Feststoffmessung in kleinen Gebirgseinzugsgebieten

Autor(en): **Zeller, Jürg**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **77 (1985)**

Heft 7-8

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-940946

Nutzungsbedingungen

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

Haftungsausschluss

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

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

http://www.e-periodica.ch

Gerätetechnik

Ganz einfache Regelungen können mit einfachen Dreipunktreglern gelöst werden. Für komplexe Regelstrecken und Regelbedingungen kommen nur noch stetige Regelungen mit Analogregler oder mit Prozessrechner in Frage (Bild 7). Bei komplexen Problemen wird das Regelverhalten unter Umständen vorteilhaft mit einer Modellrechnung abgeklärt.

Auswahlkriterien für Regelanlagen

Folgende Auswahlkriterien sind bei der Projektierung von Regelanlagen zu berücksichtigen:

- die Betriebssicherheit
- die Verfügbarkeit
- die Überwachungsmöglichkeiten
- die Anpassungsmöglichkeiten des Reglers an den Prozess
- die Bedienungsfreundlichkeit
- Bei frei programmierbaren Rechnern ist dabei besonders auf eine anwendergerechte Programmiersprache, den guten Zugang zur Software und eine gute Dokumentation zu achten.
- der Aufwand (Kosten/Nutzen-Verhältnis)
- Wartung und Unterhalt

Versuche

An der fertigen Anlage ist mit geeigneten Versuchen das Regelverhalten zu prüfen und die korrekte Einhaltung des Pflichtenheftes abzuklären.

Dies ist bei wasserwirtschaftlichen Anlagen nicht einfach, sind solche Versuche mit grossem Arbeitsaufwand und auch mit hohen Kosten verbunden. Wer schaltet schon gerne eine grosse Produktionseinheit ab, um das Regelverhalten des Unterliegers bei Sunk- und Schwallerscheinungen zu überprüfen? Oft muss der Ingenieur auch lange Zeit auf ein Hochwasser warten, um das richtige Verhalten der Regeleinrichtung kontrollieren zu können. Da solche Regelanlagen aber aufwendig und teuer sind, ist es für den Betreiber wichtig, die Gewähr für ein korrektes Verhalten seiner Regelanlagen möglichst noch während der Garantiezeit zu erhalten.

Bei der Werkabnahme kann der Einsatz eines Simulators zur Nachbildung der Stellglieder und der Regelstrecke wertvolle Dienste leisten. Durch die Nachrechnung der Regelstrecke mit geeigneten mathematischen Rechenmodellen in Kombination mit Versuchen kann das richtige Regelverhalten der Anlage auch bei Verhältnissen nachgewiesen werden, die erst nach langer Zeit auftreten können.

7. Zusammenfassung

Bei der Projektierung von Wassermess- und -regelanlagen treten recht vielschichtige Probleme auf. Diese können nur in enger Zusammenarbeit von Bauingenieur, Maschinen-, Elektro- und Betriebsingenieur befriedigend gelöst werden. Vermehrt treten auch elektronische Probleme auf, wobei einem guten Überspannungsschutz grosse Beachtung zu schenken ist.

Freiprogrammierbare Messwertverarbeitungsanlagen und Rechner kommen immer mehr zur Anwendung. Aus der Sicht des Betreibers ist dabei grosser Wert auf eine gute Dokumentation der Software und eine anwenderfreundliche Programmiersprache zu legen.

Adresse der Verfasser: *Heinrich Schlittler,* El.-Ing. HTL/STV, und *Peter Lier,* dipl. Bauing. ETHZ, Nordostschweizerische Kraftwerke AG, NOK, CH-5401 Baden.

Überarbeitete Fassung eines Vortrages, den *H. Schlittler* an der Fachtagung über «Messen und Auswerten von Wasser-Parametern für Wasserkraftnutzung und Seenregulierung» des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes am 6. September 1984 in Sitten gehalten hat.

Feststoffmessung in kleinen Gebirgseinzugsgebieten

Jürg Zeller

Zusammenfassung

Das Thema «Feststoffmessung» ist äusserst vielschichtig, komplex und vor allem ein ungelöstes Problem. Es wird versucht, mit Hilfe einiger Streiflichter stark vereinfachte Hinweise zur Feststoffmessung zu geben. Folgende Themen werden berührt: Geschiebeproblematik in Flüssen und Wildbächen, Geschiebemessanlagen an Wildbächen in der Schweiz, die Messstation Erlentobel im Alptal, einige messtechnische Probleme sowie einige Auswertungen von Geschiebefrachtmessungen.

Résumé

Le thème «Mesure de matières solides» est extrêmement varié, complexe et avant tout un problème irrésolu. A l'aide de quelques exemples heureux, l'auteur essaie de donner des indications fortement simplifiées sur la mesure des sédiments. Les thèmes suivants sont abordés: problématique du charriage des fleuves et torrents, installations de mesure du charriage des torrents en Suisse, la station hydrométrique Erlentobel dans l'Alptal, quelques problèmes sur la technique de mesure et quelques analyses de résultats sur le charriage.

Summary

Sediment transport measurement is extremely involved and complex; above all, it remains an unsolved problem. A number of high-lighted examples tentatively provide some clues to sediment transport measurement. The following topics are touched on: Problems of sediment transport in rivers and torrents; sediment gauging stations in Swiss mountain torrents; Erlentobel gauging station in Alptal, Switzerland; some gauging problems, plus a number of sediment transport rate analyses.

1. Welche Probleme stellen sich in der Schweiz im Zusammenhang mit Geschiebe?

Um für den Leser eine gemeinsame Ausgangsbasis zu schaffen, sei kurz die Frage aufgeworfen: Wo haben wir Geschiebeprobleme? Wir haben sie beim Wasserbau, bei Wasserkraftanlagen, bei der Flussschiffahrt, dann aber auch zum Beispiel in unseren Gebirgsgebieten im Zusammenhang mit Schutzmassnahmen für Siedlungen, Verkehrswege und Wirtschaftsgebiete. Es handelt sich hierbei um folgende Detailprobleme:

– Beim *Wasserbau* geht es um den Hochwasserschutz, um Fluss- und Bachkorrektionen, um Wildbachverbauungen, um Sohlensicherungen und Uferschutz usw., wobei dem Geschiebetransport in allen seinen Erscheinungsformen grösste Bedeutung zukommt.

– Bei den *Kraftwerken* stehen Fragen über Ablagerungen in Stauräumen, über geschiebefreies Fassen und Ableiten von Wasser aus Gebirgsgewässern, über Spülen von Stauhaltungen und Rückhaltebecken, über die Auswirkung von Änderungen des Wasser- und Geschiebeabflussregimes auf die Gerinne unterhalb von Gebirgsspeichern usw. im Vordergrund.

Diese Liste liesse sich noch wesentlich ergänzen, doch dürfte damit die Zielrichtung der nachfolgenden Ausführungen erkennbar sein.

Ein neues Problem kommt auf uns zu, das nicht unerwähnt bleiben darf, nämlich das Waldsterben. Es geht hierbei um

die Folgen eines teilweisen bis evtl. gänzlichen Verlustes der flächenhaften Schutzwirkung unserer Gebirgswälder. Als Folge davon werden wir vermehrt mit Bodenerosion, Gerinneerosion, Verrüfung, Rutschungen usw. rechnen müssen. Dies heisst für unsere Gewässer, dass wir in Zukunft mit einem in ungünstigem Sinne sich verändernden Wasser- und Geschiebeabflussregime konfrontiert werden[1].

2. *Welches sind die geschiebehydraulischen Probleme in Flüssen und Bächen aus messtechnischer Sicht?*

Bevor wir messen können, sollten wir uns zunächst mit dem Geschiebetrieb als solchem beschäftigen. Ohne vollständig sein zu wollen, kann man das Geschiebetriebproblem nach folgenden Gesichtspunkten ordnen, zum Beispiel in den

Geschiebetrieb auf
- fester, nicht erodierbarer Sohle (Fels, künstliche Gerinne usw.)
- beweglicher Sohle (erodierbar), in kohärentem oder in nicht kohärentem Material

Geschiebetrieb bei
- kleinen bzw. grossen Gerinnegefällen

Geschiebetrieb bei
- Erosion
- Transport
- Ablagerung im Gerinne

oder noch nuancierter unterteilt in

Geschiebetrieb bei
- Gerinneabpflästerung
- Geschiebesortierung
- partieller Ablagerung oder partieller Erosion

Geschiebetrieb bei
- gerinnemorphologischen Vorgängen bezüglich
- Gerinneausformung (Mäander usw.)
- Querschnittsausformung
- Sohlenausformung (Geschiebebänke, Dünen usw.)

Um die Problematik auch aus geschiebetechnischer Sicht etwas darzustellen, sei erlaubt, weitere Hinweise zu geben: Über den Geschiebetrieb in Flüssen, das heisst in Gerinnen mit kleinen Gefällen, glauben wir, ziemlich klare Vorstellungen zu haben. Wir unterscheiden hierbei einen Geschiebeanteil, einen Schwebstoffanteil und eventuell noch einen Schwemmstoffanteil. Wir wollen uns nachfolgend im wesentlichen auf den Geschiebeanteil konzentrieren.

2.1 *Einige Hinweise zum Geschiebetrieb in «Flachgerinnen» der Schweiz ($J \leq 2\%$), welche für die Geschiebemessung von Bedeutung sein können*

Der Geschiebetrieb erfolgt in der Regel in einer mehr oder weniger «einkornmächtigen» Schicht.
Das Geschiebe folgt stark vereinfacht eigentlichen Geschiebebahnen. Es bewegt sich meist ungleichmässig über die Sohle verteilt. Bei gekrümmten Gerinnen ist diese Erscheinung besonders typisch. So folgt der Hauptteil des Geschiebes nicht dem Gerinnetalweg, sondern verläuft seitlich davon. Diese Verhältnisse hängen stark von der jeweiligen Wasserführung ab.

[1] Zum Beispiel die gegenwärtige Situation in der CSSR: Bis 1990 rechnet man in den «klassischen» Waldschadengebieten des Erz- und Riesengebirges mit einer Zerstörung von etwa 3500 km² Waldfläche und als Folge davon mit einer Zunahme des Mittelwasserabflusses um etwa 20%, der Hochwasserspitzen um 40 bis 200% und der Wasserfracht eines Hochwassers bis zu 60%. Weiter rechnet man mit einer zeitlichen Vorverlegung und Konzentration der Frühjahresschneeschmelze (Stand der Kenntnisse Mitte 1984), interner EAFV-Bericht.

Gerinneabpflästerungen sind je nach Wasserführung bei vielen Gerinnen vorhanden, das heisst der Geschiebetrieb erfolgt bis zum Aufreisen der Abpflästerung auf *«fester»* Sohle. Allerdings ist dieser Geschiebetrieb meist gering.
Die Geschiebekornverteilung folgt gewissen Regeln. Sie lässt sich häufig durch eine Fullerkurve annähern. Auf langen Flussstrecken sind Kornverteilung und Maximalkorn mehr oder weniger konstant, und mit zunehmender Weglänge nimmt die Korngrösse ab («Abrieb»). Seitenzubringer sorgen für Unregelmässigkeiten.

2.2 *Einige Hinweise zum Geschiebetrieb in Gebirgsbächen und -flüssen, insbesondere in Wildbächen im Gefällsbereich 10 bis 30% im Hinblick auf die Geschiebemessung*

Es werden hier Bäche und Kleinflüsse von der Art derjenigen der Walliser Seitentäler, der oberen Sense mit Seitenbächen, der Urner Reuss mit Seitenbächen, der Landquart mit Seitenbächen in Betracht gezogen.
Insbesondere die *Wildbäche* zeigen ein Geschiebetriebverhalten, das sich je nach Verhältnissen ziemlich stark von demjenigen der Flüsse unterscheidet. Nämlich:

– Die Feststofführung (falls vorhanden) lässt sich meist nur noch bei Nieder- und Mittelwasser in einen Geschiebe- und einen Schwebstoffanteil unterteilen. Bei grossen Abflüssen ist eine Trennung nicht mehr möglich. Man fasst deshalb die beiden Teile zusammen und benennt diese Gesamtheit meistens mit «Geschiebe».
– Dieses «Geschiebe» stammt nicht mehr nur aus dem Gerinne selbst, sondern wird antransportiert aus Seitenbächen, Runsen, Lawinenzügen und Hangrutschungen, das heisst es handelt sich mehrheitlich um gerinnefremdes Material. Falls sich zum Beispiel ein Bach stark eintieft, stammt der Hauptteil des Geschiebes aus den nachrutschenden Bacheinhängen. Das bedeutet, dass die Geschiebekornverteilung stark variiert (im Bereich Fullerähnlich bis wesentlich gröber oder auch bis wesentlich feiner). Diese Variation ist sowohl von Ereignis zu Ereignis als auch während eines einzelnen Ereignisses vorhanden, das heisst die Kornverteilung variiert sowohl zeitlich als auch örtlich. Ausserdem nimmt die maximale Korngrösse mit wachsender Wasserführung meist zu. Bei Katastrophenabflüssen kann das Maximalkorn einige bis einige Dutzend Kubikmeter betragen.
– Als Folge von Gerinneabpflästerungen oder weil das Gerinnebett infolge guter Materialfestigkeit (Bodenmechanik) schlecht erodierbar ist, können bei ein und derselben Wasserführung Geschiebemengen transportiert werden, die zeitweise oder auch dauernd wesentlich kleiner sind, als es der Geschiebetransportkapazität entspräche.
– Der Geschiebeabfluss erfolgt in Schüben (nichtstationär), einerseits als Folge eines speziellen Mechanismus (Hydraulik) und andererseits als Folge von seitlichen Rutschungen, lokalen Bettzusammenbrüchen oder kleineren und grösseren Verklausungen.
– Der Geschiebetrieb bei mittleren bis grossen Geschiebekonzentrationen kann unter Umständen nicht mehr als rein hydraulisches Phänomen betrachtet werden. So können murgangartige Abflüsse bis eigentliches Erdfliessen mit den üblichen hydraulischen Ansätzen nicht mehr beschrieben werden.
– Die Geschiebeführung bei mittleren bis grossen Geschiebekonzentrationen führt zu einer Verminderung der Fliessgeschwindigkeit gegenüber dem Reinwasserabfluss und entsprechend zu einer Vergrösserung des Durchflussquerschnittes bzw. der Wassertiefe. Ausserdem bleibt bei Extremabflüssen unter Voraussetzung von Lockermaterial-

sohlen diese nicht in «Ruhe», sondern sie nimmt bis zu einer gewissen Tiefe am Fliessvorgang teil. Die Unterschiede zum «Reinwasserabfluss» können sehr gross sein.

Man darf demnach nicht irgendwo und irgendwann nach irgendeiner Methode Geschiebe zu Messzwecken entnehmen, sondern man hat sich sowohl bei der Planung als auch bei der Durchführung der Messungen den örtlichen Verhältnissen und dem dortigen Geschiebetriebmechanismus anzupassen, welcher sich je nach Wasserführung einstellt. Insbesondere müssen die Messdaten interpretierbar sein, weil sonst die Messungen an Wert verlieren. Bei unseren Messvorhaben müssen wir uns deshalb eindeutige *Messziele* setzen, müssen uns auf *wenige Hauptfragen* beschränken und uns darüber klar sein, dass Geschiebemessungen um ein Vielfaches anspruchsvoller sind als Wasserabflussmessungen. Bedenken wir auch, dass in Gerinnen mit starker Geschiebeführung ein Pegelstand nicht mehr nur einer einzigen Abflussmenge zugeordnet ist, sondern dass diese Beziehung mehrdeutig sein kann, je nach der momentanen Geschiebeführung.

3. Können wir überhaupt aussagekräftige Geschiebemessungen unter Gebirgsverhältnissen ausführen?

Aus den bisherigen Ausführungen ist zu entnehmen, dass die Geschiebemessung in Flüssen anspruchsvoll und in Wildbächen ein fast nicht lösbares Unterfangen ist. Die mess- und vor allem die interpretationstechnischen Schwierigkeiten sind enorm. Die Grundvoraussetzungen, die bei kontinuierlichen Messungen an Wildbächen erfüllt sein sollten, sind:

– konstanter, unveränderlicher Gerinnequerschnitt bei konstant bleibendem Gerinnegefälle und unveränderter Gerinnerauhigkeit,
– eine eindeutig definierbare und eichbare Abfluss/Pegelstands-Relation,
– ein quasi stationärer Abfluss für Wasseranteil und Geschiebeanteil,
– eine quasi gleichbleibende Geschiebeart und nur in engem Rahmen variierende Kornverteilung usw.

Eine Übertragung der Vorstellungen aus der Flusshydrologie und der Flusshydraulik auf Wildbäche wäre naheliegend, muss aber zu Misserfolgen führen.
Können wir überhaupt aussagekräftig messen? Ja, wir können! Aber nur, falls wir die Wildbachhydraulik verstehen lernen, nur mit speziellen Messanlagen und nur, falls man sich auf die elementarsten Grössen beschränkt. In Naturgerinnen sollten wir dagegen nicht messen. Dies ist etwa der heutige Kenntnisstand.
Diese Schwierigkeiten sind wohl auch die Ursache dafür, dass weltweit nur an ganz wenigen Orten gemessen wird. Dies ist ausserdem einer der Gründe, dass im Verhältnis zur Flusshydraulik unser Wissen in der Wildbachhydraulik so gering ist. Bedenkt man, dass nur schon in der Schweiz pro Jahr einige Dutzend Millionen Franken für Bach- und Flussverbauungen ausgegeben werden und diese Ausgaben keineswegs die Tendenz haben abzunehmen, im Gegenteil, so ist dieser Kenntnismangel äusserst bedauerlich und ruft dringend nach Abhilfe.

Tabelle 1. Messstationen der Schweiz mit Geschiebesammlern.

Ort	Typ	Einzugsgebiet (km^2)	Periode der Geschiebemessung	Messgrössen
Sperbelgraben	GS (behelfsmässig)	0,54	1903 - 1957	Q_W, V_G, Jahr N
Rappengraben	+ WMS	0,60		
Melera	GS + WMS	1,05	1953 - 1981 mit Unterbrüchen und ab 1984	Q_W, V_G, Jahr N
Rotenbach	GS + WMS	1,66	1953 bis heute mit Unterbrüchen	Q_W, V_G, Jahr N, T
Schwändlibach		1,38		
Erlenbach	GS mit Schussrinne + 2 WMS	0,70	ab 1983	Q_W, V_G, Jahr, V_G N, T P_{W+G}, $Q_{Schw.}$ Kornverteilung

GS = Geschiebesammler
WMS = Wassermessstation
Q_W = Q_{Wasser}
$Q_{Schw.}$ = $Q_{Schwebstoffe}$
P_{W+G} = Pegelstand von Wasser + Geschiebe
V_G, Jahr = Jahresgeschiebefracht
V_G = Geschiebefracht von Einzelereignissen
N = Niederschlag
T = Wassertemperatur

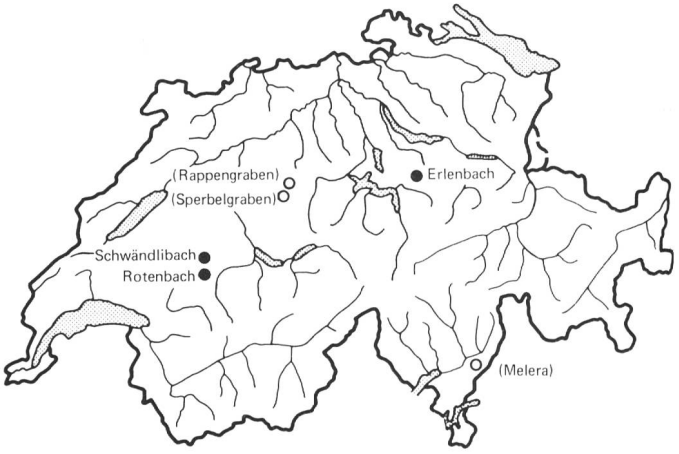


Bild 1. Ablussmessstationen an Wildbächen mit Geschiebefracht-Messanlagen (Details siehe Tabelle 1).

4. Unsere heutigen und früheren Geschiebemessanlagen an Bergbächen

Wegen der bei Hochwasser starken Geschiebeführung mit grossem Anteil an grobem Material dürfte es auch in Zukunft kaum möglich sein, direkt und kontinuierlich, das heisst im ungestörten Wasser- und Geschiebeabfluss, zu messen. Um unter den gegebenen Umständen dennoch gute Messungen zu erhalten, hat man das Wasser vom Geschiebe zu trennen. Der seit den dreissiger Jahren gewählte Grundtyp ist deshalb der *Reinwasser-Messüberfall mit vorgeschaltetem Geschiebesammler.* Solche Anlagen bestehen oder bestanden in der Schweiz an den in Tabelle 1 und in Bild 1 wiedergegebenen Orten.
In diesen Messanlagen kann die Reinwasserabflussmenge recht genau und kontinuierlich und die Geschiebefracht periodisch gemessen werden[2].
Solche Anlagen, besonders wenn sie heutigen und zukünftigen Ansprüchen genügen sollen, sind baulich teuer und in Betrieb und Unterhalt kostenintensiv. Da vor allem Langfristmessungen gesucht sind, haben die Installationen dauerhaft zu sein. Provisorien sind untauglich. Leider sind aus der Sicht der Erstellungskosten einerseits und der Eignung von Wildbächen für Messzwecke andererseits die Möglichkeiten zum Bau solcher Anlagen begrenzt. Weil man sich deshalb mit wenigen Messanlagen zu begnügen hat, stellt sich die Frage der *Übertragbarkeit* der Messergebnisse auf andere Bäche. Eine direkte Übertragung wird aus verschiedenen Gründen auch in Zukunft nur in Ausnahmefällen möglich sein. Man versucht deshalb, Geschiebetriebgleichungen für Steilgerinne aufzustellen, die erlauben sollen, den Geschiebetrieb des fraglichen Baches zu berechnen,

[2] Durch den vorgeschalteten Geschiebesammler entsteht eine beschränkte Abflussretention, die den Hochwasserabfluss dämpft. Aus diesem Grunde ist zusätzlich der Pegelstand im Geschiebesammler zu messen und mit dessen Hilfe rechnerisch die erhaltene Abflussganglinie zu korrigieren.

Bild 2. Messstation Erlentobel der EAFV im Alptal mit oberer Messstation, Schussrinne, Geschiebeauffangbecken und unterer Messstation mit V-Messüberfall (Einzugsgebiet 0,75 km²), Bewaldungsgrad 39%, auffangbares Geschiebevolumen 2500 m³, Dimensionierungshochwasser 15 m³/s, überlastbar bis 25 m³/s bei einem $Q_{100} \simeq 12\,m^3/s$).
(Foto Militärflugdienst)

das heisst grob abzuschätzen. Solche Beziehungen sind an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) an der ETHZ seit 5 Jahren in Arbeit, wobei es sich um den Grenzfall des (maximalen) Transportvermögens, das heisst der Transportkapazität handelt[3].
Auch an der ETHL im Hydrep-Labor bemüht man sich um ähnliche Fragen. In einem weiteren Schritt gilt es dann, die Geschiebetriebgleichungen mit Naturmessungen zu überprüfen (Grenzen der Anwendbarkeit, Modellähnlichkeit usw.). Diesem Zweck soll vor allem die Messanlage am Erlenbach dienen. Hierbei sind allerdings noch andere Grössen, die den Charakter des Baches und seines Einzugsgebietes umschreiben, einzubeziehen. Denn ein Wildbach im Flysch der Freiburger Voralpen wird sich anders verhalten als ein Bach im Granit des Urner Reusstales oder im Bündnerschiefer des Unterengadins. Wir stehen in dieser Beziehung noch ganz am Anfang.

5. Die neue Messanlage Erlentobel im Alptal bei Einsiedeln

Die 1983 von der Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV) in Betrieb genommene Messstation Erlentobel (Bild 2) befindet sich an einem sehr aktiven, kleinen Wildbach mit einem Einzugsgebiet von nur 0,75 km². Der Erlenbach gehört einer ganzen Gruppe von Seitenbächen der Alp an, die hydrologisch von der EAFV untersucht werden. Im Hinblick auf die Geschiebemessung – die Messstation dient noch vielen anderen Zwecken – liegen ihr folgende Zielsetzungen zugrunde:

– Erfassung des Abtragverhaltens des Einzugsgebietes über lange Zeit (Feststoffhaushalt)
– Studien über die Extreme der Geschiebefrachten
– Studien über die Transportkapazität und Verifizierung der VAW-Geschiebetriebgleichung für Steilgerinne
– Ganglinie des Hochwasserabflusses von Wasser und von Geschiebe.

In Messgrössen ausgedrückt heisst dies:

– einwandfreie, kontinuierliche Reinwasser-Abflussmessung bis zum grössten Hochwasser
– gute, kontinuierliche Pegelmessung für Wasser mit Geschiebe bei allen Abflüssen, möglichst auch bei extremem Hochwasser
– kontinuierliche oder periodische Schwebstoffmessung für Nieder- und Mittelwasserabflüsse und grösser
– Geschiebefrachtmessung für Einzelereignisse sowie Messung der Jahresfracht
– Abschätzung von Beginn und Ende der eigentlichen Geschiebeführung von Hochwasserereignissen
– Möglichkeit zum Ausbau für kontinuierliche Messungen der Geschiebeführung vor allem bei Hochwasser.

Im Hinblick auf die Geschiebeführung von Gebirgsgewässern ist die Anlage unter anderem Bestandteil einer Gemeinschaftsuntersuchung von EAFV und VAW.

6. Messtechnisches der Messstation Erlentobel

Nachfolgend beschränken wir uns auf das «Geschiebe» in der Annahme, dass die andern Messelemente in ihrer technischen Ausführung und betrieblichen Handhabung als bekannt vorausgesetzt werden dürfen.

6.1 Geschiebefrachtmessung

Wir haben uns noch nicht auf eine Methode festgelegt. Zur Verfügung stehen folgende Techniken für die Volumenbestimmung:

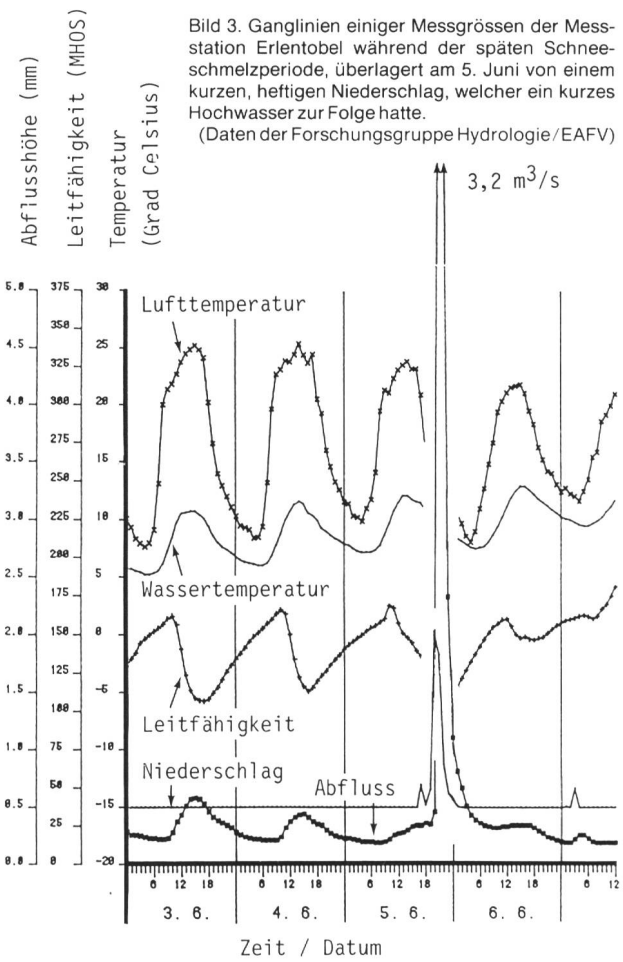


Bild 3. Ganglinien einiger Messgrössen der Messstation Erlentobel während der späten Schneeschmelzperiode, überlagert am 5. Juni von einem kurzen, heftigen Niederschlag, welcher ein kurzes Hochwasser zur Folge hatte.
(Daten der Forschungsgruppe Hydrologie/EAFV)

[3] *G. M. Smart* und *M. N. R. Jäggi* (1983): «Sedimenttransport in steilen Gerinnen». Mitt. d. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 64, 87 S.

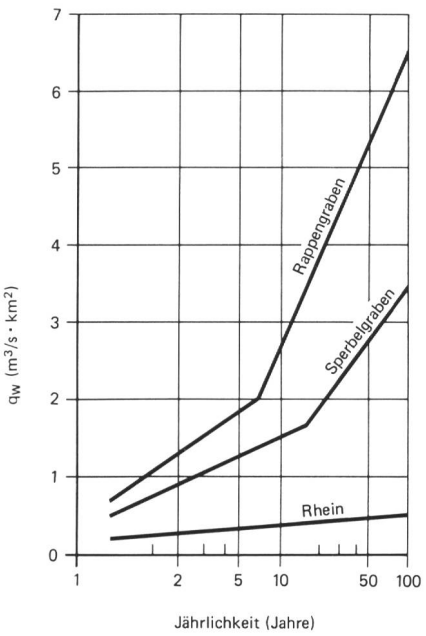
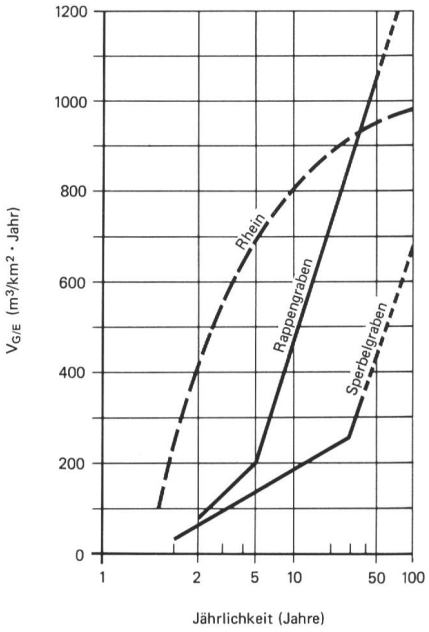


Bild 4, links. Frequenzdiagramm nach *Gumbel* für die Hochwasser- und Abflussspitzen von Sperbelgraben (E = 0,54 km²) und Rappengraben (E = 0,60 km²) der Messperiode 1903–1958 und als Gegenüberstellung vom Rhein bei St. Margrethen (E = 6122 km²) der Messperiode 1931–1960.

Bild 5, rechts. Frequenzdiagramm nach *Gumbel* für die Jahresgeschiebefrachten von Sperbelgraben (E = 0,54 km²) und Rappengraben (E = 0,60 km²) und Rhein oberhalb des Bodensees (E = 6122 km²) als Gegenüberstellung. (Sperbel- und Rappengraben folgen der 1. Extremalverteilung, der Rhein dagegen gehorcht der Normalverteilung.)



Querprofilaufnahmen: Profile in 1,0 m Abstand und Abstichen von je 1,0 m bei immer gleichbleibendem Standort der Messpunkte; funktioniert gut, ist genau genug und wird von uns seit Jahren auch andernorts verwendet.
Photogrammetrische Aufnahmen: von 2 Standorten aus (terrestrisch); funktioniert, verlangt eine Wasserspiegelabsenkung.
Echolotaufnahmen werden dieses Jahr ausprobiert. Offene Frage: Kann in seichtem Wasser, bei starken Wellen und bei hohem Schwebstoffgehalt gemessen werden? Die Untersuchungen gehen weiter. Wir suchen zu erreichen, dass Umtriebe und Zeitaufwand möglichst klein werden.

6.2 Geschiebetriebmessung

Wie bereits erwähnt, ist dieses Problem noch gar nicht gelöst. Folgendes wird studiert:
Hydrophonmessung (Messung der Geräusche beim Durchgang des Geschiebes): Da es kaum je möglich sein wird, aus den Geräuschen auf die Geschiebeführung von Wildbächen zu schliessen, wird mit dem Hydrophon der Beginn und das Ende des Geschiebedurchganges eines Hochwassers approximativ bestimmt. Diese Anlage ist installiert und in Erprobung begriffen. Die VAW leistet uns Elektronikhilfe. Um auch Aufschluss über den Füllungsgrad des Durchflussquerschnittes mit Geschiebe zu erhalten, ist eine grössere Anzahl von Hydrophonen entlang dem Umfang eingebaut.
Kontinuierliche Geschiebeabflussmessung: Eine entsprechende Messeinrichtung fehlt. Wegen der zu erwartenden grossen Geschiebeschübe kommen sogenannte Geschiebefallen oder eine kontinuierliche Geschiebeentnahme nicht in Frage. Die VAW versucht, mit Hilfe einer kontinuierlichen «Pegelstands-Gewichts-Geschiebegeschwindigkeitsmessung» auf den Geschiebedurchgang zu schliessen. Eine erste Modellanlage wird an der VAW entwickelt[4]. Bis heute ist es gelungen, den Durchgang einer einkornmächtigen Geschiebeführung labormässig zu messen. Jedoch bestehen grosse Schwierigkeiten, diese Methode für sehr starke Geschiebeführung, das heisst für mehrkornmächtige Geschiebeschichten einzusetzen, wie sie bei Wildbächen oft vorkommen. Ob diese Anlage einmal feldtauglich werden wird, steht offen.
Kontinuierliche Ablagerungsmessung im Geschiebesammler mit Hilfe von Erddruckmessgeräten: Evaluationsstudien zeigten, dass auch bei einer grossen Anzahl verwendeter Erddruckdosen und damit hohen Investitions- und Auswertekosten nur eine generelle Grössenordnung des zeitlichen Wachstumsverlaufes des Geschiebeablagerungskegels möglich ist. Auch ist die Spannungsverteilung (Erddruck) während des Wachstums des Kegels nicht ausreichend bekannt. Solche Messgeräte wurden deshalb vorläufig nicht eingebaut. Vielleicht müssen wir darauf zurückkommen.
Kontinuierliche Echolotmessungen im Geschiebesammler: Falls die Echolotmessungen erfolgreich verlaufen, wird versucht werden, auch während eines Hochwasserdurchganges in kurzen Zeitabständen zu messen.
Weitere Möglichkeiten wurden bis heute nicht untersucht. Wir sind aber ständig auf der Suche nach geeigneten Lösungsmöglichkeiten.

6.3 Schwebstoffmessungen

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass der Schwebstoffgehalt durch Entnahme von Wasserproben gemessen wird. Eingesetzt werden die üblichen Geräte, sowohl solche mit automatischer abflussproportionaler Probenentnahme als auch zusätzliche Entnahmen im Bereich von Hochwasserspitzen (abfallender Ast des Hochwassers) durch automatische Entnahme von Einzelproben. Die bis heute aufgetretenen Probleme sind mehr oder weniger gelöst, so dass zu hoffen ist, dass in Zukunft die Messungen einwandfrei sein werden.

6.4 Weitere Messungen

Für die Verifizierung der Geschiebetriebgleichung werden noch die Grössen Kornverteilung, Raumgewicht, Wassergehalt des Ablagerungsmaterials und spezifisches Gewicht des Geschiebes sporadisch gemessen. Ob diese Grössen konventionell oder zum Beispiel Raumgewicht und Wassergehalt mit Hilfe von Neutronensonden aufgenommen werden, steht noch offen. Vorläufig sollen diese Grössen nur während der Räumung des Geschiebesammlers gemessen werden, das heisst alle paar Jahre.

[4] *F. Raemy* und *M. N. R. Jäggi* (1981): «Some problems related to sediment transport measurement in steep mountain streams» Erosion and Sediment Transport Measurement, Proc. of the Florence Symposium, IAHS Publ. No. 133, S. 231–239.

R. Reimann (1983): «Verfahren zur Bestimmung des effektiven Geschiebequerschnittes in Rechteck-Kanälen, Laboruntersuchungen», Material und Technik, Nr. 3, S. 100–102.

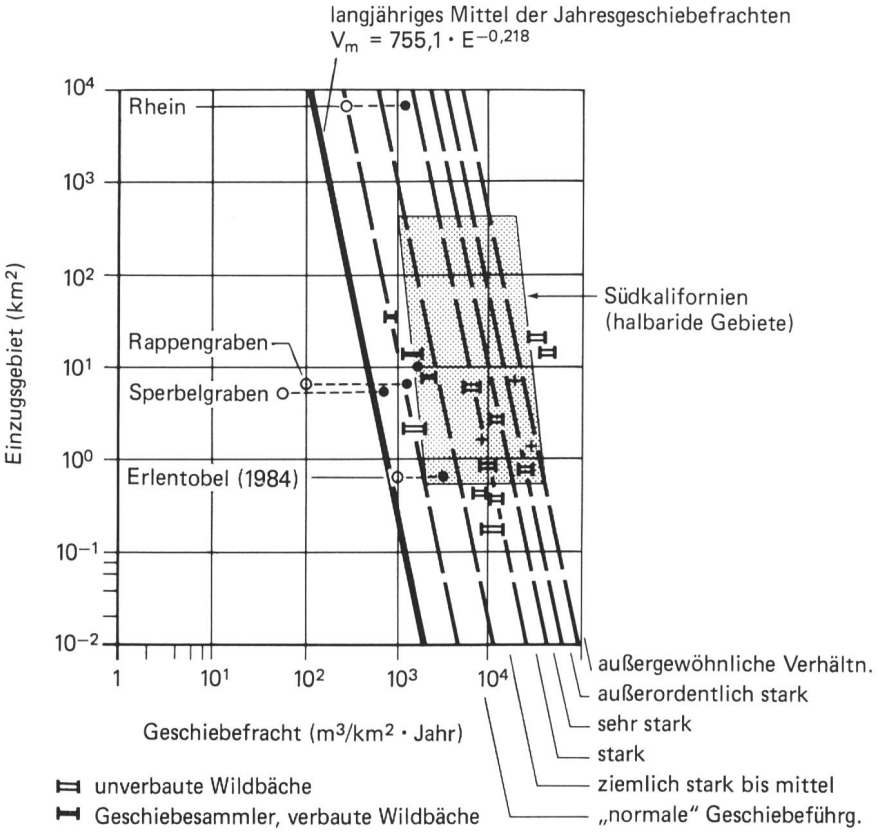


Bild 6. Abhängigkeit der Jahresgeschiebefracht von der Grösse des Einzugsgebiets eines Mitteljahres und etwa erwartbare Höchstwerte entsprechend etwa einem 100jährlichen oder selteneren Ereignis. Beispiel: Bei einem sehr stark geschiebeführenden Wildbach mit einem Einzugsgebiet von 10 km² ist gemäss Diagramm eine extreme Geschiebefracht von 1,0 bis $1{,}5 \cdot 10^4$ m³/Jahr · km² oder 10 000 bis 15 000 m³/Jahr zu erwarten. In einem Durchschnittsjahr werden dagegen nur rund 460 m³/Jahr antransportiert.
Überarbeitete Fassung eines Vortrages, den der Verfasser an der Fachtagung über «Messen und Auswerten von Wasser-Parametern für Wasserkraftnutzung und Seenregulierung» des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes am 6. September 1984 in Sitten gehalten hat.

7. Einige Auswertungen von Geschiebefrachtmessungen von Kleineinzugsgebieten

Der Aussagewert der Geschiebefrachtmessungen kann mit Hilfe der Messdaten von Sperbel- und Rappengraben kurz dargelegt werden. Als Hinweis für die Hochwasserabflussverhältnisse dient Bild 4. Dargestellt ist dort der spezifische Hochwasserabfluss in Funktion der Jährlichkeit (Frequenzdiagramm). Als Gegenüberstellung dient der Rhein bei dessen Einmündung in den Bodensee.
Bild 5 zeigt in gleicher Darstellung die spezifischen Jahresgeschiebefrachten pro km² Einzugsgebiet. Die Geschiebefrequenzdiagramme von Sperbel- und Rappengraben haben ein recht ähnliches Aussehen. Bei einer Jährlichkeit von etwa 5 bzw. 30 Jahren steigen die Geraden steil an. Es besteht die Annahme, dass sich die Bäche bei geringer Wasserführung wie normale Flachgerinne verhalten, wogegen sie bei starker Wasserführung Wildbachcharakter annehmen.
Rappen- und Sperbelgraben sind hydrologisch gesehen gleichartige Gebiete. Der Unterschied sowohl bei den Hochwasserabflussspitzen als auch bei den Geschiebefrachten ist vor allem auf den unterschiedlichen Bewaldungsgrad zurückzuführen (Sperbelgraben 97%, Rappengraben 31%). In Bild 6, einer Darstellung der spezifischen Geschiebefrachten in Funktion der Einzugsgebietsgrössen, ist zu erkennen, dass die Geschiebeführung der beiden Gebiete im Verhältnis zu anderen Gewässern der Schweiz gering ist, insbesondere was die langjährigen Mittel der Frachten betrifft.
Es ist zu berücksichtigen, dass allerdings bei diesen zwei Bächen nur der Geschiebeanteil und nicht die gesamte Feststoffmenge messbar war, das heisst das Feinstmaterial («Schwebstoffe») fehlt weitgehend, während dagegen beim Rhein die Gesamtfeststoffmenge wiedergegeben ist, die etwa zu 95% oder mehr aus Schwebstoffen besteht mit einem kleinen Rest Geschiebe. Laut Bild 5 ist es demnach näherungsweise möglich, die Geschiebefracht in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgrösse formelmässig darzustellen, allerdings mit einer recht grossen Streuung. Das langjährige Mittel der spezifischen Jahresfracht beträgt

$$V_m = 755{,}1 \cdot E^{-0{,}218} \text{ in m}^3/\text{Jahr} \cdot \text{km}^2,$$

wobei auf Geologie, Relief, Klima, Bodenbedeckung und Bewirtschaftung keine Rücksicht genommen wurde. Leider sind wir heute bezüglich Kenntnisse über die erwartbare Geschiebeführung eines Einzugsgebietes etwa soweit wie Ende des letzten Jahrhunderts mit den Kenntnissen über den «Höchsthochwasserabfluss», welcher zum Beispiel nach *Melli/Müller* lautete

$$q_{max} = 43 \cdot \psi \cdot E^{-0{,}333} \text{ in m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$$

mit ψ als Abflusskoeffizient.

8. Schlussbemerkungen

Es wurde versucht, die mess- und interpretationstechnischen Probleme, insbesondere für Wildbäche, kurz darzulegen. Weiter wurde die neue Messstation Erlentobel im Alptal vorgestellt und die dort verwendete Technik der Geschiebemessung erläutert.
Es wurde auf die Bedeutung der Messungen und deren Aussagewert hingewiesen. Es braucht noch viele Jahre Arbeit sowohl im Laboratorium zur Erforschung der Abflussmechanismen als auch im Feld zum Sammeln von praktischer Erfahrung. Es braucht nicht nur einige wenige, die daran arbeiten, sondern die Mithilfe aller Kreise, die mit solchen Problemen konfrontiert werden. Schon allein das periodische Ausmessen der Ablagerungskubaturen in unseren vielen Geschiebesammlern von Wildbächen wäre ein äusserst wertvoller Beitrag.

Adresse des Verfassers: *Jürg Zeller*, dipl. Ing., Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, EAFV, CH-8903 Birmensdorf.