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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 100 (2008)

Heft: 3

Artikel: Berechnungen zum Geschiebetransport während der Hochwasser 1993 und 2000 im Wallis

Autor: Badoux, Alexandre / Rickenmann, Dieter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939708

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: 12.07.2025

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

Berechnungen zum Geschiebetransport während der Hochwasser 1993 und 2000 im Wallis

■ *Alexandre Badoux, Dieter Rickenmann*

1. Einleitung

Formeln zur Abschätzung des Geschiebetransportes basieren weitgehend auf Experimenten in Laborrinnen. Bei solchen Versuchen wird im Prinzip ein ähnliches Transportverhalten für flachere und steilere Gerinnegefälle beobachtet (Rickenmann, 2001). Der Vergleich von Geschiebetransportmessungen in natürlichen Wildbächen und Gebirgsflüssen mit verschiedenen Formeln ergibt in vielen Fällen nur eine mässige oder schlechte Übereinstimmung (Gomez & Church, 1989). Für gegebene Abfluss- und Gerinneverhältnisse ist auch eine starke Variabilität des Geschiebetransportes zu beobachten. In natürlichen steilen Gerinnen kann eine begrenzte Verfügbarkeit von Geschiebe ein wichtiger Grund sein, weshalb im Vergleich zu Berechnungen mit Formeln für die Geschiebetransportkapazität kleinere Transportraten auftreten. Zudem sind Wildbäche und Gebirgsflüsse oft durch eine unregelmässige Gerinnegeometrie mit ausgeprägten Sohlenstrukturen charakterisiert. Die Kornrauigkeit der Geschiebekörner führt zusammen mit dem Formwiderstand infolge von Sohlenstrukturen, Krümmungen und Querschnittsänderungen (Formrauigkeit) zum gesamten Fliesswiderstand beim Gerinneabfluss. Die ausgeprägten Sohlenstrukturen können in steileren Gerinnen zu hohen Energieverlusten infolge von Formwiderstand führen, was die Geschiebetransportkapazität vermindert. Im vorliegenden Artikel wird untersucht, ob der Einbezug des Formwiderstandes bei der Anwendung einer einfachen Geschiebetransportformel die Resultate verbessert. Dabei wird für zwei bedeutende Hochwasserereignisse die Transportkapazität an verschiedenen Querschnitten in fünf Walliser Gebirgsflüssen *(Tabelle 1)* ermittelt und mit Beobachtungen im Feld verglichen.

2. Grundlagen zum Sedimenttransport

2.1 Berechnung der Geschiebetransportrate

Rickenmann (1991) leitete aus 252 Laborversuchen, die an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich von Meyer-Peter & Müller (1948), Smart & Jäggi (1983) und Rickenmann (1990) durchgeführt wurden, eine dimensionslose Geschiebetransportgleichung ab, die ein Gerinnegefälle von 0.0004 bis 0.20 abdeckt.

$$\Phi_b = 3.1\,(d_{90}/d_{30})^{0.2}\,\theta^{0.5}\,(\theta-\theta_c)\,Fr^{1.1}\,(s-1)^{-0.5} \qquad (1)$$

Dabei ist $\Phi_b = q_b\,[(s-1)\,g\,d_m^3]^{-0.5}$ die dimensionslose Geschiebetransportrate, q_b die volumetrische Geschiebetransportrate pro Einheitsbreite, $s = \rho_s/\rho$ das Verhältnis von Feststoffdichte (ρ_s) zur Dichte des Fluids (ρ), g die Gravitationsbeschleunigung, d_m die mittlere Korngrösse, d_{90} (bzw. d_{30}) die charakteristische Korngrösse des Bachbettmaterials, für welche 90% (bzw. 30%) des Materials feiner ist, $\theta = h\,S\,[(s-1)\,d_m]^{-1}$ die dimensionslose Sohlenschubspannung, θ_c die dimensionslose Schubspannung bei Beginn des Geschiebetransportes, h die Abflusstiefe, S das Gerinnegefälle (oder das Energieliniengefälle) und $Fr = v\,(g\,h)^{-0.5}$ die Froude-Zahl und v die mittlere Fliessgeschwindigkeit.

Werden die Definitionen für Φ_b und θ eingesetzt, die Kontinuitätsgleichung $q = v\,h$ verwendet (mit q als Abfluss pro Einheitsbreite), und der Exponent bei der Froude-Zahl Fr mit 1.0 angenähert (Rickenmann, 2001), lässt sich Gl. (1) in Gl. (2) umformen:

$$q_b = 3.1\,(d_{90}/d_{30})^{0.2}\,(q-q_c)\,S^{1.5}\,(s-1)^{-1.5} \qquad (2)$$

Dabei ist q_c der kritische Abfluss pro Einheitsbreite bei Beginn des Sedimenttransports. Mathematisch exakt wäre es, den Term q_c in Gl. (2) mit v/v_c zu multiplizieren (mit der kritischen Fliessgeschwindigkeit v_c, welche dem Abfluss für θ_c entspricht). Dies wird jedoch hier vernachlässigt, da für q_c meist eine empirische Funktion benutzt wird. Für Vergleiche mit anderen Geschiebetransportformeln und Abschätzmethoden kann Gl. (2) weiter vereinfacht werden. Für eine gleichförmige Geschiebemischung wird der Faktor $(d_{90}/d_{30})^{0.2}$ nach Smart & Jäggi (1983) durch den Wert 1.05 ersetzt, und für das Dichteverhältnis von Quarzsediment zu Wasser wird $s = 2.68$ gesetzt. Es ergibt sich die kompakte Gl. (3):

$$q_b = 1.5\,(q-q_c)\,S^{1.5} \qquad (3)$$

2.2 Berechnung des kritischen Abflusses bei Geschiebetransportbeginn

Der in Gl. (2) und (3) benötigte Wert für q_c kann mit einer empirischen Gleichung abgeschätzt werden:

$$q_{c,\min} = 0.065(s-1)^{1.67}\,g^{0.5}d_{50}^{1.5}\,S^{-1.12} \qquad (4)$$

Gl. (4) wurde von Bathurst et al. (1987) vorgeschlagen und von Rickenmann (1990) leicht modifiziert. Sie basiert auf Laborversuchen mit relativ einheitlichen Korngrössen und Gerinnegefällen von 0.0025 bis 0.20 und beschreibt Bedingungen in einem Bachbett ohne Deckschicht und ohne ausgeprägte Sohlstrukturen.

In Gebirgsflüssen kann eine Deckschicht vorhanden sein, wenn das feinere Geschiebematerial ausgespült wurde. Für den kritischen Abfluss beim Aufbrechen der Deckschicht (Beginn des Geschiebetransportes aus der Sohle) gibt Jäggi

(1992) folgende Beziehung für die dimensionslose Sohlenschubspannung $\theta_{c,D}$ an:

$$\theta_{c,D} = \theta_c \left[\frac{d_{m,D}}{d_m}\right]^{2/3} \approx \theta_c \left[\frac{d_{90}}{d_m}\right]^{2/3} \qquad (5)$$

Dabei ist $d_{m,D}$ der mittlere Korndurchmesser der Deckschicht und d_m der mittlere Korndurchmesser der Unterschicht; $d_{m,D}$ kann angenähert durch d_{90} der Unterschicht ersetzt werden (Jäggi, 1992). Unter Verwendung der Manning-Strickler Gleichung kann gezeigt werden, dass der Abfluss pro Einheitsbreite $q \sim h^{5/3} \sim \theta^{5/3}$ ist. Damit lässt sich der kritische Abfluss pro Einheitsbreite beim Aufbrechen der Deckschicht wie folgt ausdrücken:

$$q_{c,D} = q_{c,\min}\left[\left(\frac{d_{90}}{d_m}\right)^{2/3}\right]^{5/3} = q_{c,\min}\left[\frac{d_{90}}{d_m}\right]^{10/9} \qquad (6)$$

2.3 Bestimmung der Geschiebefracht eines Hochwasserereignisses

Werden statt der Geschiebetransportrate (q_b) und des Abflusses (q) pro Einheitsbreite die jeweiligen Werte über die gesamte Gerinnebreite (Q_b bzw. Q) eines Wildbaches oder eines Gebirgsflusses betrachtet, lässt sich Gl. (3) umformen zu:

$$Q_b = A\,(Q - Q_c)\,S^{1.5} \qquad (7)$$

Dabei stellt A einen empirischen Koeffizienten dar. Der Grenzabfluss bei Beginn des Geschiebetransportes Q_c berechnet sich analog aus dem kritischen Abfluss pro Einheitsbreite gemäss Gl. (4) oder (6) durch Multiplikation mit der Gerinnebreite B: $Q_{c,min} = B\,q_{c,min}$, $Q_{c,D} = B\,q_{c,D}$. Die Gl. (4) nach Bathurst et al. (1987) zur Berechnung von $Q_{c,min}$ repräsentiert Bedingungen in einem Gerinnebett ohne Deckschicht und liefert gewissermassen einen unteren Grenzwert. Die Gl. (6) zur Berechnung von $Q_{c,D}$ widerspiegelt die Abflussbedingungen beim Aufbrechen einer Deckschicht, und entspricht einem oberen Grenzwert.

Oft sind nur Angaben zur gesamten Geschiebefracht eines Hochwasserereignisses vorhanden, während der zeitliche Verlauf der Sedimentumlagerungen unbekannt ist. Zur Berechnung der Geschiebefracht lässt sich Gl. (7) über die Dauer eines Hochwasserereignisses integrieren:

$$G_E = A\,V_{re}\,S^{1.5} \qquad (8)$$

Dabei ist G_E die gesamte Geschiebefracht und V_{re} die so genannte effektive Wasserfracht. V_{re} entspricht der Integration der Abflussganglinie über dem Grenzabfluss Q_c über die Zeit (vgl. *Bild 1*). Grundsätzlich ist zu bemerken, dass bei Verwendung von $Q_{c,min}$ eine obere Grenze für die effektive Wasserfracht, $V_{re,1}$ berechnet wird (Fall i), und bei Verwendung von $Q_{c,D}$ eine untere Grenze, $V_{re,2}$ (Fall ii). Geht man nach Überschreiten von $Q_{c,D}$ von einer vollständigen Zerstörung der Deckschicht aus, so wäre relativ kurze Zeit später $Q_{c,min}$ für die Transportberechnung massgebend und die entsprechende Wasserfracht grösser als $V_{re,2}$. Neben der Verwendung von $V_{re,1}$ als obere Grenze für die effektive Wasserfracht wird hier im Sinne einer Vereinfachung als untere Grenze $V_{re,2}$ weiter betrachtet. Der Fall (ii) entspricht der Annahme, dass die Deckschicht nur teilweise zerstört wird oder dass eine mobile Deckschicht vorhanden ist. Die gestrichelte Linie in *Bild 1* illustriert die Situation einer vollständigen Zerstörung der Deckschicht, bei welcher relativ kurze Zeit nach Erreichen von $Q_{c,D}$ der untere Grenzabfluss $Q_{c,min}$ für die Transportberechnung massgebend wird.

Werden Geschiebefrachten aufgrund von Ablagerungen geschätzt (wie für die Auswertungen in Abschnitt 5), muss das Porenvolumen der Ablagerung berücksichtigt werden. Für den Koeffizienten A wird in Gl. (8) der aus den Laborversuchen

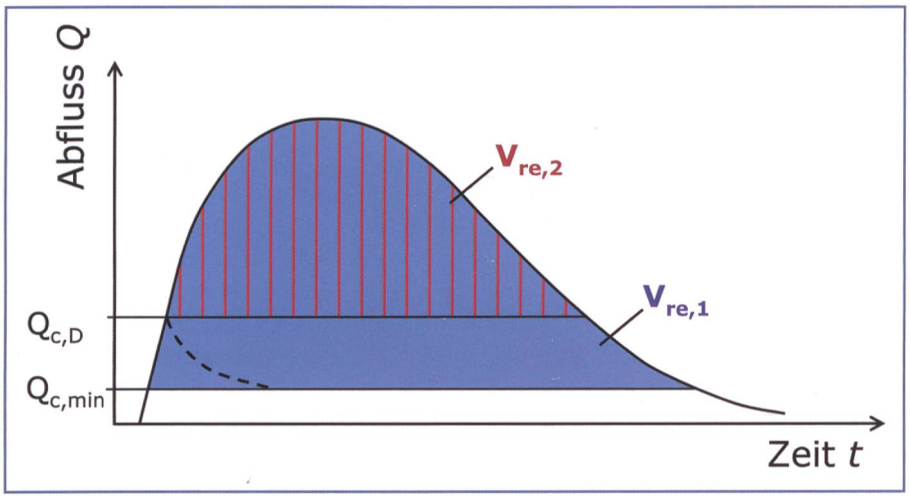

Bild 1. Zusammenhang zwischen Abflussganglinie und Transportberechnung. Illustriert sind zwei Hauptfälle: (i) Berechnung mit einem unteren Grenzabfluss $Q_{c,min}$ und der entsprechenden effektiven Wasserfracht $V_{re,1}$, sowie (ii) Berechnung mit dem kritischen Abfluss $Q_{c,D}$ und der entsprechenden effektiven Wasserfracht $V_{re,2}$.

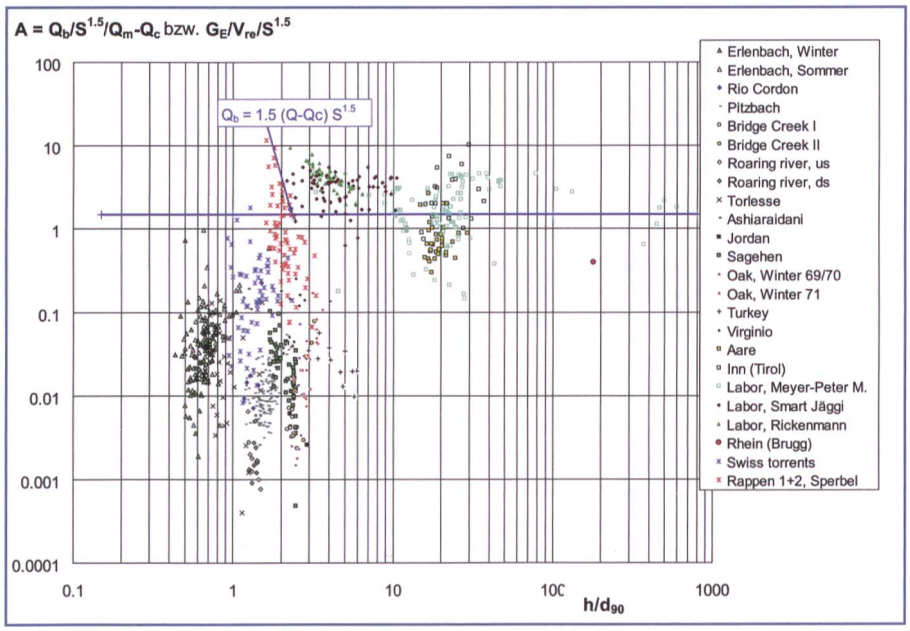

Bild 2. Der Koeffizient A (Gl. 7 und 8) ist aus weltweiten Beobachtungen zu Geschiebetransport und Abfluss berechnet und in Abhängigkeit der relativen Abflusstiefe h/d_{90} aufgetragen (modifiziert nach Rickenmann, 2001). Insbesondere bei kleinen Werten von h/d_{90} liegt A zum Teil deutlich unter 1.5 (Wert gemäss Gl. [3], welche hier durch die blaue Linie dargestellt ist).

abgeleitete Wert 1.5 verwendet. Unter Berücksichtigung eines typischen Porenvolumens in den Ablagerungen von 30% ergibt sich ein entsprechend modifizierter Wert für A von 1.95 in Gl. (9):

$$G_{ber} = 1.3^{\times}\ 1.5\ V_{re}S^{1.5} = 1.95\ V_{re}S^{1.5} \qquad (9)$$

Dabei entspricht G_{ber} der berechneten Geschiebefracht unter Berücksichtigung des Porenvolumens.

In *Bild 2* sind die aus beobachteten Messungen zum Geschiebetransport (ohne Porenvolumen) mit Gl. (7) und (8) abgeleiteten Werte für den Koeffizienten A in Funktion der relativen Abflusstiefe h/d_{90} dargestellt, welche mit dem aus den Laborversuchen abgeleiteten Wert 1.5 verglichen werden können.

Die Geschiebedaten aus natürlichen Wildbächen und steilen Gebirgsflüssen zeigen bei kleineren relativen Abflusstiefen eine grosse Streuung sowie deutlich geringere Werte für den Koeffizienten A im Vergleich zur vereinfachten Transportformel *(Bild 2)*, d.h. geringere Geschiebefrachten als nach den Berechnungen zu erwarten wären. Diese Abweichung ist vermutlich von einer begrenzten Geschiebeverfügbarkeit und nicht berücksichtigtem Formwiderstand verursacht (Rickenmann, 2001). Tatsächlich ist in steilen natürlichen Gerinnen mit unregelmässiger Sohlenstruktur und geringer Abflusstiefe die Formrauigkeit ein wichtiger Faktor und sollte neben der Kornrauigkeit explizit berücksichtigt werden.

2.4 Berücksichtigung des Formwiderstandes

Nach Wong & Parker (2006) kann in Analogie zu einem Ansatz von Meyer-Peter & Müller (1948) der Manning-Strickler-Koeffizient n_r, der sich ausschliesslich auf die Kornrauigkeit des Sohlenmaterials bezieht, wie folgt definiert werden:

$$\frac{1}{n_r} = \frac{23.2}{d_{90}^{1/6}} \qquad (10)$$

Der gesamte Fliesswiderstand (bedingt durch Form- und Kornrauigkeit) kann für steile natürliche Gerinne mit $S > 0.008$ nach Rickenmann (1996) wie folgt berechnet werden:

$$\frac{1}{n_{tot}} = \frac{0.97\ g^{0.41}\ Q^{0.19}}{S^{0.19}\ d_{90}^{0.64}} \qquad (11)$$

Dabei ist n_{tot} der Manning-Strickler-Koeffizient für die Gesamtrauigkeit. Durch die Division von Gl (11) durch (10) kann das relative Verhältnis zwischen der Kornrauigkeit (die für den Geschiebetransport zur Verfügung steht) und der Gesamtrauigkeit angegeben werden. Dies ergibt eine einfache Abschätzung des Anteils der Kornrauigkeit an der Gesamtrauigkeit in Gebirgsflüssen und Wildbächen (Chiari & Rickenmann, 2007):

$$\frac{n_r}{n_{tot}} = \frac{0.133\ Q^{0.19}}{g^{0.096}\ S^{0.19}\ d_{90}^{0.47}} \qquad (12)$$

Der Beitrag der Formrauigkeit zur gesamten Rauhigkeit entspricht dabei der Differenz $(1 - n_r/n_{tot})$. Das Verhältnis n_r/n_{tot} ist in *Bild 3* für Daten aus Rickenmann (1996) dargestellt. Es kann alternativ auch als Funktion der relativen Abflusstiefe formuliert werden (Rickenmann et al. 2006).

Es lässt sich nun der Anteil S_{red} am gesamten Energieliniengefälle S bestimmen, welcher ausschliesslich der Kornreibung zuzuordnen ist:

$$S_{red} = S\left[\frac{n_r}{n_{tot}}\right]^a \qquad (13)$$

Gemäss der Fliessformel von Manning-Strickler ($n = R_h^{0.67}\ S^{0.5}\ v^{-1}$, mit R_h als hydraulischem Radius) ist das Energieliniengefälle S proportional zum Manning-Strickler-Koeffizienten im Quadrat. Meyer-Peter & Müller (1948) gingen jedoch davon aus, dass der Exponent in Gl. (13) auch andere Werte annehmen kann. Aufgrund ihrer Experimente schlugen sie einen Exponenten $a = 1.5$ vor. Wir gehen davon aus, dass plausible Werte für a im Bereich von $1 \leq a \leq 2$ liegen.

3. Untersuchte Hochwasserereignisse

3.1 Das Hochwasser vom September 1993 in Brig-Glis

Am Nachmittag des 24. September 1993 wuchs der Abfluss auf dem Kegel der Saltina bis auf 70 m^3/s^{-1} an. In der Folge wurden beträchtliche Geschiebemengen in den Bereich der Saltinabrücke in Brig befördert, welche im Grindji ab einem Grenzabfluss von 40 bis 50 m^3/s^{-1} mobilisiert wurden. Bei einer Zufuhr von 1 bis 1.5 t s^{-1} begann sich das Geschiebe unter der Brücke abzulagern, was auf ein lokal flacheres Gerinnegefälle zurückzuführen ist. Mit zunehmender Mächtigkeit der abgelagerten Feststoffe nahm die Transportkapazität in der Saltina ab, und es bildete sich unterhalb des Absturzes vor der Brücke eine Rampe. Diese gewann in der Folge schnell an Höhe und Länge (flussabwärts). Etwas später erreichte der Wasserspiegel die Unterkante der Brücke und kurz danach bei fortschreitender Ablagerung auch deren Oberkante. Durch den Aufprall des Wassers bildete sich ein Aufstau, der zum weiteren Anstieg des Wasserspiegels führte. Das Wasser floss zunehmend auf die Brücke und seitlich ab. Im Gerinne unterhalb der Brücke hingegen nahm der Abfluss ab, was wiederum die Ablagerung förderte, den Fliessquerschnitt reduzierte, die Wasseraufstauung erhöhte und somit die Ausuferung verstärkte. Diese Prozessabfolge intensivierte sich selber weiter. Schliesslich kam es zur grossräumigen Überschwemmung und Übersarung der Stadtteile Brig und Glis. Dem Geschiebe

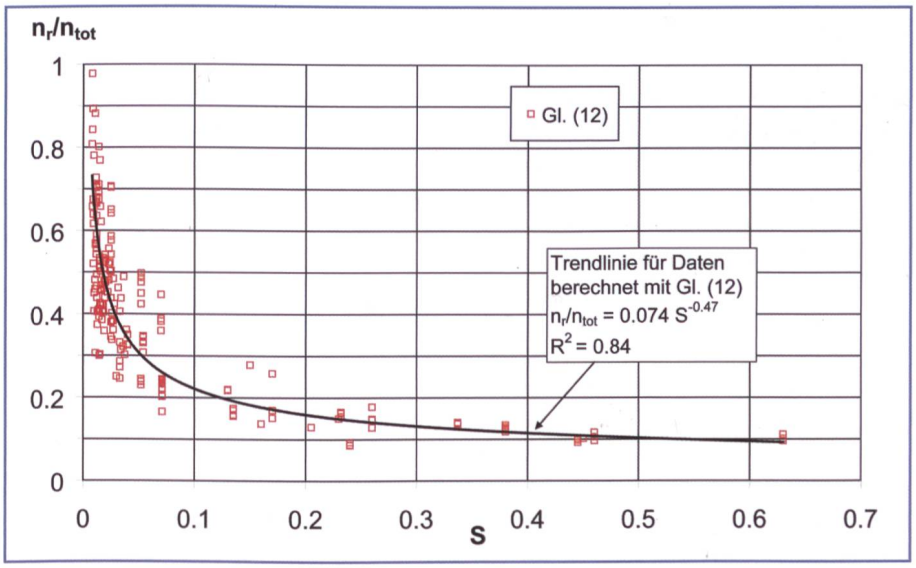

Bild 3. Verhältnis der Reibungsverluste infolge Kornrauigkeit zu den gesamten Reibungsverlusten (inkl. Formwiderstand) für Daten aus Rickenmann (1996) in Abhängigkeit des Gerinnegefälles S (Chiari & Rickenmann, 2007). Gl. (12) kann bei kleinen Gefällen zu unplausiblen Werten $n_r/n_{tot} > 1$ führen, wie der steile Verlauf der Daten andeutet.

Bild 4. Beim Hochwasserereignis vom 15. Oktober 2000 in Baltschieder (Kt. Wallis) wurde im Dorfbereich viel Geschiebe abgelagert (Foto: Archiv BWG/BAFU). Dank rechtzeitiger Evakuierung des Dorfes kamen bei diesem Ereignis keine Personen zu Schaden.

Bild 5. Die Saltina während des Hochwassers vom 15. Oktober 2000 in Brig (Kt. Wallis). Die im Anschluss an die schweren Verwüstungen vom 24. September 1993 ausgeführten baulichen Schutzmassnahmen (z.B. Hubbrücke, demontierbare Stege) bewährten sich: die Stadt Brig-Glis blieb im Oktober 2000 von Überflutungen und Geschiebeablagerungen weitgehend verschont (Foto: Ingenieurbüro wasser/schnee/lawinen, Brig-Glis).

kommt bei diesem Unwetterereignis im Hinblick auf die Schäden eine Schlüsselrolle zu. Das Saltina-Hochwasser vom 24. September 1993 ist in Bezzola et al. (1994) ausführlich rekonstruiert und analysiert.

Das Ereignis forderte zwei Todesopfer. Das Bahnhofsareal sowie zahlreiche Strassenzüge wurden mit Geröll und feinerem Material zum Teil meterhoch zugedeckt. Immense Schäden entstanden an Hunderten von Gebäuden, Infrastrukturanlagen und vielen in der Stadt parkierten Fahrzeugen. Nach dem Ereignis mussten 30 000 m^3 grobes Geschiebematerial aus der Stadt geräumt werden. Das Unwetter im September im Oberwallis führte zu Schäden von rund CHF 750 Millionen. Neben dem Schadenschwerpunkt in der Stadt Brig-Glis waren auch die Simplon-Südseite sowie das Saas- und das Mattertal stark betroffen (Röthlisberger, 1994).

3.2 Das Hochwasser vom Oktober 2000 im Kanton Wallis

Am 14. und 15. Oktober 2000 ereignete sich auf der Alpensüdseite sowie in Teilen des südwestlichen Alpenraumes ein bedeutendes Unwetter. Der Schwerpunkt der Niederschläge lag südlich des Alpenkamms im Piemont. In der Schweiz waren die Kantone Wallis und Tessin am schwersten betroffen. Das Ereignis verursachte in der Schweiz finanzielle Schäden in der Höhe von ungefähr CHF 710 Millionen, wobei rund 70% davon im Kanton Wallis entstanden (BWG, 2002).

Aus hydrologischer Sicht stellt das Hochwasser vom 14./15. Oktober 2000 das grösste Ereignis im Kanton Wallis im 20. Jahrhundert dar. Das gesamte Einzugsgebiet der Rhone oberhalb des Genfersees war von den ausgiebigen Niederschlägen betroffen, und an einigen Messstationen wurden Höchstwerte aufgezeichnet. Infolge der intensiven und andauernden Regenfälle traten im Wallis viele verschiedene Schadensprozesse auf. In der Rhoneebene standen nach Dammbrüchen (z.B. in Chamoson) und aufgrund hydraulischer Kapazitätsengpässe insgesamt zeitweise über 1000 ha unter Wasser. Murgänge traten vor allem in den Vispertälern auf. Wo hohe Niederschlagsintensitäten zu verzeichnen waren, ereigneten sich zahlreiche Rutschungen und Hangmuren. Das verheerendste Einzelereignis zerstörte in Gondo am Simplonpass zehn Gebäude, wobei 13 Personen ums Leben kamen (BWG, 2002).

Im Weiteren kam es in den Hochwasser führenden seitlichen Zuflüssen der Rhone zu beträchtlichen Sedimentumlagerungen. Grosse Probleme traten jeweils bei abnehmendem Energieliniengefälle im Übergang vom Seitental ins Haupttal auf, wo verschiedene Wildbäche und Gebirgsflüsse grosse Geschiebemengen ablagerten. Das vielleicht bekannteste Beispiel dafür ist der Baltschiederbach (Jäggi et al., 2004). Am Ausgang der oberhalb der Ortschaft Baltschieder liegenden Schlucht (Gefällsknick im Längenprofil) kam es am Morgen des 15. Oktober zur Ausuferung des Baltschiederbaches, nachdem das bestehende Rückhaltebecken überlastet war. In der Folge wurden im Dorf rund 160 000 m^3 Material abgelagert, was massive Schäden nach sich zog *(Bild 4)*. Weitere problematische Situationen infolge grosser Sedimentumlagerungen ergaben

Einzugsgebiet	Grösse [km^2]	Höhenbereich [1] [m ü.M.]	Mittl. Höhe [m ü.M.]	Ereignis	Spitzenabfluss [2] [$m^3 s^{-1}$]	Quellen
Baltschiederbach	43	647-3934	2280	2000	~ 100	a, b
Saltina	78	670-3438	2050	1993	75-90	c, d, e, f
Saltina				2000	~ 120	g
Lonza	170	630-3994	2380	2000	90-95	h, i, j
Gamsa	38	660-3391	2220	2000	65-70	k
Grosses Wasser	47	830-3930	2140	2000	~ 360	l

Quellen: a) Jäggi et al. (2004); b) Jordan et al. (2003); c) Bezzola et al. (1994); d) VAW (1994); e) VAW (1993); f) Schälchli & Abegg (1998); g) Burkard & Jäggi (2003); h) Geoplan, Pronat, Hunziker & Zarn, Geo7 (2000); i) Abgottspon et al. (2001); j) Seiler (2003); k) Bodenmann & Meile (2003); l) Dussex (2002)

[1] Tiefster Punkt jeweils bei der Mündung in den Vorfluter.

[2] Gemäss den Quellen gemessene (Saltina, 2000) oder abgeschätzte (übrige Ereignisse) Spitzenwerte in den Siedlungsgebieten von Brig (Saltina), Gampel-Steg (Lonza), Baltschieder (Baltschiederbach), beim Schluchtausgang der Gamsa und beim Staubecken Sera (Grosses Wasser).

Tabelle 1. Einige Charakteristiken der untersuchten Gebirgsflüsse und Literaturangaben zu Studien über die betrachteten Hochwasserereignisse.

Bild 6. Massive Geschiebeablagerungen beim Rückhaltebecken des Stauwehrs Fäh am Grossen Wasser (Zwischbergental, Kt. Wallis) als Folge des Hochwassers vom 15. Oktober 2000 (Foto aus Dussex, 2002).

Einzugsgebiet	Ereignis	Querschnitt (Kote, m ü.M.)	S [-]	d_{50} [m]	d_{90} [m]	b [m]	Quellen
Baltschiederbach	2000	Kegelhals (Kote 670)	0.150	0.72	0.110	10	a, b
Saltina	1993	Grund (Kote 1060)	0.050	0.46	0.102	12	a, c
	1993	Grindji (Kote 730-755)	0.033	0.25	0.064	15	a, d, e
	2000	Grindji (Eintrag; Kote 755)	0.043	0.23	0.064	15	a, e, f, g
	2000	Grindji (Austrag; Kote 730)	* 0.027	0.23	0.064	15	a, e, f, g
Gamsa	2000	Kote 880	0.147	0.56	0.113	12	a, h
	2000	Kote 810	0.082	0.51	0.094	15	a, h
	2000	Kote 750	0.069	0.58	0.116	15	a, h
Lonza	2000	Klösterli (Kote 760)	0.040	0.35	0.064	10	i, k
	2000	Kraftwerk (Kote 645)	0.021	0.40	0.066	10	i, j, k
Grosses Wasser	2000	oberhalb Staubecken Fäh (Kote 1760)	0.042	0.21	0.060	15	a
	2000	bei Brend (Kote 1360)	0.071	0.29	0.090	15	a, l
	2000	oberhalb Staubecken Sera (Kote 1280)	0.032	0.21	0.06	15	a, l, m

Quellen: a) eigene Abschätzungen und Analysen; b) mündl. Mitteilung P. Teysseire; c) Schälchli & Abegg (1998); d) VAW (1993); e) Jäggi (2001); f) Burkard & Jäggi (2003); g) mündl. Mitteilung A. Burkard; h) LCH-EPFL (2003); i) VAW (1995); j) Abgottspon et al. (2001); k) mündl. Mitteilung J. Seiler; l) Dussex (2002); m) BWG (2002)

* Gerinnegefälle gemessen nach dem Ereignis (gemäss einer groben Abschätzung könnte dieses Gerinnegefälle nach ca. der halben Ereignisdauer erreicht worden sein).

Tabelle 2. Gerinneparameter der Schlüsselstrecken in den untersuchten Einzugsgebieten mit Quellenangaben; die Lage des Querschnittes (Kote) bezieht sich auf das untere Ende der jeweiligen Schlüsselstrecke.

Einzugsgebiet	Ereignis	Querschnitt	$Q_{c,min}$ [$m^3 s^{-1}$]	$Q_{c,D}$ [$m^3 s^{-1}$]	V_{re} ($Q_{c,min}$) [$10^6 m^3$]	V_{re} ($Q_{c,D}$) [$10^6 m^3$]	G_{beo} [m^3]	Quellen
Baltschiederbach	2000	Kegelhals	1.43	11.6	3.26	2.10	120000	a
Saltina	1993	Grund	5.26	28.0	2.88	0.67	60000	b
	1993	Grindji	5.21	23.7	4.11	1.80	30000	b, c
	2000	Grindji (Eintrag)	3.87	16.0	15.99	11.07	85000	d
	2000	Grindji (Austrag)	6.52	27.0	14.74	8.18	* 25000	d
Gamsa	2000	Kote 880	1.83	10.9	5.72	3.54	160000	e
	2000	Kote 810	3.34	21.9	5.17	2.13	130000	e
	2000	Kote 750	5.56	33.3	4.57	1.14	140000	e
Lonza	2000	Klösterli	2.82	18.3	6.27	3.49	34000	f
	2000	Kraftwerk	6.08	44.3	6.37	1.77	34000	f
Grosses Wasser	2000	oberhalb Staubecken Fäh	3.61	14.5	7.97	5.32	25000	g
	2000	bei Brend	3.68	13.5	13.97	11.46	45000	g
	2000	oberhalb Staubecken Sera	4.89	19.7	17.59	13.88	100000	g

Quellen für die beobachteten Geschiebeablagerungen: a) Jäggi et al. (2004); b) Schälchli & Abegg (1998); c) Bezzola et al. (1994); d) Burkard & Jäggi (2003); e) Meile et al. (2005); f) Abgottspon et al. (2001); g) Dussex (2002)

* Berechnet basierend auf einem Gerinnegefälle von 1.5 % (Burkard & Jäggi, 2003).

Tabelle 3. Berechnete kritische Abflüsse Q_c und resultierende effektive Wasserfrachten V_{re}. In der vorletzten Spalte sind die Geschiebefrachten G_{beo} angegeben, welche in den Schlüsselstrecken transportiert wurden. Diese wurden anhand der beobachteten Geschiebeablagerungen sowie zusätzlichen Informationen aus den Quellen ermittelt.

sich z.B. an der Gamsa, Lonza, Kelchbach, Saltina *(Bild 5)*, Doveria, am Grossen Wasser *(Bild 6)* und an der Drance (BWG, 2002).

Die Auswirkungen des Unwetters vom Oktober 2000 in den fünf in diesem Artikel untersuchten Einzugsgebieten *(Tabelle 1)* werden hier nicht detailliert beschrieben. Einzelheiten können der Hochwasseranalyse (Fallbeispiele in BWG, 2002) entnommen werden, welche im Anschluss an die schweren Unwetter vom damaligen Bundesamt für Wasser und Geologie BWG (heute BAFU) und der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL in Zusammenarbeit mit den Walliser Kantonsbehörden und lokalen Ingenieurbüros erarbeitet wurde.

4. Datengrundlage

Die Abschätzung der Geschiebefrachten während der Ereignisse im September 1993 und Oktober 2000 wurde für die Bäche Baltschiederbach, Saltina, Gamsa, Lonza und Grosses Wasser durchgeführt. In Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Angaben zu den beobachteten Geschiebefrachten erfolgte die Berechnung des Geschiebetransportes für einen oder mehrere ausgewählte Querschnitte bzw. Gerinneabschnitte. Massgebend für die Berechnung ist der Gerinneabschnitt mit dem kleinsten Gerinnegefälle, welcher für den Geschiebetransport limitierend wirkt. Dieser Abschnitt wird als Schlüsselstrecke bezeichnet. Die entsprechenden Gerinneabschnitte und die für die Berechnung benötigten Gerinneparameter sind in *Tabelle 2* aufgelistet.

In Gerinnestrecken mit ähnlicher Gerinnerauigkeit und ähnlichem Abfluss entspricht die Schlüsselstrecke dem Abschnitt mit dem geringsten Gerinnegefälle. Es ist jedoch auch möglich, dass ein etwas steilerer Abschnitt mit grösserer Gerinnerauigkeit und grösserem Formwiderstand die geringste Geschiebetransportkapazität aufweist. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde vom Prinzip des geringsten Gerinnegefälles ausgegangen; die angesprochene Frage ist Thema von Folgeuntersuchungen.

Für die Bestimmung der effektiven Wasserfracht V_{re} (das Abflussvolumen über dem kritischen Abfluss) sind Informationen zum Verlauf des Abflusses während der betrachteten Hochwasserereignisse notwendig. Gemessene Ganglinien standen nur vereinzelt zur Verfügung. Für die meisten Einzugs-

gebiete konnte jedoch auf berechnete bzw. rekonstruierte Abflussganglinien aus früheren Untersuchungen zurückgegriffen werden. Die zur Berechnung der Geschiebefrachten an den untersuchten Querschnitten verwendeten effektiven Wasserfrachten V_{re} sind in *Tabelle 3* angegeben. Detailliertere Angaben zu den Grundlagen und Berechnungen sind in Badoux & Rickenmann (2008) gegeben.

5. Resultate

5.1 Geschiebefrachten

Zur Berechnung der Geschiebefrachten wird Gl. (9) nach Rickenmann (2001) verwendet. Die effektive Wasserfracht V_{re} entspricht der Integration der Abflussganglinie über dem Grenzabfluss Q_c über die Zeit. Für die Ermittlung von Q_c bei Beginn des Sedimenttransportes werden Gl. (4) und (6) sowie die in *Tabelle 2* aufgeführten Eingabewerte verwendet. Bei den Geschiebetransportberechnungen wird als massgebendes Gefälle das Gerinnegefälle der Schlüsselstrecke eingesetzt.

Die beobachteten Geschiebefrachten *(Tabelle 3)* dienen als Grundlage für den Vergleich mit den berechneten Geschie-

Einzugsgebiet	Ereignis	Querschnitt	G_{ber} [m³]		G_{ber} (mit Berücksichtigung des Formwiderstandes) [m³]					
		Fall	A	B	C	D	E	F	G	H
		basierend auf	($Q_{c,min}$)	($Q_{c,D}$)	($Q_{c,min}$) a=1	($Q_{c,min}$) a=1.5	($Q_{c,min}$) a=2	($Q_{c,D}$) a=1	($Q_{c,D}$) a=1.5	($Q_{c,D}$) a=2
Baltschiederbach	2000	Kegelhals	370000	238000	76600	34800	15900	59700	29900	15000
Saltina	1993	Grund	62900	14700	22300	13300	7920	5970	3810	2430
	1993	Grindji	48000	21000	32000	26100	21300	15300	13100	11200
	2000	*Grindji (Eintrag)*	*278000*	*192000*	*188000*	*154000*	*127000*	*143000*	*124000*	*107000*
	2000	*Grindji (Austrag)* (1), (2)	*127000*	-	-	-	-	-	-	-
	2000	Eintrag-Austrag	151000	-	-	-	-	-	-	-
Gamsa	2000	Kote 880	628000	389000	127000	56800	25500	96200	47800	23800
	2000	Kote 810	237000	97700	63500	32900	17000	32500	18700	10800
	2000	Kote 750	161000	40100	44400	23300	12200	13400	7770	4490
Lonza	2000	Klösterli	97700	54500	47400	33100	23000	29600	21800	16100
	2000	Kraftwerk (3)-	37800	-	-	-	-	-	-	-
Grosses Wasser	2000	oberhalb Staubecken Fäh	134000	89200	94900	79900	67300	66300	57100	49300
	2000	bei Brend	516000	423000	291000	218000	164000	240000	181000	136000
	2000	oberhalb Staubecken Sera	196000	154000	186000	182000	177000	147000	144000	141000

(1) Basierend auf einem Gerinnegefälle von 2.7 % nach dem Ereignis (mit einem Gerinnegefälle von 1.5 % vor dem Ereignis ergäbe sich ein Austrag von rund 2/3 der hier angegeben Werte).

(2) Für den Austrag aus dem Ablagerungsraum Grindji wird angenommen, dass während des Ereignisses keine Deckschicht vorhanden war (primär Auflandungen).

(3) Die Gerinnesohle unterhalb des Kraftwerkes konnte nicht untersucht werden (hohe Abflusstiefen), daher wurden keine Deckschicht- und Formwiderstandsberechnungen durchgeführt.

Tabelle 4. Anhand der Gl. (9) ermittelte absolute Werte der Geschiebefrachten in den Untersuchungsgebieten. Für die Fälle C bis H wurde für die Berechnung von n_r/n_{tot} der über das Hochwasser gemittelte Abfluss Qm verwendet.

Einzugsgebiet	Ereignis	Querschnitt	G_{ber}/G_{beo}		G_{ber}/G_{beo} (mit Berücksichtigung des Formwiderstandes)					
		Fall	A	B	C	D	E	F	G	H
		basierend auf	($Q_{c,min}$)	($Q_{c,D}$)	($Q_{c,min}$) a=1	($Q_{c,min}$) a=1.5	($Q_{c,min}$) a=2	($Q_{c,D}$) a=1	($Q_{c,D}$) a=1.5	($Q_{c,D}$) a=2
Baltschiederbach	2000	Kegelhals	3.08	1.98	0.64	0.29	0.13	0.50	0.25	0.12
Saltina	1993	Grund	1.05	0.24	0.37	0.22	0.13	0.10	0.06	0.04
	1993	Grindji	1.60	0.70	1.07	0.87	0.71	0.51	0.44	0.37
	2000	*Grindji (Eintrag)*	*3.27*	*2.26*	*2.21*	*1.82*	*1.49*	*1.69*	*1.46*	*1.26*
	2000	*Grindji (Austrag)*	*5.10*	-	-	-	-	-	-	-
	2000	Eintrag-Austrag	2.51	-	-	-	-	-	-	-
Gamsa	2000	Kote 880	3.93	2.43	0.79	0.36	0.16	0.60	0.30	0.15
	2000	Kote 810	1.82	0.75	0.49	0.25	0.13	0.25	0.14	0.08
	2000	Kote 750	1.15	0.29	0.32	0.17	0.09	0.10	0.06	0.03
Lonza	2000	Klösterli	2.87	1.60	1.40	0.97	0.68	0.87	0.64	0.47
	2000	Kraftwerk	1.11	-	-	-	-	-	-	-
Grosses Wasser	2000	oberhalb Staubecken Fäh	5.35	3.57	3.80	3.20	2.69	2.65	2.29	1.97
	2000	bei Brend	11.46	9.39	6.46	4.85	3.64	5.33	4.02	3.03
	2000	oberhalb Staubecken Sera	1.96	1.54	1.86	1.82	1.77	1.47	1.44	1.41
Median *me* (1)			2.42	1.57	0.93	0.61	0.42	0.56	0.37	0.26
Mittelwert *mw* (1)			3.43	2.25	1.72	1.30	1.01	1.24	0.96	0.77
Standardfehler s_e (1, 2)			0.32	0.50	0.36	0.41	0.47	0.53	0.56	0.60

(1) Für die Berechnung der statistischen Grössen (*me*, *mw*, s_e) bzgl. G_{ber}/G_{beo} wurde das Transportereignis an der Saltina im Jahre 2000 nicht berücksichtigt.

(2) Berechnung erfolgt anhand des Vergleiches von logarithmierten Werten der berechneten und beobachteten Geschiebefrachten.

Tabelle 5. Quotient der anhand Gl. (9) berechneten und der im Feld beobachteten Geschiebefrachten G_{ber}/G_{beo}.

befrachten *(Tabelle 4)*. Im Folgenden werden Resultate zu acht Berechnungsfällen A bis H dargestellt. Neben der Berücksichtigung von zwei Ansätzen zur Bestimmung des Grenzabflusses Q_c wird zusätzlich der Einfluss des Formwiderstandes auf die berechneten Geschiebefrachten untersucht. Dazu wird gemäss Gl. (12) und (13) das reduzierte Energieliniengefälle S_{red} bestimmt, welches ausschliesslich auf die Kornrauigkeit zurückzuführen und für den Geschiebetransport massgebend ist. Für die Bestimmung des reduzierten Energieliniengefälles werden in Gl. (13) für den Exponenten a die Werte 1, 1.5 und 2 eingesetzt *(Tabelle 4)*. Dies ermöglicht es, den Einfluss dieses Ansatzes abzuschätzen.

Bei der Anwendung von Gl. (12) werden im Sinne einer Sensitivitätsbetrachtung zwei Vorgehen unterschieden: (a) Verwendung eines mittleren Abflusses Q_m, berechnet aus der Ganglinie für die Zeit $Q > Q_c$, und (b) zeitlich variable Bestimmung von n_r/n_{tot} unter Verwendung des jeweiligen Abflusses Q für jeden Zeitschritt der Ganglinie. Die Resultate zeigen nur geringe Unterschiede der berechneten Geschiebefrachten für die Vorgehensweisen (a) und (b), welche mehrheitlich im Bereich von bis zu 15% liegen. Die genauere Berechnungsart mittels der Abflussganglinie führt dabei systematisch zu leicht höheren Werten. In Anbetracht der generellen Unsicherheiten bei der Berücksichtigung des Formwiderstandes werden hier nur die Resultate der Berechnungen nach dem Vorgehen (a) vorgestellt.

5.2 Vergleich der berechneten und beobachteten Geschiebefrachten

Für den Vergleich wird angenommen, dass die Angaben zu den beobachten Geschiebefrachten einen Porenanteil von ca. 30% beinhalten, der auch in den berechneten Geschiebefrachten berücksichtigt ist. In *Tabelle 5* sind für die acht verschiedenen Berechnungsfälle A bis H die Quotienten von berechneten zu beobachteten Geschiebefrachten $R = G_{ber}/G_{beo}$ dargestellt. Zusätzlich sind in *Tabelle 5* Mittelwert, Median und Standardfehler für die betrachteten Berechnungsfälle angegeben. Am aussagekräftigsten sind der Median *me* sowie der relative Standardfehler s_e, definiert als Standardabweichung zwischen berechneten und beobachteten Werten (RMSE) dividiert durch den Mittelwert der beobachteten Werte.

Generell kann festgestellt werden, dass die Kombination von $Q_{c,D}$ und Berücksichtigung des Formwiderstandes (für alle untersuchten Exponenten a = 1, 1.5, 2; Fälle F, G, H) zu einer mehr oder weniger deutlichen Unterschätzung der beobachteten Geschiebefrachten führt. Eine Ausnahme bilden die berechneten Geschiebefrachten für das Grosse Wasser, welche in allen Fällen zu Überschätzungen führen.

Bei Verwendung des einfachsten Ansatzes mit $Q_{c,min}$ (Fall A) ergibt sich eine Überschätzung der beobachteten Geschiebefrachten *(Bild 7a)*, im Mittel um rund 240%. Die Verwendung von $Q_{c,D}$ (Fall B) führt zu einer besseren Übereinstimmung zwischen berechneten und beobachteten Geschiebefrachten; Median und Mittelwert sind besser als für Fall A, während der Standardfehler grösser ist *(Tabelle 5)*. Die Abweichung vom beobachteten Wert ist für Fall A bei 6 von 14 Datenpunkten und für Fall B bei 4 von 11 Datenpunkten grösser als ein Faktor 3. In beiden Fällen werden die Geschiebefrachten bei grösseren Gerinnegefällen tendenziell überschätzt.

Verwendet man den Grenzabfluss $Q_{c,min}$ und berücksichtigt man den Formwiderstand mit einem Exponenten a = 1 (Fall C), ergibt sich eine ähnlich gute Übereinstimmung zwischen berechneten und

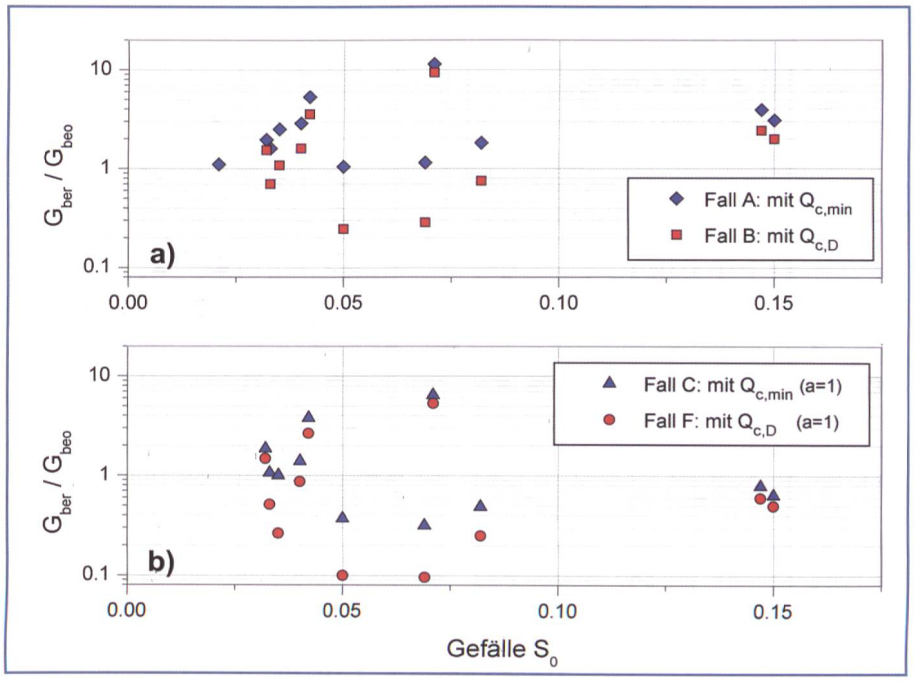

Bild 7. Verhältnis G_{ber}/G_{beo} in Abhängigkeit des Gerinnegefälles für die Fälle A und B (obere Grafik) und für die Fälle C und F (untere Grafik); die Daten sind in Tabelle 5 angegeben.

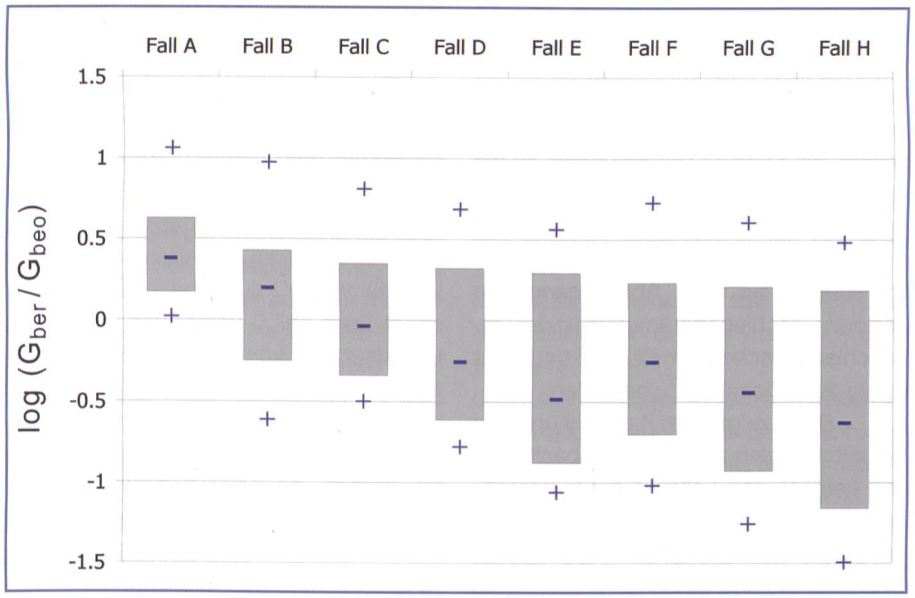

Bild 8. Boxplot des Logarithmus des Wertes $R = G_{ber}/G_{beo}$ für die Fälle A bis H in Tabelle 5. Die grauen Boxes geben den Bereich der 25%- bis 75%-Quantile an, die blauen Striche zeigen den Median und die blauen Kreuze die Extremwerte (Maximum und Minimum).

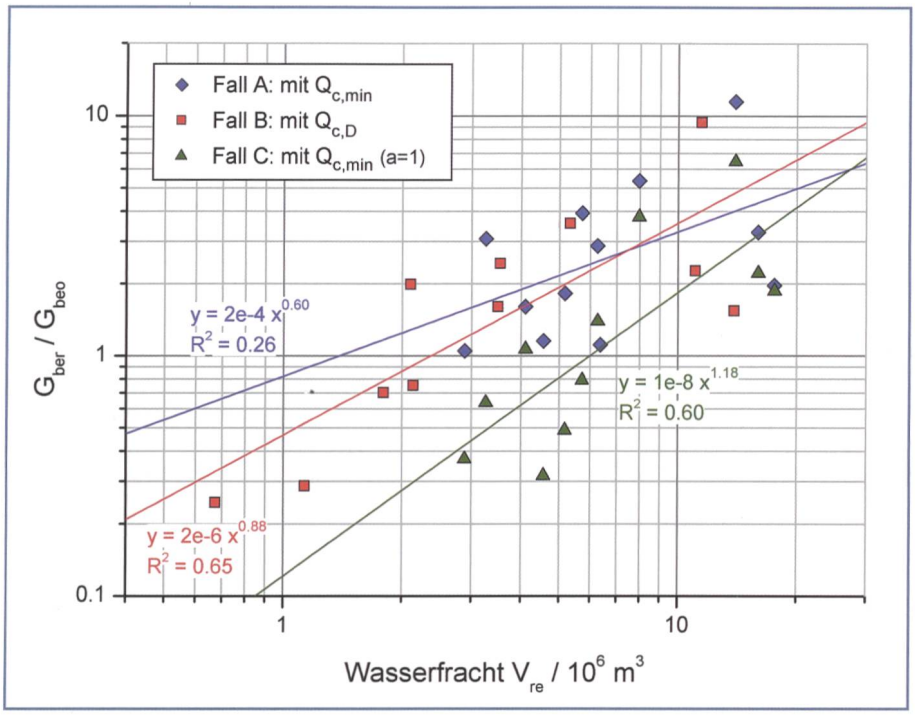

Bild 9. Verhältnis G_{ber}/G_{beo} in Abhängigkeit der effektiven Wasserfracht V_{re} für die Fälle A, B und C in Tabelle 5; die Geraden geben die jeweiligen Trendlinien wieder.

beobachteten Geschiebefrachten *(Bild 7b)* wie beim Fall B. Den statistischen Parametern Median, Mittelwert und Standardfehler nach zu urteilen, liegt Fall C noch etwas besser; für 3 von 11 Datenpunkten ist die Abweichung vom beobachteten Wert grösser als ein Faktor 3. In Anbetracht der Unsicherheiten bei den beobachteten Geschiebefrachten, den Abflussganglinien und den Geschiebeparametern ist der Unterschied zwischen den Fällen B und C als wenig aussagekräftig zu bewerten.

Bild 8 zeigt eine Übersicht über die Verhältniszahlen zwischen beobachteten und gemäss den Fällen A bis H berechneten Geschiebefrachten. Auch hier wird deutlich, dass für die Fälle C und B die Übereinstimmung zwischen berechneten und beobachteten Frachten am besten ist. Bei Verwendung des Grenzabflusses $Q_{c,min}$ und der Berücksichtigung des Formwiderstandes mit einem Exponenten a = 1.5 (Fall D) werden die Frachten tendenziell unterschätzt. Das gilt ebenfalls für die Kombination Grenzabfluss $Q_{c,min}$ mit Formwiderstand-Exponent a = 2 (Fall E). In beiden Fällen ist bei 6 von 11 Datenpunkten die Abweichung vom beobachteten Wert grösser als ein Faktor 3. Die kombinierte Verwendung von $Q_{c,D}$ und Berücksichtigung des Formwiderstandes (Fälle F bis H) führt auch zu einer Unterschätzung der beobachten Geschiebefrachten.

Betrachtet man den Quotienten *R* in Abhängigkeit der effektiven Wasserfracht für die Fälle A und B *(Bild 9)*, so sieht man deutlich, dass bei Berücksichtigung von $Q_{c,D}$ (Fall B) die Wasserfracht V_{re} reduziert wird. Diese Korrektur hat bei kleineren Werten von V_{re} relativ betrachtet einen grösseren Effekt, so dass die Werte von *R* stärker reduziert werden und in diesem Bereich eine Unterschätzung der Frachten resultiert. Interessant ist, dass ein ähnlicher Trend zu kleineren *R*-Werten bei kleineren Werten von V_{re} auch beim Grundfall A sowie beim Fall C vorhanden ist *(Bild 9)*. Grundsätzlich könnte unter Berücksichtigung dieser beobachteten Trends ein verbesserter (empirischer) Berechnungsansatz für die untersuchten Fälle abgeleitet werden; die Korrekturfunktion dürfte aber stark von den (wenigen verwendeten) Daten abhängen und eine Verallgemeinerung daher kaum sinnvoll sein.

6. Diskussion

Die Anwendung einer einfachen Geschiebetransportformel für Gebirgsflüsse wie diejenige von Rickenmann (1990, 2001) auf die untersuchten Hochwasserereignisse im Wallis führt generell zu einer Überschätzung der beobachteten Geschiebefrachten. Für den Geschiebetransport beim Hochwasser 2005 in der Schweiz wurde eine ähnliche Analyse durchgeführt, wobei die effektiven Wasserfrachten über den Niederschlag und gebietsspezifische Abflusskoeffizienten abgeschätzt wurden (Rickenmann et al., 2008). Dabei zeigte sich, dass die beobachteten Geschiebefrachten ab Gerinnegefällen von mehr als etwa 4 bis 6% deutlich geringer sind als die mit der oben erwähnten Geschiebetransportformel berechneten Werte. Die meisten untersuchten Gerinneabschnitte der Hochwasserereignisse im Wallis haben ähnliche oder grössere Gerinnegefälle als der erwähnte kritische Bereich. Sowohl bei den Ereignissen beim Hochwasser 2005 als auch bei denjenigen im Wallis 1993 und 2000 werden die Abweichungen zwischen berechneten und beobachteten Geschiebefrachten mit zunehmendem Gerinnegefälle tendenziell grösser.

Auch andere Studien zeigen, dass die mit Geschiebetransportformeln berechneten Werte die beobachteten Transportraten häufig massiv überschätzen (Gomez & Church, 1989; Rickenmann, 2001; Bathurst, 2007). Zum Teil ist dies darauf zurückzuführen, dass der auf die Geschiebekörner wirkende Anteil der Sohlenschubspannung nicht quantifiziert werden kann. Insbesondere in steileren und raueren Gerinnen nehmen die Energieverluste infolge von Formwiderstand deutlich zu und können bis zu 90% des gesamten Fliesswiderstandes betragen (Millar, 1999; Church & Zimmermann, 2007; Yager et al., 2007). Wird die für den Geschiebetransport zur Verfügung stehende Abflussenergie um den Formwiderstand reduziert, ergeben sich rechnerisch deutlich kleinere Transportraten (Rickenmann, 2005).

Die beste Übereinstimmung mit den beobachteten Frachten ergibt sich für die untersuchten Hochwasserereignisse 1993 und 2000 im Wallis, wenn der Formwiderstand über ein reduziertes Energieliniengefälle mit einem Exponenten a = 1 in Gl. (13) berücksichtigt wird (Fall C). Dieser Ansatz wurde erfolgreich auch auf einige Hochwasserereignisse 2005 in Österreich in Kombination mit dem Sedimenttransportmodell SETRAC angewendet. Dabei führte ein reduziertes Energieliniengefälle mit einem Exponenten a = 1 ebenfalls zu plausiblen Resultaten (Chiari et al., 2008; Chiari & Rickenmann, 2007; Rickenmann et al., 2006).

Für die untersuchten Hochwasserereignisse im Wallis ergibt sich eine bessere Übereinstimmung zwischen berechneten und beobachteten Geschiebefrachten, wenn statt dem unteren Wert $Q_{c,min}$ für den kritischen Abfluss (Fall A) ein höherer Wert $Q_{c,D}$ angenommen wird, der für das Aufbrechen der Deckschicht nötig ist (Fall B). Wie in Abschnitt 2.3 erwähnt, wird beim Fall B nach dem Überschreiten von $Q_{c,D}$ keine vollständige Zerstörung der Deckschicht angenommen. Damit ergibt sich tendenziell eine Unterschätzung der effektiven Wasserfracht und damit der Geschiebefracht (s. auch *Bild 1*). Man kann aber

davon ausgehen, dass bei intensiveren Abflüssen ($Q>>Q_{c,D}$) die statische Deckschicht zerstört wird. Bei abklingendem Hochwasser bildet sich zuerst eine mobile Deckschicht und schliesslich wieder eine statische Deckschicht (Parker et al., 2003; Parker, 2008). Somit ist die Annahme für den Fall B, dass $Q_{c,D}$ für das Auftreten von Geschiebetransport immer überschritten sein muss, zumindest teilweise gerechtfertigt.

Jäggi et al. (2004) führte eine Nachrechnung des Sedimenttransportes beim Hochwasserereignis 2000 im Baltschiederbach mit einer ähnlichen Geschiebetransportformel durch. Dabei nahm er einerseits ein reduziertes Energieliniengefälle an, woraus ein geringerer Transport in die Schlüsselstrecke von oberhalb resultiert. Andererseits bestimmte er den kritischen Abfluss für die Mobilisierung der groben Blöcke in der Schlüsselstrecke nach einem Verfahren von Whittaker et al. (1988). Dieser liegt zwischen 56 und 70 m^3/s^{-1}, d.h., Erosion von Geschiebe aus der Sohle in der Schlüsselstrecke ist nur für Abflüsse über diesem Wertebereich zu erwarten. Durch die Kombination dieser beiden Faktoren lag die berechnete Geschiebefracht nahe bei der beobachteten Fracht.

Ein weiterer Grund für die generelle Überschätzung der Transportraten oder Geschiebefrachten liegt möglicherweise in der beschränkten Geschiebeverfügbarkeit in steileren und raueren Gerinnen (Hassan et al., 2005). Einerseits kann Geschiebe wegen grober Blöcke im Gerinnen (welche z.T. aus Hangprozessen stammen) und Abpflasterungseffekten schwierig mobilisierbar sein. Andererseits befinden sich in engen und steilen Bächen Gerinneabschnitte oft auch in anstehendem Fels, oder es besteht nur eine dünne Schicht von alluvialen Ablagerungen über einer Felssohle. Manchmal verstärkt durch das Vorhandensein von Schwemmholz ist bei Gerinnegefällen von mehr als etwa 5% die Stabilität der Sohle gegen Erosion häufig auch durch Stufen-Becken-Sequenzen (step-pool structures) erhöht. Die Grenzstabilität dieser Strukturen kann heute noch kaum quantifiziert werden. Auch andere Sohlstrukturen in rauen Gerinnebetten können dazu beitragen, dass die Verfügbarkeit von Geschiebe aus der Sohle beschränkt ist (Hassan et al., 2005). Untersuchungen in Wildbächen nach dem Hochwasser 1987 in der Schweiz zeigten, dass im Durchschnitt 40% der mobilisierten Feststoffe aus Hangprozessen (tiefgründige Rutschungen, Nachbrechen von Böschungen) und Runsen stammten (Kienholz et al., 1991a, b).

Bravo-Espinosa et al. (2003) vergleichen verschiedene Geschiebetransportformeln mit Messungen in Flüssen. Sie teilen dabei die Gerinne in solche mit transportlimitierten, mit teilweise transportlimitierten und mit Verfügbarkeits-limitierten Geschiebebedingungen ein. Die Schoklitsch-Gleichung (Schoklitsch, 1962) ergibt insgesamt und speziell bei den letzten zwei Kategorien die besten Resultate. Die Schoklitsch-Gleichung wurde auch in den Studien von Gomez & Church (1989) sowie von Bathurst et al. (1987) vergleichsweise erfolgreich auf Felddaten angewendet. Es ist daher interessant festzustellen, dass die hier verwendete Gl. (3) fast identisch mit der Schoklitsch-Gleichung ist, welche einen Koeffizienten von 0.93 statt 1.5 aufweist (Rickenmann, 2001).

7. Schlussfolgerungen

Für Hochwasserereignisse der Jahre 1993 und 2000 in fünf Gebirgsflüssen im Kanton Wallis wurden Geschiebetransportberechnungen durchgeführt. Die Anwendung einer einfachen Geschiebetransportformel auf diese Ereignisse führt generell zu einer Überschätzung der beobachteten Geschiebefrachten. Eine ähnliche Überschätzung der beobachteten Geschiebefrachten bei Anwendung der gleichen empirischen Transportformel wurde auch beim Hochwasser 2005 für steilere Gerinne festgestellt. Eine bessere Übereinstimmung zwischen berechneten und beobachteten Geschiebefrachten wird erreicht, wenn entweder ein reduziertes Energieliniengefälle infolge des Formwiderstandes beim Fliesswiderstand berücksichtigt oder wenn ein erhöhter Grenzabfluss verwendet wird.

Verdankungen

Die hier vorgestellte Arbeit wurde im Rahmen des Projektes HYDRALP durchgeführt. Wir danken der Dienststelle für Strassen- und Flussbau DSFB des Kantons Wallis und insbesondere D. Bérod für die Unterstützung dieses Projektes. Für die freundliche Bereitstellung von Unterlagen danken wir J. Abegg, M. Bodenmann, A. Burkard, B. Dussex, T. Meile, U. Schälchli, J. Seiler und P. Teysseire. Kommentare von C. Rickli, J. Turowski, M. Nitsche und F. Blaser haben zu einer besseren Verständlichkeit des Textes beigetragen.

Literatur

Abgottspon, E., Seiler, J., Zarn, B., Zimmermann, M. (2001): Hochwasser vom Oktober 2000 in der Lonza: Temporäre Schutzmassnahmen verhindern Millionenschäden. Wasser Energie Luft 93 Jg., Heft 3/4, 87–92.

Badoux, A., Rickenmann, D. (2008): Untersuchungen zum Sedimenttransport während der Hochwasser 1993 und 2000 im Wallis anhand von Geschiebetransportberechnungen. Bericht zu Handen der Dienststelle für Strassen- und Flussbau DSFB des Kantons Wallis (unveröffentlicht).

Bathurst, J.C., Graf, W.H., Cao, H.H. (1987): Bed load discharge equations for steep mountain rivers. In Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers, edited by C. R. Thorne, J. C. Bathurst and R. D. Hey, pp. 453–492, Wiley, Chichester.

Bathurst, J.C. (2007): Effect of Coarse Surface Layer on Bed-Load Transport. Journal of Hydraulic Engineering, 133 (11), 1192–1205.

Bezzola, G.R., Abegg, J., Jäggi, M.N.R. (1994): Saltinabrücke Brig-Glis (Rekonstruktion des Hochwassers vom 24. September 1993 in Brig-Glis). Schweizer Ingenieur und Architekt, 11, 165–169.

Bodenmann, M., Meile, T. (2003): Hochwasserschutz im Wallis, Sanierung der Gamsa im Unterlauf. Wasser Energie Luft, 95 Jg., Heft 9/10, 280–282.

Bravo-Espinosa, M., Osterkamp, W.R., Lopes, V.L. (2003): Bedload transport in alluvial channels. Journal of Hydraulic Engineering, 129(10), 783–795.

Burkard, A., Jäggi, M.N.R. (2003): Hochwasserschutz im Wallis, Massnahmen an der Saltina. Wasser Energie Luft, 95 Jg., Heft 9/10, 273–280.

BWG (2002): Hochwasser 2000, Ereignisanalyse/Fallbeispiele. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 2, Bern.

Chiari, M., Rickenmann, D. (2007): The influence of form roughness on modelling sediment transport at steep slopes. Paper for the International Conference Erosion and Torrent Control as a Factor in Sustainable River Basin Management, Belgrad, 25–38, September 2007, [CD-ROM], 8p.

Chiari, M., Mair, E., Rickenmann, D. (2008): Geschiebetransportmodellierung in Wildbächen und Vergleich der morphologischen Veränderung mit Lidar Daten. In: Interpraevent 2008, Dornbirn Vorarlberg Austria, Conference Proceedings, Vol.1, pp. 295–306.

Church, M., Zimmermann, A. (2007): Form and stability of step-pool channels: Research progress. Water Resources Research, 43, W03415, doi: 10.1029/2006WR005037.

Dussex, B. (2002): Intempéries d'octobre 2000 dans la région de Gondo (Valais-Suisse), Travail Postgrade à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, Lausanne, 77 p.

Geoplan, Pronat, Hunziker & Zarn, Geo7 (2000): Hochwasserschutzkonzept Lonza. Bericht Nr. VS 1527 zu Handen der Gemeinden Steg und Gampel (unveröffentlicht).

Gomez, B., Church, M. (1989): An assessment

of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers. Water Resources Research, 25, 1161–1186.

Hassan, M.A., Church, M., Lisle, T.E., Brardinoni, F., Benda, L., Grant, G.E. (2005): Sediment transport and channel morphology of small, forested streams. Journal of the American Water Resources Association, 41, 853–876.

Jäggi, M.N.R. (1992): Sedimenthaushalt und Stabilität von Flussbauten. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 119.

Jäggi, M.N.R. (2001): Natürlicher Geschiebe-rückhalt und Geschiebedosierung. Wasser Energie Luft, 93 Jg., Heft 5/6, 133–139.

Jäggi, M.N.R., Nigg, U., Teysseire, P. (2004): Die Sedimentkatastrophe von Baltschieder. In: Interpraevent 2004, Riva del Garda, Congress Publication, Vol. 3, pp. VII/165–VII/180.

Jordan, F., Jäggi, M.N.R., Nigg, U. (2003): Modélisation physique d'un piège à graviers, le cas du Baltschiederbach. Wasser Energie Luft, 95 Jg., Heft 9/10, 283–290.

Kienholz, H., Lehmann, C., Guggisberg, C., Loat, R. (1991a): Geschiebelieferung durch Wildbäche. In: Ursachenanalyse der Hochwasser 1987. Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Nr. 4, Bern, pp. 89–97.

Kienholz, H., Lehmann, C., Guggisberg, C., Loat, R., Hegg, C. (1991b): Bedload budgets in Swiss mountain torrents with respect to the disasters in 1987. Zeitschrift für Geomorphologie, 83 (Supplementband), 53–62.

LCH-EPFL (2003): Hochwasserschutzprojekt der Gamsa in Gamsen (Brig-Glis). Hydraulische Modellversuche, Schlussbericht. LCH-Bericht Nr.11/03, EPFL, Lausanne.

Meile, T., Schleiss, A., Bodenmann, M., Boillat, J.-L., Jäggi, M.N.R. (2005): Hochwasserschutzmassnahmen an der Gamsa mit eingegrabenen Betonprismen. Wasser Energie Luft, 97 Jg., Heft 3/4, 59–66.

Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948): Formulas for bedload transport. Proc. 2nd meeting Int. Assoc. Hydraulic Structures Research, Appendix 2, pp. 39–64, Stockholm, Sweden.

Millar, R.G. (1999): Grain and for resistance in gravel-bed rivers. Journal of Hydraulic Research, 37(3), 303–312.

Parker, G., Toro-Escobar, C.M., Ramey, M., Beck, S. (2003): The effect of floodwater extraction on the morphology of mountain streams. Journal of Hydraulic Engineering, 129(11), 885–895.

Parker, G. (2008): Chapter 3: Transport of gravel and sediment mixtures. In: M. Garcia (ed.), Sedimentation Engineering: Theories, Measurements, Modeling, and Practice, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110., pp. 165–252.

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

Rickenmann, D. (1991): Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. Journal of Hydraulic Engineering, 117(11), 1419–1439.

Rickenmann, D. (1996): Fliessgeschwindigkeiten in Wildbächen und Gebirgsflüssen. Wasser Energie Luft, 88 Jg., Heft 11/12, 298–304.

Rickenmann, D. (2001): Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. Water Resources Research, 37, 3295–3305.

Rickenmann, D. (2005): Geschiebetransport bei steilen Gefällen. In: Tagungspublikation zu «VAW 75 Jahre», Festkolloquium 7. Oktober 2005. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 190, pp. 107–119.

Rickenmann, D., Chiari, M., Friedl, K. (2006): SETRAC – A sediment routing model for steep torrent channels. In R. Ferreira, E. Alves, J. Leal & A. Cardoso (eds), River Flow 2006, Taylor & Francis, London, pp. 843–852.

Rickenmann, D., Hunzinger, L., Koschni, A. (2008): Hochwasser und Sedimenttransport während des Unwetters vom August 2005 in der Schweiz. In: Interpraevent 2008, Dornbirn Vorarlberg Austria, Conference Proceedings, Vol.1, pp. 465–476.

Röthlisberger, G. (1994): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1993. Wasser Energie Luft, 86 Jg., Heft 1/2, 1–8.

Seiler, J. (2003): Leben mit dem Hochwasser, Problemstellen rund um die Gemeinde Steg. Wasser Energie Luft, 95 Jg., Heft 9/10, 293–296.

Schälchli & Abegg (1998): Saltina, Geschiebebewirtschaftung im Grindji. Bericht zu Handen der Stadtgemeinde Brig-Glis, Zürich (unveröffentlicht).

Schoklitsch, A. (1962): Handbuch des Wasserbaues. 3rd edition, Springer-Verlag, Vienna, 1, 173–177.

Smart, G.M., Jäggi, M.N.R. (1983): Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 64.

VAW (1993): Saltina / Brig-Glis – Bericht über die Rekonstruktion der Überschwemmung vom 24. September 1993 im hydraulischen Modell sowie über die Untersuchung einer provisorischen Lösung für die Saltinabrücke. VAW Teilbericht Nr. 4079/1, Zürich.

VAW (1994): Die Grösse extremer Hochwasser der Saltina – Hydrologische Untersuchungen nach der Hochwasserkatastrophe in Brig vom 24.9.1993. VAW Bericht Nr. 4080, Zürich.

VAW (1995): Lonza Gampel-Steg, Studie über die Hochwassergefährdung durch die Lonza in Gampel und Steg. VAW Bericht Nr. 4094, Zürich.

Whittaker, J.G., Hickman, W.E., Croad, R.N. (1988): Riverbed Stabilisation with placed blocks. Report 3–88/3, Central Laboratories, Works and Development Services Corporation, Lower Hutt, New Zealand, 33p.

Wong, M., Parker, G. (2006): Re-analyses and corrections of bedload relation of Meyer-Peter and Müller using their own database. Journal of Hydraulic Engineering, 132, 11, 1159–1168.

Yager, E.M., Kirchner, J.W., Dietrich, W.E. (2007): Calculating bed load transport in steep boulder bed channels. Water Resources Research, 43, W07418, doi: 10.1029/2006WR005432.

Anschrift der Verfasser
Dr. *Alexandre Badoux*
Prof. Dr. *Dieter Rickenmann*
Eidg. Forschungsanstalt WSL, Gebirgshydrologie und Wildbäche
Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf
Tel. +41 44 739 22 83
badoux@wsl.ch
dieter.rickenmann@wsl.ch
www.wsl.ch