Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 102 (1984)
Heft: 47

Artikel: Der Geschiebetransport in Flüssen nach der VAW-Formel 1983
Autor: Jäggi, Martin
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75571

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: 17.07.2025

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

Der Geschiebetransport in Flüssen nach der VAW-Formel 1983

Von Martin Jäggi, Zürich

Zur Berechnung des Geschiebetransports in Flüssen existieren bereits verschiedene Formeln, die auf empirische Weise ermittelt worden sind. Die bekannteste unter ihnen ist jene von Meyer-Peter, die inzwischen an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) weiterentwickelt worden ist. Mit der neuen VAW-Formel 1983 können steile, kiesführende Flüsse mit Gefällen bis zu 20% erfasst werden. Zu beachten ist allerdings der Transportbeginn in Funktion der natürlichen Deckschichtbildung.

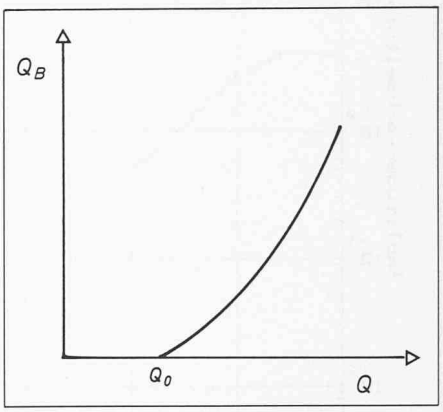


Bild 1. Geschiebefunktion, Beziehung zwischen Abfluss und Geschiebetransportrate für ein bestimmtes Gerinne mit bekannter Geometrie und Granulometrie des Sohlenmaterials. Der Transport beginnt bei einem Grenzabfluss Q_0

Einleitung

Die Bestimmung der *Geschiebetransportrate* als Funktion des Reinwasserabflusses ist ein zentrales flussbauliches Problem. Ist sie bekannt, so kann abgeschätzt werden, ob eine Flusssohle sich infolge Auflandungen anhebt und dadurch mit der Zeit eine erhöhte Überschwemmungsgefahr besteht – oder ob sie sich infolge Erosionen senkt, was die Ufer und Schutzdämme gefährdet. Unter *Geschiebe* werden jene Feststoffe verstanden, die vom Fluss in Sohlennähe talabwärts bewegt werden. Da ein enger Austausch zwischen Sohlenmaterial und Geschiebe stattfindet, hat das Transportvermögen des Abflusses diese besondere Bedeutung für die Sohlenentwicklung. Wesentliches Ziel flussbaulicher Abklärungen ist das Aufstellen einer eindeutigen *Geschiebefunktion,* d.h. einer Beziehung zwischen Abfluss Q und Geschiebetransportrate Q_B (siehe Bild 1). Werden solche Geschiebefunktionen für verschiedene Ausbauvarianten berechnet, so lässt sich durch Vergleich mit einer geschätzten Transportrate bzw. mit der Geschiebefunktion eines sich offensichtlich im Gleichgewicht befindlichen Flussabschnitts die optimale Variante bestimmen, welche der Gleichgewichtssohlenlage am nächsten kommt.

Bei der Berechnung einer solchen Geschiebefunktion wird üblicherweise die Annahme gemacht, dass das Sohlenmaterial bzw. das Geschiebe durch einen einzigen charakteristischen *Korndurchmesser,* den mittleren Durchmesser d_m, repräsentiert ist. Dies bedeutet, dass man für die Rechnung die meist recht breit gestreute Mischung einer Flusssohle durch ein Material aus einem Einheitskorn ersetzt. Selbstverständlich ist dann auch der Korndurchmesser von Sohlenmaterial und Geschiebe identisch. Unter dieser vereinfachten Voraussetzung gelingt es unter Laborbedingungen relativ leicht, bei bestimmter Geometrie und für ein bestimmtes Material eine Geschiebefunktion experimentell zu bestimmen. Wird zuviel Geschiebe zugegeben, so wird das Gefälle höher als das Anfangsgefälle, wird zu wenig zugefügt, dann nimmt das Gefälle im Lauf des Versuchs ab.

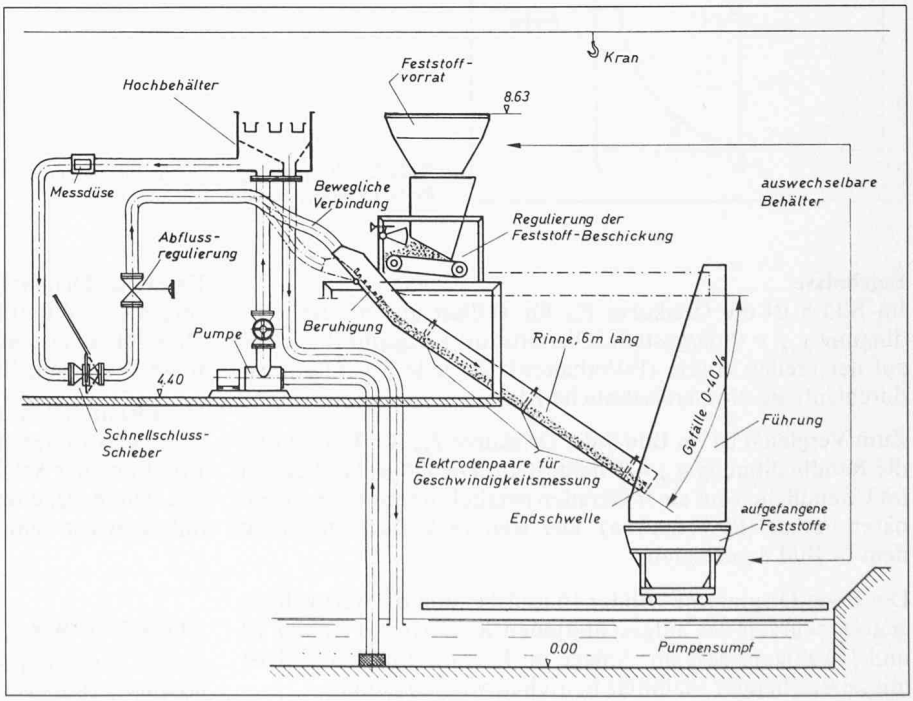
Zu den bekanntesten Versuchen dieser Art zählen jene von *Meyer-Peter* und *Müller,* die zwischen 1930 und 1948 an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau der ETH Zürich (heute: VAW) durchgeführt worden sind. Sie resultierten in der Formel von 1934 und in der international berühmten Formel von 1948 [5, 6]. Die internationale Fachliteratur (siehe z.B. [10, 13, 14] kennt viele weitere Formeln, von denen die meisten jedoch für die Anwendung in sandführenden Flüssen mit geringen Gefällen bestimmt sind. Unter diesen Verhältnissen geht ein grosser Teil des Geschiebes in Suspension über.

Neue Versuche an der ETH Zürich

Zwischen 1980 und 1982 wurden an der VAW *Geschiebetransportversuche* im Steilbereich bei Gefällen von 3 bis 20% durchgeführt. Ziel war es, die Gültigkeit der bekannten Geschiebetransportformeln in diesem Bereich zu untersuchen und nach Möglichkeit eine Formel zu finden, die sowohl in *Flüssen* wie auch in *Bergbächen* bei murgangähnlichen Verhältnissen angewandt werden kann. Einen Eindruck der Versuchsanlage gibt Bild 2.

Da bei allen Versuchen die Transportraten hoch waren und alles Material bewegt wurde, war die übliche Annahme, das *Sohlenmaterial als Einheitskornmaterial* zu betrachten, gerechtfertigt.

Bild 2. Versuchsanlage für Geschiebetransportversuche im Steilbereich



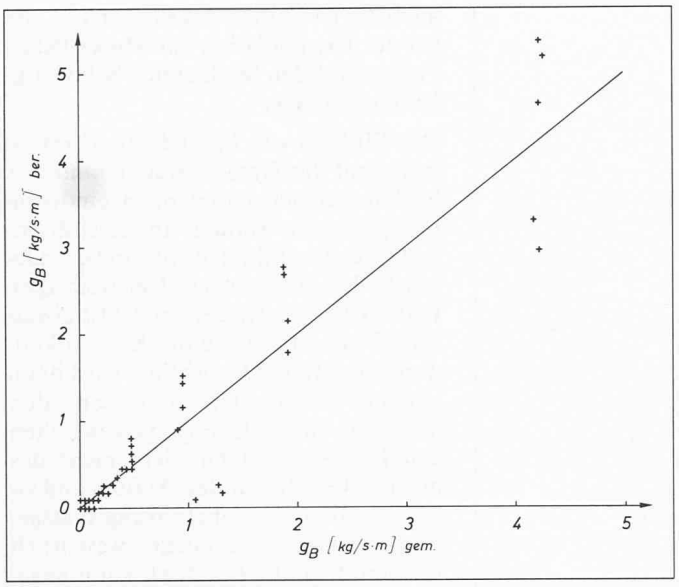


Bild 3. Vergleich der nach der Meyer-Peter-Formel bestimmten Transportraten und den Meyer-Peter-Versuchsdaten

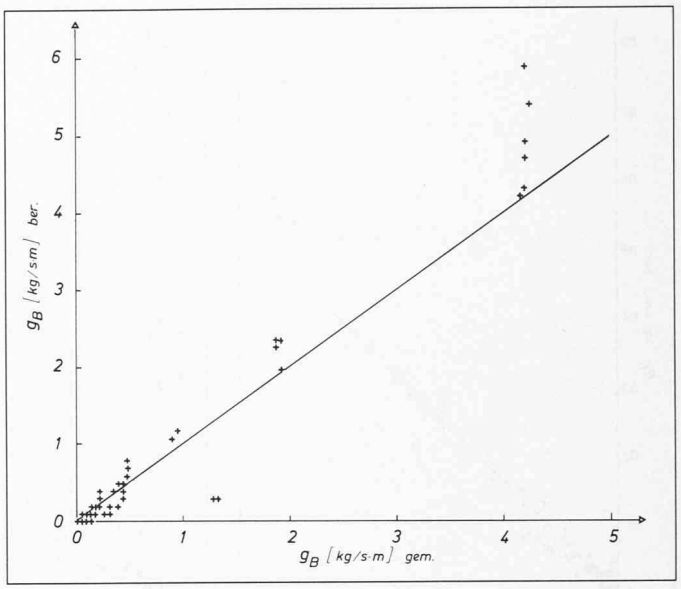


Bild 4. Vergleich zwischen den mit der VAW-Formel 1983 berechneten Transportraten und den Meyer-Peter-Versuchsdaten

Bei Gefällen über 10% wurden Besonderheiten im Bewegungsvorgang beobachtet. Bei diesen Verhältnissen sind auch bei kleinen Abflusstiefen und bei grobem Sohlenmaterial die *Transportintensitäten* hoch. Die aus der Sohle gelösten Körner springen ohne weiteres bis an die Wasseroberfläche oder werden auch aus dem Abfluss herausgeschleudert. Sie fallen dann aber relativ rasch wieder an die Sohle zurück, der Transportvorgang kann somit nicht als Suspension bezeichnet werden. Solche Zustände dürften in der Natur bestimmten Formen von Murgängen entsprechen.

Der *Transportmechanismus* ist aber auch unter diesen Extremverhältnissen nicht grundsätzlich von jedem verschieden, wie er bei den bekannten Geschiebetransportversuchen beobachtet wurde. Die Partikel rollen und gleiten auf der Sohle oder springen kurzfristig von dieser ab. Je nach Abflusstiefe, Korngrösse und Fliessgeschwindigkeit dehnt sich die Bewegung nur über einen Teil oder aber die gesamte Abflusstiefe aus.

Deshalb wurden die neuen Versuchsdaten zusammen mit den Daten der Meyer-Peter-Versuche analysiert. Die Analyse und deren Resultate wurden bereits anderswo [11, 12] eingehend beschrieben. Sie führte schliesslich zu einer *neuen Formel,* die ohne Einschränkungen in beiden Versuchsbereichen angewandt werden kann.

Die VAW-Formel 1983

Die VAW-Formel zur Berechnung des Geschiebetransports lautet in leicht vereinfachter Form:

$$q_B = 2{,}5 \cdot q \cdot J^{0,6} \cdot \left(J - \frac{d_m}{12{,}1\, h_m}\right)$$

Darin bedeuten

q_B	[m³/ms]	= Geschiebetransportrate pro Meter Gerinnebreite und Sekunde, reines Feststoffvolumen
q	[m³/ms]	= Spezifischer Abfluss
J	[-]	= Energieliniengefälle
h_m	[m]	= mittlere Abflusstiefe
d_m	[m]	= massgebender Korndurchmesser des Sohlenmaterials (Gewichtsmittel der mittleren Durchmesser der einzelnen Fraktionen)

In dieser Form der Formel wurde bereits die relative Dichte des Feststoffmaterials zum Wasser

$$s = \varrho_s / \varrho_w = 2{,}68$$

gesetzt.

Mit dieser Formel kann die *mittlere Geschiebetransportrate* in einem Fluss bestimmt werden. Wie mit anderen Formeln lässt sie sich aus Werten von q und h_m berechnen, die entweder über den ganzen Flussquerschnitt gemittelt worden sind oder aber über einzelne Streifen mit ungefähr gleicher Sohlenlage. Dieses letztere Verfahren erlaubt es, bei unregelmässigen Profilen den Einfluss stark unterschiedlicher Wassertiefen zu berücksichtigen. Die Gesamttransportrate ergibt sich als Produkt der spezifischen Transportrate mit der Sohlbreite bzw. als Summe der Produkte der jeweiligen spezifischen Transportraten in den einzelnen Streifen mit der entsprechenden Teilbreite.

Es sei ferner daran erinnert, dass bei relativ engen Flussgerinnen, wie sie in der Schweiz häufig sind, die *Wand- oder Uferreibung* auf den Transportvorgang eine grosse Rolle spielt. Wie bei anderen Verfahren wird dies auch bei der neuen Formel dadurch berücksichtigt, dass nur derjenige Abflussanteil in die Formel eingesetzt wird, der durch eine ideelle auf die Sohle wirksame Teilfläche abfliesst. Nach *Einstein* [1] kann ein reduzierter spezifischer Abfluss q_r bestimmt werden, der anstelle von q in die Geschiebetransportformel eingesetzt wird:

$$q_r = \frac{Q}{B_s} \cdot \left\{1 - \left(\frac{v_m}{k_w J^{0,5}}\right)^{1,5} \cdot \frac{P_w}{F}\right\}$$

Darin sind B_s die Sohlenbreite, F die Querschnittsfläche des Gesamtquerschnitts, P_w der Anteil der Ufer am benetzten Umfang, v_m die mittlere Fliessgeschwindigkeit und k_w der Rauhigkeitsbeiwert der Ufer nach *Strickler.*

Der Gültigkeitsbereich der Formel ergibt sich aus den Versuchsbereichen, aus denen sie abgeleitet wurde. Die Anwendung ist für kiesführende Flüsse geeignet, bei Gefällen von $0{,}2 < J < 20\%$ und relativen Rauhigkeiten $h_m / d_m < 100$.

Vergleich mit der Formel von Meyer-Peter

Die direkte Extrapolation der Formel von *Meyer-Peter* auf den Steilbereich war nicht möglich, während die neue Formel beide Versuchsbereiche abdeckt. Nur auf den Bereich der Meyer-Peter-Versuchsdaten bezogen, schnitten beide Formeln ungefähr gleich gut ab, mit einem leichten Vorteil für die neue Formel (Bilder 3 bis 6). Der Stan-

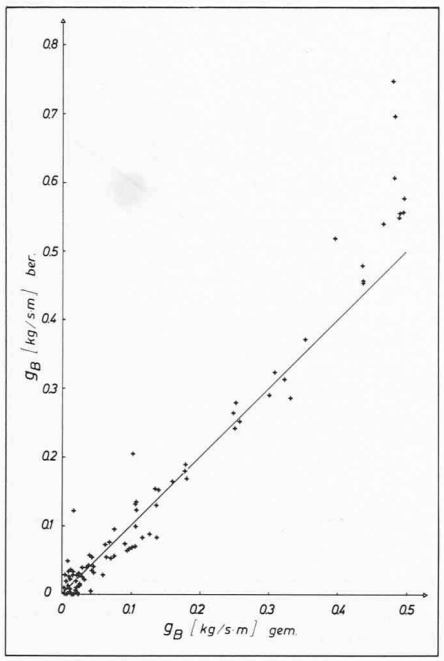


Bild 5. Vergleich der nach der Meyer-Peter-Formel bestimmten Transportraten und den Meyer-Peter-Versuchsdaten (Bereich kleiner und mittlerer Transportraten)

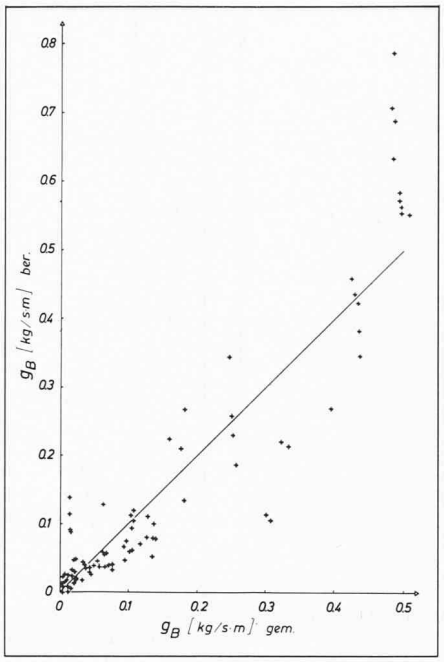


Bild 6. Vergleich zwischen den mit der VAW-Formel 1983 berechneten Transportraten und den Meyer-Peter-Versuchsdaten (kleine und mittlere Transportraten)

dardfehler betrug nämlich 66 gegenüber 72%.

Der Aufbau der beiden Formeln ist ähnlich, es handelt sich bei der neuen Formel an sich um eine *Weiterentwicklung der Meyer-Peter-Formel.* Für einen Vergleich werden beide Formeln am besten in dimensionslose Schreibweise umgeschrieben. Dazu werden die bekannten Faktoren θ (*Shields*-Faktor) und φ (*Einstein*-Faktor) verwendet. Es sind

$$\theta = \frac{h \cdot J}{(s-1)\, d_m}$$

und

$$\varphi = \frac{q_B}{[(s-1) \cdot g \cdot d^3]^{0,5}}$$

θ_{cr} ist der Wert für θ bei Transportbeginn. Gemäss *Meyer-Peter* ist θ_{cr} = 0,047. In der obigen vereinfachten Form der neuen Formel wurde ein Wert von 0,05 eingesetzt.

Die beiden Formeln können mit Hilfe dieser Faktoren wie folgt angeschrieben werden:

Meyer-Peter:

$$\varphi = 8 \cdot [(k_s/k_r)^{1,5} \cdot \theta - \theta_{cr}]^{1,5}$$

VAW 1983:

$$\varphi = 4{,}2 \cdot J^{0,1} \cdot F_r \cdot \theta^{0,5} \cdot (\theta - \theta_{cr})$$

Eine Beziehung φ (θ) stellt die Abhängigkeit der Transportrate von der mittleren Sohlenschubspannung dar. Beide Formeln lassen sich auf eine solche Grundbeziehung zurückführen, wobei beide einen Korrekturparameter aufweisen.

Bei der *Meyer-Peter*-Formel ist dies der Faktor k_s/k_r. k_s ist der *Strickler*-Koeffizient, der die effektive Sohlrauhigkeit charakterisiert, $k_r = 26/(d_{90})^{0,167}$ ist ein *Strickler*-Beiwert für eine ideale ebene Sohle ohne Unregelmässigkeiten. Er wurde aus den Versuchen von *Nikuradse* [9] abgeleitet [8]. Gemäss neueren Untersuchungen [4] wird dieser Rauhigkeitsbeiwert für eine natürliche Flusssohle, auch wenn sie eben ist, immer zu günstig sein. Somit beträgt das Verhältnis k_s/k_r bei kiesführenden Flüssen etwa 0,85, wie bei einem Grossteil der Versuche der *Meyer-Peter*-Serie.

Bei der neuen Formel der VAW entspricht der Korrekturparameter praktisch der *Froude*-Zahl $Fr = v/(gh)^{0,5}$. Bei gleicher Abflusstiefe gibt sie ein Mass für die kinetische Energie des Abflusses an. Gemäss dieser Formel ist also bei gleicher Sohlenschubspannung die Transportrate zusätzlich von der Geschwindigkeit abhängig. Dadurch wird auch der spezifische Abfluss q anstelle der Abflusstiefe h neben dem Gefälle J zum einflussreichsten Parameter in der neuen Formel. Die Geschwindigkeit v ist an sich auch von der Sohlenschubspannung abhängig. Ob sie bei gleicher Sohlenschubspannung grösser oder kleiner ist, hängt dann wieder vom Gesamtfliesswiderstand der Sohle ab. Wäre also in der Meyer-Peter-Formel k_s der alleinige Korrekturparameter, so wären schliesslich die beiden Formeln einander noch ähnlicher. Es war denn auch die Definition des Beiwerts k_r, die bei der Extrapolation der Meyer-Peter-Formel auf den Steilbereich Schwierigkeiten bereitete.

Der Einfluss von besonderen *Formverlusten* auf die Transportrate konnte aus beiden Versuchsserien nicht eindeutig nachgewiesen werden. In kiesführenden Flüssen sind solche nur in besonderen Fällen zu erwarten. Der wichtigste Fall dürfte die Nieder- und Mittelwasserabflüsse in Flüssen mit Kiesbankbildung betreffen. Der Abfluss wird dann kaskadenförmig [4]. Zwischen den Schnellen an den Übergängen zwischen den Bänken ist dann nicht mehr das mittlere Gefälle für den Abfluss und allenfalls die Geschiebeführung massgebend, sondern das lokale, wesentlich kleinere Gefälle. Praktisch kann angenommen werden, dass beim Auftreten eines solchen kaskadenförmigen Abflusses kein Geschiebetransport mehr möglich ist.

Bei kleinen Gefällen können grundsätzlich beide Formeln angewandt werden. Zu beachten ist, dass durch die häufige Annahme, bei ebener Sohle in der *Meyer-Peter*-Formel $k_s/k_r = 1$ zu setzen, etwas zu hohe Transportraten resultieren. Die Anwendung der neuen Formel dürfte oft rechnerisch einfacher sein, da die Abflusstiefe nurmehr eine sekundäre Rolle spielt und meist der Abfluss Q besser bekannt ist.

Frage des Transportbeginns

Es sei zum Schluss noch besonders auf die Frage des effektiven Transportbeginns eingegangen. In kiesführenden Flüssen ist meist eine *breite Streuung der Korngrössen* anzutreffen. Dadurch ist der eigentliche Transportbeginn nicht eindeutig definiert. Die feineren Körner werden schon bei kleineren Abflüssen, die gröberen erst bei grösseren Abflüssen in Bewegung gebracht. Dadurch entsteht eine natürliche Pflästerungsschicht [2], welche bis zu einem Grenzabfluss die Erosion aus der Sohle unterbindet.

Die *Grenzbelastung für die Pflästerungsschicht* kann gemäss *Günter* [3] angenähert werden. Die Grenzabflusstiefe beim Aufbrechen der Deckschicht wird

$$h_D = \frac{0{,}05 \cdot (s-1) \cdot d_m}{J} \cdot \left(\frac{d_{mD}}{d_m}\right)^{0,67}$$

Wird in grober Näherung angenommen, dass der mittlere Korndurchmesser der Pflästerungsschicht d_{mD} ungefähr 2,5 d_m betrage, dann wird

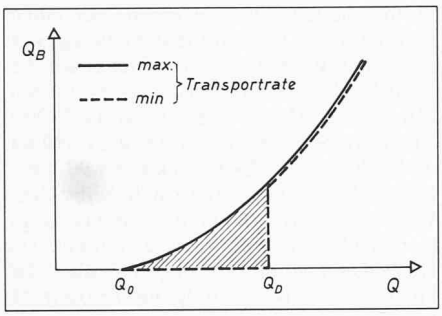


Bild 7. Geschiebefunktion unter Berücksichtigung der natürlichen Sohlenabpflästerung. Im Bereich $Q_0 < Q < Q_D$ ist diese nicht eindeutig definiert.

$$h_D = 0{,}15\ d_m / J$$

Aus diesem Wert lässt sich der Grenzabfluss Q_D für den eigentlichen Erosionsbeginn der Sohle festlegen.

Dadurch muss auch die Geschiebefunktion differenziert betrachtet werden. In einem Bereich $Q_0 < Q < Q_D$ ist diese nicht mehr eindeutig definiert wie auf Bild 1. Wenn der Abfluss Q_0 übertroffen wird, ist zwar der Weitertransport von Material mit dem Durchmesser d_m möglich. Sofern aber keine Geschiebezufuhr von oben erfolgt, so wird auch kein Material aus der Sohle erodiert, und der Geschiebetransport beginnt erst bei Q_D. Je nach Aufgabenstellung muss in diesem Abflussbereich ein Wert für die Transportrate angenommen werden, der zwischen Null und einem Wert liegt, wie er durch die Geschiebefunktion ohne Berücksichtigung des Abpflästerungsprozesses gegeben ist (siehe Bild 7).

Literaturhinweise

[1] *Einstein, H.A.:* «The Bedload Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows». US Dept. of Agriculture, Techn. Bull. No. 1026, Sept. 1950

[2] *Gessler, J.:* «Der Geschiebetriebbeginn bei Mischungen, untersucht an natürlichen Abpflästerungserscheinungen in Kanälen». Mitt. der Versuchsanstalt für Wasser- und Erdbau, ETH Zürich, Nr. 69, 1965

[3] *Günter, A.:* «Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen». Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 3, 1971

[4] *Jäggi, M.:* «Alternierende Kiesbänke». Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 62, 1983

[5] *Meyer-Peter, E.; Favre, H.; Einstein, H.A.:* «Neuere Versuche über den Geschiebetrieb». SBZ Bd. 103, Nr. 13, 1934

[6] *Meyer-Peter, E.; Müller, R.:* «Formulas for Bedload Transport». Proc. IAHR 3rd Congress, Stockholm, 1948

[7] *Meyer-Peter E.; Müller, R.:* «Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs». SBZ, 67. Jg., Nr. 3, 1949

[8] *Müller, R.:* «Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen». Mitt. der Versuchsanstalt für Wasser- und Erdbau, ETH Zürich, Nr. 4, 1943

[9] *Nikuradse, J.:* «Strömungsgesetze in rauhen Rohren». Forschungsheft des Deutschen Ingenieurwesens, Heft 361, 1933

[10] *Raudkivi, A.:* Grundlagen des Sedimenttransports, Springer-Verlag, 1982

[11] *Smart, G.; Jäggi, M.:* «Sedimenttransport in steilen Rinnen». Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 64, 1983

[12] *Smart, G.:* «A Sediment Transport Formula for Steep Channels». Proc. ASCE, Journal of Hydr. Engrg. Vol. 110, No. 3, March 1984

[13] *Yalin, M.S.:* Mechanics of Sediment Transport, Pergamon Press 2nd ed. 1977

[14] *Zanke, U.:* Grundlagen der Sedimentbewegung, Springer-Verlag, 1982

Schlussfolgerungen

Die kombinierte Analyse der Geschiebetransportversuche von *Meyer-Peter* und neuerer Versuche an der VAW im Steilbereich erlaubten die Herleitung einer neuen Formel zur Berechnung des Geschiebetransports in kiesführenden Flüssen. Bei ähnlichem Aufbau wie bei der bekannten *Meyer-Peter*-Formel erlaubt die bessere Berücksichtigung des Einflusses des Fliesswiderstands auf das Transportvermögen eine Anwendung auch auf höhere Gefälle bis 20%.

Bei differenzierter Betrachtung des Transportbeginns und der natürlichen Sohlenabpflästerung kann mit der neuen Formel auch eine *verlässliche Geschiebefunktion* abgeschätzt werden.

Adresse des Verfassers: Dr. *M. Jäggi*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Autoentwicklung für die Zukunft

Versuchsfahrzeuge Volvo LCP 2000

***(pd).* In vierjähriger Entwicklungsarbeit entstand im Volvo-Forschungszentrum eine kleine Serie von vier Versuchsfahrzeugen im Rahmen des «Light Component Project» (LCP). Das Ingenieurteam unter Leitung von Ralph Mellde hatte freie Hand, weltweit die modernsten Lösungen aufzuspüren. Die strengen Pflichtenheftanforderungen bezüglich Gewicht, Platzangebot, Treibstoffverbrauch und Fahreigenschaften sowie der Möglichkeiten der Serienfabrikation konnten erfüllt oder übertroffen werden.**

Eine Serienfabrikation des Volvo LCP 2000 ist nicht vorgesehen, doch gehen viele der Erkenntnisse aus dieser Entwicklungsarbeit in die Herstellung gegenwärtiger und künftiger Modelle ein.

Pflichtenheft

Bei der Festlegung des Pflichtenhefts Anfang 1979 schienen die Anforderungen an das Versuchsfahrzeug auf der Grenze des Erreichbaren gewählt zu sein:

□ Maximalgewicht (fahrbereit) 700 kg, bei Platz für vier Personen,

□ Durchschnitts-Treibstoffverbrauch 4 l/100 km,

□ Geringer Luftwiderstandsbeiwert CD < 0,30,

□ Beschleunigung von 0 auf 100 km/h in unter 13 s und Höchstgeschwindigkeit über 150 km/h.

Bezüglich Qualität, Lebensdauer und Sicherheit muss das Zukunftsauto den heutigen Modellen gleichkommen oder sie übertreffen. Auch für eine allfällige Serienfabrikation waren strenge Auflagen zu erfüllen.

Die energetische Gesamtbilanz des Fahrzeugs war ebenfalls zu berücksichtigen. Für die Herstellung des LCP 2000, den Betrieb über eine Lebensdauer von zehn Jahren bzw. 150 000 km unter Einbezug der Abfallwiederverwendung nach dem Gebrauch errechnet sich ein Wert von 77 000 kWh gegenüber 133 000 kWh für einen heutigen Wagen vergleichbarer Grösse bzw. eine Reduktion auf 57,8 Prozent.

Gewichtseinsparung

Da eine Gewichtsreduktion von 10 Prozent bei einem Auto eine Verbrauchsminderung von etwa 5 Prozent ermöglicht, suchten die Entwicklungsingenieure die günstigste Wahl der Werkstoffe im Rahmen der Pflichtenheftauflagen zu treffen. Dabei machten sie sich Lösungen der Luft- und Raumfahrtsindustrie sowie von Forschungslaboratorien in verschiedensten Ländern zunutze, besonders für Erfahrungen in der Anwendung von Leichtmetallen wie Magnesium- und Aluminiumlegierungen.

Unter Verwendung von 50 kg *Magnesiumlegierungen* konnten 200 kg Gewicht gegenüber der herkömmlichen Stahlkonstruktion eingespart werden. Dank der langfristig sichergestellten Verfügbarkeit von Magnesium (1 m³ Meerwasser enthält 1,3 kg Mg) und der Überwindung der Probleme der Entzündbarkeit und Korrosionsanfälligkeit