

Zeitschrift:	Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber:	Schweizerischer Forstverein
Band:	119 (1968)
Heft:	2
Artikel:	Methode zur Reduktion der Grösse des Sperrenkolkes mit technischen Hilfsmitteln und deren Erprobung im Modell
Autor:	Kotoulas, D.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-765555

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: 17.01.2026

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

Methode zur Reduktion der Größe des Sperrenkolkes mit technischen Hilfsmitteln und deren Erprobung im Modell

Von D. Kotoulas, Zürich/Thessaloniki

Oxf. 116.7 (384.3)

1. Problemstellung

Eines der brennendsten Probleme des Fluß- und Wildbachverbaues stellt die Auskolkung der Gerinnesohle durch natürlichen oder künstlichen Wasserabsturz dar. In der Praxis dienen die Abmessungen des Kolkloches häufig als Kriterium zur Bestimmung der minimalen Fundierungstiefe des Bauwerkes und des minimalen Abstandes zweier aufeinanderfolgender Sperren.

Auf alle Fälle ist eine Vorausberechnung der wichtigsten Kolkdimensionen – Tiefe, Länge, Lage des tiefsten Kolkpunktes – möglich. Sie dient der Vorauskonstruktion der Kolkwanne (Kotoulas, 1967). Es wäre aber sowohl von technischem als auch ökonomischem Interesse, diese zu erwartenden Kolkabmessungen möglichst günstig zu reduzieren.

Diese Idee ist nicht neu. Bereits seit vielen Jahren sichert man Sperren durch Einwerfen größerer Blöcke vor Kolkschäden (Wang, 1903, Härtel-Winter, 1934, Strele, 1950). Bis jetzt wurde aber der Einfluß der eingeworfenen Blöcke auf die Kolkabmessungen nicht untersucht, sondern nur nach Erfahrungswerten festgelegt.

In der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, welche Beziehung zwischen der Dimension, dem Volumen und der Zusammensetzung der eingebrachten Blöcke und den dadurch bedingten Kolkabmessungen besteht. Voraussetzungen zur Prüfung dieser Beziehung im Bereich des vollkommenen Überfalles sind:

- Verwendung von Geschiebemischungen als Sohlenmaterial;
- keine Berücksichtigung des Abriebes des Sohlenmaterials;
- kein Geschiebetransport von Oberstrom.

2. Methode zur Kontrolle der Kolkabmessungen

2.1 Überlegungen zur erwünschten Reduktion der Kolkabmessungen

Auf Grund früher durchgeführter Kolkversuche¹ konnten für die Berechnung der Kolkwassertiefe, der Kolklänge und der Lage des tiefsten Kolkpunktes folgende Gleichungen aufgestellt werden:

¹ Die entwickelte Methode basiert hauptsächlich auf unseren früheren Untersuchungen über das Kolkproblem an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau (VAWE) der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich (Kotoulas, 1967).

$$S_t = (h_{st} + h_u) = \left[1.9 \cdot \frac{1}{g^{0.35}} \cdot \frac{h^{0.35} \cdot q^{0.7}}{d_{95}^{0.4}} \right] \cdot \left(1 - e^{-0.55 \sqrt[5]{t}} \right) \quad (1)$$

$$l_{st} = \left[2.7 \cdot \frac{1}{g^{0.45}} \cdot \frac{h^{0.45} \cdot q^{0.9}}{d_{95}^{0.8}} \right] \cdot \left(1 - e^{-0.2 \sqrt[3]{t}} \right) \quad (2)$$

$$l_{at} = \left[3.9 \cdot \frac{1}{g^{0.35}} \cdot \frac{h^{0.27} \cdot q^{0.54}}{d_{95}^{0.08}} \right] \cdot \left(1 - e^{-0.5 \sqrt[6]{t}} \right) \quad (3)$$

S_t l_s l_a = Kolkwassertiefe, Kolkänge und Abstand zwischen dem tiefsten Kolkpunkt und der Sperre zur Zeit t (m)

h_{st} = Kolktiefe zur Zeit t (m)

h_u = Unterwassertiefe (m)

g = Erdbeschleunigung (m/sec^2)

h = Absturzhöhe (m)

q = spez. Wassermenge ($\text{m}^3/\text{sec m}$)

d_{95} = Geschiebedurchmesser bei 95 Gew.-% der gesamten Sohlenmischung (m)

t = Zeit (sec)

Verallgemeinert lautet die Gleichung für eine beliebige Kolkabmessung ohne Geschiebetransport von oberstrom, ohne spezielle Berücksichtigung des Abriebes und gültig für den vollkommenen Überfall:

$$K = \left[w_k \cdot d_{95} \cdot \left(\frac{q^2 \cdot h}{g \cdot d_{95}^4} \right)^x \right] \cdot \left(1 - e^{-f \cdot t^n} \right) \quad (4)$$

K_t = Kolkabmessung zur Zeit t (m)

w_k f = Faktoren bzw. Koeffizienten (dimensionslos)

x n = Exponenten (dimensionslos)

Ebenso wurde gezeigt, daß durch den Aufprall des Wasserstrahles das Geschiebematerial der Sohle aufgewirbelt und in die Höhe gerissen wird, anschließend schwebend über die Kolkböschung gelangt und dann vom Wasser fortgeschwemmt wird. Die ganze Materialbewegung führt zu einer Entmischung und Sortierung des Sohlengeschiebes. Das Grobkörnige verbleibt in der Kolkwanne, während das Feinere durch das Wasser abtransportiert wird. So bilden allmählich die groben Komponenten auf der gesamten Kolkfläche die sogenannte Deckschicht, die das darunterliegende Material vor weiterer Kolkung schützt.

Wie die Untersuchung des Kornaufbaus und der Stärke der Deckschicht an verschiedenen Stellen der Kolkwanne zeigte, ist die Deckschichtpartie im

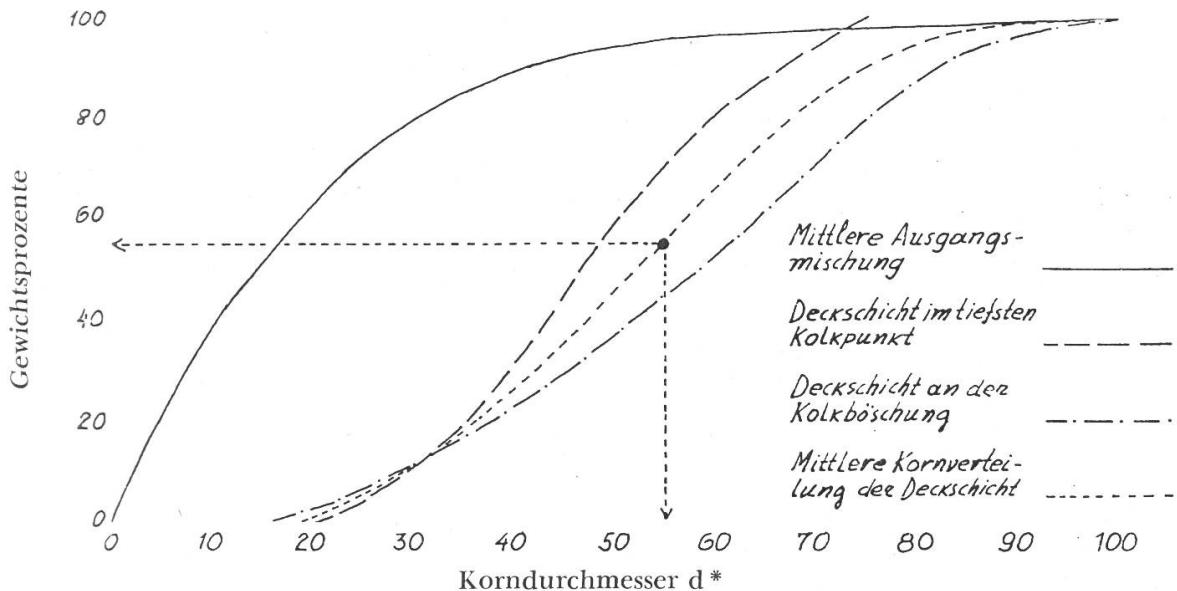


Abbildung 1

Gesamtbild der mittleren Kornzusammensetzung der Ausgangsmischungen und der Deckschichten im tiefsten Kolkpunkt und an der Kolkböschung.

d^* = Quadratloch (Sieb)
(gilt für alle weiteren Darstellungen)

tiefsten Kolkpunkt und an der Kolkböschung von großer Bedeutung für den Kolkvorgang und die Kolkabmessungen. Sie zeichnet sich (Abbildung 1) durch eine relativ ausgeprägte Gleichförmigkeit und das Vorhandensein nur der größten Komponenten des Ausgangsmaterials aus. Es wurde festgestellt, daß der maßgebende Korndurchmesser der Deckschicht an den erwähnten zwei Stellen bestimend für die Kolkbildung ist. Der maßgebende Korndurchmesser d_m ist $d_m = d_{95}$ der Ausgangsmischung.

Maßgebend für die Entstehung des Kolkes sind vor allem Korndimensionen, -zusammensetzung und -volumen im tiefsten Kolkpunkt und an der Kolkböschung, da hier der Wasserstrahl angreift. Einer bestimmten Kolkgeometrie entspricht eine bestimmte Deckschicht. Auf Grund dieser festgestellten Beziehung können wir folgende Annahme machen:

Die technische Einbringung einer nach Dimension, Volumen und Zusammensetzung größeren Deckschicht als diejenige des natürlichen Sohlenmaterials bereits vor der Auskolkung soll eine dieser Deckschicht entsprechende verkleinerte Kolkgeometrie bedingen.

2.2 Die Kornzusammensetzung der Deckschicht in der Kolkwanne und ihre Wiederherstellung

Zur Vereinfachung der Beschreibung der Kornzusammensetzung der Deckschicht wurde aus der Kornverteilungskurve im tiefsten Kolkpunkt und an der Kolkböschung die mittlere Kornverteilung bestimmt (Abbildung 1). Die so entstandene mittlere Kurve gibt uns die Beziehung zwischen Korn-

durchmesser (in Prozenten des maximalen Korndurchmessers der Mischung) und den Gewichtsprozenten. Somit kann für einen bestimmten Korndurchmesser sowohl das entsprechende Gewichtsprozent als auch die Gewichtszunahme pro Durchmesserstufe bestimmt werden.

Als maßgebender Korndurchmesser kann aus Abbildung 1 $d_m = d_{55}$ abgelesen werden. Weiter kann aus der mittleren Kurve $d_m = 0,55 \cdot d_{max}$ und $d_{min} = 0,18 \cdot d_{max}$ ermittelt werden. Es kann daher bei Kenntnis des maßgebenden Korndurchmessers der Deckschicht der maximale und minimale Korndurchmesser mit der einfachen Beziehung berechnet werden:

$$d_{max} = \frac{d_m}{0,55} \quad , \quad d_{min} = 0,18 \cdot d_{max}$$

Mit Hilfe der Tabelle 1 können des weiteren die nötigen Punkte der Kornverteilungskurve gezeichnet werden.

Tabelle 1
Kornzusammensetzung der Deckschicht

Korndurchmesser in % des d_{max}	Gewichtsprozent	Gewichtsprozent- zuwachs pro Korndurchmesserstufe
18	0	2
20	2	10
30	12	15
40	27	19
50	46	20
60	66	16
70	82	10
80	92	6
90	98	2
100	100	

2.3 Berechnung der Deckschicht (maßgebendes Korndurchmesser-Volumen und Gewicht)

Für die Berechnung der Kolkwassertiefe im Endzustand wird die Gleichung (1) verwendet. Sie erhält mit $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$ die Endform:

$$S_0 = 0,86 \cdot \frac{h^{0,35} \cdot q^{0,7}}{d_{95}^{0,4}}$$

oder bei $d_m = d_{95}$ der Ausgangsmischung:

$$d_m^{0.4} = 0.86 \cdot \frac{h^{0.35} \cdot q^{0.7}}{s_0} \quad (m)$$

Diese Gleichung liefert den maßgebenden Korndurchmesser der Deckschicht für eine angestrebte Kolkwassertiefe.

Weiters muß das Volumen bzw. Gewicht der benötigten Deckschicht berechnet werden. Das kann über die Querschnittfläche der Deckschicht (gegeben durch den Bereich des tiefsten Kolkpunktes und der unteren Kolkböschung, Abbildung 2) erreicht werden. Die früher durchgeföhrten Modellversuche lieferten die benötigte Anzahl von Photos. Anhand dieser kann die Querschnittfläche bestimmt und planimetriert werden (Tabelle 2).

Ausgangspunkt für die Berechnung der Deckschichtfläche (F_d) im Endzustand bildet die allgemeine, dimensionsrichtige Gleichung 4 in folgender abgeänderter Form:

$$\left(\frac{F_d}{d_{95}^2} \right) = w_k \cdot \left(\frac{q^2 \cdot h}{g \cdot d_{95}^4} \right)$$

Der Exponent x wurde wie folgt bestimmt:

$$\log \left(\frac{F_d}{d_{95}^2} \right) = \log w_k + x \log \left(\frac{q^2 \cdot h}{g \cdot d_{95}^4} \right)$$

Trägt man $\left(\frac{F_d}{d_{95}^2} \right)$ in Funktion von $\left(\frac{q^2 \cdot h}{g \cdot d_{95}^4} \right)$ auf logarithmisches Papier, so erhält man als Ausgleichsfunktion eine Gerade (Abbildung 3), deren Steigungsmaß:

$$\frac{\log \left(\frac{F_d}{d_{95}^2} \right)}{\log \left(\frac{q^2 \cdot h}{g \cdot d_{95}^4} \right)} = 0.52$$

dem Exponenten x entspricht.

Die Konstante w_k wurde mit Hilfe folgender Gleichung bestimmt:

$$\log w_k = \log \left(\frac{F_d}{d_{95}^2} \right) - \log \left(\frac{q^2 \cdot h}{g \cdot d_{95}^4} \right)^{0.52}, \quad w = 1.8$$

Die Gleichung für die Querschnittfläche der Deckschicht F_d lautet:

$$\left(\frac{F_d}{d_{95}^2} \right) = 1.8 \cdot \left(\frac{q^2 \cdot h}{g \cdot d_{95}^4} \right)^{0.52}$$

und

$$F_d = 0.6 \cdot \frac{q^{1.04} \cdot h^{0.52}}{d_m^{0.08}} \quad (m^2)$$

mit $g = 9,81 \text{ m}^3/\text{sec m}$ und $d_{95} = d_m$ der Deckschicht.

Tabelle 2
Gemessene Querschnittsfläche der Deckschicht

Versuchsbezeichnung	Querschnittsfläche F_d (m^2)		
	Mischung d ₁	Mischung d ₂	Mischung d ₃
h ₁ q ₁	0,0350	0,0267	0,0215
h ₁ q ₂	0,0265	0,0197	0,0175
h ₁ q ₃	0,0200	0,0141	0,0127
h ₁ q ₄	0,0085	0,0060	0,0055
h ₂ q ₁	0,0235	0,0225	0,0216
h ₂ q ₂	0,0187	0,0158	0,0142
h ₂ q ₃	0,0140	0,0134	0,0110
h ₂ q ₄	0,0076	0,0045	0,0039
h ₃ q ₁	0,0218	0,0213	0,0182
h ₃ q ₂	0,0160	0,0145	0,0140
h ₃ q ₃	0,0088	0,0078	0,0075
h ₃ q ₄	0,0056	0,0037	0,0035
h ₄ q ₁	0,0192	0,0183	0,0142
h ₄ q ₂	0,0150	0,0122	0,0114
h ₄ q ₃	0,0070	0,0054	0,0060
h ₄ q ₄	0,0040	0,0034	0,0032

Das Gesamtvolumen der Deckschicht pro 1 m Breite ist:

$$V_d = F_d \cdot 1 \quad (m^3)$$

Spezielle Messungen in der Deckschicht ergaben ein Porenvolumen von 42 Prozent. Das tatsächliche Materialvolumen ist:

$$V_{d_W} = 0,58 \cdot V_d \quad (m^3)$$

und das entsprechende Gewicht ist:

$$G_{d_W} = V_{d_W} \cdot \gamma_s = 0,58 \cdot V_d \cdot \gamma_s = 0,58 \cdot F_d \cdot 1 \cdot \gamma_s$$

γ_s = spez. Gewicht des Sohlenmaterials (t/m^3).

2.4 Materialvolumen bzw. Gewicht der Deckschicht und seine Kornzusammensetzung

Die Kornzusammensetzung der benötigten Deckschicht kann entweder größer als diejenige des vorhandenen Sohlenmaterials sein (Abbildung 4 [b]),

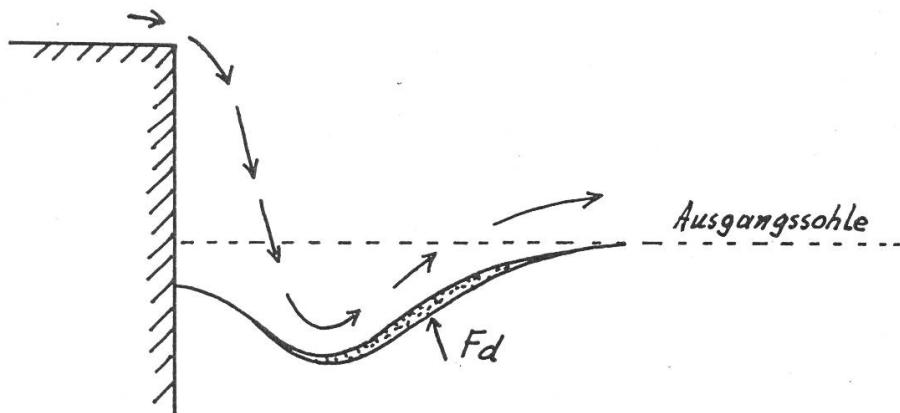


Abbildung 2
Schematisches Bild der gemessenen Querschnittsfläche.

oder die feineren Komponenten der Deckschicht sind gleich groß wie die größeren der Sohlenmischung (Abbildung 4 [a]). Daraus geht klar hervor, daß im zweiten Fall zur Erreichung der gewünschten Reduktion der Kolkabmessungen nur der fehlende Teil der Deckschicht eingebracht werden muß (in der Abbildung 4 schraffiert). Der restliche Teil fällt durch die Auskolkung der Sohle an.

Zur Bestimmung der Gewichtsanteile pro Korndurchmesserstufe des bei einer erwünschten Koltiefe vorhandenen Sohlenmaterials muß die entstehende Koltgeometrie bekannt sein. Die Koltlänge (l_{s_0}) und die Lage des tiefsten Kolkpunktes (l_{a_0}) werden mit Hilfe der Gleichungen 2 und 3 für den Endzustand berechnet. Die Koltwanne kann somit konstruiert (Kotoulas, 1967), die Fläche gemessen und das Volumen pro 1 m Kolkbreite berechnet werden. Nach Abzug der 30 Prozent für das Porenvolumen (Kotoulas, 1967) ergibt sich für das tatsächliche Volumen:

$$V_{s_w} = 0.7 \cdot V_s \quad (m^3/m)$$

und für das entsprechende Gewicht:

$$G_{s_w} = V_{s_w} \cdot \gamma_s = 0.7 \cdot V_s \cdot \gamma_s \quad (t/m)$$

γ_s = spez. Gewicht des Sohlenmaterials (t/m^3).

Aus der Kornverteilungskurve der Sohlenmischung wird die prozentuelle Gewichtszunahme pro Korndurchmesserstufe gerechnet. Mit Hilfe des berechneten Gesamtgewichtes (G_{s_w}) des Sohlenmaterials der Koltwanne kann die Gewichtszunahme pro Korndurchmesserstufe für den angestrebten Zustand ermittelt werden (Abbildung 4).

Vergleiche der Kornzusammensetzung der Deckschicht und des Sohlenmaterials haben gezeigt, daß sämtliche feine und etwa die Hälfte der größeren Komponenten der Sohlenmischung wegtransportiert werden und somit

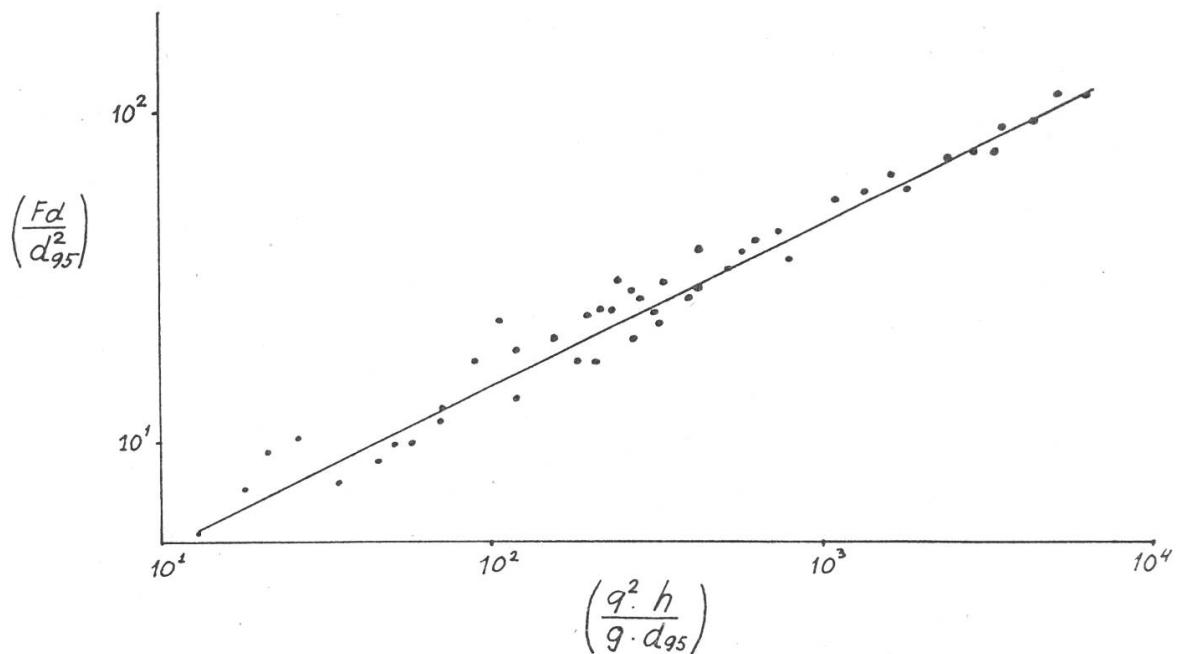


Abbildung 3
Bestimmung des Exponenten X

für die Deckschicht verloren gehen. Dieser Verlust muß in Rechnung gestellt werden.

Für die benötigte Deckschicht kann die entsprechende Gewichtszunahme pro Korndurchmesserstufe mit Hilfe der Tabelle 1 bestimmt werden.

3. Überprüfung der Methode im Modell

3.1 Versuchsbedingungen

3.1.1 Versuchsprogramm

Die zur Erprobung der entwickelten Methode notwendigen Versuche im Modell wurden an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau (VAWE) der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich durchgeführt.

Von den drei bei früheren Versuchen verwendeten Geschiebemischungen (Kotoulas, 1967) kam die feinste (d_3) zur Verwendung (Abbildung 5). Der mit dieser Mischung bei $q = 0,08 \text{ m}^3/\text{sec}$ und $h = 0,400 \text{ m}$ durchgeführte Versuch ergab eine Kolkwassertiefe von $S_o = 0,545 \text{ m}$ oder eine eigene Kolktiefe von $h_s = 0,410 \text{ m}$ (Kotoulas, 1967). Ziel des Versuchsprogrammes waren folgende Reduktionen der Kolkwassertiefe bei obgenannten Bedingungen:

$$\begin{array}{lll}
 S_{o_1} = 0.485 \text{ m} & h_{s_1} = 0.350 \text{ m} & (14.6 \%) \\
 S_{o_2} = 0.435 \text{ m} & h_{s_2} = 0.300 \text{ m} & (27.0 \%) \\
 S_{o_3} = 0.385 \text{ m} & h_{s_3} = 0.250 \text{ m} & (39.0 \%)
 \end{array}$$

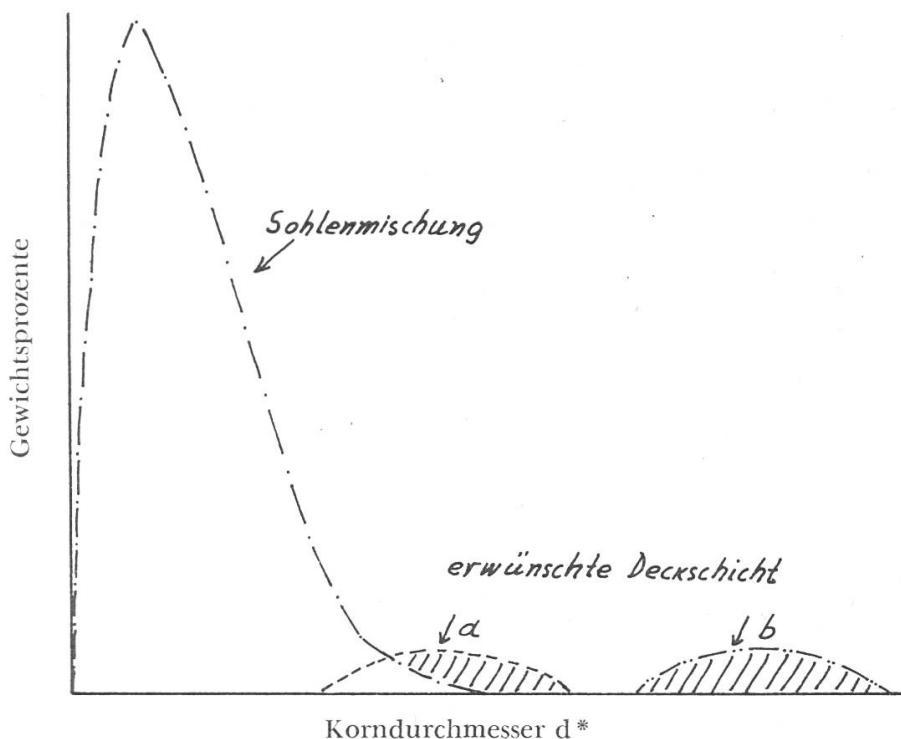


Abbildung 4

Schematischer Vergleich zwischen Ausgangsmischung und notwendiger Deckschicht.

Mit der entwickelten Methode konnten die der Reduktion entsprechenden Deckschichten ermittelt werden:

$$D_1 = 22 \text{ kg}, D_2 = 30 \text{ kg}, D_3 = 34 \text{ kg}.$$

Abbildung 6 zeigt die entsprechenden Kornverteilungskurven. Es wurden also drei Versuche durchgeführt:

$$d_3 h q D_1, d_3 h q D_2, d_3 h q D_3.$$

Anhand von Photographien konnte der ganze Kolkvorgang studiert werden.

Ein weiteres Problem stellt die Festlegung der Lage des günstigsten Platzes zur Blockwurfablagerung dar. Dies gilt sowohl für das Modell (bei konstanter Wassermenge) als auch bei natürlichen Verhältnissen (Änderung der Wassermenge mit der Zeit).

Im Modell wurden folgende Ablagerungsvarianten untersucht:

- zwischen Sperre und Wasserwurfparabel abgelagerter Blockwurf (Abbildung 7 a);
- zwischen Sperre und Wasserwurfparabel in der Sohle eingegrabener Blockwurf (Abbildung 7 b).

Diese zwei Varianten wurden deshalb gewählt, weil Vorversuche zeigten, daß wegen der großen Schleppkraft des Wasserstrahles und der Gefahr des

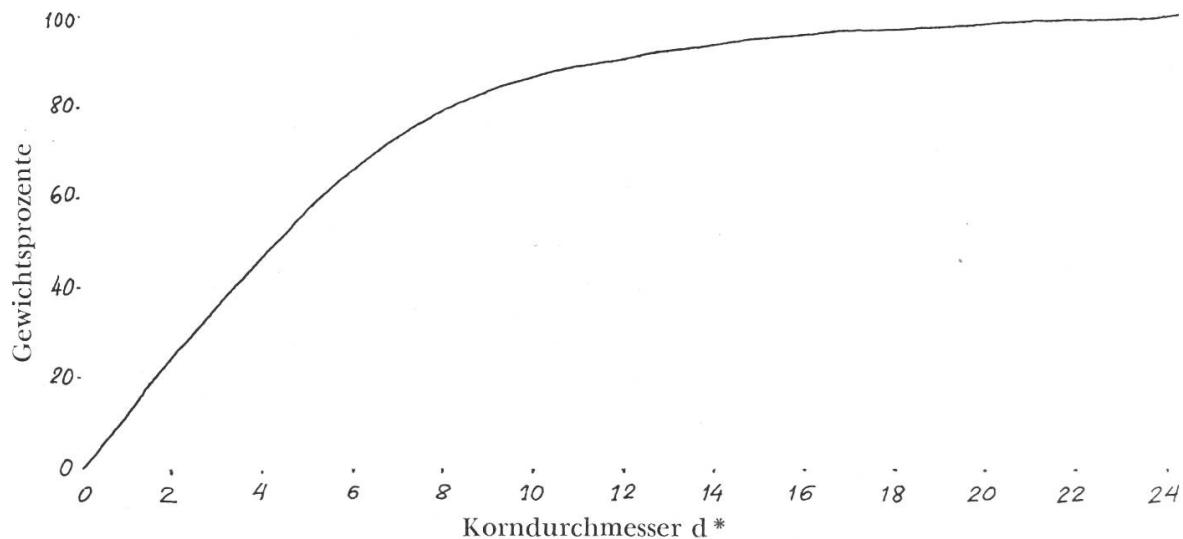


Abbildung 5
Kornverteilungskurve der Ausgangsmischung.

Abtransportes des Blockwurfes dieser zwischen Sperre und Wurfparabel des Wasserstrahles abgelagert werden sollte. Für jeden Modellfall wurden zwei Versuche mit dem Blockwurf D_3 durchgeführt.

Für natürliche Verhältnisse wurden folgende Ablagerungsvarianten untersucht:

- zwischen Sperre und Wurfparabel der minimalen Wassermenge frei abgelagerter Blockwurf (Abbildung 8 a);
- in einer durch die minimale Wassermenge geschaffenen Kolkwanne abgelagerter Blockwurf (Abbildung 8 b).

Zur Nachahmung der natürlichen Verhältnisse im Modell wurde bei vier Versuchen mit der Deckschicht D_2 die Wassermenge variiert:

$$q_1 = 0,02, \quad q_2 = 0,04, \quad q_3 = 0,06, \quad q_4 = 0,08 \quad \text{m}^3/\text{sec m}$$

Die Fließdauer von q_1, q_2, q_3 betrug je 15 Minuten, von q_4 4 Stunden.

3.1.2 Versuchsanordnung und -technik

Im Prinzip sind Versuchsanordnung und -technik gleich wie bei den früher durchgeführten Versuchen (Abbildung 9).

Der für jeden Versuch vorbereitete Blockwurf wurde vor Versuchsbeginn nach Ausgleichung der Sohle in den vorgesehenen Ablagerungsplatz eingebbracht.

Die Färbung des Blockwurfes erleichterte die Beobachtung des Kolkvorganges sehr.

3.2 Versuchsergebnisse

Der Kolkvorgang spielte sich wie bei den früheren Kolkversuchen ab. Der mit hoher Geschwindigkeit aufprallende Wasserstrahl spülte die Sohle

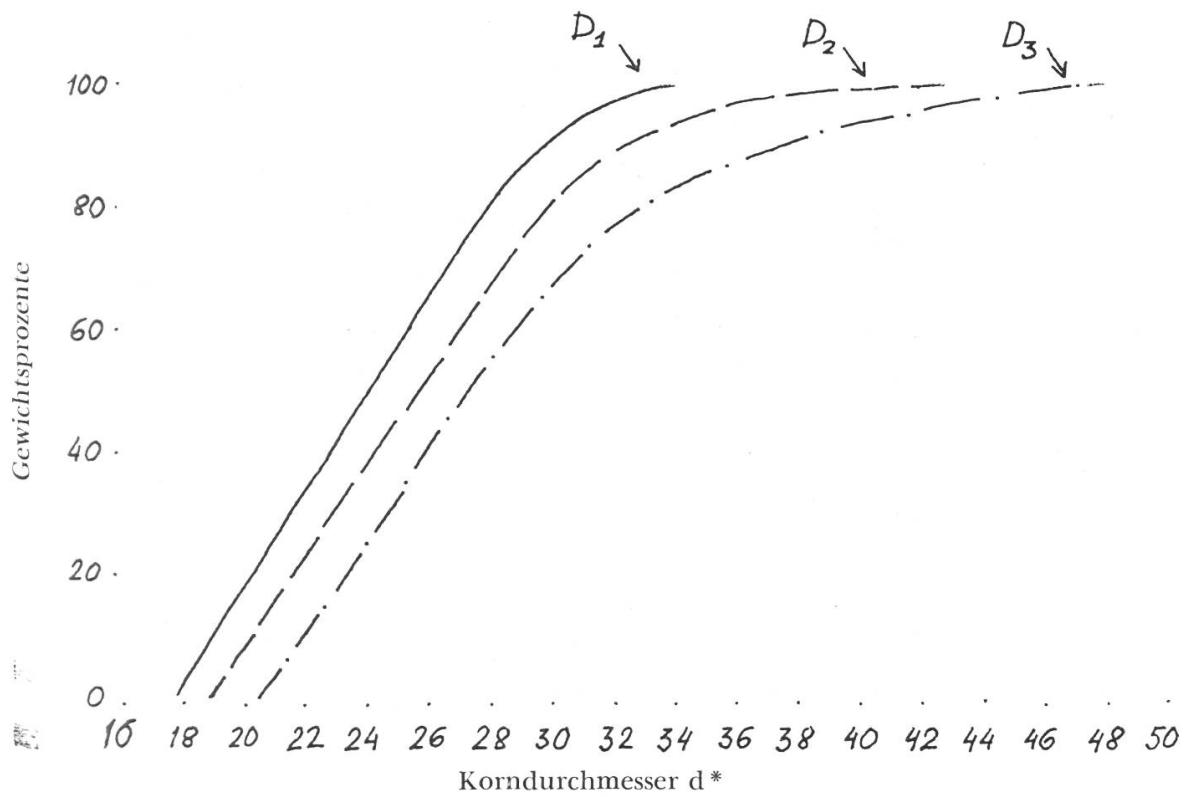


Abbildung 6

Kornzusammensetzung der drei für die Modellversuche vorbereiteten Blockwürfe.

Tabelle 3
Die zeitliche Entwicklung der Kolkwassertiefe in m

Versuch	Zeit (sec)						
	20	40	78	156	307	615	1230
d ₃ hq	0,330	0,340	0,375	0,395	0,415	0,440	0,460
d ₃ hqD ₁	0,325	0,330	0,345	0,365	0,390	0,405	0,415
d ₃ hqD ₂	0,305	0,315	0,325	0,340	0,350	0,370	0,390
d ₃ hqD ₃	0,280	0,300	0,310	0,330	0,335	0,340	0,345

Versuch	Zeit (sec)						
	2460	3600	7200	14 400	25 200	86 400	
d ₃ hq	0,470	0,480	0,490	0,500	0,510	0,530	
d ₃ hqD ₁	0,435	0,450	0,460	0,470	0,480	0,485	
d ₃ hqD ₂	0,400	0,410	0,420	0,425	0,430	0,435	
d ₃ hqD ₃	0,355	0,360	0,370	0,375	0,380	0,385	

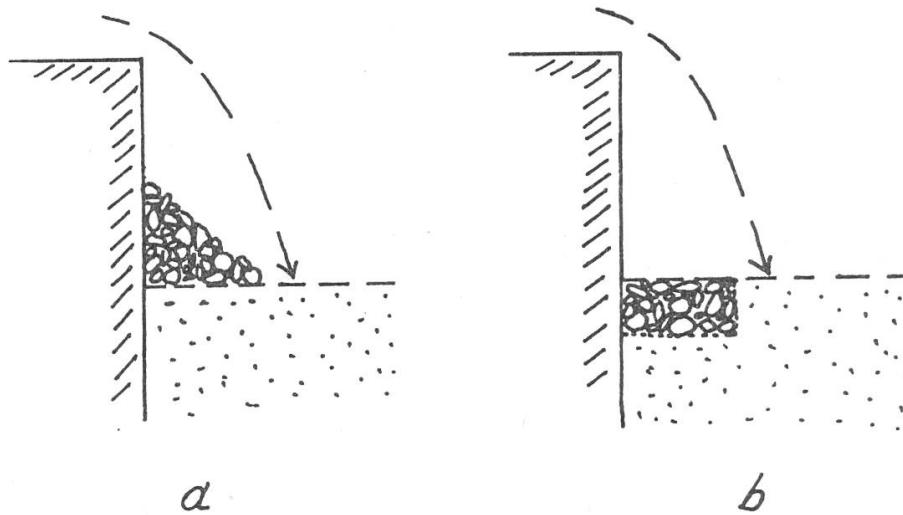


Abbildung 7
Ablagerung des Blockwurfs im Modell.

bis auf eine beträchtliche Tiefe aus. Gleichzeitig begann der Blockwurf nachzurutschen. Bereits 20 Sekunden nach Beginn des Versuches befand sich eine beachtliche Menge von Steinen in der Kolkwanne (Abbildung 10). Dies bedingte eine Verzögerung des ganzen Kolkvorganges. Im Laufe der weiteren Kolkentwicklung rutschte auch der letzte Teil des Blockwurfs in die Kolkwanne nach. Bereits nach 5 Minuten befand sich der ganze Blockwurf im Kolkloch. Einen typischen Kolkvorgang mit Blockwurf zeigt Abbildung 10.

Tabelle 3 ermöglicht den Vergleich der zeitlichen Entwicklung des Kolkvorganges ohne Blockwurf und den drei verwendeten Blockwürfen. Aus dieser Tabelle geht klar hervor, daß unter Verwendung der erwähnten Blockwürfe die erwünschte Reduktion der Kolkwassertiefe erreicht worden ist (Abbildung 11). Hiermit ist der Beweis erbracht, daß die entwickelte Methode zur Reduktion der Kolkabmessungen richtig aufgebaut und auch in der Praxis angewendet werden kann.

Die Versuche ergaben als günstigsten Platz für die Ablagerung des Blockwurfs für das Modell bzw. für die natürlichen Verhältnisse den Raum zwischen Sperre und Wurfparabel der konstanten bzw. minimalen Wassermenge. In diesem Ablagerungsbereich wird der Blockwurf nicht abtransportiert, sondern rutscht vorerst allmählich über die obere Kolkböschung in die Kolkwanne und übernimmt dort die Rolle der Deckschicht. Die Blockwurfablagerung gerade unterhalb der Wurfparabel des Wasserstrahles führt zu großen Materialverlusten und kann praktisch kaum einen Einfluß auf den Kolkvorgang ausüben. Die Eingrabung des Blockwurfs in der Sohle verhindert Steinverluste, jedoch verbleibt ein großer Teil der Steine in der

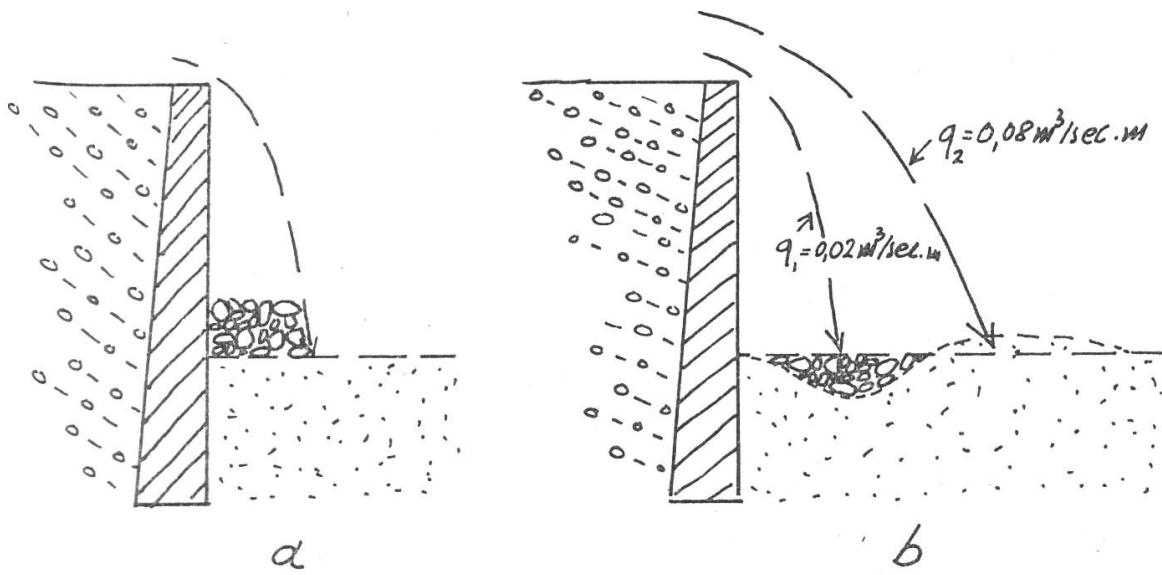


Abbildung 8

Ablagerung des Blockwurfs für den Fall der natürlichen Verhältnisse.

Ausgangslage. Somit geht die Wirkung für die Reduktion des Kolkvorganges größtenteils verloren.

Die Ablagerung des Blockwurfs in einer durch kleine Wassermengen entstandenen Kolkwanne führt bei späterer Zunahme der Wassermenge zu großen Steinverlusten.

4. Anwendung der Methode in der Praxis (Beispiel)

Der Berechnungsgang zur Reduktion der Kolkabmessungen soll anhand eines Beispieles erläutert werden.

Gegeben:	Sperrenhöhe	$h = 5 \text{ m}$
	spez. Wassermenge	$q_{\max} = 4 \text{ m}^3/\text{sec m}$
	Kornzusammensetzung der Sohle (siehe Abbildung 12)	
	erwartete maximale Kolktiefe	$h_{s_0} = 4.3 \text{ m}$
	maximal erwünschte Kolktiefe	$h'_{s_0} = 2.6 \text{ m}$
	Kolktiefe-Unterschied	<hr/> $1.7 \text{ m (40 \%)} \quad$

Gesucht: Dimension, Volumen bzw. Gewicht und Kornzusammensetzung des benötigten Blockwurfs.

Berechnungsvorgang:

a) maßgebender Korndurchmesser:

$$s_o = h_{S_0} + h_u$$

$$h_u = \frac{3}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{q^2}{g \cdot b^2}} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{4^2}{9.81}} = 1.76 \text{ m}$$

$$s_o = 4.36 \text{ m}$$

$$d_m^{0.4} = 0.86 \cdot \frac{h^{0.35} \cdot q^{0.7}}{s_o} = 0.86 \cdot \frac{5^{0.35} \cdot 4^{0.7}}{4.36}$$

$$d_m = 0.56 \text{ m}$$

b) Kornzusammensetzung des Blockwurfs (Tab. 4):

$$d_{\max} = \frac{d_m}{0.55} = \frac{0.56}{0.55} \approx 1 \text{ m} \quad d_{\min} = 0.18 \cdot d_{\max} = 0.18 \cdot 1 = 0.18 \text{ m}$$

c) Fläche, Volumen, Gewicht des Blockwurfs:

$$F_d = 0.6 \cdot \frac{q^{1.04} \cdot h^{0.52}}{d_m^{0.08}} = 0.6 \cdot \frac{4^{1.04} \cdot 5^{0.52}}{0.56^{0.08}} = 5 \text{ m}^2$$

$$V_d = F_d \cdot 1 = 5 \cdot 1 = 5 \text{ m}^3, \quad \gamma_{d_W} = 0.58 \cdot V_d = 3.5 \text{ m}^3$$

$$\text{und wenn } \gamma_s = 2.68 \text{ t/m}^3$$

$$G_{d_W} = 0.58 \cdot V_{d_W} \cdot \gamma_s = 9.4 \text{ t/m}$$

Tabelle 4

Korndurchmesser		Gewichtsprozent	Gewichtsprozentzuwachs pro Durchmesserstufe
%	d _{max}		
18	0,18	0	2
20	0,20	2	10
30	0,30	12	15
40	0,40	27	19
50	0,50	46	20
60	0,60	66	16
70	0,70	82	10
80	0,80	92	6
90	0,90	98	2
100	1,00	100	

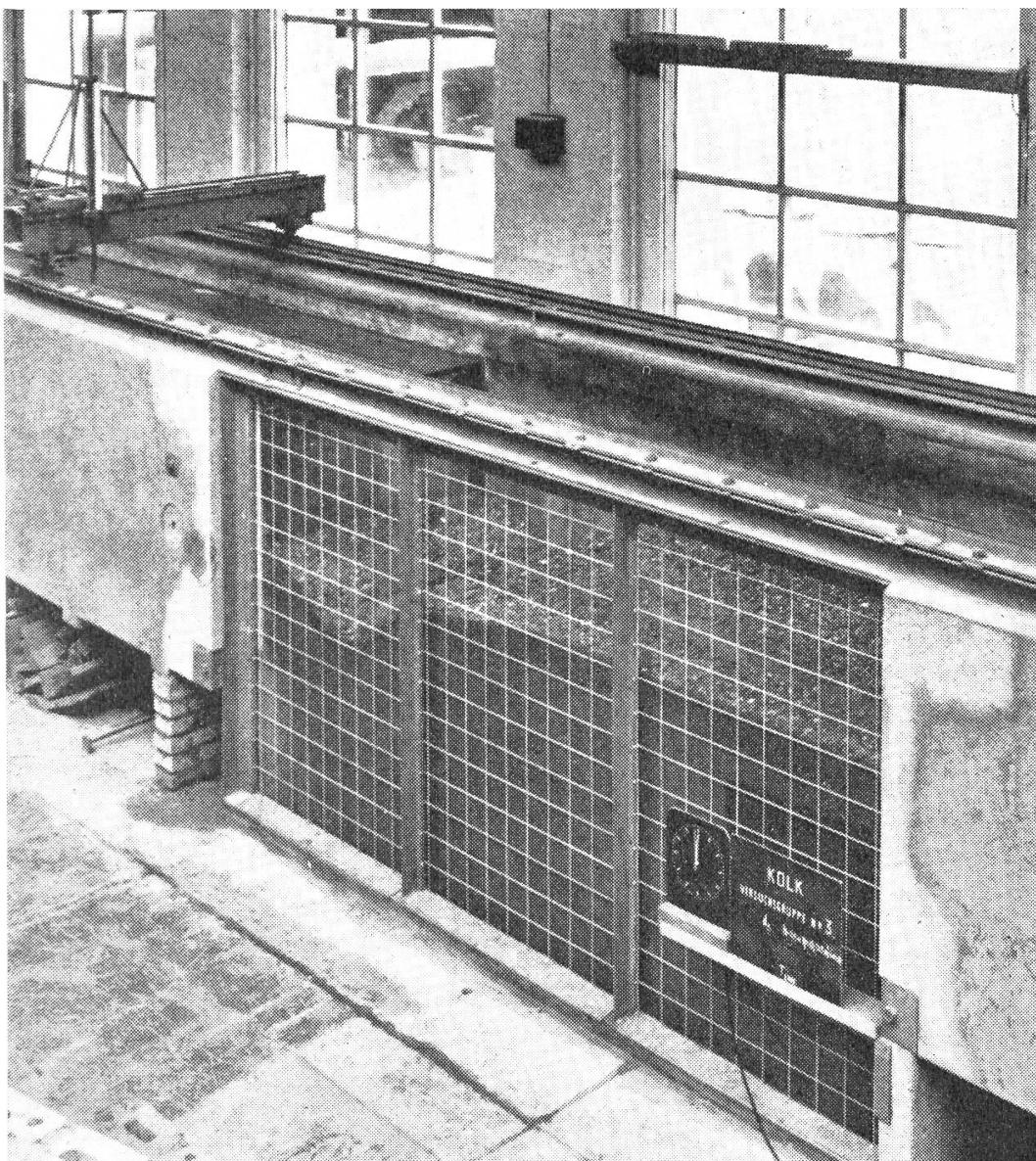


Abbildung 9
Gesamtansicht der Versuchsanordnung

d) Vergleich der Kornzusammensetzung des Blockwurfs mit derjenigen der Sohlenmischung:

– Kolktiefe: $h_{s_0} = 2.6 \text{ m}$

$$– \text{ Kolklänge: } l_{s_0} = 0.97 \cdot \frac{h^{0.45} \cdot q^{0.9}}{d_m^{0.8}} = \frac{0.97 \cdot 5^{0.45} \cdot 4^{0.9}}{0.56^{0.8}} = 10.7 \text{ m}$$

– Lage des tiefsten Kolkpunktes:

$$l_a = 1.5 \cdot \frac{h^{0.27} \cdot q^{0.4}}{d_m^{0.08}} = 1.5 \cdot \frac{5^{0.27} \cdot 4^{0.4}}{0.56^{0.08}} = 4.6 \text{ m}$$

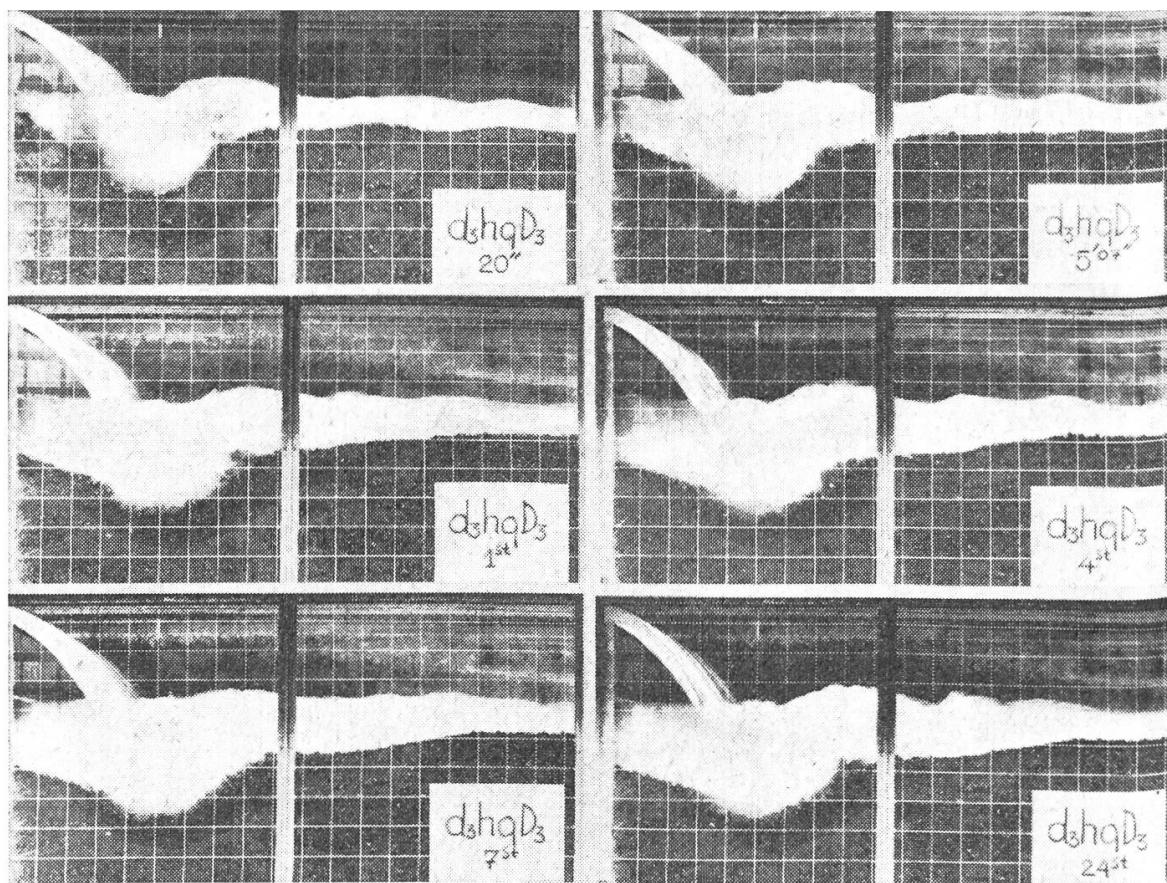


Abbildung 10
Die zeitliche Entwicklung des Kolkes.

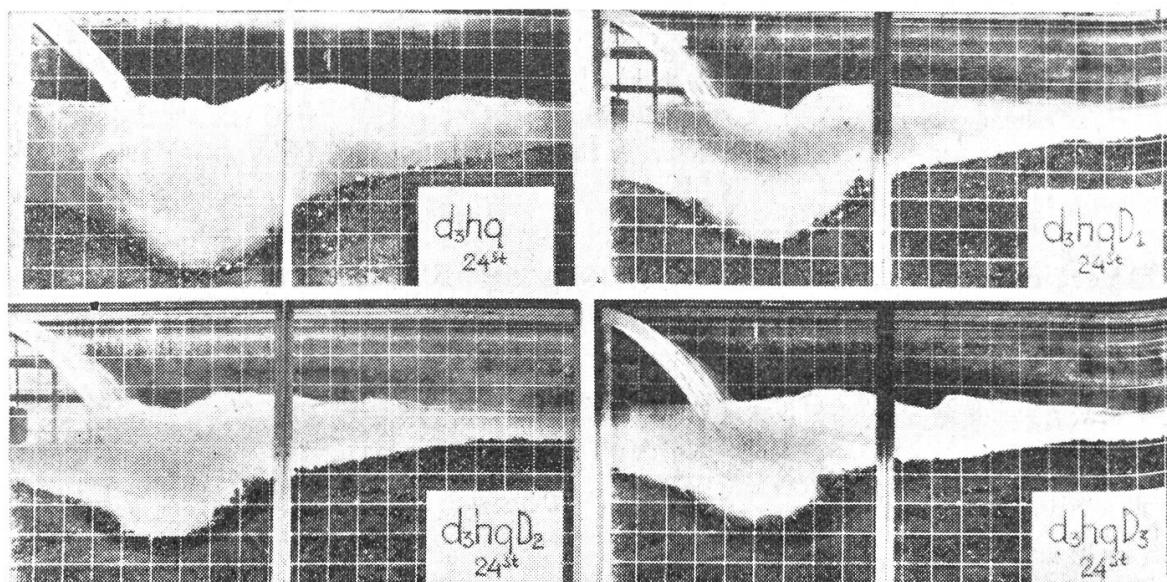


Abbildung 11
Der Kolkendzustand mit und ohne Blockwurf.

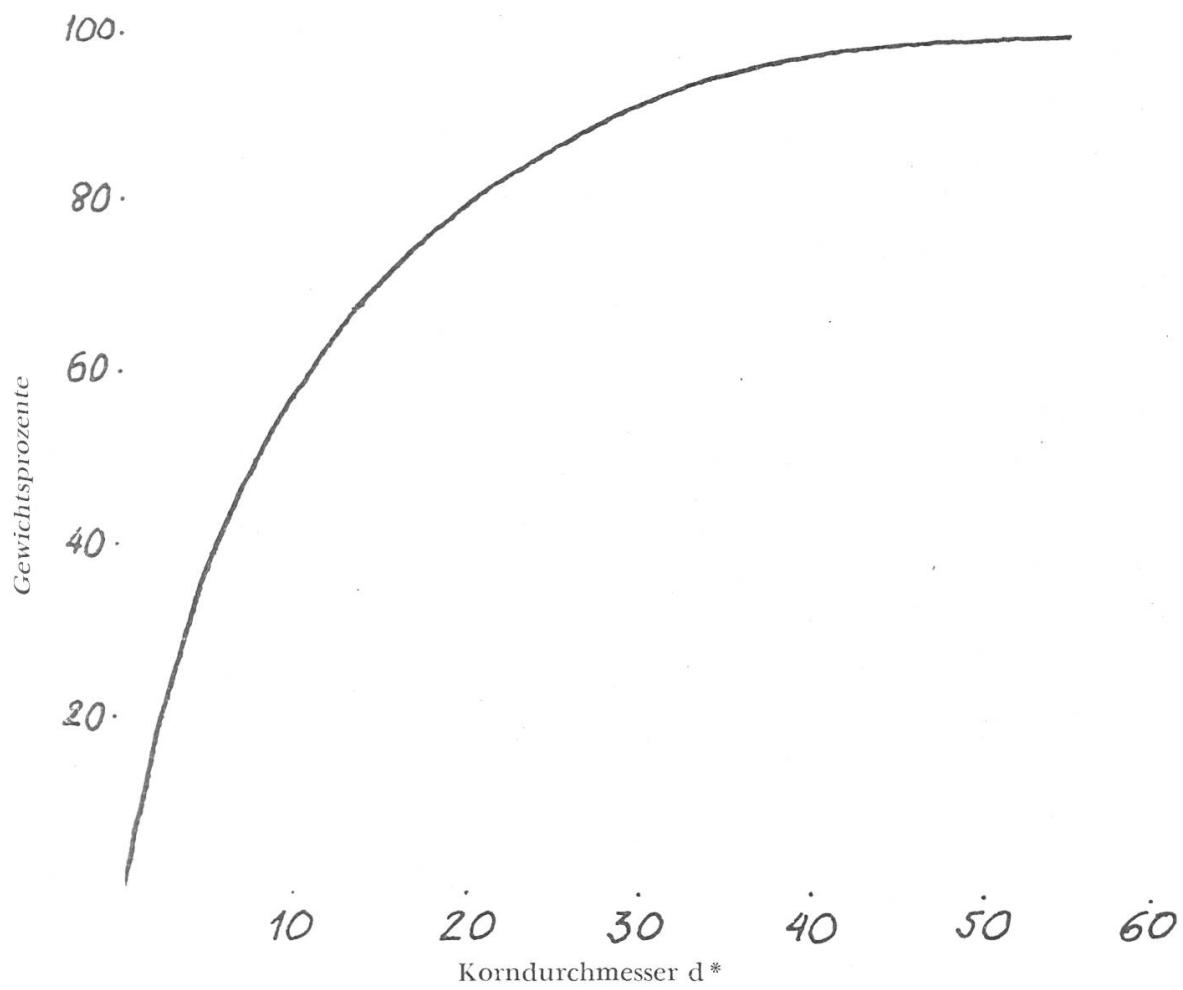


Abbildung 12
Kornverteilungskurve der Sohlenmischung (Annahme).

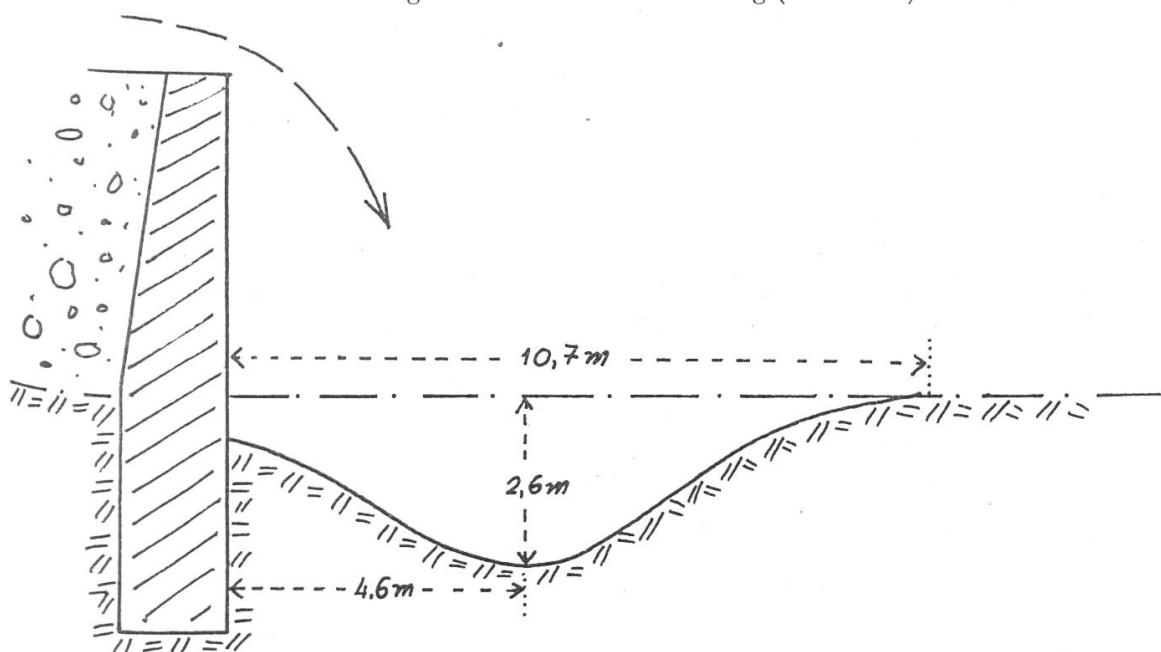


Abbildung 13
Vorauskonstruktion der Kolkwanne.

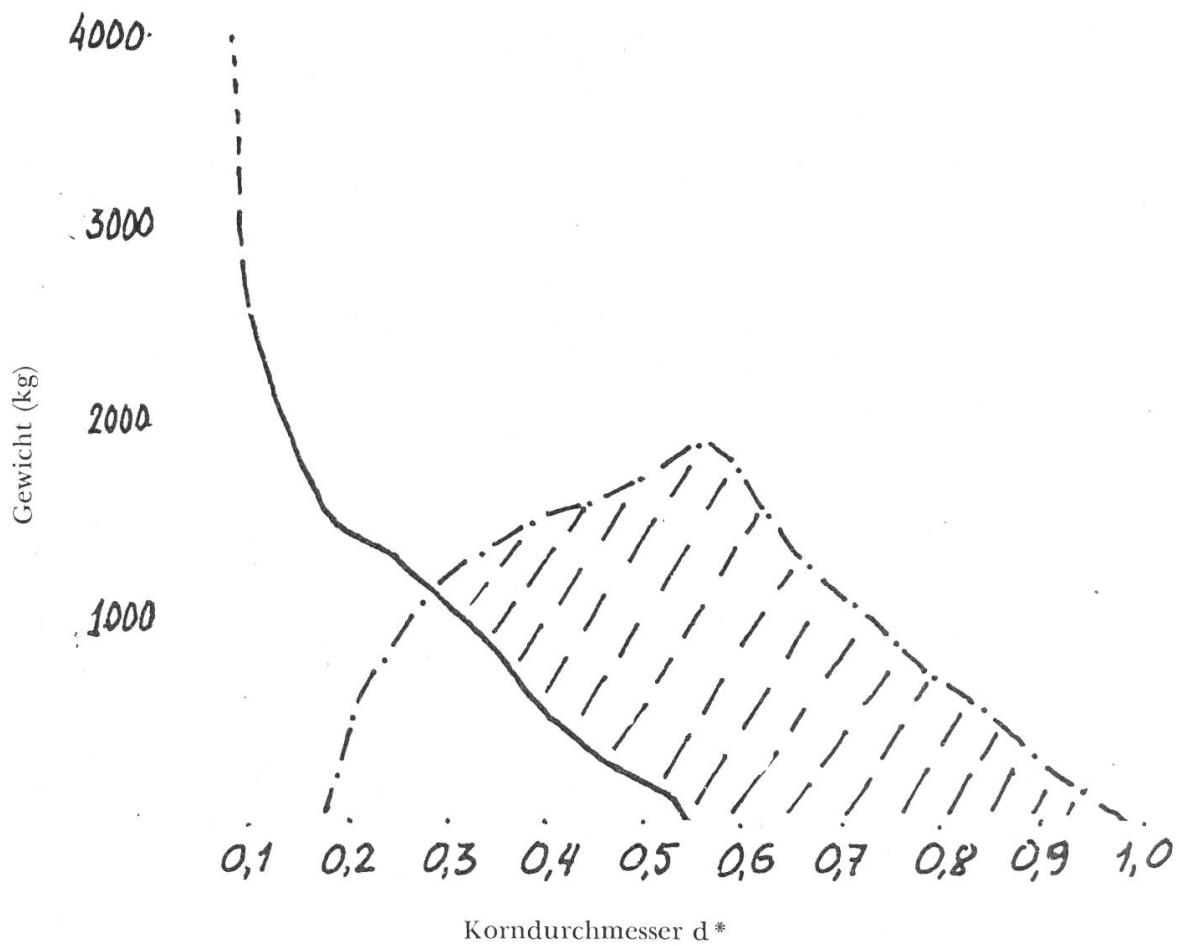


Abbildung 14

Vergleich des notwendigen Blockwurfs mit der Sohlenmischung.

- Vorauskonstruktion und Flächenbestimmung der Kolkwanne (siehe Abbildung 13):

$$F_s = 15 \text{ m}^2$$

$$V_s = 15 \cdot 1 = 15 \text{ m}^3$$

$$V_{s_w} = 0.7 V_s = 10.5 \text{ m}^3, \quad \text{wenn } \gamma_s = 2.68 \text{ t/m}^3$$

$$G_{s_w} = V_{s_w} \cdot \gamma_s = 28.6 \text{ t/m}$$

- Berechnung der Kornzusammensetzung der Sohlenmischung und des Blockwurfs nach Gewicht:

Tabelle 5

Korndurchmesser (m)	Gewichtsprozent	Gewichtsprozentzunahme pro Durchmesserstufe	Gesamtgewicht (kg)	Gewicht pro Durchmesserstufe (kg)	Gewichtsreduktion der groben Komponenten (kg)
I. Sohlenmischung					
0,00	0	40		11 200	
0,05	40	18		5 200	
0,10	58	14		4 182	
0,15	72	10		2 860	1430
0,20	82	9		2 600	1300
0,30	91	6		1 700	850
0,40	97	2		572	286
0,50	99	1		286	143
0,55	100			28 600	
II. Blockwurf					
0,18		2		180	
0,20		10		940	
0,30		15		1 400	
0,40		19		1 600	
0,50		20		1 900	
0,60		16		1 400	
0,70		10		940	
0,80		6		560	
0,90		2		180	
1,00				9 100	

Den Vergleich der Kornzusammensetzung des Blockwurfs mit derjenigen der Sohlenmischung stellt Abbildung 14 dar. Das zu vorbereitende Blockwurfgewicht pro Durchmesserstufe wird in dieser Abbildung schraffiert angegeben. Es hat folgende Kornzusammensetzung (Tabelle 6):

e) Zusammenfassung der Ergebnisse:

Zur Reduktion der erwarteten maximalen Kolktiefe von 4,3 m um 1,7 m müssen 5,72 t Steinblöcke pro 1 m Kolkbreite mit der in Abbildung 15 angegebenen Kornzusammensetzung eingebracht werden. Das entspricht bei einer Konsolidierungssperre mit einer 5 m breiten Abflußsektion 28,6 t.

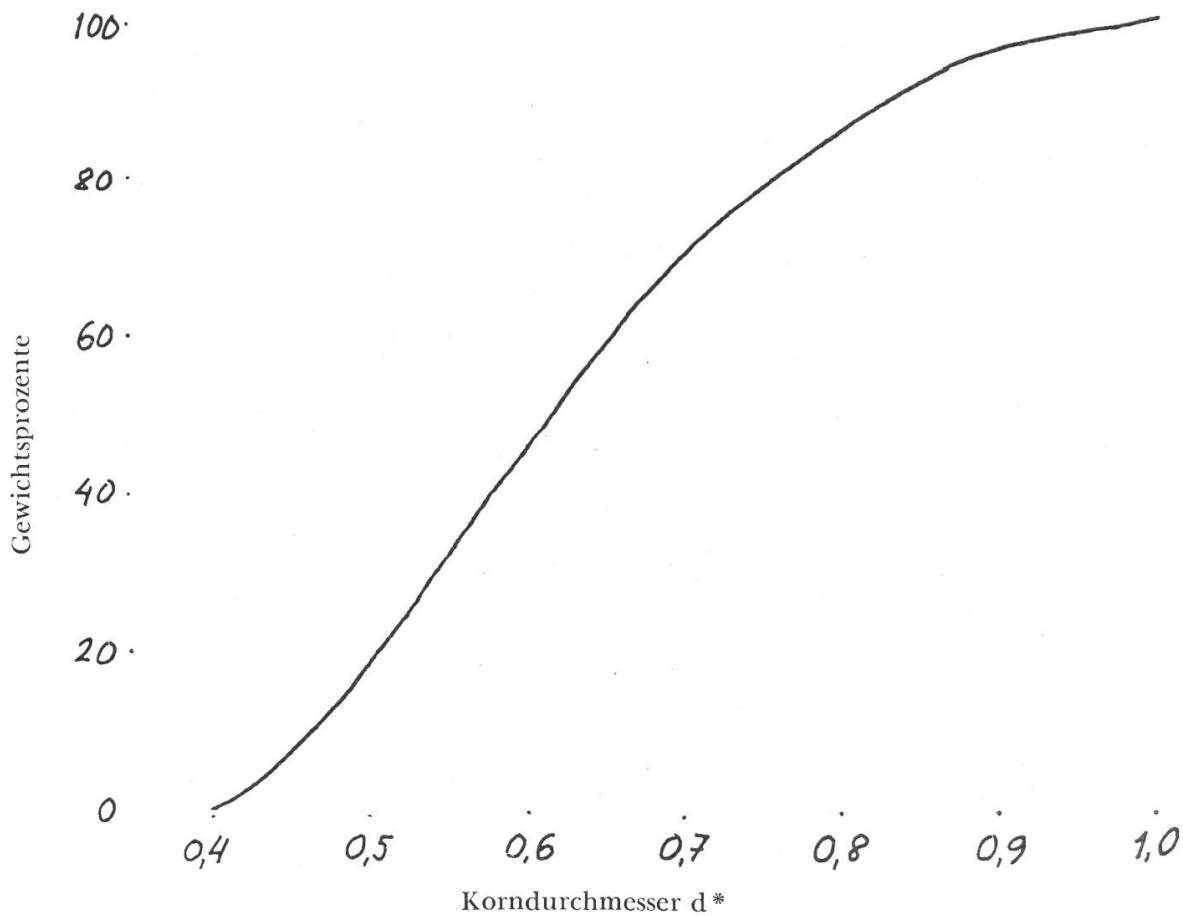


Abbildung 15
Kornverteilungskurve des vorzubereitenden Blockwurfs.

Tabelle 6

Korndurchmesser (m)	Gewicht pro Durchmesserstufe (kg)	Gewicht (kg)	Gewichtsprozent
0,40	1028	1028	18
0,50	1614	1614	46
0,60	1400	2642	71
0,70	940	4042	87
0,80	560	4982	97
0,90	180	5542	100
1,00		5722	

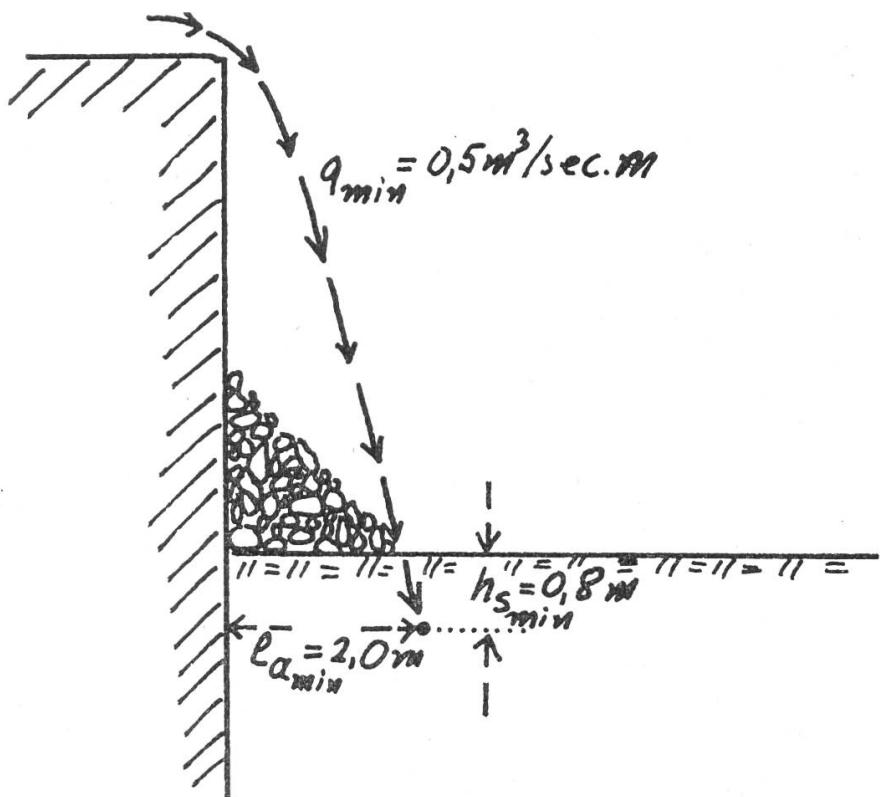


Abbildung 16
Ablagerungsplatz des Blockwurfs.

f) Ablagerung des Blockwurfs auf der Sohle:

Der Blockwurf muß im Raum zwischen Sperre und Wurfparabel der minimalen Wassermenge abgelagert werden (Abbildung 16).

$$q_{min} = 0.5 \text{ m}^3/\text{sec m}$$

$$h_{o min} = 0.8, \quad l_{a min} = 2.0 \text{ m}$$

Maximale Länge des Ablagerungsraumes von der Sperre: 2,0 m (siehe Abbildung 16).

Literaturverzeichnis

Härtel-Winter: Wildbach- und Lawinenverbauung. Wien und Leipzig, 1934

Kotoulas, D.: Das Kolkproblem unter besonderer Berücksichtigung der Faktoren Zeit und Geschiebemischung im Rahmen der Wildbachverbauung. Diss. ETH, 1967

Strele, G.: Grundriß der Wildbach- und Lawinenverbauung. Wien, 1950

Wang, F.: Grundriß der Wildbachverbauung. Leipzig, 1903