26. Symposium Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, 27. Juni 2025, Empa Dübendorf

BaudynSymp2025_10_Carrel-Geopraevent-etal.pdf

Radar- und optische Überwachung des Brienz/Brinzauls-Bergsturzes

Maxence Carrel, Marc Schneebeli, Martin Hahner, Johannes Gassner, Geopraevent AG, Zürich, CH

Abstract

Am 15. Juni 2023 erreichte ein Erdrutsch mit 1,2 Millionen Kubikmetern beinahe das Dorf Brienz/Brinzauls in der Südostschweiz. GEOPREVENT-Lösungen waren Schlüsselelemente des Frühwarnsystems zur Überwachung des Erdrutsches und trugen wesentlich dazu bei, das Risiko für Dorf, Strasse und Infrastruktur im Talboden zu minimieren. Eine der Zufahrtsstrassen nach Brienz verlief direkt unter dem Hang und war stark durch Steinschlag gefährdet. Daher wurde 2016 von Geoprevent ein Steinschlagradar installiert, das mit Hilfe der Doppler-Radartechnologie Steinschlagereignisse in Echtzeit erkennt. Dieses System erkennt Ereignisse innerhalb weniger Sekunden und sperrt die Strasse innerhalb weniger Sekunden automatisch mit Hilfe von Ampeln. Seit seiner Installation hat dieses System regelmässig und erfolgreich Steinschlagereignisse erkannt und die Strasse gesperrt, was die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer erhöht. Seit 2019 wird ein interferometrisches Radar zur kontinuierlichen Messung der Hangbewegungsrate eingesetzt. Im Jahr 2023 wurde ein hochauflösendes Kamerasystem hinzugefügt, um den Erdrutsch vom Kamm aus zu überwachen und eine automatische Bildanalyse aus einem anderen Blickwinkel durchzuführen. Die gesammelten Daten zeigen deutlich die Beschleunigung des Erdrutsches vor dem Ereignis. Nach dem Ereignis nahmen die Bewegung des Erdrutsches und die Steinschlagaktivität stark ab. Das Frühwarnsystem ist weiterhin in Betrieb, um die weitere Entwicklung im Bergsturzgebiet zu überwachen.

Radar- und optische Überwachung des Brienz/Brinzauls-Bergsturzes

Maxence Carrel[1], Marc Schneebeli[1], Martin Hahner[1], Johannes Gassner[1]

[1] GEOPREVENT, Räffelstrasse 28, 8045 Zurich, Switzerland

ZUSAMMENFASSUNG: Am 15. Juni 2023 erreichte ein Erdrutsch mit 1,2 Millionen Kubikmetern beinahe das Dorf Brienz/Brinzauls in der Südostschweiz. GEOPREVENT-Lösungen waren Schlüsselelemente des Frühwarnsystems zur Überwachung des Erdrutsches und trugen wesentlich dazu bei, das Risiko für Dorf, Strasse und Infrastruktur im Talboden zu minimieren. Eine der Zufahrtsstrassen nach Brienz verlief direkt unter dem Hang und war stark durch Steinschlag gefährdet. Daher wurde 2016 von Geoprevent ein Steinschlagradar installiert, das mit Hilfe der Doppler-Radartechnologie Steinschlagereignisse in Echtzeit erkennt. Dieses System erkennt Ereignisse innerhalb weniger Sekunden und sperrt die Strasse innerhalb weniger Sekunden automatisch mit Hilfe von Ampeln. Seit seiner Installation hat dieses System regelmässig und erfolgreich Steinschlagereignisse erkannt und die Strasse gesperrt, was die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer erhöht. Seit 2019 wird ein interferometrisches Radar zur kontinuierlichen Messung der Hangbewegungsrate eingesetzt. Im Jahr 2023 wurde ein hochauflösendes Kamerasystem hinzugefügt, um den Erdrutsch vom Kamm aus zu überwachen und eine automatische Bildanalyse aus einem anderen Blickwinkel durchzuführen. Die gesammelten Daten zeigen deutlich die Beschleunigung des Erdrutsches vor dem Ereignis. Nach dem Ereignis nahmen die Bewegung des Erdrutsches und die Steinschlagaktivität stark ab. Das Frühwarnsystem ist weiterhin in Betrieb, um die weitere Entwicklung im Bergsturzgebiet zu überwachen.

Einführung

Phase I – Steinschlagradar zur Überwachung der Zufahrtsstrasse

In Gebirgsregionen sind Infrastrukturen wie Strassen, Bahnen oder Gebäude häufig durch alpine Massenbewegungen wie Erdrutsche und Steinschlag (Hungr et al. 2014), Murgänge (Jacquemart et al. 2015) oder Eis- und Schneelawinen (Margreth et al. 2017) gefährdet. In der Vergangenheit wurden, wo es möglich war, bauliche Massnahmen wie Tunnel, Galerien, Dämme, Schutzmauern oder Wälder (Holub et al. 2008, Stoffel et al. 2005) gebaut, um Schäden zu vermeiden oder zu minimieren. In den letzten Jahren, mit der Entwicklung neuer elektronischer Technologien unter Verwendung von Reissleinen, Radar-, Bewegungs- oder Seismik Sensoren (Geoprevent, 2023), stellen organisatorische Massnahmen mit automatischer Strassen- oder Bahnsperrung eine kostengünstige Alternative zu konstruktiven Massnahmen dar, da die Vorlaufzeit des Ereignisses lang genug ist, damit die Nutzer die Gefahrenzone evakuieren können. Meier et al. (2016, 2017) haben gezeigt, dass Dopplerradarsysteme effektiv in lokale Alarmsysteme eingebunden werden können, um Strassen oder Bahnlinien nach der Erkennung von Eis- oder Schneelawinen und Steinschlagereignissen zu sperren. Ein solches System wurde 2016 in Brienz/Brinzauls installiert, einer Gemeinde in der Ostschweiz, wo ein tiefliegender Erdrutsch in den letzten zehn Jahren regelmässig Steinschlag verursachte und eine der wichtigsten Zufahrtsstrassen gefährdete. Die Strasse war ursprünglich durch einen Damm geschützt. Aufgrund einer Verschiebung und Ausdehnung des Steinschlaggebiets am Berg war die Strasse östlich und westlich des Schutzdamms zunehmend durch Steinschlag gefährdet. Als

ergänzende Massnahme zum Schutz der Verkehrsteilnehmer wurde dann das Alarmsystem mit dem Dopplerradar installiert. GEOPREVENT betreibt dieses System, das vom Tiefbauamt des Kantons Graubünden als ergänzende Massnahme zum Schutz der Verkehrsteilnehmer finanziert wurde.

Phase II – Kontinuierliche Überwachung der Hangbewegungen

Die Bevölkerung des Dorfes Brienz/Brinzauls in der Südostschweiz wurde am 12. Mai 2023 wegen eines drohenden Erdrutsches von schätzungsweise 2 Millionen m3 evakuiert. Das Dorf befindet sich an einem Hang, der seit Jahrzehnten in Bewegung ist. Seit 2011 werden verschiedene Technologien zur Überwachung eingesetzt. Ein als „Insel“ bezeichnetes Kompartiment hatte sich seit 2018 beschleunigt und erreichte Ende 2022 Geschwindigkeiten von etwa 20 m pro Jahr, während sich das Dorf mit einer Geschwindigkeit von ca. 1-1,5 m pro Jahr bewegte (The Landslide Blog 2023). Es wurden mehrere Szenarien für die weitere Entwicklung des Erdrutsches in Betracht gezogen, von denen das pessimistischste davon ausging, dass ein Teil des Dorfes durch den erwarteten Erdrutsch verschüttet würde. Am 15. Juni 2023, 7 Wochen nach der Evakuierung des Dorfes, brach der Erdrutsch kurz vor Mitternacht aus. Etwa 1,2 Millionen m3 Material wurden freigesetzt und verfehlten das Dorf um einige Meter (The Landslide Blog 2023). Dieses Ereignis stiess in der Wissenschaft auf grosses Interesse und wurde weltweit von den Medien aufgegriffen. Zum Schutz der Bewohner und der Infrastruktur im Dorf und im Tal wurde ein Frühwarndienst mit einem umfassenden Frühwarnsystem (EWS) eingerichtet, das von den lokalen Behörden (der Gemeinde Albula mit Mitteln der Gemeinde, des Kantons Graubünden und der Schweizerischen Eidgenossenschaft) finanziert und von einem Konsortium unter der Leitung eines privaten Unternehmens in Zusammenarbeit mit weiteren Unternehmen und Forschungseinrichtungen betrieben wurde. Dieses FWS bestand aus mehreren Komponenten wie periodischen Lidar-Messungen und satellitengestützten InSAR-Analysen sowie einer kontinuierlichen Überwachung mit Piezometern, Inklinometern, einer Totalstation, seismischen Sensoren und GNSS-Systemen (Gojic et al., 2021, Häusler et al., 2021, Jones et al. 2022). GEOPREVENT trug zu diesem EWS mit zwei verschiedenen Technologien bei, die Erkenntnisse zum Verständnis der Prozesse und zur Überwachung der Beschleunigung des Erdrutsches in den letzten Jahren und in den Wochen vor dem Abbruch lieferten.

Aufbau des Doppler-Radarsystem zum Erkennen von Steinschlag

Das in Brienz/Brinzauls installierte Doppler-Radarsystem ist am oberen Teil eines Gebäudes auf der Nordseite des Dorfes angebracht. Der Radarkopf, eine Kamera zur Überwachung des Radars und eine weitere zur Aufzeichnung von Filmen der erkannten Ereignisse sind dem Erdrutsch zugewandt (siehe linkes Feld in Abbildung 1). Die Entfernung zwischen dem Radarstandort und dem oberen Teil des Erdrutsches beträgt ca. 950 m. Das Radargerät hat einen horizontalen und vertikalen Winkel von 90° bzw. 20°, und sein Sichtfeld ist durch die gestrichelte rote Linie in Abbildung 2 dargestellt. Das Radar tastet sein Sichtfeld ab, indem es ein frequenzmoduliertes Dauerstrichsignal (FMCW) über ein Frequenzband von 50 MHz bei ca. 10 GHz aussendet. 10 GHz. Das Radarsystem nutzt den Dopplereffekt zur Erkennung bewegter Objekte, d. h. den Frequenzunterschied zwischen dem gesendeten und dem empfangenen Signal, da bewegte Objekte im Sichtfeld ein Signal mit höherer Frequenz reflektieren, das geschwindigkeitsabhängig ist. Die Laufzeitinformationen zwischen dem Radar und dem sich bewegenden Objekt ermöglichen die Lokalisierung der sich bewegenden Objekte im Sichtfeld des Radars. Das System führt jede Sekunde Messungen durch und arbeitet unabhängig von den Wetter- und Helligkeitsbedingungen. Bewegte Objekte werden von ihrer

Erkennung an verfolgt, bis sie zum Stillstand kommen oder das Sichtfeld des Systems verlassen. Abbildung 2 zeigt eine Steinschlagspur und einige ihrer Metadaten sowie einige Ereignisbilder, wie sie auf GRAVX™, dem Datenportal von Geoprevent, angezeigt werden. Auf diesem Portal sind Daten zu allen erkannten Ereignissen gespeichert und zur Visualisierung verfügbar.

Abbildung 1. Hardware des Doppler-Radarsystems mit Überwachungskamera, Radarkopf und Ereigniskamera (links) und Ampelsystem, das in der Nähe der Zufahrtsstrasse des Dorfes installiert wurde, mit dem Erdrutsch im Hintergrund.

Normalerweise erkennen Doppler-Radare bewegte Objekte mit einem Volumen von 0,1 m3 in 100 m und 1 m3 in 1 km Entfernung (Geoprevent, 2023). Seit seiner Installation im Jahr 2016 hat dieses System mehr als 9500 Steinschlagereignisse erfasst. Die Steinschlagaktivität in den 18 Monaten vor dem Erdrutschereignis ist in Abbildung 3 dargestellt und zeigt eine grosse zeitliche Variabilität und häufige Tage mit 10 oder mehr Ereignissen. Die kontinuierlich überwachte Felssturzaktivität wurde als wichtiger Warnparameter für den Erdrutsch-Frühwarndienst verwendet.

Automatische Strassensperrung

In Brinzauls beträgt die Länge des Strassenabschnitts, der Steinschlag ausgesetzt ist, 450 m. Da dieser Abschnitt ausserhalb der Ortschaft liegt, sind Autos, die mit mässiger Geschwindigkeit (langsamer Verkehr wie Fahrräder ist verboten) durch diesen Abschnitt fahren, etwa 30 Sekunden lang Steinschlag ausgesetzt. Je nach Ablösezone dauert es zwischen 45 und 60 Sekunden, bis herabfallende Felsbrocken die Strasse erreichen. Daher sperrt das Radargerät bei Erkennung eines sich bewegenden Objekts die Strasse automatisch innerhalb weniger Sekunden, so dass den Verkehrsteilnehmern Zeit bleibt, die gefährdete Region sicher zu verlassen.

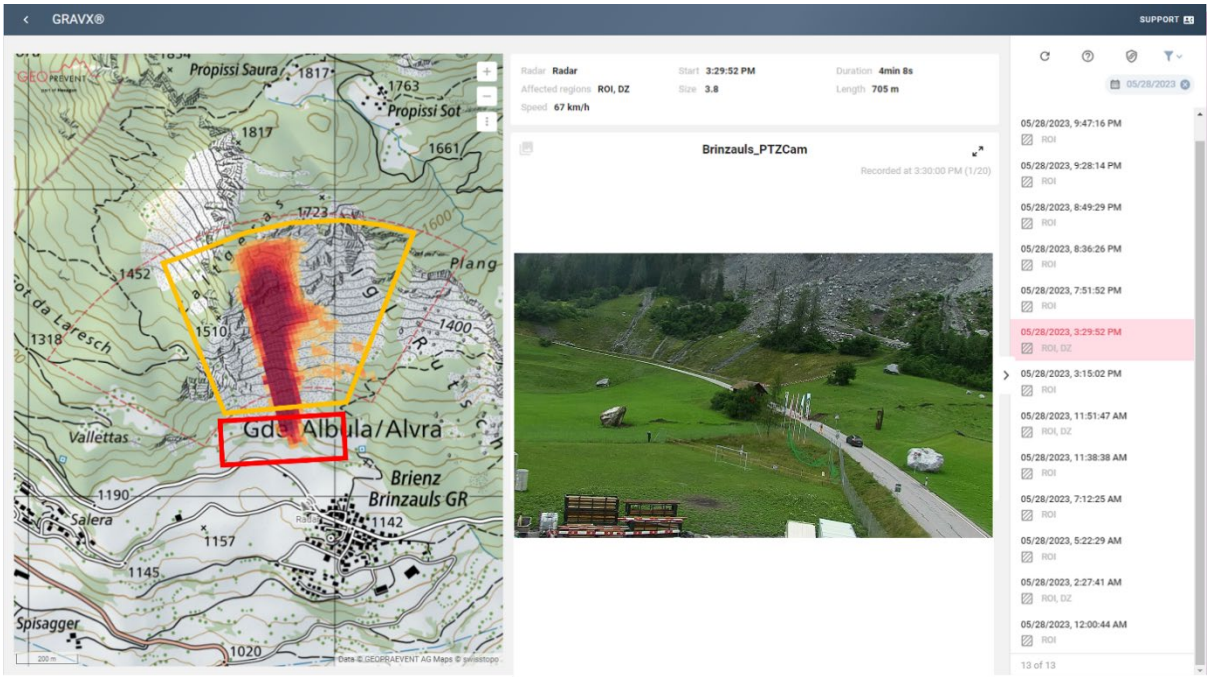

Abbildung 2. Ansicht der Doppler-Radarergebnisse, wie sie im GRAVX-Datenportal angezeigt werden. Jedes Ereignis erzeugt einen Eintrag, der nach Zeit sortiert ist (rechts). Sobald ein Ereignis in der Liste auf der rechten Seite ausgewählt wurde, werden Informationen angezeigt, die aus einer Karte der Region mit einer Farb-Darstellung des entdeckten Ereignisses und der vom Radar abgedeckten Zone bestehen, die durch eine rote gestrichelte Linie dargestellt wird (links). In der Mitte werden die Metadaten eines bestimmten Ereignisses angezeigt (Startdatum und -zeit, Dauer, Durchschnittsgeschwindigkeit, Länge), einschliesslich der Bilder des Ereignisses, in diesem Fall eines Felsblocks, der die Strasse überquert hat.

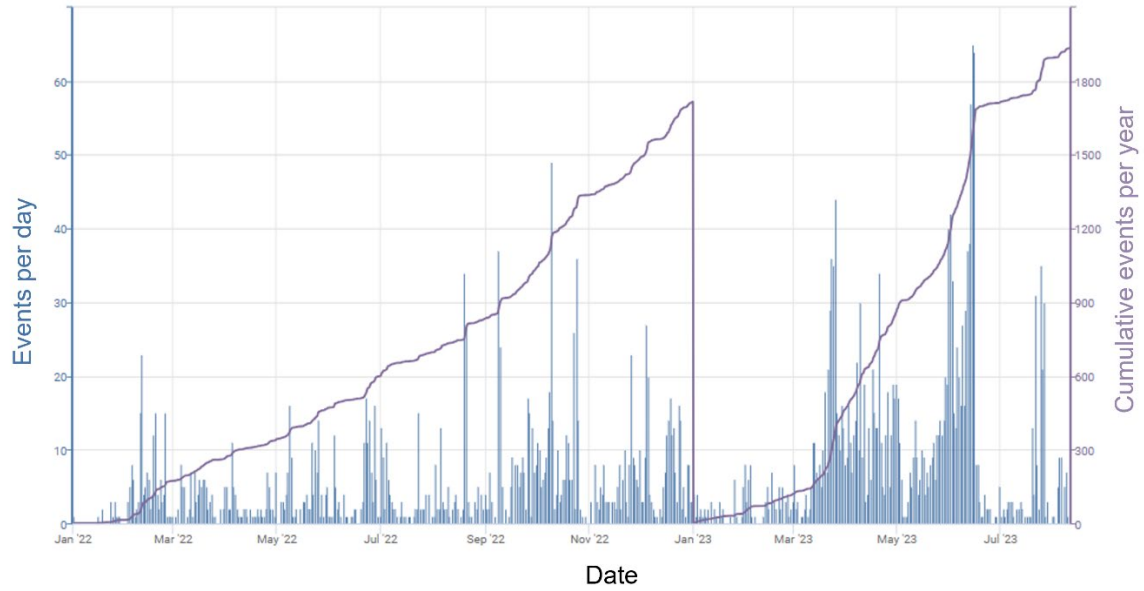

Abbildung 3. Tägliche Aktivität und jährliche kumulative Ereignisstatistiken für das Erdrutschgebiet. Für Mitte Mai bis Mitte Juni 2023 ist ein Rückgang der Steinschlagaktivität nach dem Abbruch vom 15. Juni 2023 zu erkennen.

Aufgrund der hohen Anzahl der vom Radar erfassten Ereignisse wurde eine spezielle Alarmlogik definiert, um die Zeit der Strassensperrung zu minimieren und gleichzeitig den Verkehrsfluss zu maximieren. Zu diesem Zweck wurden zwei verschiedene Zonen definiert, eine Alarmzone (orangefarbenes Polygon auf der linken Seite in Abbildung 2) und eine

Gefahrenzone (in Abbildung 2 rot dargestellt). Das Radargerät sperrt automatisch die Strasse, wenn eine Bewegung in der Alarmzone erkannt wird. Wird in der Gefahrenzone keine Bewegung festgestellt, wurde das bewegte Objekt durch den Damm aufgehalten oder kam während seiner Abwärtsbewegung zum Stillstand. In diesem Fall wird die Strasse nach einigen Minuten automatisch wieder freigegeben, und der Verkehr kann wieder aufgenommen werden. Wird eine Bewegung im Gefahrenbereich erkannt, wird die Strasse nach einigen Minuten wieder freigegeben und die Ampel schaltet auf orangefarbenes Blinken um, um die Verkehrsteilnehmer auf das mögliche Vorhandensein von Felsbrocken auf der Strasse hinzuweisen. Wenn ein Ereignis die Gefahrenzone erreicht, werden die Behörden automatisch benachrichtigt und können mit Hilfe der steuerbaren Kamera (Schwenken, Neigen, Zoomen) den Bereich inspizieren und beurteilen, ob ein Eingreifen vor Ort erforderlich ist, um Blöcke von der Strasse zu entfernen. Mit der Infrarot-Beleuchtung ist auch eine Inspektion der Strasse nach Ereignissen in der Nacht möglich.

Bodengestütztes interferometrisches Radar (Gb-InSAR)

Caduff et al. (2015) haben gezeigt, dass bodengestützte interferometrische Radare leistungsstarke Instrumente zur Messung der Verschiebung von Erdrutschen sind, da sie geeignet sind, Gebiete von mehreren km2 abzudecken, Messungen rund um die Uhr und bei allen Wetterbedingungen liefern und die Möglichkeit bieten, die Auswirkungen von atmosphärischen Störungen auf die Daten zu korrigieren. GEOPREVENT installierte im April 2019 ein bodengestütztes interferometrisches Radar in Brienz/Brinzauls als Teil des Frühwarndienstes zur permanenten Überwachung des sich beschleunigenden Bergsturzes. Das eingesetzte Gerät ist ein IBIS-FM der Firma IDS Georadar, Pisa, Italien. Nach der Durchführung von Sichtbarkeitsanalysen wurde ein Standort am unteren, gegenüberliegenden Hang gewählt, um eine ausreichende Sichtbarkeit des interessierenden Bereichs zu gewährleisten. Für den Standort mit der besten Sicht, der 3 km vom Erdrutsch entfernt liegt, war kein Netzanschluss verfügbar. Daher wurde ein energieautarkes System in einer kleinen Hütte installiert, um die Hardware vor ungünstigen Wetterbedingungen zu schützen. Solarmodule und eine Brennstoffzelle wurden mit Batterien kombiniert, um eine redundante Stromversorgung zu gewährleisten, die mehrtägige Schlechtwetterperioden überbrücken kann. An diesem Standort ist die Mobilfunkabdeckung ausreichend, um die vor Ort gemessenen Daten zur weiteren Verarbeitung in die Cloud zu übertragen. Das Radarsystem und sein Standort sowie der Erdrutsch auf der anderen Seite des Tals sind in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4. Links: Standort des interferometrischen Radars mit den Sonnenkollektoren und der Hütte (im Bau). Rechts: Radarkopf, der sich auf der Schiene des Systems bewegt, mit Schutzgehäusen, die die Batterien, die Brennstoffzelle und die Übertragungseinheit enthalten.

Die gemessenen Geschwindigkeiten in den aktivsten Zonen betrugen im Jahr 2020 ca. 3 - 5 m / Jahr und erreichten Ende 2022 15 - 20 m / Jahr bis hin zu mehr als 40 Metern pro Tag unmittelbar vor dem Kollaps des Erdrutsches (The Landslide Blog, 21. Juni 2023). Die maximale Geschwindigkeit, die das Radar zuverlässig messen konnte, lag bei ca. 4,5 m/Tag, bei höheren Geschwindigkeiten traten Phasenumbrüche auf, die eine Interpretation erschwerten. Angesichts der hohen Erdrutschgeschwindigkeiten unmittelbar vor dem Abbruch stellte dies eine grosse Herausforderung dar. Um den atmosphärischen Bedingungen vor Ort gerecht zu werden, wurde ein adaptives Interferometrie Modell entwickelt (Gassner et al., 2022). Dieses Modell basiert auf dem Vergleich von aktuellen Scans mit solchen, die unter ähnlichen Bedingungen gewonnen wurden, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Weitere Einzelheiten zu diesen Analysen finden sich in Gassner et al., 2022. Ein Beispiel für die resultierenden Verschiebungsdaten, die mit dem adaptiven Interferometrie Modell für den 25. April 2023, etwa zwei Monate vor dem Abbruch, gewonnen wurden, ist in Abbildung 5 dargestellt.

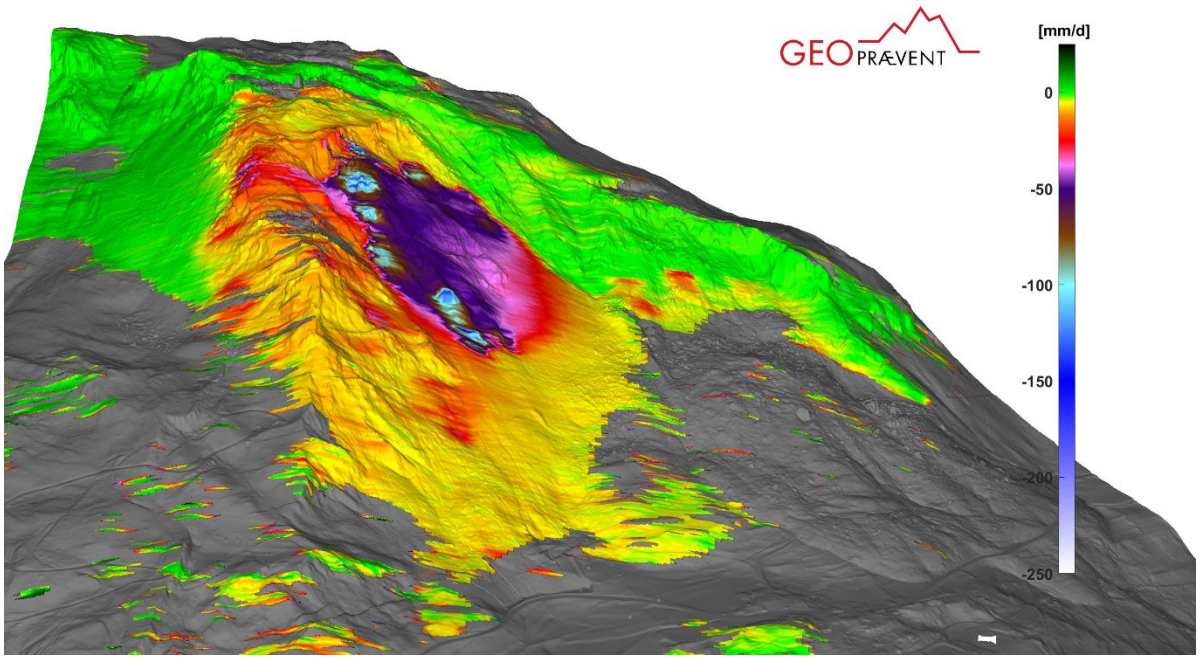

Abbildung 5. Interferometrische Radarmessungen vom 25. April 2023, 2 Monate vor dem Abbruch, kartiert auf einem digitalen Höhenmodell mit maximalen gemessenen Geschwindigkeiten von mehr als 200 mm pro Tag.

Deformationskamera

Zusätzlich zu den Radarsystemen installierte GEOPREVENT auch eine energieautarke Kamera auf dem Kamm an der Ostseite des Erdrutsches, um Verformungsdaten aus einem anderen Blickwinkel zu generieren. Deformationsmessungen, die auf der Korrelationsanalyse optischer Bilder basieren, haben ein hohes Potenzial für die Überwachung von Erdrutschen gezeigt (Travelleti et al. 2012). Das Kamerasystem nimmt alle 15 Minuten 42-Megapixel-Bilder mit hohem Dynamikbereich auf, und täglich wird eine Deformationsanalyse berechnet.

Die Ergebnisse dieser Bildanalyse, die einige Tage vor dem Abbruch aufgenommen wurden, sind in Abbildung 6 dargestellt, wobei die aktivste Zone des Erdrutsches gut zu erkennen ist. Die durchschnittlichen Verschiebungsraten in definierten Regionen von Interesse (ROIs) wurden bestimmt, und die Zeitreihen dieser Messungen, die in der Abbildung 6 dargestellt sind, veranschaulichen die Beschleunigungsphase, die zum Abbruch dieses Erdrutsches und dem anschliessenden Versagen führte.

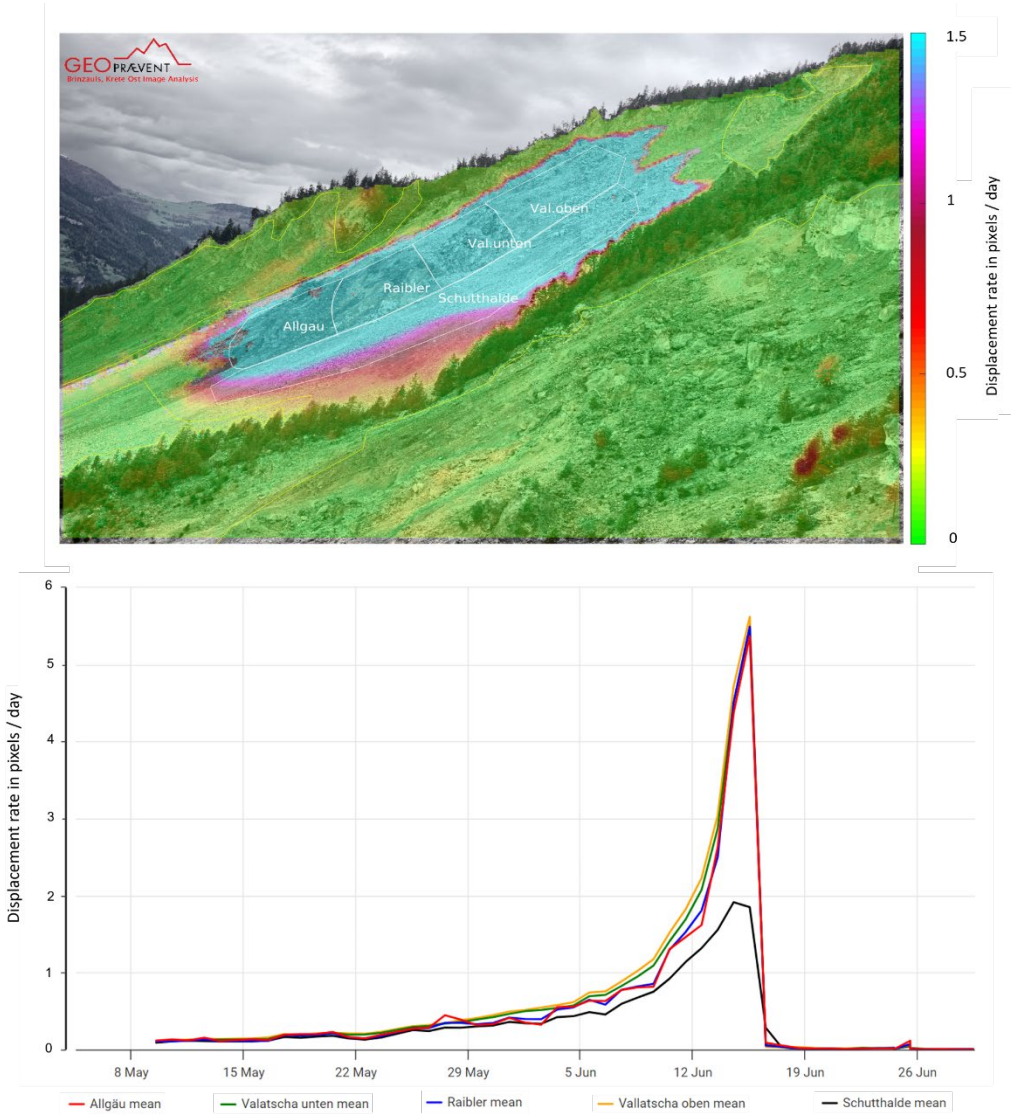

Abbildung 6. Verschiebungsfeld einige Tage vor dem Abbruch, wobei verschiedene ROIs definiert und weiss abgegrenzt sind und die Namen der ROIS in den entsprechenden Regionen angezeigt werden (oben). Zeitreihe der über 2 Monate gemittelten Verschiebung, gemessen in den verschiedenen ROIs (unten).

Fazit

Für die Überwachung des Bergsturzes wurden verschiedene Technologien eingesetzt.
In der Phase I wird ein auf der Doppler-Radar-Technologie basierendes Alarmsystem installiert, dass eine der Hauptzufahrtsstrassen zum Dorf automatisch sperrt. Innerhalb von

Sekunden sperrt das System die Strasse und ermöglicht es den Verkehrsteilnehmern, die gefährdete Strecke zu evakuieren und in Sicherheit zu bleiben. Seit der Installation des Systems im Jahr 2016 wurden mehr als 9500 Steinschlagereignisse erfasst. In der Phase II wird von GEOPREVENT ein bodengestütztes interferometrisches Radarsystem sowie eine Deformationskamera installiert, um die Beschleunigung des Erdrutsches zu überwachen, die zum Abbruch vom 15. Juni 2023 führte. Diese Technologien lieferten Erkenntnisse zur Überwachung der Situation, die zum Abbruch führte. Nach dem Abbruch nahmen die Bewegung und die Aktivität des Erdrutsches deutlich ab. Die mit der Interferometrie und der Deformationskamera gesammelten Daten haben den Frühwarndienst und die Behörden während des gesamten Prozesses wesentlich unterstützt, von der Entscheidung zur Evakuierung des Dorfes bis zur genauen Überwachung des Abbruches, bis sich die Situation stabilisierte und die Menschen in ihre Häuser zurückkehren konnten. Die gefährdete Strasse wurde durch das Ereignis vom 15. Juni 2023 verschüttet, aber das Radarsystem ist immer noch in Betrieb, um die Aktivität des Steinschlags zu überwachen.

Referenzen

Caduff R, Schlunegger F, Kos A & Wiesmann A (2015) A review of terrestrial radar interferometry for measuring surface change in the geosciences, Earth Surf. Process. Landforms, 40, pages 208– 228.

Gassner J, Wahlen S & Meier L (2022) Radarüberwachung von Massenbewegungen. *Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen* 173 (3), 124–129.

Geoprevent (2023) Monitoring systems for gravitative natural hazards, Technical Report, Geoprevent, Zurich

Gojcic Z, Schmid L & Wieser A (2021) Dense 3D displacement vector fields for point cloud-based landslide monitoring. *Landslides* 18, 3821–3832.

Guardian (2023) Huge landslide misses Swiss mountain village of Brienz 'by a hair'. Available at: https://www.theguardian.com/world/2023/jun/16/huge-landslide-misses-swiss-mountain-village-of-brienz-by-a-hair (Accessed: 20 July 2023).

Holub, M. and Hübl, J., 2008. Local protection against mountain hazards? state of the art and future needs. Natural Hazards and Earth System Sciences, 8(1), pp.81-99.

Hungr O, Leroueil S & Picarelli L (2014) The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11, 167–194.

Jacquemart M, Tobler D, Graf C & Meier L (2015) Advanced debris-flow monitoring and alarm system at Spreitgraben. *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 3: River Basins, Reservoir Sedimentation and Water Resources*. Springer International Publishing, pp. 59-62.

Jones N, Manconi A & Löw S (2022) Satellitenfernerkundung der räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Oberflächendeformationen. *Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen* 173 (3): 118–123.

Margreth S, Funk M, Tobler D, Dalban P, Meier L & Lauper J (2017) Analysis of the hazard caused by ice avalanches from the hanging glacier on the Eiger west face. *Cold Regions Science and Technology*, 144, 63-72.

Meier L, Jacquemart M, Blattmann B, Wyssen S, Arnold B & Funk M (2016) Radar-based warning and alarm systems for Alpine mass movements. *13th Congress Interpraevent 2016: living with natural risks*, 960-968. International Research Society INTERPRAEVENT

Meier L, Jacquemart M, Wahlen S & Blattmann (2017) Real-time rockfall detection with Doppler radars. *Proc. 6th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection,* pp. 1-4

Loew S, Hantz D & Gerber W (2022) Rockfall Causes and Transport Mechanisms – A Review (2022) *Treatise on Geomorphology.* J.F. Shroder (ed) Academic Press, pp. 137-168

Persson A, Venås M, Humstad T & and Meier L (2018) Real-time radar avalanche detection of a large detection zone for road safety in Norway. *Proceedings ISSW,* pp 597-600.

Stoffel, M., Schneuwly, D., Bollschweiler, M., Lievre, I., Delaloye, R., Myint, M. and Monbaron, M., 2005. Analyzing rockfall activity (1600–2002) in a protection forest—a case study using dendrogeomorphology. Geomorphology, 68(3-4), 224-241.

The Landslide Blog (2023) Summary of the 15 June 2023 Brienz/Brinzauls rockslide collapse in the Swiss Alps. Available at: https://blogs.agu.org/landslideblog/2023/06/21/brienz-brinzauls-rockslide/ (Accessed: 20 July 2023)

Travelletti J, Delacourt C, Allemand P, Malet JP, Schmittbuhl J, Toussaint R & Bastard M, 2012. Correlation of multi-temporal ground-based optical images for landslide monitoring: Application, potential and limitations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 70, pp.39-55.