

# Monitoring von gravitativen Massenbewegungen mittels terrestrischem Laserscanning und terrestrischer Radar-Interferometrie am Beispiel des Hüttschlag-Felssturzes

ERIK KUSCHEL<sup>1</sup>, ANNA SARA AMABILE<sup>2</sup>,  
WOLFGANG STRAKA<sup>3</sup>, GERALD VALENTIN<sup>5</sup>  
MARC OSTERMANN<sup>2</sup>, JOHANNES HÜBL<sup>4</sup>  
CHRISTIAN ZANGERL<sup>3</sup>

## Organisationen:

<sup>1</sup> Department für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich;

<sup>2</sup> Geologische Bundesanstalt, Abteilung Ingenieurgeologie, Wien, Österreich

<sup>3</sup> Institut für Angewandte Geologie, Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich;

<sup>4</sup> Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich;

<sup>5</sup> Landesgeologischer Dienst Salzburg, Salzburg, Österreich.

erik.kuschel@boku.ac.at, annasara.amabile@geologie.ac.at

## Abstract

Gravitative Massenbewegungen stellen, bedingt durch den steigenden Bedarf an Siedlungsraum und dem Klimawandel, zunehmend eine Bedrohung für Mensch und Infrastruktur in den Alpen dar. Das Langzeit-Monitoring von gravitativen Massenbewegungen ist jedoch oftmals schwierig, da die Installation von In-Situ-Messgeräten kostspielig und aufwendig ist. Für eine fundierte Gefahrenbeurteilung sind jedoch zeitlich und räumlich hochauflösende Daten erforderlich. Am Beispiel des Felssturzgebietes bei Hüttschlag (Salzburg) wird ein kombinierter Ansatz, bestehend aus terrestrischer Radarinterferometrie (GB-InSAR) und terrestrischem Laserscanning (TLS), getestet. 2019 ereigneten sich an einer ca. 100 m hohen Felswand bei Hüttschlag drei Felsstürze, wobei einzelne Blöcke mit Kubaturen

von bis zu ca. 200m<sup>3</sup> den Talboden erreichten. Das Untersuchungsgebiet liegt in den Bündnerschiefern, die in diesem Bereich aus Kalkglimmerschiefern, Grünschiefern und Kalkphylliten aufgebaut sind. Im Rahmen einer ersten Testphase wurde mittels terrestrischer Radarinterferometrie von November 2019 bis Mai 2020 die Felsflanke des Abbruchgebietes auf aktuelle Hangdeformationen untersucht und mit terrestrischen Laserscans, die in regelmäßigen Intervallen durchgeführt wurden, ergänzt. Im Zuge dieses Beitrages werden I) der Aufbau des Monitoringsystems; II) dessen Implementation als Monitoring und Frühwarnsystem für verschiedene gravitative Naturgefahren; III) Vor- und Nachteile des Messsystems; und IV) die vorläufigen Ergebnisse zum Felssturz in Hüttschlag präsentiert.

## Einleitung

Gravitative Massenbewegungen, wie Felsstürze, Steinschläge, Rutschungen und Muren sind natürlich auftretende Prozesse in alpinen Räumen, insbesondere in den tief eingeschnittenen alpinen Tälern. Durch den steigenden Bedarf an Siedlungsraum und die Veränderung durch den Klimawandel besonders im Hochgebirge, stellen diese Prozesse zunehmend eine Bedrohung für Mensch und Infrastruktur in den Alpen dar. Vermehrt werden modernen Methoden des Risikomanagements (Risikoanalyse, Risikobewertung und Risikosteuerung eingesetzt, um mit möglichst effizientem Aufwand ein annehmbares Maß an Sicherheit zu gewährleisten (Zangerl et al., 2008). Als Basis einer fundierten Risikoanalyse ist eine umfassende Gefahrenbeurteilung und Prozessanalyse durchzuführen, die neben anderen spatio-temporalen Daten besonders Deformationsmessungen mit einer adäquaten räumlichen und zeitlichen Auflösung benötigt. Das Langzeit-Monitoring und die Installation von Frühwarnsystemen im Bereich von extrem langsamen bis langsamen (mm bis wenige cm pro Jahr) gravitativen Massenbewegungen, gestaltet sich jedoch oftmals schwierig, da i) die Installation von In-Situ-Messgeräten oder geologischen Untergrunderkundungen zu gefährlich oder kostspielig sind und ii) etablierte Fernerkundungsmethoden nicht die notwendige Messgenauigkeit oder räumliche Auflösung besitzen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde daher für die Messung der andauernden Deformationen im Absturzgebiet

des Hüttschlag-Felssturzes ein Messsystem basierend auf i) terrestrischem Laserscanning (TLS) und ii) terrestrischer Radarinterferometrie (Gb-InSAR) installiert. In diesem Beitrag werden i) der Aufbau des Messsystems; II) der potenzielle Einsatz als Frühwarnsystem für Felsstürze; III) die Vor- und Nachteile des Messsystems; und IV) die vorläufigen Ergebnisse dieser Analysen präsentiert.

## Der Hüttschlag-Felssturz

Das Untersuchungsgebiet befindet sich auf der orographisch rechten Flanke des Großarltales in der Gemeinde Hüttschlag (Karteis, Salzburg) (Abbildung 1). Hier ereigneten sich 2019 an einer ca. 100 m hohen Felswand drei Felsstürze, welche sich jeweils durch Steinschläge ankündigten. Bei den Felsstürzen selbst lösten sich Einzelblöcke, die teilweise ein Volumen von mehr als 200 m<sup>3</sup> aufwiesen, einige erreichten den Talboden (Abbildung 2), wobei Siedlungsgebiet und Infrastruktur (Straße, Radweg) jedoch nicht beschädigt wurden.

Geologisch betrachtet liegt das Untersuchungsgebiet in den Bündnerschiefern, die in diesem Bereich aus Kalkglimmerschiefern, Grünschiefern und Kalkphylliten aufgebaut sind (Exner, 1956). Die Schieferung fällt flach bis mittelsteil Richtung Norden ein. Zusätzlich finden sich im Abbruchgebiet markant ausgeprägte Kluftsysteme mit großer Erstreckung, die maßgeblich die Entstehung des Felssturzes und die Kluftkörper beeinflussten. Im Zuge einer Befliegung am 23.07.2019 stellte der Landesgeologische Dienst des Landes Salzburgs, anhand von frischen



Abbildung 1: Felssturz bei Hüttschlag am 17. Juni 2020.



Abbildung 2: Einzelblöcke mit einem Volumen von über 200 m<sup>3</sup> erreichten den Talboden während der Felssturzereignisse.

und bis zu 1 m breiten Zerrspalten im Ablösebereich fest, dass sich ein weiterer Teilbereich der Felsflanke stark aufgelockert hat und empfahl die Installation eines geeigneten Monitoringsystems (Valentin, 2019).

## Das Monitoringsystem

Nach den drei Felssturzereignissen wurde 2019 mit einer intensiven messtechnischen Überwachung der Felsflanke und der abgelagerten Felssturzmasse am Hangfuß begonnen. Hierfür wurden im Rahmen einer ersten Testphase ein terrestrisches Radarinterferometer (LI-SALab; Ellegri Ltd.) von November 2019 bis Mai 2020 installiert. Die Messungen wurden im Ku Frequenzbereich (central frequency: 17.2 GHz; wavelength: 17.44 mm) mit einer synthetischen Aperatur von bis zu 2.8 m durchgeführt. Das Radarsystem wurde in Hüttschlag als Echtzeit-Monitoringsystem (C-Gb-InSAR) und Frühwarnsystem, mit einer Messfrequenz von 10 Minuten betrieben, wodurch Bewegungen von wenigen mm bis m pro Tag in Blickrichtung (line of sight) erfasst werden konnten (siehe auch Casagli et al., 2010; Monserrat et al., 2014). Zusätzlich wurde die Massenbewegung mittels multi-temporalen terrestrischen Laserscanning (RIEGL VZ-4000) in regelmäßigen Abständen mit hoher Punktdichte vermessen.

Die Kombination von GB-InSAR und TLS wurde gewählt, da multi-temporales terrestrisches Laserscanning sich als kosteneffiziente Fernerkundungsmethode für das Monitoring von gravitativen Massenbewegungen etabliert hat (Jaboyedoff et al. 2012; Abellan et al. 2014). Dieses ermöglicht die Generierung hochgenauer digitaler Geländemodelle mittels 3D-Punktwolken und die multi-temporale Quantifizierung von Veränderungen der Geländeoberfläche. TLS ist jedoch nur bedingt für das kontinuierliche flächenhafte Deformationsmonitoring und als Warnsystem für sehr langsame bis langsame (mm bis wenige cm pro Jahr) Felsbewegungen geeignet. Die Messgenauigkeit von TLS-Punktwolken ist abhängig von der Messdistanz, der Oberflächenrauigkeit und dem Messwinkel. Dadurch können unter Feldbedingungen in alpinen

Einsatzgebieten nur LODs (Level of Detection) von mehreren cm bis dm erreicht werden (Fey et al., 2017). Daher wird TLS häufig mit anderen Verfahren der Fernerkundung oder der Vermessung (z.B. satellitengestütztes InSAR, GNSS, Tachymetrie) kombiniert eingesetzt.

Die terrestrische Radarinterferometrie hingegen ermöglicht eine kontinuierliche Deformationsmessung in vordefinierten Zeitintervallen, wobei theoretisch Messreichweiten von über vier Kilometern mit Messgenauigkeiten im sub-millimeter Bereich erreicht werden können (Abbildung 3). GB-InSAR-Systeme können auch zur Überwachung von Hängen und Felswänden eingesetzt werden, für welche andere Systeme (z.B. ALS, satellitengestütztes InSAR) nur bedingt oder keine Daten liefern können (Monserrat et al., 2014; Tarchi et al., 2003). Die terrestrische Radarinterferometrie erlaubt daher ein Echtzeit-Monitoring von gravitativen Massenbewegungen in steilen Felsflanken mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung. Durch die Implementierung der TLS-Punktwolken wurden die zweidimensionalen GB-InSAR Deformationsmessungen auf ein dreidimensionales Geländemodell projiziert. Zusätzlich wurde im Talboden ein automatisches Kamerasystem installiert, um Steinschlag- und Felssturzereignisse optisch zu dokumentieren.

### Die Terrestrischen Laserscans

Die Erfassung des gesamten Felssturzabbruchgebietes und der Steinschlagereignisse ab dem 27.11.2019 erfolgte auf Basis der multi-temporalen terrestrischen Laserscans und der verfügbaren ALS-Punktwolke (Airborne Laser Scanning) von 2018. Die Registrierung und Georeferenzierung der TLS-Punktwolke erfolgte mittels ICP-Algorithmen (Iterative Closest Point), welche diese, über korrespondierende Flächen, auf die bestehende georeferenzierte ALS-Punktwolke registrierte. Für diese Berechnungen wurden Oberflächen, die potenziell durch Verschiebungen beeinflusst sind (z.B. Blockschuttkegel, Felssturzabbruchfläche, baulich veränderte Flächen) nicht berücksichtigt. Alle weiteren TLS-Punktwolken wurden analog auf die georeferenzierte TLS-Punktwolke registriert. Die Berechnung der Oberflächen

veränderungen erfolgte mittels der Geomorphic Change Detection Software (Wheaton, 2008; Wheaton et al., 2009). Aus den digitalen Höhenmodellen der ALS und TLS Messungen konnte ein Felssturzvolumen (alle 3 Ereignisse zusammen) von ca. 41000 m<sup>3</sup> berechnet werden (Abbildung 4).

### Die Terrestrische Radarinterferometrie

Die Verschiebungen, die durch die Felsstürze, freigelegten Abbruchfläche und des Blockschuttkegels wurde mittels GB-InSAR untersucht (Abbildung 5). Hierfür wurden aus jeweils zwei SAR-Bildern ein Interferogramm berechnet mit dem, durch »Phase-Unwrapping«, die Verschiebungen in LOS berechnet wurden (Agliardi et al., 2013). Um den Einfluss von atmosphärischen und anthropogenen Störfaktoren zu minimieren, wurde für die Berechnung der Verschiebungsraten der 24h-Mittelwert aller SAR-Messungen verwendet (Abbildung 4). Aufgrund unterschiedlich hoher Bewegungsraten der Felsflanke und des Blockschuttkegels war eine getrennte Auswertung nötig. Die lokalen 2D-Radardaten wurden auf Basis der TLS-Punktwolken in 3D-Daten trans-

formiert. Dies ermöglicht die Projektion der GB-InSAR-Daten auf Fotos (Abbildung 5) und einen Vergleich der Verschiebungen mit den TLS-Messungen. Hierbei zeigte sich, dass die GB-InSAR-Messungen die absoluten Verschiebungen im Vergleich zu den TLS-Daten unterschätzen, zumal die Radarinterferometrie nur Bewegungen in Blickrichtung (LOS) detektieren kann.

Die hohe Messgenauigkeit und -frequenz von GB-InSAR-Systemen ermöglicht das Deformationsverhalten von Massenbewegungen, wie den Felssturz von Hüttschlag, im Detail zu studieren. Ziel dabei ist i) instabile Bereiche zu lokalisieren, ii) Beschleunigungen zuverlässig und frühzeitig zu erkennen, iii) den Einfluss von verschiedenen Faktoren (z.B. Niederschlag, Schneeschmelze, Temperatur etc.) auf das Bewegungsverhalten zu untersuchen, und iv) wenn vorhanden, zyklische Deformationen (z.B. thermische Kontraktion und Expansion) messtechnisch zu erfassen. Eine detaillierte Auswertung hinsichtlich der Kinematik und dem zeitlich-variablen Deformationsverhalten der Felsflanke ist noch ausständig.

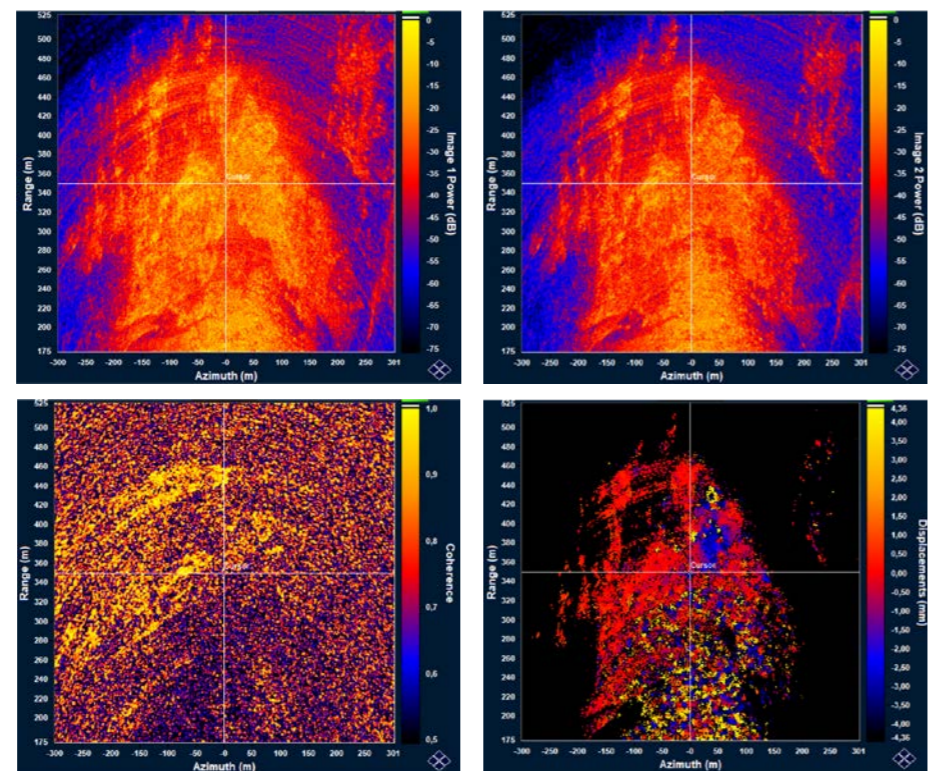


Abbildung 3: GB-InSAR Messdaten: A) InSAR-Bild der Amplitude (24-Mittelwert) vom 30.11.2019; B) InSAR-Bild der Amplitude (24-Mittelwert) vom 23.02.2020; C) Kohärenz zwischen zwei SAR-Bildern vom 30.11.2019 und 23.02.2020; D) Radar-Interferogramm mit der Deformation im Zeitraum 30.11.2019 - 23.02.2020 in Blickrichtung (LOS) in mm.

### Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Kombination von terrestrischer Radarinterferometrie und terrestrischem Laserscanning als Beispiel eines modernen Monitoring- und Frühwarnsystems zur Untersuchung von Massenbewegungen vorgestellt. Der kombinierte Versuchsaufbau ermöglichte ein hochgenaues und flächenhaftes (2D/3D) Monitoring von unterschiedlichen Prozessen (Deformationsverhalten einer instabilen Felsflanke, Steinschlagfrequenz und Intensität; Kriechverhalten des Schuttkegels) welches durch den Einsatz von klassischen Monitoringsystemen (Tachymetrie, GNSS, Extensometer) nicht möglich ist. Die Schwächen der einzelnen Methoden, wie die geringere

Messgenauigkeit von TLS können durch den Einsatz von GB-InSAR-Systemen ausgeglichen werden. Das vorgestellte System bietet die Möglichkeit, geologische Naturgefahren, wie den Hüttschlag-Felssturz, mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung zu untersuchen und ermöglicht dadurch das Prozessverständnis zu erhöhen und eine fundierte Gefahrenbeurteilung durchzuführen.

### Danksagung

Wir möchten der Gemeinde Hüttschlag und dem Geologischen Dienst des Landes Salzburg für die Unterstützung zu diesem Projekt danken.

### Literaturverzeichnis

Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N. J., Lim, M., & Lato, M. J. (2014): Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth surface processes and landforms*, 39(1), 80-97.

Agliardi, F., Crosta, G. B., Meloni, F., Valle, C., & Rivolta, C. (2013) Structurally-controlled instability, damage and slope failure in a porphyry rock mass. *Tectonophysics*, 605, 34-47.

Casagli, N., Farina, P., Leva, D., Nico, G., & Tarchi, D. (2003): Ground-based SAR interferometry as a tool for landslide monitoring during emergencies. In *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477) (Vol. 4, pp. 2924-2926)*. IEEE Exner, C. (1957): Erläuterungen zur Geologischen Karte der Umgebung von Gastein 1: 50.000: (Ausgabe 1956). Geologische Bundesanstalt.

Fey, C., & Wichmann, V. (2017): Longrange terrestrial laser scanning for geomorphological change detection in alpine terrain—handling uncertainties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(5), 789-802.

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M. H., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A. (2012): Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural hazards*, 61(1), 5-28.

Monserrat, O., Crosetto, M., & Luzi, G. (2014): A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93, 40-48.

Tarchi, D., Casagli, N., Moretti, S., Leva, D., & Sieber, A. J. (2003): Monitoring landslide displacements by using groundbased synthetic aperture radar interferometry: Application to the Ruinon landslide in the Italian Alps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8).

Valentin G. (2019): Stellungnahmen Felssturz in Karteis, Simulation möglicher Szenarien, Gemeinde Hüttschlag (26.09.2019). Landesgeologischer Dienst, Land Salzburg (unveröffentlichte Stellungnahme).

Wheaton J, Brasington J, & Darby S, Sear D. (2009): Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*. 35. 136 - 156. 10.1002/esp.1886.

Wheaton JM. (2008): Uncertainty in morphological sediment budgeting of rivers. Unpublished PhD, University of Southampton, Southampton, 412 pp. Available at: <http://www.joewheaton.org/Home/research/projects-1/phdthesis>

Zangerl, C., Prager, C., Brandner, R., Brückl, E., Eder, S., Fellin, W., Tentschert E., Poscher G. & Schönlaub, H. (2008): Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. *Geo. Alp*, 5, 1-51.

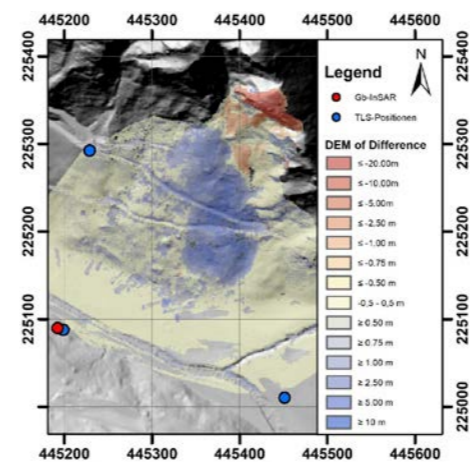


Abbildung 4: Oberflächenveränderung durch den Felssturz auf Basis des ALS-2018 und TLS-2020 mit TLS-Scanpositionen und GB-InSAR-Standort.

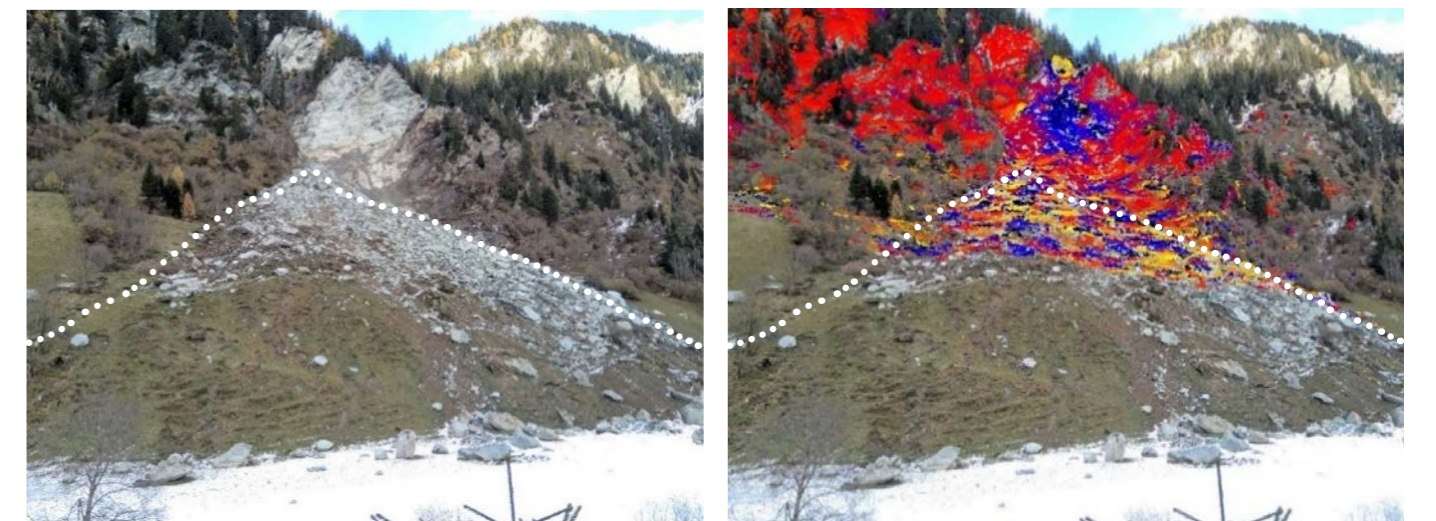


Abbildung 5: A) Foto des Hüttschlag-Felssturzes betrachtet vom Standort des GB-InSAR-Systems am 30.11.2019; B) Deformation in Blickrichtung (LOS) für den Zeitraum 27.11.2019 - 13.02.2020 in mm, projiziert auf das Foto. Die Messungen im Bereich des Blockschuttkegels sind nicht repräsentativ, da die Bewegungen innerhalb der Messperiode zu schnell waren.