Geschiebefracht in Wildbächern : Grundlagen und Schätzverfahren

Autor(en): **Zimmermann, Markus / Lehmann, Christoph**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **91 (1999)**

Heft 7-8

PDF erstellt am: **05.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-940067

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

Geschiebefracht in Wildbächen: Grundlagen und Schätzverfahren

Markus Zimmermann, Christoph Lehmann

1. Problemstellung

Wildbachereignisse verursachen in der Schweiz beinahe in jedem Jahr Schäden in Millionenhöhe. Obschon seit jeher versucht wurde, solche Schäden durch Massnahmen möglichst zu begrenzen, ist es bisher nur teilweise gelungen, die Wildbachgefahr wirksam einzudämmen. Dies hat unter anderem auch mit der immer noch mangelhaften Kenntnis über die Prozesse zu tun, welche in Unwettersituationen wirksam werden.

Seit mehr als 100 Jahren werden in der Schweiz Anstrengungen unternommen, die Abflussverhältnisse in Einzugsgebieten abzuschätzen (z.B. *Lauterburg,* 1884; *Melli,* 1924; *Kölla,* 1986). In dieser Zeit ist dem Geschiebe nicht die gleiche Bedeutung zugemessen worden. Vor allem die Unwetterereignisse von 1987 und 1993 haben von neuem die Tatsache untermauert, dass dem Geschiebe, neben dem Abfluss, eine ebensogrosse Wichtigkeit beizumessen ist. Die Forschung stellte vorerst Werkzeuge für die Berechnung des Geschiebetransportes in relativ einfachen Verhältnissen zur Verfügung. Seit 50 Jahren existiert z.B. die Geschiebetransportformel von *Meyer-Peter* und *Müller* (1948). Erst in den letzten Jahren sind Methoden und Verfahren entstanden, die auch in steileren Flüssen und Bächen angewendet werden können (z.B. *Smart* und *Jäggi,* 1983; *Rickenmann,* 1990). Neben den Transportvorgängen in den Gerinnen selbst wurden aber auch einzelne Aspekte des Geschiebehaushalts dargestellt und zu quantifizieren versucht (*Zimmermann,* 1989; *Kienholz* et al., 1991; *Lehmann,* 1993; *Hegg,* 1996).

Im vorliegenden Aufsatz werden verschiedene Verfahren zur Abschätzung der Geschiebefracht bei Wildbachereignissen, die in den letzten Jahren entwickelt wurden, skizziert. Vorgängig wird auf einige Zusammenhänge bei der Wildbachaktivität eingegangen.

2. Geschiebe im Wildbach

2.1 Prozesse und Prozessgefüge

Ein Wildbach kann als System betrachtet werden, das aus Teilsystemen aufgebaut ist, in welchen die verschiedensten hydrologischen und geschiebetechnischen Prozesse ablaufen. Je weiter die Systemgrenze gezogen wird, desto komplexer erscheinen diese Prozesse in ihren Wechselwirkungen und Abhängigkeiten. Diese Zusammenhänge werden auch heute nur zum Teil verstanden. Deshalb werden in der Regel die einzelnen Teilsysteme getrennt betrachtet (Bild 1). Die Feststoffe und deren Verlagerung spielen eine zentrale Rolle. Grundsätzlich sind Prozesse in den Hängen (Sturzprozesse, Rutschungen) und solche in Gerinnen und Runsen (Geschiebetransport, Murgänge) zu unterscheiden. Entsprechend können erstere als geschiebeliefernde, letztere als geschiebeverlagernde Prozesse betrachtet werden. Generell werden Wildbachereignisse durch den Charakter des Einzugsgebietes sowie durch die klimatischen Bedingungen gesteuert. Oft wechseln Perioden mit einem aktiveren und einem vollkommen passiven Verhalten ab. Nur in einigen Bächen der Schweizer Alpen haben Geschiebeereignisse (Murgänge, stark geschiebeführende Hochwasser) eine Wiederkehrdauer von weniger als 10 Jahren. In vielen Fällen beträgt sie 30, 50 oder sogar mehr als 100 Jahre. Die Wildbachaktivität wird deshalb oft als episodisch bezeichnet, zumindest aus der Sicht des «Menschengedenkens» (Bilder 2, 3 und 4).

2.2 Beurteilung des Geschiebehaushalts

Die Kenntnis des Geschiebehaushalts ist für viele Fragestellungen wichtig. Einerseits interessiert z.B. die mittlere Geschiebelieferung in einen Vorfluter, andererseits müssen Geschiebefrachten von einzelnen Ereignissen abgeschätzt werden können. Messungen des Geschiebetransports und von Geschiebefrachten sind aus verschiedenen Gründen problematisch und oft schwieriger als jene des Abflusses:

- Geschiebeereignisse treten in der Regel episodisch auf. Das anfallende Geschiebe kann deshalb nur selten und unregelmässig erfasst werden.
- Die Schätzung von abgelagerten Geschiebefrachten gestaltet sich oft schwierig (sofortige Räumung nach dem Ereignis, Kenntnis der Situation vorher usw.).
- Die direkte Geschiebemessung erfordert aufwendige und verhältnismässig teure Installationen. Methode und Technik weisen nach wie vor Mängel auf (z.B. *Kienholz* et al., 1998).

Der Geschiebehaushalt, insbesondere die bei einem Ereignis anfallende Fest-

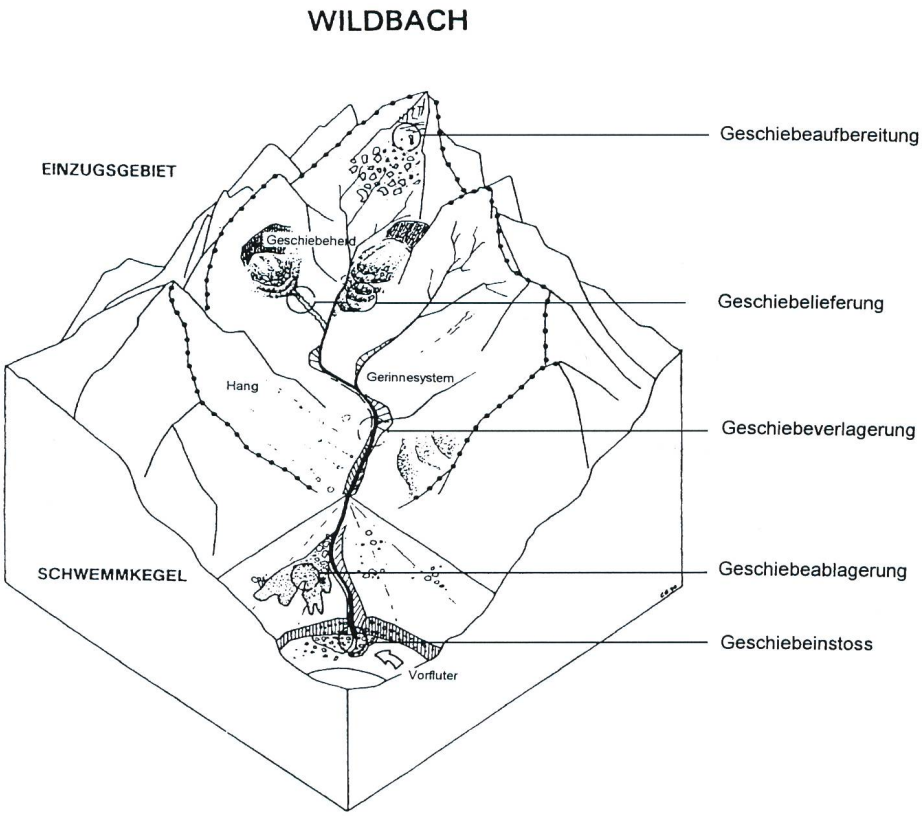

Bild 1. Schematische Darstellung eines Wildbaches (Kienholz et al., 1991).

stofffracht, muss deshalb mit verschiedenen indirekten Hilfsmitteln bestimmt werden können (vgl. dazu Kap. 3). Dabei spielt das Geschiebepotential im Einzugsgebiet (der Vorrat an Lockermaterial) eine entscheidende Rolle. Bezüglich des Geschiebepotentials können drei Typen unterschieden werden (*Zimmermann* et al., 1997), die die Wildbachaktivität zu einem wesentlichen Teil bestimmen. In einem einzelnen Einzugsgebiet können auch mehrere solcher typischen Charakteristika auftreten:

1. Das Geschiebe ist als Altschuttherd vorhanden
- Moränenhalden, Schutthalden, Talverfüllungen
- Praktisch unlimitierte Vorräte, d. h. solange Geschiebeherde nicht ausgeräumt sind und eine Verbindung mit dem Gerinne besteht, kann Schutt erodiert werden.
- Es liegt Tiefenerosion vor mit den typischen Feilenanbrüchen und Nachböschungsprozessen. In steilen Schutthängen herrscht häufig rückschreitende Erosion.
- Die Menge des erodierten Schuttes wird durch den Erosionsprozess gesteuert. Auch bei rückschreitender Erosion sind Erosionsquerschnitte selten grösser als 600 m^2.
- Es sind grosse Geschiebeereignisse möglich (mehrere 100 000 m^3).
- Klimaänderungen können Charakteristika von Schutthalden langfristig verändern.

2. Das Geschiebe ist in Form von veränderlich-festem Fels vorhanden
- Gewisse Felsformationen (Schiefer, Phyllite, Mergel) erfahren durch Eindringen von Wasser eine Veränderung des Gefüges und werden dadurch leicht erodierbar.
- Die Mobilisierung von Material erfolgt durch Tiefenerosion.
- Die Erosion wird durch den Prozess (Ereignisdauer, Art des Prozesses) oder durch den Untergrund (Erodierbarkeit, Verwitterung) gesteuert.
- Oft wechseln sich Aktivitäts- und Ruhephasen ab.
- Grosse Ereignisse sind möglich. Material ist oft feinkörnig (z. B. Bündnerschiefer).

3. Das Geschiebe wird durch die laufende Verwitterung produziert
- Einzelne Geschiebeherde im Gerinne werden durch Prozesse im Hang und in Runsen aufgebaut. Die laufende Verwitterung liefert das Material.
- Die Erosion im Gerinne wird meist durch die vorhandene Geschiebemenge gesteuert. Gerinne können durch ein Geschiebeereignis wesentlich ausgeräumt werden. Der Fels selber wird kaum erodiert (Gerinne z. B. im Granit, Gneis, Kalk).
- Die Disposition verändert sich zyklisch.
- Die Ereignisgrösse ist durch das vorhandene Geschiebepotential limitiert.

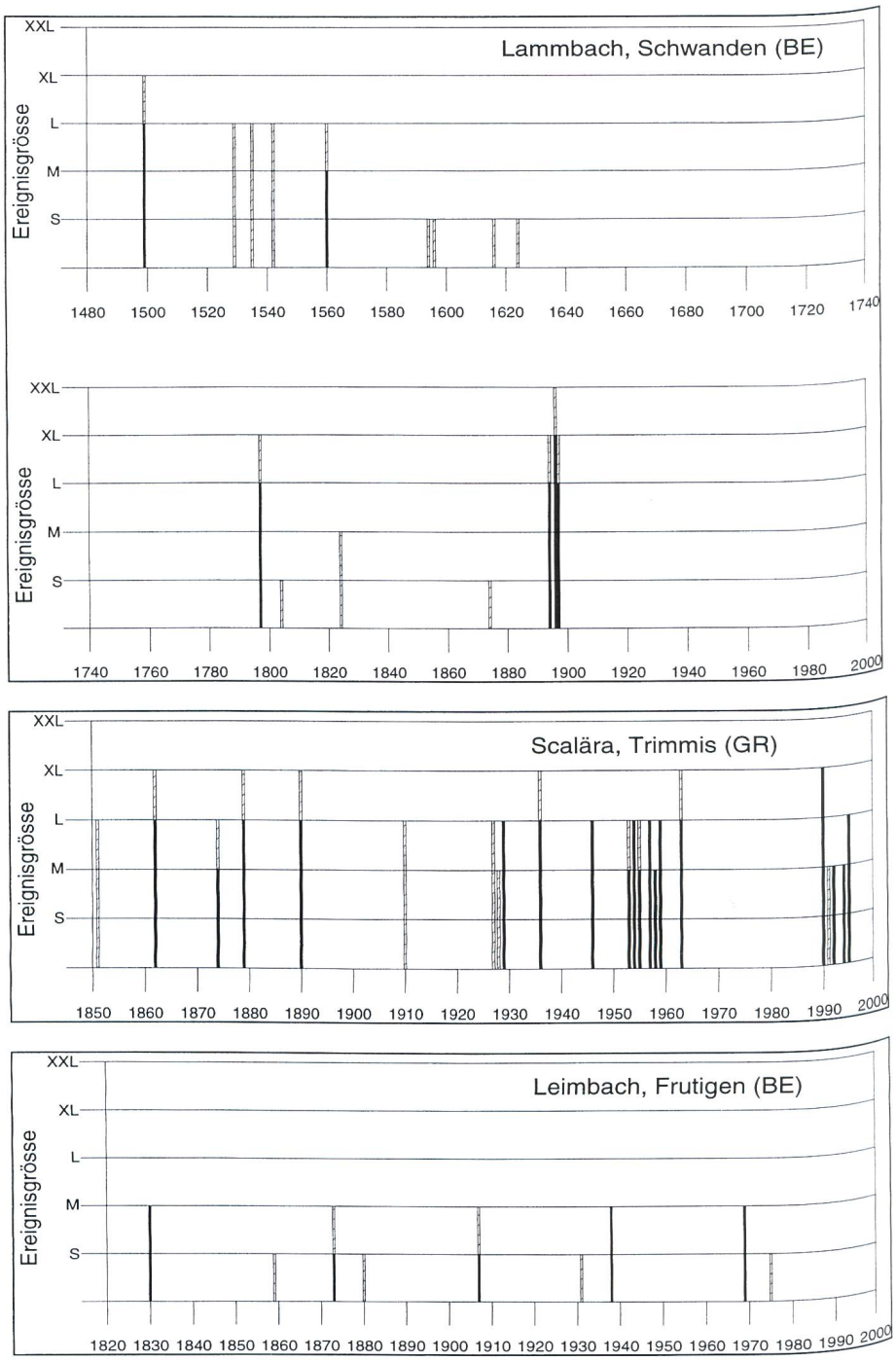

Bild 2. Typische Sequenz von Ereignissen im Altschutt (oben), im Bündnerschiefer (Mitte) und im Jungschutt (unten).
Die Ereignisgrösse wird in logarithmischen Klassen angegeben: S: etwa 5000 m^3, XXL: etwa 500 000 m^3.

2.3 Bemerkungen zur Geschiebeverlagerung in einem Wildbach

Die Grösse der Feststofffracht auf dem Kegel wird neben dem Verhalten der Geschiebeherde ganz wesentlich durch die Prozesse der Feststoffverlagerung im Gerinne gesteuert.

Nicht alles erodierte Material gelangt automatisch zum Kegel. Ablagerungen entlang der Strecke können die Feststoffkubatur wesentlich vermindern.

Obwohl es in der Praxis oft schwierig ist, in Wildbächen den fluvialen Geschiebetransport von den Murgängen zu unterscheiden, versucht man im Hinblick auf die Gefahrenbeurteilung und Dimensionierung von Bauten diesen Unterschied zu beachten. Murgänge sind in der Lage, grosse Geschiebemassen innert kürzester Zeit zu verlagern. Sie folgen teilweise andern Fliessgesetzen und reagieren folglich auf potentielle Ablagerungsstrecken anders als Hochwasser mit Geschiebetransport. Den Unterschied zwischen Geschiebetransport und Murgangtransport zu berücksichtigen ist jedoch nicht

Bild 3. Einzugsgebiet und Kegel des Talbachs (Klosters). Die Frequenz der Ereignisse in diesem Jungschuttgebiet beträgt viele Jahrzehnte.

Bild 4. Mächtige Schutthalden und tiefgründig versackter Fels in Lammbach (Schwanden bei Brienz). Das Geschiebepotential ist ausserordentlich hoch. Vor allem im letzten Jahrhundert haben sich sehr grosse Murgänge ereignet.

in jedem Falle sinnvoll, weil reiner Geschiebetransport in Wildbächen praktisch nicht existiert. Man muss vielmehr von Mischformen ausgehen: Je nach Abfluss, nach Gefällsverhältnissen und nach dem verfügbaren Material ist der eine oder andere Prozess dominant. Sogar innerhalb des gleichen Ereignisses können sich die verschiedenen Prozesse abwechseln.

3. Schätzverfahren

Seit etwa 15 Jahren steht eine grössere Zahl von Verfahren zur Abschätzung der Geschiebeverhältnisse in Bächen und kleineren Flüssen zur Verfügung. Diese gliedern sich in Schätzverfahren zum Geschiebetransport (z. B. *Smart* und *Jäggi,* 1983; *Rickenmann,* 1990) sowie in Verfahren zum Schätzen der Geschiebefracht eines einzelnen Ereignisses.

Diese letzteren Verfahren werden in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben und in Kapitel 4 am Beispiel des Steinibachs (LU) angewendet. Die hier vorgestellten Verfahren stellen eine Auswahl aus den Alpen dar. Aus anderen Regionen der Erde (z. B. den USA, Japan) existieren weitere Beispiele.

3.1 Verfahren mit einem Parameter

Die einfachsten Schätzverfahren haben neben wählbaren Koeffizienten nur einen variablen Parameter, die Grösse des Einzugsgebiets (analog den frühen Schätzformeln für den Abfluss). Eine einfache Beziehung (1) nach *Zeller* (1985) basiert auf Beobachtungen in schweizerischen Einzugsgebieten.

$$M = 17{,}000 \sim 27{,}000\, E^{0{,}78} \qquad (1)$$

Dabei wird E in km^2 angegeben, M in m^3. Die hier zugrundeliegenden Daten entstammen weitgehend den Messungen im Alptal. Die Formel setzt die Annahme voraus, dass die jährlich anfallende Geschiebefracht auf ein Grossereignis extrapoliert wird. Eine solche Annahme ist vermutlich nicht immer zutreffend.

3.2 Verfahren mit mehreren Parametern

Die Verfahren mit mehreren Parametern können in zwei Kategorien eingeteilt werden, in solche, die a) neben der Einzugsgebietsgrösse weitere Faktoren beinhalten, und solche, die b) auf die Berücksichtigung der Einzugsgebietsgrösse verzichten.

a) Diese Verfahren beinhalten neben der Einzugsgebietsgrösse weitere Faktoren wie beispielsweise geologische Verhältnisse. Ferner können Kegelgefälle, ein mittleres Bachgefälle oder hydrologische Faktoren eingebunden sein.

Bekannt sind die Methoden von *Kronfellner-Kraus* (1984):

$$M = K^* E^* J_c \quad (2)$$

Der Wert für K ergibt sich aus drei unterschiedlichen Wildbachzonen in Österreich und variiert zwischen 250 und 1750 je nach geologischen Verhältnissen. Das Verfahren ist regional begrenzt. Neben der Wahl des K-Wertes stellt sich vor allem das Problem des Wertes für J_c, welcher als sogenanntes Erosions- und Transportgefälle gilt (mittleres Bachgefälle).

Bei der Formel von *D'Agostino* et al. (1996) werden die geologischen Verhältnisse (IG) mit einem Faktor 0 bis 5 gewichtet:

$$M = 45 * E^{0,9} * J_c^{1,5} * \mathrm{IG} \quad (3)$$

Die Formel zur Schätzung der Murenfracht nach *Hampel* (1980) leitet sich aus gebietsspezifischen Faktoren (Niederschlag, Meereshöhe u.a.) und einem Abriebsfaktor ab:

$$M = \frac{4{,}47 E h_{100} \psi (1 - H_u / 2300)(J\% - 1{,}2)^{2{,}63}}{J\% s^l} \quad (4)$$

Dabei ist h_{100}: 100jährlicher 24-h-Regen, ψ: Abflussreduktion durch Versickerung, H_u: Höhe des Talbodens bei Mündung in m ü.M., s: Abriebskoeffizient, l: Lauflänge des Geschiebes in m.

b) Verfahren mit mehreren Parametern, welche auf den Faktor Einzugsgebietsgrösse verzichten: Es wird versucht, mehr prozessorientiert die Erosionsleistung (erodierbare Gerinnelänge L_c) im Wildbach zu erfassen. Hier sind z.B. die Arbeiten von *Rikkenmann* (1995) zu erwähnen. Die Verfahren basieren auf Messungen und Beobachtungen von Murgangereignissen in der Schweiz. Sie geben einen oberen Grenzwert der Murenfracht an. Neben der Gerinnelänge L_c berücksichtigt man das Kegelgefälle S_f.

$$M = L_c * (6{,}4 * S_f\% - 23) \quad (\text{für } 7\% < S_f\% \leq 15\%) \quad (5)$$

$$M = L_c * (110 - 2{,}5 * S_f\%) \quad (\text{für } 15\% < S_f\% \leq 40\%) \quad (6)$$

3.3 Verfahren mit Berücksichtigung von Verlagerungsprozess und geologischen Faktoren

Mit diesem Verfahren (*Lehmann*, 1993a; GHO, 1996), welches nicht als eigenständiges Verfahren entwickelt, sondern innerhalb einer aufwendigeren Prozedur erste Anhaltspunkte liefern soll, kann die Feststofffracht mit einem Flussdiagramm (Bild 5) unter Benutzung von Karten und Luftbildern grob geschätzt werden.

$M = f$ (Verlagerungsprozess, Gerinnegefälle, Lage der Geschiebeherde, Felsstrecken, Ablagerungen, Geologie) (7)

Als Ergebnis resultiert eine spezifische Feststofffracht. Die geologische Zuordnung erfolgt in einem zweiten Schritt, bei dem unter Berücksichtigung der Einzugsgebietsgrösse die effektive Feststofffracht abgeschätzt werden kann.

3.4 Methoden mit Berücksichtigung der Geschieberelevanz

Einzugsgebiete bzw. deren Teile weisen eine bestimmte Geschieberelevanz auf (Geo7, 1997; *Heinimann* et al., 1998). Die Verfahren berücksichtigen und gewichten verschiedene Einzugsgebiets-Charakteristika, wie sie z.B. auf einer Karte 1:25000 dargestellt sind. Als Resultat ergeben sich einzelne geschieberelevante Flächen, denen eine Geschiebelieferung zugeordnet werden kann. Die Geschiebefracht M ist somit eine Funktion von:

$M = f$ (Geologie, Felsfläche, Lockermaterial, Lockermaterial in Bachnähe, Hangneigung). (8)

M wird in m³ für ein grösseres oder kleineres Ereignis angegeben. Die primären

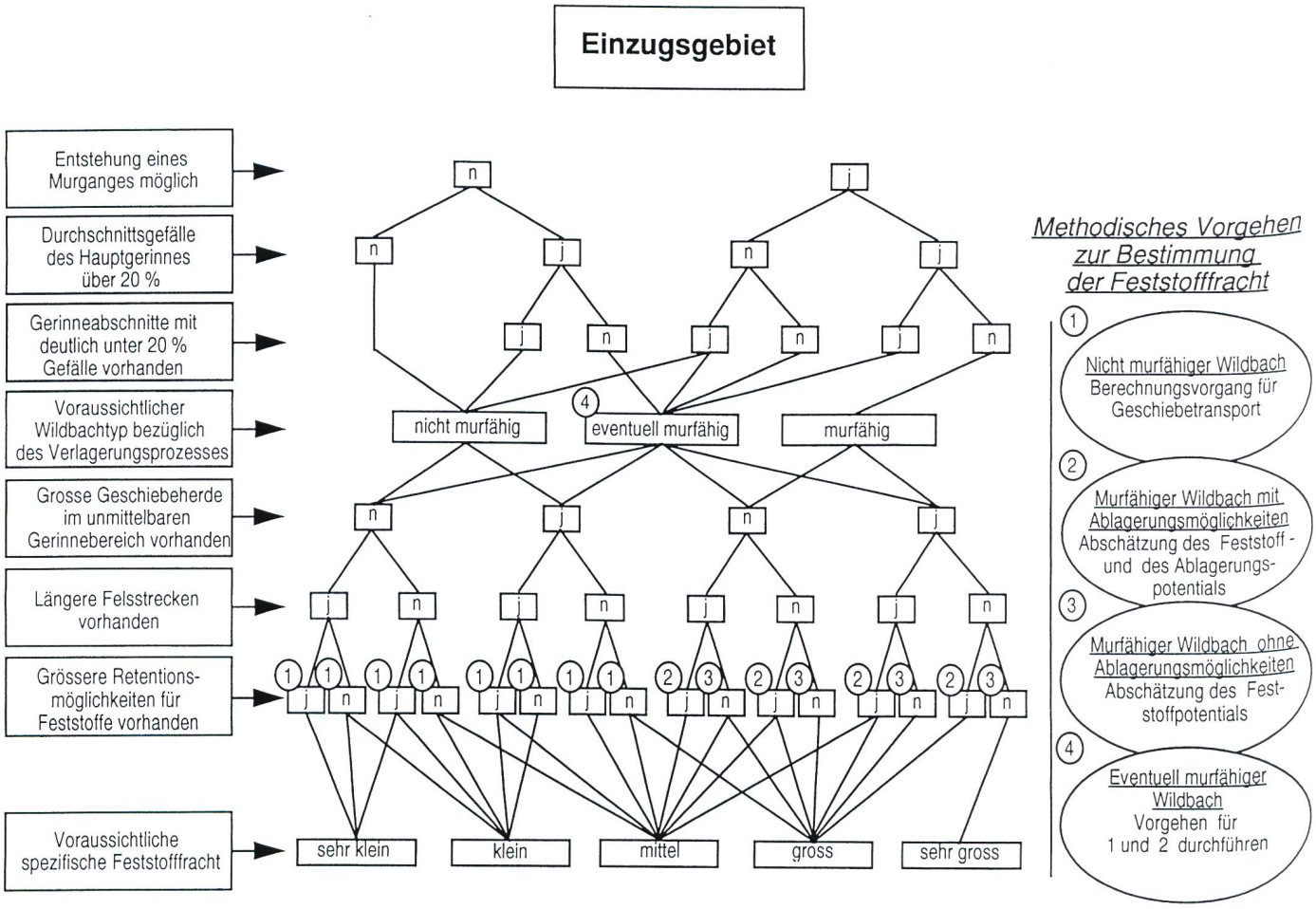

Bild 5. Diagramm zur Abschätzung der spezifischen Feststofffracht in Wildbächen (Lehmann, 1993a; GHO, 1996).

Arbeitsschritte beinhalten eine detaillierte Interpretation der Karte 1:25000. Dies kann automatisch in einem Geographischen Informationssystem (GIS) erfolgen. Das Verfahren ist schematisch in Bild 6 dargestellt.

3.5 Erhebung des Geschiebepotentials und Berechnung der Feststofffracht

Bei diesem Verfahren (*Lehmann,* 1993b; GHO, 1996) wird das effektiv im Einzugsgebiet vorhandene Geschiebepotential berücksichtigt. Dabei spielt die Lage der Geschiebeherde in bezug auf die Vorfluter eine entscheidende Rolle. Unter Berücksichtigung von Verlagerungsprozess und Ablagerungen kann die Feststofffracht, welche auf dem Bachkegel erwartet werden kann, bestimmt werden. Das Verfahren ist aufwendig. Es erfordert intensive Geländearbeit.

3.6 Abschliessende Bemerkungen zu den Schätzverfahren

Die einfachen Schätzverfahren mit einem oder zwei Parametern geben eine Grössenordnung der Kubatur an, mit der im Extremfall gerechnet werden muss (häufig ein 100jährliches oder ähnliches Ereignis). Abweichungen der einzelnen Verfahren um einen Faktor 5 bis 10 voneinander sind keine Seltenheit (vgl. Bild 7). Das etwas komplexere Verfahren mit den geschieberelevanten Flächen ergibt brauchbare Hinweise.

Zuverlässige Ergebnisse können aber nur mittels Geländeerhebungen erzielt werden. Eine detaillierte Aufnahme des effektiv erodierbaren Geschiebes im Einzugsgebiet kann je nach Erhebungsschwerpunkt zwar auch hier ein Problem darstellen, da für die einzelnen Schätzwerte ein wesentlicher Ermessensspielraum besteht (Szenarien). Diesen Ermessensspielraum zu erkennen und auszuloten erfordert vielfältige Kenntnisse im Umgang mit Wildbachproblemen, über welche in der Regel nur die Fachspezialisten verfügen.

4. Anwendung der Verfahren im Steinibach (LU)

4.1 Das Einzugsgebiet

Das etwa 4,4 km^2 grosse Einzugsgebiet des Steinibachs bei Flühli befindet sich als rechtsseitiger Zufluss zur Waldemme am Übergang vom Mittelland zu den Voralpen. Molassegesteine und Flysch (v.a. Mergel, Sandsteine) bilden einen wichtigen Teil der Festgesteine im Gebiet. In höheren Regionen finden sich auch Kalke, welche von den Abhängen der Baumgartenflueh und der Schafmatt stammen. Das Gewässernetz ist weit verzweigt und umfasst nebst dem Hauptgerinne eine

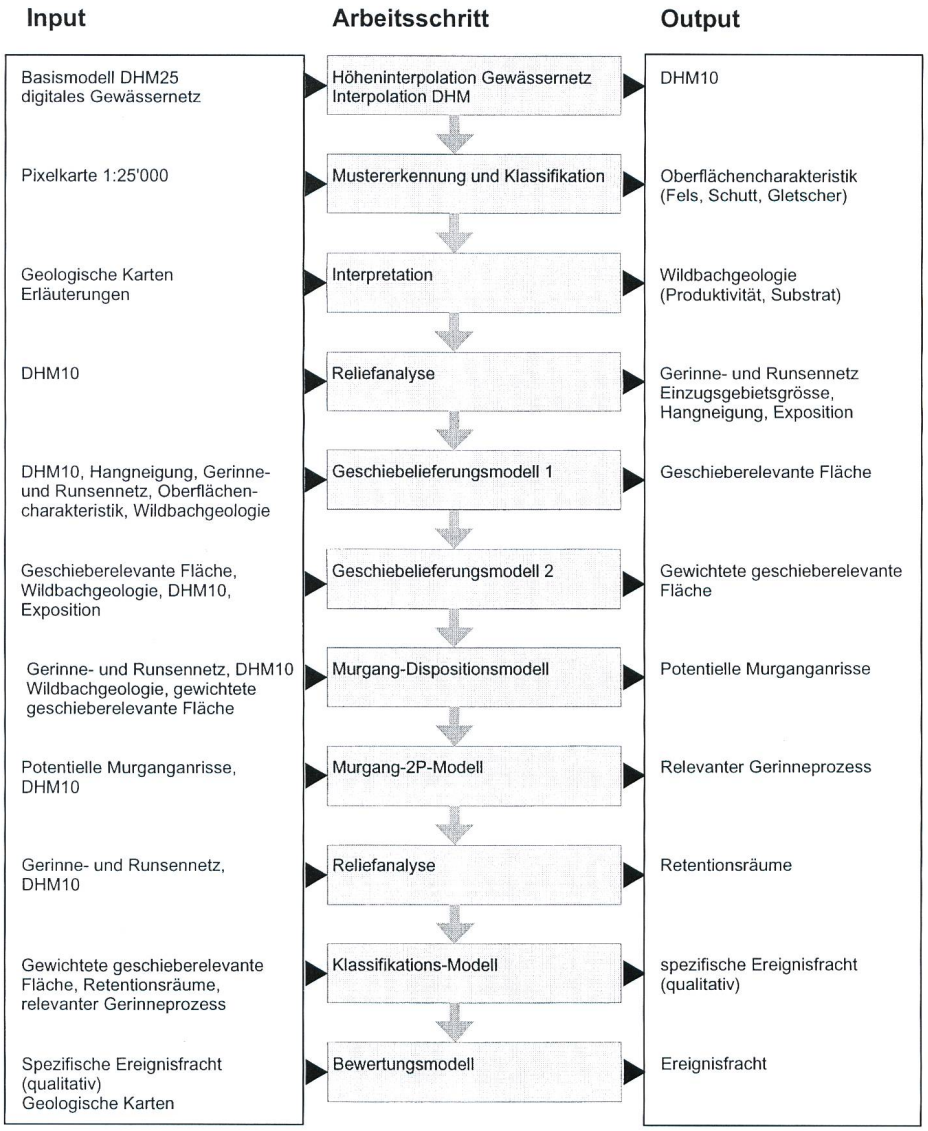

Bild 6. Verfahren zur Abschätzung von Feststofffrachten mit Hilfe von digital verfügbaren Daten. Die Grundlagendaten können mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) über grosse Raumeinheiten effizient verarbeitet werden (Geo7, 1997).

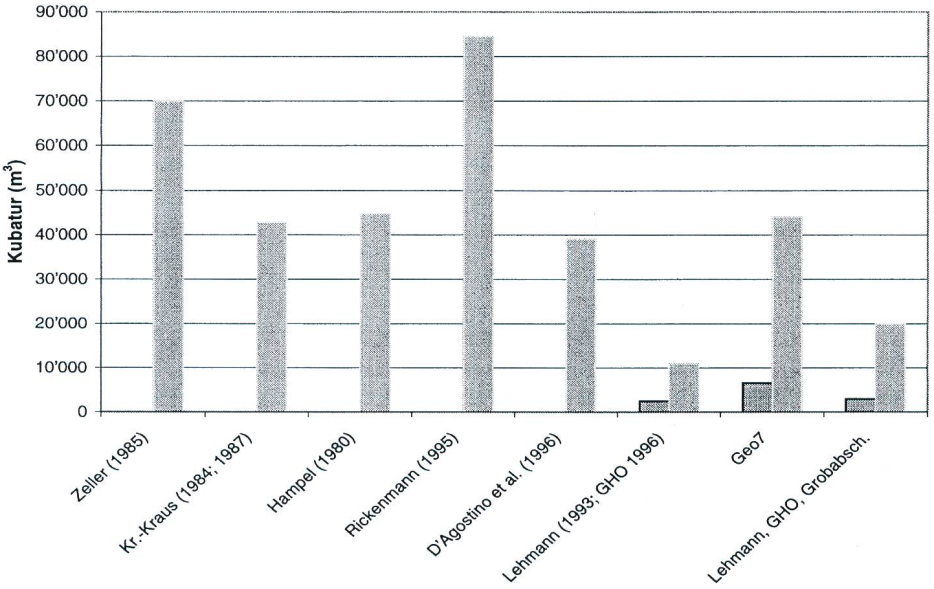

Bild 7. Ergebnisse der verschiedenen Verfahren zur Abschätzung der Feststoffkubatur im Steinibach, Kanton Luzern. Die Doppelwerte der beiden Verfahren GHO berücksichtigen verschiedene Szenarien. Der hohe Wert beim Verfahren Geo7 geht von einem Murgang aus, der tiefe Wert von einem geschiebeführenden Hochwasser.

Vielzahl von kleinen Bächen und Runsen. Die mittlere Gerinneneigung beträgt etwa 18 %.

Der Kegel weist ein Gefälle von 8 % auf. Der Bach ist hier kanalisiert und wird in einer offenen Schale in die Waldemme geführt. Auf dem Kegel selbst befinden sich wenige Wohnhäuser und einige Wirtschaftsgebäude. Die Kantonsstrasse nach Flühli überquert den Bach am unteren Kegelende. Der Steinibach machte in der letzten Zeit seinem Namen keine Ehre. Seit Jahrzehnten verursachte er keine nennenswerten Schäden.

4.2 Anwendung der Verfahren

Für die Vergleichbarkeit der in Kapitel 3 erwähnten Verfahren zur Berechnung der Feststofffracht sind die benötigten Grössen unten zusammengestellt.

Einzugsgebiet	E	= 4,4 km^2
Höhe am Kegelhals	H_u	= 840 m
Länge Erosionsgerinne	L_c	= 3000 m
Gefälle Gerinne	J_c	= 18 %
Abriebswert	s	= 0,66
Geologiewert	IG	= 3
100jährl. Eintagesniederschlag	h_{100}	= 135 mm
Abflussreduktion	ψ	= 0,4
Gefälle Kegel	J_f	= 8 %

Die Feststofffrachten aus den verschiedenen Berechnungsmethoden sind in Bild 7 dargestellt. Die Werte schwanken zwischen 2500 und 85000 m^3, was einem Faktor von 34 entspricht. Noch grösser würde die Diskrepanz der Ergebnisse, wenn die verschiedenen Ermessensspielräume dargestellt würden (in Bild 7 nicht berücksichtigt). Beispielsweise stellt sich bei der Formel von *Hampel* (1980) die Frage nach der Wahl der Parameter (ψ, s und I. Die Ergebnisse können bei unterschiedlichen, aber immer realistischen Annahmen der erwähnten Parameter zwischen etwa 20000 und 154000 m^3 variieren!

Die Ergebnisse in Bild 7 stellen einen Spiegel der verschiedenen Betrachtungsweisen dar (beispielsweise ergeben Formeln zur Berechnung der maximal möglichen Fracht eher hohe Werte). Im weiteren ist die regionale Beschränkung der Formeln nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse von Bild 7 belegen aber auch die noch herrschende Unsicherheit im Umgang mit der Geschiebeproblematik in Wildbächen.

5. Schlussfolgerungen

Die Beschäftigung mit dem Geschiebe in einem Wildbach setzt gute Kenntnisse der Prozesse und Zusammenhänge voraus. Auch wenn heute eine grössere Zahl von Verfahren zur Schätzung von Geschiebefrachten und von Geschiebetransport existiert, so bleibt ein wesentlicher Ermessensspielraum bestehen. Dieser kann mit zunehmender Erfahrung zwar nicht ausgeschaltet werden. Mit gut ausgebildetem Prozessverständnis kann aber die Qualität der Ergebnisse deutlich erhöht werden. Je einfacher die Verfahren sind, desto grösser muss die Vorsicht bei deren Anwendung sein. Verwendet man für Fragestellungen, bei welchen eine Abschätzung der Grössenordnung genügt, die wenig aufwendigen Verfahren, sollte nie nur ein einzelnes Verfahren angewendet werden. Je besser fundiert die Ergebnisse sein müssen, desto aufwendiger werden die durchzuführenden Arbeiten (Geländearbeit).

Die unterschiedlichen Ergebnisse für den Steinibach lassen die folgenden Konsequenzen daraus ableiten: Die Ergebnisse der einfachen Methoden liegen in einem Bereich von 40000 bis 70000 m^3, wenn der kleinste und grösste Wert weggelassen werden. Die aufwendigeren Verfahren (Geo7 und GHO, 1996) liefern je nach Szenario als Maximalwerte 21000 bis 44000 m^3 bzw. als Minimalwerte 3000 bis 6000 m^3. Falls man einmal im Steinibach Schutzmassnahmen erstellen müsste, sollte von einer Kubatur von etwa 15000 bis 20000 m^3 ausgegangen werden.

Dank

Die Untersuchungen im Steinibach wurden im Rahmen von Aufträgen des Tiefbauamtes des Kantons Luzern und des Bundesamtes für Wasserwirtschaft durchgeführt. Den beteiligten Fachleuten sei an dieser Stelle für die Zusammenarbeit bestens gedankt.

Literatur

D'Agostino, V., Cerato, M., Coali, R., 1996: Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino orientale. Interpraevent 1996, Bd. 1, p. 377–386.

GHO, 1996: Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. Mitt. der Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie (GHO) Nr. 4, Landeshydrologie und -geologie, Bern.

Geo7, 1997: Zur Abschätzung von Ereignisfrachten im Rotbach und Steinibach (LU). Gutachten für das Tiefbauamt des Kantons Luzern.

Hampel, R., 1980: Die Murenfracht von Katastrophenhochwässern. Wildbach- und Lawinenverbau, Dezember 1980, H 2, 71–102.

Hegg, C., 1996: Zur Erfassung und Modellierung von gefährlichen Prozessen in steilen Wildbacheinzugsgebieten. Geogr. Bernensia G52, Geogr. Inst. Univ. Bern.

Heinimann, H. R., et al., 1998: Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 85, Buwal, Bern.

Kienholz, H., et al., 1991: Geschiebelieferung durch Wildbäche. In: Ursachenanalyse der Hochwasser 1987. Ergebnisse der Untersuchungen. Mitt. des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4, p. 89–97.

Kienholz, H., et al., 1998: Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. NFP31 Schlussbericht. Vdf Verlag, Zürich.

Kölla, E., 1986: Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Mitteilung Nr. 87 der VAW-ETH, Zürich.

Kronfellner-Kraus, G., 1984: Extreme Feststofffrachten und Grabenbildungen von Wildbächen. Interpraevent 1984, Bd. 2, 109–118.

Lehmann, C., 1993a: Accurate Sediment Transport Assessment in Mountain Streams. Swiss National Committee of the UN International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR): Floods and Geological Hazards. 2.1–2.16, Bern.

Lehmann, C., 1993b: Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen. Grundlagen und Anleitung. Geographica Bernensia G42, Bern.

Meyer-Peter, E., Müller, R., 1948: Formulas for Bed-Load Transport. Second Meeting IAHR, Stockholm.

Rickenmann, D., 1990: Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitteilung Nr. 103 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich.

Rickenmann, D., 1995: Beurteilung von Murgängen. Schweizer Ingenieur und Architekt 48, 1104–1108.

Smart, G. M., Jaeggi, M., 1983: Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitt. Nr. 64, VAW-ETH, Zürich.

Zeller, J., 1985: Feststoffmessung in kleinen Gebirgseinzugsgebieten. wasser, energie, luft, vol. 77, Nr. 7/8, 246–251.

Zimmermann, M., 1989: Geschiebeaufkommen und Geschiebebewirtschaftung – Grundlagen zur Abschätzung des Geschiebehaushaltes im Emmental. Geogr. Bern. G34, Bern.

Zimmermann, M., Mani, P., Romang, H., 1997: Magnitude-frequency aspects of Alpine debris flows. Eclo. Geol. Helv., vol. 90, p. 415–420.

Adressen der Verfasser: *Markus Zimmermann*, Geo7 AG, Neufeldstrasse 3, CH-3012 Bern, mzimmermann@geo7.ch. *Christoph Lehmann*, Holzgasse 37, CH-3322 Schönbühl, ChrL@compuserve.com