

Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 52 (1960)
Heft: 8-10

Artikel: Die Entwicklung der flussbautaulichen Hydraulik
Autor: Müller, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-921761>

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: 19.02.2026

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

6. Ausblick

Mehr als die Hälfte des heute als wirtschaftlich realisierbar betrachteten Ausbaues unserer Wasserkräfte ist nun mit einer im Betrieb befindlichen Ausbaukapazität von rund 19 Milliarden Kilowattstunden erreicht und weitere 20 % derselben stehen im Bau. Bei anhaltender Hochkonjunktur oder wenigstens normaler Beschäftigungslage ist der Vollausbau bereits für die Zeit um 1970/75 zu erwarten.

Als Vollausbau haben wir für diese Untersuchungen eine Energiemenge von 35 Mrd. kWh angenommen, die bereits mit den heute bekannten Projekten, für welche die Wasserrechtsverleihungen vorliegen oder für die sich ernsthafte Bewerber um die Konzession bemühen, erreicht wird. Wir sind uns bewußt, daß noch weitere Möglichkeiten bestehen, die hier nicht eingerechnet wurden, wie beispielsweise verschiedene Erweiterungs- und

Ausbaumöglichkeiten an der Aare, an der Reuß unterhalb Luzern, am vereinigten Rhein oberhalb des Bodensees, und daß auch in der Modernisierung und Leistungserweiterung älterer Werke noch ansehnliche Reserven stecken. Das sog. wirtschaftliche Wasserkraftpotential, dessen Bewertung überall mit fortschreitendem Ausbau bekanntlich steigende Tendenz hat, dürfte demnach im günstigsten Fall noch näher an die 40-Mrd.-kWh-Grenze rücken.

Trotz dieser Aussichten ist es unerläßlich, daß man in Anbetracht des anhaltenden Bedarfszuwachses an elektrischer Energie, auch in der Schweiz bald an den Bau großer thermischer Anlagen schreitet — vorerst mit den herkömmlichen Energieträgern Kohle und Öl, um dann in späterer Zeit einen möglichst günstigen Anschluß an den Bau von Kernenergie-Anlagen zu finden.

Die Entwicklung der flußbaulichen Hydraulik

Prof. Dr. R. Müller, Biel

DK 532.51:627.4

Wir blicken zurück

Die Entwicklung der flußbaulichen Hydraulik in den vergangenen Dezennien verdanken wir

Professor Dr. E. Meyer-Peter.

In den ersten Jahren seiner Lehrtätigkeit als Professor für Wasserbau an der ETH, vor etwa 40 Jahren, waren die Grundlagen der Hydraulik der natürlichen Gerinne mit losen beweglichen Wandungen noch sehr lückenhaft. Einen wertvollen Beitrag bildeten die Studien von Ing. Strickler [1], die ja zur Grundlage unserer Hydraulik wurden. Was jedoch fehlte, das waren zuverlässige Angaben über die Bewegungen der losen Kiessand-Sohlen der natürlichen Gerinne, über die

Geschiebeführung.

Die Auswirkungen der Geschiebeführung waren wohl bekannt, denn die Eintiefungen in den Erosionsgebieten und die Auflandungen in den flacheren Talläufen bildeten seit jeher die Gefahr für die Gebirgsländer, eine Bedrohung, die sich bei Hochwasser zu Katastrophen auswirkt. Mit dem wachsenden Ausbau der Wasserkräfte erwies sich die Geschiebeführung aber auch als ein Hindernis für die Nutzung der Gewässer.

Prof. Meyer-Peter kannte damals die theoretischen Ähnlichkeitsbetrachtungen und die Erfahrungen der ersten wasserbaulichen Versuchsanstalten. Für die Anwendung dieser neuen Untersuchungsmethode auf Vorgänge mit Geschiebebewegung fehlte jedoch der Nachweis der Ähnlichkeit. Andererseits konnte aber nur eine eingehende experimentelle Untersuchung der Geschiebeführung weiterhelfen. Die Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH mußte also verwirklicht werden, und es war ein mutiger Entschluß, die Abklärung der Geschiebeführung gewissermaßen mit der Eröffnung der Versuchsanstalt zu beginnen.

Anfänglich war nur eine Nachbildung dieser Vorgänge in natürlicher Größe möglich. Im großen Meßkanal der Versuchsanstalt führte H. A. Einstein seine systematischen Versuche über den Geschiebetrieb in an-

genähert natürlichen Größen der Variablen durch, der Abflußmengen, Korngrößen und Gefälle. Zur Vereinfachung wurde natürliches Geschiebe auf einheitliche Korngröße ausgesiebt. Die glatten Wände des Meßkanals sicherten wohl angenähert einen zweidimensionalen Vorgang, blieben aber trotzdem bei der Auswertung als hydraulisch «raue» Wände störende Faktoren [2]. Es gelang Einstein die Feststellung und Formulierung einer Gesetzmäßigkeit der Geschiebeführung [3], und er konnte seine Beobachtungen über den Vorgang des Geschiebetransportes später als Wahrscheinlichkeitsproblem darstellen [7].

Kaum hatte diese gut gemeinte Systematik begonnen, so stellte sich der Versuchsanstalt mit dem Problem der Internationalen Rheinregulierung von der Illmündung bis zum Bodensee auch schon die Frage von Modellversuchen, also der verkleinerten Nachbildung der Vorgänge mit natürlicher Mischung des Sohlenmaterials und damit der Ähnlichkeit solcher Vorgänge. Es waren damals für die Versuchsanstalt recht bewegte Jahre. Ing. Bründle mußte vorzeitig mit der Untersuchung des Verhaltens von natürlichen Geschiebemischungen beginnen, und Ing. Hoeck sah sich vor die Unmöglichkeit gestellt, im Rheinmodell natürliches Geschiebe zu verwenden. Die Nachbildung einer genügenden Länge des Rheines bedingte einen so kleinen Maßstab, daß die geometrische Ähnlichkeit des Geschiebes — eine Voraussetzung für hydraulisch ähnliches Verhalten — zu feines Modellgeschiebe mit unnatürlicher Kohäsion bedingt hätte. Der Entschluß war rasch gefaßt; gröberes Modellgeschiebe, dafür spezifisch leichteres, nämlich Brikketgriess zu verwenden, um so, trotz zu grobem Geschiebe, die Beweglichkeit zu gewährleisten. Die Folgen dieser «bösen» Tat waren jedoch beinahe unübersehbar. Mit der Verzerrung der Korngröße wurde die Froudesche Ähnlichkeit verlassen. Es mußten deshalb im Rheinmodell Perioden mehrerer Jahre wiederholt nachgebildet werden, mit Veränderung der Maßstäbe für die

Korngröße und die Zeit. Als einziges Kriterium für die «Ähnlichkeit» blieb der Vergleich der Größe und der Bewegungsgeschwindigkeit der Kiesbänke in Natur und Modell, also auch die volle Dreidimensionalität des Geschiebetriebvorganges. Daß es schließlich gelang, nach jahrelangem dreischichtigem Betrieb des Modells der Natur ähnliche Vorgänge im Modell zu erhalten, ist dem Einsatz der leider so früh verstorbenen Ingenieure Hoeck und Brändle, aber auch ihren jüngeren Helfern zu verdanken. Allerdings waren auch die Früchte entsprechend. Die Variablen des Problems waren viel zahlreicher geworden; Geschiebe verschiedenen spezifischen Gewichtes, Geschiebemischungen, Einfluß der natürlichen Variation der Abflußmengen, Dreidimensionalität des Vorganges.

Wenn die Versuchsanstalt zur Berechnung der Geschiebeführung und der Normalprofilbreite von Gebirgsflüssen [4] und auch zur direkten Lösung des Rheinproblems [5] schon früh beitragen konnte, so war dies nur möglich dank einer parallel geführten theoretisch-rechnerischen Überprüfung aller experimentellen zwei- und dreidimensionalen Untersuchungen. Besonders interessant war auch die theoretische Überprüfung der im Rheinmodell erhaltenen verzerrten Maßstäbe, die schließlich die «Ähnlichkeit» der Geschiebebewegungsvorgänge ergeben hatten. Die daraus entwickelte «Theorie über die Ähnlichkeit bei flußbaulichen Modellversuchen» [8] hat bei allen Untersuchungen über Vorgänge mit beweglichem Sohlenmaterial geholfen. So wurden später in einer zweiten Versuchsserie mit zwei grundrißgetreuen Modellen des Rheins alle Maßstäbe zum voraus berechnet. Es war für die Beteiligten ein unvergeßliches Erlebnis, wie sich, nach Ablauf eines einzigen Modelljahres, aus einer eben eingefüllten Sohle die volle der Natur geometrisch ähnliche Dreidimensionalität, mit wechselweise an den beiden Ufern anliegenden Kiesbänken, selbsttätig ausgebildet hatte. Dabei war das Jahr im Modell nach wenigen Stunden nachgebildet.

Es lagen so über die Geschiebeführung mit der Zeit ganz verschiedenartige Erfahrungen und Gesetzmäßigkeiten vor. Dazu zählen auch die Überprüfungen der wenigen in Natur durchgeführten Geschiebemessungen Dritter [6, 9]. Eine erste Sichtung aller Versuche [10] ergab, daß das Geschiebetriebgesetz 1934 [3] nicht allen Erfahrungen entsprach. Es gelang erst später, nach dem Ordnen und gerichteten Ergänzen mit weiteren Versuchsserien, für alle Versuche eine einheitliche Gesetzmäßigkeit der Geschiebeführung, das Geschiebetriebgesetz [15, 16] zu erkennen. Das Gesetz und dessen Entwicklung wurden dem Internationalen Verband für wasserbauliches Versuchswesen 1948 genau dargestellt [15].

Während dieser Jahrzehnte experimenteller und theoretischer Forschung wurde auch die Methode der praktischen Anwendung verfeinert [4, 10, 11]. Aus Modell- und Naturmessungen mußte geprüft werden, wie das zweidimensional formulierte Gesetz auf die dreidimensionalen natürlichen Gerinne angewendet werden kann. Schließlich mußte zur Behandlung längerer Flußläufe auch das Prinzip der Kontinuität der Geschiebeführung berücksichtigt werden. Kontinuität heißt nicht Konstanz, sondern es muß die natürliche Verkleinerung des Geschiebes mit der Lauflänge, der Abrieb, eingeführt werden.

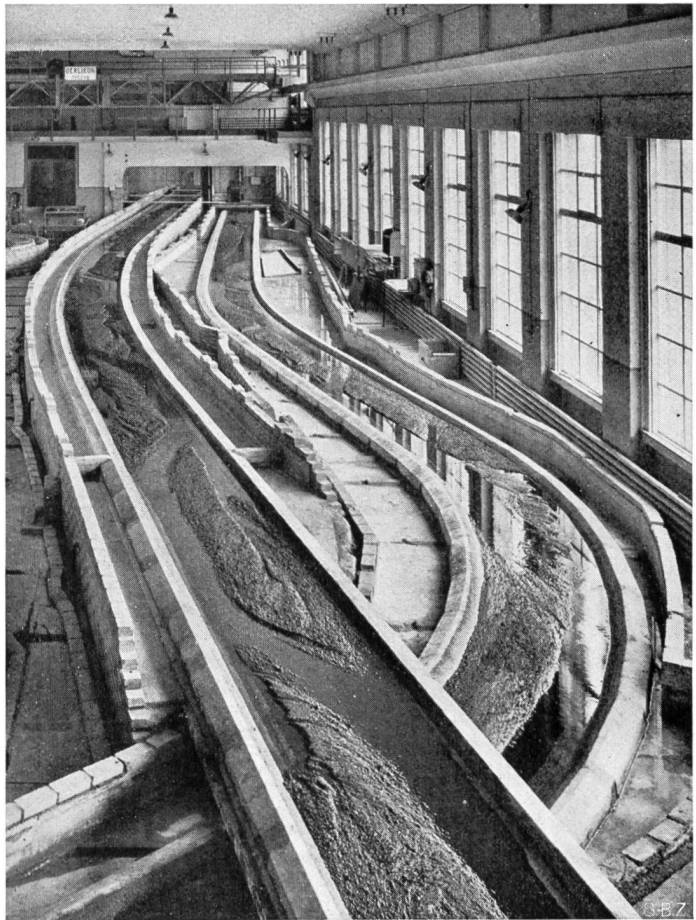


Bild 1 Die zwei grundrißgetreuen Rheinmodelle, 2×60 m hin und zurück, dreidimensionale Kiesbänke; Maßstäbe nach der Ähnlichkeitstheorie [8] gewählt. (Cliché SBZ)

Zu den Erkenntnissen über die Vorgänge in Gerinnen mit beweglichen Sohlen haben auch die weiteren Geschiebeprobleme, welche die Versuchsanstalt für die Praxis in denselben Jahrzehnten zu lösen hatte, beigetragen. Meist standen sie im Zusammenhang mit der Nutzung geschiebeführender Gewässer, mit Wasserfassungen [17, 18]. Auch die vielen systematischen [12 bis 14] und die Einzel-Kolkuntersuchungen haben Steinchen zum Mosaik beigefügt. So kann heute der Modellversuch zuverlässig zur Lösung von Geschiebeproblemen angewendet werden, und zudem ist auch die rechnerische Behandlung der Hydraulik der natürlichen Gerinne mit beweglichen Sohlen möglich.

Der Fluß- und Wildbachverbau, der sich früher nur auf Erfahrungsregeln stützen konnte, wurde so in den vergangenen Dezennien zu einem modelltechnisch und theoretisch erfaßbaren Gebiet des Ingenieurwesens. Trotzdem bleiben selbstverständlich die natürlichen Gegebenheiten richtungweisend. Es wird immer erforderlich sein, zuerst den bestehenden Zustand zu analysieren und aus diesen Grundlagen auf das Neue zu schließen. Die Entwicklung ist einer großen Arbeit Vielen zu verdanken. Sich daran zu erinnern, das ist wohl der Zweck dieser Jubiläumsschrift, und die Erinnerung soll uns begleiten, wenn nun das Geschiebetriebgesetz und Anwendungen im Wildbachverbau und im Flußbau zusammengefaßt dargestellt werden.

Wir betrachten das Erreichte

Wer sich für die folgende Darstellung der Resultate und Anwendungsmöglichkeiten interessiert, der möge beachten, daß unsere Dimensionen

Meter, Tonnen und Sekunden

sind. Die Bezeichnungen sind die in der Hydraulik üblichen, sie sind am Schluß zusammengefaßt. Hier soll speziell darauf hingewiesen werden, daß

- g_s'' der Geschiebetransport pro sec und pro m Breite des Gerinnes ist, unter Wasser gewogen, also in t/m s,
- g ist die Erdbeschleunigung,
- d die nach Gewichtsprozenten gemittelte Korngröße des Geschiebes in m, Kiesbankmischung.
- d_r die nach Gewichtsprozenten gemittelte Korngröße der Sohlenoberfläche in m, angenähert das Grobe des Geschiebes bei 90 Gewichts-% der Kiesbankmischung [10].
- γ_s'' das spez. Gewicht des Geschiebes unter Wasser gewogen ($\gamma_s - 1$) und
- γ das spez. Gewicht des Wassers.

Das Geschiebetransportgesetz

Die erste Zusammenfassung der Versuchsergebnisse [3] ergab für den Transport von Geschiebe natürlichen spez. Gewichtes einheitlicher Korngröße die Gleichung 1934

$$q_s^{2/3} \cdot J = a \cdot d + b \cdot g_s''^{2/3}$$

mit den Konstanten $a = 0,17$ und $b = 0,547$
oder für den Beginn des Geschiebetriebes ($g_s'' = 0$)

$$q_s^{2/3} \cdot J = a \cdot d$$

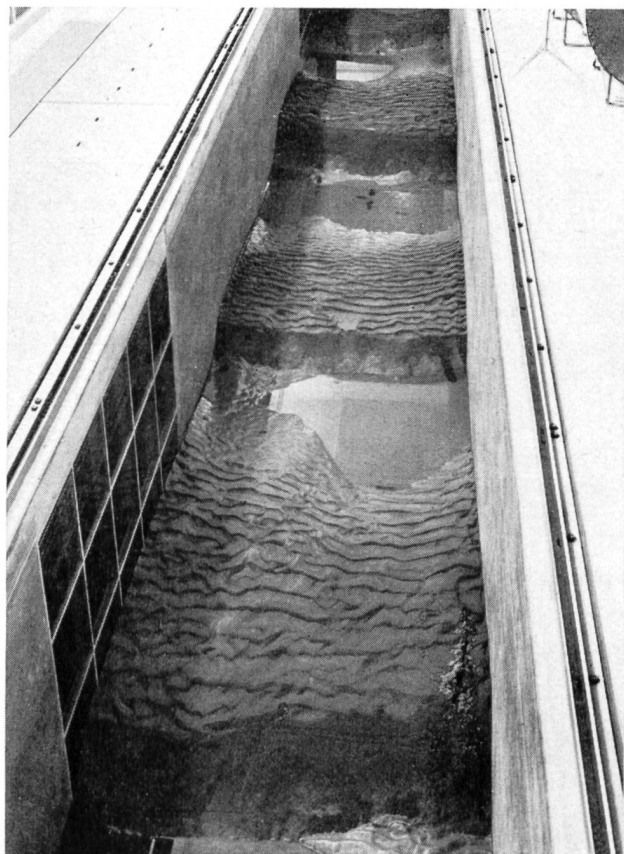


Bild 2 Hohe zweidimensionale Sandbänke, eine extreme Sohlenform
mit $\frac{k_s}{k_r} \approx 0,4$

Es stellte sich später heraus, daß die Versuche noch zu eng im Bereich um die kritische Tiefe

$$h_k = \frac{q_s^{2/3}}{g^{1/3}}, \text{ also mit } q_s^{2/3} = h_k \cdot g^{1/3}$$

durchgeführt wurden, um ein Gesetz von allgemeiner Gültigkeit liefern zu können. Geschrieben als Aussage über den kritischen Bereich $q_s^{2/3} = h_k \cdot g^{1/3}$ hätte die Gleichung auch formuliert werden können

$$\gamma \cdot h_k \cdot J = a' \cdot d + b' \cdot g_s''^{2/3}$$

oder mit der Grenzscheppspannung für den Beginn des Geschiebetriebes

$$\gamma \cdot h_k \cdot J = a' \cdot d$$

Die Gültigkeit der Duboys'schen Scheppspannung (1879)

$$\gamma \cdot h \cdot J$$

als für die Beweglichkeit maßgebende Größe konnte somit nach den Versuchen nicht ausgeschlossen werden. $\gamma \cdot h \cdot J$ bedeutet die treibende Schubspannung des Wassers, beim gleichförmigen Abfluß also die Reibungsspannung, die von der Gerinnesohle dem Abfluß entgegenwirkt. Es mußte daher geprüft werden, ob nicht doch im Sinne der Duboys'schen Vorstellung diese Reibungs- oder Scheppspannung die maßgebende Größe für die Bewegung des Geschiebes sei.

Es brauchte weitere 14 Jahre der Entwicklung, um schließlich zeigen zu können, daß die Gleichung 1934 wohl im Aufbau richtig war, daß aber doch eine Formulierung mit der Scheppspannung als bewegende Größe eine allgemeinere Gültigkeit besitzt. Es ließen sich nämlich alle Versuche [15, 16] mit der Gleichung 1948

$$\gamma \cdot \frac{Q_s}{Q} \cdot \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} \cdot h \cdot J = A'' \cdot \gamma_s'' \cdot d + B'' \cdot \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{1/3} \cdot g_s''^{2/3}$$

mit $A'' = 0,047$ und $B'' = 0,25$ erfassen, für den Beginn des Geschiebetriebes also mit der Grenzbedingung

$$\gamma \cdot \frac{Q_s}{Q} \cdot \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} \cdot h \cdot J = A'' \cdot \gamma_s'' \cdot d$$

Darnach ist allerdings nicht die gesamte Scheppspannung

$$\gamma \cdot h \cdot J$$

maßgebend, sondern für die Beweglichkeit der Sohle ist im allgemeinen nur ein Teil wirksam, indem die Faktoren

$\frac{Q_s}{Q}$ und $\frac{k_s}{k_r}$ meist kleiner als Eins sind.

$\frac{Q_s}{Q}$ bedeutet nämlich das Verhältnis der Abflußmenge, die auf der Sohle abfließt (Q_s) zur totalen im Gerinne abfließenden Wassermenge Q . Ein Teil der totalen Abflußmenge fließt auf den meist festen Wandungen oder Böschungen ab, erzeugt somit keinen Transport. Der Faktor ist demnach im schmalen Gerinne mit großer Wassertiefe kleiner als Eins, kann andererseits im breiten Gerinne mit geringem Wandeinfluß gleich Eins angenommen werden.

Der Faktor $\frac{k_s}{k_r}$ bedeutet andererseits, daß auch bei Formrauigkeiten der beweglichen Sohle, wie sie sich als Schuppen, Riffel oder Kiesbänke natürlich bilden, ein Teil der Scheppspannung $\gamma \cdot h \cdot J$ nicht für den Geschiebetransport verfügbar ist.

$\frac{k_s}{k_r}$ ist nämlich das Verhältnis des nach Strickler definierten Rauigkeitswertes k_s der Sohle, aus

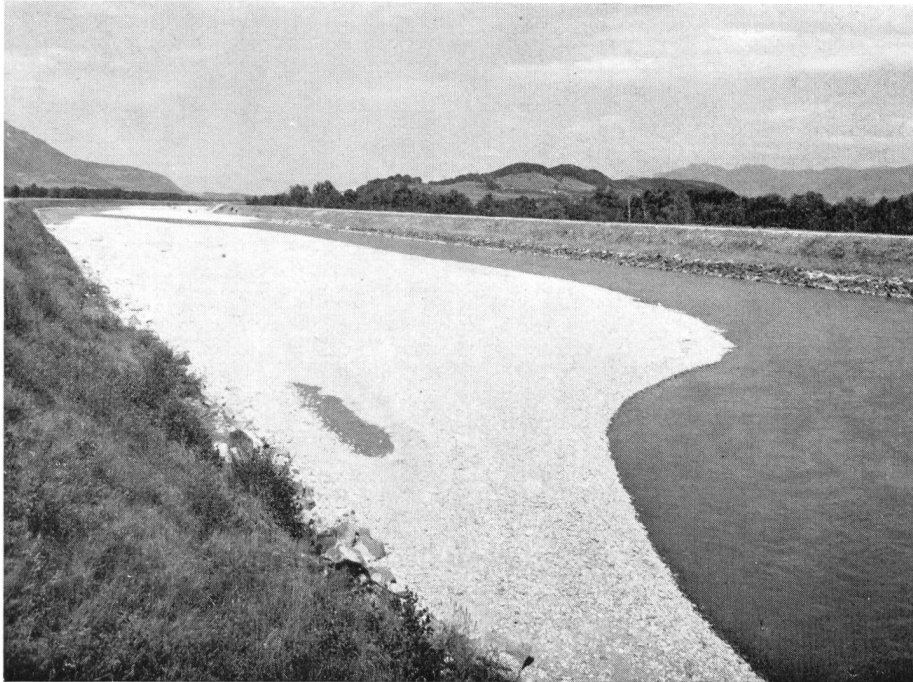


Bild 3
Kiesbänke im Rhein bei Buchs/
SG; Blick flussabwärts, dreidimen-
sionale Wasser- und Geschiebe-
bewegung.

Form und Korn bedingt, zu k_r der reinen Kornrauigkeit bei ebener Sohle, definiert nach Strickler und ermittelt aus den Versuchen über körnige, feste Wandungen bei voll ausgebildeter Turbulenz [10],

$$k_r = \frac{26}{d_r^{1/6}}$$

Strickler hat aus natürlichen Gerinnen mit Kiesbänken und Geschiebetrieb in seinem Ansatz

$$k_s = \frac{c}{d_r^{1/6}} \text{ für } c = 21 \text{ ermittelt.}$$

Näherungsweise beträgt demnach in einem solchen Gerinne mit dreidimensionalen Kiesbänken

$$\frac{k_s}{k_r} = \frac{21}{26} = 0,81 \text{ und } \left(\frac{k_s}{k_r}\right)^{3/2} = 0,73$$

In den Versuchen mit den verschiedensten sich selbsttätig bildenden Sohlenformen betrug der Faktor [15]

$$\frac{k_s}{k_r} = 1 \text{ bei ebener Sohle bis } 0,5 \text{ bei hohen Riffeln.}$$

Es ist also $\frac{k_s}{k_r}$ nur im speziellen Fall gleich Eins, wenn die Sohle eben ist und eben bleibt. Dieser Zustand kommt bei Geschiebetrieb nur selten vor, er ist aber vorhanden, wenn ein Gerinne mit ebener Sohle gebaut und so geschützt wird, daß keine Bewegung des losen Sohlenmaterials erfolgen kann.

Die Schleppspannung ist also nur voll wirksam im breiten Gerinne mit ebener und eben bleibender Sohle. In diesem speziellen Fall lautet das Geschiebetriebsgesetz 1948

$$\gamma \cdot h \cdot J = A'' \cdot \gamma_s'' \cdot d + B'' \cdot \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} \cdot g_s^{2/3}$$

mit dem einfachen, aber besonders wichtigen Grenzfall des Beginns der Beweglichkeit:

$$\gamma \cdot h \cdot J = A'' \cdot \gamma_s'' \cdot d$$

Entstehung und Nachweis des Geschiebetriebsgesetzes 1948 sind in der Veröffentlichung [15] genau dargelegt. Die Konstanten

$$A'' = 0,047 \text{ und } B'' = 0,25$$

entsprechen den hydraulischen Verhältnissen und den Korngrößen d , wie sie in den Gebirgsflüssen vorkommen mit dem reinen Geschiebetrieb auf der Sohle.

Spätere Versuche, die speziell zur Beurteilung von Flüssen mit Sandsohlen durchgeführt wurden, ergaben die Konstanten

$$A'' = 0,047 \text{ und } B'' = 0,22.$$

Die Verkleinerung von B'' bedeutet ein rascheres Größerwerden des Transportes, wenn die Grenzschleppspannung überschritten wird. In diesen Versuchen war auch schon ein im Wasser schwebender Suspensions-transport vorhanden.

Anwendungen im Wildbachverbau

Einen Wildbach verbauen, heißt die Erosion hindern oder verunmöglichen. Das Gerinne soll nicht mehr erodiert, es soll kein Geschiebe mehr transportiert werden. Alle Abflußmengen, auch die Höchstwasser, müssen im Endzustand geschiebelos abfließen können, ohne das Gerinne zu gefährden. Es muß somit im Endzustand für $g_s'' = 0$ dimensioniert sein. Wildbachverbau bedeutet also die klassische Anwendung des Grenzfalles «kein Transport mehr», und damit der Geschiebetriebgleichungen in der Formulierung 1934

$$q^{2/3} \cdot J \leq a \cdot d \text{ mit } a = 0,17$$

oder nach dem allgemeinen Geschiebetriebsgesetz 1948

$$\gamma \cdot \frac{Q_s}{Q} \cdot \left(\frac{k_s}{k_r}\right)^{3/2} \cdot h \cdot J \leq A'' \cdot \gamma_s'' \cdot d \text{ mit } A'' = 0,047$$

Die Bedingungen müssen erfüllt sein beim Abfluß des Höchsthochwassers Q_{\max} , denn in diesem Zustand wird das Bachbett am stärksten beansprucht, vor allem wenn das Höchsthochwasser ohne Geschiebetrieb abfließen soll. Das Wasser hat in diesem geschiebelosen Abflußzustand überall und immer die Tendenz, sich aus der losen Sohle entsprechend dem Transportvermögen zu sättigen.

Wenn vom Verbau des Wildbaches als festes Gerinne abgesehen wird, so gibt es zwei andere klassische Systeme, um ein Gerinne gegen Erosion zu schützen. Die Sohle kann durch einen künstlich eingebrachten losen groben Blockwurf gesichert werden. Die «Korngröße» muß in diesem Fall so gewählt werden, daß das Höchsthochwasser die Steine nicht bewegen kann. Dafür gibt die Gleichung 1934 als erste Näherung

$$d_{\text{erf}} \geq q^{2/3} \cdot \frac{J}{a} \quad \text{oder im Gerinne mit der Sohlenbreite } B \text{ und mit der Nährung} \quad q_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{max}}}{B}$$

$$d_{\text{erf}} \geq \left(\frac{Q_{\text{max}}}{B} \right)^{2/3} \cdot \frac{J}{a} \quad \text{mit } a = 0,17$$

Die zweite Methode besteht darin, das Gerinne durch Sperren abzutrepfen. Zwischen den Sperren bilden sich mit der Zeit die Hinterfüllungen und im Endzustand entsteht ein kleines Ausgleichsgefälle im natürlichen vorhandenen Geschiebe. Maßgebend für die Anordnung der Sperren wird das kleinstmögliche Ausgleichsgefälle J_{min} , das sich bildet, wenn das Höchsthochwasser Q_{max} im Endzustand geschiebelos abfließt. Auch für diesen Zustand liefert die Gleichung 1934 in erster Näherung das maßgebende Ausgleichsgefälle

$$J_{\text{min}} \leq a \cdot d \cdot \left(\frac{B}{Q_{\text{max}}} \right)^{2/3} \quad \text{mit } a = 0,17$$

Die genaueren Lösungen mit Hilfe der Gleichung 1948

$$\gamma \cdot \frac{Q_s}{Q} \cdot \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} \cdot h \cdot J \leq A'' \cdot \gamma_s'' \cdot d$$

ergeben etwas kleinere erforderliche Korngrößen bzw. etwas größere zulässige Ausgleichsgefälle J_{min} . Die Anwendung der Gleichung ist nicht so einfach, weil aus hydraulischen Gründen die Abflußtiefe h abhängig ist von den gesuchten Größen d_{erf} bzw. von J_{min} . Als Vereinfachung kann bei einheitlicher Rauigkeit von Sohle und Böschung für

$$\frac{Q_s}{Q} = \frac{B}{P}$$

gesetzt werden, mit P als benetztem Rauheitsumfang beim Abfluß von Q . Die Geschiebebedingung lautet demnach

$$\gamma \cdot \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} \cdot \frac{h}{P} \cdot B \cdot J \leq A'' \cdot \gamma_s'' \cdot d$$

und speziell für den maßgebenden Abfluß von Q_{max}

$$\gamma \cdot \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{h}{P} \right)_{Q_{\text{max}}} \cdot B \cdot J \leq A'' \cdot \gamma_s'' \cdot d$$

Beim Einbringen einer Pflasterungsschicht bleibt die Sohle eben, somit ist $\left(\frac{k_s}{k_r} \right) = 1$ und es beträgt

$$d_{\text{erf}} \geq \frac{\gamma}{\gamma_s'' \cdot A''} \cdot B \cdot J \cdot \left(\frac{h}{P} \right)_{Q_{\text{max}}} \quad \text{mit } A'' = 0,047$$

$$\text{oder } d_{\text{erf}} \gtrsim 12,5 \cdot B \cdot J \cdot \left(\frac{h}{P} \right)_{Q_{\text{max}}} = f_1 \left(\frac{h}{P} \right)_{Q_{\text{max}}}$$

Zu dieser geschiebetechnischen Bedingung müssen nach der rein hydraulischen Normalabflußbedingung für verschiedene Korngrößen d bzw. $k = \frac{26}{d^{1/6}}$ (Sohle eben, $d_r = d$)

die Werte $\left(\frac{h}{P} \right)_{Q_{\text{max}}}$ bestimmt werden. Diese rein hydraulische Funktion $\left(\frac{h}{P} \right)_{Q_{\text{max}}} = f_2(d)$

liefert zusammen mit der geschiebetechnischen Funktion

$d_{\text{erf}} = f_1 \left(\frac{h}{P} \right)_{Q_{\text{max}}}$ die gemeinsame Lösung und damit die gesuchte erforderliche Korngröße der Pflasterung.

Bei der Abtrepung wird zwischen den Sperren ein natürliches Bachbett mit Form- und Kornrauigkeit entstehen, es beträgt somit

$$\left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} < 1 \cong 0,8$$

Das Ausgleichsgefälle wird demnach etwa ($d = d_r$)

$$J_{\text{min}} \leq \frac{A'' \cdot \gamma_s''}{\gamma \cdot \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2}} \cdot \frac{d_r}{B \cdot \left(\frac{h}{P} \right)_{Q_{\text{max}}}} \quad \text{mit } A'' = 0,047$$

$$\text{oder } J_{\text{min}} \lesssim \frac{1}{10} \cdot \frac{d_r}{B \cdot \left(\frac{h}{P} \right)_{Q_{\text{max}}}} = f_1 \left(\frac{h}{P} \right)_{Q_{\text{max}}}$$

Zu dieser Geschiebebedingung ist die rein hydraulische

Funktion $\left(\frac{h}{P} \right)_{Q_{\text{max}}} = f_2(J)$ zu berücksichtigen, indem für verschiedene Gefälle J die $\left(\frac{h}{P} \right)_{Q_{\text{max}}}$ -Werte für Nor-

malabfluß mit $k \cong \frac{22}{d_r^{1/6}}$ berechnet werden. Die beiden

Funktionen liefern zusammen als gemeinsame Lösung J_{min} das Ausgleichsgefälle.

Bei der praktischen Anwendung stellen sich Ermessensfragen. Die Breite B ist zu schätzen auf der Höhe der zukünftigen abgetreppten Sohle. Die Steingröße d_r ist die nach Gewichtsprozenten gemittelte Korngröße der zukünftigen Ausgleichssohle nach der Verlandung der Sperren. Sie dürfte etwa übereinstimmen mit der mittleren Korngröße der Oberfläche des bestehenden Bachlaufes, denn bis zum Endzustand des gesicherten Baches wird die Sohle zwischen den Sperren zeitweise über J_{min} verlanden, später wieder erodieren.

Es muß noch darauf hingewiesen werden, daß bei steilen Sperrentreppen das Ausgleichsgefälle $J_{\text{min}} = 0$ vernachlässigt werden kann. Der Sperrenabstand muß dann mindestens so groß gewählt werden, daß eine gute Energievernichtung zwischen den Sperren stattfindet. Nach den systematischen Versuchen der Versuchsanstalt über Absturzbauwerke, Kolkprobleme und Kolkformen [12, 13, 14] sollte der Sperrenabstand L , als erforderliche Tosbeckenlänge betrachtet,

$$L \gtrsim 4 \cdot h_{k \text{ max}}^{3/2} \cdot A^{1/2}$$

betragen, mit $h_{k \text{ max}}$ als kritische Tiefe über der Sperrenkrone beim Abfluß von Q_{max} und A als Absturzhöhe. Diese Bedingung kann bei sehr steilem vorhandenem Gefälle $J_{\text{vorh.}}$ die Mindest-Absturzhöhe der Sperren vorschreiben

$$A \gtrsim 16 \cdot J_{\text{vorh.}}^2 \cdot h_{k \text{ max}}^3$$

Die Absturzhöhe kann sonst frei gewählt werden, es sollte aber die vollständige Belüftung des überfallenden Strahles auch bei Höchsthochwasser gewährleistet sein. Auch der Kolkchutz am Fuß der Sperren kann nach den Kolkversuchen [13] beurteilt werden.

Das für die Dimensionierung maßgebende Höchsthochwasser wird immer nur angenähert gegeben sein. Es sind in den Wildbächen die Gewitterregen, die während weniger Stunden die Abflußspitzen erzeugen. Als



Bilder 4 und 5 Sihl bei Studen vor und nach der Verbauung; Blick vom Geschiebesammler flussabwärts, Blockwurf-Pflasterung der Sohle entsprechend dem geschiebelosen Abfluß unterhalb des Sammlers. (Photo Schmid O. B. I.)

Größenordnung kann in unseren Verhältnissen etwa mit [10, 19]

$$Q_{\max} \cong \psi_0 \cdot 40 \cdot F_e^{2/3}$$

F_e Einzugsgebiet in km^2 , Q_{\max} in m^3/sec

gerechnet werden, mit $\psi_0 = 1$ als Höchstfaktor, im Mittel $\psi_0 \cong 0,4$ bzw.

beim steilen und glatten Einzugsgebiet 0,4 bis 0,6
beim flacheren oder bewaldeten

Einzugsgebiet 0,2 bis 0,4

Das Eidg. Oberbauinspektorat hat eine sehr schöne Zusammenstellung der beobachteten Höchstwasser Q_{\max} veröffentlicht [20].

Das Geschiebetransportgesetz kann auch zur angenähernten Bestimmung der erforderlichen Größe von Geschiebesammlern verwendet werden. Die Berechnung des Geschiebetriebes für Q_{\max} und mit der für die Bildung dieser Abflußmenge erforderlichen Regendauer extremster Intensität, bei 0,4 m/s Zusammenfließgeschwindigkeit im Einzugsgebiet etwa die Zeit

$$T = \frac{10^3 \cdot F_e^{1/2}}{0,4} \text{ in sec}$$

dürfte wenigstens einen Anhaltspunkt ergeben. Diese berechnete Menge entspricht allerdings nur dem einmaligen Schub eines Höchsthochwassers, sie setzt also die jeweilige sofortige Entleerung des Geschiebesammlers voraus.

Wildbachverbauungen sind Schutzbauten; dafür ist nur das Beste gut genug, denn ein Schutz muß vollkommen sein, sonst erhöht er die Gefahr. Die rechnerischen Grundlagen können daher allein nicht genügen, sie müssen durch genaue Beobachtungen überprüft werden, denn jedes Tal hat seinen Charakter, und das Schöne der Aufgabe besteht im Eingabeln der Lösung mit Hilfe der Beobachtungen und der Berechnungen.

Für die dargestellten Beziehungen nach der Bedingung $g_s'' = 0$ ist auch ein großes Anwendungsgebiet gegeben für alle Arten von Kanälen, die ohne feste Wandungen nur für den Wasserabfluß ohne Geschiebe dimensioniert werden müssen. Es wird die gleiche Bedingung zu erfüllen sein, daß sich nämlich bei größter Wasserführung der Kanäle die Sohle und die Böschungen nicht verändern oder bewegen.

Anwendungen im Flußbau

Auch in den Flüssen sind die Höchsthochwasser für die Sicherheit maßgebend. Im Unterschied zu den Wild-

bächen ist jedoch die Wasserführung der Flüsse viel ausgeglichener, so daß die Geschiebeführung schon bei den kleineren Abflußmengen beginnt und die maßgebenden Gerinneveränderungen, Abtrag oder Auflandungen von den häufigen mittleren Abflußmengen mit ihrer langen Dauer bewirkt werden. Die zeitlich kurzen Höchsthochwasser finden dann die durch die mittleren Abflußmengen veränderten Gerinne vor, ihr Abflußvorgang richtet sich hydraulisch nach diesen von den mittleren Abflußmengen geschaffenen Gegebenheiten. Nicht die Höchsthochwasser sind geschiebetechnisch gefährlich, sondern die häufigeren mittleren und größeren Abflußmengen schaffen in den Flüssen durch Auflandungen und Erosionen die Gefahr.

Im Flußbau ist also die Summenwirkung aller Abflußmengen zu bestimmen; maßgebend werden die Geschiebefrachten, etwa die mittleren jährlichen Frachten. Es müssen deshalb in den Flüssen zu den Abflußmengenkurven $Q = f(h)$ die Geschiebemengenkurven $G = f(h)$ und damit die Geschiebefunktionen $G = f(Q)$ berechnet werden. Entsprechend der mittleren jährlichen Dauerkurve der Abflußmengen muß die mittlere jährliche Dauerkurve der Geschiebemengen und daraus die mittlere jährliche Geschiebefracht G_f bestimmt werden.

Flußbauliche Probleme werden sich stellen, wenn ein Flußlauf Teilstrecken mit ungleichem Transportvermögen aufweist, so daß keine Kontinuität der Geschiebeführung mit der Lauflänge besteht. Teilstrecken mit zu kleinem Transportvermögen werden zu Auflandungen führen, solche mit zu großem Transportvermögen sich aus der Sohle sättigen, also Erosionen bewirken. Diskontinuitäten können andererseits auch natürlich durch Seitenzuflüsse bedingt sein, mit unmittelbarer Änderung der Wasser- und der Geschiebefracht und auch der Korngröße im Hauptlauf. Typische Folgen geschiebeführender Seitenzuflüsse sind die steileren Rampen in den Längsprofilen der Flußläufe. Auch die Nutzung der Gewässer kann solche Änderungen bedingen.

In Strecken ohne Seitenzuflüsse äußert sich die Kontinuität der Wasserführung in der Gleichheit der Dauerkurve der Abflußmengen an jedem Ort des Laufes. Müßte als Geschiebekontinuität auch die Gleichheit der Geschiebefracht an jedem Ort vorausgesetzt werden, so würde dies bei konstanter Profilbreite nach dem Geschiebetransportgesetz auch die Konstanz des

Gefälles bedingen. Das Geschiebe erfährt aber beim Transport eine natürliche Verkleinerung, den *Abrieb*. Das abgeriebene Material geht in Suspension über und entsprechend vermindert sich mit der Lauflänge die als Geschiebeführung bezeichnete, auf der Sohle transportierte Fracht und deren Korngröße. Gleichheit der Wasserführung und der Profilbreite und Kontinuität der Geschiebeführung haben also wegen des Abriebes mit der Lauflänge die bekannte Abnahme des erforderlichen Gefälles flussabwärts zur Folge.

Der *Abrieb* ist groß. Formuliert nach Sternberg, führt er zu einer Verminderung der Geschiebefracht auf der Lauflänge x (km) von

$$G_{Fx} = G_{F0} \cdot e^{-c \cdot x}$$

und entsprechend auf eine Verminderung der Korngröße

$$d_x = d_0 \cdot e^{-\frac{c}{3} \cdot x}$$

mit dem Abrieffkoeffizient $c = 0,02$ bis $0,05 \text{ km}^{-1}$. Das Abriegesetz ist also die Bedingung der Kontinuität der Geschiebeführung.

Frachtverminderung und Verfeinerung infolge des Abriebes sind damit entscheidende Faktoren bei flussbaulichen Problemen. Es muß bei der Behandlung längerer Flußstrecken durch sehr viele Geschiebeanalysen die Geschiebegröße und deren Abnahme mit der Lauflänge und damit der Sternbergsche Abrieffkoeffizient c aus der Natur ermittelt werden.

Es wird bei den eigentlichen flussbaulichen Aufgaben über längere Flußstrecken die Kontinuität der Wasser- und der Geschiebeführung erreicht werden müssen. Nach ihr sind an jedem Ort die zu transportierenden Geschiebefrachten gegeben, und es ist das passende Wertepaar von Profilbreite und Gefälle für den Transport dieser Frachten zu bestimmen.

Die Berechnung der Geschiebefracht bildet also die Grundlage zur Lösung flussbaulicher Probleme. Sie erfolgt zweckmäßig für eine oder mehrere Beharrungs- oder Musterstrecken des zu behandelnden Flußlaufes. Die Ergänzung mit den beobachteten mittleren jährlichen Auflandungen oder Erosionen der Nachbarstrecken und die Berücksichtigung des Abriebes werden die Geschiebeverhältnisse des bestehenden Zustandes quantitativ erkennen lassen. Es handelt sich hier also vor allem darum, noch zu zeigen, wie das zweidimensional formulierte Geschiebetriebesetz auf eine Musterstrecke anzuwenden ist.

Im seltenen Fall einer Musterstrecke mit zweidimensionalen Schuppen oder Bänken ist die Sohle im Querprofil horizontal. Für das Gefälle J und die nach Gewichtsprozenten gemittelte Korngröße d des Geschiebes liefert das Geschiebetriebesetz für jede Tiefe h

$$\gamma \cdot \frac{Q_s}{Q} \cdot \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} \cdot h \cdot J = A'' \cdot \gamma_s'' \cdot d + B'' \cdot \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{1/3} \cdot g_s''^{2/3}$$

den sekundlichen Transport g_s'' pro m Sohlenbreite, und der sekundliche Geschiebetrieb über die Sohlenbreite B beträgt

$$G = g_s'' \cdot B$$

Die Berechnung dieses Transportes für verschiedene Abflusstiefen, also auch entsprechende Abflußmengen, ergibt die Geschiebefunktion

$$G = f(Q)$$

und mit der mittleren jährlichen Dauerkurve der Abflußmengen ist auch die mittlere jährliche Fracht gegeben.

Zur Berechnung des Transportes g_s'' müssen allerdings die Faktoren $\frac{Q_s}{Q}$ und $\frac{k_s}{k_r}$ in Funktion von h bekannt sein. Von den vier Größen ist

$$k_r = \frac{26}{d_r^{1/6}}$$

eine Konstante. Q ist aus der Abflußmengenkurve in $f(h)$ gegeben. Es bleiben also Q_s und k_s in $f(h)$ zu bestimmende Größen. Mit der vereinfachten Annahme gleicher Rauigkeit von Sohle und Böschungen beträgt

$$\frac{Q_s}{Q} = \frac{B}{P}$$

und ist damit in $f(h)$ gegeben. Für k_s kann bei angenähert ebener Sohle der aus der Abflußmengenkurve berechnete mittlere Stricklersche k_m -Wert verwendet werden.

In schmalen Gerinnen mit verschiedener Rauigkeit von Böschung und Sohle muß der Rauigkeitswert der Böschungen k_w geschätzt werden. Die gesuchten Größen k_s und Q_s sind dann unter der Annahme gleicher mittlerer Geschwindigkeit für den «Wand»- und den Sohlenabfluß in $f(h)$ bestimmbar [16].

Im normalen Fall einer Musterstrecke mit dreidimensionalen Kiesbänken muß zunächst das maßgebende Profil bestimmt werden. Die Auswertung der dreidimensionalen Modellversuche hat gezeigt, daß es nicht genügt, eine gemittelte, im Querprofil horizontale Sohle einzuführen. Wir haben aus den Versuchen das maßgebende Profil als hypsographische Kurve der Sohlenkonfiguration, bezogen auf eine im mittleren Sohlengefälle geneigte Ebene definiert. Dieses maßgebende Querprofil ergibt, symmetrisch zur Flußaxe aufgezeichnet, eine von der Mitte gegen die Ufer steigende Sohle. Näherungsweise steigt im maßgebenden Querprofil die Sohle von der Mitte, gegeben durch die mittlere Höhe des Talweges, gegen beide Ufer linear auf die mittlere Höhe der Kiesbankrücken auf. Die Höhendifferenz der Sohle zwischen Flußmitte und den Ufern entspricht somit etwa der mittleren Höhe der Kiesbänke. Die Anwendung des Geschiebetriebesetzes muß daher streifenweise erfolgen, indem für jeden Wasserstand die Integration über die Breite mit variabler Tiefe durchzuführen ist.

Auch hier muß wieder auf die Bestimmung der Faktoren $\frac{Q_s}{Q}$ und $\frac{k_s}{k_r}$ in Abhängigkeit des Wasserstandes

hingewiesen werden. k_r bleibt eine Konstante. $\frac{Q_s}{Q}$ kann

bei der streifenweisen Anwendung der Geschiebetriebgleichung gleich Eins angenommen werden, der Böschungsabzug erfolgt, indem auf der Böschung kein Transport gerechnet wird. Es bleibt somit nur k_s als in Abhängigkeit vom Wasserstand zu bestimmende Größe. Wir haben bei der streifenweisen Anwendung des Geschiebetriebesetzes auch das Stricklersche Gesetz streifenweise angewendet:

$$v = k \cdot h^{2/3} \cdot J^{1/2}$$

$$q = k \cdot h^{5/3} \cdot J^{1/2}$$

$$\text{und definiert } Q = k_s \cdot J^{1/2} \cdot \int \frac{h^{5/3}}{\text{Breite}} \cdot dB$$



Die ungebändigte Kraft der Wildbäche zerstört immer wieder Verkehrswege, Brücken und Heimwesen;
Val Roseg nach dem Hochwasser 1954 — im Hintergrund Sella-Glückschart-Gruppe (Photo G. A. Töndury)

Der so definierte k_s -Wert ist eine Funktion von Q und verschieden vom mittleren k_m -Wert bei der Betrachtung des Gesamtprofils als Ganzes, denn es ist eine bestimmte Geschwindigkeitsverteilung über das maßgebende Profil angenommen. Aus der gegebenen Abflußmengenkurve und der Lage und Form des maßgebenden Profils ist für jeden Wasserstand das Integral

$$\int \frac{h^{3/2}}{\text{Breite}} \cdot dB$$

gegeben. Somit sind auch k_s und $\frac{k_r}{k_s}$ für jede Spiegel-lage oder Abflußmenge gegeben.

Auch zur Lösung solch dreidimensionaler flußbaulicher Aufgaben sind also die Richtlinien bekannt. Nur die rechnerische Überprüfung eines gegebenen Zustandes kann jedoch zuverlässige Grundlagen liefern für Veränderungen, die an den gegebenen Verhältnissen vorgenommen werden sollen. Für vollständig neu zu bauende Flußstrecken mit Geschiebetrieb sind die Grundlagen aus obern Flußstrecken oder aus andern Naturbeispielen zu ermitteln, denn die Sohlenform beeinflusst den Geschiebetransport, sie bildet sich selbsttätig aus und kann nur aus ähnlichen Verhältnissen zum voraus beurteilt werden.

Abschließende Bemerkungen

Ich habe versucht, die flußbaulichen Grundlagen darzulegen, wie sie seit der Gründung der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH in den vergangenen Dezennien entwickelt wurden. Nach Stimmen und aus flußbaulichen Arbeiten im Ausland kann gesagt werden, daß sich diese Grundlagen bestätigten. Es gibt keine andere durch so eingehende Untersuchungen begründete Methode zur Behandlung der Probleme der Hydraulik von Gerinnen mit beweglicher Sohle.

Sind wir weiter gekommen als die Ingenieure des vergangenen Jahrhunderts mit ihren gut gelungenen Korrekturen? Auch sie haben damals durch sorgfältigste Beobachtung des bestehenden Zustandes die Lösungen gefunden. Dieses Vorgehen bleibt uns auch heute nicht erspart, denn die natürlichen Gerinne sind zu verschieden. Wir haben aber das Bestehen einer allen Bächen und Flüssen gemeinsamen Gesetzmäßigkeit der Geschiebeführung nachgewiesen und können so quanti-

tativ die zweckmäßigsten Lösungen mit größerer Sicherheit und rascher überblicken. Die Möglichkeit grober Fehler ist ausgeschlossen, und es kann jeder, dem die theoretischen Grundlagen vertraut sind, die Vorgänge in der Natur verstehen und sie zweckentsprechend beeinflussen.

Die Darstellungen beleuchten aber auch eine experimentelle und theoretische Forschungsarbeit, die in den vergangenen Dezennien an der Versuchsanstalt geleistet wurde. Mit großem Einsatz sind wir auf einem kleinen Zweig dazu gelangt, die Vorgänge in der Natur etwas besser zu verstehen. Auch dieser Zweig hat aber seine Bedeutung, dient er doch dazu, Sicherheit und Wohlergehen zu schaffen und zu erhalten.

Bezeichnungen

B, P, J	Sohlenbreite, benetzter Rauheitsumfang und Gefälle des Gerinnes
h, h_k	Wassertiefe und kritische Tiefe
Q, Q_s	Gesamtabflußmenge und «Abfluß auf der Sohle» in m^3/s
q	der spez. Abfluß pro m Sohlenbreite, also $m^3/s \cdot m$
k_m, k_s, k_r, k_w	Rauheitswerte nach Strickler, $m^{1/2}/s$
c	Konstante im Stricklerschen Ansatz über den Rauheitswert, $m^{1/2}/s$ auch Abriebkoeffizient nach Sternberg (km^{-1})
G	der sekundliche Geschiebetrieb im Profil über die ganze Breite in t/s
G_F	die mittlere jährliche Geschiebefracht, $t/Jahr$

Für die Umrechnung der unter Wasser gewogenen Geschiebemengen gilt:

trocken gewogen:

$$\frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \cdot g_s'', \text{ normales Geschiebe} \sim 1,6 \cdot g_s''$$

volumetrisch (m^3):

mit Porenvolumen n und Raumgewicht $(1-n) \cdot \gamma_s$,

$$\frac{1}{(\gamma_s - 1)(1 - n)} \cdot g_s'', \text{ normales Geschiebe} \sim 0,85 \cdot g_s''$$

Literaturverzeichnis

- [1] 1923 Strickler — «Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen», Mitteilung Nr. 16 des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft, Bern.
- [2] 1934 Einstein — «Der hydraulische oder Profilradius», SBZ, Band 103, Nr. 8.
- [3] 1934 Meyer-Peter, Favre, Einstein — «Neuere Versuchsergebnisse über den Geschiebetrieb», SBZ, Band 103, Nr. 13.
- [4] 1935 Meyer-Peter, Favre, Müller — «Beitrag zur Berechnung der Geschiebeführung und der Normalprofilbreite von Gebirgsflüssen», SBZ, Band 105, Nr. 9 und 10.
- [5] 1937 Meyer-Peter, Hoeck, Müller — «Beitrag der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH, Zürich, zur Lösung des Rheinproblems», SBZ, Band 109, Nr. 17 und 18.
- [6] 1937 Müller — «Überprüfung des Geschiebetriebgesetzes und der Berechnungsmethode der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH mit Hilfe der direkten Geschiebemessungen am Rhein», SBZ, Band 110, Nr. 12 bis 15.
- [7] 1937 Einstein, Polya — «Der Geschiebetrieb als Wahrscheinlichkeitsproblem», «Zur Kinematik der Geschiebebewegung», Rascher & Co., Zürich.
- [8] 1939 Einstein, Müller — «Über die Ähnlichkeit bei flußbaulichen Modellversuchen», Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, Band 5, Nr. 8.
- [9] 1939 Eidg. Amt für Wasserwirtschaft — «Untersuchungen in der Natur über Bettbildung, Geschiebe- und Schwebstoff-führung», Mitteilung Nr. 33.
- [10] 1943 Müller — «Theoretische Grundlagen der Fluß- und Wildbachverbauungen», Mitteilung Nr. 4 Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH.
- [11] 1944 Müller — «Über einige Grundlagen der Fluß- und Wildbachverbauung», Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen, Nr. 1.
- [12] 1944 Eggenberger, Müller — «Experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Kolkproblem», Eggenberger — «Kolkbildung bei Überfall und Unterströmen», Müller — «Die Kolkbildung beim reinen Unterströmen und allgemeinere Behandlung des Kolkproblems», Mitteilung Nr. 5 der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH.

- [13] 1946 Müller — «Über die hydraulische Dimensionierung von Absturzbauwerken» und «Flußbauliches über die Maggia», Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen, Jg. 97, Nr. 1, 2 und 7.
- [14] 1948 Meyer-Peter, Müller — «Affouillements en aval des barrages», Internationaler Verband für Wasserbauliches Versuchswesen, Zweite Tagung, Stockholm, 7.—9. VI. 1948.
- [15] 1948 Meyer-Peter, Müller — «Formular for Bed-Load Transport», Internationaler Verband für Wasserbauliches Versuchswesen, Zweite Tagung, Stockholm, 7.—9. VI. 1948.
- [16] 1949 Meyer-Peter, Müller — «Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes», SBZ, Band 67, Nr. 3.
- [17] 1953 Müller — «Flußbauliche Studien an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH», SBZ, 71. Jg., Nr. 8.
- [18] 1955 Müller — «Wasserfassungen an geschiebeführenden Flüssen», Wasser- und Energiewirtschaft, Sonderheft zur Jahrhundertfeier der ETH, Nr. 9 bis 11.
- [19] 1957 Müller — «Generelle Beurteilung der flußbaulichen Verhältnisse im Einzugsgebiet des Inn oberhalb S-chanf», Wasser- und Energiewirtschaft, Nr. 6.
- [20] 1958 Eidg. Oberbauinspektorat — «Die größten bis zum Jahre 1956 beobachteten Abflußmengen von schweizerischen Gewässern», Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.

Aperçu rétrospectif des corrections exécutées sur nos cours d'eau

Par l'ingénieur A. Jaccard, sous-directeur,
et ingénieur W. Schmid, adjoint du service fédéral des routes et des digues

DK 627.4

Depuis très longtemps, l'homme cherche à protéger ses terres et ses habitations contre la furie des eaux en exécutant des travaux d'endiguement. En Suisse, les populations ont établi, il y a des siècles déjà, de telles protections sur quantité de cours d'eau. Mais ces tentatives fort méritoires — si l'on songe qu'autrefois notre pays était peu peuplé et que ses ressources étaient modestes — n'apportaient souvent pas à leurs auteurs le bénéfice escompté. En effet, les intéressés se contentaient trop souvent d'ériger leurs ouvrages sur les sections fluviales limitrophes de leurs propriétés. Il en résultait une succession de protections locales non coordonnées entre elles. Des inondations désastreuses en résultaient fréquemment.

La première correction fluviale systématique exécutée dans notre pays fut sans doute celle de la Kander. Cette rivière se jetait dans l'Aar à 3 km de Thoune; ses débordements causaient à tout moment des ravages dans la plaine de l'Allmend. Au XVIII^e siècle, le gouvernement bernois fit détourner son cours dans le lac de Thoune, réalisant ainsi une œuvre de grande utilité publique.

La correction de la Linth, entreprise en 1807 sur une décision prise deux ans plus tôt par la Diète fédérale, fut à peu près du même type. Elle consista à dériver la rivière dans le lac de Walenstadt où elle put dès lors déposer ses alluvions, puis à la diriger en ligne directe de ce lac vers celui de Zurich. Cette première étape, terminée en 1816, apporta un énorme soulagement à la population de la vallée, dont les propriétés étaient auparavant submergées à tout moment. Les travaux furent poursuivis par la suite. Leur début est intéressant parce qu'il porte sur la première grande œuvre entreprise sur la base de la solidarité confédérale.

La Constitution de 1848 — dont l'article 21 (devenu en 1874 l'article 23) autorise la Confédération à ordonner à ses frais ou à encourager par ses subsides «les travaux publics qui intéressent la Suisse ou une partie considérable du pays» — procura aux pouvoirs fédéraux la possibilité d'intervenir plus fréquemment pour faciliter l'exécution de plusieurs corrections fluviales importantes, parmi lesquelles nous citons celles du Rhin saint-gallois, du Rhône en Valais et des eaux du Jura. La correction de la Reuss, entre Attinghausen et le lac des Quatre-Cantons, représente un cas spécial intéressant; elle fut en effet exécutée entre 1850 et 1855, sur l'initiative et avec l'aide d'une société suisse d'utilité

publique, par les autorités locales; à partir de 1888 cependant, le canton d'Uri, secondé par la Confédération, compléta ces travaux.

L'article 24 de la Constitution de 1874, qui donne à la Confédération le droit de haute surveillance sur les endiguements, puis la loi sur la police des eaux du 22 juin 1877, lui permirent d'apporter régulièrement son aide technique et financière aux travaux de correction dignes de son intérêt. C'est à ce moment précisément que fut créée l'Inspection fédérale des travaux publics (qui, depuis juin 1960, se dénomme Service fédéral des routes et des digues). Sous ce régime légal, plusieurs grandes corrections furent réalisées au siècle dernier, notamment celles de l'Aar, de la Limmat, du Tessin, de l'Orbe, de la Glatt, de la Thur et de la Töss. Parmi les torrents les plus dangereux dont l'endiguement fut commencé durant cette époque, nous citons la Nolla, dont les crues ravagèrent à plusieurs reprises le Domleschg.

Au cours de notre siècle, les ouvrages de plusieurs corrections importantes faites antérieurement ont dû être complétés ou renforcés et cela entre autres pour les raisons suivantes:

On doit tout d'abord considérer qu'un cours d'eau ne reste pas inactif, en dépit des tentatives de l'homme pour le dompter ou l'assagir. L'eau érode sans cesse les terrains, puis entraîne les matériaux enlevés vers l'aval. Selon son débit, la rivière se charge plus ou moins d'alluvions qu'elle dépose dans les parties de son cours où sa pente est plus faible; elle a donc tendance à y surélever son lit préparant ainsi de nouveaux débordements. Il appartient donc à l'homme d'adapter autant que possible ses ouvrages de correction aux variations de pente et de profil en travers que la nature provoque. Chaque inondation désastreuse rappelle, parfois brutalement, cette obligation aux populations riveraines, les contraignant à fournir de nouveaux efforts dans leur lutte contre les eaux. Pour nous limiter à notre 20^e siècle, nous mentionnerons les crues catastrophiques de 1910, 1927, 1934, 1935, 1936, 1944, 1948, 1951 et 1954 qui ont causé de grands dommages, entre autres dans le Rheintal, dans la vallée du Rhône, dans celle de l'Aar, au Tessin, dans l'Oberland zurichois, dans l'Entlebuch, dans l'Engadine, au Val Bregaglia, pour nous limiter à quelques-unes des régions les plus éprouvées.

D'autre part, il faut tenir compte du fait que les digues érigées autrefois ne présentent pas toujours une