

Ferndetektion von Felsstürzen in den Ostalpen

Remote Detection of Rockfalls in the Eastern Alps



Wolfgang Lenhardt, Maria-Theresia Apoloner, Helmut Hausmann und Alexandra Haberler, Wien

Kurzfassung

Immer öfter werden Felsstürze in den Ostalpen vom Österreichischen Erdbebendienst aufgezeichnet. Größere Felsstürze und Bergstürze können häufig über große Distanzen (> 100 km) registriert werden, da die heutigen Messgeräte wesentlich empfindlicher sind als jene vor 30 Jahren. Auch sind heute bedeutend mehr seismische Beobachtungsstationen im Einsatz. Basierend darauf nimmt die Anzahl der erfassten Felsstürze laufend zu. Inwieweit diese Zunahme auf den Anstieg der Jahresmitteltemperatur und dem Auftauen des Permafrostes in hochalpinen Lagen zurückzuführen ist, oder auf die Verdichtung des Beobachtungsmessnetzes, lässt sich derzeit noch nicht beantworten. Jedenfalls dient die sofortige Detektion von Felsstürzen der Sicherheit des alpinen Tourismus sowie der Unterstützung von Such- und Bergungsmaßnahmen.

Schlüsselwörter: Seismische Aufzeichnungen, Felsstürze, Statistik, Gefährdung

Abstract

Instrumental recordings of landslides or rockfalls became abundant during the recent past. Massive rockfalls or mountain slides are now recorded across vast distances – that is 100's of km away from the source. Hence, the number of recordings has heavily increased – which is mainly related to the improved density of seismic stations in the Eastern Alps and their sensitivity. Whether or not this observed increase can be linked to the retreat of permafrost remains to be investigated. However, rapid detection of such incidents may assist in search- and rescue operations and safeguarding hiking trails.

Keywords: Seismic recordings, rockfalls, statistics, hazard

1. Einleitung

Unter gravitativen Massenbewegungen versteht man hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Locker- und/oder Festgesteinsmassen aufgrund der Wirkung der Schwerkraft. Unter Bezugnahme auf die zugrundeliegenden Prozesse und die auslösenden Vorgänge ergeben sich unterschiedliche Klassifizierungsmöglichkeiten. Die in dieser Arbeit verwendete Einteilung stützt sich im Wesentlichen auf die auf Varnes (1978) und Cruden & Varnes (1996) zurückgehende prozessorientierte Klassifikation, welche nach dem bewegten Material (Locker- oder Festgestein) sowie dem Bewegungsablauf (Fallen, Kippen, Gleiten/Rutschen, Fließen, Driften) differenzieren. Der Einfachheit halber beschränkt sich hier die Differenzierung auf die Prozessgruppen Fließen (z.B. Hangmuren) und Gleiten/Rutschen (z.B. Hangrutschungen, Felsgleitungen) einerseits und die Prozessgruppe Stürzen (z.B. Felsstürze, Bergstürze) andererseits. Zu beachten ist, dass Felsstürze und Bergstürze in erster Linie aufgrund des involvierten Volumens

unterschieden werden. Erst bei Kubaturen von mehr als $1.000.000 \text{ m}^3$ – und einer Flächenausdehnung von mindestens 10 ha – spricht man nach Abele (1974) von Bergstürzen.

Als initialer Auslöser von Hangrutschungen oder Hangmuren spielt vielfach das Wasser (in Form von Regen oder Schnee) eine maßgebliche Rolle, wohingegen bei Sturzprozessen darüber hinaus markante jahres- wie tageszeitliche Temperaturunterschiede des Gesteins und der Frost-Tau-Wechsel eine wesentliche Komponente darstellen. Aber auch Erdbeben können solche „gravitativen Massenbewegungen“ auslösen (Harp & Wilson, 1995).

Plötzliche Hangbewegungen in Form von Felsgleitungen, Felsstürzen und erst recht Bergstürzen, können nicht nur die touristische Nutzung eines Gebietes beeinträchtigen, sondern vermögen auch Gebäude, Verkehrswege, das Leitungsnetz wie auch andere technische Einrichtungen und Bauwerke zu gefährden. Ein beredtes Beispiel hierfür ist die Katastrophe von Longarone im itali-

enischen Piavetal. Im Zuge der Füllung des Stausees Vajont war eine Gleitfläche an der Bergflanke des Monte Toc aktiviert worden, woraufhin in den Nachtstunden des 9. Oktober 1963 hunderte Millionen Kubikmeter Gestein in den Stauraum abglitten und eine Flutwelle auslösten, der ca. 2000 Menschen zum Opfer fielen (Barla & Paronuzzi, 2013).

Oft sind solche Ereignisse selbst aus größerer Entfernung – manchmal bis 200 km – von Erdbebenbeobachtungsstationen registrierbar. Dies ermöglicht binnen kürzester Zeit das Geschehen einzuschätzen und ggf. Rettungs- und Sicherungsmaßnahmen einzuleiten. Weiters lässt sich so die aus einem einzigen Abbruch oder einer Sequenz von unmittelbar aufeinanderfolgenden Abbrüchen bestehende Felssturzaktivität mit dem exakten Zeitpunkt dokumentieren. Dies ist speziell dann von Bedeutung, wenn das Ereignis unbeobachtet, weil beispielsweise in der Nacht und erst recht in siedlungsfernen Regionen, stattgefunden hat oder wenn es durch die Landesgeologie zu einer raschen Befundung der Abbruchstelle kommen soll.

2. Beobachtungen

Bereits in den 1970er Jahren befasste man sich ausführlich mit den Auswirkungen von Massenbewegungen im Sinne von Prozessgeschwindigkeiten (Scheidegger, 1973) als auch von deren Reichweite (Scheidegger, 1973; Tianchi, 1983; Evans & Hungr, 1993). Mit der Verfügbarkeit hochsensibler und digitaler seismischer Messgeräte sowie der zunehmenden digitalen Fotodokumentation hat eine neue Ära für die Erfassung von Massenbewegungen begonnen, insbesondere während der Verfügbarkeit einer Vielzahl an temporär installierten Stationen im Zuge von AlpArray (Fuchs, 2018a, 2018b).

Einer der ersten seismisch sehr gut dokumentierten Felsstürze ereignete sich am 12. Oktober 2007 um 09:39 Uhr Ortszeit am Einserkofel in den Sextener Dolomiten in Südtirol (Abbildung 1). Es bildete sich dabei eine dichte Staubwolke, die das gesamte Fischleintal erfüllte, jedoch Menschen verschonte. Trotzdem das Sturzvolumen nur ca. 60.000 m³ betrug, konnte das Ereignis noch in einer Distanz von 200 km von Messstationen des Österreichischen Erdbebendienstes erfasst



Abb. 1: Felssturz vom Einserkofel bei Sexten in Südtirol am 12. Oktober 2007. Foto: Dr. Jürgen Leikert

werden. Die sogleich erfolgte Lokalisierung wies mit 1 km-Genauigkeit auf den Einserkofel hin. Aus der Registrierung wurde dann eine Pseudo-Magnitude von 2,0 bestimmt. Der Terminus „Pseudo-Magnitude“ wird deshalb verwendet, weil es sich im engeren Sinn nicht um die klassische Magnitude eines tektonischen Erdbebens handelt (Richter, 1935), sondern um eine Maßzahl für die Dimension eines anders gearteten Verformungsprozesses. Zum besseren Verständnis und zur leichteren Vergleichbarkeit ordnet man ihr jedoch eine „Magnitude“ zu, so, als hätte es sich um ein tektonisches Erdbeben gehandelt.

Am 20. Juli 2011 kam es an derselben Stelle übrigens zu einem weiteren Felssturz. Die Kubatur betrug dabei laut Wikipedia aber lediglich 500 m³ (Einserkofel, 2022).

Als weiteres Beispiel dient der Felssturz bei Mellau (Vorarlberg) am 12. Februar 2018 um 21:02 Uhr Ortszeit. Er wies die Pseudo-Magnitude 0,6 auf. Die Aufzeichnung dieses Ereignisses (Abbildung 2) wurde ausgewählt, weil es das typische Seismogramm eines Felssturzes zeigt. Der Ersteinsatz ist undeutlich, das Signal „baut“ sich dann langsam auf, um danach wieder abzufallen. Das Signal ist also fast symmetrisch – und damit völlig untypisch für ein klassisches Erdbeben. Bei einem Erdbeben würde man den Ersteinsatz deutlich sehen. Diesem würde dann ein dominanter sekundärer Einsatz (Scherwelle) folgen. Aus der Zeitdifferenz könnte man anschließend die Entfernung vom Hypozentrum ableiten. Diese Signalstruktur fehlt hier völlig. Außerdem ist der dominante Anteil der Schwingungsfrequenz viel zu niedrig.

Oft wird eine gravitative Massenbewegung aber auch gar nicht registriert; wie z.B. am 4. Juli 2022. Am Nachmittag jenes Tages ereignete sich in der Iselschlucht bei Virgen, westlich von Matrei in Osttirol ein größerer Felssturz mit einer Kubatur von ca. 20.000 m³ (Iselschlucht, 2022). Obwohl die nächstliegende Erdbebenstation bei Abfallers-

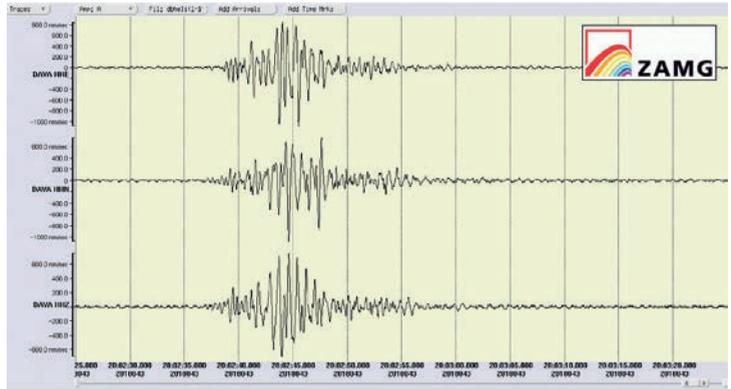


Abb. 2: Registrierung des Felssturzes bei Mellau (Vorarlberg) an der 8 km entfernten Station in Damüls

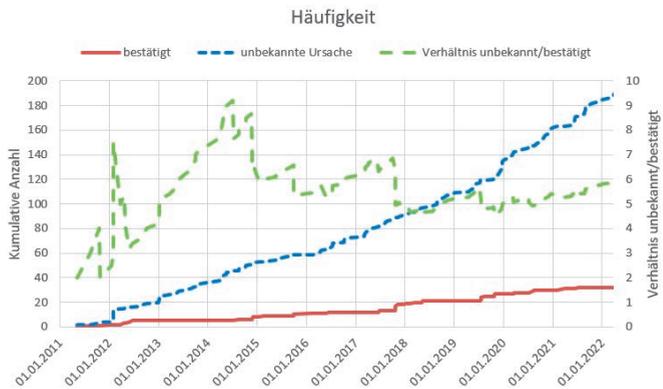


Abb. 3: Kumulative Anzahl von seismisch aufgezeichneten Massenbewegungen im Vergleich zu den Erschütterungsaufzeichnungen unbekannter Quellen. Die sekundäre Y-Achse zeigt das Verhältnis von unbekanntem zu bestätigten Felsstürzen.

bach im Drautal weniger als 30 km entfernt ist, waren dort keine auffälligen Erschütterungssignale erkennbar. Sichtlich war das Sturzvolumen zu gering oder der Sturzstrom zu langsam.

Damit stellt sich die Frage: Kam es zu einer Zunahme in den letzten Jahren? In Abbildung 3 ist die kumulative (!) Anzahl der seismischen Aufzeichnungen von Felsstürzen dargestellt. Da der kumulative Häufigkeitsverlauf nahezu linear verläuft, scheint kein rezenter Anstieg von Felsstürzen der Fall zu sein. Die Sprünge in den gezeigten Kurven sind hauptsächlich auf Verdichtungen des seismischen Erfassungsnetzes zurückzuführen. Das Verhältnis unbekannter Erschütterungsursachen zu bestätigten Felsstürzen ist grün strichliert dargestellt. Es variiert zwischen 2 und 9 mit einem Mittelwert von 5,56. Als Ursache werden hauptsächlich anthropogene Störungen (z.B. entfernte Sprengungen) vermutet.

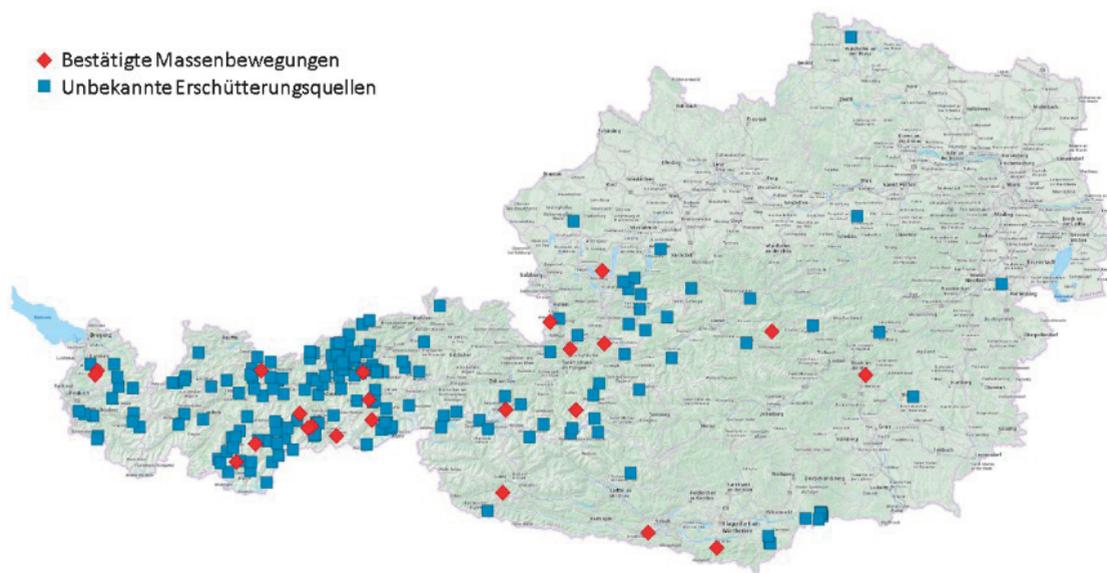


Abb. 4: Anzahl von seismisch aufgezeichneten und bestätigten Massenbewegungen (rot) im Vergleich zu den Erschütterungsaufzeichnungen unbekannter Quellen (blau)

In Abbildung 4 ist die räumliche Verteilung bestätigter Felsstürze (rot) und jene der unbekannteren Erschütterungsquellen (blau) dargestellt. Letztere konzentrieren sich hauptsächlich um Bereiche bestätigter Felsstürze. Es könnte also sein, dass es sich – wenigstens teilweise – um ferndetektiertere Massenbewegungen handelt. Anders besehen ist das Messnetz im Bereich bestätigter Felsstürze – vor allem in Tirol – relativ dicht.

3. Interpretation

Mit der Dynamik von Fels- und Bergstürzen haben sich bereits viele Autoren befasst (z.B. Erismann & Abele, 2001). Dazu zählt auch die Auslösung von Bergstürzen durch Erdbeben (u.a. Voigt & Pariseau, 1978; Keefer, 1984; Harp & Wilson, 1995; Brückl et al., 2015).

Darauf basierend wurden auch das Erdbeben 1348 (Hammerl, 1992), welches sich höchstwahrscheinlich im Friaul (Italien) ereignete, und der Bergsturz vom Dobratsch im Bundesland Kärnten (Till, 1907, Brandt, 1981) in Relation gesetzt. Dabei zeigte sich, dass ein Epizentrum in Friaul gerechtfertigterweise anzunehmen ist, somit der Terminus „Villacher Erdbeben 1348“ seit 1992 überholt erscheint. Jedenfalls hat das Erdbeben nicht nur mehrere Bergstürze im Gailtal hervorgerufen, sondern auch Angst und Schrecken, denn die Gesteinsmassen dürften mit einer Geschwindigkeit von bis zu 200 km/h ins Tal abgefahren

sein. Der ganze Prozess könnte nahezu zwei Minuten gedauert haben (Lenhardt, 2007).

Was das 21. Jahrhundert betrifft, so führt der fortschreitende Klimawandel sichtlich zu einem Rückgang des Permafrosts und somit zu einer erhöhten Steinschlaggefahr, was vorrangig alpinen Vereinen, anderen Weegerhaltern (z.B. Gemeinden) sowie Hochalpinisten Sorge bereitet. Noch umfangreichere mediale Aufmerksamkeit erlangen besonders große bzw. mit erheblichem Schadensausmaß einhergehende gravitative Massenbewegungen, wie zum Beispiel der Bergsturz an der Nordflanke des Piz Cengalo (Cengalo, 2011) in den Bergeller Alpen im Kanton Graubünden an der Grenze der Schweiz zu Italien. Nachdem bereits am Abend des 27. Dezember 2011 an die zwei Millionen Kubikmeter Gestein in das hintere Val Bondasca gestürzt und im Jahr darauf Murgänge erst knapp vor dem Ort Bondo zum Stillstand gekommen waren, ereignete sich in den Vormittagsstunden des 23. August 2017 einer der größten Bergstürze der letzten Jahrzehnte in Graubünden. Dabei lösten sich rund drei Millionen m³ Gestein von der Flanke des Piz Cengalo und stürzten 1.500 Höhenmeter ins Bondascatal, was unmittelbar einen gewaltigen Murgang auslöste und Schäden im Ort Bondo verursachte. Dieses Ereignis wurde auch in Österreich mit einer Pseudo-Magnitude von 2,7 an den Bebenstationen registriert.

28	04.08.2012	11:23:00	Puitkogel (Nordflanke)/Hohe Geige (Ötztal Alpen)	http://www.youtube.com/watch?v=7UvQ2brlHR4	nur ungefähre Uhrzeit
29	24.08.2012		Vorderes Alpbjohr oberhalb Drischlsteig (Gde. Imst)	http://www.geoforum-umhausen.at/aktuelles2013/Tagungsband_2013.pdf	zwischen 20:00 und 21:00 Uhr
30	10.09.2012	7:35:00	NO-Grat des Kellersberges in der Glocknergruppe (Abbruchrisse in ca. 2760-2800 m SH)	http://www.youtube.com/watch?v=io2GwoCIWGs	Nachstürze
31	23.10.2012		Schattseite (Gde. Hopfgarten in Deferegggen)	http://www.osttirol-heute.at/videos/video/latest/felssturz-hopfgarten-i-d	gegen 08:30 Uhr
32	07.11.2012		Westflanke der Blässe am Vilsalpssee (Gde. Tannheim)	http://www.meinbezirk.at/reutte/chronik/meisger-felssturz-am-vilsalpssee-0397625	gegen 21:00 Uhr
33	25.11.2012	11:29:04	Nenninger Himmel		1,0
34	29.04.2013		Ingelsberg, Gde. Bad Hofgastein	http://www.slomove.eu/de/news.asp?aktuelles_action=3000&aktuelles_image_id=7	Sturzereignisse auch ab 21.07.2012, im Juni 2010, 2
35	13.05.2013	23:38:00	oberhalb der Schildalmgalerie an der Felbertauernstraße (Gde. Matri in Osttirol)	http://www.geoforum-umhausen.at/aktuelles2013/Tagungsband_2013.pdf	
36	24.07.2013		Hohe Warte - NO-Flanke (Gde. Vals)	http://tirol.orf.at/news/stories/259495/	am Nachmittag
37	10.07.2014		umweit der Tappenkalm (Gde. Kleinarl)	http://salzburg.orf.at/news/stories/2657033/	
38	13.07.2014	9:34:21	Lienz Dolomiten		0,4
39	27.08.2014		Großes Fleißtal (Gde. Heiligenblut)	https://www.youtube.com/watch?v=YN1YEDHoo	Datum unsicher
40	24.05.2015	19:45:00	Pletzackkogel (Gde. Kramsach)	http://www.kramsach.at/system/web/GeoDocument.ashx?fileid=954974	Uhrzeit nicht auf die Minute genau
41	16.11.2014		Rabenstein im Passeiertal (Südtirol)	https://www.youtube.com/watch?v=Sj2xqKJdJaw	
42	24.11.2014	16:27:20	Trins		1,5
43	25.11.2014	2:48:39	Neustift im Stubaital		0,7
44	16.01.2015	19:22:50	Fürnitz		1,0
45	16.01.2015	19:23:00	Rote Wand am Dobratsch	http://www.kleinezeitung.at/kr/kaernten/villach/4652325/DOBRTATSCH-Eine-Steinernen-Spur-der-Verwüstung	
46	30.09.2015	20:30:18	Schwarz		0,0
47	30.09.2015		Eiblschrofen (Gde. Schwarz)	https://www.tirol.gv.at/meldungen/meldung/artikel/ersteinsetzung-der-landesgeologie-keine-gefahr-fuer-siedlungsraum/	
48	02.10.2015	15:58:56	Sölden		1,2
49	02.10.2015		Schartlaskogel (Ötztal Alpen)	https://www.tt.com/panorama/natur/10657382-91/%C3%96stztaler-felssturz-kam-einem-erdbeben-gleich.cssp	

Abb. 5: Beispiel aus der Datenbank der ehemaligen Geologischen Bundesanstalt (GBA). In „rot“ bestätigte seismische Aufzeichnungen.

Ein Felssturz im Pöllestal bei Sölden (Pöllestal, 2015) am 2. Oktober 2015 mit einem Sturzvolumen von 200.000 m³ führte hingegen lediglich zu einer Pseudo-Magnitudo von 1,2. Im Vergleich dazu betrug die Pseudo-Magnitudo vom bereits erwähnten Einserkofel 2,0 bei einem Sturzvolumen von ca. 60.000 m³. Man sieht also, dass man aus der Pseudo-Magnitudo das Sturzvolumen nicht allein abschätzen kann. Darauf wies u.a. Fuchs et al. (2018a & 2018b) im Detail hin. Das mag enttäuschend sein, deutet aber auf das komplexe Prozessgeschehen bei gravitativen Massenbewegungen hin. Es bedarf folglich zusätzlicher Information und zum anderen exzellenter Simulationsprogramme, die möglichst viele Einflussgrößen – wie lokale Änderungen der geomechanischen Oberflächenrauigkeit (z.B. durch Sturzströme oder Murenablagerungen) – berücksichtigen können. Eine Alternative bietet Manconi et al. (2016) an, nämlich die Verwendung der in Italien gängigen Duration-Magnitudo, welche die Länge der seismischen Aufzeichnung oberhalb einer bestimmten Aufzeichnungsgrenze berücksichtigt. Die erwähnten Autoren fanden, dass ein „ML/MD“ (Verhältnis der lokalen Magnitudo zur „Duration Magnitudo“) von weniger als 0,8 zu einer guten Unterscheidung zwischen tektonischen Erdbeben und gravitativen Massenbewegungen führt. Weil die „MD“ in Österreich keine Anwendung findet – da sie nicht der Definition lt. Richter (1935) entspricht – sind solche Vergleiche noch ausständig.

Das Detektionslimit von Fels- und Bergstürzen hängt vom Felssturzvolumen, der Prozess- bzw. Fließgeschwindigkeit, der Topografie und der Stationsdichte ab. Ein genaues Limit ist daher situationsbedingt und lokal sehr unterschiedlich. Wichtig erscheinen Abgleiche mit Beobachtungen vor Ort. Deshalb stand der Erdbediendienst auch seit vielen Jahren laufend im Austausch mit der Geologischen Bundesanstalt (Abbildung 5).

Als initiale Auslöser der gravitativen Massenbewegungen bieten sich in erster Linie meteorologische Randbedingungen wie die Niederschlagsintensität (s.a. Krautblatter & Moser, 2009) oder die Saisonalität (s.a. Bajni et al., 2021) an, wenngleich auch bei Heranziehung dieses Kriteriums sehr starke regionale Unterschiede in der Steinschlag-Felssturz-Statistik in Abhängigkeit zur Geologie (z.B. Delonca et al., 2014; Glade, et al., 2001) ausführlich dokumentiert wurden. Es liegt auf der Hand, dass der Beschaffenheit der Oberfläche (z.B. Glade, 2005) eine maßgebliche Rolle zukommt.

Der Permafrostrückgang führt höchstwahrscheinlich zu einer verstärkten Felssturzaktivität, wie dies von Savi et al. (2021) in den italienischen Ostalpen – insbesondere seit 2010 (möglicherweise angedeutet ein Jahr später in den Ostalpen Österreichs in Abbildung 3) – beobachtet wurde. Die Klimaerwärmung reduziert demzufolge die Hangstabilitäten in hochalpinen Lagen, wo die Permafrostgrenze um ca. 300 m angestiegen ist. Sie steht auch durch in ursächlichem Zusammen-

hang mit dem Gletscherrückgang, und der damit einher gehenden Exposition und Destabilisierung der Talflanken. Damit erhöht sich auch das Gefahrenpotential für den immer weiter ins Hochgebirge vordringenden alpinen Tourismus, beispielsweise in Form von vermehrt auftretenden Steinschlägen. Daraus resultieren mehr Einsätze der Bergrettung. Der Anstieg um das Dreifache während der letzten Jahre (s.a. Bergrettung, 2022) war jedoch trotz allem zumeist der Unerfahrenheit der Touristen und der dem Hochgebirge nicht angepassten Ausrüstung geschuldet.

4. Schlussfolgerungen

Gefährdete Bereiche können im Detail durch oberflächenseismische (Glade et al., 2005) und mit Hilfe geomagnetischer und geoelektrischer Untersuchungen hinsichtlich potenzieller Gleithorizonte (z.B. Gallistl et al., 2018) eingegrenzt werden. Das aber ist in der Praxis oft nur sehr schwer möglich. Praktischer erscheinen detaillierte Topografieerfassungen, die Abgrenzungen der alpinen Permafrostverbreitung und Modellberechnungen hinsichtlich der Mobilisierung von Gesteinsmassen durch Niederschlag. Eine genaue Untersuchung ist für den Ostalpenraum noch ausständig.

Das Hauptproblem bei der Gefahreinschätzung liegt in der nahezu metergenauen topografischen Erfassung zusammen mit der – wenigstens stundengenauen – Niederschlagssituation (Intensität und Summen bzw. Verteilung) und den lokalen geologischen Gegebenheiten, denn diese Genauigkeiten sind verständlicherweise kaum zu erreichen. Dies führt in der Praxis zu relativ ungenauen Angaben bezüglich gefährdeter Bereiche.

Praktisch gesehen ist gegenwärtig die schnelle, weil meist anwendbare Ferndetektion von Fels- und Bergstürzen vorrangig, da diese im Bedarfsfall zu einer frühest möglichen Einleitung von Rettungs- und Bergungsmaßnahmen führt. Dafür erscheint es notwendig automatische Detektionsalgorithmen – wie Hidden Markov Models, Autoregressive Prediction (Fuchs, 2018a) und/oder die Duration Magnitude „MD“ (Marconi u.a., 2016) – zu entwickeln, die umso besser funktionieren, je mehr zuverlässige Erdbeben-Messstationen verfügbar sind. Natürlich müssen solche Algorithmen auch verschiedene seismische Frequenzbänder und alle drei Komponenten berücksichtigen.

Einen zusätzlichen Nutzen der Auswertung von Fels- und Bergsturzereignissen stellt die Sammlung von Hinweisen auf prähistorische Erdbeben

dar. Eine prähistorische Rückverfolgung von gravitativen Massenbewegungen, die Rückschlüsse auf mögliche stärkere Erdbeben in der Vergangenheit erlaubt (s.a. Crozier, 1991, Daxer et al., 2022), kann nämlich für langfristige Erdbebengefährdungsbestimmungen verwendet werden. Solche Untersuchungen dienen der Verbesserung der erdbebengerechten Bauweise im Alpenraum.

Die Fusion der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) mit der Geologischen Bundesanstalt (GBA) ab 1.1.2023 zur GeoSphere Austria (GSA) fördert die Zusammenarbeit auf diesem sehr wichtigen Untersuchungsgebiet.

Eine gekürzte Version dieses Beitrags wurde im Tagungsband des Geoforums Tirol 2022 veröffentlicht.

Referenzen

- Abele, G. 1974:* Bergstürze in den Alpen, ihre Verbreitung, Morphologie und Folgeerscheinungen (= Wissenschaftliche Alpenvereinshefte. Bd. 25, ISSN 0084-0912). Deutscher Alpenverein, München 1974, S. 21, (Zugleich: Karlsruhe, Universität, Habilitationsschrift, 1972).
- Bajni, G., Camera, C.A.S. & Apuani, T. 2021:* Deciphering meteorological influencing factors for Alpine rockfalls: a case study in Aosta Valley. Landslides, DOI: 10.1007/s10346-021-01697-3.
- Barla, G. & Paronuzzi, P. 2013:* The 1963 Vajont Landslide. 50th Anniversary. In: Rock Mechanics and Rock Engineering. Band 46, Nr. 6, 26. September 2013, 1267–1270, doi:10.1007/s00603-013-0483-7.
- Bergrettung 2022:* <https://www.bergrettung-innsbruck.at/category/einsatz-2/>; abgerufen am 26.7.2022.
- Brandt, A. 1981:* Bergstürze an der Villacher Alpe (Dobratsch)/Kärnten/Österreich. Unpubl. Diss., Universität Hamburg, Deutschland.
- Brückl, E., Binder, D. & Merti, St. 2015:* Seismic Sources from Landslides and Glaciers. Encyclopedia of Earthquake Engineering, DOI: 10.1007/978-3-642-36197-5_385-1, 34 Seiten.
- Cengalo 2011:* https://de.wikipedia.org/wiki/Bergsturz_von_Bondo; abgerufen am 19.12.2022.
- Crozier, M.J. 1991:* Determination of palaeoseismicity from landslides. Proc. of 6th International Symposium on „Landslides - Glissements de terrain“, Balkema, D.H. Bell (ed.), Vol.1, 1992, 1173–1180.
- Cruden, D.M. & Varnes, D.J. (1996):* Landslide Types and Processes. – In: Turner, A.K. & Schuster, R.L. (Eds.): Landslides, Investigations and Mitigation. – Transportation Research Board, Special Report, 247, 36–75, Washington (National Academies of Sciences, Engineering, Medicine).
- Daxer, Ch., Ortler, M., Fabbri, S.C., Hilbe, M., Hajdas, I., Dubois, N. Piechl, T., Hammerl, Ch., Strasser, M. & Moernaut, J. 2022:* High-resolution calibration of seismically-induced lacustrine deposits with historical earthquake data in the Eastern Alps (Carinthia, Austria). Quaternary Science Reviews, Volume 284, 2022, 107497, ISSN 0277-3791, DOI: 10.1016/j.quascirev.2022.107497, 23 Seiten.

- Delonca, A., Gunzburger, Y. & Verdell, T.* 2014: Statistical correlation between meteorological and rockfall databases. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1953–1964, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/14/1953/2014/
- Einserkofel* 2022: <https://de.wikipedia.org/wiki/Einserkofel>; abgerufen am 26.7.2022.
- Erismann, T.H. & Abele, G.* 2001: Dynamics of Rockslides and Rockfalls. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 120 Abb., 10 Tabellen, 316 Seiten.
- Evans, S.G. & Hungr, O.* 1993: The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 620–636.
- Fuchs, F., Lenhardt, W., Hibert, C., Bokelmann, G. & AlpArray Working Group* 2018a: Searching fore- and afterslides of gravitational mass movements. Tagung der European Seismological Commission in Malta.
- Fuchs, F., Lenhardt, W., Bokelmann, G. & the AlpArray Working Group* 2018b: Seismic detection of rockslides at regional scale: examples from the Eastern Alps and feasibility of kurtosis-based event location, *Earth Surf. Dynam.*, 6, 955–970, DOI: 10.5194/esurf-6-955-2018.
- Gallistl, J., Wigand, M., Stumvoll, M., Ottowitz, D., Glade, T. & Flores Orozco, A.* 2018: Delineation of subsurface variability in clay-rich landslides through spectral induced polarization imaging and electromagnetic methods. *Engineering Geology* 245 (2018) 292–308.
- Glade, T.* 2005: Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology. *Geomorphology* 66 (2005) 189–213.
- Glade, T., Kadereit, A., Dikau, R.* 2001: Landslides at the Tertiary Escarpments of Rheinhessen, Germany. *Zeitschrift für Geomorphologie Suppl.* Vol. 125. pp. 65–92.
- Glade, T., Stark, P., Dikau, R.* 2005: Determination of potential landslide shear plane depth using seismic refraction – a case study in Rheinhessen, Germany. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 64 (2), 151–158, DOI: 10.1007/s10064-004-0258-1.
- Hammerl, Ch.* 1992: Das Erdbeben vom 25.Jänner 1348 - Rekonstruktion des Naturereignisses. Unpubl. Diss., Universität Wien.
- Harp, E.L. & Wilson, R.C.* 1995: Shaking Intensity Thresholds for Rock Falls and Slides: Evidence from the Whittier Narrows and Superstition Hills Earthquake Strong Motion Records. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 1739–1757.
- Iselschlucht* 2022: https://www.kleinezeitung.at/kaernten/osttirol/6161340/Felssturz-in-die-Isel_Vermessungsspiegel-sollen-weitere-Abbrueche; abgerufen am 2.12.2022.
- Keefer, D.K.* 1984: Landslides caused by earthquakes. *Bull. Geol. Soc. Am.* 95, 406–421.
- Keefer, D.K. & R.C. Wilson, R.C.* 1989: Predicting earthquake-induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments. In ‚Landslides in a Semi-Arid Environment‘, *Inland Geological Society, P.M. Sadler & D.M. Morton (eds.)*, Vol.2, 118–149.
- Krautblatter, M. & Moser, M.* 2009: A nonlinear model coupling rockfall and rainfall intensity based on a four year measurement in a high Alpine rock wall (Reintal, German Alps). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1425–1432.
- Lenhardt, W.A.* 2007: Earthquake triggered landslides in Austria – Dobratsch revisited. *Jb. Geol. B.-A.*, Band 147, Heft 1+2, S. 193–199, 5 Abb., Wien.
- Manconi, A., Picozzi, M., Coviello, V., De Santis, F. & Elia, L.* 2016: Real-time detection, location, and characterization of rockslides using broadband regional seismic networks. *Geophysical Research Letters* 43(13), DOI: 10.1002/grl.54655.
- Pöllestaal* 2015: <https://www.tt.com/artikel/10657382/oetztaeler-felssturz-kam-einem-erdbeben-gleich>; abgerufen am 22.12.2022.
- Richter, C.F.* 1935: An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.25, 1-32.
- Savi, S., Cimiti, F. & Strecker, M.R.* 2021: Pronounced increase in slope instability linked to global warming: A case study from the eastern European Alps. *Earth Surf. Process. Landforms*. Vol. 46: 1328–1347, DOI: 10.1002/esp.100.
- Scheidegger, A.E.* 1973: On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics*, 5, 231–236.
- Tianchi, L.* 1983: A mathematical model for predicting the extent of a major rockfall. *Z. Geomorph.*, N.F., 27, 473–482.
- Till, A.* 1907: Das große Naturereignis von 1348 und die Bergstürze des Dobratsch. In den Mitteilungen der K.k. Geographischen Gesellschaft, Bd.50, Wien, 535–645.
- Varnes, D.J.* 1978: Slope movement types and processes. – In: Schuster, R.L. & Krizek, R.J. (Eds.): *Landslides, analysis and control*. – Transportation Research Board Special Report, 176, 11–33, Washington (National Academies of Sciences, Engineering, Medicine).
- Voight, B. & Pariseau, W.G.* 1978: Rockslides and avalanches: An introduction. Publ. in „Rockslides and avalanches“, 1–63.

Anschrift der Autor:innen

Univ.-Doz. Dr. Wolfgang Lenhardt, Formanekgasse 1A/3/1, A-1190 Wien.

E-Mail: wolfgang.lenhardt@gmail.com

Dipl.-Ing.ⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Maria-Theresia Apoloner, GeoSphere Austria, Hohe Warte 38, 1190 Wien.

E-Mail: maria-theresia.apoloner@geosphere.at

Dipl.-Ing. Helmut Hausmann, GeoSphere Austria, Hohe Warte 38, 1190 Wien.

E-Mail: helmut.hausmann@geosphere.at

Mag.^a Alexandra Haberler, GeoSphere Austria, Neulinggasse 38, 1030 Wien.

E-Mail: alexandra.haberler@geosphere.at