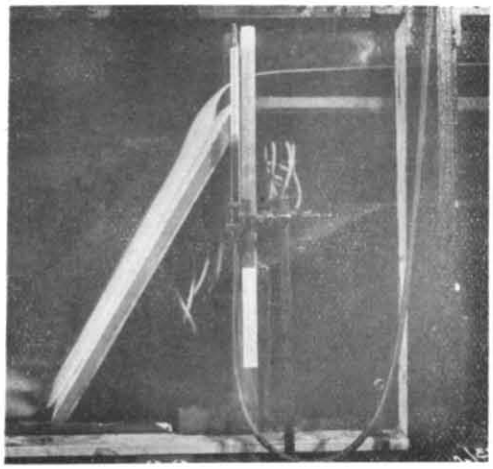


Abb. 11. Versuchsreihe IV; Q = 20 l/sek, Piezometerrohr R 7.

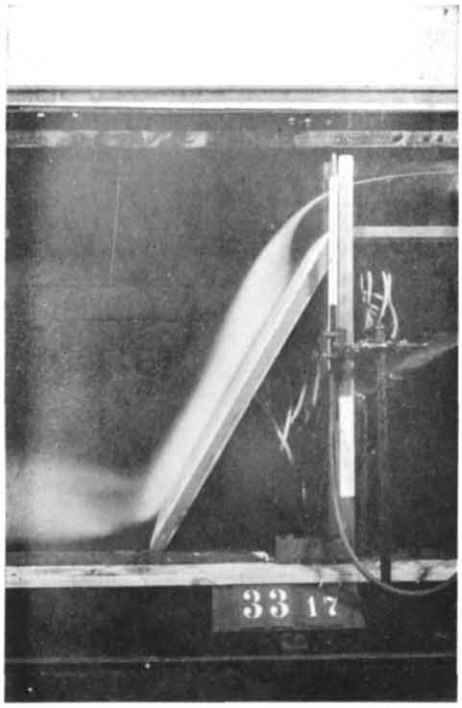


Abb. 12. Versuchsreihe IV ; Q = 60 l/sek, Piezometerrohr R 7.

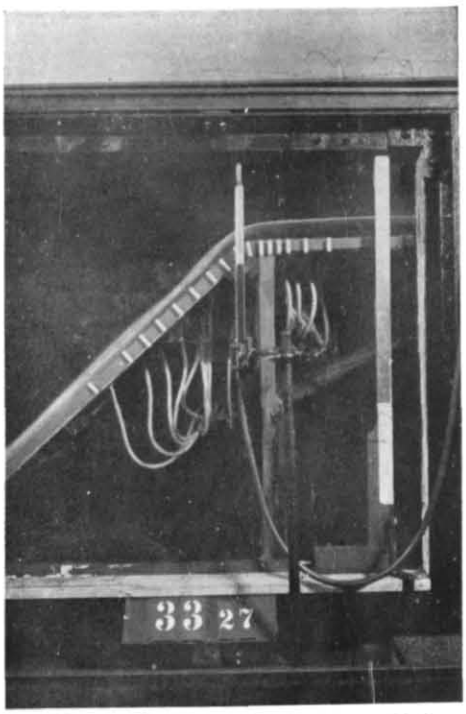


Abb. 13. Versuchsreihe V ; Q = 20 l/sek, Piezometerrohr R 8.

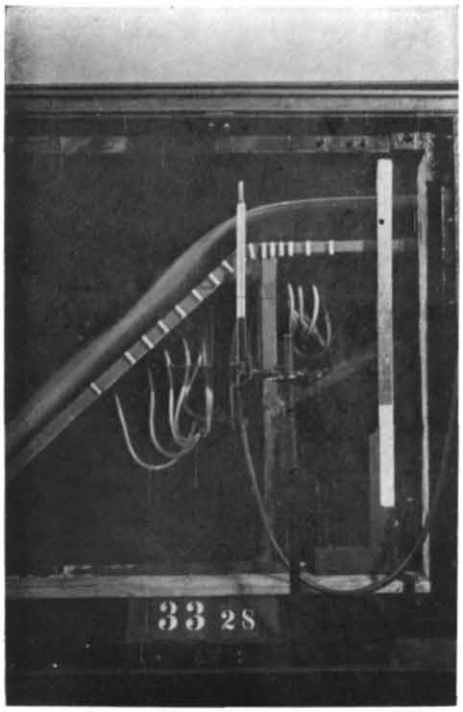


Abb. 14. Versuchsreihe V ; Q = 60 l/sek, Piezometerrohr R 8.

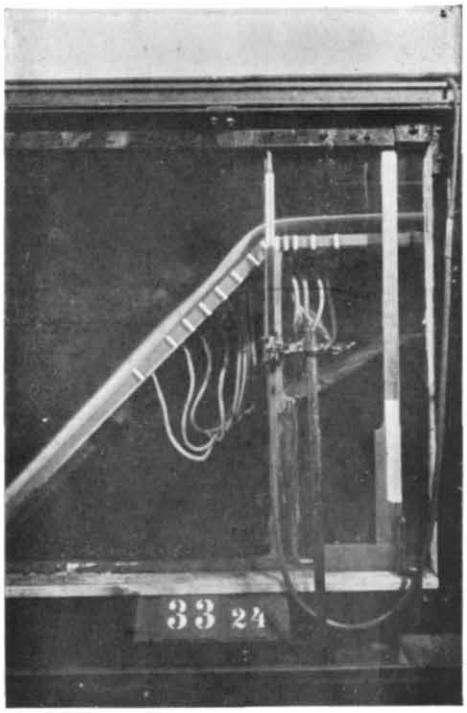


Abb. 15. Versuchsreihe VI ; Q = 20 l/sek, Piezometerrohr R 6.

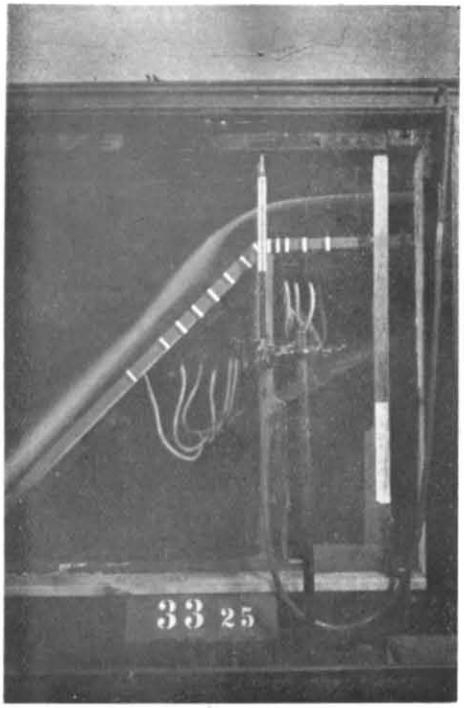


Abb. 16. Versuchsreihe VI; Q = 60 l/sek, Piezometerrohr R 6.

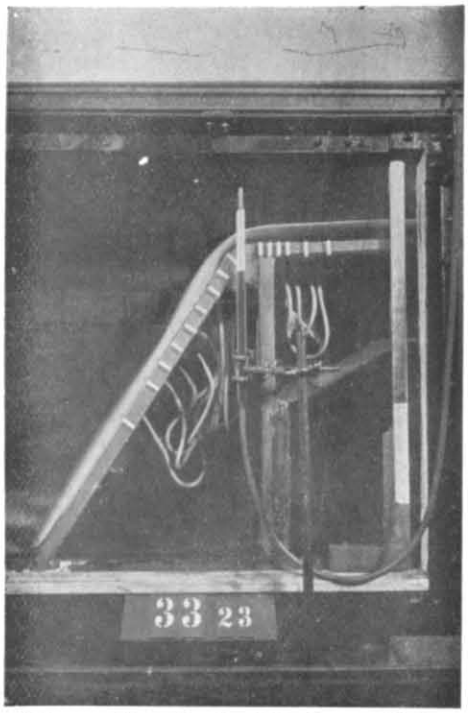


Abb. 17. Versuchsreihe VII; Q = 20 l/sek, Piezometerrohr R 7.

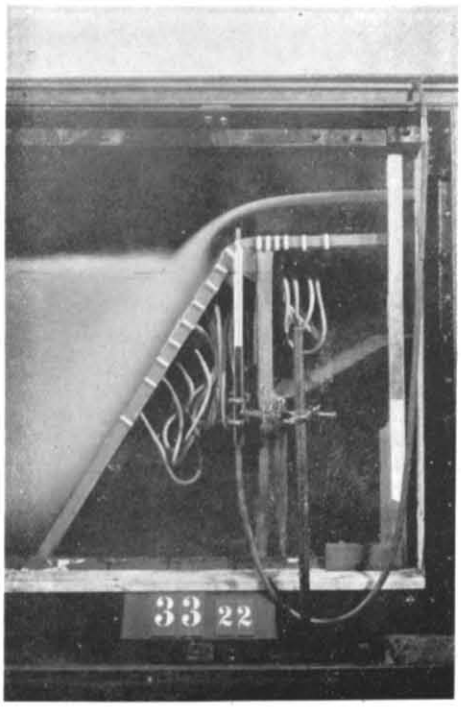


Abb. 18. Versuchsreihe VII; Q = 60 l/sek, Piezometerrohr R 7.

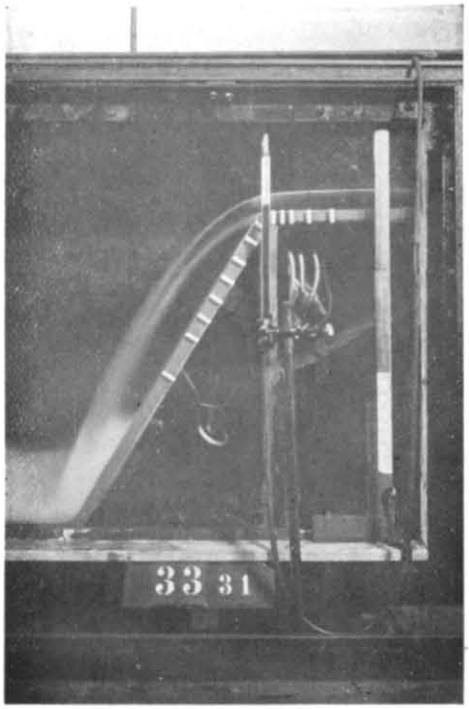


Abb. 19. Versuchsreihe VIII; Q = 20 l/sek, Piezometerrohr R 6.

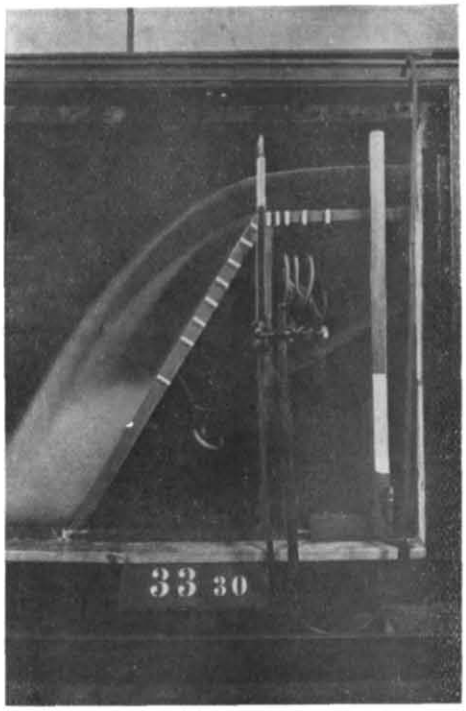


Abb. 20. Versuchsreihe VIII, Q = 60 l/sek, Piezometerrohr R 6.

Abb. 21. Walzenbildung unterhalb der Ueberfallkante; Versuchsreihe IV, Q = 60 l/sek.

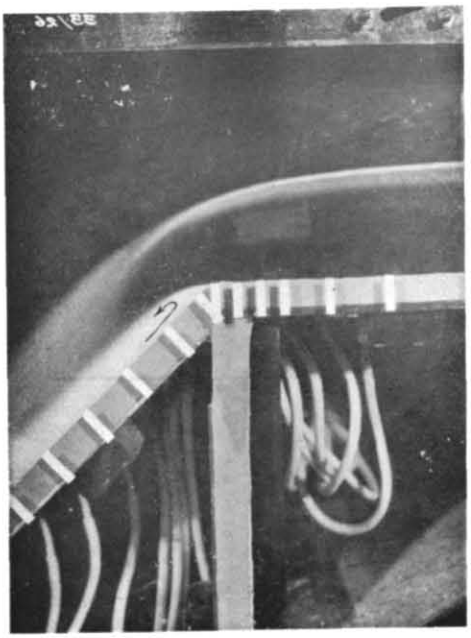


Abb. 22. Walzenbildung unterhalb der Ueberfallkante; Versuchsreihe VI, Q = 60 l/sek.

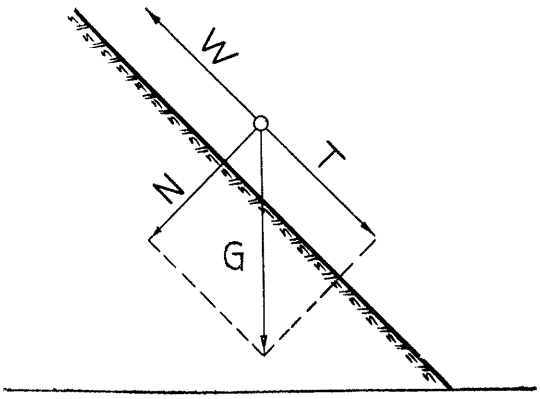


Abb. 23. Kräftezerlegung.

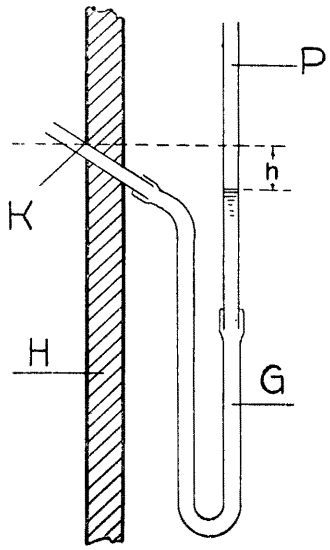


Abb. 24. Piezometerrohr an der rückwärtigen Holzwand.

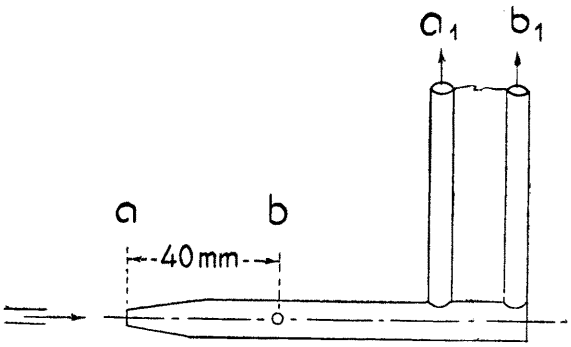


Abb. 25. Düse der Pitotröhre.

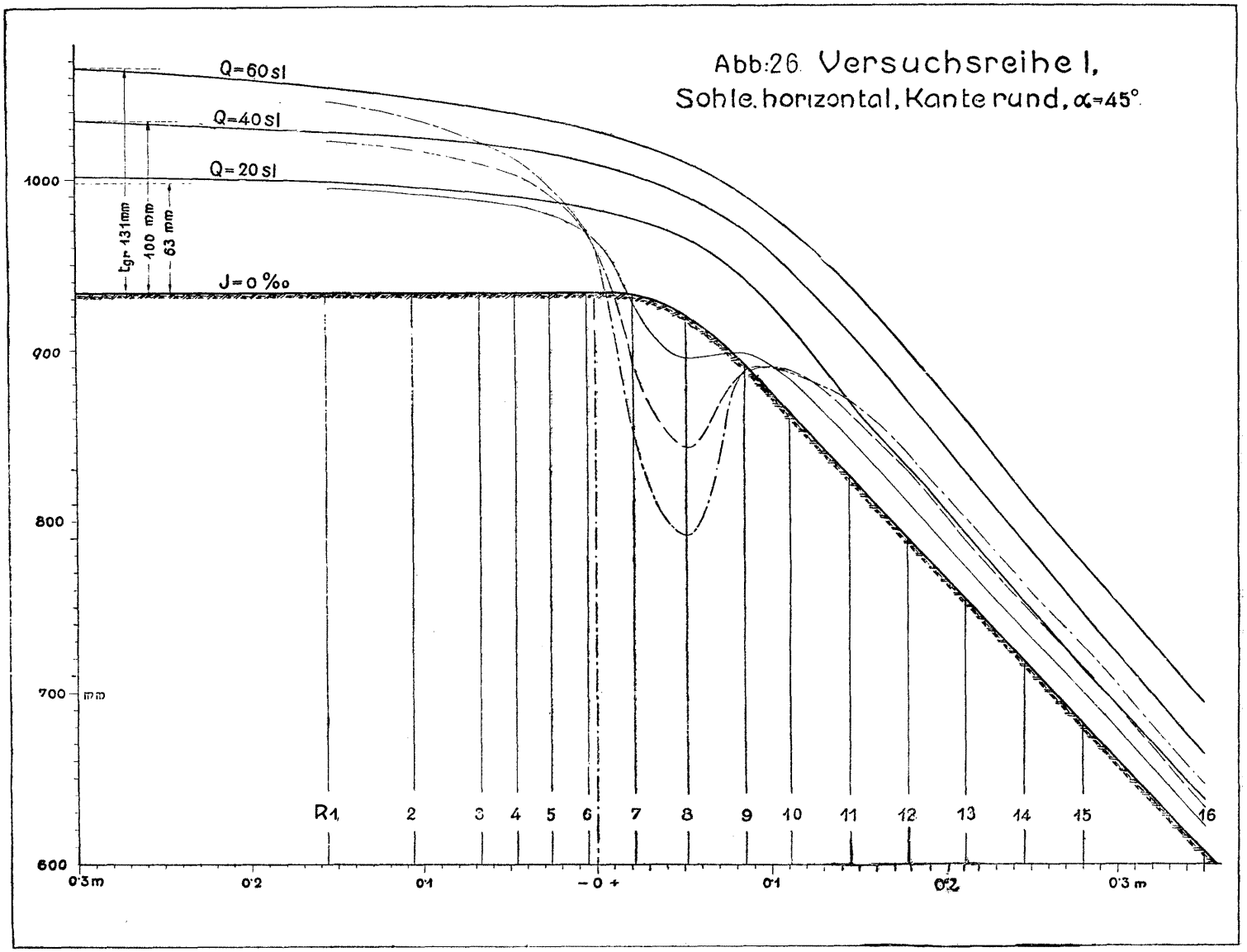


Abb:26 Versuchsreihe I,
Sohle horizontal, Kante rund, α=45°
Q=60 sl
Q=40 sl
Q=20 sl
J=0 ‰
tgr 131 mm
100 mm
63 mm
1000
900
800
700
600
mm
R1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
0·3 m
0·2
0·1
– 0 +
0·1
0·2
0·3 m

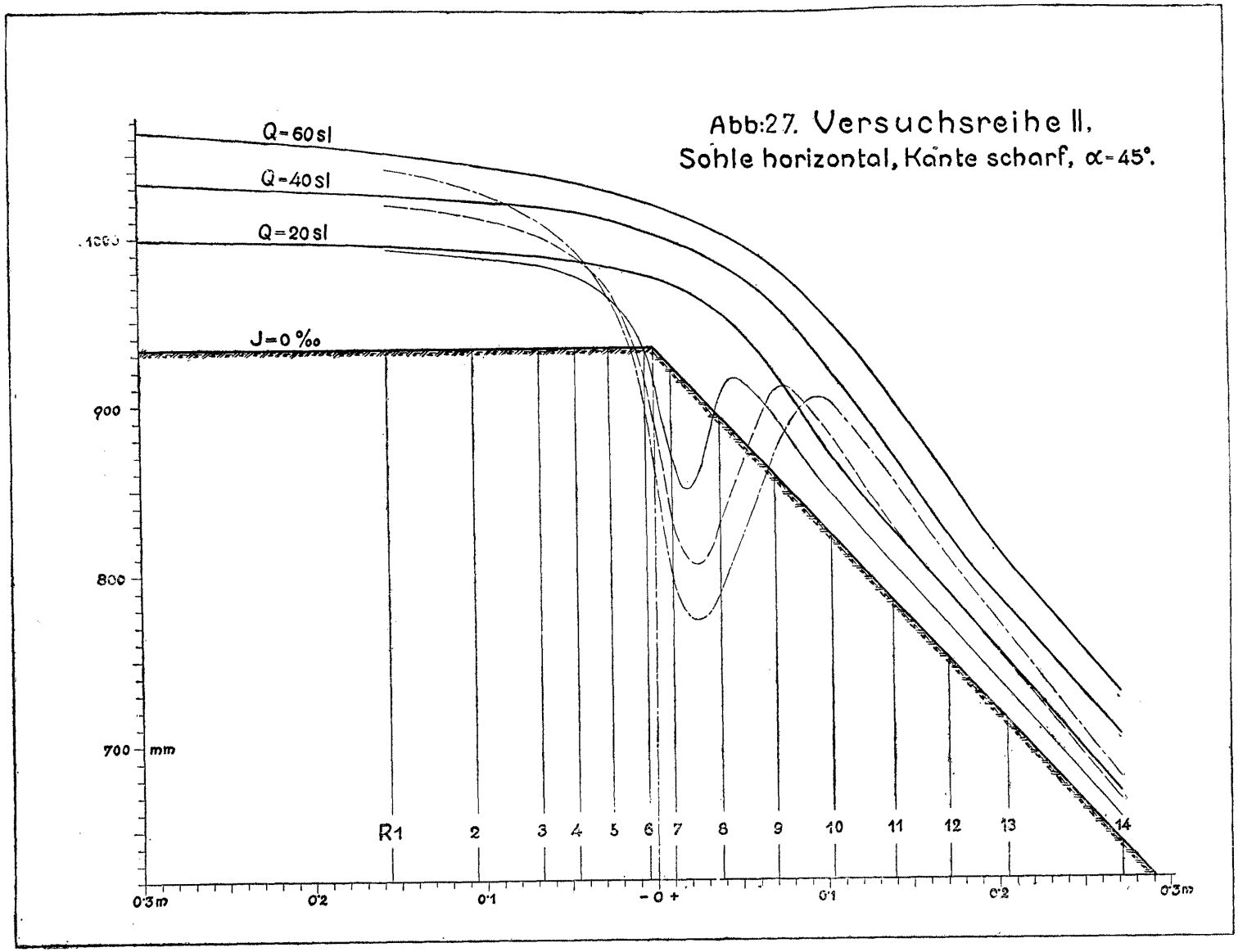


Abb:27. Versuchsreihe II.
Sohle horizontal, Kante scharf, α=45°.
Q=60 sl
Q=40 sl
Q=20 sl
J=0 ‰
1000
900
800
700 mm
R1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
0·3m
0·2
0·1
- 0 +
0·1
0·2
0·3m

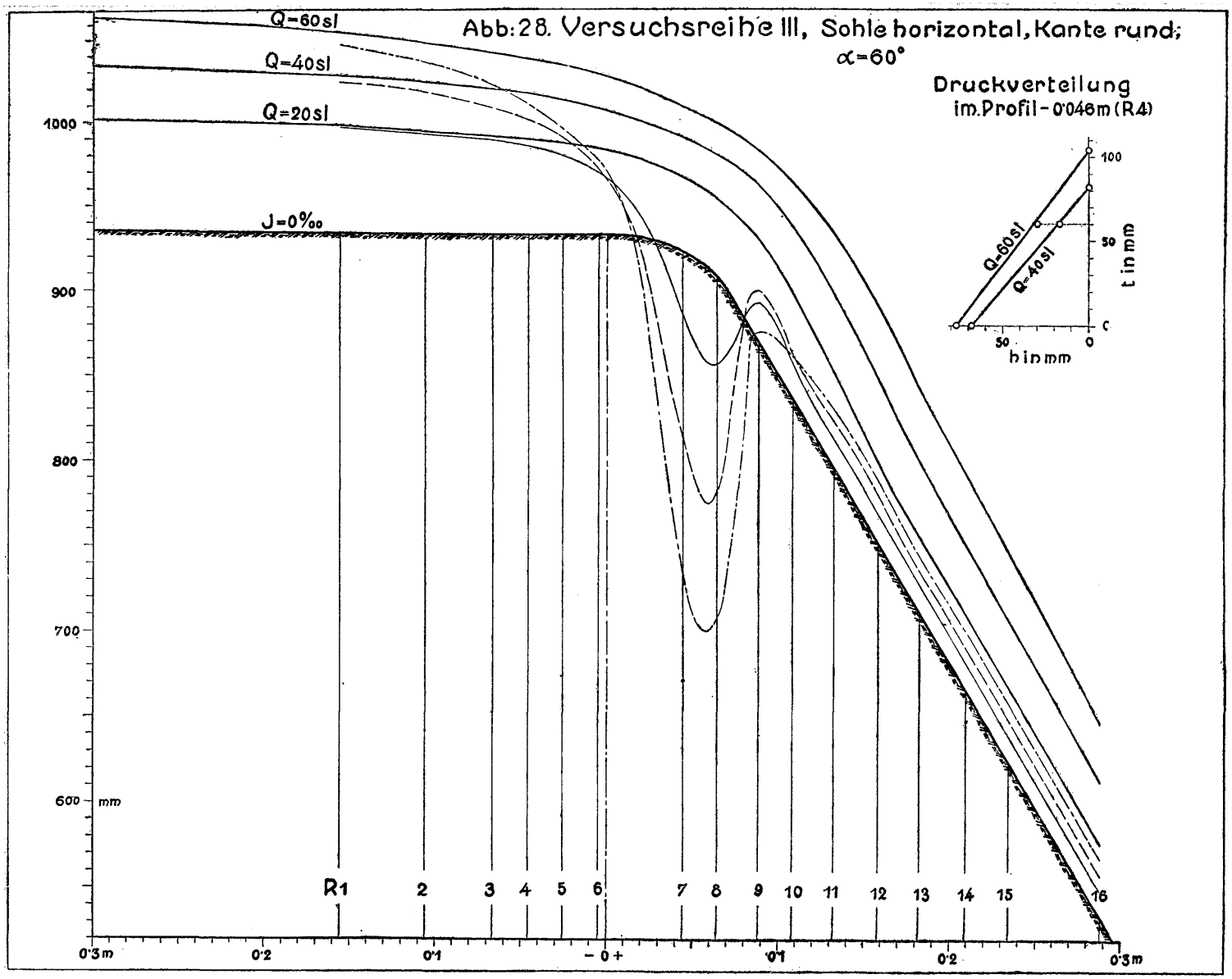


Abb: 28. Versuchsreihe III, Sohle horizontal, Kante rund;
α=60°
Druckverteilung
im. Profil - 0·046m (R4)
Q=60sl
Q=40sl
Q=20sl
J=0‰
1000
900
800
700
600
mm
R1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
0·3m
0·2
0·1
- 0 +
0·1
0·2
0·3m
100
50
0
t in mm
h in mm

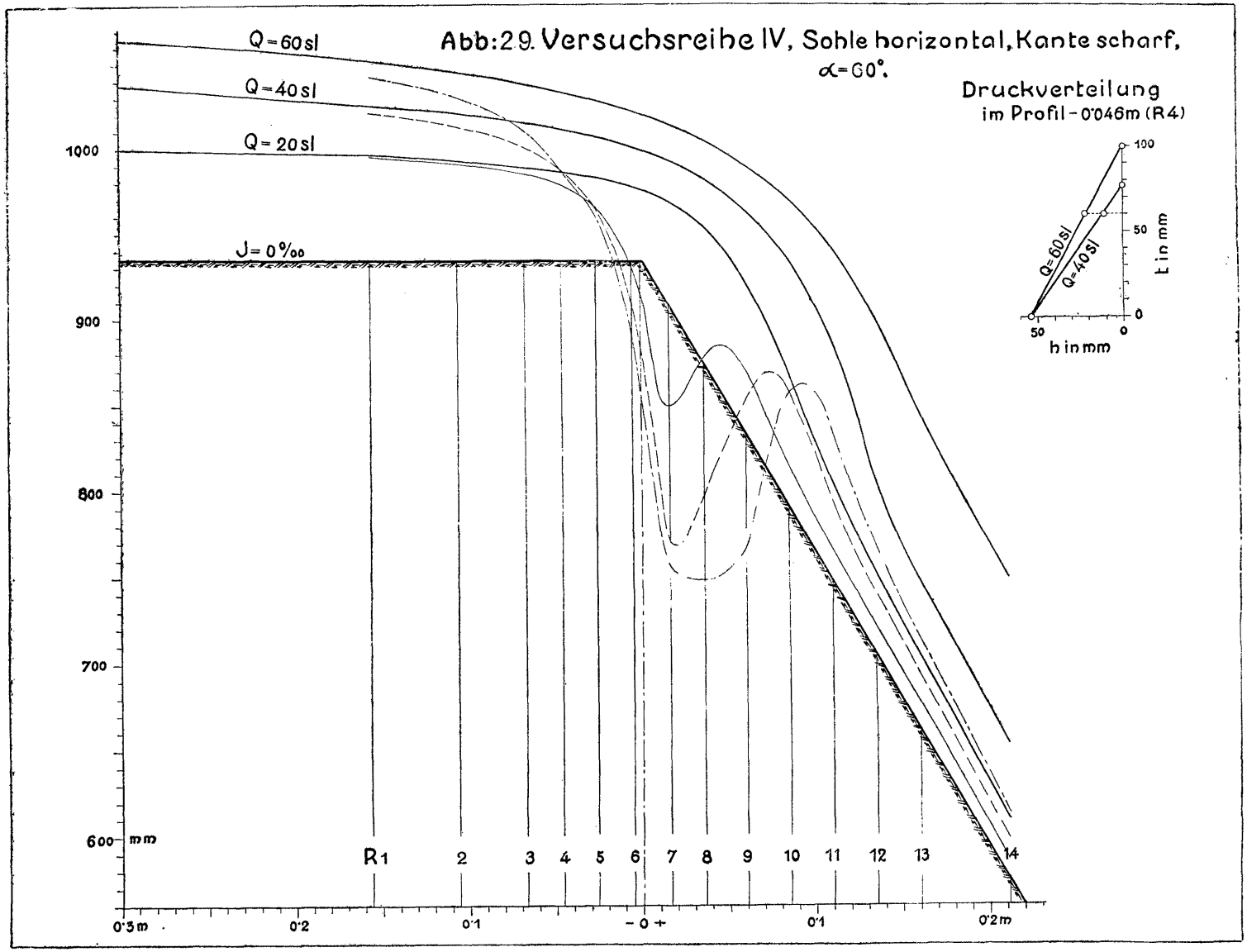


Abb: 29. Versuchsreihe IV, Sohle horizontal, Kante scharf,
α = 60°.
Druckverteilung
im Profil - 0·046m (R4)
Q = 60 sl
Q = 40 sl
Q = 20 sl
J = 0 ‰
1000
900
800
700
600
mm
R1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
0·3m
0·2
0·1
- 0 +
0·1
0·2m
100
50
0
h in mm
50
0
h in mm

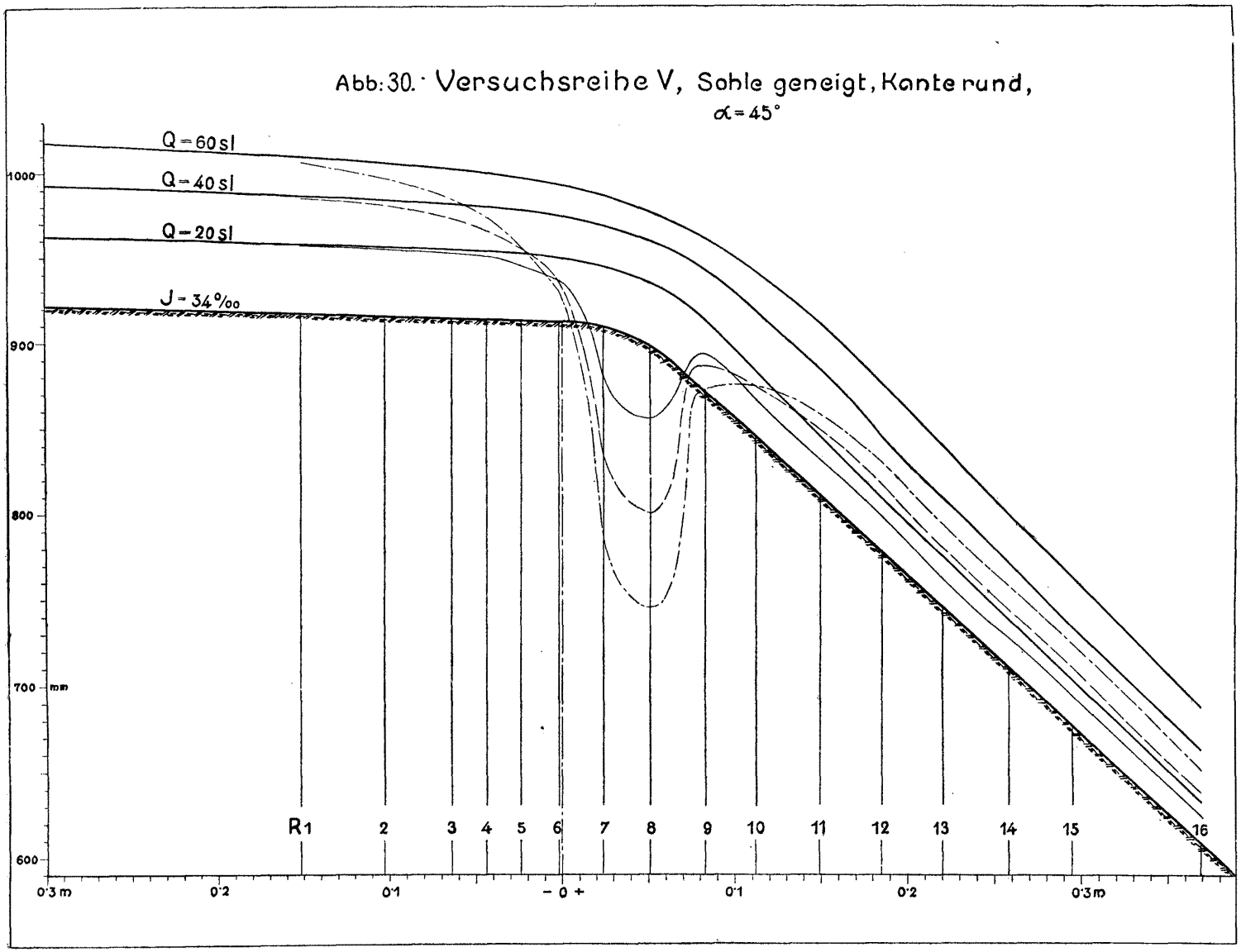


Abb: 30. Versuchsreihe V, Sohle geneigt, Kante rund,
α = 45°
Q = 60 sl
Q = 40 sl
Q = 20 sl
J = 34 ‰
1000
900
800
700
mm
600
R 1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
0·3 m
0·2
0·1
− 0 +
0·1
0·2
0·3 m

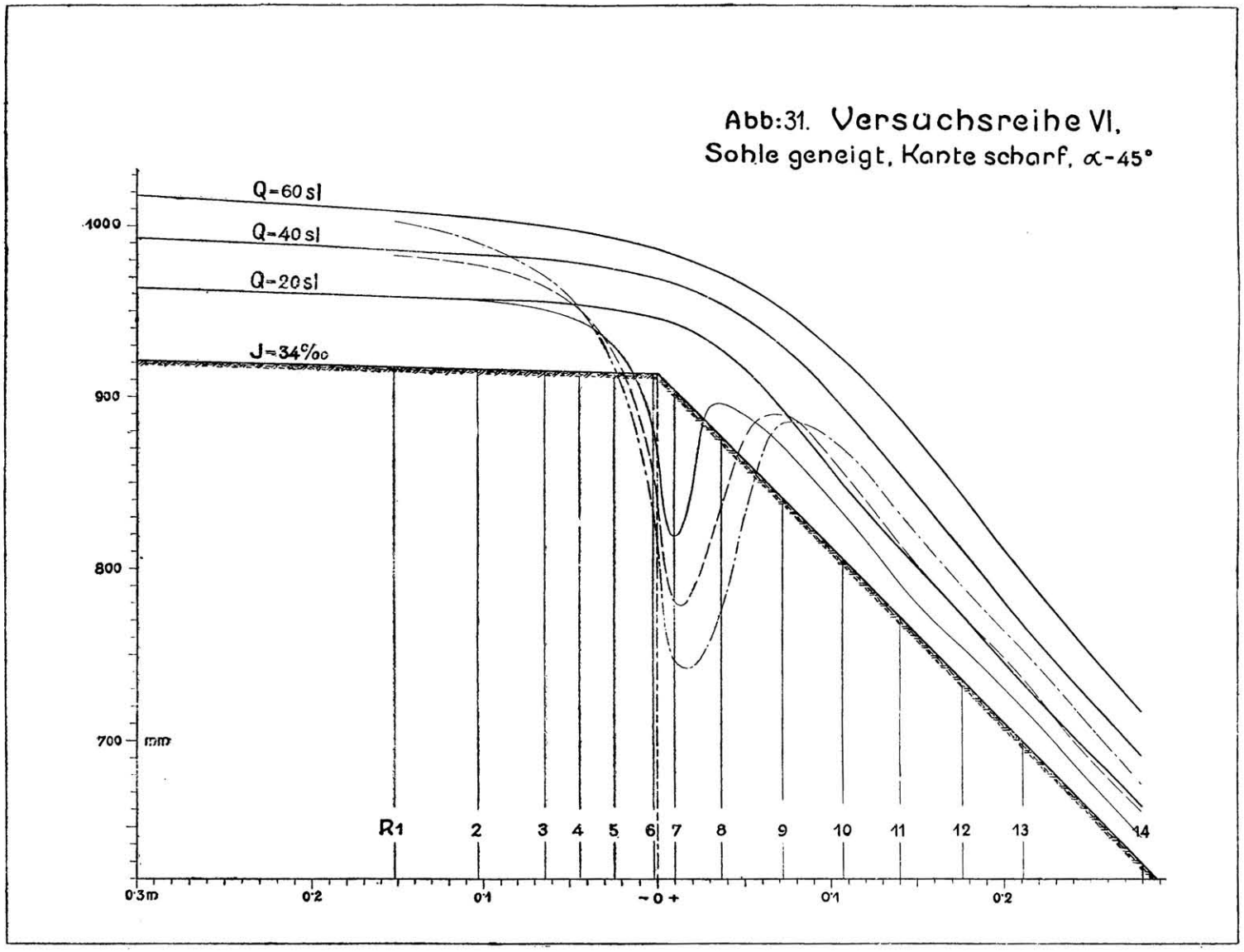


Abb:31. Versuchsreihe VI.
Sohle geneigt, Kante scharf, α-45°
Q=60 sl
Q=40 sl
Q=20 sl
J=34‰
1000
900
800
700
mm
R1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
0·3m
0·2
0·1
-0+
0·1
0·2

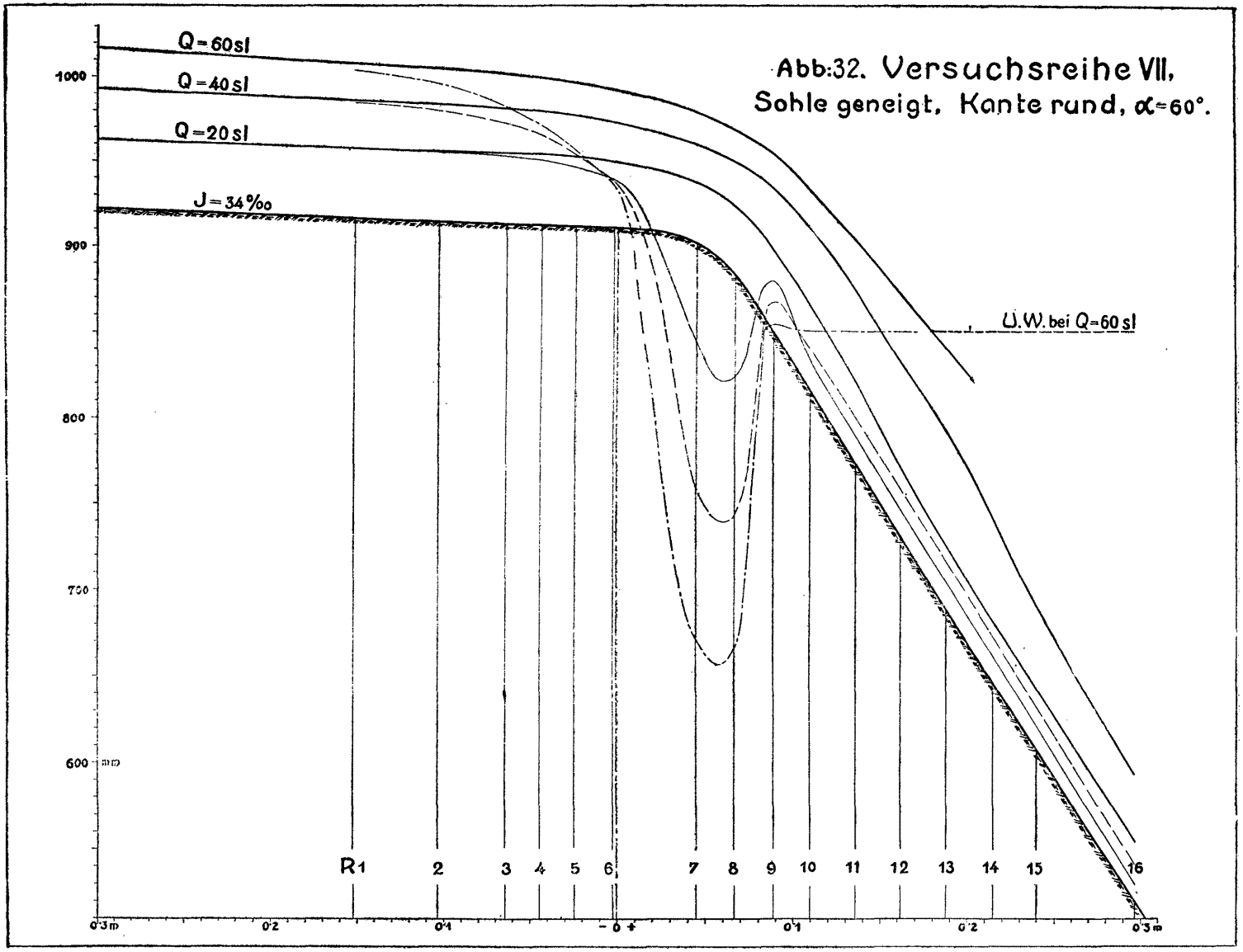


Abb:32. Versuchsreihe VII,
Sohle geneigt, Kante rund, α=60°.
Q=60sl
Q=40sl
Q=20sl
J=34‰
U.W. bei Q=60sl
1000
900
800
700
600
mm
R1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
0·3m
0·2
0·1
- 0 +
0·1
0·2
0·3m

Abb:33. Versuchsreihe VIII, Sohle geneigt, Kante scharf, $\alpha = 60°$

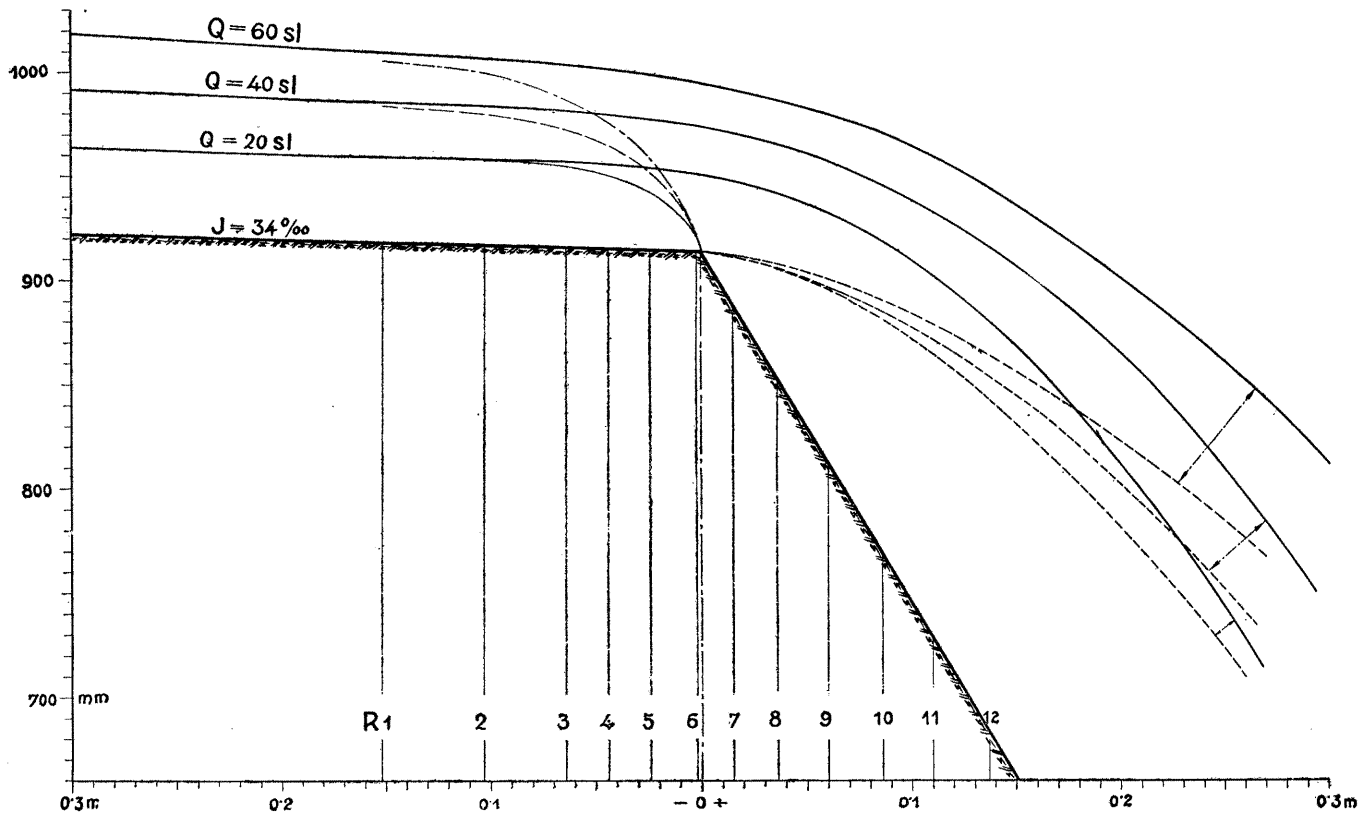


Abb:34. Verlauf d. Wasserdrücke entlang der Sohle, Versuchsreihe I.

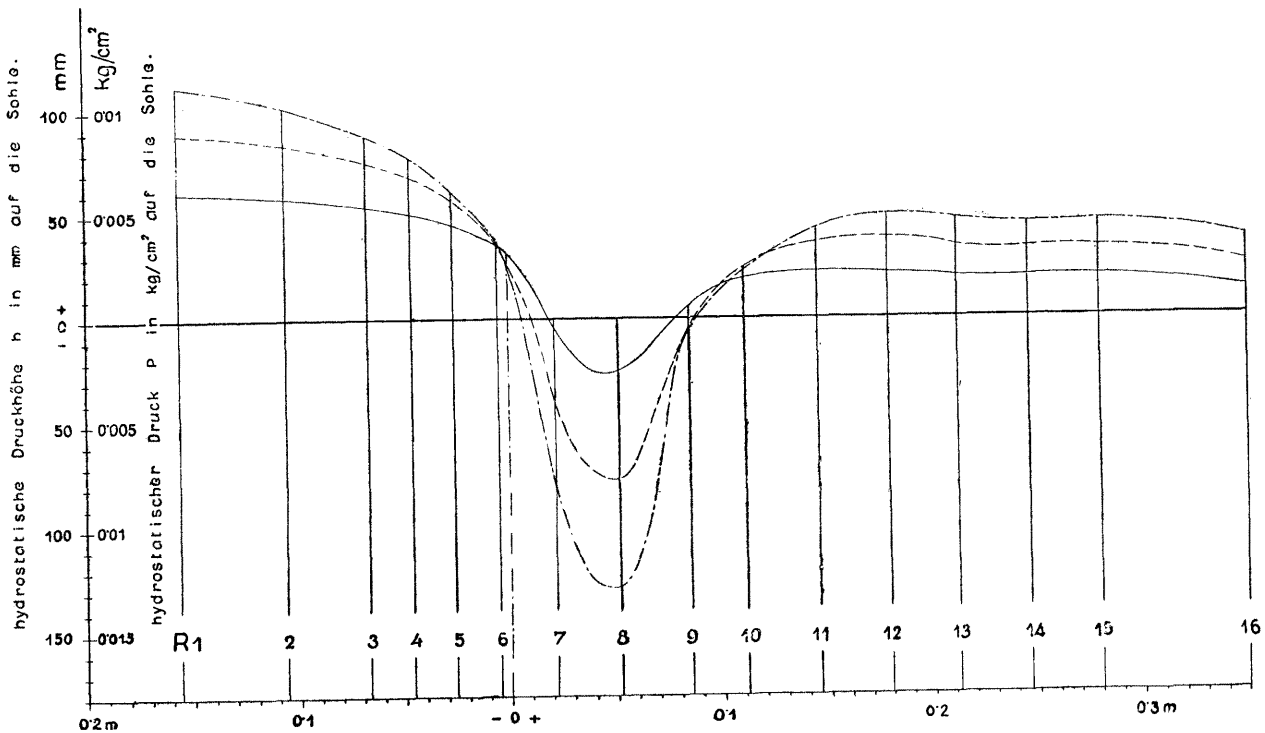
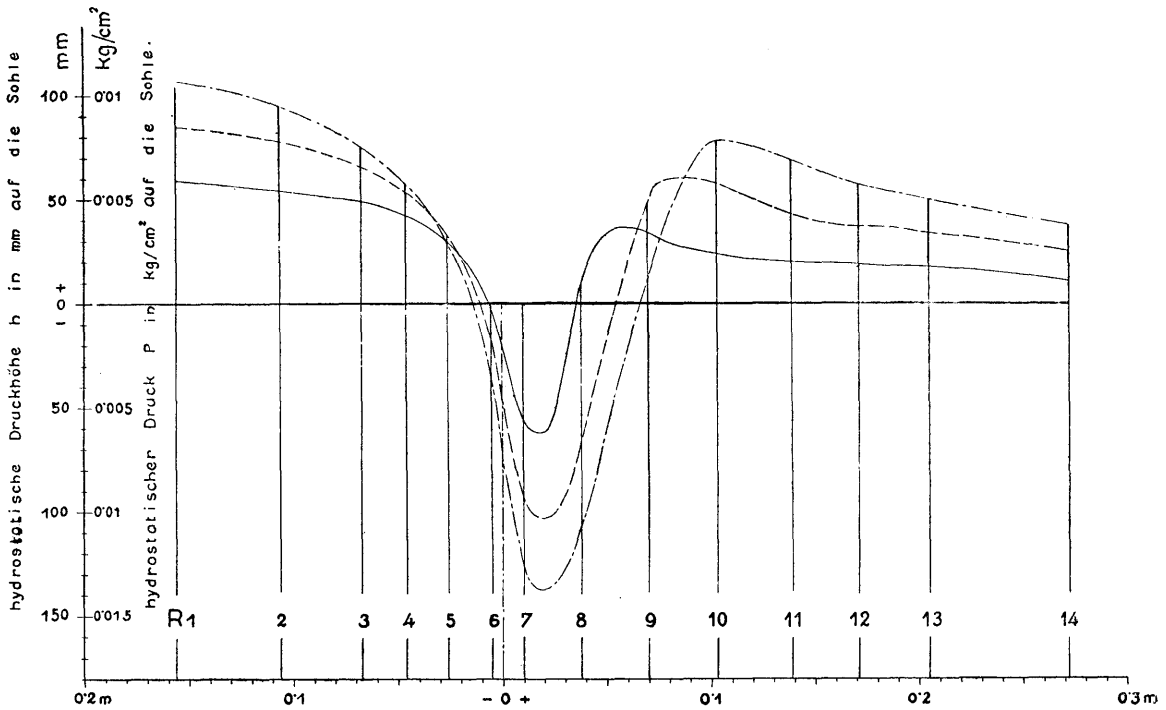


Abb:35. Verlauf d. Wasserdrücke entlang der Sohle, Versuchsreihe II



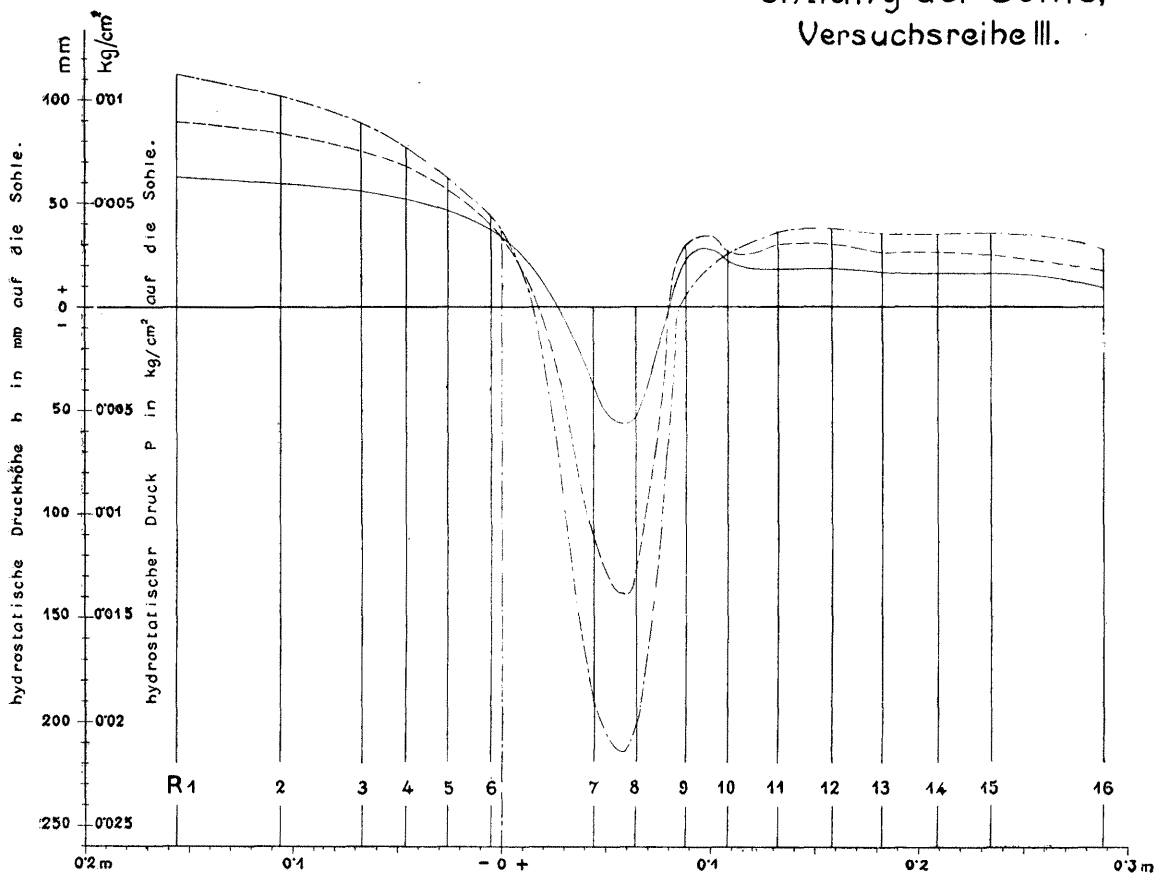


Abb:36. Verlauf d. Wasserdrücke entlang der Sohle, Versuchsreihe III.

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

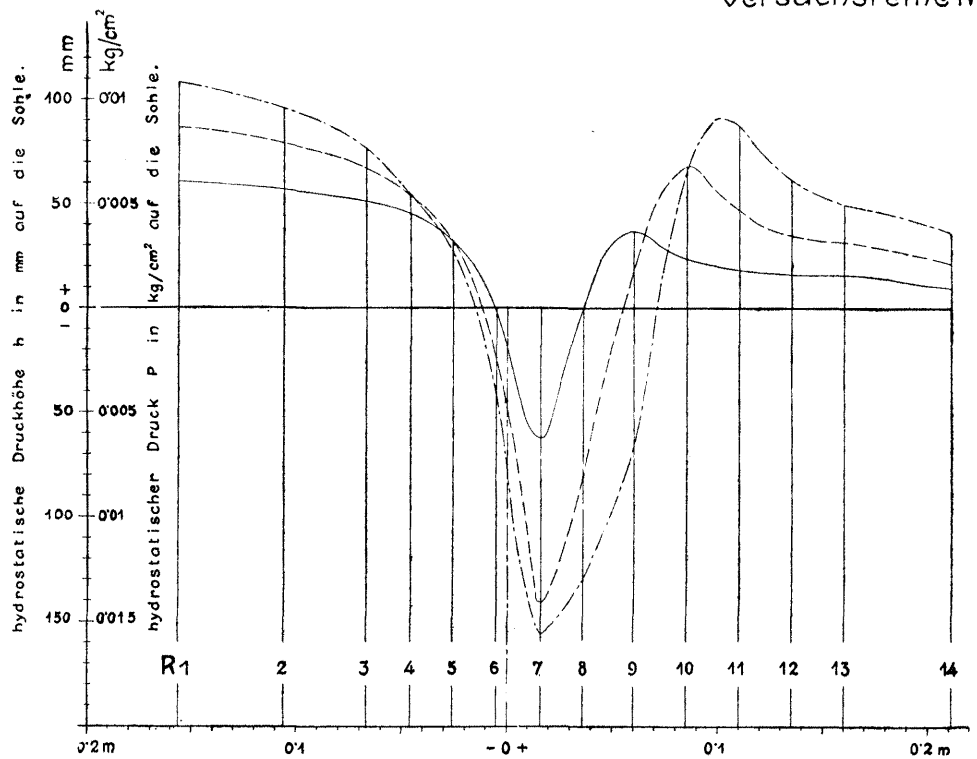
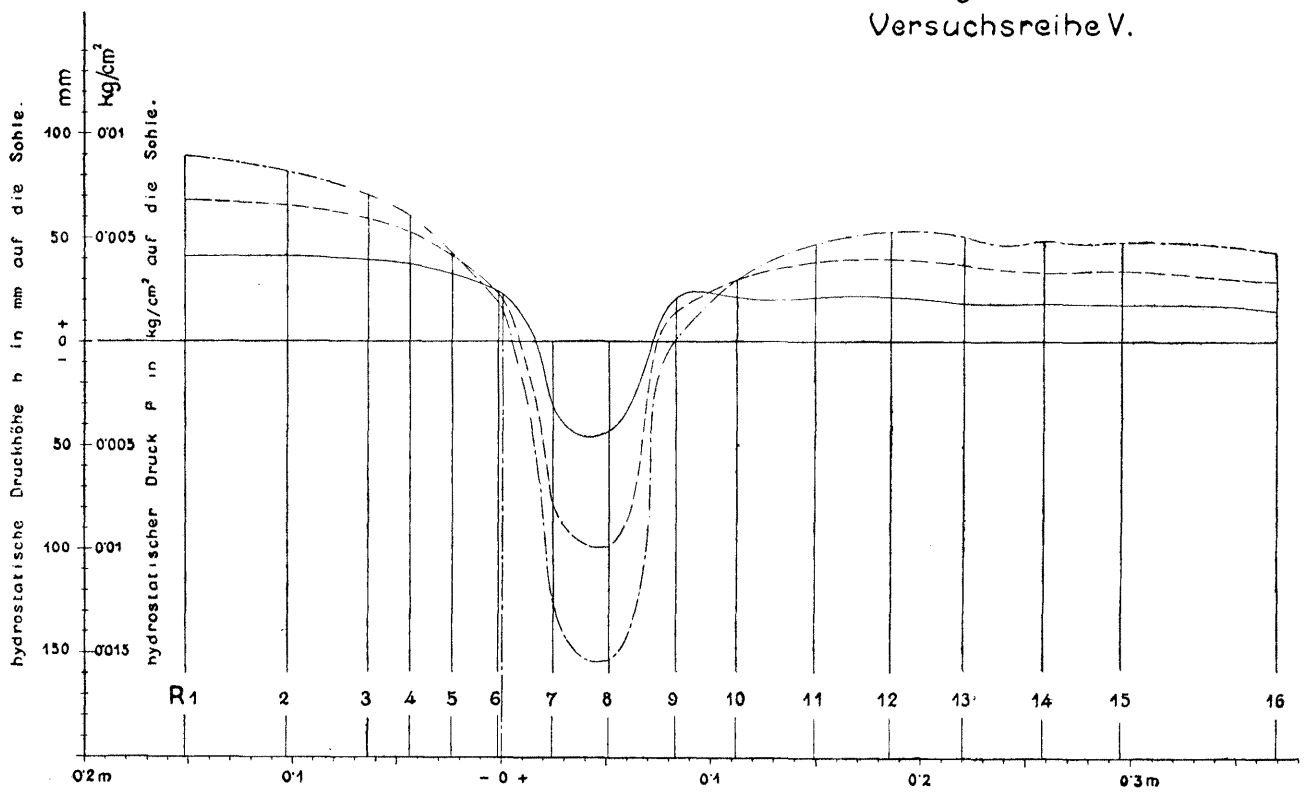


Abb:38. Verlauf d. Wasserdrücke entlang der Sohle, Versuchsreihe V.



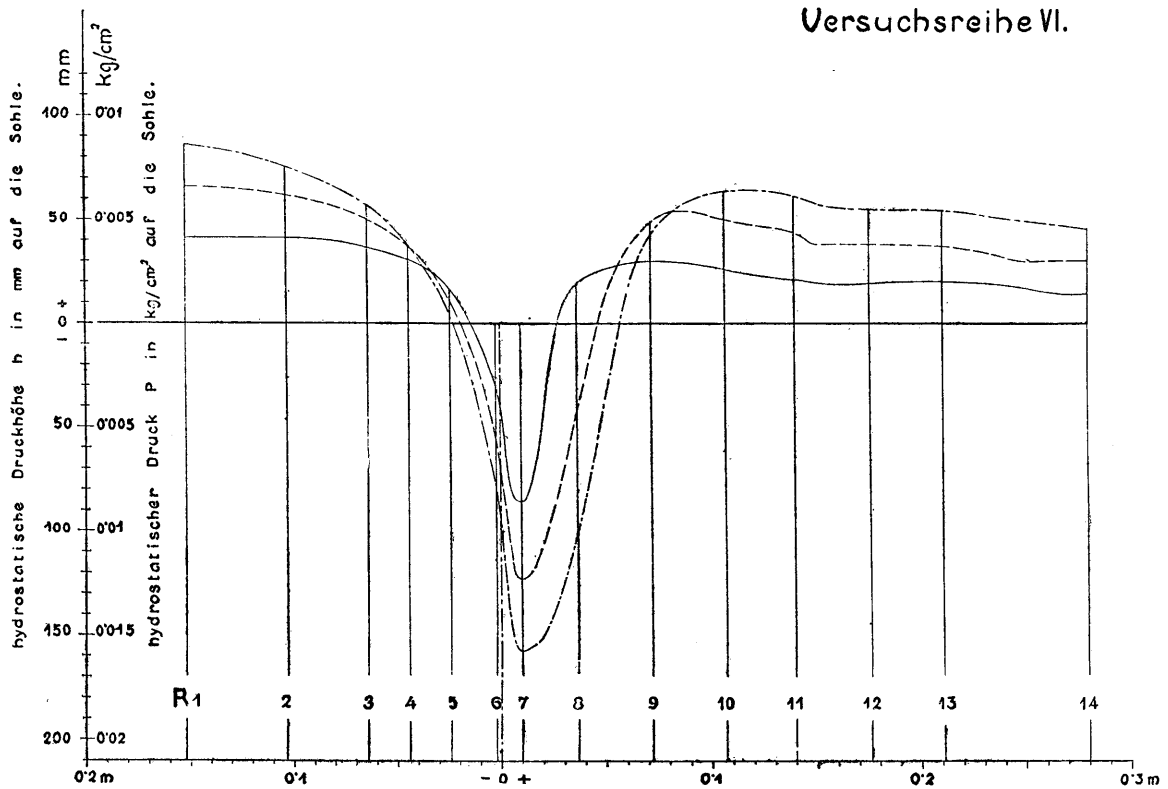


Abb:39. Verlauf d. Wasserdrücke entlang der Sohle, Versuchsreihe VI.

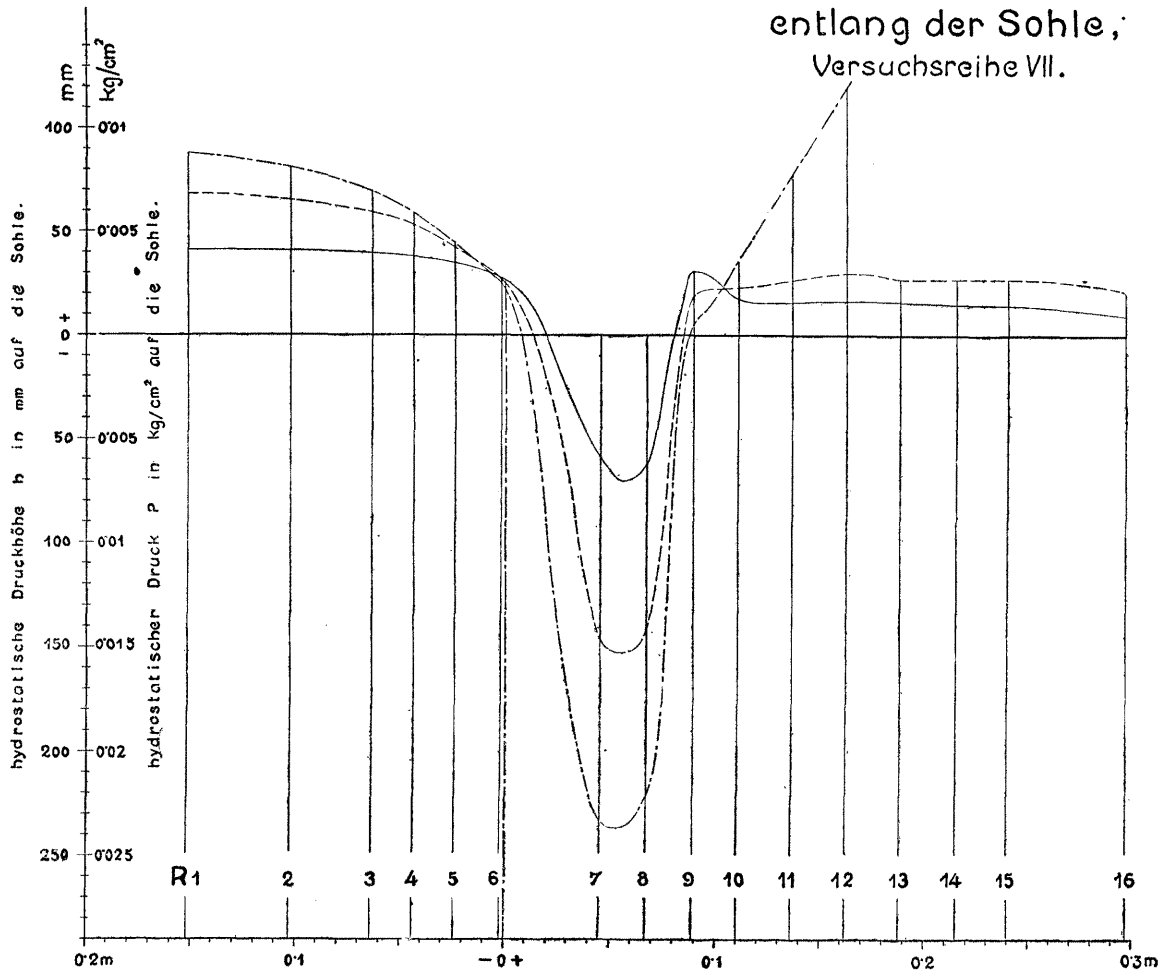


Abb:40. Verlauf d. Wasserdrücke
entlang der Sohle,
Versuchsreihe VII.
hydrostatische Druckhöhe h in mm auf die Sohle.
hydrostatischer Druck P in kg/cm² auf die Sohle.
mm
kg/cm²
100
50
0
50
100
150
200
250
0·01
0·005
0·005
0·01
0·015
0·02
0·025
R1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
0·2m
0·1
−0+
0·1
0·2
0·3m

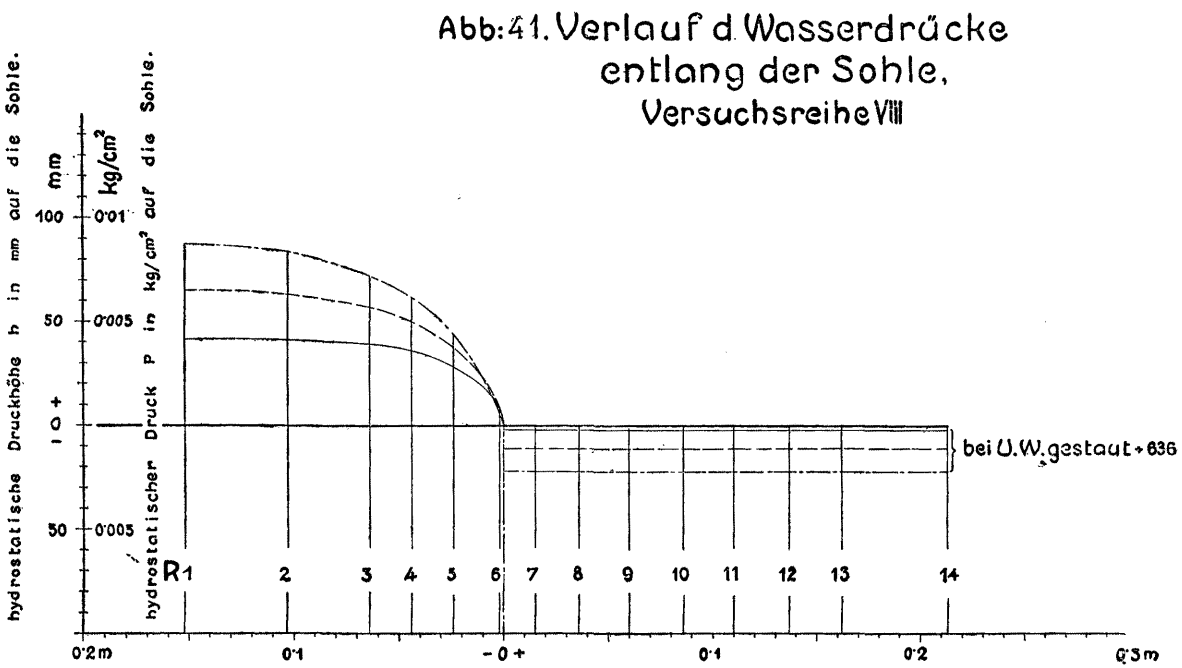


Abb: 41. Verlauf d. Wasserdrücke
entlang der Sohle,
Versuchsreihe VIII
hydrostatische Druckhöhe h in mm auf die Sohle.
mm
100
50
+ 0
50
hydrostatischer Druck P in kg/cm² auf die Sohle.
kg/cm²
0·01
0·005
0·005
R1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
bei U.W. gestaut + 636
0·2 m
0·1
- 0 +
0·1
0·2
0·3 m

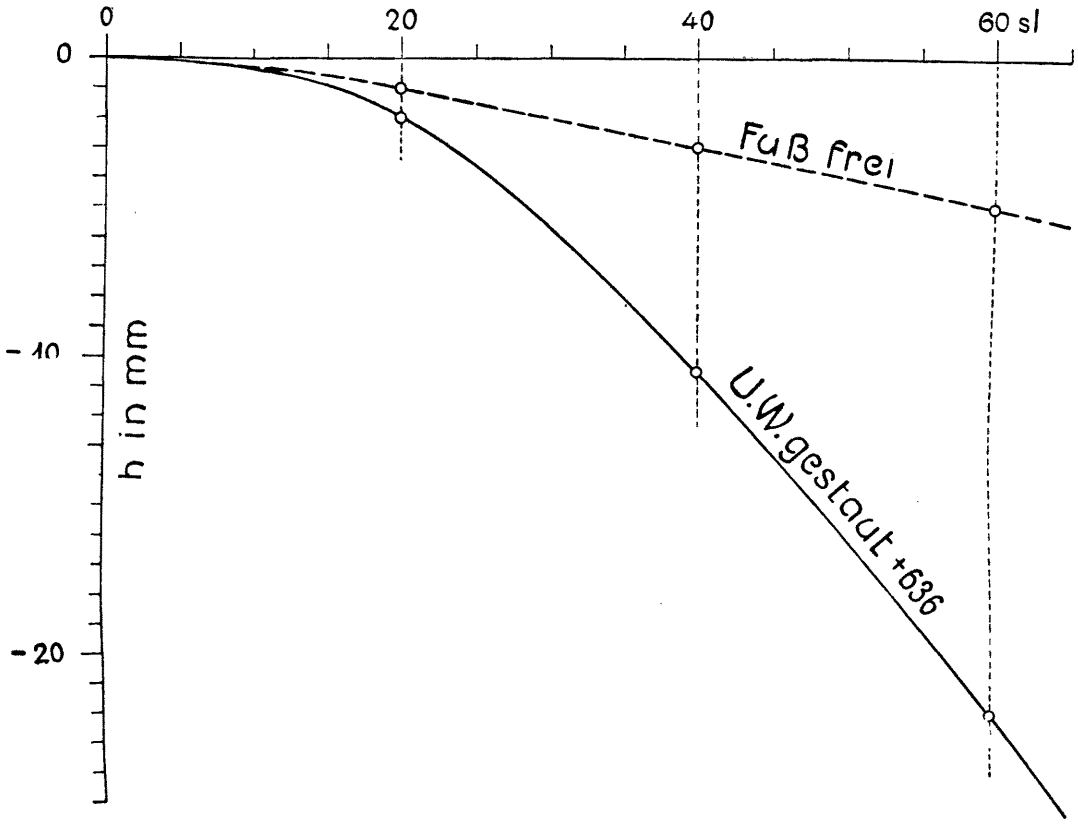
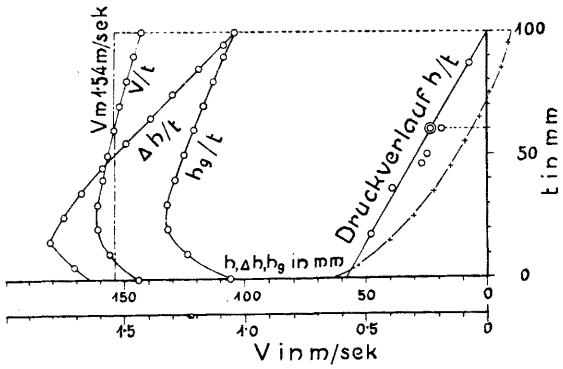


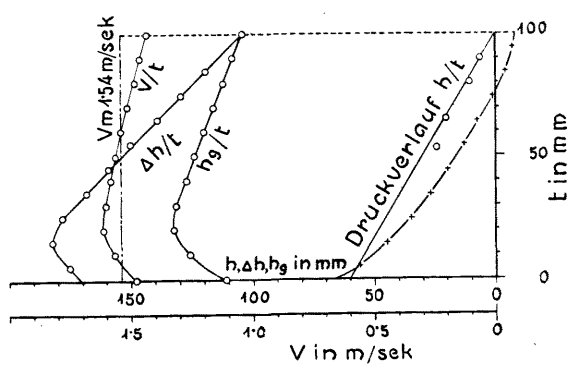
Abb. 42. Unterdrücke h im Zwischenraum zwischen Wehrreücken und Wasserstrahl; Versuchsreihe VIII.



Druckverlauf bei Düse parallel zu den Stromfäden.

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/sek.



Druckverlauf bei Düse parallel zu den Stromfäden.

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/sek.

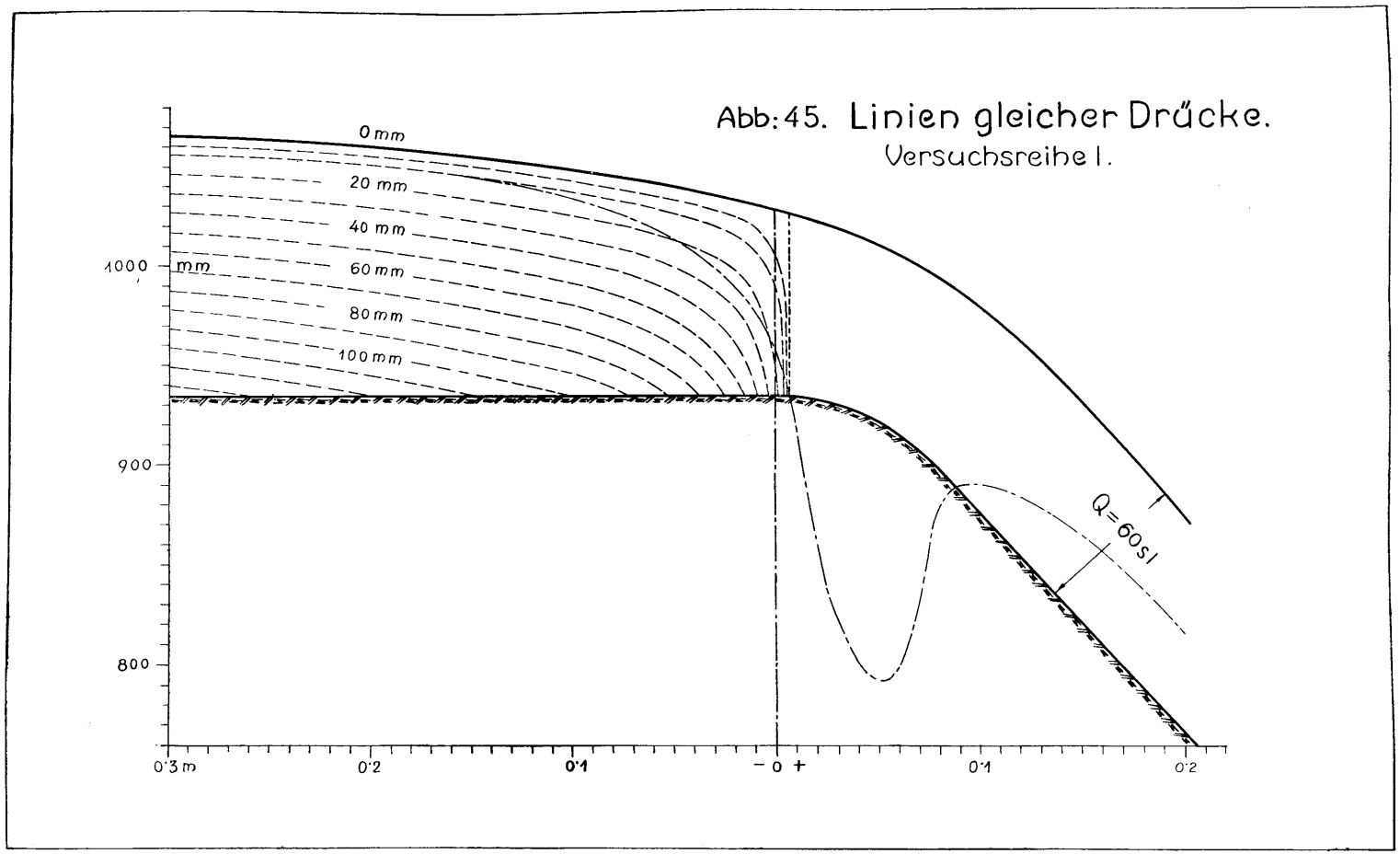


Abb: 45. Linien gleicher Drücke.
Versuchsreihe I.
0 mm
20 mm
40 mm
60 mm
80 mm
100 mm
1000 mm
900
800
Q=60 sl
0·3 m
0·2
0·1
− 0 +
0·1
0·2

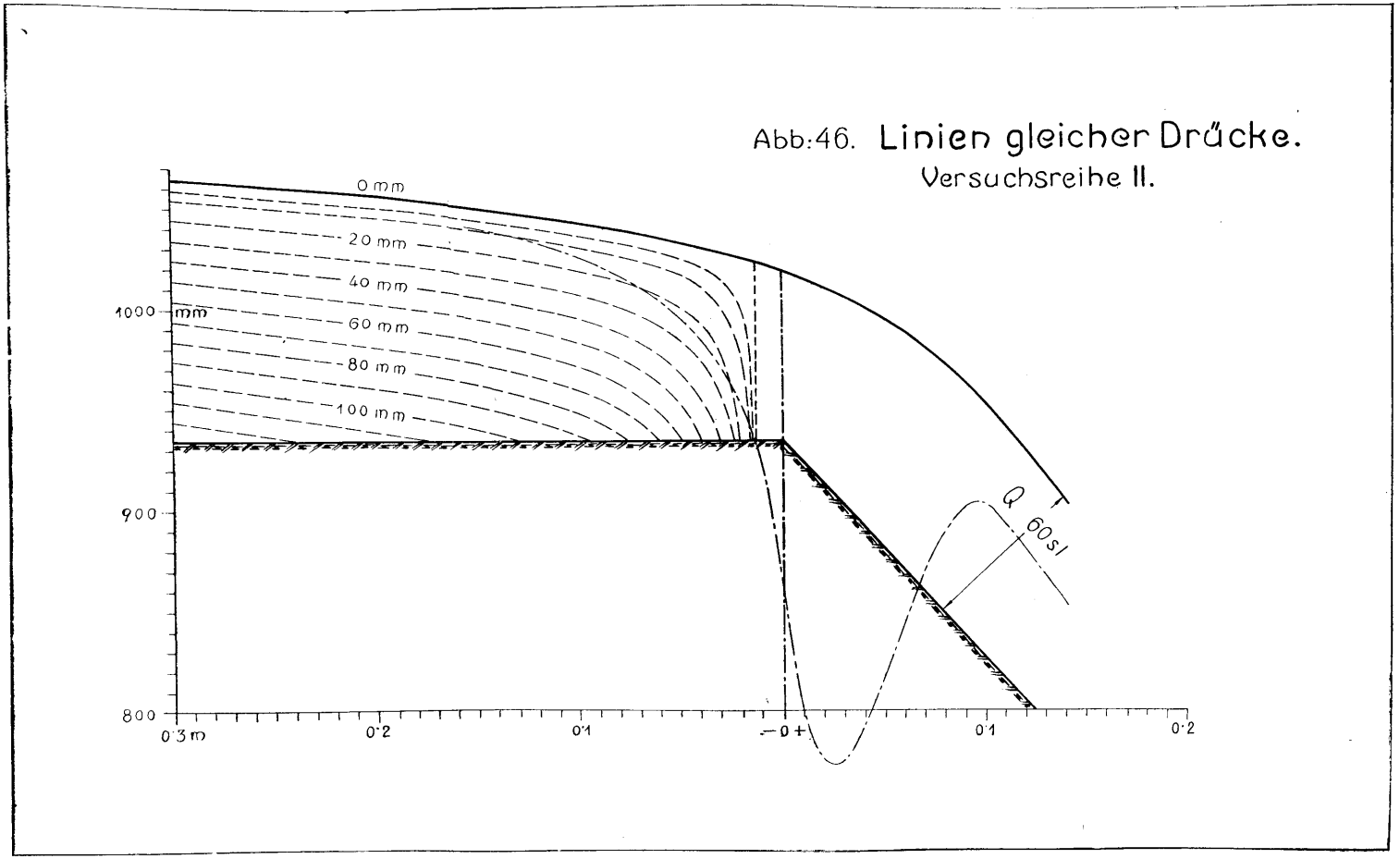


Abb:46. Linien gleicher Drücke.
Versuchsreihe II.
0 mm
20 mm
40 mm
60 mm
80 mm
100 mm
1000 mm
900
800
0·3 m
0·2
0·1
— 0 +
0·1
0·2
Q 60 sl

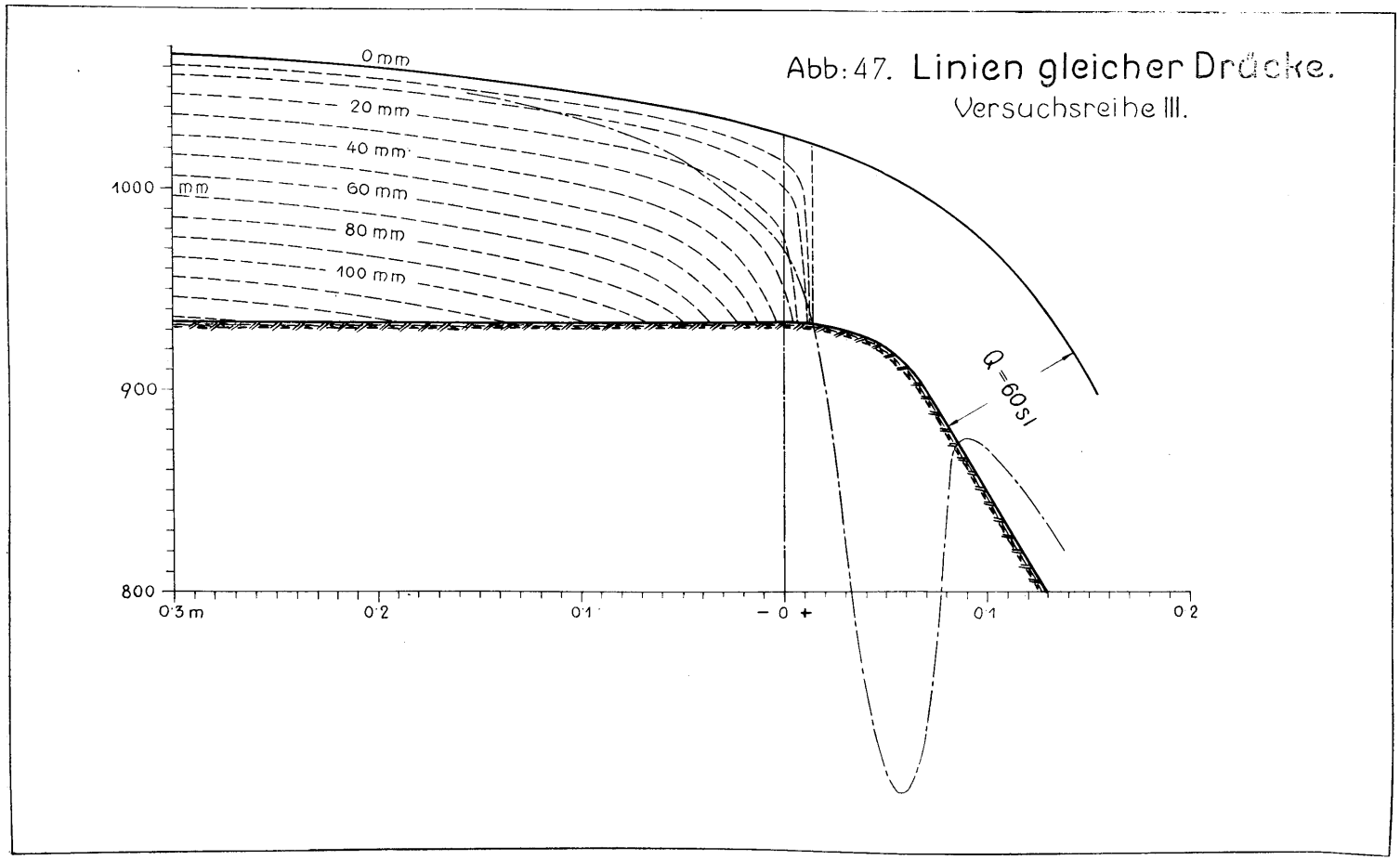


Abb: 47. Linien gleicher Drücke.
Versuchsreihe III.
0 mm
20 mm
40 mm
60 mm
80 mm
100 mm
mm
1000
900
800
0·3 m
0·2
0·1
− 0 +
0·1
0·2
Q=60 sl

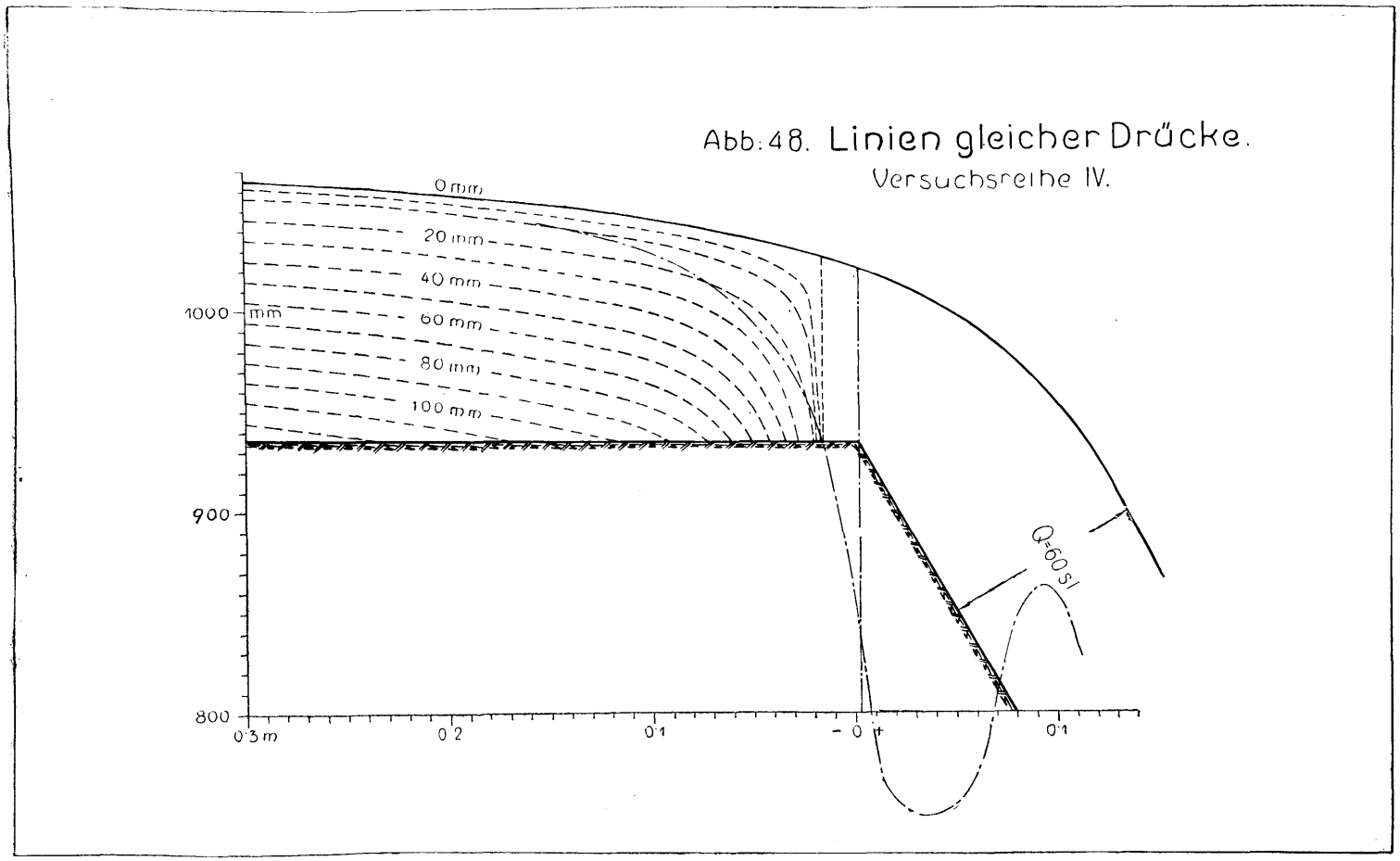


Abb. 48. Linien gleicher Drücke.
Versuchsreihe IV.
0 mm
20 mm
40 mm
60 mm
80 mm
100 mm
1000 mm
900
800
0·3 m
0·2
0·1
- 0 +
0·1
Q=60 sl

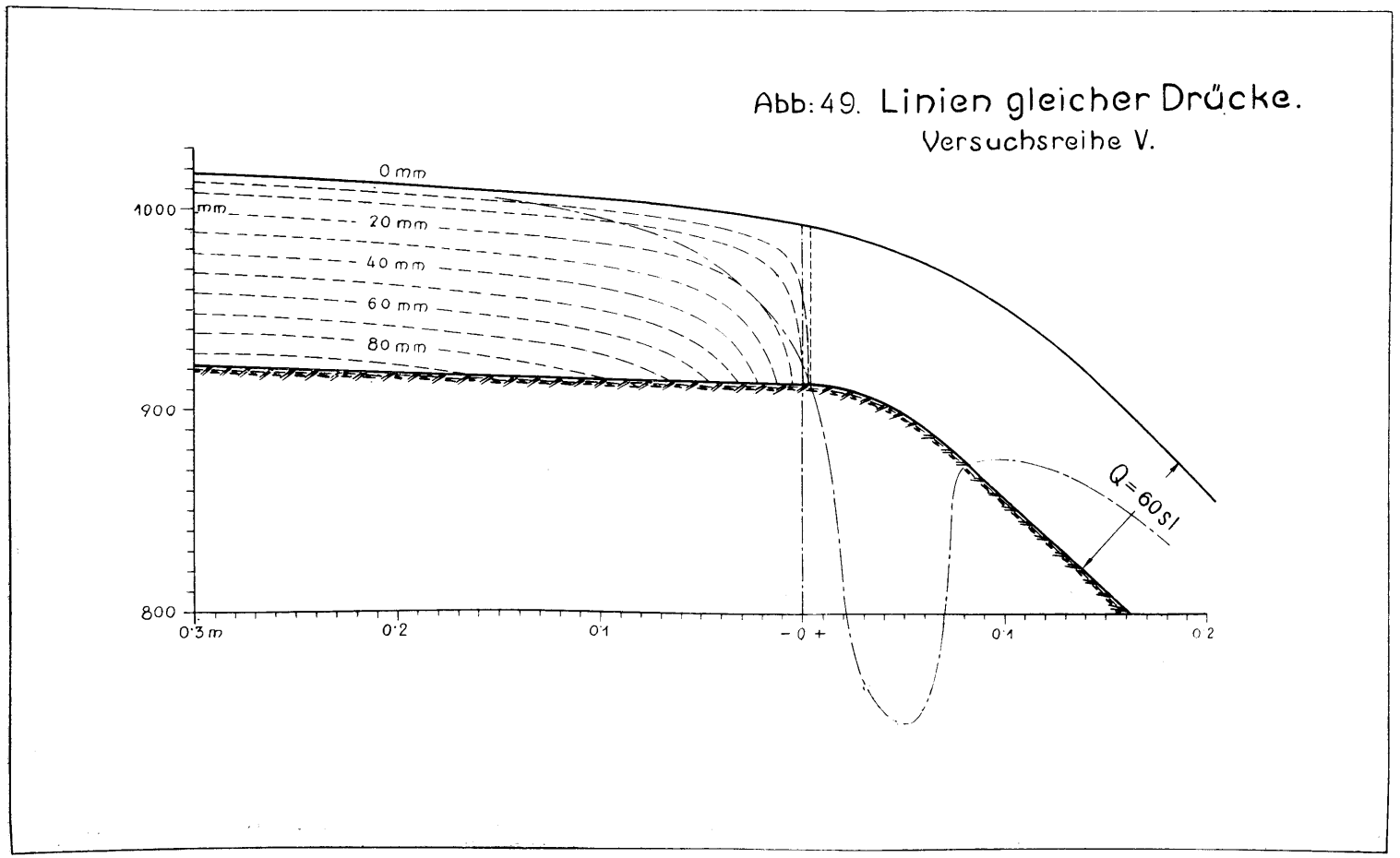


Abb: 49. Linien gleicher Drücke.
Versuchsreihe V.
0 mm
20 mm
40 mm
60 mm
80 mm
1000 mm
900
800
0·3 m
0·2
0·1
- 0 +
0·1
0·2
Q = 60 sl

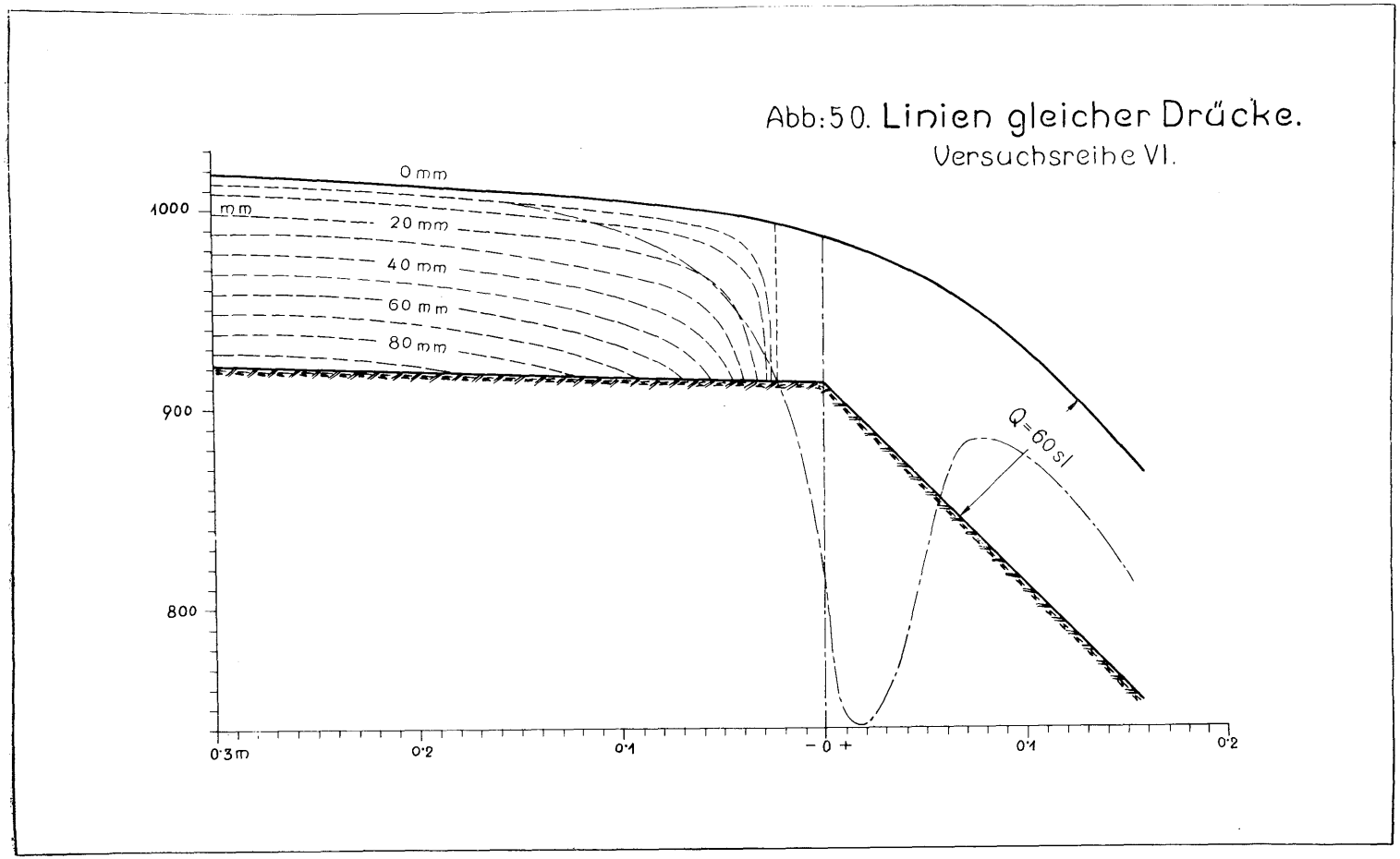


Abb: 50. Linien gleicher Drücke.
Versuchsreihe VI.
0 mm
20 mm
40 mm
60 mm
80 mm
mm
1000
900
800
Q=60 sl
0·3m
0·2
0·1
− 0 +
0·1
0·2

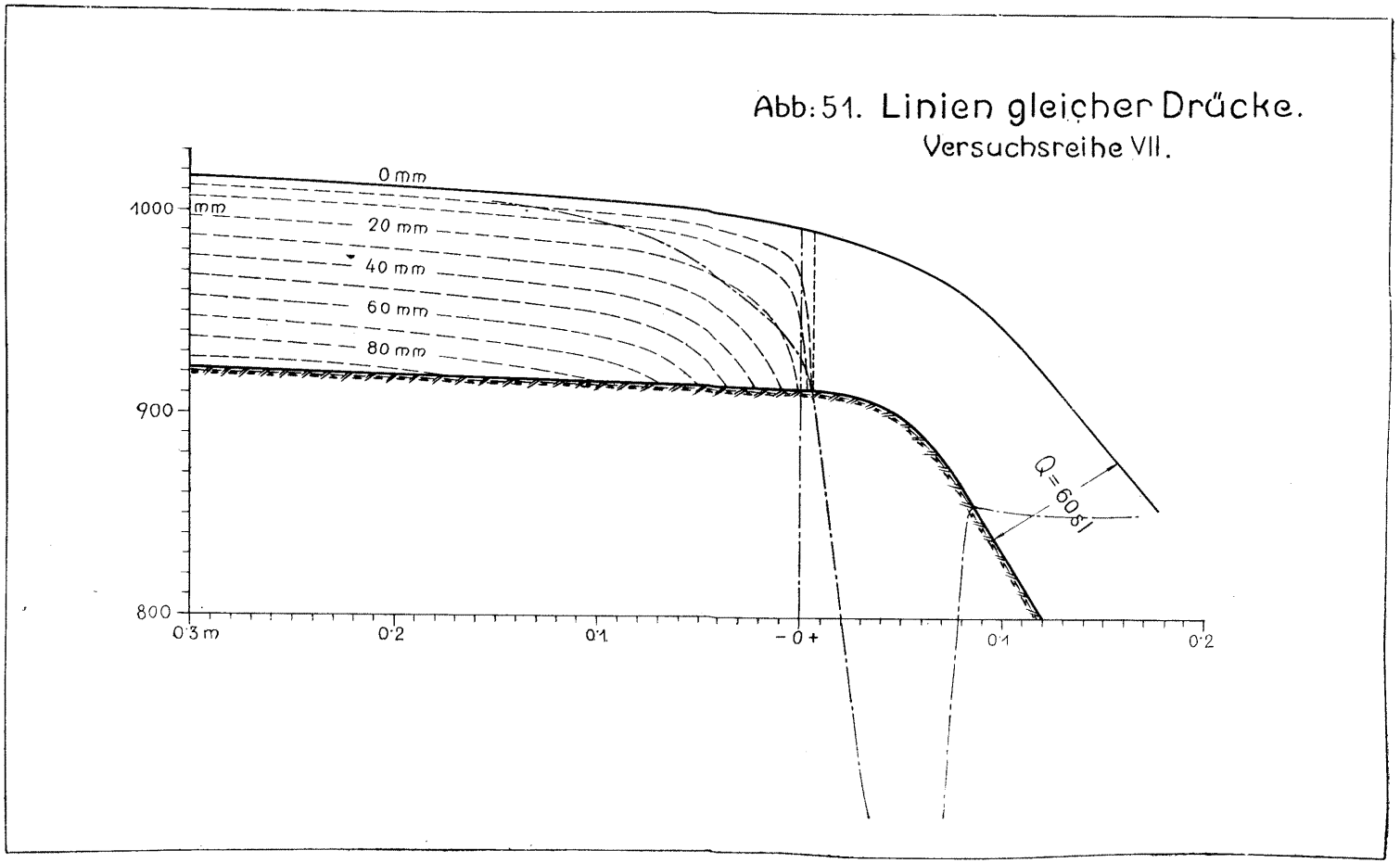
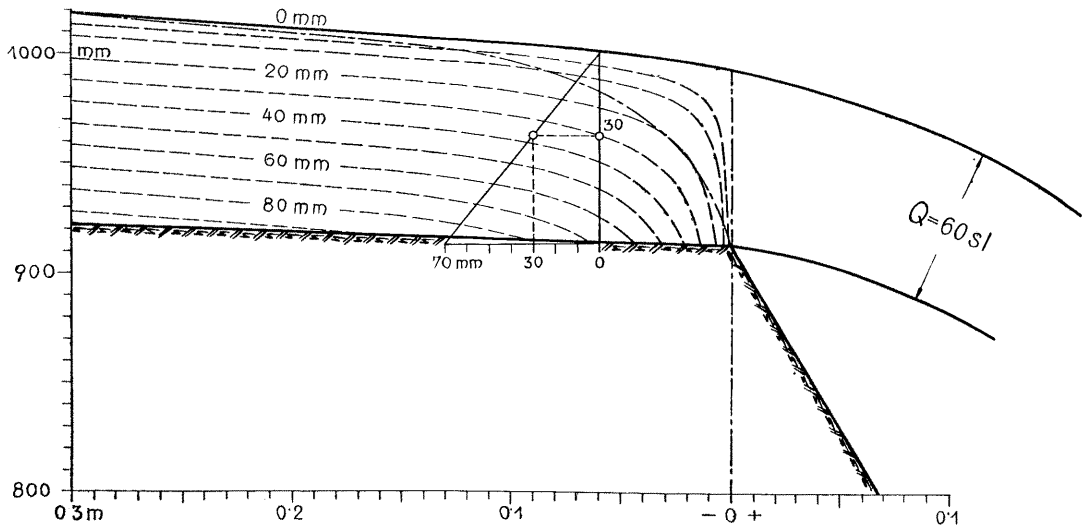


Abb: 51. Linien gleicher Drücke.
Versuchsreihe VII.
0 mm
20 mm
40 mm
60 mm
80 mm
1000 mm
900
800
0·3 m
0·2
0·1
- 0 +
0·1
0·2
Q = 60 sl

Abb:52. Linien gleicher Dräcke.
Versuchsreihe VIII.



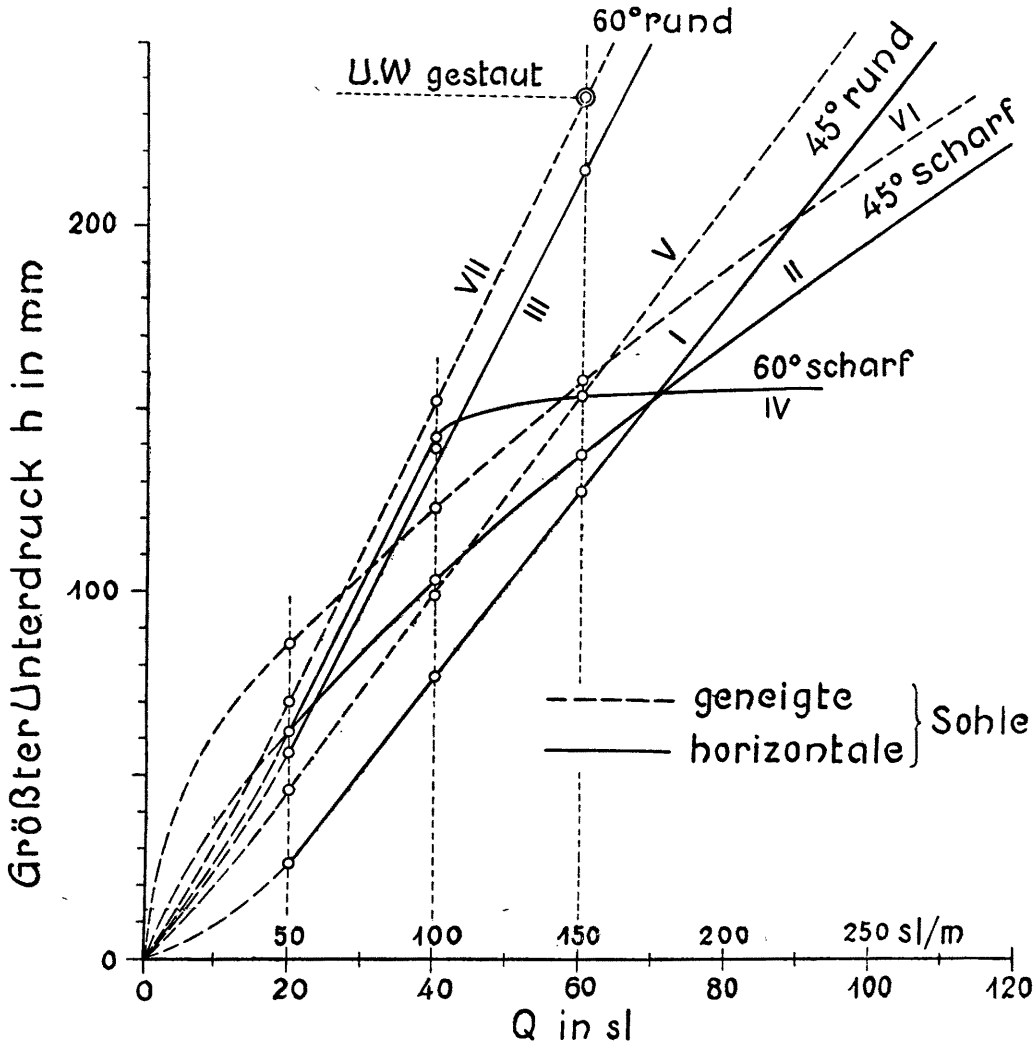


Abb. 53. Beziehung zwischen den maximalen Unterdrücken (nächst Wehrkrone) und den sekundlichen Wassermengen.