

# Analysis and classification of bedload transport events with variable process characteristics

## Analyse und Klassifikation von Geschiebetransportereignissen mit unterschiedlichen Prozesscharakteristika

Andrea Kreisler<sup>1</sup>; Markus Moser<sup>2</sup>; Johann Aigner<sup>3</sup>; Rolf Rindler<sup>3</sup>; Michael Tritthart<sup>3</sup>; Helmut Habersack<sup>3</sup>

### ABSTRACT

In Salzburg/Austria an integrative monitoring system has been installed in the year 2011, which combines direct (mobile basket sampler, bedload trap) and indirect (geophone plates) measuring devices. Comprehensive results have been achieved in the monitoring period. The application of a geophone device enables the permanent recording of the intensity and distribution of bedload transport within the channel cross-section in high spatial and temporal resolution. The calibration of the geophone data is performed using results of direct bedload measurements and gives us the opportunity to calculate bedload rates and bedload yields in selected time periods. This work presents various bedload transport events at the Urslau stream and offers insights concerning measured bedload rates and bedload yields. The assessment of the monitoring data further shows that sediment availability is a determining factor for prevalent bedload fluxes at the Urslau stream.

### ZUSAMMENFASSUNG

In Salzburg/Österreich wurde 2011 ein integratives Monitoringsystem installiert, bei dem direkte (mobiler Geschiebefänger, Geschiebefalle) und indirekte (Geophonanlage) Messgeräte kombiniert werden. Umfassende Ergebnisse konnten im Monitoringzeitraum gewonnen werden. Durch den Einsatz der Geophone wird die Intensität und Verteilung des Geschiebetransportes im Bachquerschnitt in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erfasst. Die Kalibrierung der Geophonaten erfolgt über die Ergebnisse der direkten Geschiebemesungen und ermöglicht uns die Berechnung von Geschiebetransportraten und –frachten in beliebigen Zeiträumen. Diese Arbeit präsentiert unterschiedliche Geschiebetransportereignisse an der Urslau und zeigt Ergebnisse über gemessene Transportraten und Geschiebefrachten auf. Die Analyse der Monitoringergebnisse hat weiters ergeben, dass die Sedimentverfügbarkeit einen entscheidenden Einfluss auf vorherrschende Geschiebetransportraten an der Urslau hat.

1 Universität für Bodenkultur, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau, Vienna, Österreich, andrea.kreisler@boku.ac.at

2 Wildbach- und Lawinerverbauung, Österreich

3 Universität für Bodenkultur, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau, Vienna, Österreich

## KEYWORDS

bedload transport; integrative monitoring system; bedload transport events

## EINFÜHRUNG

Die Bedeutung eines umfangreichen Geschiebemonitorings für Wissenschaft und Praxis, durch welches Geschiebetransportraten, -frachten und Korngrößen gewonnen werden können, ist unumstritten. Die Messung des Transportprozesses ist oftmals herausfordernd, wird jedoch vermehrt von unterschiedlichen Einrichtungen betrieben (z.B. Bunte et al., 2004, García et al., 2000, Habersack et al., 2001, Lenzi et al., 2004, Rickenmann et al., 2012). Naturmessdaten des Geschiebetransportes zeigen häufig eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität auf, wodurch eine starke Streuung der Geschiebetransportraten bei vergleichbaren hydraulischen Bedingungen beobachtet werden kann (Habersack et al., 2008, Mao et al., 2014, Turowski et al., 2009). Wir präsentieren in dieser Arbeit das integrative Geschiebemesssystem, durch welches seit 2011 kontinuierliche Daten des Geschiebetransportprozesses an der Urslau gewonnen werden. Die Messstation wurde vom Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau / Universität für Bodenkultur Wien in enger Zusammenarbeit mit der Wildbach- und Lawinenverbauung in Salzburg errichtet. Es werden in dieser Arbeit Geschiebefrachten und Transportraten von unterschiedlichen Ereignistypen angegeben. Die Auswertung der Daten zeigt unterschiedliche Geschiebetransportraten je nach Ereignistyp und Abflussmenge. Es wird dargestellt, dass die Geschiebeverfügbarkeit einen großen Einfluss auf aktuelle Transportraten hat.

## PROJEKTGEBIET

Das Projektgebiet befindet sich in Salzburg/Österreich, nahe Maria Alm (Abb.1a). Die Urslau entspringt zwischen dem Hochkönig und dem Steinernen Meer (Abb.1b) und mündet nach 18,8km Lauflänge in die Saalach. Das mittlere Gefälle ist 4% und die Größe des Einzugsgebietes beträgt 122 km<sup>2</sup>. Am Pegel Saalfelden beträgt der Mittelwasserdurchfluss (MQ) 4,71 m<sup>3</sup>/s (Hydrografisches Jahrbuch 2012, Reihe 1951-2011). Am Unterlauf der Urslau, rund 7.5 km flussauf der Mündung in die Saalach, wurde im Jahr 2011 eine Geschiebemesstation errichtet (Abb.1c). Hier ist die Bachbreite 8m. Die charakteristische Korngröße D50 des Sohlsubstrats ist 0,05 m und D84 ist 0,09 m.

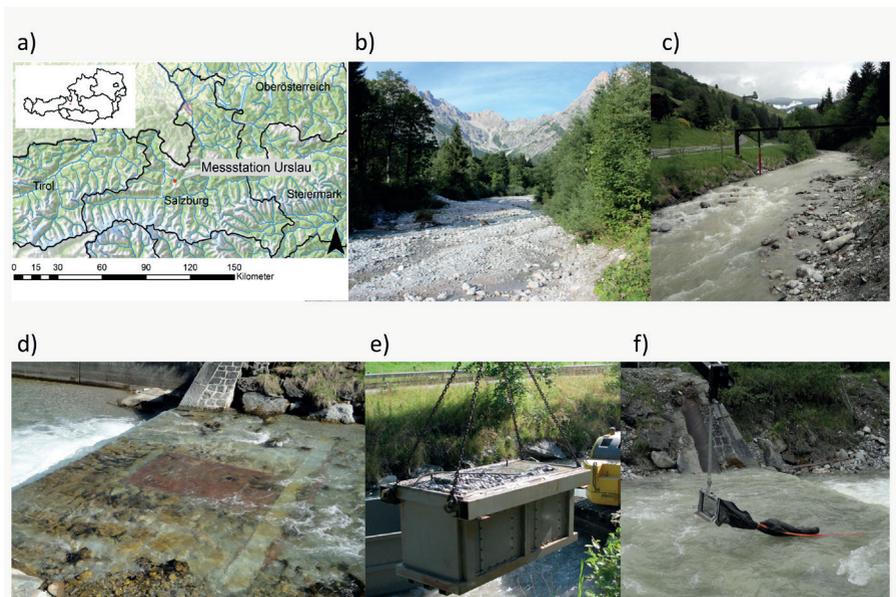


Abbildung 1: (a) geografische Übersicht; (b) Aufnahme des Entstehungsgebiets; (c) Fotografie der Messstation; (d) Geschiebefalle und Geophonanlage; (e) Behälter Geschiebefalle; (f) Fangkorb

### GESCHIEBEMONITORING

An der Station kommt ein Integratives Geschiebemesssystem zum Einsatz, in welchem direkte (mobiler Geschiebefänger, Geschiebefalle) und indirekte (Geophone) Messmethoden kombiniert werden. Im Folgenden wird ein Überblick über die Messgeräte gegeben, genauere Informationen werden in Kreisler et al. (in Bearbeitung) zur Verfügung gestellt. In Habersack et al. (in Bearbeitung) werden detaillierte technische Informationen und Anwendungsmöglichkeiten präsentiert.

Das Konzept des Geschiebefängers (Abb. 1f) basiert auf den mobilen Geschiebefallen, welche in Bunte et al. (2004) präsentiert werden. Geschiebemessungen werden mit Hilfe eines Kranwagens durchgeführt. Die Messung mit dem Fangkorb ist auf niedrige Durchflüsse beschränkt. In höheren Durchflussbereichen wird die Geschiebefalle eingesetzt (Abb. 1d und 1e). Die Geschiebefalle ist in der Mitte des Profils in der Sohle eingebaut. Im Ereignisfall kann ein Messschlitz über einen Hydraulikmechanismus geöffnet werden und das Geschiebe fällt in einen Sammelbehälter, der auf Wägezellen gelagert ist. Über die automatisch aufgezeichnete Massenzunahme wird der Geschiebetrieb erfasst. Durch den Einsatz der direkten Messgeräte kann der Geschiebetransport im gesamten Profil und die Korngrößen erfasst werden. Zusätzlich ist der Einsatz der direkten Messgeräte erforderlich, um die Geophone zu kalibrieren. Flussauf der Geschiebefalle sind sieben Geophone, die an Stahlplatten montiert sind, regelmäßig über den Querschnitt verteilt eingebaut (Abb. 1d). Geschiebepartikel, die über die Platte transportiert werden, erzeugen Vibrationen, die vom Geophon registriert werden.

Dieses Signal wird in ein elektrisches Spannungssignal transformiert und von einem Computersystem weiterverarbeitet. Bei der Verarbeitung des Rohdatensignals werden über eine Software unter anderem jede Minute die Anzahl der Impulse (Überschreiten eines Schwellenwertes von 0,1 Volt) aufgezeichnet. Durch diese automatisierte Messmethode wird der Geschiebetransport sowohl über den gesamten Querschnitt als auch zeitlich kontinuierlich (Minutenwerte) aufgezeichnet.

Die Kalibrierung der Geophone, und damit die Möglichkeit die registrierten Geophonimpulse in Massen des transportierten Geschiebes umzurechnen, erfolgt durch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der direkten Messmethoden und der aufgezeichneten Geophonimpulse. Geophonimpulse werden nur von Geschiebekörnern größer als 10-20mm ausgelöst (Rickenmann et al., 2012). Daher wird für die Erstellung der Kalibrierungsfunktion nur Geschiebematerial >10mm berücksichtigt. Daraus folgt, dass berechnete Geschiebetransportraten und -frachten sich nur auf Geschiebematerial >10mm beziehen. In Kreisler et al. (in Bearbeitung) wird die Kalibrierungsfunktion präsentiert. Es wird gezeigt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem gemessenen Geschiebetrieb und den registrierten Geophonimpulsen besteht und mit der in Formel 1 angegebenen Funktion beschrieben werden kann:

$$\text{imp} = 5.39 * q_b$$

Formel 1: Kalibrierungsfunktion nach Kreisler et al. (in Bearbeitung)

wobei IMP den Mittelwert der registrierten Geophonimpulse im Messzeitraum [ $\text{imp m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ] und  $q_b$  den direkt gemessenen Geschiebetrieb  $D>10\text{mm}$  [ $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ] bezeichnet.

## DATENGRUNDLAGE

Die Auswertung der hier präsentierten Analyse umfasst die Messdaten des Jahres 2012. Es werden basierend auf 15 min Mittelwerten der Geophonimpulse Geschiebetransportraten und -frachten über die Kalibrierungsfunktion in Formel 1 berechnet. Die Durchflussdaten werden in 15 min Intervallen vom hydrografischen Dienst bezogen. Niederschlags- und Temperaturdaten werden von der Messstation 11137 in Maria Alm von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik zur Verfügung gestellt.

## GESCHIEBETRANSPORTEFFIZIENZ

Neben der Ermittlung von Geschiebetransportraten und Frachten kann durch die kontinuierliche Erfassung des Transportprozesses auch der Zusammenhang zwischen Geschiebetransport und Durchfluss untersucht werden. Wir haben in der Monitoringperiode beobachtet, dass die Beziehung zwischen Geschiebetransport und Durchfluss bei den unterschiedlichen Ereignissen verschieden ist. Um diesen Zusammenhang darzustellen, wurde für alle analysierten Geschiebetransportereignisse die Geschiebetransporteffizienz (in Folge mit  $e_p$  bezeichnet) berechnet. Diese wird in Bagnold (1966) als Verhältnis zwischen „bedload work rate“ und „stream power“ definiert und berechnet sich wie folgt:

$$e_b = \frac{i_b \tan \alpha}{\omega}$$

Formel 2: Geschiebetransporteffizienz  $e_p$  nach Bagnold (1966)

wobei  $i_b$  die Geschiebetransportrate unter Wasser darstellt:  $i_b = q \cdot g(\rho_s - \rho_f)$  mit  $q_s$  – volumetrische spezifische Geschiebetransportrate,  $g$  – Erdbeschleunigung,  $\rho_s$  – Feststoffdichte,  $q$  – Fluid-dichte. In Formel 2 ist  $\omega$  - stream power mit  $\omega = \rho g q S$ , worin  $q$  – spezifischer Durchfluss und  $S$  – Gefälle.  $\tan \alpha$  ist der Reibungswinkel und wurde, wie in Recking (2012) vorgeschlagen, in dieser Analyse mit  $\alpha = 52^\circ$  gewählt. Prinzipiell stellt  $e_p$  das Verhältnis aus transportiertem Geschiebematerial und hydraulischen Verhältnissen dar und spiegelt im Zuge dieser Analyse die Intensität eines Ereignisses wieder.

## ERGEBNISSE

Abbildung 2a zeigt die Ganglinie der Tagesmittelwerte des Geschiebetransportes und des Durchflusses des Jahres 2012 an der Ursiau. Zusätzlich sind die Tagessummen des Niederschlags und die Monatsmittelwerte der Temperatur an der Station 11137 in Maria Alm (Daten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) abgebildet. Für die folgende Analyse werden drei Bereiche (B1-B3) der Ganglinie herausgehoben.

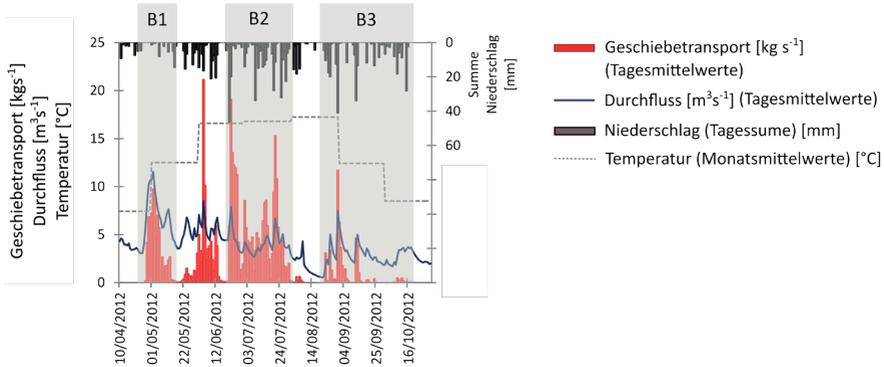
Bei Bereich B1 handelt es sich um die Schneeschmelzperiode. Die Niederschlagssummen sind verglichen mit den Sommermonaten gering und die Tagesmittelwerte des Durchflusses hoch. Die Ganglinie in Abbildung 2a veranschaulicht sehr gut, dass in dieser Schneeschmelzperiode die höchsten Tagesmittelwerte des Durchflusses vorherrschten. Ein exemplarischer Bereich (3 Tage) der Schneeschmelzperiode ist detailliert (15 min Mittelwerte) in Abbildung 2b dargestellt. Ein deutlicher Tagesgang der beiden Messwerte ist ersichtlich. Für die weitere Analyse wurde der Bereich B1 in Teilereignisse gegliedert. Diese Gliederung erfolgte nach hydrologischen Verhältnissen (Durchflussspitzen). Insgesamt umfasst Bereich B1 10 Teilereignisse, wobei davon TE2, TE3 und TE4 in Abbildung 2b dargestellt sind.

Der zweite Bereich B2 umfasst ein lang andauerndes Geschiebetransportereignis im Sommer. Der Anfang des Ereignisses ist in 15 Minuten Auflösung in Abbildung 2b dargestellt.

Bei diesem Ereignis wurde über einen Zeitraum von ungefähr 40 Tagen kontinuierlich Geschiebetransport erfasst. Dieser Bereich B2 wurde im Zuge der folgenden Analyse in 10 Teilereignisse geteilt.

Auf das langandauernde Geschiebeereignis (Bereich B2) folgen im Jahr 2012 7 weitere kleinere Ereignisse. Diese Folgeereignisse werden im Bereich B3 zusammengefasst. Das höchste dieser Folgeereignisse trat in der Nacht vom 23.08.2012 auf den 24.08.2012 auf und dauerte nur 10 Stunden. Abbildung 2b zeigt dieses Ereignis. Die Geschiebefracht des Bereichs B1 (Schneeschmelze) liegt bei 6500 t (27.04.12-06.05.12). Die mittlere Fracht von den Teilereignissen ist 450 t. Die mittlere Geschiebetransportrate von B1 beträgt  $4.5 \text{ kgs}^{-1}$ . Im Zuge des in Bereich B2 dargestellten Ereignisses wurde in einem Zeitraum von 40 Tagen eine Geschiebefracht von ca. 19800 t transportiert. In diesem Zeitraum betrug die mittlere Transportrate  $5.8 \text{ kgs}^{-1}$ . Die Geschiebefracht des Ereignisses, welches in Abbildung 3c dargestellt ist, beträgt 274 t. Hierbei wurde ein maximaler Geschiebetransport von  $63 \text{ kgs}^{-1}$  gemessen.

a) Ganglinie Tageswerte



b) Ganglinie 15min-Werte

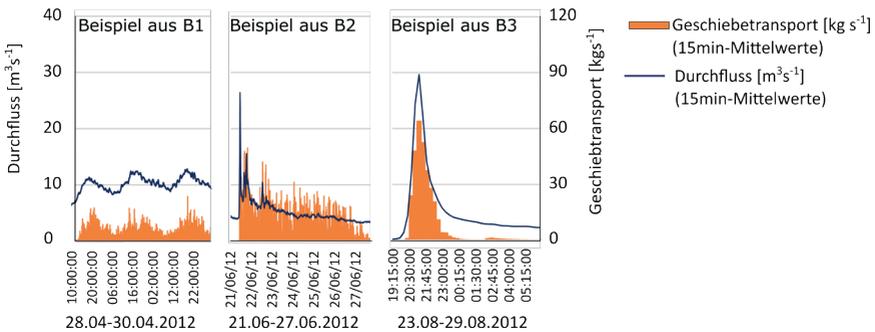


Abbildung 2: (a) Jahresganglinie von Durchfluss, Geschiebetransportrate, Niederschlagssumme und Temperatur; (b) ausgewählte Ereignisse

Wie im Kapitel „Geschiebetransporteffizienz“ beschrieben, wurde für die analysierten Ereignisse der Wert  $e_p$  nach Bagnold (1966) (Formel 2) berechnet und in Abbildung 3a eingetragen. In Abbildung 3b werden jeweils die Mittelwerte des Geschiebetransportes und des Durchflusses der jeweiligen Teilereignisse dargestellt. Es zeigt sich in dieser Auswertung, dass der mittlere Durchfluss im Zeitraum der Schneeschmelze vergleichbar hoch ist. Die Abbildung veranschaulicht weiter, dass unter den analysierten Ereignissen die mittleren Geschiebetransportraten von TE1 und TE2 in Bereich 2 am größten waren. Es ist auffallend, dass bei TE10 am Ende des Bereichs B2 der mittlere Geschiebetransport abnimmt, obwohl der Durchfluss, im Vergleich zu den vorherigen Werten, relativ konstant bleibt. Selbiges gilt für die Teilereignisse in Bereich B3. Der mittlere Durchfluss variiert hier zwischen 3.9 und 5.6  $m^3 s^{-1}$ , jedoch nimmt die mittlere transportierte Geschieberate ab. Diese Beobachtung wird auch durch die Ergebnisse für  $e_p$  in Abbildung 3a bestätigt. Hier werden die berechneten Werte  $e_p$  pro Teilereignis in einem Box-Plot Diagramm dargestellt. Berechnete  $e_p$  Ergebnisse für die Teilereignisse ,TE1 und TE2 in Bereich 2 sind im Vergleich zu den anderen Werten sehr hoch,

woraus die Autoren in diesem Teilbereich auf intensiven Geschiebetransport schließen. Von TE3 bis TE9 (Bereich 2) liegen die Werte in der gleichen Größenordnung und werden erst bei dem Teilereignis TE10 (Bereich 2) niedriger, da bei vergleichbaren Durchflussraten ein geringerer Geschiebetransport registriert wurde. Die Werte für  $e_p$  der Ereignisse in Bereich 3 liegen in derselben Größenordnung wie Ereignis TE10 (Bereich B2). Es zeigt sich in Abbildung 2 deutlich, dass die Beziehung zwischen Geschiebetransport und Durchfluss bei den unterschiedlichen Ereignissen nicht konstant ist. Wir interpretieren für die hier dargestellten Ereignisse, dass während der Durchflussspitze von Bereich 2 (TE1 und TE2) viel Geschiebematerial mobilisiert und im weiteren Verlauf des Ereignisses transportiert wurde. Erst im Teilereignis TE10 kommt es zu einer verminderten Geschiebeverfügbarkeit und dadurch zu einem geringeren Wert von  $e_p$  für die folgenden Ereignisse. Im Zeitraum der Schneeschmelze konnten sehr hohe Durchflussraten beobachtet werden, jedoch vergleichbar moderate Geschiebetransportraten. Die berechneten  $e_p$  Werte liegen im Bereich der Teilereignisse von Bereich 3. Wir folgern daraus, dass im Zeitraum der Schneeschmelze die lang anhaltenden hohen Abflüsse zu einem Ausräumen des Gerinnes und damit reduziertem Geschiebedargebot an der Gewässersohle geführt haben und durch die bestehende Schneedecke der Geschiebeeintrag aus dem Einzugsgebiet eingeschränkt war. Zusätzlich fehlen dem Abflussprozess, der in diesem Zeitraum durch kontinuierliche hohe Werte charakterisiert ist, intensive und rasch ansteigende Durchflussspitzen. Verminderte Geschiebetransportraten in der Schneeschmelzperiode bei vergleichbaren Durchflusswerten wurden unter anderem von Mao et al., 2014 und Rickenmann et al., 1998 beobachtet.

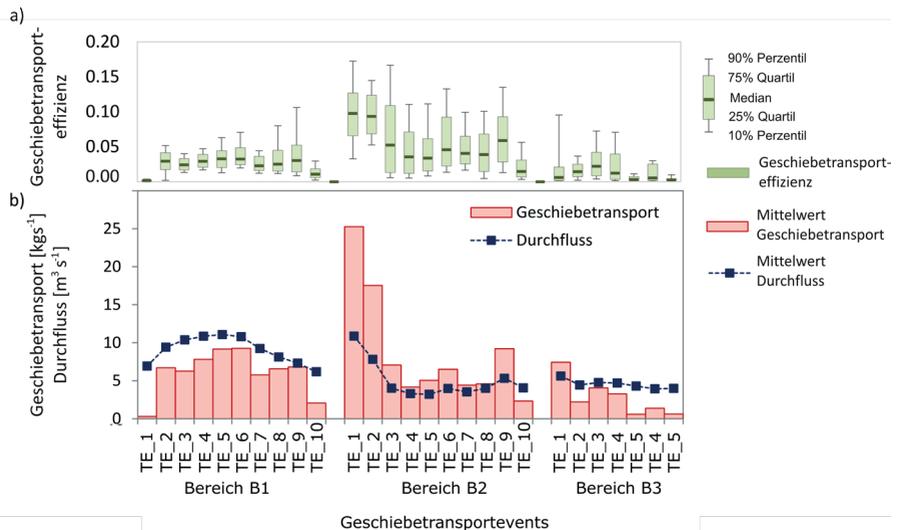


Abbildung 3: (a) Berechnete Geschiebetransporteffizienz; (b) Mittlerer Geschiebetransport und Durchfluss für die ausgewählten Teilereignisse.

## FAZIT

Durch den Einsatz des integrativen Geschiebemesssystems an der Ursiau können wichtige Messdaten über den Geschiebetransport in einem Wildbachunterlauf gewonnen werden. Durch das langjährige Monitoring konnte eine Kalibrierungsfunktion für die Geophone erstellt werden. Es wird somit ermöglicht, aus den kontinuierlichen und automatisch erfassten Geophondaten Geschiebetransportraten und -frachten in beliebigen Zeiträumen zu ermitteln. In dieser Arbeit werden die Daten eines Messjahres präsentiert, und es werden Geschiebefrachten und Transportraten von ausgewählten Ereignissen an der Ursiau angegeben. Diese Werte sind nicht nur für wildbachtechnische Fragestellungen in der Praxis wichtig, sondern ermöglichen auch ein erweitertes Prozessverständnis und bilden die Basis für die Kalibrierung und Weiterentwicklung von Transportformeln sowie numerischen Feststofftransportmodellen. Wir haben in dieser Arbeit dargestellt, dass an der Ursiau hinsichtlich des Geschiebetransportverhaltens unterschiedliche Ereignisse auftreten. Es zeigt sich, dass die Beziehung zwischen Durchfluss und Geschiebetransport bei den unterschiedlichen Ereignissen nicht konstant ist. Schmelzbedingte Ereignisse liefern andere Transportraten als Ereignisse die durch Niederschlag bedingt sind. Bei langandauernden Ereignissen und Folgeereignissen konnten wir eine Abnahme des Geschiebetransportes bei vergleichbaren hydraulischen Verhältnissen beobachten. Die Vorgeschichte dieser Folgeereignisse führte zu einem „Ausräumen“ des leicht mobilisierbaren Materials an der Sohle und den Erosionsquellen am Ufer. Auch die Ausbildung einer Deckschicht wird von den Autoren angenommen. Wir folgern auf Basis des hier dargestellten Messjahres, dass an der Ursiau unterschiedliche Geschiebeverfügbarkeiten und die Vorgeschichte eines Ereignisses den vorherrschenden Geschiebetransport beeinflussen.

## LITERATUR

- Bagnold R. A. (1966): An approach to the sediment transport problem from general physics, Geological survey Professional Paper. Washington.
- Bunte K., Abt S., Potyondy J., Ryan S. (2004): Measurement of Coarse Gravel and Cobble Transport Using Portable Bedload Traps, in: Journal of Hydraulic Engineering, 130, S. 879-893.
- Garcia C., Larone J.B., Sala, M. (2000): Continuous monitoring of bedload flux in a mountain gravel-bed river, in: Geomorphology, 34, S. 23-31.
- Habersack H., Kreisler A., Aigner J., Rindler R., Seitz H., Liedermann, M. (in Bearbeitung). Integrative automatic bedload transport monitoring
- Habersack H., Nachtnebel P., Laronne J. (2001): The continuous measurement of bedload discharge in a large alpine gravel bed river, in: Journal of Hydraulic Research, 39, S. 125-133.
- Habersack H., Seitz H., Laronne J. (2008): Spatio-temporal variability of bedload transport rate: Analysis and 2D modelling approach, in: Geodinamica Acta, 21, S. 67-79.
- Kreisler A., Moser M., Aigner J., Rindler R., Tritthart M., Habersack H. (in Bearbeitung): Analysis and classification of bedload transport events with variable process characteristics

- Lenzi M. A., Mao L., Comiti F. (2004). Magnitude-frequency analysis of bed load data in an Alpine boulder bed stream, in: *Water Resources Research*, 40, W07201.
- Mao L., Dell'Agnese A., Huincahe C., Penna D., Engel M., Niedrist G., Comiti F. (2014). Bedload hysteresis in a glacier-fed mountain river, in: *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, S. 964-976.
- Recking A. (2012). Influence of sediment supply on mountain streams bedload transport, in: *Geomorphology*, 175–176, S. 139-150.
- Rickenmann D., D'Agostino V., Fontana G., Lenzi M., Marchi L. (1998). New results from sediment transport measurements in two Alpine torrents. IAHS Publication no. 248, S.283-289.
- Rickenmann D., Turowski J. M., Bruno F., Angela K., Andreas L. (2012). Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers, in: *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Turowski J. M., Yager E. M., Badoux A., Rickenmann D., Molnar P. (2009). The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel, in: *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, S. 1661-1673.