

Kolkbildung bei Überfall und Unterströmen

VON DER
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN
HOCHSCHULE IN ZÜRICH

ZUR ERLANGUNG
DER WÜRDE EINES DOKTORS DER
TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

GENEHMIGTE
PROMOTIONSARBEIT

VORGELEGT VON
WILLY EGGENBERGER
dipl. Ing. E. T. H.

aus Grabs (Kt. St. Gallen)

Referent: Herr Prof. Dr. E. Meyer-Peter
Korreferent: Herr Prof. Dr. H. Favre



Zürich 1943 Diss.-Druckerei A.-G. Gebr. Leemann & Co.
Stockerstraße 64

**Die Versuche sind in der Versuchsanstalt für Wasserbau
an der E. T. H. Zürich durchgeführt worden.**

**Erscheint als Teildruck zu Nr. 5 der
„Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau an der
Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich“
Herausgegeben von Prof. Dr. E. Meyer-Peter**

MEINEN LIEBEN ELTERN
IN DANKBARKEIT GEWIDMET

Leer - Vide - Empty

Vorwort

Es sei mir gestattet, an dieser Stelle allen denen, die es mir möglich gemacht haben, diese Arbeit durchzuführen, meinen aufrichtigsten Dank auszusprechen.

Vor allem danke ich meinem sehr verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. *E. Meyer-Peter* für das rege Interesse, das er dieser Arbeit angedeihen ließ und Herrn dipl. Ing. *R. Müller*, Chef der hydraulischen Abteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, für die wertvolle Unterstützung bei der Ausbildung der Versuchstechnik.

Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr. *H. Favre*, dem Korreferenten, für die Übernahme des Referates.

Willy Eggenberger.

Leer - Vide - Empty

Inhaltsverzeichnis

Seite

Einleitung	9
I. Kapitel	
1. Bisher bekannte Literatur	10
2. Kritik	13
II. Kapitel	
1. Programm der Versuche	14
2. Maßstabsfrage	15
3. Beschreibung der Versuchsanlage	17
a) Allgemeines	17
b) Eichung der Modellschützen	22
III. Kapitel	
1. Messungen	23
a) Grundsätzliche Überlegungen	23
b) Versuchstechnik zur Bestimmung der maximalen Kolk­ tiefe unter Berücksichtigung des Abriebes	24
2. Resultate	30
a) Überströmen	30
b) Kombination Überströmen-Unterströmen	40
c) Einfluß von Geschiebemischungen	45
IV. Kapitel	
1. Ähnlichkeit der Modellversuche	49
2. Kontrollversuche zur Überprüfung des Froude'schen Ähnlichkeits- gesetzes	51
3. Kontrolle der Formeln von Schoklitsch, Veronese und Jaeger hinsichtlich ihres Aufbaus	52
V. Kapitel	
1. Zusammenstellung der Resultate	53
a) Kolk­tiefe	53
b) Form des Kolkes	55
2. Schlußfolgerungen	59
Literaturverzeichnis	60

Leer - Vide - Empty

Einleitung

Wo Wasser über ein Bauwerk oder eine steile Felswand des Flußbettes abstürzt, trifft es das Flußbett mit großer Bewegungsenergie in der Regel unter einem steilen Winkel; wenn die Sohle an dieser Stelle aus beweglichem Material (Geschiebe) oder nicht sehr festem Fels besteht, so wird sie ausgekolkt. Der Überfallstrahl taucht bis auf den Boden des Kolkes und wird dort flußabwärts umgelenkt. Vor und hinter diesem Strahl entsteht je eine große Walze (siehe Abb. 10); die hinter dem Strahl, also flußaufwärts desselben, liegende spült die Sohle flußaufwärts aus und bewirkt die Unterspülung von Bauwerken bzw. der steilen Wand an Wasserfällen. Wenn diese Unterspülung weit genug fortgeschritten ist, bewirkt sie den Einsturz des Bauwerkes bzw. das Nachbrechen der Felswand an Wasserfällen, was schließlich zu dem vielfach beobachteten Flußaufwärtswandern der Wasserfälle führt.

Die Kolkbildung unter einem Wehr und seine Verhütung beschäftigte seit Jahren zahlreiche in der Praxis stehende Ingenieure und auch Versuchsanstalten.

Die meisten neueren größeren Wehranlagen des In- und Auslandes wurden auf Grund von Modellversuchen, die den Zweck der Kolkverhütung verfolgten, geformt. Diese Versuche gaben eine Lösung für einen Einzelfall, aber keine allgemein gültigen Regeln; sie waren nicht hinreichend systematisch ausgeführt. Es wurde lediglich festgestellt, daß ohne besondere Vorkehrungen am Fuße des Bauwerkes tiefe Auskolkungen zu befürchten sind, die die Standsicherheit des Bauwerkes gefährden können. Bevor aber die Zweckmäßigkeit eventueller baulicher Maßnahmen beurteilt werden kann, muß der Vorgang, der sich bei der Kolkbildung ohne besonderen Kolkschutz abspielt, klargestellt werden.

Der versuchstechnisch einfachste Fall liegt vor, wenn ein freier Überfallstrahl die ungeschützte, bewegliche Sohle trifft. In

vielen Fällen der Praxis wird aber auch kombiniertes Über- und Unterströmen mit zusammengezogenen Doppelschützen verwendet. Die vorliegende Arbeit zeigt die systematische Untersuchung:

a) des reinen Überströmens,

b) der Kombination Überfall-Unterströmen,

und berichtet über die Ergebnisse, die diese Versuche gebracht haben.

I. Kapitel

1. Bisher bekannte Literatur

Eine neuere Veröffentlichung über das Problem schrieb A. Schoklitsch im Jahre 1932. (Siehe Literaturverzeichnis [3]*) und [5].) Dieser Verfasser führte viele Hunderte systematischer Versuche über die Kolkbildung und die Kolkabwehr durch.

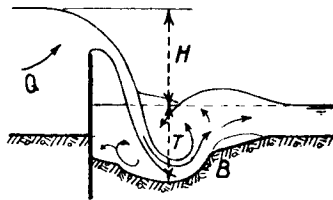


Abb. 1.

Er stellt fest, „daß ein Überfallstrahl, der unmittelbar die ungeschützte, bewegliche Sohle trifft, diese bis auf eine beträchtliche Tiefe ausspülen kann. Unmittelbar unter dem Strahl liegt der „Kolkboden“ (Abb. 1), auf dem der Sohlenangriff erfolgt. Dort wird das Geschiebe aufgewirbelt und in die Höhe gerissen. Zunächst gelangt der größte Teil dieses aufgewirbelten Geschiebes schwebend über die „Kolkböschung“ (B) und wird vom Wasser fortgetragen. Je weiter die Kolkbildung fortgeschritten ist, desto mehr Geschiebe fällt während des schwebenden Transportes auf die Kolkböschung (B) und gleitet wieder auf den Kolkboden zu-

*) Die [] eingeklammerten Zahlen beziehen sich auf die entsprechenden Zahlen im Literaturverzeichnis.

rück. Endlich bildet sich ein Gleichgewichtszustand heraus, bei dem kein Geschiebe mehr über die Kolkböschung hinweggelangt; die Kolkbildung ist beendet. In diesem Beharrungszustand des Kolkes ist aber das Geschiebe noch nicht in Ruhe. Es wird unausgesetzt hochgewirbelt, fällt aber immer wieder auf die Kolkböschung und gleitet wieder auf den Kolkboden zurück. Dieses Kreisen des Geschiebes führt zu einem Abrieb desselben und in dem Maße, als einzelne Geschiebe durch diesen Abrieb wesentlich verkleinert werden, können sie fortgeschleppt werden, während am Kolkboden neue Geschiebe in das Kreisen einbezogen werden. Die Kolkvertiefung ist aber infolge des Geschiebeabriebes so geringfügig, daß sie außer acht gelassen werden kann.“

Da Schoklitsch in der Geschiebegröße einen bedeutenden Einfluß auf die Kolkabmessungen sah, verwendete er zur Durchführung seiner Versuche verschiedene Sandsorten: fünf Sandsorten waren auf möglichst einheitliches Korn ausgesiebt, drei waren natürliche Gemische. Mit jeder Sandsorte führte er mehrere Versuchsreihen durch, bei denen jedesmal die Wassermenge q pro Meter Wehrbreite konstant gehalten und die Absturzhöhe H verändert wurde. Zur Feststellung des Kolkes genügte die Messung der größten Wassertiefe im Kolk. Die Versuchsergebnisse wurden auf logarithmisch geteiltem Papier aufgetragen und ergaben die bekannte Formel

$$T = \frac{4,75}{d_m^{0,32}} \cdot H^{0,2} \cdot q^{0,57} \quad (1)$$

wobei nach Abb. 1

T = maximale Kolkwassertiefe in m

H = Absturzhöhe in m

q = Überfallwassermenge in m^3/secm

d_m = „maßgebender“ Korndurchmesser bei 90 %.

Die Kolkwassertiefe ist definiert als Summe der Kolktiefe (gemessen von ursprünglicher Sohle) + Unterwassertiefe, nach Schoklitsch, Veronese und Jaeger mit T , nach Eggenberger mit $t + h_2$ bezeichnet.

Als maßgebender Korndurchmesser der natürlichen Geschiebe wurde jener angesehen, der die Mischungslinie (Abb. 14) derart

scheidet, daß 90 % der Körner (Gewichtsanteil) kleiner, der Rest größer ist.

Im Jahre 1937 veröffentlichte *A. Veronese* seine in der Versuchsanstalt für Wasserbau in Padua ausgeführten Versuche [7]. Der Verfasser hat ebenfalls den Fall eines in ein freies Becken überfallenden Strahles untersucht. Der Beckenboden war gleichfalls aus einem Gemisch von Kies und Sand gebildet. Seine Formel lautet:

$$T = \frac{3,68}{d^{0,42}} \cdot H^{0,225} \cdot q^{0,54} \quad (2)$$

wobei die gleichen Bezeichnungen gelten wie bei Schoklitsch.

Die Messungen von Veronese bestätigen somit praktisch die Form der Formel von Schoklitsch.

Wie später im Kapitel IV, 3 gezeigt wird, steht sowohl die Formel von Schoklitsch, als auch diejenige von Veronese im Widerspruch zum Froude'schen Gesetz, sodaß die modelltechnische Untersuchung von Kolkproblemen in Frage gestellt blieb, da sie nicht in die Natur übertragbar ist. Immerhin gelang es im Jahre 1939 *Ch. Jaeger* [8], die Formel von Veronese aus den tabellari-schen Zusammenstellungen zu überprüfen und die gemessenen Kolkwassertiefen durch eine Formel auszudrücken, die dem Froude'schen Gesetz gehorcht. Formel (2) läßt sich durch Formel

$$T = a \cdot H^{0,25} \cdot q^{0,5} \cdot \left(\frac{h_2}{d}\right)^\alpha \quad \text{mit } \alpha = \frac{1}{3} \quad \text{und } a = 6 \quad (3)$$

ersetzen, in der T , H und h_2 in m, d in mm und q in m^3/secm auszudrücken sind (h_2 = Wassertiefe flußabwärts des Kolkes; Abb. 2). Nach Jaeger ist jedoch die Anzahl der Versuche zu gering, um eine eindeutige Gesetzmäßigkeit daraus abzuleiten, d. h. er erachtet die Aufstellung dieser Formel aus den Versuchen von Veronese als verfrüht.

Die bestehende Unsicherheit in der Frage, ob Kolkbildungen dem Froude'schen Gesetz gehorchen oder nicht, veranlaßte den Direktor der Versuchsanstalt für Wasserbau an der E. T. H., Prof. Dr. E. Meyer-Peter, die Gesetzmäßigkeit der Kolkbildung durch eigene systematische Versuchsserien abzuklären.

2. Kritik

Die Beschreibung des Kolkvorganges nach Schoklitsch ist grundsätzlich richtig.

Bei der Kolkbildung durch Überfall und Unterströmen wird das vorhandene Geschiebe durch die Energie des Wassers hochgewirbelt und gelangt teilweise in schwebendem Zustand über die Kolkböschung hinaus; teilweise aber bleibt es auf der Kolkböschung liegen und gleitet wieder auf den Kolkboden zurück, wo es erneut auf die Kolkböschung hochgewirbelt wird. Es entsteht ein unausgesetzter Kreislauf des Geschiebes, der naturgemäß zu einem Abrieb desselben führt. Durch diesen Abrieb wird das Geschiebe verkleinert, vom Wasser fortgeschleppt, und es wird am Kolkboden neues in das Kreisen einbezogen.

Schoklitsch und auch *Veronese* sind der Ansicht, daß durch den Geschiebeabrieb keine wesentliche Kolkvertiefung entstehe. Sie haben deshalb den Abrieb vernachlässigt.

In den in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Versuchen wurde der Abrieb des Geschiebes berücksichtigt; es zeigte sich, daß durch ihn bedeutend größere Kolkiefen entstehen können. Selbstverständlich konnte in den Versuchen nicht der natürliche Abrieb abgewartet werden. Seine Berücksichtigung erfolgte durch eine Anpassung der Versuchstechnik, indem das den beschriebenen Kreislauf ausführende Geschiebe solange künstlich entfernt wurde, bis der Kreislauf aufhörte. In diesem Grenzzustand traten nur noch leichte Geschiebebewegungen an Ort auf, die praktisch keinen Abrieb mehr zur Folge haben können. Diese später eingehend beschriebene Versuchstechnik bestand darin, das im Kreislauf befindliche Geschiebe nicht so herauszunehmen, daß der Kolk künstlich vertieft wurde, sondern nur auf der Kolkböschung, so daß sich die Kolkvertiefung selber doch auf natürliche Weise vollzog.

II. Kapitel

1. Programm der Versuche

Es wurde dem Verfasser die Aufgabe gestellt, durch systematische Versuchsserien die Kolkbildung beim reinen Überströmen und bei der Kombination Überströmen-Unterströmen (ohne Tosenbecken) zu untersuchen.

Zur systematischen Untersuchung des Kolkproblems ist der zweidimensionale Vorgang am geeignetsten. Er entspricht in der Natur einem Ausschnitt aus einem gleichartigen Vorgang von größerer Breite. Nach den bisherigen Untersuchungen sind als den Kolk beeinflussende variable Größen einzuführen (Abb. 2):

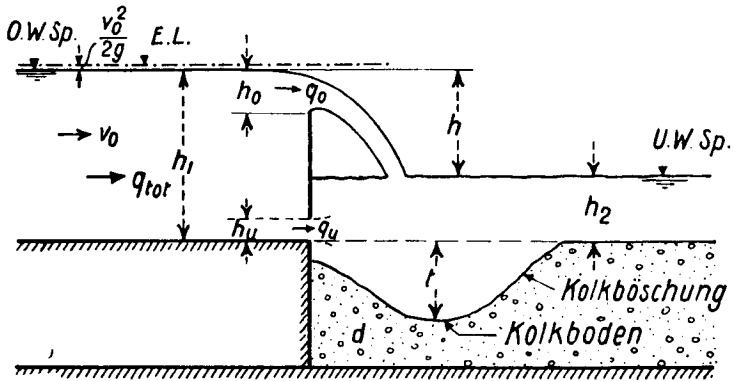


Abb. 2.

q_{tot} = totale Wassermenge in $m^3/secm = q_o + q_u$

q_o = Überfallwassermenge in $m^3/secm$

q_u = unterströmende Wassermenge in $m^3/secm$

h_1 = Oberwassertiefe in m

h_2 = Unterwassertiefe in m

$\bar{h} = h_1 - h_2$ = Absturzhöhe in m

t = Kolk tiefe in m, gemessen von der ursprünglichen Sohle

d = maßgebender Korndurchmesser des Geschiebes in mm,

wobei hier im Gegensatz zu Schoklitsch und Veronese mit t die eigentliche maximale Kolk tiefe, gemessen von der ursprünglichen

Sohle, bezeichnet ist, sodaß die Unterwassertiefe h_2 grundsätzlich als selbständige Variable auftritt.

Gemäß Abb. 1 und 2 ist also mit den Bezeichnungen der verschiedenen Autoren

$$T = t + h_2$$

eine Größe, die wir schon weiter oben als „Kolkwassertiefe“ bezeichnet haben.

In systematischen Versuchsserien wurde jeweils der Einfluß jeder einzelnen Variablen für sich auf die Kolktaufe, unter Konstanthaltung der übrigen Größen, festgestellt. Dabei zeigte sich bald, daß tatsächlich die von den beiden Autoren eingeführte maximale Kolkwassertiefe ($t + h_2$) als Variable zweckmäßig ist. Bei den Versuchen mit Überströmen allein, genügte es deshalb, die Wassermenge q_o , die Absturzhöhe h und die Geschiebegröße d einzeln zu variieren. Dabei wurden drei Geschiebe mit möglichst einheitlichem Korndurchmesser und eine normale Flußgeschiebemischung verwendet. Bei den Versuchen mit Über- und Unterströmen mußte noch das Verhältnis $\frac{q_o}{q_u}$ eingeführt werden. Dieser kombinierte Abflußzustand dagegen wurde nur noch für ein Geschiebe mit möglichst einheitlicher Korngröße systematisch untersucht und die erhaltene Gesetzmäßigkeit durch Stichproben mit den übrigen Geschiebegrößen kontrolliert.

2. Maßstabsfrage

Um auch mit den systematischen Versuchsreihen im Bereiche praktisch vorkommender Kombinationen der Variablen zu bleiben, wurden die Mittelwerte der Abmessungen der vier neuesten Niederdruckanlagen am Rhein und an der Aare ermittelt (Tabelle 1) und das Versuchsgerinne als zweidimensionales Modell dieser mittleren Wehrgröße ursprünglich im Maßstab 1:20 erstellt. Die angenommene Breite des Versuchsgerinnes von 1,20 m entspricht im Maßstab 1:20 ungefähr der mittleren Breite einer einzelnen Wehröffnung. Es ergab sich daraus im Modell eine maximale Schützenhöhe von 0,48 m. Die Übertragung der mittleren Jahresabflußmenge in das Modell ergab eine Modellwasser-

Tabelle 1.

Betriebs- beginn	Wehr	Fluß	Schützen			Höhe der ob. Schütze	max. Q Überfall bei $\lambda = 0,63$		max. Q Überfall u. Unterströmen		Abflubmengen *)			
			Höhe	Breite	Anzahl Öffn.		totale	pro m Breite	totale	pro m Breite	Max. Q (Spitze)	mittl. Jahres- abflubmenge	Min. Q	mittl. Jahres- abflubmenge
			m	m		m	m ³ /sec	m ³ /secm	m ³ /sec	m ³ /secm	m ³ /sec	m ³ /sec	m ³ /sec	m ³ /secm
1933	Kembs	Rhein	11,50	30,00	5	3,00	1455	9,7	4200	28,0	4200 (Juni 1910)	1040 (1901-39)	267 (März 1909)	7,0
1935	Klingnau	Aare	7,00	30,00	4	2,25	756	6,3	2110	17,6	2110 (Juni 1910)	569 (1904-39)	140 (Nov. 1906)	4,7
1941	Reckingen im Rupperswil Bau	Rhein Aare	12,00	20,00	3	3,75	810	13,5	2250	37,5	2250 (Juni 1910)	448 (1904-39)	120 (März 1909)	7,5
	Mittel		9,625	25,50			467	7,3	1230	18,6	1230 (Juni 1910)	322 (1916-39)	74 (März 1921)	5,0
	M 1 : 20 M 1 : 40		m 0,48	m 1,275				9,2 103 36		25,4 284 100				1/secm 67 24

*) Hydrographisches Jahrbuch der Schweiz. 1939.

**) Diese Wassermenge wird praktisch allein durch Unterströmen abgeleitet.

menge von 67 l/secm. Nach den Formeln von Schoklitsch und Veronese wurde ungefähr die maximale Kolkttiefe für 80 l/secm berechnet und daraus die Höhe der Schwelle mit 0,60 m über dem Laboratoriumsboden der Versuchsanstalt angenommen.

Es zeigte sich allerdings im Verlaufe der Versuche, daß zwei- bis dreimal größere Kolkttiefen erreicht wurden, als auf Grund der Formeln (1) und (2) vorausgesetzt werden konnte. Die im Maßstab 1:20 vorgesehenen Wassermengen für Überströmen (9,2 m³/secm, d.h. im Modell $q_o = 103$ l/secm), hätten infolge zu großer Kolkttiefen nicht mehr nachgebildet werden können. Daher wurden die Modellversuche mit kleineren Wassermengen bis maximal 36 l/secm durchgeführt. Diese maximale Wassermenge entspricht, verglichen mit den maximalen Abflußmengen bei Überfall der Tabelle 1, ungefähr dem Maßstab 1:40.

Für die Kombination Überfall-Unterströmen wurde mit der gleichen Größenordnung der Wassermengen gearbeitet, um einen direkten Vergleich der Kolkttiefen mit denjenigen für reines Überströmen zu erhalten.

Durch Versuchsserien mit kleineren Oberwassertiefen bis $h_1 = 32$ cm und Absturzhöhen bis $h = 16$ cm konnte, im Maßstab 1:40 betrachtet, eine Anpassung des Versuchsbereiches an die Verhältnisse der Tabelle 1 erreicht werden. Dementsprechend wurden im Modell Geschiebedurchmesser von 1,22 bis 7,55 mm verwendet, die in der Natur den vorkommenden Korngrößen von 5 bis 30 cm entsprechen. Da es sich hierbei nach den früheren Verfassern um die größten Geschiebe (bei 90 %) der Mischung handelt, können diese Korngrößen ebenfalls als angemessen betrachtet werden.

3. Beschreibung der Versuchsanlage

a) Allgemeines

Die in Abb. 3 schematisch dargestellte Versuchsrinne wurde eigens für diese Versuche in der Versuchsanstalt für Wasserbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich gebaut.

Die Abmessungen der Rinne betragen: Länge = 13,90 m, Breite = 1,20 m und Höhe = 1,22 m.

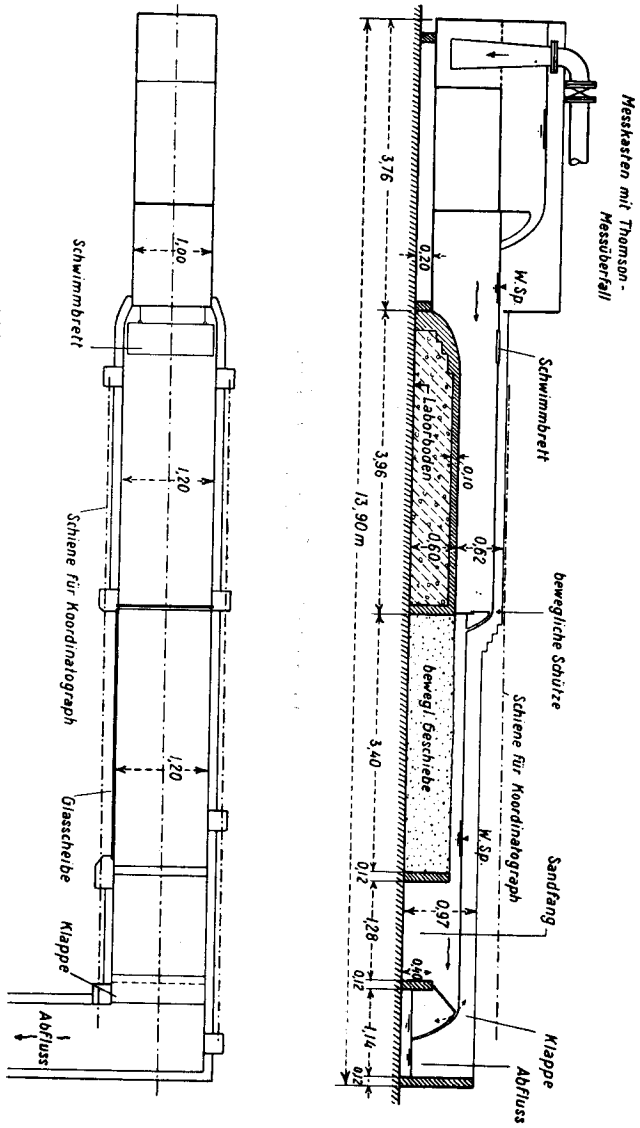


Abb. 3. Versuchsanordnung, Maßstab 1 : 100.

Der Zufluß des Wassers aus dem Mitteldruckbehälter in den Meßkasten der Versuchsanlage wurde durch einen Schieber reguliert. Der Mitteldruckbehälter wurde durch eine Pumpe mit Wasser versorgt und war mit einem Streichwehr versehen, so daß ein konstanter Zufluß während der Versuche sichergestellt war. Der Meßkasten, versehen mit einem scharfkantigen Meßwehr (Thompson-Form), diente zur genauen Messung der Durch-

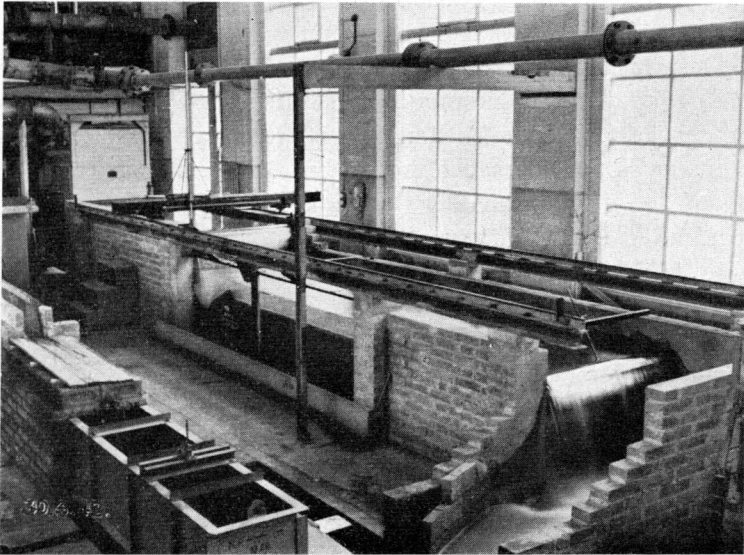


Abb. 3a. Versuchsanordnung.

flußmengen. Der Meßkasten mußte erhöht angeordnet werden, damit bei höchstem im Modell eingestelltem Oberwasserspiegel (h_{1max}) ein vollkommener Überfall entstand. Die Abfallhöhe betrug im Minimum 30 cm, so daß der überfallende Strahl auf der Unterseite vollständig frei war. Zur Bestimmung der Überfallhöhe im Meßkasten diente ein Hackenpegel in einem seitlichen Beobachtungskasten. Dieser Kasten war durch ein kommunizierendes Rohr, das in einer Entfernung von 900 mm vom Überfall in die Sohle des Meßkastens mündete, mit dem Oberwasser verbunden. Der Überfall wurde von Ingenieuren der Versuchsanstalt

mit Hilfe eines 235 m^3 fassenden Eichbehälters, dessen Inhalt als Funktion der Höhe genau bekannt war, sorgfältig volumetrisch geeicht. Dies geschah durch eine spezielle Rinne mit Faldeckeln. Nachdem der Beharrungszustand des Wassers des Überfalles eingetreten war, wurde durch Öffnen des Faldeckels das Wasser plötzlich in den Eichraum geleitet. Nach etwa 1000 Sekunden, die mit der Stoppuhr gemessen wurden, wurde das Wasser wieder in den Rücklaufkanal geleitet. So konnte durch Messung der Wassermenge im Eichraum die genaue sekundliche Wassermenge für jede Überfallshöhe im Meßkasten bestimmt werden [2].

Der Hackenpegel zur Messung der Überfallshöhe wurde von unten gegen den Wasserspiegel im seitlichen Beobachtungskasten herangebracht. Die in Millimeter geteilte Skala des Pegels war mit einem Nonius versehen, sodaß auf $\frac{1}{10}$ mm genau gemessen und auf $\frac{1}{20}$ mm geschätzt werden konnte. Der mittlere Fehler wurde unter Berücksichtigung der sonst noch auftretenden Umstände (Fehler in der Nullpunktsbestimmung, Einstellung der Pegelspitze, Temperaturdehnungen, usw.) auf $\frac{1}{10}$ mm veranschlagt. Bei der mittleren Überfallshöhe von 180 mm entspricht $\frac{1}{10}$ mm Fehler in der Ablesung einer Genauigkeit der Messung von $0,6 \text{ ‰}$.

Da das Wasser vom Überfall des Meßkastens unmittelbar in das Versuchsgerinne gelangte, wurde zu Beginn des eigentlichen Modelles zur Beruhigung des Abflusses ein Schwimmbrett eingebaut. Bei einer maximalen Wassermenge von 36 l/secm war der Oberwasserspiegel des Gerinnes fast vollständig ruhig.

Die Schützen waren im Abstand von 3,96 m vom Meßkasten angebracht. Auf diese Weise wurde eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung des Wassers und daher ein gleichmäßiger Überfall auf die ganze Breite des Gerinnes erzielt. Die Wände des Versuchsgerinnes von 1200 mm Breite wurden mit einem auf $\pm 0,5$ mm genauen Glattstrich versehen. Zur Beobachtung der Kolkbildung wurden anschließend an den Überfall im Unterwasser Spiegelglas-Scheiben eingesetzt.

Das Wehr bestand aus zwei Schützentafeln, die durch in den Schützennuten angebrachte Spindeln unabhängig voneinander bewegt werden konnten. Die obere Schützentafel hatte eine Höhe

von 270 mm, die untere eine solche von 260 mm (Abb. 4). Dies ermöglichte bei der maximal benutzten Wassermenge von 36 l/secm unter Berücksichtigung der Überfallshöhen das Einstellen einer Oberwassertiefe h_1 von maximal 56 cm und minimal 34 cm. Die Wehrschwelle wurde 60 cm über dem Laborboden angenommen.

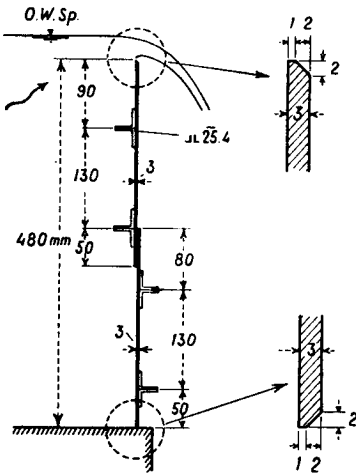


Abb. 4. Querschnitt der Schützen.
Detailskizze.

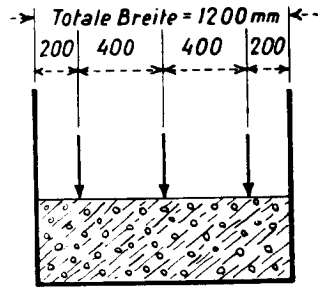


Abb. 5. Querschnitt
durch das Versuchsgerinne.

Der Überfallsstrahl wurde durch ein gelochtes, seitlich mündendes Rohr von 4,15 cm \varnothing auf die ganze Breite belüftet.

Unmittelbar nach dem Wehr wurde das bewegliche Geschiebe auf eine Länge von 3,40 m und bis auf die Höhe der Wehrschwelle horizontal eingefüllt. Die auf der einen Seite des Versuchsgerinnes eingesetzten Scheiben ermöglichten die Beobachtung und das Photographieren jedes beliebigen Stadiums des Kolkvorganges. Diese Anordnung erwies sich im Verlaufe der Versuche als vorteilhaft.

Am Ende des Versuchsmodelles diente ein Sandfang von 1,28 m Länge zur Aufnahme des fortgeschwemmten Geschiebes. Eine bewegliche Klappe, die durch eine Spindel betätigt wurde, ermöglichte auf einfachste Weise eine genaue Einstellung

der Unterwassertiefe h_2 auf ein beliebiges Maß zwischen 5 und 21 cm.

Zur Messung der Wasserspiegelhöhen und der erzeugten Kolkiefen wurde ein auf Schienen laufender Relief-Koordinatograph benützt. Die Schienen wurden auf den Wänden des Modelles einbetoniert. Der zur Höhenaufnahme bestimmte Spitzenpegel war quer zur Strömungsrichtung verstellbar auf einem besonderen Wagen angebracht. Diese Anordnung gestattete die Messung in allen beliebigen Punkten der Versuchsrinne mit einer Genauigkeit von 0,1 mm.

Die Kolkiefe wurde in jedem Querschnitt an drei Punkten gemessen (Abb. 5) und als Resultat der erhaltene Mittelwert angegeben. Die Spitze des Meßpegels war durch ein Messingplättchen von 2 cm Durchmesser ersetzt, um ein Einsinken des Pegels in die Geschiebemischung zu verhindern. Die Resultate an den drei Meßpunkten eines Querschnittes wichen nur um ca. $\pm 6\%$ vom arithmetischen Mittel ab.

b) Eichung der Modellschützen

Die beiden Schützen des Wehres des Versuchsmodelles wurden genau geeicht. In Abb. 6 und 7 sind für Überströmen die Überfallshöhe als Funktion der Wassermenge pro Meter Breite,

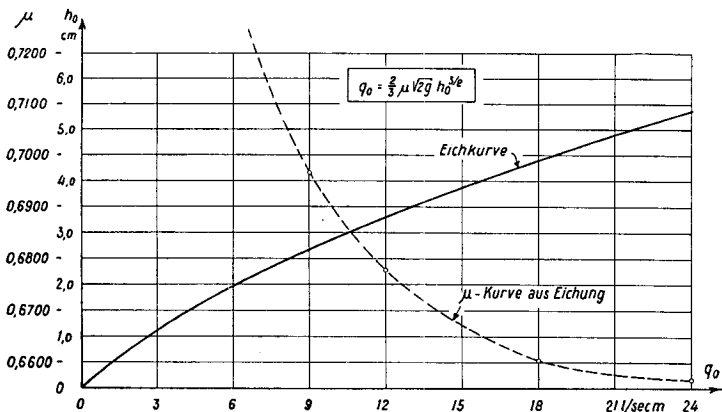


Abb. 6. Überfallshöhe in Funktion der Wassermenge.

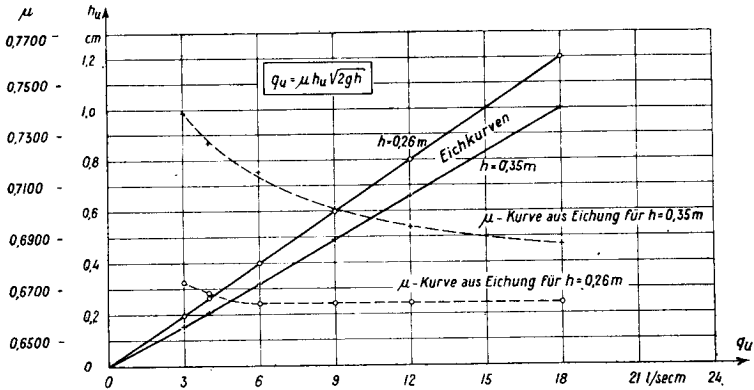


Abb. 7. Unterströmen in Funktion der Wassermenge.

für Unterströmen der Schützenhub als Funktion der Wassermenge pro Meter Breite dargestellt. Die zugehörigen μ -Werte wurden nach der Formel

$$q_o = \frac{2}{3} \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot h_o^{3/2} \quad (4)$$

resp.

$$q_u = \mu \cdot h_u \cdot \sqrt{2g \cdot h} \quad (5)$$

berechnet.

III. Kapitel

1. Messungen

a) Grundsätzliche Überlegungen

Wenn das Wasser über ein Wehr auf die natürliche, unbefestigte Sohle überfällt, bildet sich unterhalb des Absturzes ein mehr oder weniger tiefer Kolk aus. Das Ausmaß des Angriffes hängt, abgesehen von den hydraulischen Grundlagen, von der Zusammensetzung und der Korngröße des Materials ab, aus dem die Sohle besteht.

Der Zweck dieser systematischen Versuche galt, im Gegensatz zu den bisher ausgeführten Kolkversuchen, der Bestimmung der größten Kolktiefe. Es mußte daher bei jedem Versuch die

jenige Kolktiefe erreicht werden, bei der sich auf Kolkboden und Kolkböschung kein Geschiebe mehr bewegte.

Schoklitsch und auch Veronese beendeten ihre Kolkversuche, wenn sich ein sogenannter „Gleichgewichtszustand“ gebildet hatte, bei dem kein Geschiebe mehr über die Kolkböschung hinweg gelangte. Nach ihrer Meinung war dann die Kolkbildung beendet, trotzdem das Geschiebe am Kolkboden und auf der Kolkböschung noch in Bewegung war, die im Falle längerer Dauer des Vorganges zu einem Abrieb desselben führen muß. Bei Schoklitsch und Veronese muß sich unterhalb der Kolkböschung ein Geschiebewall gebildet haben, der sicherlich die Kolkbildung verlangsamte. (Siehe auch Beschreibung S. 25 und Abb. 12.)

Solange sich das Geschiebe durch den schon erwähnten Kreislauf vom Kolkboden auf die Kolkböschung und zurück dauernd in Bewegung befindet, muß mit einem Abrieb gerechnet werden. Die Vernachlässigung dieses Abriebes bei der Bestimmung der Kolktiefe ist nur berechtigt, wenn durch eine Zufuhr von Geschiebe von der für den Kolk maßgebenden Korngröße ein Ersatz erfolgt. Diese Geschiebezufuhr kann künstlich erfolgen, oder aber durch eine natürliche Geschiebeführung gegeben sein. In diesem Fall ist aber grundsätzlich die Menge des zugeführten Geschiebes als eine zusätzliche Variable des Problemles zu berücksichtigen.

Den vorliegenden systematischen Kolkuntersuchungen liegt der Gedanke der Kolkbildung bei Wehren von Niederdruckanlagen mit Stauräumen zu Grunde. Infolge der eintretenden Stauraumverlandung kann selbst bei Geschiebeführung im Fluß nicht mit einem regelmäßigen Ersatz des Geschiebes gerechnet werden. Zur Bestimmung der maximalen Kolkbildung im Endzustand muß deshalb der Abrieb berücksichtigt werden. Es muß somit diejenige Kolktiefe bestimmt werden, bei der der Kreislauf des Geschiebes nicht mehr auftritt.

b) Versuchstechnik zur Bestimmung der maximalen Kolktiefe unter Berücksichtigung des Abriebes

Vor Beginn jedes Versuches wurde die Sohle im Versuchsmodell genau auf die Höhe der festen Schwelle ausgeglichen. Dann wurde die Rinne von unten her sorgfältig eingestaut und

die Versuchswassermenge laufen gelassen. Die Versuchsdauer erstreckte sich bis zur Erreichung des Beharrungszustandes im Kolk; sie betrug durchschnittlich für jeden Versuch 100 Stunden. Zur Messung des Kolkes bei reinem Überströmen im Verlaufe und am Ende jedes Versuches wurde der Abfluß des Wassers durch Aufsetzen eines Bleches auf die obere Schütze plötzlich unterbunden, um eine eventuelle Zerstörung des entstandenen Kolkes bei abnehmender Wassermenge zu verhindern. Durch die seitlich am Versuchsmodell angebrachten Spiegelglas-Scheiben war eine genaue Beobachtung der Kolkform beim Abstellen möglich. Bei der Kombination Überfall-Unterströmen erübrigte sich die Benützung des Bleches, da beim Abstellen des Wasserzuflusses das Verhältnis $\frac{q_o}{q_u}$ kleiner wurde und der vorhandene Tauchstrahl in einen gewellten Oberflächenstrahl überging. Diese Strahlform bedingte wesentlich kleinere Kolkiefen.

Der erste Versuch dauerte total 449 Stunden. Er galt vor allem der Entwicklung der Versuchstechnik, weshalb die Kolkbildung noch stark dem Wasser allein überlassen wurde. Vor Beginn des Versuches wurde das Geschiebe bis auf Schwellenhöhe horizontal eingefüllt. Nach dem Einstauen der Rinne von unten her wurde die Versuchswassermenge von 20 l/secm eingestellt. Mit der Entstehung des Kolkes bildete sich sofort unterhalb desselben ein Geschiebewall, der allmählich eine Höhe über der ursprünglichen Sohle erreichte, die durch den Geschiebetrieb gegeben war. Der Wall bewegte sich langsam flußabwärts. Das meiste Geschiebe, das auf dem Kolkboden aufgewirbelt wurde, gelangte nur bis auf die Kolkböschung und glitt auf dieser wieder auf den Kolkboden zurück (Abb. 8, Skizze 1). Nach 53 $\frac{1}{2}$ Stunden selbsttätiger Kolkbildung bildete sich Form 1 aus. Abb. 9 zeigt diese Form mit verschiedenen Zwischenstadien, die gestrichelt angegeben sind. Aus dieser Abbildung 9 ist deutlich ersichtlich, wie sich die Kolkböschung, ihre Neigung beibehaltend, flußabwärts verschob. Eine Fortsetzung dieses Vorganges der selbsttätigen Kolkbildung bis zur endgültigen, maximalen Kolk-tiefe würde sehr lange dauern.

Um klar definierte Versuchsbedingungen zu schaffen, wurde

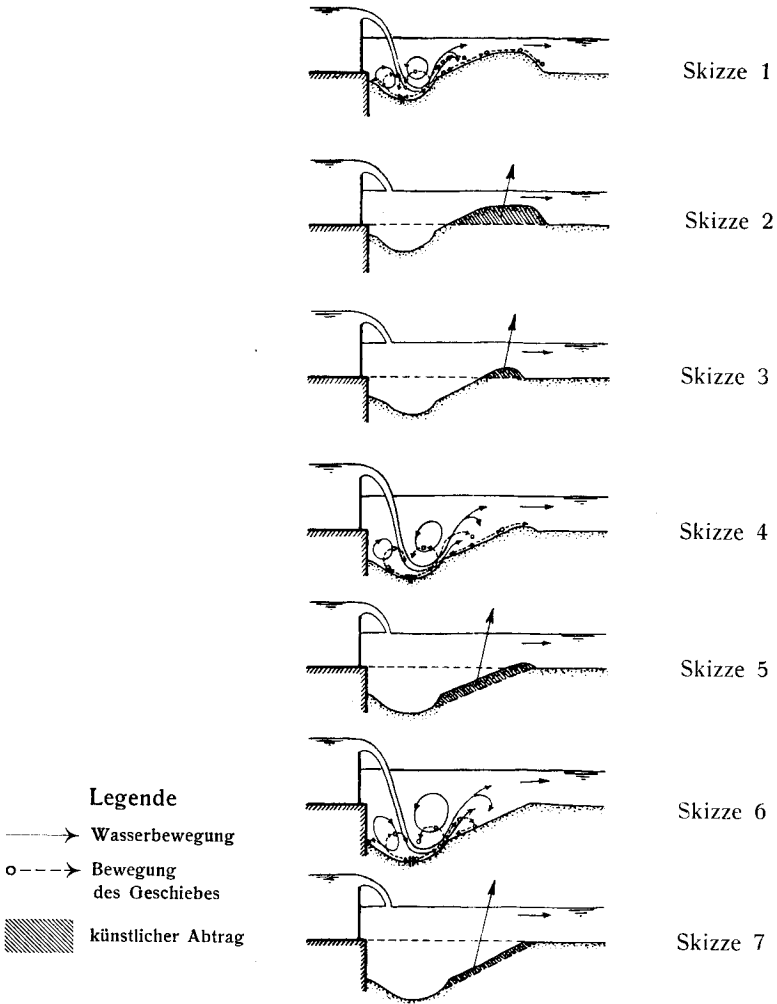


Abb. 8. Schematische Darstellung der Versuchstechnik.

der Geschiebewall künstlich bis auf Schwellenhöhe abgetragen, da dieser Wall in der Natur, infolge der natürlichen Wegschwemmung bei Hochwasser, nicht vorhanden ist (Abb. 8, Skizze 2).

In der Folge zeigte sich sofort wieder eine wesentliche Kolk-

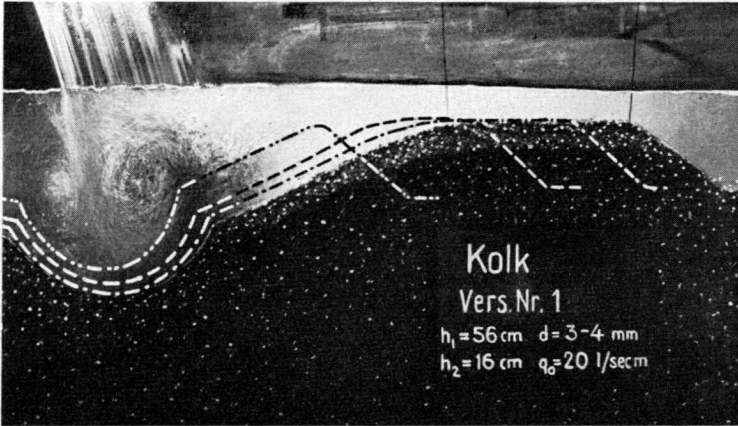


Abb. 9. Versuch Nr. 1 nach einer Versuchsdauer von $53\frac{1}{2}$ Stunden.

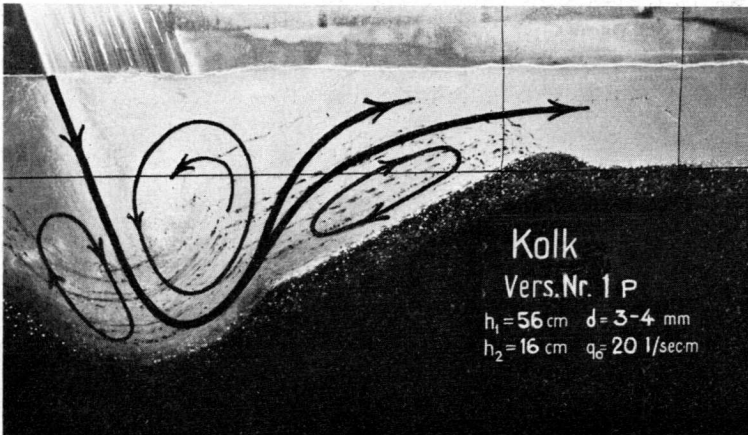


Abb. 10. Versuch Nr. 1 nach einer Versuchsdauer von 363 Stunden.

vertiefung, und es bildete sich erneut ein allerdings etwas kleinerer Geschiebewall, der wiederum künstlich entfernt wurde (Abb. 8, Skizze 3). Dieser Vorgang wiederholte sich, bis im Zustand 1 P (Abb. 10) der Geschiebewall nur noch sehr klein war. Das Geschiebe im Kolkboden und auf der Kolkböschung war aber noch keineswegs in Ruhe, der Endkolk also noch nicht erreicht

(Abb. 8, Skizze 4). Es stellte sich daher die Frage, wie der Abrieb des beweglichen Geschiebes berücksichtigt werden konnte. Es mußte eine Versuchstechnik gefunden werden, um die maximale Kolktiefe in einer vernünftigen Zeit zu erhalten.

Wenn man sich vorstellt, daß das in Bewegung befindliche Geschiebe durch Abrieb immer feiner und endlich suspendiert weggeschafft wird, so folgt, daß man grundsätzlich das in Bewegung befindliche Geschiebe abfangen und entfernen sollte. Leider ist dies während des laufenden Versuchs nicht möglich, ohne Störungen der Kolkbildung zu erzeugen. Man muß deshalb überlegen, was sich durch dieses fortlaufende Abfangen des Geschiebes ergeben würde, und die Versuchstechnik entsprechend

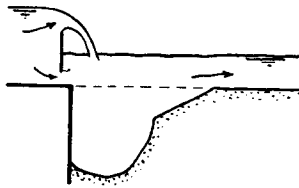


Abb. 11.

diesen Folgen wählen. Durch das Abfangen des in Bewegung befindlichen Geschiebes würde immer neues Geschiebe des Kolkbodens in Bewegung geraten und damit das eigentliche Kolkloch vertieft (Abb. 11). Die Kolkböschung würde unterspült, ihres Fußes beraubt, also nachrutschen. Es ist daher möglich, anstatt das in Bewegung befindliche Geschiebe abzufangen, durch Entnahme des Geschiebes parallel zur Kolkböschung und tangential zum Kolkboden, eine Beschleunigung der Versuche zu erreichen (Abb. 8, Skizze 5). Diese Versuchstechnik hat den Vorteil, daß die Kolktiefe sich selbständig ausbildet und stimmt zudem mit dem übrigen natürlichen Vorgang, der durch Beibehaltung der Neigung und Flußabwärtsverschieben der Kolkböschung charakterisiert ist, überein.

Bei der weiteren Fortsetzung des Versuches wurde regelmäßig, nachdem sich wieder eine selbsttätige Vertiefung des Kolkes einstellte, das Geschiebe parallel zur Kolkböschung und

tangential zum Kolkboden entfernt (Abb. 8, Skizze 7). Im Zustand 1V (Abb. 12) wurde die Kolkform mit dem Winkel $\varphi = 180^\circ$ erreicht, also diejenige Kolkform, bei der die Kolkböschung tangential an den Kolkboden anschließt. Das Geschiebe auf dem Kolkboden blieb an Ort, und es wurde kein Material mehr auf die Kolkböschung geworfen. Die Kolkbildung war somit beendet.

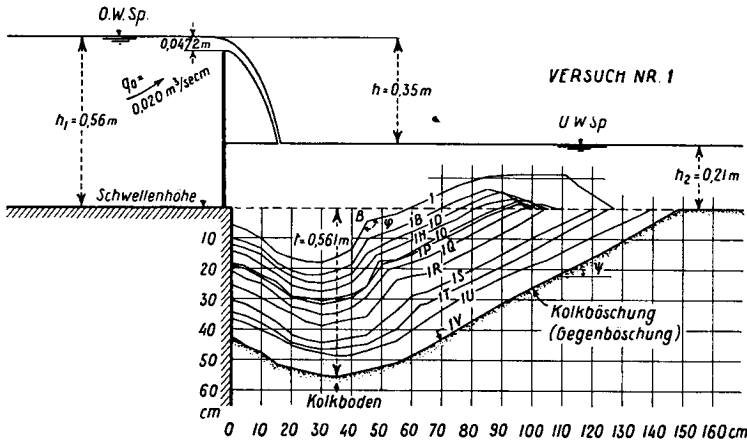


Abb. 12. Versuch Nr. 1.

Es ist klar, daß diese Methode, auf künstliche Art den maximalen Kolk zu erhalten, nur eine Annäherung an den sich im Verlaufe der Jahre in der Natur abspielenden Vorgang darstellt. Die erhaltene Endform des Kolkes ist jedoch vernünftig. Solange die im Versuch erhaltene maximale Tiefe nicht erreicht ist, wird Geschiebe dauernd in Bewegung sein, sich somit abreiben. Erst beim Erreichen der im Versuch erhaltenen Grenztiefe ist dies nicht mehr der Fall. Die Kolkböschung ergibt eine Neigung von ungefähr $\varphi = 30^\circ$. Dieser Neigung entspricht eine natürliche Böschung, die bekanntlich beim vorhandenen kohäsionslosen Material unter Wasser gleich groß ist, wie in trockenem Zustande. Diese Böschung ist somit auf jeden Fall stabil. Die erhaltene Endform des Kolkes ist also plausibel.

In der Folge wurden sämtliche Versuche mit der beschriebenen künstlichen Geschiebeentnahme durchgeführt, wobei eine Beschleunigung des Kolkvorganges erreicht werden konnte.

2. Resultate

a) Überströmen

Der einfachste Fall liegt dann vor, wenn ein freier Überfallstrahl die ungeschützte, bewegliche Sohle trifft. Dieser Sonderfall wurde zuerst untersucht. Die Versuchsergebnisse sind tabellarisch zusammengestellt (Tabellen 2, 3 und 4).

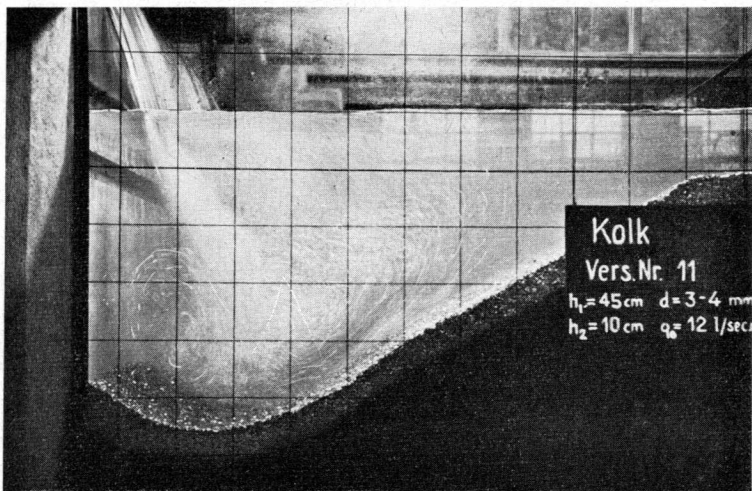


Abb. 13. Versuch Nr. 11.

Da die Geschiebegröße von bedeutendem Einfluß auf die Kolkabmessungen ist, mußten verschiedene Sandsorten verwendet werden, deren Mischungslinien in der Abb. 14 in üblicher Weise dargestellt sind; drei Sandsorten A, B, C waren auf möglichst einheitliches Korn ausgesiebt worden.

Unter dem Durchmesser eines Kornes wird immer der mittlere Durchmesser verstanden, der durch die lichte Maschenweite eines Siebes mit quadratischen Maschen gerade noch durchfällt.

Mit jeder Sandsorte wurden mehrere Versuchsreihen ausgeführt.

Zur Charakterisierung des Kolkes genügte die Einführung der größten Kolkwassertiefe ($t + h_2$). Nach den Messungen von

Tabelle 2.

Vers. Nr.	$q_0 = q_{tot}$		d_{90}	h_1	h_2	h	$t + h_3$	w aus Gl. 7	v	$v v$	Verhältnis						
	m^2	secm									mm	m	m	m	m	m	m
1	0,020		3,5	0,56	0,21	0,35	0,771	22,51	-0,29	0,0841	0,255	0,546	0,277	100	33,1	70,8	36,0
2	0,006		3,5	0,56	0,21	0,35	0,376	22,59	-0,21	0,0441	0,141	0,285	0,139	100	37,5	75,8	37,0
3	0,012		3,5	0,56	0,21	0,35	0,577	22,88	+0,08	0,0064	0,199	0,414	0,207	100	34,5	71,8	36,9
4	0,006		3,5	0,50	0,15	0,35	0,377	22,59	-0,21	0,0441	0,126	0,285	0,139	100	33,4	75,6	36,2
5	0,006		3,5	0,41	0,15	0,26	0,324	22,59	-0,21	0,0441	0,117	0,267	0,131	100	36,1	82,4	40,4
6	0,012		3,5	0,41	0,15	0,26	0,497	22,86	+0,06	0,0036	0,165	0,388	0,195	100	33,2	78,1	39,2
7	0,018		3,5	0,41	0,15	0,26	0,632	22,79	-0,01	0,0001	0,201	0,483	0,246	100	31,8	76,4	38,9
8	0,006		3,5	0,34	0,15	0,19	0,284	23,16	+0,36	0,1296	0,108	0,248	0,123	100	38,0	87,3	43,3
9	0,012		3,5	0,34	0,15	0,19	0,428	23,03	+0,23	0,0529	0,153	0,361	0,183	100	35,8	84,4	42,8
10	0,018		3,5	0,34	0,15	0,19	0,543	22,91	+0,11	0,0121	0,186	0,450	0,231	100	34,3	82,8	42,5
11	0,012		3,5	0,45	0,10	0,35	0,573	22,72	-0,08	0,0064	0,155	0,414	0,207	100	27,0	72,2	36,1
Abb. 13																	
12	0,0085		3,5	0,36	0,10	0,26	0,406	22,97	+0,17	0,0289	0,121	0,322	0,160	100	29,8	79,3	39,4
							Mittel $w =$	22,80	$\sum v v =$	0,4564							

$$\psi_m = \pm \sqrt{\frac{\sum v v}{n(n-1)}} = \pm \sqrt{0,00346} = \pm 0,0588 \quad \psi_1 = \pm \sqrt{\frac{\sum v v}{n-1}} = \pm \sqrt{0,04149} = \pm 0,2037$$

mittl. Fehler in ‰ = $\frac{0,0588}{22,80} = 2,58 \frac{\text{‰}}{100}$ mittl. Fehler einer Beobachtung in ‰ = $\frac{0,2037}{22,80} = 8,93 \frac{\text{‰}}{100}$

Tabelle 3.

Vers. Nf.	$q_0 = q_{tot}$		d_{80}	h_1	h_8	h	$t + h_8$	w aus Gl. 7	v	$v v$	Verhältnis					
	ms / secm										Schottisch Gl. 1		Veronese Gl. 2		Jaeger Gl. 3	
	mm	m	m	m	m	m	m	m	m	m	%	%	%	%	%	%
13	0,006	0,50	0,15	0,35	0,278	22,71	-0,27	0,0729	0,097	0,206	0,109	100	34,9	74,1	39,2	
14	0,012	0,50	0,15	0,35	0,428	23,07	+0,09	0,0081	0,137	0,300	0,162	100	32,0	70,1	37,9	
15	0,018	0,50	0,15	0,35	0,548	23,16	+0,18	0,0324	0,167	0,374	0,204	100	30,5	68,2	37,2	
16	0,024	0,50	0,15	0,35	0,651	23,15	+0,17	0,0289	0,194	0,436	0,241	100	29,8	67,0	37,0	
17	0,006	0,50	0,15	0,19	0,206	22,84	-0,14	0,0196	0,083	0,180	0,097	100	40,3	87,4	47,1	
18	0,006	0,41	0,15	0,26	0,241	22,85	-0,13	0,0169	0,091	0,193	0,103	100	37,8	80,0	42,7	
19	0,012	0,50	0,15	0,19	0,315	23,05	+0,07	0,0049	0,118	0,262	0,143	100	37,5	83,2	45,4	
20	0,012	0,50	0,15	0,26	0,3665	22,92	+0,06	0,0036	0,128	0,281	0,153	100	34,9	76,6	41,8	
21	0,018	0,50	0,15	0,19	0,402	23,06	+0,08	0,0064	0,144	0,326	0,181	100	35,8	81,1	45,0	
22	0,018	0,50	0,15	0,26	0,469	23,00	+0,02	0,0004	0,155	0,349	0,192	100	33,1	74,4	41,0	
23	0,024	0,50	0,15	0,19	0,474	22,88	-0,10	0,0100	0,166	0,380	0,213	100	35,0	80,2	45,0	
24	0,024	0,50	0,15	0,26	0,560	23,11	+0,13	0,0169	0,180	0,408	0,227	100	32,2	72,8	40,5	
25	0,024	0,47	0,21	0,26	0,557	22,99	+0,01	0,0001	0,201	0,408	0,227	100	36,1	73,2	40,8	
						Mittel $w =$		$\Sigma v v =$								
						22,98		0,2211								

$$\psi_m = \pm \sqrt{\frac{\Sigma v v}{n(n-1)}} = \pm \sqrt{0,00142} = \pm 0,0377$$

$$\psi_1 = \pm \sqrt{\frac{\Sigma v v}{n-1}} = \pm \sqrt{0,01843} = \pm 0,1357$$

mittl. Fehler in $q_{100} = \frac{0,0377}{22,98} = 1,64 \frac{q_{100}}{100}$

mittl. Fehler einer Beobachtung in $q_{100} = \frac{0,1357}{22,98} = 5,91 \frac{q_{100}}{100}$

Tabelle 4.

Vers Nr.	$d_{90} =$ d_{tot}	d_{90}		h_1	h_2	h	$t + h_2$	w aus Gl. 7	v	$v v$	Verhältnis			
	m^3 / secm	min	m	m	m	m	m	m			Eggen- berger	Jaeger	Ver- nese	Schoh- litsch
											m	m	m	m
27	0,006	1,22	0,34	0,15	0,19	0,424	22,69		-0,12	0,0144	0,154	0,387	0,173	100
28	0,006	1,22	0,41	0,15	0,26	0,504	23,03		+0,22	0,0484	0,166	0,415	0,184	100
29	0,006	1,22	0,50	0,15	0,35	0,582	22,93		+0,12	0,0144	0,179	0,444	0,195	100
30	0,012	1,22	0,36	0,17	0,19	0,640	22,59		-0,22	0,0484	0,217	0,562	0,257	100
						Mittel $w =$	22,81		$\sum v v =$	0,1256				

$$\psi'_m = \pm \sqrt{\frac{\sum v v}{n(n-1)}} = \pm \sqrt{0,01047} = \pm 0,1023$$

$$\text{mittl. Fehler in } \psi'_{100} = \frac{0,1023}{22,81} = \frac{4,48 \psi'_{100}}{22,81}$$

$$\psi'_1 = \pm \sqrt{\frac{\sum v v}{n-1}} = \pm \sqrt{0,04320} = \pm 0,2078$$

$$\text{mittl. Fehler einer Beobachtung in } \psi'_{100} = \frac{0,2078}{22,81} = \frac{9,11 \psi'_{100}}{22,81}$$

Schoklitsch und Veronese konnte angenommen werden, daß dieser Wert $(t + h_2)$ proportional einer Potenz der Wassermenge pro Meter Absturzbreite q und der Absturzhöhe h und umgekehrt proportional einer Potenz des maßgebenden Geschiebedurchmessers d sei, sodaß ein Gesetz von der Form

$$t + h_2 = w \cdot \frac{h^\alpha \cdot q_o^\beta}{d^\gamma} \quad (6)$$

erwartet werden konnte.

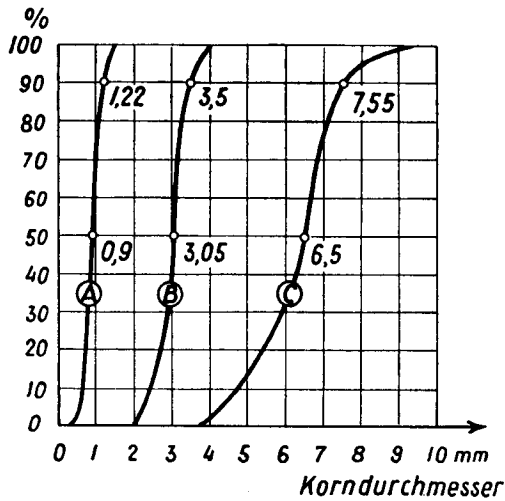


Abb. 14. Mischungslinien der Sandsorten (Mittel aus 3 Analysen).

Zur Bestimmung der Exponenten α , β , γ wurde in den Abb. 15, 16 und 17 unter Konstanthaltung zweier Variablen die dritte in Funktion der gemessenen Kolkwassertiefe $(t + h_2)$ auf doppelt logarithmisch geteiltem Papier aufgezeichnet. So sind z. B. in Abb. 15 die gemessenen Kolkwassertiefen $(t + h_2)$ in Funktion der Überfallwassermengen q_o aufgetragen. Die Verbindungslinie der Meßpunkte gleicher h und d ergeben eine Schar paralleler Geraden. Es ist aber aus:

$$t + h_2 = w \cdot \frac{h^\alpha \cdot q_o^\beta}{d^\gamma} \quad \text{mit} \quad \frac{h^\alpha}{h^\gamma} = e = \text{konstant}$$

$$t + h_2 = w \cdot e \cdot q_o^\beta$$

somit $\log(t + h_2) = \log(w \cdot e) + \beta \cdot \log q_0$

und $\frac{d(\log(t + h_2))}{d(\log q_0)} = \beta = \text{Steigungsmaß}$

Das Steigungsmaß der Schar paralleler Geraden entspricht also dem Exponenten der Überfallshöhe. Nach Abb. 15 beträgt das Steigungsmaß 0,6; $(t + h_2)$ ist daher proportional $q_0^{0,6}$.

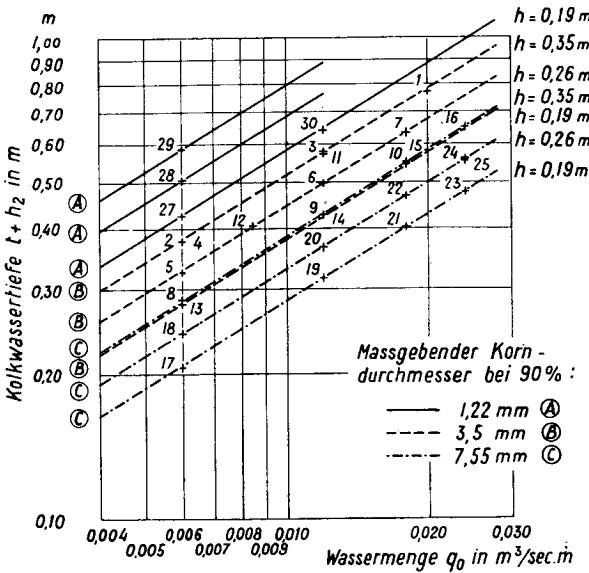


Abb. 15. Kolkwassertiefe in Funktion der Wassermenge für verschiedene Absturzhöhen und verschiedene Geschiebe.

In Abb. 16 wurden in gleicher Weise die gemessenen Kolkwassertiefen in Funktion der Absturzhöhen aufgetragen. Für gleiche Überfallwassermengen und Geschiebedurchmesser liegen die aufgetragenen Punkte ebenfalls auf einer Geradenschar mit einheitlichem Steigungsmaß 0,5; $(t + h_2)$ ist demnach proportional $h^{0,5}$.

Folglich ist nach diesen Auftragungen die maximale Kolkwassertiefe bei konstantem Korndurchmesser

$$t + h_2 = \frac{w}{d^{0,6}} \cdot h^{0,5} \cdot q_0^{0,6}$$

wobei $\frac{w}{d}$ ein Beiwert ist, der von der Korngröße des Geschiebes abhängt.

Während der Kolkbildung reichert sich das in der Mischung vorhandene Grobmaterial auf dem Kolkboden an. Es bildet sich eine natürliche Pflasterungsschicht. Nach den Erfahrungen von Schoklitsch, wie nach Versuchen der Versuchsanstalt für Wasserbau an der E. T. H., kann als mittlerer Korndurchmesser dieser

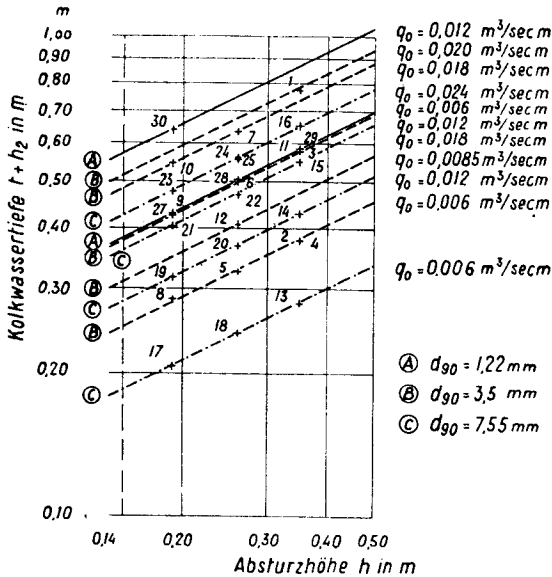


Abb. 16. Kolkwassertiefe in Funktion der Absturzhöhe für verschiedene Wassermengen und verschiedene Geschiebe.

Pflasterungsschicht der Durchmesser bei 90 %, d_{90} der Gesamtmischung, angenommen werden. Dieser maßgebende Korndurchmesser ist bei den in Abb. 14 dargestellten Geschieben besonders hervorgehoben.

In Abb. 17 sind, wieder mit logarithmischen Maßstäben, die gemessenen Kolkwassertiefen in Funktion der maßgebenden Korndurchmesser d_{90} aufgezeichnet. Für gleiche Wassermengen und

Absturzhöhen liegen die aufgetragenen Punkte auf einer Geraden-schar mit dem Steigungsmaß $-0,4$.

Es ist also

$$t + h_2 \sim (d_{90}^{-0,4}) = \left(\frac{1}{d_{90}^{0,4}} \right)$$

Die maximale Kolkwassertiefe beträgt daher

$$t + h_2 = w \frac{h^{0,5} \cdot q_0^{0,6}}{d_{90}^{0,4}} \quad (7)$$

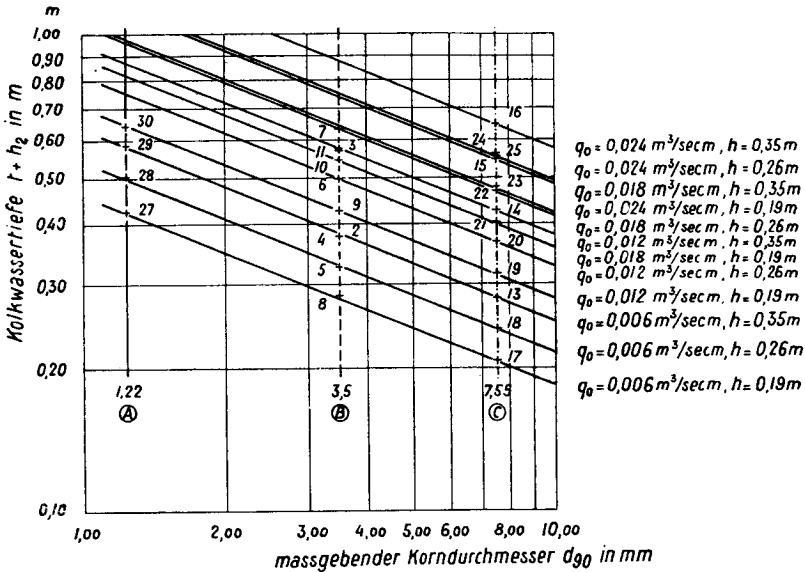


Abb. 17. Kolkwassertiefe in Funktion des maßgebenden Geschiebedurchmessers (90 %) für verschiedene Wassermengen und Absturzhöhen.

Aus den bei den Modellversuchen gemessenen Kolkwassertiefen konnte der Wert w ermittelt werden. Er ist praktisch konstant und beträgt für die gewählten Dimensionen

$$\begin{aligned}
 t, h_2, h & \text{ in m} \\
 q_0 & \text{ in m}^3/\text{secm} \\
 d_{90} & \text{ in mm}
 \end{aligned}$$

im Mittel $w = 22,88$ (Tabellen 2—4).

In Abb. 18 sind nach dieser Formel (7) alle Meßpunkte aufgetragen ($t + h_2$ in Funktion von $\frac{h^{0,5} \cdot q_0^{0,6}}{d_{90}^{0,4}}$). Die Abweichung gegenüber der mit $w = 22,88$ eingezeichneten Geraden beträgt nach der Tabellenberechnung des mittleren Fehlers 1,56 ‰ (Tabelle 5).

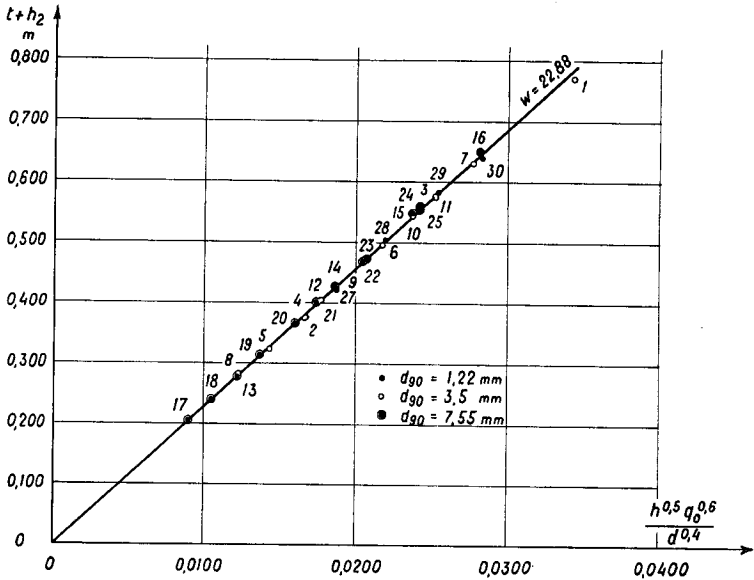


Abb. 18.

Zur Kontrolle der Zweckmäßigkeit der Einführung von d_{90} als maßgebender Geschiebedurchmesser, wurde die Auswertung auch mit dem mittleren Durchmesser d_{50} der Gesamtmischung durchgeführt. Diese in der Tabelle 5 zusammengestellten Resultate ergeben einen mittleren Fehler von 4,51 ‰, wobei die Konstante im Mittel 21,41 beträgt. Der Vergleich der Konstanten bei Änderung des Geschiebes zeigt aber eine stärkere Streuung des w -Wertes mit dem Korndurchmesser, sodaß tatsächlich die Einführung von d_{90} als maßgebenden Korndurchmesser zutreffend ist. Diese Feststellung wird später auch durch die Versuche mit einem natürlichen Geschiebegemisch bestätigt. (Siehe Kapitel III, 2c.)

Tabelle 5.

Vers. Nr.	d_{90}	w aus Gl. 7	v	vv	d_{50}	w aus Gl. 7	v	vv
	mm				mm			
1	3,5	22,51	-0,37	0,1369	3,05	21,30	-0,11	0,0121
2	3,5	22,59	-0,29	0,0841	3,05	21,37	-0,04	0,0016
3	3,5	22,88	± 0	0	3,05	21,65	+0,24	0,0576
4	3,5	22,59	-0,29	0,0841	3,05	21,37	-0,04	0,0016
5	3,5	22,59	-0,29	0,0841	3,05	21,37	-0,04	0,0016
6	3,5	22,86	-0,02	0,0004	3,05	21,63	+0,22	0,0484
7	3,5	22,79	-0,09	0,0081	3,05	21,56	+0,15	0,0225
8	3,5	23,16	+0,28	0,0784	3,05	21,91	+0,50	0,2500
9	3,5	23,03	+0,15	0,0225	3,05	21,79	+0,38	0,1444
10	3,5	22,91	+0,03	0,0009	3,05	21,67	+0,26	0,0676
11	3,5	22,72	-0,16	0,0256	3,05	21,50	+0,09	0,0081
12	3,5	22,97	+0,09	0,0081	3,05	21,73	+0,32	0,1024
13	7,55	22,71	-0,17	0,0289	6,5	21,38	-0,03	0,0009
14	7,55	23,07	+0,19	0,0361	6,5	21,72	+0,31	0,0961
15	7,55	23,16	+0,28	0,0784	6,5	21,81	+0,40	0,1600
16	7,55	23,15	+0,27	0,0729	6,5	21,80	+0,39	0,1521
17	7,55	22,84	-0,04	0,0016	6,5	21,51	+0,10	0,0100
18	7,55	22,85	-0,03	0,0009	6,5	21,52	+0,11	0,0121
19	7,55	23,05	+0,17	0,0289	6,5	21,70	+0,29	0,0841
20	7,55	22,92	+0,04	0,0016	6,5	21,58	+0,17	0,0289
21	7,55	23,06	+0,18	0,0324	6,5	21,71	+0,30	0,0900
22	7,55	23,00	+0,12	0,0144	6,5	21,66	+0,25	0,0625
23	7,55	22,88	± 0	0	6,5	21,54	+0,13	0,0169
24	7,55	23,11	+0,23	0,0529	6,5	21,76	+0,35	0,1225
25	7,55	22,99	+0,11	0,0121	6,5	21,65	+0,24	0,0576
27	1,22	22,69	-0,19	0,0361	0,9	20,09	-1,32	1,7424
28	1,22	23,03	+0,15	0,0225	0,9	20,40	-1,01	1,0201
29	1,22	22,93	+0,05	0,0025	0,9	20,31	-1,10	1,2100
30	1,22	22,59	-0,29	0,0841	0,9	20,00	-1,41	1,9881
	Mittel $w =$	22,88	$\Sigma vv =$	1,0395	Mittel $w =$	21,41	$\Sigma vv =$	7,5722
	$\psi_m = \pm \sqrt{\frac{1,0395}{29 \cdot 28}} = \pm 0,03578$				$\psi_m = \pm \sqrt{\frac{7,5722}{29 \cdot 28}} = \pm 0,09657$			
	mittl. Fehler für w in ‰ = $= \frac{35,78}{22,88} = 1,56\text{‰}$				mittl. Fehler für w in ‰ = $= \frac{96,57}{21,41} = 4,51\text{‰}$			

Die Berechnung der Kolkwassertiefe für jeden ausgeführten Versuch nach der Formel von Schoklitsch, von Veronese und nach der von Jaeger abgeänderten Formel von Veronese, liefert die in den Tabellen 2, 3 und 4 angegebenen prozentualen Verhältnisse

im Vergleich mit den durch unsere Messungen erhaltenen Kolkwassertiefen. Die großen Unterschiede der erhaltenen Resultate zeigen die Wichtigkeit der Berücksichtigung des Abriebes bei der Beurteilung der auftretenden Kolke in allen jenen Fällen, in denen kein Ersatz für das abgeriebene Geschiebe zugeführt wird.

Es hat sich weiter gezeigt, daß es wohl möglich ist, nach Vorschlag Jaeger, eine nach dem Froude'schen Ähnlichkeitsgesetz aufgebaute Formel zu finden, daß aber in dieser Formel die Unterwassertiefe nicht explizite figuriert, was an Hand der veröffentlichten Tabellen von Veronese [7] nicht eindeutig erkannt werden konnte.

b) Kombination Überströmen-Unterströmen

Systematische Untersuchungen von Kombinationen Überströmen und Unterströmen wurden mit Geschiebe B (siehe Abb. 14) durchgeführt. Das Verhältnis Überströmen zu Unterströmen $\frac{q_o}{q_u}$ wurde zu 1,0, 2,0, 3,0 und 4,0 angenommen. Es wurde geprüft, ob die für Überströmen erhaltene Formel als zutreffend angenommen werden darf. Da von vornherein zu erwarten war, daß der für reines Überströmen als konstant befundenen Faktor w vom Verhältnis $\frac{q_o}{q_u}$ abhängen müsse, wurde zuerst untersucht, ob sich die Gleichung (7) bei variablen Werten q_o und q_u , aber konstant gehaltenem Verhältnis $\frac{q_o}{q_u}$ als brauchbar erweist. Für jedes Verhältnis $\frac{q_o}{q_u}$ wurde deshalb einzeln der zugehörige w -Wert ermittelt (Tabellen 6 und 7). Es zeigte sich dabei das erhoffte Resultat. Wenn in der Formel (7) für q_o der Wert $q_{tot} = q_o + q_u$ eingeführt wird

$$t + h_2 = w \frac{h^{0,5} \cdot q_{tot}^{0,6}}{d_{90}^{0,4}} \quad (8)$$

so ist für ein gegebenes Verhältnis $\frac{q_o}{q_u}$, w tatsächlich eine Konstante. Andererseits wird w eine Funktion des Verhältnisses $\frac{q_o}{q_u}$. Der in den Tabellen 6 und 7 berechnete mittlere Fehler unter Verwen-

derung der für jedes Verhältnis $\frac{q_o}{q_u}$ erhaltenen mittleren w -Wertes erwies sich als sehr klein.

Die Gültigkeit derselben Formel ist damit zu erklären, daß bei den untersuchten Kombinationen von Überströmen und Unterströmen die Strahlform, nämlich der Tauchstrahl, bestehen bleibt. Dagegen ist ausdrücklich zu bemerken, daß diese Strahlform sich erst bei $\frac{q_o}{q_u} \geq 1,38$ mit Sicherheit bildet. Bei abnehmendem Verhältnis ($\frac{q_o}{q_u} < 1,38$) hat dagegen das Unterströmen allmählich gegenüber dem Überströmen einen überwiegenden Einfluß auf die Strahlform, sodaß zuerst ein Labilitätsbereich entsteht, bis bei sehr kleinem Verhältnis $\frac{q_o}{q_u}$ kein Tauchstrahl mehr

Tabelle 6.

Vers. Nr.	q_o	q_u	$\frac{q_o}{q_u}$	q_{tot}	d_{90}	h_1	h_2	h	$t + h_2$	w aus Gl. 8	v	vv
	m ² /secm	m ² /secm		m ² /secm	mm	m	m	m	m			
31	0,012	0,012	1,0	0,024	3,5	0,41	0,15	0,26	0,391	11,87	-0,11	0,0121
32	0,018	0,018	1,0	0,036	3,5	0,41	0,15	0,26	0,502	11,94	-0,04	0,0016
33	0,018	0,018	1,0	0,036	3,5	0,50	0,15	0,35	0,577	11,83	-0,15	0,0225
34	0,006	0,006	1,0	0,012	3,5	0,41	0,15	0,26	0,262	12,05	+0,07	0,0049
35	0,006	0,006	1,0	0,012	3,5	0,50	0,15	0,35	0,309	12,25	+0,27	0,0729
36	0,012	0,012	1,0	0,024	3,5	0,56	0,21	0,35	0,456	11,93	-0,05	0,0025
Mittel $w =$										11,98	$\Sigma vv = 0,1165$	

$$\psi_m = \pm \sqrt{\frac{\Sigma vv}{n(n-1)}} = \pm \sqrt{0,00388} = \pm 0,0623$$

$$\text{mittl. Fehler in } \text{‰} = \frac{0,0623}{11,98} = 5,20 \text{‰}$$

37	0,012	0,006	2,0	0,018	3,5	0,41	0,15	0,26	0,4395	15,85	+0,30	0,0900
38	0,012	0,006	2,0	0,018	3,5	0,50	0,15	0,35	0,491	15,26	-0,29	0,0841
39	0,018	0,009	2,0	0,027	3,5	0,41	0,15	0,26	0,550	15,55	± 0	0
Mittel $w =$										15,55	$\Sigma vv = 0,1741$	

$$\psi_m = \pm \sqrt{\frac{\Sigma vv}{n(n-1)}} = \pm \sqrt{0,0290} = \pm 0,1703$$

$$\text{mittl. Fehler in } \text{‰} = \frac{0,1703}{15,55} = 10,95 \text{‰}$$

Tabelle 7.

Vers. Nr.	q_o	q_u	$\frac{q_o}{q_u}$	q_{tot}	d_{90}	h_1	h_2	h	$t + h_2$	w	v	$\nu\nu$
	m ³ /secm	m ³ /secm		m ³ /secm	mm	m	m	m	m	aus Gl. 8		
40	0,018	0,006	3,0	0,024	3,5	0,41	0,15	0,26	0,609	18,48	+ 0	0
41	0,018	0,006	3,0	0,024	3,5	0,50	0,15	0,35	0,707	18,49	+ 0,01	0,0001
Mittel $w =$										18,48	$\Sigma \nu\nu = 0,0001$	

$$\psi_m = \pm \sqrt{\frac{\Sigma \nu\nu}{n(n-1)}} = \pm \sqrt{0,00005} = \pm 0,0071$$

$$\text{mittl. Fehler in } \%_{oo} = \frac{0,0071}{18,48} = 0,38\%_{oo}$$

42	0,012	0,003	4,0	0,015	3,5	0,41	0,15	0,26	0,506	20,36	+ 0,02	0,0004
43	0,012	0,003	4,0	0,015	3,5	0,50	0,15	0,35	0,588	20,39	+ 0,05	0,0025
44	0,016	0,004	4,0	0,020	3,5	0,41	0,15	0,26	0,599	20,28	- 0,06	0,0036
45	0,016	0,004	4,0	0,020	3,5	0,50	0,15	0,35	0,696	20,31	- 0,03	0,0009
Mittel $w =$										20,34	$\Sigma \nu\nu = 0,0074$	

$$\psi_m = \pm \sqrt{\frac{\Sigma \nu\nu}{n(n-1)}} = \pm \sqrt{0,0006} = \pm 0,0245$$

$$\text{mittl. Fehler in } \%_{oo} = \frac{0,0245}{20,34} = 1,20\%_{oo}$$

möglich ist, sondern ein gewellter, bedeckter Oberflächenstrahl entsteht (Abb. 19). Bei dieser Strahlform, die in ganz anderer Weise auf die Sohle trifft, kann die Kolkformel des Verfassers nicht mehr zutreffend sein. Es entstehen wesentlich kleinere Kolk-tiefen. Das untersuchte Verhältnis $\frac{q_o}{q_u} = 1,0$ liegt immer noch in der Labilitätszone zwischen Tauchstrahl und gewelltem, bedecktem Oberflächenstrahl.

In Abb. 20 ist die Kurve aufgetragen, die den mittleren Wert w in Funktion des Verhältnisses $\frac{q_o}{q_u}$ darstellt. Sie kann durch folgende Funktionen dargestellt werden:

$$w = 22,88 \cdot e^{-\frac{1}{0,11 \left(\frac{q_o}{q_u}\right)^3 - 0,15 \left(\frac{q_o}{q_u}\right)^2 + 0,7 \left(\frac{q_o}{q_u}\right) + 0,9}} \quad (9)$$

oder:

$$w = 22,88 - \frac{1}{0,0049 \left(\frac{q_o}{q_u}\right)^3 - 0,0063 \left(\frac{q_o}{q_u}\right)^2 + 0,029 \left(\frac{q_o}{q_u}\right) + 0,064} \quad (9a)$$

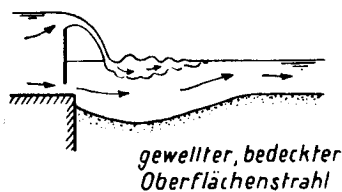
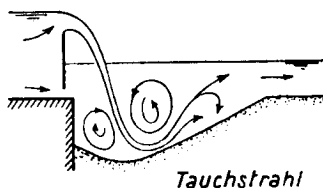


Abb. 19.

In der Folge wurde durch 8 Versuche mit Geschiebe A und C (Abb. 14) die in Abb. 20 dargestellte w -Kurve überprüft. Die Wassermengen für Überfall (q_o) und Unterströmen (q_u), sowie das Verhältnis $\frac{q_o}{q_u}$, die Oberwassertiefe (h_1) und die Unterwassertiefe (h_2) wurden willkürlich angenommen und nach der Gleichung (8) wurde unter Verwendung der durch Abb. 20 gegebenen w -Kurve die Kolkwassertiefe berechnet.

Die Resultate dieser Kontrollversuche sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Die gemessenen Kolkwassertiefen ergeben eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung. Die größte Abweichung beträgt nur $+1,84\%$ (Versuch Nr. 49).

In Abb. 21 sind alle diese Meßpunkte zusammengefaßt und mit den nach den Gleichungen (8) und (9) oder (9a) erhaltenen Funktionen verglichen. Es entsteht bei dieser Darstellung eine Geradenschar mit w als Parameter. Die ebenfalls eingezeichnete Gerade für reines Überströmen ($w = 22,88$) bildet die obere Begrenzung der Kolkiefen.

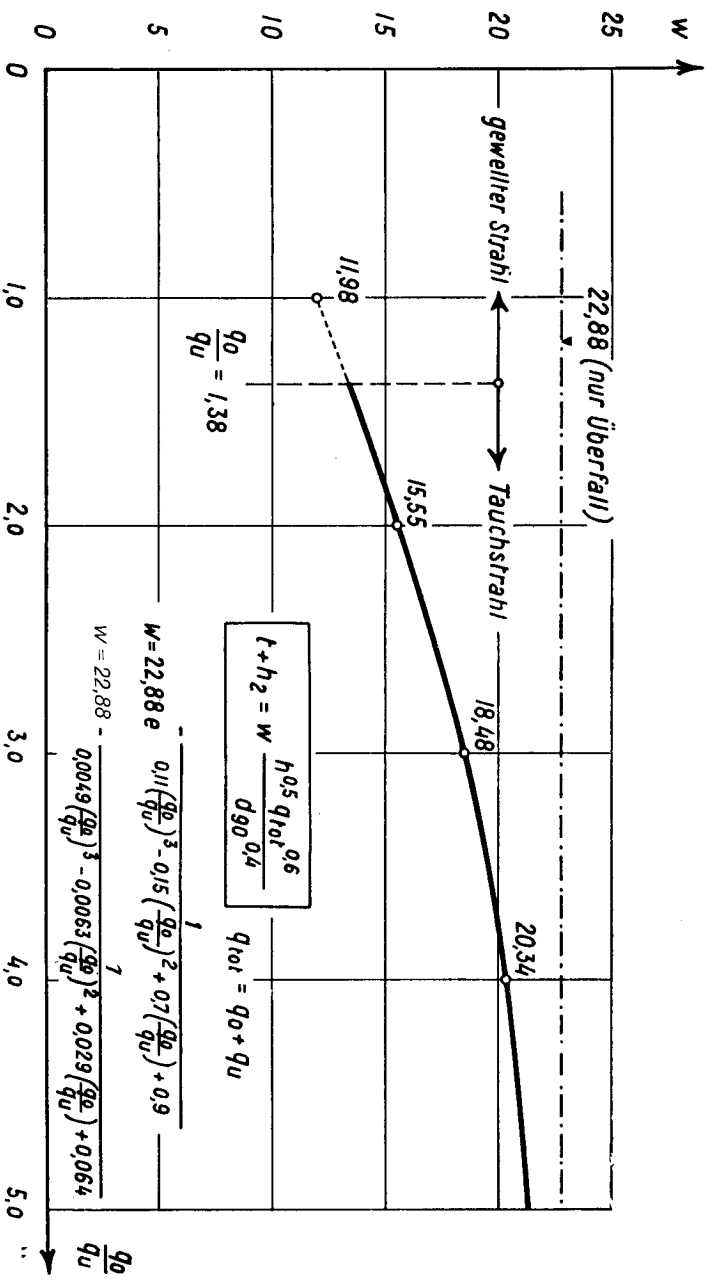


Abb. 20.

Tabelle 8.

Vers. Nr.	gemessen									gerechn. nach Eg.		Unterschied	
	q_o	q_u	$\frac{q_o}{q_u}$	q_{tot}	d_{90}	h_1	h_2	h	$t + h_2$	w n. Kurve Abb. 20 oder Gl. 9 oder 9a	$T + h_2$ Gl. 8		
	m ³ /secm	m ³ /secm		m ³ /secm	mm	m	m	m	m		m	m	%
47	0,012	0,008	1,5	0,020	7,55	0,39	0,14	0,25	0,2995	13,87	0,296	+ 0,0035	+ 1,17
48	0,014	0,004	3,5	0,018	7,55	0,47	0,16	0,31	0,438	19,58	0,436	+ 0,002	+ 0,46
49	0,018	0,010	1,8	0,028	7,55	0,37	0,065	0,305	0,435	14,81	0,427	+ 0,008	+ 1,84
50	0,024	0,010	2,4	0,034	7,55	0,40	0,10	0,30	0,535	16,80	0,539	- 0,004	- 0,75
51	0,007	0,005	1,4	0,012	1,22	0,37	0,14	0,23	0,4165	13,48	0,420	- 0,0035	- 0,84
52	0,011	0,005	2,2	0,016	1,22	0,32	0,16	0,16	0,494	16,15	0,499	- 0,005	- 1,01
53	0,0102	0,006	1,7	0,0162	1,22	0,35	0,15	0,20	0,509	14,50	0,505	+ 0,004	+ 0,79
54	0,0108	0,004	2,7	0,0148	1,22	0,36	0,14	0,22	0,612	17,64	0,610	+ 0,002	+ 0,33

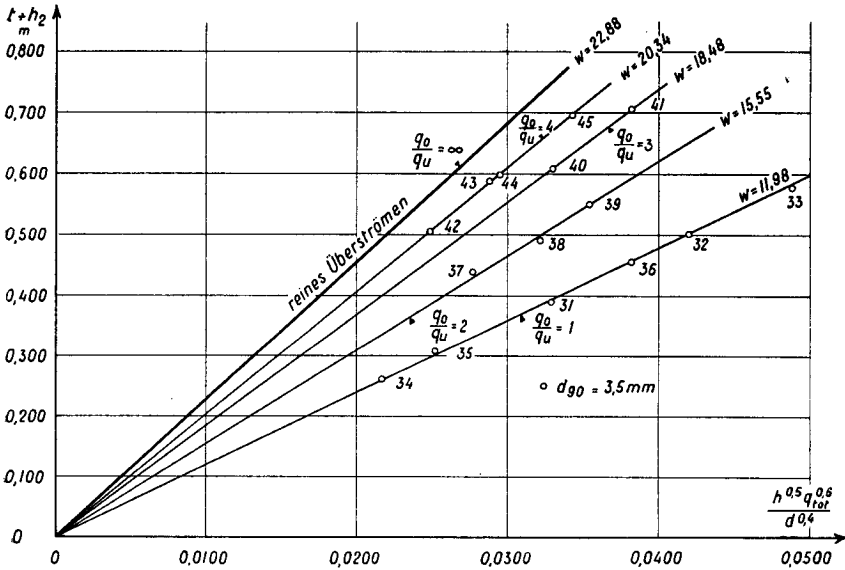


Abb. 21.

c) Einfluß von Geschiebemischungen

Um die Gleichung (8) für die Praxis nutzbar zu machen, ist es notwendig, als Sohle auch eine Geschiebemischung zu verwenden, deren Zusammensetzung den Charakter eines typischen Fluß-

geschiebes aufweist. Die Zusammenstellung verschiedener Naturanalysen hat ergeben, daß die Korngrößen von 0—90 % angenähert durch die Fullerkurve

$$p = 90 \left(\frac{d_p}{d_{90}} \right)^\alpha \quad (10)$$

dargestellt werden können, wobei $\alpha = \frac{1}{3}$ bis $\frac{2}{3}$ (im Mittel $\alpha = \frac{1}{2}$) und $d_{max} = 1,3 - 2,2 d_{90}$ (im Mittel $d_{max} = 1,5 d_{90}$).

Dieses typische Flußgeschiebe ist in Abb. 22 gestrichelt dargestellt.

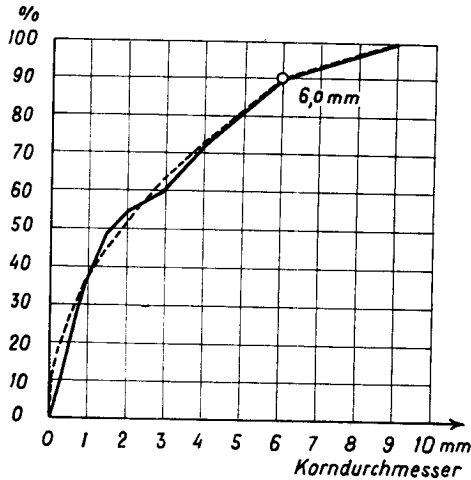


Abb. 22.

----- $p = 90 \left(\frac{d_p}{d_{90}} \right)^\alpha \quad \alpha = \frac{1}{2} \quad d_{max} = 1,5 \cdot d_{90}$
 ————— im Modell verwendete Mischung

Die genaue Zusammensetzung der verwendeten Mischung ist ebenfalls in Abb. 22 eingezeichnet.

Aus technischen Gründen wichen die feineren Kornkategorien unter 1,0 mm Durchmesser gegenüber dem Sollwert ab. Diese Abweichung war für die Durchführung der Versuche belanglos, da nur die größten Kornkategorien für den Kolk maßgebend sind.

Bei allen Versuchen hatte das Wasser die Möglichkeit, Kolk und Abpflasterung frei zu bilden. Für die Abpflasterung stand das Material des Kolkes zur Verfügung. Die größten Kompo-

menten blieben im Kolke liegen und dienten zu seiner Abpflasterung, die besonders auf dem Kolkboden ausgeprägt war. Es war möglich, durch Wegnahme des beweglichen Geschiebes parallel zur Kolkböschung und tangential an den Kolkboden, die Abpflasterung im Kolkboden nicht zu stören (Abb. 23). Wie bei den

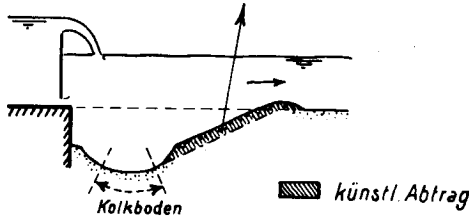


Abb. 23.

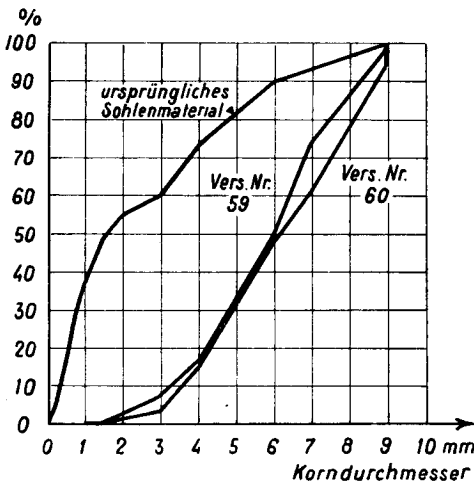


Abb. 24. Analyse der Deckschicht des Kolkes bei Versuch Nr. 59 und Versuch Nr. 60.

Versuchen mit praktisch einheitlichem Geschiebe konnte somit der Abrieb des Geschiebes berücksichtigt werden.

In Abb. 24 sind zur verwendeten Mischung zwei Sieb-Analysen der durch die grobe Abpflasterung des Kolkes gebildeten Deckschicht eingezeichnet. Der mittlere Durchmesser dieser Deckschicht bei 50 % der Siebkurve beträgt 6 mm. In der Siebkurve der Gesamtmischung 0,2—9,0 mm liegt dieser Durchmesser bei un-

Tabelle 9.

Vers. Nr.	gemessen									gerechnet nach Eggenberger		
	q_o	q_u	$\frac{q_o}{q_u}$	q_{tot}	d	h_1	h_2	h	$t + h_2$	w aus Kurve Abb. 20	d aus Gl. 8	nach Siebkurve Abb. 22
	m ³ /secm	m ³ /secm		m ³ /secm	mm	m	m	m	m	od. Gl. 9, 9a	mm	%
55	0,009	0,005	1,8	0,014	0,2-9,0	0,35	0,15	0,20	0,252	14,81	5,87	89
56	0,012	0,006	2,0	0,018	0,2-9,0	0,36	0,17	0,19	0,290	15,55	6,38	91
57	0,015	0,010	1,5	0,025	0,2-9,0	0,36	0,14	0,22	0,3435	13,87	6,17	90,5
Abb. 25 58	0,036	—	∞	0,036	0,2-9,0	0,33	0,256	0,074	0,401	22,88	6,48	91,5
59	0,014	0,004	3,5	0,018	0,2-9,0	0,40	0,14	0,26	0,435	19,58	6,10	90,3
60	0,023	0,010	2,3	0,033	0,2-9,0	0,40	0,16	0,24	0,509	16,55	6,07	90,1

gefähr 90 %. Daraus geht deutlich der maßgebende Einfluß der größten Körner des Gemisches für die Kolkbildung, d. h. die Erosionserscheinung hervor.

In Tabelle 9 sind die Resultate der ausgeführten Versuche zusammengestellt. Es wurde unter Anwendung der Gleichungen (8) und (9) oder (9a) aus der gemessenen Kolkwassertiefe ($t + h_2$) rückwärts der maßgebende Korndurchmesser ermittelt. Es zeigte sich auch hier, daß der maßgebende Korndurchmesser bei ca. 90 % der Gesamtmischung liegt, also mit dem mittleren Durchmesser bei 50 % der Deckschicht übereinstimmt.

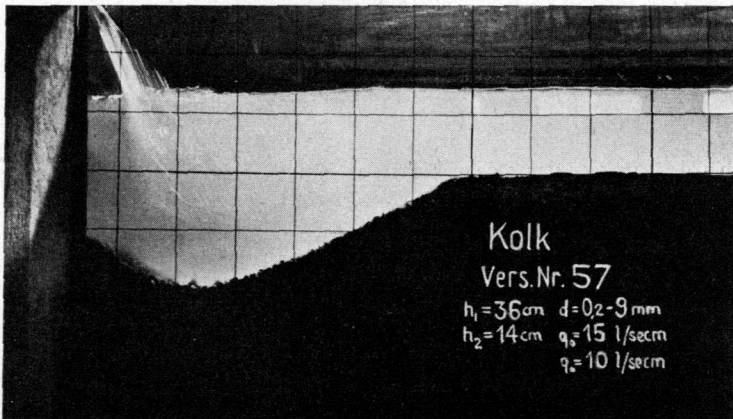


Abb. 25. Versuch Nr. 57.

IV. Kapitel

1. Ähnlichkeit der Modellversuche

Viele Vorgänge in der Natur, die man in der Technik erfassen möchte, sind durch rein theoretische Behandlung nicht zu lösen. Aus diesem Grunde haben Ingenieure und Physiker seit ca. 70 Jahren (*Froude* 1870, [1]) eine Methode entwickelt, die darin besteht, den Vorgang in verkleinertem Maßstabe nachzubilden.

Diese Methode der Versuche mit Modellen, die der Natur geometrisch ähnlich sind, hat nur Existenzberechtigung, wenn es gelingt, die am Modell erhaltenen Ergebnisse in die Natur zu übertragen. Dieses Problem ist das Ziel der Theorie der mechanischen Ähnlichkeit.

Zwei Bewegungen sind mechanisch ähnlich, wenn:

1. die Körper, die diese Bewegung ausführen, geometrisch ähnlich sind und zwei entsprechende Massenpunkte geometrisch ähnliche Bahnkurven haben,

2. die entsprechenden Größen der gleichen physikalischen Art (Kräfte, Massen, Geschwindigkeiten usw.) zueinander im gleichen Verhältnis stehen. (Dieses Verhältnis kann je nach der Art der betrachteten Größen verschieden sein.)

Dabei müssen bestimmte Bedingungen für diese Ähnlichkeit eingehalten werden. Es sind z. B. bei Abflußvorgängen mit freiem Wasserspiegel die Beschleunigung der Schwere im Modell und in der Natur gleich groß [6]. Dies ist, in allgemeinsten Form gesagt, die *Froude'sche* Bedingung.

Es seien:

L, l zwei charakteristische homologe Längen,
 T, t zwei entsprechende Zeiten.

Dabei beziehen sich die großen Buchstaben auf den Naturvorgang und die kleinen auf das Modell.

Bezeichnet man weiter mit

$\lambda = \frac{L}{l}$ das konstante Verhältnis der Längen (reziproker Wert des Längenmaßstabes)

$\tau = \frac{T}{t}$ das Verhältnis der Zeiten,

so beträgt die Beschleunigung der Schwere

$$\text{in der Natur} = \frac{L}{T^2}$$

$$\text{und im Modell} = \frac{l}{t^2}$$

Diese Beschleunigungen sind aber gleich groß und es ergibt sich:

$$\frac{L}{T^2} = \frac{l}{t^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{L}{l} \cdot \frac{t^2}{T^2} = 1$$

oder

$$\lambda \cdot \frac{1}{\tau^2} = 1$$

nämlich das Froude'sche Ähnlichkeitsgesetz. Aus diesem Ähnlichkeitsgesetz erhalten wir folgende Verhältnisse bzw. Maßstäbe:

$$\text{Verhältnis der Längen (auch Geschiebegroößen)} \quad \frac{L}{l} = \lambda \quad \text{also Längenmaßstab: } 1:\lambda$$

$$\text{Verhältnis der Zeit} \quad \frac{T}{t} = \tau = \lambda^{1/2} \quad \text{also Zeitmaßstab: } 1:\lambda^{1/2}$$

$$\text{Verhältnis der Flächen} \quad \frac{F}{f} = \lambda^2 \quad \text{also Flächenmaßstab: } 1:\lambda^2$$

$$\text{Verhältnis der Volumen} \quad \frac{V}{v} = \lambda^3 \quad \text{also Volumenmaßstab: } 1:\lambda^3$$

$$\text{Verhältnis der Kräfte} \quad \frac{K}{k} = \frac{V}{v} = \lambda^3 \quad \text{also Kräftemaßstab: } 1:\lambda^3$$

$$\text{Verhältnis der Wassermengen pro sec (Volumina pro Zeiteinheit)} \quad \frac{Q}{q} = \frac{V}{v} = \frac{V}{v} \cdot \frac{t}{T} = \frac{\lambda^3}{\lambda^{1/2}} = \lambda^{5/2}$$

also Maßstab der Wassermengen pro sec: $1:\lambda^{5/2}$

Verhältnis der Wassermengen pro sec und Meter Breite

$$\frac{\frac{Q}{L}}{\frac{q}{l}} = \frac{V}{v} \cdot \frac{t}{T} \cdot \frac{l}{L} = \frac{\lambda^3}{\lambda^{1/2} \cdot \lambda} = \lambda^{3/2} \quad \text{also Maßstab der Wassermengen pro sec. und Meter Breite: } 1:\lambda^{3/2}$$

Vorausgesetzt, daß nur die Schwere als die Bewegung erzeugende Kraft auftritt, ist es möglich, mit genügend großer Genauigkeit für „rein hydraulische Versuche“ Modellergebnisse mit diesen Maßstäben auf Naturgröße zu übertragen.

Bei den meisten dieser hydraulischen Vorgänge tritt aber die Reibung als zusätzliche Kraft auf. Bei voll ausgebildeter Turbulenz in Natur und Modell läßt sich jedoch mit Hilfe des Prandtl'schen Ansatzes über die auftretende Schubspannung zeigen [6], daß auch das Verhältnis dieser Reibungskräfte λ^3 beträgt.

2. Kontrollversuche zur Überprüfung des Froude'schen Ähnlichkeitsgesetzes

Die in den beschriebenen Versuchen erhaltene Formel zur Bestimmung der Kolkentiefe bei Überfall und bei der Kombination Überfall-Unterströmen entspricht ihrem Aufbau nach dem Froude'schen Gesetz.

$$t + h_2 = w \frac{h^{0,5} \cdot q_{tot}^{0,6}}{d_{90}^{0,4}} \quad (8)$$

Es betragen nämlich die Verhältnisse von:

Kolkentiefe + Unterwassertiefe $\frac{T + H_2}{t + h_2} = \lambda$

Absturzhöhe $\left(\frac{H}{h}\right)^{0,5} = \lambda^{0,5}$

Wassermenge pro sec. und Meter Breite $\left(\frac{Q}{q}\right)^{0,6} = \lambda^{3/2 \cdot 0,6} = \lambda^{0,9}$

Geschiebedurchmesser $\left(\frac{D_{90}}{d_{90}}\right)^{0,4} = \lambda^{0,4}$

somit ist $\lambda = \frac{\lambda^{0,5} \cdot \lambda^{0,9}}{\lambda^{0,4}} = \frac{\lambda^{1,4}}{\lambda^{0,4}} = \lambda$

Experimentell wurde die Übertragbarkeit nach dem Froude'schen Gesetz durch zwei Versuchspaare nachgewiesen. Versuch Nr. 1 wurde im Maßstab 1 : 2,87 mit Versuch Nr. 26 wiederholt

und ergab eine Abweichung des Verhältnisses vom Sollverhältnis von + 4,0 %; dieser relativ hohe Wert entstand dadurch, daß sich für die in Versuch Nr. 26 sehr kleine Überfallwassermenge von 4,1 l/secm, die Belüftung des Überfallstrahles schwierig gestaltete.

Der Sollmaßstab der Versuche Nr. 16 und Nr. 46 beträgt 1 : 2,16 und stimmt genau mit dem aus dem Versuch erhaltenen Maßstab überein.

In der nachfolgenden Tabelle 10 sind die gemessenen Versuchsergebnisse zusammengefaßt.

Tabelle 10.

Kontrollversuche zur Überprüfung des Froude'schen Ähnlichkeitsgesetzes.

Vers. Nr.	d_{90}	q_0	h_1	h_2	h	gerechnet		gemessen		Bemerkungen	Unterschied	
						$t + h_2$ nach Gl. 8	Verhältnis λ	$t + h_2$	Verhältnis		%	
						m		m				
1	3,5	0,020	0,56	0,21	0,35	0,781	2,87	0,771	2,99	gestört wegen ungenügender Belüftung des Überfalls	+0,12	+4,0
26	1,22	0,0041	0,195	0,073	0,122	0,272		0,258				
16	7,55	0,024	0,50	0,15	0,35	0,646	2,16	0,651	2,16	—	—	
46	3,5	0,0076	0,232	0,070	0,162	0,299		0,302				

3. Kontrolle der Formeln von Schoklitsch, Veronese und Jaeger hinsichtlich ihres Aufbaus

Setzt man in den veröffentlichten Formeln die Verhältnisse unter Berücksichtigung der Froude'schen Bedingung ein, so ergibt sich nach

Schoklitsch

$$T = \frac{4,75}{d_m^{0,32}} \cdot H^{0,2} \cdot q^{0,57}$$

(1)

$$\lambda^1 = \frac{\lambda^{0,2} \cdot \lambda^{3/8} \cdot 0,57}{\lambda^{0,32}} = \frac{\lambda^{0,2} \cdot \lambda^{0,855}}{\lambda^{0,32}} = \frac{\lambda^{1,055}}{\lambda^{0,32}} = \lambda^{0,735}$$

Veronese

$$T = \frac{3,68}{d^{0,42}} \cdot H^{0,225} \cdot q^{0,54} \quad (2)$$

$$\lambda^1 = \frac{\lambda^{0,225} \cdot \lambda^{3/2 \cdot 0,54}}{\lambda^{0,42}} = \frac{\lambda^{0,225} \cdot \lambda^{0,81}}{\lambda^{0,42}} = \frac{\lambda^{1,035}}{\lambda^{0,42}} = \lambda^{0,615}$$

Jaeger

$$T = 6 \cdot H^{0,25} \cdot q^{0,5} \cdot \left(\frac{h}{d}\right)^{1/3} \quad (3)$$

$$\lambda^1 = \lambda^{0,25} \cdot \lambda^{3/2 \cdot 0,5} = \lambda^{0,25} \cdot \lambda^{0,75} = \lambda^1$$

Es zeigt sich, daß Formel (1) und (2) ihrem Aufbau nach dem Froude'schen Ähnlichkeitsgesetz nicht entsprechen. Die Formel (3), aus den Kolkversuchen von Veronese abgeleitet, entspricht dagegen dem Froude'schen Gesetz.

V. Kapitel

1. Zusammenstellung der Resultate

a) Kolktiefe

Die Ausführung systematischer Versuche gestattete das Aufstellen einer Formel

$$t + h_2 = w \frac{h^{0,5} \cdot q_{tot}^{0,6}}{d_{90}^{0,4}} \quad (8)$$

zur Bestimmung der Kolkwassertiefe bei reinem Überströmen, in welcher t , h_2 , h in m, d_{90} in mm und q_{tot} in $m^3/secm$ auszudrücken sind. Der Faktor w ergab sich zu 22,88; d_{90} bedeutet den maßgebenden Korndurchmesser bei 90% der gesamten Sohlenmischung.

Für die Kombination Überströmen-Unterströmen ändert sich die Struktur der Formel nicht. Es wird lediglich für

verschiedene Verhältnisse $\frac{q_o}{q_u}$ jeweils gemäß nachstehender Gleichungen (9) oder (9a) (Abb. 20) ein variabler Wert w erhalten, welcher durch die Funktionen

$$w = 22,88 \cdot e^{-\frac{1}{0,11\left(\frac{q_o}{q_u}\right)^3 - 0,15\left(\frac{q_o}{q_u}\right)^2 + 0,7\left(\frac{q_o}{q_u}\right) + 0,9}} \quad (9)$$

$$w = 22,88 - \frac{1}{0,0049\left(\frac{q_o}{q_u}\right)^3 - 0,0063\left(\frac{q_o}{q_u}\right)^2 + 0,029\left(\frac{q_o}{q_u}\right) + 0,064} \quad (9a)$$

ausgedrückt werden kann, wobei $q_o + q_u = q_{tot}$ ist.

Die Formeln (8) und (9) gelten für $\frac{q_o}{q_u} \geq 1,38$, können aber praktisch bis zum Wert $\frac{q_o}{q_u} = 1$ herab zur Anwendung gelangen. Bei einem Verhältnis $\frac{q_o}{q_u} < 1,38$ ist streng genommen das Unterströmen gegenüber dem Überströmen zu groß, daß zuerst ein Labilitätsbereich entsteht, worauf kein Tauchstrahl mehr möglich ist und ein gewellter, bedeckter Oberflächenstrahl entsteht. Bei dieser Strahlform entstehen wesentlich kleinere Kolkiefen.

Es ist also möglich, bei gegebener Überfallwassermenge q_o und gegebener unterströmender Wassermenge q_u nach der Formel (9) oder (9a) oder nach Abb. 20 den Wert w zu bestimmen. w in die Formel (8) eingesetzt, ergibt die maximale Kolkwassertiefe ($t + h_2$). Die Kolkwassertiefe ist definiert als Summe der Kolktiefe (gemessen von ursprünglicher Sohle) + Unterwassertiefe.

Formel (8) zeigt implizite den Einfluß der Unterwassertiefe h_2 auf die Kolkbildung. Sind die Wassermenge q_{tot} , die Absturzhöhe h und der Geschiebedurchmesser d_{90} konstant, so erreicht die maximale Kolktiefe t einen Wert, der um den gleichen Betrag zunimmt, wie die Unterwassertiefe abnimmt und umgekehrt.

b) Form des Kolktes

Nach den Bezeichnungen der Abb. 26 charakterisieren die Längen l_1 und l_2 und die maximale Kolkwassertiefe $t_{max} + h_2$ die zu erwartende Kolkform.

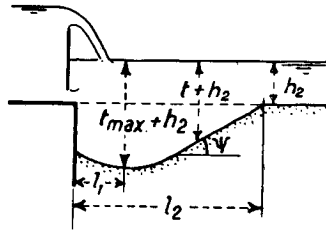


Abb. 26.

Die Untersuchung der Abhängigkeit der Kolkängen von den in Frage kommenden Variablen h , q_0 (bzw. q_{tot}) und d_{90} würde eine analoge systematische Verarbeitung der Versuchsergebnisse, wie sie für die Kolkwassertiefe erfolgt ist, erfordern. Versuche, bei denen die genannten grundlegenden Variablen mechanisch ähnlich sind, müssen — soll das Froude'sche Gesetz anwendbar sein — geometrisch ähnliche Kolkbilder ergeben, d. h. es müssen für solche Versuche die Längen l_1 bzw. l_2 verschiedener Versuche derselben Gruppe ebenfalls geometrisch ähnlich werden. Um diesen Nachweis zu erbringen, sind in der Tabelle 11 die beiden mechanisch ähnlichen Versuchspaare Nr. 1 und 26 und Nr. 16 und 46 zusammengestellt.

Tabelle 11.

Vers. Nr.	Verhältnis gerechnet (s. Tab. 10)	l_1 gemessen	Verhältnis	l_2 gemessen	Verhältnis	Bemerkungen
		cm		cm		
1	2,87	35,5	2,96	149	2,92	gestört wegen ungenügender Belüftung des Überfalls (siehe Kap. IV, 2)
26		12		51		
16	2,16	32,5	2,17	123	2,16	
46		15		57		

Abgesehen von der durch versuchsmäßige Störung verursachten Abweichung beim ersten Versuchspaar, läßt sich aus dieser Zusammenstellung die Gültigkeit des Froude'schen Gesetzes für mechanisch ähnliche Versuche mit Bestimmtheit entnehmen.

Die strenge geometrische Ähnlichkeit der Kolkbildung würde erfordern, daß die Verhältniszahlen

$$\frac{l_1}{t_{max}} \text{ und } \frac{l_2}{t_{max}} \quad \text{bzw. auch} \quad \frac{l_1}{t_{max} + h_2} \text{ und } \frac{l_2}{t_{max} + h_2}$$

für mechanisch ähnliche Versuche je für sich konstant sind. (t_{max} bedeutet hierin die größte Kolktaiefe, die bisher einfach mit t bezeichnet wurde.) Die Untersuchung dieser Bedingung würde aber die Vornahme zahlreicher weiterer Versuche unter Erweiterung der mechanisch ähnlichen Gruppen verlangen, was über den Rahmen dieser Arbeit hinaus gehen würde.

Um trotzdem zu versuchen, zu einem für die praktischen Bedürfnisse richtungweisenden Resultat zu gelangen, sind in Tabelle 12 die Verhältniszahlen

$$\frac{l_1}{t_{max} + h_2} \text{ und } \frac{l_2}{t_{max} + h_2},$$

sowie auch die versuchsmäßig erhaltenen Böschungswinkel ψ der Kolkwannen zusammengestellt.

Es zeigen sich — wie aus der im allgemeinen bei den Versuchen 1—60 nicht vorhandenen mechanischen Ähnlichkeit zu erwarten — wesentlich stärkere Streuungen als bei den Kolkwassertiefen $t_{max} + h_2$; jedoch weichen die Einzelresultate nicht allzu sehr von den Mittelwerten ab, nämlich

$\frac{l_1}{t_{max} + h_2} = 0,5 \pm 0,1$ $\frac{l_2}{t_{max} + h_2} = 1,8 \pm 0,2$ $\psi = 30^\circ \pm 2^\circ$	(10)
---	------

Tabelle 12.

Vers. Nr.	$\frac{l_1}{t_{max} + h_2}$	$\frac{l_2}{t_{max} + h_2}$	ψ in °	Vers. Nr.	$\frac{l_1}{t_{max} + h_2}$	$\frac{l_2}{t_{max} + h_2}$	ψ in °
1	0,5	1,9	28	31	0,7	1,8	33
2	0,5	1,5	27	32	0,6	1,9	31
3	0,4	2,0	28	33	0,7	2,0	30
4	0,4	1,7	25	34	0,5	1,5	32
5	0,5	1,7	26	35	0,6	1,6	32
6	0,5	1,7	32	36	0,6	1,6	30
7	0,5	2,0	28	37	0,6	1,8	30
8	0,5	1,5	32	38	0,5	1,9	30
9	0,5	1,8	30	39	0,6	2,0	31
10	0,6	2,0	27	40	0,5	2,0	30
11	0,4	2,0	31	41	0,5	1,9	31
12	0,5	1,9	29	42	0,5	1,7	33
13	0,5	1,5	29	43	0,4	1,8	32
14	0,5	1,8	30	44	0,5	1,8	34
15	0,5	1,8	29	45	0,5	1,9	34
16	0,5	1,9	30	46	0,5	1,9	30
17	0,5	1,7	27	47	0,6	1,5	26
18	0,6	1,5	33	48	0,6	1,8	30
19	0,6	1,6	30	49	0,6	2,0	29
20	0,6	1,6	33	50	0,6	2,0	34
21	0,6	1,8	31	51	0,4	1,6	32
22	0,6	1,9	30	52	0,5	1,7	33
23	0,6	1,9	33	53	0,4	1,6	32
24	0,6	1,9	32	54	0,4	1,8	30
25	0,6	1,6	33	55	0,6	1,5	27
26	0,5	2,0	29	56	0,5	1,5	29
27	0,4	1,7	34	57	0,6	1,9	29
28	0,4	1,6	33	58	0,6	1,7	31
29	0,4	2,0	30	59	0,6	1,9	30
30	0,4	2,0	30	60	0,6	1,9	31
				Mittel	0,5	1,8	30°

$$\frac{l_1}{t_{max} + h_2} : \Sigma v v = 0,42$$

$$\psi_m = \pm \sqrt{\frac{0,42}{59}} = \pm 0,08 = \sim \pm 0,1$$

$$\frac{l_2}{t_{max} + h_2} : \Sigma v v = 1,74$$

$$\psi_m = \pm \sqrt{\frac{1,74}{59}} = \pm 0,17 = \sim \pm 0,2$$

$$\psi : \Sigma v v = 287$$

$$\psi_m = \pm \sqrt{\frac{287}{59}} = \pm 2,2^\circ = \sim \pm 2^\circ$$

In Abb. 27 sind auf zwei Arten die mittlere Kolkform und die beiden extremsten Formen aufgezeichnet. In beiden Darstellungen wurden als Abszisse die Relativ-Längen $\frac{l_1}{t_{max} + h_2}$ und $\frac{l_2}{t_{max} + h_2}$ gewählt, als Ordinate in der ersten Darstellung $\frac{t}{t_{max}}$ und in der zweiten $\frac{t + h_2}{t_{max} + h_2}$. Letztere hat den Vorteil, daß die Neigung der Kolkböschung unverzerrt erscheint; dafür wird aber die Schwellenhöhe variabel.

Für die praktische Anwendung ist das erhaltene Resultat (10) genügend genau. Es empfiehlt sich aber, die in Abb. 27 strichpunktiert eingezeichnete Umhüllende der gemessenen ungünstigsten Kolkformen für die Bestimmung der Foundationstiefen zu verwenden.

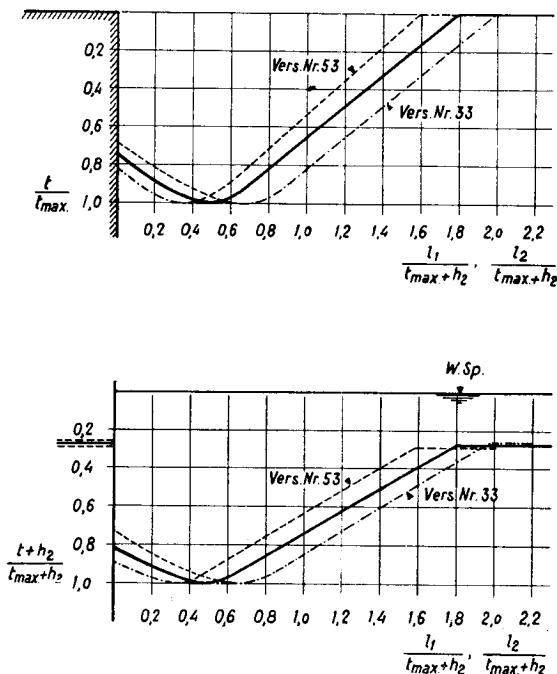


Abb. 27.

- extremste Werte
- Mittelwerte aller 60 Versuche (Tabelle 11)

2. Schlußfolgerungen

Auf rein theoretischer Grundlage, d. h. ohne Durchführung praktischer Versuche konnte bis jetzt kein brauchbarer Ansatz zur Bestimmung der Kolktiefe gefunden werden. Der Energievernichtungsvorgang beim reinen Überströmen und bei der Kombination Überströmen-Unterströmen und sein Einfluß auf die bewegliche Sohle ist ein sehr kompliziertes hydraulisches Problem, das voraussichtlich erst nach genügender Abklärung der Fragen des Geschiebetriebes mit Erfolg behandelt werden kann.

Es zeigte sich bei den durchgeführten Versuchen, daß durch Modellversuche erhaltene Kolke quantitativ in die Natur übertragen werden können, sodaß die Behandlung spezieller Einzelfälle im Modell möglich ist.

Es bestätigt sich die schon von *Scimemi* [9] gemachte Feststellung, daß bis ca. 1 mm mittlerer Korngröße des Geschiebes im Modell die Gesetzmäßigkeit der Kolkbildung noch zutrifft. Der in der vorliegenden Untersuchung verwendete kleinste mittlere Geschiebekorndurchmesser d_{50} betrug 0,9 mm (Abb. 14).

Als Schutz gegen die gemessenen sehr großen Kolkiefen bei reinem Überfall wird normalerweise ein Tosbecken eingebaut, dessen Länge so groß gewählt wird, daß der überfallende Strahl nicht auf die bewegliche Sohle auftrifft. Es konnte in den Versuchen die interessante Feststellung gemacht werden, daß ohne Tosbecken die Kolktiefe bei der Kombination Überströmen-Unterströmen mit zunehmender unterströmender Wassermenge abnimmt.

Literaturverzeichnis

- [1] *W. Froude*: Transactions of the Inst. of Naval Architects XI, 1870; Report of the British Association 1872.
- [2] *E. Meyer-Peter*: Die Versuchsanstalt für Wasserbau an der Eidg. Techn. Hochschule in Zürich. Schweiz. Bauzeitung 1930.
- [3] *A. Schoklitsch*: Kolkbildung unter Überfallsstrahlen. Wasserwirtschaft 1932.
- [4] *H. Blattner*: Kolk- und andere Untersuchungen an schweizerischen Wehranlagen. Zürich 1935.
- [5] *A. Schoklitsch*: Stauraumverlandung und Kolkabwehr. Wien 1935.
- [6] *E. Meyer-Peter* und *H. Favre*: Der wasserbauliche Modellversuch im Dienste der Wasserkraftnutzung und der Flußkorrektur. Zürich 1937.
- [7] *A. Veronese*: Erosioni di fondo a valle di uno scarico. Roma 1937.
- [8] *Ch. Jaeger*: Über die Ähnlichkeit bei flußbaulichen Modellversuchen. Wasserwirtschaft 1939.
- [9] *E. Scimemi*: Sulla relazione che intercede fra gli scavi osservati nelle opere idrauliche originali e nei modelli. Milano 1939.

Curriculum vitae

Ich wurde am 27. März 1916 in Bern geboren, besuchte die bernischen Schulen und bestand im Frühling 1936 an der Realschule des Städtischen Gymnasiums die Reifeprüfung. Ich immatrikulierte mich im Wintersemester 1936/37 an der Eidg. Techn. Hochschule in Zürich, wo ich das Studium Ende 1940 mit dem Diplom als Bauingenieur abschloß. Auf Neujahr 1941 wurde ich wissenschaftlicher Assistent von Herrn Prof. Dr. E. Meyer-Peter an der Versuchsanstalt für Wasserbau an der Eidg. Techn. Hochschule. Seit April 1943 bin ich als Ingenieur bei den Nordostschweizerischen Kraftwerken in Baden tätig.

Thalwil, den 25. Juni 1943.

Willy Eggenberger.