Beitrag zur Berechnung der Geschiebeführung und der Normalprofilbreite von Gebirgsflüssen

Autor(en): **Meyer-Peter, E. / Favre, Henry / Müller, Robert**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **105/106 (1935)**

Heft 10

PDF erstellt am: **28.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-47401

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

INHALT: Beitrag zur Berechnung der Geschiebeführung und der Normalprofilbreite von Gebirgsflüssen. — Vollautomatische Oelfeuerungsanlagen. — Versuche über die Wirkung von Kaminaufsätzen. — Mitteilungen: Städtische Miethäuser in Genf. Neuerungen im Dampfturbinenbau. Korrosionsermüdung. Das italienische Baugewerbe im Jahre 1934. Wasserenthärtung durch Permutitverfahren. Photoelektrisches Trübungsmessgerät. Ein Mangelberuf. 4. Internationaler Krankenhaus-Kongress in Rom. Die vatikanische Eisenbahn. Die Lyoner Messe. — Nekrologe: Alex Alder. Karl Gabriel. Carl v. Linde. Benjamin Person. Ernest Deluermoz. — Literatur. — Eidg. Patentschriften-Sammlung der „SBZ". — Inhaltsverzeichnis der „SBZ". — Mitteilungen der Vereine. — Sitzungs- und Vortrags-Kalender.

Band 105 Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 10

Beitrag zur Berechnung der Geschiebeführung und der Normalprofilbreite von Gebirgsflüssen.

Von Prof. Dr. E. MEYER-PETER, Dr. HENRY FAVRE und Dipl. Ing. ROBERT MÜLLER, E. T. H. Zürich. (Schluss von Seite 99.)

III. ÜBERPRÜFUNG DER BERECHNUNGSMETHODE AN HAND VON AUSGEFÜHRTEN MODELLVERSUCHEN.

Die beste Methode der Ueberprüfung der beschriebenen Berechnungsmethode besteht in der direkten Geschiebemessung, worauf schon im oben zitierten Aufsatz in der „SBZ" vom März 1934 hingewiesen worden ist. Leider bestehen noch zu wenige derartige Messungen, um schlüssige Folgerungen zu ziehen. Eingehende Versuche der Versuchsanstalt für Wasserbau am Modell im Masstab 1:100 einer regulierten Flusstrecke können an Stelle von direkten Messungen in der Natur für diese Prüfung herangezogen werden. Aus der grossen Reihe dieser Versuche wurden die nachstehend mit a bis e bezeichneten ausgewertet.

Als Geschiebe wurde wegen des Modellmasstabes Braunkohlengrus in zwei verschiedenen Mischungen verwendet; das spezifische Gewicht des Materials beträgt 1,25. Besondere systematische Versuche, ähnlich denen, die im Aufsatz der „SBZ" vom März 1934 beschrieben sind, haben das für Modellversuche in kleinem Masstab unter Anwendung dieses Materials wichtige Ergebnis gebracht, dass das Geschiebetriebgesetz nach Gleichung (3) auch für Braunkohlengrus gilt. Die Konstanten *a* und *b* ändern sich mit dem spezifischen Gewicht. Für die beiden verwendeten Gemische ergeben sich folgende charakteristische Werte:

Gemisch Nr.	Korngrössen mm	Massgebender Durchmesser mm	Konstanten des Geschiebetriebgesetzes a	b
1	1 bis 3	1,3	1,65	0,268
2	0,5 bis 11,6	1,2	1.50	0,275

Die Feststellung, dass die beiden Konstanten *a* und *b* für die beiden Gemische etwas von einander abweichen, erklärt sich durch die kleinen Korndurchmesser, die, gemäss früheren Mitteilungen, auch nach den Versuchen von Gilbert eine gewisse Abweichung gegenüber dem Verhalten der grossen Durchmesser zeigen. In Bezug auf den Wert *g* in der Gleichung (3) ist noch darauf hinzuweisen, dass er aus versuchstechnischen Gründen *unter Wasser* gewogen wurde. Das den Versuchen zu Grunde gelegte Normalprofil der Flusstrecke geht aus Abb. 9 (S. 110) hervor, in der auch die für den Versuch e aus den Aufnahmen der Flusssohle, gemäss den Abb. 9A und 9B, ermittelte hypsographische Kurve, d. h. der massgebende Querschnitt eingezeichnet ist. Abb. 9C stellt eine Aufnahme einer Modellstrecke bei NW dar; zum Vergleich wird in Abb. 9D eine Fliegeraufnahme des Rheines unmittelbar oberhalb des Diepoldsauer Durchstiches wiedergegeben. Die vier Versuche a bis d sind mit der Mischung Nr. 1 ausgeführt, aber mit verschiedenen Wassermengen, der Versuch e mit dem Gemisch Nr. 2.

Versuch Nr.	Wassermenge l/sec	Gefälle ‰	Geschiebemenge l/sec Berechnet	Gemessen
a	5	0,99	7,21	8,0
b	7	1,00	13,6	14,1
c	15	1,00	37,8	36,0
d	25	1,039	66,7	65,4

Die vier erhaltenen Resultate gestatten nun die Aufzeichnung der Geschiebefunktion (Abb. 10).

Der Versuch e wurde mit variabler Wassermenge ausgeführt, entsprechend einem gegebenen Beobachtungsjahr. Die Geschiebefunktion war durch Vorversuche annähernd ermittelt worden, wobei jeder Wassermenge eine besondere Geschiebemischung zugeordnet war. Dabei variierte der massgebende Korndurchmesser von 0,87 mm für einen Abfluss von 1 l/sec bis 1,65 mm für einen Abfluss von 15 l/sec. Das während eines Versuchsjahrs im Ganzen eingeführte Geschiebe hatte aber im Mittel den bereits genannten massgebenden Durchmesser von 1,2 mm.

Es konnten hier nur die jährlichen Geschiebefrachten miteinander verglichen werden und zwar wurden dabei bei der Rechnung das eine Mal die mit den Wassermengen variierenden Durchmesser, das andere Mal dagegen der Durchmesser des Mittels der Mischungen eingeführt. Die Resultate sind die folgenden:

Versuch Nr.	Wassermenge l/sec	Gefälle Mittel ‰	Geschiebefracht, Liter berechnet mit variablen Korndurchmessern	berechnet mit mittl. Korndurchmesser	gemessen
e	variierend von 1 l/sec bis 15 l/sec	1,00	93,7	97,5	94

Der Vergleich der Resultate der Berechnung mit denen der Messsung darf also wohl als sehr befriedigend bezeichnet werden. Er zeigt auch, dass bei der Anwendung auf die natürlichen Verhältnisse, bei denen eine Differenzierung der Geschiebemischungen je nach den Wassermengen nicht möglich ist, mit genügender Genauigkeit mit dem massgebenden Korndurchmesser des mittleren Geschiebes, das auf den Kiesbänken leicht analysiert werden kann, gerechnet werden darf.

IV. BERECHNUNG DES LÄNGSPROFILS BEI GEGEBENER NORMALPROFILBREITE.

1. *Generelle Beschreibung des Berechnungs-Ganges.* Durch die Entwicklungen in Abschnitt II sind die Grundlagen für diese Aufgabe gegeben. Es handelt sich darum, die praktische Anwendung der Theorie auf konkrete Fälle kurz zu besprechen.

Bisher ist gezeigt worden, wie für einen geschiebeführenden Gebirgsfluss die jährliche Geschiebefracht berechnet werden kann, wenn gegeben sind: das Querprofil, das Gefälle, die Rauhigkeit, der massgebende Geschiebedurchmesser und die jährliche Wasserfracht. Es ist ohne weiteres einzusehen, dass aus der Beziehung zwischen diesen sechs Variabeln jede beliebige, so insbesondere das Gefälle berechnet werden kann, wenn die fünf andern gegeben sind. Die explizite Ermittlung des Gefälles ist allerdings nicht möglich, weshalb man so vorzugehen hat, dass, gemäss den in Abschnitt II entwickelten

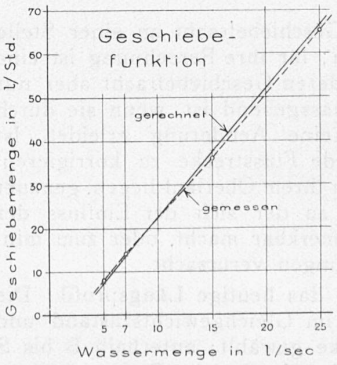
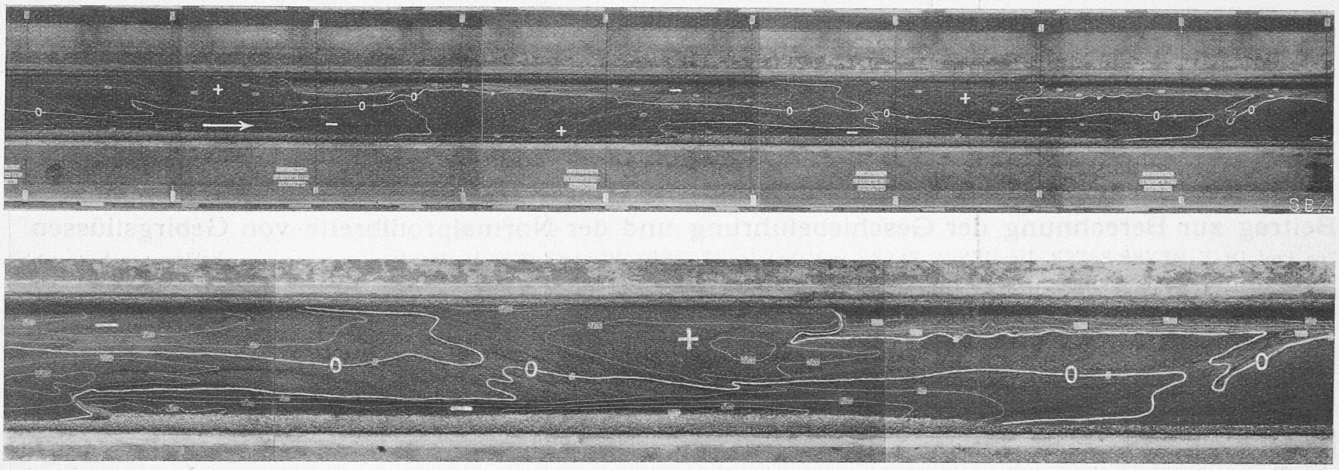


Abb. 10



Modellversuche der Versuchsanstalt für Wasserbau an der E. T. H.

Abb. 9 A (oben). Aufnahme der Modell-Flussohle mit 1 m Höhenkurven (O = Kote der theoretischen Sohle).

Abb. 9 B (darunter). Desgleichen, Hälfte rechts von Abb. 9 A in doppeltem Masstab (1 : 5000).

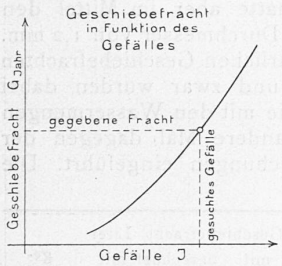


Abb. 11

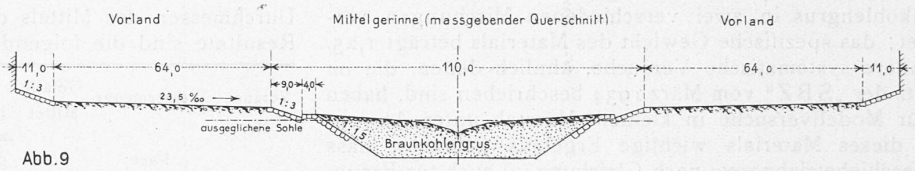


Abb. 9

Formeln für ein angenommenes Gefälle, die zugehörige Geschiebefracht berechnet wird. Man erhält dann durch Aufzeichnen der Resultate eine Kurve: Geschiebefracht in Funktion des Gefälles (Abb. 11), aus der das der gegebenen Fracht zugehörige Gefälle ermittelt wird.

Es ist nun zu beachten, dass das gesamte Längsprofil seiner absoluten Höhe nach stets durch einen Fixpunkt, der flussabwärts der betrachteten Strecke liegt, bestimmt ist. Dieser Fixpunkt, in Abb. 12 mit S bezeichnet, ist derart zu verstehen, dass die Höhenlage der Sohle unabhängig ist von der Geschiebeführung in der Strecke oberhalb S. Dies trifft praktisch zu bei der Mündung in einen tiefen See, wenn die Vorschiebung der Mündungsstelle durch die Deltaablagerung in den für technische Aufgaben in Frage kommenden Zeiten vernachlässigt werden kann; ferner bei der Mündung in einen Hauptfluss, der die ihm zugeführten Geschiebe anstandslos weiterfördern kann, endlich bei einer direkt unterhalb S vorhandenen steilen Flusstrecke, deren Sohle durch eine Felsschwelle oder sehr grobes Schuttmaterial, das mit dem Flussgeschiebe nichts zu tun hat, fixiert ist. Zwei derartige Strecken kommen beispielsweise an der Rhone vor bei Leuk und bei der Mündung des St. Barthélemy-Baches; Felsschwellen sind häufig. Jede rechnerische Ermittlung der Wirkung einer Flusskorrektion hat sich also bis zu diesem Fixpunkt zu erstrecken.

Anderseits muss die Geschiebefracht an einer Stelle des Flusslaufes gegeben sein; für ihre Berechnung ist eine Musterstrecke erforderlich, deren Geschiebefracht aber nur dann für das Längsprofil massgebend ist, wenn sie durch die geplante Korrektion keine Aenderung erleidet. Ist also die oberhalb S liegende Flusstrecke zu korrigieren, so sollte die Musterstrecke in ihrem Oberlauf liegen, genauer gesagt, an der Stelle, bis zu der sich der Einfluss der Korrektion gerade noch bemerkbar macht, oder zum mindesten nur geringe Aenderungen verursacht.

In Abb. 12 sei A-B-S das heutige Längsprofil. Die Strecke A-B befindet sich im Gleichgewichtszustand und sei deshalb als Musterstrecke gewählt; unterhalb B bis S sei Alluvionszustand. Würde die Strecke B-S nicht korrigiert, so müsste sich somit ihre Sohle mit der Zeit heben, und das definitive Längsprofil wäre durch den Linienzug A'-B'-S gegeben. Es sei hier zunächst vorausgesetzt, dass die Höherlegung der Musterstrecke von A-B nach A'-B' keine Verminderung der Geschiebezufuhr bedinge. Im allgemeinen wird dies zutreffen, da oberhalb A-B sicher eine Erosionsstrecke vorhanden ist, deren unteres Ende im Verhältnis zu dem vorhandenen Gefällsüberschuss doch nur ganz unwesentlich gehoben würde.

Ueberhöhte Längen-Profile eines Gebirgsflusses.

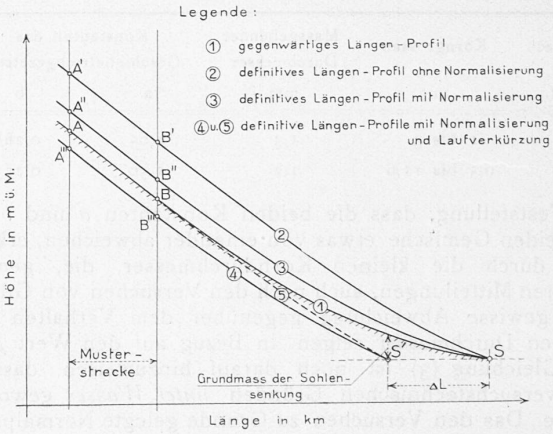


Abb. 12

Der Anlass zur Korrektion des Flusses wird durch die in Zukunft (Gleichgewichtszustand) zu erwartende hohe Sohlenlage gegeben, die als unzulässig betrachtet werde. Für den Fall, dass keine Laufverkürzung durch Durchstiche in Frage kommt, kann die zu lösende Aufgabe nur dahin lauten, durch passende Wahl des Normalprofils das definitive Längsprofil so zu beeinflussen, dass, von S ausgehend, eine als zulässig zu betrachtende Erhöhung der heutigen Sohle nicht überschritten wird, dass sich also ein Längsprofil gemäss der Linie A''-B''-S einstellt.

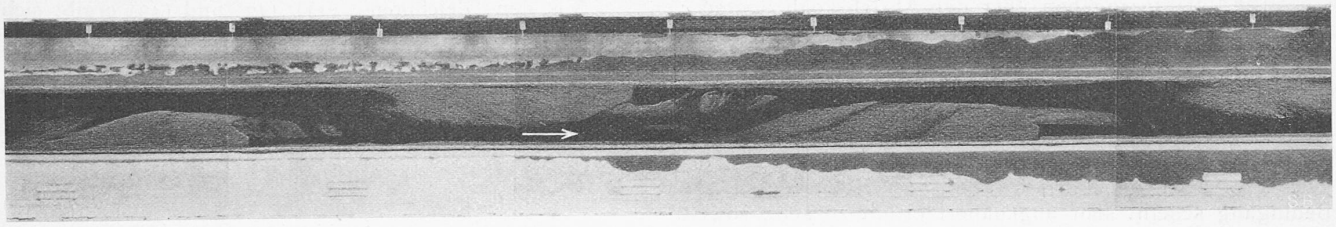


Abb. 9 C. Aufnahme der gleichen Modellstrecke bei Niederwasser (0,55 l/sec, entsprechend 55 m³/sec in der Natur). Modellmasstab 1 : 100, Cliché-Masstab etwa 1 : 10 000.

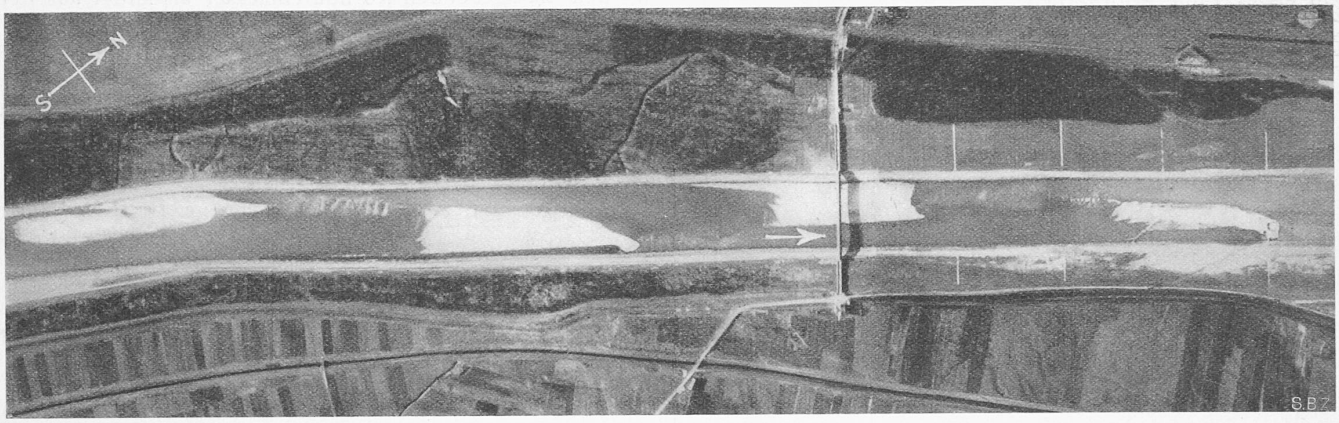


Abb. 9 D. Fliegerbild einer ähnlichen Rheinstrecke mit der Brücke Kriessern-Mäder. Aufnahme Flugplatz Dübendorf vom 10. März 1930 (mittl. Tagesabfluss 54,5 m³/sec).

Ist eine Laufverkürzung zu berücksichtigen, so rückt dadurch der Fixpunkt S gegenüber der zu korrigierenden Flusstrecke um das Verkürzungsmass ΔL nach oben, also nach S'. Dabei ist es für das Grundmass der Sohlensenkung gleichgültig, wo die Durchstiche liegen, das Gesamtmass der durch sie bedingten Laufverkürzung ist stets von S aus aufzutragen.[6]) Es fragt sich dann, wie das Normalprofil auszugestalten sei, damit das definitive Längsprofil im Gleichgewichtszustand entweder etwas tiefer als A-B, nämlich durch die Punkte A'''-B'''-S' verlaufe, oder gerade mit A-B zusammenfalle, gemäss der Linie A-B-S'. Auch die eventuelle Vertiefung der Musterstrecke von A-B nach A'''-B''' kann auf deren Geschiebeführung *auf die Dauer* keinen Einfluss ausüben.

Damit ist der Berechnungsgang beschrieben, es bedarf aber noch der Untersuchung einiger Einzelfragen.

2. *Geschiebeabrieb.* Es soll also angenommen werden, dass in Abb. 12 für die Strecke A-B, bzw. A''-B'', bzw. A'''-B''' die Geschiebefracht bekannt sei, ebenso der massgebende Korndurchmesser des Geschiebes. Nunmehr ist der *Geschiebeabrieb* zu berücksichtigen, der heute allgemein auf Grund des Sternberg'schen Abriebgesetzes[7]) berechnet wird:

$$P = P_0 \, e^{-cx} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (38)$$

Darin bedeuten:

P_0 das Gewicht eines Geschiebestückes an einer gegebenen Stelle des Flusses,

x den Weg, den dieses Geschiebe zurücklegt,

P das Gewicht des selben Geschiebes nach Durchlaufen des Weges x,

c den Abriebskoeffizienten in km^{-1}, abhängig von der petrographischen Beschaffenheit des Geschiebes.

Betrachtet man die Geschiebefracht als die Summe aller Einzelgeschiebe, von denen jedes beim Transport sich nach Gleichung (38) abreibt, so kann man in erster Annäherung auch diese Geschiebefracht als in gleicher Weise vom zurückgelegten Weg abhängig annehmen. Dabei ist zu bedenken, dass die beim Abrieb entstehenden feinen Partikel als sogenannte Sinkstoffe, d. h. schwebend weiterbefördert werden, nicht mehr als Geschiebe, und somit in der Berechnung nicht mehr zu berücksichtigen sind. (Eine Abhängigkeit der Geschiebeführung vom Sinkstoffgehalt des Wassers ist mit den bisherigen Methoden nicht nachweisbar und ist offenbar bei der bis heute möglichen Genauigkeit der Rechnung zu vernachlässigen.) Damit ergibt sich für die Geschiebefrachten im Gleichgewichtszustand und in zwei um die Strecke x von einander entfernten Querprofilen eine der Gleichung (38) analoge Beziehung

$$G = G_0 \, e^{-cx} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (39)$$

Es ist ferner zu berücksichtigen, dass der massgebende Korndurchmesser der Geschiebe sich infolge des Abriebs verringert. Schon im Aufsatz vom Mai 1934 („SBZ") ist der in Betracht gezogene Korndurchmesser als mittlerer Durchmesser des Geschiebes definiert. Da das Geschiebe-Gewicht der dritten Potenz des mittleren Durchmessers proportional ist, geometrisch ähnliche Geschiebe vorausgesetzt, so wird die Abnahme des mittleren Korndurchmessers durch die Formel

$$d = d_0 \, e^{\frac{-cx}{3}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (40)$$

ausgedrückt. Wenn G_0 und d_0 für die Musterstrecke gegeben sind, kann nunmehr, von deren Mitte ausgehend, für jeden Punkt des Flusslaufes bis hinunter nach S bzw. S' die definitive Geschiebefracht G und der zugehörige massgebende Durchmesser d aus den Gleichungen (39) und (40) berechnet werden. Der Verlauf der beiden Werte in Funktion der vom Geschiebe zurückgelegten Weglänge geht aus Abb. 13 (S. 112) hervor. Daraus ergibt sich die zwar selbstverständliche, aber bisher nicht immer genügend berücksichtigte Tatsache, dass im Falle von Laufverkürzungen die Mündungsstrecke ein stärkeres Gefälle aufweist, als bei Beibehaltung der ursprünglichen Flusslänge, ferner die ebenso wichtige Folgerung, dass bei Vornahme von Durchstichen, deren unterer Endpunkt oberhalb S liegt, zwischen diesen beiden Punkten Sohlenerhöhungen zu erwarten sind.[8])

[6]) v. Salis: „Das schweizerische Wasserbauwesen". — Ph. Krapf: „Die Gestaltung geschiebeführender Gewässer hinsichtlich Linienführung und Gefälle".

[7]) „Zeitschrift für Bauwesen" 1875; Ph. Forchheimer: „Hydraulik" 1930; J. Putzinger: „Ausgleichgefälle geschiebeführender Wasserläufe".

[8]) Ph. Krapf (siehe Fussnote 6).

Die Literaturangaben über den Abriebskoeffizienten c sind noch spärlich und mangels systematischer Erhebungen unzuverlässig.[9]) Es handelt sich einmal um die Bestimmung der allmählichen Abnahme des massgebenden Durchmessers durch die Feststellung des Verlaufes der Siebkurven für eine möglichst lange Flusstrecke. Die Gleichungen (39) und (40) setzen geometrisch ähnliche Geschiebe voraus, also auch geometrisch ähnliche Siebkurven. Diese Bedingung scheint sehr angenähert erfüllt zu sein, soweit aus den bisher verfügbaren morphologischen Untersuchungen zu schliessen ist. Solche Untersuchungen sind also in erster Linie erforderlich.

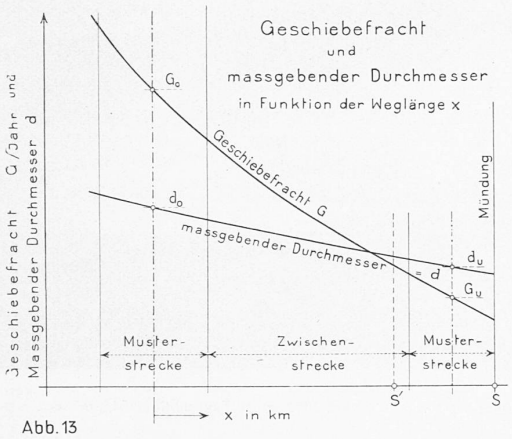


Abb. 13

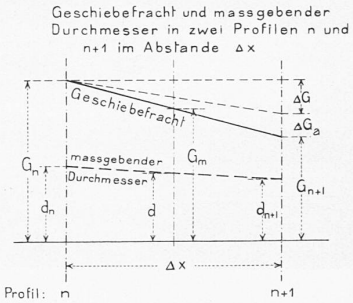


Abb. 14

Eine rechnerische Ueberprüfung des aus den Siebanalysen bestimmten Abriebskoeffizienten ist dann möglich, wenn im zu untersuchenden Flusslauf zwei Musterstrecken vorhanden sind, wobei zwischen beiden Strecken nur die Bedingung erfüllt sein muss, dass kein namhafter geschiebeführender Zufluss vorhanden ist. Im übrigen kann die Zwischenstrecke im Alluvionszustand sein. Für zwei beliebige Querprofile im Abstand Δx besteht zwischen den in beiden Profilen auftretenden Geschiebefrachten eine *Geschiebekontinuitätsgleichung,* die gemäss Abb. 14 wie folgt angeschrieben werden kann:

$$G_{n+1} = G_n \pm \Delta G - \Delta G_a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (41)$$

Hierin bedeuten:

G_n, bzw. G_{n+1} die Geschiebefrachten in den Profilen n bzw. $n+1$, z. B. für ein Jahr,

ΔG das in der Zwischenstrecke Δx in der gleichen Zeit abgetriebene (+) bzw. abgelagerte (—) Geschiebevolumen,

ΔG_a die Verkleinerung der Geschiebefracht durch den Abrieb auf der Strecke Δx.

Ferner kann, wenn Δx nicht zu gross ist, die mittlere Geschiebefracht G_m in der Strecke gesetzt werden:

$$G_m = \frac{G_n + G_{n+1}}{2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (42)$$

Mit Berücksichtigung des Umstandes, dass die Geschiebefracht annähernd der dritten Potenz des massgebenden Durchmessers, der Abrieb der Differenz der dritten Potenz der massgebenden Durchmesser am Anfang und Ende der Strecke proportional ist, kann geschrieben werden:

$$\Delta G_a = G_m \frac{d_n^3 - d_{n+1}^3}{d^3} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (43)$$

Dabei ist auf den Umstand nicht Rücksicht genommen, dass die Abnahme des Korndurchmessers, im Falle einer Zwischenstrecke, die sich im Alluvionszustande befindet, unter Umständen auch durch die Entmischung des Geschiebes, d. h. die Ablagerung vorwiegend grober Geschiebe verursacht sein kann. Gl. (43) und die nachfolgenden gelten, wie schon gesagt, nur unter der ausdrücklichen Voraussetzung, dass die Mischungslinien geometrisch ähnlich bleiben. Ob dies zutrifft, ist im Einzelfalle zu entscheiden.

[9]) Neueste Veröffentlichung hierüber A. Schoklitsch: „Ueber die Verkleinerung der Geschiebe in Flussläufen" (Wien 1933).

Aus den Gleichungen (41), (42) und (43) ergibt sich nach einigen Umformungen:

$$G_{n+1} = \frac{G_n \left(1 - \frac{1}{2} \frac{d_n^3 - d_{n+1}^3}{d^3}\right) \pm \Delta G}{1 + \frac{1}{2} \frac{d_n^3 - d_{n+1}^3}{d^3}} \quad . \quad . \quad (44)$$

und hieraus wird nun annähernd:

$$G_{n+1} = \frac{G_n \left(1 - \frac{3}{2} \frac{\Delta d}{d}\right) \pm \Delta G}{1 + \frac{3}{2} \frac{\Delta d}{d}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (45)$$

Hierin bedeuten:

d den massgebenden Korndurchmesser als Mittel aus der Strecke Δx,

Δd seine Aenderung durch Abrieb auf der Strecke Δx (positiv zu nehmen bei Abnahme des Korndurchmessers).

Nun ergibt sich aber aus Gleichung (40)

$$\Delta d = \frac{c}{3} d \, \Delta x \quad . \quad . \quad (46)$$

(Vorzeichen siehe Bemerkung betr. Δd); damit wird Gl. (45)

$$G_{n+1} = \frac{G_n \left(1 - \frac{c}{2} \Delta x\right) \pm \Delta G}{1 + \frac{c}{2} \Delta x} \quad (47)$$

Ist ΔG klein gegenüber G_n, und $\frac{c}{2} \Delta x$ klein gegenüber 1, so kann Gl. (47) in der einfachern Form geschrieben werden:

$$G_{n+1} = G_n (1 - c \, \Delta x) \pm \Delta G \quad (47a)$$

eine Form, die übrigens aus Gleichung (39) durch Differentiation und Beifügung des Wertes ΔG direkt hervorgeht.

Befinden sich die beiden Musterstrecken in der Entfernung x und ist die Geschiebefracht der obern Strecke G_0, so kann nun mit Hilfe der Gleichung (47) bzw. (47a) von diesem Wert aus schrittweise die Geschiebefracht G_1, G_2 ... G_u berechnet werden, bis man zum Wert G_u der untern Musterstrecke kommt. Die Werte $\pm \Delta G$ sind durch die Profilaufnahmen als bekannt vorauszusetzen. Da die Werte G_0 und G_u mit zugehörigen Werten d_0 und d_u berechnet sind, ist damit der Wert c eigentlich schon bestimmt, nämlich aus Gleichung (40), die nach c aufgelöst wie folgt lautet:

$$c = \frac{3}{x} (ln \, d_0 - ln \, d_u) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (48)$$

Der nach Gleichung (47) erhaltene Wert G_u muss mit dem früher berechneten Wert, der auf Grund des Korndurchmessers d_u aus den Siebanalysen bestimmt wurde, übereinstimmen. Nötigenfalls sind der Wert c und damit die Werte d_0 und d_u, bzw. G_0 und G_u zu korrigieren, bis sowohl das Abriebgesetz (Gleichung (39), als die Geschiebekontinuitätsgleichung (47) erfüllt werden. Die Verhältnisse werden durch Abb. 15 veranschaulicht.

3. *Der Rauhigkeitskoeffizient k.* Der Rauhigkeitskoeffizient k ist abhängig von der relativen Wandrauhigkeit und von der Geschiebeführung. Für die Musterstrecke ist er nach den Gleichungen (14) bezw. (15) gegeben. Die Bestimmung der Werte für die korrigierte Strecke wird nur dann einfach, wenn zwei Musterstrecken vorhanden sind mit verschiedenen Werten G_0 und G_u, bzw. d_0 und d_u. Da man nach Gleichung (47) und Gleichung (40) die entsprechenden Werte von G und d für jeden Punkt zwischen den Musterstrecken kennt, lässt sich daraus der entsprechende k-Wert durch Interpolation aus den gegebenen Werten k_0 und k_u bestimmen. Die Versuchsanstalt für Wasserbau an der E. T. H. wird sich bemühen, aus den im Gange befindlichen Geschiebetrieb-Versuchen die Abhängigkeit des k-Wertes von G und d experimentell zu bestimmen. Wenn dies gelingt, wird das Vorhandensein einer zweiten Musterstrecke zwar immer noch zur Kontrolle erwünscht, aber nicht mehr unerlässlich sein.

4. *Massgebender Querschnitt.* Der massgebende Querschnitt einer bestimmten Flusstrecke bringt die Abweichung der örtlichen Sohlenkonfiguration von der ausgeglichenen Sohlenlage zum Ausdruck. Die Ursache dieser eigentümlichen Erscheinung ist in der Wirkung der *kleinen und mittleren Wasserführungen,* nicht der grossen zu suchen. Sie tritt offenbar überall dort ein, wo die Sohle nicht mit dem Flusse fremden schweren Geschieben abgepflästert ist, die nur durch ganz ausserordentliche Hochwasser (Wildbachausbrüche) bewegt werden. Durch die Bildung schmaler Kolkrinnen werden kleine Wasserstände zusammengehalten und dadurch in die Lage versetzt, Geschiebe zu fördern, was sie nicht im Stande wären, wenn die Sohle bei gleicher Breite zwischen Wuhren horizontal wäre. Dass die Hochwasser diese Erscheinung nicht verursachen, sondern ihr entgegenarbeiten, geht aus den Modellversuchen klar hervor, wo festgestellt werden konnte, dass die Geschiebeführung in diesem Falle in kurzen, über die ganze Breite des Modellgerinnes reichenden Dünen stattfindet.

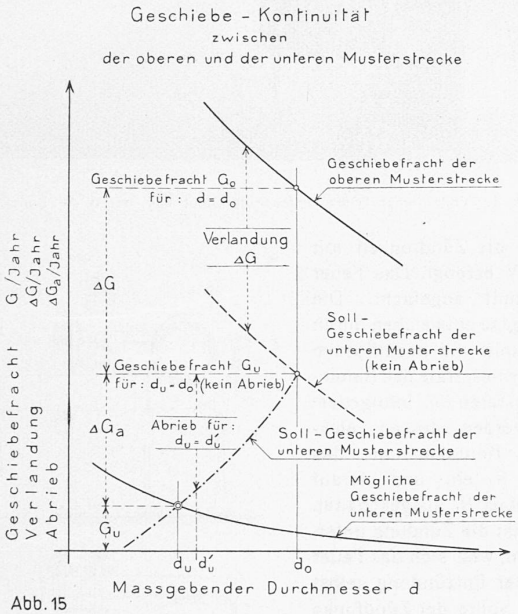


Abb. 15

Doch können bis heute die Bedingungen für die Ausbildung eines vom theoretischen Trapez abweichenden massgebenden Querschnitts noch nicht übersehen werden. Das Quergefälle wird bei gleicher Breite zwischen den Wuhren umso grösser, je grösser der massgebende Durchmesser und je grösser die Geschiebefracht ist; es nimmt also flussabwärts ab.[10]) Von Wichtigkeit ist auch die Abhängigkeit des Quergefälles des massgebenden Querschnittes von der Normalprofilbreite bei gleicher Geschiebefracht und gleichem Korndurchmesser. Diese zwei Fragen sind durch systematische Modellversuche abzuklären. Da es sich um die Bestimmung des massgebenden Querschnittes einerseits in Funktion der Geschiebefracht und des Korndurchmessers bei gegebener Normalprofilbreite, anderseits in Funktion der Normalprofilbreite bei gegebenen Werten der Fracht und des Durchmessers handelt, genügen kurze Modellflusstrecken. Auch wenn solche Versuche noch erforderlich sind, stellt die beschriebene Methode einen Fortschritt dar, denn die Abbildung sehr langer Flusstrecken, die bei der Lösung der Gesamtaufgabe durch Versuche notwendig wäre, ist praktisch unmöglich. Die Methode läuft also auf eine Kombination von Versuchen mit der Rechnung hinaus, wobei die Versuche zur Klärung von Einzelfragen, die Rechnung zur Lösung des Gesamtproblems dient.

[10]) Siehe hierüber auch R. Jasmund; „Fliessende Gewässer". Seite 313 in Gewässerkunde 1. Band, Handbuch der Ingenieurwissenschaften III. Teil, 1923.

Auch hier leistet übrigens das Vorhandensein zweier Musterstrecken im Flusse wesentliche Dienste, weil ein Teil der eben diskutierten Einzelfragen durch sie gelöst werden kann.

SCHLUSSBETRACHTUNGEN.

Sind in der zu korrigierenden Flusstrecke Mündungen von Nebenflüssen vorhanden, so erleidet das Längsprofil eine Diskontinuität, die von der Menge und der Grösse der Geschiebe der Nebenflüsse abhängt. Es ist hier nicht zu umgehen, die Geschiebeführung der letztgenannten getrennt von jener des Hauptflusses zu untersuchen.

Bei konstanter Normalprofilbreite der Korrektionsstrecke ist die Krümmung des Längsprofils, das nach oben konkav ist, einzig durch den Geschiebeabrieb bedingt. Es kann vorkommen, dass die Berechnung bei konstanter Normalprofilbreite ein Längsprofil ergibt, das gegenüber dem der Talsohle zu geringe Krümmung aufweist, was zu starke Sohlenerhöhung in der Nähe des Fixpunktes S (Abb. 12) zur Folge hat. Dieser Fall ist namentlich dann denkbar, wenn die Talsohle durch Auffüllung eines Sees entstanden ist, bevor der Fluss korrigiert war. Sie besteht dann nur aus Sand und Schlick, hat also sehr geringes Längsgefälle. Erst durch die Korrektion werden schwere Geschiebe bis zum Fixpunkt (heutige Seemündung) befördert, die ein sehr erhebliches Gefälle erfordern. Man hat es dann in der Hand, das Längsprofil des Flusses dadurch möglichst gut der Talsohle anzupassen, dass man die Normalprofilbreite allmählich von oben nach unten abnehmen lässt, eine Methode, die, zwar nur auf der Naturbeobachtung beruhend, mit bestem Erfolg bei der Aare zwischen Meiringen und der Brienzersee angewendet wurde.

Gegenüber der von Kreuter[11]) angegebenen Methode zur Berechnung der Normalprofilbreite hat der hier beschriebene Weg offenbar den Vorteil, dass er auf der Anwendung einer Geschiebetrieb-Formel beruht, die durch systematische Versuche in grossen Masstabverhältnissen überprüft ist. Der Kreuter'schen Methode haftet ferner der Mangel an, dass die Querprofilberechnung nur auf der Berücksichtigung bestimmter Wassermengen, nicht aber der mittleren jährlichen Geschiebefracht beruht und dass, infolge der Unmöglichkeit der experimentellen Bestimmung der Abfuhrziffer χ in Formel (1), ein Umweg beschritten werden muss, um diesen Wert mit Hilfe der Musterstrecke zu eliminieren. Sie rechnet ferner mit dem mitteren Trapezprofil und gestattet nicht, den Geschiebeabrieb zu berücksichtigen. Seither ist allerdings die Methode durch verschiedene Autoren etwas verbessert worden, doch bleibt der Nachteil bestehen, dass die Formel von Du Boys durch die Versuche nicht bestätigt wird.

Von grösster Wichtigkeit für jede Projektierarbeit ist die aus den vorliegenden Ausführungen sich von selbst ergebende Folgerung, dass eine Flusskorrektion mit Erfolg nicht für eine kurze Strecke für sich entworfen werden kann, sondern nur im Zusammenhang mit den anliegenden Strecken, bis hinunter zu einem natürlichen Fixpunkt.

Das Problem ist im Prinzip gelöst, heute aber noch nicht in allen Einzelheiten rein rechnerisch zu erfassen; es verlangt für gewisse Fragen noch die Beihilfe von Versuchen und Messungen in der Natur. Bei vereinten Arbeiten in den Laboratorien und in der Natur durch Messungen, die sich bestreben, besonders über die Veränderung des Rauhigkeitsbeiwerts und des Quergefälles des massgebenden Querschnitts in Funktion der Geschiebefracht und des massgebenden Korndurchmessers, sowie auch über den Geschiebeabrieb, Zahlenwerte zu beschaffen, dürfte aber kein Zweifel mehr darüber bestehen, dass die endgültige Lösung nur noch eine Frage der Zeit ist.

Zürich, 20. Dezember 1934.

[11]) Siehe die Fussnote [1]) auf Seite 95 in Nr. 9