

E I N I G E H I N W E I S E Z U R G E S C H I E B E -
F Ü H R U N G V O N W I L D B Ä C H E N

J. Zeller

Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen,
CH-8903 Birmensdorf/ZH

Z U S A M M E N F A S S U N G

Mit Hilfe von Geschiebefrachtmessungen in Wildbach-Ver-
suchsgebieten wird gezeigt, dass es möglich ist, mit der Fre-
quenzanalyse auf die Jährlichkeit von Extremereignissen zu
schliessen. Einen Zusammenhang zwischen Wasserfracht und Ge-
schiebefracht eines Jahres liess sich nicht herstellen. Es
braucht eine detaillierte Analyse der einzelnen Hochwasser-
ereignisse, um die Geschiebefrachten zu verstehen.

Der aus hydraulischen Gründen maximal mögliche Geschiebe-
transport ist eine wichtige Grösse im Wildbachverbau. Es wer-
den erste Ergebnisse aus Laborversuchen über die sogenannte
Transportkapazität dargestellt und auf die Unterschiede zum
Reinwasserabfluss hingewiesen.

Abschliessend wird versucht, die Ergebnisse im Hinblick
auf die Verwendung im Bachverbau und der Gefahrenbeurteilung
zu interpretieren.

S U M M A R Y

Using sediment transport rate measurements from mountain
torrent research areas, it is shown that the return period
of extreme events can be established by means of frequency
analysis. No relationship between the water transport rate
and the sediment transport rates of any given year could be
found. In order to understand sediment transport rates, a
detailed analysis of individual flood events is necessary.

The maximum possible sediment transport rate allowed by hydraulic factors is a very important parameter in mountain torrent control. The first results of laboratory experiments on the so-called "transport capacity" are given, and the differences between this and clear water discharge are pointed out.

Finally, an attempt is made to interpret these results in terms of their applicability to mountain torrent control and danger estimation.

1. E I N L E I T U N G

Unsere Wildbäche mit ihren Hochwasserproblemen zeigen uns immer wieder, welche grosse Bedeutung der Geschiebeführung zukommt. Es ist deshalb überraschend, dass bis anhin in den Alpenländern nur vereinzelt Arbeiten zur Klärung der Geschiebeführung von Wildbächen beigesteuert wurden. Dem Wunsch der Verbaupraktiker, in dieser Hinsicht bessere Unterlagen, ja eine eigentliche "Wildbachhydraulik" zu erhalten, wurde kaum tätige Beachtung geschenkt. Zwar liegen vereinzelt Geschiebefrachtmessungen vor, doch fehlt bis heute eine Auswertung auf hydraulisch-hydrologischer Grundlage.

Die Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV) hat deshalb vor einigen Jahren begonnen, ihre bisherigen Geschiebefrachtmessungen systematisch auszuwerten. Sie tat sich auch mit der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) zusammen, um mit Hilfe von Laboratoriumsuntersuchungen das Geschiebeprobblem aus hydraulischer Sicht etwas aufzuhellen. Die nachfolgenden Ausführungen geben einige Einzelergebnisse dieser Untersuchungen wieder, worauf versucht wird, diese in einen Gesamtzusammenhang zu stellen. Diese Interpretation ist keineswegs frei von spekulativen Elementen. Die Untersuchungen werden weitergeführt.

2. G E S C H I E B E F R A C H T E N E I N I G E R W I L D B Ä C H E D E R S C H W E I Z

2.1 Die untersuchten Messgebiete

Die drei ältesten Versuchsgebiete der EAFV wurden hinsichtlich Geschiebefracht, d.h. der Gesamtgeschiebeführung

über etwa ein Jahr, näher untersucht. Es sind dies Sperbel- und Rappengraben sowie die Melera (Tabelle 1).

Tabelle 1 Hydrologische Umschreibung der Versuchsgebiete

	Sperbelgraben	Rappengraben	Melera
Standort	7°50'37"/ 47°01'02"	7°53'29"/ 47°01'03"	9°05'04"/ 46°10'25"
	nördl. Alpenrand Kanton Bern	nördl. Alpenrand Kanton Bern	südl. Alpenrand Kanton Tessin
Messperiode (Geschiebe)	1903-1958	1903-1958	1935-1978*)
Einzugsgebiet	0,544 km ²	0,596 km ²	1,05 km ²
Höhenlage	911-1203 m ü.M.	996-1256 m ü.M.	962-1773 m ü.M.
Exposition	SW	SW	SSW
mittleres Bachgefälle	23 %	30	54 %
Jahresniederschlag	1585 mm	1572 mm	2060 mm
Jahresabfluss	835 mm	1044 mm	1487 mm
Bodenbedeckung			
Anteil Wald	97 %	31 %	84 %
Anteil Weide/Wiese	3 %	69 %	14 %
Geologie	Molasse	Molasse	Kristallin

*) Lücke 1955-1975

2.2 Auswertung der Geschiebefrachtmessungen

Ziel der Untersuchung war festzustellen, ob ein Zusammenhang zwischen Wasserfracht und Geschiebefracht bestehe, und ob eine Frequenzanalyse zur Ermittlung der Jährlichkeit der Geschiebefrachten möglich sei.

- Frequenzanalyse: (Fig. 1 bis 4)

Die Analyse wurde für die 50 resp. 20 zur Verfügung stehenden Messjahre nach Gumbel ausgeführt. Es zeigte sich, dass eine derartige Analyse sinnvoll und eine Extrapolation auf seltene Ereignisse möglich ist. Je nach Einzugsgebiet können die Messdaten 2 verschiedenen Grundgesamtheiten angehören, d.h. dass die Gumbelgerade geknickt sein kann. Da die Messungen nicht jedes Jahr zum genau gleichen Zeitpunkt durchgeführt wurden, entstand eine gewisse zusätzliche Streuung. Untersucht wurden jeweils die 1., 2. und 3. Extremalverteilung. Als Gegenüberstellung diene der Alpenrhein mit 6122 km² Einzugsgebietsgrösse (Fig. 4).

- Geschiebefracht-Wasserfracht: (Fig. 5-7)

Die Gegenüberstellung der Jahresfrachten von Geschiebe und von Wasser ergibt keinen unmittelbaren Zusammenhang (Fig. 5). Die Aufsummierung der Frachten über die gesamte Messperiode zeigt dagegen ein gewisses systematisches Verhalten, in-

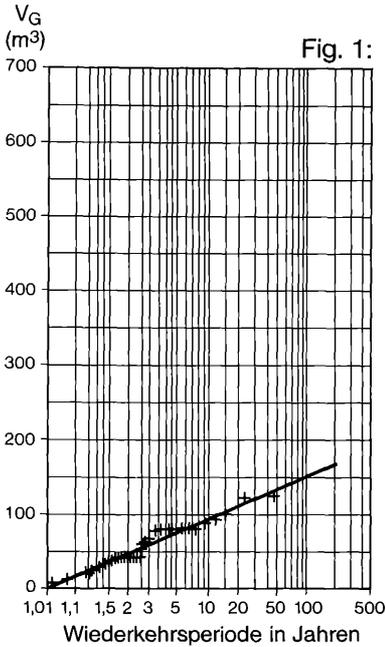


Fig. 1:

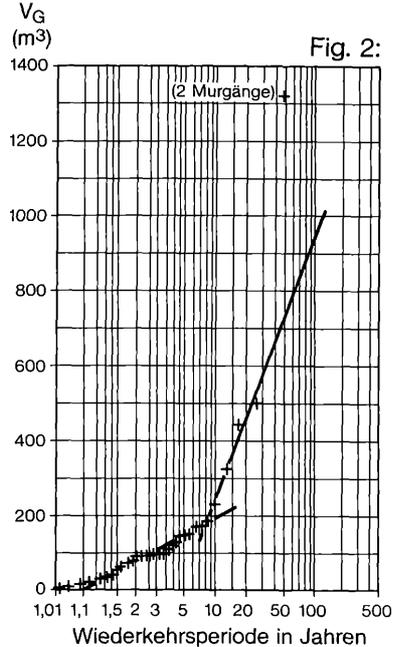


Fig. 2:

Fig. 1: Frequenzdiagramm nach Gumbel für die Jahresgeschiebefrachten des Sperbelgrabens (praktisch voll bewaldet).

Fig. 2: Frequenzdiagramm nach Gumbel für die Jahresgeschiebefracht des Rappengrabens (Waldanteil 31 %).

dem eine Grundtendenz zu erkennen ist, die etwa mit "mittlerem Abtrag" umschrieben werden könnte (Fig. 6). Die Weiterverfolgung des Zusammenhanges Geschiebefracht-Wasserfracht ergibt nur bei Gegenüberstellung der Abflüsse von Einzelhochwassern mit der Geschiebefracht einen Zusammenhang (Fig. 7). Das heisst, dass die Geschiebefracht unserer Wildbäche weitgehend von einzelnen Hochwasserereignissen bestimmt wird und Nieder- und Mittelwasserabflüsse überwiegend geschiebearm bis geschiebefrei sind.

3. MESSUNGEN ÜBER DIE MAXIMAL MÖGLICHE GESCHIEBEFÜHRUNG VON WILDBÄCHEN

Die Geschiebefrachten, wie sie im Kapitel 2 diskutiert wurden, lassen sich bezüglich Jährlichkeit nicht beliebig extrapolieren. Es bestehen physikalische nicht überschreit-

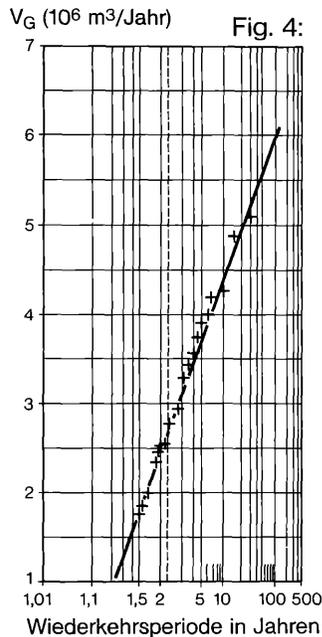
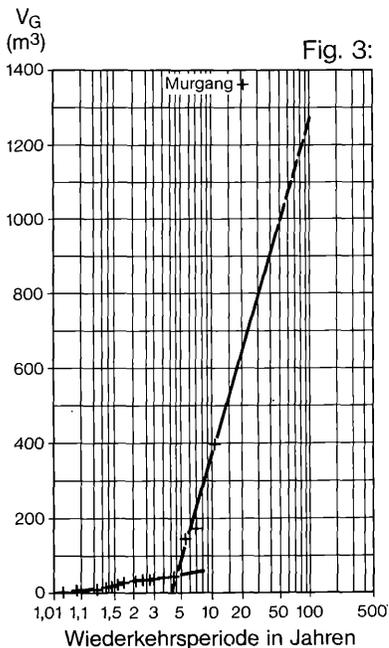


Fig. 3: Frequenzdiagramm nach Gumbel für die Jahresgeschiebefrachten der Melera (Waldanteil 84 %).

Fig. 4: Frequenzdiagramm (Normalverteilung) für die Jahresfeststofffrachten des Rheins bei der Einmündung in den Bodensee für 1931-1960, Einzugsgebiet 6122 km², Daten nach [5]

bare Grenzen, welche die maximal mögliche Geschiebefracht limitieren. Diese Fracht hängt u.a. von Geologie, Topographie, Bodenbedeckung, Zustand von Einzugsgebiet und Gerinne, der Vorgeschichte und der hochwasserhydrologischen Situation ab. Es wäre von grösstem praktischem Nutzen, wenn die während eines Katastrophenereignisses erwartbare maximale Geschiebefracht konkret bestimmt werden könnte. Eine Grösse aus der Vielzahl der Parameter, nämlich das vom Bach aus hydraulischen Gründen fixierte (maximale) Transportvermögen, d.h. die sog. Transportkapazität, dürfte bei dieser Frage eine Hauptrolle spielen. Ein Bach kann höchstens soviel Geschiebe transportieren, wie es dieser Transportkapazität entspricht. Ist aus irgendeinem Grunde mehr transportfähiges Material vorhanden, so bleibt es liegen, wird erst später oder überhaupt nicht abtransportiert oder wird möglicherweise nur über eine Teilstrecke verfrachtet.

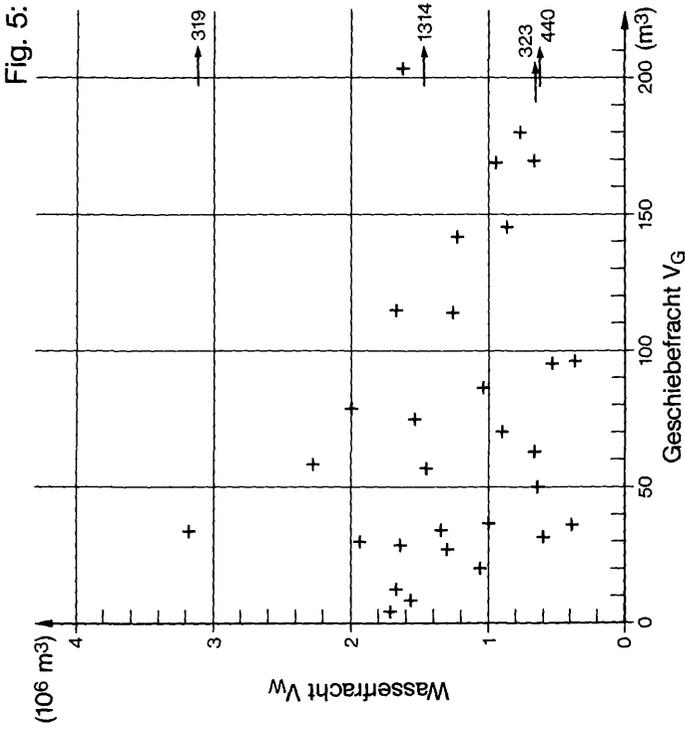


Fig. 5: Gegenüberstellung von Wasserfracht und Geschiebefracht des Rappengrabens (Periode 1903-1957).

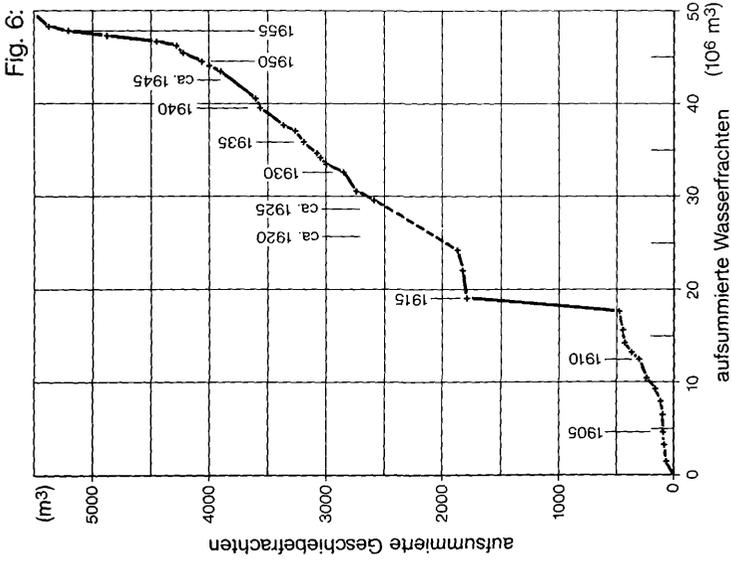


Fig. 6: Aufsummierte Wasser- resp. Geschiebefrachten des Rappengrabens (Periode 1903-1957).
 Erläuterungen: Kurve flach = viel Wasser, Kurve steil = viel Geschiebe, Kurve nach oben gekrümmt = zunehmende Geschiebeführung, d.h. zunehmende Erosion, Kurve nach unten gekrümmt = abnehmende Geschiebeführung, d.h. abnehmende Erosion, grosser Abstand zwischen der Jahreszahl = grosse Wasserführung (und umgekehrt).

3.1 Laborversuche über die Geschiebetransportkapazität

In Natur lässt sich dieses Problem kaum untersuchen. Nur hydraulische Laborversuche versprechen Erfolg. Ein solches Vorhaben ist zeitaufwendig, arbeitsintensiv, benötigt spezielle Versuchseinrichtungen und ist deshalb kostspielig. Eine grosse Zahl von Variablen sollten berücksichtigt werden. Die EAFV hat sich deshalb wie erwähnt mit der VAW zusammengetan, um dieses Problem einer Lösung näherzubringen. Man entschloss sich, mit dem denkbar einfachsten Fall zu beginnen, und zwar mit Versuchen

- in einer geraden Rechteckrinne, nicht erodierbar, im Gefällsbereich 0 bis 35 ‰
- mit "gleichförmigem" Wasser- und Geschiebeabfluss
- mit gleichkörnigem und sehr ungleichkörnigem Geschiebe ohne Tonfraktion und einem maximalem Korndurchmesser von 7 bzw. 20 mm.

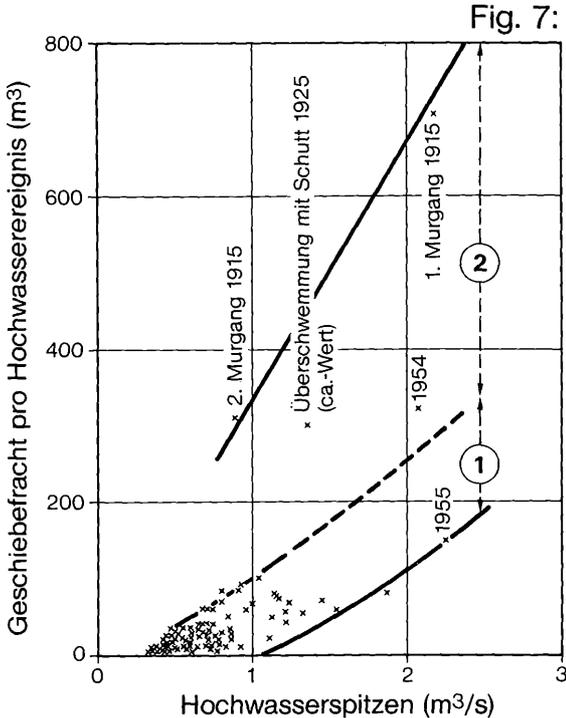


Fig. 7:
Rappengraben: Auf die einzelnen Hochwasserereignisse aufgeteilte Jahresgeschiebefrachten in Funktion des dazugehörigen Spitzenabflusses; geschiebeführende Hochwasser traten etwa ab $0,3 \text{ m}^3/\text{sec}$. auf.

Bereich ① "Normale" Geschiebeführung; das Geschiebe besteht überwiegend aus Material des eigentlichen Bachgerinnes.

Bereich ② Extreme Geschiebeführung seltener Ereignisse unter Beteiligung des Einzugsgebietes an der Geschiebeproduktion. Die linke Begrenzung von Bereich ② dürfte etwa dem Zustand bei Transportkapazität entsprechen.

3.2 Erste Ergebnisse der Laborversuche

Die Untersuchungen, die verdankenswerter Weise von der VAW ausgeführt wurden, sind nicht abgeschlossen, weshalb diese Ergebnisse noch an die Versuchsbedingungen gebunden sind. Die bisherigen Messungen lassen sich mit folgender empirischer

Gleichung [1] umschreiben (Stand 1979):

$$C_{\text{Grenz}} = \frac{q_G \text{ Grenz}}{q_W} = A \cdot J^\alpha \cdot \left[\frac{d_{90}}{d_m} \right]^{0,62} \cdot e^{-4,14J} \cdot \left[\frac{d_m \cdot g^{1/3}}{\sqrt{2/3}} \right]^{0,15-J} \cdot \left[\frac{q_W}{v} \right]^{-0,31}$$

C_{Grenz} = Geschiebekonzentration bei Transportkapazität (volumetrisch)

q_W = Wasserabfluss pro Meter Gerinnebreite ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$)

$q_G \text{ Grenz}$ = Geschiebeabfluss pro Meter Gerinnebreite bei Transportkapazität ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$)

A, α = Koeffizienten
 für $J < 13 \%$ $A = 70,25, \alpha = 1,29$
 für $J \geq 13 \%$ $A = 2024, \alpha = 2,93$

J = Gerinnegefälle

v = Kinematische Zähigkeit von Reinwasser ($1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

d_{90} = Korndurchmesser, der von 90 des Geschiebes unterschritten wird

d_m = mittlerer Korndurchmesser (Gewichtsmittel!)

g = Erdbeschleunigung

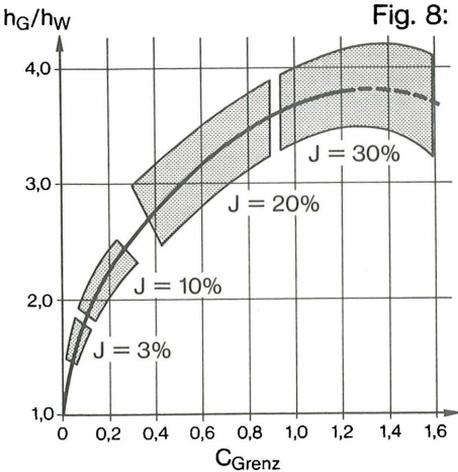


Fig. 8:

Abflusswassertiefe bei Transportkapazität in Abhängigkeit von der Geschiebeführung; nicht erodierbares Gerinne [1]

h_W = Wassertiefe bei Reinwasserabfluss

h_G = Wassertiefe des Wasser-Geschiebe-Gemisches

C_{Grenz} = Geschiebekonzentration bei Transportkapazität = Geschiebevolumen Wasservolumen.

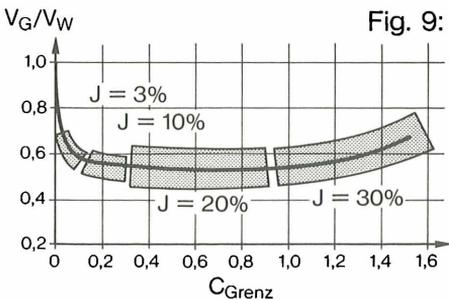


Fig. 9:

Mittlere Fließgeschwindigkeit bei Transportkapazität in Abhängigkeit von der Geschiebeführung; nicht erodierbares Gerinne [1]

V_W = Fließgeschwindigkeit bei Reinwasserabfluss

V_G = Geschwindigkeit des Wasser-Geschiebe-Gemisches

C_{Grenz} = Geschiebekonzentration (siehe Fig. 8).

Fliessgeschwindigkeit des Gemisches und Wassertiefe sind z.T. stark verschieden zu denjenigen des Reinwasserabflusses (Fig. 8 und 9). Eine eingehende Beschreibung von Versuchsanlage und Messergebnissen ist in [1] enthalten. In der Zwischenzeit zeigte es sich, dass mit der angegebenen Gleichung noch nicht der gesamte Geschiebetransportbereich erfasst ist, so dass noch einige Modifikationen zu erwarten sind.

4. G E N E R E L L E I N T E R P R E T A T I O N D E R B I S H E R I G E N E R G E B N I S S E

4.1 P r i n z i p s k i z z e z u m G e - s c h i e b e t r i e b v o n W i l d b ä c h e n

Die nachfolgenden Ausführungen sind ein erster Schritt, die bisherigen Beobachtungen und Messungen in Anlehnung an die Flusshydraulik zu einer Arbeitshypothese für Wildbäche zusammenzufügen. Da die Kenntnisse in vielen Beziehungen ungenügend sind, ist dieses Unterfangen dornig. Fehlinterpretationen sind nicht auszuschliessen.

- Der Geschiebetrieb von Wildbächen nimmt je nach Randbedingungen extrem hohe Werte an, die von "normaler" Geschiebeführung bis zum Murgang alles beinhalten. Er übertrifft hinsichtlich Geschiebekonzentration die Verhältnisse von Flüssen bei weitem. Es ist deshalb, insbesondere bei starker Geschiebeführung in Steilgerinnen, in vielen Fällen nicht möglich, eine Aufgliederung der Feststoffführung in eine Schwebstoff- und einen Geschiebeanteil vorzunehmen, wie dies im Flussbau üblich ist.
- Gerinneabpflasterung: Wie Beobachtungen auch in Natur immer wieder zeigen, besteht über weite Zeitspannen des Jahres kein oder doch nur ein wenig bedeutender Feststofftransport. Das Bachbett ist mit viel Grobmaterial abgedeckt, welches sich durch Abschwemmen des feinen Materials ausbildete (abgesehen von Blöcken, die von der Seite ins Bachbett gelangen u.s.w.). Diese sogenannte "Deckschicht" oder "Gerinneabpflasterung" ist in sehr vielen Wildbächen ausgeprägt vorhanden.
- Geschiebetriebbeginn: Erst von einer gewissen Wasserführung an aufwärts wird Feinmaterial transportiert, das abgeschwemmtes Material aus der Gerinnesohle, aus Seitengewässern und durch Landerosion (Oberflächenerosion) entstandenes Material sein kann. Bei noch grösserer Wasserführung beginnt der eigentliche Geschiebetransport. Dieser "Geschiebetriebbeginn", wie er andeutungsweise aus Fig. 7 hervorgeht (Beginn der Geschiebe-

führung erst nach Ueberschreiten einer gewissen kritischen Wasserführung), dürfte bei Wildbächen nicht eindeutig festlegbar sein. Dies deshalb, weil das Gerinne sehr heterogen aufgebaut ist, und das Aufreissen der Sohle nur schrittweise und vorerst nur in Teilflächen der Sohle (partiell) erfolgt. Bei noch weiterem Ansteigen der Wasserführung (in der Regel bei grossen Hochwassern) wird sukzessive, evtl. auch sehr rasch, die Sohle "vollständig" aufgerissen, so dass praktisch alle in Bachbett und Ufer befindlichen Korngrössen transportiert werden. Dies ist der Beginn des "voll ausgebildeten Geschiebetransportes".

- Voll ausgebildeter Geschiebetransport: Dieser wird bei Extremereignissen derart grosse Werte annehmen, dass er der Transportkapazität des Gerinnes gleichkommt. Ueberschritten werden kann diese Kapazität definitionsgemäss nicht. Obwohl es hier um den Geschiebeabfluss und nicht um die Geschiebefracht geht, interessiert die Bedeutung des Knickes im Gumbeldiagramm (Fig. 2 und 3). Er scheint in einem engen Zusammenhang mit diesem voll ausgebildeten Geschiebetransport zu stehen. Möglicherweise ist er auch ein Hinweis dafür, dass während einer gewissen Zeit des Hochwassers die Transportkapazität erreicht wird. Bei Extremereignissen trafe dies jedenfalls zu. Uebrigens gehören die Extrempunkte der Fig. 7 (Bereich ②) der steilen Gumbelgeraden der Fig. 2 an. Es wird noch erheblicher Anstrengungen bedürfen, dieses Phänomen hydraulisch zu deuten.
- Naturverhältnisse: Wegen der Unregelmässigkeit des Längsprofils und der starken Variation der Querprofile ist der vorgezeigte Geschiebetriebvorgang starken Variationen unterworfen. Lokale Aufstauungen, Schwemmholz, Verkläuerungen mit Durchbrüchen und Rutschungen verändern den Abfluss. Es bilden sich Geschiebeschübe (-wellen). Unter Umständen "entleert" sich auch das Gerinne vorzeitig von Geschiebe, so dass während oder gegen Ende des Hochwassers ein geschiebearmer oder nur noch ein Feinmaterialabfluss entsteht. Oder aber der Abfluss ist kurz und heftig, ist aber so kurz, dass ein Teil oder auch alles Geschiebe wegen Versiegens des Wasserabflusses unvermittelt liegenbleibt. Ob es zur Murgangbildung kommt, ist aus hydraulischer Sicht vor allem von der frei verfügbaren Geschiebemenge und deren Kornzusammensetzung abhängig, abgesehen von Wasserführung, Steilheit und Geometrie des Gerinnes.

4.2 Hinweise zum Geschiebetriebmechanismus bei Transportkapazität

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf die Laborversuche. In ihrem wesentlichen Gehalt können sie, abgesehen von den Zahlenwerten, für Naturverhältnisse als repräsentativ betrachtet werden.

- Einfluss des Gefälles: Die Transportkapazität nahm mit wachsendem Gefälle J stark zu und erreichte bei $J \geq 30 \%$

einen Geschiebeanteil, der grösser als die Wasserführung war. Bei noch grösseren Gefällen begann der Abflussvorgang "rutschungsähnlichen" Charakter anzunehmen.

- **"Wassertiefe":** Die Wassertiefe des Wasser-Geschiebe-Gemisches war durchwegs grösser als diejenige des entsprechenden Reinwasserabflusses. Das Verhältnis Reinwassertiefe zur Gemischwassertiefe wuchs mit zunehmender Geschiebeführung von 1:1 bis 1:3,8 an (Fig. 8). Man hat also mit wesentlich grösseren Durchflussquerschnitten zu rechnen als bei Reinwasserabflüssen. Hinzu kommt noch die meist ausgeprägte Luftdurchmischung, die den erforderlichen Durchflussquerschnitt weiter vergrössert.
- **Fliessgeschwindigkeit:** Die mittlere Fliessgeschwindigkeit fiel gegenüber dem Reinwasserabfluss schon bei einem Verhältnis Wasser- zu Geschiebeanteil, d.h. $q_W:q_G = 1:0,1$ auf rund die Hälfte ab und verblieb nahezu unverändert auf dieser Hälfte bis zum Verhältnis $q_W:q_G = 1:1,2$ (Fig. 9). Diese Abhängigkeit von der Geschiebeführung ist folglich auch eine solche vom Gefälle. Fig. 10 versucht diese grundsätzlichen Unterschiede im Fliess- und Transportverhalten schematisch darzustellen.
- **Gerinneform und Rauigkeit:** Die Gerinneunregelmässigkeiten und die Gerinnerauigkeit sind hydraulisch kaum mehr voneinander trennbar. Bei grossen Geschiebekonzentrationen wurden die Unregelmässigkeiten des Gerinnes durch Geschiebe ausgefüllt und dadurch das Gerinne geglättet. Beim verbleibenden Durchflussquerschnitt war das Transportvermögen nur wenig geringer als beim glatten Gerinne. Die Differenzen betragen weniger als 20 Vol. %.
- **Geschiebekornverteilung:** Die Transportkapazität hängt von der Kornzusammensetzung des Geschiebes ab. Stark ungleichkörnige Geschiebe (mit einigermaßen regelmässiger Kornverteilung) waren leichter transportierbar als gleichkörnige. Aus Erfahrung wissen wir auch, dass feinkörnige Geschiebe besser transportierbar sind als grobkörnige. Insbesondere bei starkem Ueberwiegen des Ton-Silt-Anteiles ist mit noch grösseren Geschiebekonzentrationen zu rechnen (wurde noch nicht untersucht). In solchen Fällen können sich eigentliche Erdfließströme bilden, welche allerdings nicht mehr den hydraulischen, sondern rheologischen Fliessgesetzen gehorchen [2]. Letztes Jahr fand in der Schweiz ein derartiger "Murgang" statt, der bei einem mittleren Gefälle von rund 23 % über eine Distanz von rund 3 km eine mittlere Fliessgeschwindigkeit von 0,025 m/sec. (90 m/Std.) aufwies [4].

Es ist einschränkend nochmals hervorzuheben, dass diese Ausführungen (im Kapitel 4) den gegenwärtigen Stand der Kenntnisse wiedergeben, und dass die Versuche im Labor, wie auch die Feldmessungen weitergeführt werden.

Fig. 10:

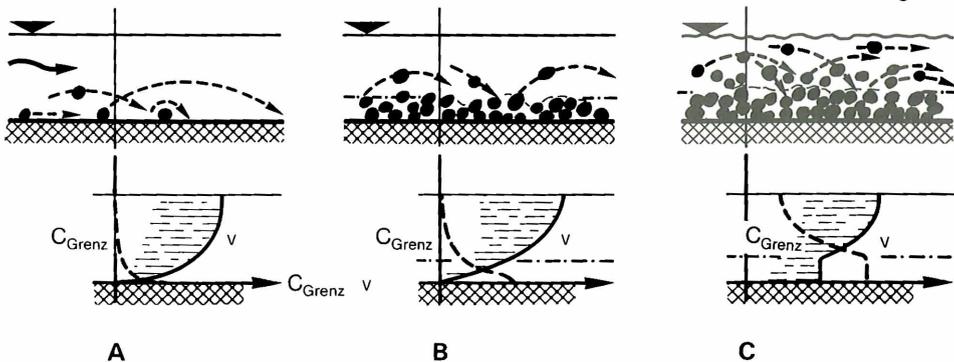


Fig. 10:

Verschiedene Zustände der Geschiebeführung mit Profilen der Fließgeschwindigkeit und der Geschiebekonzentration C_{Grenz} für den Fall einer nicht erodierbaren Sohle, wie sie aus den Versuchen der VAW hervorgehen.

Fall A: Geschiebetransportbild bei kleinen Gefällen von weniger als 2 ‰ (strömender Abfluss); die Geschiebebewegung erfolgt vor allem entlang der Sohle (oder Sohlennähe); die Mächtigkeit der "Geschiebetransportschicht" ist ca. ein Korn dick; das Wassergeschwindigkeitsprofil "entspricht" näherungsweise demjenigen von Reinwasser; $C_{Grenz} < 0,05$.

Fall B: Geschiebetransportbild bei mittlerem Gefälle von weniger als 10 ‰ (schiessender Abfluss); es entsteht eine mehrere Körner mächtige Geschiebetransportschicht mit einem + konstanten Geschwindigkeitsgradienten vom "Du Boys-Typ"; die Körner erreichen vereinzelt auch oberliegende Wasserschichten; $C_{Grenz} < 0,30$.

Fall C: Geschiebetransportbild bei grossem Gefälle von mehr als 15 ‰ (schiessender Abfluss); die Geschiebetransportschicht beginnt als "kompakte Masse" mit konstanter Geschwindigkeit über die Sohle zu gleiten, wobei Umlagerungen in dieser Schicht stattfinden; darüber befindet sich eine stark mit Geschiebe vermischte Wasserschicht, die bis zum Wasserspiegel reichen kann; die Wasseroberfläche ist stark gestört ("gischtig"), einzelne Geschiebekörner durchstossen den Wasserspiegel; $C_{Grenz} > 0,50$.

Fall D: (nicht dargestellt), murgangartiger Abfluss, $C_{Grenz} > 1,0$ (Schätzung), das Geschiebe beansprucht mehr oder weniger den gesamten Durchflussquerschnitt.

4.3 Einige Hinweise zur Verbaupraxis

Es ist in der Schweiz üblich, die Verbauungen auf ein z.B. 100jähriges Hochwasser zu dimensionieren. Man nimmt hierbei an, dass der Verbau einen geschiebearmen Abfluss gewährleisten wird. Diese Betrachtungsweise ist solange berechtigt, als ein Bach "voll" verbaut wird. Leider sind wir oft aus finanziellen Gründen nicht in der Lage, einen Vollverbau durchzuführen, so dass es über Jahrzehnte oder auch für immer bei einem Teilverbau bleibt. Ja, des öfters muss man auf einen Verbau verzichten und sich z.B. mit einem reichlich bemessenen Geschiebesammler begnügen. Man hat deshalb in vielen Bächen mit voll ausgebildetem Geschiebetrieb zu rechnen, der im

Katastrophenfall die Transportkapazität erreichen kann. Für eine solche extreme Geschiebeführung hat man die Sperrenabflussektionen, Kolke, Querschnitte von Schussrinnen (Schalen), Brückendurchlässe wichtiger Verkehrsträger, Geschiebesammler u.s.w. zu bemessen.

Für den projektierenden Ingenieur beginnen die Schwierigkeiten schon bei einem der ersten Schritte, nämlich der Bestimmung des Dimensionierungshochwassers DHQ. Er kann z.B. mit Hilfe von Hochwasserspuren früherer Extremereignisse auf dieses DHQ schliessen, wobei er meist stillschweigend Reinwasserabfluss voraussetzt. Dieses Vorgehen ist mit vielen Fragezeichen behaftet, auch wenn die betreffende Strecke gerade und regelmässig ist und über das Hochwasserereignis unverändert blieb, ja sogar gleichförmiger Abfluss angenommen werden kann. Da die Fließgeschwindigkeiten bei extremer Geschiebeführung stark reduziert sind, und deshalb der benötigte Durchflussquerschnitt meist erheblich grösser ist als bei Reinwasserabfluss, errechnet man mit der Reinwasserhydraulik viel zu grosse Abflüsse.- Umgekehrt, falls der projektierende Ingenieur das DHQ z.B. mit Hilfe des Niederschlages und eines hydrologischen Abflussmodelles berechnet, d.h. in der Regel den Reinwasserabfluss bestimmt, wird mangels ausreichender Berücksichtigung der Geschiebeführung der benötigte Durchflussquerschnitt u. U. wesentlich zu klein. Die Unterschiede können ganz erheblich sein.

Eine Bestimmung des Hochwasserabflusses des Steinibaches (Hergiswil bei Luzern) mit Hilfe von Hochwasserspuren ergab für ein Einzugsgebiet von $2,9 \text{ km}^2$ einen "unmöglichen" Abfluss von mehr als $150 \text{ m}^3/\text{sec}$. bei Berechnung als Reinwasserabfluss gegenüber $80 - 100 \text{ m}^3/\text{sec}$. bei Berechnung mit Hilfe der Gleichung für die Transportkapazität [3].

Nur schon bei diesem ersten Projektierungsschritt, d.h. der Bestimmung des Dimensionierungshochwassers, ist einzusehen, dass die Wirklichkeit recht kompliziert ist und nur zu oft nicht mit einigen aus der Reinwasserhydraulik abgeleiteten Handformeln zu bewältigen ist. Obwohl diese Situation unbequem ist, und wir versucht sind, diese Probleme zu negieren, kommen wir nicht um die Aufgabe, ja Verpflichtung herum, uns der Probleme der "Wildbachhydraulik", wie sie eingangs genannt wurde, anzunehmen.- Wie erwähnt werden die Untersuchungen weitergeführt. Bis eine einigermaßen zuverlässige Theorie über den Geschiebetrieb bei Wildbächen gefunden ist, wird es allerdings noch viel Arbeit und Mühe kosten. Hoffen wir, dass es nicht wie bei den Flüssen an die "100 Jahre" dauert!

L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

- [1] M. Hänger (1979): "Geschiebetransport in Steilgerinnen, Pilotstudie für feste und glatte Sohle und Gefälle von 3 bis 30 %".
Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, Nr. 38.
- M. Hänger und J. Zeller (1980): "Laboratoriumsuntersuchungen zum Geschiebetransport in Steilgerinnen mit fester Sohle". Symposium Interpraevent 1980, Band 2, S. 103-110, herausgegeben von der Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung, Klagenfurt.
- [2] J. Zeller (1972): "Die Schwierigkeit einer technisch korrekten Festlegung der Wildbachgefahrenzonen". 100 Jahre Hochschule für Bodenkultur, Wien, Band IV, Teil 2, S. 169-186.
- [3] J. Zeller und G. Röthlisberger (1980): "Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1979".
Wasser, Energie, Luft, Jahrg. 72, Heft 4, S. 127-134 oder Bericht Nr. 212 der Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, CH-8903 Birmensdorf.
- [4] J. Zeller und G. Röthlisberger (1981): "Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1980".
Wasser, Energie, Luft, Jahrg. 73, Heft 4, S. 87-91 oder Bericht Nr. 227 der Eidg. Anstalt für das forstl. Versuchswesen, CH-8903 Birmensdorf.
- [5] G. Müller (1968): "The new Rhine delta in lake Constanze".
Sonderdruck Geograph. Inst. der Universität Freiburg/BRD.