Berechnung der Kolktiefen flussab eines Stauwerkes

Autor(en): **Schoklitsch, Armin**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie**

Band (Jahr): **43 (1951)**

Heft 2

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-921669

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Berechnung der Kolktiefen flußab eines Stauwerkes

Von Dr. techn. Dr. Ing. eh. *Armin Schoklitsch,* Tucuman

Flußab eines Stauwerkes spült bekanntlich das Freiwasser die Sohle aus, und es bildet sich ein Kolk, dessen Tiefe und Form bekannt sein muß, wenn das Grundwerk des Wehres und der Uferschutz im Kolkbereich richtig bemessen werden sollen. Die Abmessungen des Kolkes hängen ab vom Durchfluß und seiner Verteilung über das Wehr, von der Fallhöhe H des Wassers am Wehr, von der Form des Wehrbodens und seiner Höhenlage in bezug auf die Flußsohle flußab des Kolkbereiches, von der Breite des Flußbettes im Vergleich zur Wehrbreite, vom Anschluß der Ufer an die Unterstromseite des Wehres, von der Art der Ableitung des Freiwassers am Wehr, von der Form der Pfeiler, von der Einwirkungsdauer des Durchflusses auf das Flußbett und schließlich davon, ob Geschiebe durch das Stauwerk abläuft.

Auf Grund zahlreicher Versuche ohne Geschiebetrieb durch das Wehr an Teil- und Vollmodellen konnte für die Kolktiefe T (Abb. 1), gemessen von der Höhenlage des Wehrbodenendes die Formel

$$T = 4{,}5\ \alpha\ \beta \left(\frac{\Sigma b}{B}\right)^{1/4} z^{1/6}\ H^{1/2}\ q^{1/3} + 2{,}15\ a \quad [m] \qquad (1)$$

aufgestellt werden; in ihr bedeutet

- q den über die freigegebenen Wehrfelder gleichmäßig verteilten Durchfluß, bezogen auf einen Meter Breite in [m²/sec];
- H die Höhenlage der Energielinie im Stauraum über der tiefsten Stelle des Wehrbodens in Metern;
- z die Einwirkungsdauer des Durchflusses q auf die Flußsohle in Stunden;
- Σb die Breite des durch Pfeiler und Wehrverschlüsse verbauten Teiles des Gerinnes in Metern;
- B die Gerinnebreite flußab des Wehres in Metern;
- a die Höhenlage der Flußsohle gegenüber dem Ende des Wehrbodens in Metern (a ist negativ, wenn die Flußsohle höher liegt);
- α den Wehrquerschnittsbeiwert und
- β den Ableitungsbeiwert.

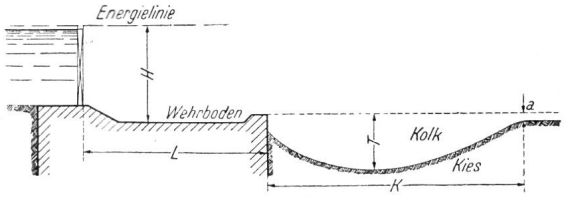

Abb. 1 Kolk flußab eines Wehres

Der Wehrquerschnittsbeiwert α hängt von der Querschnittsform des Wehrbodens ab und kann für die untersuchten Wehrbodenformen der Abb. 2 der Zahlentafel 1 entnommen werden. Diese Beiwerte α gelten aber nur, wenn über dem Wehrboden keine Deckwalze liegt; dann ist auch die Länge L des Wehrbodens nur von ganz

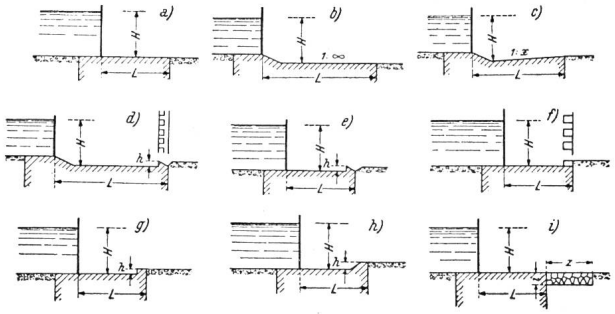

Abb. 2 Untersuchte Wehrquerschnittsformen

geringem Einfluß auf die Kolkbildung, wie ein Blick in die Abb. 3 lehrt. Die Länge L des Wehrbodens wird daher nicht durch Rücksichten auf die Kolkentwicklung festgelegt; der Wehrboden muß aber den Ausflußstrahl verläßlich umlenken; dazu genügt eine Wehrbodenlänge

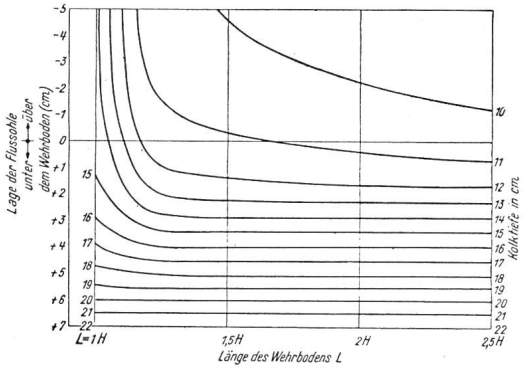

Abb. 3 Einfluß der Wehrbodenlänge L auf die Kolktiefe

L = 1,5 H. Durch eine entsprechende Formung des Umrisses des Wehrbodens kann wohl die Kolktiefe herabgesetzt werden, viel wirksamer ist es aber, den Wehrboden so tief zu legen, daß er während der ganzen Verlandungszeit des Stauraumes, während der sich ja das Bett flußab des Wehres eintieft, stets tiefer liegt als die Flußsohle flußab des Kolkbereiches. Unter gar keinen Umständen soll ein flußab abfallender Wehrboden ausgeführt werden, weil ein solcher Wehrboden sehr tiefe Kolke hervorruft und das Auftreten des Tauchstrahles fördert. Tauchstrahlen treten auch auf, wenn bei anderen Wehrböden die Flußsohle flußab des Kolkbereiches tief unter die Wehrbodenhöhe absinkt.

Zahlentafel 1 **Wehrquerschnittsbeiwerte α**

Abb. 2	Wehrbodenform	$\frac{L}{H}$	$\frac{h}{H}$	Anzahl der Versuche	α
a)	Waagrechter Wehrboden	1,5	—	303	0,36
b)	Waagrechter Wehrboden	2,5	—	167	0,30
c)	Waagrechter Wehrboden, Steigung 1:28,5	2,5	—	60	0,26
	flußab ansteigend 1:19	2,5	—	30	0,26
	1:14,3	2,5	—	59	0,28
d)	Waagrechter Wehrboden mit Rehbock-Zahnschwelle (h = Zahnhöhe)	2,5	0,037	46	0,25
		2,5	0,049	53	0,22
		2,5	0,061	131	0,21
		2,5	0,076	164	0,20
		2,5	0,092	72	0,19
		2,5	0,107	45	0,18
		2,5	0,122	114	0,17
e)	Waagrechter Wehrboden mit Rehbock-Zahnschwelle (h = Zahnhöhe)	1,5	0,039	11	0,30
		1,5	0,057	14	0,23
f)	Rechteck-Zahnschwelle (h = Zahnhöhe)	1,5	0,057	20	0,18
g)	Waagrechter Wehrboden mit Rechteckschwelle (h = Schwellenhöhe)	1,5	0,029	15	0,35
		1,5	0,057	9	0,28
		1,5	0,086	12	0,24
h)	Waagrechter Wehrboden mit Trapezschwelle (h = Schwellenhöhe)	1,5	0,029	9	0,32
		1,5	0,057	8	0,27
		1,5	0,086	5	0,20
		1,5	0,114	6	0,12
i)	Waagrechter Wehrboden mit Steinwurf Z = 1,0 H; i = 0,18 H	1,5	—	17	0,30
	Z = 1,5 H; i = 0,275 H	1,5	—	10	0,04

Zahlentafel 2 **Ableitungsbeiwerte β für ein Wehr mit drei gleichen Feldern**

Ableitung des Freiwassers gleichmäßig verteilt durch	Linkes Ufer βz	Unterstromseite des Wehres βw	Rechtes Ufer βr	Größte Kolktiefe βmax
		0 bis		
alle drei Wehrfelder	0,85	0,21	0,85	1,0
das mittlere und das linke Wehrfeld	0,75	0,75	0,75	1,0
das rechte und das linke Wehrfeld	0,70	1,0	1,0	1,05
das mittlere und das rechte Wehrfeld	1,0	1,0	0,70	1,05
das mittlere Wehrfeld	0,85	0,80	0,85	1,07
das rechte Wehrfeld	0,85	0,95	0,95	1,0
das linke Wehrfeld	0,95	0,95	0,85	1,0

Der Ableitungsbeiwert β hängt von der Art der Ableitung des Wassers am Wehr und vom Anschluß der Ufer an die Unterstromseite des Wehres ab. Für ein Wehr mit drei gleichen Wehrfeldern, Gerinnebreite B gleich Wehrbreite und schlanken Übergang von den lotrechten Wehrwangen zu den Uferböschungen, der überdies an beiden Ufern genau symmetrisch ausgeführt ist, und stromlinienförmigen Wehrpfeilern können die Ableitungsbeiwerte β der Zahlentafel 2 entnommen werden. Aus der Gleichung (1) kann sowohl die größte Kolktiefe überhaupt als auch jene unmittelbar an den Ufern bzw. an der Unterstromseite des Wehres berechnet werden, wenn die entsprechenden Ableitungsbeiwerte β der Zahlentafel 2 in die Gleichung (1) eingesetzt werden.

Die Körnung des Geschiebes hatte bei den bisher

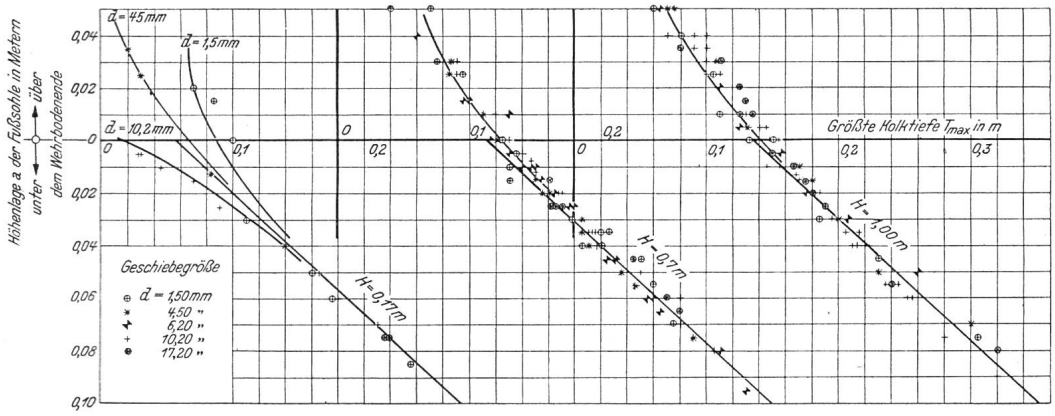

Abb. 4 Größte Kolktiefe T_{max} bei waagrechtem Wehrboden. Wirksame Wehrbodenlänge L = 1,5 H, Stautiefen H = 0,17 m, 0,7 m und 1,0 m, Geschiebegröße d = 1,5 bis 17,2 mm, Durchfluß Q = 0,056 m³/s, Einwirkungsdauer z = 1 Stunde

ausgeführten Versuchen bei Höhenlagen der Energielinie über H = 0,7 m über dem Wehrboden keinen feststellbaren Einfluß auf die Kolktiefen. Tatsächlich sollte ja die Formel für die Kolktiefen die Form

$$T = 4{,}5\ \alpha\ \beta \cdot z^{1/6} \left(\frac{\Sigma b}{B}\right)^{1/4} H^{1/2} \left(q^{1/3} - q_0^{1/3}\right) + 2{,}15 a \quad (2)$$

haben, wobei q_0 den Grenzdurchfluß über den Breitenmeter des Wehres bedeutet, bei dem eben noch kein Kolk bei der betreffenden Geschiebegröße vorkommt. Nun ist aber bei den großen Höhenlagen der Energielinie über dem Wehrboden, wie sie bei ausgeführten Wehren vorkommen, dieser Grenzdurchfluß bei natürlichem Geschiebe so klein, daß er ohne weiteres vernachlässigt werden kann. In der Abb. 4 sind die Ergebnisse einiger Versuchsreihen im Glasgerinne, also an einem Modell ohne jedwede Verbauung durch Pfeiler, mit Höhenlagen der Energielinie bis H = 1 [m], bei einstündiger Einwirkungszeit z und bei Geschiebegrößen zwischen d = 0,0015 bis 0,0172 [m] aufgetragen. Das Wehrmodell hatte waagrechten Wehrboden ohne Schwelle. Man erkennt an den Auftragungen, daß bei Höhenlagen der Energielinie unter etwa H = 0,7 [m] die Korngröße der Geschiebe zwar von Einfluß ist, daß dieser Einfluß aber um so kleiner wird, je größer die Höhenlage H der Energielinie und je tiefer die Sohlenlage im Flusse unter dem Wehrboden ist. Die Linie, die die Beziehung zwischen der Kolktiefe T und der Höhenlage a der Flußsohle in jenem Bereiche, der in der Praxis interessiert, darstellt, nähert sich mit zunehmendem H einer Geraden, die durch die Gleichung (1) dargestellt wird.

Jede Unsymmetrie am Wehr oder in den Böschungsanschlüssen an der Unterstromseite des Wehres und auch eine Unsymmetrie im Stauraum, die den Stromstrich von der Wehrmitte verlegt, führt selbst dann, wenn alle Wehrfelder ganz gleichmäßig freigegeben werden, zu einer unsymmetrischen Ausbildung des Kolkes. In den beiden Ableitungsfällen, in denen das Wehr symmetrisch freigegeben, das Wasser also nur durch das Mittelfeld abgeleitet wird oder alle drei Wehrfelder gleichmäßig freigegeben werden, gibt die Gleichung (1) nur das arithmetische Mittel der beiden größten Kolktiefen an den Ufern, von dem die wahren Kolktiefen um bis ± 25 % abweichen können.

Wenn die Uferböschungen an der Unterstromseite des Wehres so angeschlossen werden, daß sich Randwalzen ausbilden können, so treten außerordentlich große Kolktiefen auf, und die Ufer werden stark angegriffen. Die Abb. 5 zeigt als Beispiel die außerordentlichen Uferabtragungen durch eine Randwalze an einem Wehr in der Thaya.

Die außerordentlich ungünstige Wirkung eines unrichtig ausgeführten Anschlusses der unterstromseitigen Böschung an das Wehr auf die Kolkbildung zeigt anschaulich die Abb. 6. Ursprünglich war die linke Böschung an das Wehr unvermittelt angeschlossen, um die Ausläufe der Kanäle der Einlaufschwellenspülung geradlinig herausführen zu können. Die Unstetigkeit der linken Uferlinie hat die Entstehung einer kleinen Randwalze bewirkt, die trotz gleichmäßig verteilter Ableitung des Freiwassers durch das Wehr zu einer ganz unsymmetrischen Kolkbildung geführt hat. Eine Verbesserung des Böschungsanschlusses (Abb. 6 unten, b) hat eine wesentlich gleichmäßigere Ausbildung des Kolkes gebracht. In der Abb. 6, in der die Verschneidung der Kolksohle mit den Spundwandebenen dargestellt sind, ist die Wirkung der Verbesserung des Böschungsanschlusses deutlich zu erkennen.

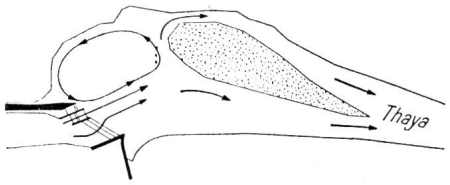

Abb. 5 Ufereinriß an einem Thaya-Wehr infolge Randwalzenbildung

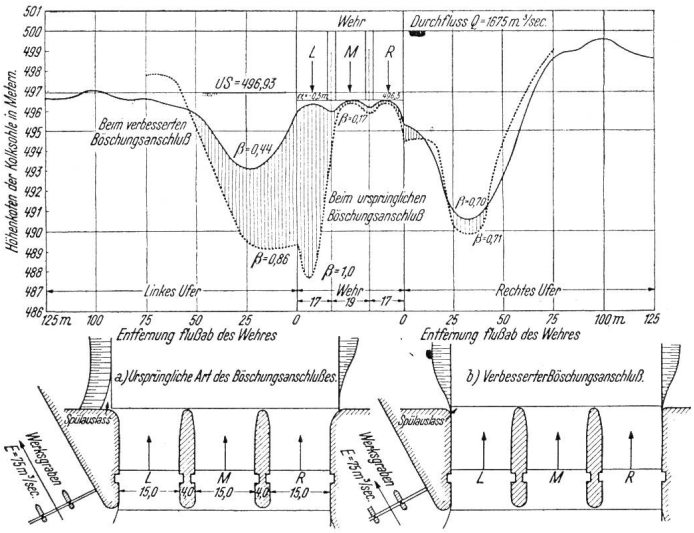

Abb. 6 Unsymmetrische Kolkausbildung bei unsymmetrischer Ausbildung der Ufer flußab des Wehres

Die angestellten Versuche haben klar gezeigt, daß die vielfach noch übliche Verbreiterung des Bettes flußab des Wehres falsch ist.

Die Länge K eines Kolkes hängt, wie Versuche gezeigt haben, sehr weitgehend von der Körnung der Geschiebe ab. Je feiner das Korn ist, desto länger wird der Kolk. Bei Versuchen mit korngleichem Kies von der Größe d [m] war die Kolklänge

$$K = \frac{\lambda}{d^{1/4}} \text{ [m]} \qquad (3)$$

λ hängt von der Höhenlage H der Energielinie und vom Einheitsdurchfluß q ab. An einem Modell mit waagrechtem Wehrboden von der Länge L = 1,5 H, Höhenlage der Energielinie H = 0,28 [m] und q = 0,056 [m²/sec] ergaben sich bei verschiedenen Höhenlagen der Flußsohle flußab des Kolkbereiches und verschiedenen Geschiebegrößen die in der Abb. 7 aufgetragenen Kolklängen. Die größten treten auf, wenn sich der Wellstrahl ohne Deckwalze ausbildet.

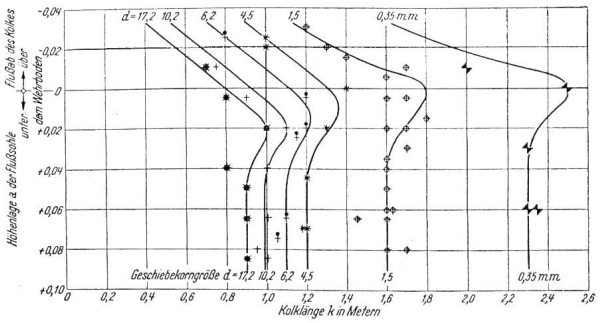

Abb. 7 Kolklängen K beim Durchfluß q = 0,056 m³/s. Waagrechter Wehrboden von der wirksamen Länge L = 1,5 H, Stautiefe H = 0,28 m, Geschiebegröße d = 0,35 bis 17,2 mm

Bisher war vorausgesetzt, daß durch das Wehr kein Geschiebe läuft. Wenn Geschiebe durch das Wehr herabkommt, sind die Kolktiefen geringer und die Kolktiefe nimmt nicht mehr mit der Zeit zu. Die Geschiebeabfuhr aus dem Kolk wird um so kleiner, je tiefer der Kolk ist. Wenn nun Geschiebe durch das Wehr läuft, so ist die dieser Geschiebezufuhr entsprechende endgültige Kolktiefe erreicht, sobald Gleichgewicht zwischen der Geschiebezufuhr in den Kolk und der Geschiebeabfuhr aus demselben herrscht. Diese endgültige Kolktiefe ist um so kleiner, je mehr Geschiebe in den Kolk läuft.

Während nun im freien Fluß der Geschiebetrieb sich wenigstens annähernd berechnen läßt, kann man über den Geschiebetrieb durch die Wehrfelder nichts Sicheres sagen. Geschiebe laufen durch das Wehr erst, wenn sie im Zuge der Stauraumverlandung bis ans Wehr vorgestoßen sind. Sobald nun ein Hochwasser auftritt, wird ein Teil der Stauraumanlandungen ausgespült. Zum Geschiebetrieb des freien Flusses kommen nun noch jene Geschiebe, die aus dem Stauraum ausgeräumt werden. Die Geschiebemenge, die in der Zeiteinheit aus dem Stauraum ausgespült wird, nimmt mit der Dauer der Spülung ab und nähert sich sehr langsam Null. Es läßt sich daher über den Geschiebetrieb durch das Wehr gegenwärtig nichts Sicheres angeben.

Bei fallendem Hochwasser tritt eine Wiederverlandung des Stauraumes ein, während der kein Geschiebe durch das Wehr läuft. Bei einem Wehr mit verlandetem Stauraum werden sich daher die größten Kolktiefen immer bei fallendem Hochwasser einstellen.

Der Geschiebetrieb durch das Wehr ist nicht gleichmäßig über die freigegebenen Wehrfelder verteilt, auch dann nicht, wenn das Freiwasser gleichmäßig verteilt abgeleitet wird. Die Verteilung des Geschiebetriebes über die Wehrfelder hängt zum Teil von der Verteilung des Geschiebetriebes über die Sohle im Stauraum, zum Teil von der Sohlenausbildung im Stauraum unmittelbar flußauf des Wehres ab.

Die gleichmäßigste Verteilung des Geschiebetriebes hat sich bei den angestellten Versuchen eingestellt, wenn der Stauraum durch das Freiwasser ausgespült worden ist, wenn also der Geschiebetrieb sehr heftig war. Wenn die Sohle im Stauraum dem Durchfluß vollkommen angepaßt ist, wenn also nur das in den Stauraum einlaufende Geschiebe durch das Wehr läuft, ist die Geschiebetriebverteilung am unregelmäßigsten. Wenn alle Wehrfelder zur Ableitung des Freiwassers gleichmäßig herangezogen werden, läuft durch das Mittelfeld meist mehr als die Hälfte aller Geschiebe durch.

Bei größeren Stauhöhen vergehen vielfach Jahrzehnte, bis gelegentlich der Stauraumverlandung die Geschiebe bis zum Wehr vorstoßen. Während dieser langen Zeit

gelangen keine Geschiebe durch das Wehr und es ist daher berechtigt, bei der Bemessung der Spundwände im Kolkbereich mit Kolktiefen zu rechnen, die sich ohne Geschiebetrieb durch das Wehr einstellen.

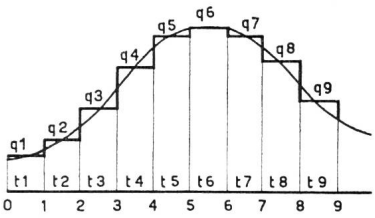

Abb. 8 Abgestufte Durchflußganglinie

Die Durchflüsse in einem natürlichen Fluß sind nun nicht konstant, sondern weisen einen Gang auf, der bei der Berechnung der Kolktiefen berücksichtigt werden muß. Um die Kolkentwicklung mit der Zeit rechnerisch verfolgen zu können, wird die Ganglinie der Durchflüsse durch einen stufenförmigen Linienzug ersetzt, so, wie es die Abb. 8 andeutet. Hiezu wird die Zeit in eine Anzahl von Abschnitten unterteilt und in jedem Abschnitt der Durchfluß als gleichbleibend angenommen. Für ein gegebenes Stauwerk kann in der Gleichung (1)

$$4{,}5\ \alpha\ \beta \left(\frac{\Sigma b}{B}\right)^{1/4} H^{1/2} = c \qquad (4)$$

gesetzt werden; dann stellt sich bei gleichbleibendem Einheitsdurchfluß q [m²/sec] innerhalb von z Stunden die Kolktiefe

$$T = c\ z^{1/6}\ q^{1/3} + 2{,}15\ a \qquad (5)$$

ein. Mit dieser Formel wird nun schrittweise fortschreitend die Entwicklung des Kolkes berechnet. Ausgegangen wird von der Kolktiefe T_0 zur Zeit 0. Nun wird vorerst ermittelt, wieviele Stunden z_0 der Durchfluß q_1 des ersten Zeitabschnittes hätte auf die Flußsohle einwirken müssen, damit er die Kolktiefe T_0 ausgespült hätte. Es gilt für diese Berechnung

$$T_0 = c\ z_0^{1/6}\ q_1^{1/3} + 2{,}15\ a \qquad (6)$$

und es folgt

$$z_0^{1/6} = \frac{T_0 - 2{,}15}{c\ q_1^{1/3}} \qquad (7)$$

Der Einheitsdurchfluß q_1 im ersten Zeitabschnitt hält nun t_1 Stunden an. Am Ende des ersten Zeitabschnittes t_1 beträgt dann die Kolktiefe

$$T_1 = c\left(z_0 + T_1\right)^{1/6} q^{1/3} + 2{,}15\ a \qquad (8)$$

Für den folgenden Zeitabschnitt t_2 beträgt die Ausgangskolktiefe T_1 und der Einheitsdurchfluß q_2 hätte

$$z_1^{1/6} = \frac{T_1 - 2{,}15\ a}{c\ q_2^{1/3}} = \frac{c\left(z_0 + t_1\right)^{1/6} q^{1/3}}{c\ q_2^{1/3}} = \left(z_0 + t_1\right)^{1/6} \left(\frac{q_1}{q_2}\right)^{1/3} \qquad (9)$$

oder

$$z_1 = \left(z_0 + t_1\right) \left(\frac{q_1}{q_2}\right)^2 \qquad (10)$$

Stunden anhalten müssen, um die Ausgangskolktiefe T_1 auszuspülen. Am Ende des Zeitabschnittes t_2 beträgt dann die Kolktiefe

$$T_2 = c\left(z_1 + t_2\right)^{1/6} q_2^{1/3} + 2{,}15\ a \qquad (11)$$

So wird schrittweise fortgefahren, bis die ganze Durchflußganglinie durchgerechnet ist. Allgemein angeschrieben lauten die anzuwendenden Gleichungen

$$z_{n-1} = \left(z_{n-2} + t_{n-1}\right) \left(\frac{q_{n-1}}{q_n}\right)^2 \qquad (12)$$

und

$$T_n = c\left(z_{n-1} + t_n\right)^{1/6} q_n^{1/3} + 2{,}15\ a \qquad (13)$$

Wenn auf den Wehrboden ein Steinwurf folgt, der aus Steinen besteht, die das Wasser nicht fortzuspülen vermag und wenn dieser Steinwurf aus mehreren Lagen solcher Steine besteht, so kann die Kolktiefe stark herabgesetzt werden. Wenn der Steinwurf aber aus zu wenig Lagen besteht und zu kurz ist, so bleibt er wirkungslos und die Steine verschwinden bald im Geschiebe der Kolksohle.

Schließlich sei besonders hervorgehoben, daß das Wasser auch in Fels einen Kolk herausarbeitet. Es besteht die begründete Annahme, daß der Kolk im Fels im Laufe der Zeit ebenso tief ausgeschliffen wird, wie er in einer beweglichen Sohle entstünde, nur wird der Zeitfaktor in Fels einen ganz anderen Wert haben.