

Bonasoundas, M.

Strömungsvorgang und Kolkproblem am runden Brückenpfeiler

1973

Bericht nr 28

Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischen Universität München

Okar v. Miller Institut

U B E R B L I C K

Ziel der vorliegenden Studie war es, den Zusammenhang zwischen Strömungsvorgang und Kolkbildung an runden Brückenpfeilern zu untersuchen und hierzu möglichst einfache Beziehungen aufzustellen, um dem planenden Ingenieur eine übersichtliche und praxisgerechte Dimensionierungshilfe zu geben. Den durchgeführten Modellversuchen gingen zunächst ein umfangreiches Literaturstudium und dann die theoretische Behandlung des Problems voraus.

Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit zeigt, daß ein kurzfristiges Hochwasser mit starkem Geschiebetrieb für die Kolktiefe nicht maßgebend ist, da der Kolk in diesem Fall durch die ständige Geschiebezufuhr immer wieder aufgefüllt wird. Die tiefsten und damit gefährlichsten Kolke entstehen wenn in der Flußstrecke oberstrom des Pfeilers eine stabile Sohle besteht. Die flächenmäßig größten Kolke entstehen aber während des Hochwassers. Als maßgebende Parameter für den entstandenen Kolk und seine Größe wurden erkannt: der Pfeilerdurchmesser, die Fließgeschwindigkeit, der Geschiebekorndurchmesser und vor allem die Zeit. Letztere ist besonders bei stabiler Sohle von großer Bedeutung.

In dem beigegebenen Arbeitsblatt wurden die Ergebnisse zusammengefaßt. Mit seiner Hilfe (oder auch nach der Tafel der Seite 79) können die zu erwartenden Endkolkdimensionen unter Berücksichtigung der meisten Einflußfaktoren (Parameter) für in der Praxis vorkommende Fälle ermittelt werden. Der Gebrauch des Arbeitsblattes ist einfach und wird an Hand eines Beispiels in Kapitel 8 und auf dem Arbeitsblatt erläutert.

A B S T R A C T

Objective of this study was to examine the interaction of flow regimen and scouring at round piers and to obtain simple relationships in order to give the planning engineer a clear and practice oriented method of calculation. The experiments were preceded by an intensive study of the literature and the theoretical treatment of the problem.

The present study proved that, in contrast to former beliefs, short duration floods with intense sediment transport are most the predominant cause for the scour, the reason being, that in this case the scour is always refilled through the continuous bed-load. The biggest and most dangerous scours are formed when, upstream of the pier the river bed is stable. The pier diameter, the stream velocity, the sediment diameter and, most of all, the elapsed time were recognised being important parameters for the scour and its dimensions. The latter is of great importance, especially during stable bed.

The results have been summarised in a working sheet.

R E S U M É

Objet de cette étude était la recherche de la relation entre le courant de l'eau et les profondeurs des affouillements autour des piles de ponts ronds, et l'établissement de rapports simples, ainsi que l'ingénieur a eu une méthode à calculer claire. Les expériences ont été précédées par une étude étendue de la littérature et le traitement théorique du problème.

Le résultat de l'étude présente a démontré, que des crues de courte durée avec un charriage de matière grand, ne sont pas de grande importance pour la profondeur de l'affouillement, car dans ce cas, l'affouillement se remplit continuellement à cause de l'arrivée continue de matière. Les plus grands et dangereux affouillements se forment quand en amont de la pile le cours du fleuve est stable.

Comme paramètres importants pour les affouillements et leurs dimensions sont reconnus: le diamètre de la pile, la vitesse du courant, le diamètre des sédiments et surtout, pour un fleuve en fond stable, l'espace du temps.

Les résultats sont résumés sur "la table de travail" ci-jointe, en aide de celle on pourra calculer les dimensions des affouillements en tenant compte de la plus part de paramètres qui s'offrent.

Die vorliegende Arbeit habe ich während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München angefertigt. Sie ist aus dem Bemühen entstanden, den Kolkmechanismus an runden Brückenpfeilern genau und umfassend zu untersuchen und gleichzeitig eine handliche und leicht verwendbare Berechnungsmethode für die Praxis zu entwickeln.

Vor allen anderen habe ich Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Hartung zu danken, der auch das erste Referat übernommen hat. Dies nicht nur, weil er mir die Anregung für die vorliegende Untersuchung gab und an seinem Institut die Durchführung der notwendigen Versuche ermöglichte, sondern auch weil er mir stets mit seinem Verständnis für meine Bemühungen und mit seiner Hilfe bei der Überwindung aller Schwierigkeiten zur Seite stand.

Herrn Prof. Dr.-Ing. P.G. Franke danke ich für die Übernahme des Korreferates, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Kupfer für den Vorsitz bei der mündlichen Prüfung.

Herrn Dipl.-Ing. K. Csallner danke ich von Herzen für seine unermüdliche Bereitschaft zur Diskussion des Geschiebeprobie- mes und für seine wertvollen, kritischen Hinweise, die zur Formulierung der Arbeit sehr viel beigetragen haben. Besonders aber werde ich mich immer an seine jederzeit freundliche Hilfsbereitschaft während meines Aufenthaltes am Institut für Wasserbau erinnern.

Ferner gilt mein Dank Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. G. Seus für seine sehr nützlichen Bemerkungen und schließlich Herrn Dipl.-Ing. F. Wolfart sowie allen Mitarbeitern des Lehrstuhles und der Versuchsanstalt in Oberrach für ihre Ratschläge und Hilfe bei allen auftauchenden Problemen.

München, im Mai 1973

INHALTSVERZEICHNIS

Formelzeichen

1. Einleitung und Problemstellung	1
2. Bisherige Untersuchungen	3
3. Theoretische Behandlung des Problemes	10
3.1 Theoretische Möglichkeiten zur Untersuchung der Kolkbildung	10
3.2 Der Kolkvorgang	10
3.3 Betrachtungen auf der Stauebene des Pfeilers	24
3.3.1 Allgemeines	24
3.3.2 Bestimmung der Lage der Trennungslinie	26
3.3.3 Mathematische Analyse	28
3.3.2.1 Der Impulssatz	28
3.3.2.2 Der örtliche Reibungs- beiwert C_{fx}	35
3.3.2.3 Der Geschwindigkeitsform- parameter Γ_{12}	35
3.3.4 Anfangswerte zur Lösung des Gleichungssystemes	38
3.3.5 Der Geschwindigkeitsverlauf oberstrom des Pfeilers	39
3.3.6 Die Berechnungsmethode	41
3.3.7 Der Verlauf der errechneten Funktionen	43
3.3.8 Bemerkungen zur Analyse	43
3.4 Ableitung einer dimensionstreuen Berechnungsformel	46

(i) Modell-Größen

4. Die Modellversuche	51
4.1 Das Versuchsprogramm	51
4.2 Die Versuchsanordnung	51
4.2.1 Ermittlung der Kanalbreite	57
4.3 Die Versuchstechnik	61
5. Die Versuchsergebnisse	61
5.1 Allgemeines	63
5.2 Die Vorversuche	64
5.2.1 Die minimale Versuchsdauer	65
5.2.2 Der Einfluß der Lagerungsdichte	69
5.2.3 Bestimmung des Abstandes zwischen den zwei hintereinander eingebauten Pfeilern	69
5.3 Die Hauptversuche	70
5.3.1 Die Kolkform	70
5.3.2 Die Kolktiefe	71
5.3.2.1 Bemerkungen zur Kolktiefe	
5.3.3 Die Kolklänge	81
5.3.3.1 Auswertung der Versuche	85
5.3.3.2 Analytische Auswertungen	89
5.3.3.3 Bemerkungen zur Kolklänge	99
5.3.4 Das Kolkvolumen	100
5.3.5 Die Neigung der Kolkböschungen	101
6. Zusammenfassung der Ergebnisse, Folgerungen und Diskussion	102
7. Vergleich der Ergebnisse mit denjenigen der bisher veröffentlichten Literatur	104
8. Anwendung der Ergebnisse in der Praxis Literaturverzeichnis Anlagen Arbeitsblatt zur Berechnung der Kolkdimensionen	107

L	Einheit der Länge
T	Einheit der Zeit
M	Einheit der Masse
a, a_i	Charakteristische Parameter
Π_i	Dimensionslose Glieder
λ_x	Horizontaler Modellmaßstab
λ_y	Vertikaler Modellmaßstab
λ	Geometrischer Ähnlichkeitsfaktor
Re	Reynoldssche Zahl
Fr	Froudesche Zahl
l	Charakteristische Länge
u, U	Charakteristische Geschwindigkeiten

(ii) Physikalische Größen

g	Erdbeschleunigung
ρ	Flüssigkeitsdichte
ν	Dynamische Zähigkeit
μ	Kinematische Zähigkeit
$\gamma = \rho \cdot g$	Spezifisches Gewicht der Flüssigkeit
ρ_s	Geschiebedichte
$\gamma_s = \rho_s \cdot g$	Geschiebewichte
d	Geschiebekorngröße (generell)
d_m	Maßgebender Korndurchmesser in einer Mischung unter der Annahme, daß eine Kornverteilung durch eine einzige Größe dargestellt werden kann
d_z	Korndurchmesser bei z Gewichtsprozenten der gesamten Sohlenmischung
d_{\max}	(bzw. d_{\min}) Maximaler (bzw. minimaler) Korndurchmesser des Sohlenmaterials
R	Brückenpfeiler Radius
D	Pfeilerdurchmesser

(iii) Koordinaten

x, y, z	Orthogonale Koordinaten. (x-Richtung parallel zur Sohle in der Strömungsrichtung, y-Richtung senkrecht zur Sohle, z-Richtung parallel zur Sohle und senkrecht zur Strömungsrichtung)
x ₀	Koordinate des Schnittpunktes auf der Stauebene konvergierender Stromlinien
X	Abstand in der Stauebene von der Pfeiler-Achse nach oberstrom
r, θ, φ	Polarkoordinaten des Zylinders
t	Zeit

(iv) Größen der Bewegung

U	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit
u	Örtliche Geschwindigkeit parallel zur Sohle
v	Örtliche Geschwindigkeit senkrecht zur Sohle
τ	Örtliche Schubspannung
u _x	Geschwindigkeit an einer Stelle x oberstrom des Pfeilers
τ ₀	Wandschubspannung (y=0)
u _* = $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho \Omega}}$	Schubspannungsgeschwindigkeit
C _{fx}	Örtlicher Reibungsbeiwert in der x-Richtung
u _s	Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe der Sohle
u _c	Kritische Geschwindigkeit beim Beginn der Geschiebebewegung
p	Statischer Druck
q = $\frac{\rho}{2} \cdot u^2$	Staudruck
δ _r	Dicke der Reibungsschicht einer Strömung
δ ₁	Verdrängungsdicke
δ ₂	Impulsdicke
H ₁₂	Formparameter
h	Wassertiefe
B	Kanalbreite
k	Rauhigkeitsgröße (nach Nikuradse)
k _s	Äquivalente Rauigkeit nach Strickler
k _r	Rauhigkeit der Sandkörner nach Meyer-Peter
J _e	Energieliniengefälle
J _s	Sohlgefälle

J _w	Wasserspiegelgefälle
Q	Wassermenge, bzw. gesamter Abfluß für den benetzten Umfang
q	Spezifischer Abfluß
q _s	Geschiebefracht

(v) Kolkgrößen

K	Kolktiefe (generell)
K _t	Kolktiefe zur Zeit t
K ₂	Kolktiefe nach einer Versuchszeit von zwei Stunden
K _∞	Endkolktiefe
K ₁	Kolklänge oberstrom des Pfeilers
w	Winkel des Böschungsmateriales
f _* = K _∞ /K ₂	Zeitfaktor bis zum Erreichen der Endkolktiefe

1. Einleitung und Problemstellung

Die starke Zunahme des Autoverkehrs und vor allem der Fahrgeschwindigkeit auf Straßen und Autobahnen führt dazu, daß immer häufiger Verkehrswege schräg über Flüsse geführt werden müssen. Aus statischen Gründen sind jedoch schräge lange Pfeiler, die wegen des Stromstriches nicht senkrecht zur Brückenachse angeordnet sind, nicht erwünscht. Zur Brückenachse senkrecht angeordnete Pfeiler führen jedoch zu schiffahrtstechnischen und strömungstechnischen Schwierigkeiten, wie z.B. Beeinträchtigung der Sichtverhältnisse (49), Verstärkung des Pfeilerstaues, wesentliche Vergrößerung der Auskolkungen, u.a.m.

Als Ausweg bietet sich die Anwendung des runden Brückenpfeilers an. Dabei wird man heute infolge der größeren möglichen Spannweiten mit einem oder mehreren weit auseinander liegenden Stropfpfeilern auskommen, sodaß die Verbauung des wasserführenden Querschnittes sehr klein und vernachlässigbar ist.

Wird ein fester Gegenstand in ein Gerinne eingefügt, so wird die örtliche Geschwindigkeit in dessen Nähe verändert. Das hat zur Folge, daß bei beweglicher Sohle ein örtlich verstärkter Abtransport von Sohlenmaterial stattfindet und eine lokale Sohleneintiefung entsteht, die man als "Kolk" bezeichnet. Durch diese Kolkbildung wird von der Strömung ein hydraulischer Gleichgewichtszustand angestrebt (15).

Der einfachste Weg, um einen Brückenpfeiler vor der von einer Auskolkung ausgehenden Gefahr zu schützen, ist, ihn "tief genug" zu gründen und das Flußbett im Pfeilerbereich "weit genug" nach oberstrom zu befestigen, so daß die Gründung nicht durch den Kolk zerstört werden kann. Das Problem liegt also darin, dieses "genug" für die Gründung zu kennen. Könnte die Kolktiefe und die Kolklänge oberstrom sicher berechnet werden, so könnte der Pfeiler mit sinnvollem Aufwand gegründet werden.

In der vorliegenden Arbeit wird der Strömungsvorgang und das Kolkproblem um einen runden Brückenpfeiler unter Berücksichtigung der meisten in der Natur vorkommenden fließbaulichen Faktoren untersucht.

Die Versuche zur Bestätigung der theoretischen Untersuchungen wurden in der Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischen Universität München (Oskar von Miller-Institut) in Oberrach durchgeführt.

2. Bisherige Untersuchungen

In letzter Zeit wurden immer wieder Versuchsergebnisse veröffentlicht, die jedoch nicht theoretisch bestätigt werden konnten. Das hat seine Ursache in der großen Zahl von Faktoren, die den Kolkvorgang beeinflussen. Es liegt daher ein überreiches Maß von Versuchsdaten vor, aber wenig brauchbare, physikalisch begründete Ergebnisse, die als wissenschaftliche Basis zur Behandlung oder Beschreibung des Kolk-Ereignisses dienen könnten. Diese empirischen Formeln gestatteten fast in allen Fällen nur die Berechnung einer physikalischen Größe, der Kolkentiefe. Die verschiedenen Formeln sind meistens nicht dimensionslos, da sie aus speziellen Versuchsreihen entwickelt worden sind und ergeben untereinander teilweise große Abweichungen. Nachfolgend werden die wesentlichsten Veröffentlichungen diskutiert, die das Kolkproblem bei runden Pfeilern zum Thema haben.

Als erster gab Tison (60) eine elegante und einfache theoretische Erklärung für die vor dem Pfeiler nach unten tauchende Strömung, die die Sohle angreift. Seine Vorstellungen sind im Kapitel 3.2 beschrieben.

In den Jahren 1950 bis 1953 sind an der Universität von IOWA im Rahmen eines staatlichen Auftrages von E.M. Laursen und A. Toch (33, 35, 38) Modellversuche über angeströmte, nicht runde Brückenpfeiler durchgeführt worden. Die Verfasser untersuchten eine ungewöhnliche Pfeilerform, von der sie allerdings angeben, daß sie typisch für die damals übliche Ausführungsform im Staat IOWA war. Diese Pfeiler bestanden aus zwei Säulen von rechteckigem, dreieckigem oder kreisförmigem Querschnitt, die durch eine dünne Wand, deren Stärke $1/6$ der Säulenbreite beträgt, miteinander verbunden sind.

Auf experimentellem Wege ermittelten Laursen und Toch die Kolktiefe in Abhängigkeit von der Anströmungsgeschwindigkeit bei einem Anströmungswinkel von 0° bis zum theoretischen Grenzwert von 90° . Bei kreisrundem Querschnitt der Säulen nimmt die Kolktiefe mit wachsendem Anströmungswinkel α zu. Für $\alpha = 45^\circ$ ist die Kolktiefe etwa doppelt so groß wie bei $\alpha = 0^\circ$. Wächst α über 45° so bleibt die Kolktiefe konstant.

In der Arbeit wird behauptet, daß bei wandernder (instabiler Sohle) die Korngröße des Sohlenmaterials und die Fließgeschwindigkeit der Strömung für die Kolktiefe von vernachlässigbarer Bedeutung sind und nur die Wassertiefe ein wichtiger Parameter sei.

In einer späteren Veröffentlichung [38] fand Laursen, daß unter Vernachlässigung der Geschiebebewegung die Fließgeschwindigkeit und der Korndurchmesser des Sohlenmaterials eine große Rolle spielen. Laursen setzte den Kolkvorgang an einem Brückenpfeiler gleich mit dem Erosionsvorgang in einer langen Einengung des Fließquerschnittes mit entsprechendem Verbaunungsverhältnis. Die ermittelte Funktion, auf den Brückenpfeiler angewendet, hatte die Form:

$$\frac{K}{h} = f \left(\frac{D}{h} \right) \quad (1)$$

Laursen betonte jedoch selbst, daß diese theoretische Beziehung nur mit Vorsicht angewendet werden könne und daß sie nur für näherungsweise Voraussagen geeignet sei.

Anlässlich des Wiederaufbaues der Brücke Mahatsara in Madagaskar wurden im Jahre 1956 in der Versuchsanstalt für Wasserbau von Chatou [8] in Frankreich von J. Chabert und P. Engeldinger verschiedene Brückenpfeilerformen auf ihre Kolkwirkung untersucht. Als günstigster stellte sich ein Pfeiler mit Kreisquerschnitt heraus, der dann noch genauer erforscht wurde. In einem 80 cm breiten Gerinne wurden die Wassertiefe, die Fließgeschwindigkeit und die Korngröße des Sohlenmaterials variiert und nach einer Stunde die entstandene Kolktiefe, die als Endkolktiefe angenommen wurde, gemessen.

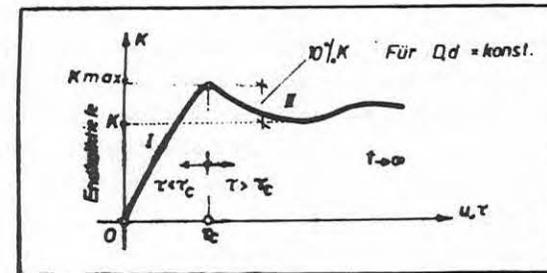


Abb. 1 Abhängigkeit der Kolktiefe von der Schleppspannung [8]

Es wurde festgestellt (Abb. 1), daß die Kolktiefe fast linear mit der Schleppspannung τ zunimmt (Kurve I) bis die Grenzschleppspannung τ_c (für den ungestörten Bereich der

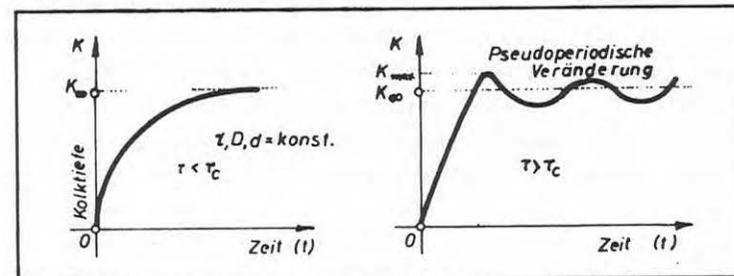


Abb. 2 Die Kolktiefe in Abhängigkeit von der Zeit [8]

Abb. 3 Die Kolktiefe in Abhängigkeit von der Zeit [8]

beweglichen Sohle) und eine entsprechende maximale Kolktiefe K_{max} erreicht wird. Danach beginnt die Wanderung der Sohle. Die Kolktiefe nimmt ab und es ergibt sich eine pseudoperiodische Veränderung der Endkolktiefe, welche auf die durch die Kolkwanne wandernden Geschiebemengen zurückzuführen ist. Diese pseudoperiodische Veränderung kann durch die in der Abb. 1 dargestellte Endzustandskurve ersetzt werden.

In derselben Arbeit ist auch die Abhängigkeit der Kolktiefe K von der Zeit t schematisch gegeben. Ohne Geschiebezufuhr (Abb. 2) nimmt die Kolktiefe mit der Zeit zu und nähert sich asymptotisch einem Endzustand. Mit Geschiebezufuhr ergibt sich eine maximale Kolktiefe und danach eine pseudoperiodische Veränderung, die eine horizontale Gleichgewichtssachse hat (Abb. 3). Die Verfasser geben keine mathematische Funktion für die Kolktiefe an.

In den letzten Jahren hat die Arbeit von H. Shen (51) erhebliches Aufsehen erregt und wurde vielfach diskutiert.

Neben den guten theoretischen Gedanken brachte die Arbeit den großen Vorteil, eine einfache rechnerische Bestimmung der Kolktiefe nach folgender Beziehung zu ermöglichen:

$$\text{Für } \tau < \tau_c \quad K_{\infty} = 0,0073 \text{ Re}^{0,619} \quad (2)$$

wobei Re die Reynoldssche Zahl des Pfeilers angibt. Als Geschiebe wurde Sand mit einer Korngröße von $d_{50} \approx 0,24$ mm verwendet. Als Nachteil der Arbeit müssen folgende Punkte genannt werden:

- a) Die Vernachlässigung des Korndurchmessers.
- b) Die Vernachlässigung eines Ähnlichkeitsgesetzes und die Ableitung einer nicht dimensionslosen (bzw. nicht homogenen) Formel, so daß die Ergebnisse für die Kolktiefe vom Modell nicht in die Natur übertragen werden können.
- c) Die für die Endkolktiefe angegebene Formel ist aus Versuchen ohne Geschiebezufuhr von oberstrom entwickelt worden. Das hat zur Folge, daß bei einer wandernden Sohle die

Formel zu große Kolkiefen angibt. Unerklärlich bleibt, warum bei Versuchen mit einer Korngröße von 0,24 mm eines kohäsionslosen Sandes und einer Versuchsgeschwindigkeit von fast 1,0 m/sec (z.B. (51), Ver. 7) die Sohle sich nicht bewegte.

- d) Der Verfasser dieser Arbeit ist davon überzeugt, daß eine Re -Zahl nicht der grundsätzliche Parameter für eine örtliche Auskolkung sein kann. Die Beziehung $K = f(Re)$ müßte vielmehr zu einer Abhängigkeit von K , U und D führen. Andernfalls müßte Shen Versuche mit verschiedenen kinematischen Zähigkeiten durchführen. Der Faktor Re ist sicher von großer Bedeutung für die Beschreibung einer Grenzschicht um einen stehenden Zylinder, er ist aber m.E. keine maßgebende Größe bezüglich der Kolktiefe. Wenn die Pfeilermantelfläche und das Flußbett große Rauigkeit besitzen, dann kann der Einfluß der Viskosität vernachlässigt werden.
- e) Der Verfasser dieser Arbeit ist auch der Meinung, daß ein Pfeiler von 15 cm Durchmesser nicht mit einem Korndurchmesser von $d_{50} \approx 0,24$ mm für eine allgemeine Untersuchung und Theorie des Kolkproblems kombinierbar ist, da diese Größen nur als Extremwerte behandelt werden können. Dies gilt schon für amerikanische Flüsse, noch mehr aber für europäische Verhältnisse. Eine Übertragung dieser Größen-Verhältnisse in die Natur ergibt bei einem Pfeilerdurchmesser von 3-4 m einen sehr kleinen 90-prozentigen natürlichen Korndurchmesser von $d_{90N} = 4-6$ mm. Bei einem hierzu häufig vorkommendem Geschiebekorndurchmesser von $d_{90N} = 40-60$ mm müßte der Pfeiler den riesigen Durchmesser von 35-45 m bekommen.

Die in der Arbeit von J.W. Dietz (12) nach einer Versuchszeit von 2 1/2 Stunden gemessenen Kolktiefe kann jedoch nach Meinung des Verfassers nicht, wie von Dietz angenommen, die Endkolktiefe sein.

Nach den Erfahrungen des Verfassers ist die Kolkbildung bei sonst stabiler Sohle auch im Modell erst nach mehreren Tagen abgeschlossen, wengleich die augenscheinliche Kolkbildung

schon nach wenigen Stunden beendet zu sein scheint. Nach 7-tägigen Versuchen des Verfassers hatte sich die Kolkttiefe gegenüber der Kolkttiefe nach zwei Stunden (wie später noch gezeigt wird, s. Abschnitt 5.2.1) fast verdoppelt.

Da Dietz diesen Umstand wenig Beachtung schenkte, erwecken seine Ergebnisse den Anschein, als gäbe es in der Kolkttiefe keine Unterschiede in Abhängigkeit vorhandener oder nicht vorhandener Geschiebezufuhr mit der Strömung von oberstrom.

- Die gegebene Funktion

$$\frac{K}{D} = C \cdot \left(\frac{1}{A}\right) \cdot \left(\frac{U}{U_C}\right) \quad (3)$$

für die Bestimmung der Größe eines Kolkes müßte auch die Wassertiefe direkt berücksichtigen und nicht nur über einen fast konstanten Faktor C.

Für den Faktor C gilt nach Angaben von Dietz C = 0,75 für h/D > 2 bzw. für D/h < 0,50. Dies gilt jedoch nur für den Fall der wandernden Sohle. Der Fall der stabilen Sohle wird von Dietz nur in einem zu kleinen Bereich betrachtet. Nach den Versuchsergebnissen des Verfassers erstreckt sich der lineare Teil der Funktion bei stabiler Sohle jedoch bis D/h ≤ 1,0.

- Der lineare Zusammenhang zwischen der Kolkttiefe und der Re-Zahl des Pfeilers gilt nur in einem viel kleineren Bereich der Untersuchungen als von Dietz angenommen, deswegen sind auch große Abweichungen bei seinen graphischen Darstellungen festzustellen.
- Auch Dietz gibt wieder eine Abhängigkeit der Kolkttiefe von der Re-Zahl des Pfeilers und im Bereich der stabilen Sohle an. Hätte er die Ergebnisse mit dem reziproken Wert der relativen Geschwindigkeit (U/U_C) klassifiziert, so würde er den Einfluß der Re-Zahl nicht erwähnen müssen.
- Bezüglich der verwendeten Geschiebesorten, muß betont werden, daß wegen des Einflusses der Kohäsion für eine generelle Untersuchung mehrere Quarzgeschiebematerialien zwischen 0,4 und 4,2 mm von Dietz hätten verwendet werden müssen, da das Verhalten dieser so stark differenzierenden Körnungen sehr unterschiedlich sein kann.

Mit dem Thema der Kolkbildung an Pfeilern (und auch Buhnen) haben sich sehr viele Forscher befaßt (siehe Literaturverzeichnis). So gab z.B. Carstens [7], den Geschiebefaktor

$$N_s = \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right) g \cdot d}} \quad (4)$$

an, um verschiedene Kolkarten zu klassifizieren. Einen ähnlichen Parameter hat Shields aufgestellt.

Breusers [5] gab für den runden Pfeiler die Formel

$$K_{max} = 1,4 D \quad (5)$$

an, und Larras [32] formulierte allgemein

$$K_{max} = C \cdot 1,42 \cdot D^{0,75} \quad (6)$$

wobei C die Gestalt und D die Breite des Pfeilers bedeuten.

Interessante Arbeiten wurden auch noch von Chitale [9], Varzeliotis [62], Tarapore [57], M. Krishnamurthy [47], u.a. veröffentlicht. Im Literaturverzeichnis ist eine Reihe weiterer Arbeiten angegeben, die während der Beschäftigung mit dieser Arbeit gesammelt wurden.

Es ergeben sich jedoch unter denselben Fließbedingungen bei den verschiedenen Autoren manchmal Unterschiede von bis zu 100%, die wahrscheinlich auf die verschiedenen Versuchszeiten zurückzuführen sind. Es muß auch festgestellt werden, daß in der gesamten Literatur zur Bestimmung der Kolkttiefe oberstrom des Pfeilers bis jetzt keine dimensionslose Formel für einen so großen Variationsbereich der Geschwindigkeiten angegeben ist, die die grundsätzlichen Einflußfaktoren und vor allem einen Zeitfaktor berücksichtigt. Weiter ist der Mangel an näheren Untersuchungen für die Kolklänge festzustellen und ab welchem Brückenpfeilerdurchmesser und welchem Geschiebekorndurchmesser im Modell, die Kolklänge dimensionslos anzugeben ist. Hier eine Lücke zu schließen, ist das Anliegen vorliegender Arbeit.

3. THEORETISCHE BEHANDLUNG DES PROBLEMES

3.1 Möglichkeiten zur Untersuchung der Kolkbildung

Für Untersuchungen über Kolkbildung gibt es grundsätzlich drei verschiedene Möglichkeiten:

- a) Direkte Beobachtungen der Vorgänge in der Natur,
- b) theoretische Untersuchungen und
- c) Modellversuche im Laboratorium.

Im ersten Falle werden die Kolkdimensionen in natürlichen Gerinnen beobachtet, dann werden auf Grund der Meßergebnisse die Gesetzmäßigkeiten abgeleitet, die dann durch Interpolation oder Extrapolation auf ähnliche Fälle erweitert werden.

Im zweiten Falle wird die Kolkentstehung physikalisch-theoretisch geklärt und begründet. Eine allgemeine theoretische Behandlung der Geschiebebewegung und der Auskolkung ist sehr schwierig, wenn nicht sogar ausgeschlossen, da das Problem durch eine Vielzahl verschiedener Faktoren charakterisiert wird.

Die theoretischen Betrachtungen müssen meistens mit einem Modellversuch verglichen bzw. bestätigt werden.

3.2. Der Kolkvorgang

Als "Auskolkung" bezeichnen wir den Vorgang des örtlich verstärkten Abtransportes von Sohlenmaterial an bestimmten Stellen. Ursache sind erhöhte Geschwindigkeit und Turbulenz in diesem Bereich.

Die örtliche Auskolkung um einen Brückenpfeiler ist von den Strömungscharakteristiken in der unmittelbaren Nähe des

Pfeilers abhängig. Für eine richtige Vorhersage der Kolkdimensionen ist es nötig, den Charakter der Strömung zu studieren. Von besonderem Interesse ist zum Beispiel, wie die Sekundärströmungen verlaufen, wie die Strömungszonen sich erweitern, wo Wirbel auftreten usw., Ursachen also, die einzeln schwer mathematisch zu formulieren sind.

Es gibt viele theoretische und experimentelle Arbeiten, die die Strömungen um Zylinder oder prismatische Körper zum Gegenstand haben, fast überall wurde vereinfachend gleichförmige Geschwindigkeitsverteilung in den Gerinnen und vor allem eine nur zweidimensionale (Grundriß-Betrachtung) Umströmung des Gegenstandes angenommen. Bei der vorliegenden Arbeit wurde die Tatsache einer nichtlinear verteilten Geschwindigkeit und eines dreidimensionalen Strömungsvorganges berücksichtigt.

Die durchgeführte Versuchsreihe führte zu besseren Kenntnissen über die verschiedenen Ursachen der Kolkentwicklung.

Die Auskolkung am Pfeiler beginnt fast gleichzeitig mit der Wasserbewegung an den Stellen der am stärksten erhöhten Geschwindigkeit, also unter 45° zur Strömungsrichtung am Rand des Pfeilers (Abb. 4a). Die weitere Entwicklung ergibt eine Kolkung von zwei konischen Vertiefungen, die einen gemeinsamen Punkt S haben (ab Abb.4b) und deren Böschungen ungefähr eine Neigung von der Größe des natürlichen Böschungswinkels des Geschiebematerials unter Wasser haben. In dieser Phase ist die Kolkentwicklung ziemlich stark und die Oberkanten der beiden Vertiefungen haben die Tendenz, sich schnell zu vereinigen (Abb.4c). Die Kolkwanne behält im weiteren Verlauf ihre Form bei, solange die Strömung nicht "stark genug" ist, vor dem Pfeiler einen Fußwirbel zu bilden, der die Auskolkung dann fortsetzt. Bei größeren Geschwindigkeiten entwickelt sich die Kolkform weiter mit vertiefender Sohle oberstrom des Pfeilers (Abb.4d). Das Sohlenmaterial wird von der Strömung aus unmittelbarer Nähe des Pfeilers nach unterstrom

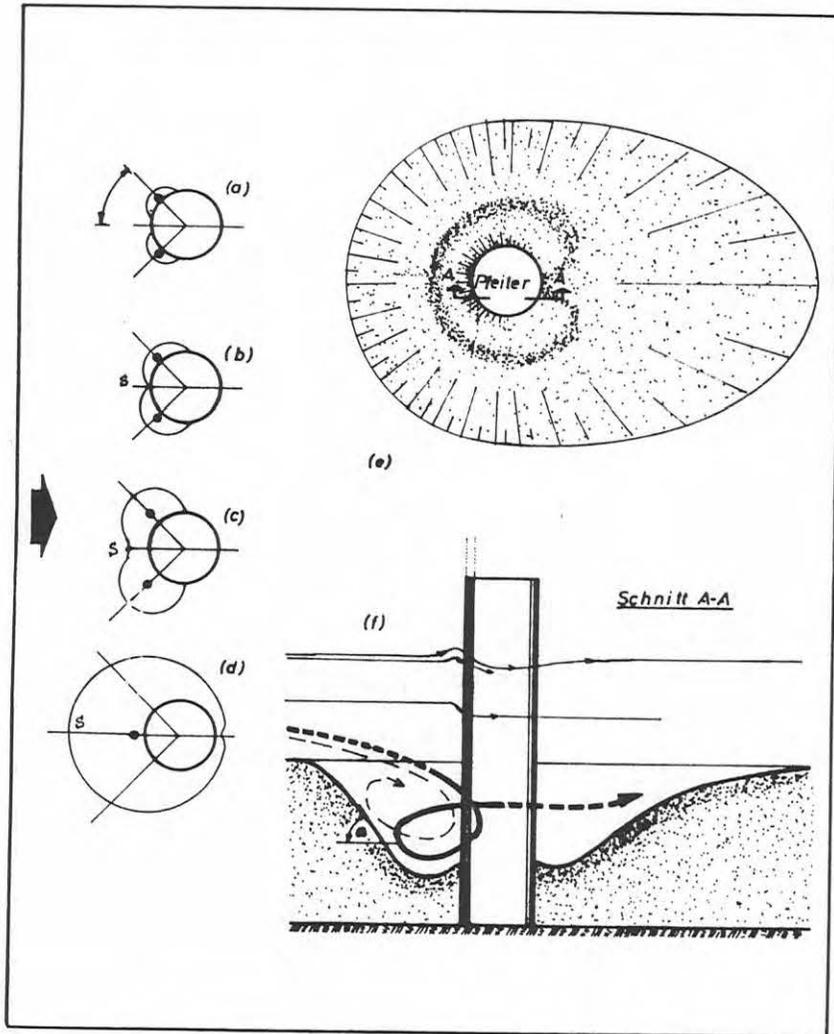


Abb. 4 Die zeitliche Entwicklung des Kolkes

wegtransportiert. Neues Böschungsmaterial rutscht in die Kolkwanne nach, wird wieder von den Wirbeln erfaßt und

nach unterstrom weggespült. So entwickelt sich eine Kolkwanne, die zu einem Endkolkzustand führt, der in Abb. 5 und 6 dargestellt ist (vgl. Auch Kapitel 5.2.1.).

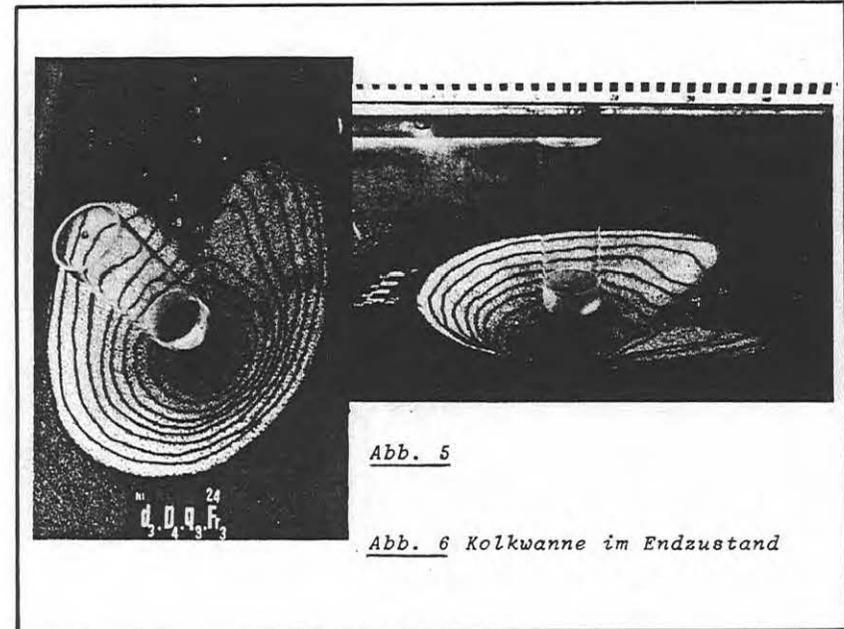


Abb. 5

Abb. 6 Kolkwanne im Endzustand

Im folgenden sollen die Strömungen beim Kolkvorgang beschrieben werden. In Abb. 7 ist ein Gesamtüberblick über die angewendete Systematik am Pfeiler dargestellt.

Unmittelbar am oberstromigen Scheitel des Pfeilers entwickelt sich eine nach unten gerichtete Strömung. Tison (60) bewies auf einfachem rechnerischem Wege die Existenz der nach unten gerichteten Strömung (Abb. 8) und behauptete, daß sie die Ursache der Kolkbildung sei. Er ging von dem einfachen Gedanken aus, daß jedes Hindernis im Flußbett zu einer Krümmung der Stromlinien führt (Abb.9). Es bildet sich eine erste Krümmung

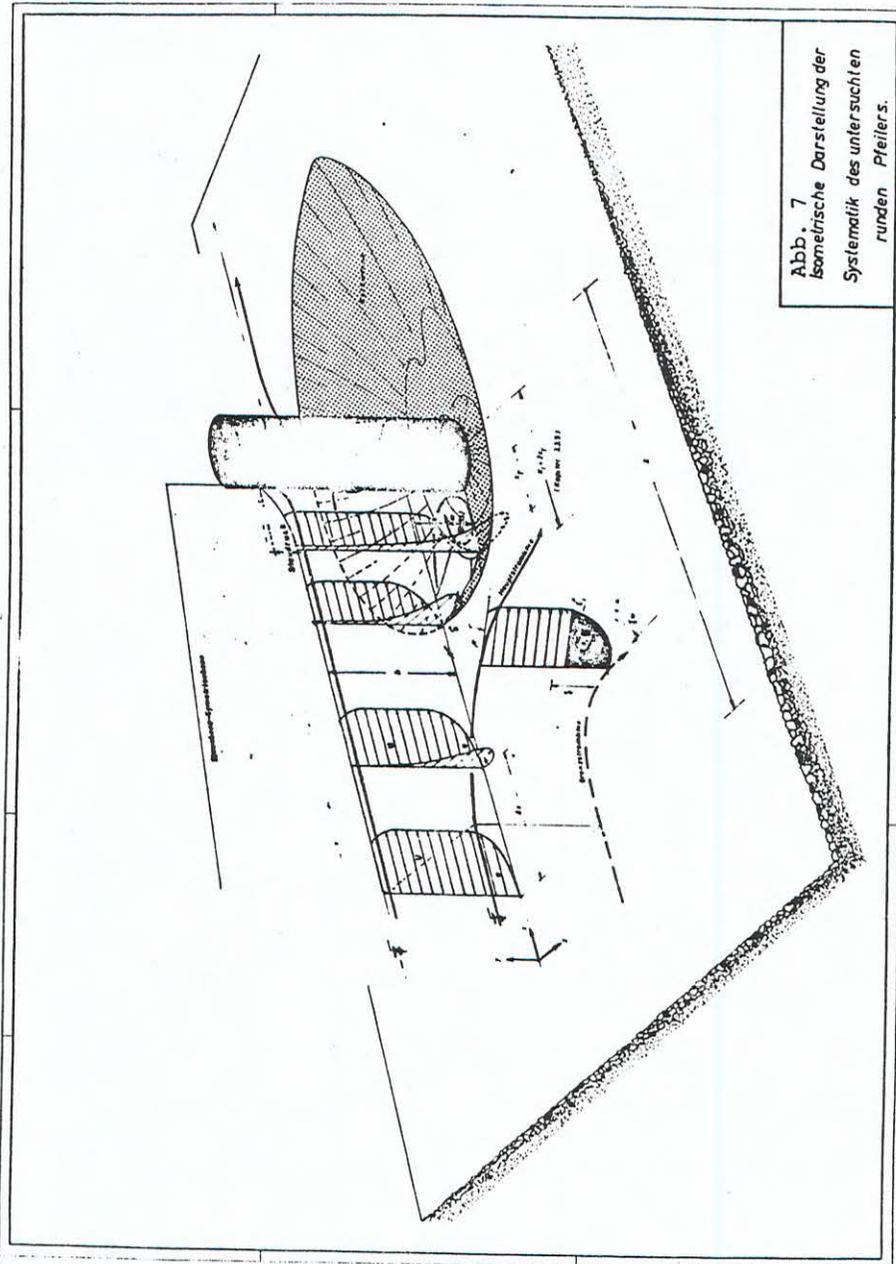


Abb. 7
Isometrische Darstellung der
Systematik des untersuchten
runden Pfeilers.

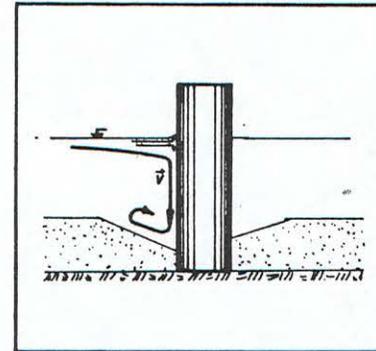


Abb. 8 Senkrechte Strömung
und Fußwalze

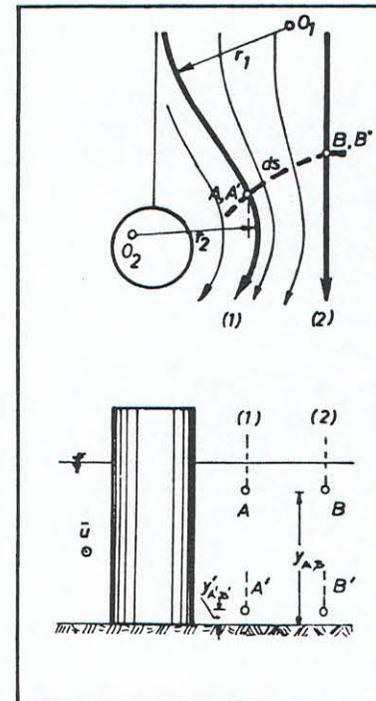


Abb. 9 Die Umströmung des
Pfeilers [60]

mit dem Radius r_1 und dem Mittelpunkt O_1 , danach eine Gegenkrümmung mit dem Radius r_2 und dem Mittelpunkt O_2 im Inneren des Zylinders. Längs des Flusses und in einem gewissen Abstand von dem Pfeiler bleibt die Strömung unbeeinflusst und daher geradlinig (Stromlinie 2, Abb. 9). Tison geht von der Annahme aus, daß die Strömung parallel zur Sohle bleibt und wendet die Energie-Gleichung entlang einer Potentiallinie AB auf der Wasseroberfläche im Bereich des Pfeilers an:

$$y_A + \frac{P_A}{\gamma} = y_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{1}{g} \cdot \int_A^B \frac{U_0^2}{r_1} dr_1 \quad (7)$$

Für die Punkte A' und B', die in einer horizontalen Ebene nahe der Sohle senkrecht unter A bzw. B liegen, formulierte er die analoge Beziehung:

$$y_{A'} + \frac{P_{A'}}{\gamma} = y_{B'} + \frac{P_{B'}}{\gamma} + \frac{1}{g} \int_{A'}^{B'} \frac{U_S^2}{r_2} dr_2 \quad (8)$$

Weiter ist:

$$y_B + \frac{P_B}{\gamma} = y_{B'} + \frac{P_{B'}}{\gamma} \quad (9)$$

Durch Subtraktion der Gleichungen (7) und (8) und unter Berücksichtigung der Gleichung (9) folgt:

$$\left(y_A + \frac{P_A}{\gamma} \right) - \left(y_{A'} + \frac{P_{A'}}{\gamma} \right) = \frac{1}{g} \left[\int_{x'}^x \frac{U_0^2}{r_1} dr_1 - \int_{x'}^x \frac{U_s^2}{r_2} dr_2 \right] \geq 0 \quad (10)$$

Da $U_0 > U_s \geq 0$ und $r_1 \approx r_2$ (11)

ist, folgt, daß der Druck auf der Oberfläche $(y_A + P_A/\gamma)$ größer als der Druck nahe der Sohle $(y_{A'} + P_{A'}/\gamma)$ ist, und Tison schließt daraus auf eine absteigende Bewegung verbunden mit der Längsbewegung. Danach war die Annahme der zur Sohle parallelen Stromlinien nicht richtig. Vielmehr tauchen die Stromlinien nach unten auf die Sohle zu und greifen sie an.

Mit Hilfe der Potentialtheorie und unter Verwendung der Eulerschen Bewegungsgleichung ist die Berechnung der senkrechten Strömung vor dem Pfeiler und in seiner Stauebene durchaus möglich. Unter Vernachlässigung der Viskosität lautet in Zylinderkoordinaten r, θ, y für einen Abstand y von der Sohle die Eulersche Bewegungsgleichung, in der senkrechten Richtung, wie folgt:

$$U_r \frac{\partial v_y}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \cdot \frac{\partial v_y}{\partial \theta} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial q}{\partial y} + g = 0 \quad (12)$$

wobei $\partial q/\partial y$ die Druckänderung in der senkrechten y -Richtung und ρ die Dichte des Wassers angeben. In irgendeinem Punkt (r, θ, y) ist die Gesamtgeschwindigkeit U durch

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_\theta^2} \quad (13)$$

gegeben, wobei U_r und U_θ die radiale und tangentielle Geschwindigkeit um den Zylinder darstellen, die mit Hilfe der Potentialtheorie mit folgenden Beziehungen berechnet werden können:

$$U_r = -U_y \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \cos \theta \quad (14)$$

$$U_\theta = U_y \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \sin \theta \quad (15)$$

Aus (13) ergibt sich die Beziehung:

$$U^2 = U_y^2 \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right)^2 \cos^2 \theta + U_y^2 \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right)^2 \sin^2 \theta = U_y^2 \left(1 + \frac{R^4}{r^4} - 2 \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta \right) \quad (16)$$

Als Druckdifferenz in der Stauebene des Pfeilers wird der Druckunterschied in der Strömung mit und ohne den Pfeiler angenommen [52], oder

$$\frac{q}{\gamma} = \frac{U^2}{2g} - \frac{U_y^2}{2g} = \frac{U_y^2}{2g} - \frac{U_y^2}{2g} \left(1 + \frac{R^4}{r^4} - 2 \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta \right)$$

oder

$$\frac{q}{\gamma = \rho \cdot g} = \frac{U_y^2}{2g} \left(2 \cos 2\theta - \frac{R^2}{r^2} \right) \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{q}{g}$$

daraus folgt:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{2U_y}{2} \cdot \frac{\partial U_y}{\partial y} \left(2 \cos 2\theta - \frac{R^2}{r^2} \right) \frac{R^2}{r^2}$$

oder

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial q}{\partial y} = U_y \left(2 \cos 2\theta - \frac{R^2}{r^2} \right) \frac{R^2}{r^2} \cdot \frac{\partial U_y}{\partial y} \quad (17)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (14), (15) und (17) in (12) ergibt sich:

$$0 = \cos \theta \left(\frac{R^2}{r^2} - 1 \right) \frac{\partial v_y}{\partial r} + \frac{\sin \theta}{r} \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \frac{\partial v_y}{\partial \theta} + \frac{v_y}{U_y} \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} + \left(2 \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta - \frac{R^4}{r^4} \right) \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{g}{U_y}$$

Zur Bestimmung der senkrechten Strömung an der Vorderkante und in der Stauebene des Zylinders wird die Randbedingung $\theta = 0$, $r = R$ festgelegt und man erhält:

$$\frac{v_y}{u_y} \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{g}{u_y} = 0$$

oder

$$v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + g = 0$$

oder

$$\frac{d(v_y^2/2)}{dy} + \frac{d(u_y^2/2)}{dy} + g = 0$$

oder durch Integration:

$$\frac{v_y^2}{2} + \frac{u_y^2}{2} + g \cdot y + C = 0 \quad (20)$$

Auf der freien Oberfläche gilt:

$$y = h, \quad v_y = 0, \quad u_y = u_0$$

oder

$$0 + u_0^2 + 2 \cdot g \cdot h + 2 \cdot C = 0$$

oder

$$C = (-u_0^2 - 2g \cdot h) / 2 \quad (21)$$

Aus den Gleichungen (20) und (21) folgt:

$$v_y^2 = -u_y^2 - 2 \cdot g \cdot y + u_0^2 + 2 \cdot g \cdot h = (u_0^2 - u_y^2) + 2g(h-y)$$

Mit Ausnahme des Bereiches in unmittelbarer Nähe der Sohle ergibt sich $u_0 \approx u_y$ und

$$\text{für } y \neq 0 \quad v_y^2 \approx 2g(h-y) \approx 2g(h-y) \quad (22)$$

oder allgemeiner

$$v_y = \sqrt{[u_0^2 - u_y^2] + 2g(h-y)} \quad (23)$$

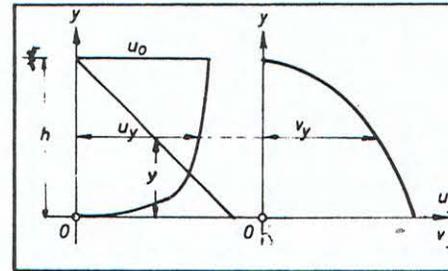


Abb. 10 Die Größe der vertikalen Geschwindigkeitskomponente v_y

Aus der Beziehung (23) ergibt sich die Größe der senkrechten Komponente entlang der vorderen Scheitellinie des Pfeilers (Abb. 10). Für $y=h$ folgt $u_y \rightarrow u_0$ und $v_y \rightarrow 0$. Für $y=0$ folgt $u_y \rightarrow u_s$ und $v_y \rightarrow \sqrt{(u_0^2 - u_s^2) + 2gh}$. In Wirklichkeit nimmt die Sohle auch negative y -Werte an, so daß für $y=0$, $u_y \approx u_0$ und $v_y \approx \sqrt{2gh}$ wird.

Diese auf theoretischem Wege ermittelte Strömungskomponente hat in der Tat, infolge Reibung und Ablenkung der Stromlinien, einen so kleinen Wert, daß sie nicht als die Ursache der Auskolkung angenommen werden kann. Deswegen ist der Verfasser der Meinung, daß die senkrechte Strömung, die praktisch nur im unmittelbaren Bereich eines runden Pfeilers und in seiner Stauebene eine nennenswerte Größe erreicht, eher eine akademische Vorstellung als die wirkliche Ursache der Kolkentstehung und Vertiefung ist. Die senkrechte Strömung existiert, ist aber zu schwach, um die Kolkentiefe zu beeinflussen.

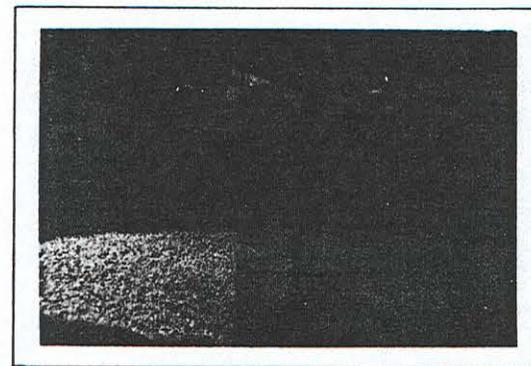


Abb. 11 Färbung eines Stromfadens

Die nach unten gerichteten Stromlinien werden sehr schnell nach unterstrom abgelenkt, wie in der Abb. 11 an dem gefärbten Wasserfaßchen gut zu sehen ist. Besonders bei kleinen Wassertiefen, von beispielsweise $h=0,5D$, ist die Entstehung

einer ausgeprägten senkrechten Strömung schwer vorstellbar.

Feststeht daß ein Kolk entsteht, und die sich stellenden Fragen:

- a) Haben die Wasserteilchen überhaupt die Zeit vor dem Pfeiler nach unten zu tauchen, um die Sohle anzugreifen?
- b) Ist die senkrechte (nach unten gerichtete) Strömung auch

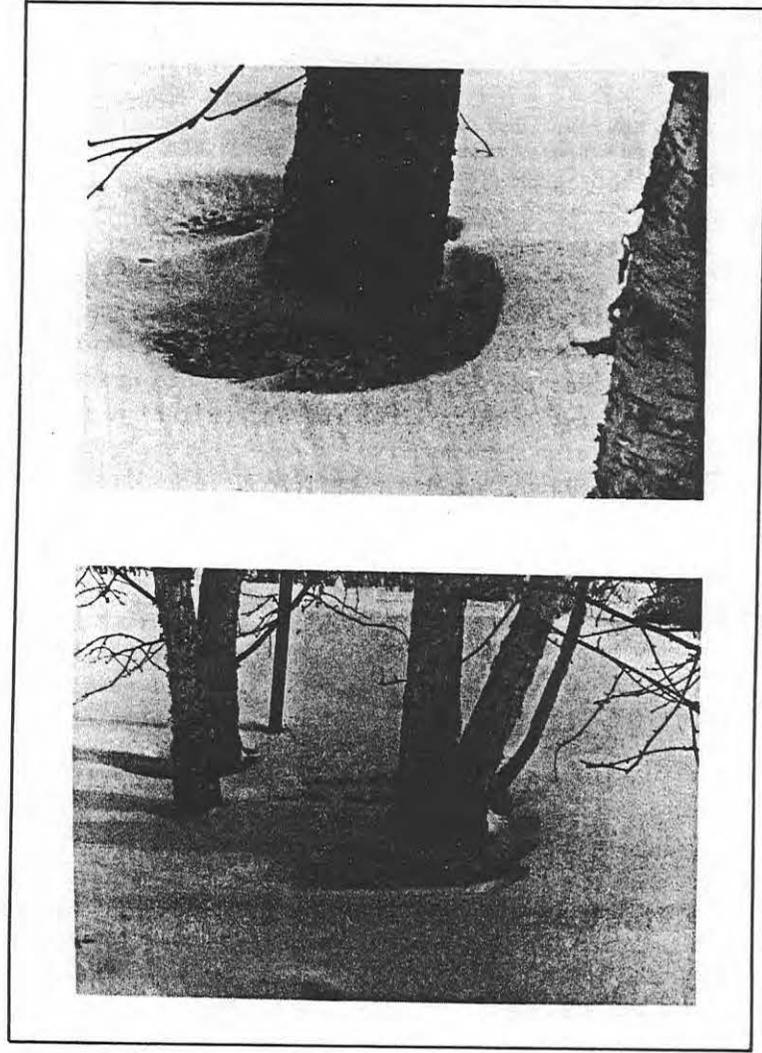


Abb. 12 Ähnliche Naturerscheinung: "Schnee-Kolk"

bei einer so kleinen Wassertiefe so stark, daß diese die Auskolkung bewirkt? sind zu verneinen.

Schließlich soll auch noch die folgende Naturbeobachtung geschildert werden. An einem windigen Wintertag entstanden auf einem freien Gelände die Bilder der Abb. 12. Die Rolle des Geschiebes wird vom Schnee und die des Wassers von der Luftströmung übernommen. Hier stellen sich dieselben Fragen: Kann für einen rauhen Baum eine senkrechte Strömung definiert werden? Und vor allem für einen vierastigen, unrunder, schräg gewachsenen Baum? Trotzdem ist eine Auskolkung entstanden, die im Aussehen unserem Falle stark ähnelt. (Abb. 4c).

In einer Versuchsreihe mit Scheibenringen um den Pfeiler in bestimmten Abständen von der Sohle zeigte Tanaka [56], daß die Kolkentiefe von der Scheibenringkonstruktion unabhängig ist, daß also die vertikale Strömung keinen Einfluß auf die Kolkvertiefung ausübt.

Im weiteren Verlauf werden die Stromlinien, nachdem sie mehr oder weniger weit nach unten getaucht sind, um den Pfeiler herumgelenkt. Dabei haben sie einen spiralförmigen Verlauf [54], für den sich folgende theoretische Begründung aufstellen läßt (Abb. 13):

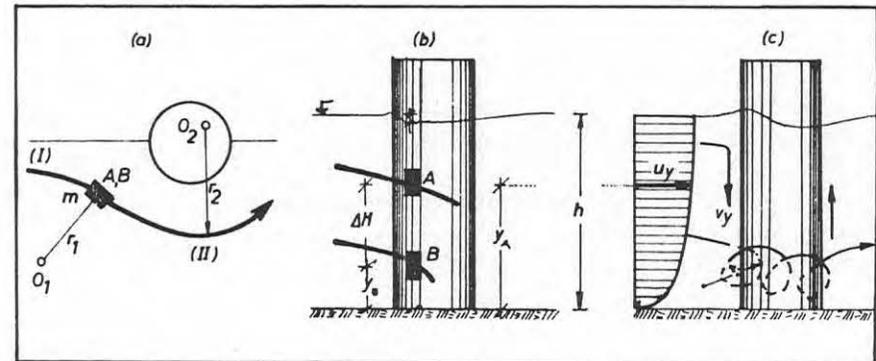


Abb. 13 Spiralströmung seitlich des Pfeilers [54]

Für ein Wasserelement A von der Masse m , das unter der Wirkung einer Zentrifugalkraft $F = mU_{yi}^2/r_i$ und einer Druckkraftdifferenz $\Delta p = \gamma \cdot \sigma \cdot \Delta h$ auf den beiden gegenüberliegenden Seiten der Fläche σ beansprucht wird, soll im Falle der stationären Bewegung folgende Beziehung gelten:

$$\gamma \cdot \sigma \cdot \Delta h = m \cdot \frac{U_{yi}^2}{r_i} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\gamma \cdot \sigma \cdot \Delta h}{m} = \frac{U_{yi}^2}{r_i} \quad (24)$$

Das linke Glied der Beziehung (24) ist konstant für zwei Elemente A und B in verschiedenen Wassertiefen y_A und y_B . Das rechte Glied aber, unter Berücksichtigung einer ungleichförmigen Verteilung der Geschwindigkeit, hält einen konstanten Wert nur mit variablem U_{yi} und r_i , woraus zu folgern ist, daß dem unteren Bereich mit kleinen U_{yi} kleinere Krümmungsradien r_i entsprechen. So bilden sich die spiralförmige Strömungen an den beiden Seiten des Pfeilers, deren Richtung und Intensität von der Abweichung der Stromlinien im Grundriß und der Geschwindigkeitsverteilung in der Vertikalen abhängig ist. Diese Beobachtung zeigt auch, daß die allmählich sich entwickelnde spiralförmige Strömung oberstrom des Pfeilers "windschiefe" Geschwindigkeitsprofile erfordert (Abb.7), die die

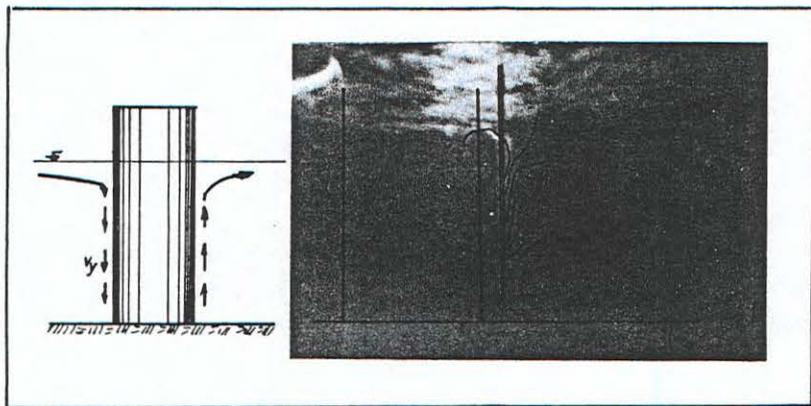


Abb. 14 Die senkrechte Strömung hinter dem Pfeiler

Entstehung des Fußwirbels am Pfeiler auch erleichtern. Die Entwicklung, und der Verlauf der windschiefen Profile werden im Kapitel 3.3 analytisch beschrieben.

Während vor dem Pfeiler eine fallende Strömung existiert, ist sie hinter dem Pfeiler steigend (vgl. Abb. 14). Der unterstromige Teil des Pfeilers wirkt auf die Geschiebekörner, die oberstrom abgetragen werden, einen Sog aus.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

- Eine absteigende Bewegung der Stromlinien ist vor dem Pfeiler zu beobachten. Die vertikale Komponente der Geschwindigkeit ist jedoch nicht in der Lage, die Sohle um den runden Pfeiler zu vertiefen. Je größer die Anströmungsgeschwindigkeit ist, desto größer wird die nach unten gerichtete Geschwindigkeitskomponente.
- Oberstrom des Pfeilers entstehen in der Nähe der Sohle windschiefe Geschwindigkeitsprofile, die die Entstehung des Fußwirbels erleichtern. Am Rande des Pfeilers entwickeln sich ellipsoidale Strömungen, die das abgegrabene Geschiebe stromabwärts weiter transportieren.
- Hinter dem Pfeiler ist eine ansteigende Bewegung der Stromlinien festzustellen. Der unterstromige Teil des Brückenpfeilers wirkt auf die Geschiebekörner, die oberstrom abgetragen werden, einen Sog aus.
- Die Kolkentwicklung beginnt an der Seite des Pfeilers unter 45° zur Stromrichtung, da hier die größten Geschwindigkeiten herrschen. Für die weitere Entwicklung des Kolkes ist der Wirbel am Fuße des Pfeilers maßgebend. Der tiefste Punkt in der Kolkwanne erscheint in der Stauenebene oberstrom des runden Pfeilers.

3.3 Betrachtungen in der Stauebene des Pfeilers

3.3.1 Allgemeines

Bei der Durchführung der Versuche mit einem grau-braunen Quarzsand, der einen gewissen Gewichtsanteil eines schwereren weißen Sandes enthielt, stellte sich nach Ablauf der Langzeitversuche eine Sortierung der beiden Materialien auf der Sohle ein, wie in Abb. 15 gezeigt wird. An der Stelle, entlang der mit 1T2 bezeichneten Begrenzungslinie am Fuße des Pfeilers, findet eine Ablösung in der Kolkwanne statt. Diese Sortierung und die Entstehung der weißen "Begrenzungslinie" auf der Sohle ist auf die Existenz des Fußwirbels zurückzuführen, der in der Nähe der Sohle besonders stark ausgeprägt ist. Weiter wurde festgestellt,

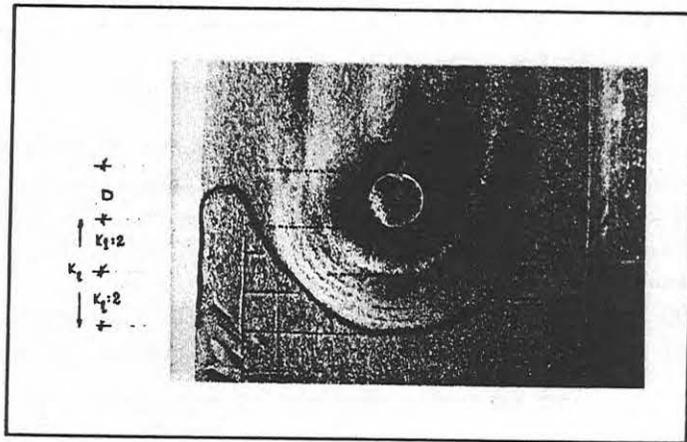


Abb. 15 Ausgekolkte Sohle in Draufsicht

daß für alle durchgeführten Versuche, die erwähnte Begrenzungslinie den Abstand zwischen Pfeiler und Kolkfang oberstrom halbierte, was den Gedanken nahelegte, bei einer ana-

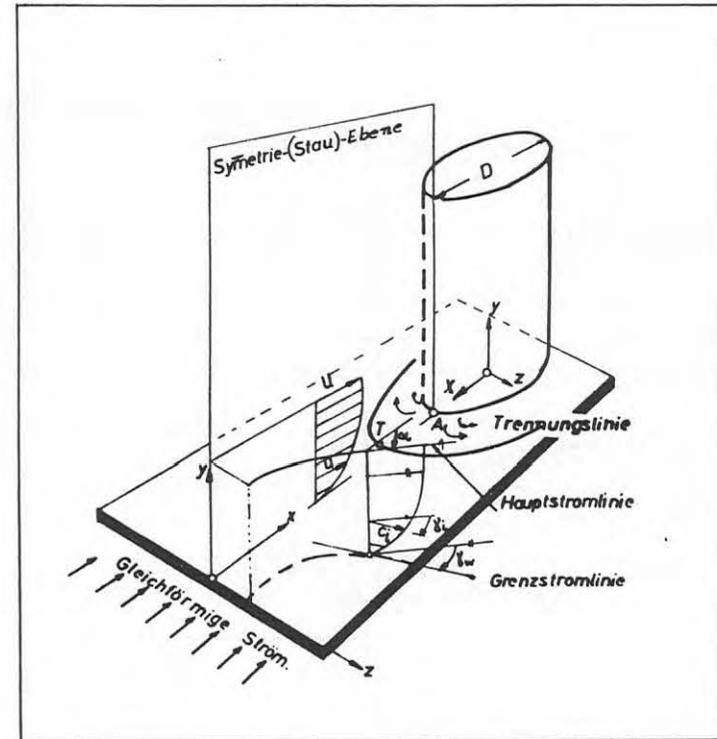


Abb. 16 Trennungslinie am Fuße des Pfeilers bei ebener Sohle (24)

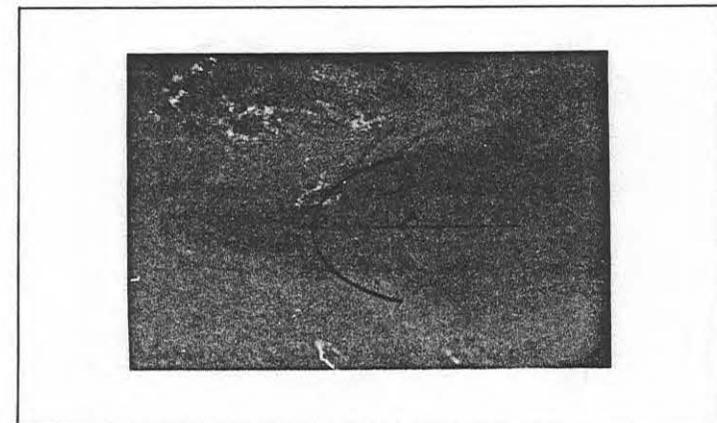


Abb. 17 Gefärbte Stromfäden

lytischen Bestimmung der Kolklänge oberstrom vom Pfeiler, den Abstand \overline{AT} zu verdoppeln, da dieser Abstand rechnerisch [23] ermittelt werden kann. Diese Idee wurde durch die später durchgeführten Versuche sehr gut bestätigt.

3.3.2 Bestimmung der Lage der Trennungslinie

Wenn die Veränderung des Geschwindigkeitsprofils entlang der Strömung in der Stauenebene erfaßt werden kann, dann kann auch eine Vorhersage über die Lage der Trennungslinie gemacht werden [23], indem diejenige Stelle auf der Stauenebene des Pfeilers ausgesucht wird, an der das Geschwindigkeitsprofil die für den Ort der Trennungslinie charakteristischen Eigenschaften zeigt.

In Abb. 16 wird für den runden Pfeiler, die Lage der Symmetrie-Ebene (meist als Stauenebene bezeichnet) gezeigt und die erwähnte Trennungslinie auf einer noch nicht ausgekolkten Sohle schematisch dargestellt [24]. Oberstrom des Pfeilers entwickeln sich in der Nähe der Symmetrie-Ebene nach der in Kapitel 3.2. gegebenen Begründung windschiefe Geschwindigkeitsprofile, die in der Nähe der Sohle eine stärkere Komponente in der z-Richtung haben und die Entstehung des Fußwirbels am Pfeiler erleichtern. Solche Geschwindigkeitsprofile gekrümmter Stromlinien wurden von Prandtl [25] mit folgenden Gleichungen für eine turbulente Strömung definiert (Abb. 18).

$$\frac{u}{U} = G\left(\frac{y}{\delta}\right) \text{ und } \frac{w}{U} = \tan\gamma_w \cdot G\left(\frac{y}{\delta}\right) \cdot g\left(\frac{y}{\delta}\right)$$

mit

$$\begin{aligned} G = 0, \quad g = 1 & \quad \text{für } y = 0 \\ G = 1, \quad g = 0 & \quad \text{für } y = \delta \end{aligned}$$

Später gab Mayer [40] für die Funktionen G und g die Werte:

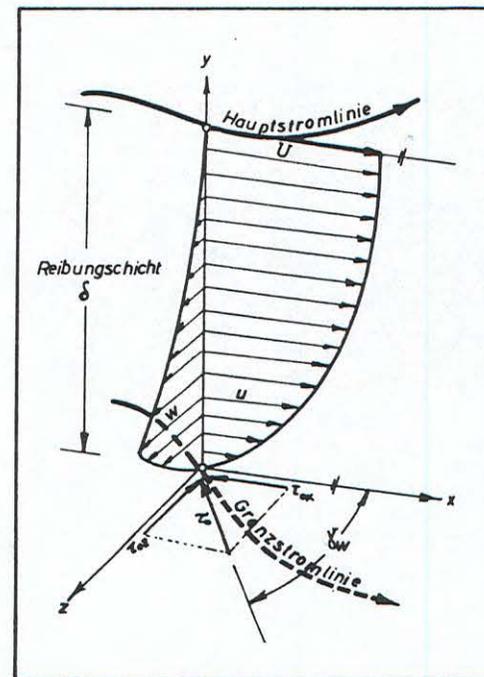


Abb. 18 Windschiefes Geschwindigkeitsprofil in einer gekrümmten Stromlinie [25]

$$G = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/n}, \quad g = \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2 \quad \text{mit } n \approx 7 \text{ an.}$$

Daraus wird deutlich, daß es sich um ein Problem der Reibungsschicht handelt. Zunächst wird diese Reibungsschicht des Geschwindigkeitsprofils beschrieben und ihre durch den Pfeiler bewirkte Veränderung in Fließrichtung in Abhängigkeit der örtlich herrschenden veränderlichen Größen bestimmt.

Folgende Größen haben einen großen Einfluß auf den weiteren Verlauf der Reibungsschicht [23]:

- 1) Die Form des Geschwindigkeitsprofiles,
- 2) der dynamische Druck außerhalb der Reibungsschicht, bzw. die Veränderung der Geschwindigkeit oberstrom bis zum Pfeiler und
- 3) die Schubspannung an der Sohle.

3.3.3 Mathematische Analyse

3.3.2.1 Der Impulssatz

Als erster verwendete von Kármán in seiner Arbeit über den Einfluß des veränderlichen dynamischen Druckes auf die Reibungsschicht den Impulssatz und leitete damit den Verlauf der Stärke der Reibungsschicht für eine ebene Platte ab.

Unter Vernachlässigung der Druckänderungen und der turbulenten Schwankungen senkrecht zur Sohle, lautet der Impulssatz für die dreidimensionale inkompressible Reibungsschicht [23] in x,y,z Koordinaten (Abb. 19) wie folgt:

$$\frac{\partial \delta_2}{\partial x} + (2\delta_2 + \delta_1) \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{U^2} \int_0^{\delta} (U-u) \frac{\partial w}{\partial z} dy = \frac{C_{fx}}{2} \quad (25)$$

wobei:

- U die Geschwindigkeit in der x-Richtung außerhalb der Reibungsschicht und
- u,w die Komponenten in der x und z-Richtung der Schwankungsgeschwindigkeiten in der Reibungsschicht, bedeuten.

$$\delta_1 = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (26)$$

ist die Verdrängungsdicke. Man versteht darunter diejenige Schichtdicke, um welche die Potentialströmung, infolge der Geschwindigkeitsabminderung, nach außen abgedrängt wird.

$$\delta_2 = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U}\right) \frac{u}{U} \cdot dy \quad (27)$$

ist die Impulsverlustdicke. Man versteht darunter, den in der Reibungsschicht infolge Reibung gegenüber der Potentialströmung weniger durchfließenden Impuls.

$$C_{fx} = \frac{\tau_{0x}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2} \quad (28)$$

ist der Reibungsbeiwert in der x-Richtung.

Die Formel (25) entspricht bis auf das Glied

$$I = \frac{1}{U^2} \int_0^{\delta} (U-u) \frac{\partial w}{\partial z} dy$$

dem Impulssatz für die zweidimensionale Strömung. Dieses Glied soll im folgenden näher untersucht.

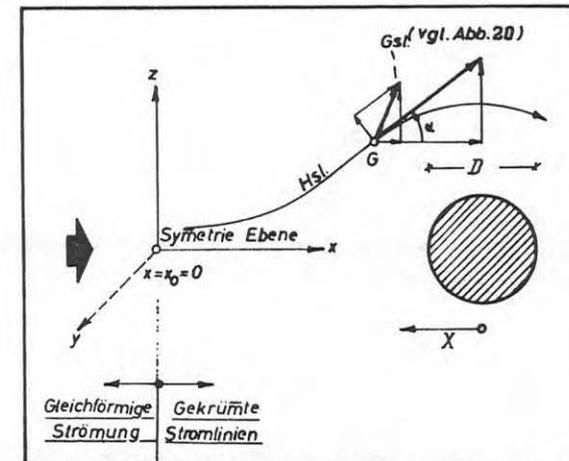
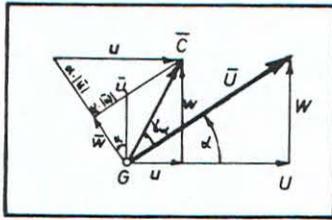


Abb. 19 Geschwindigkeitskomponenten der Umströmung um den Pfeiler [23]



In Abb. 20 ist zu sehen, daß für die Hauptstromlinien in der Nähe der Symmetrieebene der Winkel α klein ist. Deshalb kann man die Geschwindigkeit mit den Komponenten $U=F(u,w,\alpha)$ mit den Beträgen der Vektoren einsetzen:

$$\begin{aligned} U &\cong |\vec{U}| \\ w &\cong |\vec{w}| + \alpha |\vec{u}| \\ u &\cong |\vec{u}| - \alpha |\vec{w}| \end{aligned} \quad (30)$$

Abb. 20 Geschwindigkeitskomponenten der Umströmung um den Pfeiler [23]

Aus der Beziehung (29) und (30) folgt, daß

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{U^2} \int_0^\delta (U-u) \frac{\partial w}{\partial z} dy = \frac{1}{|\vec{U}|^2} \int_0^\delta (|\vec{U}| - |\vec{u}| + \alpha |\vec{w}|) \left(\frac{\partial |\vec{w}|}{\partial z} + |\vec{u}| \frac{\partial \alpha}{\partial z} \right) dy = \\ &= \frac{1}{|\vec{U}|^2} \int_0^\delta (|\vec{U}| - |\vec{u}|) \left[\frac{\partial |\vec{w}|}{\partial z} + |\vec{u}| \frac{\partial \alpha}{\partial z} \right] dy = \\ &= \frac{1}{|\vec{U}|^2} \int_0^\delta (|\vec{U}| - |\vec{u}|) \frac{\partial |\vec{w}|}{\partial z} dy + \frac{\partial \alpha}{\partial z} \cdot \frac{1}{|\vec{U}|^2} \int_0^\delta |\vec{u}| (|\vec{U}| - |\vec{u}|) dy \text{ ist. } (31) \end{aligned}$$

Unter der Annahme, daß $\alpha \cdot |\vec{w}| \rightarrow 0, \alpha \frac{\partial u}{\partial z} + 0, \frac{\partial \alpha}{\partial z} = \text{konst.}$ und mit einer ähnlichen Bezeichnung zu der Impulsverlustdicke (Gl. 27)

$$\bar{\delta}_2 = \frac{1}{\bar{U}^2} \int_0^\delta \bar{u} (\bar{U} - \bar{u}) dy \cong \delta_2 \quad (32)$$

und

$$\bar{\delta}_{2xz} = \frac{1}{\bar{U}^2} \int_0^\delta \bar{w} (\bar{U} - \bar{u}) dy \cong \delta_{2xz}$$

ergibt sich für das obige Glied I der Impulsgrenzschichtgleichung

$$I = \delta_2 \frac{\partial \alpha}{\partial z} + \frac{\partial \delta_{2xz}}{\partial z} \quad (33)$$

Das Glied $\delta_2 \frac{\partial \alpha}{\partial z}$ stellt die Divergenz (oder Konvergenz) der Hauptstromlinien (von $\delta \rightarrow h$) und das Glied $\frac{\partial \delta_{2xz}}{\partial z}$ die Abweichungen der Stromlinien in der Nähe der Sohle ($0 \rightarrow \delta$) dar.

Physikalisch betrachtet gibt $\frac{\partial \delta_{2xz}}{\partial z}$ die Größe der Veränderung des Impulses in der x-Richtung infolge der windschiefen

Reibungsschicht an. Gäbe es keine windschiefen Profile, so würde $\frac{\partial \delta_{2xz}}{\partial z} = 0$ sein.

Aus den Gleichungen (25) und (33) ergibt sich die Differentialgleichung der Impulsverlustdicke:

$$\frac{\partial \delta_2}{\partial x} = \frac{C_{fx}}{2} - \frac{(2\delta_2 + \delta_1)}{U} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - \delta_2 \frac{\partial \alpha}{\partial z} - \frac{\delta_{2xz}}{\partial z} \quad (34)$$

Die Kontinuitätsgleichung der Hauptströmung in der x,z,-Ebene (zweidimensionale Strömung) lautet:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0$$

Es gilt:

$$v = U \cdot \text{tg} \alpha \cong U \cdot \alpha \quad \frac{\partial v}{\partial z} = U \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial z}$$

Daraus folgt:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + U \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial z} = 0$$

oder

$$\frac{\partial \alpha}{\partial z} = -\frac{1}{U} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \quad (35)$$

Für die Berechnung des Faktors $\frac{\partial \delta_{2xz}}{\partial z}$ wird angenommen [23]:

$$\delta_{2xz} = -A \cdot (\delta_2 - \delta_1) \quad (36)$$

mit

$$A = + 2U^2 \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{U^2} \cong 2\alpha = \text{konstant} \quad (37)$$

Mit der obigen Annahme gilt:

$$\frac{\partial \delta_{2xz}}{\partial z} = - \frac{\partial A}{\partial z} (\delta_2 - \delta_1) \quad (38)$$

oder

$$- \frac{\partial \delta_{2xz}}{\partial z} \cong 2 \frac{\partial U}{\partial x} (\delta_2 - \delta_1) \quad (39)$$

und wegen der Beziehung (35)

$$- \frac{\delta_{2xz}}{\partial z} \cong - \frac{2}{U} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} (\delta_2 - \delta_1) \quad (40)$$

Die Gleichung (34) wird unter Berücksichtigung der Gleichung (40) wie folgt geschrieben:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta_2}{\partial x} &= \frac{c_{fx}}{2} - \frac{(2\delta_2 + \delta_1)}{U} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \delta_2 \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{U} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} (\delta_2 - \delta_1) = \\ &= \frac{c_{fx}}{2} - \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} (2\delta_2 + \delta_1 - \delta_2) - \frac{2}{U} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} (\delta_2 - \delta_1) = \\ &= \frac{c_{fx}}{2} - \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} (3\delta_2 - \delta_1) \end{aligned}$$

und für $\Delta x \rightarrow dx$ ergibt sich die Impulsgrenzschicht-Differentialgleichung der Veränderung der Impulsverlustdicke δ_2 entlang der x-Achse und in der Stauenebene des Pfeilers. Diese lautet:

$$\frac{d\delta_2}{dx} + \frac{1}{U(x)} (3\delta_2 - \delta_1) \frac{dU}{dx} = \frac{c_{fx}}{2} \quad (41)$$

oder nach Multiplikation beider Seiten mit $U^2(x) = U^2$

$$U^2 \frac{d\delta_2}{dx} + 2U\delta_2 \frac{dU}{dx} + U(\delta_2 - \delta_1) \frac{dU}{dx} = \frac{c_{fx}}{2} \cdot U^2$$

oder

$$\frac{d(U^2 \cdot \delta_2)}{dx} + U(\delta_2 - \delta_1) \frac{dU}{dx} = \frac{c_{fx}}{2} \cdot U^2$$

oder

$$\frac{d(U^2 \delta_2)}{dx} = \frac{c_{fx}}{2} \cdot U^2 - k^2$$

Unter Vernachlässigung des Gliedes $k^2 = U(\delta_2 - \delta_1) \frac{dU}{dx}$ das viel kleiner als $c_{fx} \cdot U^2/2$ ist, bekommen wir:

$$\frac{d(U^2 \cdot \delta_2)}{dx} = \frac{c_{fx}}{2} \cdot U^2(x)$$

Oder nach Integration

$$U^2(x) \cdot \delta_2(x) = \int_0^x \frac{c_{fx}}{2} \cdot U^2(x) dx + C$$

Für $x=0$ gilt $U^2(x) \cdot \delta_2(x) = (U^2 \cdot \delta_2)_0$

und

$$[\delta_2 \cdot U^2]_x = [\delta_2 \cdot U^2]_0 + \int_0^x \frac{c_{fx}}{2} U^2 dx$$

Für zwei hintereinander folgende Stellen $x, x+\Delta x$, gilt die Rekursionsformel

$$[\delta_2 \cdot U^2]_{x+\Delta x} = [\delta_2 \cdot U^2]_x + \int_x^{x+\Delta x} \frac{c_{fx}}{2} U^2 dx$$

oder die

$$\delta_{2,x+\Delta x} = \delta_{2,x} \left(\frac{U_x}{U_{x+\Delta x}} \right)^2 + \int_x^{x+\Delta x} \frac{C_{fx}}{2} \cdot \left(\frac{U_x}{U_{x+\Delta x}} \right)^2 dx \quad (42)$$

die, die Veränderung der Impulsdicke in zwei benachbarte Stellen in der Fließrichtung bzw. entlang der Symmetrieebene oberstrom des Pfeilers angibt.

Unter der Beziehung (26), der gegebenen Verdrängungsdicke δ_1 , versteht man, wie schon gesagt, diejenige Unterschicht, um welche die Potentialströmung nach außen abgedrängt wird. Unter der Impulsdicke δ_2 versteht man den in der Grenzschicht, infolge Reibungswirkung im Vergleich zur Potentialtheorie weniger durchfließenden Impuls. Weil aber δ_2 vom Quadrat der Geschwindigkeitsverteilung und δ_1 nur von der ersten Potenz der Geschwindigkeitsverteilung (u/U) abhängt folgt, daß der Formparameter $H_{12} = \delta_1 / \delta_2$ eines Geschwindigkeitsprofils von der Veränderung der Größe (u/U) mit der Tiefe abhängt, oder besser gesagt, von der Form der unteren Reibungsschicht. Das Umgekehrte kann von der mathematischen Seite her nicht behauptet werden. Wenn nämlich H_{12} allein die Form des Geschwindigkeitsprofils bestimmen würde, dann müßten alle Punkte u/U in einem Diagramm (u/U - H_{12} mit konstantem Wert y/δ_2) zusammenfallen, was aber nicht der Fall ist [13]. Die Geschwindigkeitsverteilung vor dem Pfeiler wird also durch δ_2 , C_{fx} und H_{12} bestimmt.

Um den Verlauf von δ_2 oberstrom bis zur Trennungslinie am Fuße des Pfeilers zu bestimmen, muß die Gleichung (42) integriert werden. Dafür benötigt man zusätzlich zu der Impulsgleichung noch zwei andere Gleichungen, und zwar eine für den örtlichen Reibungsbeiwert $C_{fx} = C_{fx}(\delta_2, H_{12})$ und eine für den Formparameter $H_{12} = f(\delta_2, C_{fx})$ des Geschwindigkeitsprofils, da er in der weiter angegebenen Beziehung (43) auch enthalten ist.

3.3.2.2 Der örtliche Reibungsbeiwert C_{fx}

Bei der Berechnung des Reibungsbeiwertes C_{fx} muß beachtet werden, daß die Trennungslinie in der Kolkwanne entsteht und daß das Geschwindigkeitsprofil nach Entstehung des Kolkes in diesem Bereich die raue Sohle schon verlassen hat. Es ist hier also gerechtfertigt, den Reibungsbeiwert für eine glatte Sohle als Funktion der gebräuchlichsten Formparameter H_{12} und der Reynoldsschen Zahl der Reibungsschicht $Re_2 = U \cdot \delta_2 / \nu$ anzunehmen.

Für einen beliebigen Druckverlauf wurde, aus der Vielzahl der von verschiedenen Forschern angegebenen Beziehungen, für den Reibungsbeiwert C_{fx} die handliche Gleichung von Rotta [46]

$$C_{fx} = 2 \left(8 (\log Re_2)^{0,919} - 0,2 + K + 5,75 \log H_{12} \right)^{-2} \quad (43)$$

$$K = K \left[\frac{H_{12} - 1}{H_{12} \sqrt{\frac{C_{fx}}{2}}} \right]$$

ausgewählt, die nach $\log Re_2$ aufgelöst ist und zur Erleichterung der späteren Arbeit auch in der Form einer graphischen Darstellung angegeben ist (Anlage 1)

3.3.2.3 Der Geschwindigkeitsformparameter H_{12}

Für die weitere Bearbeitung der Gleichung (42) ist, wie schon erwähnt, die Beziehung zwischen H_{12} , C_{fx} und δ_2 erforderlich, welche zusammen mit (43) zur Lösung des Problems führt. Von den vielen Veröffentlichungen, wurden die einfache Beziehung von Rotta [46] und von A.E. Doenhof [13] verwen-

det, die im weiteren als E- und D-Verfahren für die Formulierung der Lösung bezeichnet werden. Beim

E-Verfahren

wird die Gesamtenergieverlustdicke δ_3 eingeführt, die den Totalverlust an kinetischer Energie des Geschwindigkeitsprofils angibt. Mit Hilfe dieser Größe läßt sich für die Änderung des Formparameters $H_{32} = \delta_3 / \delta_2$ die Differentialgleichung (44) ableiten [46], wobei die auftretende Impulsverlustdicke δ_2 in jeder neuen Stelle der Stauebene des Pfeilers aus dem Impulssatz (Gl. 42) eliminiert wird. Es gilt:

$$\delta_2 \frac{dH_{32}}{dx} = - \left(H_{12}^{-1} \right) \frac{H_{32}}{2} \delta_2 \frac{dp/dx}{q} + C_D - C_{fx} \frac{H_{32}}{2} \quad (44)$$

Für die Abhängigkeit

$$H_{32} = f(H_{12}, C_{fx})$$

wurde die Beziehung:

$$H_{32} = 3 - \left(1 - \frac{C_{fx}}{2} I_2 + 1,3 \sqrt{\frac{C_{fx}}{2}} \right) H_{12} \quad (45)$$

verwendet, die zur Erleichterung der späteren Auswertung wieder in der Form einer Fluchtlinientafel unter Berücksichtigung des Faktors I_2 [46] in der Anlage 2 beigegeben ist. Für den Beiwert C_D der Beziehung (44) gilt die Funktion:

$$C_D = C_{fx} \left[1 + \sqrt{\frac{C_{fx}}{2}} \cdot F \left(\frac{H_{12}^{-1}}{H_{12} \sqrt{\frac{C_{fx}}{2}}} \right) \right] \quad (46)$$

und für den Faktor I_2 der Beziehung (45) die Funktion:

$$I_2 = \frac{9}{4} \cdot \frac{1}{C_{fx}} \left(\frac{H_{12}^{-1}}{H_{12}} \right)^2$$

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß mit den beiden Gleichungen (42), (44) und der in der Anlage 2 gegebenen Fluchtlinientafel die Lage der Trennungslinie und damit die Stelle des Kolkanfanges oberstrom des Pfeilers, bestimmt werden kann. Beim

chungen (42), (44) und der in der Anlage 2 gegebenen Fluchtlinientafel die Lage der Trennungslinie und damit die Stelle des Kolkanfanges oberstrom des Pfeilers, bestimmt werden kann. Beim

D-Verfahren

wird die Veränderung des Formparameters H_{12} [13] direkt mit der Gleichung

$$\delta_2 \frac{dH_{12}}{dx} = e^{4,68(H_{12}^{-2},975)} \left[\frac{\delta_2}{q} \frac{dq}{dx} \left(\frac{2q}{\tau_0} \right)^{-2,035(H_{12}^{-1},286)} \right] \quad (47)$$

berechnet und mit der empirischen Beziehung

$$\frac{2q}{\tau_0} = \left[5,890 \lg(4,075 Re_2) \right]^2 = \frac{2}{C_{fx}} \quad (48)$$

gekoppelt.

Aus einer Umformung des Systemes mit Hilfe der Bernoullischen Gleichung

$$\frac{dq/dx}{q} = - 2 \frac{dU/dx}{U}$$

erhält man das Gleichungssystem:

$$\frac{dH_{12}}{dx} = e^{4,68(H_{12}^{-2},975)} \cdot \left[\frac{2dU/dx}{U} \cdot C - \frac{2,035(H_{12}^{-1},286)}{\delta_2} \right] \quad (49)$$

$$C = \left[5,89 \log_{10}(4,075 Re_2) \right]^2 \quad (50)$$

Die graphischen Darstellungen von $\tau_0/2q = f(Re_2)$ und von $e^{4,68(H_{12}^{-2},975)} = f_1(H_{12})$ sind in den Anlagen 3 und 4 wiedergegeben.

Auch diese Methode führt mit der Formulierung der Impuls-gleichung (42) zur Bestimmung der Trennungslinie in der Kolkwanne.

* * *

Nach dem E-Verfahren ist die Trennungslinie in der Kolkwanne durch das Streben der Wandschubspannung τ_0 (bzw. $C_{fx} \rightarrow 0$) gegen Null gekennzeichnet, was durch das Liegenbleiben (Ablagern) der erwähnten schwereren weißen Geschiebekörner bestätigt wird (s. Kapitel 3.3.1) Weil aber das Verhältnis H_{12} nach den bisherigen Kenntnissen [46] auf der letzten Strecke vor der Trennungslinie sehr rasch wächst und C_{fx} ebenso abfällt, ist die Stelle der Trennungslinie durch eine Extrapolation der C_{fx} -Kurve bis $C_{fx}=0$ mit guter Genauigkeit zu ermitteln.

Nach dem D-Verfahren liegt die Trennungslinie auf der Stauebene des Pfeilers an der Stelle, an welcher der H_{12} -Wert gleich dem 1,5-fachen des H_{12} Anfangswertes ist.

Nach Feststellungen von I.A.Zaat [64], ist die Lage der Trennungslinie vom gewählten Anfangswert des Formparameters H_{12} nicht sehr abhängig. Das bedeutet, daß gewisse Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Anfangswerte aus Versuchsmessungen auf die Lösung des Systemes keinen großen Einfluß haben.

Eine vergleichende Diskussion für die Anwendung des einen oder des anderen Verfahrens wird im Kapitel 5.3.3.2 gebracht.

3.3.4 Anfangswerte zur Lösung des Gleichungssystemes

Die Bestimmung der Anfangswerte macht keine Schwierigkeiten, wenn die genaue Form des Geschwindigkeitsprofiles, ohne Störung durch den Pfeiler gegeben ist. Aus der Form dieses Profiles errechnet man die Werte δ_1 , δ_2 und H_{12} (Anlage 5), dann aus der Anlage 1 oder 3 (je nach verwendeter Methode) die C_{fx} -Werte und schließlich, im Falle der Verwendung des E-Verfahrens, den H_{32} -Wert aus der Anlage 2. Die so erhaltenen Werte sind die Anfangswerte für einen Abstand $x=(R/X)=x_0$ oberstrom

des Pfeilers. x_0 ist frei wählbar, es hat sich aber gezeigt, daß $x_0=0,10$ sehr gute Ergebnisse liefert. Für $x_0 \leq 0,10$ bleibt der H_{12} -Wert konstant, da der Druckgradient in einem größeren Abstand vom Pfeiler (bzw. $x_0 < 0,10$) bedeutungslos ist.

Die so ermittelten Anfangswerte werden in der weiteren Berechnung mit:

$$\delta_{2,0}, C_{fx,0}, H_{12,0}, H_{32,0}$$

bezeichnet.

3.3.5 Der Geschwindigkeitsverlauf oberstrom des Pfeilers

Ein Parameter von großer Bedeutung für die Berechnung ist die Strömungsgeschwindigkeit und besonders ihr Verlauf entlang der Stauebene bis zum Pfeiler. Die Kenntnis dieses Verlaufes führt zur richtigen Bestimmung der Lage der Trennungslinie in der Kolkwanne, wobei die Qualität der Ergebnisse stark von der Genauigkeit des Geschwindigkeitsverlaufes abhängt.

Nach der Potentialtheorie besteht zwischen der Geschwindigkeit U_x , die in einem Abstand $(R/X)=x$ oberstrom eines senkrecht umströmten Zylinders herrscht und einer Geschwindigkeit U im ungestörten Bereich die Beziehung:

$$y_1 = \frac{U_x}{U} = 1 - \left(\frac{R}{X}\right)^2 \tag{51}$$

Diese, auf theoretischem Wege ermittelte Beziehung, muß jedoch für das hier behandelte Problem als unzureichend betrachtet werden. Mit Hilfe von Geschwindigkeitsmessungen an vier verschiedenen Pfeilern und verschiedenen Fließgeschwindigkeiten für stabile und bewegliche Sohle, wurde die Formel:

$$y_2 = \frac{U_x}{U} = 1 - 0,05x - 1,13x^2 \quad \text{mit } x = \frac{R}{X} \tag{52}$$

hergeleitet (Abb. 21). Damit erhält man:

$$Y = \frac{1}{U_x} \cdot \frac{\partial U_x}{\partial x} = \frac{-0,05 - 2,26x}{1 - 0,05x - 1,13x^2} \quad (54)$$

In der Anlage 6 sind die numerischen Werte der Funktionen U_x/U , $(\partial U_x/\partial x)/U$ und $(\partial U_x/\partial x)/U_x = Y$ in Abhängigkeit von der dimensionslosen Größe $x = (R/X)$ für jeden Brückenpfeiler angegeben.

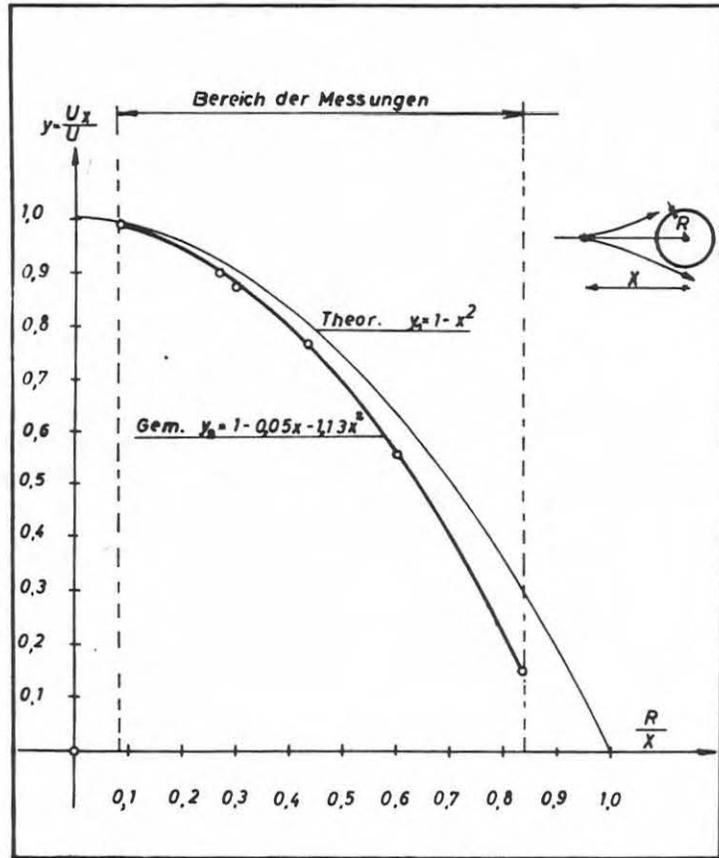


Abb. 21 Der Geschwindigkeitsverlauf oberstrom des Pfeilers

Aus der Meßreihe ist auch zu ersehen, daß in einem Abstand $x_o = (R/X) = 0,10$, oberstrom des Pfeilers, ungestörte Strömung herrscht. Man kann also von dieser Stelle aus die Berechnung beginnen.

3.3.6 Die Berechnungsmethode

Nachstehend folgt eine Zusammenfassung der Formeln für die Berechnung des Verlaufes der Strömungscharakteristiken oberstrom des Pfeilers. Es gilt:

a) E-Verfahren

Anfangswerte: $\delta_{2,o}, H_{12,o}, C_{fx,o}, H_{32,o}, U$

und das Gleichungssystem:

$$[\delta_2 U^2]_x = [\delta_2 U^2]_o + \int_o^x \frac{C_{fx}}{2} \cdot U^2 dx \quad (42)$$

$$C_{fx} = 2 \left[8 (\lg Re_2)^{0,919 - 0,2 + K} \left(\frac{H_{12}^{-1}}{H_{12} \sqrt{\frac{C_{fx}}{2}}} + 5,751 \lg H_{12} \right)^{-2} \right] \quad (43) \quad \text{(Anlage 1)}$$

$$\delta_2 \frac{dH_{32}}{dx} = -2 (H_{12}^{-1}) \frac{H_{32}}{2} \delta_2 \cdot Y + C_D - \frac{C_{fx}}{2} \cdot H_{32} \quad (44)$$

$$H_{32} = 3 - \left(1 - \frac{C_{fx}}{2} I_2 + 1,3 \sqrt{\frac{C_{fx}}{2}} \right) H_{12} \quad (45) \quad \text{(Anlage 2)}$$

$$Y = (\partial U_x / \partial x) / U_x \quad \text{(Anlage 6)} \quad (54)$$

b) D-Verfahren

Anfangswerte: $\delta_{2,o}, H_{12,o}, U$

und das Gleichungssystem

$$[\delta_2 U^2]_x = [\delta_2 U^2]_0 + \int_0^x \frac{C_{fx}}{2} U^2 dx \quad (42)$$

$$\frac{dH_{12}}{dx} = e^{4,68(H_{12}-2,975)} \left[-2Y \cdot \frac{\tau_0}{q} - \frac{2,035(H_{12}-1,286)}{\delta_2} \right] \quad (49)$$

$$\frac{2q}{\tau_0} = \left[5,89 \log_{10}(4,075 Re_2) \right]^2 \quad (\text{Anlage 3}) \quad (50)$$

$$Y = (\partial U_x / \partial x) / U_x \quad (\text{Anlage 6}) \quad (54)$$

Die Differentialgleichungen sind alle von erster Ordnung, so daß eine einfache schrittweise Integration vorgenommen werden kann. Durch die Anwendung der Anlagen 1 und 2 wird die Integration wesentlich erleichtert. Die Vorgehensweise wird anhand des Beispiels im Kapitel 5.3.3.2 näher gezeigt.

E-Verfahren

Mit den Anfangswerten $\delta_{2,0}$, $C_{fx,0}$, U an der Stelle $x_0 = 0,10$ läßt sich nach Gleichung (42) und mit Hilfe des y -Wertes aus der Anlage 6 der Wert $\delta_{2,1}$ an der Stelle $x = 0,10 + \Delta x$ berechnen, wobei Δx frei zu wählen ist. Es wird vorausgesetzt, daß C_{fx} im Intervall $x_0 \leq C_{fx} \leq x_0 + \Delta x$ konstant bleibt. Mit dem neuen $\delta_{2,1}$, dem C_D -Wert (Anlage 2), dem $H_{12,0}$ - und dem Y -Wert (Anlage 6) berechnet man den $dH_{32} \approx \Delta H_{32}$ -Wert, nach Gleichung (45) und mit diesem den neuen $H_{32,1}$ -Wert = $H_{32,0} + \Delta H_{32}$. Aus Anlage 2 ergibt sich dann der neue $H_{12,1}$ -Wert. Mit $H_{12,1}$ und dem errechneten $Re_{2,1}$ ergibt sich aus Anlage 1 ein neuer $C_{fx,1}$ Wert, dann aus Anlage 2 ein verbesserter $H_{12,1}$ -Wert, so daß man am Ende die neuen $C_{fx,1}$ und $H_{12,1}$ -Werte erhält. Dann wird ein neues Intervall gewählt und der gleiche Vorgang wiederholt. Es ergibt sich so eine schrittweise Integration, die den Verlauf von H_{12} , δ_2 und C_{fx} entlang der Stauebene des Pfeilers angibt.

D-Verfahren

Mit den Anfangswerten $\delta_{2,0}$, $H_{12,0}$, und U berechnet man nach Anlage 3 $\tau_0/2q$ und daraus $C_{fx} = 2 \cdot (2q/\tau_0)$. Mit Hilfe der Gleichung (42) und des y -Wertes aus der Anlage 6, läßt sich der $\delta_{2,1}$ -Wert an der nächsten Stelle $x = 0,10 + \Delta x$ berechnen. Mit Hilfe des $H_{12,0}$, des Y -Wertes (Anlage 6) und des e -Wertes (Anlage 4) läßt sich nach Gleichung (49) die Veränderung von H_{12} , ΔH_{12} zwischen $x = 0,10$ und $x = 0,10 + \Delta x$ berechnen. Damit ergibt sich der neue $H_{12,1}$ -Wert. So läßt sich die schrittweise Integration der Funktion H_{12} entlang der Stauebene des Pfeilers durchführen. Die Trennungslinie ergibt sich an der Stelle x_T bei der $H_{12,xT} = 1,5 \cdot H_{12,0}$ ist. Das Beispiel in Kapitel 5.3.3.2 gibt nähere Angaben zur Berechnungsmethode.

3.3.7 Verlauf der errechneten Funktionen

Die errechneten Funktionen sind stetig (Abb. 51, Seite 98), und zeigen mit Annäherung an die Trennungslinie einen immer steileren Verlauf. An der Trennungslinie geht vor Beginn der Rückströmungen, die Schubspannung an der Sohle gegen Null, also $C_{fx} \rightarrow 0$. Die beiden Verfahren ergeben nicht den gleichen Verlauf für die H_{12} und C_{fx} -Linien; trotzdem führen sie fast zu derselben Lage der Trennungslinie.

3.3.8 Schlußbemerkungen zur Analyse

Mit der geschilderten Methode berechnet man diejenige Stelle in der Stauebene des Pfeilers, an der die Trennungslinie auftritt, bzw. man berechnet den Anfangspunkt der Kolkwanne, unter Berücksichtigung aller Faktoren, die die Geschwindigkeitsverteilung beeinflussen (Wassertiefe, Korngröße des Geschiebematerials, Fließgeschwindigkeit u.s.w.). Eine Veränderung

der verschiedenen, die Kolkklänge beeinflussenden Parameter führt zu anderen Anfangswerten H_{12} und C_{fx} und damit zu einem anderen Verlauf der errechneten Funktionen.

Aus den angestellten Betrachtungen ist zu ersehen, daß die Wassertiefe und der Geschiebekorndurchmesser keinen großen Einfluß auf die Kolkklänge haben müssen, da ihr Einfluß in dem $H_{12,0}$ Anfangswert enthalten ist, der den späteren Verlauf nur wenig beeinflusst. Die Geschwindigkeit hingegen hat einen großen Einfluß auf den $H_{12,0}$ -Wert und auf den weiteren Verlauf der H_{12} , C_{fx} -Linien. Diese Feststellungen wurden experimentell recht gut bestätigt (vgl. Kapitel 5.3.3.2).

Die Ermittlung der Kolkklänge nach der erwähnten Methode ist nicht schwierig, benötigt aber genaue Angaben für die Form des Geschwindigkeitsprofils und vor allem die schrittweise Integration der Gleichungssysteme mit Hilfe der angegebenen Nomogramme. Zur "Beruhigung" werden für den planenden Ingenieur, der die erwähnte Methode zeitraubend und unbefriedigend finden könnte, auch einfache Beziehungen angegeben, die aus den Auswertungen der Versuchsdaten ermittelt wurden.

Bei bekannter Kolkklänge kann man auch die Kolkttiefe berechnen, wenn für die Kolkböschungen der Böschungswinkel des Materials unter Wasser bekannt ist. (Für die durchgeführte Versuchsreihe siehe Abb. 52).

Im weiteren wurde versucht, sowohl für die Kolkklänge, als auch für die Kolkttiefe eine möglichst einfache empirische Berechnungsformel anzugeben, die auf den Meßdaten der zuletzt erwähnten Versuchsreihe basiert.

3.4 Ableitung einer dimensionstremen Berechnungsformel

Die im Kapitel 3.3.4 erwähnte Schwierigkeit der theoretischen Untersuchung bedeutet keinesfalls eine Unzulänglichkeit der vorgeschlagenen analytischen Lösung und auch nicht, daß die im weiteren definierten Größen der Versuchsreihe ohne jegliche Überlegung gemessen werden müssen.

Für die weiteren theoretischen Untersuchungen bietet sich die Dimensionsanalyse an, die eine weite Anwendung in der wasserbaulichen Forschung gefunden hat und deren Ziel die Formulie-

rung einer dimensionsrichtigen (homogenen) Formel ist, deren Konstanten auf Grund von Versuchsauswertungen experimentell bestimmt werden. Die Erläuterung der Methode ist hier nicht nötig, da es bereits einige umfassende Darstellungen gibt. Der Vorteil besteht darin, daß die Durchführung der Versuche wesentlich erleichtert wird, weil bei ihrer Anwendung zur Erfassung des Problem es die große Zahl der Faktoren, die den Kolkvorgang beeinflussen, auf eine geringere Zahl zu variierenden Größen reduziert wird.

Folgende Faktoren beeinflussen den Kolkvorgang:

- a) Faktoren der Kanal- und Pfeilergeometrie wie:
 - die Kanalbreite
 - der Pfeilerdurchmesser
 - das Sohlgefälle
 - das Verbauungsverhältnis.
- b) Faktoren, die den Fließzustand beschreiben wie:
 - die spezifische Wassermenge
 - die Fließgeschwindigkeit
 - die Sohlschubspannung
 - die Wassertiefe
 - das Wasserspiegelgefälle.
- c) Faktoren, die das flüssige Medium beschreiben wie:
 - die Flüssigkeitsdichte
 - die dynamische Viskosität
 - die kinematische Zähigkeit
 - die Flüssigkeitstemperatur.
- d) Faktoren die das Geschiebe charakterisieren wie:
 - der Geschiebekorndurchmesser
 - die spezifische Dichte des Geschiebes
 - die kritische Schubspannung der Geschiebekörner (bzw. kritische Geschwindigkeit)
 - die Kohäsion der Geschiebekörner.
- e) Die Zeit.

Nicht allen diesen Faktoren kommt gleiche Bedeutung zu. So wird etwa das spezifische Gewicht des Wassers als konstant angenommen und die Kohäsion des Geschiebes außer Acht gelassen. Es wird auch unterstellt, daß die Viskosität wegen der in der Kolkwanne herrschenden relativ großen Wasserge-

schwindigkeit und der relativ großen Korndurchmesser nur einen vernachlässigbar kleinen Einfluß auf den Kolkbildungsprozeß ausübt.

Es ist leicht zu erkennen, daß es sicher kaum möglich ist, Untersuchungen über die Abhängigkeit der Kolkbildung unter Variation aller hier aufgeführten Parameter durchzuführen, da die Kolkdimensionen ohnehin nur ganz schwache Unterschiede aufweisen würden.

Folgende Parameterauswahl erschien dem Verfasser bedeutungsvoll:

- Die Flüssigkeitsdichte ρ ,
- die kinematische Viskosität ν ,
- der Korndurchmesser des Geschiebes d , unter der Annahme, daß hohäsionsloses Material vorliegt und daß es keine Unebenheiten auf der Sohle gibt, so daß die gesamte Rauigkeit der Sohle nur durch d beschrieben werden kann,
- die Geschiebedichte, bzw. Wichte ρ_s, γ_s ,
- die Fließgeschwindigkeit,
- die Wassertiefe h ,
- den Durchmesser D des Brückenpfeilers,
- die Zeit t ,
- die Erdbeschleunigung g ,

oder

$$K = f(\rho, \nu, d, \rho_s, \gamma_s, U, h, D, g, t) \quad (55)$$

Um die acht Π -Ableitungen formulieren zu können, werden die Parameter γ_s, U, d gewählt. Man bekommt:

(aus K):

$$\Pi_1 = K \cdot (\gamma_s^{-1} \cdot U^1 \cdot d^1) = (L^1) \cdot (L^{-2x_1+y_1+z_1} \cdot M^{x_1} \cdot T^{-2x_1-y_1}) = (L^1) \cdot A$$

$$\left. \begin{array}{l} L: 0 = 1 - 2x_1 + y_1 + z_1 \\ M: 0 = x_1 \\ T: 0 = -2x_1 - y_1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} x_1 = 0 \\ y_1 = 0 \\ z_1 = -1 \end{array}$$

und

$$\Pi_1 = \frac{K}{d}$$

(Aus ρ):

$$\Pi_2 = \rho \cdot (\gamma_s^{x_2} \cdot U^2 \cdot d^2) = (L^{-3} \cdot T^0 \cdot M^1) \cdot A \rightarrow$$

$$\left. \begin{array}{l} L: 0 = -3 - 2x_2 + y_2 + z_2 \\ M: 0 = 1 + x_2 \\ T: 0 = -2x_2 - y_2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} x_2 = -1 \\ y_2 = 2 \\ z_2 = -1 \end{array}$$

und

$$\Pi_2 = \frac{\rho \cdot U^2}{\gamma_s \cdot d}$$

(Aus ν):

$$\Pi_3 = \nu \cdot (A) = L^2 \cdot T^{-1} \cdot (A) \rightarrow$$

$$\left. \begin{array}{l} L: 0 = 2 - x_3 + y_3 + z_3 \\ M: 0 = x_3 \\ T: 0 = -1 - 2x_3 - y_3 \end{array} \right\} \begin{array}{l} x_3 = 0 \\ y_3 = -1 \\ z_3 = -1 \end{array}$$

und

$$\Pi_3 = \frac{U \cdot d}{\nu}$$

(Aus h) ähnlich wie aus K:

$$\Pi_4 = \frac{d}{h}$$

(Aus ρ_s) wie aus ρ

$$\Pi_5 = \frac{\rho_s \cdot U^2}{\gamma_s \cdot d}$$

(Aus D) wie aus K

$$\Pi_6 = \frac{D}{d}$$

(Aus g)

$$\Pi_7 = g \cdot (A) = (L \cdot T^{-2}) \cdot (A)$$

$$\left. \begin{array}{l} L: 0 = 1 - 2x_7 + y_7 + z_7 \\ M: 0 = x_7 \\ T: 0 = -2 - 2x_7 - y_7 \end{array} \right\} \begin{array}{l} x_7 = 0 \\ y_7 = -2 \\ z_7 = 1 \end{array}$$

und
$$\Pi_7 = Fr_* = \frac{g \cdot d}{U^2}$$

(Aus t):

$$\Pi_8 = t \cdot (A) = T^1 \cdot (A)$$

$$\left. \begin{array}{l} L: 0 = -2x_8 + y_8 + z_8 \\ M: 0 = x_8 \\ T: 0 = 1 - 2x_8 - y_8 \end{array} \right\} \begin{array}{l} x_8 = 0 \\ y_8 = 1 \\ z_8 = -1 \end{array}$$

und
$$\Pi_8 = \frac{U \cdot t}{d}$$

Es ist also:

$$F(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_8) = 0$$

oder

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_8)$$

oder

$$F\left(\frac{K}{d}, \frac{\rho \cdot U^2}{\gamma_s \cdot d}, \frac{U \cdot d}{v}, \frac{d}{h}, \frac{\rho_s \cdot U^2}{\gamma_s \cdot d}, \frac{D}{d}, Fr_*, \frac{U \cdot t}{d}\right) = 0$$

oder

$$\frac{K}{d} = f\left(\frac{\rho \cdot U^2}{\gamma_s \cdot d}, \frac{d}{h}, \frac{U \cdot d}{v}, Fr_*, \frac{D}{d}, \frac{U \cdot t}{v}\right) \quad (57)$$

(1) (2) (4) (3) (6) (5) (7)

-Das dimensionslose Glied $(\rho \cdot U^2) / (\gamma_s \cdot d)$ ist ein durch Shields [50] bekannter Parameter, der den Beginn der Geschiebebewegung charakterisiert, wobei die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit $U_* = \sqrt{\tau_c / \rho}$ durch die mittlere Geschwindigkeit U ersetzt wurde. Zusammen mit dem Glied (6), kann (2) durch den Quotienten U_c / U ersetzt werden, wobei die kritische Geschwindigkeit U_c der Geschiebekörner durch die einfachen Beziehungen von Velikanow (63)

$$U_c = \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g \cdot d} \left(\frac{h}{d}\right)^{0,2} \quad \text{oder} \quad \frac{U_c^2}{2g} = 15d \text{ (mm)} + 6 \text{ (mm)} \quad (58)$$

gegeben werden.

-d/h stellt die relative Rauigkeit dar, die im Quotienten

$$\frac{U_c}{U} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) \cdot g \cdot d}{g \cdot h}} \cdot \frac{(d/h)^{0,2}}{Fr} = \frac{1,2846}{Fr} \left(\frac{d}{h}\right)^{7/10} \quad (59)$$

enthalten sind, und Fr die Froudesche Zahl des Abflußvorganges.

- Ud/v ist eine Art Re-Zahl der Körner, die im Fall der voll ausgebildeten Rauigkeit unter dem Parameter (4) berücksichtigt werden kann. Bei größeren Körnern kann sie vernachlässigt werden.

- Ut/d gibt die zeitliche Entwicklung des Kolkes, die beim Betrachten des Endkolkezustandes vernachlässigt wird. Sie wird im Kapitel 5.1 genauer untersucht.

Unter Berücksichtigung des oben Erwähnten bekommt man für die relative Kolktaiefe die Beziehung:

$$\frac{K}{d} = f_1\left(\frac{U_c}{U}, \frac{D}{h}\right)$$

und weil $U_c/U = f_2(d, h, U)$ oder $d = f_3(U_c/U, h, U)$ ist, erhält man die Beziehung:

$$\frac{K}{h} = f\left(\frac{U_c}{U}, \frac{D}{h}\right), \quad (60)$$

wobei folgende wichtigen Parameter der Kolkbildung berücksichtigt werden:

$$h, d, U, D, g, \rho_s, \rho$$

Im Kapitel 5. ist die Funktion (60) auf Grund der durchgeführten Versuchsreihe gegeben. Es sind sowohl für die Kolk-

länge als auch für die Kolktiefe Formeln angegeben, mit denen auf einfachem Wege diese Kolkdimensionen berechnet werden können.

Für die praktische Anwendung kann das Diagramm der Abb. 22 verwendet werden [58], das die kritische Geschwindigkeit U_c in Abhängigkeit vom Korndurchmesser des Sohlenmaterialies angibt ($\gamma_s = 2,65 \text{ t/m}^3$). Die gegebene Kurve gilt nur für Wassertiefen größer als ein Meter.

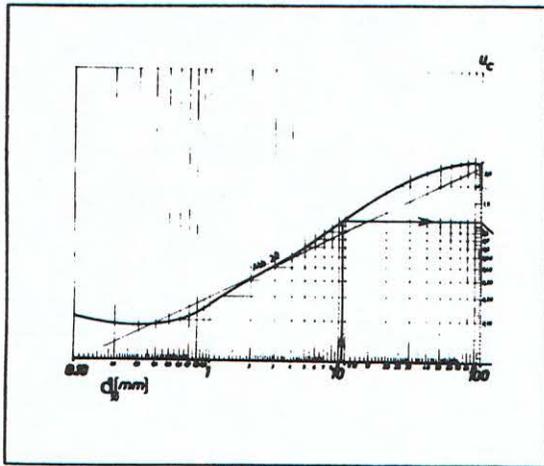


Abb. 22 Diagramm für die Bestimmung der kritischen Geschwindigkeit U_c des Sohlenmaterialies [58]

4. DIE MODELLEVERSUCHE

4.1 Das Versuchsprogramm

Die Einflußgrößen für die Kolkdimensionen sind nach den bisherigen Untersuchungen:

- h Die Wassertiefe,
- U Die Wassergeschwindigkeit,
- q Die spezifische Wassermenge,
- d_m Der maßgebende Korndurchmesser des Geschiebes unter der Annahme, daß eine Kornverteilung durch eine einzige Größe dargestellt werden kann. Dazu wurde der nach Meyer-Peter maßgebende Korndurchmesser eingeführt

$$d_m = \frac{\int d \cdot \Delta p}{100} \approx d_{50}$$

- D Der Pfeilerdurchmesser
- t Die Zeit

Der Problemstellung gemäß wurden in der Arbeit die Fälle ohne und mit Geschiebetransport von oberstrom untersucht.

Runde Brückenpfeiler sind im allgemeinen nur in solchen Flüssen zu erwarten, deren Kenngrößen sich innerhalb des nachfolgenden angegebenen Variationbereiches bewegen:

Spezifische Wassermenge	q: 2-15m ³ /s.m
Wassergeschwindigkeit	U: 1-5 m/s
Wassertiefen	h: 1,5-5 m
Korndurchmesser des Geschiebes (d_{50})	d: 1-70 mm
Pfeilerdurchmesser	D: 1-4 m

Für diese Bereiche ergeben sich bei einem praktikablem Modellmaßstab von 1:25 folgende Modellgrößen nach dem Froudeschen Ähnlichkeitsgesetz

Für die Längen:

$$L_N/L_M = \lambda = 25$$

Für die Geschwindigkeiten:

$$U_N / U_M = \lambda^{1/2} = 5$$

Für die Wassermengen:

$$Q_N / Q_M = \lambda^{5/2} = 3125$$

und

$$q_N / q_M = \lambda^{3/2} = 125$$

Für die Gerinnerauigkeit unter Zugrundelegen der Strickler-Formel bekommt man:

$$\frac{U_N}{U_M} = \frac{k_{sN} \cdot R_N^{2/3} \cdot J^{1/2}}{k_{sM} \cdot R_M^{2/3} \cdot J^{1/2}}$$

oder

$$\lambda^{1/2} = \frac{k_{sN}}{k_{sM}} \cdot \lambda^{2/3}$$

oder

$$k_{sN} : k_{sM} = 1 : \lambda^{1/6}$$

Da

$$k_{sN} = \frac{C_0}{d_N^{1/6}} \quad \text{bzw.} \quad k_{sM} = \frac{C_0}{d_M^{1/6}} \quad \text{ist,}$$

ergibt sich:

$$\frac{k_{sN}}{k_{sM}} = \frac{1}{\lambda^{1/6}} \quad \text{oder} \quad \frac{d_N}{d_M} = \lambda = \lambda_s = 25$$

Zur Wahl des Geschiebes gilt nach Yalin [63] die Beziehung:

$$\lambda_{\gamma_s} \cdot \lambda_s \cdot \lambda^{-1} = 1$$

mit λ = Längenmaßstab
 λ_{γ_s} = Maßstab der Korneinheitsgewichte
 λ_s = Ähnlichkeitsmaßstab zweier geometrisch ähnlicher Sohlenflächen.

Für $\lambda_{\gamma_s} = \lambda$ ergibt sich $\lambda_{\gamma_s} = 1$, d.h., daß das Geschiebe im Modell und in der Natur dasselbe spezifische Gewicht haben müssen. Für die Versuche wurde Quarzsand mit $\gamma_s = 2,65 \text{ t/m}^3$ verwendet.

Zur Entwicklung eines Versuchsprogrammes unter Berücksichtigung dieses Maßstabes wurden im Modell die unten stehenden Größen variiert.

Größe	$\lambda = 25$	Natur Gr.	Modell Gr.	Gewählte Variationsgr.
$d_m \approx d_{50}$	1:25	10-70mm	0,4-3,0mm	0,63 [mm] 1,15 3,3
D	1:25	1,5-4 m	6 -16 cm	5 [cm] 10 12,5 15
q	1:125	$2-15 \frac{\text{m}^3}{\text{s.m}}$	$16-170 \frac{\text{lt}}{\text{s.m}}$	30 $\left[\frac{\text{ltr}}{\text{s.m}} \right]$ 60 120
Fr	/-/	0,15-0,6	0,15-0,60	0,20 0,30 0,40 0,60

Aus den Größen Fr_i und q_i errechneten sich für die einzelnen Fälle die h_i und U_i -Werte nach:

$$h_i = \sqrt[3]{\left(\frac{q}{Fr_i}\right)^2 \cdot \frac{1}{g}} \quad \text{und} \quad U_i = \frac{q_i}{h_i}$$

und ergaben die Werte-Paare der Tafel 60.1 .

Es ist klar, daß die Variation zweier geometrischer Größen (Korn- und Pfeilerdurchmesser) für das zugrunde gelegte Froude-Ähnlichkeitsgesetz überflüssig ist. Dennoch wurden auch diese Größen variiert, um die Gültigkeit des Ähnlichkeitsgesetzes und der dimensionslosen Kolk-tiefen-Formel zu prüfen.

Tafel 60.1

q [litr/s.m ²]	Fr [-]	h [m]	U [m/s]
30	0,20	0,1319	0,2275
	0,30	0,1006	0,2981
	0,40	0,0831	0,3611
	0,60	0,0634	0,4732
60	0,20	0,2093	0,2896
	0,30	0,1598	0,3756
	0,40	0,1319	0,4550
	0,60	0,1030	0,5820
120	0,20	0,3323	0,3611
	0,30	0,2536	0,4732
	0,40	0,2093	0,5732
	0,60	0,1598	0,7511

Bei der Untersuchung der Kolkbildung im Modell mit einheitlichem Korn muß anstelle des maßgebenden Korndurchmessers d_m der Wert des d_{90} der Natur unter dem entsprechenden Maßstab eingesetzt werden, da es sich um den Grenzzustand handelt, bei dem eine natürliche Abpflasterung in der Kolkwanne stattfindet. [15]. Für die Modellversuche gilt also:

$$d_{50, \text{Mod.}} = d_{90 \text{Nat.}} \cdot \lambda \quad (61)$$

Die Kornzusammensetzung der verwendeten Geschiebearten ist in Abb. 23 dargestellt.

Die Kombination der drei verwendeten Kornmischungen (d_1, d_2, d_3), der vier Pfeilerdurchmesser (D_1, D_2, D_3, D_4), der drei Wassermengen (q_1, q_2, q_3) und der vier Froudeschen Zahlen (Fr_1, Fr_2, Fr_3, Fr_4) führte zu dem folgenden Versuchsprogramm: $d_i D_j q_k Fr_l$ mit $i, j, k, l = 1, 2, 3, 4$ Versuche, die alle nicht durchgeführt werden konnten, da manche extreme Fließbedingungen unklare Kolkcharakteristiken erzeugten.

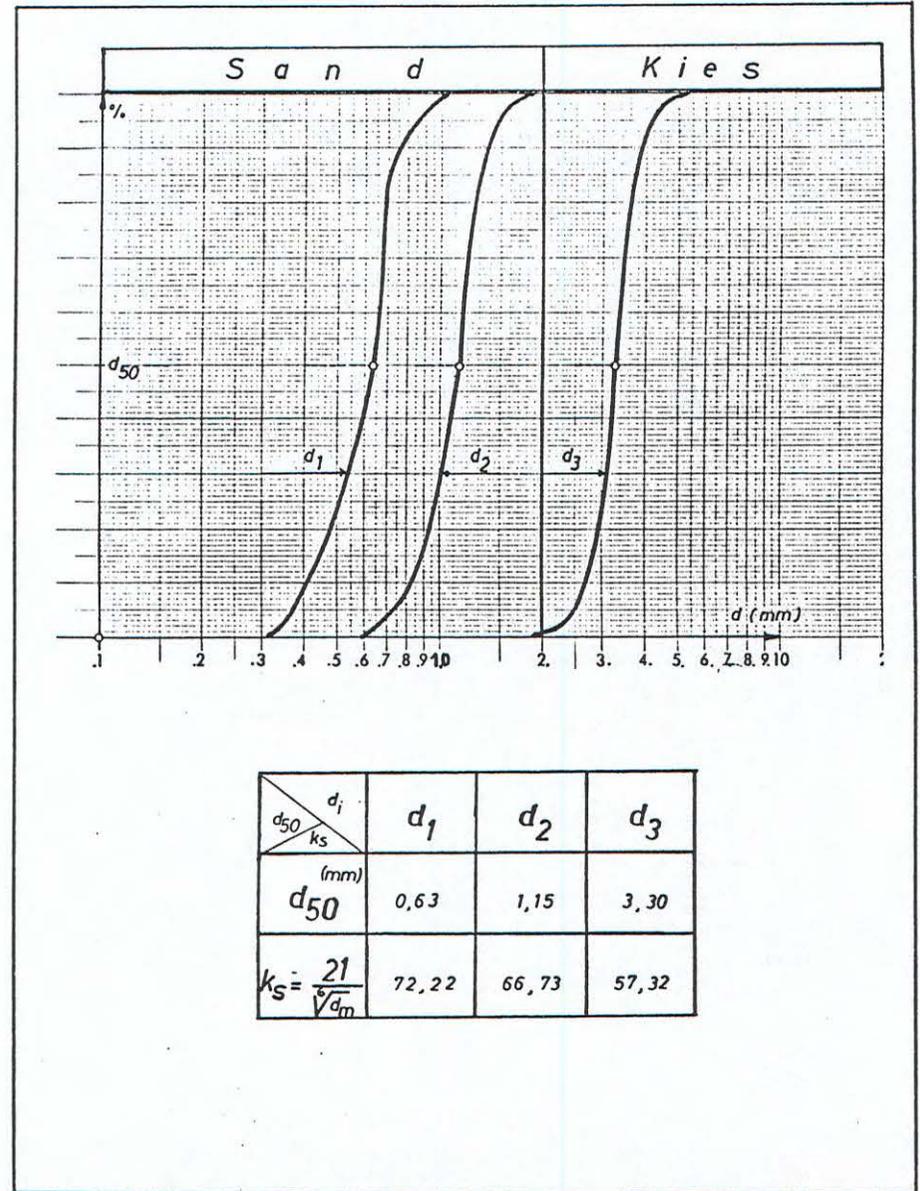


Abb. 23 Kornzusammensetzung der verwendeten Geschiebematerialien

Tafel 62.1 Schema des durchgeführten Versuchsprogrammes

$d_i = d_1, d_2, d_3$			
$d_1 D_1 q_1 Fr_1$	$d_1 D_2 q_1 Fr_1$	$d_1 D_3 q_1 Fr_1$	$d_1 D_4 q_1 Fr_1$
$d_1 D_1 q_1 Fr_2$	$d_1 D_2 q_1 Fr_2$	$d_1 D_3 q_1 Fr_2$	$d_1 D_4 q_1 Fr_2$
$d_1 D_1 q_1 Fr_3$	$d_1 D_2 q_1 Fr_3$	$d_1 D_3 q_1 Fr_3$	$d_1 D_4 q_1 Fr_3$
$d_1 D_1 q_1 Fr_4$	$d_1 D_2 q_1 Fr_4$	$d_1 D_3 q_1 Fr_4$	$d_1 D_4 q_1 Fr_4$
$d_1 D_1 q_2 Fr_1$	$d_1 D_2 q_2 Fr_1$	$d_1 D_3 q_2 Fr_1$	$d_1 D_4 q_2 Fr_1$
$d_1 D_1 q_2 Fr_2$	$d_1 D_2 q_2 Fr_2$	$d_1 D_3 q_2 Fr_2$	$d_1 D_4 q_2 Fr_2$
$d_1 D_1 q_2 Fr_3$	$d_1 D_2 q_2 Fr_3$	$d_1 D_3 q_2 Fr_3$	$d_1 D_4 q_2 Fr_3$
$d_1 D_1 q_2 Fr_4$	$d_1 D_2 q_2 Fr_4$	$d_1 D_3 q_2 Fr_4$	$d_1 D_4 q_2 Fr_4$
$d_1 D_1 q_3 Fr_1$	$d_1 D_2 q_3 Fr_1$	$d_1 D_3 q_3 Fr_1$	$d_1 D_4 q_3 Fr_1$
$d_1 D_1 q_3 Fr_2$	$d_1 D_2 q_3 Fr_2$	$d_1 D_3 q_3 Fr_2$	$d_1 D_4 q_3 Fr_2$
$d_1 D_1 q_3 Fr_3$	$d_1 D_2 q_3 Fr_3$	$d_1 D_3 q_3 Fr_3$	$d_1 D_4 q_3 Fr_3$
$d_1 D_1 q_3 Fr_4$	$d_1 D_2 q_3 Fr_4$	$d_1 D_3 q_3 Fr_4$	$d_1 D_4 q_3 Fr_4$

Nach Beendigung der einzelnen Versuche wurden die Kolkabmessungen registriert und der Endkolk mit Schnüren ausgelegt und fotografiert (Abb.24) und gezeichnet (Anlage 10).

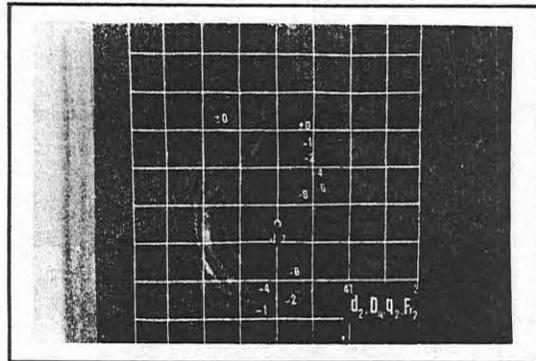


Abb. 24 Endkolkzustand

Die vor Beginn des Versuchsprogramms auftauchenden Fragen, z.B. über die Versuchsdauer bis zum Endkolkzustand und über den Einfluß der Lagerungsdichte des Sohlenmaterialies auf den Kolkvorgang u.a., wurden in besonderen Vorversuchen geklärt.

4.2 Die Versuchsanordnung

4.2.1 Die Ermittlung der Kanalbreite

In der Versuchsrinne sollten die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen U_0 und U_x kleiner als 2% sein (Vgl. Abb.25). Nach der Potentialtheorie gilt:

$$U_x = U_0 \left(1 + \frac{d^2}{B^2} \right)$$

und für die Voraussetzung $U_x \leq 1,02 U_0$ folgt:

$$B = \frac{D}{\sqrt{\frac{U_x}{U_0} - 1}} = \frac{D}{\sqrt{1,02-1}} = 7 D$$

für den größten Pfeiler mit $D=15\text{cm}$ ergibt sich die Kanalbreite mit $B=1,0\text{m}$.

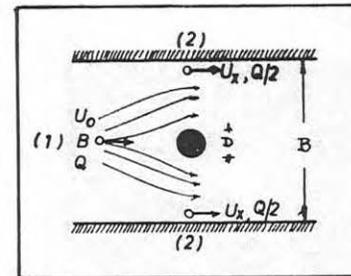


Abb. 25 Geschwindigkeitsverteilung in der Versuchsrinne

Die Gerinneabmessungen betragen schließlich 1,00 m Breite, 0,80 m Tiefe, und 15 m Länge. Das Gerinne war lang genug um gleichzeitig zwei Kolkversuche störungsfrei hintereinander durchzuführen. Um einen rationellen Versuchsbetrieb zu ermöglichen wurden zwei genau gleiche Gerinne mit auswechselbaren Pfeilern nebeneinander gebaut. Eine der beiden Rinnen wurde im Bereich der Pfeiler seitlich

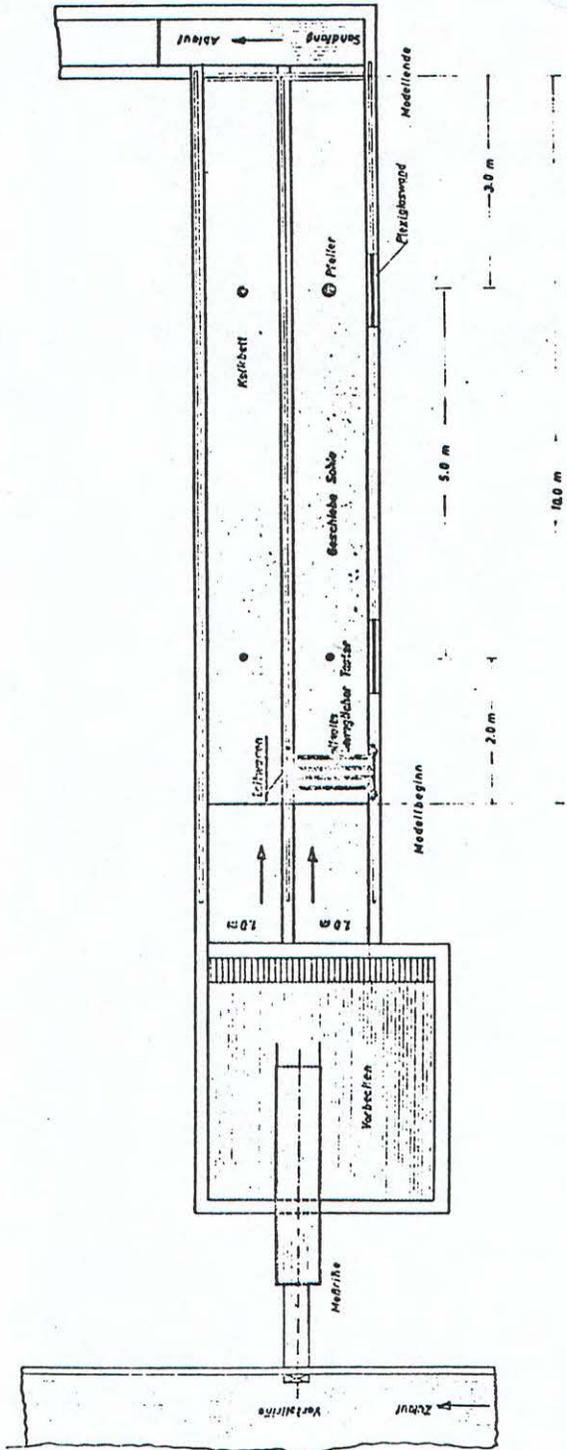
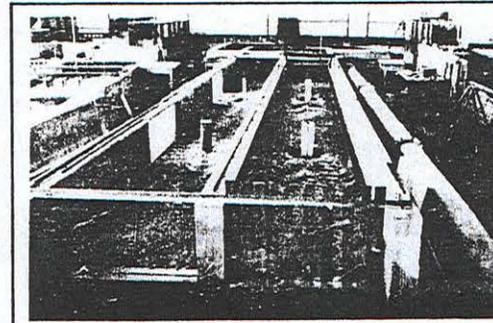
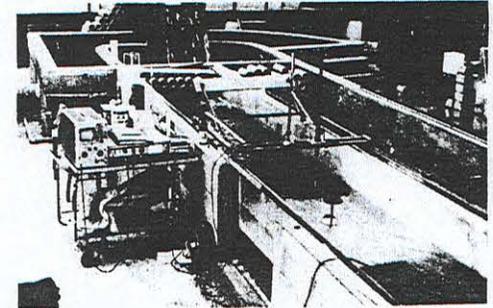


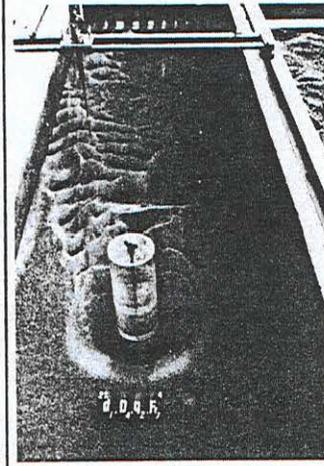
Abb. 26
Modellanordnung
Grundriß im



Versuchsanordnung
von unterstom



Meßapparatur



Kolkwanne nach Ablauf
der Versuchszeit

Abb. 27 Versuchsanordnung, Meßapparatur

mit Plexiglasscheiben ausgestattet, um genaue Beobachtungen und das Photographieren zu ermöglichen. In den Abb. 26 und 27 ist die gesamte Versuchsanordnung dargestellt.

Am Gerinneende wurde die Sohle durch eine Endschwelle fixiert hinter der ein Geschiebefang eingebaut wurde. Zwei Pumpen mit zusammen 600 l/sec Leistung versorgten eine Verteilrinne, die das Wasser in zwei Meßrinnen abgab, die zur genauen Abstimmung der Abflußmenge mit einem scharfkantigen Meßwehr (Poncelet-Überfall) ausgestattet waren. Die Bestimmung der Überfallhöhe wurde mit einem OW-Pegel durchgeführt, dessen mm-Skala mit einem Nonius auf 1/10 mm Genauigkeit abzulesen gestattete. Damit konnte die Genauigkeit des Wassermengendurchflusses auf $\pm 1\%$ genau angegeben werden. Nach dem Überfall folgte ein Beruhigungsraum, an den sich die eigentliche Versuchsrinne anschloß.

Am Ende des Versuchskanals waren bewegliche Staubleche angeordnet, die eine genaue Einstellung des Wasserspiegels erlaubten.

Vor Versuchsbeginn wurde die Rinne langsam und störungslos aus im Boden verlegten Füll-Rohren gefüllt.

Zur Bestimmung der Wassertiefen bzw. der Kolkiefen wurde ein verfahrbarer Meßwagen mit einem Pegel verwendet, dessen genau einnivellierte Schienen auf den Wänden des Versuchskanals einbetoniert waren. Mit dem Pegel des Meßwagens konnte jeder Punkt im Gerinne erreicht werden.

Nach Beendigung eines Versuches wurde das Wasser durch zwei andere Dränagerohre sukzessiv abgeführt und bei je zwei Zentimeter Höhendifferenz eingespiegelt. Dadurch ergaben sich die genauen Höhenlinien des Kolkes, die mit schwarzem Wollfaden ausgelegt und photographiert (Abb. 24, Seite 62) bzw. mit Hilfe eines Rasters auf mm Papier übertragen wurden [22].

Für die Messung der Geschwindigkeitsprofile wurde ein empfindlicher Mikroflügel (60 Impulse/Umdrehung) verwendet, der

an einem Ott-Pegel befestigt war. Die ganze Konstruktion war wieder an dem Meßwagen befestigt, so daß eine Bewegung nach den x,y,z Koordinaten möglich war. Eine Digital-Meßeinrichtung zeigte die von dem Flügel abgegebenen Impulse, aus denen später mittels Eichkurven die Fließgeschwindigkeiten bestimmt wurden.

Die Geschwindigkeitsprofile wurden punktweise nach Messungen, bestimmt, die in Abständen von 0,5 cm entlang einer Lotrechten durchgeführt wurden. An jedem Punkt wurden 30 Messungen von je 15 sec Dauer durchgeführt und daraus das arithmetische Mittel errechnet.

Nach Durchführung der Versuchsreihe wurde ein besonders ausgewählter Versuch wiederholt und die Kolkwanne mit einer Lösung von Wasserglas und Calciumchlorid stabilisiert und mit Sprühlack auch an der Oberfläche befestigt. Dies war nötig, um bei der Durchführung der Geschwindigkeitsmessungen eventuelle Rutschungen an den Kolkböschungen zu vermeiden und die empfindliche Meßapparatur vor Geschiebeschlag zu schützen. Schließlich wurden auch bei ebener, befestigter Sohle Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Die weiße Lackierung hatte noch den Vorteil, auf Photographien den Kolk gut sichtbar werden zu lassen.

4.3 Die Versuchstechnik

Vor Beginn jedes Versuches wurde die Sohle mit dem Spezialleitwagen ausgeglichen. Dann wurde das Versuchsgerinne mit Wasser von untenher bis zur gewünschten Wassertiefe gefüllt. Die Wasserleitung wurde geöffnet und das Staubrett am Ende der Rinne herausgenommen.

Nach Ablauf der vorgesehenen Versuchszeit wurde in umgekehrter Weise verfahren.

Am Ende des Versuches wurden Geschiebeprouben aus der Kolkwanne entnommen. Bei der anschließend vorgenommenen Siebanalyse zeigte sich, daß diese Proben dem d_{50} des Geschiebematerials ent-

sprachen. Das heißt, daß eine Abpflasterung nicht stattfand, da die Siebkurven des verwendeten Modellgeschiebes fast senkrecht verliefen.

5. DIE VERSUCHSERGEBNISSE

5.1 Allgemeines

Die Ursachen des Kolkvorganges wurden im Kapitel 3.2. ausführlich beschrieben und erklärt. Bei den Beobachtungen mit und ohne Geschiebezufuhr zeigte sich, daß der am Fuße des Pfeilers sich bildende Spiralwirbel das bewegliche Material der Sohle mitreißt und sie bis zu einer beträchtlichen Tiefe auskolkt. Das Geschiebe wird aufgewirbelt, in die Höhe gerissen und fast schwebend über die unterstromige Böschung in gelegentlich spiralförmiger Bewegung fortgetragen. Die weitere Vertiefung des Kolkes hängt von der Stabilität der Sohle ab.

Ohne Geschiebezufuhr ($U_c > U$) von oberstrom vertieft sich der Kolk weiter bis zu einem Zeitpunkt, an dem die Strömungsenergie nicht mehr ausreicht das Geschiebe aus der Kolkwanne zu transportieren. Diese Situation wird als "Endkolkzustand" definiert und ist auch der eigentliche Gegenstand dieser Untersuchung. Die während des Versuches ununterbrochen kreisende Bewegung des Geschiebes im Kolk wird gegen den Endzustand stark abgeschwächt, bis sich nur noch selten einzelne Steine bewegen. So betrachtet, ist die Wirkung des Abriebes auf die Kolkabmessungen ohne Bedeutung. In der Natur führt die ganze Materialbewegung zu einer Entmischung und Sortierung des Sohlengeschiebes [15]. Das grobkörnige Material verbleibt in der Kolkwanne und erzeugt Deckschichten, welche die weitere Kolkentwicklung abbremsen und schließlich zum Stillstand kommen lassen, während das feinere Material vom Wasser abtransportiert wird. Im Modell war diese Sortierung des Sohlengeschiebes nicht zu sehen, da das verwendete Quarz-Geschiebe, wie schon erwähnt, aus fast einkörnigem Material bestand.

Mit Geschiebezufuhr ($U_c < U$) von oberstrom ergibt sich ein anderes Erscheinungsbild der Kolkentwicklung. Es tritt kein endgültiger Ruhezustand auf. Die in einem engen Schwankungsbe-

reich sich ständig ändernde Kolktiefe kann sinnvoll mit einem Mittelwert angegeben werden. Sie ist im Falle der Geschiebebewegung viel kleiner als bei ruhender Sohle.

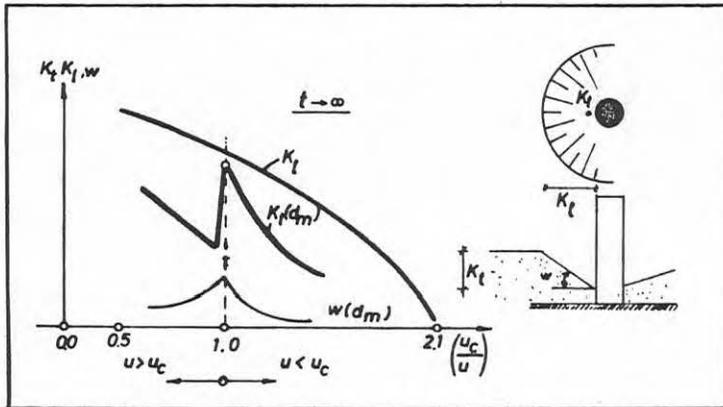


Abb. 28 Abhängigkeit der Kolktiefe, der Kolklänge und des Böschungswinkels von der kritischen Geschwindigkeit des Geschiebematerialies

Die Kolklänge zeigt (Abb. 28), unabhängig von der Beweglichkeit der Sohle, einen stetigen Verlauf.

Die Kurve "Böschungswinkel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit" hat eine Unstetigkeit an der Stelle $U_c/U=1$, da sie von der Kolktiefe abhängt.

5.2 Die Vorversuche

Vorversuche wurden durchgeführt zur Bestimmung:

- der minimalen Versuchsdauer zur Erreichung des Endkolkzustandes,
- des Einflusses der Lagerungsdichte des Sohlenmaterialies auf den Kolkvorgang,
- des notwendigen Abstandes der beiden Pfeiler in einem Gerinne, um eine gegenseitige Beeinflussung mit Sicherheit ausschließen zu können.

Die Ergebnisse der Vorversuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

5.2.1 Die minimale Versuchsdauer

Um Kenntnis über die mindest erforderliche Versuchsdauer zu bekommen, wurden mit jeder der 3 Geschiebearten und mit verschiedenen Fließgeschwindigkeiten Versuche durchgeführt, welche, je nach Geschiebegröße bis zu 7 Tage lang dauerten. Während dieser Versuchsdauer wurden in den Zeitpunkten 15 min, 1/2 Stunde, 2 Stunden, 4 Stunden, 6 Stunden, 24 Stunden und Endzeit Messungen der Kolkdimensionen durchgeführt und Photos aufgenommen.

In Abb. 29 ist die Auswertung der Dauerversuche in Prozenten der Endkolktiefe (K_t/K_∞ (y-Achse)) als Funktion der Zeit (x-Achse) dargestellt. Als dritter Parameter wurde der Faktor U_c/U , der eine Aussage über die Stabilität der Sohle liefert, gewählt und nicht Parameter, die den Korndurchmesser beschreiben. Aus den Darstellungen geht klar hervor, daß die zeitliche Kolkentwicklung für den Fall $(U_c/U) < 1$ durch nur eine Kurve und für den Fall $(U_c/U) > 1$ durch eine Kurvenschar zusammenzufassen ist. Dabei ist die zeitliche Entwicklung der Kolktiefe für beide Fälle unabhängig vom Pfeilerdurchmesser.

Die für $(U_c/U) < 1$ ermittelte Kolkzeitkurve zeigt eine rasche Kolkentwicklung an. Ein mittlerer Gleichgewichtszustand ist schon nach einer Stunde erreicht. Mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate wurde folgende Beziehung festgestellt:

$$\frac{K_t}{K_\infty} = 1 - 0,828 \cdot e^{-7,02 \cdot t} \quad (t \text{ in Stunden}) \quad (62)$$

Für $(U_c/U) > 1$ kann ähnlich dem Fall $(U_c/U) < 1$ auch eine mathematische Beziehung aufgestellt werden, die dann folgende Form haben müßte:

$$\frac{K_t}{K_\infty} = 1 - b \left(\frac{U_c}{U} \right) \cdot e^{-c \left(\frac{U_c}{U} \right) \cdot t} \quad (63)$$

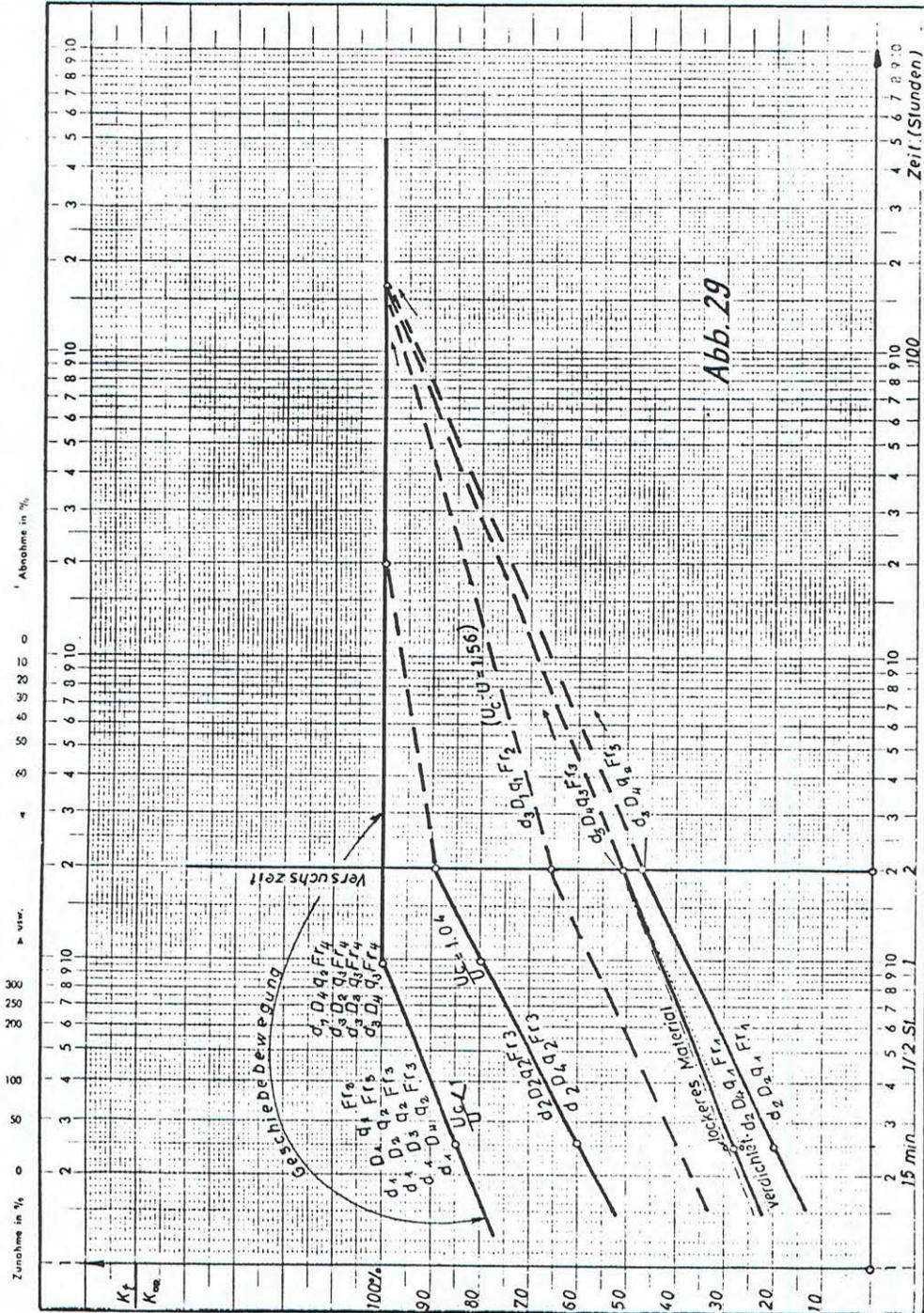


Abb. 29 Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 10000, Einheit 02,5 mm, die andere in mm mit Prozentmaßstab Nr. 369/1, 6 P

Aus der durchgeführten Versuchsreihe wurde deutlich, daß zur Erreichung der Endkolkttiefe drei bis fünf Tage nötig waren und daß für eine konstante Versuchszeit, z.B. 2 Stunden nicht immer die gleiche prozentuale relative Kolkttiefe erreicht wurde.

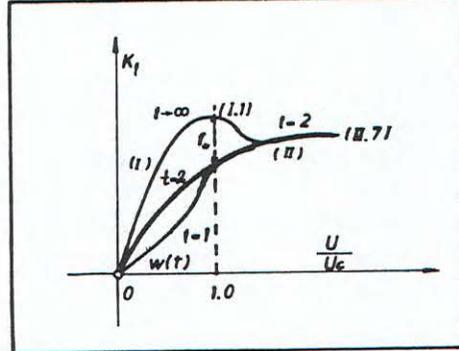


Abb. 30 Kolkttiefe für verschiedene Versuchszeiten

Außerdem wurde festgestellt, daß für eine durchgeführte Versuchsreihe mit verschiedenen Versuchszeiten 1, 2, 3, Stunden sich das Bild der Abb. 30 ergab, womit auch die Diskrepanz zwischen den Ergebnissen verschiedener Verfasser, die sich mit dem Problem beschäftigt haben, zu erklären ist. Für den ansteigenden Ast (I) der Kurven in der Abb. 30 stellten sich jedes Mal je nach Versuchszeit verschiedene Steigungswinkel ein, wobei aber der Verlauf der $K=f(U/U_c)$ Linie (II) für $U/U_c \geq 1$ immer derselbe blieb.

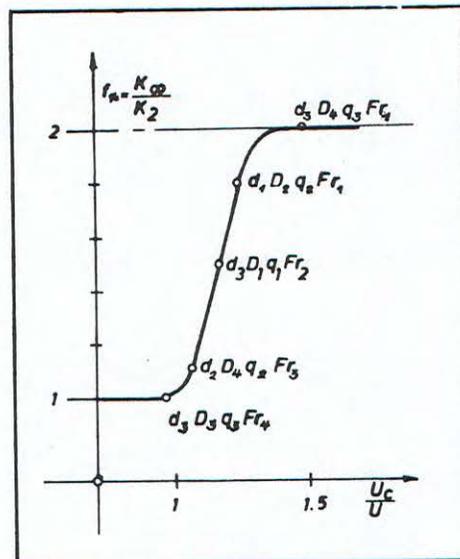


Abb. 31 Der Kolkzeitfaktor

Von diesen Überlegungen ausgehend, wurde eine Versuchszeit von 2 Stunden festgelegt, welche zwischen den beiden Ästen I und II einen kontinuierlichen Verlauf ergab. Um da-

raus eine eindeutige Aussage über den Endkolkzustand K_{∞} machen zu können, wurde die Funktion $K_{\infty}/K_2 = f_*(U_c/U)$ in Abhängigkeit von der relativen Geschwindigkeit des Sohlenmaterials untersucht. Die Kenntnis dieser Funktion ermöglichte es, für einen bekannten U_c/U -Wert den Faktor f_* zu bestimmen (Abb. 31), mit welchem die zweistündige Modellkolkentiefe multipliziert werden müßte, um die Endkolkentiefe im Modell zu bekommen. Es ist klar, daß für $(U_c/U) \leq 1,0$ ($f_* = 1,0$) f_* konstant blieb, da schon nach einer Stunde die maximale Kolkentiefe erreicht wurde. Der Faktor f_* hatte bei der festgelegten zweistündigen Versuchszeit einen Variationsbereich zwischen $1 \leq f_* \leq 2$ und zeigte, inwieweit die Versuchszeit von 2 Stunden für die Entstehung der maximalen Kolkentiefe zu kurz war. Eine Übertragung der Endkolkentiefe K_{∞} nach dem Froudeschen Ähnlichkeitsgesetz in die Natur ist, wie noch bewiesen wird, durchaus möglich. Möglich ist jedoch nur die Übertragung der Beziehung $K_{\infty N}/K_{\infty M} = \lambda$, während aber auf keinen Fall die Beziehung $(K_{\infty}/K_2)_N = f_*$, in der Natur gilt. Für die Natur gilt die ähnliche Form $(K_{\infty}/K_t)_N = f_*$ für eine unbekannte Zeit t , die jedoch bestimmt werden kann.

Schließlich soll erwähnt werden, daß der Grenzwert $U_c/U=1$ nicht genau bestimmt werden kann. Eine exakte Definition der kritischen Geschwindigkeit ist für ungleichförmiges Geschiebmaterial nicht möglich. Es wäre vielleicht einleuchtend, den unbestimmten Fall $(U_c/U)=1$ zu dem Bereich $(U_c/U) < 1$ zu zählen, da sich "irgendetwas doch immer bewegt". Für die Untersuchung erscheint es jedoch zweckmäßig, den Abschnitt $(U_c/U) > 1$ zu $(U_c/U) \geq 1$ zu erweitern, da hier die gefährlicheren Kolke auftreten; somit liegt man auf der sicheren Seite.

Für die Funktion f_* könnte aus rein wissenschaftlichem Interesse erwähnt werden, daß sie der Approximationskurve (28)

$$f_* = 1 + \left(1 - \frac{U_c}{U}\right)^2 \sum_{n=0}^{n \approx 50} \left(2 - \frac{U_c}{U}\right)^n \left(1 + \frac{U_c}{U}\right)^n \quad (64)$$

für $U_c/U \geq 1$

entspricht. Dann gilt:

$$K_{\infty M} = f_* \cdot K_{2M} \quad (65)$$

und

$$K_{\infty N} = f_* \cdot K_{tN} \quad (65)$$

5.2.2 Einfluß der Lagerungsdichte

Interessant war, die Frage abzuklären, ob im Falle des kohäsionslosen Quarzsand - Geschiebes die Lagerungsdichte des Sohlenmaterials einen Einfluß auf die Kolktenwicklung oder den Endzustand ausübt. Zu diesem Zweck wurden Versuche gefahren, bei denen das Sohlenmaterial in drei Schichten zu je 10 cm [31] eingebracht und mit einem Stampfer sorgfältig verdichtet wurde. Vergleichsversuche wurden mit locker gelegtem Geschiebe durchgeführt.

Ein Unterschied war nur ganz zu Beginn der Versuche festzustellen. Nach spätestens einer Stunde Versuchszeit, waren die Ergebnisse völlig identisch.

5.2.3 Bestimmung des erforderlichen Abstandes zwischen zwei hintereinander stehenden Pfeilern

Um einen möglichst rationellen Versuchsbetrieb zu erreichen,

sollte geprüft werden, ob in einer Rinne zwei Pfeiler hintereinander eingebaut werden können und wie groß ihr Abstand voneinander mindestens sein muß, um eine gegenseitige Beeinflussung auszuschließen.

Die gemessenen Geschwindigkeitsprofile und doppelt gefahrenen Versuche, mit und ohne zweiten Pfeiler, zeigten bei einem Pfeilerabstand von 5 m keine Unterschiede auf die Kolkdimensionen. Eine minimal erhöhte Turbulenz der Strömung konnte durch die etwas unruhigere Wasseroberfläche festgestellt werden, die Kolkdimensionen blieben aber gleich. Der Abstand von 5 m wurde bis zum Ende der Versuchsreihe konstant gehalten.

5.3 Die Hauptversuche

5.3.1 Die Kolkform

Wie aus den Kolkzeitdiagrammen zu ersehen ist, wird bei beweglicher Sohle schon innerhalb einer Stunde eine relativ große Kolkwanne erzeugt, deren Form der Endzustandsform sehr ähnlich ist. Die zeitliche Entwicklung der Kolkform in der Draufsicht ist in Abb. 32 gezeigt und kann während

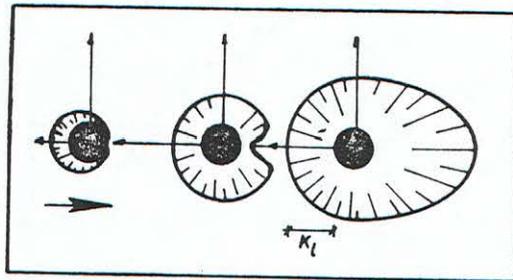


Abb. 32 Zeitliche Entwicklung der Kolkform

der Kolkentwicklung als eine Pascalsche Schnecke und im Endzustand aus einem Kreis und einer Ellipse zusammengesetzt, aufgefaßt werden. Der tiefste Punkt im Kolk erscheint oberstrom am Fuße des Pfeilers, vorwiegend in der Stauebene. Für sehr große U_c/U Werte ($U_c/U > 2,5$) bzw. sehr kleine Geschwin-

digkeiten kann der tiefste Punkt unter einem Winkel von 45° zur Stauebene erscheinen. Dieser Fall braucht aber nicht berücksichtigt zu werden, da er selten in der Natur auftritt und nur kleine Kolkdimensionen erzeugt. Die Kolkform wird für einen konstanten Wert U_c/U nicht von der Geschiebegröße beeinflusst.

5.3.2 Die Kolktiefe

Diese Größe ist bezüglich der Kolkwirkung für die Gründungstiefe des Pfeilers entscheidend.

Den erwähnten Betrachtungen mit Hilfe der Dimensionsanalyse und der Beziehung (60) gemäß, wurde die relative Kolktiefe im Endzustand durch eine Funktion der dimensionslosen Größen

$$\frac{K}{h} = f \left(\frac{D}{h}, \frac{U_c}{U} \right)$$

ausgedrückt. Für verschiedene Korndurchmesser wurden die einander zugehörig gemessenen K/h und D/h Werte mit U_c/U als Parameter in einem Diagramm dargestellt (Abb. 33). Bei der Auswertung der Messergebnisse und der Ermittlung der Kolktaiefenfunktionen, wurden auch die generelle Tendenz in den vier kommenden Bereichen ($U_c/U, D/h$), die Erfahrungen aus dem Geschiebeversuchswesen und die Resultate anderer Forscher (s. umfangreiches Literv.) mitberücksichtigt. Es zeigte sich zusammenfassend für alle Korndurchmesser folgender Kurvenverlauf:

- Für $U_c/U \geq 1$ linearer Verlauf für $0 < D/h \leq 1,0$ und
"exponentieller" für $1,0 < D/h$
- Für $U_c/U < 1$ linearer Verlauf für $0 < D/h \leq 0,5$ und
"exponentieller" für $0,5 < D/h$

Den rein qualitativen Verlauf zeigt die Abb. 35

I. Exponentieller Verlauf

Für den exponentiellen Teil der Kurven ergaben sich nach einer Eintragung der Ergebnisse auf doppelt logarithmischem Papier (Abb. 36) folgende analytische Beziehungen:

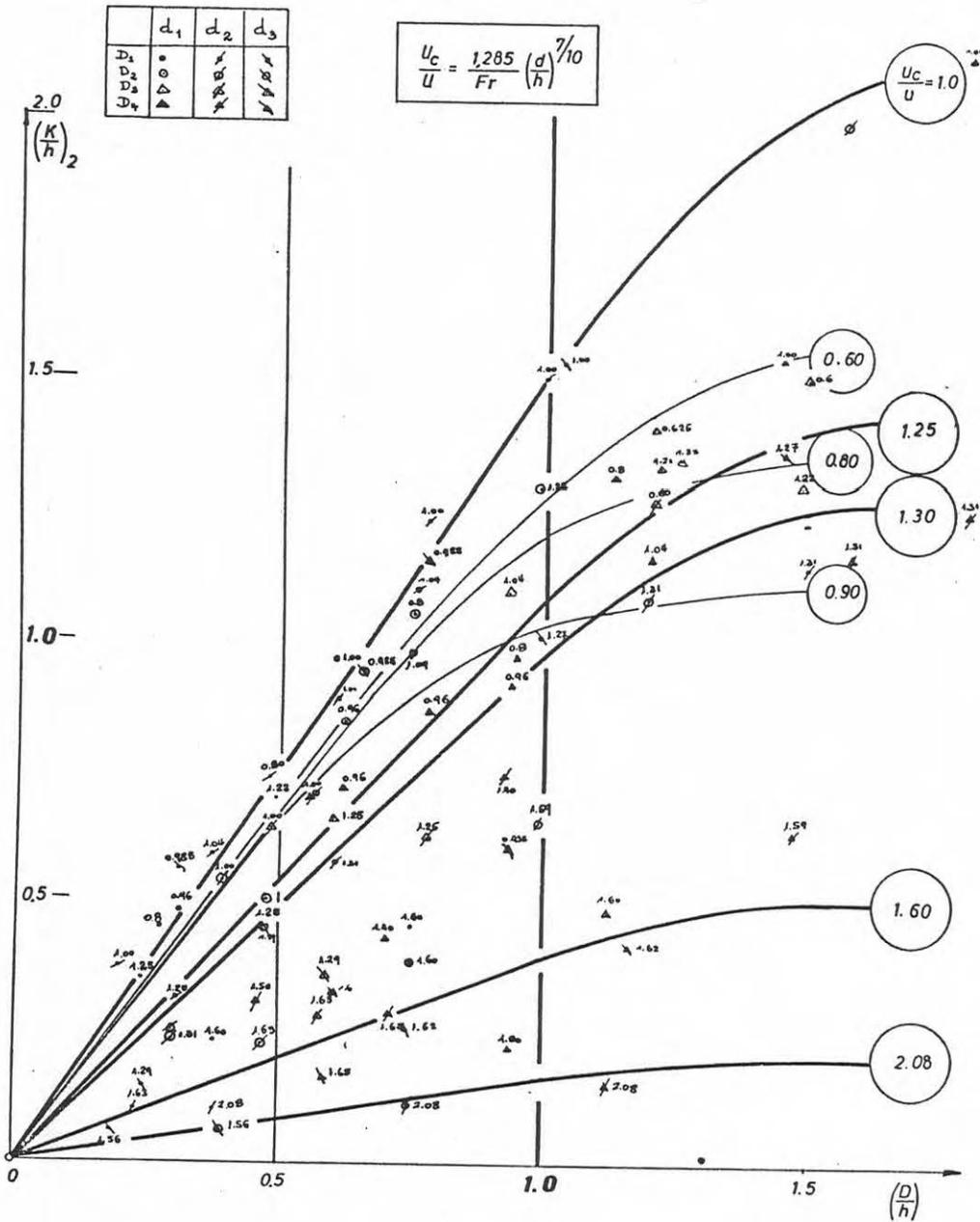


Abb. 33 Abhängigkeit der Pfeiler-Kolkttiefe vom Pfeilerdurchmesser und der relativen kritischen Geschwindigkeit des Sohlenmaterialies.

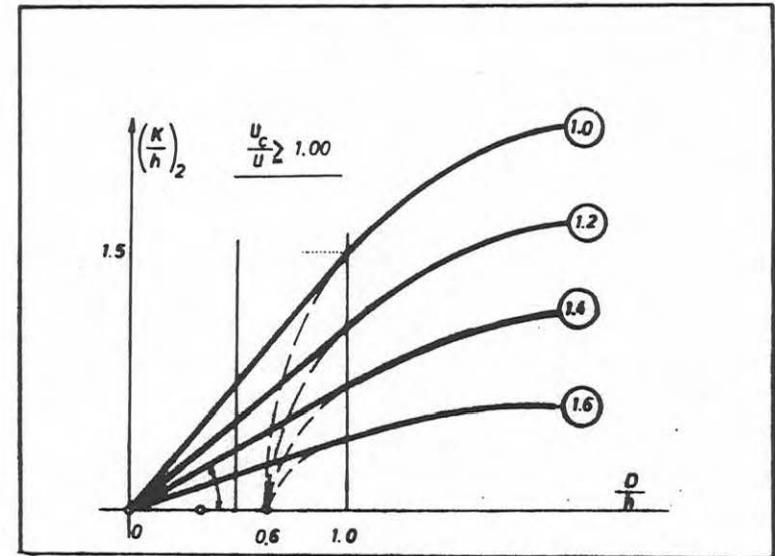


Abb. 34 Qualitativer Kurvenverlauf der Pfeilerkolkttiefe in Abhängigkeit vom Pfeilerdurchmesser und der relativen kritischen Geschwindigkeit des Sohlenmaterialies

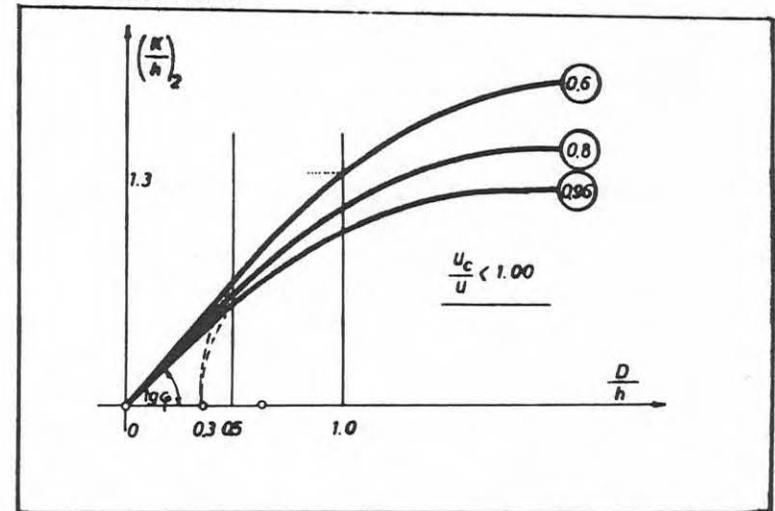


Abb. 35 Qualitativer Kurvenverlauf der Pfeilerkolkttiefe in Abhängigkeit vom Pfeilerdurchmesser und der relativen kritischen Geschwindigkeit des Sohlenmaterialies

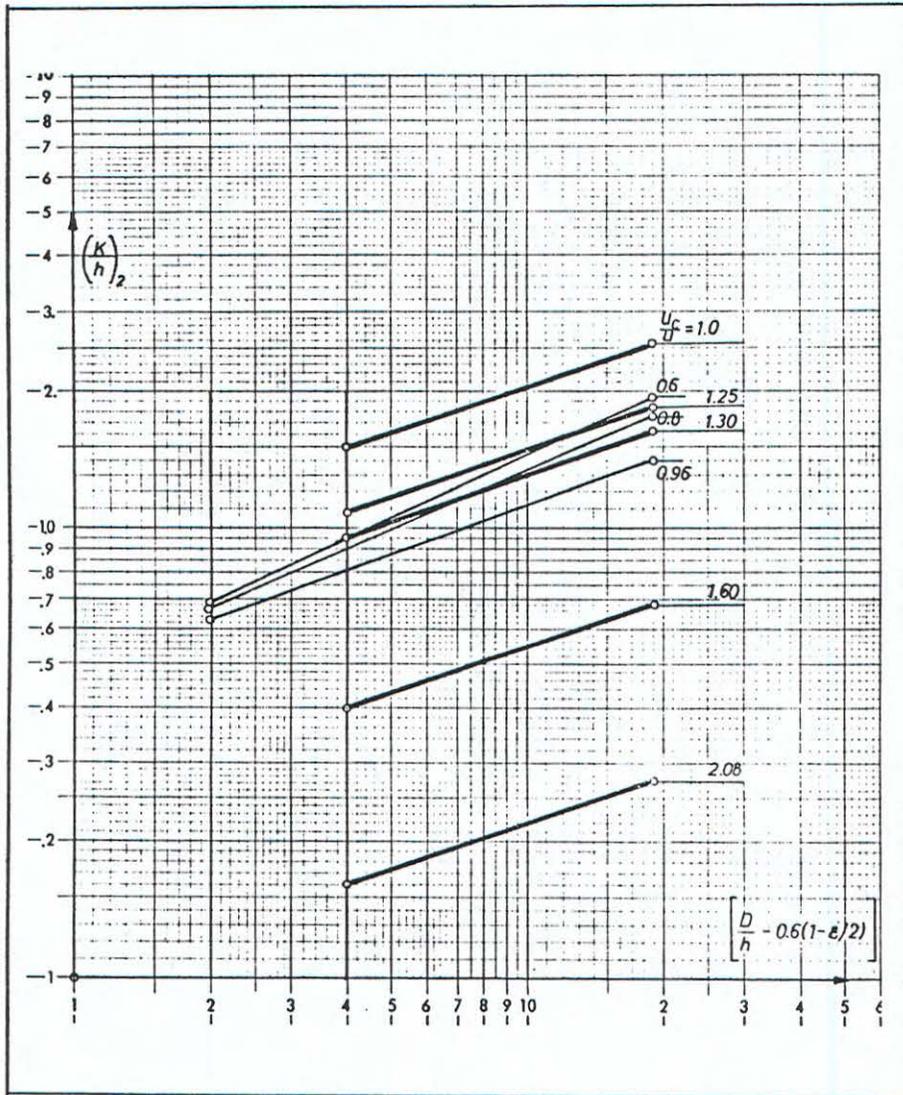


Abb. 36 Exponentieller Teil der Pfeilerkolktiefen-Kurven in Abhängigkeit vom Pfeiler Durchmesser und der relativen kritischen Geschwindigkeit des Sohlenmaterials

a) Für $(U_c/U) \geq 1$ bzw. $D/h \geq 1,0$ ergab sich:

Für $U_c/U = 1,00$ $\left(\frac{K}{h}\right)_2 = 2,10 \left(\frac{D}{h} - 0,60\right)^{1/3}$

" $U_c/U = 1,25$ $\left(\frac{K}{h}\right)_2 = 1,50 \left(\frac{D}{h} - 0,60\right)^{1/3}$

" $U_c/U = 1,30$ $\left(\frac{K}{h}\right)_2 = 1,30 \left(\frac{D}{h} - 0,60\right)^{1/3}$

" $U_c/U = 1,60$ $\left(\frac{K}{h}\right)_2 = 0,53 \left(\frac{D}{h} - 0,60\right)^{1/3}$

" $U_c/U = 2,08$ $\left(\frac{K}{h}\right)_2 = 0,22 \left(\frac{D}{h} - 0,60\right)^{1/3}$

b) Für $(U_c/U) < 1$ bzw. $D/h \geq 0,5$ ergab sich:

" $U_c/U = 0,60$ $\left(\frac{K}{h}\right)_2 = 1,45 \left(\frac{D}{h} - 0,30\right)^{0,35}$

" $U_c/U = 0,80$ $\left(\frac{K}{h}\right)_2 = 1,33 \left(\frac{D}{h} - 0,30\right)^{0,41}$

" $U_c/U = 0,96$ $\left(\frac{K}{h}\right)_2 = 1,12 \left(\frac{D}{h} - 0,30\right)^{0,49}$

Die obenerwähnten Einzelfälle wurden unter der Beziehung

$$\frac{K}{h} = a_1 \left[\frac{D}{h} - 0,60 \left(1 - \frac{1}{2} \cdot e \right) \right]^n \cdot f_* \quad (66)$$

zusammengefaßt, wobei f_* aus Abb.31 oder aus der Beziehung (64) ermittelt werden kann. e, n und a_1 sind Parameter mit folgenden Werten, die mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt wurden:

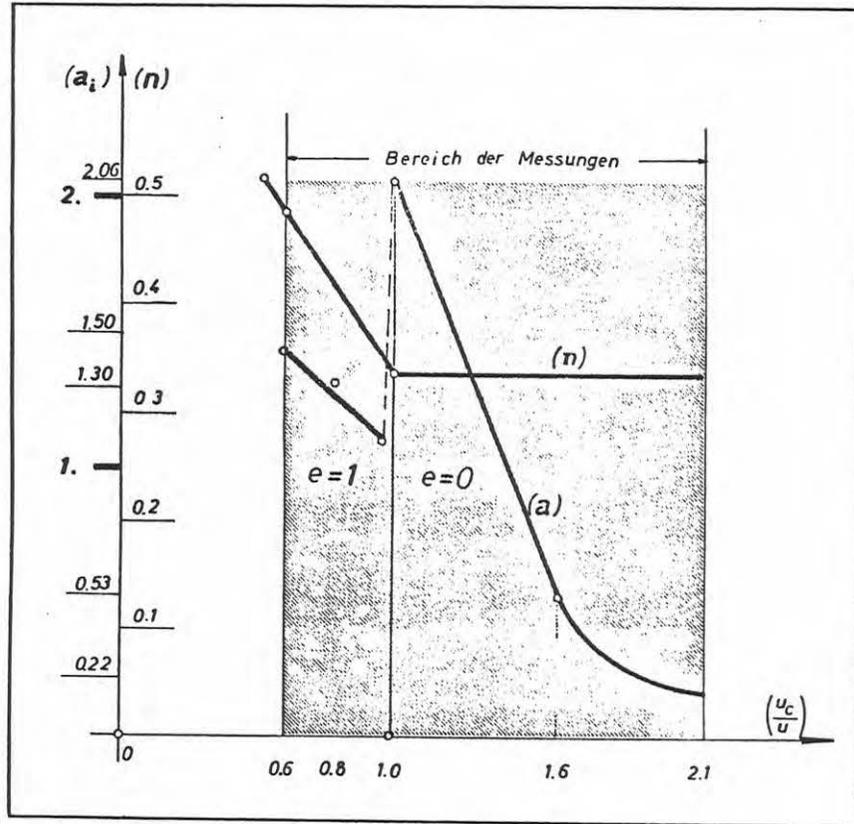


Abb. 37 a_1, n Parameter der Kolk-tiefen-Formel in Abhängigkeit von der kritischen relativen Geschwindigkeit des Sohlenmaterials

$e = 0$	für $U_c/U \geq 1,00$	stabile Sohle	(67)
$e = 1$	" $U_c/U < 1,00$	bewegliche Sohle	

Nach einer Eintragung der n, a_1 -Werte in Abhängigkeit von U_c/U (Abb. 37, 38) konnten folgende Beziehungen angegeben werden:

$$n = \frac{1}{3} + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{U_c}{U} \right) \cdot e \quad (68)$$

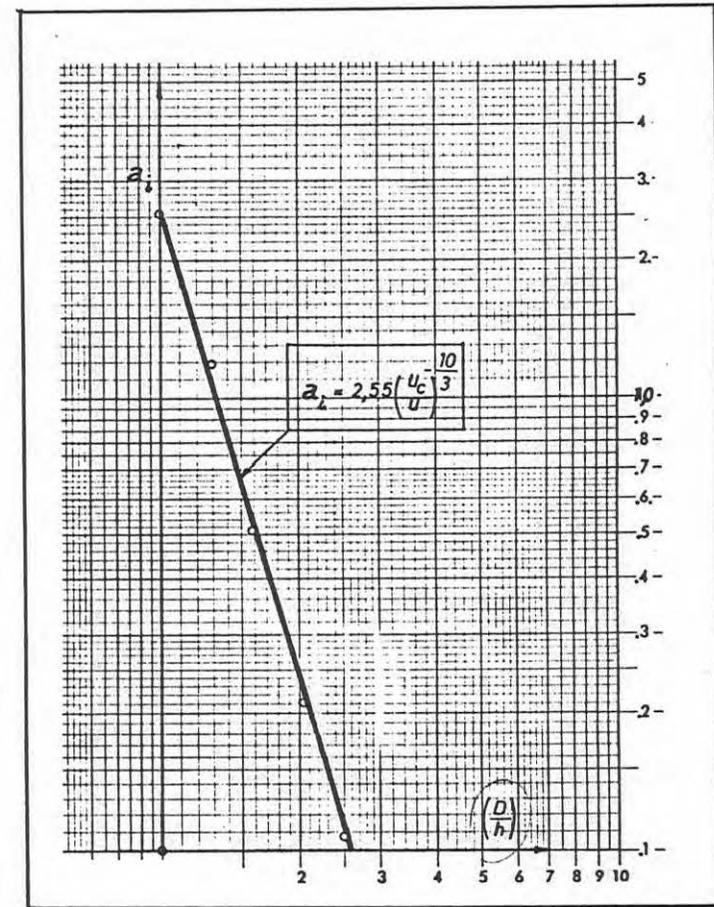


Abb. 38 Abhängigkeit des a_1 -Parameters der Kolk-tiefen-Formel von der relativen kritischen Geschwindigkeit des Sohlenmaterials

$a_1 = 2,00 - 0,88 (U_c/U)$	für $U_c/U < 1$	
$a_1 = 4,65 - 2,55 (U_c/U)$	" $1 \leq U_c/U < 1,6$	(69)
$a_1 = 2,55 (U_c/U)^{10/3}$	" $1,6 \leq U_c/U$	

$\frac{U_c}{U}$

II. Der lineare Teil

Der zwischen $0 < D/h \leq 0,5$, bzw. $0 < D/h \leq 1,0$ liegende lineare Teil der Kurven ist in analytischer Form mit der Gleichung

$$\frac{K}{h} = \left(\frac{D}{h}\right) \cdot \operatorname{tgw}_1$$

zu beschreiben.

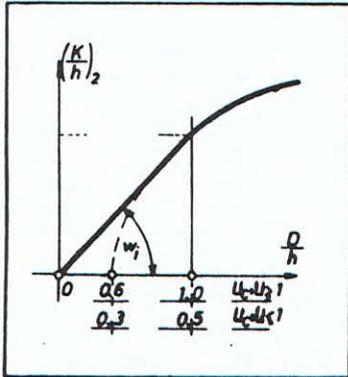


Abb. 39 Linearer Teil der Kolk-tiefe-Kurven

a) Für $U_c/U < 1,0$ bzw. $\frac{D}{h} \leq 0,5$

$$\operatorname{tgw}_1 = \frac{(K/h)}{0,5} = 2 \left(\frac{K}{h}\right)_{z=0,5}$$

und

$$\frac{K}{h} = 2a_1 (0,2)^n \cdot \frac{D}{h}$$

bzw.

$$\left(\frac{K}{D}\right)_{\infty} = f_* \cdot 2a_1 (0,2)^n \quad (70)$$

b) Für $U_c/U \geq 1,0$ bzw. $\frac{D}{h} \leq 1$

$$\operatorname{tgw}_1 = \frac{(K/h)_{D/h=1}}{1,0} = 1 \left(\frac{K}{h}\right)_{\frac{D}{h}=1}$$

oder:

$$\left(\frac{K}{h}\right)_{\infty} = f_* \cdot a_{2,3} (0,4)^{n=1/3} \cdot \frac{D}{h} \quad (71)$$

Zusammenfassend kann für die verschiedenen Bereiche von U_c/U und D/h folgende Tafel angegeben werden:

Tafel 79.1 Kolk-tiefe Formeln für verschiedene Bereiche

$\frac{U_c}{U} = \frac{1,2846}{Fr} \left(\frac{d}{h}\right)^{7/10}$			
$e=1 \leftarrow U_c/U < 1 \quad U_c/U \geq 1 \rightarrow e=0$			
$n = \frac{1}{3} + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{U_c}{U}\right) \cdot e$			
D/h	$\frac{D}{h} \leq 0,5$	$0,5 < \frac{D}{h} \leq 1$	$1 < \frac{D}{h}$
U_c/U	Linearer Verlauf		Exponentialer Verl.
$i=1$	$a_1 = 2 - 0,88 \frac{U_c}{U}$		
$\frac{U_c}{U} < 1$ $e=1$	$\left(\frac{K}{D}\right)_{\infty} = 2a_1 (0,2)^n \cdot f_*$	$\left(\frac{K}{h}\right)_{\infty} = \left(\frac{K}{h}\right)_*$	
$i=2$	$a_2 = 4,65 - 2,55 \frac{U_c}{U}$		
$1 \leq \frac{U_c}{U} < 1,6$ $e=0$	$\left(\frac{K}{h}\right)_{\infty} = f_* \cdot a_{2,3} (0,4)^{n=1/3} \cdot \frac{D}{h}$	$\left(\frac{K}{h}\right)_{\infty} = \left(\frac{K}{h}\right)_*$	
$i=3$	$a_3 = 2,55 \left(\frac{U_c}{U}\right)^{0,3}$		
$1,6 \leq \frac{U_c}{U}$	Linearer Verlauf		Exponentialer Verl.
$\left(\frac{K}{h}\right)_* = a_1 \left[\frac{D}{h} - 0,6 \left(1 - \frac{1}{2} \cdot e\right)\right]^n \cdot f_*$			
f_* : Nach Abb.31 oder Gl. (64).			

5.3.2.1 Bemerkungen zur Kolktiefe

Aus den einzelnen aufgestellten Formel geht hervor, daß:

- die Fließtiefe h nur solange von Einfluß ist, als $h \leq 2D$ (für den Fall der Geschiebebewegung) und $h \leq D$ (für den Fall der stabilen Sohle) ist.

Nach Erreichen letzteren Grenzwertes wird h fast bedeutungslos.

- Die theoretisch größtmögliche Kolktiefe, die um einen runden Pfeiler entstehen kann, wird bei $D/h = 1$ und $U_c/U \geq 1$ erreicht und ist laut Tafel 79.1 gleich:

$$K_{max} = f_{*} \cdot 2,10(0,4)^{1/3} \cdot D \geq 1,0 \cdot 2,10(0,4)^{1/3} \cdot D \geq 1,5 \cdot D$$

Diese theoretische Tiefe tritt in der Natur nur kurzzeitig auf, da der Fall $(U_c/U) \geq 1$ ohne Geschiebebewegung nur selten vorkommt. Schon die kleinste Geschiebebewegung würde die Kolk-tiefe stark reduzieren. Für die Natur kann mit ziemlicher Si-cherheit bei einem Wert $U_c/U = 0,5$ für die maximale Kolk-tiefe folgende Beziehung nach der Tafel 79.1 angegeben werden.

$$\left(\frac{K}{h}\right)_{max} = 2a_1 (0,2)^n \left(\frac{D}{h}\right) = 2 \cdot 1 \cdot (0,2)^{1/2} \cdot D \approx D$$

oder

$$K_{maxNat} \approx D \quad \text{für } U_c/U = 0,5$$

Es ist zu erwähnen, daß Larras [32] für einzelne untersuchte Fälle die Beziehung

$$K_{max} = 1,4 \cdot D^{0,75}$$

angibt, die für einen Pfeiler von $D=25m$ mit der obigen Bezie-hung des Verfassers übereinstimmt.

Bei der Konstruktion einer Brücke sollte ein Sicherheitsfak-tor von mindestens $\approx 1,5$ berücksichtigt werden, womit sich eine Gründungstiefe von wenigstens

$$K = 1,5 D$$

ergibt. Eine weitere Erhöhung der Sicherheit wäre mittels einer Befestigung der Sohle im Kolkbereich möglich (vgl. Seite 90).

- Das Arbeitsblatt ermöglicht es, bei bekannten Größen für D, d, h, U die Kolk-tiefe im Endzustand zu ermitteln. Seine einfache Benutzung wird im Kapitel 8 erläutert.

5.3.3 Die Kolklänge

Ebenso wichtig wie die Kenntnis der Kolk-tiefe ist für eine wirtschaftliche Bemessung der Gründung und Befestigung eine genaue Kenntnis der Kolk-länge K_1 (Abb. 40). Sie gibt den oberstromigen Abstand des Kolk-anfanges vom Pfeiler an. Zur Er-leichterung der späteren Auswertungen wird die Pfeilerkolk-länge

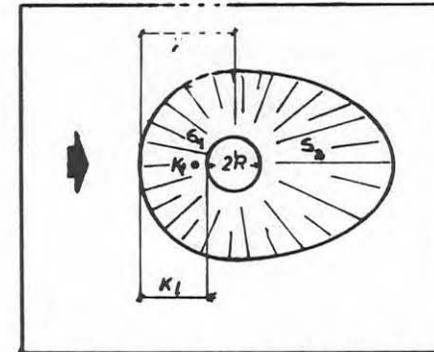


Abb. 40 Kolkform

X definiert Sie gibt den Abstand zwischen Pfeilerachse und Kolk-anfang (oberstrom) an (s. Abb. 40). Für die Berechnung der Pfeilerkolk-länge X wurde einerseits die unter Kapitel 3.3.2 beschriebene analytische Methode angewendet, anderer-seits wurden auch Resultate auf dem Versuchswege ermittelt, wie im Falle der Kolk-tiefe.

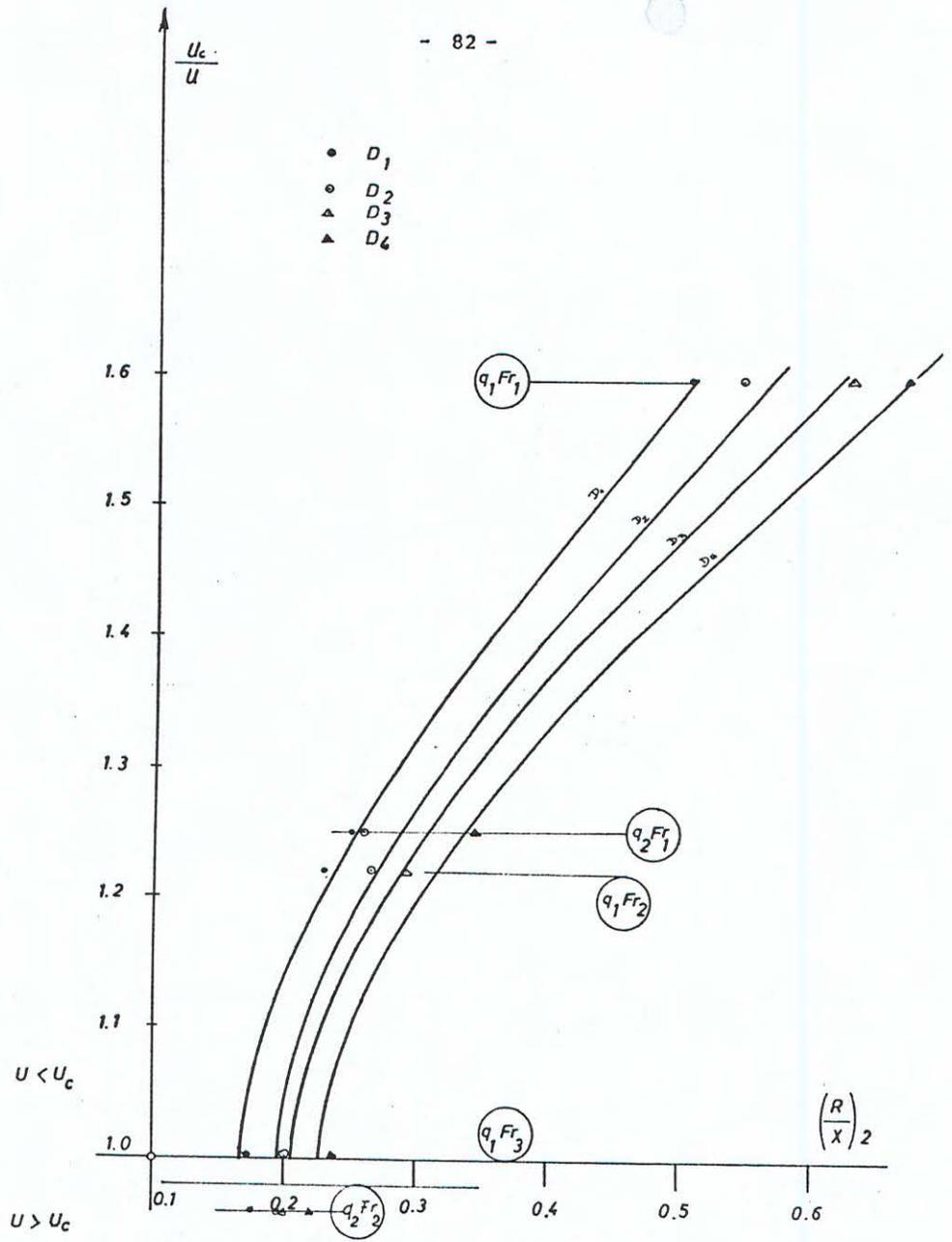


Abb. 41 Relative Kollänge in Abhängigkeit von der relativen Geschwindigkeit des Geschiebematerialies (d_1)

$q_2 Fr_3$

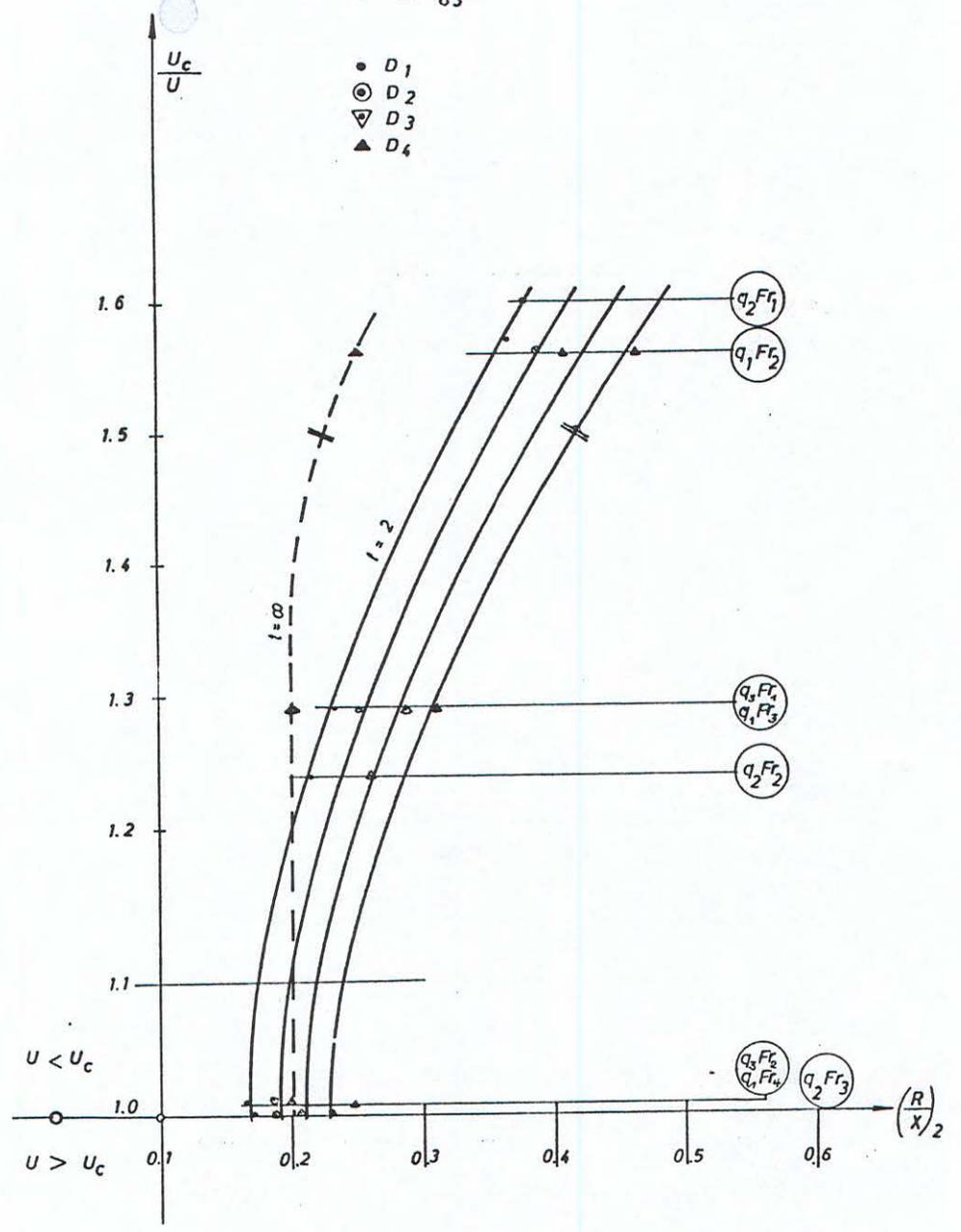


Abb. 42 Relative Kollänge in Abhängigkeit von der relativen Geschwindigkeit des Geschiebematerialies für d_2

$q_2 Fr_4$

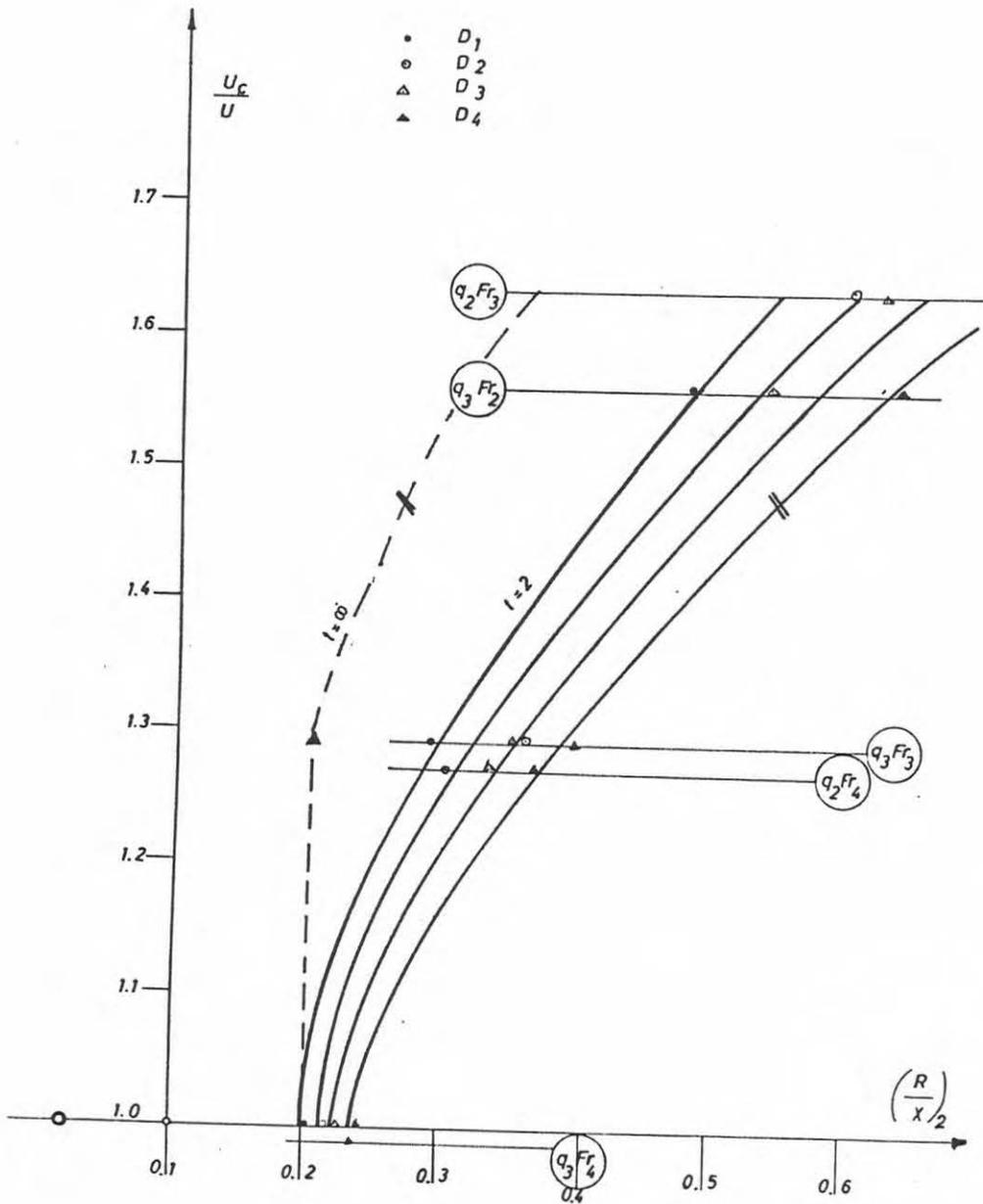


Abb. 43 Kolklänge in Abhängigkeit von der relativen kritischen Geschwindigkeit des Sohlenmaterials für d_3

5.3.3.1 Auswertungen der Versuche

a) $\frac{U_c}{U} \leq 1,40$

In ein $(R/X)-(U_c/U)$ Koordinatensystem wurden die relative Kolklänge R/X für die untersuchten Geschiebe- und Pfeilergrößen eingetragen. (Abb. 41, 42, 43).

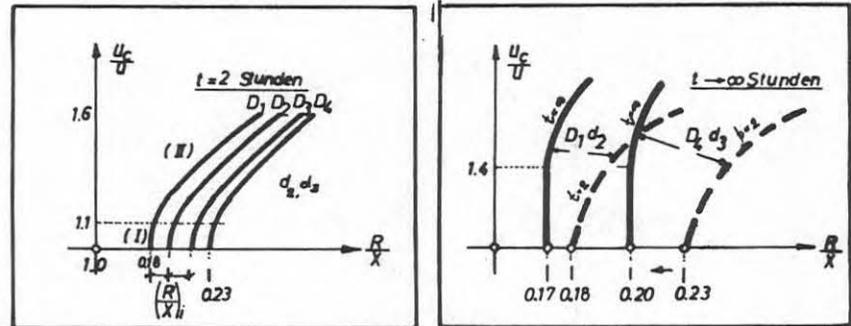


Abb. 44 Kolklänge-Kurven für eine zwei-stündige Versuchszeit

Abb. 45 Kolklänge-Kurven für den Endkolkzustand

Es stellte sich heraus, daß für einen konstanten Geschiebe- und Pfeilerdurchmesser und eine relative Geschwindigkeit $(U_c/U) < 1,10$ für eine Fließzeit von 2 Stunden die relative Kolklänge unabhängig von der relativen Geschwindigkeit ist (Abb. 44).

Im Endzustand verschoben sich die Kurven entsprechend der Abb. 45, für die mit den Geschiebegrößen d_2 und d_3 durchgeführten Versuchen. Diese Tendenz wurde ohne Nachweis auch für die Korngröße d_1 als gültig erachtet.

Trägt man für $(U_c/U) < 1,10$ auf einer $(R/X)-(D/d)$ Ebene die entsprechenden Meßwerte für die zweistündige Versuchsdauer auf und berücksichtigt man den Einfluß des Zeitfaktors nach Abb. 45, so bekommt man die Diagramme der Abb. 46 für Fließzeiten von $t=2$ Stunden und $t \rightarrow \infty$ Stunden.

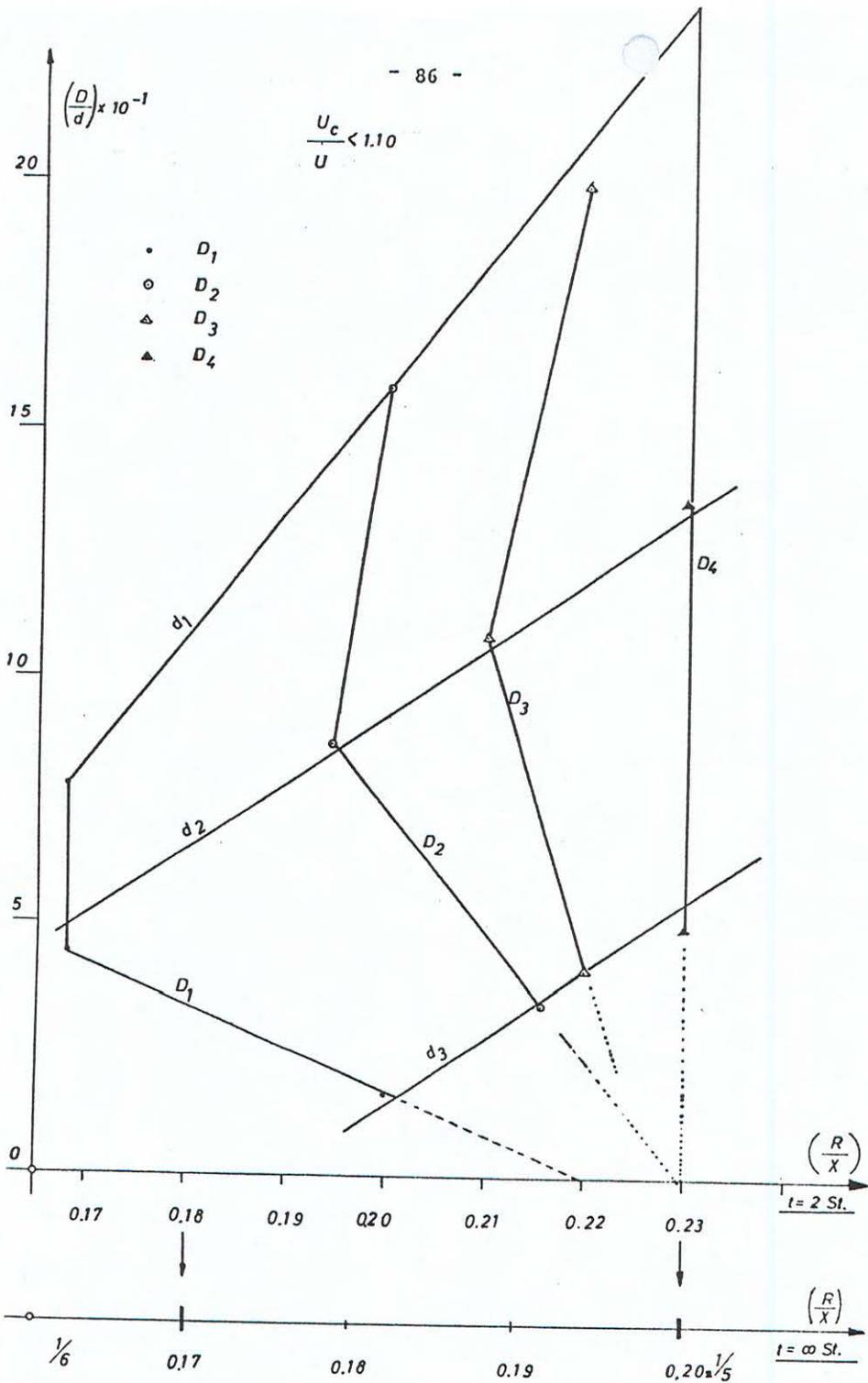


Abb. 46

Kolklänge-Kurven

Es ist deutlich zu sehen, daß die relative Kolklänge nicht immerwie die relative Kolktiefe mit dimensionslosen Größen angegeben werden kann. Der Pfeiler kleineren Durchmessers ergibt die relativ größte Kolklänge für konstantes Geschiebmaterial. Für einen konstanten Brückenpfeilerdurchmesser und abnehmende Geschiebegröße nimmt die relative Kolklänge (R/X) ab, solange

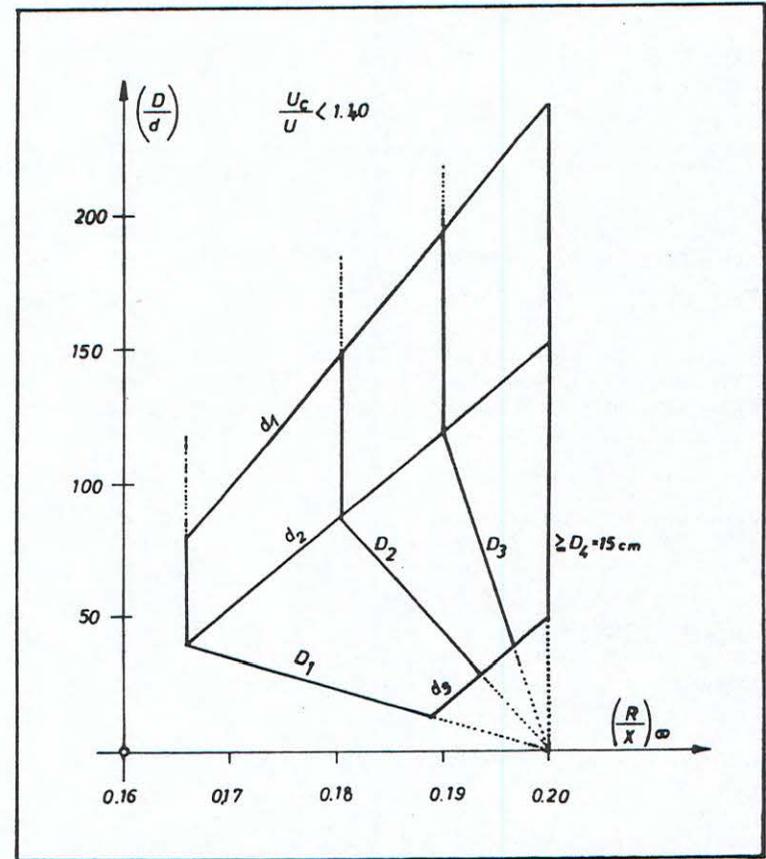


Abb. 47

Kolklänge-Kurven

die Geschiebekörner nicht kleiner als $d_{50} \approx 1,15 \text{ mm}$ sind (Abb. 46). Diese untere Grenze entspricht ungefähr auch den bekannten Vorstellungen über die Gültigkeit des Froudschen Ähnlichkeitsgesetzes bei Geschiebeproblemen. Wird $d_1 \leq 1,15 \text{ mm}$, so muß man mit dem Auftreten von Kohäsionskräften rechnen, die den Kolkmechanismus bzw. die Kolklänge beeinflussen. Ferner ist zu beachten, daß für ein konstantes D/d -Verhältnis, die relative Kolklänge vom Pfeilerdurchmesser abhängt, solange $D < 15 \text{ cm}$ ist. Für $D = 15 \text{ cm}$ ergibt sich eine untere Grenze, bei der die relative Kolklänge unabhängig vom Pfeilerdurchmesser und der Geschiebegröße ist. R/X nimmt dann den Wert $R/X=0,20$ an. Dieses Verhältnis kann in die Natur übertragen werden und entspricht einer Kolklänge von

$$K_1 = 2,5D - \frac{1}{2} D = 2D \quad \text{bei } U_c/U \leq 1,4$$

Unter Bewahrung einer guten Genauigkeit von $\pm 2\%$, können für die Kurvenschar der Abb. 46 die Kurven der Abb. 47 angegeben werden. Das Diagramm ermöglicht für ein vorgegebenes Verhältnis D/d die maximale relative Modellendkolklänge abzulesen für den Fall $U_c/U \leq 1,4$. Auf eine analytische Formel wie bei der Kolktiefe wird hier verzichtet, weil die Kolklänge kontinuierlich mit der Geschwindigkeit wächst und keine Unstetigkeit im Bereich $U_c/U=1,0$ zeigt. Außerdem tritt die maximale Kolklänge bei bewegter Sohle und nicht wie die Kolktiefe bei stabiler Sohle auf. Für die Natur könnte sogar auf die Abb. 47 verzichtet werden und eine relative Kolklänge $R/X=0,20$ für jeden $U_c/U \leq 1,40$ angegeben werden.

Das Diagramm der Abb. 47 liefert einen wissenschaftlichen Beitrag zur Anwendung der Ähnlichkeitsgesetze, es dient der Bestimmung der unteren Grenze des Modellmaßstabes. Um Versuchsergebnisse mit Sicherheit nach dem Froudeschen Ähnlichkeitsgesetz in die Natur übertragen zu können,

müssen die Versuche mit einem Pfeiler von $D \geq 15 \text{ cm}$ und einem Geschiebe von $d_{50} \geq 1,15 \text{ mm}$ durchgeführt werden.

$$U_c/U > 1,40$$

Der Fall $U_c/U > 1,40$ ist von geringer Bedeutung. Er könnte ähnlich der Kolktiefe mit einem Faktor f_* behandelt werden. Stattdessen wird aber die Kurve der Abb. 48 angegeben.

Mit Abb. 49 wird ein Befestigungsvorschlag für die Sicherung der Pfeilergründung angegeben, der der konsequenten Anwendung der oben beschriebenen Ergebnisse vorliegender Arbeit entspricht.

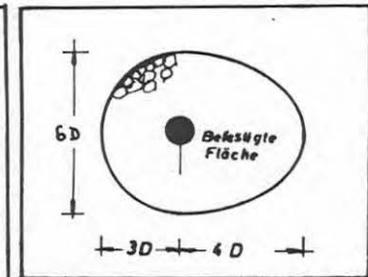
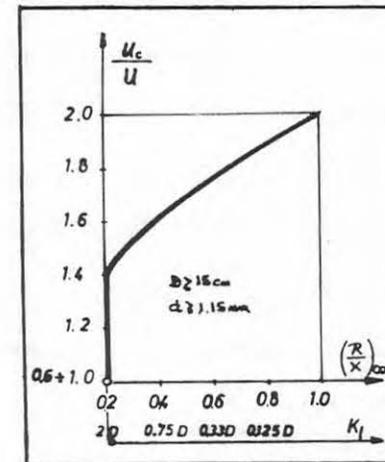


Abb. 49 Befestigungsvorschlag

Abb. 48 Relative Kolklänge in Abhängigkeit von der kritischen relativen Geschwindigkeit des Sohlenmaterials

5.3.3.2 Analytische Auswertungen der Meßergebnisse

Im Kapitel 3.3.5 wurde zur Bestimmung der Kolklänge aus

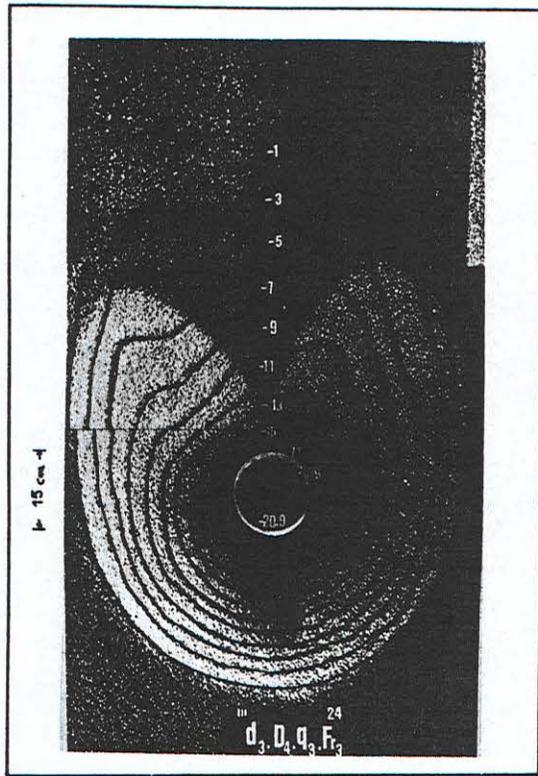


Abb. 50 Befestigte und lackierte Kolkwanne

dem Abstand der Trennungslinie vom Pfeiler die analytische Lösung angegeben. An Hand des folgenden Beispielen soll die damals vorgeschlagene Lösung der beiden Gleichungssysteme erläutert werden.

Aus der Versuchsreihe wurde der Langzeitversuch, d_3, d_4, q_3, Fr_3 , ausgewählt und im Endkolkzustand die bewegliche Sohle in der Umgebung des Pfeilers stabilisiert. Mit Hilfe des Mikroflügels wurden in je 1cm Abstand entlang der Stauebene die Geschwindigkeitsprofile gemessen (Anlagen 7,8).

Die Berechnung nach dem

I) E-Verfahren

erfolgt nach dem Arbeitsschema der Seite 99.

Als Ausgangswerte an der Stelle $x=R/X=0,10$ wurden folgende Werte ermittelt (Anlage 9):

$$\begin{aligned} \underline{(R/X)=0,10} \quad \delta_{1,0} &= 15,5 \times 10^{-3} \text{ m} \quad H_{12}=1,50 \\ \delta_{2,0} &= 10,3 \times 10^{-3} \text{ m} \\ U_{\infty} &= 0,618 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Anlage 6 : $y = 0,9837$

$$Re_2 = \frac{y \cdot U_{\infty} \cdot \delta_2}{\nu} = \frac{0,9837 \cdot 0,618 \cdot 10,3 \cdot 10^{-3}}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 6199,6$$

Anlage 1 : Für $H_{12}=1,5$, $Re_2=6199,6$ $C_{fx,0} = 2,2 \cdot 10^{-3}$

Anlage 2 : Für $H_{12}=1,5$, $C_{fx}=32,2 \cdot 10^{-3}$ $H_{32,0}=1,642$

(R/X)=0,20 $\Delta x=0,20-0,10=0,10$

Anlage 6 : $y=0,9448$

$$\begin{aligned} \text{Gleichg. 42: } \delta_2 &= 10,30 \cdot 10^{-3} \left(\frac{0,9837}{0,9448} \right)^2 + \frac{2,2 \cdot 10^{-3}}{2} \left(\frac{0,9837}{0,9448} \right)^2 \cdot 0,10 = \\ &= 11,28 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

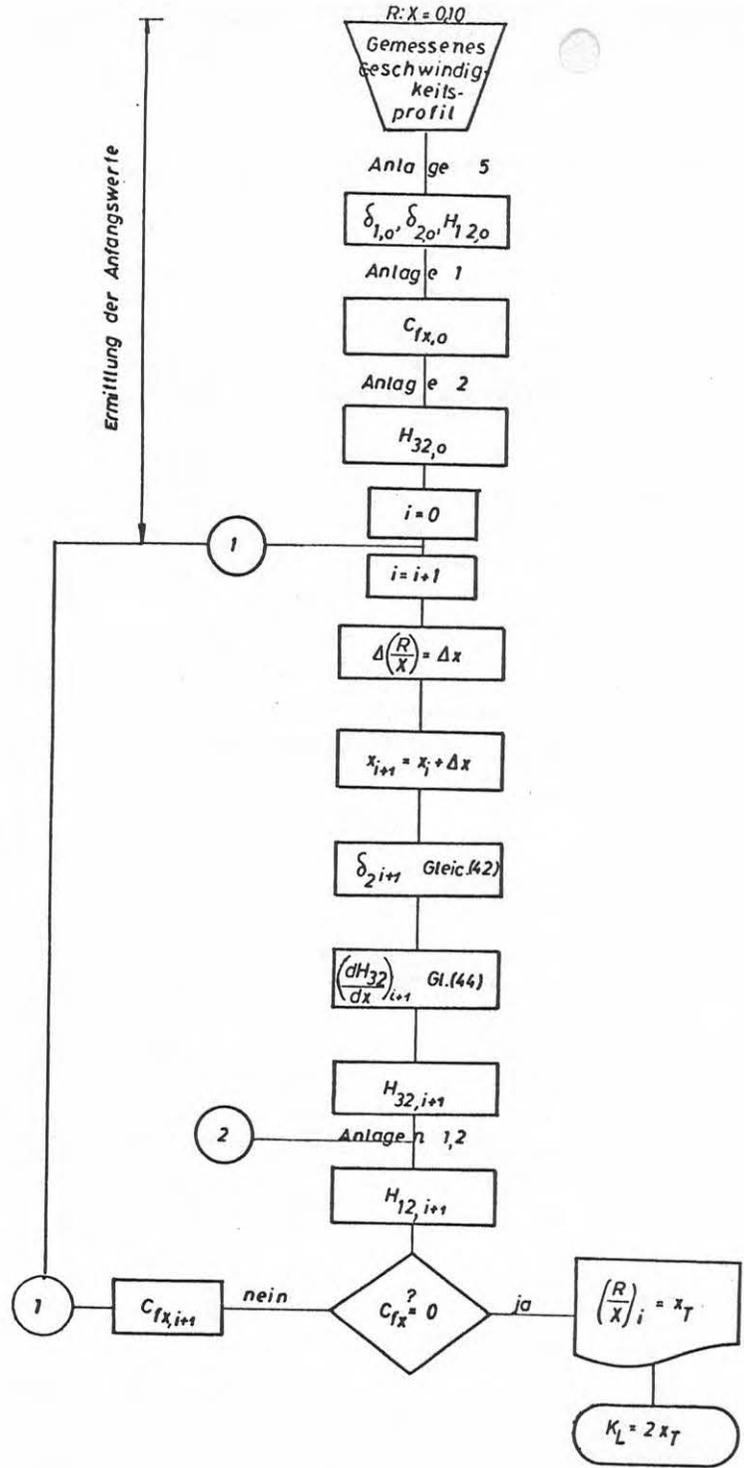
Anlage 6 : $Y=-0,53$

$$-2\delta_2 \cdot Y = 2 \cdot 11,28 \cdot 10^{-3} \cdot 0,53 = 11,95 \cdot 10^{-3}$$

Anlage 2 : $C_D = 2,3 \cdot 10^{-3}$

$$\begin{aligned} \text{Gleichg. 44: } H_{32} &= H_{32,0} + \Delta H_{32} = 1,642 + \frac{0,10 \cdot 10^{-3}}{11,28 \cdot 10^{-3}} \left[-(1,5-1) \frac{1,642}{2} \cdot 11,95 + \right. \\ &\quad \left. + 2,3 - \frac{2,2}{2} \cdot 1,642 \right] = 1,60 \\ Re_2 &= \frac{0,9448 \cdot 0,618 \cdot 11,28 \cdot 10^{-3}}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 6521 \end{aligned}$$

Anlage 1 : Für $H_{12}=1,50$, $C_{fx}=2,15 \cdot 10^{-3}$



Flußdiagramm für die Berechnung der Kolklänge nach dem E-Verfahren

Anlage 2 : $H_{32}=1,60, C_{fx}=2,15 \cdot 10^{-3} \rightarrow H_{12}=1,62$

Anlage 1 : $\rightarrow C_{fx}=2,00 \cdot 10^{-3} + H_{12}=1,62 \rightarrow \underline{C_{fx}=2,00 \cdot 10^{-3}}$
 $\underline{H_{12}=1,62}$

$(R/X)=0,25 \quad \Delta x=0,25-0,20=0,05$

Anlage 6 : $y=0,9169$

Gleich. (42): $\delta_2=12,03 \cdot 10^{-3}$

Anlage 6 : $Y=-0,6707, -2\delta_2 Y=16,12 \cdot 10^{-3}$

Anlage 2 : $C_D=2,3 \cdot 10^{-3}$

Gleich. (44): $H_{32}=1,57, Re_2=6740$

Anlage 1 : $H_{12}=1,62 \rightarrow C_{fx}=1,8 \cdot 10^{-3} \rightarrow H_{12}=1,74 \rightarrow$
 $\rightarrow C_{fx}=1,70 \cdot 10^{-3} + H_{12}=1,74 \rightarrow \underline{C_{fx}=1,70 \cdot 10^{-3}}$
 $\underline{H_{12}=1,74}$

$(R/X)=0,30 \quad \Delta x=0,05$

Anlage 6 : $y=0,8833, Y=-0,8241$

$-2\delta_2 Y=21,4 \cdot 10^{-3}$

$C_D=2,3 \cdot 10^{-3}$

$H_{32}=1,526$

$Re_2=7000$

$\rightarrow \underline{C_{fx}=1,00 \cdot 10^{-3}}$
 $\underline{H_{12}=2,04}$

$(R/X)=0,31$

$\Delta x=0,01, y=0,8759, Y=-0,8569, -2\delta_2 Y=22,71 \cdot 10^{-3}, C_D=2,3 \cdot 10^{-3}$

$H_{32}=1,514, Re_2=7080$

$\rightarrow \underline{C_{fx}=0,90 \cdot 10^{-3}}$
 $\underline{H_{12}=2,09}$

$(R/X)=0,32$

$\Delta x=0,01, y=0,8683, Y=-0,8904, -2\delta_2 Y=24,29 \cdot 10^{-3}$

$C_D=2,3 \cdot 10^{-3}, H_{32}=1,5, Re_2=7150$

$\rightarrow \underline{C_{fx}=0,80 \cdot 10^{-3}}$
 $\underline{H_{12}=2,19}$

$(R/X)=0,33$

$\Delta x=0,01, y=0,8604, Y=-0,9249, \delta_2=13,47 \cdot 10^{-3}$

$-2\delta_2 Y=24,92 \cdot 10^{-3}, C_D=2,3 \cdot 10^{-3}, H_{32}=1,486 \rightarrow \underline{C_{fx}=0,62 \cdot 10^{-3}}$

$\underline{H_{12}=2,36}$

$(R/X)=0,34$

$\Delta x=0,01, y=0,8524, Y=-0,9601, \delta_2=13,73 \cdot 10^{-3}, -2\delta_2 Y=26,37 \cdot 10^{-3}$
 $C_D=2,3 \cdot 10^{-3} H_{32}=1,460 \rightarrow \frac{C_{fx}}{H_{12}}=0,3 \cdot 10^{-3}$
 $H_{12}=3,05$

$(R/X)=0,35$

$\Delta x=0,01, y=0,8440, Y=-0,9963, \delta_2=13,93 \cdot 10^{-3},$
 $-2\delta_2 Y=27,75 \cdot 10^{-3}, C_D=2,3 \cdot 10^{-3} H_{32}=1,45 + \frac{C_{fx}}{H_{12}}=0,2 \cdot 10^{-4}$
 $H_{12}=3,3$

Die errechneten C_{fx} -Werte sind in der Abb.51 graphisch dargestellt.

Es ergibt sich $C_{fx} \rightarrow 0$ für $R/X=0,34$, die Trennungslinie liegt also in einem Abstand

$$K_1/2 = \frac{D/2}{R/X} - D/2 = \frac{7,5}{0,34} - 7,5 = 14,6 \text{ cm}$$

d.h daß die Kolklänge gleich

$$K_1 = 2 \cdot 14,6 = 29,20 \text{ cm}$$

groß ist. (K_1 -gemessen = 30 cm).

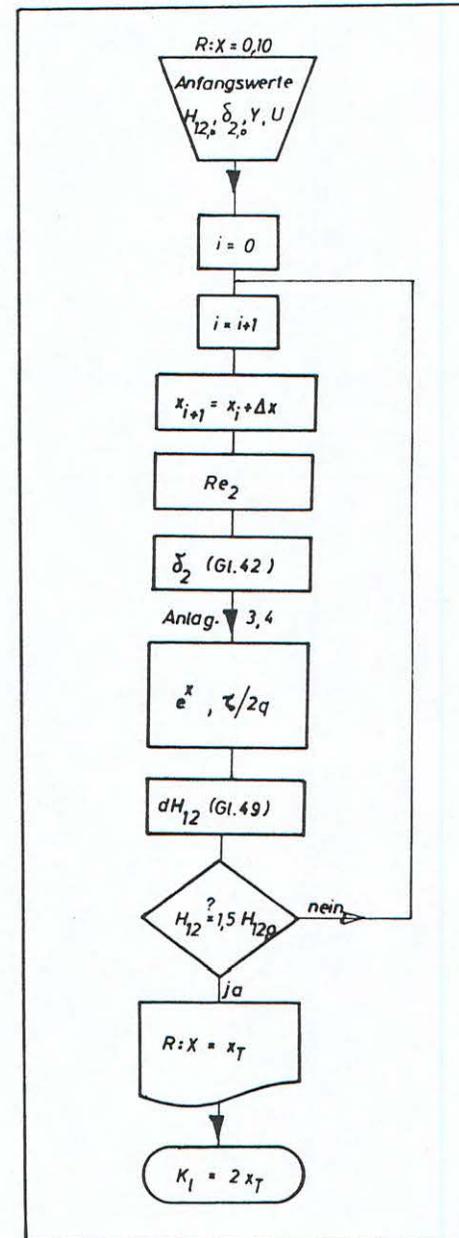
Bei dem durchgeführten Langzeitversuch ergab sich in sehr guter Übereinstimmung $K_1=30 \text{ cm}$.

Ferner zeigten die Geschwindigkeitsmessungen in der Kolkwanne (Anlage 8), daß tatsächlich in einem Abstand $R/X=0,34$ das Geschwindigkeitsprofil im unteren Bereich von einer Rückströmung beeinflusst wird und einen Fußpunkt aufweist, dessen Form auf eine Ablösung hindeutet. An dieser Stelle liegt die Trennungslinie.

Der Vergleich der mit gemessenen Anfangswerten theoretisch errechneten H_{12} -Werte mit den gemessenen H_{12} -Werten (Anlage 9) entlang der Stauebene des Pfeilers ist in der Abb.51 gezeigt. Eine Diskussion folgt nach der Berechnung mit der zweiten Methode (D-Verfahren).

(II) Das D-Verfahren

Man geht nach dem folgenden Flußdiagramm vor:



Flußdiagramm für die Berechnung der Trennungslinie nach dem D-Verfahren

Der Arbeitsaufwand ist gegenüber dem E-Verfahren wesentlich geringer.

Man verwendet wieder die gleichen gemessenen Anfangswerten:

$$\begin{aligned} \underline{(R/X)=0,10} : \quad \delta_2 &= 10,30 \cdot 10^{-3} & H_{12} &= 1,5 & U &= 0,618 \text{ m/s} \\ & & Re_2 &= 6199,6 & C_{fx} &= 2,94 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

und errechnet den weiteren Verlauf wie folgt:

$$\underline{(R/X)=0,20} \quad \Delta x = 0,20 - 0,10 = 0,10$$

Anlage 6 : $y = 0,9448$, $Y = -0,53$

$$\text{Gleichg. (42): } \delta_2 = 11,32 \cdot 10^{-3}$$

$$Re_2 = \frac{0,9448 \cdot 0,618 \cdot 11,32 \cdot 10^{-3}}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 6544$$

$$\text{Anlage 3 : } \tau_0/2q = 0,00147 \quad C_{fx} = 2 \cdot 0,00147 = 2,94 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Anlage 4 : } e^a = 0,0010$$

$$\text{Gleichg. (49): } H_{12} + \Delta H_{12} =$$

$$1,5 + 0,10 \cdot 0,0010 \left(\frac{2 \cdot 0,53}{0,00147} - \frac{2,03(1,5 - 1,286)}{11,317 \cdot 10^{-3}} \right) = 1,568$$

$$\underline{H_{12} = 1,568, \quad C_{fx} = 2,94 \cdot 10^{-3}}$$

$$\underline{(R/X)=0,30}$$

$$\Delta x = 0,05, \quad \delta_2 = 13,12 \cdot 10^{-3}, \quad Re_2 = 7090, \quad \tau_0/2q = 0,00145$$

$$C_{fx} = 2,90 \cdot 10^{-3}, \quad e^a = 0,0017, \quad \rightarrow \quad \underline{H_{12} = 1,725}$$

$$\underline{(R/X)=0,32}$$

$$\Delta x = 0,02, \quad \delta_2 = 13,60 \cdot 10^{-3}, \quad Re_2 = 7225, \quad \tau_0/2q = 0,00142$$

$$C_{fx} = 2,84 \cdot 10^{-3}, \quad e^a = 0,0033 \quad \rightarrow \quad \underline{H_{12} = 1,850}$$

$$\underline{(R/X)=0,33}$$

$$\Delta x = 0,01, \quad \delta_2 = 13,86 \cdot 10^{-3}, \quad Re_2 = 7300, \quad \tau_0/2q = 0,00142$$

$$C_{fx} = 2,84 \cdot 10^{-3}, \quad e^a = 0,0040 \quad \rightarrow \quad \underline{H_{12} = 1,870}$$

$$\underline{(R/X)=0,34}$$

$$\underline{(R/X)=0,34}$$

$$\Delta x = 0,01, \quad \delta_2 = 14,14 \cdot 10^{-3}, \quad Re_2 = 7375, \quad \tau_0/2q = 0,00142$$

$$C_{fx} = 2,84 \cdot 10^{-3}, \quad e^a = 0,0066 \quad \rightarrow \quad \underline{H_{12} = 1,96}$$

$$\underline{(R/X)=0,35}$$

$$x = 0,01, \quad \delta_2 = 14,44 \cdot 10^{-3}, \quad Re_2 = 7486, \quad \tau_0/2q = 0,00143$$

$$C_{fx} = 2,80 \cdot 10^{-3}, \quad e^a = 0,0090 \quad \rightarrow \quad \underline{H_{12} = 2,08}$$

$$\underline{(R/X)=0,36}$$

$$x = 0,01, \quad \delta_2 = 14,75 \cdot 10^{-3}, \quad Re_2 = 7520, \quad \tau_0/2q = 0,0014$$

$$C_{fx} = 2,80 \cdot 10^{-3}, \quad e^a = 0,017 \quad \rightarrow \quad \underline{H_{12} = 2,32}$$

Unter der Bedingung, daß die Ablösung an der Stelle $H_{12} = 1,5 H_{12,0}$ auftritt, bekommt man für die Lage der Trennungslinie $R/X = 0,355$ und entsprechend

$$x = \frac{D/2}{R/X} - D/2 = \frac{7,5}{0,355} - 7,5 = 14,30 \text{ cm}$$

bzw. für die Kolklänge

$$\underline{K_1 = 2 \cdot 14,30 = 28,60 \text{ cm}}$$

Bemerkungen:

Die nach den beiden Verfahren ermittelten Werte H_{12} und C_{fx} stimmen nicht vollständig überein, jedoch muß festgestellt werden, daß zumindest eine sehr gute Übereinstimmung vorliegt, da die Ergebnisse nicht mehr als 2% voneinander abweichen.

In Abb. 51 sind sämtliche errechneten und gemessenen Werte dargestellt. Die Trennungsfläche tritt je nach Berechnungsmethode im Bereich $0,34 \leq R/X \leq 0,355$ auf. Für einen Mittelwert von $R/X = 0,35$ und unter Berücksichtigung der Tatsache, daß der Korndurchmesser und die Wassertiefe einen kleinen Einfluß auf die Ausgangswerte von H_{12} bzw. dessen weiteren Verlauf haben, kann festgestellt werden, daß die Trennungslinie ungefähr in einem Abstand von $x_{TN} = D$ erscheint, oder

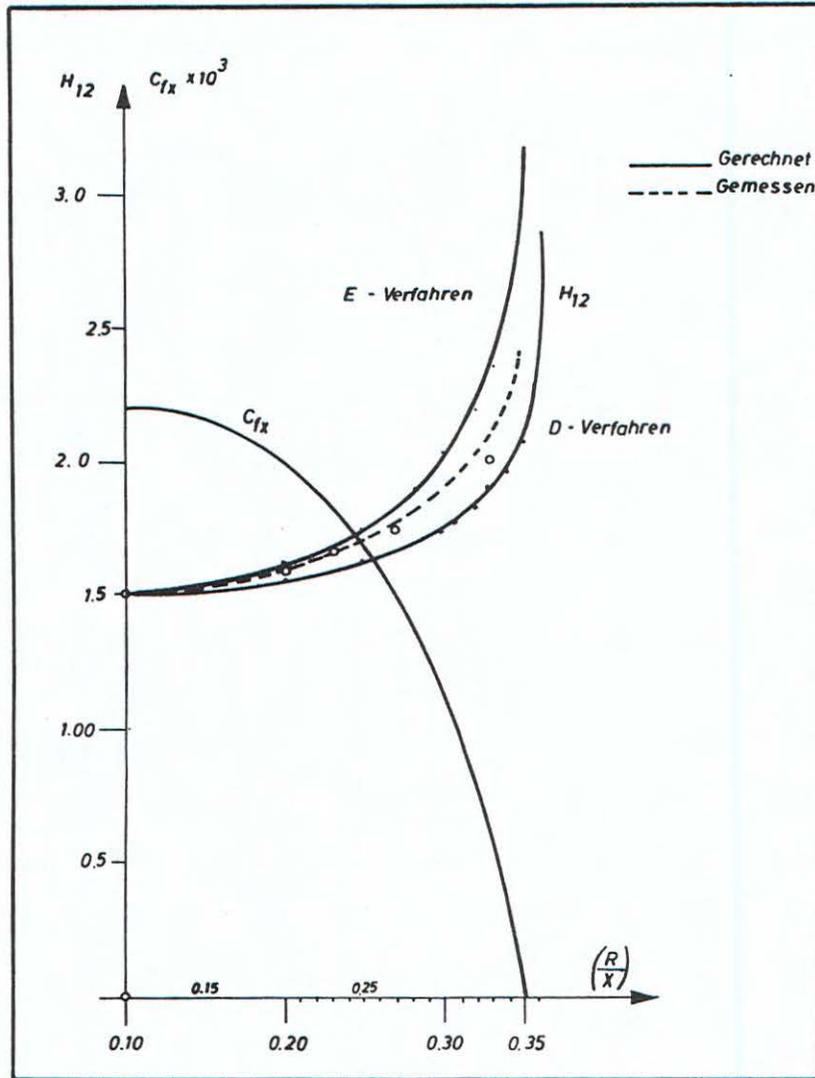


Abb. 51 Vergleich errechneter und gemessenen Werte des Reibungsbeiwertes und des Geschwindigkeitformparameters

daß die Kolklänge von kleinen Abweichungen abgesehen, eine Länge von $K_1 = 2D$ haben muß, was eine völlige Übereinstimmung mit der durchgeführten Versuchsreihe und den Ergebnissen anderer Verfasser [12] zeigte. So kann begründet werden warum in einem Fließzustand mit $U_c/U \leq 1,4$, die Endkolklänge konstant und gleich dem zweifachen des Pfeilerdurchmessers ist. Für noch größere Geschwindigkeiten (z.B. $U_c/U = 0,80$) zeigt der Anfangswert $H_{12,0}$ keinen wesentlichen Unterschied zu dem Wert H_{12} für $U_c/U = 1,4$, so daß man wesentlich größere Kolklängen nicht erwarten kann.

Von den beiden vorgeschlagenen Verfahren liefert im Vergleich mit den Messungen das E-Verfahren bessere Resultate und einen besseren Verlauf für die C_{fx} -Linie des Schubspannungskoeffizienten. Das D-Verfahren ist aber einfacher und leichter in Bearbeitung und Berechnung.

5.3.3.3 Bemerkungen zur Kolklänge

Aus den erstellten analytischen Beziehungen und der Auswertung der Versuche geht zusammengefaßt folgendes hervor:

- Die relative Kolklänge kann nicht für alle untersuchten Bereiche dimensionslos wie die Kolktiefe in Abhängigkeit von U_c/U und D/d ausgedrückt werden. Eine gemeinsame Tendenz wurde für Brückenpfeiler mit $D \geq 15\text{cm}$ und Geschiebe-Sorten $d \geq 1,15\text{mm}$ festgestellt. Für einen Pfeiler mit $D < 15\text{cm}$ ergeben sich relativ größere Kolklängen.
- Für den in der Praxis vorkommenden Geschwindigkeitsbereich $0,60 \leq U_c/U \leq 1,40$ bleibt die Kolklänge konstant bei $2D$. Der Fall $U_c/U = 1,0$ ist keine charakteristische Stelle wie bei der Kolktiefe. Der Verlauf der $(K_1 - U_c/U)$ -Linie ist stetig und zeigt keinen maximalen Wert bevor eine Geschiebewanderung an der Sohle auftritt.

- Die angegebenen Berechnungsverfahren sind weniger als geeignete Verfahren zur Ermittlung der Kolklänge aufzufassen, sondern sollen vielmehr ein Beweis für die angegebene einfache Beziehung $K_1=2D$ sein, da diese Kolklänge nur wenig von den Sohleigenschaften und der Wassertiefe, aber stark von der Geschwindigkeit abhängt, die jedoch ab einer bestimmten Grenze ($U_c/U \leq 1,4$) keinen Einfluß mehr ausübt.

Für die Praxis sei - beim Vorhandensein von Fließgeschwindigkeiten, die bezüglich der vorhandenen Sohle im kritischen Geschwindigkeitsbereich liegen - empfohlen, keine mühsame Berechnung für die Kolklänge durchzuführen. Es ist besser für die Kolklänge den doppelten Brückenpfeilerdurchmesser anzunehmen, da der auftretende Fehler kleiner als $\pm 5\%$ sein wird. Für $U_c/U > 1,4$ kann die Kolklänge bzw. der R/X-Wert nach Abb. 48 bestimmt werden.

5.3.4 Das Kolkvolumen

Aus der Kolkgeometrie ergibt sich für das Kolkvolumen die folgende einfache Beziehung (72), wenn man in sehr guter Annäherung die Kolkwanne als einen umgekehrten stumpfen Kegel betrachtet, dessen Querschnitt sich entsprechend Abb.40, aus Halbkreis und Halbellipse zusammensetzt.

$$K_v = (S_1 + S_2) \cdot K_{\infty} = \left[\frac{1}{2} \pi \cdot \frac{(5D)^2}{4} - \frac{\pi D^2}{4} + \pi(2,5D)(4D) \right] \cdot K_{\infty} =$$

$$= \pi \left[\left(\frac{25}{8} D^2 - \frac{D^2}{4} \right) + \pi \frac{5}{2} \cdot 4D^2 \right] \cdot K_{\infty} = 13 \cdot D^2 \cdot K_{\infty}$$

oder

$$K_v = 13 \cdot D^2 \cdot K_{\infty}$$

(72)

Beispielsweise ergibt sich für den Fall der Geschiebebewegung ($U_c/U=1$ und $K_{\infty}=D$) die Beziehung:

$$K_v = 13 \cdot D^3$$

5.3.5 Die Neigung der Kolkböschungen

Abschließend soll noch eine Abschätzung des Böschungswinkels im Kolk für die zweistündige Versuchszeit vorgenommen werden. In der Abb.52 sind die aus dem Versuchswege ermittelten Kolkböschungswinkel w angegeben. Es ist klar, daß auch hier eine Unstetigkeit der $\lg(w)$ -Linie im Bereich $U_c/U=1$ auftreten muß, da der Neigungswinkel von der Kolktiefe abhängt.

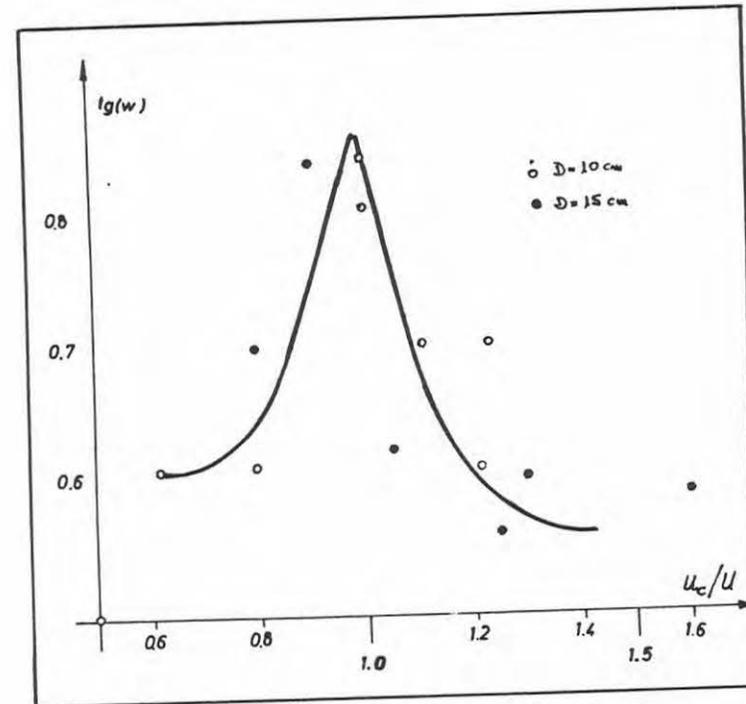


Abb. 52 Abhängigkeit des Böschungswinkels der Kolkwanne von der relativen kritischen Geschwindigkeit des Sohlenmaterials

6. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE, FOLGERUNGEN, DISKUSSION

Der Kolkvorgang ist zeitabhängig.

Die maximale Endkolktiefe tritt oberstrom am Fuße des Pfeilers in der Stauebene auf.

Die wesentlichsten Einflußfaktoren sind das dimensionslose Verhältnis U_c/U , das eine Aussage für die Stabilität der Sohle liefert, und die Zeit.

Für $U_c/U \geq 1$ stellt sich ein ganz konkreter Endzustand für die Kolktiefe ein, bei dem sich in der Kolkwanne kein Geschiebe mehr bewegt. Bei $U_c/U < 1$ gibt es einen Mittelwert der Kolktiefe, um den die augenblickliche Kolktiefe schwankt. Die Kolkiefen sind in den beiden Fällen ($U_c/U \geq 1$ und $U_c/U < 1$) völlig verschieden.

Es wurde festgestellt, daß der Kolk im Modell für $U_c/U \geq 1$ innerhalb von 72-96 Stunden zu einem Gleichgewichtszustand gelangt. Für $U_c/U < 1$ wird das Stadium des Endkolkzustandes schon nach einer Stunde erreicht.

Ferner wurde bewiesen, daß die Lagerungsdichte einen nur unmerklichen und daher vernachlässigbaren Einfluß sowohl auf die zeitliche Entwicklung als auch auf die Endkolkdimensionen ausübt.

Die relative Endkolktiefe K/h ist eine Funktion der Größen h , d_m , D , U , g , welche die dimensionslose Beziehung

$$\frac{K}{h} = f \left(\frac{U_c}{U}, \frac{D}{h} \right)$$

erfüllen. Für eine Variation von U_c/U und D/h ist für die Berechnung der Größe K/h die Tafel der Seite 79 ermittelt worden und mit dem "Arbeitsblatt" ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit gegeben.

In der Natur findet in der Kolkwanne ein Abpflasterungs-

vorgang statt [15], der im Modell wegen des verwendeten einkörnigen Geschiebes nicht zu beobachten war.

Aus Versuchsbeobachtungen und aus den Ergebnissen der Berechnungen wurde gezeigt, daß die Endkolkklänge oberstrom für eine relativ große Geschwindigkeit ($U_c/U \leq 1,4$) gleich dem doppelten Brückenpfeilerdurchmesser ist. Ferner wurde auf dem Versuchswege die Verkürzung der Endkolkklänge für größere U_c/U -Werte, bzw. für kleinere Geschwindigkeiten ermittelt.

Die Kolkform ist ebenfalls von der dimensionslosen Verhältniszahl U_c/U und von der Zeit t abhängig. Während der zeitlichen Entwicklung nimmt die Kolkfläche die Form einer Pascal'schen Kurve und im Endzustand eine aus Halbkreis und Halbellipse zusammengesetzte Form an.

Die Böschungswinkel zeigten eine Neigung von 31° - 35° wobei in extremen Fällen, ($U_c/U \geq 1$) bei stabiler Sohle eine Neigung von 50° im Modell erreicht wurde.

Die starke prozentuale Zunahme der Kolktiefe in kurzer Zeit bei beweglicher Sohle und das Erreichen einer maximalen Kolk-tiefe -die wesentlich kleiner ist als im Falle der stabilen Sohle mit schwachem prozentuaem Zuwachs - nach einer Stunde zeigte eindeutig, daß ein kurzfristiges Hochwasser nicht die maximale Kolk-tiefe hervorrufen kann.

Der Einfluß der Zeit wurde mit Hilfe eines Zeitfaktors f_* untersucht (Kapitel 5.2.1)

Um Versuchsergebnisse mit Sicherheit nach dem Froudschen Ähnlichkeitsgesetz in die Natur übertragen zu können, müssen die Versuche mit einem Pfeiler von $D \geq 15$ cm und einen Geschiebekorn von $d_{50} \geq 1,15$ mm durchgeführt werden.

7. VERGLEICH DER ERGEBNISSE MIT DENJENIGEN DER BISHER VERÖFFENTLICHTEN LITERATUR

Ein ausführlicher Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit mit denjenigen der Literatur ist sowohl wegen der hier angewendeten Art der Behandlung des Problems und der Klassifizierung der Versuchsergebnisse als auch wegen der verschiedenen Versuchszeiten nicht leicht, wenn nicht sogar ausgeschlossen.

Der bei den Versuchen beobachtete Verlauf des Kolkvorganges stimmt im wesentlichen mit den Beschreibungen einiger anderer Verfasser überein. Es zeigten sich jedoch Unterschiede (Einfluß der Versuchszeit), auch wurden zusätzliche Betrachtungen durchgeführt, wie zum Beispiel die Veränderung der Form des Geschwindigkeitsprofils in der Stauebene des Pfeilers mit ausgekolkter Sohle oder die Vernachlässigung der von Tisson erwähnten senkrechten Strömung als Ursache der Kolkbildung.

Unbekannt war auch der Einfluß des Zeitfaktors f auf die Entwicklung des Kolkes, so daß die in Wirklichkeit geringe Bedeutung eines nicht lange anhaltenden Hochwassers bisher stets überschätzt wurde. Für die zeitliche Entwicklung der Kolkdimensionen wurde vom Verfasser dieser Arbeit eine analytische Beziehung entwickelt.

Für die Berechnung der Kolkentiefe wurden in der Literatur verschiedene empirische Gleichungen formuliert, je nach Untersuchungsbereich des Verfassers mit oder ohne Geschlebebewegung. Ein Vergleich mit den Ergebnissen von Chabert [8] ist in Abb.56 durchgeführt, wobei sich eine ziemlich gute Übereinstimmung und die selbe Tendenz für die $K/h-D/h$ Linien zeigten.

Die Versuche der Arbeit von Shen [51] konnten nicht auf dasselbe Vergleichsdiagramm gebracht werden, da der Quotient

U_c/U nicht bestimmt werden konnte, trotzdem zeigte sich dieselbe Tendenz und der selbe Verlauf unter Verwendung beliebiger Werte von U_c . Unverständlich bleibt, wie eine Geschwindigkeit von $3,34 \text{ ft/s} \approx 1 \text{ m/s}$ ([51], Ver.7) kohäsionslose Sandkörner von $d_{50} \approx 0,24 \text{ mm}$ nicht bewegt haben soll, da die Versuche nach den Angaben dieses Forschers im stabilen Bereich der Sohle durchgeführt wurden. Ein Vergleich wurde deshalb nur für die analytische Form der Kolkbildung gemacht. Für den speziell von Shen untersuchten Bereich von $1,60 \frac{U_c}{U} > 1$ und $0,50 < D/h < 1,32$ ist laut Tafel auf Seite 79 die Kolk-tiefe gleich:

$$\begin{aligned}
K &= a_1 \left(\frac{D}{h} - 0,60 \right)^{0,33} \quad \text{für } U = \text{konst.} = a_2 \cdot U^2 \left(\frac{D}{h} - 0,60 \right)^{0,33} \\
&\text{für } D = \text{konst.} = a_3 (a_4 \cdot U^2 \cdot D^2 - 0,60h)^{0,33} \quad \text{unter Vernach-} \\
&\quad \text{lässigung der Wassertiefe } h \\
&= a_6 \left[\left(\frac{U \cdot D}{v} \right)^2 \right]^{0,33} = a_7 \cdot Re^{0,66} = k \cdot Re^{0,66} \approx k_{Shen} \cdot R e^{0,62}
\end{aligned}$$

Der Vergleich zwischen diesen Gleichungen ist ein Beweis der qualitativen Ähnlichkeit der Versuchsergebnisse des von ihm untersuchten Bereichs.

Die von Dietz für die Mainbrücke Eddersheim vorgeschlagene Kolk-tiefen-Formel [12]

$$K = C \cdot \left(\frac{U}{U_c} \right) \cdot D$$

entspricht für einen Bereich $1 \leq U_c/U < 1,4$ recht gut dem Ergebnis des Verfassers

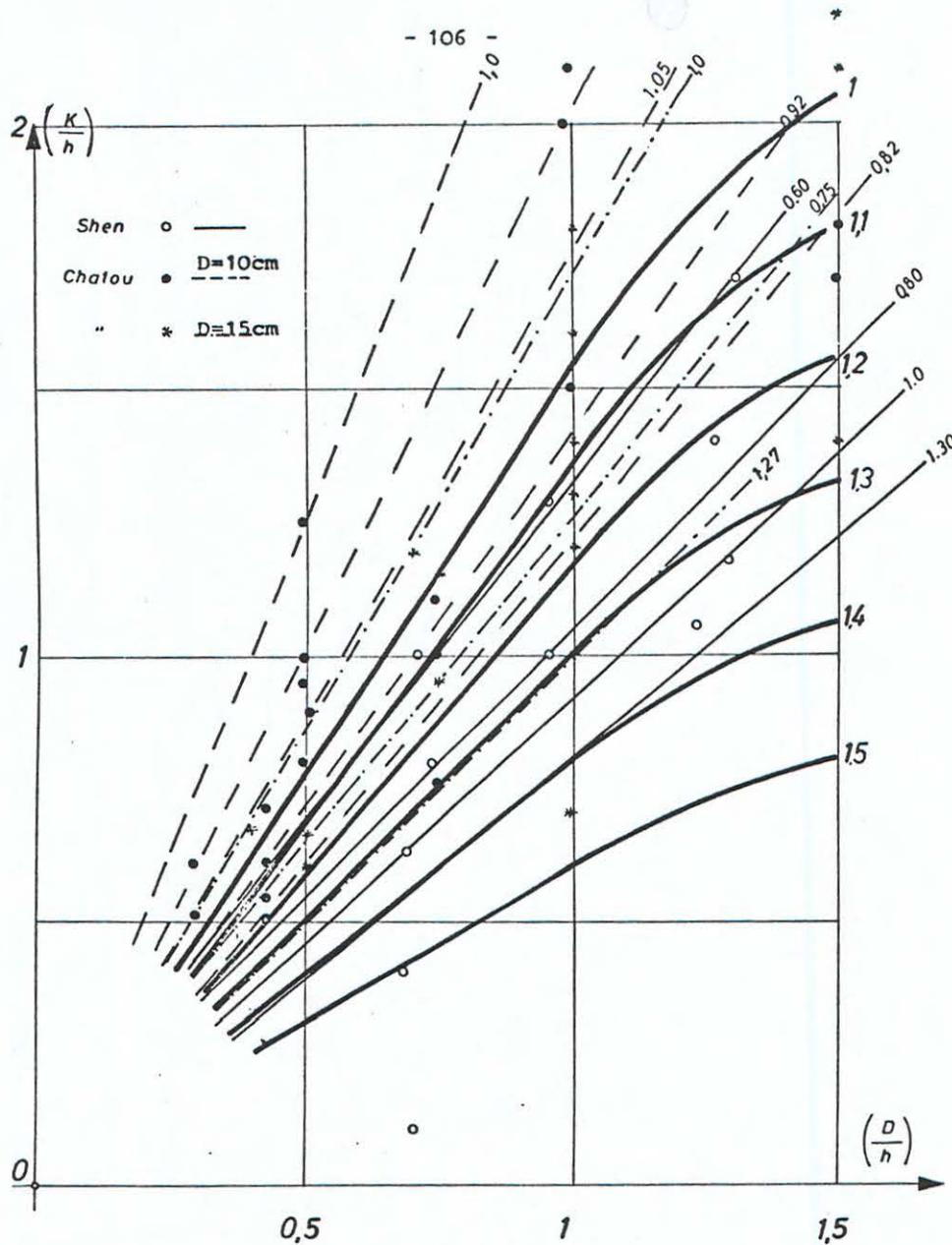


Abb.53 Vergleich der Ergebnisse anderer Forscher

8. ANWENDUNG DER ERGEBNISSE IN DER PRAXIS

Der Kolkvorgang wird vor allem durch die Schwerkraft beeinflusst, so daß die Modellergebnisse, nach dem Froude'schen Ähnlichkeitsgesetz voll auf die Natur übertragbar sind. Das wurde auch klar auf Grund der bis jetzt erstellten Berechnungsformeln.

Der Berechnungsvorgang soll an Hand des folgenden Beispiels erläutert werden:

Gegeben sind:

Pfeilerdurchmesser	D=2,1m
Wassertiefe	h=2,1m
Korndurchmesser	d ₉₀ =9mm
Mittlere Fließgeschwindigkeit	U=1,0m

Gesucht sind:

Die Kolktiefe, die Kolklänge, die Kolkform

Die Kolktiefe

$$d=9\text{mm} \rightarrow \text{Abb.22} \rightarrow U_c=1,10\text{m/s} \rightarrow U_c/U=1,10/1,00=1,10$$

$$\text{Abb.31} \rightarrow f_* = 1,22 \quad (1)$$

$$D/h=2,1/2,1=1,00 \quad U_c/U=1,10 \quad \text{Tafel 86.1}$$

$$a_2=4,65-2,55 \cdot 1,10 = 4,65 - 2,80 = 1,85$$

$$n = \frac{1}{3} + \frac{2}{5} (1-1,1) \cdot 0 = 1/3$$

$$\left(\frac{K}{h}\right)_{\infty} = \left(\frac{K}{h}\right)_* \quad \frac{K}{h} = 1,85 \left(\frac{D}{h} - 0,6(1-\frac{1}{2} \cdot 0)\right)^{1/3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 1,85(D/h-0,6)^{1/3} = 1,85(1-0,6)^{1/3} =$$

$$= 1,85 \cdot 0,4^{1/3}, K = 2,1 \cdot 1,85 \cdot 0,4^{1/3} = 2,8 \quad (2)$$

$$(1), (2) \rightarrow K_{\infty} = f_* \cdot K = 1,22 \cdot 2,8 = 3,4 \text{ m}$$

Das gleiche Ergebnis wird auch bei der Benutzung des Arbeitsblattes wie folgt erhalten.

1. Weg ($d_{90}=9\text{mm}$): Verlauf der rechten Nomogramme bis "Ende des 1. Weges". Wert : 1,22 .

2. Weg ($D=2,10\text{m}$): Verlauf der linken Nomogramme bis "Ende des 2. Weges". Wert : 2,80 .

Die Gerade (1,22-2,80) gibt auf der K_{∞} -Achse die Endkolk-tiefe $K_{\infty}=3,40\text{m}$.

Kolklänge:

$U_c/U=1,10 < 1,40 \rightarrow \text{Abb. 48} \rightarrow R/X=0,20 \rightarrow K_1=2D=4,20 \text{ m.}$

Kolkform:

Die Form der Abb. 50, auch im Arbeitsblatt rechts oben.

* * *

LITERATURVERZEICHNIS

- (1) Ahmad, M. "Experiments on design and behavior of spur dikes". Proceedings IAHR, Minnesota, 1953.
- (2) Altinbilek, H.D. "Similarity laws for local scour with special emphasis on vertical circular pile in oscillatory flow. IAHR Kongress, Paris 1971, Band 3, V.Nr. C41.
- (3) Arunachalam, K. "Scour around bridge piers". Journal of Indian Congress, Band 29, Nr. 2, 8/1965, Seite 189-210.
- (4) Awazu, S. "On scour around spur dikes". IAHR Kongress 1967, Band 3, Seite C12.
- (5) Breusers, H.N.C. "Scour around dulling platforms" IAHR Proceedings, Vol. 19, S. 276, 1965.
- (6) Bronstein und Semendjajew "Taschenbuch der Mathematik" Verlag Harri Deutsch, Frankfurt 1964.
- (7) Carstens, M. "Similarity laws for localized scour". ASCE HY3 Division, Mai 1966, pp. 4818, S. 13.
- (8) Chabert, J. und Engeldinger, P. "Etudes des affouillements autour des piles de ponts". Laboratoire Nationale d'Hydr. de Chatou, 6 Quai Watier, Chatou, France, 10/1956.

- (9) Chitale, S.V. "Scour at bridge crossing".
Discussion ASCE HY9, Band 86, 11/66.
- (10) Coleman, N.L. "Analysing laboratory measurements of scour at cylindrical piers in sand beds".
IAHR Kongress Paris 1971, Band 3, Nr. C37.
- (11) Dietz, J.W. "Modellversuche über Kolk - bildung".
Die Bautechnik, Heft 5/1972, Seite 240, Heft 7/1972
- (12) Dietz, J.W. "Systematische Modellversuche über die Pfeilerkolkbildung".
Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, März 1972.
- (13) Doenhoff, A.E. "Determination of general relations for the behavior of turbulent boundary layers".
NACA Report No. 772, 1943.
- (14) Einstein, H.A. "The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows".
U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Bulletin No 1026, Sept. 1950.
- (15) Franke, P.G. "Über Kolkbildung und Kolkformen".
Österreichische Wasserwirtschaft, Jahrgang 12, Heft 1, 1960
- (16) Gallez, B. und Butte, J.N. "Regime non-stationnaire auto-excite et affouillement des piles".
IAHR Kongress Paris 1971, Band 3, pp.C35.
- (17) Garde, R.J. und Subramaya, K. "Study of scour around spur dykes".
ASCE HY6, Band 87, pp.2978, 11/1961.
- (18) Gradowczyk, M.H. und Folguera, H.G. "Analysis of scour in open channels by mean of mathematical methods".
La Houille Blanche, Band 20, Seite 761.
- (19) Gradowczyk, M.H. , Maggiolo, O.J. und Folguera, H.G. "Localized scour in erodible bed channels".
IAHR Proceeding 12/1968.
- (20) Gole, C.V. "River bed scour at bridge constructions".
IAHR Kongress 1967, Band 3, pp.C38.
- (21) Hancu, S. "Sur le calcul des affouillements locaux dans la zone des piles de ponts".
IAHR Kongress Paris 1971, pp.C36.
- (22) Hartung, F. und Csallner, K. "The scouring energy of the macroturbulent flow down-stream of a hydraulik jump".
IAHR Kongress 1967, Fort Collins, pp.B9.
- (23) Johnston, J.P. "The three-Dimensional turbulent boundary layer".
Gas Turbine Lab. Report No 39, 5/1957, Massachusetts Inst. of Technology.

- (24) Johnston, J.P. "The turbulent boundary layer at a plane of symmetry in a three-dimensional flow".
Trans.ASME, 9/1960,pp.622-628
- (25) Johnston, J.P. "On the three Dimensional turbulent Boundary layer generated by a secondary Flow"
ASME, 3/1960, pp. 233
- (26) Herbich, J.D. "Prevention of scour at bridge abutments".IAHR Kongress 1967 pp. B9.
- (27) Jarocki, W. "Effect of piers on water streams and bed form".
IAHR Kongress Dubrobnik 1961, Band 3, S. 1147.
Pfalz Verlag, Basel 1969
- (28) Kleine Enzyklopädie der Mathematik
- (29) Keutner, Chr. "Strömungsvorgänge an Strompfeilern von verschiedenen Grundrissformen und ihre Einwirkung auf die Flußsohle".
Die Bautechnik, Band 10, Nr.12, 3/1932.
- (30) Komura, S. "Equilibrium depth of scour in long constructions"
ASCE HY5, Vol. 92, 9/1966
- (31) Kotoulas, D. "Das Kolkproblem unter besonderer Berücksichtigung der Faktoren "Zeit" und "Geschiebemischung" im Rahmen der Wildbachverbauung".
Diss. ETH Zürich, 1967.
- (32) Larras, J.A. "Profondeurs maximales d'érosion des fondes mobiles autour des piles en rivières".
Annales des ponts et chaussées, Vol. 133, Nr.4, pp.441-424.
- (33) Laursen, E.M. "Scour at bridge crossing".
ASCE Proceedings, Vol. 85, No.26, 2/1960.
- (34) Laursen, E.M. "Progress Report of Modell studies of scour around bridge piers and abutments".
Highway Research Bd., Research Report No 13, 1951.
- (35) Laursen, E.M. "Observation of the nature of scour"
Proceeding of the 5th hy.Conf. Bulletin 34, Univ. IOWA, 1952
- (36) Laursen, E.M. "A generalized model study of scour around bridge piers and abutments"
IAHR Proceedings, Minnesota 1953.
- (37) Leclerc, J.P. "Recherche des lois regissant les phénomènes d'affouillements au pieds des piles de pont premiers resultats."
IAHR Kongress Paris 1971, Band 3, pp. C39.
- (38) Liu, H.K. "Laboratory observations of scour at bridge abutments".
Highway Research BD. Bulletin 242, 1960.
- (39) Liu, H.K. ,
Chang, F.M. und
Skinner, M.M. "Effect of bridge construction on scour and backwater".
Report CER60HKL22, Civ. Ing. section, Colorado Univ. Fort Collins.

- (40) Mayer, A. "Generalization of boundary layer momentum integral equation to the three-dimensional flow those of rotating system".
NASA Report 1067/1962.
- (41) Nicollet, G. und Ramette, M. "Affouillements au voisinage de piles de pont cylindrique."
IAHR Kongress Paris 1971, Vol. 3, pp. C38.
- (42) Posey, C. "Why bridges fail in floods".
Civil Engineering, Vol. 19, 2/1949.
- (43) Posey, C. "Scour at bridge piers".
Civil Eng. May 1963.
- (44) Posey, C. "Why bridges fail in floods".
Civil Engineering, Vol. 19,
February 1949, pp. 42-90.
- (45) Prandtl, L. "On boundary layers in the three-dimensional flow"
Transaction No. 64, British N.A.P
5/1946.
- (46) Rotta, J. "Näherungsverfahren zur Berechnung turbulenter Grenzschichten, unter Benutzung der Energiesatzes".
Mitteilungsblatt aus dem Max-Planck Institut für Strömungsforschung,
Nr. 8, Göttingen 1953.
- (47) Sarma, K.V.N. und Krishnamurthy, M. "Scour around bridge piers".
Indian Institute of Science,
Bangalore, India.
- (48) Schneible, D.E. "An investigation of the effect of bridge pier shape on the relative depth of scour."
IOWA Univer. 6/1951 Diss.
- (49) Schleiermacher, E. "Gestaltung schräg angeströmter Brückenpfeiler".
Mitteilungsblatt Nr. 3 der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 1954.
- (50) Shields, A. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenz auf die Geschiebewegung. Mitt. Preuss. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, 1936.
- (51) Shen, H.W., Schneider, U.R. und Roper, A.T. "Analytical approach to local scour".
IAHR Proceeding, Colorado Vol. 3, 1967.
- (52) Shen, H.W., Ogawa, Y. und Karaki, S.S. "Time variation of bed deformation near bridge piers".
XI IAHR Symposium 1965, Vol. III.
- (53) Shen, H.W. "Local scour around a circular cylinder"
Colorado Univ. Hyd. Seminar, Vol. 1, pp. 23
- (54) Sousa, Pinto "Erosao ao redor de pilares de ponte".
Curitiba 1961, Brasilien.
- (55) Stabilini, S. "Scour at bridge piers".
Civil Engineering, 5/1963.
- (56) Tanaka, S. und Motoaki, Y. "Local scour around a circular cylinder"
IAHR 1967, Kongress pp. C23.

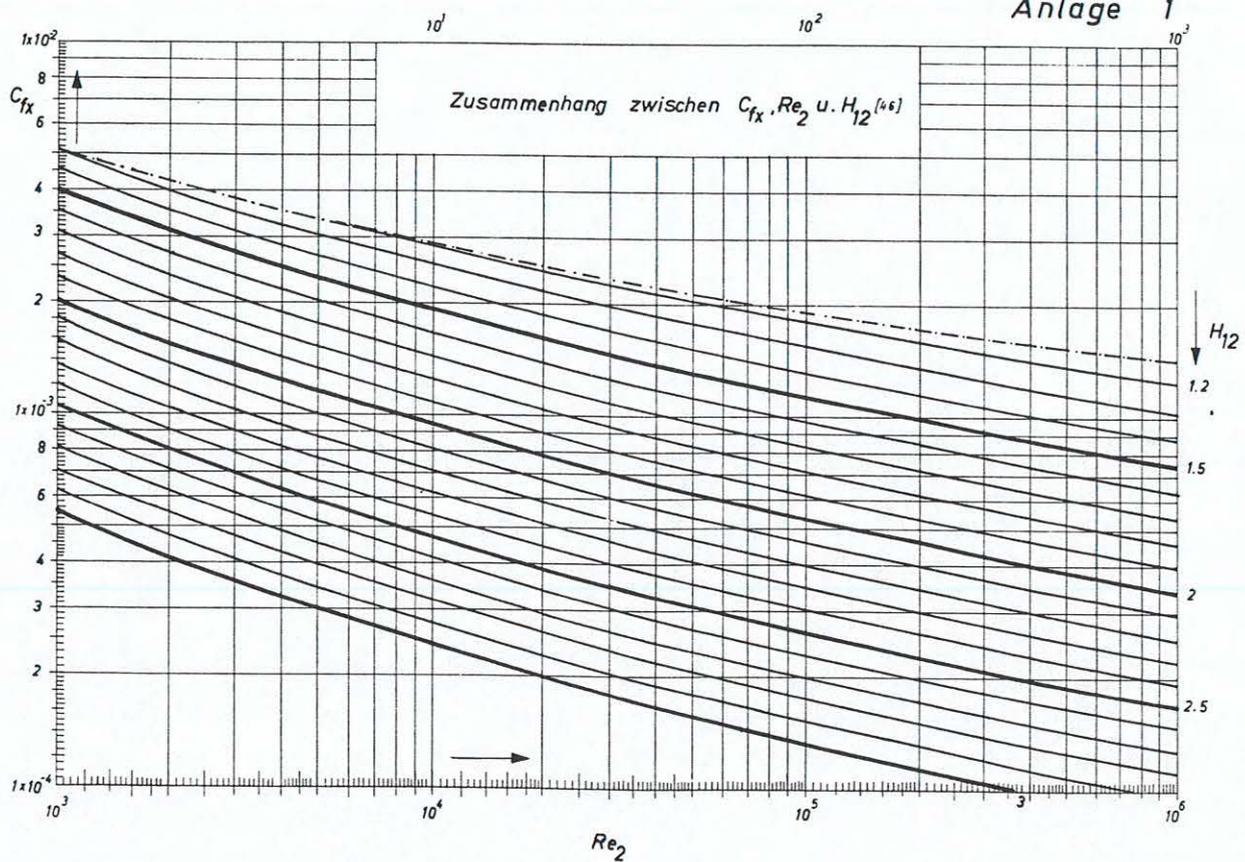
- (57) Tarapore, Z.S. "A theoretical and experimental determination of the erosion pattern around obstructions placed in an alluvial channel". IAHR Kongress 1967, Fort Collins, pp. C3.
- (58) Task Committee on Preparation of Sedimentation Manual "Sediment Transportation Mechanics: Initiation of Motion". IAHR Proceeding, HY-Division, March, 1966, Proc.P: 4738.
- (59) Thomas, Z. "An interesting hydraulic effect occuring at local scour" IAHR 1967, Fort Collins, pp.C15.
- (60) Tison, L.J. "Erosion autour des piles de ponts en riviere" Annales des Travaux Publics de Belgique, 1940.
- (61) Ventakadri, C., Mytan, R.G., Hussain, R. und Asthama, K.C. "Scour around bridge piers and abutments". Journal of Irrigation and Power, India, January 1965.
- (62) Varzeliotis, A.N. "Model studies of scour around bridge piers". Univers. of Alberta, Edmondn Canada, Diss. 1960.
- (63) Yalin, S. "Die theoretische Analyse der Mechanik der Geschiebebewegung. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 1957, Heft 8.

* * *

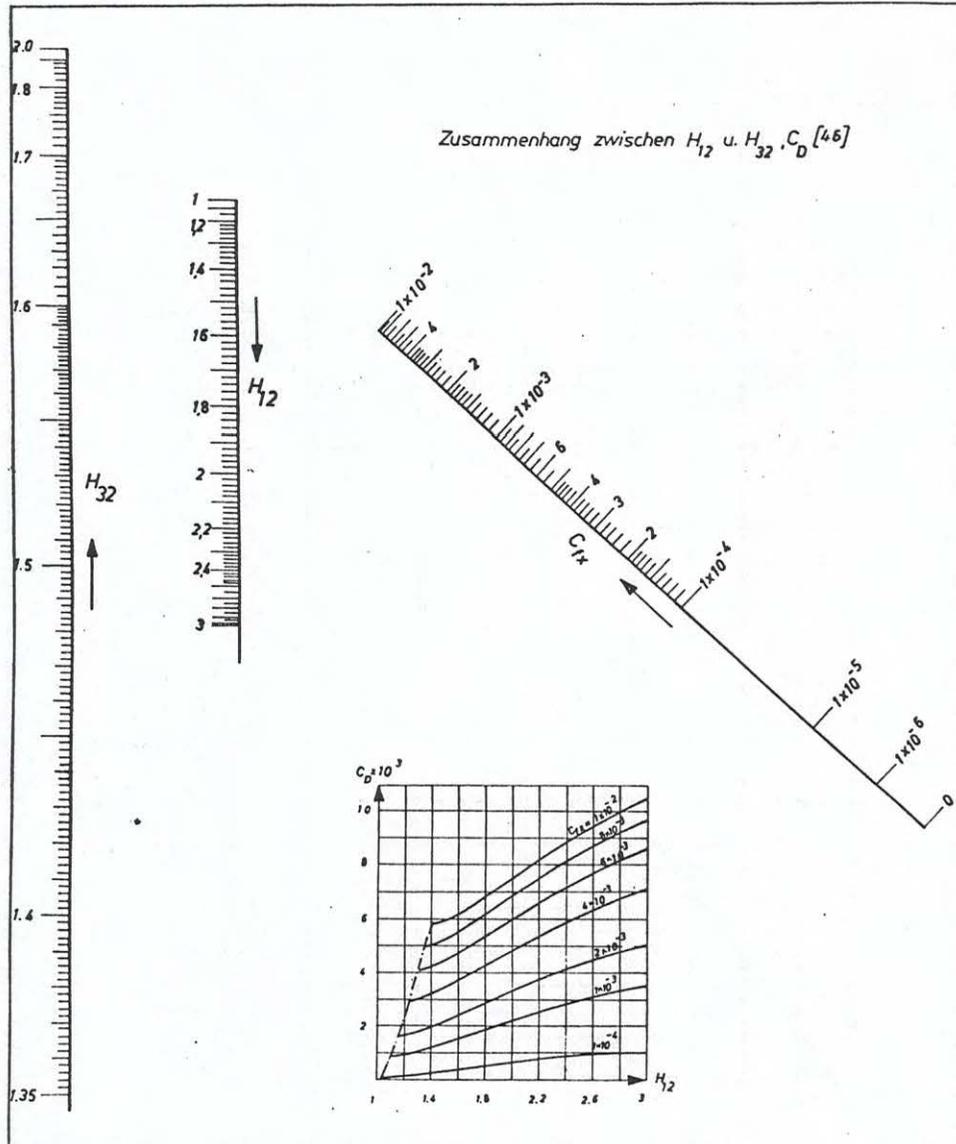
A N L A G E N

- 1 Der örtliche Reibungsbeiwert C_{fx}
- 2 Nomogramme für den Zusammenhang zwischen H_{12} und H_{32}
- 3 Zusammenhang zwischen C_{fx} und Re_2
- 4 Zusammenhang zwischen e^a und H_{12}
- 5 Die Berechnung der Anfangswerte $\delta_1, \delta_2, H_{12}$
- 6 y, Y ,-Werte für den Pfeiler
- 7,8 Gemessene Geschwindigkeitsprofile
- 9 Bestimmung der H_{12} -Werte für die gemessenen Geschwindigkeitsprofile.
- 10 Form einer Kolkwanne
- 11 Befestigungsvorschlag
- 12 Versuchsergebnisse

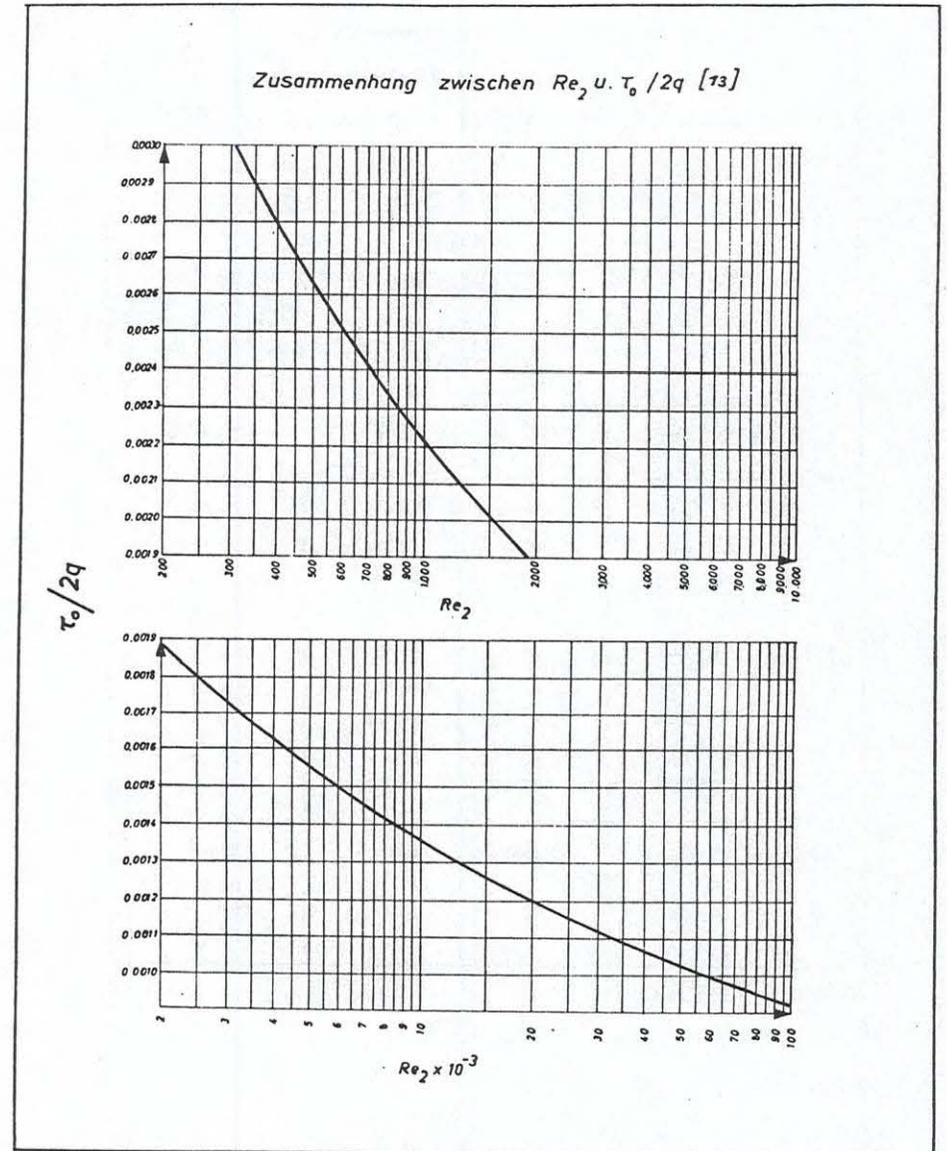
Anlage 1



Anlage 2

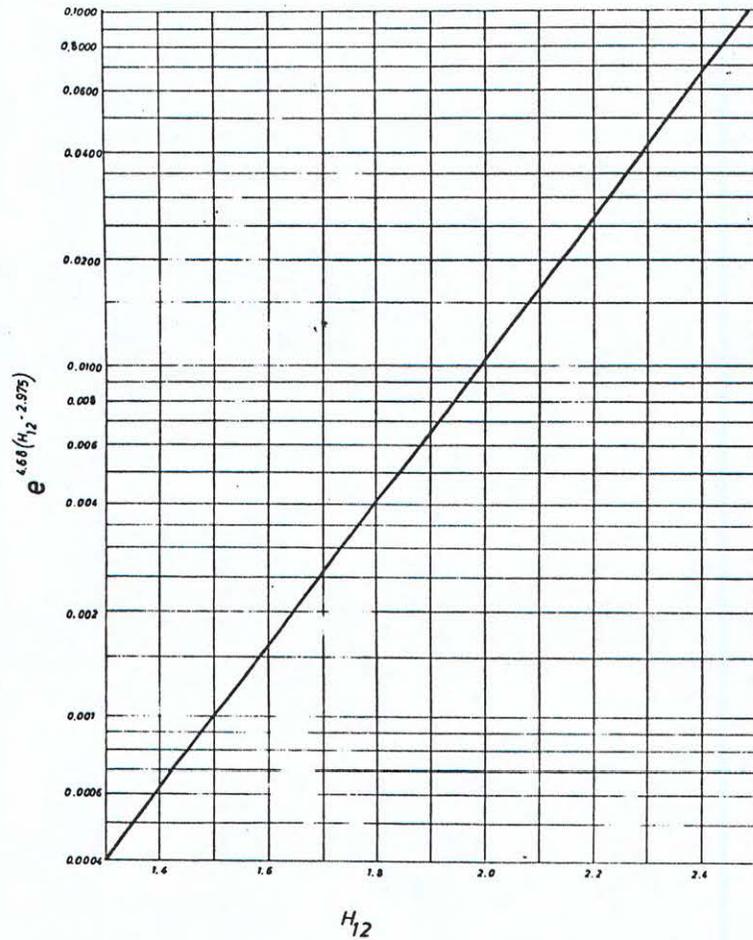


Anlage 3



Anlage 4

Zusammenhang zwischen H_{12} u. $e^{4,68(H_{12}-2,975)}$ [13]



Berechnung der $\delta_1, \delta_2, H_{12}$ Anfangswerte

Anlage 5

$$\delta_1 = \frac{1}{U} \int_0^{\delta} (U-u) dy, \quad \delta_2 = \frac{1}{U^2} \int_0^{\delta} u(U-u) dy$$

$$H_{12} = \delta_1 / \delta_2$$

(Kapitel: 5.3.3.2)

Höhe von der Sohle [cm]	u [cm/s]	U-u [cm/s]	u(U-u) [(cm/s) ²]	U [cm/s]
0,5	32	29,8	953,60	61,80
1,5	37,5	24,3	911,25	
2,5	45	16,8	756,00	
3,5	50,6	11,2	566,72	
4,5	55	6,8	374,00	
5,5	58	3,8	220,40	
6,5	60	1,8	108,00	
7,5	61	0,80	48,80	
8,5	61,6	0,20	12,32	

$$\Delta y = 1,0 \quad \sum \delta_1 = 95,60 \quad 3951,09 = \sum \delta_2$$

$$\delta_1 = \frac{\Delta y \cdot \sum \delta_1}{U} = \frac{1,0 \times 95,60}{61,80} = 15,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta y \cdot \sum \delta_2}{U^2} = \frac{1,0 \times 3951,09}{61,80^2} = 10,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$H_{12} = \delta_1 / \delta_2 = 1,84 / 0,9547 = 1,92 \approx 1,9$$

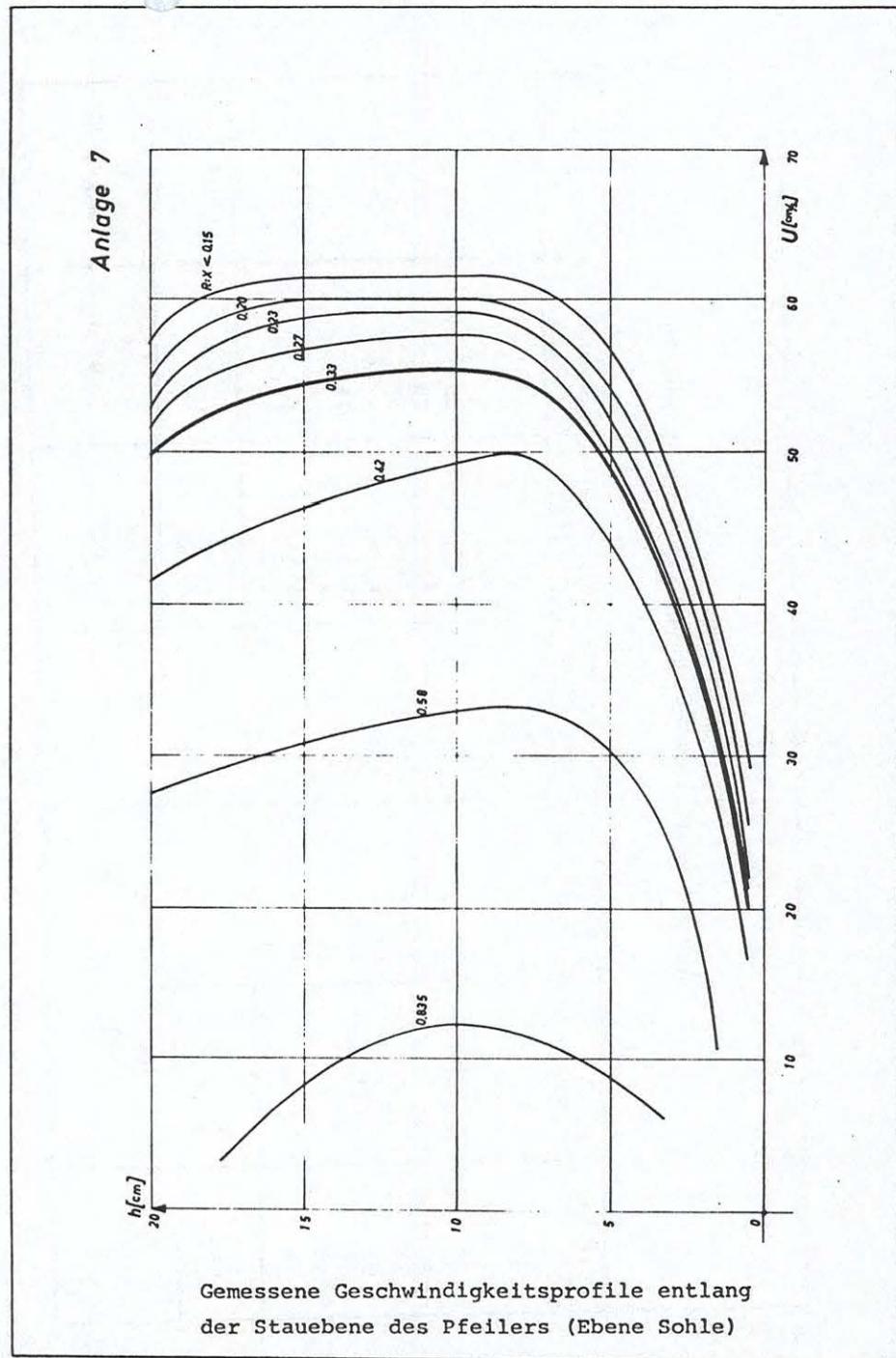
C_{fx} nach Anlage 1 (E-Ver.) , Anl. 3 (D-Ver.)

H_{32} nach Anlage 2

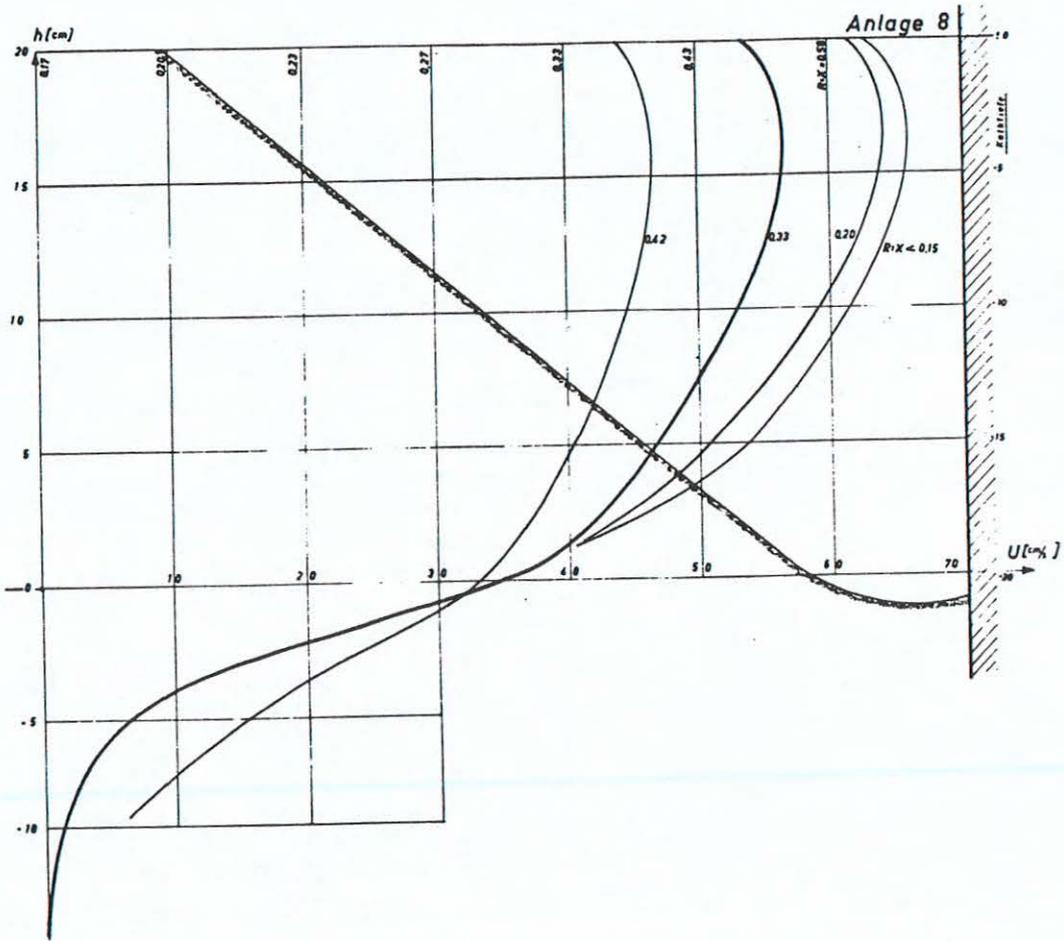
e^a nach Anlage 4

y, Y-Werte Anlage 6

$x = \frac{R}{X}$	$y = \frac{U}{U_0} x = 1 - 0,05x - 1,13x^2$	$y' = -(0,05 + 2,26x)$	$\gamma = \frac{\partial U_x / \partial x}{U_x}$
0.10	0.983700	-0.276000	-0.280573
0.11	0.980827	-0.298600	-0.304436
0.12	0.977728	-0.321200	-0.328516
0.13	0.974403	-0.343800	-0.352831
0.14	0.970852	-0.366400	-0.377400
0.15	0.967075	-0.389000	-0.402243
0.16	0.963072	-0.411600	-0.427382
0.17	0.958843	-0.434200	-0.452837
0.18	0.954388	-0.456800	-0.478631
0.19	0.949707	-0.479400	-0.504787
0.20	0.944800	-0.502000	-0.531329
0.21	0.939667	-0.524600	-0.558282
0.22	0.934308	-0.547200	-0.585674
0.23	0.928723	-0.569800	-0.613530
0.24	0.922912	-0.592400	-0.641881
0.25	0.916875	-0.615000	-0.670756
0.26	0.910612	-0.637600	-0.700188
0.27	0.904123	-0.660200	-0.730210
0.28	0.897403	-0.682800	-0.760857
0.29	0.890467	-0.705400	-0.792168
0.30	0.883300	-0.728000	-0.824182
0.31	0.875907	-0.750600	-0.856940
0.32	0.868288	-0.773200	-0.890487
0.33	0.860443	-0.795800	-0.924872
0.34	0.852372	-0.818400	-0.960144
0.35	0.844075	-0.841000	-0.996356
0.36	0.835552	-0.863600	-1.033568
0.37	0.826803	-0.886200	-1.071839
0.38	0.817828	-0.908800	-1.111236
0.39	0.808627	-0.931400	-1.151828
0.40	0.799200	-0.954000	-1.193693
0.41	0.789547	-0.976600	-1.236911
0.42	0.779668	-0.999200	-1.281571
0.43	0.769563	-1.021800	-1.327766
0.44	0.759232	-1.044400	-1.375600
0.45	0.748675	-1.067000	-1.425184
0.46	0.737892	-1.089600	-1.476638
0.47	0.726883	-1.112200	-1.530094
0.48	0.715648	-1.134800	-1.585695
0.49	0.704187	-1.157400	-1.643597
0.50	0.692500	-1.180000	-1.703971



Gemessene Geschwindigkeitsprofile entlang der
Staubebene des Pfeilers (Ausgekolkte Sohle)

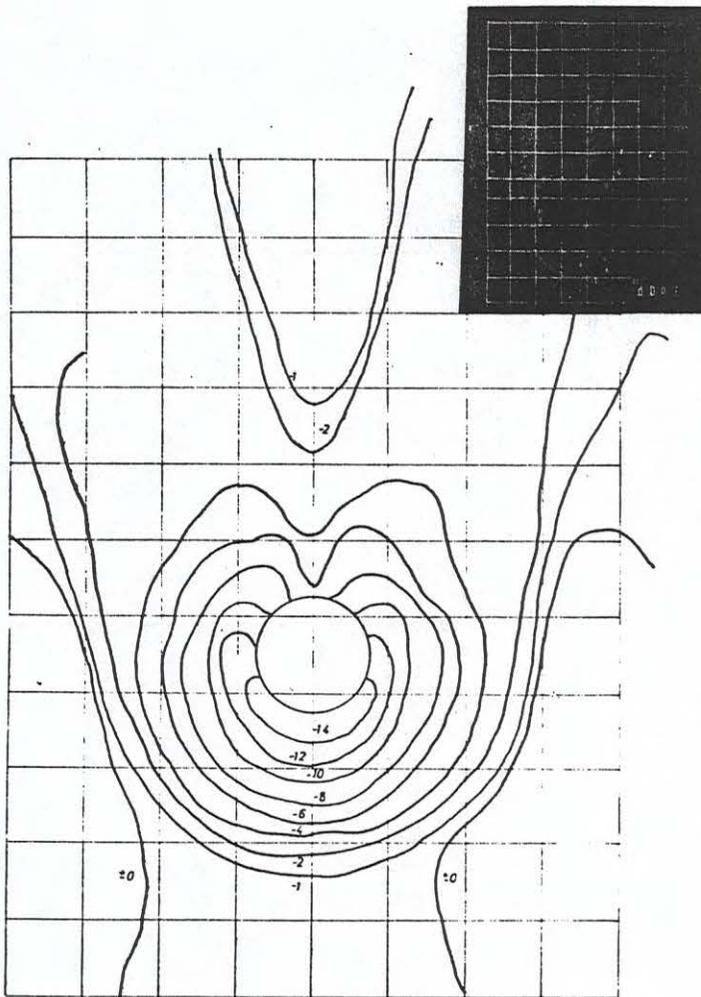


Anlage 8

$(R/X) =$ $x = \text{cm}$	0,15 80	0,20 30	0,23 25	0,27 20	0,33 15	0,43 10
$U =$		60.25	59.4	57.4	55.4	50
$y =$	61.8 1	1	1	1	1	1
$u_i =$	32 37 45 50.6 55 58 60 61 61.6	26 34.8 42.2 48.3 52.3 55.2 57.3 58.8 59.8 60.2	24 32.8 40 46 50.4 53.6 56.2 58 58.4 59.1	19 31 38 43.6 48 51.35 54 56 57.3 57.3	10 30 37 42.5 46 50 52.6 54.2 54.8 55 55.4	0 25 32 38 42 45.4 48 49.4 50
$H_{12} =$	1.499151	1.583584	1.627250	1.733470	1.977731	2.582191

Ausgewerte H_{12} -Werte für das Geschwindigkeitsprofil
der Anlage 7

Anlage 9



Ausgelegter Kolk (d_2, D, q, Fr_2)

DER KOLKSCHUTZ

Die Ergebnisse dieser Untersuchung können als Grundlagen für einen Befestigungsvorschlag dienen um einen Pfeiler vor der von einem Kolk ausgehenden Gefahr zu schützen. Ein solcher Kolkschutz kann "indirekt" oder "direkt" vorgenommen werden.

Ein indirekter Schutz wäre der Bau eines Pfeilers mit einem kleineren Durchmesser oberstrom des zu schützenden Pfeilers, so daß die Stromlinien unter einem flacheren Winkel abgelenkt werden und ein kleiner Kolk vor dem dünnen Pfeiler auftritt. Durchgeführte Versuche [8] zeigten eine Verminderung der Kolkdimensionen um mindestens 20%. Diese Methode muß jedoch als wenig elegant und teuer angesehen werden.

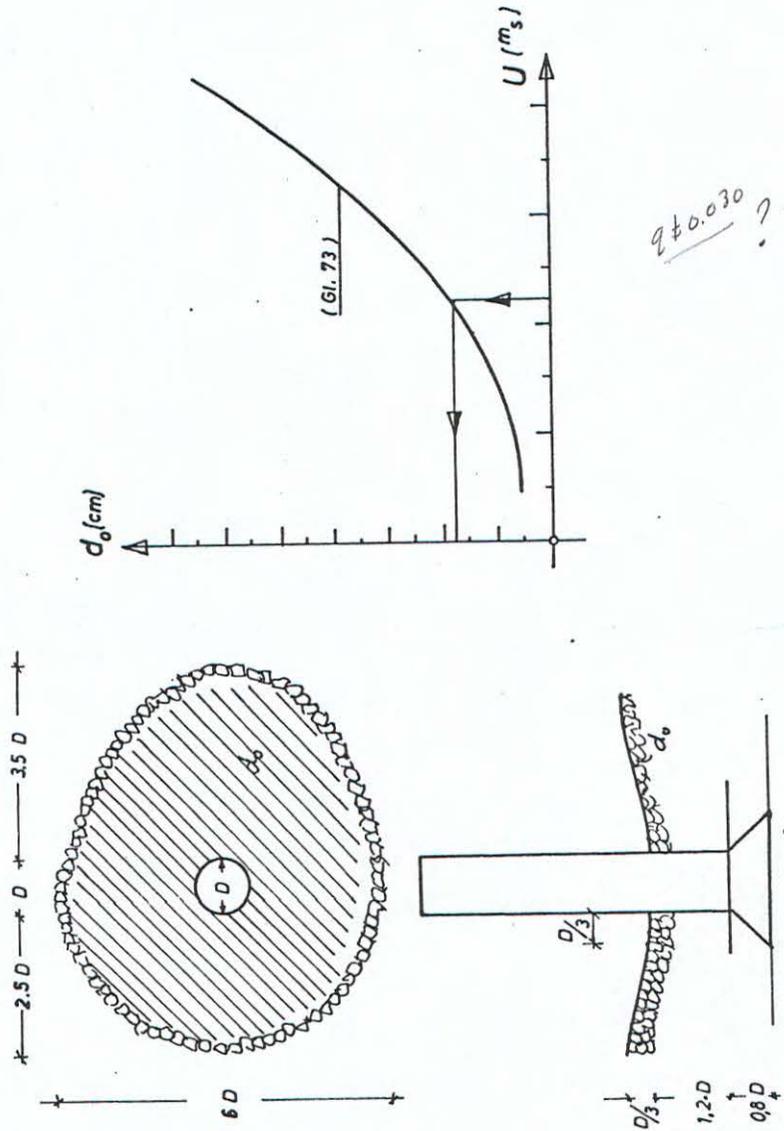
Ein direkter Schutz erfolgt, indem die Flußsohle um den Pfeiler befestigt wird. Die Mulde am Fuße des Pfeilers (s.nächste Seite) erscheint wichtig, da sie den natürlichen Verhältnissen besser entspricht [22]. Zur Ausführung wird ein Steinwurf mit einem Mindest-Durchmesser von:

$$d_0 = 6 - 3,3 U + 4 U^2 \quad (73)$$

vorgeschlagen. Die obige Beziehung (73) wurde aus den Versuchsmessungen von Maza [53] ermittelt.

Von Dietz [12] wird eine Pflasterung empfohlen.

Gemessene Kolkcharakteristiken (d_1) zu Abb. 33, $t=2\text{St.}$) $b/2$ 55



$q \pm 0.030$?

Befestigungsvorschlag für die Sohle um den Pfeiler

U	h
0.228	0.1319
0.298	0.1006
0.364	0.0832
0.473	0.0832
0.2912	0.2101
0.379	0.1613
0.455	0.1319
0.582	0.1031
0.228	0.132
0.298	0.101
0.350	0.083
0.291	0.210
0.379	0.160
0.455	0.132
0.582	0.10
0.228	0.132
0.298	0.101
0.364	0.086
0.291	0.209
0.379	0.160
0.456	0.132
0.582	0.103
0.228	0.132
0.298	0.101
0.364	0.083
0.260	0.200
0.379	0.160
0.456	0.132
0.582	0.103

? $q=0.006$

Versuch Nr.	Kolktiefe [K](cm)	K/h	D/h	U_c/U	R/X	u	K/D
$d_1 D_1 q_1 Fr_1$	2,75	0,208	0,379	1,600	0,510	22,8	0,55
Fr_2	7,00	0,696	0,497	1,220	0,230	29,8	1,20
Fr_3	8,00	0,962	0,601	1,000	0,170	36,4	1,60
Fr_4	8,10	0,965	0,601	0,769	unaef.	47	1,60
$q_2 Fr_1$	7,50	0,358	0,238	1,250	0,230	29	1,50
Fr_2	7,68	0,481	0,310	0,960	0,170	30	1,6
Fr_3	6,00	0,454	0,379	0,800	0,175	25	1,2
Fr_4	5,50	0,534	0,485	0,625	0,170	28	1,1
$D_2 q_1 Fr_1$	5,00	0,379	0,758	1,600	0,545		
Fr_2	13,05	1,297	0,994	1,220	0,270		
Fr_3	9,55	1,150	1,206	1,040	0,200		0,7
$q_2 Fr_1$	10,50	0,500	0,477	1,250	0,300	29	1,01
Fr_2	11,50	0,720	0,626	0,960	0,200	30	1,15
Fr_3	13,85	1,050	0,758	0,800	0,210	41	1,7
Fr_4	13,30	1,291	1,00	0,625	0,200	1,9	1,0
$D_3 q_1 Fr_1$	3,00	0,227	0,947	1,600	0,630		
Fr_2	13,58	1,350	1,243	1,220	0,290		1,0
Fr_3	13,18	1,540	1,450	1,000	0,200		0,7
$q_2 Fr_1$	13,60	0,650	0,597	1,250	0,320		
Fr_2	13,80	0,864	0,782	0,960	0,210		1,1
Fr_3	12,50	0,947	0,947	0,800	0,230		
Fr_4	14,62	1,420	1,214	0,625	0,210	1,7	0,7
$D_4 q_1 Fr_1$	6,30	0,478	1,137	1,600	0,670		
Fr_2	13,00	1,290	1,490	1,220	0,320		
Fr_3	17,20	2,000	1,805	1,000	0,240		1,1
$q_2 Fr_1$	9,00	0,430	0,716	1,400	0,340		0,55
Fr_2	14,55	0,911	0,938	0,960	0,220		
Fr_3	17,20	1,304	1,137	0,800	0,235		
Fr_4	15,85	1,530	1,450	0,625	0,220		1,1

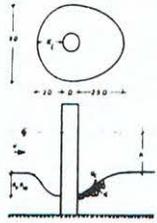
Beginn der Geschiebebewegung im Modell bei $U=0,364\text{m/s}=U_c$
 Kritische Geschw. des Sohlgeschiebes nach Bez. (58)
 $U_c^2 = (15d+6) \cdot g = 0,155 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $U_c = 0,394 \text{ m/s}$.

Versuch Nr.	Kolktiefe	K/h	D/h	U_c/U	R/X	h
0.226 $d_2 D_1 q_1 Fr_1$	1,85	0,114	0,379	2,080	0,370	0.132 \checkmark
0.359 Fr_3	4,81	0,580	0,600	1,310	0,230	0.083 \checkmark
0.47 Fr_4	7,80	1,230	0,780	1,000	0,175	0.064 \checkmark
0.288 $q_2 Fr_1$	2,30	0,100	0,230	1,630	0,380	0.217 \checkmark
0.376 Fr_2	5,00	0,320	0,310	1,250	0,215	0.161 \checkmark
0.452 Fr_3	7,80	0,590	0,379	1,040	0,170	0.132 \checkmark
0.580 Fr_4	5,55	0,540	0,485	0,810	0,180	0.103 \checkmark
0.359 $q_3 Fr_1$	3,78	0,114	0,150	1,310	0,235	0.333 \checkmark
0.47 Fr_2	9,50	0,375	0,197	1,000	0,175	0.254 \checkmark
0.226 $D_2 q_1 Fr_1$	1,52	0,115	0,750	2,080	undef.	0.133 \checkmark
0.296 Fr_2	6,54	0,650	0,990	1,590	0,390	0.101 \checkmark
0.359 Fr_3	9,00	1,080	1,200	1,310	0,250	0.083 \checkmark
0.470 Fr_4	12,63	1,992	1,570	1,000	0,192	0.064 \checkmark
0.288 $q_2 Fr_1$	4,82	0,230	0,470	1,630	undef.	0.213 \checkmark
0.376 Fr_2	10,90	0,680	0,625	1,250	0,240	0.160 \checkmark
0.452 Fr_3	14,50	1,100	0,758	1,040	0,190	0.132 \checkmark
0.359 $q_3 Fr_1$	8,00	0,241	0,300	1,310	0,250	0.333 \checkmark
0.47 Fr_2	13,72	0,540	0,390	1,000	0,190	0.256 \checkmark
0.359 $D_3 q_1 Fr_3$	9,52	1,140	1,490	1,310	0,292	0.084 \checkmark
0.47 Fr_4	15,00	2,320	1,971	1,000	0,200	0.063 \checkmark
0.288 $q_2 Fr_1$	6,00	0,286	0,600	1,630	undef.	0.208 \checkmark
0.376 Fr_2	10,00	0,620	0,782	1,250	0,260	0.160 \checkmark
0.452 Fr_3	14,50	1,100	0,937	1,040	0,210	0.133 \checkmark
0.577 Fr_4	13,90	1,350	1,214	0,815	0,210	0.103 \checkmark
0.359 $q_3 Fr_1$	8,00	0,275	0,376	1,310	0,289	0.332 \checkmark
0.47 Fr_2	16,30	0,630	0,492	1,000	0,208	0.254 \checkmark
0.226 $D_4 q_1 Fr_1$	2,00	0,150	1,140	2,080	undef.	0.132 \checkmark
0.313 Fr_2	6,34	0,630	1,470	1,500	0,45	0.102 \checkmark
0.359 Fr_3	10,23	1,230	1,805	1,310	0,309	0.083 \checkmark

U_c gemessen : (d_2) = 0,47 m/s , nach (58) $U_c = 0,482$ m/s
 : (d_3) = 0,74 m/s , " " $U_c = 0,740$ m/s

Versuch Nr	Kolktiefe	K/h	D/h	U_c/U	R/X	h
0.470 $d_2 D_4 q_1 Fr_4$	14,60	2,300	2,365	1,000	0,290	0.063 \checkmark
0.288 $q_2 Fr_1$	5,86	0,280	0,710	1,630	undef.	0.211 \checkmark
0.336 Fr_2	11,70	0,730	0,930	1,400	0,300	0.161 \checkmark
0.452 Fr_3	15,70	1,130	1,200	1,040	0,230	0.125 \checkmark
0.313 $q_3 Fr_1$	10,50	0,316	0,450	1,500	0,313	0.333 \checkmark
0.470 Fr_2	22,77	0,898	0,591	1,000	0,220	0.254 \checkmark
0.583 $d_3 D_1 q_2 Fr_4$	5,00	0,485	0,485	1,270	undef.	0.103 \checkmark
0.474 $q_3 Fr_2$	1,70	0,067	0,197	1,560	0,480	0.254 \checkmark
0.574 Fr_3	2,70	0,129	0,239	1,290	0,290	0.209 \checkmark
0.751 Fr_4	9,00	0,560	0,312	0,985	0,200	0.160 \checkmark
0.455 $D_2 q_2 Fr_3$	3,40	0,258	0,750	1,626	0,600	0.133 \checkmark
0.583 Fr_4	10,0	0,970	0,970	1,270	0,310	0.103 \checkmark
0.474 $q_3 Fr_2$	1,60	0,063	0,394	1,560	undef.	0.254 \checkmark
0.574 Fr_3	10,00	0,460	0,470	1,290	0,360	0.213 \checkmark
0.751 Fr_4	15,00	0,940	0,666	0,985	0,210	0.150 \checkmark
0.582 $D_3 q_2 Fr_4$	13,65	1,330	1,210	1,271	0,335	0.103 \checkmark
0.574 $q_3 Fr_3$	12,20	0,580	0,597	1,290	0,330	0.209 \checkmark
0.751 Fr_4	18,20	1,140	0,780	0,985	0,240	0.160 \checkmark
0.455 $D_4 q_2 Fr_3$	5,60	0,420	1,140	1,626	0,720	0.132 \checkmark
0.582 Fr_4	13,88	1,350	1,460	1,271	0,370	0.103 \checkmark
0.473 $q_3 Fr_2$	7,61	0,300	0,590	1,564	0,620	0.254 \checkmark
0.573 Fr_3	10,45	0,500	0,710	1,291	0,400	0.211 \checkmark
0.750 Fr_4	9,60	0,600	0,940	0,987	0,240	0.160 \checkmark

U_c (d_2) = 0,47 m/s , U_c (d_3) = 0,74 m/s



Größen

- D : Brückenpfeilerdurchmesser
- d : Kernradius des Deckens (Abb. 2)
- h : Wassertiefe
- U : mittlere Fließgeschwindigkeit
- U_C : kritische Geschwindigkeit
- K_f : Rauheitskoeffizient (K_f Manning)
- f_p : Zeitsfaktor
- K_{ab} : Einheitsbreite

Beispiel

$D = 21m, h = 21m, d = 8mm, u = 10mm, K_{ab} = 1$
 Rechter Verlauf: $K_f = 1,2, K_p = 1,2, K_{ab} = 1,2, u = 10, h = 21, D = 21m$
 Linker Verlauf: $K_f = 2, K_p = 2, K_{ab} = 2, u = 10, h = 21, D = 21m$
 Überhöhung der Stützen: $h = 1,8$ (Abb. 4)

Arbeitsblatt für die Berechnung der Kolkdimensionen am runden Brückenpfeiler

Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München Inst. Bericht 28

