

# Messung und Modellierung von Geschiebetransportprozessen in alpinen Einzugsgebieten

*Gabriele Harb, Josef Schneider, Johannes Stangl und Oliver Sass*

## Zusammenfassung

Mögliche Veränderungen der Niederschlagsmenge, der Niederschlagsverteilung und der Schneedeckenentwicklung durch die aktuelle Klimaerwärmung könnten sich auch auf den Sedimenthaushalt alpiner Einzugsgebiete auswirken. Um die Sedimentfracht der Wildbäche und deren mögliche Änderungen verstehen zu können und technische Schutzmaßnahmen zu optimieren, sind Messstationen zur Erfassung des Sedimenttransports erforderlich; diese sind jedoch in Österreich nur spärlich vorhanden. In dem Beitrag werden die Ergebnisse von Feldmessungen und numerischer Modellierung von Sedimenttransportprozessen in einem alpinen Einzugsgebiet in Österreich dargestellt (Schöttlbachtal, Steiermark). Im Rahmen der Feldmessungen wurden u.a. ein Messnetz für Niederschlag und Abfluss implementiert, Oberflächenveränderung im Projektgebiet durch photogrammetrische Untersuchungen mit Drohnen (UAVs) ermittelt und ausgewählte Erosionsflächen in aktiven Teilbereichen mit regelmäßigen terrestrischen Laserscans (TLS) aufgenommen. Der fluviale Sedimenttransport im Gerinne wurde durch im Projekt weiterentwickelte Sediment-Impact-Sensoren (SIS) erfasst und mittels Geschiebemessungen kalibriert. Diese Daten wurden mit Bewegungsdaten von Tracersteinen und regelmäßigen Volumensbestimmungen des Geschieberückhaltebeckens am Ende des Einzugsgebiets ergänzt.

Ergebnisse geophysikalischer Messmethoden zeigen, dass die Mächtigkeit der erodierbaren Sedimente im unteren Einzugsgebiet bei 20-30 m liegt, so dass keine Erschöpfung der Sedimentverfügbarkeit in absehbarer Zeit zu erwarten ist. Die höchste Transportkapazität ergibt sich in den untersten 1-2 km des Einzugsgebiets zwischen dem Zusammenfluss der beiden Hauptzubringer und dem Geschieberückhaltebecken. Die regelmäßigen Laserscans des Rückhaltebeckens zeigen einen sehr hohen Geschiebeeintrag im ersten Halbjahr nach dem Hochwasserereignis von 2011, der sich in den folgenden drei Jahren von 40.000 m<sup>3</sup> auf unter 4.000 m<sup>3</sup> pro Jahr reduzierte. Das Einzugsgebiet hat sich nach dem Extremereignis wieder weitgehend stabilisiert, in den letzten 1-2 Jahren lagen die Erosionsraten an den Seitenhängen in annähernd derselben Größenordnung wie die Ablagerungen im Rückhaltebecken. Die numerische Modellierung zeigt gute Übereinstimmung mit den Validierungsdaten aus den Feldmessungen.

## 1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten konnte ein Ansteigen von extremen Wetterereignissen beobachtet werden (IPCC, 2012). In Hinblick auf den Klimawandel kann global mit einer weiteren Verstärkung dieses Trends gerechnet werden. Die regionalen Auswirkungen des Klimawandels sind aber vor allem in alpinen Gebieten, noch mit großen Unsicherheiten behaftet (Gobiet et al., 2014), allerdings ist in Zukunft mit einem Rückgang der Schneemenge zu rechnen.

Bei einem Ansteigen von Starkregenereignissen steigt jedoch auch die Wahrscheinlichkeit für Hochwasser, Muren oder Hangrutschungen. Aufgrund der hochvariablen Wetterbedingungen und des Reliefs sind Extremereignisse im Gebirge äußerst schwer vorherzusagen. Die

möglichen Änderungen der Niederschlagsmenge, der Niederschlagsverteilung und der Schneedecke können sich auf den Sedimenthaushalt auswirken. In den letzten Dekaden wurde versucht, den Sedimenttransport in den Zubringern mit technischen Maßnahmen einzudämmen und so Schäden in den Siedlungsgebieten zu verhindern. Seit einigen Jahren hat, auch aus finanziellen Gründen, ein Umdenken eingesetzt. Die große Herausforderung in der Zukunft ist die Gewährleistung des Schutzes vor Katastrophenereignissen wie Murgängen, wobei der morphologische und ökologische Zustand möglichst naturnah bleiben soll.

Effizientes Sedimentmanagement benötigt ein umfassendes Wissen über die geomorphologischen Prozesse in den Einzugsgebieten und Sedimenttransportprozesse in den Gewässern. Allerdings gibt es wenig dokumentierte und veröffentlichte Messungen des Sedimenttransports in alpinen Flüssen, z.B. in Valois/Schweiz (Turowski et al. 2008), am Erlenbach/ Schweiz (Rickenmann and Fritschi 2010, Rickenmann et al. 2012) und in der Urslau/Österreich (Kreisler et al. 2014). Vor allem die Messung des Geschiebetransports stellt bei Extremereignissen eine große Herausforderung dar, da hier nach Ergenzinger and Kozlowski (1999) das gesamte Sediment im Gerinne bewegt werden kann.

Der vorliegende Beitrag zeigt einen Überblick über das installierte Messnetz im Projektgebiet Schöttlbach (Obersteiermark, Österreich), die wesentlichen Ergebnisse seit 2011 und gibt einen Überblick über die numerische Modellierung des Gebiets im Rahmen des Projektes ClimCatch. Das Einzugsgebiet ist charakterisiert durch das steile Sohlgefälle ( $> 4\%$ ) und große Mengen von mobilisierbaren Lockersedimenten. Das Gebiet wurde durch ein massives Hochwasserereignis 2011 beeinflusst.

## **2 Projektgebiet und Hintergrund**

### **2.1 Beschreibung Projektgebiet**

Das Einzugsgebiet des Schöttlbachs liegt in den Niederen Tauern in den Zentralalpen Österreichs. Die Hauptzubringer sind der Schöttlbach und der Krumeeggerbach. Der Schöttlbach hat ein Einzugsgebiet von  $71 \text{ km}^2$  mit einer Gesamtlänge von  $15,4 \text{ km}$  und einem mittleren Gefälle von  $4,1 \%$ . Das beobachtete Mittelwasser von 2012-2015 bei Oberwölz, am Auslass des Einzugsgebiets, liegt bei  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , das  $\text{HQ}_{30}$  bei  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  und das  $\text{HQ}_{100}$  bei  $125 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der Krumeeggerbach hat ein Einzugsgebiet von  $16 \text{ km}^2$  mit einer Gesamtlänge von  $7,7 \text{ km}$  und einem mittleren Gefälle von  $12,9 \%$ .

Das Einzugsgebiet ist nicht vergletschert und erstreckt sich von  $2375 \text{ m ü.A.}$  (Hochweber Spitze) auf  $815 \text{ m ü.A.}$  (Oberwölz). Die Hauptsedimentquelle im Einzugsgebiet ergibt sich aus der Erosion der pleistozänen Sedimente, die in Form von Terrassen an den Hängen des Schöttlbachs liegen. Diese hoch erodierbaren, glazialen Sedimente sind signifikant für das Einzugsgebiet und aufgrund der Tiefenerosion an den Zubringern und seitlichen Feilenanrissen vor allem in den unteren Teilen des Einzugsgebiets verfügbar.

Im Projektgebiet steigen die Abflüsse in den Zubringern bei Gewittern und lokalen Niederschlagsereignissen sehr rasch an. Die Abflussspitze in der Stadt Oberwölz, am Ende des Einzugsgebiets, wird meist  $1-2 \text{ h}$  nach Einsetzen der Niederschläge erreicht. Dabei treten im Bereich des Stadtgebiets Fließgeschwindigkeiten bis zu  $5 \text{ m/s}$  im Gerinne auf.

## 2.2 Hintergrund – Hochwasserereignis 2011

Am Nachmittag des 7. Juli 2011 waren hohe Niederschläge über 3 Stunden mit bis zu 70 mm/h (Hübl et al., 2011) aufgrund eines lokalen Wärmegewitters der Auslöser eines Hochwasserereignisses im unteren Bereich des Schöttbachs. Dabei stieg der Abfluss innerhalb kurzer Zeit auf etwa 100 m<sup>3</sup>/s an und überflutete die Stadt Oberwölz und die umliegenden Siedlungsgebiete. Der hohe Wasserspiegel und die hohen Fließgeschwindigkeiten im Gerinne führten weiters zu Erosionsprozessen und daraus folgendem massiven Sedimenttransport (siehe Abbildung 1).

Durch das Hochwasserereignis wurden große Mengen an Sedimentenkörpern freigelegt die nun zum Transport zur Verfügung stehen, dadurch konnten danach auch niedrige Niederschlagsereignisse vergleichsweise hohen Sedimenttransport auslösen. Nach der Terminologie von Recking (2012) haben sich die Bedingungen im Einzugsgebiet von *moderate sediment supply* zu *high sediment supply* verschoben.



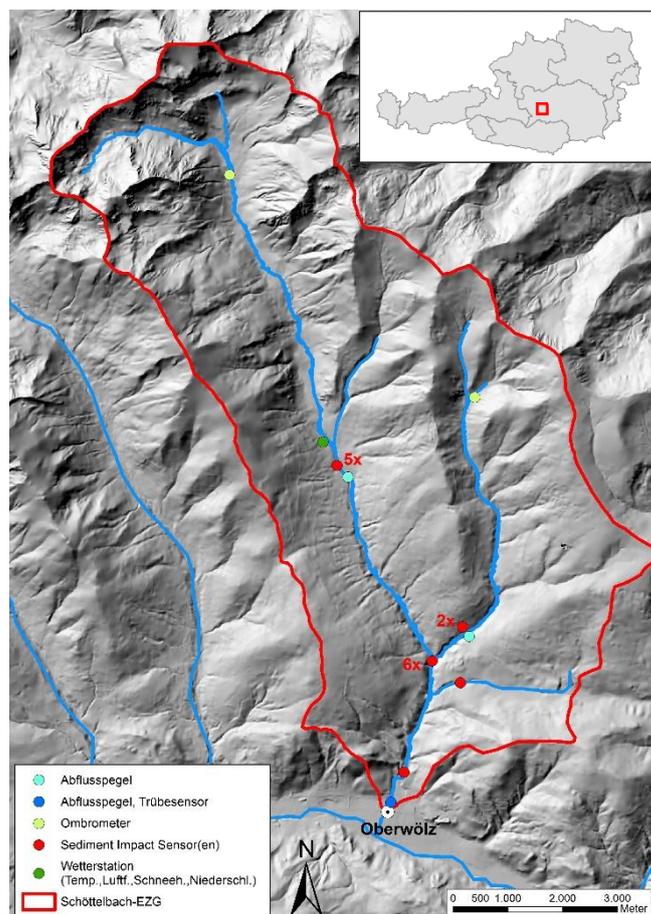
**Abb. 1** Sedimenteintrag durch Seitenerosion im Einzugsgebiet (links) und zerstörtes Wohnhaus durch das Hochwasserereignisses 2011 (rechts)

## 3 Methodik und Messnetz

Um die Zusammenhänge von Niederschlag, Abfluss und Sedimenttransport zu erfassen, wurde ein umfangreiches Messnetz im Einzugsgebiet installiert (Abbildung 2). Zusätzlich zu den in diesem Beitrag beschriebenen Messungen wurden Radio- und Fartracersteine, Structure-from-Motion (SfM) und terrestrische Laserscans zur Überwachung der Erosions- „hot spots“; Hammerschlag- und Sprengseismikuntersuchungen, Kartierungen und multitemporale Drohnenbefliegungen im Rahmen des Projektes durchgeführt.

### 3.1 Niederschlags- und Abflussmessung

Die Niederschlagsdaten werden an einer meteorologischen-Station (Temperatur, Luftfeuchte, Schneehöhe & Niederschlagswaage) in der Mitte des Einzugsgebiets und zwei Ombrometern (Kippwaagenprinzip mit Logger) in den höheren Bereichen der Hauptzubringer gemessen und von drei umliegenden ZAMG-Stationen ergänzt. Am Auslass des Einzugsgebiets in der Stadt Oberwölz wurde eine Abflussmessstation installiert, die den Wasserstand, die Oberflächenfließgeschwindigkeit, die Trübung, die Leitfähigkeit und die Wassertemperatur aufzeichnet. Zusätzlich wurden zwei Druckpegel in den oberen Bereichen des Einzugsgebiets installiert. Die Pegelstationen wurden mit Salztracer- und Nautilus-Messungen kalibriert.



**Abb. 2** Das installierte Messnetz im Einzugsgebiet

### 3.2 Sediment Impact Sensoren (SIS)

Die Sedimenttransportraten wurden über sogenannte Sediment-Impact-Sensoren (SIS) bestimmt, die im Rahmen des Projektes weiterentwickelt wurden (siehe Abb. 3 rechts). Die SIS bestehen aus einer Stahlplatte, auf deren Unterseite ein Sensor befestigt ist, der die Impulse des über den Sensor transportieren Geschiebes misst. In Abbildung 3 links sind Farbracersteine dargestellt, wie sie im Rahmen des Projektes ClimCatch zum Einsatz kamen.



**Abb. 3** Farbracersteine (links) (Spreitzer, 2014) und Sediment Impact Sensor (SIS) auf einer Rampe im Schöttelbach mit Geschiebefangekorb

### 3.3 Terrestrische Laserscans (TLS)

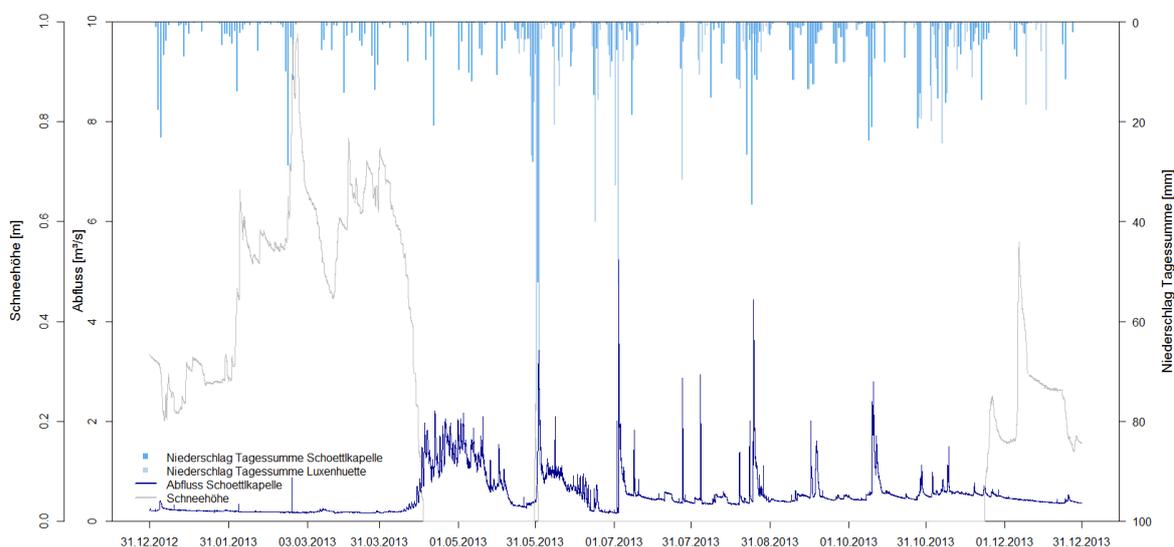
Für die Aufnahmen der Verlandung im Rückhaltebecken wurde ein Laserscanner der Marke Riegl VZ-620 TLS verwendet. Für die Positionierung der verschiedenen Punktwolken wurden mehrere reflektierende Verbindungspunkte im Bereich des Rückhaltebeckens installiert. Das Rückhaltebecken wurde im Laufe von drei Jahren 11-mal gescannt.

## 4 Numerische Modellierung

Zusätzlich zu den umfangreichen Messungen im Einzugsgebiet wurde auch ein 1D-Modell des unteren Bereiches des Schöttlbachs aufgesetzt. Dabei wurde die Software TomSed (Chiari, 2010) verwendet, um den Geschiebetransport zu simulieren. TomSed unterteilt dabei die implementierten Querprofile in einzelne Abschnitte in Abhängigkeit von der Profilgeometrie („stream-tube-approach“) und berechnet für diese die einzelnen Parameter wie den spezifischen Abfluss oder die Transportkapazität. Das Modell wurde mit dem Hochwasserereignis 2011 und einzelnen Niederschlagsereignissen 2013 kalibriert. Weiters wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Die Jahresabflussganglinie am Schöttlbach ist geprägt von Niederwasserabfluss in den Wintermonaten, gefolgt von einer breiten Abflussspitze durch die Schneeschmelze von Mitte April bis Mitte Mai. Ab Mai bis Ende Oktober prägen kurze, hohe Abflussspitzen die Ganglinie, die von lokalen Niederschlagsereignissen verursacht werden. Diese lokalen Niederschlagsereignisse erfassen oft nur Teilbereiche des Einzugsgebiets und werden daher oft nur bei einer Niederschlagsstation aufgezeichnet (Abbildung 4).

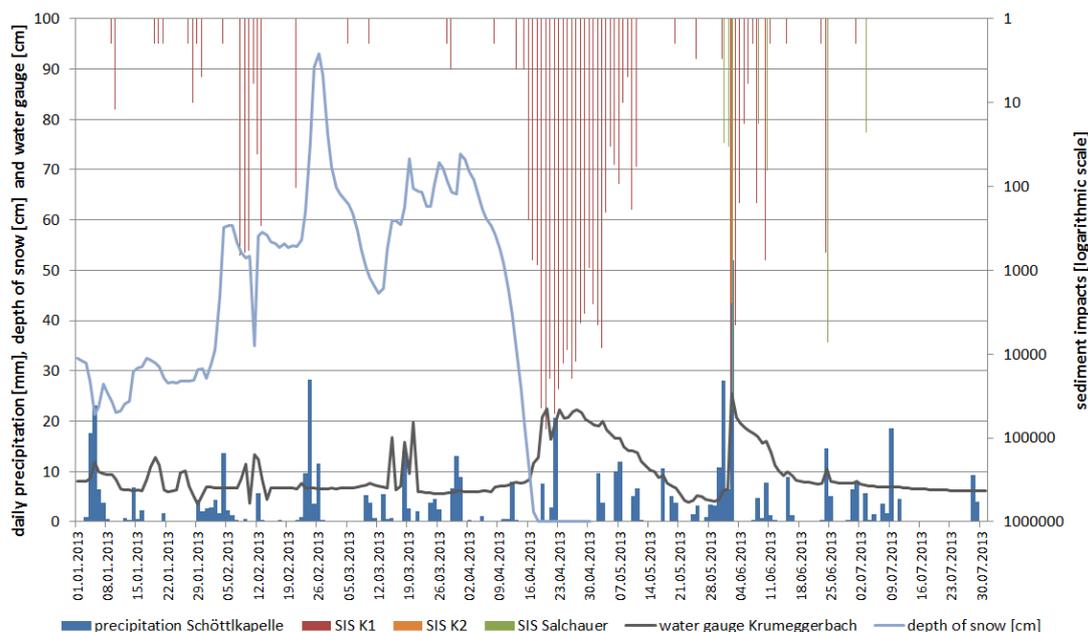


**Abb. 4** Korrelation des gemessener Niederschlag (blaue Säulen), Abfluss (dunkelblaue Linie) und Schneehöhen (graue Linie) an den Messstationen „Schöttlkapelle“ und „Luxenhütte“ im Jahr 2013

Die Auswirkung der Abflussganglinie auf den Sedimenttransport ist in Abbildung 5 beispielhaft für den Krumeggerbach im ersten Halbjahr 2013 dargestellt. Auch hier ist ersichtlich, dass der Abfluss am Krumeggerbach (blaue Linie) nicht auf jedes Niederschlagsereignis bei der Schöttlkapelle (3 km entfernt) reagiert. Weiters hängt die Anzahl der aufgezeichneten Sedimenttrans-

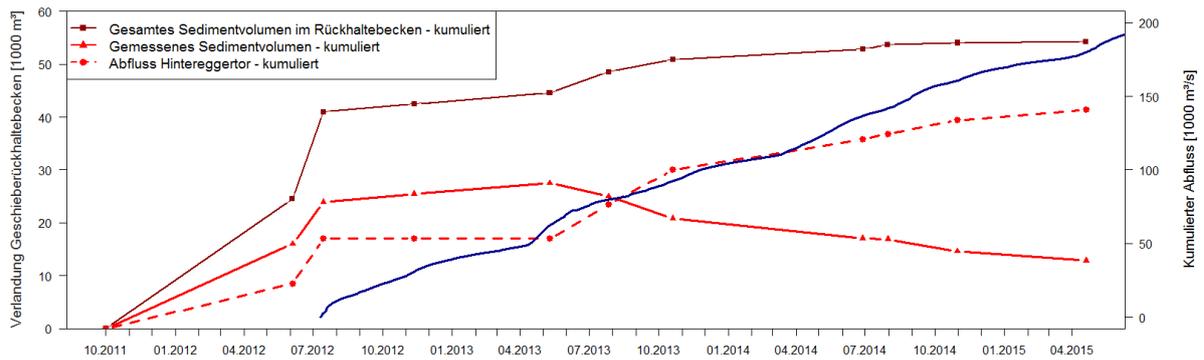
port-Impulse von der Lage der einzelnen Sensoren im Flussbett ab. Der Sensor SIS K1 im Krumeggerbach reagiert z.B., bei fast allen Abflussspitzen, wobei der Sedimenttransport hauptsächlich am steigenden Ast der Abflusskurve stattfindet. Nach der Schneeschmelze im April 2013 wurde sehr starker Geschiebetransport aufgezeichnet. Die Sensoren SIS K2 am Krumeggerbach und am Salchauerbach zeichnen hingegen erst im Mai nach einer Umlagerung im Gerinne Sedimenttransport auf.

Die Ergebnisse der Vermessung der Verlandung im Geschieberückhaltebecken sind in Abbildung 6 dargestellt. Im ersten Winter nach dem Hochwasserereignis (2011/2012) wurden trotz Niederwasserbedingungen große Mengen an Geschiebe in das Rückhaltebecken transportiert. Diese hohen Sedimentmengen sind sehr wahrscheinlich durch die gestörten Bedingungen im Einzugsgebiet und die hohe Sedimentverfügbarkeit verursacht worden. Die transportierte Jahresgeschiebemenge sinkt von über 40.000 m<sup>3</sup> in den Jahren 2011/12 auf weniger als 4.000 m<sup>3</sup> in 2013/14. Die Abbildung zeigt auch, dass die Verlandungskurve im Rückhaltebecken abflacht, während das summierte Abflussvolumen weiter relativ konstant ansteigt. Daher kann die sinkende Geschiebetransportrate auf reduzierte Sedimentverfügbarkeit zurückgeführt werden.



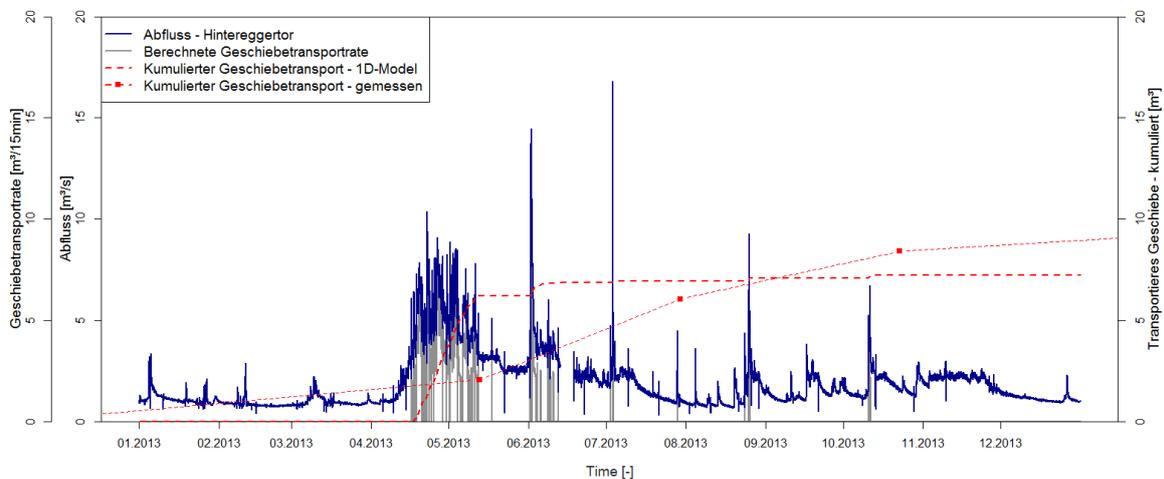
**Abb. 5** Korrelation des gemessener Niederschlag (blaue Säulen), Abfluss (dunkelblaue Linie), Schneehöhen (hellblaue Linie) und des Geschiebetransports (rote, gelbe und grüne Säulen) am Krumegger- und Salchauerbach im ersten Halbjahr 2013

Die Berechnungen mit dem 1D-Modell zeigten, dass es aufgrund der verschiedenen Sedimenttransportprozesse bei verschiedenen Abflussszenarien im Gerinne, wie z.B. durch das Aufreißen der Deckschicht oder Abpflasterungsprozessen sowie Hiding- und Exposure-Effekten nicht möglich war, eine universelle Kalibrierung durchzuführen. Daher mussten für die Sedimenttransportberechnungen des Extremhochwassers 2011 und der Abflüsse in den Jahren 2012-2015 zwei verschiedene Parametersets verwendet werden.



**Abb. 6** Entwicklung des Sedimentvolumens im Rückhaltebecken am Auslass des Einzugsgebiets und kumuliertes Abflussvolumen an der Pegelstation Hintereggertor in Oberwölz. Das gemessene Sedimentvolumen ist ab 2013 aufgrund von Schotterentnahmen rückläufig; diese wurden quantifiziert und dem gesamten Sedimentvolumen zugerechnet.

Abbildung 7 zeigt die gemessenen Abflüsse (blaue Linie) an der Station Hintereggertor in Oberwölz und die berechneten Geschiebetransportraten (graue Linie), die zum kumulierten Geschiebetransport (rote grob strichlierte Linie) aufsummiert wird. Dieser berechnete kumulierte Geschiebetransport wird mit dem gemessenen kumulierten Geschiebetransport (rote fein strichlierte Linie) verglichen. Das Ergebnis zeigt, dass die Größenordnung des berechneten kumulierten Geschiebetransports gut zu dem gemessenen Geschiebetransport passt, aber die zeitliche Verteilung des Transports vom 1D-Modell nicht wiedergegeben wird.



**Abb. 7** Vergleich des gemessenen und des berechneten Geschiebetransports in das Rückhaltebecken (rote Linien) mit Abflussganglinie (blaue Linie) und berechneter Geschiebetransportrate (graue Linie)

Im Vergleich zur Simulation wird in der Natur mehr Sediment bei niedrigeren Abflüssen transportiert und weniger Sediment bei höheren Abflüssen. Eine Erklärung für diesen Unterschied ist die Implementierung im 1D-Modell, bei der der Seiteneintrag von den steilen Gerinnehängen zum Teil vernachlässigt worden ist. Weiters können lokale Deckschicht- und Abpflasterungsprozesse den Sedimenttransport bei höheren Abflüssen einschränken.

## 6 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen im Einzugsgebiet haben gezeigt, dass das extreme Hochwasserereignis von 2011 durch das Aufreißen der Deckschicht in der Flusssohle, das Anreißen der Gerinneböschungen mit der folgenden Seitenerosion und die massiven Feilenrisse der steilen Zubringer den Sedimenteintrag im Einzugsgebiet von einem moderatem Niveau auf ein hohes Niveau verschoben hat. Im ersten Winterhalbjahr 2011/2012 ist in der Niederwasserperiode überraschend viel Sediment aus dem Einzugsgebiet ausgetragen worden, seitdem sinkt die Sedimentaustragsrate wieder ab. Die gemessenen Niederschlagsdaten, Abflusswerte und Sedimentimpulse zeigen gute Übereinstimmung. Die Berechnungen mit dem 1D-Modell zeigen ebenfalls, dass bei verschiedenen Abflussszenarien unterschiedliche Sedimenttransportprozesse im Gerinne wirken, wie z.B. durch das Aufreißen der Deckschicht oder Abpflasterungsprozesse, Hiding- und Exposure-Effekte, und daher eine universelle Festlegung der Parameter für das Extremereignis und die folgenden Jahresganglinien von 2012-2015 nicht möglich war.

Die Ergebnisse spiegeln die Komplexität der Faktoren bei Geschiebe- und Sedimenttransportprozessen wider und zeigen die Probleme bei der Messung des Geschiebetransports in alpinen Einzugsgebieten.

### Danksagung

Das Forschungsprojekt *Impact of climate change on the sediment yield of alpine catchments* (ClimCatch) wurde von 2012-2015 vom Institut für Geographie und Raumforschung der Karl-Franzens-Universität Graz als Projektleitung, dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Graz, und dem Wegener Center for Climate and Global Change der Karl-Franzens Universität Graz durchgeführt. Das Projekt wurde vom Österreichischen Klimafond finanziert (Austrian Climate Research Program – ACRP).

### Literatur

- Chiari, M., Friedl, K., Rickenmann, D. (2010). A one dimensional bedload transport model for steep slopes, *Journal of Hydraulic Research* Vol. 48(2), 152-160
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps – A review, *Science of the Total Environment* Vol. 493, 1138-1150.
- Ergenzinger, P. and Kozlowski, B. (1999). Ring structures - a specific new cluster type in steep mountain torrents. *Proceedings IAHR Conference 1999, Graz*.
- IPCC, (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

- Kreisler, A; Moser, M; Tritthart, M; Aigner, J; Rudolf-Miklau, F; Habersack, H. (2014): Monitoring and calculation of bedload Transport at the mountain torrent Urslau In: Fujita, M; Araki, Y; Daimaru, H; Gomi, T; Kaibori, M; Miyata, S; Nakatani, K; Takebayashi, H; Tsutsumi, D; Uchida, T; Yamada, T; Hübl, J; Mikos, M; Rudolf-Miklau, F; Beyer Portner, N (Eds.), INTERPRAEVENT 2014 in the Pacific Rim - Natural Disasters Mitigation to Establish Society with the Resilience
- Rickenmann, D, & Fritschi, B. (2010): Bedload transport measurements using piezoelectric impact sensors and geophones. U.S. GeoLogical Sur-vey Scientific Investigations Report 2010-5091
- Rickenmann, D.; Turowski, J.M.; Fritschi, B.; Klaiber, A.; Ludwig, A., (2012). Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers. Earth Surf. Process. Landf. 37: 1000-1011
- Spreitzer, G. (2014): Untersuchung des Sedimenttransports in einem alpinen Einzugsgebiet anhand von Freifeldversuchen sowie die Erforschung des Abflussverhaltens von Wildbächen unter Einbezug des stetigen Klimawandels. Masterarbeit. Graz University of Technology
- Turowski, J.M.; Badoux, A.; Rickenmann, D.; Fritschi, B. (2008). Erfassung des Sedimenttransportes in Wildbächen und Gebirgsflüssen - Anwendungsmöglichkeiten von Geophonmessanlagen. Wasser Energ. Luft 100, 1: 69-74.

### **Anschrift der Verfasser**

DI Dr. techn Gabriele Harb  
 ehem. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz  
 Stremayrgasse 10/II, A-8010 Graz  
 gabriele.harb@gmx.at

DI Dr. techn Josef Schneider  
 Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz  
 Stremayrgasse 10/II, A-8010 Graz  
 schneider@tugraz.at

DI Mag. Johannes Stangl  
 Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz  
 Heinrichstraße 36, 8010 Graz  
 johannes.stangl@uni-graz.at

Univ. Prof. Dr. Oliver Sass  
 Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz  
 Heinrichstraße 36, 8010 Graz  
 oliver.sass@uni-graz.at