

# HOCHWASSER UND SEDIMENTTRANSPORT WÄHREND DES UNWETTERS VOM AUGUST 2005 IN DER SCHWEIZ

## FLOOD EVENTS AND SEDIMENT TRANSPORT DURING THE RAINSTORM OF AUGUST 2005 IN SWITZERLAND

Dieter Rickenmann<sup>1</sup>, Lukas Hunzinger<sup>2</sup>, Anja Koschni<sup>1</sup>

### ZUSAMMENFASSUNG

Durch die hohen Abflüsse und teilweise sehr hohen transportierten Feststofffrachten während des Hochwassers im August 2005, kam es in der Schweiz an vielen Orten zu grossen Schäden durch Überschwemmungen, Übersarungen oder Murgänge. Hohe Feststofftransporte in Form von Geschiebe und Schwemmholz traten hauptsächlich in den Bergregionen auf. Die grösseren Flüsse des Schweizer Mittellandes wiesen hohe Abflüsse auf; der Geschiebetransport spielte dort eine geringere Rolle. An vielen Stellen reichte die Gerinnekapazität nicht mehr aus, um die auftretenden Abflüsse innerhalb des Bachbettes abzuführen. Die beobachteten Geschiebefrachten sind ab Gerinnegefällen von mehr als 5% deutlich geringer als die mit einer einfachen Geschiebetransportformel berechneten Werte. Mögliche Gründe dafür sind bedeutende Formverluste, welche die für den Geschiebetransport verfügbare Abflussenergie vermindern, sowie eine beschränkte Geschiebeverfügbarkeit in steileren Gerinnen.

**Key words:** Hochwasser, Feststofftransport, Erosion, Ablagerung

### ABSTRACT

The flood events of August 2005 in Switzerland were associated with high water discharges and very high transported sediment loads in some channel reaches. This caused large damage in many places due to flooding, sediment deposition, debris flows, and woody debris. High sediment transport occurred primarily in mountain regions where intense bank and channel bed erosion was observed, and where deposition of sediment and woody debris also occurred outside of the channel. The larger rivers of the Swiss plateau had high flow discharges but sediment transport played only a minor role. In many places the channel conveyance capacity was too small in comparison to the high discharges. For channel reaches steeper than about 5% observed bedload volumes are significantly smaller than values calculated with a simple bedload transport equation. Possible reasons for this discrepancy are large form resistance losses, which reduce the flow energy available for sediment transport, and limited sediment availability in steeper streams.

**Key words:** Flood, sediment transport, erosion, deposition

---

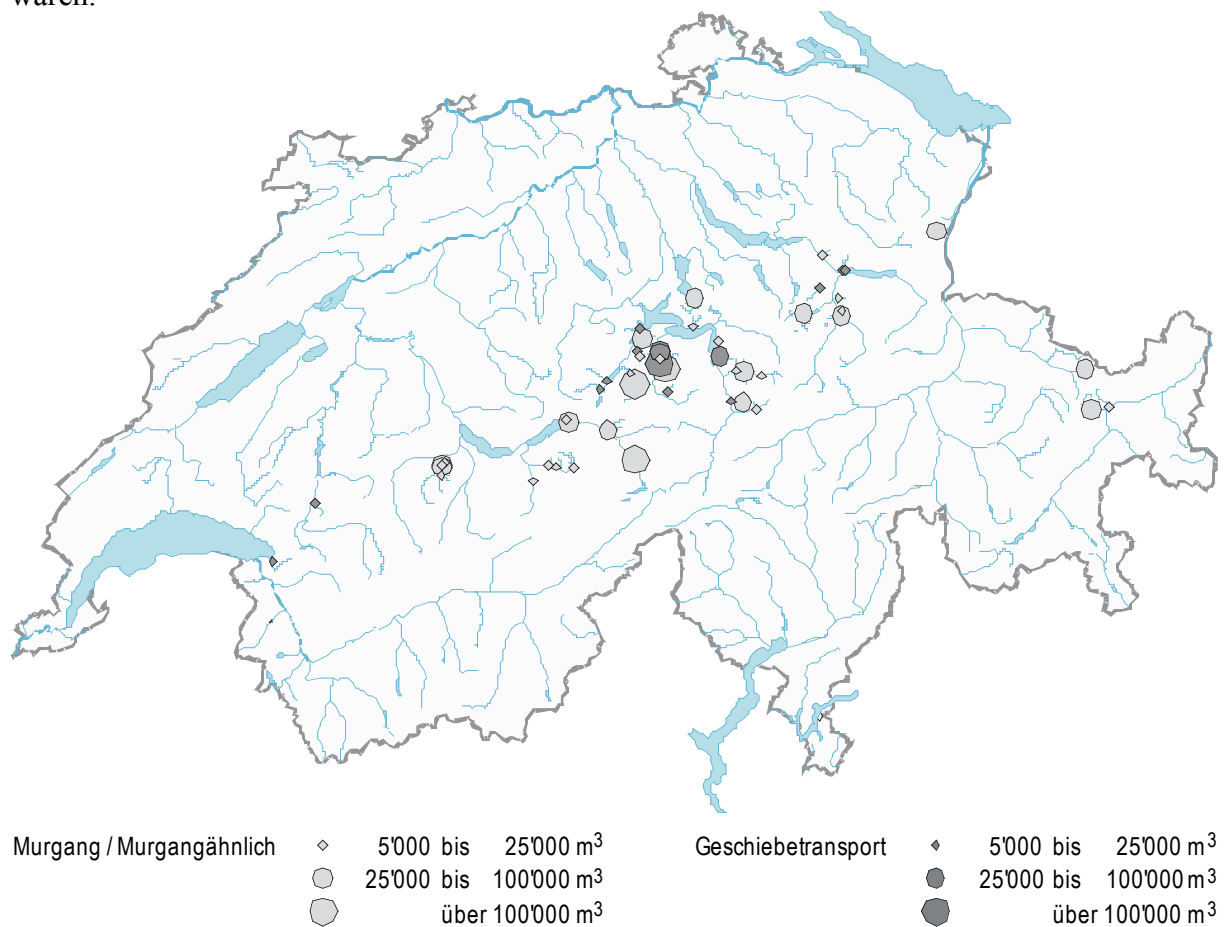
<sup>1</sup> Swiss Federal Research Institute (WSL), Mountain Hydrology and Torrents, Birmensdorf, Switzerland; [rickenmann@wsl.ch](mailto:rickenmann@wsl.ch)

<sup>2</sup> Schälchli, Abegg + Hunzinger, dipl. Ing. ETH / SIA, River engineering, Bern, Switzerland; [sah.be@flussbau.ch](mailto:sah.be@flussbau.ch)

## EINLEITUNG

Durch die hohen Niederschläge vom 21. – 23. August 2005 führten die meisten Fließgewässer entlang des Alpenordhangs Hochwasser. In Wildbächen und Gebirgsflüssen oberhalb der Alpenrandseen dominierten hohe Abflüsse mit starkem Geschiebetransport und mit Seitenerosion während in den grossen Flussläufen des Mittellandes außerordentliche Abflüsse beobachtet wurden, der Geschiebetransport aber weniger bedeutend war (Abb. 1). In allen Gewässern wurden große Mengen an Schwemmholz transportiert, welches Brücken und Wehre verkleuste.

Insgesamt kann gesagt werden, dass die Gewässer mit den hohen Abflüssen und grossen Feststoffumlagerungen im Wesentlichen in den Gebieten der intensivsten Niederschläge zu finden waren.



**Abb. 1:** Ort und Grösse der Murgang- und Geschiebetransport-Ereignisse während des Hochwassers 2005 in der Schweiz.

**Fig. 1:** Location and magnitude of sediment transport and debris flow events during the floods of August 2005 in Switzerland.

Für die Analyse der Gerinneprozesse wurde eine Datenbank mit etwa 80 Einzelereignissen angelegt, bei welchen u.a. Angaben zur Art der abgelaufenen Prozesse, den Abflussmengen und Feststofffrachten sowie die Charakteristik der Einzugsgebiete erfasst wurden (Rickenmann *et al.* 2007). Sie stützt sich vor allem auf die Ereignisdokumentationen und -analysen der Kantone und Gemeinden sowie auf technische Berichte von Wiederinstandstellungs- und Hochwasserschutzprojekten. Es handelt sich dabei nicht um eine vollständige Dokumentation, sondern um eine übersichtsmässige Zusammenstellung der relevanten Ereignisse. Es ist möglich, dass einzelne kleine, lokale Ereignisse nicht erfasst worden sind.

Die Fliessgewässer wurden in der Datenbank in die drei Kategorien Wildbäche, Gebirgsflüsse und Talflüsse unterteilt. Die Einteilung erfolgte auf Grund der Einzugsgebietsgrösse und des Längsgefälles des Gerinnes, wodurch auch der unterschiedliche Anteil der Feststoffe im Abfluss charakterisiert wird. Die Grenzen zwischen Wildbach und Gebirgsfluss und zwischen Gebirgs- und Talfluss sind fließend.

Als Wildbäche werden hier die Gewässer bezeichnet, deren Einzugsgebietsgrösse unter 25 km<sup>2</sup> liegt und deren Längsgefälle mehr als 5 - 10% beträgt. Bei Wildbächen führen Ereignisse der Grössenordnung wie beim Hochwasser 2005 häufig zu Ablagerungen ausserhalb des Gerinnes und damit zu Schäden. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die meisten dieser Ereignisse auf Grund der von ihnen verursachten Schäden dokumentiert wurden und somit in der Datenbank enthalten sind. Insgesamt wurden etwa 50 Ereignisse in Wildbächen dokumentiert.

Gebirgsflüsse weisen ein Einzugsgebiet von mehr als 25 km<sup>2</sup> auf und sind massgeblich durch den Geschiebetransport beeinflusst. Ihr Gefälle liegt in der Regel unter 5 - 10%.

Unter der Kategorie Talflüsse werden die flachen Fliessgewässer zusammengefasst, in welchen die Geschiebetransportprozesse nur eine sekundäre Rolle spielen. Es sind vor allem die grossen Flüsse des Schweizer Mittellandes.

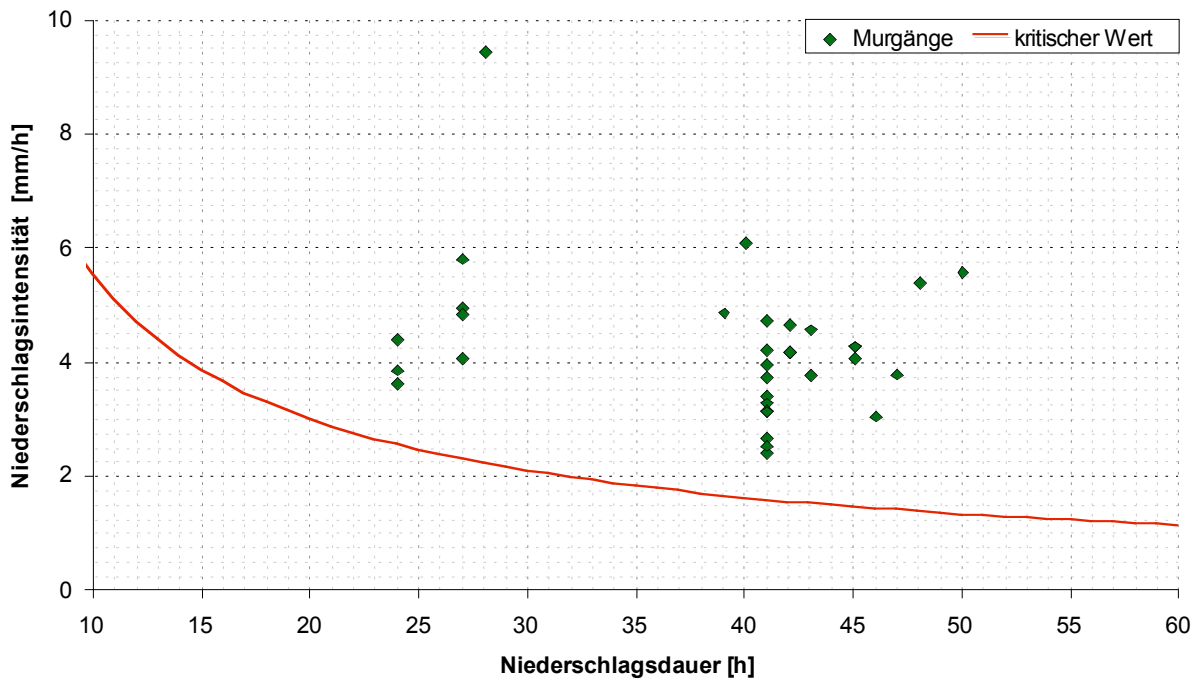
## **GERINNEPROZESSE WÄHREND DES HOCHWASSERS 2005**

### **Murgänge und Geschiebetransport in Wildbächen**

Bei den registrierten Wildbachereignissen wurden Feststoffmengen zwischen 5'000 m<sup>3</sup> und 500'000 m<sup>3</sup> umgesetzt. In 30 der 50 untersuchten Wildbäche wurden die Feststoffe als Murgänge oder in murgangähnlicher Form transportiert. Bei den vier grössten Murgangereignissen wurden Feststoffmengen zwischen 50'000 m<sup>3</sup> und 500'000 m<sup>3</sup> verfrachtet. Die grössten Frachten mit fluvialen Transport in Wildbächen lagen bei vier Ereignissen zwischen 30'000 m<sup>3</sup> und 70'000 m<sup>3</sup>.

Damit in einem Wildbach ein Murgang ausgelöst werden kann, muss der Niederschlag in seinem Einzugsgebiet bestimmte Schwellenwerte übersteigen. So müssen in den Schweizer Alpen mindestens 40 mm Niederschlag fallen und es ist eine minimale, von der Dauer abhängige Niederschlagsintensität erforderlich (Zimmermann *et al.*, 1997). Diese Bedingungen waren im August 2005 in manchen Einzugsgebieten gegeben. Über den gesamten Hauptniederschlag verteilt, traten bei den Einzugsgebieten, in denen ein Murgang ausgelöst wurde, Intensitäten von 2.5-10 mm/h auf. Abb. 2 zeigt diese im Vergleich zu den jeweiligen Schwellenwerten in Abhängigkeit der Niederschlagsdauer.

Im vom Hochwasser 2005 betroffenen Gebiet gab es auch etliche Wildbäche, welche gar nicht oder nur mittelmässig aktiv waren. Das könnte darauf zurückzuführen sein, dass in ihren Einzugsgebieten die gebietspezifischen kritischen Niederschlagsintensitäten nicht erreicht wurden.



**Abb. 2:** Mittlere Niederschlagsintensitäten während des Hochwassers August 2005 in den von Murgängen betroffenen Gebieten. Die kritische Grenzlinie für Murgang-Auslösung in der Schweiz ist aus Zimmermann *et al.* (1997).

**Fig. 2:** Average rainfall intensities during the floods of August 2005 in the catchments affected by debris flows. Also shown is the threshold line for debris flow initiation in Switzerland after Zimmermann *et al.* (1997).

Das grösste Geschiebevolumen wurde mit 500'000 m<sup>3</sup> vom Rotlaubach in Guttannen umgelagert. Hier stammt ein grosser Anteil des Geschiebes von der Rutschung Rotlauri. Bei ungefähr der Hälfte aller Murgangereignisse haben Rutschungen oder Hangmuren einen wesentlichen Teil der Feststoffe mobilisiert. In einigen Fällen waren sie die Auslöser zur Bildung der Murgänge. Bedeutende Materialeinträge aus Rutschungen haben möglicherweise auch zu grossen Abflüssen und Beanspruchungen der Sohle in Wildbachgerinnen und dadurch zu massiver Erosion der Bachbetten geführt. Im Weiteren wurden Feststoffe durch Ufer- und Seitenerosion mobilisiert.

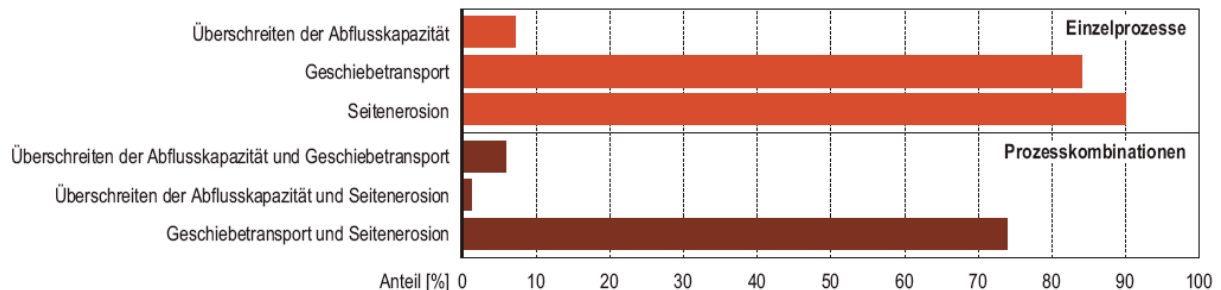
Bei vielen Wildbachereignissen wurde Schwemmholz mittransportiert, welches mehrheitlich aus Hangrutschungen und aus Uferböschungen stammte, die direkt erodiert wurden oder infolge Sohlenerosion abgerutscht waren.

### Geschiebetransport und Seitenerosion in Gebirgsflüssen

Etwa 20 Fliessgewässer oberstrom der Alpenrandseen sind in der Datenbank als Gebirgsflüsse erfasst. Auf Grund der Intensität und der Dauer der Niederschläge traten in vielen Gebirgsflüssen über eine längere Zeitdauer grosse Abflüsse auf. Einige Flüsse, wie z.B. die grosse und kleine Melchaa wiesen Abflussspitzen mit Jährlichkeiten von über 200 Jahren auf. Mit den hohen und lang andauernden Abflüssen war ein intensiver Geschiebetransport mit Geschiebefrachten bis 100'000 m<sup>3</sup> und mehr verbunden. Die Feststoffe wurden dabei entweder von den Zuflüssen, d.h. von den Wildbächen, eingetragen oder durch Seitenerosion und Gerinneverlagerung mobilisiert, seltener durch Tiefenerosion.

Die Transportprozesse waren durch intensive Seitenerosionen und Gerinneverlagerungen begleitet. Besonders in den Flussabschnitten mit Auflandungen kam es zu Gerinneverlagerun-

gen, wie z.B. im Chärstelenbach in Bristen oder in der Chirel in Diemtigen. Auf 190 km bzw. 84% der erfassten Gerinnelänge war der Geschiebetransport ein massgeblicher Prozess. Auf gut 200 km bzw. 90% der erfassten Gerinnelänge war es die Seitenerosion. Die beiden Prozesse überlagerten sich auf Gerinneabschnitten mit einer Länge von insgesamt 170 km (74%, Abb. 3).



**Abb. 3:** Beobachtete Gerinneprozesse in Gebirgsflüssen.

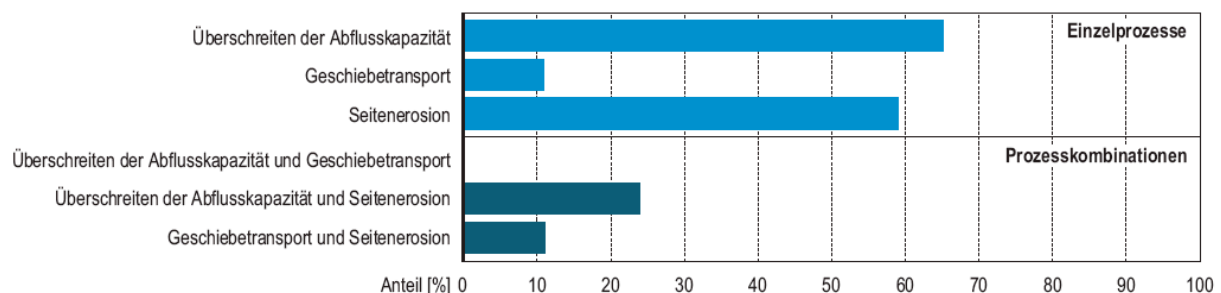
**Fig. 3:** Observed channel processes in mountain rivers.

Wie in den Wildbächen wurde auch entlang von Gebirgsflüssen viel Schwemmholz mobilisiert. Das Schwemmholz stammte hauptsächlich aus Ufererosionen, aus gerinnenahen Hangrutschungen oder es wurde durch Seitenbäche in den Vorfluter eingetragen. Im Kanton Obwalden wurden in den ersten Wochen nach dem Unwetter rund 14'000 m<sup>3</sup> Schwemmholz aus Flüssen und Seen entfernt. Etwa die Hälfte davon stammte allein aus der Grossen Melchaa.

### Überschreiten der Abflusskapazität und Seitenerosion in Talflüssen

Zu den Talflüssen gehören vor allem die Flüsse im Mittelland und im Napfgebiet, sowie die grossen Vorfluter in den Alpentälern. Aufgenommen wurden in der Datenbank 19 Talflüsse, wobei nur 2 davon durch einen grossen Geschiebetransport auffielen.

Als massgebliche Gerinneprozesse sind bei den Talflüssen vor allem die hohen Abflüsse und die Seitenerosionen zu nennen (Abb.4). In einigen Talflüssen erreichten die Abflussspitzen neue Rekordwerte. Dadurch wurde die Abflusskapazität an vielen Orten überschritten und es kam zu grossflächigen Überflutungen. An einzelnen Stellen wurden Hochwasserschutzdämme überströmt und brachen.



**Abb. 4:** Beobachtete Gerinneprozesse in Talflüssen.

**Fig. 4:** Observed channel processes in valley rivers.

Seitenerosion war bei etwa 60% der dokumentierten Gewässerabschnitte ein massgeblicher Prozess. Sie wurde durch die lange Dauer des Ereignisses begünstigt. Einerseits konnte die Strömung lange Zeit auf die Böschungen einwirken, andererseits waren diese durch die anhaltenden Niederschläge mancherorts aufgeweicht und daher weniger widerstandsfähig. Be-

bachtet wurde Seitenerosion vor allem in den steileren Talflüssen wie Kander, Simme und Emme. Uferabschnitte von 100 m oder länger wurden zum Teil mehr als 10 m abgetragen. An der Kleinen Emme verlagerte sich das Gerinne um mehr als eine Flussbreite. Lokale Erosionen konnten auch bei einem Rückfluss des Wassers in das Gerinne, nach einem vorherigen Überströmen der Ufer entstehen.

Wie schon bei den Wildbächen und Gebirgsflüssen, kam es auch bei den Talflüssen teilweise zu enormen Schwemmholzansammlungen. In der Aare bei Bern wurde z.B. die Wehranlage im Schwellenmätteli teilweise mit Schwemmholz verlegt, so dass die Aare in der Folge durch das Mattequartier floss.

## **GEFAHRENPROZESSE UND SCHÄDEN**

Wegen geringer Abfluss- und Transportkapazitäten, oft noch begünstigt durch Verklausungen, traten mancherorts die Wildbäche über die Ufer und lagerten die Feststoffe flächig ausserhalb der Gerinne ab. Abgelagert wurden sie meist im Kegelbereich. Tendenziell führten Verklausungen bei Murgängen dazu, dass angrenzende Strassen mit Geschiebe übersart wurden, während Verklausungen bei fluvialen Geschiebetransport eher Erosionsprozesse auslösten.

Die Gefahrenprozesse in Gebirgsflüssen wurden hauptsächlich durch Ufererosionen und Gerinneverlagerung sowie durch Geschiebeablagerungen und Verklausungen bei Brücken ausgelöst. Als Folge von Ablagerungen im Gerinne oder Verklausungen traten die Gewässer über die Ufer und überschwemmten und übersarten Siedlungsräume oder Kulturland. Die dynamischen Überflutungen erreichten mittlere bis hohe Intensitäten. An der Kleinen Melchaa in Giswil und anderen Orten konnten Schäden durch künstliche Breschenbildung oder Umleitung des Abflusses in weniger intensiv genutzte Gebiete zum Teil vermindert werden.

Die Talflüsse verursachten Schäden zweierlei Art: Zum einen wurden zahlreiche Gebäude von Überflutungen betroffen, was zu Gebäude- und Mobiliarschäden privater Haushalte und Gewerbebetriebe führte. Zum anderen wurden Uferschutzbauten und Strassen sowie andere, den Gewässern entlang führende Werkleitungen, durch Ufererosion beschädigt oder zerstört. Davon war meistens die öffentliche Hand betroffen.

## **FESTSTOFFFRACHTEN UND ABFLUSSVERHÄLTNISSE**

### **Vorgehen**

In der Ereignisdatenbank sind Angaben zu den transportierten Feststofffrachten (*GF*) vor allem für Ereignisse oder Gerinneabschnitte in Wildbächen und Gebirgsflüssen aufgeführt. Die Schätzungen dieser Feststofffrachten beruhen auf Kartierungen der Ablagerungen (z.B. bei Übersarungen der Wildbachkegel), auf Rückhaltevolumen von gefüllten Geschiebesammlern, auf Auswertungen topographischen Daten aus Luftbildern und LiDAR Befliegungen sowie auf Angaben zu Lastwagenfahrten beim Räumen der Ablagerungen. Bei den Angaben für einige grössere Flüsse wurde angenommen, dass rund 50% der Ablagerungen aus Feinmaterial bestanden. Dieser Anteil ist für die nachfolgenden Vergleiche in den hier verwendeten Werten für *GF* nicht enthalten, da sich diese auf das Grobgeschiebe beziehen. Die Genauigkeit der Angaben zu den transportierten Feststofffrachten ist unterschiedlich. Für die vorhan-

denen Daten muss von einer Unsicherheit im Bereich von einem Faktor von etwa 1.3 bis 2.0 ausgegangen werden.

Für die weiteren Analysen wurden für jedes erfasste Gewässer die folgenden Parameter bestimmt: Fläche des Einzugsgebietes (oberhalb des Ortes mit Angaben zur transportierten Feststofffracht), charakteristische Gerinnegefälle sowie die Abflussfracht während des Hochwasserereignisses. Weil nur in wenigen Fällen eine gemessene Abflussganglinie vorliegt, wurde die Abflussfracht in den Gerinnen über Niederschlagsdaten abgeschätzt. Das charakteristische Gefälle bezieht sich auf eine so genannte Schlüsselstrecke, also auf jenen Gerinneabschnitt mit dem geringsten Gefälle, bei welchem die bekannte Feststofffracht durchtransportiert wurde.

Ziel dieses Teils der Untersuchungen ist ein Vergleich der beobachteten Feststofffrachten mit einfachen Berechnungen. Dabei geht es um einen Vergleich von Grössenordnungen und um das Erkennen von Trends.

In den Untersuchungen wurde zwischen den beiden Hauptprozessen fluvialer Transport (in den Gebirgsflüssen, Wildbächen und z.T. Talflüssen) sowie Murgängen unterschieden. Murgänge traten nur in Wildbächen auf. In einigen Fällen war eine Unterscheidung zwischen den beiden Prozessen nicht ganz eindeutig. Die Klassierung erfolgte dann nach dem vermuteten dominanten Prozess.

### **Niederschlagsdaten**

Die MeteoSchweiz stellte für die Analyse der Niederschläge des Hochwassers 2005 Niederschlagsdaten zur Verfügung, die zum einen mit Regenmessstationen und zum anderen mit den drei Schweizer Radarsensoren erstellt wurden. Die Daten der Messstationen stehen als Tagessummen in einem 2 km-Raster flächendeckend für die ganze Schweiz zur Verfügung. Dazu wurden die Messungen der 482 Schweizer Niederschlagsstationen räumlich gewichtet und über die Fläche der gesamten Schweiz interpoliert. Die interpolierten Niederschlagssummen haben im Mittelland eine Lagegenauigkeit von etwa 10-15 km, im Gebirge eine solche von etwa 15-20 km. Ebenfalls flächendeckend, jedoch im 1 km-Raster und als Stundenwerte, liegen die Daten der drei Schweizer Radarstationen vor. Die Radarstationen messen in einem Umfeld von jeweils 130 km und zeigen grundsätzlich nur die Intensität der Niederschläge an. Sie wurden daher an die Niederschlagssammler der Schweiz angeeicht. Ausserdem wurden Korrekturmodelle zur Unterdrückung des Bodenechos angewendet. Die Niederschlagsintensitäten in den Regionen, in denen ein Berg das Radarecho abschirmt, wurden mittels Messungen in der Höhe und einer dazugehörenden Profilkorrektur bestimmt. Genauere Ausführungen können dem Arbeitsbericht der MeteoSchweiz (2006) entnommen werden.

Da es sich bei den Ermittlungen der Niederschläge um zwei grundsätzlich verschiedene Vorgehensweisen handelt, sind Unterschiede nicht ausgeschlossen. Für die betrachteten Einzugsgebiete und die 3-tägige Hauptniederschlagsperiode ergeben sich mit den Radar-basierten Werten im Durchschnitt rund 15 % geringere mittlere Gebietsniederschläge als mit den Werten der Niederschlagsstationen, wobei die Unterschiede mit zunehmender Einzugsgebietsgrösse abnehmen.

## Schätzung der Abflussfrachten

Mit den Niederschlagsdaten wurden für zwei unterschiedliche Zeiträume des Ereignisses die Abflussvolumina für jeden betrachteten Gewässerabschnitt bestimmt. Die Niederschläge wurden über die Dauer des Ereignisses und die Fläche der Einzugsgebiete aufsummiert und mit einem Abflusskoeffizienten abgemindert. Als erste Näherung für die Volumenabflusskoeffizienten wurden Werte zwischen 0.41 und 0.86 verwendet, wie sie von Eberhard *et al.* (2007) für die Periode vom 18. August 2005 12:00 Uhr bis zum 23. August 2005 12:00 Uhr in Einzugsgebieten mit Abflussmessstationen bestimmt wurden (mit  $A_{EG} = 45$  bis  $800 \text{ km}^2$  für die hier verwendeten Abflusskoeffizienten).

Eine obere Grenze der Wasserfracht  $V_{wg}$  wurde für die Periode vom 20. August 2005 8:00 Uhr bis zum 23. August 2005 8:00 Uhr (Periode des Hauptniederschlages) mit dem Niederschlag basierend auf den Stationsdaten bestimmt.

Eine untere Grenze der Wasserfracht  $V_{wp}$  wurde für jene Einzugsgebiete ermittelt, für welche in der Niederschlagsganglinie der oben genannten Periode zwei unterschiedliche Phasen des Niederschlags identifiziert werden konnten. Unter der Annahme, dass die erste Phase der Niederschläge vor allem zur Bodensättigung beigetragen hat, und die zweite Phase vor allem zum Abfluss, wurden nur die Niederschläge der jeweils zweiten Phase aufsummiert, wobei hier die Radar-basierten Werte verwendet wurden.

## Spezifische Feststofffrachten

In Abb. 5 sind die spezifischen beobachteten Feststofffrachten,  $SGF$ , normiert mit der Fläche des Einzugsgebietes ( $A_{EG}$ ), in Abhängigkeit des Gerinnegefälles in der Schlüsselstrecke ( $J$ ) dargestellt. Es ist erkennbar, dass  $SGF$  beim fluvialen Geschiebetransport mit  $J$  zunimmt. Bei den Murgängen ist kein klarer Trend zu erkennen (auch wenn die Regressionslinie einen ähnlichen Trend andeutet). Weiter fällt auf, dass die spezifischen Feststofffrachten für ein gegebenes Gerinnegefälle bei Murgängen im Durchschnitt rund 4- bis 5-mal höher waren als bei den Fällen mit fluvialem Feststofftransport.

## Einfache Formeln zur Berechnung des Sedimenttransports

Die beobachteten Feststofffrachten wurden mit einem einfachen Ansatz zur Beschreibung des Geschiebetransportes verglichen. Der Geschiebetransport in Wildbächen und Gebirgsflüssen kann mit folgender Formel beschrieben werden (Rickenmann, 2001):

$$Q_b = 1.5 (Q - Q_c) J^{1.5} \quad (1)$$

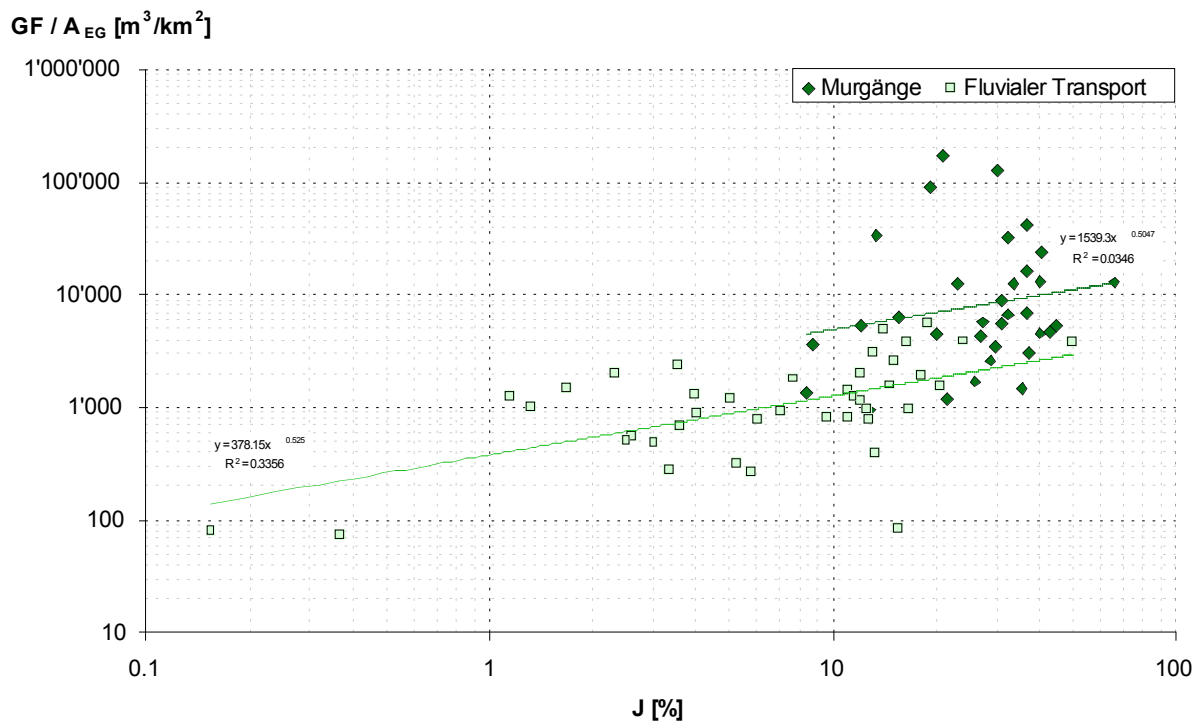
Dabei ist  $Q_b$  die Geschiebetransportrate [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] über die ganze Gerinnebreite,  $Q$  ist der Abfluss,  $Q_c$  der kritische Abfluss bei Transportbeginn und  $J$  das Gerinnegefälle. Gleichung (1) beruht hauptsächlich auf Laboruntersuchung zum Geschiebetransport, ist aber sehr ähnlich zu einem Ansatz von Schoklitsch (1962), welcher sich auch auf Feldmessungen abstützt. Zur Berechnung der Geschiebefracht ( $G_b$ ) kann Gleichung (1) über die Dauer eines Hochwasserereignisses integriert werden und es ergibt sich:

$$G_b = 1.5 V_w J^{1.5} \quad (2)$$

Dabei entspricht  $V_w$  der effektiven Abflussfracht [ $\text{m}^3$ ], und  $G_b$  [ $\text{m}^3$ ] bezeichnet das transportierte Geschiebevolumen (ohne Porenräume). Der Anteil der Abflussganglinie unterhalb des



Grenzabflusses wurde vernachlässigt. In Anbetracht der unsicheren Werte der beobachteten Feststofffrachten und in der Annahme dass in vielen Fällen  $Q \gg Q_c$  ist, ist die Vernachlässigung des Einflusses von  $Q_c$  vertretbar.



**Abb. 5:** Spezifische Geschiebefracht in Bezug zum Gerinnegefälle in der Schlüsselstrecke.

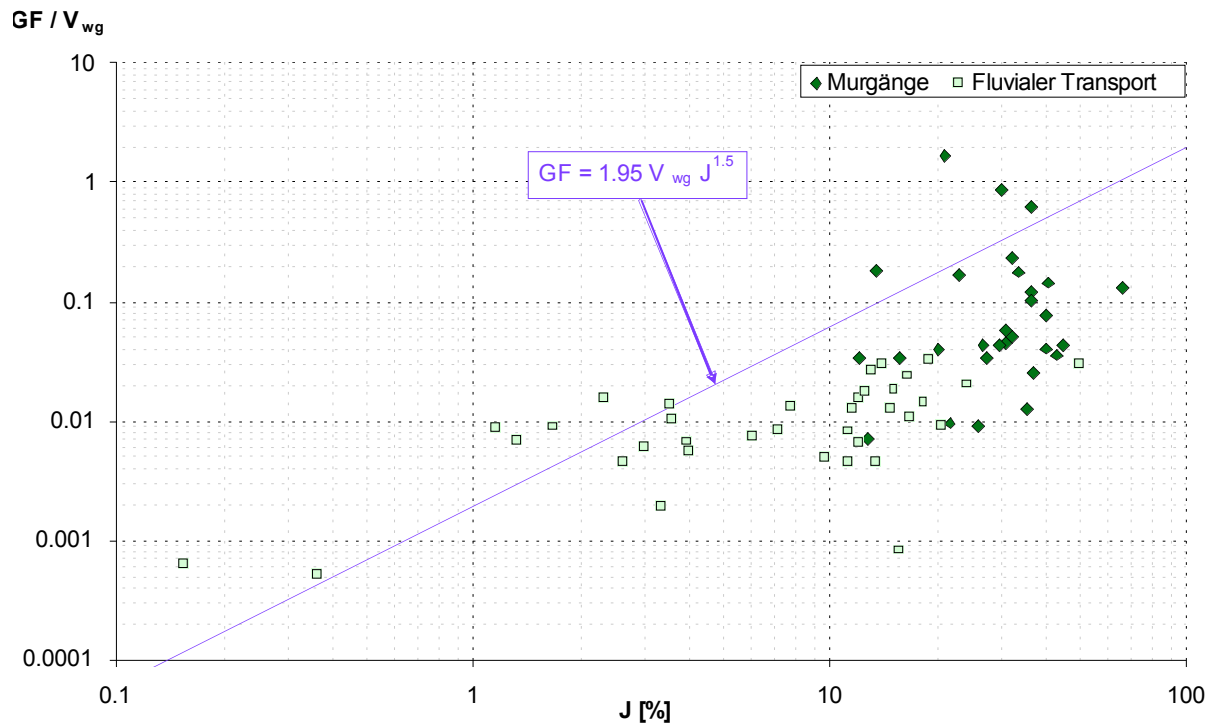
**Fig. 5:** Sediment yield per unit catchment area in relation to the minimum channel slope upstream of the point of major sediment deposition.

Bei den mit Gleichung (2) berechneten Sedimentfrachten handelt es sich um Material, das als Geschiebe transportiert wurde. Die hier verwendeten Werte der beobachteten Feststofffrachten ( $GF$ ) beziehen sich auf das Grobgeschiebe und beinhalten grundsätzlich auch das Porenvolumen innerhalb des abgelagerten (bzw. erodierten) Sedimentes. Für den Vergleich wird ein mittleres Porenvolumen von 30% angenommen. Nach Gleichung (2) können dann die Feststofffracht wie folgt berechnet werden:

$$GF = 1.95 V_w J^{1.5} \quad (3)$$

### Vergleich der beobachteten Geschiebefrachten mit einer Sedimenttransportformel

Abb. 6 zeigt die beobachteten Geschiebefrachten ( $GF$ ), normiert mit der oberen Grenze der relevanten Abflussfracht ( $V_{wP}$ ), in Bezug zum Gerinnegefälle in der Schlüsselstrecke ( $J$ ), und im Vergleich mit der einfachen Geschiebetransportformel (3). Für Gerinnegefälle bis etwa 4% liegen die Daten in der Nähe der Linie der Geschiebetransportformel (3). Für Gefälle grösser als etwa 4 bis 6% zeigt sich, dass die Berechnungen von  $GF$  mit (3) für fluvialen Geschiebetransport zu einer deutlichen Überschätzung der beobachteten Frachten führt. Bei den Murgängen liegt ein Teil der Daten im Trend derjenigen für fluvialen Transport, während ein anderer Teil der beobachteten Frachten um die Linie der Geschiebetransportformel (3) streut.



**Abb. 6:** Beobachtete Geschiebefrachten ( $GF$ ), normiert mit der oberen Grenze der relevanten Abflussfracht ( $V_{wg}$ ), in Bezug zum Gerinnegefälle in der Schlüsselstrecke ( $J$ ), und im Vergleich mit der einfachen Geschiebetransportformel (3).

**Fig. 6** Observed sediment load ( $GF$ ), normalised with the upper value of the relevant runoff volume ( $V_{wg}$ ), in relation to the channel slope ( $J$ ) of the critical reach relevant for fluvial bedload transport, and in comparison with the simple bedload transport equation (3).

Zum Vergleich mit der Abb. 6 wurde in Abb. 7 im Sinne einer unteren Grenze für die Abschätzung der relevanten Abflussfracht der Wert  $V_{wP}$  verwendet. Die Datenpunkte liegen generell etwas höher, aber es gelten grundsätzlich ähnliche Feststellungen wie bei Abb. 6. Die Geschiebefrachten bei fluvialem Transport werden mit zunehmendem Gerinnegefälle ab ca. 4% bis 6% deutlich überschätzt.

Ein wichtiger Grund für die Differenzen zwischen beobachteten und berechneten Geschiebefrachten bei Gerinnegefällen grösser als etwa 5% dürfte sein, dass mit der einfachen Geschiebetransportformel die verfügbare Abflussenergie überschätzt wird, weil z.T. bedeutende Verluste des Fließwiderstand infolge von Formverlusten durch ausgeprägte Sohlstrukturen und grobe Blöcke nicht berücksichtigt werden. Ein anderer wichtiger Grund für die Abweichungen dürfte die oft beschränkte Geschiebeverfügbarkeit in steileren Gerinnen sein, welche dazu führt, dass die Transportkapazität nicht ausgeschöpft werden kann. Diese möglichen Einflussfaktoren sind in der Sedimenttransportforschung schon länger bekannt. Eine Quantifizierung der Formverluste ist aber schwierig. Ansatzweise konnten diese Verluste anhand von Beobachtungen zum Geschiebetransport bei vorwiegend kleineren Abflussintensitäten beschrieben werden (Rickenmann, 2001, 2005). Zur Quantifizierung der Formverluste in steilen Gerinnen bei Hochwasser gibt es aber bisher kaum Untersuchungen (Rickenmann *et al.*, 2006). In diesem Sinne sind die Daten zu den Hochwassern vom August 2005 in der Schweiz eine wertvolle Grundlage für weitere Untersuchungen.



**Abb. 7:** Beobachtete Geschiebefrachten ( $GF$ ), normiert mit der unteren Grenze der relevanten Abflussfracht ( $V_{wp}$ ), in Bezug zum Gerinnegefälle in der Schlüsselstrecke ( $J$ ), und im Vergleich mit der einfachen Geschiebetransportformel (3).

**Fig. 7:** Observed sediment load ( $GF$ ), normalised with the lower value of the relevant runoff volume ( $V_{wp}$ ), in relation to the channel slope ( $J$ ) of the critical reach relevant for fluvial bedload transport, and in comparison with the simple bedload transport equation (3).

## SCHLUSSBEMERKUNGEN

Insgesamt waren im August 2005 relativ wenig Murgangereignisse zu verzeichnen, was darauf zurückzuführen sein könnte, dass die gebietsspezifischen Niederschlagsschwellwerte zur Auslösung von Murgängen nur in vereinzelt Gebieten erreicht oder überschritten wurden.

Praktisch alle Gebirgsflüsse im Niederschlagsgebiet verzeichneten einen hohen Feststofftransport und starke Seitenerosion. Ihre Abflusskapazität war in der Regel nicht ausgeschöpft. Allerdings führten Geschiebeablagerungen und Verkläuerungen dazu, dass die Abflusskapazität örtlich überschritten und angrenzende Gebiete überflutet wurden.

In den Talflüssen waren die Überschreitung der Abflusskapazität und die Seitenerosion die massgeblichen Gerinneprozesse. Bei den Talflüssen flussabwärts der Alpenrandseen führten, trotz der ausgeprägten Dämpfung des Abflusses durch die Seen, primär Überflutungen zu Schäden. Im Gegensatz dazu wurden die Schäden entlang der Talflüsse oberhalb der Seen vornehmlich durch Seitenerosion verursacht.

Die bei den Hochwassern vom August 2005 in der Schweiz beobachteten Geschiebefrachten sind ab Gerinnegefällen grösser als etwa 5% deutlich geringer als die mit der einfachen Geschiebetransportformel (3) berechneten Werte. Dies dürfte unter anderem daran liegen, dass mit der einfachen Geschiebetransportformel die verfügbare Abflussenergie überschätzt wird, weil z.T. bedeutende Verluste des Fließwiderstandes infolge von Formverlusten durch ausgeprägte Sohlstrukturen und grobe Blöcke nicht berücksichtigt werden. Zur Quantifizierung

solcher Formverluste in steilen Gerinnen bei Hochwasser stellen die vorhandenen Daten eine wertvolle Grundlage für weitere Untersuchungen dar. Ein anderer wichtiger Grund für die Diskrepanzen bei Gerinnegefällen grösser als etwa 5% kann die beschränkte Geschiebeverfügbarkeit in steilen Bächen sein.

## LITERATUR

- Eberhard, A., Diezig, R., Kann, C. & Cosandey, A.-C. (2007): Hydrologie Fließgewässer. In: Bezzola, G.R.; Hegg, C. (eds) Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 - Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, 39-70.
- MeteoSchweiz (2006): Starkniederschlagsereignis August 2005. Arbeitsbericht der MeteoSchiweiz 211, 63 p.
- Rickenmann, D. (2001): Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. *Water Resources Research*, 37(12): 3295-3305.
- Rickenmann, D. (2005): Geschiebetransport bei steilen Gefällen. In: Tagungspublikation zu VAW 75 Jahre, Festkolloquium 7. Oktober 2005, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 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., & Cosandey, A.-C. (2007): Gerinneprozesse. In: Bezzola, G.R.; Hegg, C. (eds) Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 - Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, 163-180.
- Schoklitsch, A. (1962): *Handbuch des Wasserbaus*. 3. Ausgabe, Springer Verlag, Wien.
- Zimmermann M., Mani, P., Gamma, P. (1997): Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Schlussbericht NFP 31, Zürich.