

Zeitschrift:	Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber:	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band:	94 (1976)
Heft:	12
Artikel:	Die allgemeine dreidimensionale Kolkentwicklung, betrachtet als Geschiebetriebproblem
Autor:	Schmid, W.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-73069

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die allgemeine dreidimensionale Kolkentwicklung, betrachtet als Geschiebetriebproblem

Von W. Schmid, Institut für Kulturtechnik, ETH Zürich

DK 627.431

1. Ziel der Untersuchung

Seit einem Jahrhundert hat man zur Beruhigung der Einzugsgebiete der Wildbäche und zur Sicherung der Talfluren ein Verbundsystem aus bautechnischen, forstlich-biologischen und alpwirtschaftlichen Massnahmen entwickelt. Dennoch stehen viele, insbesondere geschiebetechnische und hydraulische Fragen offen.

Eine der wichtigsten Massnahmen bildet das überströmte Querwerk. Es verhindert bei Hochwasser den Tiefenschurf, das Unterspülen der Talflanken, stabilisiert die Seitenhänge und drosselt den Geschiebetrieb.

Zur sicheren Fundierung der Sperren, die oft wegen des steilen Gefälles in Wildbächen nacheinander in Form einer (Sperren-)Treppe angeordnet sind, muss der Ingenieur unter anderem die grösstmögliche Ausdehnung des Kolks am Fusse der Sperren im Verlauf des massgebenden Hochwasser-Ereignisses kennen. Dabei hat er nicht nur den tiefsten Punkt des Kolks, sondern die gesamte dreidimensionale Kolkform zu berücksichtigen.

Da die Kolkbildung ein äusserst komplexer Vorgang ist, konnte bis heute keine allgemein gültige Lösung des Kolkproblems gefunden werden. Insbesondere bestehen wenig Untersuchungen über den Einfluss des zeitabhängigen Geschiebetransports in die Kolkzone und des mit der Zeit variierenden Abflusses auf den zeitabhängigen Kolvorgang. Aber gerade für die Wildbachverbauung sind neben der Absturzhöhe des Querwerks und der Zusammensetzung des Sohlmaterials der zeitliche Verlauf der Hochwasserwelle und der entsprechende Geschiebetrieb in die Kolkzone von besonderer Bedeutung.

Das Ziel der Untersuchung war daher, ein Gleichungssystem herzuleiten, das Ausbildung und Änderung des Kolks eines überströmten Querwerkes in Funktion der Zeit, des Abflusses, der Absturzhöhe, des Geschiebetriebs in die Kolkzone und der Kornzusammensetzung des Sohlmaterials umfassend beschreibt. Der Abfluss, die Absturzhöhe und der Geschiebetransport in die Kolkzone sind gegebene Funktionen der Zeit.

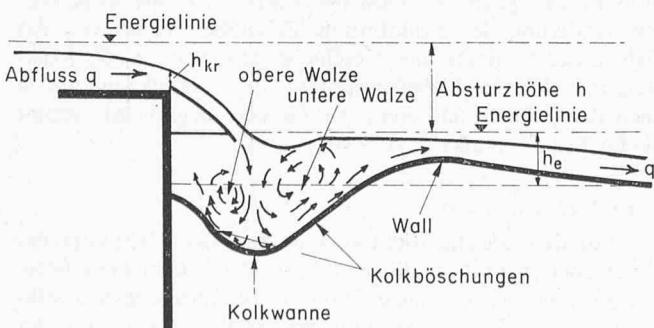


Bild 1. Schematisches Kolkbild

Einschränkend sollen dabei für die Untersuchung folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Der Überfall sei vollkommen und belüftet
2. Das Tosbecken sei nicht künstlich gepflastert
3. Die Geschiebemischungen des Sohlmaterials und des transportierten Geschiebematerials seien kohäsionslos
4. Das Sohlmaterial und das transportierte Geschiebematerial sollen annähernd die gleiche Kornverteilungskurve aufweisen.

Die Untersuchung, deren Ergebnisse nicht nur für Sperren in der Wildbachverbauung, sondern für jedes Wehr, für welches die oben genannten Voraussetzungen zutreffen, gelten, wurde am Institut für Kulturtechnik der Eidg. Techn. Hochschule in den Jahren 1969/72 durchgeführt. Sie lässt sich in zwei grosse Schritte gliedern:

1. In eine theoretische Herleitung des Kolggleichungssystems, das den allgemeinen dreidimensionalen Kolvorgang sowohl nach einem einzelnen Querwerk als auch nach einer Sperre in einer Sperrentreppe beschreibt und
2. in eine versuchstechnische Überprüfung dieses Gleichungssystems mit Hilfe von Modellversuchen, die an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich durchgeführt wurden.

Der vorliegende Aufsatz soll zusammenfassend über die Forschungsarbeit und deren Ergebnisse informieren. Theoretische Ableitungen und Einzelheiten sind in der Gesamtarbeit dargestellt [6].

Kolvorgang und Kolk

Ein Kolk entsteht durch eine intensive örtliche Erosion. Deshalb ist der Auskolkungsvorgang eines der vielfältigen Sedimenttransportprobleme und ist auch als solches zu behandeln. Er lässt sich in zwei hydromechanisch zu unterscheidende Phasen einteilen, die am Beispiel der Entwicklung des Klarwasserkolks, d.h. für einen Kolvorgang ohne Geschiebetransport in die Kolkzone, erläutert werden sollen (Bilder 1 und 2).

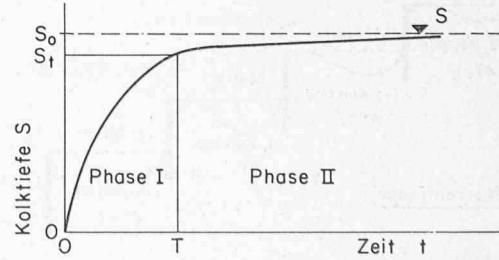


Bild 2. Schematische Darstellung der Klarwasser-kolk-Entwicklung

Phase 1: eigentliche Auskolkungsphase

Während der Phase I wirkt der Überfallstrahl direkt auf die einzelnen Körner der Kolkwanne ein, reisst sie aus ihrem Verband und schleudert sie aus der Kolkwanne.

Mit zunehmender Koltiefe fächert sich der Überfallstrahl in der Kolkwanne mehr und mehr auf, bzw. löst sich in einzelne Wirbel auf, bis von einer gewissen Koltiefe S_T an keine direkte Wirkung des ungebrochenen Strahls auf die Körner mehr spürbar und die Phase 1 der Kolkentwicklung somit abgeschlossen ist.

Phase 2: Konsolidierungsphase

Während der Phase 2 vermögen die positiven turbulenten Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen noch einzelne Körner aus der Kolkzone zu transportieren. Dadurch wird eine bestimmte Koltiefe zu einer bestimmten Zeit, statistisch gesehen, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit erreicht. Der Geschiebetransport aus der Kolkzone ist klein und strebt asymptotisch gegen null, während die Koltiefe asymptotisch einem Grenzwert zustrebt, den man als *Endkoltiefe* S_0 bezeichnet.

Einzelkolk und Kolk in der Sperrentreppe

Für den Einzelkolk, d.h. den Kolk nach einer einzelnen Sperre, beschränkt man sich zur Beschreibung des Kolkvorganges unmittelbar auf die Kolkwanne und vernachlässigt die Wallbildung.

In der Sperrentreppe bildet jede Sperre jeweils die Gegensperre für das oberhalb liegende Querwerk. Da die Wallbildung in einem Sperrenfeld den Kolkvorgang im nächstfolgenden Sperrenfeld beeinflusst, ist für den Kolkvorgang in einem Sperrenfeld das gesamte Feld zwischen zwei Sperren in die Betrachtung einzubeziehen. Es wird deshalb zur Unterscheidung vom Einzelkolk als Kolkfeld bezeichnet (Bild 3).

Die dreidimensionale Kolkform

Die dreidimensionale Kolkform umfasst die gesamte geometrische Begrenzung der Kolkzone und ist eine komplexe räumliche Fläche.

Es lässt sich zeigen, dass man sie mit genügender Genauigkeit durch einzelne Parameter beschreiben kann. In Bild 4 sind die wichtigsten gewählten Kolkparameter für einen idealisierten dreidimensionalen Kolk in einer Sperrentreppe dargestellt.

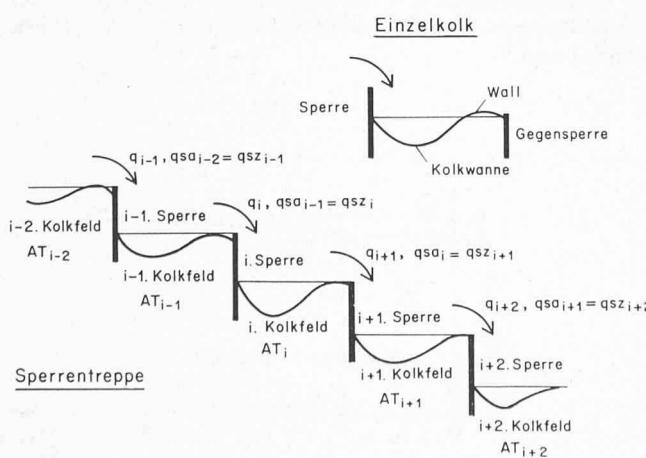


Bild 3. Einzelkolk und Sperrentreppe

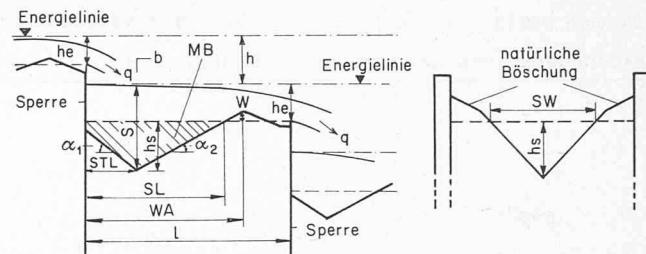


Bild 4. Idealisierte, dreidimensionale Kolkform

hs = eigentliche Koltiefe

STL = Abstand des tiefsten Punktes der Kolkwanne von der oberen Sperre

SL = Kolkänge

SW = Kolkbreite

WA = Abstand des höchsten Wallpunktes von der Sperre

MB = Kolkvolumen

h = Absturzhöhe = Differenz zwischen den Energielinienhöhen über der Überfallkante der oberen Sperre und der Kolkwanne

he = Energielinienhöhe über der Kolkwanne bezogen auf die horizontale Bezugsebene durch die untere Sperrenkante

l = Abstand der Sperren voneinander = Länge der Kolkzone

S = $hs + he$ = Kolkwassertiefe

Durch systematische Versuche konnte statistisch nachgewiesen werden, dass für ein bestimmtes Querwerk die Kolkformen zu jeder Zeit der Kolkentwicklung einander geometrisch ähnlich und symmetrisch in Bezug auf die Vertikalebene in Fließrichtung durch den tiefsten Kolkpunkt sind.

Somit lassen sich folgende einfache Beziehungen zwischen den wichtigsten Kolkparametern aus Bild 4 ableSEN.

$$STL = k_1 \cdot hs + co_1$$

$$SL = k_2 \cdot hs + co_2$$

$$SW = k_3 \cdot hs + co_3$$

$$WA = k_4 \cdot hs + co_4$$

$$W = k_5 \cdot hs + co_5$$

$$mb = k_6 \cdot hs^2 + co_6 \quad (co_6 = 0, \text{ im Normalfall})$$

$$mb = MB/B = \text{spezifisches Kolkvolumen}$$

$$B = \text{mittlere Breite der Abflussektion}$$

Die Konstanten k_1 bis k_6 und co_1 bis co_6 hängen allein von der Form des Überfallstrahls ab, und diese ist bestimmt durch die Ausbildung der Abflussektion.

Einteilung des Kolkvorgangs in Bezug auf den Geschiebe-transport in der Kolkzone

In Bezug auf den Geschiebetransport in die Kolkzone lassen sich drei Fälle unterscheiden.

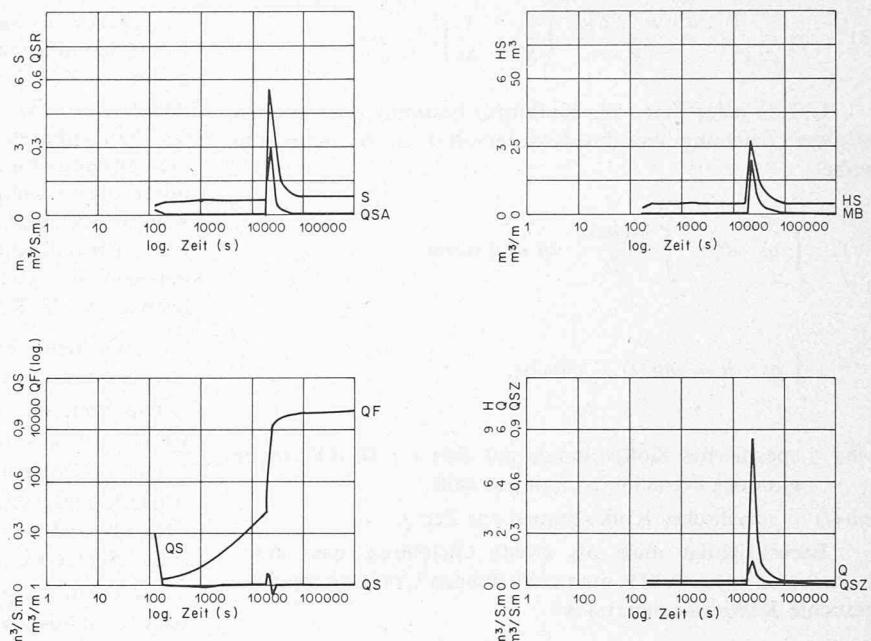
Der allgemeine Kolkvorgang

Für den allgemeinen Kolkvorgang besteht ein in Funktion der Zeit gegebener Geschiebetransport in die Kolkzone. Die Änderung der Kolkform je Zeiteinheit hängt von der Grösse der Differenz des Geschiebetransportes in die Kolkzone und des Geschiebetransportes aus der Kolkzone ab. Je nach dem, ob die Differenz positiv oder negativ ist, nimmt die Grösse des Kolks zu oder ab.

Der Gleichgewichtskolk

Für den Gleichgewichtskolk ist zu jedem Zeitpunkt der Geschiebetransport in die Kolkzone gleich dem Geschiebetransport aus der Kolkzone. Somit ist die Änderung der Kolkform gleich null; d.h. die Kolkform bleibt konstant mit der Zeit.

Bild 5. Kolkvorgang im zweiten Kolkfeld einer vierstufigen Sperrentreppe



Der Klarwasserkolk

Für die Entwicklung des Klarwasserkolkes ist der Geschiebetransport in die Kolkzone immer gleich null. Die Änderung der Kolkform mit der Zeit ist somit immer positiv. Für den Sonderfall, dass der Abfluss und die Absturzhöhe konstant mit der Zeit bleiben, nimmt die je Zeiteinheit ausgetragene Geschiebemenge im Verlauf des Kolkvorganges exponentiell ab und strebt asymptotisch gegen null. Das heißt der Kolkvorgang erreicht mit unendlicher Zeit einen Beharrungszustand, für den der Geschiebetrieb in die und aus der Kolkzone identisch null ist. Den dabei erreichten Kolk definiert man als Endkolk.

3. Herleitung des Kolkgleichungssystems

Der allgemeine Kolkvorgang, als Geschiebetransportbilanz formuliert, lautet: Die Änderung des Kolkvolumens MB pro Zeiteinheit ist gleich dem Geschiebetransport qsa pro Zeiteinheit aus der Kolkzone minus dem Geschiebetransport qsZ pro Zeiteinheit in die Kolkzone, oder mathematisch formuliert:

$$(1) \quad qs = qsa - qsZ$$

$$qs = \frac{QS}{B} = \frac{d(mb)}{dt} = \text{Änderung des spezifischen Kolkvolumens } mb \text{ je Zeiteinheit}$$

$$= \text{spezifische Kolkrate } [qs] = \frac{L^3}{T L}$$

$$qsa = \frac{QSA}{B} = \text{spezifischer Geschiebetrieb aus der Kolkzone } [qsa] = \frac{L^3}{T L}$$

$$qsZ = \frac{QSZ}{B} = \text{spezifischer Geschiebetrieb in die Kolkzone } [qsZ] = \frac{L^3}{T L}$$

In der Gleichung (1) ist qs die gesuchte Größe. qsZ ist in Funktion der Zeit gegeben und qsa – so lässt sich zeigen – ist allein von der momentanen Kolktiefe abhängig.

Die Kolkgeschiebetriebgleichung

In Analogie zum Geschiebetriebgesetz von E. Meyer-Peter [5] lässt sich ein Geschiebetriebgesetz auch für den Kolkvorgang in der Form:

$$\text{dimensionslose Transportgröße} = \text{dimensionsloser Grenzwert} + \text{dimensionslose Geschiebetriebegröße}$$

formulieren.

Über den Endkolk lässt sich nun folgende Kolk-Geschiebetriebgleichung herleiten:

$$(2) \quad \frac{q^{2/3} \cdot h^{1/3}}{g^{1/3} \cdot d_{90}^{1/3}} \cdot \frac{1}{S} = c_1 + c_2 \cdot \left(\frac{qsa}{d_{90} \sqrt{g \cdot d_{90}}} \right)^{1/3}$$

q = spezifischer Abfluss

h = Absturzhöhe

g = Erdbeschleunigung

c_1, c_2 = dimensionslose Faktoren

d_{90} = massgebender Korndurchmesser des Geschiebematerials

S = momentane Kolkwassertiefe

Die Kolkgeschiebetriebgleichung ist die zentrale Gleichung des Kolkvorgangs. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen der Transportgröße und dem Geschiebetransport aus der Kolkzone. Sie zeigt, dass bei zunehmender Kolktiefe der Geschiebetrieb aus dem Kolk abnimmt und null wird, sobald der Endkolk S_0 erreicht ist. c_1 und c_2 sind Konstanten, die allein von der Strahlform abhängen, die ihrerseits durch die Form der Abflussektion bestimmt ist. c_1 ist ein Mass für die erreichbare Endkolktiefe, während c_2 die Auskultungsgeschwindigkeit beeinflusst. Man kann zeigen, dass die Kolk-Geschiebetriebgleichung, wie das Geschiebetriebgesetz von Meyer-Peter, eine Schleppkraftformel ist.

Das Kolkgleichungssystem

Formt man die Kolk-Geschiebetriebgleichung (2) um, löst sie nach qsa auf und setzt sie in Gleichung (1) ein, so erhält man folgende Gleichung, die den allgemeinen Kolkvorgang in differentieller Form beschreibt.

$$(3) \quad qs = \frac{1}{c_2^3} \cdot \frac{q^2 \cdot h \cdot \sqrt{d_{90}}}{\sqrt{g}} \cdot \left(\frac{1}{S} - \frac{1}{S_0} \right)^3 - qsz$$

Um zu jeder Zeit t die Kolkform bestimmen zu können, ist diese Gleichung über das Zeitintervall $0 — t$ zu integrieren, wobei

$$\int_0^t qs \cdot dt = \int_0^t \frac{d(mb)}{dt} \cdot dt \text{ und somit}$$

$$\int_0^t qs \cdot dt = mb(t) - mb_0 \text{ ist.}$$

mb_0 = spezifisches Kolkvolumen zur Zeit $t = 0$, d.h. zu Beginn des betrachteten Zeitintervalls.

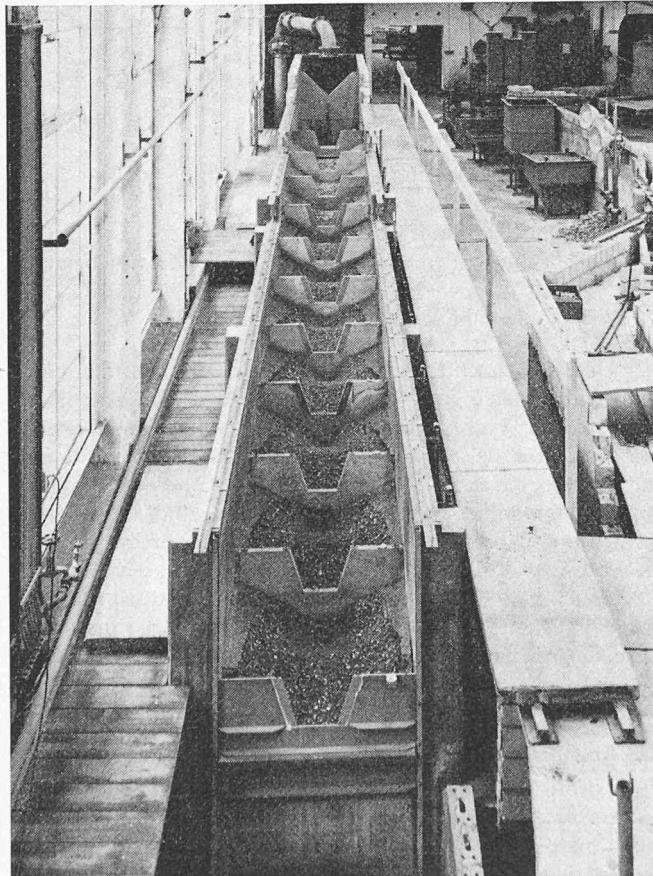
$mb(t)$ = spezifisches Kolkvolumen zur Zeit t .

Berücksichtigt man, als zweite Gleichung, dass $mb = k \cdot hs^2 + co$ ist, so erhält man nach einigen Umformungen das gesuchte *Kolkgleichungssystem*:

$$mb(t) = mb_0 + \int_0^t \frac{1}{c_2^3} \cdot \frac{q^2(t) \cdot h(t) \cdot \sqrt{d_{90}}}{\sqrt{g}} \cdot \left(\frac{1}{S(t)} - \frac{1}{S_0(t)} \right)^3 \cdot dt - \int_0^t qsz(t) \cdot dt$$

$$S(t) = \sqrt{k \cdot mb(t) + co} + he(t)$$

Bild 6. Gesamtansicht der Sperrentreppe



Dieses Kolkgleichungssystem beschreibt in umfassender Form den allgemeinen Kolkvorgang, d.h.: Die Änderung der gesamten Kolkform ist gegeben in Funktion der Zeit t , des Abflusses q , der Absturzhöhe h , des Geschiebetriebs qsz in die Kolkzone und des Geschiebematerials. Wobei d_{90} die Geschiebemischung charakterisiert und die Kolkgeometrie durch die Verknüpfung der einzelnen Kolkparameter mit der Kolkwassertiefe S bzw. der eigentlichen Koltiefe hs bestimmt ist. Als Randbedingungen müssen in Funktion der Zeit gegeben sein: der Abfluss q , die Absturzhöhe h und der Geschiebetrieb qsz in die Kolkzone.

Aus dem Kolkgleichungssystem lassen sich folgende wichtige Eigenschaften des Kolkvorgangs ablesen:

1. Die Änderung der Kolkform hängt von der Differenz des Geschiebetriebs in die und aus der Kolkzone ab.
2. Der Geschiebetrieb aus der Kolkzone und somit auch die Auskolkungsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Koltiefe ab und ist bei gegebenen hydraulischen Bedingungen lediglich eine Funktion der momentanen Kolkform.
3. Zu jedem Zeitpunkt der Kolkentwicklung besteht bei gegebenem Abfluss, Geschiebetrieb in die Kolkzone und gegebener Absturzhöhe in Funktion der Zeit ein eindeutiger, wohl definierter Kolk. Dies bedeutet bei konstantem Abfluss und konstanter Absturzhöhe für den Spezialfall der Klarwasserkolk-Entwicklung, dass der Endkolk asymptotisch mit der Zeit erreicht wird.

Sonderfälle

Je nach gegebenen Randbedingungen gilt das Kolkgleichungssystem selbstverständlich auch für die Sonderfälle: Klarwasserkolk und Gleichgewichtskolk oder auch für Fälle wie z.B. den Kolkvorgang nach einer beweglichen Schütze, die je nach Grösse des Abflusses gehoben oder gesenkt wird.

Insbesondere gilt das Kolkgleichungssystem auch für den Kolkvorgang in der Sperrentreppe. Die Besonderheit des Auskolkungsvorganges in der Sperrentreppe liegt darin, dass durch den Kolkvorgang selbst ein Geschiebetrieb in die einzelnen Kolkfelder entsteht, da der Geschiebetrieb in ein beliebiges Kolkfeld der Treppe jeweils gleich dem Geschiebetrieb aus dem vorhergehenden Feld ist. Kennt man also den Geschiebetrieb in das erste Kolkfeld in Funktion der Zeit ($qsz_1(t)$), so ist durch die Kolk-Geschiebetriebgleichung für alle nachfolgenden Felder der Geschiebetrieb in das Kolkfeld in Funktion der Zeit gegeben.

Für ein beliebiges Feld gilt: $qsz_i = qsa_{i-1}$ (Bild 3)

Integration des Kolkgleichungssystems

Eine mathematisch geschlossene Integration des Kolkgleichungssystems (4) ist in den meisten Fällen ausgeschlossen. Zur Lösung des Integrationsproblems bietet sich aber die numerische Integration nach der Methode von Heun [8] mit Hilfe des Computers an.

Zu diesem Zweck wurde ein Programmsystem entwickelt, das im wesentlichen aus den Programmen *INTKOLK* und *GRAPH* besteht. Das Programm *INTKOLK* führt die numerische Integration durch und das Programm *GRAPH* stellt die Ergebnisse mit Hilfe eines Plotters in Funktion der Zeit dar¹). Da der Plotter keine Kleinbuchstaben erzeugt, sind die spezifischen Größen q , mb , qsz , qs und qf in Grossbuchstaben geschrieben.

Im folgenden ist als Beispiel (Bild 5) für eine vierstufige Sperrentreppe der Kolkvorgang im zweiten Kolkfeld darge-

¹⁾ Die Programme *INTKOLK* und *GRAPH* und ihre Beschreibung sind am Institut für Kulturtechnik an der ETH Zürich archiviert.

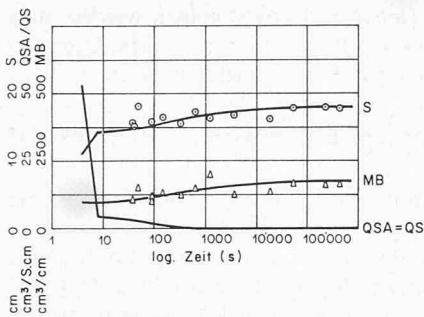


Bild 7 (links). Kolkvorgang im Feld 1

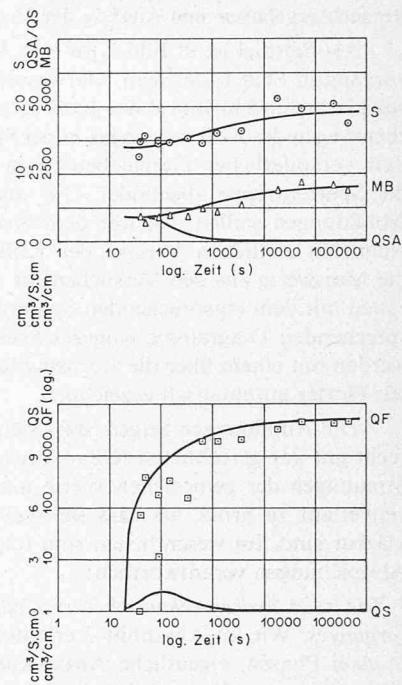


Bild 8 (rechts). Kolkvorgang im Feld 4

stellt. Der Berechnung lagen folgende Ausgangsdaten zu grunde:

- Abfluss $q(t)$: Hochwasserwelle, die in einem voralpinen Wildbach «der grossen Runs» im Kt. Schwyz gemessen wurde.
 Absturzhöhe $h(t)$: konstant mit der Zeit ($h = 4,6$ m)
 Geschiebetrieb $qsz_1(t)$ in das 1. Kolkfeld: gegeben in Funktion der Zeit.

Der Kolkvorgang lässt sich am deutlichsten anhand der eigentlichen Koltiefe hs verfolgen. Sie nimmt bei Beginn des Hochwassereignisses sehr schnell zu, verringert sich dann wegen des Einflusses des Geschiebetriebs in die Kolkzone wieder, bis sie annähernd ihren Ausgangswert erreicht.

Verschiedene vergleichbare Berechnungen haben gezeigt, dass schon ein geringer Geschiebetrieb in die Kolkzone die maximal erreichbare Koltiefe gegenüber einem entsprechenden Klarwasser-Kolkvorgang um rund 30% verringert und zusätzlich ist, da der Spitzenabfluss nur während kurzer Zeit erreicht wird, die maximal erreichbare Klarwasser-Koltiefe um rund 20% geringer als die entsprechende Endkoltiefe. Hingegen hat eine Veränderung der Absturzhöhe nur einen geringfügigen Einfluss auf die maximal erreichbare Koltiefe. So verringert sich die maximal erreichbare Koltiefe für den Klarwasserkolk bei einer Reduktion der Absturzhöhe um 30% für den Spitzenabfluss lediglich um 10%.

4. Modellversuche

Das Ziel der Modellversuche war, zu überprüfen, ob das hergeleitete Kolkgleichungssystem den allgemeinen dreidimensionalen Kolkvorgang unter den getroffenen Voraussetzungen mit genügender Genauigkeit beschreibt. Dazu wurde aus folgenden zwei Gründen der dreidimensionale Kolkvorgang in einer Sperrentreppe gewählt:

1. Der Kolkvorgang in der Sperrentreppe ist ein wesentlich allgemeinerer Fall als der des Einzelkolks. Anhand der Sperrentreppe können alle für den Kolkvorgang wichtigen Zusammenhänge zwischen der Änderung der Kolgeometrie, des Abflusses, der Absturzhöhe, des Geschiebetriebs in die

und aus der Kolkzone und des Geschiebematerials in Funktion der Zeit untersucht werden. Zudem ist die Sperrentreppe eine wichtige bauliche Massnahme zur Konsolidierung der Flanken und Sohle eines Wildbachgerinnes.

2. Mittels der Dimensionsanalyse von E. Buckingham [2] kann gezeigt werden, dass für die Sperrentreppe versuchstechnisch durch alleinige Änderung des Abflusses q der gesamte allgemeine Kolkvorgang in einem Kolkfeld oder in einem Einzelkolk sich in Abhängigkeit aller massgebenden Parameter q , h , d_0 , qsz und t untersuchen lässt, wobei q , h und qsz gegebene Funktionen der Zeit sind. Somit lässt sich anhand der Sperrentreppe die Zahl der Versuche auf ein Mindestmaß beschränken.

Versuchsanordnung und Versuchsprogramm

Die Zahl der Sperren der Treppe soll genügend gross sein, um im Versuch feststellen zu können, wie die einzelnen Kolkfelder während des Kolkvorganges voneinander abhängen. Versuche haben gezeigt, dass eine Zahl von 11 Sperren, d.h. von 10 Kolkfeldern, genügt. Zudem sollen die Abmessungen der Sperrentreppe im Modell so sein, dass sie eine Abbildung einer Sperrentreppe in einem durchschnittlichen Wildbach des mitteleuropäischen Voralpen- und Alpenraumes im Massstab 1:10 bis 1:50 darstellt (Bild 6).

Es wurden 48 Einzelversuche durchgeführt. Für einen Einzelversuch durchläuft ein gewisser Abfluss Q während einer gewissen Zeit t die Sperrentreppe. Einzelversuche mit gleichem Abfluss Q fasste man zu Versuchsserien zusammen. Insgesamt belief sich die Zahl der Versuchsserien auf 6 und es wurden 480 Einzelkolke ausgemessen.

Mit den im wasserbaulichen Versuchswesen üblichen Methoden wäre das Ausmessen der 480 Kolkformen ein aussichtloses Unterfangen gewesen. Hingegen erschien die Nahbildphotogrammetrie zur Ausmessung der Kolke bei der bekannten Leistungsfähigkeit des Verfahrens als zielführend. Allerdings lagen keine Erfahrungen darüber vor. So wurde aufgrund einer Reihe von Auswertungsversuchen eine zweckmässige Methodik entwickelt, die sich – wie sich zeigt – im wasserbaulichen Versuchswesen allgemein für ähnliche Aufgabenstellungen mit Erfolg anwenden lässt [7].

Versuchsergebnisse und Analyse der Versuche

Als Beispiel ist in Bild 7 für eine Versuchsserie der Kolkvorgang in Feld 1, der dem Klarwasserkolk einer Einzelsperre entspricht, und in Bild 8 der Kolkvorgang in Feld 4, für welchen wegen des Kolkvorganges in der Sperrentreppe ein mit der Zeit veränderlicher Geschiebetrieb in das Kolkfeld besteht, der Sperrentreppe abgebildet. Die ausgezogenen Kurven der Abbildungen stellen den mit dem Kolkgleichungssystem berechneten zeitlichen Verlauf der Kolkgrößen dar, während die Messwerte aus den Versuchen für die einzelnen Versuchszeiten mit dem entsprechenden Symbol punktweise in die entsprechenden Diagramme eingezeichnet sind. Die Diagramme werden mit einem über die Rechenanlage der ETHZ gesteuerten Plotter automatisch gezeichnet.

Die Abbildungen zeigen, dass sich die gemessenen Werte recht gut der gerechneten Kurve anschmiegen. Doch sind die Streuungen der gemessenen Werte um den gerechneten Kurvenverlauf zu gross, als dass sie allein durch Messfehler erkläbar sind. Im wesentlichen sind folgende Faktoren für die Abweichungen verantwortlich:

1. *Die zwei hydromechanisch verschiedenen Phasen des Kolkvorganges:* Wie im Abschnitt 2 erläutert, ist der Kolkvorgang in zwei Phasen, eigentliche Auskolkungsphase und Konsolidierungsphase, zu unterteilen. Während der Phase 2 wird eine gewisse Kolktiefe zu einer bestimmten Zeit, statistisch gesehen, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit erreicht. Deshalb müssen die Messwerte während der Phase 2 um den gerechneten Kurvenverlauf streuen.

2. *Ungenaue Beschreibung des Geschiebematerials:* Die Geschiebemischung der Sohle und des transportierten Materials charakterisiert allein der massgebende Korndurchmesser d_{90} .

3. *Geschiebetrieb in die Kolkzone und Wallbildung:* Allen Vorgängen im Flussbau mit Geschiebetrieb ist eigen, dass der Geschiebetrieb nicht, wie im Kolkgleichungssystem angenommen, kontinuierlich sondern stossweise erfolgt. Dieser Effekt wird für den Kolkvorgang in der Sperrentreppe durch die Wallbildung noch verstärkt. Die Wallbildung ist das Stör-element in der Sperrentreppe, das in der Hauptsache die Streuungen der Messwerte um den gerechneten Kurvenverlauf verursacht.

4. *Entmischung des transportierten Geschiebematerials:* Unter dem Einfluss der Schubspannungsverteilung in der Nähe der Kolkwanne wird während des Kolkvorganges vor allem der feinkörnige Anteil der Geschiebemischung des Sohlmaterials ausgewaschen und weiter transportiert, während die gröberen Kornfraktionen die Kolkwanne abflästern. Dadurch tritt eine gewisse Entmischung des Geschiebematerials während der Kolkentwicklung in der Sperrentreppe auf. Dieser Effekt verstärkt sich von Feld zu Feld der Sperrentreppe und nimmt mit zunehmender Versuchsdauer zu. Das Kolkgleichungssystem berücksichtigt diesen Entmischungsvorgang nicht.

Modellähnlichkeit

Das Kolkgleichungssystem ist derart aufgebaut, dass das Froudsche Ähnlichkeitsgesetz gilt. Da im Modell allein die Gravitation die Bewegung des Wassers erzeugt und die Turbulenz voll ausgebildet ist, ist anzunehmen, dass auch der gesamte Kolkvorgang dem erweiterten Froudschen Ähnlichkeitsgesetz gehorcht. Der Nachweis wurde allerdings in dieser Arbeit nicht erbracht.

Doch wurde an der VAW in verschiedenen Fällen, in denen dies möglich war, ähnliche Vorgänge in verschiedenen Massstäben zu studieren, gezeigt, dass die erweiterte Froudsche Ähnlichkeit sowohl bezüglich der Strahlform als auch hydraulisch, geschiebetechnisch und in Bezug auf die Endkolktiefe und Kolkbildung mit praktisch genügender Ge-

nauigkeit besteht [3]. Daher darf angenommen werden, dass das Kolkgleichungssystem tatsächlich für den praktisch in Frage kommenden Bereich massstabsunabhängig ist.

5. Zusammenfassung der Ergebnisse im Hinblick auf die Praxis

Das Kolkgleichungssystem beschreibt den Kolkvorgang nach einer einzelnen Sperre, wie auch den Kolkvorgang in einer Sperrentreppe in allgemeiner, umfassender Form. Seine Erprobung an numerischen Beispielen zeigt eine gute Übereinstimmung mit Modellversuchen und Erfahrungen aus der Praxis.

Es schafft hydraulisch exakte Grundlagen für eine wirtschaftliche und sichere Berechnung der Einzelsperren und Sperrentreppen in der Wildbachverbauung; und es erlaubt, die Bauwerke den gegebenen Bedingungen optimal anzupassen. Es zeigt, dass der Kolkvorgang nach einer einzelnen Sperre wie auch in der Sperrentreppe ganz wesentlich vom zeitlichen Verlauf der Hochwasserwelle und des Geschiebetriebs in die Kolkzone abhängt.

Das Kolkgleichungssystem gilt aber nicht nur in der Wildbachverbauung, sondern auch für alle übrigen Kolkvorgänge, für welche die dieser Arbeit zugrunde gelegten Voraussetzungen zutreffen.

Hat man den Zugang zu einem Computer, so ist die Anwendung des Kolkgleichungssystems ohne grossen Arbeitsaufwand möglich und die Kolkentwicklung der verschiedensten Fälle lässt sich sofort graphisch festhalten. Direkt ergeben sich aus der Arbeit folgende Punkte, die allgemein für den Bau von Sperren Gültigkeit haben:

- Die Abflussektion soll so ausgebildet sein, dass sich der Überfallstrahl in der Kolkwanne möglichst stark auffächert. Dadurch lassen sich die Konstanten c_1 und c_2 und damit auch die maximal erreichbare Kolktiefe klein halten
- Bei der Bemessung der Sperren muss berücksichtigt werden, dass die tatsächlichen Kolkgrößen um die berechneten Werte streuen
- Für den Kolkvorgang mit auch sehr geringem Geschiebetrieb in die Kolkzone verringern sich die Kolktiefen gegenüber den entsprechenden Kolktiefen des entsprechenden Klarwasserkolks um 20 bis 30%.

Literaturverzeichnis

- [1] M. R. Carstens: Similarity Laws for Localized Scour. Proc. ASCE 1966 Hy 3, Paper 4818.
- [2] E. Buckingham: Model Experiments and the Form of Empirical Equations. Transactions American Society of Mechanical Engineers, Volume 37, 1935.
- [3] W. Eggenberger und R. Müller: Experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Kolkproblem. Mitteil. aus der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH Zürich, 1944.
- [4] E. M. Laursen: Observations on the Natur of Scour. Proc. of 5th Hydr. Conf. State Univ. of Iowa, Iowa City, Iowa Bulletin 34, June 9–11, 1952.
- [5] E. Meyer-Peter und R. Müller: Formulas for Bedload Transport. IAHR, 2. Tagung in Stockholm, Juni 1948.
- [6] W. Schmid: Die allgemeine dreidimensionale Kolkentwicklung unter besonderer Berücksichtigung des Geschiebetriebs und der Zeit. Diss. ETH Nr. 4859, Zürich 1972.
- [7] W. Schmid: Die Photogrammetrie im wasserbaulichen Versuchswesen. «Schweiz. Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie», Fachheft 4/73, Dezember 1973.
- [8] E. Stiefel: Einführung in die numerische Mathematik. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart 1963.
- [9] VAW ETH: «Geschiebekolk», Bericht über Modellversuche im Auftrag des ASF, Bern 1971.

Adresse des Verfassers: Dr. sc. techn. W. Schmid, zu den 3 Linden 18, 4058 Basel.