

Geschiebe- und Wasserabfall bei Talsperren.



VORWORT.

Unter den verschiedensten Baumassnahmen auf dem Gebiete der Wildbachverbauung kommt die Errichtung von Talsperren in erster Linie in Betracht. Wenn auch über Talsperren viele Versuche unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse bei Wasserkraftanlage ausgeführt wurden, so hat man doch nur wenige vom Standpunkte der Wildbachverbauung unternommen. Da der Verfasser in Bezug auf das Verhältnis zwischen Geschiebe und Talsperre im Wildbach lange Zeit hindurch viele ungelöste Fragen vorfand, versuchte er einige davon in der vorliegenden Arbeit der Lösung zuzuführen.

Seitdem Professor Wang in die Lehre der Wildbachverbauung Systematik brachte, hat sie wenig Vorschritte auf theoretischem Gebiete gemacht, trotzdem die Wildbachverbauung in der Praxis überall besonders in Japan eine ziemlich bedeutende Entwicklung erlangt hat. Wenn auch der Verfasser einige Punkte in Wang's Werk kritisiert hat, so schätzt er doch diese Arbeit sehr hoch und dankt an dieser Stelle weiland Herrn Prof. Wang herzlichst für die wertvollen Anregungen, die ihm sein Werk über Wildbachverbauung gegeben hat.

Die nachstehenden Versuche wurden im November 1928 in der Versuchsanstalt für Wasserbau im Bundesministerium für Land u. Forstwirtschaft in Wien durchgeführt. Es sei mir erlaubt, an dieser Stelle dem Leiter der Versuchsanstalt Herrn Ministerialrat Ehrenberger für sein anlässlich der Versuchsdurchführung mir bewiesenes Entgegenkommen meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

Februar 1929.

Der Verfasser.

## INHALTSVERZEICHNIS.

Vorwort.

Einleitung.

I. Versuche über die Abfallkurve.

(A) Überfall bei rechtwinkliger Kante.

(B) Überfall bei unter  $45^\circ$  geneigter Kante.

(C) Überfall bei bogenförmiger Kante.

II. Die durch den Überfall auftretende Kolkerscheinung.

(A) Kolkerscheinung und Kantenform.

(B) Kolkerscheinung und Anlauf der Stirnwand.

(C) Kolkerscheinung und Unterwassertiefe.

(D) Länge des Sturzbettes.

III. Stoss des Geschiebes auf das Sturzbett.

Schlussbemerkungen.

## Geschiebe- und Wasserabfall bei Talsperren.

### EINLEITUNG.

Bei dem Bau von Talsperren in einem Wildbach muss ihr Querschnitt vor allem die Standsicherheitsbedingungen erfüllen. Welche Form, besonders welcher Anlauf der talseitigen Stirnwand einer Talsperre ist bei Erfüllung der Sicherheitsbedingungen die beste? In Österreich und in der Schweiz haben die talseitigen Stirnwände der Talsperren meistens steilen, hingegen in Japan flachen Anlauf.

Über die Entscheidung des Anlaufs der Stirnwand liegen nur einige wenige Literaturangabe vor. Thiéry<sup>(1)</sup> entnahm einem Aufsatz von M. Vaultrin (Revue des eaux et forets, Jahrgang 1884.) folgende Bedingungsgleichung:

$$n < v \sqrt{\frac{2}{gh}} \quad (1)$$

Prof. F. Wang<sup>(2)</sup> hat ebenfalls diese Gleichung, die den Anlauf der Stirnwand und die Vorfeldlänge der Talsperren zu rechen ermöglicht, in seinem Werk angeführt.

Da ich in Bezug auf diese Gleichung anderer Meinung war, habe ich sie sowohl vom theoretischen als auch vom praktischen Standpunkt aus auf ihre Richtigkeit geprüft.

1). Die Ableitung der Gleichung (1) ist folgende: Auf ein Material im Punkte A wirkt als Horizontalkraft die Trägheit des Wasserstromes, der mit der Geschwindigkeit= $v$  ankommt, und als Vertikalkraft, die Schwerkraft mit der Beschleunigung= $g$ , dann ist

$$y = \frac{1}{2} g t^2,$$

$$x = v t,$$

daraus folgt

$$y = \frac{g}{2v^2} x^2 \quad (2)$$

Wenn die Talsperrehöhe mit  $h$ , das Böschungsverhältnis mit  $n$  bezeichnet wird, ist die Fussbreite  $b = n h$ . Durch Einsetzen von  $x = b = n h$ ,  $y = h$  in die Gleichung (2) folgt

$$h = \frac{g n^2 h^2}{2 v^2}$$

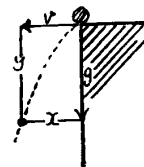


Abb. 1.

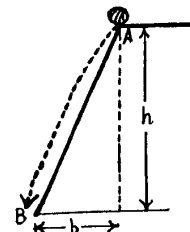


Abb. 2.

(1) E. Thiéry: Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement. (1891). S. 171—.

(2) F. Wang: Grundriss der Wildbachverbauung. (1901), S. 303.

$$n = v \sqrt{\frac{2}{gh}} \quad (3)$$

Damit das Geschiebe nicht von A auf die Stirnwand AB fällt, wodurch sie geschädigt werden kann, muss

$$n < v \sqrt{\frac{2}{gh}}$$

Ohne Zweifel zeigt die Bahn des Materials eine der Gleichung (2) entsprechende Abfallkurve, wenn das Material im Punkt A genau die horizontale Geschwindigkeit  $v$  hat und kein anderer Widerstand vorhanden ist. Es ist aber fraglich, ob das Geschiebe tatsächlich vom Punkte A mit einer solchen Abfallkurve abfällt, weil es dann wirklich die Geschwindigkeit  $v$  haben müsste. Der Wasserstrom wirkt auf das Geschiebe mit der Geschwindigkeit  $v$ , aber dieses hat wegen der Reibung nicht die Geschwindigkeit  $v$ , sondern eine ganz kleine Geschwindigkeit, nach Wang die Grenzgeschwindigkeit  $v=0$ . Es scheint, als ob das Geschiebe im Augenblick des Abfallens vom Punkte A seine Reibung verliert und die Geschwindigkeit  $v$  hat. Doch beim Absturz des betreffenden Steines, durch den die Stirnwand der Talsperre beschädigt werden könnte, ragt ein Teil des Steines schon über die Kante vor und unterliegt bereits der Wirkung der Schwerkraft, während der andere Teil noch mit der Reibung auf der Krone bleibt. Darum wird obige Gleichung im allgemeinen für Geschiebe ungültig sein, wengleich sie auch für feinsten Kies oder Sand gültig ist.

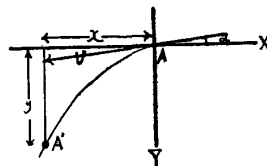
Es ist klar, dass die Abfallkurve von Geschiebe von der Kantenform abhängig ist. Aber in dieser Gleichung findet nur die einzige Kronenform von Talsperren nämlich die rechteckige Kante Berücksichtigung, während andere Formen, z.B. runde oder schiefe Kanten ausser acht gelassen werden. (Im Verlauf vieler Jahre ändert sich die Form der rechteckig gebauten Kante; sie wird rund.)<sup>(3)</sup>

Die nachfolgenden Versuche zeigen, dass nicht nur die Abfallkurve von Geschiebestücken, sondern auch die des Wassers von der dieser Gleichung

(3) Noch aus einem Grunde erachte ich die Gleichung (2) für unrichtig, nämlich deshalb, weil in ihr das Gefälle der Krone der Talsperre nur als ein horizontales behandelt wird. In der Tat aber hat die Sohle mehr oder weniger eine Neigung, dann ist die Gleichung der Abfallkurve statt der Gleichung (2) folgende,

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha + \frac{g}{2v^2 \cos^2 \alpha} x^2$$

Wenn der Neigungswinkel  $\alpha$  sehr klein ist, so kann man ihn vernachlässigen. Ist z.B. das Sohlgefälle 20~30‰, so ist  $\operatorname{tg} \alpha : 0,02 \sim 0,03$ ;  $\cos \alpha : 0,999$ . Deshalb kann man wegen Einfachheit der Rechnung die Neigung vernachlässigen. Wenn die Neigung aber grösser ist oder wenn die Kante der Krone schief oder rund ist, muss man auf sie Rücksicht nehmen.



entsprechenden Kurve abweicht.

2). Wird obige Gleichung für die Entscheidung der Form der Talsperren benützt, so wird nur die Beschädigung der Stirnwand in Rücksicht gezogen, während die des Sturzbettes ausser acht gelassen wird. Diese Ansicht gilt nur unter der Voraussetzung, dass die Beschädigung des Sturzbettes weniger gefährlich sei, als die der Stirnwand und die Ausbesserung leichter ausführbar sei, als die der Stirnwand. Diesbezüglich herrscht aber auch eine gegenteilige Ansicht<sup>(4)</sup>.

(a) Da die Stirnwand der Talsperre geneigt ist, wird sie durch den Abfall des Geschiebes sehr wenig beschädigt, hingegen erleidet in diesem Fall das Sturzbett durch die Stösse des senkrecht abstürzenden Geschiebes beträchtliche Beschädigungen.

(b) Wenn das Sturzbett einmal beschädigt ist, wird seine Ausbesserung nicht leichter als die der Stirnwand sein, ja es kann sogar die Zerstörung des Sturzbettes den ganzen Körper der Talsperre zugrunde richten.

Darum muss man dem Sturzbett mehr Vorsicht zuwenden als der Stirnwand.

Ich teile nicht diese beiden Ansichten. Um dieses Problem zu entscheiden, muss man vor allem die Abfallkurve des Wasserstrahles und des Geschiebes an Talsperren, sowie die Wirkung des Geschiebes und des Wasserabflusses auf das Vorfeld der Talsperre studieren. Zu diesem Zweck hat der Verfasser folgende Versuche bzw. Untersuchungen angestellt.

- A. Versuche über die Abfallkurve.
- B. Versuche über die durch den Überfall vorkommende Kolkerscheinungen.
- C. Analytische Untersuchung für die Stosswirkung der Geschiebes.

#### I. VERSUCHE ÜBER DIE ABFALLKURVE.

Die Versuche wurden in einem 0,402 m breiten Versuchsgerinne mit drei verschiedenen Kantenformen, nämlich rechteckig, schief mit 45° Neigung und bogenförmig ausgeführt. Bei diesen Kantenformen wurden die Abfallkurven für drei verschiedene Wassermengen:  $Q=10, 20$  und  $37$  l/sek. untersucht, dabei liess man das Donaugeschiebe von einem mittleren Korndurchmesser  $d=10, 20, 30$  und  $50$  mm (bei der Wassermenge  $37$  l ausserdem von  $d=70$  mm) etwa 1 m von der Kante entfernt abfliessen und hierauf abstürzen. Das obere Sohlengefälle betrug anfangs 35‰ (Versuchsreihe 1~3.), später 27‰ (V.R. 4~9.)

##### (A) Überfall bei rechtwinkliger Kante. (Versuchsreihe 1~3.)

Der Wasserstrahl selbst zeigt eine andere als die der Gleichung (2) entsprechende Kurve, deren Abweichung umso bedeutender ist, je grösser die Geschwindigkeit des ankommenden Wassers ist.

---

(4) Mochida: Shinrindobokugaku, S. 243.

Die Bahnen der Geschiebestücke weichen noch mehr als die des Wasserstrahles ab und zwar nimmt die Abweichung mit zunehmendem Durchmesser zu. Aber auch bei gleichbleibendem mittleren Korndurchmesser sind ihre Bahnen sehr verschieden. Abbildung (3) stellt den Wasserstrahl, sowie die markierten Bahnen der Geschiebestücke bei der Wassermenge  $Q=20$  sl, der Wassergeschwindigkeit an der Kante  $v=1.46$  m/sek. und dem Korndurchmesser  $d=50$  mm dar. Diese Ursache der Verschiedenheit der Bahnen bei Geschiebestücken von gleicher Durchmesserklasse liegt in der Formverschiedenheit, von welcher der Widerstand abhängig ist. Es

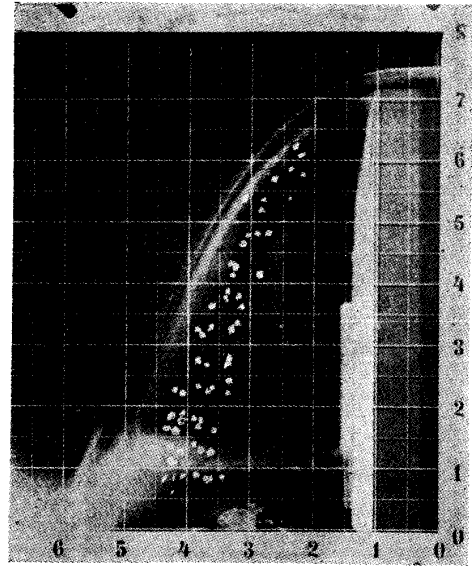


Abb. 3.

#### Abfallkurve der Geschiebestücke und des Wasserstrahls.

Versuchsreihe I.  $Q=10$  sl.

$t_0=20$  mm  $v_0=1,24$  m/sek.  $t_1=23$  mm  $v_1=1,08$  m/sek.

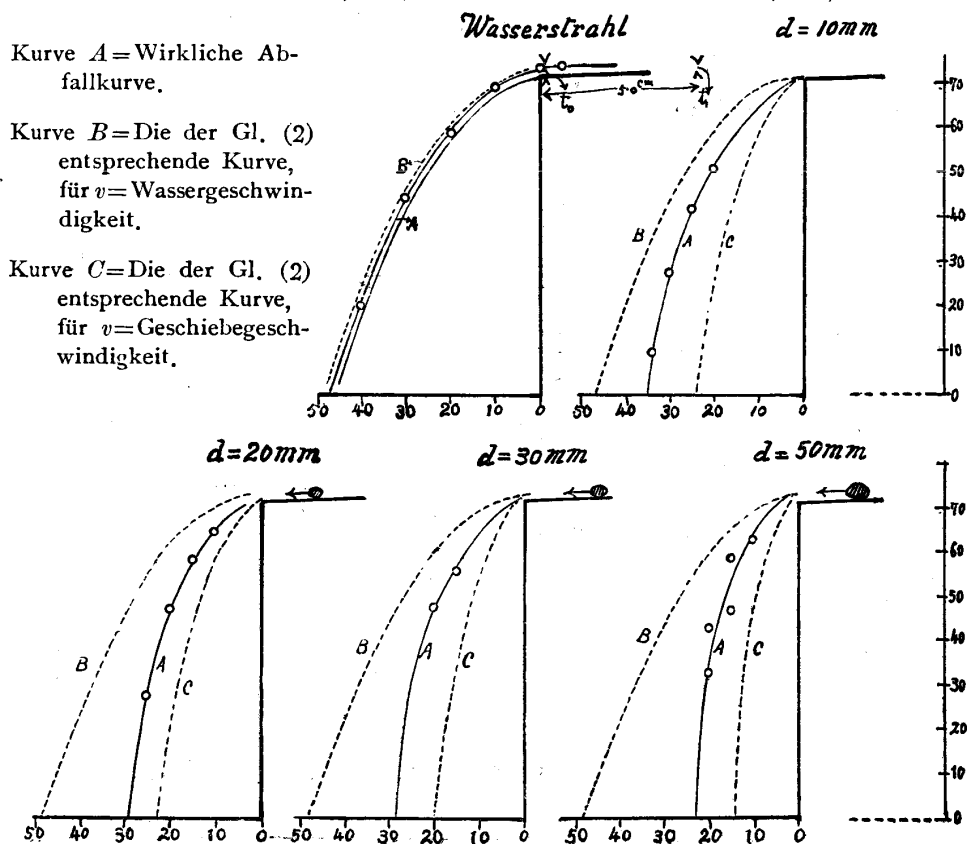
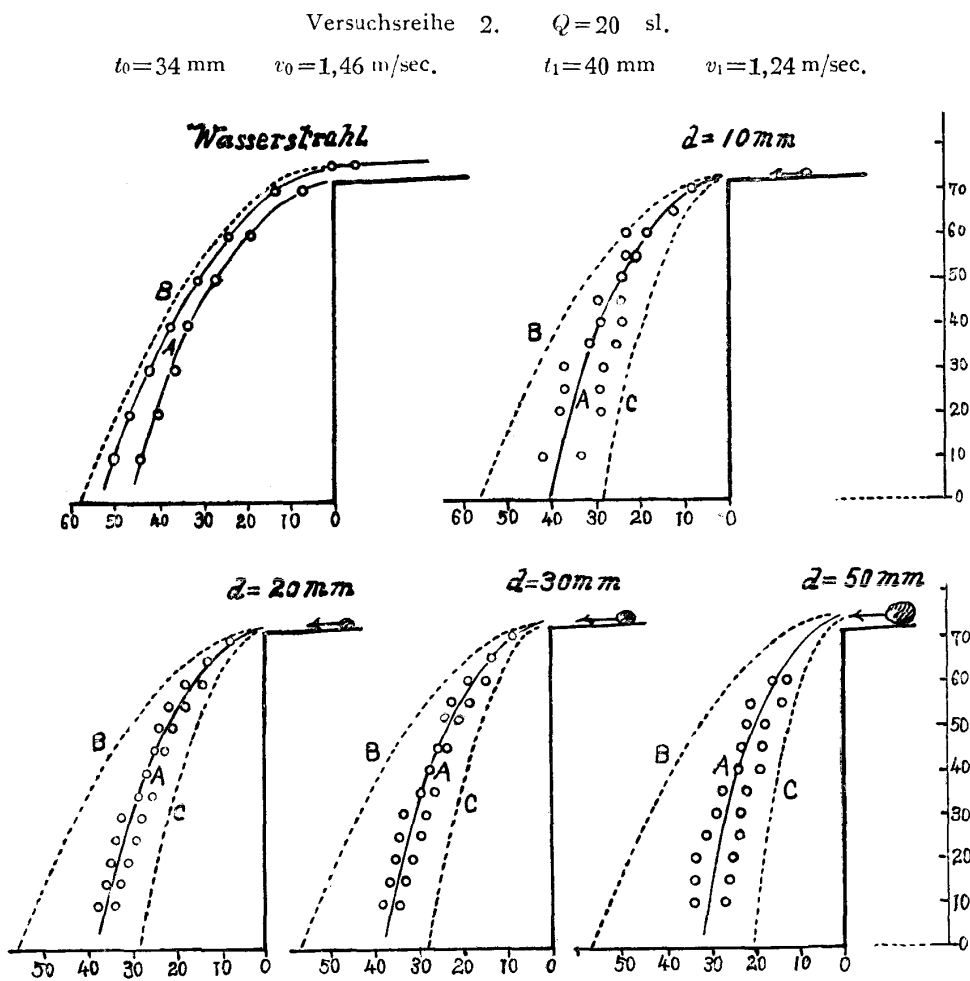


Abb. 4.

sind also die Bahnen der Geschiebestücke nicht nur von der Wassergeschwindigkeit, sondern auch von ihrer Grösse und ihrer Form abhängig. Daher ist es nicht richtig, diese Bahnen durch die Gleichung  $y = \frac{g}{2v^2}x^2$ , wobei  $v$  die mittlere Profilgeschwindigkeit des bei der Kante ankommenden Wassers bedeutet, auszudrücken. Aber es ist auch unrichtig, statt der Wassergeschwindigkeit  $v$  die Geschwindigkeit, mit der sich die Geschiebestücke auf der Sohle fortbewegen, einzusetzen. Die Geschwindigkeit des Gesiebes ist sehr unregelmässig,



Kurve A = Wirkliche Abfallkurve.

Kurve B = Die der Gl. (2) entsprechende Kurve, für  $v =$  Wassergeschwindigkeit.

Kurve C = Die der Gl. (2) entsprechende Kurve, für  $v =$  Geschiebegeschwindigkeit.

weshalb ihre Messung schwer durchzuführen ist. Die Geschwindigkeitsmessung für die 1 m lange Strecke unmittelbar flussaufwärts der Abfallkante ergab folgende Resultate:

Mittlere Geschwindigkeit der Geschiebestücke, m/sec.

Wassermenge $Q$ l/sek.	Korngrösse: $d$ (mm)				
	10	20	30	50	70
10	0,65	0,60	0,53	0,40	
20	0,74	0,735	0,71	0,54	
30		0,83	0,83	0,77	0,59

Versuchsreihe 3.  $Q=37$  sl.  
 $t_0=55$  mm  $v_0=1.67$  m/sec.  $t_1=67$  mm  $v_1=1.37$  m/sec.

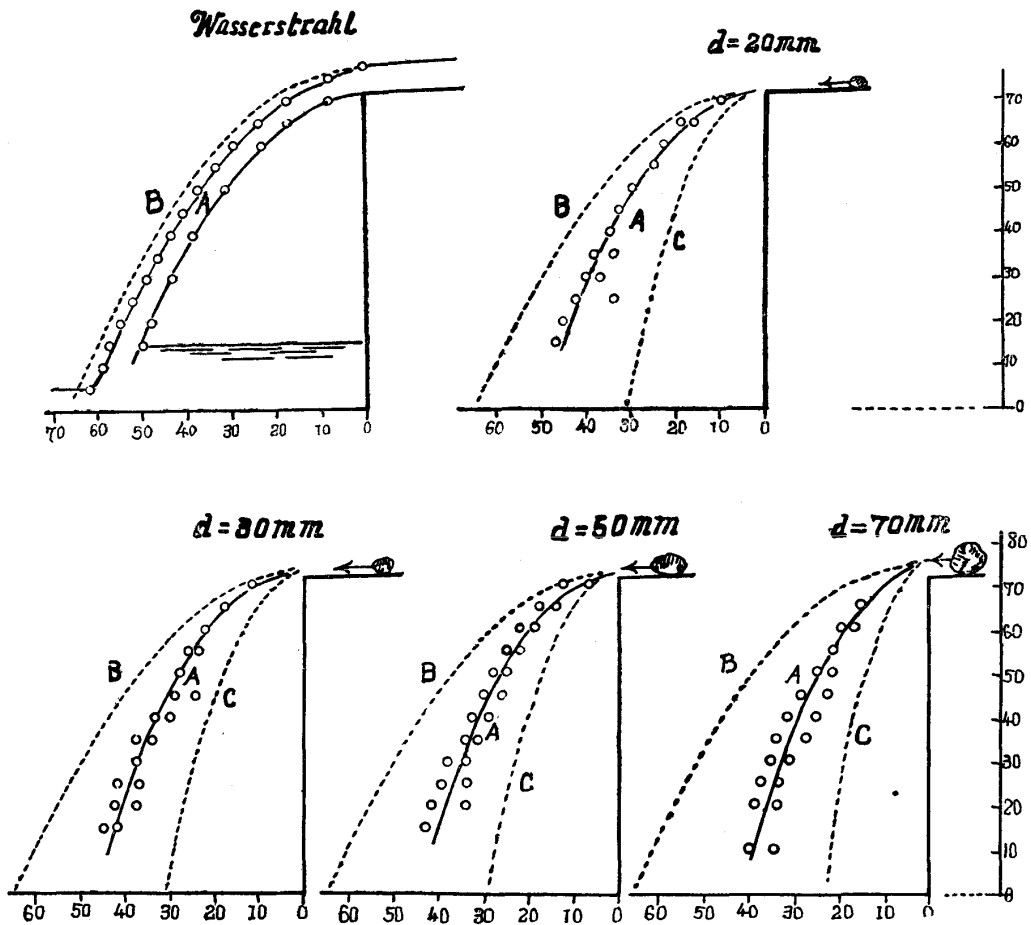


Abb. 6.

Kurve A=Wirkliche Abfallkurve.

Kurve B=Die der Gl. (2) entsprechende Kurve, für  $v$ =Wassergeschwindigkeit.

Kurve C=Die der Gl. (2) entsprechende Kurve, für  $v$ =Geschiebegeschwindigkeit.

Auch die Geschwindigkeit des einzelnen Geschiebestückes ist je nach der Form sehr verschieden, zum Beispiel bei der Wassermenge 10 l/sek.,  $d=30$  beträgt die Zeit für die 1 m lange Strecke: 1,8, 2,4, 1,8, 1,8, 1,8, 2,0, 2,0, 1,6, 1,8, (und 5. 4) Minuten. Übrigens ist die obige Zahl die mittlere



Geschwindigkeit auf der 1 m langen Strecke und nicht die augenblickliche Geschwindigkeit an der Kante. (Letztere muss noch etwas grösser sein). Wenn man statt der Wassergeschwindigkeit  $v$  die mittlere Geschwindigkeit des Geschiebes in die Gleichung (2) einsetzt, stimmen ihre Kurven, wie Abb. 4~6 zeigen, mit den wirklichen Abfallkurven nicht überein. Die Abfallkurve der Wasserstrahlen und der Geschiebestücke fällt zwischen die beiden Kurven der Gleichung (2), deren  $v$  durch die mittlere Geschwindigkeit des Wasserstrahles an der Kante beziehungsweise der Geschiebestücke ersetzt wurde, und zwar näher zur letzteren.

Bei diesen Versuchen hat man in der Wand hinter dem Wasserstrahl eine Öffnung angebracht, damit keine Luftverdünnung entstehen kann. Wenn keine Öffnung da ist, wird die Luft hinter dem Wasserstrahl durch Absaugung verdünnt, somit wird der Wasserstrahl von aussen her stärker gedrückt und erfährt eine noch grössere Abweichung. (Auch bei der wirklichen Talsperre kann die Luft manchmal etwas verdünnt werden).

Man nimmt die Abfallkurve als Parabel an

$$y = \beta x^2 \quad (4)$$

und wählt einen Punkte oberhalb der Kante als Anfangspunkt der Koordinaten, den hiedurch gezogenen Horizont als X-Achse und das längs der Wand stehende Lot als Y-Achse<sup>(5)</sup>.

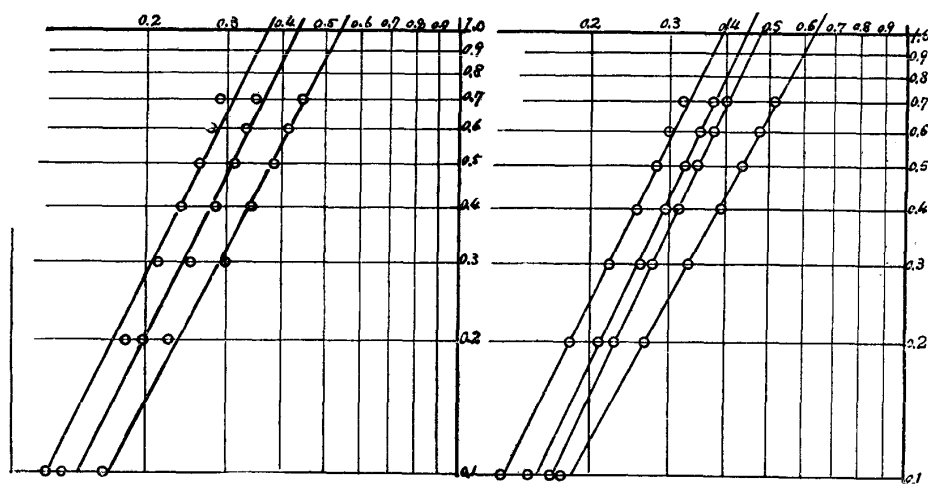


Abb. 7.  $Q=10$

Abb. 8.  $Q=20$

- (5) Da sich die Abfallkurve schön in einem von der Kante oberhalb liegenden Punkte krümmt, sollte man lieber diesen Punkte als Anfangspunkt der Koordinaten wählen, um die Eigenschaft der Kurve genau untersuchen zu können. Aber hier ist man nicht so vorgegangen, weil dieser Punkt in der Praxis unbequem ist, da seine Lage immer veränderlich ist; ausserdem ist diese Annahme nicht vorteilhaft, um die Abfallkurve mit der von Wang durch die Gleichung (2) dargestellte Kurve zu vergleichen.

Ermittelt man mit Hilfe der logarithmischen Darstellung (Abb. 7~9) den Exponenten  $\alpha$  aus der Tangente des Neigungswinkels der Linien mit der Abszissenachse,  $\beta$  aus dem Abschnitte der Linien auf der Ordinatenachse, so erhält man die folgenden Tabellen :

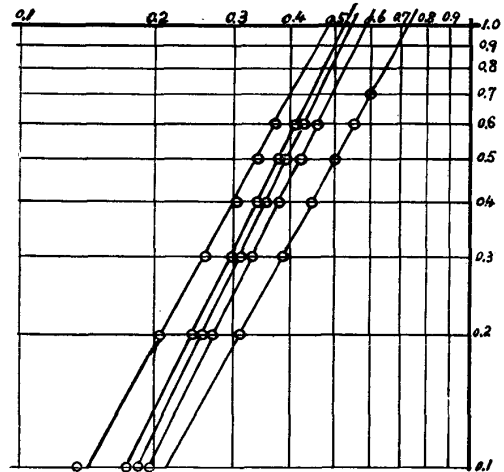


Abb. 9.  $Q=37$

Wassermenge $Q$ (sl).	Wassergeschwindigkeit $v$ m/sek.	Wasserstrahl		Korngrösse in mm										$\beta_w^*$	
		$\alpha$	$\beta$	10		20		30		50		70			
				$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$		
10	1.24	2.00	3.40	2.13	5.60	2.06	7.60	×							3.18
20	1.46	1.90	2.43	2.17	4.95	2.14	5.60	××		2.07	6.80				2.30
37	1.67	1.90	1.82			2.09	3.05	2.01	3.60	2.08	3.75	1.93	4.00		1.70

\*  $\beta_w = \frac{g}{2v^2}$  für Wasserstrahle ( $v$ =Wassergeschwindigkeit)

×, ×× Die Kurve für die Korngrösse  $d=30$  stimmt ungefähr mit jener für  $d=20$  überein.

Zur Feststellung der Charakteristika der Abfallkurven war das Versuchsmodell zu klein und die Versuche zu wenig zahlreich. Ich will daher ein anderes Mal die Versuche unter natürlichen Verhältnissen wiederholen. Man kann aber doch sagen, dass diese Kurve wahrscheinlich einer Parabel zweiten Grades ähnlich ist, aber die Werte von  $\beta$  sind untereinander sehr verschieden und zeigen auch im Vergleich zu der Werten von  $g/2v^2$  ( $v$  Wassergeschwindigkeit) aus der Gleichung (2) grosse Unterschied. Stellt man  $\beta$  in der Gleichung (4) als Funktion der Wassergeschwindigkeit von folgender Form dar :

$$\beta = \frac{g}{2v'^2} \quad (5)$$

wobei  $v'$  eine Funktion der mittleren Profilgeschwindigkeit im Profil der Absturzkante ist,

$$v' = \epsilon v$$

dann ist der Koeffizient  $\epsilon$  :

$$\epsilon = \frac{v'}{v} = \frac{1}{v} \sqrt{\frac{g}{2\beta}}$$

Setzt man aus obiger Tabelle die Werte ein, so ergibt sich für  $\epsilon$

Wert von  $\epsilon$

Wassermenge $Q$ (sl)	Geschwindigkeit: $v$	Wasserstrahl	Korngrösse: $d$				
			10	20	30	50	70
10	1,24	0,98	0,76	0,65			
20	1,46	0,98	0,68	0,64		0,58	
30	1,67	0,97		0,74	0,74	0,68	0,66

$\epsilon$  ist von der Wassergeschwindigkeit und besonders von der Grösse der Geschiebestücke abhängig.

Setzt man die Gleichung (5) in die Gleichung (4) ein, dann ist:

$$y = \frac{g}{2 v'^2} x^2 \quad (6)$$

oder

$$y = \frac{g}{2 (\epsilon v)^2} x^2 \quad (6')$$

Für die praktische Anwendung kann man diese Gleichung (6 od. 6') als Näherungsgleichung benutzen. In dieser Gleichung beträgt  $v'$  60~70 Prozent der oben angeführten Wassergeschwindigkeit  $v$ . Da  $\epsilon$  um so kleiner ist, je grösser der Durchmesser der Geschiebestücke ist, so könnte es bei grösseren Steinen, wie dies manchmal bei Talsperren in Wildbächen der Fall ist, unter 50 Prozent sinken.

(B) Überfall bei unter  $45^\circ$  geneigter Kante. (Versuchsreihe 4~6).

Die Kante bildet die Hypotenuse eines gleichseitigen rechtwinkligen Dreieckes, dessen Katheten je 10 cm lang sind, somit beträgt der Winkel mit der Horizontalen  $45^\circ$ .

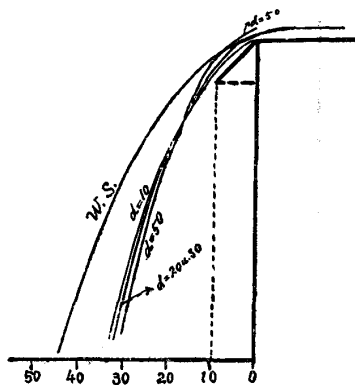


Abb. 10.  $Q=10$

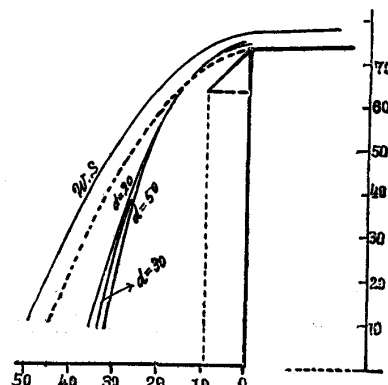
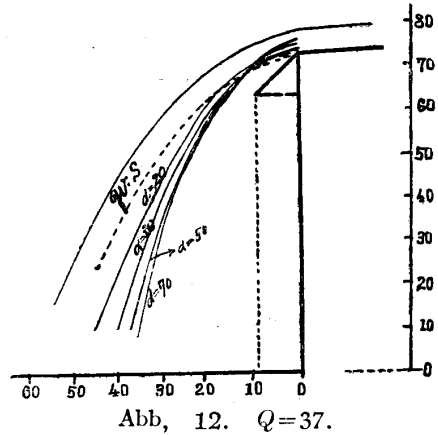


Abb. 12.  $Q=20$

In diesem Fall zeigt die Abfallkurve der Wasserstrahlen, wie aus Abb. 10~12 ersichtlich ist, gegenüber dem obenbeschriebenen Fall A keinen grossen Unterschied, weil die schiefe Kante sehr kurz ist, so dass sie auf den Wasserstrahl kaum einen Einfluss auszuüben vermag. (Wenn die Katheten über 20 cm lang sind, würde sich bestimmt ein bedeutender Einfluss auf den Wasserstrahl bemerkbar machen.)

Die Abfallkurve der Geschiebestücke aber wird von der Kantenform beeinflusst und zeigt eine noch etwas grössere Abweichung als bei der rechtwinkligen Kante. Besonders gross ist diese Abweichung bei kleinem Korndurchmesser, während sie bei grossem  $d$  keinen grossen Unterschied aufweist. Es ist bemerkenswert, dass alle Abfallkurven der Geschiebestücke ungefähr übereinstimmen, weil die Korngrösse in diesem Fall keine grosse Rolle spielt. Diese Übereinstimmung ist bei geringer Wassermenge besonders deutlich, weil dann vielleicht die Abfallkurve von der horizontalen Wassergeschwindigkeit wenig, hingegen von der Form der Kante stark beeinflusst wird.



(C) Überfall bei bogenförmiger Kante. (Versuchsreihe 7~9.)

Der Bogen entspricht bei einem Radius von 10 cm einem Zentralwinkel von  $60^\circ$ , folglich bildet die Tangente im Punkte A mit der Horizontalen ebenfalls Winkel von  $60^\circ$ .

In diesem Falle fliessen alle Wasserstrahlen der Wassermengen 10, 20 und 37 sl längs des Bogens, dann stürzen sie von A aus noch mehr als in den beiden vorherigen Fällen abweichend herab. Das beruht darauf, dass man in diesem Falle statt der Gleichung (2):

$$y = \frac{g}{2v^2} x^2, \text{ folgende Gleichung für die}$$

theoretische Abfallkurve benützen soll. Wenn man A als Anfangspunkt der Koordinaten, wie in den vorstehenden Fällen, wählt, so ist



Abb. 13.

$$x = a + v_1 t \cdot \cos \alpha$$

$$y = b + v_1 t \cdot \sin \alpha + \frac{1}{2} g t^2,$$

in den Gleichungen ist  $v_1$  die Wassergeschwindigkeit in Punkt A, dann ergibt sich für

$$y = b + (x - a) \operatorname{tg} \alpha + \frac{1}{2} \frac{g(x - a)^2}{v_1^2 \cos^2 \alpha} \quad (7)$$

Wenn man den Koordinatenursprung von A nach  $A_1$  verlegt, dann ergibt sich die Gleichung

$$y = x \operatorname{tg} \alpha + \frac{g}{2 v_1^2 \cos^2 \alpha} x^2 \quad (8)$$

Die wirkliche Abfallkurve weicht immer noch etwas ab, die Näherungsgleichung ist folgende:

$$y = x \operatorname{tg} \alpha + \frac{g}{2 (\epsilon v_1)^2 \cos^2 \alpha} x^2 \quad (9)$$

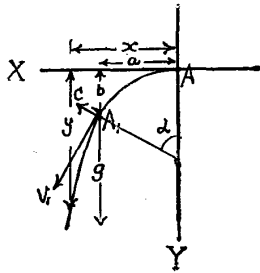


Abb. 14.

Hiebei ist  $\epsilon$  nicht kleiner als 1, sondern  $\epsilon > 1$ . Es beruht vielleicht darauf, dass hier im Punkt A noch eine andere Kraft, d.h. die Fliehkraft C wirkt.

Sämtlichen Abfallkurven der Geschiebestücke liegen in den Wasserstrahlen. Die Abfallkurven der Geschiebestücke weichen in diesem Falle nicht besonders ab, trotzdem die Wasserabfallkurven eine grössere Abweichung zeigen, als in den vorstehenden Fällen; daher stimmen die beiden Abfallkurven ungefähr überein. Dies beruht vielleicht darauf, dass auf das Geschiebe eine

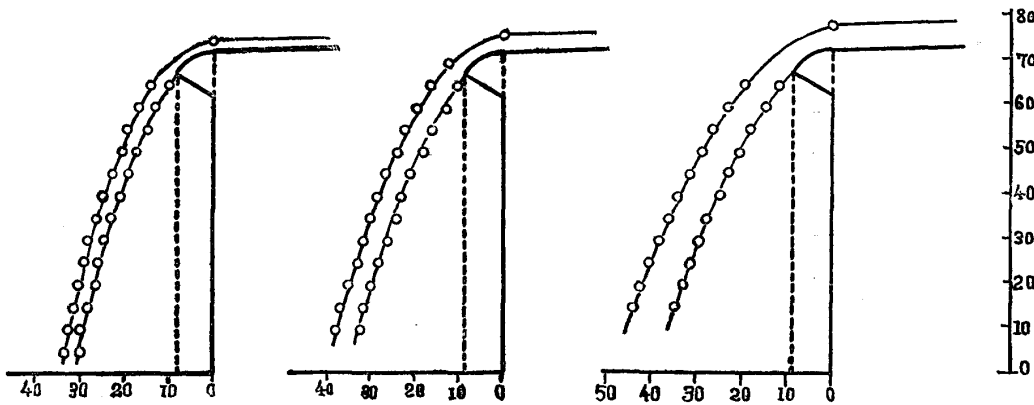


Abb. 15.  $Q=10$

Abb. 16.  $Q=20$

Abb. 17.  $Q=37$

grössere Fliehkraft wirkt und dass die Wassergeschwindigkeit im unteren Teil des Strahles grösser ist als im oberen.

Durch die oben erwähnten Versuche hat der Verfasser klar zu machen versucht, dass die wirklichen Abfallkurven der Geschiebestücke von der Gleichung  $y = \frac{g}{2 v^2} x^2$  entsprechenden Kurve sehr abweichen und dass deren Ab-

weichung von der Kantenform der Sperrenkrone, der Wassergeschwindigkeit, der Form und Grösse der Geschiebestücke abhängig ist. Daher würde man einen grossen Fehler machen, wenn man auf Grund der Folgerungen aus der Gleichung (2) den Anlauf der talseitigen Stirnwand der Talsperre entwerfen oder die Grösse des Baugebiet im Vorfeld der Talsperre ermitteln wollte.

Nach einem Beispiel, das Professor Wang<sup>(6)</sup> in seinem Werk erwähnt hat, würde sich für 0.3 m grosse Steine bei Annahme eines Gefälles von 10 proc. und eines Reibungskoeffizienten von 0.76, die Grenzgeschwindigkeit mit rund  $v=2$  m ergeben; daher hat man für  $n$ , bei einer Sperrenhöhe von 5 m, 0.4 und für die untere Breite  $BB'=2$  m zu nehmen, damit das Geschiebe nicht auf die Stirnwand AB fallen und sie nicht beschädigen soll. Die Verhältnisse sind aber in Wirklichkeit andere. Wenn man als Gleichung der Abfallkurve

des Geschiebes  $y = \frac{g}{2(\epsilon v)^2} x^2$  und  $\epsilon = 0.6$  annimmt (wirklich würd  $\epsilon$  für die Korngrösse der Geschiebestücke  $d=0.3$  m und für die Grenzgeschwindigkeit  $v=2$  m noch kleiner

sein.), ergibt sich für die Breite  $x = \epsilon v \sqrt{\frac{2h}{g}} = 1.2 \text{ m} = BB'$  und  $n = 0.24$ , d.h. das Geschiebe fällt nicht auf den Punkt B', sondern auf den Punkt B'', folglich würde das Geschiebe bei Vorhandensein der Stirnwand AB' mit dem Böschungverhältnis  $n=0.4$  auf diese stossen.

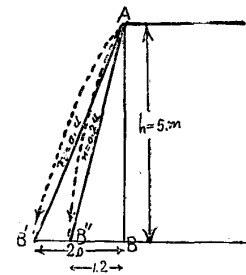


Abb. 18.

## II. DIE DURCH DEN ÜBERFALL AUFTRETENDE KOLKERSCHEINUNG.

Um die Wirkung, die der Überfall von Talsperren auf das Vorfeld ausübt und um die Verhältnisse zwischen Anlauf der Stirnwand oder Tiefe des Unterwassers und der Kolkerscheinung zu studieren, hat der Verfasser die Versuche bei folgenden Fällen durchgeführt.

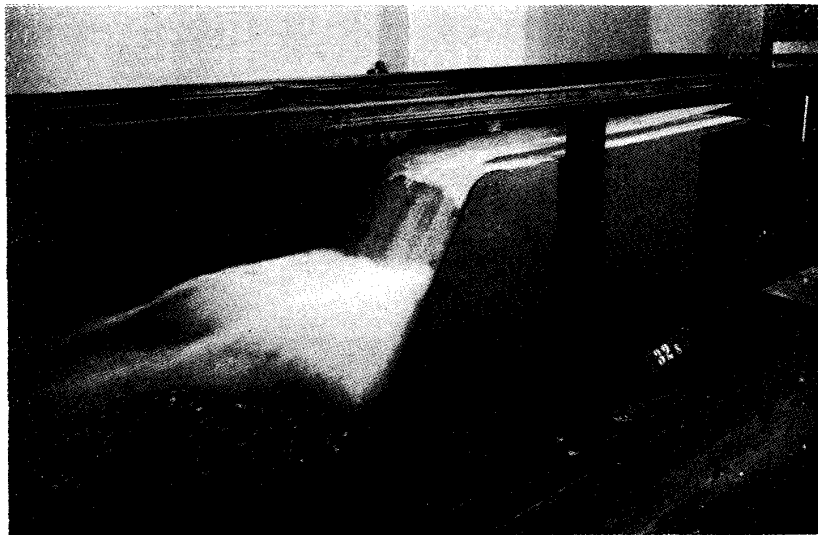


Abb. 19.

(6) F. Wang: a.a.o. S. 304.

- a. Senkrechte Wand mit rechteckiger Kante. (Versuchsreihe 10, 11.)
- b. Senkrechte Wand mit bogenförmiger Kante. (Versuchsreihe 12, 13.)
- c. 60° schiefe Wand mit bogenförmiger Kante. (Versuchsreihe 14, 15.)
- d. 45° schiefe Wand mit 45° schiefer Kante. (Versuchsreihe 16, 17.)

Die bei diesen Versuchen verwendeten Wassermengen betragen 15 und 25 l/sek. Um die Verhältnisse zwischen Kolk und Unterwassertiefe zu untersuchen, kamen bei jedem Versuche die folgenden verschiedenen Fälle zur Verwendung:

- (1) Unterwassertiefe  $t=30$ ; Höhe des Überfalls (von Kante bis Unterwasserspiegel)  $h=20$  cm.
- (2) Tiefe  $t=20$ ; Höhe  $h=30$ .
- (3) Tiefe  $t=10$ ; Höhe  $h=40$ .

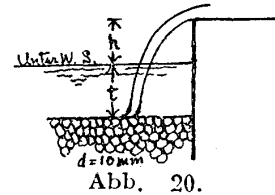


Abb. 20.

Bei allem Versuchsreihen bestand die Sohle des Sturzbettes aus Kies von einem Korndurchmesser von nur 10 mm.<sup>(7)</sup>

Bei jeder Kolkbildung wird das Geschiebe von der Wasserströmung abgeschoben, und zwar wird ein Teil von B nach C transportiert, der abgelagert sich dort höher als die Ursprungsohle oder er wird noch weiter abgetrieben; ein anderer Teil kehrt von B nach D mit dem walzenden Wasser zurück; ein dritter Teil fällt rollend von B nach A. Durch das

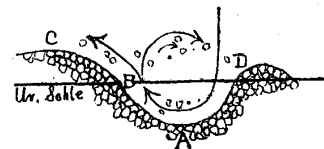


Abb. 21.

Gleichgewicht zwischen der Wasserkraft und dem Widerstand des Geschiebes bildet sich eine bestimmte Kurve *ABC* aus. Bei allem Versuchen trat nach 3~5 oder längstens 10 Minuten bereits der Beharungszustand in der Kolk Ausbildung ein. Da die Kiessohle im Falle der Verwendung einer Wassermenge von  $Q=25$  sl und bei den Tiefenverhältnissen von  $t=10$  und  $h=40$  nicht genug tief ist, hat sich der Kolk bis zum Boden des Gerinnes erstreckt; folglich entbehrt das Resultat zum Teil der Richtigkeit.

### (A) Kolkerscheinung und Kantenform.

Das gegenseitige Verhältnis zwischen den Kolkerscheinungen und der Form der Kante klar festzustellen, ist schwer, da dies nicht Hauptzweck dieser Versuche war. Wenn auch die Kolkerscheinungen von der Kantenform wenig abhängig sind, zeigt sich doch bei runder Kante ein kleinerer Kolk als bei eckiger. Die Ursache dieser Erscheinung lässt sich nicht sicher feststellen.

(7) Nach Rehbock (Die Verhütung schädlicher Kolke bei Sturzbetten, 1928, S. 9.) ist die Korngröße des Bettmaterials auf die Form des entsprechenden Kolkes bei Sturzbetten in seinen Versuchen nur von geringem Einfluss, wenn auch die Auswaschung der Sohle bei größerem Boden ganz erheblich mehr Zeit erfordert. Vermutlich aber ist in den folgenden Versuchen die Größe des Kolkes von der Korngröße des Kieses, d.h. von der Widerstandsgröße des Kieses gegen den Wasserstrom abhängig. Aus Gründen der Einfachheit habe ich nur eine Korngröße ( $d=10$  mm) benützt.

Sie beruht wahrscheinlich darauf, dass bei runder Kante wegen der Fliehkraft der Wasserdruck abnimmt und das Wasser mehr Luft einsaugt.

(B) Kolkerscheinung und Anlauf der Stirnwand.

Es scheint, als ob bei senkrechter Wand, die dem Wasserstrahle weniger Reibung entgegensetzt

und somit seine Geschwindigkeit nicht verringert, ein grösser Kolk auftreten müsste, als bei schiefer Wand, die eine grössere Reibung zwischen Wasserstrahl und Abfallwand zur Folge hat. In der Tat ist dies aber umgekehrt. Bei schiefer Wand tritt ein grösserer Kolk auf, als bei senkrechter Wand. Meiner Ansicht nach lässt sich dies auf folgende zwei Ursachen zurückführen.

(1) Die Dicke  $d$  des frei fallenden Wasserstrahls bleibt beim Fallen ungefähr dieselbe. Wenn der frei fallende Wasserstrahl dieselbe gleich bleibende Dicke  $d$  beibehält, obwohl die Geschwindigkeit des Wassers nach abwärts immer mehr zunimmt, dann wird er als sogenanntes "ungefülltes, zerrissenes Wasser" Luft einsaugen<sup>(8)</sup>, wodurch sein Füllungsgrad abnehmen muss. Bezeichnen  $v_0$  und  $v_1$  Wassergeschwindigkeiten im Punkte  $A_0$  bzw.  $A_1$  und ist

Versuchsreihe 10.

$$Q = 15 \text{ l}$$

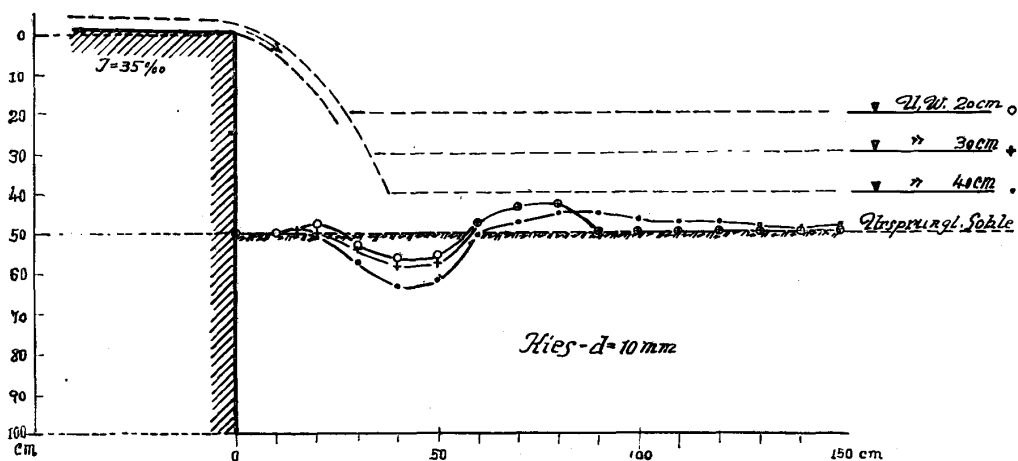


Abb. 23.

(8) Koch-Carstanjen: Bewegung des Wassers und dabei auftretende Kraft, 1926, S. 59.



Versuchsreihe 11.

$Q = 25 \text{ l.}$

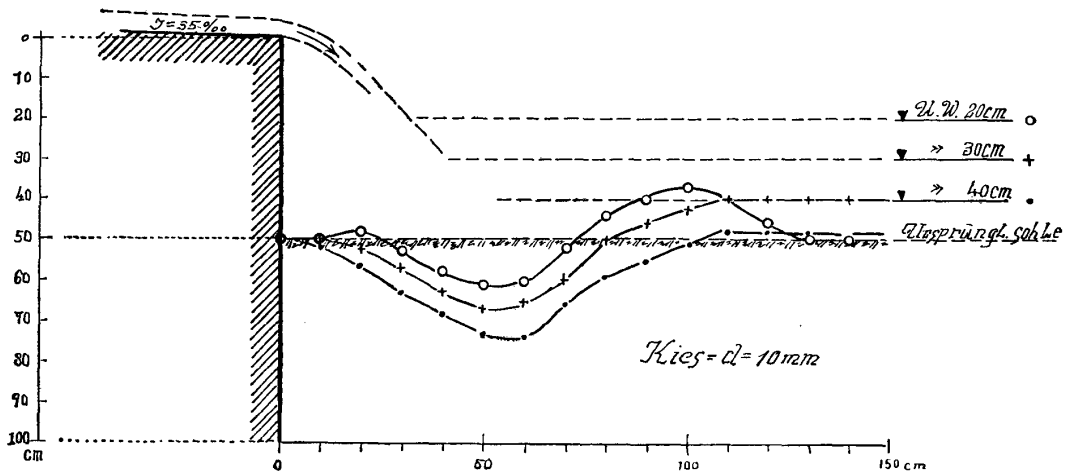


Abb. 24.

Versuchsreihe 12.

$Q = 15 \text{ l.}$

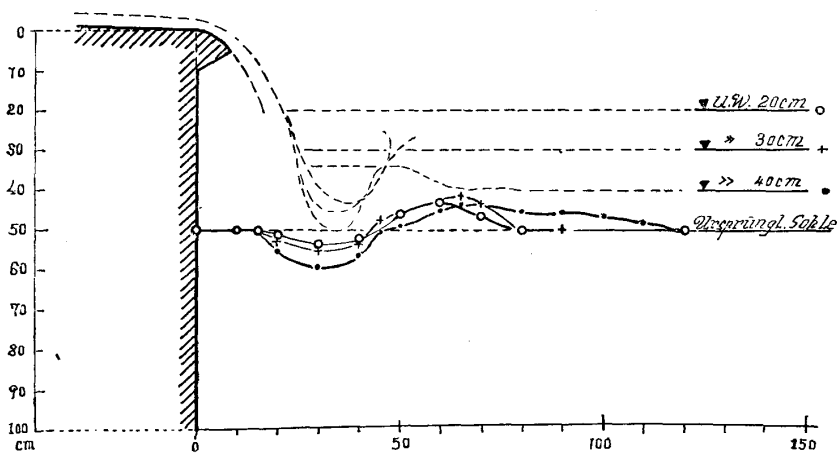


Abb. 25.

Versuchsreihe 13.

$Q = 25 \text{ l.}$

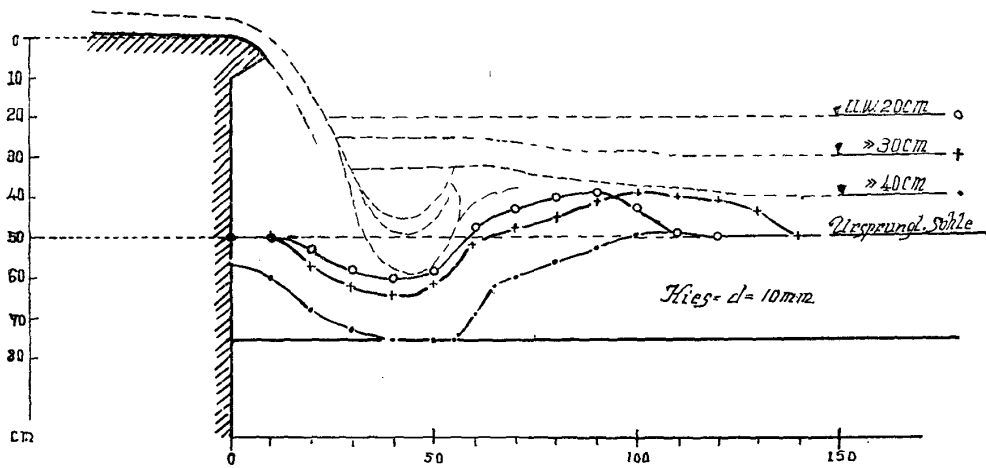


Abb. 26.

Versuchsreihe 14.

$Q = 15 \text{ l.}$

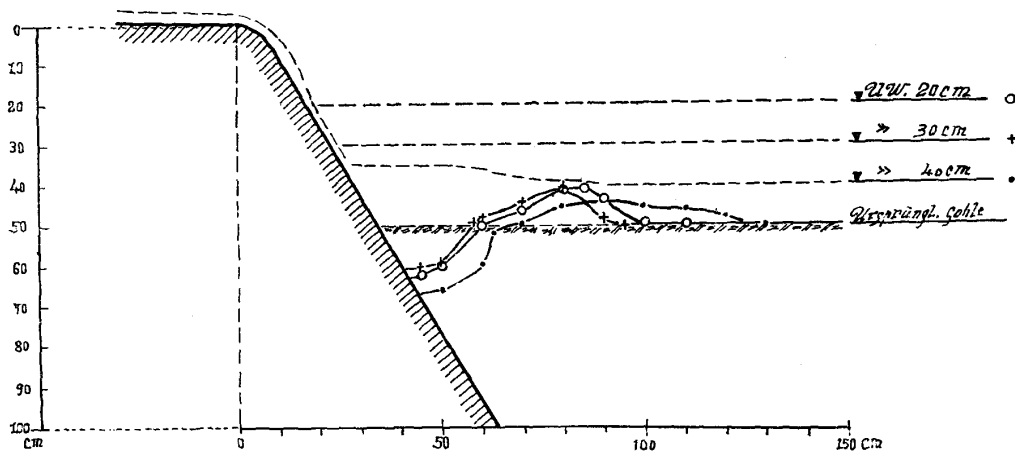


Abb. 27.

Versuchsreihe 15

$Q = 25 \text{ l}$

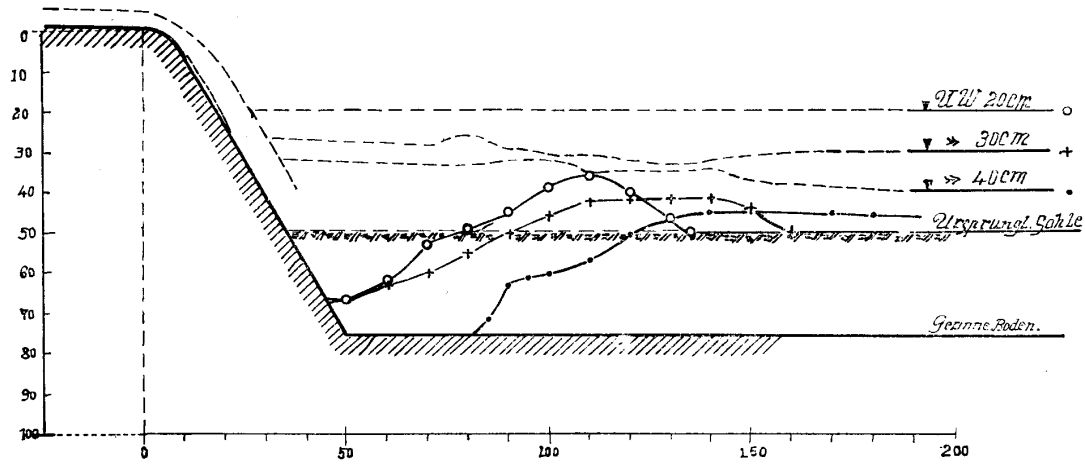


Abb. 28.

Versuchsreihe 16

$Q = 15 \text{ l}$

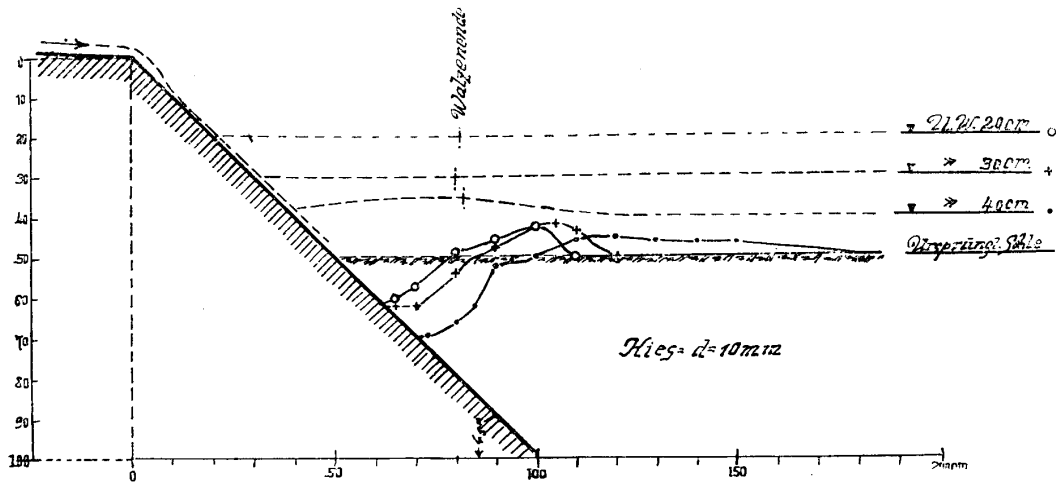


Abb. 29.

*Versuchsreihe 17.*  
 $Q=2551$

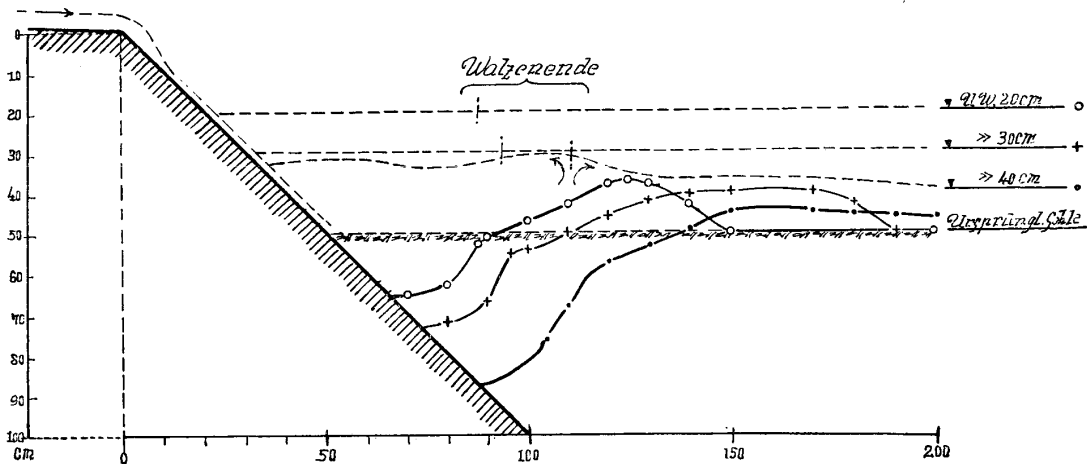


Abb. 30.

$$v_0 = \sqrt{2g h_0}; \quad v_1 = \sqrt{2g(h_0 + h_1)}, \quad \text{so ist}$$

der Füllungsgrad  $\lambda$  in  $A_1$ :

$$\lambda = \frac{v_0}{v_1} \quad (10)$$

oder

$$\lambda = \sqrt{\frac{h_0}{h_0 + h_1}} = \sqrt{1 - \frac{h_1}{h_0 + h_1}};$$

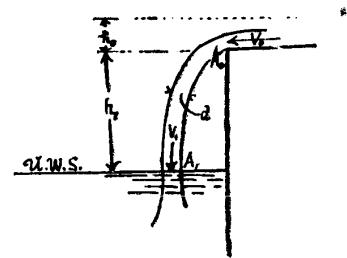


Abb. 31.

daher enthält das Wasser, das bei  $A_1$  in das Unterwasser einströmt, mehr Luft als bei  $A_0$ ; d.h. die Luftmenge pro Sekunde ist folgende:

$$(1 - \lambda) v_1 = v_1 - v_0 = \sqrt{2g} \left( \sqrt{h_0 + h_1} - \sqrt{h_0} \right) \quad (11)$$

Das Wasserstrom kann also eine ziemlich grosse Luftmenge enthalten<sup>(9)</sup> (z.B. wird bei der Anfangsgeschwindigkeit  $v_0=3$  m/sek. ein Wasserstrahl, der in das 1.5 m unterhalb der Abfallkante gelegene Unterwasser einströmt, über die Hälfte Luft enthalten.) und die Strömung wird in dem Unterwasser immer breiter und ihre Kraft immer schwächer werden. Hingegen ist das auf der schiefen Wand strömende Wasser an seiner Oberfläche zerrissen und saugt Luft an, aber für den Hauptteil des Stromes entlang der Wand nimmt die Breite gemäss der Gleichung  $d=q/v$  ab, je mehr die Geschwindigkeit  $v$  zunimmt;

(9) Über die selbstbelüftung des Wasser: Ehrenberger, Wasserbewegung in steilen Rinnen. 1926.

darum strömt es intensiv ein.

(2) Die vertikale Komponente des abstürzenden Wassers stösst senkrecht auf die Sohle und wird hauptsächlich beim Aufprall vernichtet; die horizontale



Abb. 32.

komponente wird das Geschiebe flussabwärts treiben. Bei frei fallendem Wasserstrahle nähert sich seine Richtung immer mehr dem Lote, je tiefer er abfällt, daher vergrössert sich seine Stosskraft auf das Sturzbett, aber die Horizontalkraft nimmt verhältnismässig nicht zu. Hingegen bleibt

die Richtung der auf der Wand abfliessenden Wasserströmung immer konstant, z.B. bei der auf der  $45^\circ$  schiefen Wand abfliessenden Strömung bildet ihre Richtung immer einen Winkel von  $45^\circ$  mit dem Horizont und ihre kolkende Kraft ist grösser als die der frei fallenden Strömung.

Bei diesem Versuche wurde als Wand ein glattes Holzbrett verwendet, weshalb das fliessende Wasser nur einen sehr geringen Reibungswiderstand



Abb. 33.

fand, worin eine Ursache der grossen Differenz zwischen den beiden Kolk-tiefen bei senkrechter und schiefer Wand liegt. Bei der wirklichen Talsperre aber übt die Stirnwand wegen ihrer Rauheit einen grösseren Reibungswiderstand gegen das Wasser aus, wodurch die Kraft der Wasser-

strömung verringert wird; als weitere Folge wird auch der durch sie auftretende Kolk nicht so gross sein. Die Rauheit der Wand ist verschieden je nach ihrem Baumaterial.

Noch einen grossen Nachteil hat die schiefe Wand auf die Lage des Kolks. Die Kolkbildung bei senkrechter Wand tritt, wie die Abbildung (32) zeigt, etwas entfernt von dem Fuss der Wand auf und sie wirkt kaum auf das Fundament des Bauwerkes ein. Hingegen bildet sich der Kolk bei schiefer Wand direkt am Fuss derselben aus und zwar an dieser Stelle am stärksten, was für das Bauwerk besonders gefährlich ist. (Abb. 33).

### (C) Kolkerscheinung und Unterwassertiefe.

Selbstverständlich tritt bei grösster Unterwassertiefe der kleinste Kolk auf; er wird umso grösser sein, je mehr die Tiefe abnimmt. Die Grösse des Kolks ist aber nicht einfach umgekehrt proportional zur Tiefe.

Die Zunahme der Unterwassertiefe übt gegen die Kolkbildung eine doppelte Wirkung aus, nämlich einerseits nimmt der Einfluss der Höhe des Überfalls  $h$  ab, wodurch sich die Kraft des einströmenden Wasser verringert, während andererseits der Einfluss der Tiefe des Unterwassers  $t$  zunimmt; auf diese Weise wird die Wirkung der Strömung gestört.

Dr. K. Riediger<sup>(10)</sup> hat unter Anlehnung an die Helmholtzsche Theorie rein analytische Untersuchungen durchgeführt und unter Zugrundelegung des Bewegungsgesetzes: "der in eine anfänglich ruhende Flüssigkeit einströmende Flüssigkeitsstrahl gleicher physikalischer Beschaffenheit bewegt sich in dieser mit der Einströmungsgeschwindigkeit und der Einströmungsrichtung fort," folgende Gleichung für die Einströmungstiefe  $y$ , die identisch mit der Kolk-tiefe ist, aufgestellt:

$$y = \frac{v^2}{g} \quad (12)$$

Wenn aber sowohl die Dichte der beiden Flüssigkeiten nicht gleich, als auch die Unterwassertiefe  $t$  nicht genügend ist, d.h.  $t < y$  dann ist die Gleichung (12) nicht gültig. In der Wirklichkeit saugt das frei fallende Wasser, wie schon erwähnt, beim Fallen eine grosse Menge Luft an, folglich ist die Dichte des einströmenden Wasserstrahls nicht gleich der des Unterwassers. Deshalb bewegt sich der Wasserstrahl nicht gleichförmig und geradlinig fort, sondern seine Geschwindigkeit nimmt immer mehr ab, seine Dicke wird breiter und er krümmt sich immer mehr, je tiefer er in das Unterwasser eindringt.

Nach Riediger<sup>(11)</sup> ist die Geschwindigkeit einer Flüssigkeit  $v_2$  in der Tiefe  $z$ , die mit dem spezifischen Gewicht  $\Gamma$  und mit der Geschwindigkeit  $v_1$  in die Beckenflüssigkeit vom spezifischen Gewicht  $\Gamma_w$  eindringt, folgende:

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 - 2gz \frac{\Gamma_w - \Gamma}{\Gamma}} \quad (13)$$

(10) K. Riediger: Die Theorie der Kolkbildung und deren Verwertung zur Berechnung der Fundierungstiefen von Wasserbauten an Gebirgsflüssen und Wildbächen. (1920).

(11) Riediger: a.a.O. S. 81.

Also bleibt die Einströmungsgeschwindigkeit nicht dieselbe, sondern sie verändert sich je nach der Tiefe  $z$  und der Differenz der Dichten der beiden Flüssigkeiten. Bezeichnet man mit  $q$  die pro Sekunde durchfliessende Wassermenge bezogen auf die Einheitsbreite, mit  $d_1$  und  $d_2$  die Dicke in  $A_1$  bez.  $A_2$ , so ist

$$q = d_1 v_1 = d_2 v_2$$

$$d_2 = \frac{q}{v_2} = \frac{d_1 v_1}{v_2} = \frac{q}{\sqrt{v_1^2 - 2gz \frac{\Gamma_w - \Gamma}{\Gamma}}} = d_1 \frac{v_1}{\sqrt{v_1^2 - 2gz \frac{\Gamma_w - \Gamma}{\Gamma}}} \quad (14)$$

Es zeigt sich, dass die Erweiterung der Dicke  $d$  von der Tiefe  $z$  und dem spezifischen Gewicht  $\Gamma$  abhängig ist, d.h. die Dicke  $d$  wird um so grösser sein, je mehr Luft das Wasser enthält und je tiefer der Wasserstrahl in das Unterwasser eingringt. Frei fallendes Wasser saugt, wie oben erwähnt, eine ziemlich grosse Menge Luft ein, daher wird sich in den spezifischen Gewichten  $\Gamma$  und  $\Gamma_w$  ein ziemlich grosser Unterschied zeigen, somit kann es zu einer starken Erweiterung der Strahldicke kommen. Dazu kommt noch, dass die Unterwassertiefe  $t$  im Sturzbette von Talsperren im Wildbach gewöhnlich nicht so tief ist, d.h.  $t < y$ , daher stösst das Einströmungswasser auf das Sturzbett, wodurch seine Kraft teilweise vernichtet wird und ausserdem seine Kraft beim auftretenden Kolk durch die Reibung gegen den Kies teilweise verloren geht. Daher ist die Tiefe  $y$  bei weiten kleiner, wie man es aus diesen Versuchen erkennen kann.

Um den Einfluss der Zunahme der Unterwassertiefe auf die Grösse des Kolks zu studieren, hat der Verfasser ausser den vorstehenden Versuchen noch

### Versuchsreihe 18

$Q = 2082$

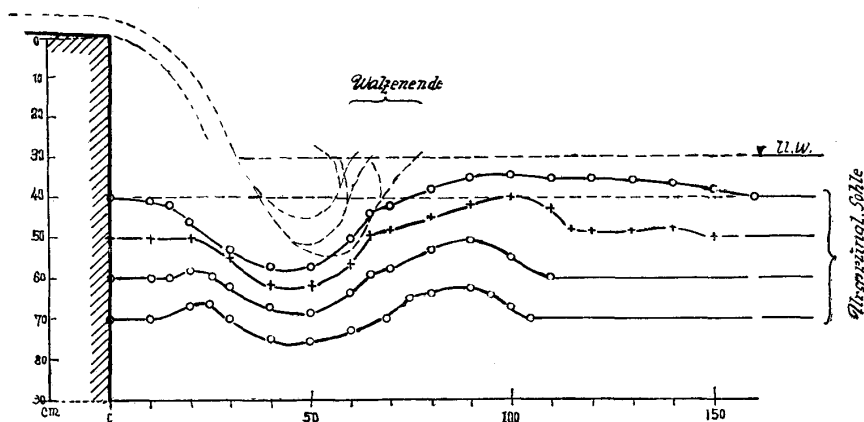


Abb. 34.

einen anderen Versuch ausgeführt. (V.R. 18.) Bei diesem Versuch hat man vier verschiedene Unterwassertiefen  $t$  (10, 20, 30 und 40 cm) verwendet, die durch die Veränderung der Höhe der Kiessohle erreicht wurden, während die Höhe  $h$  des Überfalls immer eine bestimmte war. Die Wassermenge betrug 20 sl. (Abb. 34.)

Tiefe des U. W. $t$	Kolk­tiefe $y$ cm	Kolkgrösse		
		$t$ cm	$d$ cm	$u$ cm
10	27	17	67	77
20	32	12	45	52
30	38	9	39	43
40	46	6	38	41

Hierin ist die Kolk­tiefe  $y$  die vom Unterwasserspiegel bis zum tiefsten Punkte des Kolks gemessene Tiefe,  $t$  die von der Ursprungssohle bis zu demselben Punkte gemessene Tiefe;  $b$  die Länge der Ursprungssohle, die Kolk­kurve abschneidet;  $u$  der Umfang des Kolks unter der Ursprungssohle.

Die Kolk­tiefe ist nicht nur von der Geschwindigkeit des Einströmungswassers und der Unterwassertiefe abhängig, sondern sie ist auch je nach der im Wasser enthaltenden Luftmenge und dem Widerstand des Sohlenmaterials sehr verschieden, deshalb ist es schwer, die Beziehung zwischen Kolk­tiefe und Unterwassertiefe durch eine einfache mathematische Gleichung auszudrücken.

#### (D) Länge des Sturzbettes.

Wenn auch dieses Thema nicht Gegenstand diese Abhandlung ist, so möchte ich doch einiges über die bisher herrschenden diesbezüglichen Ansicht bemerken.

Prof. Wang<sup>(12)</sup> entnahm die Gleichung für die Länge des Sturzbettes der Arbeit Picciolis: "Sui Rimboschimenti eseguiti in Francia". (Florenz 1887). Unter Zugrundelegung der Gleichung für die Abfallkurve (Gl. 2), von der man auch die Bedingungsgleichung für den Anlauf der Talsperre ableitete, hat er folgende Gleichung für die Länge des Vorfeldes, einschliesslich Anlauf der talseitigen Stirnwand, aufgestellt:

$$x = v \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (15)$$

Wie schon erwähnt, ist die Gleichung der Abfallkurve (Gl. 2.), d.i. die Prämisse der Gleichung (15), unrichtig, folglich ist auch deren Schluss, nämlich die Gleichung (15) unrichtig. In diesem Falle liegt der Fehler der sicheren Seite zu. Daher kann man sagen, dass dies für die Praxis keinen grossen Fehler bedeutet. Wie Professor Wang selbst gesagt hat, muss man für die praktischen Fälle die Länge des Sturzbettes der Sicherheit wegen noch

(12) Wang: a.a.O. S. 322.



länger wählen.

Nicht aus diesem Grunde erachte ich die Gleichung (15) für die Bestimmung der Länge des Sturzbettes für ungenügend, sondern wegen der Idee, die Länge des Sturzbettes mit der Stelle des einstürzenden Wasserstrahles zu bestimmen. Der Hauptzweck des Sturzbettes liegt darin, den Kolk abzuwehren, der für die Talsperre gefährlich ist. Daher soll die Länge des Sturzbettes genug gross sein, dass der gefährliche Kolk abgeschwächt werden kann. Z.B. nach der Gleichung (15) würde man bei unter  $45^\circ$  geneigter Wand für die Länge des Sturzbettes, ausschliesslich des Anlaufes der Stirnwand, Null oder negative Werte bekommen. Tatsächlich aber bedarf es in diesem Falle auch ungefähr derselben Länge, wie bei senkrechter Wand. Man soll die Länge des Sturzbettes nicht "bis zur" einstürzenden Stelle, sondern "von" derselben noch weiter so lang messen, dass der Sperrkörper vor dem gefährlichen Kolk geschützt wird.

Da diese Länge von der Baumethode des Sturzbettes und der Unterwassertiefe abhängig ist, ist es schwer, die massgebende Länge abstrakt festzustellen. Wenn man keinen anderen Bau dort einrichtet, würde sie wenigstens der Länge des Kolks, die im vorstehenden Versuche mit  $b$  bezeichnet ist, bedürfen. Es ist aber schwer, den am Ende des Sturzbettes vorkommenden Kolk absolut zu verhindern, wenn man auch die Verbreiterung des Sturzbettes besonders gross macht<sup>(13)</sup>. Daher ist es zweckmässig, die Kolkbildung durch Verwendung von Rehbockschen Zahnschwellen, beziehungsweise durch die Zunahme der Unterwassertiefe zu verhindern und die Länge des Sturzbettes möglichst zu verkürzen.

### III. STOSS DES GESCHIEBES AUF DAS STURZRETT.

Bei dem Bau von Talsperren muss man, wie schon erwähnt, vor allem die Bahn des Wassers und des Geschiebes bei Talsperren, sowie die Stosswirkung beider auf das Sturzbett untersuchen. Die Bahn des Wassers und des Geschiebes hat der Verfasser im Abschnitte I, die Stosswirkung des Wassers im Abschnitte II experimentell zu erklären versucht. Die Stosswirkung des Geschiebes auf das Sturzbett will der Verfasser hier durch eine analytische Untersuchung festlegen.

Um den Stoss des bei Talsperren abstürzenden Geschiebes auf das Sturzbett abzuschwächen, soll man entweder durch Verwendung einer schiefen Wand, die gegen das auf ihr rollende Geschiebe eine grosse Reibung ausübt, oder durch Zunahme der Unterwassertiefe die Geschwindigkeit des Geschiebes verringern. Da bei schiefer Wand die Gefahr besteht, dass das Gerölle die Stirnwand beschädigt und dessen Abfall nur auf einen Punkt, d.h. auf den

---

(13) Rehbock: a.a.O. S. 12.

Fuss des Sperrkörpers konzentriert wird, ist die schiefe Wand womöglich zu vermeiden. Daher kommt in diesem Falle nur die Wirkung der Unterwassertiefe in Betracht. Die Zunahme der Unterwassertiefe kann nicht nur den Stoss des Gerölles abschwächen, sondern sie hat noch einen anderen Vorteil, wie bereits vorher erwähnt, nämlich es kann durch diese Zunahme die Höhe des Abfall verringert und des Kolk verhindert werden, wenn kein Bau im Vorfeld errichtet wurde.

Welches Verhältnis besteht zwischen dem Stoss des Geschiebes und der Unterwassertiefe ?

Der Einfachheit halber nimmt man die Fallrichtung senkrecht an. Die Annahme ist zulässig, weil die Fallrichtung des Geschiebes sich immer mehr dem Lote nähert, je tiefer es fällt. Nimmt man  $y = \frac{g}{2(\epsilon v)^2} x^2$  als Gleichung der Abfallkurve an, so ist die Tangente der Abfallkurve:  $\frac{dy}{dx} = \frac{g}{(\epsilon v)^2} x$ . Daher beträgt z.B. bei Annahme von  $(\epsilon v) = 2$  m und  $x = 5$  m der Winkel der Fallrichtung schon über  $85^\circ$ .

Man nimmt das Geschiebe als Würfel mit der Seite  $a$  an ; dessen spezifisches Gewicht sei  $\delta$ .  $v_1$  bezeichnet die Geschwindigkeit im Punkt  $A_1$  im Wasserspiegel (Ursprungsgeschwindigkeit) ;  $v$  die Geschwindigkeit im Punkte  $A$ , der im Wasser  $s$  m tiefer liegt.

Die auf das Geschiebe im Punkte  $A$  wirkende Ausserkraft ist folgende :

(1) Die Schwerkraft  $G$ , deren Beschleunigung unter Berücksichtigung des Auftriebes  $g' = \frac{G'}{m}$

$$G' = \text{das Gewicht des Geschiebes im Wasser} = a^3(\delta - \gamma)$$

$(\gamma = \text{Gewicht des Wassers})$

$$m = \text{die Masse des Geschiebes} = \frac{G}{g} = \frac{a^3 \delta}{g}$$

$$g' = \frac{a^3(\delta - \gamma)}{a^3 \delta / g} = g \left(1 - \frac{\gamma}{\delta}\right) \quad (16)$$

(2) Der Widerstand des Wassers  $W$ , den das Wasser auf die Fläche  $a^2$  des mit der Geschwindigkeit  $v$  durch das Wasser abfallenden Steines ausübt, lautet aus Hydraulik wie folgt :

$$W = \zeta \gamma a^2 \frac{v^2}{2g}$$

deren entsprechende Beschleunigung  $b$  ist folgende :

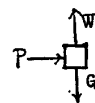
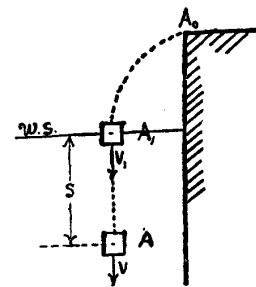


Abb. 35.

$$b = \frac{W}{m}$$

für die Masse  $m = \frac{G}{g} = \frac{a^3 \delta}{g}$  ergibt sich

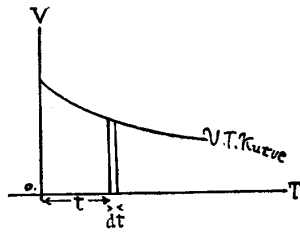
$$b = \frac{\zeta r a^2 \frac{v^2}{2g}}{\frac{a^3 \delta}{g}} = \frac{\zeta r v^2}{2 \delta a} \quad (17)$$

Ausserdem kommt noch die von den Seiten wirkende Kraft  $P$ , d.i. der hydrostatische Druck in  $s$   $m$  Tiefe, in Betracht.  $p = s \gamma$ . Die von  $p$  hervorgerufene Reibung  $R$  gegen alle Seiten des Steines ist folgende:

$$R = \mu \gamma s \cdot 4 \cdot a^2.$$

wobei  $\mu$  Reibungskoeffizient ist. Der Einfachheit halber wird man hier die Wirkung des Unterwassers auf den Stein nur auf den Stoss beschränken und die Reibung vernachlässigen.

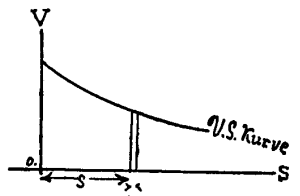
Die Geschwindigkeit des Geschiebes  $v$  wird sich als Funktion der Zeit  $t$  durch die Zeit-Geschwindigkeits-Kurve (V.T. Kurve) darstellen lassen. Die



Beschleunigung des Punktes ist

$$\frac{dv}{dt} = g' - b. \quad (18)$$

Will man die Geschwindigkeit  $v$  als Funktion des Weges  $s$  ausdrücken und die Gleichung (18) in die Gleichung für die Weg-Geschwindigkeits-Kurve (V.S. Kurve) verwandeln, so verändert sie sich durch



in

$$\frac{ds}{dt} = v$$

$$ds = \frac{v \cdot dv}{g' - b}.$$

Abb. 36.

Setzt man  $b$  und  $g'$  aus Gl. (16) u. (17) ein, so ergibt sich

$$ds = \frac{v \cdot dv}{g \left(1 - \frac{\gamma}{\delta}\right) - \frac{\zeta r v^2}{2 \delta a}} \quad (19)$$

Durch Auflösung dieser Differential-Gleichung erhält man die Weg-Geschwindigkeit-Gleichung:

$$s = \int \frac{v \cdot dv}{g \left(1 - \frac{\gamma}{\delta}\right) - \frac{\zeta r v^2}{2 \delta a}} = \frac{2 \delta a}{\zeta r} \int \frac{v \cdot dv}{\frac{2 a (\delta - \gamma)}{\zeta r} g - v^2}$$

$$= \frac{-\delta a}{\zeta r} \ln \left[ \frac{2a(\delta - \gamma)g}{\zeta r} - v^2 \right] + C \quad (20)$$

Um die Konstante  $C$  zu bestimmen, setzt man für  $s=0$  und  $v=v_1$  ein, dann ergibt sich für  $C$

$$C = \frac{\delta a}{\zeta r} \ln \left[ \frac{2a(\delta - \gamma)g}{\zeta r} - v_1^2 \right] \quad (21)$$

folglich ist die Gleichung für die Weg-Geschwindigkeit-Kurve folgende:

$$\begin{aligned} s &= \frac{\delta a}{\zeta r} \left\{ \ln \left[ \frac{2a(\delta - \gamma)g}{\zeta r} - v_1^2 \right] - \ln \left[ \frac{2a(\delta - \gamma)g}{\zeta r} - v^2 \right] \right\} \\ &= \frac{\delta a}{\zeta r} \ln \frac{\frac{2a(\delta - \gamma)g}{\zeta r} - v_1^2}{\frac{2a(\delta - \gamma)g}{\zeta r} - v^2} \end{aligned} \quad (22)$$

oder

$$\begin{aligned} e^{\frac{\zeta r s}{\delta a}} &= \frac{\frac{2a(\delta - \gamma)g}{\zeta r} - v_1^2}{\frac{2a(\delta - \gamma)g}{\zeta r} - v^2} \\ v^2 &= \frac{v_1^2 - \frac{2a(\delta - \gamma)g}{\zeta r}}{\frac{\zeta r s}{e \delta a}} + \frac{2a(\delta - \gamma)g}{\zeta r} \\ v &= \sqrt{\frac{v_1^2 - \frac{2a(\delta - \gamma)g}{\zeta r}}{\frac{\zeta r s}{e \delta a}} + \frac{2a(\delta - \gamma)g}{\zeta r}} \end{aligned} \quad (23)$$

oder

$$v = \sqrt{\frac{v_1^2}{\frac{\zeta r s}{e \delta a}} + \frac{2a(\delta - \gamma)g}{\zeta r} \left( 1 - \frac{1}{\frac{\zeta r s}{e \delta a}} \right)} \quad (24)$$

wobei  $a$  für einen Quader beziehungsweise Zylinder die Länge des Axen in der Fallrichtung im Wasser bedeutet; für eine Kugel mit dem Radius  $r$  muss man statt  $a$ ,  $4/3 r$  einsetzen.

Die Gleichung zeigen das Verhältnis zwischen der Unterwassertiefe  $s$  und der Geschwindigkeit des fallenden Geschiebes  $v$ ; aus ihr kann man er-

sehen, wie die Zunahme der Unterwassertiefe die Geschwindigkeit des Geschiebes abschwächen kann. Es ergibt sich: wenn  $s=0$  ist, für  $v=v_1$ , dann nimmt der Wert  $\frac{\zeta\gamma s}{e^{\delta a}}$  rasch zu, je nach der Zunahme des Wert  $s$ ; schliess-

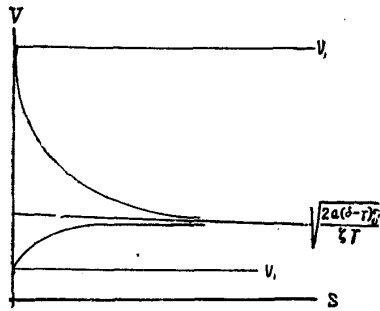


Abb. 37.

lich gelangt sie für  $s=\infty$  zur Grenze  $v=\sqrt{\frac{2a(\delta-\gamma)g}{\zeta\gamma}}$ . Die s.v. Kurve liegt innerhalb der beiden Grenzen  $v_1$  und  $\sqrt{\frac{2a(\delta-\gamma)g}{\zeta\gamma}}$ , hiebei gibt es zwei Fälle:

(1) Wenn die Ursprungsgeschwindigkeit  $v_1$  grösser als der Wert  $\sqrt{\frac{2a(\delta-\gamma)g}{\zeta\gamma}}$  ist, d.h.

$v_1 > \sqrt{\frac{2a(\delta-\gamma)g}{\zeta\gamma}}$ , so nimmt die Geschwindigkeit  $v$  des Geschiebes im Wasser mit zunehmender Wassertiefe ab und gelangt schliesslich zur Grenze  $\sqrt{\frac{2a(\delta-\gamma)g}{\zeta\gamma}}$ .

(2) Ist hingegen  $v_1 < \sqrt{\frac{2a(\delta-\gamma)g}{\zeta\gamma}}$ , so nimmt die Geschwindigkeit  $v$  mit zunehmender Tiefe  $s$  zu, und geht dann zur Grenze  $\sqrt{\frac{2a(\delta-\gamma)g}{\zeta\gamma}}$  über.

Der letzte Fall gehört nicht zu diesem Gegenstand, da die Ursprungsgeschwindigkeit  $v_1$  so klein ist, dass man die Geschwindigkeit des Geschiebes durch die Zunahme der Unterwassertiefe nicht abschwächen kann, sondern sie wird mit der Zunahme der Tiefe zunehmen.

Der Wert  $\frac{\zeta\gamma s}{e^{\delta a}}$  in der Gleichung (24) nimmt mit der Zunahme des Wert  $s$  sehr rasch zu, weil  $s$  im Exponent steht, folglich verkleinert sich das

erste Glied der Radikanten  $\frac{v_1^2}{\frac{\zeta\gamma s}{e^{\delta a}}}$  sehr rasch und der Wert  $\left(1 - \frac{1}{\frac{\zeta\gamma s}{e^{\delta a}}}\right)$  im

zweiten Glied nähert sich 1. Wenn auch das Verhältnis je nach der Grösse und der Form des Steines und seinem spezifischen Gewicht verschieden ist, so wird sich doch der Wert des ersten Gliedes ziemlich verkleinern und für  $v$  keine grosse Rolle mehr spielen, wenn der Wert  $s$  sich ziemlich vergrössert,

während das zweite Glied  $\frac{2a(\delta-\gamma)g}{\zeta\gamma} \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{\zeta\gamma s}{\delta a}}} \right)$  sehr rasch dem Grenzwert  $\frac{2a(\delta-\gamma)g}{\zeta\gamma}$  nähert. Aus der folgenden Tabelle kann man die Verhältnisse ersehen. Bei dieser Berechnung der Wert  $v$  aus der Gl. (24) nimmt man für die spezifischen Gewicht des Wasser  $\gamma=1$  und für den Koeffizienten  $\zeta=1$  und 1.5 an.

Fallgeschwindigkeit für  $\zeta=1$ ;  $\delta=2.5$ 

Tiefe $s$	für $a=0.3$ m			für $a=0.4$ m		
	$v=8$	10	12	$v=8$	10	12
0.5	6.1	7.5	8.9	6.6	8.1	9.6
1.0	4.9	5.8	6.7	5.5	6.7	7.8
1.5	3.9	4.5	5.2	4.9	5.6	6.4
2.0	3.5	3.9	4.3	4.3	4.9	5.4
2.5	3.3	3.5	3.6	4.0	4.4	4.8
3.0	3.1	3.2	3.3	3.8	4.0	4.3
$\infty$	3.0			3.4		

Fallgeschwindigkeit für  $\zeta=1.5$ ;  $\delta=2.5$ 

Tiefe $s$	für $a=0.3$ m			für $a=0.4$ m		
	$v=8$	10	12	$v=8$	10	12
0.5	5.2	6.4	7.5	5.8	7.2	8.5
1.0	3.7	4.3	5.0	4.5	5.3	6.2
1.5	2.9	3.3	3.6	3.7	4.2	4.7
2.0	2.7	2.8	2.9	3.2	3.5	3.8
2.5	2.5	2.6	2.6	3.0	3.2	3.3
3.0	2.5	2.5	2.5	2.9	3.0	3.1
$\infty$	2.4			2.7		

Hiedurch ist ersichtlich, dass es einer besonders grossen Unterwassertiefe gewöhnlich nicht bedarf, um die Geschwindigkeit des Geschiebes abzuschwächen, sondern es scheint, als ob im allgemeinen 1.5~2 m Tiefe genügen würden.

Wenn man den Stein von  $a=0.3$  m und  $\delta=2.5$  von 5 m Höhe fallen lässt, so wird ohne Unterwasser die Geschwindigkeit des Steines am Boden  $v = \sqrt{2g \times 5} = 9.9$  m sein; wenn aber 1.5 m tiefes Wasser da ist, so wird die

Geschwindigkeit bei dem Wasserspiegel  $v=8.3$  m und Geschwindigkeit am Boden ungefähr  $v=3\sim 4$  m sein.

In der Wirklichkeit liegen die Verhältnisse nicht so einfach, weil die Form der Gerölle sehr unregelmässig ist, folglich ist einerseits der Widerstand gegen die Vorderseite verschieden, anderseits empfängt das Gerölle eine negativ Kraft, die auch je nach der Form der Gerölle verschieden ist. Daher ist der Beiwert  $\zeta = \zeta_1 + \zeta_2$  sehr verschieden.

Ausserdem kommt noch, wie schon erwähnt, die Reibung zwischen Wasser und Stein in Betracht, die die Fallgeschwindigkeit noch verringert. Die Wirkung derselben ist bei grosser Tiefe besonders deutlich, während sie bei kleiner Unterwassertiefe nicht ins Gewicht fällt.

Aus diesen verschiedenen Gründen ist die Wirkung des Wassers auf den Stein je nach seiner Grösse, Form und spezifischem Gewicht sehr kompliziert; aber man kann das Verhältnis zwischen der Unterwassertiefe und der Geschwindigkeit des fallenden Steines im grossen und ganzen aus der vorstehenden Gleichung beurteilen.

Die Zunahme der Unterwassertiefe erreicht man vor allem durch den Bau einer Vorsperre. Das Verhältnis zwischen der Vorsperre und der Unterwassertiefe wird der Verfasser ein anderes Mal untersuchen. Ausserdem kann man die Vergrössung der Unterwassertiefe auch dadurch erreichen, dass man eine Vertiefung im Sturzbett ausführt. Wurde dort kein Bau erreicht, so wird durch die Kolkbildung auf dem Kiesboden eine der Natur angepasste Tiefe entstehen.

## SCHLUSSBEMERKUNGEN.

(1) Die Abfallkurve des Geschiebes bei Talsperren kann man nicht durch die Gleichung  $y = \frac{g}{2v^2} x^2$  darstellen, sondern sie weicht immer mehr oder weniger nach rückwärts ab.

(2) Daher ist es auch nicht richtig, den Anlauf der Stirnwand der Talsperre aus der daraus abgeleiteten Gleichung  $n = v\sqrt{\frac{2}{gh}}$  zu rechnen, wenn man eine Beschädigung der Stirnwand vermeiden will.

(3) Da die Abfallkurve des Geschiebes je nach seiner Grösse und Form und je nach der Geschwindigkeit des Wasser sehr verschieden ist, muss man für die Stirnwand einen ganz steilen Anlauf wählen, damit das Geschiebe nicht auf die Wand zu fallen kommt. Wenn dies nicht möglich ist, soll man lieber einen ganz flachen Anlauf für die Wand verwenden, so dass das Geschiebe von Anfang an längs der Oberfläche der Wand rollen kann. Da eine Wand, die von dem anfangs frei fallenden Stein unterwegs gestossen wird, sehr gefährdet ist, soll man sie möglichst vermeiden.

Um das Geschiebe längs der Wand rollen zu lassen, ist die runde Kante der Krone zweckmässig.

(4) Die senkrechte Wand ist gegen die durch das abfallende Wasser auftretende Kolkausbildung am wenigsten gefährdet.

(5) Die Zunahme der Unterwassertiefe ist nicht nur in Bezug auf die Abschwächerung der Kolkbildung, sondern auch gegen den Stoss des fallenden Gerölles sehr wirksam; aber es bedarf nicht einer besonders grossen Tiefe.

(6) Für den Wildbach ist es zweckmässiger, viele, kleine Talsperren mit senkrechter Wand zu bauen, statt wenige, grosse; dabei ist es besser, keinen Bau für ihr Sturzbett zu errichten, wenn der Grund entweder aus Gestein besteht oder sich dort grosse Geschiebeablagerungen befinden. Aber man soll immer dafür sorgen, dass das Unterwasser eine passende Tiefe erhält. Wenn man die senkrechte Wand aus irgendeinem technischen Grunde nicht ausführen kann, so ist es vorteilhafter, einen ganz flachen Anlauf zu wählen.

(7) Der Bau der Vorsperre ist wegen der damit verbundenen Vergrösserung der Unterwassertiefe für die Sicherheit des Sperrkörpers von besonderer Bedeutung, aber ihre Höhe bedarf keiner besonderen Grösse.