

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 81 (1963)
Heft: 35

Artikel: Einführung in den Sedimenttransport offener Gerinne
Autor: Zeller, Jürg
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-66866>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 15.02.2026

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

zählige Bauten, von Fondaco dei Turchi zu den französischen Schlössern des XVII. Jahrhunderts, als Muster diente. Genauer gesagt, vollzieht sich im «Viktoria» die letzte Wandlung der albertinischen Formen, die durch die «Blende» der schulmässigen Regeln in die Gestaltungsfreiheit des Jugendstils projiziert werden.

Das Rahmenwerk der Loggia, das zugleich den Aufbau der Geschosse und die Gliederung der Innenräume verrät, lässt sich auf den dreifachen Säulengang der Renaissance-Ordnung zurückführen. Die beinahe abstrakt wirkende, im Hintergrund liegende Mauer ist wie eine reine Wandfläche, auf welcher der mit der Säulenordnung geschmückte Fassadenplan erscheint. (Die glücklicherweise erhaltenen farbigen Glastrennwände sind ein rein empirischer Versuch, die Trennung aufzuheben.) Schliesslich ist auch das unten angebrachte «Gewicht» ein altes Rezept aus der Renaissance und dem Barock.

*

Damit ist der Widerspruch zwischen dem architektonischen Glaubensbekenntnis von *Davinet* und *Studer* und der augenfälligen Ausnahme, die das «Viktoria» in ihrem Gesamtwerk zu bilden scheint, verschwunden. Davinets erstes Architekturexperiment, der Westflügel des heutigen Bundeshauses, war eine abgenutzte Wiedergabe florentinischer Schemata gewesen. Eine Spur davon liesse sich zweifellos mehr oder weniger deutlich durch sein ganzes Lebenswerk hindurch verfolgen, bis endlich zu dieser Art poetischer Verklärung, die sie im «Viktoria» erreicht.

Die unmittelbar dem «Viktoria» vorangehenden und folgenden Bauten sind, wie wir gesehen haben, eindeutig eklektisch. Vielleicht hat hier *Davinet* beweisen wollen, dass, wenn er auch nicht imstande war, sich zu erneuern — was Zweifel über sein ästhetisches Glaubensbekenntnis hätte aufkommen lassen — er wenigstens die Architekten der «Neuen Kunst» auf ihrem Gebiet zu schlagen und die Eitelkeit ihrer Anstrengungen vor Augen zu führen vermochte. Diese «Neue Kunst» fasste er offenbar als einen Stil im Dienste der Architektur auf, der sich wohl für einige Spezialfälle eignen würde.

Diese Einstellung liegt derjenigen eines *Wagner*, wie sie *Leonardo Benevolo* definierte⁹⁾, nahe. Sie ist eine Art subtiles Widerkäuen herkömmlicher Stile, insbesondere des Neoklassizismus. Nach Benevolo gehen die besten Werke der «Neuen Kunst» nicht über den Rahmen der eklektischen Mentalität hinaus. Das Problem der Architektur wird von *Horta* und *Wagner* nicht neu gestellt. Sie kleiden vielmehr die Baukörper, die noch den alten, von der Einheit des Blickpunktes abgeleiteten Grundsätzen entsprechen, in vereinfachte Formen ein, lehnen aber die aus diesen Grundsätzen herausgewachsene Sprache ab. Zusammenfassend heisst das, um einen Ausspruch von *René Huyghe* umzukehren: «Si, dans leur art, ce qui est explicite est différent, ce qui est implicite est identique»¹⁰⁾.

Zumindest trifft dieser Ausspruch für das «Viktoria» zu, ein gewiss nicht geniales, aber doch recht anmutiges Werk. Dieses Gebäude, ohne Aggressivität und Schwulst, nach *Edwards* so ganz von «guten Manieren» durchdrungen, stellt eine sinnreiche Abwandlung des Jugendstils dar, dessen Grenzen er auf seine Weise anerkennt.

9) Storia dell'architettura moderna, Bari 1960, Bd. 1, S. 380.

10) Daraus folgert *Benevolo*, dass dem Zeitraum von 1893 bis 1914 eine rein vorbereitende Bedeutung zukommt. Wir möchten weniger kategorisch sein, und uns der Auffassung von *Bruno Zevi* in seiner Storia dell'architettura moderna (Turin 1955, S. 112 ff.) anschliessen. Die Kunstwerke von *Mackintosh* oder *Gaudi* sind abgeschlossen. Sie sind mehr als eine Ankündigung, sie haben einen Wert an sich. Widerspricht sich übrigens Benevolo nicht, wenn er einen *Loos* oder einen *Hoffmann* als Vorläufer der neuen Zeit betrachtet, nachdem er sie der Vergangenheit zugewandt geschildert hatte? Von Bedeutung ist, dass sie die intellektuellen Schranken des Eklektizismus zu durchbrechen versuchten, und diese Haltung erlaubt uns, sie als *modern* zu bezeichnen. Wäre die «Neue Kunst» in ihrem Wesen nur eine Variante des Eklektizismus gewesen, wie hätte ihr der Rationalismus von 1920 entspringen können?

Adresse des Verfassers: *André Corboz*, 17 chemin des Crêts de Champel, Genève. — Photographien: *Jean-Marc Sauvant*, Übersetzung aus dem Französischen ins Deutsche: *Ernest Stocker*.

Einführung in den Sedimenttransport offener Gerinne

DK 627.157.001

Von **J. Zeller**, dipl. Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau (VAWE) an der ETH, Zürich

Fortsetzung von Heft 34, Seite 602

II. Der Geschiebetransport

Im vorangegangenen Kapitel wurde festgestellt, dass das Sedimenttransportproblem ausserordentlich vielschichtig ist, dass es trotz vieler Untersuchungen empirischer und theoretischer Art nach wie vor als kaum gelöst angesprochen werden muss, und dass sich die Studien vorwiegend auf den Fall gleichförmigen Abflusses und gleichförmigen Sediment-

transportes in eigener Alluvion beschränken. Wir wollen nachfolgend einige der wichtigsten Untersuchungsergebnisse kurz wiedergeben und wo notwendig, kommentieren.

1. Der Beginn der Geschiebebewegung und die kritische Schubspannung

Steigert man in einem Gerinne (Labor) mit «beweglicher

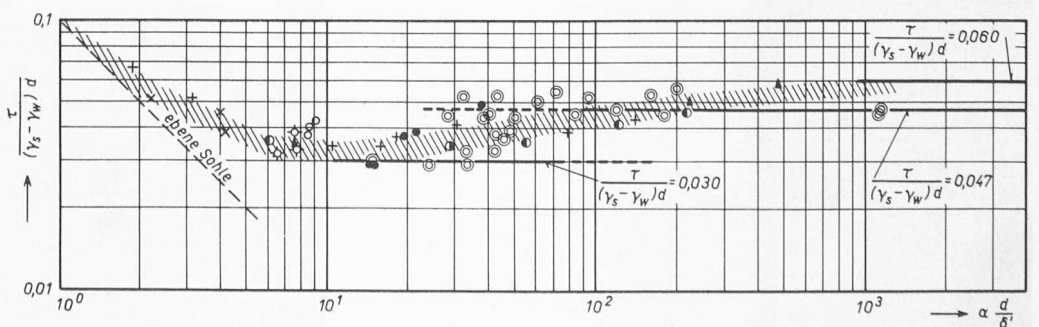


Bild 9. Kritische Schub- bzw. Schleppspannung in Abhängigkeit von Korndurchmesser und Strömungseigenschaften für Einheitskorn nach Shields, ergänzt durch Messwerte von Meyer-Peter u. a.

○ Bernsteinsand	$\gamma_s = 1,06$	$d_m = 1,56 \text{ mm}$	+	Sand	$\gamma_s = 2,55$ (Casey)	$d_m = 2,47 \text{ mm}$	$\alpha = 11,6$
● Braunkohle	$\gamma_s = 1,27$	$d_m = 1,71 \text{ mm}$	◇	Sand	$\gamma_s = 2,65$ (Kramer)	—	
⊙ Granitplitz	$\gamma_s = 2,70$	$d_m = 2,44 \text{ mm}$	×	Sand	$\gamma_s = 2,65$ (USWES)	—	
● Schwerspat	$\gamma_s = 4,25$	$d_m = 2,46 \text{ mm}$	▲	Sand	$\gamma_s = 2,65$ (Gilbert)	—	
			◎	Sand	$\gamma_s = 2,68$ (Meyer-Peter)	$d = 1,66 \text{ bis } 28,60 \text{ mm}$	

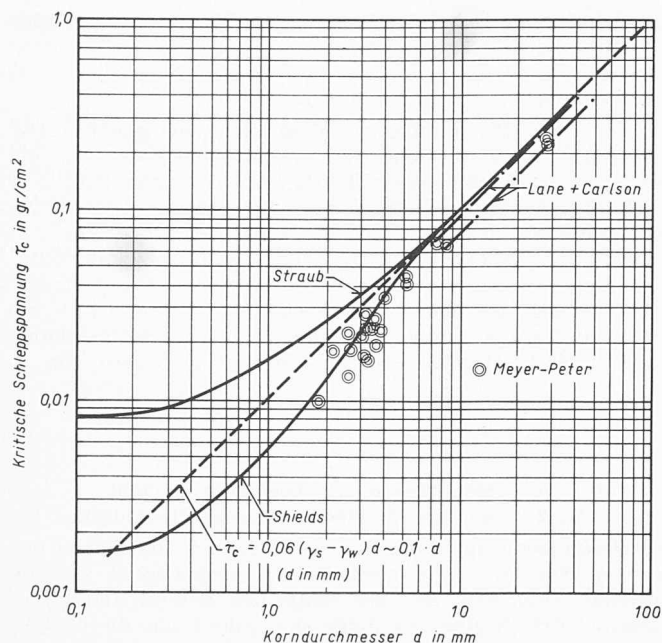


Bild 10. Kritische Schub- bzw. Schleppspannung für gleichkörnige Materialien mit einem spezifischen Gewicht $\gamma_s = 2,65$ bis $2,70 \text{ g/cm}^3$, ergänzt durch Werte von Meyer-Peter

Sohle sukzessive die Abflusswassermenge Q , so beginnt von einem bestimmten Q an, das Sohlenmaterial sich zu bewegen, d. h. der Geschiebetrieb beginnt. Diese Erscheinung ist bei flussbaulichen Problemen von grosser Bedeutung. Man bemüht sich seit langem, dieses Phänomen zu ergründen und Näheres über dessen Mechanismus zu erfahren. Das Erfangen, einen Beginn des Geschiebetriebes zu definieren, scheint allerdings ziemlich hoffnungslos. Nicht nur beginnt die Geschiebewegung, besonders bei weit gespannter Kornverteilung, je nach bewegtem Korndurchmesser bei ganz verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten, sondern auch die Variation der Schubspannungen entlang der Sohle infolge Turbulenz und verschiedener Ausgesetztheit der Körner zur Strömung ist erheblich. Dennoch ist der Vorgang so markant, dass es sich durchaus rechtfertigt, sich darüber Rechenschaft abzulegen.

Man charakterisiert diesen Beginn durch die *kritische Schub- oder Schleppspannung* τ_c . Diese wird entweder durch Beobachtung des Geschiebetriebbeginnes, oder aber durch Extrapolation der Geschiebetriebsgleichungen (siehe später) nach «unten» ermittelt.

A. Shields [6] untersuchte die auf ein Korn wirkenden Kräfte. Er definiert in allgemeiner Form die wirksame Schubkraft zu

$$S = C_K F_K \rho \frac{v^2}{2}$$

- C_K = Koeffizient des Strömungswiderstandes einer Kugel
 F_K = die der Strömung ausgesetzte Querschnittsfläche des Kornes einer Kugel
 ρ = Dichte
 v = Anströmgeschwindigkeit

Unter Berücksichtigung der logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung in Sohlennähe nach Prandtl-von Kármán findet er, dass die kritische Schubspannung eine Funktion ist von

$$(16) \quad \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) d} = f \left(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \frac{d \sqrt{\tau_0 / \rho}}{v} \right)$$

- α_1 = Kornoberflächenfaktor
 α_2 = Distanz von der Gerinnesohle in Einheiten des massgebenden Korndurchmessers
 α_3 = volumetrischer Kornformfaktor

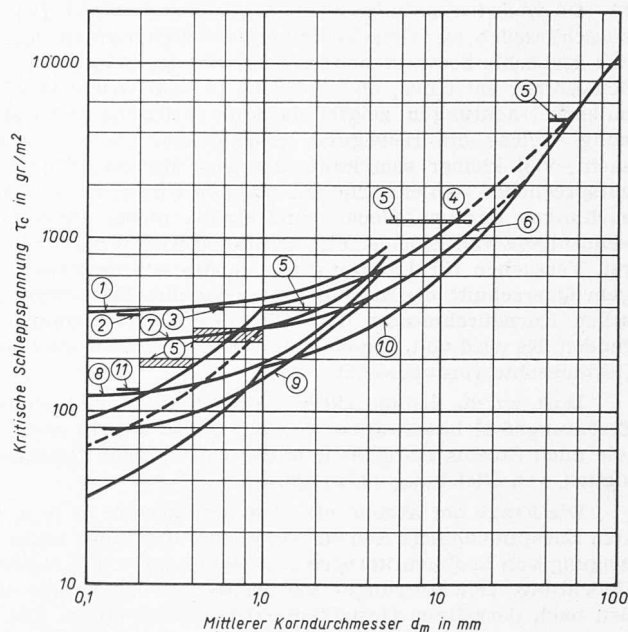


Bild 11. Für Kanäle empfohlene Begrenzung der Schleppspannung. (Oberhalb Kurven: Sedimentbewegung; unterhalb: keine Bewegung) nach E. W. Lane

- (1) für Wasser mit grossem Suspensionsgehalt nach Lane
- (2) empfohlen für Kanäle in Sandmaterial und Wasser mit grossem Kolloidgehalt nach S. Fortier und F. C. Scobey
- (3) empfohlen für Kanäle in Sandmaterial nach A. Schoklitsch
- (4) für Kanäle mit 2,5 % Kolloiden im Wasser nach U. S. S. R.
- (5) Nürnberger Kulturrat
- (6) für Kanäle mit 0,1 % Kolloiden im Wasser nach U. S. S. R.
- (7) empfohlen für Kanäle mit geringem Schwebstoffgehalt nach E. W. Lane
- (8) empfohlen für Kanäle mit Reinwasser nach E. W. Lane
- (9) Kurve nach Straub für die kritische Schleppspannung in Laboratoriumskanälen (Reinwasser)
- (10) für Kanäle mit Reinwasser nach U. S. S. R.
- (11) empfohlen für Kanäle in feinem Sandmaterial und Reinwasser nach S. Fortier und F. C. Scobey

τ_0 = Schubspannung entlang der Sohle (wird von Shields näherungsweise gleichgesetzt $\tau = \gamma \cdot R \cdot J$). Bei Geschiebetriebbeginn ist $\tau_0 = \tau_c$.

f = Funktion

d = Korndurchmesser (massgebend)

Diese für gemischtkörnige Sedimente näherungsweise gültige Beziehung nimmt für Sedimente mit einheitlichem Korn die einfache Form an

$$(17) \quad \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) d} = f_1 \left(\frac{d \sqrt{\tau_0 / \rho}}{v} \right) = f_2 \left(\frac{d}{\delta'} \right)$$

f_1, f_2 = Funktionen

ρ = Dichte der Körner

$$\delta' = 11,6 \frac{v}{\sqrt{\tau_0 / \rho}} \quad \text{laminare Grenzunterschicht,}$$

d. h. τ_c ist für konstantes ρ näherungsweise proportional dem Korndurchmesser.

In Bild 9 sind diese Funktion f_2 und Messresultate von Shields und anderer Autoren für die turbulente Strömung wiedergegeben. Im Bereich oberhalb der im Diagramm angegebenen schraffierten Linie bewegen sich die Körner, im Bereich darunter sind sie in Ruhe.

Falls d wesentlich grösser ist als δ' , nähert man sich dem konstanten Wert

$$(17) \quad \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) d} = \text{konst.} \sim 0,06$$

Auch wird offenbar der Wert 0,03 nicht unterschritten.

Im weiteren sei noch erwähnt, dass z. B. White [7] sich ausschliesslich zu einer Verteilung der Schubkräfte auf die aus der Sohle hervorstehenden bzw. auf der Sohle aufliegenden Körner entschied, und Kalinske [8] auf Grund von Turbulenzbetrachtungen zeigte, dass die kritische Schubspannung, welche die Bewegung gleichgrosser Partikel verursacht, viel kleiner sein kann, als dem Mittelwert über die entsprechende Sohlenfläche entsprechen würde. Diese Untersuchungen ändern jedoch grundsätzlich nichts an den Erkenntnissen von Shields. Für Quarzmaterial wurde in neueren Versuchen für Laboratoriumskanäle mit rechteckförmigem Querschnitt die in Bild 10 dargestellte Beziehung zwischen Korndurchmesser und kritischer Schubspannung gefunden. Es wird voll ausgebildete Turbulenz sowie eine ebene Gerinnesohle vorausgesetzt.

Dort, wo die Sedimentkörner «vollständig» ins turbulente Strömungsfeld hineinragen (in Bild 10 bei $d \geq 10$ mm), ist, wie auch Shields festgestellt hatte, die einfache Gesetzmässigkeit von Gleichung (17a) gültig.

Die Frage der absolut stabilen Gerinnesohle, d. h. in diesem Zusammenhange Sohlen, auf denen überhaupt keine Bewegung von Sedimentkörnern stattfindet, ist von praktischer Bedeutung. Bewässerungs- und Entwässerungskanäle werden nach derartigen Gesichtspunkten dimensioniert. Die zugelassenen Grenzen der Schubspannung τ_c werden meist niedriger angesetzt, als nach Shields zu erwarten wäre. Eine Zusammenstellung einiger für derartige Zwecke heute verwendeten «Richtlinien» ist in Bild 11 wiedergegeben.

Besonders mag auffallen, dass bei feinkörnigem Sohlenmaterial mit zunehmendem Suspensions- bzw. Kolloidgehalt des Wassers die Wirkung der Schleppspannung abnimmt. Diese Eigenart kann z. T. auf den Umstand zurückgeführt werden, dass die Strömungsgeschwindigkeit in Sohlennähe bei hohem Suspensionsgehalt und damit die Schubspannungsverteilung weit stärker abfällt als bei Reinwasser und entsprechend auch die Turbulenz in Sohlennähe weniger intensiv ist. Ausserdem ist in Bild 11 das spezifische Gewicht der Sedimente nicht berücksichtigt, so dass hiedurch gewisse zusätzliche Streuungen auftreten.

2. Der Geschiebetrieb

Die nachfolgend diskutierten Geschiebetriebgleichungen erfassen die auf der Gerinnesohle und deren unmittelbaren Nähe transportierten Sedimente. Es handelt sich hierbei durchwegs um die max. mögliche Sedimentmenge, die transportiert werden kann, d. h. die Transportkapazität eines Gerinnes in eigener Alluvion. Die historische Entwicklung in der Kenntnis dieser Transportvorgänge spiegelt sich in den aufgeführten Geschiebetriebgleichungen wider, indem versucht wurde, sich von den rein empirischen Erkenntnissen zu lösen und mehr und mehr hydromechanische und -dynamische Gesichtspunkte mit einzubeziehen¹²⁾. Einen der ersten Schritte zur Beschreibung des Geschiebetriebes unternahm Du Boys 1879. Obgleich die Herleitung seiner Transportgleichung auf heute in dieser Art kaum mehr haltbaren Voraussetzungen beruht, fand diese Gleichung weiteste Verbreitung. Ihre grosse Einfachheit und ihre in einzelnen Fäl-

¹²⁾ Die Auswahl der Geschiebetriebgleichungen wurde derart getroffen, dass die bekanntesten Gleichungen wiedergegeben werden, ergänzt durch einige, die mehr akademischen Wert haben, aber die Entwicklungstendenz charakterisieren.

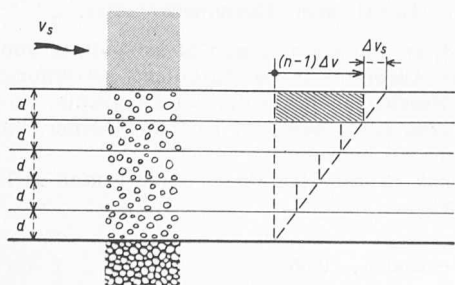


Bild 12. Geschiebebewegung nach Du Boys

len verblüffende Übereinstimmung mit Messungen in Natur dürften dazu beigetragen haben.

Geschiebetriebgleichung von Du Boys

Du Boys [9] nimmt an, dass sich der gesamte Geschiebetrieb in einer Zone der Gerinnesohle abspielt, die mehrere Korndurchmesser mächtig ist. Er unterteilt diese in n einkornmächtige Schichten von der Stärke d (Bild 12) und nimmt an, dass sich jede von unten nach oben um den Betrag Δv_s rascher bewege (lineare Geschwindigkeitsverteilung), wobei die unterste Schicht eine Geschwindigkeit Null und die oberste dann eine solche von $(n-1) \Delta v_s$ aufweise. Daraus ergibt sich eine in dieser Sedimentzone transportierte Geschiebemenge (an Luft gewogen) von

$$g_G = \gamma_s n d \frac{(n-1) \Delta v_s}{2}$$

mit $n \cdot d$ = Mächtigkeit der bewegten Schicht
 $(n-1) \Delta v_s / 2$ = mittlere Fortbewegungsgeschwindigkeit

Die Gesamtschubspannung τ_0 , die längs der Oberfläche der obersten Schicht wirkt, verteilt sich proportional auf die einzelnen Schichten. Bei der kritischen Schubspannung τ_c (Geschiebetriebbeginn) vermöge sich jedoch nur die oberste Schicht zu bewegen, weshalb $\tau_0 = \tau_c$ für $n = 1$ und $\tau_0 / \tau_c = n$ ist. Die Geschiebetriebgleichung erhält dadurch die typische Form:

$$(18) \quad g_G = \chi \tau_0 (\tau_0 - \tau_c)$$

$$\chi = \frac{\gamma_s d \Delta v_s}{2 \tau_c^2} = \text{Koeffizient}$$

L. G. Straub [10] hat in diesem Zusammenhang für einige praktische Fälle χ und τ_c ermittelt (Bild 13), allerdings beschränkt auf Laboratoriumsrinnen mit verhältnismässig kleinen Abmessungen.

Gl. (18) wird heute noch hin und wieder für überschlägige Berechnungen angewendet im Falle groben, gleichkörnigen Geschiebes und grosser Strömungsgeschwindigkeiten (Flüsse und Bäche mit Gebirgscharakter; in der Schweiz nicht gebräuchlich).

Geschiebetriebgleichung von A. Schoklitsch

1934 publizierte A. Schoklitsch [11] seine Untersuchungen über den Geschiebetrieb. Die Arbeit beruht auf den eingehenden Versuchen von G. K. Gilbert [1].

$$(19) \quad g_G = \frac{7000}{\sqrt{d}} J^{2/3} (q - q_c)$$

d = Korndurchmesser in mm. Bei Korngemischen wird die Kornverteilung in Korngruppen mit einheitlichem Korndurchmesser d_i unterteilt. Hierauf bestimmt man für jede Fraktion d_i den Geschiebetrieb g_i . Der Gesamtgeschiebe-

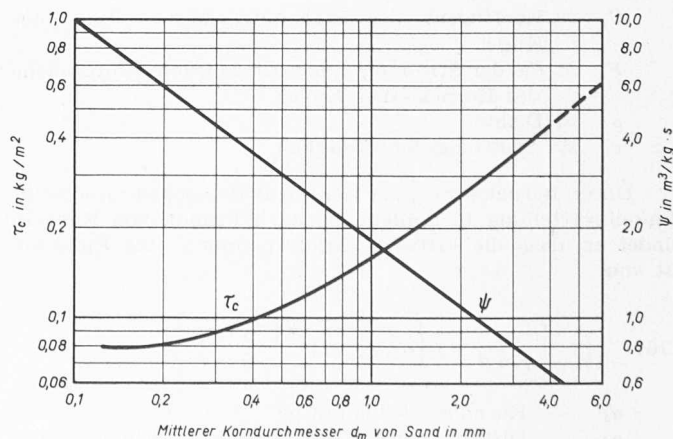


Bild 13. τ_c und χ für die Geschiebetriebgleichung von Du Boys nach L. G. Straub

trieb g_G ist das Gewichtsmittel aus den einzelnen g_i , wobei die Gewichte für die Mittelwertbildung die Anteile der entsprechenden Fraktionen der Kornverteilung sind.

J = Gefälle

q = Wassermenge in m^3/s pro m Gerinnebreite

q_c = Wassermenge, bei der der Geschiebetrieb beginnt («kritische Wassermenge»)

$$q_c = 1,944 \cdot 10^{-5} \frac{d}{J^{1/3}}$$

Gleichung (19) wird heute manchmal noch benützt für den Fall groben, mehr oder weniger gleichkörnigen Geschiebes in Flüssen mit grossen bis mittleren Gefällen (in der Schweiz wenig gebräuchlich).

Geschiebetriebgleichung von E. Meyer-Peter und R. Müller [12]

Diese Gleichung, kurz «Meyer-Peter-Gleichung» genannt, hat weiteste Verbreitung gefunden. Sie stellt wohl einen der letzten und vollkommensten Versuche dar, die verschiedenen den Geschiebetrieb beeinflussenden Parameter in einer einzigen, auf empirischem Wege aufgesuchten Gleichung zu vereinen. Sie beruht auf einer überaus grossen Zahl sorgfältig ausgeführter Versuche mit verschiedensten Sedimenten und Gerinneabmessungen. Diese Versuche, die während einer Zeitspanne von über 15 Jahren durchgeführt wurden, ergaben die bekannte Gleichung

$$(20) \quad \gamma_w R_s J_r = \gamma_w \frac{Q_s}{Q} \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} h J = A'' \gamma_s'' d + B'' \left(\frac{\gamma_w}{g} \right)^{1/3} g''_G^{2/3}$$

hierin bedeuten:

γ_s'' = spezifisches Gewicht des Geschiebes, unter Wasser gewogen, in t/m^3 . $\gamma_s'' = \gamma_s - \gamma_w$

d_m = mittl. Korndurchmesser des Geschiebes = Gewichtsmittel der einzelnen Kornfraktionen = $1/100 \cdot \Sigma \Delta \cdot d$ in m

d_{90} = Korndurchmesser, der von 90 % (Gewicht) der Körner unterschritten wird (Kornverteilungskurve)

h = Wassertiefe in m

$\left. \begin{matrix} A'' \\ B'' \end{matrix} \right\}$ = Koeffizienten, dimensionslos

$A'' = 0,047$ für voll ausgebildeten Sedimenttransport. Falls man den Beginn des Sedimenttransportes untersucht, wird A'' kleiner. Kein Transport findet statt bei $A'' \sim 0,03$ (Bild 9)

$B'' = 0,25$. Für Flüsse mit Sandsohlen bzw. viel Feinmaterial wurde für $B'' = 0,22$ gefunden [2].

g = Erdbeschleunigung = $9,81 \text{ m/s}^2$

g''_G = Geschiebetransport unter Wasser gewogen pro m Gerinnebreite in kg/s (das an Luft gewogene Gewicht $g_G = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \right) g''_G$)

Q = Gesamtabflusswassermenge in m^3/s

Q_s = Anteil der Abflusswassermenge, die für den Sedimenttransport entlang der Gerinnesohle verantwortlich ist.

J = Energieliniengefälle zugehörig zur Gesamtabflusswassermenge (dimensionslos)

J_r = Energieliniengefälle desjenigen Anteiles des Gesamtenergiegefälles J , der auf die Sohlenreibung infolge Kornrauigkeit zurückzuführen ist

R_s = «Sohlenanteil» des hydraulischen Radius (verantwortlich für Sedimenttransport)

k_s = Koeffizient nach Strickler, der den Anteil des Energieverlustes infolge «Sohlenrauigkeit» wiedergibt.

k_r = Koeffizient, der denjenigen Anteil von k_s wiedergibt, der auf die «Kornrauigkeit» zurückzuführen ist.

k_s/k_r = Das Verhältnis von k_s/k_r variiert etwa zwischen den Grenzen $0,5 > k_s/k_r > 1,0$, wobei 1,0 bei ebener Sohle und 0,5 bei hohen Sohlenwellen bestimmt wurden [2]. (Bei hohen zweidimensionalen Sanddünen (Bänken) wurde sogar ein Wert $k_s/k_r = 0,4$ ermittelt).

Die Meyer-Peter-Gleichung findet für die meisten Alpen-, Voralpen- und z. T. auch Flachlandflüsse Anwendung, d. h. Flüsse mit flachen bis steilen Gefällen, gleichkörnigen bis ungleichkörnigen Geschieben und ebenen bis stark gewellten Flusssohlen bei strömendem Abfluss. Beim Uebergang zum Schiessen (Antidünen) wird g_G zu klein, ebenso, wenn beim Geschiebe der grobkörnige gegenüber dem feinkörnigen Anteil stark zurücktritt (in der Schweiz wird praktisch ausschliesslich nach Gl. (20) gearbeitet).

Geschiebetriebgleichung von A. Kalinske

Kalinske ist erwähnenswert, weil er den Versuch unternahm, auf theoretischem Wege die Wirkung der Turbulenz auf die einzelnen Körner der Sohle zu berücksichtigen. Bis anhin wurde die Schubspannung als eine konstante Grösse (Mittelwert) angenommen (Du Boys, Schoklitsch, Meyer-Peter usw.), wohingegen Kalinske diese Kraft als fluktuierend voraussetzt (siehe Kapitel I). Der Sedimenttransport ist deshalb ebenfalls, wenigstens in kleinen Zeitintervallen gesehen, unregelmässig. Geht man wiederum vom Einzelkorn aus, so ist dessen Fortbewegungsgeschwindigkeit

$$v_s = \varepsilon (v - v_c)$$

v = momentane Strömungsgeschwindigkeit auf der Höhe des Einzelkornes in m/s

v_c = kritische Geschwindigkeit, d. h. Geschwindigkeit bei Geschiebetriebbeginn.

ε = Konstante, nahe bei 1,0.

Da v eine Momentangeschwindigkeit ist, die sich mit der Zeit ändert, so variiert entsprechend auch die Fortbewegungsgeschwindigkeit v_s des Kornes. Die Anzahl N gleichartiger Körner pro Flächeneinheit der Gerinnesohle, die bereit sind, sich zu bewegen, sei

$$N = \frac{P}{\alpha_1 d^2} \quad \text{worin:}$$

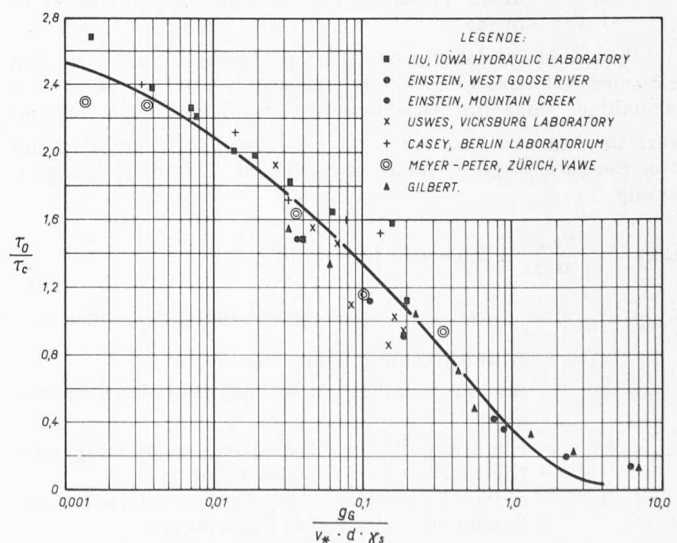


Bild 14. Transportierte Geschiebemengen entsprechend Gl. (21) für gleichkörnige Sedimente, verglichen mit Versuchen verschiedener Autoren, nach Kalinske

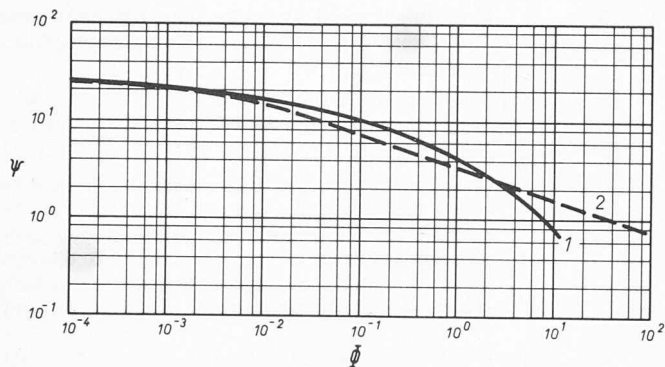


Bild 15. Geschiebefunktion nach Einstein für gleichkörniges Sohlenmaterial

- (1) Funktion zu Gleichung (22)
(2) Funktion zu Gleichung (25) nach Einstein-Brown

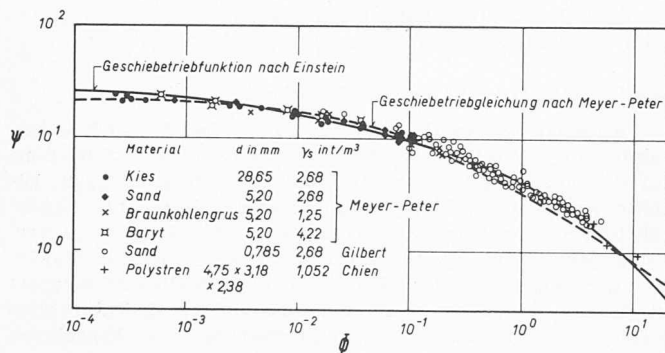


Bild 16. Gegenüberstellung der Geschiebefunktion von Einstein mit der Meyer-Peter-Gleichung für gleichkörniges Geschiebe nach Ning Chien

P = Flächenanteil der Gerinnesohle, die durch diese Körner belegt ist, in m²

d = Korndurchmesser in m

α_1 = Formfaktor der Körner

Die derart transportierte Geschiebemenge (pro sec und m Gerinnebreite) ist:

$$g_G = \gamma_s \alpha_3 d^3 \bar{v}_s N = \alpha P \gamma_s d \bar{v}_s$$

α_3 = Volumenfaktor der Körner (siehe Kapitel I).

α = Kornformfaktor (Kombination aus α_1 und α_3)
= $\frac{1}{6}$ für Kugeln gleichen Durchmessers

\bar{v}_s = mittl. Transportgeschwindigkeit der Körner in m/sec

Unter Einbeziehung des Strömungswiderstandes an den Körnern bei einem bewegten Kornanteil von $p = 35\%$, der Annahme, dass die Geschwindigkeitsfluktuationen normal verteilt sind und dass $\bar{\sigma}/\bar{v} = \frac{1}{4}$ sei (entspricht der Mehrzahl von Beobachtungen), findet Kalinske die Geschiebetriebgleichung

$$(21) \quad \frac{g_G}{v_* d \gamma_s} = 2,5 \Theta \left(\frac{\tau_c}{\tau_0} \right)$$

$$v_* = \sqrt{\tau_0 / \rho} = \sqrt{g R_s J_e} = \text{«Schergeschwindigkeit» in m/s}$$

τ_0 = Schubspannung längs der Sohle

τ_c = Schubspannung, bei der der Geschiebetrieb beginnt

Θ = Funktion, die die Grösse der Geschwindigkeitsfluktuationen wiedergibt (Bild 14)

σ = mittl. Abweichung der Geschwindigkeitsfluktuationen (Gauss'sche Verteilung)

Gleichung (21) ergibt vor allem für gleichkörnige Geschiebe eine gute Übereinstimmung mit Messungen in Versuchsrinnen und kann in speziellen Fällen auch für Vor-

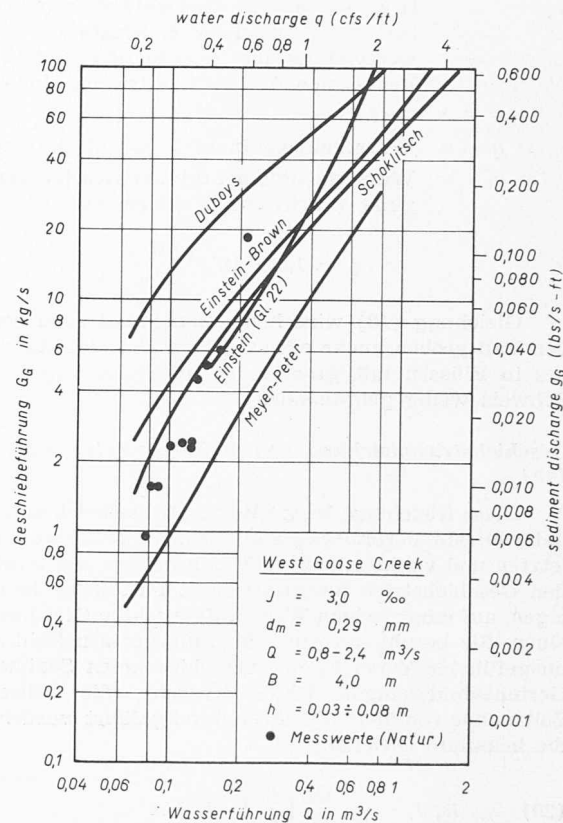


Bild 17. Geschiebefunktion des West Goose Creek bei Oxford (Mississippi, USA). Flüsschen mit nahezu gleichkörnigem Geschiebe, dessen Gerinnesohle je nach Wasserführung Riffel bis Dünen und unter gewissen Umständen Antidünen aufweist, nach Vanoni [22]

gänge in Natur benützt werden (in der Schweiz nicht im Gebrauch).

Geschiebefunktion von H. A. Einstein

Einsteins Untersuchung [13] beruht auf der Vorstellung, dass die Geschiebebewegung durch «Gleiten», «Rollen» und «Hüpfen» der Einzelkörner charakterisiert werden könne. Ausserdem schlägt er vor, dass die feinsten Körner, 10 % des Kornanteiles des Sohlenmaterials, nicht zu berücksichtigen seien, da diese nur lose die Hohlräume zwischen den grösseren Körnern füllen und schon bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten weggewaschen werden, deshalb für die Geschiebebewegung nicht repräsentativ sind. Auf Grund vieler Versuche stellte er fest, dass ein Korn gegebenen Durchmessers sich in einer Serie von Einzelbewegungen konstanter mittlerer Länge fortbewegt. Die Anzahl Körner eines bestimmten Durchmessers, die sich pro Zeiteinheit in einer Flächeneinheit der Sohle ablagern, ist abhängig von Korn-Strömungsverhältnissen in Sohlennähe.

Demgegenüber ist die Kornanzahl, die aus diesem Flächenelement pro Zeiteinheit wegtransportiert wird, eine Funktion der Körner dieses bestimmten Durchmessers, die die betrachtete Flächeneinheit bedecken, und der Wahrscheinlichkeit ihres Wegtransportes. Diese Wahrscheinlichkeit kann ausgedrückt werden durch die auf das Korn wirkenden dynamischen Auftriebskräfte im Verhältnis zum Unterwassergewicht dieses Kornes. Geschiebetriebgleichgewicht herrscht, wenn die Anzahl der im Flächenelement ankommenden Körner gleich derjenigen ist, die es verlässt. Unter Verwendung der Kenntnisse der modernen Turbulenzforschung führt dies zu folgendem Ausdruck für die Wahrscheinlichkeit p der Fortbewegung der Körner:

$$(22) \quad p = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-B_* x - 1/\eta_0}^{+B_* x - 1/\eta_0} e^{-t^2} dt = \frac{A_* \Phi}{1 + A_* \Phi}$$

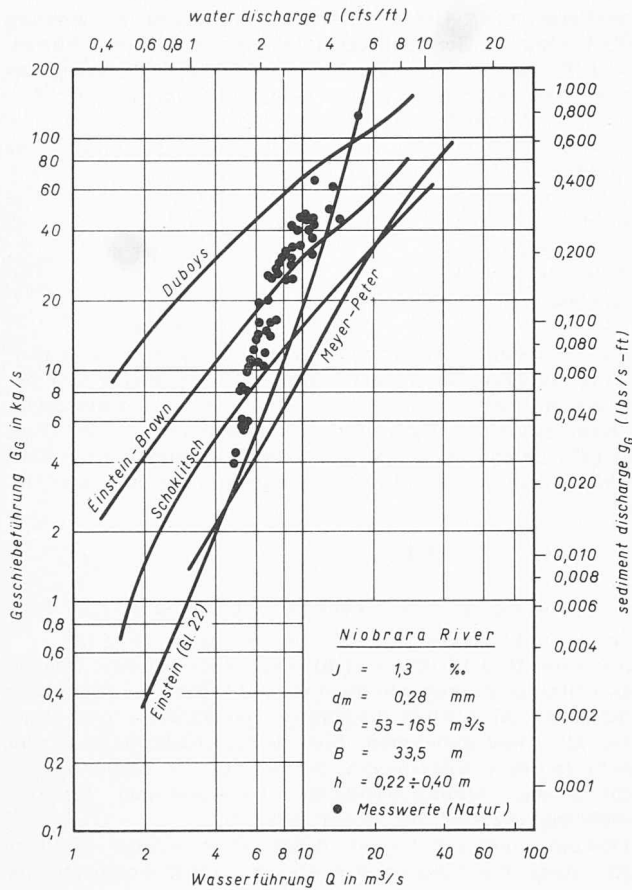


Bild 18. Geschiebefunktion des Niobrara River (Nebraska, USA). Fluss mit nahezu gleichkörnigem Geschiebe, nach Vanoni [22]

Gleichung (22) stellt die unter dem Namen «Einsteinsche Geschiebefunktion» bekannte Beziehung dar und ist in Bild 15 dargestellt. Einstein definiert deren Transportintensität zu

$$(23) \quad \Phi = \frac{g_G}{\rho_s g} \left(\frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{g d^3} \right)^{1/2}$$

und deren Bewegungsintensität zu

$$(24) \quad \chi = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \frac{d}{R'_s J_e}$$

Die universellen Konstanten nehmen für gleichkörnige Sedimente und eine Sohle mit Riffeln die Werte an:

$$A_* = 43.5 \quad B_* = 0.143 \quad \eta_0 = 0.5 \text{ (Auftriebsfaktor)}$$

t ist eine Integrationsvariable und R_s der hydraulische Radius (Sohlenanteil), der in zwei Teile aufgespalten wird, einen Anteil R'_s , der dem Strömungswiderstand an den Körnern und einen solchen R''_s , der den Sohlenunebenheiten (Bänke, Riffel usw.) zugeordnet ist [14].

Die Gleichungen (22) und (24) beruhen auf Untersuchungen an gleichkörnigen Sedimenten. Sie sind aber derart aufgebaut, dass sie jederzeit auch auf Korngemische angewendet werden können, falls folgende Substitutionen vorgenommen werden:

$$\Phi_* = \frac{i_G}{i_g} \Phi \quad \text{und} \quad \chi_* = \xi Y \frac{(\beta/\beta_x)^2}{\Theta} \chi$$

i_G/i_g = relativer Flächenanteil der Sohle, der durch die Körner eines bestimmten Durchmessers bedeckt wird.

ξ , Y (β/β_x)² und Θ sind Korrekturfaktoren für ungleichförmige Sedimente, die die gegenseitige Einwirkung der Körner aufeinander und den Einfluss der laminaren Grenzschicht während des Transportes wiedergeben. Hat man nun

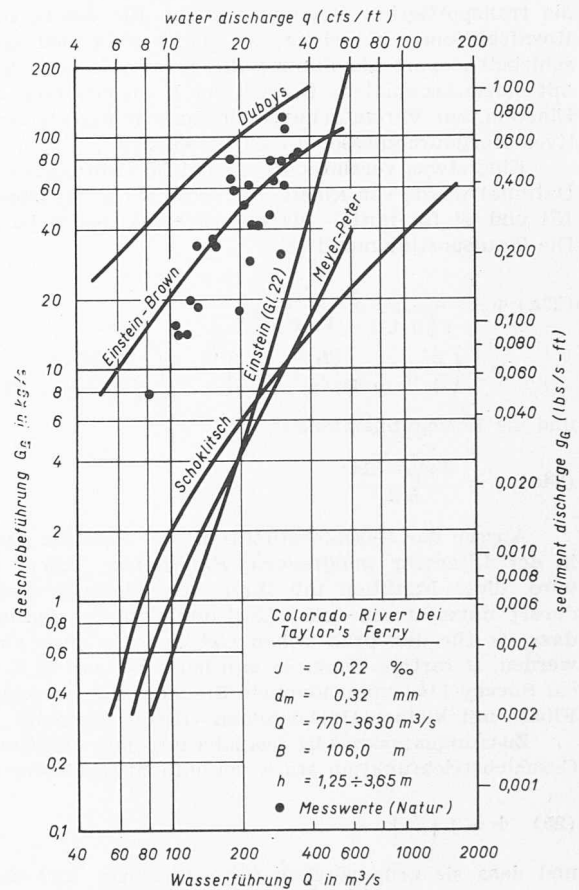


Bild 19. Geschiebefunktion des Colorado River bei Taylor's Ferry (USA). Fluss mit extremen Hochwasserspitzen und ausserordentlich grossem Schwebstofftransport, nach Vanoni [22]

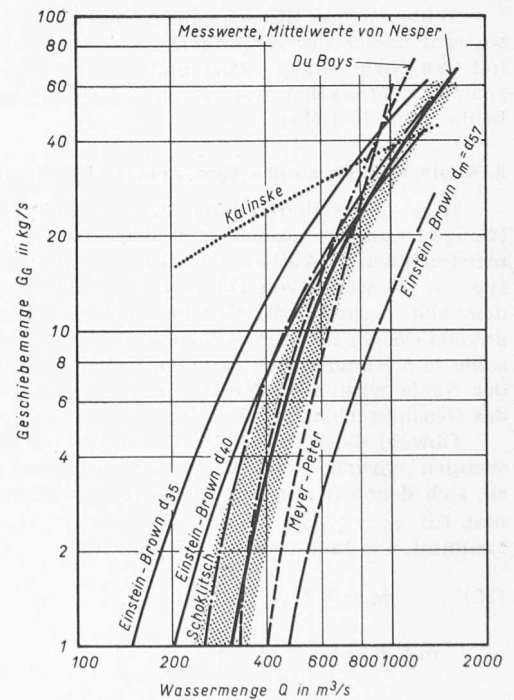


Bild 20. Geschiebefunktion des Rheins bei Brugg (SG). Fluss mit viel Grobgeschiebe, ausgeprägtem Schwebstofftransport bei Hochwasser und stetig wandernden Kiesbänken, die ihre Form kaum verändern. (Die Berechnung nach Einstein-Brown erfolgte für die Korndurchmesser d_{35} , d_{40} und d_{57}) [37]

die transportierten Geschiebemengen für die verschiedenen Kornfraktionen berechnet, so findet man den Gesamtgeschiebetransport als Summe dieser Anteile. Für Sedimente mit einem «schmalen» Bereich der Kornverteilung empfiehlt Einstein, zur Vereinfachung der Berechnung als repräsentativen Korndurchmesser d_{35} zu verwenden.

Eine etwas vereinfachte Geschiebetriebfunktion (älteren Datums) wurde von Einstein-Brown [15] ausgearbeitet (Bild 15) und ist für mittel- bis grobkörniges Geschiebe geeignet. Die Transportintensität ist

$$(23a) \quad \Phi = \frac{g_G}{\gamma \sqrt{g (\gamma_s - 1) F d^{2/3}}} \\ F = \left(\frac{2}{3} + \frac{36 p^2}{g d^3 (\gamma_s - 1)} \right)^{1/2} - \left(\frac{36 p^2}{g d^3 (\gamma_s - 1)} \right)^{1/2}$$

und die Bewegungsintensität

$$(24a) \quad \chi = \frac{d (\gamma_s - 1)}{h J}$$

Ausser der Geschiebefunktion von Einstein findet man in der Literatur *modifizierte Funktionen*, indem versucht wird, diese Funktion mit ihren verschiedenen Parametern derart umzuformen und «Unstimmigkeiten» auszuschalten, dass sie für den praktischen Gebrauch leichter anwendbar werden. Derartige Versuche wurden z. B. vom U. S. Geological Survey [16] unternommen. Sie sind aber vorwiegend für Flüsse mit kleinen Unebenheiten (Riffel) gedacht.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Einsteinsche Geschiebetriebfunktion stark vereinfacht die Form hat

$$(25) \quad \Phi = f \left(\frac{1}{\chi} \right)$$

und dass sie grundsätzlich für alle Fluss- und Geschiebearten angewendet werden kann. Da aber, wie erwähnt, die universellen Konstanten A_* , B_* , η_0 der Gleichungen (23) und (24) bis heute noch an bestimmte Voraussetzungen gebunden, d. h. erst für einen beschränkten Gültigkeitsbereich ermittelt worden sind, eignet sich die Geschiebefunktion von Einstein mehr für Flüsse mit fein- bis mittelkörnigen Sedimenten, wie sie vor allem in Flachlandflüssen und Mündungsgebieten auftreten, als für Gebirgsflüsse.

Will man sie für schweizerische Verhältnisse benützen, so wird besser die vereinfachte Form nach Einstein-Brown mit den Gleichungen (23a) und (24a) verwendet. (Die Geschiebetriebfunktion von Einstein ist in der Schweiz bis heute nicht in Gebrauch).

3. Bemerkungen zu den Geschiebetriebgleichungen

Eine Gegenüberstellung der verschiedenen Geschiebetriebgleichungen, besonders früherer Zeiten, zeigt für die meisten einen im Aufbau grundsätzlich ähnlichen Gleichungstyp wie derjenige von Du Boys (Gl. 18). Im Prinzip wurde demnach versucht, die Geschiebemenge mehr oder weniger ausschliesslich mit den Schleppkräften entlang der Gerinnesohle in Verbindung zu bringen, wobei meist anstelle der an der Sohle wirkenden Kräfte, auf die mittlere Schleppkraft des Gesamtgerinnequerschnittes basiert werden musste.

Obwohl die Meyer-Peter-Gleichung (Gl. 20) auf die tatsächlich wirksamen Schleppkräfte Rücksicht nimmt, lässt sie sich dennoch auf den Du Boys-Typ zurückführen, wenn man für $\tau_0 = \gamma_w R_s J_r$ und $\tau_c = A'' \gamma''_s d_m$ annimmt. Sie lautet derart umgeformt:

$$(26) \quad g_G = K (\tau_0 - \tau_c)^{3/2} \\ \text{mit } K = 8 \left(\frac{g}{\gamma_w} \right)^{1/2} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} \right)$$

Sinngemäss findet man auch eine Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Bagnold [17], Ning Chien [18], Yalin [19] und anderen. Da die Meyer-Peter-Gleichung dem Ähnlichkeitsgesetz von Froude gehorcht, wird sie für die verschiedensten Gerinneabmessungen anwendbar, solange man sich im Bereich voll ausgebildeter Turbulenz befindet. Es darf deshalb angenommen werden, dass die Gleichung von

Meyer-Peter einen Grossteil der bis zu deren Entstehung (1948) bekannten Geschiebetriebgleichungen in sich schliesst. Dies ist vor allem auf die sehr ausgedehnten Versuche zurückzuführen, auf denen diese Gleichung beruht. Der Bereich dieser Versuche ist folgender [20]:

Gefälle 1,5 bis 20 ‰ (mit annehmbaren Resultaten bis gegen 60 ‰).

Korndurchmesser	0,8 bis 30 mm
Wassertiefen	0,1 bis 1,2 m
Abflussmengen	0,002 bis 2,00 m ³ /s m'
Spezifisches Gewicht des Geschiebes	1,05 bis 4,2 t/m ³
Kornform	kugelig bis kubisch

Eine Gegenüberstellung der Geschiebefunktion von Einstein mit anderen Geschiebetriebgleichungen dürfte von besonderem Interesse sein, speziell, da diese auf Grund neuester Kenntnisse der Hydrodynamik abgeleitet wurde. Ning Chien [21] gelang es, die Meyer-Peter-Gleichung in die Einsteinsche Form $\Phi = f(1/\chi)$ überzuführen, welche alsdann lautet:

$$(27) \quad \Phi = \left(\frac{4}{\chi} - 0,188 \right)^{3/2}$$

Demnach befriedigt die Meyer-Peter-Gleichung die Einsteinsche Funktion im Bereich von rd. $10^{-4} \leq \Phi \leq 10^{+1}$ entsprechend Bild 16 (für gleichkörniges Geschiebe). Ebenso zeigen Untersuchungen von Mostafa [21], dass die Gleichung von Kalinske im Aufbau derjenigen von Einstein sehr ähnlich ist. Man darf annehmen, dass die Geschiebefunktion von Einstein in ihrer allgemeinen Form und die Meyer-Peter-Gleichung die «allumfassendsten» Darstellungen der Geschiebebewegung sind, die es zur Zeit gibt.

Obwohl man auf Grund dieser Feststellung glauben müsste, dass die Lösung des Geschiebetransportproblems ganz oder doch nahezu ganz gelöst sei, zeigen praktische Anwendungen, dass dem leider nicht so ist. Die vier Beispiele der Bilder 17 bis 20, denen noch weitere angefügt werden können, mögen dies veranschaulichen. H. Rouse [23] stellte fest: «So gut die Geschiebetriebgleichungen als solche auch stimmen mögen, so schwierig ist es für den Praktiker, die Gleichungen anzuwenden und die für die Berechnung erforderlichen Daten korrekt zu ermitteln. Je nach Bearbeiter können für die selbe Flusstrecke unter Verwendung der selben Geschiebetriebgleichung Unterschiede in der Berechnung von g_G entstehen, die mehr als 100 % betragen.» Diese Feststellung ist nicht sehr ermutigend und zeigt in Verbindung mit den Bildern 17 bis 20, dass offenbar noch lange nicht alle Faktoren, die den Geschiebetrieb beeinflussen, ausreichend erkannt und berücksichtigt worden sind. Man beschäftigt sich deshalb heute auf breiter Basis mit allen möglichen Phänomenen, die für den Geschiebetransport von Bedeutung sein können, worunter zu nennen sind:

- Einfluss von Suspensionsgehalt und Wassertemperaturschwankungen auf die Geschwindigkeitsverteilung in Sohlennähe und auf den Sedimenttransport.
- Einfluss der Sohlenform (insbesondere der Sohlenwellen) auf Energieverluste, Geschwindigkeitsverteilung und Geschiebetrieb, und Studium des Entstehungsmechanismus der Sohlenwellen.
- Einfluss des Abflussregimes auf die Sedimentführung und Bettbildung unter Berücksichtigung ungleichförmigen Geschiebetransportes.

u. a. m.

Schluss folgt

Nekrologe

† Rudolf Gaberel wurde am 15. Juli 1882 in Bern als Bürger der Bielerseegemeinde Ligerz geboren, wo das neben dem «Hof» bemerkenswerteste gotische Gaberelhaus unter dem Schutz der hoch über See und Rebland schauenden Kirche steht und für das Alter des Geschlechtes zeugt, dessen letzter männlicher Spross er geworden. Nach durch Krankheit abgerissener Gymnasialzeit in Bern, halbjähriger Zimmermannslehre und Studien am Technikum in Burgdorf kam er in eine zweijährige Lehre bei Architekt Stettler in