

Mikroseismisches Monitoring : Lokalisierung von Bruch- und Rutschprozessen im instabilen Fels am Bsp. Moosfluh oberhalb vom Aletschgletscher und Im Ruostel oberhalb vom Sihlsee

Autor(en): **Ebert, Andreas / Zürcher, Benjamin**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology**

Band (Jahr): **25 (2020)**

Heft 1-2

PDF erstellt am: **18.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-977308>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Mikroseismisches Monitoring: Lokalisierung von Bruch- und Rutschprozessen im instabilen Fels am Bsp. Moosfluh oberhalb vom Aletschgletscher und Im Ruostel oberhalb vom Sihlsee

Andreas Ebert¹, Benjamin Zürcher¹

Stichworte: Naturgefahren, Felssturz, Mikroseismik, Monitoring, Aletsch, Sihlsee

Zusammenfassung

Seit 2017 werden der grosse Hangrutsch Moosfluh oberhalb des Aletschgletschers und ein sich lösender Felsblock oberhalb vom Sihlsee mit einem mikroseismischen Monitoring überwacht. Es konnte damit die Bruch- und Rutschaktivität im Untergrund 4-dimensional aufgezeigt werden. Unter anderem belegen die Daten, dass der Moosfluh-Rutsch tiefer reicht als angenommen und sich die mikroseismische Aktivität in den vermeintlich «heilen» Fels verlagert. Es hat sich gezeigt, dass sich die mikroseismischen Aktivitäten mit den Jahreszeiten und über die Jahre hinweg verändern. Sie lassen sich mit der Witterung, wie Schneeschmelze, Starkniederschlägen oder Frost-Tau-Zyklen korrelieren.

Abstract

Since 2017, the large landslide Moosfluh above the Aletsch glacier along with a loosening boulder above the lake of Sihlsee have been monitored with micro-seismic technologies. Based on the monitoring results, the fracturing and sliding activities in the subsurface have been possible to plot in 4D. The data shows i.a. that the slide of Moosfluh reaches deeper than expected and that the micro seismic activity is shifting to the presumed undeformed host rock. It also appears that the micro seismic activities change with the seasons and over the years and can be correlated with weather conditions, such as snowmelt, heavy rainfall or freeze-thaw cycles.

1 Einleitung und Zielsetzung

Nachfolgende Publikation erfolgte im Rahmen der Tagung der SFIG (Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie) im Jahr 2020 in Olten mit dem Tagungsthema «Die Ingenieurgeologie im Zeichen und Einfluss des Klimawandels Permafrost – Massenbewegungen – Schutzwald», welche Corona-bedingt auf den Herbst 2020 verschoben wurde.

Seit 2016 bzw. 2017 werden zwei Endglieder im Bereich Fels- / Bergsturz mit einem mikroseismischen Monitoring überwacht (Standorte siehe Fig. 1). Diese sind der Rutschhang bzw. Bergsturz nördlich der Station Moosfluh beim Aletschgletscher mit einem Volumen von >150'000'000 m³ und max. Bewegungsraten von 10-80 cm / Tag, sowie eine instabile Felswand oberhalb von Im Ruostel am Sihlsee mit ca. 15'000 m³ und Bewegungen von wenigen cm pro Jahr (Fig. 2).

Ziele der Messungen sind, die mikroseismische Aktivität, ausgelöst durch die Destabilisierungen in der Rutschmasse bzw. im instabilen Fels zeitlich lückenlos und vierdimensional zu vermessen und zu lokalisieren, sowie mit Wetterdaten und Geologie zu korrelieren. Daraus können Abschätzungen zum instabilen Volumen, zum Ablöseverhalten und möglichen Prozessen und Triggern gemacht werden. Neben der Früherkennung von instabilen Felspartien und sich verlagernden Destabilisierungen wird das Fernziel

¹ Geo Explorers AG, Wasserturmplatz 1, 4410 Liestal, www.geo-ex.ch, info@geo-ex.ch

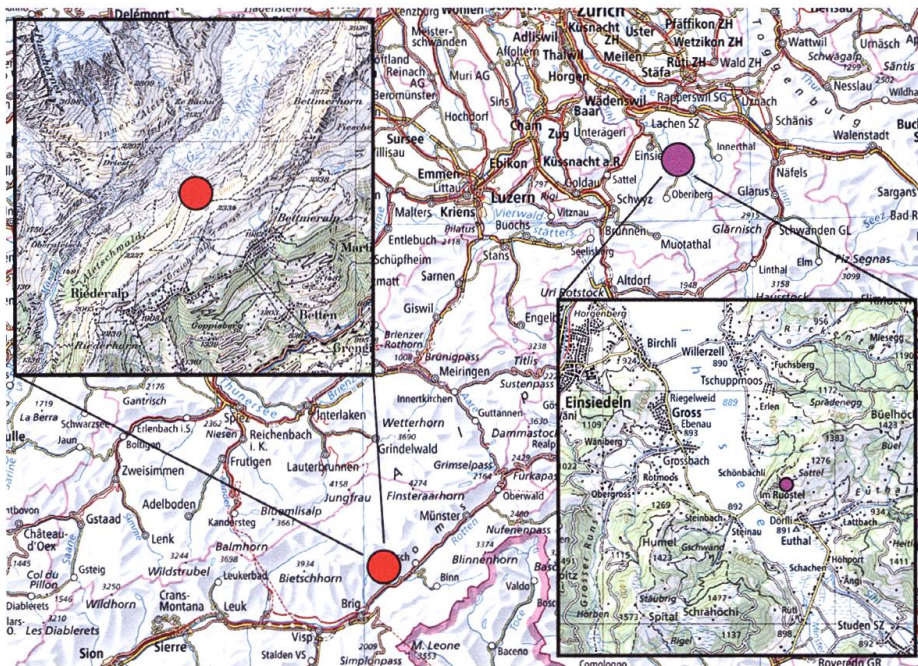


Fig. 1: Standortgebiete Moosfluh (rot) und Im Ruostel (violett).

verfolgt, ein Frühwarnsystem zu entwickeln. Der Vorteil der Anwendung ist es, dass neben den Tiefeninformationen ein Zugang in Gefahrenbereiche oder ein Sichtkontakt nicht notwendig sind.

2 Messprinzip und Funktionsweise

Basierend auf dem mikroseismischen Monitoringsystem vom Tiefengeothermie-Projekt in Basel im Jahr 2006 (Häring et al., 2008) wurde das Messsystem und die Auswertesoftware auf oberflächennahe Bruchprozesse bei Fels- und Bergstürzen und Rutschungen adaptiert. Dabei werden mit Geophonen die Erschütterungen / Mikrobeben im Un-

tergrund ausgehend von den Bruch- und Rutschaktivitäten gemessen und überwacht. Mit den eingesetzten Geophonen kann zum einen die Aktivität der Destabilisierung definiert werden, als auch aus den verschiedenen Ankunftszeiten und Einstrahlrichtungen der gemessenen seismischen Wellen mit Hilfe von einem Geschwindigkeitsmodell der Ort der Bruchaktivität, also der Ursprung der seismischen Welle lokalisiert werden. Zudem kann über die Amplitude der Schwingung die Stärke bzw. die freigesetzte Energie des Bruchvorganges ermittelt werden.

Im Untersuchungsgebiet Moosfluh wurden auf einer Fläche von 1.5 km² zwölf 3C-Geophone um und im Hangrutsch installiert

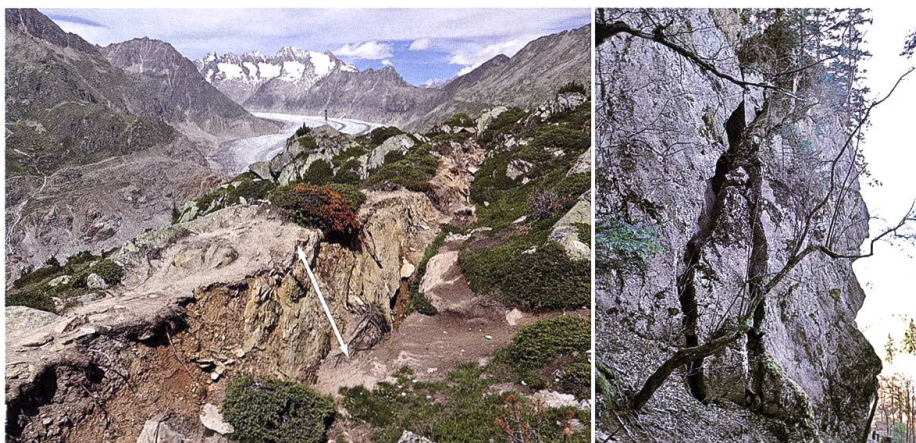


Fig. 2 links: Toppling-Flächen im oberen Hangbereich vom Moosfluh-Hangrutsch, welche im 2016 und 2017 entstanden sind und rechts: sich lösender Felsblock oberhalb von Im Ruostel.

(Fig. 3). Diese messen die mikroseismische Aktivität im Rutschgebiet. Die Messdaten gelangen zu 6 Stationen und werden von dort über das Mobilnetz in Echtzeit ins Büro transferiert oder auf lokalen Speichermedien gespeichert. Im Fall «Im Ruostel» kommen 4 Geophone am Top und 2 am Fuss der instabilen Felswand und eine Logging- und Daten-transfer-Einheit zum Einsatz.

3 Messdaten

Generell konnten zwei Typen von mikroseismischen Signalen unterschieden werden. Es wurden stärkere und längere seismische Events gemessen, die von mehreren Geophonen aufgezeichnet wurden und entsprechend gut lokalisiert werden konnten. Sie zeigten häufig Frequenzen von <20 Hz. Wiederholt

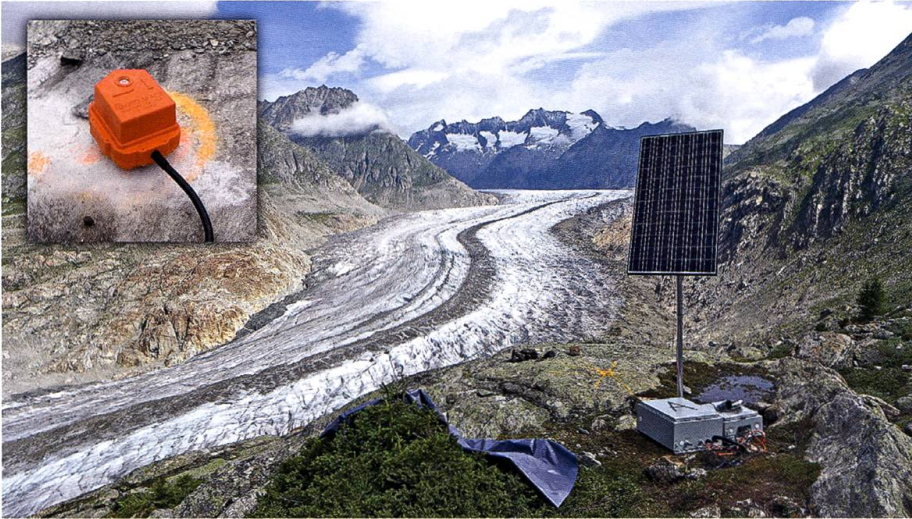


Fig. 3: Eine Station mit Logging- und Datenübertragungseinheit, sowie Stromversorgung oberhalb des Aletschgletschers mit Geophon (links), bevor dieses eingesandet und Schallschutz-geschützt ummantelt wurde.

Im Büro werden mittels Filtern und Automatismen die relevanten Erschütterungen getriggert, lokalisiert und deren Grössenklasse ermittelt. Je nach Signalstärke der Mikrobeben liegt die Herausforderung darin, die relevanten mikroseismischen Daten aus dem Hintergrundrauschen (Noise) herauszufiltern. Auf Grund typischer Frequenzspektren, Wellenformen, Ersteinsatzreihenfolgen, Symmetrien und Wellencharakteristika können die unerwünschten Signale wie Blitze, Schüsse, Maschinen, vorbeilaufende Tiere usw. herausgefiltert werden. Die verbleibenden getriggerten Events werden von Hand evaluiert, lokalisiert und bewertet. Das für die Lokalisierung notwendige Geschwindigkeitsmodell wurde mit Hilfe von Hammerschlagseismik, einer kleinen Vibroanregequelle und durch iteratives inverses Modellieren generiert.

Die Datenübertragung und der Aufbau / Wartung der Stationen erfolgte in Zusammenarbeit mit der inNET Monitoring AG in Altdorf.

dauerte das Signal mehrere Sekunden an und variierte in der Stärke. Diese Signale spiegelten ein Art «Rumpeln» wider. Die anderen Signale waren meist kurz und eher schwächer mit typischen Frequenzen von 20-40 Hz. Es wurden nur die «guten» Events lokalisiert. Die restlichen wurden aber bei der Aktivitätsbewertung berücksichtigt.

4 Ergebnisse

4.1 Aktivitätsüberwachung und Korrelation mit Witterung

An beiden Standorten konnte gezeigt werden, dass sich die mikroseismischen Aktivitäten und damit die Bruch- und Rutschaktivitäten über die Jahreszeiten und Messjahre hinweg ändern. Es wechseln sich ruhige Phasen mit aktiveren Phasen ab. Die Eventraten gegen die Zeit (Anzahl natürliche mikroseismische Events pro Tag) werden in den Figures 4 und

5 für die beiden Standorte gegen die Temperatur, Niederschlag und Schneehöhen geplottet. Es sei angemerkt, dass die Witterungsdaten von nahen bestehenden Messstationen bezogen wurden und entsprechend die Witterungsverläufe relativ gut wiedergeben, aber die absoluten Werte am Messstandort insbesondere auf Grund unterschiedlicher Höhenlagen leicht verschieden sind.

Moosfluh (Aletsch)

Besonders zu Beginn der Messphase im Jahr 2017 war der Hangrutsch nachweislich noch sehr aktiv. Dabei entstanden viele neue und tiefgründige Toppling-Flächen und zentrale

Bereiche bewegten sich mit bis zu einigen Dezimetern pro Tag. Dies bestätigen die hohe mikroseismische Eventrate und grosse Anzahl von ca. 5000 getriggerten Events, welche im zentralen Bereich der Rutschmasse lokalisieren (siehe Fig. 4).

Nach einer ruhigeren Winterphase konnte eine starke Eventhäufung von bis zu 100 getriggerten Events pro Tag während einer aussergewöhnlich starken und raschen Schneeschmelze detektiert werden. Dabei wurden in wenigen Wochen auf der Fläche der Rutschmasse ca. $1 \cdot 10^9$ Liter Schmelzwasser frei, welches über die tiefgreifenden extensiven Spalten rasch und tief in den Un-

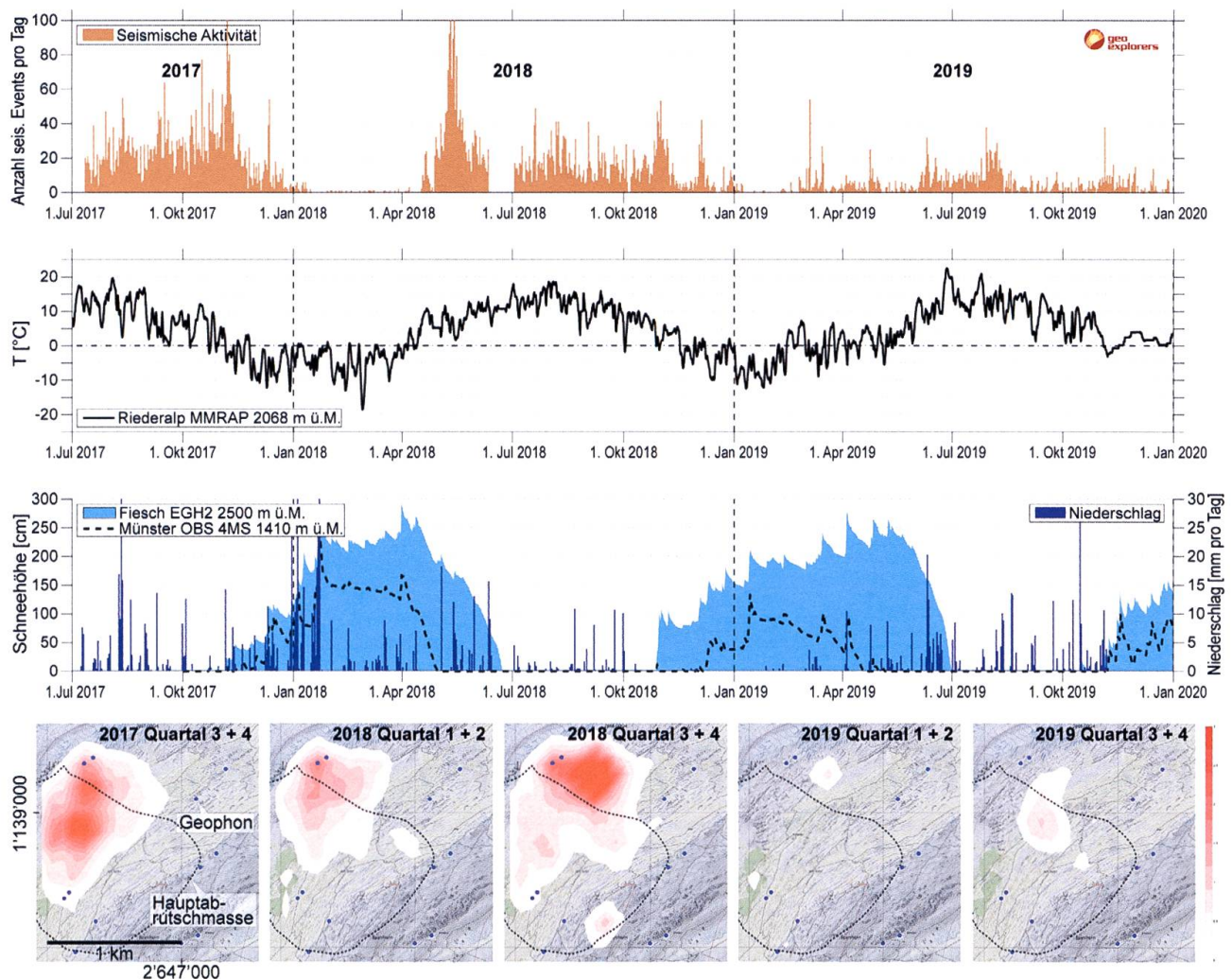


Fig. 4: Moosfluh (von oben nach unten): mikroseismische Aktivität in Events pro Tag (orange); Temperatur der Station Riederalp auf 2068 m ü.M.; Niederschlag (dunkelblau) und Schneehöhen (blaue Fläche und gestrichelte Kurve, die Schneehöhe im Messgebiet liegt zwischen den beiden Kurven, Messgebiet liegt zwischen 1700 und 2300 m ü.M.) von umliegenden Messstationen; Dichtekarten der mikroseismischen Aktivität pro Halbjahr (normierte Darstellung mit Glättungsfaktor 0.5 auf 340m*340m Bins). Im ersten Winter und Mai 2018 kam es zu Teilausfällen der Stationen.

tergrund gelangte. Hier liegt nahe, dass das reichlich und tiefgründig eindringende kalte Schmelzwasser als Trigger zu weiteren Destabilisierungen geführt haben kann. Folgende Parameter können dabei in Betracht gezogen werden: (a) erhöhter hydrostatischer Kluft- bzw. Bergwasserdruck, (b) plötzliche Fels-Kontraktion auf Grund reichlich kaltem Wasser in Tiefen, wo der Fels normal eine konstant «warme» Temperatur aufweist und (c) reduzierte Scherwiderstände.

Der Sommer und Herbst 2018 war ruhiger als im Jahr zuvor. Die Abschwächung korreliert auch mit anderen Daten, wie geringeren horizontalen Oberflächengeschwindigkeiten aus digitalen Höhenmodellen (z.B. Masterarbeit Truttmann 2019).

Nach einer ruhigen Winterphase wurde während der Schneeschmelze im 2019 nur eine leicht erhöhte Aktivität gemessen (Fig. 4). Die deutlich geringere Aktivität im Vergleich zum Vorjahr kann damit erklärt werden, dass neben einer allgemein geringeren Aktivität deutlich weniger Schnee im Gebiet des Hangrutsches auf 1700 bis 2300 m ü.M. lag und dieser über eine längere Zeit langsam abtaute. Entsprechend geringer war der Einfluss im Vergleich zu 2018.

Eine Korrelation mit Lufttemperatur, Niederschlag oder Wind konnte nicht festgestellt werden. Dies kann auf Grund der Grösse und Tiefgründigkeit der instabilen Masse erwartet werden. Entsprechend sind treibende Trigger wie Frostsprengung und Frost-Tau-Zyklen bei dieser grossvoluminösen Destabilisierung von geringer Bedeutung.

Umgekehrt konnte zu Beginn der Winter eine kurze erhöhte mikroseismische Aktivität mit den ersten starken Schneefällen festgestellt werden (Fig. 4). Evtl. ist die Rutschmasse so instabil, dass die Zusatzmasse durch mächtigen, oft nassen und damit schweren Neuschnee gerade ausreicht, weitere Destabilisierungen auszulösen. Spätere Schneefälle

im Winter zeigen keine erhöhte Aktivität. Evtl. ist ausreichend Spannung abgebaut oder wirkt die zunehmend dicke und verfestigte Schneedecke wie eine selbst stabilisierende Schutzdecke. Weitere Messjahre müssen diese Beobachtungen bestätigen.

Im Ruostel

Die Felsdestabilisierung oberhalb Im Ruostel ist viel kleiner als der Moosfluh-Rutsch. Entsprechend können andere auslösende Prozesse und mikroseismische Aktivitäten erwartet werden. In Figur 5 ist die Aktivität und Witterung über die letzten 3 Jahre aufgetragen. Die allgemeine Aktivität hat sich über die Jahre nicht grundlegend verändert. Innerhalb von den Messjahren variiert aber die Aktivität. Insbesondere fällt eine erhöhte Aktivität in den Sommermonaten auf, welche auch die stärksten Events zeigt. Evtl. kann diese mit einer direkten Sonneneinstrahlung in Verbindung gebracht werden, welche auf Grund der steilen Nordwest gerichteten Lage in den anderen Monaten nicht erfolgt. Anfang September 2017 kann eine aussergewöhnliche starke Niederschlagsphase mit einer erhöhten Aktivität korreliert werden. Eine sehr rasche Schneeschmelze im Frühjahr 2018 kann ebenfalls mit einer erhöhten Seismizität in Verbindung gebracht werden. Ansonsten lag kaum Schnee oder schmolz dieser nur langsam ab, sodass hier keine Korrelationen bestehen.

Wertet man die Daten mit einem tieferen Signal to Noise Ratio aus, so können mehr kleine Events getriggert und entsprechend detaillierter mit der Witterung verglichen werden. Dies erfolgte zu Beginn der Messreihe in den Jahren 2017 und 2018, um ein besseres Verständnis zu gewinnen. Figur 6 zeigt dies beispielhaft für das Jahr 2017. Neben der sehr deutlichen Sommeraktivität über mehrere Tage hinweg, der Korrelation mit den Starkniederschlägen Anfang September fallen auch die Eventhäufungen im Bereich der Frost-Tau-Grenze auf. Eine bimodale Häufigkeitsverteilung der Eventraten pro

Tag gegenüber der mittleren Tagestemperatur bestätigt den Temperatureinfluss auf die Destabilisierung (Teilmaxima um 2°C und 17°C). Im Gegensatz zum Moosfluh-Rutsch sind entsprechend destabilisierende Prozesse wie Frost-Tau-Zyklen, kältebedingte Kontraktion, Frostsprengung oder erhöhter Bergwasserdruck bei starken Niederschlägen von grösserer Bedeutung. In den beiden Auswertejahren 2017 und 2018 konnten auch wiederholt stärkere Niederschlagsphasen mit gleichzeitigen deutlichen Temperaturstürzen mit leichten Sprüngen auf der Aktivi-

tätssummenkurve korreliert werden.

Anmerkung: Die vielen kleinen Events sind für die Bestandsaufnahme und dem Verständnis bzgl. der destabilisierenden Prozesse interessant. Da aber deren grosse Anzahl bei der Auswertung durch die manuelle Kontrolle und Nachpicken sehr aufwendig machen und gleichzeitig weniger relevant für die Gefahrenbeurteilung sind, sowie die Lokalisierungsgenauigkeit bei den kleinen Events deutlich abnimmt, wird seit 2019 mit einem höheren Signal to Noise Ratio getriggert.

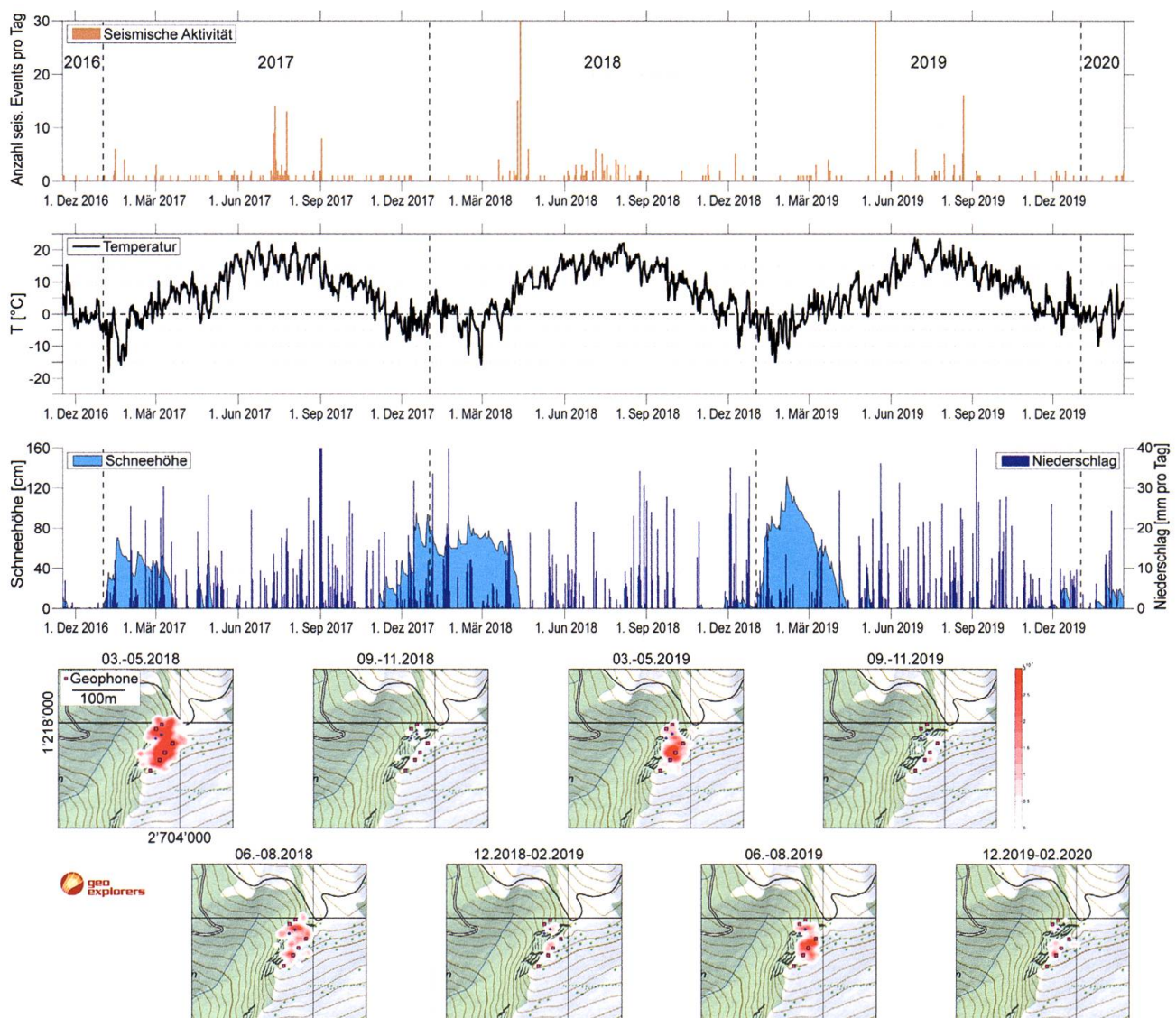


Fig. 5: Im Ruostel (von oben nach unten): mikroseismische Aktivität in Events pro Tag; Lufttemperatur; Niederschlag und Schneehöhen der nahen Stationen Unteriberg / Euthal und Oberiberg; Dichtekarten der mikroseismischen Aktivität pro Jahreszeit (normierte Darstellung mit Glättungsfaktor 100 auf 10m*10m Bins). Im ersten Jahr waren nur 4 Geophone am Felstop installiert. Deshalb wurden die Events nicht lokalisiert, da die Lokalisierungsgenauigkeit im Vergleich zu der Anordnung mit 2 Geophonen am Wandfuss deutlich ungenauer ist.

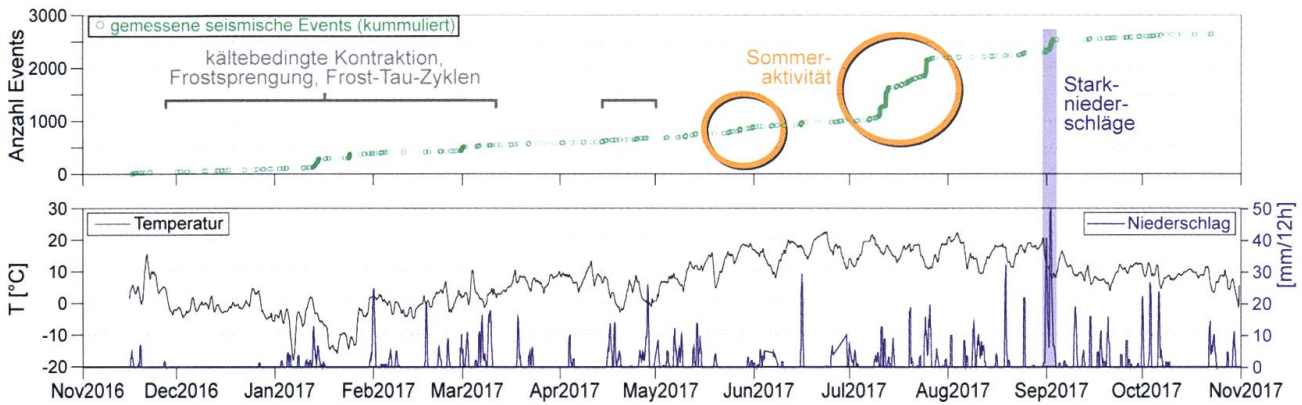


Fig. 6: Mikroseismische Aktivität «Im Ruostel» im Jahr 2017, ausgewertet mit tieferem Signal to Noise Ratio.

4.2 Lokalisierung von Bruchevents, Verlagerung von Destabilisierungen, Quantifizierung des Ablösevolumens

Moosfluh (Aletsch)

Eine wichtige Fragestellung war die Tiefe des Abscherhorizonts, da die Meinungen von einigen Zehner Metern bis rund 400 m Tiefe reichten. Dies hat Einfluss auf das Gesamtvolumen der Rutschmasse und entsprechenden Risikobewertungen. Die 481 lokalisierten Events zeigen, dass die gehäuften Destabilisierungen bis in Tiefen von ca. 100 bis 300 m reichen (Fig. 7). Dies entspricht einem ungefähren instabilen Felsvolumen von über 150'000'000 m³. Es sei hier erwähnt, dass die Lokalisierungsgenauigkeit von mehreren Faktoren abhängt, wie z.B. dem hinterlegten Geschwindigkeitsmodell, sowie der Stärke von einem Signal im Vergleich zum Hintergrundrauschen, welche die Pickgenauigkeit bestimmen. Modellierung

gen zeigen, dass die Lokisierungsaufösung bei 10 - 50 m liegt. Mit den bestehenden Ungenauigkeiten kann je nach Stärke und Typ des Events mit einer Genauigkeit zwischen 20 und 100 m gerechnet werden.

Einige Events lokalisieren vergleichsweise in grösserer Tiefe und ausserhalb der aktiven Rutschmasse (Fig. 7). Diese Events können bei Beachtung der Lokisierungsungenauigkeit nur schwer direkt mit der Rutschmasse in Verbindung gebracht werden. Diese können auf aktive «composite faults» zurückgeführt werden (M. Ustaszewski, 2007), welche natürliche, immer noch aktive, nacheiszeitliche Bruchaktivitäten in Richtung Rhonetal widerspiegeln.

Die Dichtekarten der lokalisierten Events in Figur 4 zeigen, dass sich die mikroseismische Aktivität im Jahr 2018 in Richtung NE in den

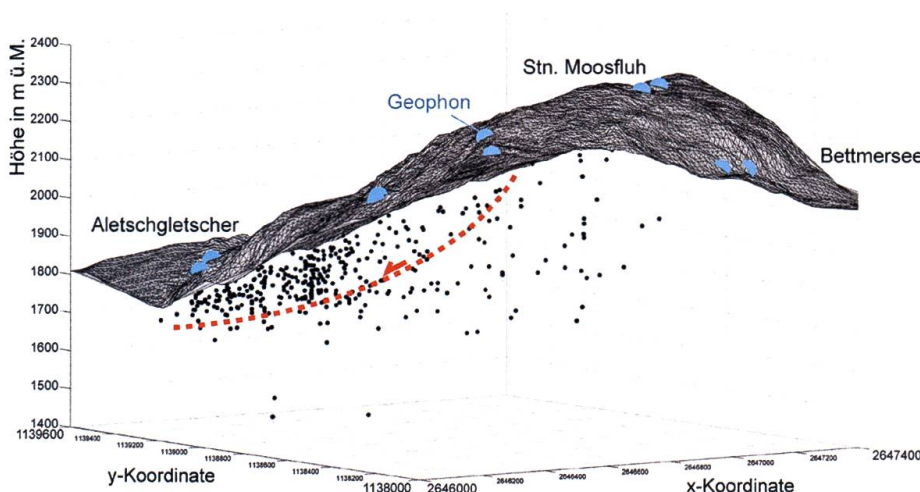


Fig. 7: Lokalisierte Events in einer 3D-Darstellung mit Blick in Richtung NE. Die Seitenansicht verläuft von NNW (links, Aletschgletscher) nach SSE (rechts, Bettmersee). Die blauen Punkte auf der Felsoberfläche entsprechen den Geophonen. Jeder schwarze Punkt stellt ein lokalisiertes mikroseismisches Event dar. Der mögliche basale Abscherhorizont der Rutschmasse ist rot gestrichelt dargestellt.

vermeintlich «heilen» Fels verschoben hat. Dies ist naheliegend, da durch das rasche Abbrechen und Übersteilen eine grosse stabilisierende Felsmasse im unteren Bereich der Rutschmasse verloren ging. Somit entstanden neue Spannungsgradienten, die den dahinter liegenden Bereich weiter destabilisierten. Zwei neue und grosse randparallele, ca. N-S verlaufende Abrisskanten belegen dies eindrücklich (siehe Fig. 8). Neueste Tendenzen im zweiten Halbjahr 2019 zeigen wieder vermehrt eine Aktivität westlich dieser N-S Abrisskanten.



Fig. 8: Blick vom gegenüberliegenden Hang auf die Moosfluh-Rutschmasse. Gut erkennbar sind auch die jungen, steilen ca. N-S streichenden Abbruchkanten. Der weisse Pfeil zeigt die Verlagerungsrichtung der seismischen Aktivität im Jahr 2018. Foto von Sandro Truttmann, Okt. 2018.

Im Ruostel

Die mikroseismische Aktivität lokalisiert im Bereich der potenziellen Abbruchmasse (Fig. 5). Werden die kleinen Events der Auswertung bei tiefen Signal to Noise Ratio berücksichtigt, so scheint, dass sich die Aktivitäten im Frühjahr eher in der Abbruchmasse häufen und sich dann die Aktivität während der Sommer- und Herbstmonate eher in den dahinter liegenden Fels hinein bewegt. Letztere bedeutet, dass sich auch der «heile» Fels hinter der Hauptabbruchmasse destabilisiert, was nicht verwunderlich ist, wenn davor stabilisierende Masse verloren geht. Um das südwestlichste Geophon herum ist es, wie zu erwarten, vergleichsweise ruhig.

Die seismischen Aktivitäten lokalisieren im Wesentlichen innerhalb der Nummulitenkalke (Fig. 9). Es scheint, dass diese in den unterlagernden Amdenmergeln gering ist. Dies wäre zu erwarten, da diese auf die Verformung eher «plastisch» reagieren. Zudem würde dies darauf hindeuten, dass das Abbruchvolumen eher nur auf den sichtbaren Felsbereich der Nummulitenkalke begrenzt werden kann.

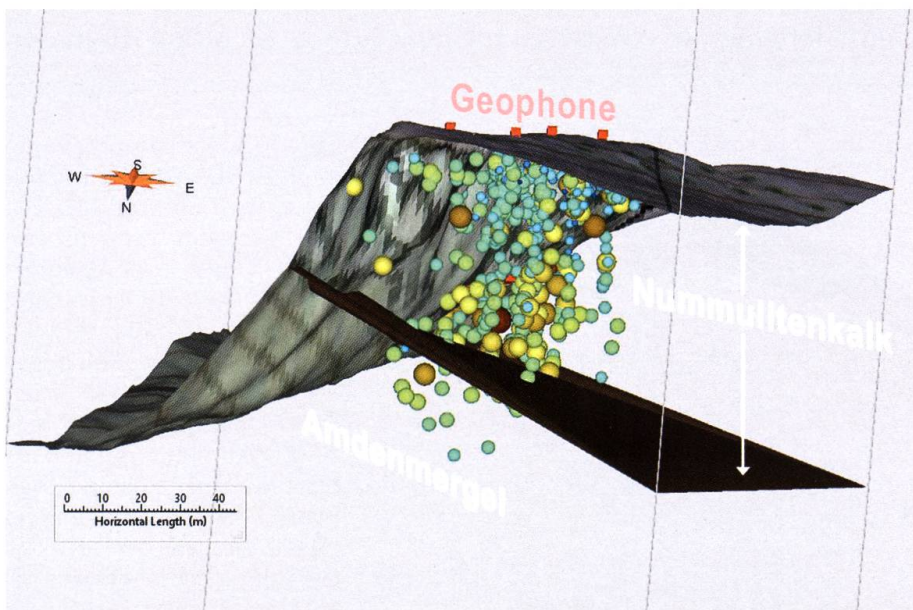


Fig. 9: 3D-Ansicht der Destabilisierung «Im Ruostel» mit den lokalisierten seismischen Events. Die runden Punkte stellen die lokalisierten Events dar, die roten Vierecke die Geophone. Je grösser die Punkte desto grösser die freigesetzte Energie / Magnitude. Es sind die Flächen der Topographie (grüngraue Fläche) und der geologischen Grenze zwischen den Nummulitenkalcken und Amdenmergeln (dunkelbraune ebene Fläche) dargestellt. Blick in Richtung Nord. Zum besseren räumlichen Verständnis wird auf Figur 10 verwiesen.

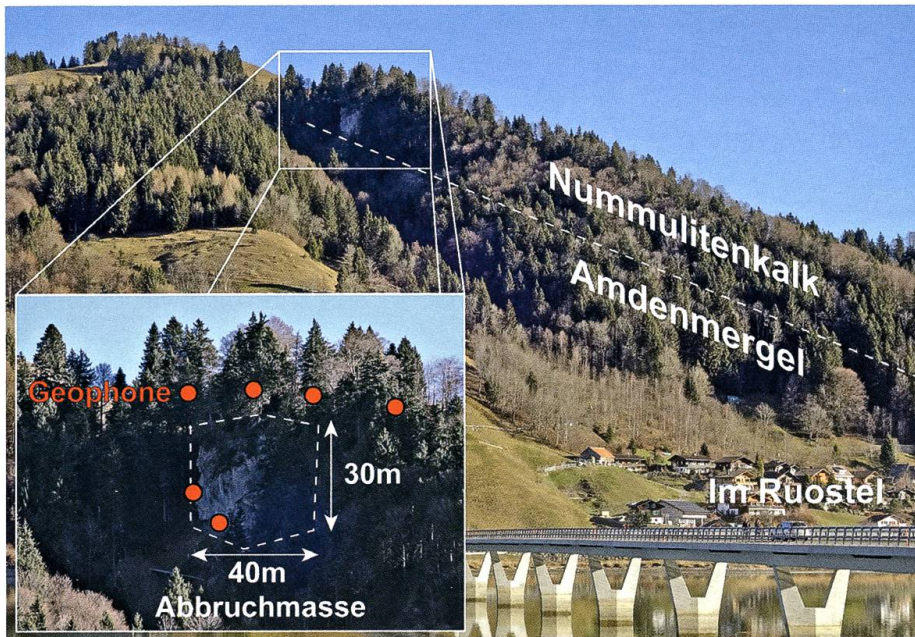


Fig. 10: Ansicht von Westen in Richtung Osten auf die instabile Felspartie oberhalb von Im Ruostel.

5 Schlussfolgerungen

Mit dem mikroseismischen Monitoring kann die Aktivität von Fels-/ Bergstürzen oder Rutschungen einfach überwacht werden. Veränderungen in der mikroseismischen Aktivität und Magnitude können gefährliche Destabilisierungen frühzeitig aufzeigen. Die Stärke des Systems ist es, dass die Aktivität im gesamten Untergrund aufgedeckt wird und sich somit Volumen abschätzen lassen. Im Moosfluh-Rutsch konnte gezeigt werden, dass der basale Abscherhorizont deutlich tiefer liegt, als wie angenommen. An beiden Standorten stellte sich heraus, dass auch im vermeintlich heilen Fels Destabilisierungen erfolgen. Es können somit frühzeitig unbekannte Hotspots oder Verlagerungen in den vermeintlich intakten Fels detektiert werden, bevor es zu messbaren Massenbewegungen kommt. Dies sind wichtige Erkenntnisse für eine zukunftsgerichtete Risikobewertung und auch für allfällige Massnahmen. Die Korrelation mit der Witterung hilft Prozesse und Trigger besser zu verstehen, um ebenfalls Risiken besser einschätzen zu können. Beide Standorte zeigen, dass je nach Grösse aber auch ausgesetzter Witterung unterschiedliche Trigger zu erhöhten Aktivitäten führen. Es scheint, dass am Moosfluh-Rutsch

starke erste Schneefälle, sowie das rasche Abschmelzen von grossen Schneemassen zu einer beschleunigten Destabilisierung führen. Im Ruostel hingegen ist die Aktivität mehr durch Temperaturänderungen und Niederschläge beeinflusst. Während Frosttagen, Frost-Tau-Zyklen, sehr starken Niederschlägen und besonders während einzelner Tage im Sommer ist die seismische Aktivität erhöht.

Schlussendlich eignet sich das Messsystem auch als schnell und einfach einsetzbare Interventionseinheit, um die weitere Gefährdung nach einem Abbruch rasch und gefahrlos bestimmen zu können.

6 Ausblick

Als nächste Schritte sind Vergleiche mit anderen Überwachungsmesssystemen geplant. Im Ruostel Felsblock wurden zuletzt automatische Weggeber installiert. Dessen Daten sollen mit der mikroseismischen Aktivität verglichen werden. Beim Moosfluh-Rutsch sollen ebenfalls bei einer Verlängerung des Pilotprojektes die Messdaten mit anderen

Daten verglichen werden. Hier steht besonders auch die Unterscheidung der Oberflächen-Prozessen von solchen im Untergrund, sowie die Quantifizierung freiwerdender Energien im Fokus.

Danksagungen

Es wird Daniel Bollinger und Lukas Inderbitzin vom Amt für Wald und Naturgefahren, Kanton Schwyz für die Ermöglichung des Pilotprojekts am "Im Ruostel" und zweimaliger Verlängerungen gedankt.

Dem BAFU danken wir für die finanzielle Unterstützung des Innovationsprojekts beim Moosfluh-Rutsch durch die Umwelttechnologieförderung. Auch bedanken wir uns bei Hugo Raetzo vom BAFU für seine tatkräftige und wissenschaftliche Begleitung.

Referenzen

- Häring, M.O., Schanz, U., Ladner, F. & Dyer, B.C. 2008: Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. *Geothermics*, 37, 469-495.
- Truttman, S. 2019: The Effect of Pre-Existing Structures on the Moosfluh Landslide (Great Aletsch Glacier, Switzerland). Master thesis, Universität Bern, p. 62.
- Ustaszewski, M. 2007: Active Tectonics in the central and western Swiss Alps. Inauguraldissertation, Universität Bern, p. 139.