

Mitteilungen
der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau,
Berlin.
Heft 26. 1936.

Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung

Von

Dr.-Ing. A. Shields

BERLIN 1936.

Erschienen im Eigenverlage
der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau,
Berlin NW 87.

Als Dissertation zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
von der Technischen Hochschule Berlin genehmigt am 30. 6. 1936



Inv. St. B. *2* No. *1338*
(Kreuzen)

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	5
Erster Abschnitt	
Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse	5
Schlußbemerkungen	9
Zweiter Abschnitt	
Beginn der Geschiebepbewegung	9
Einfluß des Gefälles	13
Einfluß der Mischung	13
Einfluß des Gewichtes	14
Einfluß der Kornform	14
Schlußbemerkungen	15
Dritter Abschnitt	
Die Geschiebeführung	16
Beharrungszustand	16
Die Form der Bettausbildung	17
Der Geschiebetrieb	18
Einfluß der Größe	20
Einfluß des Gewichtes	20
Einfluß des Gefälles	21
Einfluß der Kornform	21
Schießende Strömung	21
Vorteile der leichteren Geschiebesorten	21
Schlußbemerkungen	21
Vierter Abschnitt	
Beschreibung der Versuche	22
Geschiebesorten	22
Versuchseinrichtungen	22
Herstellung des Bettes	22
Durchführung der Versuche	23
Zusammenfassung	23
Schriftumsverzeichnis	26

Einleitung.

Die Hauptschwierigkeiten bei der Lösung einer Frage der Geschiebebewegung eines Flusses sind 1. mangelnde Kenntnis des Naturvorgangs und 2. erzwungene Abweichungen von der Modellähnlichkeit.

Man ist an erster Stelle auf Versuche in Versuchsrinnen angewiesen, um allgemeine Kenntnisse über die Geschiebebewegung zu gewinnen, und kann dann hieraus Gesetze ableiten, die, wenn gewisse Bedingungen erfüllt sind, Gültigkeit auch für den Vorgang in Flüssen besitzen. Diese Gesetze werden freilich nicht für alle Geschiebeaufgaben im Flußbau ausreichen. In zweiter Linie muß man die unvermeidlichen Unähnlichkeiten des Flußmodells so gering wie möglich halten, damit die Ergebnisse mit einiger Sicherheit übertragen werden können.

Um auf diesen beiden Wegen weiterzukommen, wurden in der VWS¹⁾ die im folgenden beschriebenen Versuche unternommen, um die Einflüsse des Korngewichtes und der Kornform auf die Bewegung des Wassers und des Geschiebes festzustellen.

Die vorliegende Arbeit ist in vier Abschnitte geteilt.

Im ersten Abschnitt ist ein Verfahren zur Berechnung der wirkenden Kraft des strömenden Wassers auf einen Teilumfang und die hierzu gehörige Teilwassermenge gegeben, wenn der Querschnitt gleich rauhen Umfang hat. Die abgeleiteten Gleichungen sind auf den Sonderfall einer rechteckigen Rinne angewendet und ergeben einfache Ausdrücke für die wesentlichen Größen.

Bei ungleichen Umfangsrauigkeiten waren diese am Besten zeichnerisch zu ermitteln mit Hilfe der Geschwindigkeitsverteilung in der Rinne.

Im zweiten Abschnitt werden die Verhältnisse beim Beginn der Geschiebebewegung einer grundsätzlichen Betrachtung unterzogen. Durch eine statistische Behandlung der auftretenden Kräfte und Benutzung der Versuchsergebnisse in rauhen Röhren konnte der Schleppspannungsbeiwert $\left(\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}\right)$ als Funktion des Ausdrucks $\left(\frac{v_0 d}{\nu} - \frac{d}{\delta}\right)$ abgeleitet werden²⁾. Die Abhängigkeit dieser Funktion von der Kornform ist im einzelnen erläutert.

Im dritten Abschnitt wird die Geschiebebewegung behandelt und zwar aus drei Gesichtspunkten: Zuerst ist die Beharrlichkeit einer gewissen Bewegungsart untersucht, weil diese die notwendige Grundlage für alle weiteren Rechnungen bildet. Als zweites werden die verschiedenen Bewegungsarten eingeordnet und beschrieben. Drittens sind Verfahren zur Aufstellung von empirischen Gleichungen erörtert.

Im vierten Abschnitt werden die beim Versuch benutzten Geschiebesorten, die Versuchseinrichtungen und die Versuchsdurchführung beschrieben.

¹⁾ Preußische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau in Berlin.
²⁾ siehe Seite 12.

Erster Abschnitt.

Uebertragbarkeit der Versuchsergebnisse.

Der schwerste Einwand gegen die Vergleichbarkeit der in einer Rinne von rechteckigem Querschnitt gewonnenen Modellversuchsergebnisse unter sich und gegen ihre Uebertragung auf die Natur dürfte der Mangel an Formähnlichkeit sein. Jede Wassertiefe stellt bei gleichbleibender Rinnebreite eine andere Querschnittsform dar. Womöglich möchte man die Rinneversuche mit einer veränderlichen, endlichen Breite auf eine unendliche Breite übertragen, da dies nicht nur eine gleiche Grundlage geben würde, sondern auch den Verhältnissen in natürlichen Flüssen in den meisten Fällen recht nahekommt. Wenn wir versuchen, anstelle der Tiefe, den sogenannten hydraulischen Radius $R = F : U$ (auch Umfangstiefe genannt, d. i. die Querschnittsfläche F geteilt durch den benetzten Umfang U zu setzen, merken wir sofort, daß dieses ein willkürliches Vorgehen ist, weil der hydraulische Radius die Form der Rinne nicht genügend berücksichtigt. Diese Größe ist übernommen von Untersuchungen in geschlossenen Rohrleitungen von gleicher Umfangsrauigkeit; hier unter einfacheren Verhältnissen hat sie gute Ergebnisse bei der Widerstandsmessung geliefert. Es entsteht die Frage, ob ihre Anwendung für unsere offene Rinne berechtigt sei.

Das offene Gerinne muß also einer grundsätzlichen Betrachtung unterzogen werden und zwar folgenderweise:

Zuerst wird der Impulssatz auf den gesamten Querschnitt angewendet und es werden die „Begrenzungsflächen“ wie in Abb. 1 gezogen.

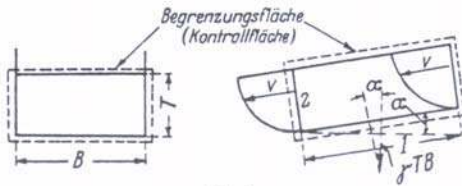


Abb. 1.

Eine Summation der Kräfte ergibt: Bei gleichförmiger Strömung ergeben die Impulskräfte auf Fläche 1 u. 2:

$$\rho \int_0^{T_1} \int_0^{B_1} \tau_1 \tau_1 dt db = \rho \int_0^{T_2} \int_0^{B_2} \tau_2 \tau_2 dt db = 0$$

und die Druckkräfte gleichen sich ebenfalls aus:

$$\int_0^{T_1} \int_0^{B_1} p_1 dt db = \int_0^{T_2} \int_0^{B_2} p_2 dt db = 0$$

Also bleiben bei gleichförmiger Strömung nur noch die reibenden Kräfte und die Druckkräfte infolge des Wassergewichtes übrig. Die Teilkraft des Gewichtes in der Fließrichtung muß also gleich der Gesamtschubkraft auf den Umfang gesetzt werden.

$$\gamma BT \sin \alpha = B \tau_{\text{Sohle}} + 2T \tau_{\text{Wand}} + B \tau_{\text{Luft}}$$

Bei kleinem α ist $\sin \alpha \sim \tan \alpha = J = \text{Gefälle}$.

Wenn die Luftreibung vernachlässigt wird und

$$B \tau_{\text{Sohle}} + 2T \tau_{\text{Wand}} = (B + 2T) \tau_{\text{mittel}}$$

gesetzt wird, dann ist

$$\gamma BTJ = (B + 2T) \tau_m \quad \text{und} \quad \tau_m = \gamma J \frac{TB}{B+2T} = \gamma J R_m$$

Die Benutzung des hydraulischen Radius in dieser Weise ergibt also lediglich eine über den benetzten Umfang gemittelte Schubspannung. Diese darf im allgemeinen nicht gleich der Schubspannung an der Sohle (Schleppspannung) gesetzt werden.

Wenn wir die besondere Kraftwirkung auf der Sohle ermitteln wollen, dann müssen wir den Impulsatz in folgender Weise auf die Sohle anwenden:

Die Trennflächen werden jetzt durch die Eckpunkte der Sohle und senkrecht zu den Isotachen der Strömung gezogen. Abb. 2 zeigt eingezeichnete Trennflächen für ein Strömungsbild.

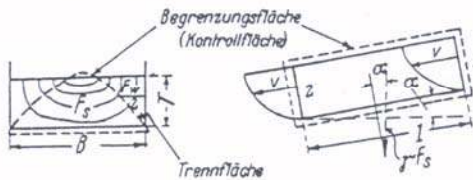


Abb. 2.

Da die Trennflächen die Isotachen senkrecht schneiden, werden längs dieser Flächen keine Schubkräfte übertragen¹⁾. Eine Summation der Kräfte in der Fließrichtung, wieder unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes, und der Einsatz von $\sin \alpha = J$ ergibt:

$$\gamma F_s J = B \tau_{\text{Sohle}} \quad \text{also} \quad \tau_s = \gamma J \frac{F_s}{B}$$

$$\text{und} \quad \gamma F_w J = 2T \tau_{\text{Wand}} \quad \text{also} \quad \tau_w = \gamma J \frac{F_w}{2T}$$

Es bleiben also noch die Teilquerschnittsflächen F_s und F_w zu bestimmen. Die Untersuchung einer Reihe von Isotachenbildern zeigt, daß in zusammengesetzten Querschnitten mit Umfängen gleicher Rauigkeit oder bei ungleicher Rauigkeiten, wenn $\frac{v_{\text{max}}}{v} < \sim 0,05$ (siehe Seite 12 und Nikuradse (1)²⁾

¹⁾ siehe auch Leighly-University of California Publications in Engineering 1934. (Die zeitweise auftretenden Schubkräfte infolge der turbulenten Schwankungen gleichen sich aus.)

²⁾ siehe Schrittverzeichnis im Anhang.

Seite 10) eine gut angenäherte Teilung des Querschnittes durch mittel- und winkelhalbierende Linien erzielt werden kann.³⁾

Für eine rechteckige, offene Rinne wird nach diesem Verfahren

$$\left. \begin{aligned} \tau_s &= \gamma J T \left(1 - \frac{T}{B}\right) & \text{für } 0 \leq \frac{T}{B} \leq \frac{1}{2} \\ \text{und} \\ \tau_s &= \gamma J \frac{B}{4} & \frac{T}{B} \leq \frac{1}{2} \\ \text{für die Wände ist jetzt} \\ \tau_w &= \gamma J \frac{T}{2} & 0 \leq \frac{T}{B} \leq \frac{1}{2} \\ \text{und} \\ \tau_w &= \gamma J \frac{B}{2} \left(1 - \frac{B}{4T}\right) & \frac{T}{B} \leq \frac{1}{2} \end{aligned} \right\} 1$$

Wenn die Umfangteile mit $U_1, U_2, U_3, U_4, \dots, U_n$ bezeichnet sind und die dazugehörigen Teilquerschnittsflächen mit F_1, F_2, \dots, F_n , dann wird das Verhältnis

$$\frac{F_1}{U_1}, \frac{F_2}{U_2}, \dots, \frac{F_n}{U_n} = R_1, R_2, \dots, R_n \dots \text{ der Teilprofilradius genannt, zu unterscheiden von dem Gesamtprofilradius } R_m = \frac{F}{U}$$

Es ist leicht einzusehen, daß für eine offene rechteckige Rinne $R_s = R_w = R_m$ (bzw. $\tau_s = \tau_w = \tau_m$) nur bei $\frac{T}{B} = \frac{1}{2}$ gilt, und weiter, daß $R_s = R_m$ bzw. $\tau_s = \tau_m$ bei unendlicher Breite, und $R_w = R_m$ bzw. $\tau_w = \tau_m$ bei unendlicher Tiefe. Sonst sind sie verschieden (siehe Abb. 3).

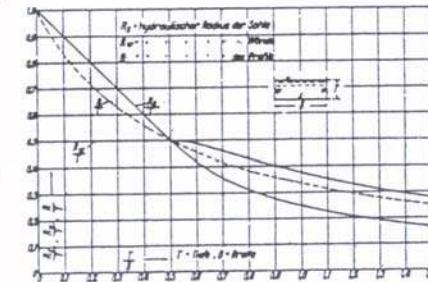


Abb. 3.

Hydraulischer Radius — Tiefe-Verhältnisse gegen das Tiefe-Breite-Verhältnis.

³⁾ Dies würde zunächst nur für die primäre Strömung gelten. Da aber die sekundäre Strömung längs mittel- und winkelhalbierender Linien stattfindet, (s. Prandtl) würde sie keinen Einfluß auf die Verteilung des Querschnittes ausüben.

Die sekundäre Strömung bewirkt also nur eine Änderung der Schubkraftverteilung auf eine Umfangfläche, ohne die gesamte Schubkraft auf dieser Fläche zu ändern. In einer offenen Rinne ist dieses Bild durch Luftreibung und Oberflächenspannung des Wassers z. T. verzerrt, aber Messungen zeigen, daß die obige Annahme auch hier gerechtfertigt ist.

In den bisher abgeleiteten Ausdrücken wurde nur von der Kraft gesprochen. Man möchte aber weiter wissen, wie groß z. B. die Wassermenge ist, die der Sohle zuzuschreiben wäre, d. h. wie groß die mittleren Geschwindigkeiten der Teilquerschnitte sind.

Im Falle, daß alle Teilprofilradien gleich groß sind und auch der Umfang überall gleich beschaffen ist, wären die mittleren Teilgeschwindigkeiten gleich groß und $v_1 = v_2 \dots = v_n \dots = v_m$. Nach unserer Berechnung, d. h. wenn die Teilprofilradien im allgemeinen nicht gleich groß sind, ist v_n durch die folgende Formel gegeben:

$$v_n = \sqrt{2gJ} \sqrt{\frac{R_n}{\lambda_n}} = C \sqrt{R_n J}$$

Hier ist R_n als bekannt nach der obigen Berechnung anzusehen, λ_n ist selbst bei überall gleicher Umfangbeschaffenheit im allgemeinen nicht unveränderlich, sondern nach den bekannten Widerstandsformeln v. Kármán (3), Nikuradse-Prandtl (4), Nikuradse (1) zu berechnen. Zur Nachprüfung kann man immer die Gleichung

$$Q = v_m F = \sum v_n U R_n$$

heranziehen, worin Q die gemessene Durchflußmenge und v_n die gerechneten Teilgeschwindigkeiten bedeuten. Solche Rechnungen sind sehr langwierig und da es außerdem immer noch fraglich ist, ob die Anwendung der Ergebnisse von Kreisrohrversuchen auf die hier in Frage kommenden Teilquerschnitte zulässig ist, empfiehlt es sich, die mittleren Teilgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der mittleren Querschnittsgeschwindigkeit auszudrücken, indem aus:

$$\sqrt{2gJ} = \frac{v_n}{\sqrt{\frac{R_n}{\lambda_n}}} = \frac{v_m}{\sqrt{\frac{R_m}{\lambda_m}}}$$

folgt:

$$v_n = \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_n}\right)^{1/2} v_m \left(\frac{R_n}{R_m}\right)^{1/2}$$

Hier ist nur das Verhältnis $\frac{\lambda_m}{\lambda_n}$ als unbekannt anzusehen. Da aber in den meisten praktischen Fällen R_n nicht sehr verschieden von R_m ist und die Abhängigkeit des λ von R verhältnismäßig schwach ist, bringt die Annahme

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_n} = 1$$

bei gleicher Beschaffenheit der Umfangteile nur einen unbedeutenden Fehler mit sich. Die mittlere Teilgeschwindigkeit wird also

$$v_n = \left(\frac{R_n}{R_m}\right)^{1/2} v_m \quad (2)$$

und die Durchflußmenge folglich

$$v_n F_n = v_n U_n R_n = U_n R_n \left(\frac{R_n}{R_m}\right)^{1/2} v_m$$

Geschwindigkeitsmessungen in Querschnitten mit überall gleicher Wandbeschaffenheit zeigen eine gute Bestätigung dieses Zusammenhanges.

Es wäre aufschlußreich, die Gleichungen der obigen Entwicklung durch Versuche nachzuprüfen. Zwei einschlägige Versuche sind bekannt, nämlich die in einer rechteckigen, offenen Rinne gemachten Sohlenschubspannungsmessungen von Engels (5) und die später mehr ausführlich gemachten Schubspannungsmessungen mittels beweglichen Platten an Sohle und Wand von gleicher Rauigkeit von Schöber (6). Die Engels'schen Messungen zeigten sich als nicht ausreichend zur Prüfung der obigen Gleichungen. Die Schöber'schen Messungen sind mit dem Verhältnis $\frac{T}{B} = 0,3$ durchgeführt. R_1 weist also einen großen Unterschied gegen R_m auf, und diese Versuche sind deshalb geeignet zur Nachprüfung. Es ist am zweckmäßigsten, die relativen Werte Schöbers zu benutzen und zwar in Form des Verhältnisses der Wand- zur Sohlenschubspannung. Nach der älteren Anschauung ist (da R_m an der Stelle von R_1 benutzt wird) $\frac{\tau_w}{\tau_s} = 1$. Nach der Berechnung der hydraulischen Radien der Teilquerschnitte ist bei

$$\frac{T}{B} = 0,3, \quad \frac{R_w}{R_s} = \frac{\tau_w}{\tau_s} = 0,715$$

Nach der Arbeit von Schöber mit $\frac{T}{B} = 0,3$ und $\frac{C_s}{C_w} = 1$:

Wassergeschwindigkeit m/sec.	$\frac{\tau_w}{\tau_s}$	
	nach Theorie	nach Messungen von Schöber
0,1	0,715	0,66
0,2	0,715	0,732
0,3	0,715	0,886
0,4	0,715	0,711
0,5	0,715	0,710
0,6	0,715	0,722
		i. M. 0,703

Das Verhältnis Wand- zur Sohlenschubspannung.
Tafel 1.

Die obige Tafel zeigt eine Zusammenstellung der Schöber'schen $\frac{\tau_w}{\tau_s}$ Werte bei den verschiedenen von ihm untersuchten Wassergeschwindigkeiten. Die eingetragenen $\frac{\tau_w}{\tau_s}$ Werte stellen Mittelwerte der ganzen Schöber'schen Messungen dar und geben eine sehr gute Bestätigung der Berechtigung, einen hydraulischen Radius für die Teilquerschnitte einzuführen, besonders bei den großen Geschwindigkeiten, wo die Meßfehler verhältnismäßig gering sind. Die Aussage über die mittleren Geschwindigkeiten der Teilquerschnitte nach der Formel

$$v_n = \left(\frac{R_n}{R_m}\right)^{1/2} v_m$$

ist durch die Isotachenbilder (von Nikuradse u. A.) ebenfalls unterstützt. Nur sind solche Berechnungen infolge der ungenauen Feststellung der Trennungsf lächen, die senkrecht zu den Isotachen stehen, auch mit einer entsprechenden Ungenauigkeit behaftet.

Wenn die Rauigkeiten der Umfänge verschieden sind, und $\frac{v_w d}{\nu} > \sim 0,05$, dann wird die Querschnittsverteilung nicht nur durch die Profilform (z. T. auch Luftreibung, Oberflächenspannung und sekundäre Strömung), sondern auch durch die verschiedenen Wandrauigkeiten bedingt und zwar wird je größer die Verschiedenheit der Rauigkeit von einem Umfangteil relativ zum anderen ist, diese „relative Rauigkeit“ umso maßgebender. Die Kenntnis dieses Verhältnisses ist noch zu mangelhaft als daß man allgemeine Gleichungen unter Berücksichtigung der Form des Teilquerschnittes und der Wirkung der „relativen“ Rauigkeit (zusammen mit den anderen Faktoren) aufstellen könnte. Dies wäre aber erforderlich, um mit der weiteren Bedingung, daß die Durchflußmenge ein Größtwert sei, zu einer allgemeinen Lösung zu gelangen.

Für eine sichere Kenntnis des Vorganges sind an sich Geschwindigkeitsmessungen erforderlich, damit das Isotachenbild hergestellt werden kann. Da aber die Herstellung des vollkommenen Isotachenbildes mühsame Arbeit erfordert und meistens nicht notwendig ist, ist es zweckmäßiger, nur einen teilweisen Verlauf der Isotachen festzustellen. In der offenen Rinne wurden die Messungen in folgender Weise vorgenommen:

Ein Pitotrohr wurde auf eine Brücke gestellt, damit das Rohr waagrecht, quer zur Rinne, verschoben werden konnte. Eine Geschwindigkeitsverteilung senkrecht in der Mittelebene wurde aufgenommen, und auf jeder Stufe wurde das Pitotrohr quer verschoben, um zu sehen, in welcher Breite die Geschwindigkeiten der Mittelebene herrschten. In dieser Weise konnte gleichzeitig der Gültigkeitsbereich dieser Geschwindigkeitsverteilung schnell festgestellt werden.

Schleppspannung und mittlere Geschwindigkeit wurden hier dann graphisch ermittelt und dieser Bereich war auch für die Geschiebebewegung maßgebend.

Der Wert der Schleppspannung in diesem Bereich wurde durch die Höhenlage der Höchstgeschwindigkeit festgelegt und solange diese sich auf der Oberfläche befand, konnte die Wassertiefe in dieser Berechnung benutzt werden. Bis das Bett sich übermäßig ausgebildet hatte, war eine Nachprüfung der Schleppspannung gegeben, weil die Wände keinen Einfluß ausübten und die Turbulenz sich frei ausbilden konnte. Es gilt dann

$$\frac{a}{v_*} = a + b \log \frac{v_w d}{\nu} + 5,75 \log \frac{y}{d} = A + 5,75 \log \frac{y}{d} \quad (3)$$

bei quadratischem Widerstand.^{*)}

^{*)} siehe Seite 10 und 5. Das k in der Nikuradeschen Bezeichnung wird durch das im Wasserbau mehr übliche d ersetzt.

Eine Auftragung u über log y würde also eine Gerade mit einer Neigung $\approx 5,75 v_*$ ergeben, also ist

$$\tau = \frac{\gamma}{g} v_*^2 = \frac{\gamma}{g} \left(\frac{N}{5,75} \right)^2$$

Diese Formel hat verhältnismäßig gute Uebereinstimmung bei größeren Wassertiefen gegeben. Bei kleinen Wassertiefen war die Uebereinstimmung unbefriedigend wegen der ungenauen Feststellung dieser Neigungen, aber hier waren die größten Geschwindigkeiten immer auf der Oberfläche, sodaß die Wassertiefen maßgebend waren.

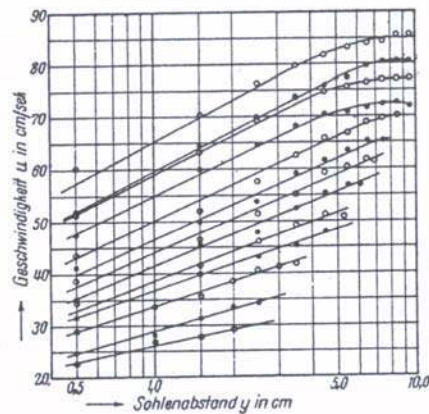


Abb. 4.
Geschwindigkeitsverteilungen für Schwerspat,
d = 1,52 mm und Gefälle = 1 : 600.

Weiter, wo diese Gerade die y = 1 Achse in u = u₁ schneidet, gilt bei quadratischem Widerstand

$$\tau = \frac{\gamma}{g} \left(\frac{U_1}{A + 5,75 \log \frac{1}{d}} \right)^2$$

Da der Wert A = 8,48 von Nikuradse nur für eine bestimmte Rauigkeit gilt, (s. u. Einfluß der Kornform) konnte, mit bekanntem τ , A berechnet werden, wobei sich A-Werte ergaben, die ungefähr 4,0 % kleiner waren.^{*)}

^{*)} in einer Eintragung $\frac{u}{v_*}$ gegen $\log \frac{y}{d}$ konnte das Rauwerden des Bettes infolge der Bettausbildung durch systematische Abweichungen festgestellt werden. Bei quadratischem Widerstand sind die A-Werte für die verschiedenen Rauigkeiten dann durch Gleichung (3) und Gleichung

$$\frac{2,88}{\sqrt{\lambda}} - 5,75 \log \frac{R}{d} + 3,75 = A \text{ gegeben. Der}$$

A-Wert ist die charakteristische hydraulische Größe für eine Rauigkeit und bestimmt zusammen mit der relativen Rauigkeit den λ (bezw. C) Wert.

Abb. 4 u. 5 zeigt eine Auftragung von u gegen y in logarithmischer Einteilung für verschiedene Wassertiefen und bei festgehaltenem Gefälle. Man sieht,

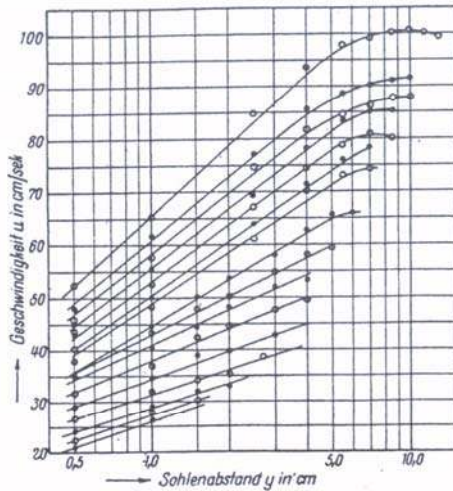


Abb. 5.
Geschwindigkeitsverteilungen für Schwespat,
 $d = 2,46$ mm und Gefälle = 1 : 380.

daß die Luftreibung und Oberflächenspannung eine etwas frühzeitige Abrundung dieser Kurven in der Nähe der Oberfläche bewirken.

Schlußbemerkungen zum ersten Abschnitt.

In diesem Abschnitt ist gezeigt worden, wie Schubspannung und Durchflußmenge für nur einen Teil von einem Umfang, z. B. der Sohle, berechnet werden können. Der praktische Wert dieser Berechnungen ist, daß die Versuchsergebnisse nicht mehr von der Modellform (etwa der Versuchsrinne) abhängig sind. Daher können sie unmittelbar auf die Natur übertragen werden. Die hier verwendeten Methoden geben auch eine Einsicht in die Auswirkung von Formänderungen, z. B. bei Tiefenverzerrung eines Modells, wo es leicht durch ein Isotachenbild einzusehen ist, daß eine erwünschte große Schleppspannung auf der Modellsohle durch Einzunahme der Teilquerschnitte, die zu den Wänden gehören, erheblich beeinträchtigt werden kann. Auch können die Auswirkungen von geplanten Aenderungen in Flußquerschnitten vorausgesehen werden.

Zweiter Abschnitt.

Beginn der Geschiebebewegung.

Im vorigen Abschnitt ist gezeigt, wie die gesamte Tangentialkraft des Wassers auf der Sohle sich (genau mit Hilfe der Isotachen und gut angenähert mit Hilfe der hier angegebenen Gleichungen) berechnen läßt. Wenn man aber zu der Frage des Anfangs der Geschiebebewegung übergeht, muß man infolge der Tatsache, daß nur die Körner auf der Bettoberfläche (etwa die oberste Schicht) in Bewegung kommen, nach der auf diese Körner einwirkenden Kraft fragen. Diese Kraft braucht nicht mit der Gesamtschubkraft auf der Sohle übereinzustimmen, weil die etwas unter der Oberfläche liegenden Körner auch einen Teil der Schubkraft des Wassers unmittelbar auf sich nehmen können. (Selbstverständlich nehmen sie mittelbar die Schubkraft auch der oberen Körner auf.) Die folgende Betrachtung berücksichtigt diesen Punkt, indem sie von dem Gleichgewichtszustand des Kornes in der Bettoberfläche (oder etwa auch der obersten Körnerschicht) ausgeht.

Weiter wird lediglich nach dem funktionalen Zusammenhang des Gleichgewichts mit den meßbaren Strömungsgrößen gesucht und nicht nach theoretischen Werten (z. B. wie beim Kugelwiderstand nach Prandtl, Oseen u. A.).

Weiter erkennen wir von vornherein an, daß die Frage der Geschiebebewegung eine Frage der Statistik ist und als solche behandelt werden muß. Die Eigenschaften des Kornes können nur im statistischen Sinne in Formeln niedergelegt werden.

Die Wassergeschwindigkeit ist infolge der turbulenten Schwankungen (wir werden nachher sehen, daß die Turbulenz der Bewegung eine notwendige Bedingung ist) durch ihre Mittelwerte gekennzeichnet.^{*)}

Wir betrachten also das Geschiebekorn in einem Bett von gleichmäßigen Körnern und fragen, wann das Korn aus dem Bett herausgezogen und dadurch in Bewegung gesetzt wird. Es wird hier nicht untersucht, wie das Korn sich bewegt. Es soll nur vorausgesetzt werden, daß diese Bewegung gering ist. Dieser Zustand, wo die Geschiebekörner eben in Bewegung kommen, wird nachher als Bewegungsbeginn gekennzeichnet, und ist versuchstechnisch eindeutig durch Extrapolieren der Geschiebetriebskurve bis zum verschwindenden Geschiebetrieb festzustellen.^{*)}

^{*)} Besondere Meßeinrichtungen wären erforderlich, um die augenblickliche Geschwindigkeit, die uns hier nichts angeht, zu messen.

^{*)} Zu diesem Zwecke wurde den Strömungsverhältnissen in der Nähe des Geschiebefanges besondere Aufmerksamkeit geschenkt, damit die sehr geringen Geschiebemengen vom Anfang der Bewegung an erfaßt werden konnten. Andererseits war das Bett mit der größten Sorgfalt eben gemacht, damit die Bewegung von einzelnen schlecht gelagerten Körnern vor dem eigentlichen Bewegungsbeginn möglichst vermieden werden konnte. Je einheitlicher die verwendete Geschiebesorte und je besser das Bett geglättet wird, desto schärfer kann man den Bewegungsbeginn nach diesem Verfahren feststellen. Im Fall einer Geschiebemischung

Es liegt also lediglich eine Frage der Kraft vor, und zwar: Wie groß ist der Kornwiderstand gegen die Bewegung (im statistischen Sinne) und: Wie groß ist die Kraft, die die Strömung auf die obere Kornlage ausübt?

Wir betrachten zuerst den Widerstand der Bewegung eines Kornes und zwar die notwendige Kraft, um ein Korn aus einem Bett gleichmäßiger Körner herauszulösen, oder was ungefähr dasselbe sein dürfte, die Kraft, die notwendig ist, um ein Korn über ein Bett von gleichmäßigen Körnern zu schlepen. Diese Kraft ist bekanntlich proportional dem Gewicht des Kornes, also:

$$K_s = \alpha_1 (\gamma_1 - \gamma) \alpha_1 d^3$$

hierin ist

γ_1 = spez. Gewicht des Kornes,

γ = spez. Gewicht der Flüssigkeit,

d = mittlerer Korndurchmesser,

α_1 = Hohlraumverhältnis des gleichförmigen Geschiebes, das nur von der Kornform und Dichte der Lagerung abhängig ist,

α_2 = Reibungsbeiwert. Er stellt das Verhältnis des Kornwiderstandes bei der Bewegung auf einem Bett von gleichmäßigen Körnern zu dem Korngewicht dar. Auch dieser Wert ist dimensionslos und nur von der Kornform und Dichte der Lagerung abhängig. (Die Beschaffenheit der Kornoberfläche ist in den Begriff „Kornform“ einbezogen.)

Die Seitenkraft des Gefälles ist hier höchstens 1/3 des Gewichtes und darf ohne weiteres vernachlässigt werden.

Die beiden Werte α_1 und α_2 sind nur von der Kornform und Lagerung abhängig und infolgedessen zu einem $\alpha_{1,2}$ zusammenzufassen. $\alpha_{1,2}$ ist für eine Kornform im statistischen Sinne ein Festwert.

Die Kraftwirkung der Strömung auf das Korn ist aus Dimensionsbetrachtungen am besten in der Form

$$K_s = \zeta \alpha_2 d^2 \gamma \frac{u_k^2}{2g}$$

ausgedrückt.

Hier ist $\alpha_2 d^2$ eine maßgebende Kornfläche, worin α_2 wieder nur von der Kornform abhängt.

$\gamma \frac{u_k^2}{2g}$ stellt den Staudruck einer maßgebenden Geschwindigkeit dar.

ζ gibt den Widerstandsbeiwert bei der Geschwindigkeit u_k für das Korn an.

Wir geben uns nicht weiter mit Definitionen der obigen Größen ab, noch versuchen wir das Strömungsbild um das Korn zu beschreiben. Wir ziehen

ist der Bewegungsbeginn nicht mehr in dieser Weise eindeutig festzustellen, weil eine Abfuhr von nur einem Teil der vorhandenen Korngrößen, etwa der feineren, möglich ist und man muß zu einer gewissen, teilweise willkürlichen, Feststellung dieser Grenze gehen. (s. Kramer (7), Casey (8)). Die von Kramer und Casey sog. „schwache“ Bewegung entspricht am nächsten dem Bewegungsbeginn.

vielmehr die Arbeit Forschungsheft 361 von Nikuradse heran, in der eine Rauigkeit von demselben Typus (s. unter Einfluß der Kornform) wie unsere benutzt wurde, und in der die für uns maßgebenden Größen sorgfältig gemessen sind.

Hier sehen wir (S. 8), daß in einem rauhen Rohr das folgende Gesetz für die Geschwindigkeit herrscht:

$$\frac{u}{v_*} = 5,75 \log \frac{y}{d} = f \left(\log \frac{v_* d}{v} \right) \quad (4)$$

Hier ist:

u = örtliche Geschwindigkeit.

$$v_* = \sqrt{\frac{R \frac{dp}{dx}}{\frac{\gamma}{g}}} = \sqrt{g R J} = \text{die sog. Schubspannungs- Geschwindigkeit.}$$

y = Wandabstand.

d = mittlere Korngröße der Rauigkeit (= k in der Bezeichnung Nikuradse's).

v = kinematische Zähigkeit.

Wir befassen uns hier mit der für das Korn maßgebenden Geschwindigkeit, wobei $y = cd$, c proportional zu d , und c ein Festwert von der Größenordnung 1 ist. Eingesetzt ergibt sich:

$$u_k = v_* \left(5,75 \log c + f \left(\log \frac{v_* d}{v} \right) \right) = v_* f_{a4} \left(\frac{v_* d}{v} \right)$$

f_{a4} bedeutet, daß diese Funktion (u. a.) auch von der Kornform abhängig ist (s. u. Einfluß der Kornform).

Der Widerstandsbeiwert des Kornes ist im allgemeinen von der Kornform und einer Funktion der Reynoldsschen Zahl abhängig. Wir setzen diesen also in die Form $\zeta = f_{a5} \left(\frac{u_k d}{v} \right)$ wo f_{a5} die Kornformabhängigkeit zum Ausdruck bringt. Setzen wir für u_k ein:

$$\zeta = f_{a5} \left(\frac{v_* f_{a4} \left(\frac{v_* d}{v} \right) d}{v} \right) = f_{a5+5} \left(\frac{v_* d}{v} \right)$$

so ergibt sich für die Strömungskraft auf das Korn:

$$\begin{aligned} \zeta \alpha_2 d^2 \gamma \frac{u_k^2}{2g} &= f_{a5+5} \left(\frac{v_* d}{v} \right) \alpha_2 d^2 \gamma \frac{\left(v_* f_{a4} \left(\frac{v_* d}{v} \right) \right)^2}{2g} \\ &= \alpha_2 d^2 \gamma R J f_{a6} \left(\frac{v_* d}{v} \right) \end{aligned}$$

Bei dem Bewegungsbeginn wird die Kraft des Stromes auf das Korn gleich der Kraft, die nötig ist, um ein Korn in Bewegung zu bringen, also wird

$$\alpha_2 (\gamma_1 - \gamma) \alpha_1 d^3 = \alpha_2 d^2 \gamma R J f_{a6} \left(\frac{v_* d}{v} \right)$$

oder

$$\frac{\gamma R J}{(\gamma_1 - \gamma) d} = \frac{v_*}{(\gamma_1 - \gamma) d} = f_{a7} \left(\frac{v_* d}{v} \right) = f_{a1} \left(\frac{d}{d} \right) \quad (5)$$

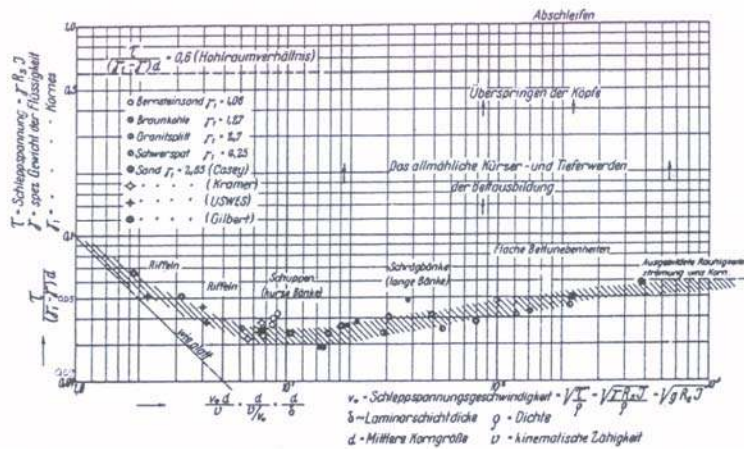


Abb. 6. Schleppspannungsbeiwert $\frac{\tau}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ gegen die Reynold'sche Zahl des Kornes $\frac{v_0 d}{\nu}$.

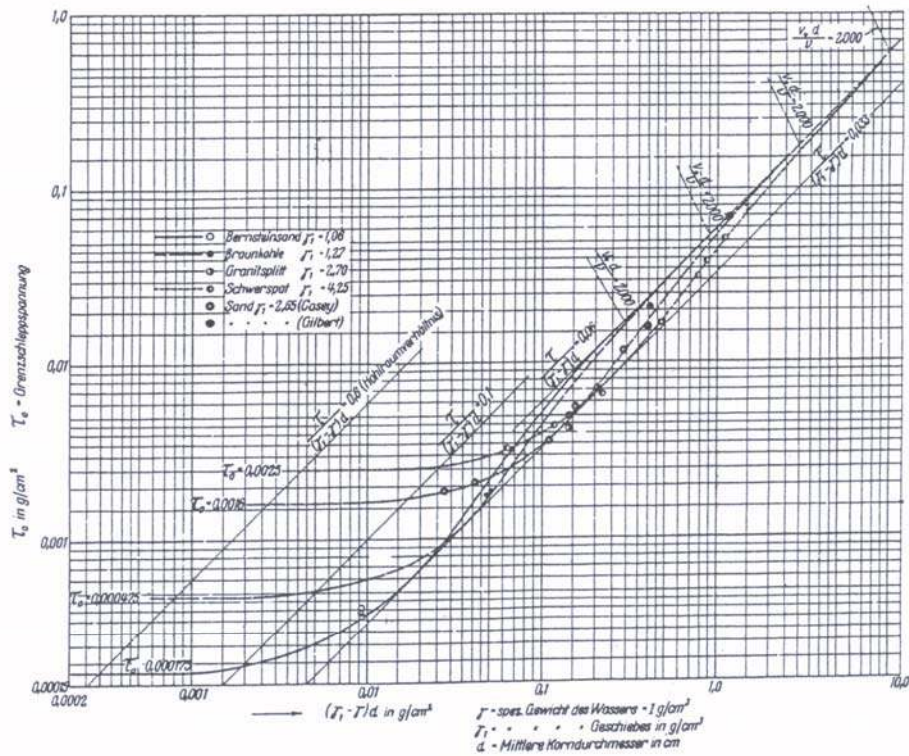


Abb. 7. Grenzschleppspannung τ gegen die Gewichte der Kornsichten, $(\gamma_1 - \gamma) d$, (die Kurven sind mit den Annahmen $\nu = 0,012$ und $\gamma = 1$ aus Abb. 6 gewonnen).

wo

τ_0 = Grenzscheppspannung;

$\frac{v_* d}{\nu}$ = Reynold'sche Zahl des Kornes;

f_a = einer Funktion, abhängig von der Kornform;

$\delta = C \frac{\nu}{v_*} =$ Laminarschichtdicke (s. v. Kármán (9));

$(\gamma_1 - \gamma)$ ist proportional dem tangentialen Widerstand einer Schicht Körner (Dicke = d) auf der Flächeneinheit.

Das Ergebnis kann also einfach folgenderweise ausgedrückt werden:

Das Verhältnis der in Richtung der Sohle wirkenden Kraft des Wassers zu dem Widerstand einer Schicht Körner ist eine universelle Funktion des Verhältnisses der Korngröße zur Dicke der Laminarschicht.

Wir können also die Größe $\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ als Funktion von $\frac{v_* d}{\nu}$ auftragen und den Kornformeinfluß als Parameter hinzufügen. Es ergibt sich die Kurve in Abb. 6. Hier ist deutlich zu sehen, daß die Punkte für Geschiebe von einheitlicher Korngröße und kantiger Form eine einzige Kurve ergeben.

Der Verlauf dieser Kurve ist sehr aufschlußreich und läßt sich in einfacher Weise mit Hilfe von Abb. 7 und Abb. 11 im Forschungsheft 361, S. 7 (1) erklären. Man hat hier vier verschiedene Bereiche zu unterscheiden.

Im ersten Bereich ist die Dicke der laminaren Schicht größer als die mittlere Korngröße ($\delta > d$) und daher wird durch die Rauigkeiten gegenüber einem glatten Bett kein zusätzlicher Energieverlust verursacht. Die Sohle verhält sich wie eine glatte Sohle. Also entsteht auf der Bettoberfläche eine Geschwindigkeit = 0, aber eine Schubspannung = $\mu \frac{du}{dy}$ (μ = absolute Zähigkeit). Vermutlich konnte das Herauslösen der Körner durch eine überwiegende Momentwirkung dieser Kraft erfolgen; d. h. die Schubkraft auf der Bettoberfläche, die auf ein Korn kommt, also $\mu \frac{du}{dy} d^2 = \tau d^2$ muß ein Korn vom Gewicht = $\alpha_1 (\gamma_1 - \gamma) d^3$ aus dem Bett heben (wo α_1 das Hohlraumverhältnis bedeutet wie vorher) und zwar durch Drehung um seinen stromabwärts gelegenen Berührungspunkt. Da ein Höchstwert gesucht wird, werden die Seitenkräfte, die eine hemmende Wirkung auf diese Bewegung ausüben würden, vernachlässigt und es ergibt sich

$$\tau_0 = \alpha_1 (\gamma_1 - \gamma) d, \quad \frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d} = \alpha_1$$

wo α_1 für gleichmäßige, kantige Körner ungefähr einen Wert von 0,6 hat. Dieser Zusammenhang ergibt in Abb. 6 und 7 die entsprechenden Grade, und man sieht leicht ein, daß die Punkte für die feinsten Geschiebesorten noch weit entfernt liegen. Also wer-

den in diesem Bereiche die Kurven gleichen Geschiebegewichts in Abb. 7 waagrecht verlaufen, in Abb. 6 als eine, als glatt bezeichnete unter 45 Grad geneigte Gerade. Diese Linien sind durch Extrapolieren gewonnen und ergeben den Grenzwert

$$\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d} = \frac{0,1}{\frac{v_* d}{\nu}} \text{ also } \tau_0 = \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{1/2} (0,1 \nu (\gamma_1 - \gamma))^{3/2} \quad (6)$$

Das Wichtige hierbei ist, daß nur die Parameter der Flüssigkeit und das spez. Gewicht des Kornes zum Ausdruck kommen. Die Korngröße fällt weg. Also hat das Verkleinern der Korngröße keine Wirkung mehr auf die Grenzscheppspannung, was jetzt nur durch Verminderung der Größen $\frac{\gamma}{g}$, ν und $(\gamma_1 - \gamma)$ erreicht werden kann. Dieser Bereich reicht bis $\frac{v_* d}{\nu} \sim 2$.

Im zweiten Bereich ist die Dicke der laminaren Schicht von der gleichen Größenordnung wie die mittlere Korngröße ($\delta \sim d$). An den hervorragenden Teilen bilden sich Wirbel und wir sehen, daß die Schubkraft der Strömung am wirksamsten in diesem Bereiche ist, da $\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ einen Mindestwert von

$$\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d} \sim 0,08 \quad (7)$$

erreicht bei

$$\frac{v_* d}{\nu} \sim 10$$

Im dritten Bereich ist die laminare Schicht so klein geworden, daß der Strömungswiderstand fast ausschließlich durch Wirbelbildung bedingt wird. Man könnte denken, daß die Schubkraft der Strömung eine gleichbleibende Wirksamkeit auf die oberen Körner hierdurch erhalten sollte, sodaß das Verhältnis $\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ gleichbliebe. Statt dessen aber steigt es mit größerem $\frac{v_* d}{\nu}$. Diese Erscheinung läßt sich durch folgende Ueberlegung erklären:

Obwohl die Hauptströmung einem quadratischen Widerstand ausgesetzt ist, ist der Widerstand des in dem Bett liegenden Kornes noch lange nicht quadratisch, wegen der niedrigeren Geschwindigkeiten, die im Gebiet dieser Rauigkeit herrschen. Also liegt ζ noch nicht im quadratischen Widerstandsgebiet, d. h. es ist noch nicht unveränderlich, sondern wird, wie etwa bei der Kugel oder Scheibe, mit steigender Reynoldsscher Zahl kleiner. Aber unsere Entwicklung der Grenzscheppspannung bei quadratischem Strömungswiderstand würde den folgenden vereinfachten Ausdruck ergeben:

$$\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d} = \frac{\alpha}{\zeta} \quad (8)$$

Wir sehen hier, daß ein Abnehmen von ζ ein Zunehmen von $\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ bedeutet, was in Einklang mit den Versuchsergebnissen steht.

Die vorhergehende Ueberlegung könnte fortgesetzt werden, um ein vier tes Gebiet bei noch größeren $\frac{v_0 d}{\nu}$ -Werten vor auszusehen, nämlich ein Gebiet, in dem nicht nur quadratischer Widerstand der Rinnenströmung, sondern auch der Strömung ums Korn herrscht. Hier wird auch $\zeta =$ einem Festwert bzw. $\frac{v_0}{(\gamma_1 - \gamma) d} =$ Festwert. Leider liegen keine zuverlässigen Angaben auf diesem Gebiete vor, und eine Abschätzung dieses Festwertes kann nur durch eine sehr unsichere Extrapolation erfolgen. Es ergibt sich also

$$\frac{v_0}{(\gamma_1 - \gamma) d} \sim 0,08 \quad (9)$$

Dieser Bereich würde dann bei $\frac{v_0 d}{\nu} \sim 10^4$ anfangen und dürfte so lange halten, wie ζ unveränderlich bleibt. Es ist wohl möglich, daß ζ später weiter abfällt, ähnlich wie bei einer Kugel oder Scheibe, wobei $\frac{v_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ einen entsprechenden Sprung erfahren wird.

In diesem Zusammenhang sei darauf verwiesen, daß die amerikanische Versuchsanstalt (USWES) (10) Schleppversuche mit Zement-Tetraedern von 5 und 10 Zoll Höhe gemacht hat. Diese waren nicht in ein gleichmäßiges Bett verlegt, wie es zu unserem Zwecke nötig wäre, sondern nur in regelmäßigen Abständen auf ein glattes Bett verteilt und hatten daher viel niedrigere Werte ergeben. Wichtig aber war, daß die 10 Zoll-Tetraeder genau zweimal soviel Schleppspannung als die 5 Zoll hohen brauchten, d. h. daß das Verhältnis $\frac{v_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ unveränderlich war.

Die praktische Benutzung der Abb. 6 wird etwas erschwert durch das Erscheinen v_0 auch in $\frac{\sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_1}} v_0 d}{\nu}$, aber das läßt sich sehr leicht in folgender Weise überwinden. Man rechnet zuerst $(\gamma_1 - \gamma) d$ und entnimmt aus Abb. 7 einen gut angenäherten v_0 -Wert.

Mit diesem v_0 berechnet man jetzt $\frac{\sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_1}} v_0 d}{\nu}$ und entnimmt aus Abb. 6 den genauen Wert. Wiederholung der Rechnung ist in den meisten Fällen nicht nötig.

Der Verlauf der Kurven für Bernsteinsand und Braunkohle in Abb. 7 ist, mit der Annahme, daß $\nu = 0,012$ und $\gamma = 1$ aus Abb. 6 gewonnen.

Einfluß des Gefälles.

In dem endgültigen funktionalen Zusammenhang für Bewegungsbeginn tritt das Gefälle nur im Zusammenhang mit dem hydraulischen Radius des der Sohle zugeordneten Querschnittes auf; also ist nur das Produkt RJ maßgebend für den Bewegungsbeginn. Eine wichtige Ausnahme muß aber erwähnt werden, nämlich wenn das Gefälle sehr groß wird. In diesem Falle ist für den Bewegungsbeginn RJ

nicht mehr unveränderlich, sondern nimmt mit wachsendem Gefälle und abnehmender Tiefe zu. Die Erklärung dieser Erscheinung ist, daß bei abnehmenden Tiefen die relative Rauigkeit $\frac{d}{R}$ so groß wird, daß sie nicht mehr eine Rauigkeit, sondern eine Querschnittsänderung darstellt. Diese Erscheinung ist auch von Nikuradse beobachtet worden; er bemerkt, daß relative Rauigkeiten $\frac{d}{R} > \sim \frac{1}{16}$ zu falschen Ergebnissen führten. Unsere Geschiebeversuche geben eine etwas niedrigere Grenze, indem die Abweichungen erst bei $\frac{d}{R}$ -Werten größer als $\sim \frac{1}{25}$ bemerkbar waren. Sicherheitshalber sollte eine Grenze von ungefähr $\frac{1}{40}$ nicht überschritten werden. Diese Grenze, die man als die „Grenze der relativen Rauigkeit“ bezeichnen könnte, ist sehr wichtig, weil über sie hinaus die Ergebnisse im allgemeinen von Modellversuchen für Flußbau nicht mehr brauchbar sind.

Dieses gilt hauptsächlich für die Versuche mit schießender Strömung, da diese alle mit großen Gefällen ($> 1:200$) durchgeführt worden sind, also mit unzulässig geringen Tiefen.

Einfluß der Mischung.

An dieser Stelle sei auf die sehr sorgfältigen und ausführlichen Versuche mit Sandmischungen von Casey (8) in der VWS hingewiesen. Casey¹⁹⁾ stellte fest, daß für Mischungen mit der Ungleichförmigkeitszahl $M > \frac{1}{3}$ der mittlere Korndurchmesser d_m als allein maßgebend für den Bewegungsbeginn benutzt werden darf.

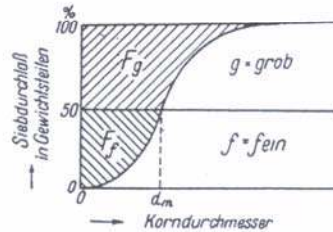


Abb. 8. Mischungsline und Ungleichförmigkeitszahl $M = F_1:F_2$ eines Geschiebes.

Eine Darstellung der Ergebnisse von Versuchen mit Mischungen dieser Eigenschaft, die Kramer (7) und andere in der VWS und der USWES (11) in Vicksburg gemacht haben, bestätigt diese Feststellung recht gut. Die kleinen Abweichungen sind schon

¹⁹⁾ $M =$ Verhältnis der Teilfläche F_1 der Siebkurve unterhalb des Häufigkeitsmittelwertes d_m zu der Teilfläche F_2 oberhalb d_m , siehe Abb. 8.

durch die Feststellung des Bewegungsbeginns einer Mischung und teilweise auch durch die Verschiedenheit der Kornform zu erklären. Es ist also ohne weiteres anzunehmen, daß der Gültigkeitsbereich der Abb. 6 entsprechend gewachsen ist, was eine sehr wichtige Zunahme ist, da die am meisten vorkommenden Sandmischungen der Praxis diese Bedingung ($M > \frac{1}{3}$) erfüllen.

Einfluß des Gewichtes.

Da $M > \frac{1}{3}$ auch für die untersuchten Braunkohle-geschiebesorten (12) gilt, dürfen wir die entsprechenden Punkte in Abb. 6 eintragen. Man sieht, daß die Übereinstimmung hier sehr gut ist,¹¹⁾ was zusammen mit der Übereinstimmung der Schwert- und Granitgeschiebe den Beweis liefert, daß die vorliegende Entwicklung den Gewichtseinfluß auf den Bewegungsbeginn vollkommen berücksichtigt.

Einfluß der Kornform.

Die Kornform kann den Bewegungsbeginn in ebensovielen Hinsichten beeinflussen, wie die α -Werte in der Ableitung der Gleichung für Bewegungsbeginn erschienen sind. Diese waren folgende:

α_1 = Einfluß der Kornform auf das Hohlraumverhältnis.

α_2 = Einfluß der Kornform auf den Bettreibungsbeiwert.

α_3 = Einfluß der Kornform auf die Kornoberfläche.

α_4 bringt den Einfluß der Kornform auf die Strömungsverhältnisse in der Rinne zum Ausdruck.

$\alpha_{4,5}$ bringt den Einfluß der Kornform auf den Widerstandsbeiwert (ζ) zum Ausdruck.

Daß diese α entgegengesetzte Einflüsse auf den Bewegungsbeginn ausüben können, geht aus Abb. 6 hervor. Hier ist zu ersehen, daß die Punkte für „abgerundete“ und für „scharfkantige“ Körner etwas höher liegen als diejenigen für „kantige“ Körner. Es wäre schwer, hier weitere Kurven zu ziehen, um die Kornform als Parameter zum Ausdruck zu bringen. Die α müssen also im einzelnen untersucht werden, um diesen Punkt zu klären. α_1 , das Hohlraumverhältnis, wäre leicht festzustellen. α_2, α_3 wäre vielleicht durch Versuche festzustellen, indem man einige Körner irgendwie auf ein Brett von gleichmäßigen festgeklebten Körnern streut, dann das Brett allmählich neigt und dabei etwas leicht schüttelt (um den turbulenten Schwankungen zu entsprechen), bis die Körner abrollen. So wäre die Grenzneigung festzustellen.

¹¹⁾ Hier bildet die Braunkohlemischung III eine Ausnahme, indem die Aussonderung und Verkittung der feineren Bestandteile zu eine etwas höhere Grenzschleppspannung führte.

$\alpha_{4,5}$ könnte vielleicht durch Fallversuche abgeschätzt werden. α_4 ist durch die folgenden Versuche z. T. geklärt:

Die von Nikuradse (1) benutzte Rauigkeit war aus einheitlichen Sandkörnern von einer Form, die wir als „abgerundet“ bezeichnen, hergestellt und entspricht sehr gut den einheitlichen Sandsorten von Casey. Es liegen aber keine Versuche in Röhren von Nikuradse oder anderen mit „kantigen“ Körnern vor, dagegen konnten unsere Versuche im offenen Gerinne mit Granitsplittsorten von „kantiger“ Form (die 2–3 mm Sorte mit sehr scharfen Kanten) zur teilweisen Klärung dieses Punktes herangezogen werden. Eine eindeutige Feststellung des Formeinflusses verlangt, daß alle anderen Veränderlichen — mechanische und hydraulische — ausgeschaltet werden. Die Granitsplittsorten waren also nicht nur mit denselben einheitlichen Korngrößen ($d = 0,85$ mm, $d = 1,23$ mm, $d = 2,44$ mm) und derselben Rinne, sondern auch mit denselben Gefällen und mit Verwendung derselben Versuchstechnik wie bei den Caseyschen Sandversuchen durchzuführen.

Die Ergebnisse für Korngrößen (0,85 mm, 2,44 mm) sind sehr kennzeichnend und sind in einer Auftragung von λ gegen R_* in Abb. 9 u. 10 dargestellt. Hier ist sehr deutlich zu sehen, daß die λ -Werte für den mehrkantigen Granitsplitt jedesmal ungefähr 10% höher sind als diejenigen für abgerundeten Sand, also daß ein kantiges Korn einen größeren Strömungswiderstand erzeugt, als ein abgerundetes. Bei festgehaltenem R_* ist daher die mittlere Geschwindigkeit bei Splitt geringer als bei Sand.

Diese Ergebnisse, wenn auf die Kármánsche Form (13) gebracht, besagen, daß in der allgemeinen Gleichung von Nikuradse (1)

$$\frac{2,88}{\sqrt{\lambda}} - 5,75 \log \frac{R}{k} + 3,75 = a + b \log \frac{r_* k}{v} = A \quad (10)$$

bei quadratischem Widerstand der Festwert $A \sim 4,0\%$ kleiner sein soll, als der von ihm angegebene. Unsere Versuche sind nicht imstande, genauere quantitative Werte für diese Gleichung zu liefern. (S. unter hydraulischen Radius.) Die Gültigkeit der Gleichung für den Bewegungsbeginn wird hierdurch nicht beeinflusst, weil hier nur die Form des Zusammenhangs nach Nikuradse in der Entwicklung benutzt wurde.

Die Messungen über die Geschwindigkeitsverteilung in der offenen Rinne mit kantigem Geschiebe auf der Sohle bestätigen die obige Schlussfolgerung.

Eine bemerkenswerte Bestätigung der Form dieser Gesetze geben auch die gesammelten „Sohlen-geschwindigkeitsmessungen in natürlichen Flüssen“ von Schaffernak (14), der folgende Erfahrungsformel angibt:

$$v_{3m} = k (bJ)^{0,4} = 310 k \sqrt[4]{\tau t J} = (142 \text{ bis } 272) \sqrt[4]{\tau t J}$$

(wo t = Tiefe in cm, und $k = 0,45 - 0,86$).

Da quadratisches Widerstandsgesetz hier herrschte, ist der Nikuradesche Ausdruck hierfür $\frac{a}{v_*} = 8,48 \log \frac{y}{d}$

oder

$$u = 8,48 \log \frac{y}{d} \cdot \sqrt{\frac{\gamma t J}{\rho}} = 8,48 \sqrt{\frac{\gamma t J}{\rho}} = 206 \sqrt{\gamma t J}$$

Man sieht, daß das Einsetzen $y = k$ und $\rho = \frac{1}{981}$ hier einen Festwert liefert, der in dem von Schaffernak gegebenen Bereich liegt.

Die beiden Sorten von Granitsplitt und Sand in Abb. 6 verhalten sich verschieden, je nach ihrem Korndurchmesser. Obwohl die beiden Granitsplittsorten einen größeren Strömungswiderstand als die gleichgroßen Sandarten haben, liegt in der Auftragung der Punkt für den kantigen Granitsplitt ($d = 0,85 \text{ mm}$) etwas unterhalb des Punktes für Sand, während der Punkt für den scharfkantigen Granitsplitt ($d = 2-3 \text{ mm}$) etwas oberhalb des entsprechenden Sandpunktes liegt. Diese Erscheinung ist beinahe ausschließlich durch den viel größeren Betreibungsbeiwert α_2 des scharfkantigen Granitsplitt zu erklären. Die Versuche zeigten ein auffällig starkes Zittern der Körner, was durch das Ineinanderhaken der scharfen Kanten verursacht war, und lange vor Bewegungsbeginn auftrat.

Eine größere Grenzschleppspannung zeigt auch das Bernsteinigeschiebe, was ebenfalls sehr scharfe

Kanten aufweist. Es wäre demnach eine etwas größere Grenzschleppspannung bei sehr scharfkantigem Geschiebe zu erwarten.

Schlußbemerkungen zum zweiten Abschnitt.

In der ganzen Entwicklung, die zur Gleichung (6) geführt hatte, sind keine vereinfachenden Annahmen gemacht worden. Es ist gezeigt, daß trotz der Berücksichtigung aller Faktoren der Beiwert der Grenzschleppspannung $\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ eine Funktion von nur $\frac{v_m d}{\nu}$ allein wird. Dieser Zusammenhang ist dann in Abb. 6 graphisch dargestellt, worin die zahlenmäßigen Werte der Funktion gegeben sind. Das Problem des Bewegungsbeginns ist hierdurch im Wesen geklärt, was auch für die Praxis einen Gewinn bedeutet. Aus Abb. 6 sind die Verhältnisse bei Bewegungsbeginn zu entnehmen und zwar nicht nur für das Modell, sondern auch für den Fluß (s. Abschnitt I.) und für alle Geschiebesorten, natürliche und künstliche, von beliebigem Gewicht. Diese Kenntnis des Beginns der Bewegung bildet die Grundlage zur weiteren Behandlung des Problems der Geschiebebewegung.

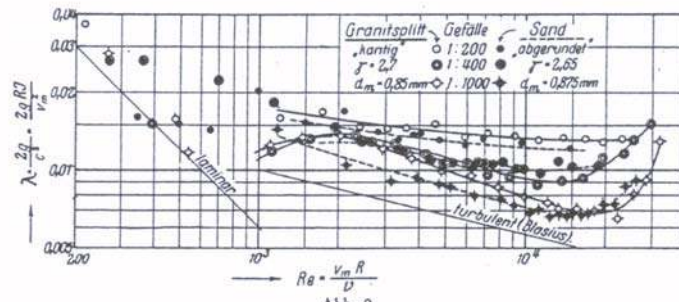


Abb. 9. Widerstandsbeiwert λ gegen Reynold'sche Zahl Re .

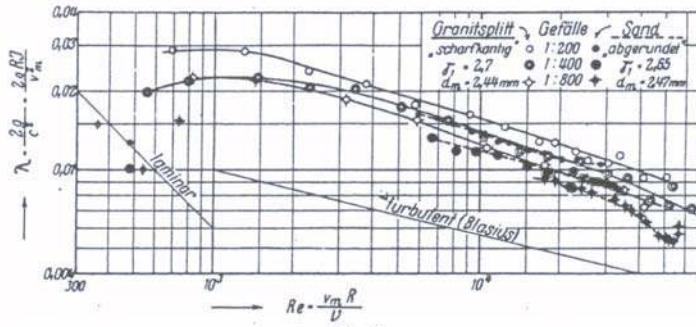


Abb. 10. Widerstandsbeiwert λ gegen Reynold'sche Zahl Re .

Dritter Abschnitt.

Die Geschiebeführung.

Die aufgestellten Gleichungen liefern quantitative Ergebnisse, mindestens im statistischen Sinne, weil hier nur von einer ebenen Sohle gesprochen wurde, d. h. von einer Art Rauigkeit, deren hydraulische Eigenschaften schon zum großen Teil bekannt waren. Wenn wir aber weitergehen zu einer Besprechung der nach dem Bewegungsbeginn folgenden Geschiebeführung, dann fällt diese sichere Grundlage vollkommen weg infolge der verschiedenen Möglichkeiten der Bettausbildung.

Die Form und Art der Bettausbildung ist in zweierlei Hinsicht für die Geschiebebewegung maßgebend:

1. sie bestimmt die hydraulischen Bedingungen, indem Strömung und Bettausbildung sich gegenseitig bedingen.
2. sie bestimmt den Geschiebetrieb, indem jede Art der Bettausbildung (Riffelbank usw.) ein abgeschlossenes System bildet mit Aufbereitung, Abfuhr und Ablagerung, während der Geschiebeaustausch mit benachbarten Riffeln oder Bänken nur unwesentliche Bedeutung hat.

Man muß also von der Bettausbildung als Ausgangspunkt ausgehen und hat drei Aufgaben der Reihe nach zu lösen, nämlich:

1. die Feststellung der Beharrung einer Bewegungsform und die Zeit, die nötig ist, um den Beharrungszustand zu erreichen (etwa vergleichsweise von einer glatten Sohle aus).
2. Messung und Beschreibung der verschiedenen Bettausbildungen und Wasseroberflächen in einer dimensionslosen Form, z. B. im Verhältnis zur Wassertiefe, d. h. ähnliche Formen werden verglichen, (die Wassertiefe ist auch in dieser Ähnlichkeit zu berücksichtigen) und das Ableiten einer empirischen Kennzahl für die verschiedenen Zustände.
3. die Feststellung des Geschiebetriebes für die verschiedenen Zustände aus (2), und das Ableiten eines empirischen Gesetzes für den Geschiebetrieb unter diesen verschiedenen Zuständen.

Beharrungszustand.

In Bezug auf (1) muß zuerst geprüft werden, ob es einen Beharrungszustand gibt. Das wird in einigen Fällen schwer festzustellen sein, nämlich dann, wenn sehr lang-periodische Erscheinungen auftreten und die benötigte Versuchsdauer außerhalb praktischer Grenzen liegt. Gilbert (15) hat einen einschlägigen Versuch gemacht, in dem er zeigte, daß die gleichmäßige Bewegung von wenig mehr als einzelnen Körnern (ungefähr der Zustand des Bewegungsbeginns) nicht beständig ist, indem bei gleichbleibendem Gefälle und gleicher Durchflußmenge die Sohle nach einer gewissen Zeit stellenweise angegriffen wird. Dies führt allmählich zu einer Welligkeit des Bettes, die mit einer wesentlich größeren Geschiebebewegung verbunden ist. Diese Erscheinung ist auch

in den Versuchen mit feinerem Sand, Granitsplitt und Schwerspat beobachtet worden, indem sich sofort nach Bewegungsbeginn sehr schwache Riffeln über das ganze Bett verbreiteten.¹⁹⁾ In den Versuchen mit gröberen Körnern schien diese gleichmäßige Bewegung (z. T. nach mehr als einer Stunde Versuchsdauer) unverändert bestehen zu bleiben, aber es ist immer noch fraglich, ob nicht doch nach mehreren Stunden eine gewisse Bettumbildung, vielleicht mit sehr langer Wechselzeit, auftreten würde.

Auch die weiteren Bewegungsstufen sind dieser Unsicherheit unterworfen. Eine Bewegung in langen Bänken nimmt allmählich eine Formbeständigkeit an, und diese ist nur in gewissen Grenzen festzustellen wegen der Verschiedenheit der Bankformen in einer Versuchsstrecke. (In solchen Fällen ist nur die Anzahl der Bänke in der Versuchsstrecke eingetragen.) Andererseits scheint eine Bettausbildung von kürzerer Wechselzeit, z. B. in Riffeln, von viel größerer Beständigkeit zu sein. Dieser Beharrungszustand wird sehr schnell erreicht. Man könnte also im allgemeinen sagen, daß je kürzer die Wechselzeit der Bewegungsart ist, desto größer ist ihre Beharrlichkeit und desto geringer ihre zur Herstellung des Beharrungszustandes benötigte Zeit. (Dies gilt auch vergleichsweise für die gleichmäßige Bewegung, die als von einer unendlich langen Wechselzeit aufgefaßt werden könnte.) Bemerkenswert ist hier, daß die leichten Geschiebesorten, wie Braunkohle und besonders Bernstein, dieselbe Bettausbildung geben können, d. h. dieselbe Form von Riffeln, Bänken usw. wie Sand, Schwerspat usw., aber mit einer viel geringeren Geschwindigkeit der Körner, also mit entsprechend längerer Wechselzeit. Versuche zeigen, daß der obige Satz auch in diesem Falle gilt. Man kann als ein weiteres Gesetz hinzufügen, nämlich, daß bei einer gewissen Bettausbildungsform, je leichter das Geschiebe desto länger die Bewegungsperiode, also desto geringer die Formbeständigkeit ist.

Da das Geschiebe in jedem Falle gleichmäßig zugeführt wird, ist auch die Rinnenlänge, die notwendig ist, um das Geschiebe in seine endgültige Bewegungsart zu versetzen, z. T. von der Beharrlichkeit der Bewegungsart abhängig. Diese Länge ist auch von der Größe (etwa Tiefe der Kolke) der Bettausbildung abhängig.

Die Beharrlichkeit einer Bewegungsart und die benötigte Zeit zur Herstellung des Beharrungszustandes sind von Bedeutung, weil diese Zeit für viele Versuche mit beweglicher Sohle den eigentlichen Zeitmaßstab der Geschiebebewegung angibt (s. Krey (16)).

Nachdem z. B. Wassermenge und Tiefe des Modells festgelegt sind und eine Geschiebesorte gewählt ist, die dieselbe Bewegungsart (s. nächste Seite) wie das Geschiebe in der Natur ergeben soll, braucht der Versuch nur so lange zu laufen, bis Beharrung erreicht

¹⁹⁾ Die von Kramer (7) und Casey (8) angeführten Bewegungsstufen der „mittleren“ und „allgemeinen“ Bewegung — Gleichmäßigkeit vorausgesetzt — fallen in diesen Fällen aus.

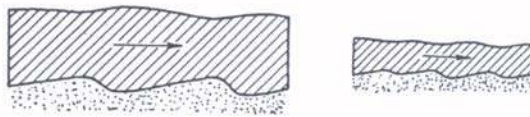
wird. Selbstverständlich wird ein Flußmodell mit Krümmungen usw. eine etwas andere Versuchsdauer benötigen als eine gerade Rinne. Aber die Rinnenergebnisse werden wertvolle Anhaltspunkte geben (Mäanderbildung ausgeschlossen). Es darf nicht vergessen werden, daß der Beharrungszustand wahrscheinlich in einigen Fällen sich nur asymptotisch erreichen läßt. Aber der Beobachter wird wohl jene Annäherung beurteilen können, bei der der Versuch für praktische Zwecke genügend genaue Ergebnisse liefert.

Die Form der Betausbildung.

Wenn schon die Erfüllung der Aehnlichkeit zweier Strömungsvorgänge bei ebener Sohle schwierig ist wegen des Verhältnisses der Rinnenbreite zur

Wassertiefe und der relativen Rauigkeit (Korngröße zur Wassertiefe), so ist diese Aufgabe durch die verschiedenen Möglichkeiten der Betausbildung ganz erheblich erschwert. Außer den Aehnlichkeitsforderungen des Zustandes bei ebener Sohle tritt hier noch die Innehaltung ähnlicher Bettformen hinzu.

Wenn die Breite des Gerinnes auf eine unendliche Breite übertragen wird (s. u. Hydraulischer Radius), und der Einfluß der relativen Rauigkeit $\frac{d}{R}$ vernachlässigt wird infolge der überwiegenden Wirkung der Bettform (etwa die relative Bettunebenheit oder Welligkeit), dann ist ein Beispiel der Innehaltung der geometrischen Aehnlichkeit zweier Vorgänge in der folgenden Skizze dargestellt.¹³⁾



Geometrische Aehnlichkeit zweier Vorgänge

Abb. 11.

Es sind also außer der relativen Rauigkeit drei Veränderliche zu beachten, nämlich:

1. die Form der Wasseroberfläche,
2. die Wassertiefe,
3. die Bettform.

Volle Erfüllung aller drei Forderungen ist beim heutigen Stande der Wissenschaft praktisch nicht durchführbar und man muß sich mit einer nur teilweisen Berücksichtigung begnügen, nämlich in erster Linie der Bettform und dann z. T. der Wassertiefe.

Es genügt zunächst die Bettform einfach durch das Verhältnis der Höhe zur Länge und der einzelnen Erhebungen in der Sohle zu kennzeichnen. Hierzu tritt das Maß der Betausbildung, das man dimensionslos durch das Verhältnis der Höhe der Riffeln oder Bänke oder Kolke zur Wassertiefe am besten zum Ausdruck bringen kann. Wir werden uns nicht weiter mit Definitionen abgeben, da die Betausbildung selbst in einer Versuchsrinnenlänge merkliche Unterschiede aufweist, sodaß vorläufig die Betausbildungen nur in großen Zügen eingeordnet werden können.

Wenn das Verhältnis der Höhe zur Länge verhältnismäßig groß ist, nennt man diese Formen der Betausbildung Riffeln. Versuche haben gezeigt, daß feineres Geschiebe zur Riffelbildung neigt. Diese Neigung ist um so größer, je feiner das Geschiebe ist (s. Kramer (7), Krey (16) u. A.). Das Verhältnis der Riffelhöhe zur Wassertiefe kann so groß werden, daß die Riffeln „störend“ wirken (s. Kramer (7)). Da aber Versuche mit kleinerem Korn mit einer entsprechenden niedrigeren Wassertiefe gemacht worden sind, sodaß die relative Korngröße (d. h. Korngröße durch

relat. Rauigkeit

Wassertiefe usw.) festgehalten war, kann der Grund dieser Riffelbildung nur an den unveränderlichen Parametern liegen, also an γ , g und ν .

Durch Versuche mit Geschiebe von verschiedenem Gewicht konnten die maßgebenden Wirkungen von γ und g verändert werden. Sie haben zu dem Ergebnis geführt, daß hauptsächlich die Zähigkeit ν in dem Glied $\frac{\nu \cdot d}{v}$ bei der Riffelbildung maßgebend ist. Man konnte die ν -Wirkung von dem Standpunkt der laminaren Schicht erklären, indem eine Bewegung nur stattfinden kann durch einen Stoß der Strömung (der auf den Rücken der Riffeln drückt) und der die laminare Schicht durchdringt. Die Kornbewegung hört plötzlich auf, wenn dieses nicht der Fall ist, sodaß die Bewegung jeweils auf einen kleinen Umkreis beschränkt wird. Abb. 6 zeigt, daß die Riffelbildung nur dann eintritt, wenn die Zähigkeit den Bewegungsbeginn stark beeinflusst.

Je größer die verwendete Geschiebesorte, desto kleiner wird das Verhältnis von Höhe zur Länge der Betausbildung, und die Art der Geschiebebewegung ändert sich, wie Abb. 6 zeigt, folgendermaßen der Reihe nach: „Schuppen“, „kurze Bänke“, „lange Bänke“ (von häufig schräger Beschaffenheit), bis bei sehr großen $\frac{\nu \cdot d}{v}$ Werten nur noch eine sanfte Bettwelligkeit vorhanden ist. Das Verhältnis der Höhe

¹³⁾ Streng genommen ist auch das Gefälle, bei geometrischer Aehnlichkeit, in den beiden Vorgängen gleich zu halten. Auch wird die Erhaltung ähnlicher Wasseroberflächenformen wahrscheinlich die Gleichheit der Froude'schen Zahlen erfordern. Die Reynolds'sche Aehnlichkeit der Rinnenströmung ist von geringerer Wichtigkeit wie Abschnitt II zeigt.

zur Wassertiefe wird auch allmählich kleiner. Die verschiedenen Bewegungsarten sind also mindestens kurz nach Bewegungsbeginn, in größerer Weise durch die Zahl $\frac{v_* d}{\nu}$ einzuordnen¹⁴⁾. Dieses gilt auch für Geschiebe von verschiedenem Gewicht. Abb. 12 gibt z. B. ein Bild von der Riffelbildung von feinem



Abb. 12.
Riffelbildung mit Schwerspat $d = 0,36$ mm.

Swerspat, während Abb. 13 eine Schrägbankbildung von Braunkohle zeigt.

Mit einer Steigerung der Schleppspannung war im allgemeinen, d. h. bei verschiedenen Bewegungsarten, ein Kürzer- und Höherwerden der Bett-



Abb. 13.
Schrägbankbildung mit Braunkohle $d = 1,88$ mm.

formen zu bemerken. Diese Verkürzung der Bänke ist mit einer Zunahme der Korngeschwindigkeit verknüpft und führt allmählich zu einem Ueberspringen der Bankköpfe, bis das Wasser eine abschleifende Wirkung auf die Bettausbildung übt. Diese Erscheinungen sind in Abb. 6 aufgetragen. Die Einordnung dieser verschiedenen Bewegungsstufen ist nicht zahlenmäßig zu verstehen

¹⁴⁾ d. h. für gleiche Bewegungsarten sind hauptsächlich gleiche Reynold'sche Zahlen der Körner notwendig.

und nicht als eine endgültige Lösung des Bewegungsproblems gemeint, sondern mehr als ein Vorschlag zu betrachten, der zeigt, daß diese Einordnung nicht so hoffnungslos ist, wie es manchmal erscheint.

Eine Beschreibung der Geschiebebewegung bei schießender Strömung gehört am besten hierher, da diese Erscheinung in Abb. 6 nicht gebracht werden kann. Bei schießendem Abfluß bilden sich manchmal kurze hohe stehende Wellen, die das Bett entsprechend angreifen und eine besonders starke Geschiebeführung verursachen. Der Berg der Wasserwelle liegt über dem Berg der Riffel. Diese kurzen Bettwellen sind nicht über die ganze Rinnebreite verbreitet, sondern nur in sehr schmalen Längsstreifen von ungefähr je anderthalb Metern Länge abwechselnd an verschiedenen Stellen längs der Versuchs-



Abb. 14.
Schuppenbildung mit Bernstein $d = 1,56$ mm.

rinne zu finden. Dieses Wellenbild überlagert die gewöhnlichen Bettformen (in Abb. 6 gegeben), die Schrägbänke mit Granitsplitt (2—3 mm) oder die Bettunebenheiten von Schwerspat (3—4 mm) und schwankt in Lage und Gestalt.

Der Geschiebetrieb.

Um im Wege des Versuchs die Gesetzmäßigkeit der Geschiebeabfuhr zu klären, müßte man auf der Grundlage der vollkommenen Aehnlichkeit arbeiten. Also müßten unter anderem die geometrischen Aehnlichkeitsbedingungen (in Abb. 11 und auf S. 17 erläutert) auch erfüllt werden bei Aufstellung eines Gesetzes der Geschiebeabfuhr. Aber man sieht leicht ein, daß die Innehaltung dieser Gesetze zu einer Verwicklung der Aufgabe führt. Es müssen also vorläufig die vereinfachenden Annahmen von S. 17 und 18 gemacht werden, d. h. die Vorgänge werden hauptsächlich nur nach Bettformen verglichen. Man wird also versuchen, im Einklang mit der vorliegenden Einordnung eine Gleichung für die verschiedenen hier angegebenen Bewegungsstufen aufzustellen. Wir wollen uns diesmal beschränken und nur eine einzige Gleichung aufstellen unter Aus-

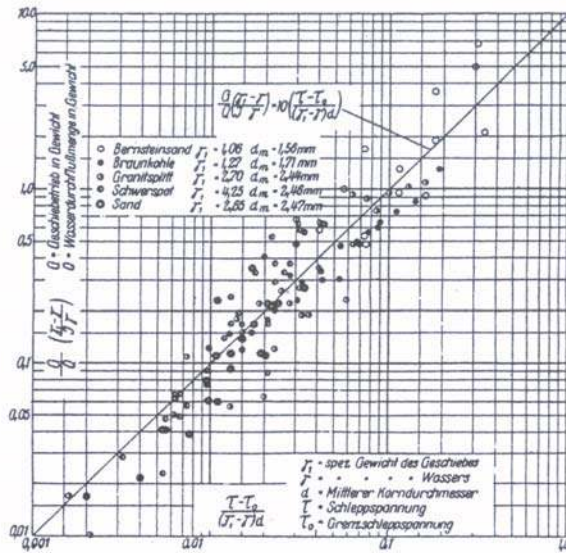


Abb. 15.
Die Darstellung einer Erfahrungsgleichung für den Geschiebetrieb.

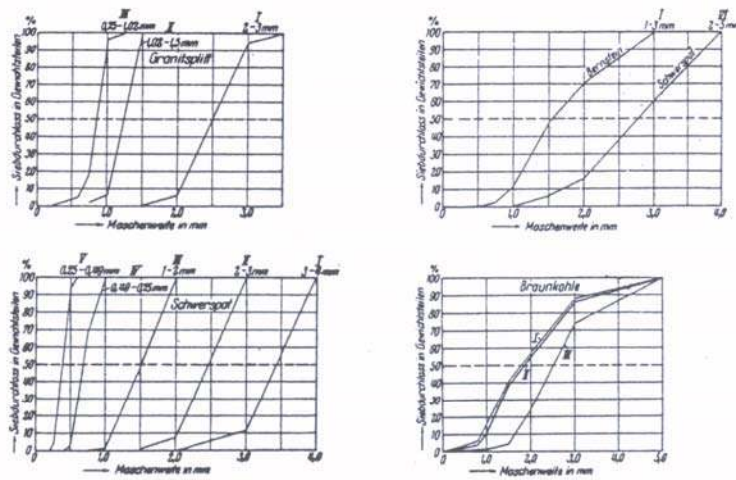


Abb. 16.
Siebkurven (viereckige Maschen).

schluß gewisser Bewegungsarten. Dieses Vorgehen ist aber nur im Hinblick auf den Mangel an Versuchen, die sich mit dieser Ähnlichkeitsaufgabe besonders befassen, gerechtfertigt; es ist hier mit allem Vorbehalt durchgeführt, damit ein quantitativer Anhaltspunkt gewonnen wird.

In dieser Hinsicht schließen wir von vornherein die Geschiebebewegung in Riffeln von unserer Betrachtung aus, da diese ein besonderer Grenzfall der Bewegung ist, dem nur geringe praktische Bedeutung im Vergleich mit der Natur zukommt. Wir versuchen also eine Gleichung für viel kleinere H/L-Werte (Höhe zu Länge der Bettform), wie sie kurz nach Bewegungsbeginn auftreten, aufzustellen, um den Verlauf der Bewegungsstufen, d. h. das Kürzerwerden der Bettausbildung, das allmählich zum Abschleifen führt, zum Ausdruck zu bringen. In dieser Gleichung erscheint auf der rechten Seite nur eine

Funktion von $\frac{\tau}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ (d. h. von $\frac{\tau - \tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$, da bei $\tau = \tau_0$ der Geschiebetrieb = 0 sein soll), die für den Vergleich von ähnlichen Bettausbildungsformen sorgt. Auf der linken Seite soll ein dimensionslos gemachter Geschiebetrieb stehen, also Geschiebetrieb in Gewicht je Zeiteinheit durch Wasserdurchflußmenge in Gewicht je Zeiteinheit, mal einer Funktion von dimensionslosen Größen, die diese verschiedenen Werte, welche für dieselbe Bewegungsart, aber unter verschiedenen Umständen gewonnen sind (Korngewicht, Gefälle usw.), zur Gleichheit bringt. Man sieht allerdings leicht ein, daß die Wahl dieses dimensionslosen Geschiebetriebes nicht die einzig mögliche ist, doch ist dies ohne weitere Bedeutung.

Eine Dimensionsanalyse der Geschiebebewegung mit Vernachlässigung der Zähigkeitswirkung, (was im wesentlichen nur eine Ausschaltung der Riffelbildung bedeutet), und mit Benutzung nur derjenigen Größen, die im allgemeinen im Flußbau gemessen werden, ergibt eine Abhängigkeit des Geschiebetriebes von folgenden dimensionslosen Größen:

$$\frac{v^2}{Rg}, \frac{d}{R}, \frac{\gamma_1 - \gamma}{\gamma}, J \quad \text{und Formfaktoren}$$

und irgendeine Kombination dieser Größen. Man sieht, daß $\frac{\tau - \tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ durch diese Analyse gegeben ist. Also ist

$$\frac{G}{Q} f_1 \left(\frac{v^2}{Rg}, \frac{d}{R}, \frac{\gamma_1 - \gamma}{\gamma}, J, \beta_1, \beta_2, \dots \right) = f_2 \left(\frac{\tau - \tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d} \right)$$

Eine Auftragung G/Q gegenüber $\frac{\tau - \tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ scheint die zweckmäßigste Darstellung dieser Funktion zu sein, und zwar zeigt sich im wesentlichen, daß $f_1 = \frac{\gamma_1 - \gamma}{J \gamma}$ ¹³⁾ gesetzt werden darf. Man findet damit

¹³⁾ Das Fehlen der Froudeschen Zahl in dieser Erfahrungformel dürfte auf die allgemeine Geringfügigkeit der Oberflächenwellen zurückzuführen sein. Die Wirkung der Oberflächenwellen macht sich erst bemerkbar bei Geschwindigkeiten in der Nähe der Schwallgeschwindigkeit $v = \sqrt{gT}$, also bei $F = \frac{v}{\sqrt{gT}} \rightarrow 1$.

als empirische Gleichung

$$\frac{G}{Q} \left(\frac{\gamma_1 - \gamma}{J \gamma} \right) = 10 \frac{\tau - \tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d} \quad (11)$$

Die Funktion $\frac{G}{Q} \left(\frac{\gamma_1 - \gamma}{J \gamma} \right)$ über $\frac{\tau - \tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ ist in Abb. 15 aufgetragen. Die Streuung von Punkten ist charakteristisch für Geschiebetriebsmessungen und ist hauptsächlich in der Beharrlichkeit und in der Periodizität der Geschiebebewegung zu suchen. Die Periodizität konnte z. T. ausgeschaltet werden, indem der Versuch eingestellt wurde, wenn die Bettform vor dem Geschiebefang in derselben Phase war, wie am Anfang des Versuches. Gleichung 10 ist nicht aufgestellt, um eine universelle Gleichung (ohne Riffelbildung) für den Geschiebetrieb darzustellen, aus der man mit Sicherheit Zahlenwerte entnehmen könnte, sondern mehr als eine abgekürzte Schreibweise für den Einfluß der verschiedenen Faktoren auf die Geschiebebewegung gemeint. Diese Einflüsse werden am besten im einzelnen erläutert.

Einfluß der Größe $\frac{\tau - \tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$

Diese Größe, die man einen Zuschuß des Schleppspannungsbeiwerts nennen könnte, erfüllt die wichtige Aufgabe der Einordnung der verschiedenen Bewegungsstufen. Diese Größe hat schon Krey als Anhaltspunkt zur Beurteilung der Modellverhältnisse, die der natürlichen Erscheinung entsprechen sollten, in seinen Elbeversuchen benützt.

Bei kleinem $\frac{\tau - \tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ liegen hauptsächlich die Schwerepunkte mit ihrem sehr kleinen Verhältnis Höhe:Länge. Bei größeren $\frac{\tau - \tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ werden die Bereiche der größeren Werte H:L, also für Sand, Granitsplitt und für noch größere $\frac{\tau - \tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ auch für Braunkohle durchschritten. Sehr große Werte $\frac{\tau - \tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ also großes H:L bringen die Bernsteinergebnisse, welche die einzigen in unserer Versuchsreihe mit abschleifender Wirkung waren, in Betracht. Das Abschleifen fand bei $\frac{\tau - \tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d} \sim 0,2$ statt.

Einfluß des Gewichtes.

Das Korngewicht erscheint dreimal in Gleichung 11. Erstens in $\frac{\tau - \tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$, wo es einen bedeutenden Einfluß auf die Einordnung ausübt, zweitens in $\frac{G}{Q}$, wo der nach Gewicht gemessene Geschiebetrieb auftritt, der von dem nach Rauminhalt gemessenen Geschiebetrieb abweicht, und drittens in der Funktion $\frac{\gamma_1 - \gamma}{J \gamma}$, wo die Ergebnisse für Geschiebesorten ver-

Die größere Streuung der Ergebnisse bei schießender Strömung ist vielleicht teilweise aus diesem Grunde zu erklären. Besondere Versuche wären zur Untersuchung dieses Vorganges anzustellen.

schiedenen spezifischen Gewichtes vereinheitlicht werden. Man sieht, daß G von der zweiten Potenz des Gewichtes im Wasser abhängt.

Einfluß des Gefälles.

Die Versuche ergeben bei gleicher Geschiebesorte größere Abfuhrmengen bei größeren Gefällen. Das Gefälleglied im Nenner der Funktion $\frac{\gamma_1 - \gamma}{\gamma}$ bringt diesen Einfluß gut zum Ausdruck.

Einfluß der Kornform.

Es wurden keine wesentlichen Einflüsse der Kornform auf die Größe der Geschiebebewegung (nach den Anfangsstufen) bemerkt.

Schießende Strömung.

Bekanntlich wird eine Strömung „schießend“ genannt, wenn die Fließgeschwindigkeit größer ist als die Wellenschnelligkeit, d. h. $v > \sqrt{gt}$. Üblicherweise versteht man dabei unter v die mittlere Fließgeschwindigkeit $v_m = \frac{Q}{F}$. Wegen der Geschwindigkeitsverteilung entsteht jedoch die Frage, welche Geschwindigkeit v man als maßgeblich betrachten soll. Eine strenge Lösung dieser Aufgabe wäre sehr schwierig. Für unsere Zwecke mag eine Benutzung der mittleren Geschwindigkeit ausreichend genau sein.

Der Einfluß der schießenden Strömung auf den Bewegungsbeginn ist im letzten Abschnitt auch unter „Einfluß des Gefälles“ beschrieben.

Der Einfluß auf die Geschiebeführung ist z. T. in diesem Abschnitt unter „Bewegungstufen“ behandelt worden. Diesen Bemerkungen braucht nur noch hinzugefügt zu werden, daß die Geschiebetriebpunkte für schießende Strömung, die in Abb. 15 eingetragen sind, alle ein wenig höher liegen, weil eine etwas andere Bettausbildung bei schießendem Abfluß vorhanden war.

Vorteile der leichteren Geschiebesorten.

Die Eigenschaften der leichteren Geschiebesorten und ihre Anwendbarkeit als Modellgeschiebe gehen aus den angegebenen Versuchsergebnissen hervor.

Sehr günstig für Modellversuche ist die hierdurch erreichbare, geringere Grenzscheppspannung, die fast proportional dem Geschiebegewicht im Wasser ist. Dies bedeutet z. B., daß ein Bernsteingeschiebe von derselben Größe eines Sandgeschiebes ungefähr ein Zwanzigstel der Grenzscheppspannung des Sandes braucht, um in Bewegung gebracht zu werden. Dieser Vorteil braucht keine weitere Würdigung.

Die Bewegungseigenschaften sind aber nicht immer so günstig, da, wie aus Abb. 6 hervorgeht, bei dem verwendeten Bernstein von 1,56 mm Durchmesser eine Bettausbildung mit Schuppen oder kurzen

Bänken (siehe Abb. 14 S. 18) bald nach Bewegungsbeginn einsetzt. Diese Eigenschaft könnte im allgemeinen eine Abweichung von der Naturähnlichkeit bedeuten und würde den Modellwiderstand unmaßstäblich erhöhen. Man müßte also zu größeren Bernsteinsorten greifen, um in Abb. 6 weiter nach rechts zu kommen, also um günstigere Bewegungseigenschaften zu erzielen. Eine teilweise Erhöhung der Grenzscheppspannung muß selbstverständlich in Kauf genommen werden, aber es werden immer noch große Vorteile bleiben.

Wenn z. B. das Korn des Bernsteins viermal so groß wie das des Sandes ist, ist seine Grenzscheppspannung immerhin nur rund ein Fünftel der des Sandes. Dieses würde beispielsweise der von uns verwendeten Bernsteinsorte eine Bewegungsart in sanften Bettunebenheiten geben. Die Verwendung von leichteren Geschiebesorten bedeutet also einen sicheren Gewinn für die Flußmodellwissenschaft.

Die größeren Bettrauhigkeiten, die durch die Verwendung von größeren Bernsteingeschiebesorten entstehen, sind auch oft günstig besonders bei Modellverzerrung.

Sehr aussichtsreich ist es auch, noch weitere günstige Eigenschaften zu gewinnen durch Mischung von Bernsteingeschiebe. Die sehr leichte Beweglichkeit von Bernsteingeschiebe bringt entsprechende große Versuchsschwierigkeiten mit sich, aber diese lassen sich durch Verwendung einer besonderen Versuchstechnik überwinden.

Es darf noch erwähnt werden, daß größere $\frac{v_w d}{v}$ -Werte auch durch Verminderung der kinematischen Zähigkeit erreicht werden könnten, aber es fehlt an brauchbaren Flüssigkeiten mit dieser Eigenschaft.

Schlußbemerkungen zum dritten Abschnitt.

Der vorliegende Abschnitt über Geschiebebewegung behandelt die Grundzüge der Geschiebeführung, die besonders in praktischer Hinsicht von Bedeutung sind. Die Kenntnis des Beharrungszustandes ist eine notwendige Bedingung für die Eindeutigkeit der Versuchsergebnisse und für Vergleiche mit der Natur, die Beharrlichkeit gibt den Zeitmaßstab für qualitative Versuche. Die Beschreibung und Einordnung der verschiedenen Bettausbildungen bildet die Grundlage für die Kenntnisse der Geschiebeführung. Es ist sehr wichtig für den Flußbauer, daß er weiß, in welcher Weise ein gegebener Sand sich unter gegebenen Verhältnissen bewegt und was für eine Bettform entstehen kann. Dieses Einordnen der Bettausbildungen ist auch eine notwendige Bedingung zur Ableitung eines Gesetzes für den Geschiebetrieb. Die Gleichung 10 für den Geschiebetrieb ist durch eine teilweise Imhaltung der Ähnlichkeitsbedingungen gewonnen und ist hier angegeben, damit der Ingenieur eine einfache Gleichung hat, mit welcher er den Geschiebetrieb im Modell und Fluß und bei beinahe beliebigen Sandarten abschätzen kann.

Diese Verwendung wird am besten an Hand eines Beispiels erläutert. Angenommen, für einen Fluß seien die folgenden Messungen vorhanden: Geschwindigkeitsverteilung in der Lotrechten, Gefälle und Geschiebegröße und -gewicht. Man berechnet zuerst R_0 , Abstand zwischen Höchstgeschwindigkeit und Sohle, und kann die Kontrollen von S. 8 u. 9 verwenden. Die Grenzscheppspannung ist aus Abb. 6 und 7 zu entnehmen. Auch geben Abb. 6 und 10 die Form der Bettbildung und die Art der Bewegung an. Der Geschiebetrieb ist dann mit Gleichung 14 zu berechnen.

Wenn Modellversuche vorgesehen sind, dann wählt man mit Hilfe Abb. 6 u. 10 ein Modellgeschiebe, das dieselben Bettformen gibt, am besten ein leichteres Geschiebe, und bestimmt die hierzu notwendige Schleppspannung. Diese Schleppspannung ist mit Rücksicht auf die Bedingungen von Abschnitt I im Modell herzustellen besonders im Fall, wo Modellverzerrungen vorgenommen worden sind.

Vierter Abschnitt.

Geschiebesorten.

Die untersuchten Geschiebesorten sind in der folgenden Tafel beschrieben:

Geschiebesorte	Spez. Gew.	Korngröße		Kornform	16)
		Grenzen mm	Mittl. Durchm. mm		
Bernstein	1,06	0,38—3,0	1,56	scharfkantig	17)
Braunkohle I	1,27	0,75—2,0	1,77	kantig m. abger. Eck.	
Braunkohle II	1,27	0,75—5,0	1,88	" " " "	
Braunkohle III	1,27	2—5	2,53	" " " "	
Granitsplitt I	2,69	2—3	2,44	scharfkantig, Ränder u. Ecken noch scharf kantig	18)
Granitsplitt II	2,71	1,02—1,5	1,29	" " " "	
Granitsplitt III	2,70	0,75—1,02	0,85	" " " "	
Schwespat I	4,2	3—4	3,44	" " " "	
Schwespat II	4,19	2—3	2,46	" " " "	
Schwespat III	4,2	1—2	1,52	" " " "	
Schwespat IV	4,25	0,49—0,75	0,69	" " " "	
Schwespat V	4,3	0,25—0,49	0,36	" " " "	
Schwespat VI	4,2	2—5	2,76	" " " "	

An Kornform kann man unterscheiden:

Die abgerollte — mit mehr oder weniger kugligen Körnern,

die plattige — mit Körnern, die in einer Richtung wesentlich kleiner sind als in den beiden anderen Richtungen,

die kantige — mit teils rundkantigen, teils scharfkantigen Bruchstücken.

Die Siebkurven Abb. 16 vervollständigen die Angaben der Tafel.

16) Casey „Ueber Geschiebebewegung“ (8).

17) Splitter, die bei der Bearbeitung des Bernsteins auf der Drehbank usw. entstehen.

18) In Steinbrechern zertrümmertes Gestein.

Alle in dieser Arbeit betrachteten Sorten dürfen im allgemeinen als „kantig“ bezeichnet werden. Nur sind die Proben von Bernstein und Granitsplitt von 2—3 mm Größe ganz scharfkantig, während die Braunkohlensorten etwas abgerundete Kanten aufweisen. Sie unterscheiden sich aber stark durch ihr spezifisches Gewicht.

Die Granitsplittproben, die ungefähr das spezifische Gewicht von Quarzsand aufweisen, haben dieselben Korngrößen wie die abgerundeten Flußsandarten (d, f, h) die Casey (8) zur Untersuchung des Einflusses der Geschiebemischung benutzt hatte und die hier zum Vergleich herangezogen wurden (s. u. Einfluß der Form).

Versuchseinrichtungen.

Für die Untersuchung von Schwespatarten I, II und III und Braunkohle I, II und III wurde eine rechteckige 80 cm breite hölzerne Rinne benutzt, und zwar dieselbe, die Dr. Ing. Kramer in seiner Arbeit „Modellgeschiebe und Schleppkraft“ (7) benutzt hat. Für die Schwespatversuche waren die Wände aus lackiertem Holz; für die Braunkohlenversuche hatten sie durch aufgeklebte Braunkohlkörner eine Rauigkeit gleich der Sohlenrauigkeit. Außer den Versuchseinrichtungen, die Kramer zur Verfügung standen, waren auf den Seitenwänden zwei Schienen zur Einstellung des Gefälles angebracht. Außerdem wurde ein Geschiebefang in Form eines Schlitzes in der Sohle beim Auslauf eingebaut mit der Absicht, möglichst geringe Störungen der Strömung hierdurch zu erzeugen. Dieser Einbau hat sich sehr gut bewährt.

Für die Untersuchung der übrigen Schwespatarten IV und V und der Bernsteinproben wurde eine rechteckige, 40 cm breite neigbare Glasrinne benutzt, und zwar die gleiche, die Dr. Ing. Casey in seiner Arbeit „Ueber Geschiebebewegung“ (8) benutzt hat. Außer den von Casey beschriebenen Einrichtungen wurden hier alle Meßnadeln mit einer besonders feinen Einstellvorrichtung versehen. Die Ein- und Auslaufmeßstellen waren mit Schläuchen in Verbindung mit Töpfen gebracht, deren Wasserspiegel mit solchen Nadeln sehr genau abgelesen werden konnten, sodaß das Spiegelgefälle scharf bestimmt werden konnte.

Herstellung des Bettes.

Das Bett wurde vor jedem Versuche mit besonderer Sorgfalt eingeebnet. In der hölzernen Rinne erfolgte das Abziehen und das Abmessen des Bettes mittels eines durch die beiden Randschienen geführten Streichbrettes. In der Glasrinne wurde eine Meßbrücke zu diesem Zwecke benutzt. Dann ließ man eine dünne Wasserschicht laufen und konnte weitere sehr geringe Unebenheiten des Bettes nach der Form der Streifen von eingegossener Farbe feststellen und beseitigen.

Durchführung der Versuche.

Jede Geschiebesorte wurde mit durchschnittlich vier verschiedenen unverändert gehaltenen Gefällen untersucht. Bei jedem Gefälle wurden ungefähr sechzehn verschiedene Wassertiefen durch langsame Steigerung der Durchflußmenge eingestellt. Jedesmal wurde der Beharrungszustand abgewartet.

Die Sohlenlage wurde zuerst durch Ablesungen der Meßnadeln über einer auf der Sohle liegenden Glasscheibe festgestellt. Die Wassertiefen konnten nachher durch Nadellesungen am Rinnenwasserspiegel, Manometerlesungen und Nadellesungen an den Topfspiegeln gemessen werden.

Das Wassergefälle wurde ebenfalls in dieser Weise gemessen, und es war immer eine sehr gute Prüfung möglich. Während Versuche mit Schwespat wurde die Verteilung der Geschwindigkeit gemessen. Ein geeichtes Pitotrohr wurde hierzu benutzt.

Die Geschiebefracht und eine ausführliche Messung und Beschreibung der Bettausbildung wurde jedesmal eingetragen. (Für weitere Einzelheiten der Messungen sei auf die Arbeiten von Casey und Kramer hingewiesen.)

Zusammenfassung.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit allgemeinen Fragen der Geschiebebewegung und berücksichtigt besonders die Einflüsse von Gewicht und Form. Ein großer Bereich des Geschiebewertes wurde durch Verwendung von Schwespat, Granitplitz, Braunkohle und Bernstein erzielt. Die Untersuchung der Kornform erstreckte sich auf „abgerundete“, „kantige“ und „scharfkantige“ Körnungen.

Um die Versuchsergebnisse auf die gleiche Basis von einer unendlichen Breite zu übertragen, wurde der Begriff des hydraulischen Radius einer grundsätzlichen Betrachtung unterzogen. Der hydraulische Radius des der Sohle zugeordneten Querschnittes (entsprechend der Tiefe bei unendlicher Breite) konnte durch das Ziehen von Trennflächen durch die Eckpunkte der Sohle und senkrecht zu den Isotachen der Strömung berechnet werden. Aber da die Letzteren nicht immer ermittelt worden sind, mußten auch Annäherungsverfahren angegeben werden. Im Falle überall gleicher Umfangrauhigkeiten konnte diese Querschnittsverteilung durch das Ziehen von mittel- und winkelhalbierender Linien gut angenähert werden. Dieses führte für eine rechteckige Rinne zum folgenden Ergebnis:

$$\frac{R_s}{T} = 1 - \frac{T}{B} \quad \text{für} \quad \frac{T}{B} \leq \frac{1}{2}$$

wo R_s = hydraulischer Radius der Sohle,
 T = Wassertiefe,
 B = Rinnenbreite.

Wenn der Umfang verschiedene Rauigkeit besitzt, wird die Verteilung des Querschnittes auch

durch die relativen Rauigkeiten zwischen den verschiedenen Wänden bedingt. Es ist dann notwendig, die Isotachen durch Geschwindigkeitsmessungen festzustellen.

Die Feststellung des hydraulischen Radius, der Schubspannung und der mittleren Geschwindigkeit des Teilquerschnittes erfolgte auch zeichnerisch, wodurch es Genauigkeitskontrollen gab.

Mit dem der Sohle zugeordneten hydraulischen Radius = R_s und dem Gefälle = J kann man durch Bildung des Produktes $R_s J$ die mittlere Schubspannung auf der Sohle berechnen. Da aber anfänglich nur die oberen Körner in Bewegung kommen, muß die Schleppspannung nur für diese oberen Körner berechnet werden. Die Letztere war im allgemeinen nicht gleich der mittleren Schubspannung der Strömung auf der Sohle, da die etwas tiefer liegenden Körner z. T. Schleppkraft unmittelbar auf sich nehmen durch die Strömung in den Lücken und Poren.

Das Korngleichgewicht mußte als Ausgangspunkt benutzt werden, um zur Kenntnis des Vorganges in der oberen Körnerschicht zu gelangen. Hierzu wurden die Strömungsgesetze in rauen Röhren als Grundlage benutzt, und es ergab sich ohne weitere Annahmen der folgende einfache Ausdruck für den Beiwert der Grenzschleppspannung:

$$\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d} = f_a \left(\frac{v_* d}{\nu} \right) \quad (5)$$

wo $v_* = \sqrt{\frac{R_s \frac{dp}{dx}}{\gamma/g}} = \sqrt{g R_s J}$ die Schubspannungsgeschwindigkeit

und $f_a \left(\frac{v_* d}{\nu} \right)$ eine Funktion bedeutet, die sich zeichnerisch darstellen läßt. Die Eintragung Abb. 6 ergibt eine Gesetzmäßigkeit, die sich in den vier verschiedenen Bereichen folgendermaßen kennzeichnen läßt: Im Bereich I liegt die Grenzschleppspannung, wo sich die Körner zuerst aus der laminaren Schicht hervorheben. Dieser Zustand ergibt eine Grenzschleppspannung von

$$\tau_0 = \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{1/2} [0,1 \nu (\gamma_1 - \gamma)]^{1/2} \quad (6)$$

Im Bereich II ist die laminare Schicht von der gleichen Größenordnung wie die Rauigkeitserhebung.

In diesem Gebiete erreicht $\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ einen Kleinstwert von $\sim 0,033$.

Im Bereich III herrscht das quadratische Widerstandsgesetz der Rinnenströmung, aber noch nicht für die Strömung ums Korn, $\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d}$ steigt also allmählich in diesem Bereich.

Im Bereich IV herrscht quadratisches Widerstandsgesetz für Rinnenströmung und Strömung ums Korn, und der Schleppspannungsbeiwert wird in einem beschränkten Bereich ein Festwert.

$$\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma) d} \sim 0,06 \quad (9)$$

Das Korngewicht ist in der Ableitung der allgemeinen Funktion der Grenzscheppspannung enthalten, und Abb. 6 zeigt, daß diese den Gewichtseinfluß vollkommen berücksichtigt.

Die Kornform sollte in Abb. 6 als Parameter eingetragen werden, aber wegen der entgegengesetzten Wirkungen der verschiedenen Einflüsse der Kornform auf die Grenzscheppspannung sind hier keine großen Abweichungen infolge der Kornform zu verzeichnen. Sehr „scharfkantige“ Körner schienen eine größere Grenzscheppspannung zu benötigen, infolge des überwiegenden Einflusses des Ineinanderhakens der Körner.

Der Einfluß der Kornform auf die Strömung ist deutlich zu erkennen, indem ein ebenes Bett aus „kantigen“ Körnern jedesmal einen größeren Strömungswiderstand verursacht, als ein Bett aus „abgerundeten“ Körnern. Diese Feststellung ändert aber nicht die Form der Strömungsgesetze, sondern nur die darin enthaltenen Festwerte.

Die Geschiebeführung wurde von dem Standpunkt der Bewegungsart behandelt, weil diese erstens die Wasserströmung stark beeinflußt und zweitens die Geschiebeführung bedingt. Ferner wurde gezeigt, daß der Beharrlichkeit einer Bewegungsart große Bedeutung zukommt, weil diese die notwendige Grundlage einer Gesetzmäßigkeit bildet und in vielen Fällen den eigentlichen Zeitmaßstab für die Modellgeschiebebewegung gibt.

Es ist weiter zu betonen, daß in der Aufstellung einer Gleichung für den Geschiebetrieb nur „ähnliche“ Bewegungsformen verglichen werden dürfen. Die verschiedenen ersten Bewegungsstufen (d. h. die Bewegungsart kurz nach Bewegungsbeginn, z. B. Riffeln, Schuppen, Bänken usw.) können gut durch die Zahl $\frac{v_* d}{v}$ eingeordnet werden. Man sieht hier, daß Riffeln sich nur da bildeten, wo ein größerer Einfluß der Zähigkeit auf den Bewegungsbeginn vorhanden ist. Bei größeren Schlepsspannungen ist im allgemeinen ein etwas Kürzer- und Tieferwerden der Sohlenformen zu merken, bis bei sehr großen

Schlepsspannungen die schwebenden Körner anfangen, die Bankköpfe zu überspringen. Die Versuche zeigen, daß der Schlepsspannungswert für den Bewegungsbeginn in der Form von $\frac{r-r_0}{(\gamma_1-\gamma)d}$ gut zum Einordnen dieser weiteren Bewegungsstufen verwendet werden kann.

Wenn die erste Bewegungsstufe eine Bettbildung mit einem verhältnismäßig kleinen Verhältnis von Höhe zur Länge (also in sog. Bänken oder sanften Unebenheiten) ist, kann folgende Gleichung für den Geschiebetrieb aufgestellt werden:

$$\frac{G}{Q} \left(\frac{\gamma_1 - \gamma}{J \gamma} \right) = 10 \frac{r - r_0}{(\gamma_1 - \gamma) d} \quad (11)$$

wo $\frac{G}{Q}$ das Gewichtsverhältnis des Geschiebetriebes zur Wasserdurchflußmenge bedeutet.

Abb. 15 zeigt, daß die Ergebnisse für die Bernsteinsörte, die in der ersten Bewegungsstufe eine Bewegung in kurzen Bänken ergeben hatte, ganz gut in diese Eintragung hineinpaßt. In dieser Eintragung waren die Ergebnisse mit Bernstein hauptsächlich bei größeren Werten zu finden und waren die einzigen, bei denen sich die Bänke abgeschliffen hatten.

Ein merklicher Einfluß der verschiedenen verwendeten Kornformen auf die Geschiebeführung nach den ersten Bewegungsstufen konnte nicht festgestellt werden.

Versuche mit Geschiebeführung bei schießender Strömung zeigen, daß die höheren Bewegungsstufen etwas größere Werte für den Geschiebetrieb ergeben, obwohl eine etwas höhere Grenzscheppspannung gegenüber dem fließenden Zustand nötig ist.

Es möge betont werden, daß der Ausdruck (10) nicht als eine endgültige Gleichung für den Geschiebetrieb (selbst in beschränkten Gebieten) zu verstehen ist, sondern mehr als ein Anfang zu einer planmäßigen Erforschung des Geschiebetriebes gemeint ist.

Zum Schluß möchte ich Gelegenheit nehmen, der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau für die Bereitstellung der erforderlichen Hilfskräfte und Versuchseinrichtungen zu danken. Dem Leiter der Versuchsanstalt, Herrn Direktor und Professor R. Seifert, bin ich besonders dankbar sowohl für die Anregung zu der vorliegenden Arbeit als auch für seine richtunggebenden Ratschläge und unentbehrliche Unterstützung.

Ferner danke ich Herrn Regierungs- und Baurat Berg, dem Vorsteher der Wasserbauabteilung der Versuchsanstalt, und Herrn Regierungsbaurat Kleberg für das große Interesse, welches sie den Untersuchungen entgegenbrachten und für die freundliche Vermittlung ihrer reichen Erfahrungen aus der Praxis. Dem Betriebsleiter, Herrn Ingenieur O. Zschiesche, danke ich für seine wertvollen Ratschläge, insbesondere bei der Durchführung der Versuche.

Herr Dr.-Ing. Kopp hat mir jederzeit hilfreich zur Seite gestanden, ich möchte auch ihm daher für seine vielseitige Unterstützung meinen herzlichsten Dank aussprechen.

Anhang.

Schriftumverzeichnis.

1. T. Nikuradse: Strömungsgesetze in rauhen Röhren. Forschungsheft 361, VDI Verlag Berlin 1933.
2. L. Prandtl: Ueber die ausgebildete Turbulenz. Verhandlungen des 2. Intern. Kongresses f. Techn. Mechanik Zürich 1926.
3. T. v. Kármán: Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz. Verhandlungen des 3. Intern. Kongresses f. Techn. Mechanik Stockholm 1930.
4. T. Nikuradse: Gesetzmäßigkeit der turbulenten Strömung in glatten Röhren. Forschungsheft 356, VDI Verlag Berlin 1932.
5. H. Engels: Versuche über den Reibungswiderstand zwischen fließendem Wasser und benetztem Umfang. Zeitschrift für Bauwesen 1912.
6. R. Schöber: Versuche über den Reibungswiderstand zwischen fließendem Wasser und benetztem Umfang. Dresden 1916.
7. H. Kramer: Modellgeschiebe und Schleppkraft. Mitteilung der Preuß. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau (VWS), Berlin 1932, Heft 9.
8. H. Casey: Ueber Geschiebebewegung. Mitteilung der Preuß. Versuchsanstalt f. Wasserbau u. Schiffbau (VWS), Berlin 1935, Heft 19.
9. T. v. Kármán: Ueber die Stabilität der Laminarströmung und die Theorie der Turbulenz. Verhandlungen des 1. Intern. Kongresses für Techn. Mechanik. Delft 1924.
10. USWES: United States Waterways Experimental Station: Investigation of proposed methods of Bank and Embankment Protection Paper 12 Vicksburg 1933.
11. USWES: Study of Riverbed Materials and their use with Special Reference to the Mississippi System (erscheint demnächst).
12. Wheaton: Braunkohlenversuche (unveröffentlichter Bericht d. VWS).
13. T. v. Kármán: Some aspects of the turbulence problem. Verhandlungen d. Vierten Intern. Kongresses f. Techn. Mechanik, Cambridge 1934.
14. F. Schaffernak: Neue Grundlagen für die Berechnung der Geschiebeführung in Flußläufen. Leipzig u. Wien 1914.
15. G. Gilbert: Transport of Debris by Running Water. Prof. Paper 86, U. S. Geological Survey, Washington 1914.
16. H. Krey: Modellversuche für einen Fluß mit starker Geschiebeführung. Berlin 1935. (Nachträglich umgearbeiteter Versuchsbericht.)

An English translation has been made:

W P Ott and J C van Uchelen,

Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed-Load Movement

published as Report No. 167 (?) of the Soil Conservation Service, Cooperative Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California.

See also:

KENNEDY, J.F. (1995). "The Albert Shields Story." JI of Hyd. Engrg., ASCE, Vol. 12, No. 11, pp. 766-772.

BUFFINGTON, J.M. (1999). "The Legend of A.F. SHIELDS." JI of Hyd. Engrg., ASCE, Vol. 125, No. 4, pp. 376-38