

Vom Flüstern, Raunen und Grollen der Landschaft

Seismische Methoden in der Geomorphologie

Jens M. Turowski¹, Michael Dietze¹, Anne Schöpa¹, Arnaud Burtin², Niels Hovius¹

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² GFZ; jetzt: Institut de Physique du Globe de Paris, Frankreich

The Earth's surface is constantly changing as material is redistributed by processes like slope failures, debris flows and floods. Although this is a natural part of landscape evolution, we perceive many of these processes as hazards. Especially during their extreme manifestations, they can cause significant damage and even injury and loss of life. The process understanding that is necessary for the safe keeping of the environment that we live in can be obtained by acute observation. Seismic measurements provide distinct advantages over traditional methods. Within a sensor network, many important processes at the Earth's surface can be observed and identified, along with their meteorological drivers. Further, seismic networks make it possible to monitor the entire landscape without the need of a prior choice of location. In this way, nearly complete event catalogues can be obtained and the interaction of different processes can be studied. The potential of seismic observations of Earth surface processes is illustrated with an example from the Illgraben, Switzerland. There, a two-way interaction between rock slope failures and debris flows was observed during a summer thunderstorm.



Das dynamische System Erdoberfläche

Die Erdoberfläche verändert sich ständig durch eine Vielzahl von Geoprozessen wie Steinschläge, Erdbeben, Murgänge, Bergstürze und Sedimenttransport durch Flüsse. Die Geomorphologie erforscht diese Prozesse und die Entwicklung der gesamten Landschaft. Die verschiedenen Erdoberflächenprozesse können große Schäden anrichten, vor allem wenn sie in extremen Formen auftreten. Daher werden sie oft als Naturgefahren wahrgenommen. Auch sind Erdoberflächenprozesse nicht unabhängig voneinander, sondern beeinflussen sich gegenseitig. Zum Beispiel kann ein Fluss seine Ufer unterspülen und dadurch Erdbeben auslösen, die große Mengen an Material in das Gerinne liefern. So kann sich der Fluss aufstauen; Überschwemmungen sind möglich. Für eine sichere und nachhaltige Nutzung der Landschaft ist es deshalb erforderlich, unterschiedliche Erdoberflächenprozesse und ihre Wechselbeziehungen umfassend zu verstehen und soweit möglich zu quantifizieren.

Prozesskenntnis wird durch intensive Beobachtung entwickelt. Es kann jedoch aufwendig sein, geomorphologische Prozesse direkt zu beobachten. Die Landschaft ist während seltener, extremer Wetterereignisse am aktivsten und es ist schwierig oder sogar gefährlich, direkte Messungen vorzunehmen. Oft kann zudem nicht genau vorhergesagt werden, wann und wo Erdoberflächenprozesse auftreten. Nur mit Geduld und Glück ist es möglich, zur rechten Zeit am rechten Ort zu sein und diese Prozesse mit entsprechenden Instrumenten aufzuzeichnen. Die Entwicklung von Methoden, mit denen eine Vielzahl von Erdoberflächenprozessen in einem großen Gebiet automatisch, flächendeckend und kontinuierlich beobachtet werden kann, ist aktuell eine der großen Herausforderungen in der Geomorphologie. Deshalb entwickeln Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ seismische Methoden für die Anwendung in der Geomorphologie.

Links: Blick in den Illgraben, ein Seitental des Rhône-tals im Süden der Schweiz. Steile, unbewachsene Hänge und brüchiges Gestein führen dort zu häufigen Steinlawinen. Murgänge transportieren dieses Material stromabwärts und liefern etwa 10 % des gesamten Sedimentaufkommens der Rhône. (Foto: K. Cook, GFZ)

Left: View of the Illgraben, a tributary of the Rhône in southern Switzerland. Steep, unvegetated slopes and fractured rocks lead to frequent rock falls. Debris flows evacuate the material and supply around 10 % of the total sediment load of the Rhône river.



Kontakt: J. M. Turowski
(jens.turowski@gfz-potsdam.de)

Seismische Signale von der Erdoberfläche

Massenverlagerungen durch geomorphologische Prozesse lösen seismische Wellen aus, die, je nach Intensität, in Distanzen von einigen Metern bis zu vielen hunderten Kilometern mit gängigen seismischen Instrumenten aufgezeichnet werden können. Seismometer sind somit ideal geeignet, das Flüstern, Raunen und Grollen der Landschaft aufzunehmen. Ein einfaches Experiment, in dem zwei Steine verschiedenen Gewichts (35,9 kg und 7,2 kg) aus 1 m Höhe auf den Boden fallengelassen wurden, illustriert das Potenzial moderner Seismometer (Abb. 1). Die Signale wurden von einem Breitbandseismometer aufgezeichnet, das 5 m entfernt vom Aufschlagpunkt in 50 cm Tiefe vergraben wurde. Die Daten erlauben zwei Aussagen: Das Signal, das der größere Stein ausgelöst hat, zeigt eine höhere Amplitude und eine tiefere Frequenz im Vergleich zu dem Signal, das der kleinere Stein ausgelöst hat.

Aufgrund dieser Beobachtungen kann erwartet werden, dass seismische Signale Informationen über Ort, Zeit, Art und Größe des Auftretens von geomorphologischen Prozessen enthalten. Tatsächlich werden seismische und auch akustische Methoden routinemäßig zur Beobachtung von Schneelawinen (Suriñach et al., 2000) sowie von Sedimenttransport in Flüssen verwendet (Gray et al., 2010) und sind häufig Bestandteil von Warnanlagen für Naturgefahren (Badoux et al., 2009). Jedoch sind diese Anwendungen auf bestimmte Prozesse an einem bestimmten Ort ausgerichtet. Dabei wird der seismische Sensor an einer Stelle verbaut, die direkt von dem entsprechenden Prozess betroffen ist, z. B. unmittelbar im Flussbett. Häufig wird der Sensor auch bestmöglich akustisch isoliert, damit nur der gewünschte Prozess aufgezeichnet und Rauschen aus umliegenden Quellen unterdrückt wird. Auf diese Weise lässt sich zwar die Beobachtung des gewünschten Prozesses optimieren, die Möglichkeiten der seismischen Methoden werden jedoch nicht vollständig ausgeschöpft.

Ein Netzwerk von in der Landschaft verteilten Seismometern hat dagegen ein sehr viel größeres Potenzial. Da zahlreiche geomorphologische Prozesse messbare seismische Wellen auslösen, kann mit einem solchen Netzwerk im Prinzip die gesamte Aktivität der Landschaft beobachtet werden. Triangulierung erlaubt es, den Ursprungsort des Signals zu lokalisieren. Dies bietet einen entscheidenden Vorteil: Seismische Netzwerke sind die momentan einzige bekannte Messtechnik in der Geomorphologie, die zeitlich hoch aufgelöst alle Prozesse, die Geräusche verursachen, in der gesamten Landschaft aufzeichnen kann. Damit ist es erstmals möglich, nahezu komplette räumlich und zeitlich aufgelöste Ereigniskataloge zu erstellen und die Wechselbeziehungen zwischen verschiedenen Prozessen zu untersuchen.

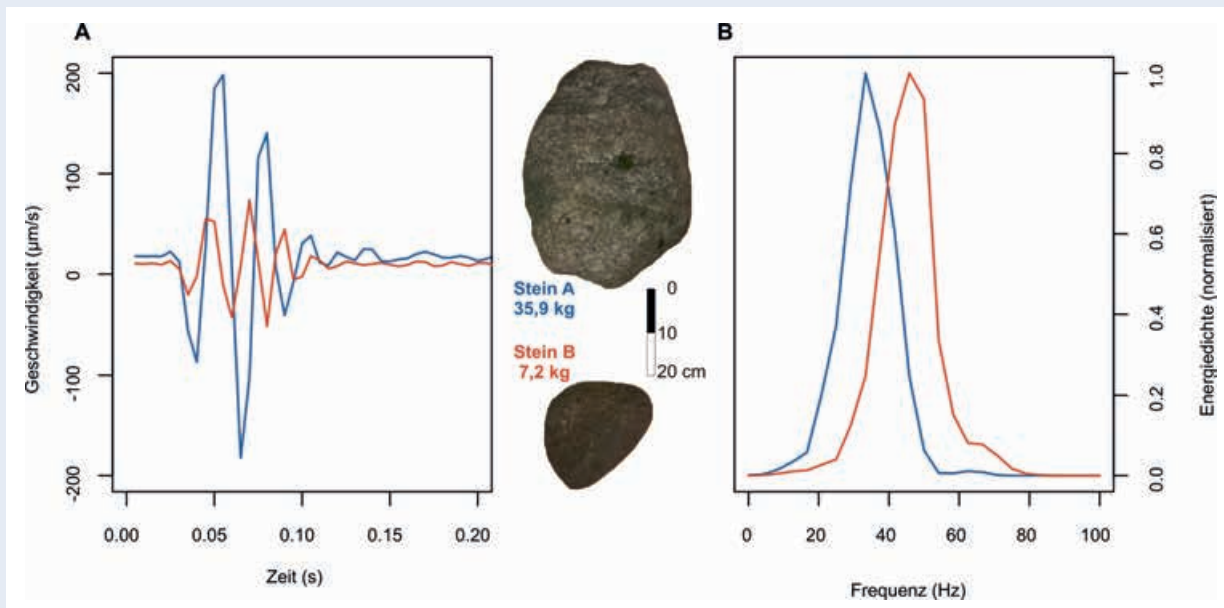


Abb. 1: Zwei unterschiedlich große Steine wurden aus 1 m Höhe auf den Boden fallengelassen. Das Signal, das durch den größeren Stein ausgelöst wurde, zeigt eine höhere Amplitude (A) und eine tiefere Frequenz (B).

Fig. 1: Two rocks of different size were dropped to the ground from a height of 1 m. The signal of the bigger rock shows a higher amplitude (A) and a lower frequency (B).

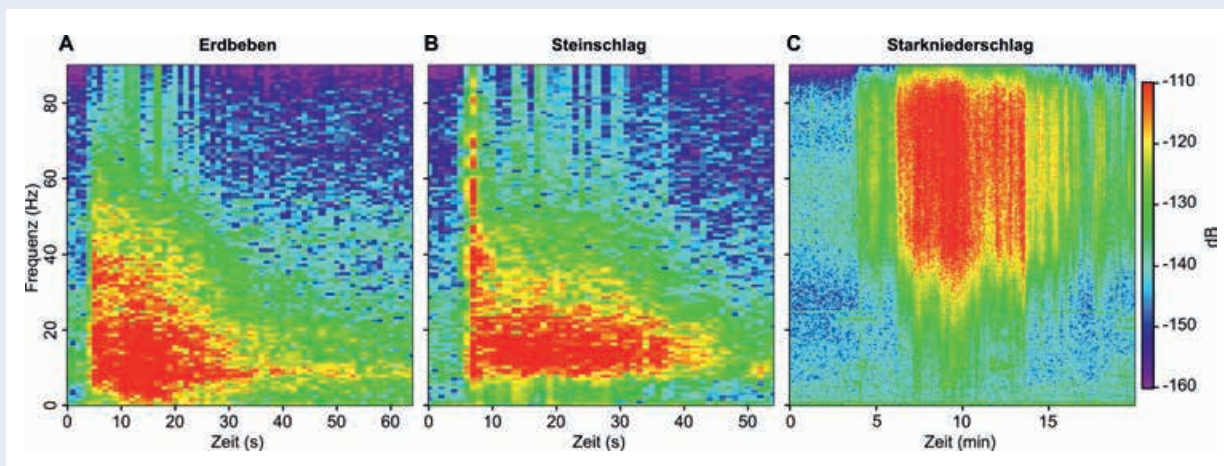


Abb. 2: Spektrogramme verschiedener seismischer Ereignisse. A: Erdbeben, B: Steinschlag, C: Starkniederschlag

Fig. 2: Spectrograms of different seismic events. A: Earthquake, B: Rockfall, C: Heavy precipitation

Für eine Interpretation der Daten ist es jedoch notwendig, allein anhand des Signals die verschiedenen geomorphologischen Prozesse voneinander und von anderen seismischen Quellen, wie Erdbeben und menschlicher Aktivität, unterscheiden zu können. Abbildung 2 zeigt eine Auswahl seismischer Signale sehr unterschiedlichen Ursprungs als sogenannte Spektrogramme, also als die Veränderung der seismischen Energie über die Zeit in verschiedenen Frequenzbereichen. Ein Erdbeben (Abb. 2A) unterscheidet sich erst auf den zweiten Blick klar von einem Steinschlag (Abb. 2B) durch das Vorhandensein sehr tiefer Frequenzen, das Fehlen der hohen Frequenzen zu Beginn und die typisch dreieckige Form des Spektrogramms. Die hohe Aktivität am Anfang des Steinschlagereignisses (Abb. 2B) in allen Frequenzen zwischen 10 Hz und 80 Hz resultiert vom ersten Einschlag der Felsmasse, während die daran anschließende Aktivität vom Rollen und Stürzen der Steine auf der Schutthalde herrührt. Ein Starkniederschlagsereignis erzeugt aus seismischer Sicht vor allem hohe Frequenzen (>30 Hz) über mehrere Minuten (Abb. 2C).

Ein Murgang, sein Auslöser und seine Folgen: Ein Beispiel vom Illgraben, Schweiz

Der Illgraben ist ein 10 km² großes Nebental des Rhônetales im Kanton Wallis im Süden der Schweiz (Abb. 3). Steile Hänge und brüchiges Gestein führen dort zu regelmäßigen Murgängen (*Schlunegger et al., 2012*). Murgänge sind Schlamm- und Gerölllawinen, die mit hoher Geschwindigkeit große Mengen an Gestein durch das Gerinne schieben. Am 13. Juli 2011 lieferte ein Sommergewitter im Illgraben insgesamt 18 mm Nieder-



Abb. 3: Der Illbach führt wenig Wasser, aber Murgänge transportieren mehrmals im Jahr große Mengen Gestein in die Rhône. (Foto: J. Turowski, GFZ)

Fig. 3: The Illbach has a low water discharge, but its channel conveys debris flows several times a year, transporting large quantities of sediment into the Rhône.

schlag und löste eine Reihe geomorphologischer Prozesse einschließlich mehrerer Murgänge aus. Diese Ereignisse wurden mit einem aus zehn Instrumenten bestehenden seismischen Netzwerk aufgezeichnet (*Burtin et al., 2014*) und sollen im Folgenden als Beispiel dienen, die Möglichkeiten dieser Messmethodik zu erläutern.

Im Verlauf des 13. Juli 2011 zeigen die Sensordaten hochfrequente seismische Signale, die mit den Niederschlagsmessungen korrespondieren (Abb. 4). Die Periode höchster seismischer Aktivität beginnt um 14:45 Uhr Ortszeit zeitgleich mit dem Sommergewitter. Im Laufe des Nachmittags können mehrere Episoden mit hoher seismischer Aktivität beobachtet werden, die die Signaturen geomorphologischer Prozesse tragen. So gibt es mehrere Ereignisse mit der Signatur von Steinlawinen, die über die gesamte Dauer des Gewitters auftreten. Die Signatur von Murgangaktivität findet sich ab 14:57 Uhr in den seismischen Daten.

An allen seismischen Messstationen im Illgraben zeigen sich während des Gewitters drei separate Pulse von mehreren Minuten Länge, wobei der dritte Puls die größte Stärke aufweist (Abb. 4A). Die einzelnen Pulse erscheinen zeitversetzt an den Stationen; je weiter stromabwärts die Messstation liegt, desto später tritt die Aktivität auf (vgl. Abb. 4A und 4B). Dies weist auf eine sich stromabwärts bewegende Masse hin. Da diese seismischen Aktivitäten zeitlich mit dem Ansprechen der Murgangwarnanlage im Illgraben zusammenfallen, liegt es nahe, die drei Pulse in den seismischen Signalen als Murgangsequenz zu interpretieren.

Der dritte Murgangspuls zeigt höhere seismische Aktivität am unteren Ende des Gerinnes und aktiviert ein breites Frequenzspektrum zwischen 1 und 50 Hz. Bemerkenswert ist, dass der dritte Puls kurz nach einem Steinlawinenereignis am unteren Teil des Westhangs des hinteren Illgrabens einsetzt (Steinlawine S1 um 15:18 Uhr, Abb. 4C und 4D). Das Abbruchgebiet grenzt direkt an das Murganggerinne (Abb. 5) und etwa zweieinhalb Minuten nach der Steinlawine wurde ein markanter Anstieg in der Murgangaktivität aufgezeichnet. Diese Beobachtungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass das Steinlawinenereignis um 15:18 Uhr den dritten Murgangspuls ausgelöst.

Während der Bewegung des dritten Pulses durch das Gerinne erfassten mehrere Messstationen ein weiteres größeres Steinlawinenereignis in Gerinnenähe (Steinlawine S2 um 15:22 Uhr). Zeitgleich mit dieser Steinlawine steigerte sich die seismische Energie des Murgangsignals deutlich und nachhaltig (Abb. 4D). Der Hang ist offensichtlich als Folge der Murgangaktivität abgerutscht. Die plötzliche Zufuhr von Material ließ das Volumen des Murgangs und damit die seismische Energie des Signals ansteigen.

Durch die zeitlich hochaufgelösten Messungen der seismischen Sensoren und die Lokalisierung der geomorphologischen

Ereignisse im Einzugsgebiet war es möglich, für das Gewitter am 13. Juli 2011 eine zeitliche Abfolge der Einzelereignisse zu erstellen, die einen kausalen Zusammenhang nahelegen. So konnte eine Kopplung von Niederschlag, Steinlawinen und Murgängen dargelegt werden; eine Steinlawine kann sowohl zu einem Murgang führen, wie auch ein Murgang zu einer Steinlawine. Mit anderen Messmethoden wäre diese Ereignissequenz nur mit viel Glück und Aufwand zu verfolgen gewesen.

Seismische Messungen als neuer Standard in der Geomorphologie

Die beschriebene seismische Messmethode hat großes Potenzial in der geomorphologischen Forschung. Als einzige momentan bekannte Methode kann sie Daten zur räumlichen wie zeitlichen Verteilung wichtiger Erdoberflächenprozesse liefern, die zur Verlagerung von Material führen. Mehr noch, auch Wetterereignisse hinterlassen als seismische Wellen ihre Spuren in der Landschaft. Zum Beispiel ist der Einschlag von Regentropfen in der Nähe der Instrumente gut messbar und

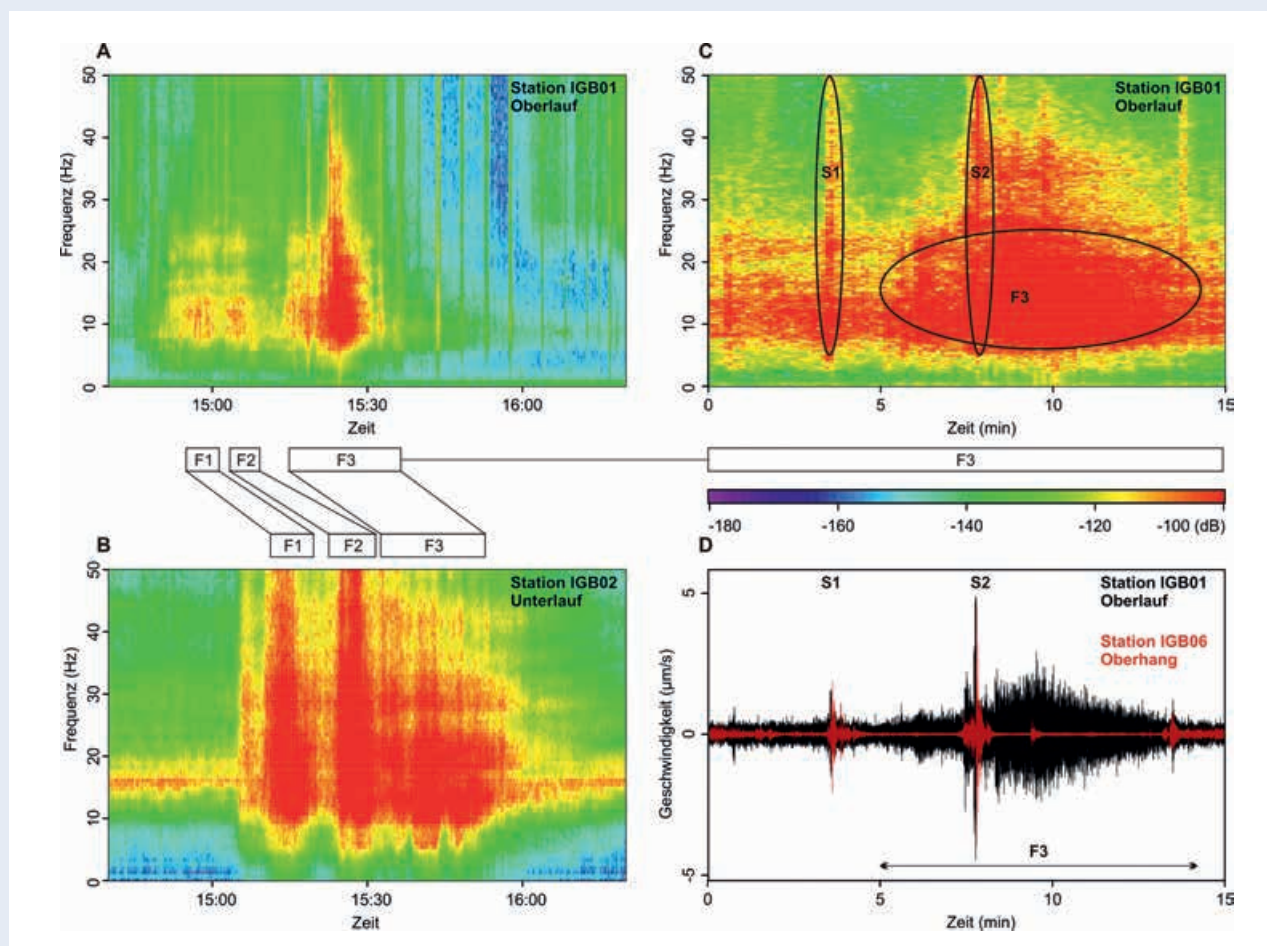


Abb. 4: Eine Murgangsequenz im Illgraben aus seismischer Sicht. Spektrogramme der drei Murgangspulse (F1 bis F3) von zwei Stationen entlang des Gerinnes am Oberlauf (A) und Unterlauf (B). Zwischen dem Eintreffen der einzelnen Pulse vergehen jeweils etwa 15 Minuten. C: Vergrößerter Ausschnitt des Spektrogramms des dritten Murgangs mit Signalen von zwei Steinlawinen (S1 und S2). D: Seismogramme des dritten Murgangs und der Steinlawinen von zwei Stationen (Stationsstandorte siehe Abb. 5)

Fig. 4: Debris flow sequence in the Illgraben from a seismic perspective. Spectrograms of three flow surges (F1 to F3) recorded by two stations along the channel upstream (A) and downstream (B). Arrivals of the surges are separated by ca. 15 minutes. C: Zoom into the spectrogram of the third debris surge with signals of two rock avalanches (S1 and S2). D: Seismograms of the third surge and two rock avalanches from two different seismic stations (see Fig. 5 for station locations)



Abb. 5: Wechselbeziehungen von Erdoberflächenprozessen im Illgraben, Schweiz. Steinlawineneignis S_1 löst den dritten Murgangpuls aus, der sich im Gerinne stromabwärts bewegt (orange Pfeile). Durch Erosion des Ufers wird eine weitere Steinlawine, S_2 , aktiviert. Seismometerstationen (weiße Kreise mit Stationsnummern IGB01 bis IGB10, nicht alle Stationen sind sichtbar) zeichnen diese Kette von Ereignissen auf und geben so Einblick in die Wechselwirkungen von Prozessen. (Foto: Google Earth)

Fig. 5: Interaction of Earth surface processes in the Illgraben, Switzerland. Rock avalanche S_1 causes the third mudflow pulse that moves downstream (orange arrows). A second rock avalanche S_2 is activated by erosion of the channel banks. Seismometer stations (white circles with station numbers IGB01 to IGB10, not all stations are visible) detect this sequence of events and give insight into the feedbacks between processes.

Windenergie wird durch Baumwurzeln als seismische Wellen in den Boden übertragen. Somit können nicht nur die geomorphologischen Prozesse, sondern auch die meteorologischen Bedingungen, die sie auslösen, mit denselben Instrumenten gemessen werden.

Ausblick

Bevor der Einsatz seismischer Instrumente zum Standard in der geomorphologischen Forschung wird, ist noch viel Forschungsarbeit zu leisten. Obwohl bereits gezeigt wurde, dass geomorphologische Prozesse messbare seismische Signale erzeugen und dass die verschiedenen Prozesse anhand ihrer Signalcharakteristiken unterschieden werden können, fehlen für viele Prozesse und Anwendungen direkte Vergleichsdaten, die mit traditionellen Messmethoden parallel zu seismischen Daten erhoben wurden. Solche Vergleichsdaten sind z. B. wichtig, um theoretische Vorhersagen der seismischen Charakteristiken einzelner Prozesse zu testen und um die seismischen Analysemethoden umfassend zu validieren. Auch fehlt es an geeigneten Werkzeugen, welche die komplexen seismischen Daten und Auswertungsmethoden für die Geomorphologie leicht zugänglich machen. Nur mit der Unterstützung der Seismologie können seismische Messmethoden momentan gezielt, genau und effizient in der Geomorphologie eingesetzt werden.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ erstellen daher momentan eine Datenbank mit qualitativ hochwertigen, parallel aufgezeichneten seismischen und traditionellen Beob-

achtungen verschiedener geomorphologischer und meteorologischer Prozesse. Zudem entwickeln sie ein frei zugängliches Softwarepaket, das auf die Bedürfnisse der geomorphologischen Forschung zugeschnitten ist. Diese Arbeiten sollen einen breiten Einsatz seismischer Methoden in der Geomorphologie ermöglichen und somit dazu beitragen, dass geomorphologische Naturgefahren schnell erfasst und die Auswirkungen für Bevölkerung und Infrastruktur minimiert werden.

Literatur

- Badoux, A., Graf, C., Rhyner, J., Kuntner, R., McArdell, B. W. (2009) : A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance. – *Natural Hazards*, 49, 3, pp. 517–539.
- Burtin, A., Hovius, N., McArdell, B. W., Turowski, J., Vergne, J. (2014): Seismic constraints on dynamic links between geomorphic processes and routing of sediment in a steep mountain catchment. - *Earth Surface Dynamics*, 2, pp. 21–33.
- Gray, J. R., Laronne, J. B., Marr, J. D. G. (2010): Bedload-surrogate Monitoring Technologies, (Scientific Investigations Report/U.S. Geological Survey; 2010-5091), Reston, VA.: U. S. Geological Survey, 37 p.
- Schlunegger, F., Norton, K., Caduff, R. (2013): Hillslope processes in temperate environments. - In: Stoffel, M., Marston, R. A. (Eds.), *Mountain and hillslope geomorphology*, (Treatise on Geomorphology; 7), Amsterdam [u. a.]: Elsevier/Acad. Press, pp. 337–354.
- Suriñach, E., Sabot, F., Furdada, G., Vilaplana, J. M. (2000): Study of seismic signals of artificially released snow avalanches for monitoring purposes. - *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 25, 9, pp. 721–727.