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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 100 (2008)

Heft: 1

Artikel: Erfassung des Sedimenttransportes in Wildbächen und Gebirgsflüssen : Anwendungsmöglichkeite von Geophonmessanlagen

Autor: Turowski, Jens M. / Badoux, Alexandre / Rickenmann, Dieter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939690

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: 14.07.2025

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

Erfassung des Sedimenttransportes in Wildbächen und Gebirgsflüssen – Anwendungsmöglichkeiten von Geophonmessanlagen

Jens M. Turowski, Alexandre Badoux, Dieter Rickenmann, Bruno Fritschi

1. Einleitung

Werden während eines Hochwassers grosse Mengen Geschiebe und Feinsedimente transportiert, kann dies zu einer drastischen Verschlimmerung der Gefahrenlage und somit oft zu weitaus grösseren Unwetterschäden führen (BWG, 2002).

Geschiebeablagerungen auf Schwemmkegeln, welche infolge der starken Abnahme des Gefälles von Wildbächen und Gebirgsflüssen auftreten, verursachen während extremer Hochwasser regelmässig Ausuferungen in kritischen Gerinneabschnitten (z.B. nach Gefällsknicken oder bei zu geringem Abflussquerschnitt). Solche Unwetterereignisse können aufgrund ihrer zerstörerischen Intensität, Ausbreitung und Dauer in Anlehnung an den in der japanischen Fachliteratur verwendeten Begriff «sediment disaster» als Sedimentkatastrophen bezeichnet werden (Jäggi et al., 2004).

Besonders eindrückliche Beispiele solcher Ereignistypen sind die Hochwasser von Brig im September 1993 (z.B. Bezzola et al., 1994) und von Baltschieder im Oktober 2000 (z.B. Jäggi et al., 2004; s.a. *Bild1*).

Bild 1. Luftbild des oberen Teils der Gemeinde Baltschieder (Kt. Wallis) nach dem Hochwasserereignis am 15. Oktober 2000. Das eingetragene Geschiebe hat sich im gesamten Dorfgebiet abgelagert (Foto Archiv BWG/BAFU).

Bild 2. Während des Hochwasserereignisses vom 15. Oktober 2000 in Baltschieder (Kt. Wallis) wurde der gesamte Dorfbereich zum Teil meterhoch mit Geschiebe bedeckt. Blick von oberhalb des Dorfes ins Tal (Foto Archiv BWG/BAFU).

Während des Hochwassers vom 15. Oktober 2000 im Baltschiederbach kam es zur Übersarung auf dem Schwemmkegel, da die Kapazität des bestehenden Geschiebesammlers ungenügend war und die Abflussschale mit Geschiebeablagerungen gefüllt wurde. Durch Glück sowie richtiges Handeln der Fachleute und der Bevölkerung der Gemeinde Baltschieder konnten Personenschäden vermieden werden. Die gesamte Schadenssumme belief sich jedoch auf über 50 Millionen Franken. Im Schwemmkegelbereich wurden etwa 120 000 m^3 Geschiebematerial abgelagert, und ein grosser Teil des Dorfes und somit Hunderte von Gebäuden wurden zum Teil meterhoch mit Geröll und feinerem Material zugedeckt (Jäggi et al., 2004; s.a. *Bild 1* und *2*).

Um in Zukunft derartigen Schadensereignissen besser begegnen zu können, sind langjährige Datenreihen von Geschiebemessungen in Wildbächen und Gebirgsflüssen von grosser Wichtigkeit. Anhand solcher Daten lassen sich die physikalischen Prozesse der Geschiebeumlagerung während Hochwasserereignissen untersuchen und besser verstehen. Des Weiteren sind Geschiebedaten hilfreich bei der Erstellung von Gefahrenkarten, die zur Risikohandhabung, zur Ereignisbewältigung und zur Planung und Ausführung von baulichen Massnahmen im Gerinnebereich verwendet werden können.

In diesem Artikel stellen wir eine indirekte Methode zur Geschiebemessung vor, die von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) entwickelt worden ist und seit mehr als zwanzig Jahren erfolgreich eingesetzt wird. Nachfolgend diskutieren wir Einsatzmöglichkeiten und

Standortvoraussetzungen dieser Geschiebemessmethode für Forschung, Warnung und Ereignisintervention, und in Geschiebehaushaltsstudien.

2. Geschiebemessung in Wildbächen und Gebirgsflüssen

2.1 Überblick über Methoden zur Erfassung des Geschiebetransportes

Die Quantifizierung von Geschieberaten und Ereignisvolumen sowie die Bestimmung des zeitlichen Auftretens eines Transportereignisses stellt eine der zentralen Herausforderungen in der Geschiebetransportforschung dar. Zur Messung von Sedimenttransport in natürlichen Gerinnen lassen sich verschiedene Methoden anwenden (z.B. DVWK, 1992), die in vier Klassen eingeteilt werden können: (i) das Erfassen von Geschiebe in einem Ablagerungsbecken (z.B. Lenzi et al., 1999); (ii) die Abschätzung der Bewegung von Tracersteinen entlang eines Gerinnes (Hassan und Ergenzinger, 2003; Yager, 2007); (iii) das Auffangen von sich bewegenden Partikeln im Bachbett; und (iv) indirekte Messmethoden von Transportintensitäten. Methode (i) lässt sich am einfachsten in kleineren Wildbacheinzugsgebieten anwenden, in welchen der Bau von Geschiebesammlern realisierbar ist. Möglich sind auch Verlandungsmessungen in natürlichen oder künstlichen Seen. Methoden (ii) und (iii) weisen meistens den grossen Nachteil auf, dass sich nur einzelne Punktmessungen in Raum und Zeit durchführen lassen, die keine Datenkontinuität gewährleisten. Ein Beispiel dafür ist die Geschiebeentnahme aus einem Gerinne mittels mobiler Fangkörbe (Bunte und Abt, 2003). Kontinuierliche Messungen von Geschiebetransport anhand der Methode (iii) sind zwar sehr wartungs- und kostenaufwendig, liefern aber oft vielversprechende Resultate, wie etwa Wirbelrohrfänger (z.B.: Hayward, 1980; Tacconi und Billi, 1987) oder im Gerinnebett fest installierte Fangkübel (Laronne et al., 2003). Indirekte Methoden (iv) basieren auf Messungen der Signale der auf dem Gerinneboden einschlagenden Sedimentkörner (z.B. Bänziger und Burch, 1990; Thorne und Hanes, 2002). Diese Methoden werden im Folgenden näher beschrieben.

2.2 Indirekte (akustische) Methoden

Indirekte Methoden zur Geschiebemessung benutzen nicht-invasive Techniken, um Störungen des Geschiebetriebs und des Wasserflusses zu minimieren. Neben den von der WSL entwickelten Sensoren, die weiter unten näher beschrieben werden (s.a. Abschnitt 2.3), sind weltweit verschiedene Systeme im Gebrauch oder werden momentan getestet. Thorne (1986) beschrieb Experimente, in denen die Bewegung von Glaskugeln in einer rotierenden Trommel mittels eines Mikrofons aufgezeichnet wurde. Solche Mikrofone wurden später erfolgreich zur Messung von Sedimentbewegungen in Küstenregionen getestet. So gewonnene Daten ermöglichen Aussagen über Feststoffkonzentration, Fliessgeschwindigkeit und Bettmorphologie (Thorne und Hanes, 2002).

Froehlich (2003) testete ein Messsystem bestehend aus sechs Meter langen Stahlrohren, die mit Mikrofonen bestückt waren. Diese Rohre wurden horizontal ins Bachbett gelegt, und die akustischen Signale der Korneinschläge wurden aufgezeichnet. Unabhängige Eichmessungen in einem Geschiebesammler legen eine lineare Beziehung zwischen dem transportierten Geschiebevolumen und den gezählten Impulsen nahe. Ein ähnliches Rohrsystem wurde in japanischen Flüssen angewendet (Mizuyama et al., 2003; Taniguchi et al., 1992).

Inspiriert durch das WSL-System (Bänziger und Burch, 1991), entwickelten Bogen und Møen (2003) und Krein et al. (2004) akustische Geschiebemesssysteme. Diese bestehen aus einem Mikrofon, das an die Unterseite einer Stahlplatte geschraubt ist. Die Platte wird im Gerinne verbaut und die akustischen Signale der einschlagenden Geschiebekörner werden aufgezeichnet. Die Sensoren wurden in Laborexperimenten ausführlich getestet (Bogen und Møen, 2003; Krein et al., 2004, 2008); Daten aus natürlichen Gerinnen wurden jedoch bisher nur vereinzelt beschrieben.

2.3 Das WSL-System (PBIS/Geophone)

Die WSL entwickelte in den 1980er-Jahren in Zusammenarbeit mit der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich ein indirektes System (Methode iv) zur Geschiebeüberwachung. Dieses basiert auf der Aufzeichnung der akustischen Signale des Geschiebes beim Transport über eine Messplatte. Die Vorteile des Systems liegen in der kontinuierlichen Messung der Feststofftransportintensität und den relativ geringen Investitions- und Wartungskosten. Ein Nachteil der Methode ist, dass zur Abschätzung absoluter Geschiebemengen oder Transportraten aus den Daten unabhängige Eichmessungen vorliegen müssen. Ausserdem ist ein zumindest teilweise fester Querschnitt im Gerinne zum Einbau notwendig.

Ursprünglich wurde für die Messung ein piezoelektrischer Kristall eingesetzt, der bei einer Verformung eine Spannung produziert, die dann verstärkt und aufgezeichnet wurde (Bänziger und Burch, 1990, 1991). Dieses System wurde zunächst als Hydrophon und später als «piezoelectric bedload impact sensor» (PBI-Sensor oder PBIS – piezoelektrischer Geschiebeeinschlagssensor) bezeichnet. Im Jahr 1999 wurden die piezoelektrischen Kristalle durch industriell gefertigte (und damit standardisierte) Geophone ersetzt, vor allem um den Kalibrierungsaufwand zu verringern. Geophone messen Oberflächenbewegungen (Schwingungen) und werden hauptsächlich für seismische Messungen verwendet.

Das Sensorelement (piezoelektrischer Kristall oder Geophon) wird an die Unterseite einer Stahlplatte geschraubt *(Bild 3)*, welche in einer Ebene mit der festen Gerinnesohle eingebaut wird, möglichst an einer Stelle, an der keine Geschiebeablagerungen zu erwarten sind. Ideal dafür ist zum Beispiel der Anbau eines Stahlkanals mit Geophonplatten bei einer Wildbachsperre (s. auch *Bild 3 rechts*). Wenn ein Geschiebekorn über die Platte rollt, löst es Schwingungen aus, die vom Sensor registriert werden. Das Signal wird durch ein induktives Element in eine Spannungsschwankung umgewandelt und dann verstärkt. Jedes Mal, wenn die Spannung einen voreingestellten Grenzwert überschreitet, wird ein Impuls registriert. Die Anzahl der Impulse pro Zeiteinheit kann als Mass des Geschiebetriebs über den Messquerschnitt verwendet werden (Rickenmann, 1997; Rickenmann und McArdell, 2007; Rickenmann und Fritschi, im Druck). An den von der WSL betriebenen Messstellen wird die minütliche Anzahl der Impulse zusammen mit anderen relevanten Daten (Zeit, Datum, Abfluss, Niederschlagsintensität) aufgezeichnet.

Für eine quantitative Auswertung der Sensordaten muss das System mit unabhängigen Geschiebemessungen geeicht werden. Dies kann zum Beispiel durch regelmässige Vermessung eines Geschiebesammlers geschehen.

3. Einsatzmöglichkeiten und Standortvoraussetzungen

In diesem Abschnitt beschreiben wir Einsatzmöglichkeiten des Geophonsystems

Bild 3a. Aufnahme des Geophonsensors, montiert unter einer Stahlplatte (Foto WSL).

	Forschung	Vorhersage / Intervention	Geschiebehaushalt
Abflussmessung	●●●	●●	●●
Digitales Höhenmodell / topogr. Karte	●●		●●●
Hütte für Messgeräte / Elektronik	●●	●	●
Geschiebesammler	●●●	●	●●●
Geschiebemessung	●●	●	●●
Meteorologische Daten	●●	●●	●●
Schwebstoffmessung	●●		●●
Stromversorgung	●●●	●●	●●
Videokamera	●●	●	
Wasserchemie	●		
Zufahrt / leicht zugänglich	●●●	●●	●●●

●●● notwendig ●● empfohlen ● hilfreich

Tabelle 1. Standortvoraussetzungen für den Einsatz von Geophonmessanlagen in Forschung, Warnung und Geschiebehaushaltsstudien. Für genauere Erläuterungen siehe Abschnitt 3.

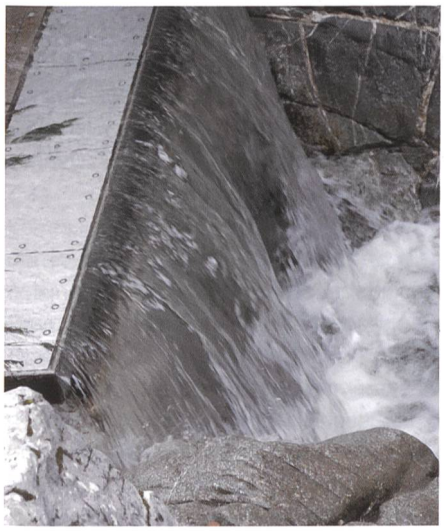

Bild 3b. Geophonsystem im Einsatz im Vogelbach (Alptal, Kt. Schwyz; Foto B. Reye, Tages-Anzeiger); die Stahlkonstruktion ist an der Unterwasserseite einer Wildbachsperre montiert. Die Stahlplatten haben Abmessungen von 36×50 cm.

in Forschung, Ereigniswarnung und Intervention und in Geschiebehaushaltsstudien. Standortvoraussetzungen werden kurz skizziert und sind in *Tabelle 1* zusammengefasst. Grundsätzlich sind halbqualitative Informationen zum Geschiebetrieb in einzelnen Bächen auch für die Ereignisdokumentation und Gefahrenbeurteilung von Nutzen.

3.1 Forschung

Anwendungsmöglichkeiten der akustischen Messsysteme in der Forschung sind vielfältig. Wegen der komplexen Prozesse, die im Gerinne stattfinden, sind die Kenntnisse über den Geschiebetransport in steilen Fliessgewässern relativ gering. Zum einen können die dort auftretenden stark turbulenten Strömungen *(Bild 4)* auch mit modernen Mitteln gar nicht oder nur unter sehr grossem Aufwand berechnet werden. Zum Zweiten besteht das Geschiebe aus einer grossen Anzahl Körner unterschiedlicher Grösse und Form. Und zum Dritten ist die Interaktion zwischen Fliessprozessen und Korngemisch bisher nur ansatzweise verstanden (Ancey et al., 2006; Schmeeckle und Nelson, 2003). Genaue Datensätze zur Geschiebebewegung sind wichtig, um existierende Ansätze und Theorien weiterzuentwickeln und um allgemeine Kenntnisse des Transportgeschehens zu verbessern.

Traditionelle Geschiebemessmethoden sind entweder zeit- und personalaufwändig oder erfordern kostenintensive Baumassnahmen, die zudem das natürliche Gerinne verändern (siehe Abschnitt 2.1). Dementsprechend sind grosse Datenbanken und lange Messreihen selten. Geophonanlagen messen automatisch und mit hoher Zeitauflösung und produzieren wertvolle Daten zum Zeitpunkt des Beginns und Endes des Geschiebetriebs und zu relativen Transportmengen. Zusammen mit unabhängigen Eichmessungen können absolute Geschiebemengen berechnet werden. Diese Daten werden genutzt, um die physikalischen Prozesse des Geschiebetriebs besser zu verstehen. Genaue Messungen des Sedimenttransportes tragen ausserdem zu Untersuchungen in anderen erdwissenschaftlichen Gebieten wie zum Beispiel der Sedimentologie oder dem Studium von Erosionsprozessen bei.

Als Standortvoraussetzungen sind vor allem eine Abflussmessung und eine Möglichkeit zur unabhängigen Eichung der Geophondaten (zum Beispiel ein Geschiebesammler) wichtig. Die Datenaufzeichnung erfolgt digital und je nach Anwendungszweck mit einem Datenlogger oder mit einem PC; im letzteren Fall ist deswegen eine Stromversorgung und ein witterungsgeschützter Raum zur Aufstellung der Geräte notwendig. Die Messstation sollte leicht zugänglich sein, um Wartung und zusätzliche Messungen (z.B. Korngrössenverteilung, Gerinnemorphologie, Längenprofil) nach Ereignissen zu erleichtern. Ein digitales Höhenmodell oder topografische Karten können hilfreich für weiterführende Berechnungen sein. Um den vollständigen Geschiebetrieb zu erfassen, sollte an einer Stelle, wo möglichst keine Geschiebeablagerungen auftreten, über die gesamte Gerinnebreite ein fester Querschnitt vorhanden sein. Weitere günstige Voraussetzungen sind verfügbare meteorologische Daten (Niederschlag, Temperatur, evtl. Wind), parallele Schwebstoffmessungen, die Möglichkeit zur Installation einer Videokamera und regelmässige wasserchemische Messungen (z.B. pH-Wert, gelöste Stoffe etc.).

3.2 Vorhersage und Ereignisintervention

Kurz vor und während Hochwasserereignissen können Geophonanlagen zwei Aufgaben erfüllen. Zum einen können zur Früherkennung Grenzwerte festgelegt werden, wenn möglich in Abstimmung mit Abflussmessungen und meteorologischen Daten, bei denen eine nähere Beobachtung des Bachverhaltens erforderlich ist oder Schutzmassnahmen eingeleitet werden sollten. Zum anderen können die Geophone während eines Ereignisses dazu verwendet werden, die Änderung des Geschiebetriebs in Echtzeit zu beobachten. Dies stützt die weitere Einsatzplanung eines Krisenstabes. Die einzige zwingende Standortvoraussetzung besteht in einem festen Teil des Querschnitts, in den sich die Sensoren einbauen lassen. Dieser sollte in einem geschieberelevanten Teil des Baches liegen. Ein fester Strom-

anschluss ist wünschenswert; die Versorgung kann aber unter Umständen auch von Batterien geleistet werden, solange der regelmässige Wechsel gewährleistet ist. Parallele Abfluss- und meteorologische Messungen geben zusätzliche Daten zur Entscheidungsfindung und Sicherheit, falls ein Teilsystem ausfällt.

3.3 Geschiebehaushaltsstudien

Geschiebehaushaltsstudien sind die Grundlage für die Erstellung einer Sedimentbilanz eines Einzugsgebietes. Sie dienen der Beantwortung der Frage, wie viel Sediment in einem Einzugsgebiet über längere Zeiträume und bei einer bestimmten Ereignisgrösse produziert wird und wo dieses mobilisiert und abgelagert wird. Geschiebehaushaltsstudien und Sedimentbilanzen sind nützlich für längerfristige Verbauungs- und Massnahmenplanung und für die Erstellung von Gefahrenkarten. Sie sind ausserdem interessant als Grundlage für wissenschaftliche Studien.

Im Rahmen von Geschiebehaushaltsstudien ist eine möglichst genaue Eichung der Geophonmessungen ein wichtiges Element, um absolute Sedimentvolumen zu erhalten. Ideal ist z.B. das Vorhandensein eines Geschiebesammlers mit den notwendigen Zufahrtsstrassen für Messungen und Leerung. Eine bessere Quantifizierung der Geophonmessungen kann auch mit unabhängigen Geschiebemessungen und mit Schwebstofftransportmessungen erzielt werden. Um Einschätzungen zu möglichen Erosions- und Depositionsflächen machen zu können, sollten ein genügend genaues digitales Höhenmodell oder entsprechende topografische Karten vorhanden sein.

4. Bisherige Messstandorte und Erfahrungen

4.1 Alptal

Die WSL betreibt ein hydrologisches Versuchsgebiet im Alptal im Kanton Schwyz, einem voralpinen Gebiet nahe Einsiedeln (Hegg et al., 2006). Im Erlenbach wird seit 1978 der Abfluss an einer hydrologischen Station regelmässig gemessen. Im Jahr 1982 wurde unterhalb der Messstation ein Geschieberückhaltebecken gebaut, um die Gesamtmengen des transportierten Geschiebes zu erfassen. Zur genaueren Messung des Geschiebetransportes vor allem während Hochwasserereignissen wurden 1986 PBI-Sensoren oberhalb des Geschiebesammlers in Betrieb genommen (Bänziger und Burch, 1990, 1991). Zusätzlich waren seit 1995 PBI-Sensoren an zwei Querschnitten weiter bachaufwärts im Gerinne des Erlenbachs installiert. Alle Sensoren wurden 1999 durch Geophone ersetzt. Seit 1999 werden Geophonmessungen auch an der Messstation Vogelbach durchgeführt, wo ebenfalls Abflussdaten zur Verfügung stehen. Wegen einer anfänglich ungünstigen Standortwahl liefert diese Anlage aber erst seit 2003 brauchbare Daten.

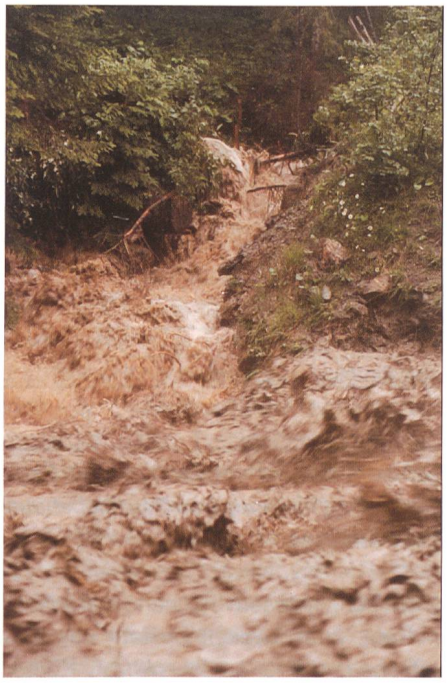

Bild 4. Der Erlenbach im Alptal, Kt. Schwyz, während des Hochwasserereignisses am 14. Juni 1995 (Foto WSL).

Geophonsensoren liefern wertvolle Informationen zum Zeitpunkt des Beginns, des Endes und zur relativen Grösse des Geschiebetriebs. Diese Daten können zusammen mit den Abflussmessungen analysiert werden. An der Station Erlenbach wurden bisher mehr als 350 geschiebeführende Hochwasserereignisse erfasst. Dort ist eine Eichung anhand der gesamten transportierten Feststofffracht möglich, da der Geschiebesammler in der Regel mehrmals jährlich vermessen wird. Jede Messperiode umfasst etwa 10 Ereignisse (Rickenmann und McArdell, 2007). Bisherige Erfahrungen zeigen, dass im Durchschnitt eine annähernd lineare Beziehung zwischen den gezählten Impulsen und der Menge des transportierten Geschiebes besteht (Rickenmann, 1997; Rickenmann und McArdell, 2007).

Das bisher grösste Hochwasserereignis mit Geophonmessungen am Erlenbach ereignete sich am 20. Juni 2007 bei einem intensiven Gewitterniederschlag. Bei diesem Ereignis wurden innerhalb von zwei Stunden rund 1650 m^3 Feststoffe in den Geschiebesammler transportiert

Bild 5. Der Geschiebesammler des Erlenbachs (Alptal, Kt. Schwyz) nach dem Hochwasserereignis vom 20. Juni 2007 (Foto Ch. Rickli). Während des Ereignisses mit einem Spitzenabfluss von rund 16 m^3/s wurden etwa 1650 m^3 Geschiebe abgelagert (siehe auch Bild 6a).

(Bild 5). Sowohl die Abfluss- als auch die Geschiebetransportmessung mit den Geophonsensoren funktionierte zuverlässig. Im Gegensatz zu anderen Hochwasserereignissen im Erlenbach verläuft die Geschiebetransportintensität während der Hauptphase des Hochwassers am 20. Juni 2007 erstaunlich parallel zum Abfluss *(Bild 6a)*. Bei den meisten bisher beobachteten Ereignissen ist dies nicht der Fall. Das Ereignis vom 7. September 2006 zum Beispiel zeigt zwei Abflussspitzen, wobei die erste Spitze höher ist als die zweite *(Bild 6b)*. Die Impulszählungen zeigen auch zwei Spitzen, jedoch ist die zweite Spitze grösser als die erste. Diese teilweise Unabhängigkeit des Geschiebetriebs vom Abfluss könnte mehrere Gründe haben. Zum einen wird Geschiebe häufig in Schüben transportiert (z.B. Habersack et al., 2007), zum anderen schwankt die Geschiebeverfügbarkeit im Gerinne über die Ereignisdauer. Zum Beispiel können Hangrutschungen dem Gerinne neues Material zuführen oder bestehende Speicher werden während des Ereignisses ausgeräumt. Bisherige Beobachtungen im Erlenbach deuten darauf hin, dass in grösseren Ereignissen die Entwicklung der Impulszahlen im Allgemeinen besser der Wasserganglinie folgt *(Bild 6)*.

4.2 Pitzbach

Die Tiroler Wasserkraftwerk AG führt seit mehreren Jahrzehnten Geschiebemessungen an Bächen mit Wasserfassungen für Wasserkraftwerke durch. An der Was-

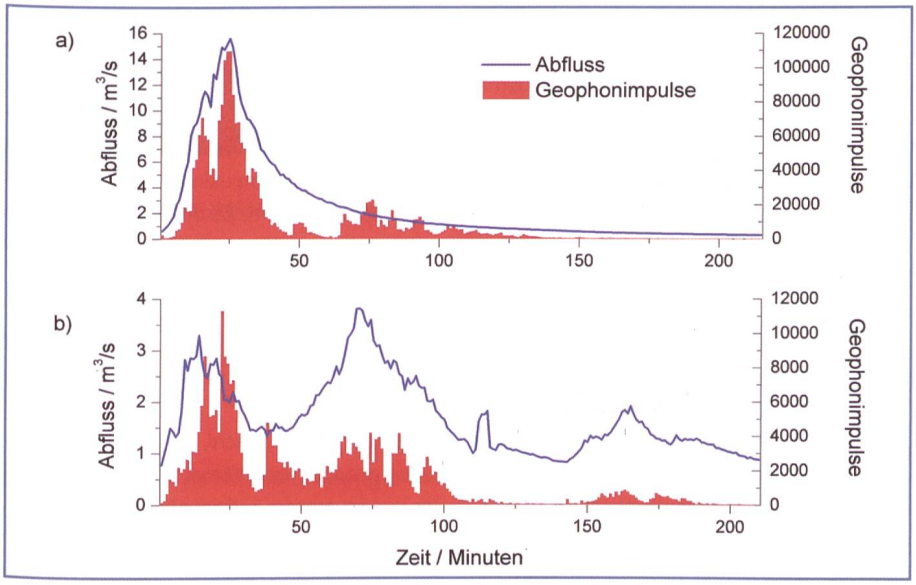

Bild 6a. Hochwasserereignis vom 20. Juni 2007 im Erlenbach (Alptal, Kt. Schwyz). b) Geschiebetransportereignis vom 9. September 2007 im Erlenbach. Die Geophonmessungen repräsentieren die Summe der Geophonimpulse von 6 Sensoren, welche den Geschiebetrieb an einer Wildbachsperre über eine Breite von 3 m erfassen. Die unterschiedliche Skalierung in a und b (v.a. bei den Geophonimpulsen) sollte beachtet werden.

serfassung am Pitzbach, im Inntal südlich von Imst in Österreich, wird das Geschiebe in einem Entsander abgelagert und das Gewicht der Sedimente regelmässig mit Drucksensoren bestimmt (Hofer, 1987). In den Jahren 1994–95 wurden Geschiebetransportmessungen mit PBI-Sensoren sowohl beim Einlauf in das Tirolerwehr der Wasserfassung als auch am Ende des Spülkanals durchgeführt.

Die hohe Zeitauflösung der unabhängigen Messungen des Geschiebevolumens im Entsander erlaubt eine genauere Untersuchung der Eichfunktion zwischen Impulszahl und transportierter Feststoffmenge (Rickenmann und McArdell, im Druck). Über kurze Zeiträume zeigen die Impulszählungen eine starke Streuung, auch bei gleichem Abfluss und Geschiebetransportraten (Turowski und Rickenmann, in Vorb.). Die Korrelation verbessert sich, wenn man die Daten über längere Zeiträume aufsummiert. Für die Messungen mit 15 Min. Auflösung ergibt sich eine lineare Beziehung zwischen der Anzahl der Impulse und der gesamten transportierten Geschiebemenge. Im Vergleich zu den Messungen im Erlenbach ist der Eichkoeffizient allerdings deutlich verschieden.

4.3 Weitere Messstandorte

Die Mattmark AG betreibt Hochdruck-Speicherkraftwerke im Saastal/Vispertal im Kanton Wallis. Zum Schutz ihrer Fassungsanlagen im Schweibbach bei Eisten suchte die Mattmark AG zusammen mit dem Ingenieurbüro Schneller, Ritz und Partner AG in Brig nach einem System zur Überwachung des Sedimenttransportes. Eine Geophonmessanlage wurde als geeignet ausgewählt und im Frühjahr 2007 realisiert. Die WSL war an der Planung und Ausführung der Anlage beteiligt. Vier Geophonsensoren wurden direkt hinter der Wasserfassung mit einem Tirolerwehr installiert. Die Anlage ist seit Juni 2007 in Betrieb und wird momentan getestet.

Zudem sind zurzeit vier weitere Messstationen in Österreich in Betrieb: zwei Anlagen in der Drau bei Lienz und Dellach, und jeweils eine in der Isel, einem Nebenfluss der Drau, und in der Rofenache bei Vent im Ötztal. Diese Messstationen wurden von den flussbaulichen und hydrologischen Diensten der Länder finanziert, und die Geschiebemessungen mittels Geophonsensoren sind auch von Interesse für das Österreichische Lebensministerium und für die Wissenschaft. Des Weiteren hat die Tiroler Wasserkraftwerk AG zwei weitere Geophonmessanlagen in Planung, deren Ausführung und Betreuung teilweise von der WSL übernommen wird. *Tabelle 2* führt die beschriebenen Messstandorte mit Betriebsdauer noch einmal auf.

Gewässer	Standort	Betrieb	Zweck
Erlenbach	Alptal, Kt. Schwyz (Sammler), CH	Seit 1986	Forschung
Erlenbach	Alptal, Kt. Schwyz (Brücke), CH	Seit 1995	Forschung
Vogelbach	Alptal, Kt. Schwyz, CH	Seit 1999	Forschung
Pitzbach	Imst, Tirol, Österreich	1994-1995	Forschung
Rofenache	Vent, Tirol, Österreich	Seit 2000	Forschung, Geschiebehaushalt
Drau	Lienz, Tirol, Österreich	Seit 2002	Forschung, Geschiebehaushalt
Drau	Dellach, Kärnten, Österreich	Seit 2006	Forschung, Geschiebehaushalt
Isel	Lienz, Tirol, Österreich	Seit 2006	Forschung, Geschiebehaushalt
Schweibbach	Eisten, Kt. Wallis, CH	Seit 2007	Warnung

Tabelle 2. Bestehende und ehemalige Geophonanlagen.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Geophonsensoren sind die Basis einer indirekten Methode zur Erfassung des Geschiebetriebs, die von der WSL entwickelt und seit über zwanzig Jahren erfolgreich eingesetzt wird. Diese Messtechnik hat verschiedene Anwendungsbereiche, so z.B. in der Forschung zum Geschiebetransport, der Warnung und Ereignisüberwachung sowie in Untersuchungen zum Feststofftransport und Geschiebehaushalt in Gerinnen oder Einzugsgebieten. In diesem Bericht sind verschiedene Einsatzmöglichkeiten diskutiert. Wenn die notwendigen Standortvoraussetzungen erfüllt sind, stellt die Geophontechnik eine zuverlässige, wartungsarme und kostengünstige Möglichkeit zur Geschiebemessung dar.

Die WSL hat weitere Projekte basierend auf der Geophonmesstechnik in Planung. Zur Grundlagenforschung werden die Messanlagen im hydrologischen Untersuchungsgebiet Alptal (Abschnitt 4.1) ausgebaut, um einerseits eine bessere zeitliche Auflösung der unabhängigen Geschiebemessungen zu erreichen und um andererseits die Entnahme von Geschiebeproben und damit Korngrössenmessungen während eines Ereignisses zu ermöglichen. Dadurch kann die Eichung der Geophonmessanlagen verbessert und es können neue Einsichten in die physikalischen Prozesse des Geschiebetriebs gewonnen werden. Parallel dazu sollen weitere Laborversuche zum Sensorverhalten durchgeführt werden. Eine genaue statistische Analyse bisheriger Geschiebe- und Geophondaten wird diese Projekte ergänzen.

In laufenden und zukünftigen Projekten entwickelt die WSL die Geophonmesstechnik weiter, um damit mit vertretbarem messtechnischem Aufwand zeitlich kontinuierliche Messungen zum Feststofftransport in unterschiedlich beschaffenen Gerinnen zu realisieren. Weitere Ziele sind auch der Einsatz von Geophonsensoren in Warnsystemen und die Erarbeitung von Kriterien zur Unterscheidung zwischen geschiebeführenden Hochwassern und Murgängen aufgrund der gemessenen Daten.

Verdankungen
Viele Einzelpersonen haben in den letzten zwanzig Jahren mitgeholfen, die Geophontechnik zu entwickeln, zu realisieren und zu betreiben. Die hier vorgestellte Arbeit wurde im Rahmen des Projektes HYDRALP durchgeführt. Diesbezüglich danken wir D. Bérod von der Dienststelle für Strassen- und Flussbau DSFB des Kantons Wallis für anhaltende Unterstützung. Kommentare von *Ch. Hegg* haben geholfen, den Text klarer zu gestalten.

Literatur

Ancey, C., Böhm, T., Jodeau, M., Frey, P. (2006): «Statistical description of sediment transport experiments», Physical Review E, 74, 011302.

Bänziger, R., Burch, H. (1990): «Acoustic sensors (hydrophones) as indicators for bedload transport in a mountain torrent, in Hydrology of Mountainous Regions I», Lang, H., Musy, A. (Hrsg.), IAHS, 193, 207–214

Bänziger, R., Burch, H. (1991)): «Geschiebetransport in Wildbächen – Messung mittels eines neuartigen Sensors», Schweizer Ingenieur und Architekt, 24, 576–579

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

Bogen, J., Møen, K. (2003): «Bed load measurements with a new passive acoustic sensor», In: Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers: Technological and Methodological Advances, Bogen, J., Fergus, T., Walling, D.E. (Hrsg.), IAHS Publication 283, International Association of Hydrological Sciences: Wallingford, 181–192.

Bunte, K., Abt, S.R. (2003): «Sampler size and sampling time affect bed load transport rates and particle sizes measured with bed load traps in gravel-bed streams», In: Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers: Technological and Methodological Advances, Bogen, J., Fergus, T., Walling, D.E. (Hrsg.), IAHS Publication, 283, 126–133.

BWG (2002): «Hochwasser 2000 – Les crues 2000. Ereignisanalyse/Fallbeispiele», Berichte des Bundesamtes für Wasser und Geologie, Serie Wasser No 2. Bern.

DVWK (Hrsg.) (1992): «Geschiebemessungen, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), Regeln zur Wasserwirtschaft 127, Paul Parey: Hamburg.

Froehlich, W. (2003): «Monitoring bed load transport using acoustic and magnetic devices», In: Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers: Technological and Methodological Advances, Bogen, J., Fergus, T., Walling, D.E. (Hrsg.), IAHS Publication 283, International Association of Hydrological Sciences: Wallingford, 201–210.

Habersack, H., Seitz, H., Liedermann, M. (in Vorb.): «Integrated automatic bedload transport monitoring», International Bedload Surrogate Monitoring Workshop, Minneapolis, USA, April 2007, unter Begutachtung.

Hassan, M.A., Ergenzinger, P. (2003): «Use of Tracers in Fluvial Geomorphology», in: Tools in Fluvial Geomorphology, 397–423.

Hayward, J.A. (1980): «Hydrology and stream sediments in a mountain catchment», Special publication 17 (PhD Dissertation, Lincoln College, Canterbury), Tussock Grasslands and Mountain Lands Institute: New Zealand; 235 ff.

Hegg, Ch., McArdell, B.W., Badoux, A. (2006): «One hundred years of mountain hydrology in Switzerland», Hydrological Processes, 20, 371–376, doi: 10.1002/hyp.6055.

Hofer, B. (1987): «Der Feststofftransport von Hochgebirgsbächen am Beispiel des Pitzbachs, Österreichische Wasserwirtschaft, 39, 30–38.

Jäggi, M., Nigg, U., Teysseire, P. (2004): «Die Sedimentkatastrophe von Baltschieder», In: Kongresspublikation des Internationalen Symposions Interpraevent 2004, Riva del Garda, Band 3(VII): 165–180.

Krein, A., Symader, W., Eiden, M., Klink, H., Brierl, R. (2004): «Entwicklung und Einsatz eines hydroakustischen Messsystems zur Untersuchung der Dynamik des Geschiebetransportes und quantitativen sowie qualitativen Charakterisierung des bewegten Materials», Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 48 (5), 172–181.

Krein, A., Klinck, H., Eiden, M., Symader, W., Bierl, R., Hoffmann, L., Pfister, L. (2008): «Investigating the transport dynamics and the properties of bedload material with a hydroacoustic measuring system», Earth Surface Processes and Landforms, 33, 152–163, DOI: 10.1002/esp.1576.

Lenzi, M.A., D'Agostino, V., Billi, P. (1999): «Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon, Part I: analysis of bedload records, conditions and threshold of bedload entrainment», Catena, 36, 171–190.

Laronne, J.B., Alexandrov, Y., Bergman, N., Cohen, H., Garcia, C., Habersack, H., Powell, D.M., Reid, I. (2003): «The continuous monitoring of bed load flux in various fluvial environments», In: Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers: Technological and Methodological Advances, Bogen, J., Fergus, T., Walling, D.E. (Hrsg.), IAHS Publication, 283, 134–145.

Mizuyama, T., Fujita, M., Nonaka, M. (2003): «Measurement of bed load with the use of hydrophones in mountain torrents», In: Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers: Technological and Methodological Advances, Bogen, J., Fergus, T., Walling, D.E. (Hrsg.), IAHS Publication 283, International Association of Hydrological Sciences: Wallingford, 222–227.

Rickenmann, D. (1997): Sediment transport in Swiss torrents, Earth Surface Processes and Landforms, 22, 937–95.

Rickenmann, D., McArdell, B.W. (2007): Continuous measurement of sediment transport in the Erlenbach stream using piezoelectric bedload impact sensors, Earth Surface Processes and Landforms, 32, 1362–1378, doi: 10.1002/esp.1478.

Rickenmann, D., McArdell, B.W. (im Druck): «Calibration of piezoelectric bedload impact sensors in the Pitzbach mountain stream», Geodynamica Acta.

Rickenmann, D., Fritschi, B. (im Druck): «Bedload transport measurements using piezoelectric impact sensors and geophones», In: International Bedload Surrogate Monitoring Workshop, Minneapolis, USA, April 2007, akzeptiert für eine USGS Publikation.

Schmeeckle, M.W., Nelson, J.M. (2003): «Direct numerical simulation of bedload transport using a local, dynamic boundary condition», Sedimentology, 50, 279–301.

Tacconi, P., Billi, P. (1987): «Bed load transport measurements by the vortex-tube trap on Virginio Creek», Italy, In: Sediment Transport in Gravelbed Rivers, Thorne, C.R., Bathurst, J.C., Hey, R.D. (Hrsg.), J. Wiley & Sons, New York, 583–616.

Taniguchi, S., Itakura, Y., Miyamoto, K., und *Kurihara, J.* (1992): «A new acoustic sensor for sediment discharge measurement», In: Erosion and Sediment Transport Monitoring Programs in River Basins, Bogen, J., Walling, D.E., Day, T.J. (Hrsg.), IAHS Publication 210, International Association of Hydrological Sciences: Wallingford, 135–142.

Thorne, P.D. (1986): «The acoustic measurement of gravel transport», Fifth International Conference on Electronics for Ocean Technology, Edinburgh, 24–26 March 1987, Publication 72, Institution of Electronic and Radio Engineers: London, 63–70.

Thorne, P.D., Hanes, D.M. (2002): «A review of acoustic measurements of small-scale sediment processes», Continental Shelf Research, 22, 603–632.

Turowski, J.M., Rickenmann, D. (in Vorb.): «Tools- and cover effect in bedload transport observations in the Pitzbach», Austria. Earth Surface Processes and Landforms, unter Begutachtung.

Anschrift der Verfasser
Jens M. Turowski, Alexandre Badoux, Dieter Rickenmann, Bruno Fritschi
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf
jens.turowski@wsl.ch
dieter.rickenmann@wsl.ch