
18 Extreme bei Hangrutschungen und Hangmuren

Thomas Glade, Nils Tilch und Arben Koçiu*

Zusammenfassung

Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren werden charakterisiert und in den Grundfunktionen anhand einzelner Beispiele beschrieben. Der Bezug zu Extremereignissen wird über die Prozessdimension (z. B. Fläche, Volumen, Geschwindigkeit) und/oder den möglichen Konsequenzen hergestellt. Historische Informationen sind sehr lückenhaft und reflektieren nicht das reale Auftreten solcher Prozesse. Im Rahmen des Schwerpunktprogrammes GEORIOS der Geologischen Bundesanstalt werden die verfügbaren österreichweiten Informationen gesammelt und zusammengeführt. Beispiele für regionale Extremereignisse werden anhand der Ereignisse Gasen/Haslau 2005 und Sellrain 2015 und für lokale Extremereignisse anhand des Ereignisses Danhöfen 2005 vorgestellt. Auf Basis dieser Beispiele werden Einschätzungen zum Sachstand und der diesbezüglichen Unsicherheiten gegeben, wobei hierbei zwischen Prozessdatenerhebung und -management sowie Prozessdatenanalyse und Erstellung gefahrenpräventiver Planungsunterlagen unterschieden wird. Zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen werden dargestellt und in die Perspektiven der Handlungsoptionen gesetzt, die u. a. verstärktes Monitoring, Einbindung in den Risikomanagementzyklus sowie Citizen Science Initiativen umfassen.

Abstract

Soil and debris slides and hillslope debris flows are characterized and described based on their basic functions. The relation to extreme events is given by the process dimensions (e. g. area, volume, velocity) and/or the potential consequences. Historic information are rather incomplete and do not represent the real landslide occurrence in the past. Within the GEORIOS program of the GBA, available and accessible information on Austrian landslides are compiled. Examples of extreme landslides events are presented within regional studies for events in Gasen/Haslau 2005 and Sellrain 2015, and within investigations during the event in Danhöfen 2005. Based on these examples, some indications of the knowledge on extreme events and the associated uncertainties are provided, with a distinction between process data compilation and management and process data analysis

* Thomas Glade, Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung, thomas.glade@univie.ac.at.

Nils Tilch, Geologische Bundesanstalt, Abteilung Ingenieurgeologie, nils.tilch@geologie.ac.at.
Arben Koçiu, Geologische Bundesanstalt, Abteilung Ingenieurgeologie, arben.kociu@geologie.ac.at.

and preparation of support documents for hazard prevention. Future developments and respective challenges are presented and put into perspective to options of actions, related to e. g. increased monitoring, embedding into the risk management cycle and the Citizen Science Initiative.

Kernaussagen

- Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren sind typische Prozesse der Gebirgsräume Österreichs.
- Historische Informationen sind zwar vorhanden, doch äußerst lückenhaft. Mittels des GEORIOS-Datenbankmanagements für gravitative Massenbewegungsprozesse und -strukturen werden die zur Verfügung stehenden Informationen gebündelt.
- Die regionalen Ereignisse aus Gasen/Haslau 2005 und Sellrain 2015, sowie das lokale Ereignis aus Danhöfen 2005 sind Beispiele für Extremereignisse für Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren.
- Die Einschätzung des Sachstandes und der diesbezüglichen Unsicherheiten basiert auf Prozessdatenerhebung und -management, sowie Prozessdatenanalyse und Erstellung präventiver Planungsgrundlagen.
- Zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen beinhalten ein verstärktes Prozessmonitoring, die Einbindung in den Risikomanagementzyklus und in Citizen Science Initiativen.

Key Points

- Soil and debris slides and hillslope debris flows are typical processes in alpine regions in Austria.
- Historic information is available, but very sparse. The GEORIOS process database intends to collect and to merge the available and accessible information.
- The regional studies in Gasen/Haslau 2005 and Sellrain 2015 as well as the local survey in Danhöfen 2005 are examples of extreme soil and debris slides and hillslope debris flows.
- The evaluation of the knowledge and the associated uncertainties are based on process data compilation and -management, and the process data analysis and the preparation of planning documents for preventive measures.
- Future developments and resulting challenges include an increased process monitoring, the embedding within risk management cycles and Citizen Science initiatives.

18.1 Einleitung und Prozessgrundlagen

Hangrutschungen (im Folgenden als Lockergesteinsrutschungen bezeichnet) und Hangmuren sind gravitative Massenbewegungen, die ausschließlich in Lockergesteinen stattfinden. Bei diesen Lockergesteinen handelt es sich um die den Felsuntergrund auflagernden lockeren Substrate, die den pedologisch definierten Boden, Hangsedimente und das darunterliegende verwitterte Ausgangsgestein umfassen. Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren sind Typen der gravitativen Massenbewegungen, die je nach dem Bewegungsablauf

den Prozessgruppen Driften, Gleiten, Kriechen und Fließen zuzurechnen sind (vgl. Beitrag 15 zu *Gravitativen Massenbewegungen*).

Das bewegte Volumen dieser Prozesse variiert von einigen m³ bis zu mehreren Mio m³. Flachgründige Hangbewegungen haben Mächtigkeiten von zehner Zentimetern bis mehreren Metern, tiefgründige Hangbewegungen können bis zu einigen zehner Metern mächtig sein, in Ausnahmefällen auch noch mächtiger. Auch deren Geschwindigkeit kann räumlich und zeitlich sehr variieren. Ganz langsam mit einigen Zentimeter pro Jahr kriechende Prozesse sind genauso anzutreffen wie extrem schnelle fließende Prozesse mit Geschwindigkeiten von mehreren Metern pro Sekunde.

Im Fall gravitativer Massenbewegungen im Lockergestein lassen sich insbesondere im Rahmen von regionalen Extremereignissen grob die folgenden Prozesstypen bzw. -entwicklungsstadien unterscheiden (vgl. Abb. 01; Tilch, 2009; Tilch et al., 2011b).

Bei Anrissen hat lediglich eine Lösung des Lockergesteins vom Hang entlang eines Risses stattgefunden (vgl. Abb. 01a), wobei noch kein oder kein bedeutender lateraler Materialtransport erfolgte. Hierbei handelt es sich um das initiale Entwicklungsstadium einer gravitativen Massenbewegung im Lockergestein.



Abbildung 01: Spontan entstandene und entwickelte Prozesse unterschiedlicher Typen und/ oder Entwicklungsstadien in der Region »Klingfurth (NÖ)« in Juni 2009: Anriss/ initiale Rutschung (a), Translationsrutschung (b) und Lockergesteinsrutschungen (Initialprozess) die in Hangmuren übergehen können (Sekundärprozess).

Figure 01: Recently triggered and advancing processes of different landslide types and/ or development stage in the region »Klingfurth (Lower Austria)« in June 2009: Crack / initial slide (a), translational slide (b) and slides in unconsolidated material (initial process), which turn into hillslope earth/ debris flows (secondary process).

Bildquellen: Geologische Bundesanstalt

Sind eine oder mehrere Gleitflächen im Lockergestein ausgebildet, entlang derer es zu einer Bewegung der Lockergesteinsmassen kommt, handelt es sich um eine Lockergesteinsrutschung. Je nach den standortspezifischen Gegebenheiten und der Geometrie der ausgebildeten Gleitfläche(n) erfolgt diese Bewegung rotativ,

planar oder in einer Mischform (z. B. Start als Rotationsbewegung und planare Weiterbewegung), wobei sich der jeweils auflagernde Lockergesteinskörper im Verband bewegt (vgl. Abb. 01b). Solche Lockergesteinsrutschungen können sich im Zuge eines Ereignisses spontan oder über mehrere Ereignisse progressiv von einem Anriss ausgehend entwickeln.

Hangmuren entstehen oft ausgehend von Lockergesteinsrutschungen (Initialprozess), in weiterer Folge fließt das freigesetzte Material auf der Geländeoberfläche (Sekundärprozess) ab (vgl. Abb. 01c).

Solche Prozesse können einerseits spontan entstehen und dann sogleich ein stabiles finales Prozessstadium erreichen. Andererseits können sich solche Prozesse aber auch über mehrere Ereigniszeitpunkte hinweg progressiv weiterentwickeln, so dass zunächst einer oder mehrere intermediäre Prozessentwicklungsstadien resultieren. Eine Reaktivierung dieser Prozesse ist dann immer wieder möglich, bis das finale Prozessentwicklungsstadium erreicht ist (vgl. Abb. 02a). Solche sich progressiv weiterentwickelnden Prozesse kommen in Österreich vielerorts aufgrund fluviatiler Ufererosion im Zuge wiederholter Hochwasserereignisse entlang der Gerinne vor (z. B. Tilch, 2009; Chiffard und Tilch, 2013; Janu et al., 2013). Durch den Materialeintrag in das Gerinne werden so auch in siedlungsfernen Gebieten Österreichs beträchtliche Murschuttvolumina mobilisiert, die über die hochwasserführenden Gerinne (fluvialer Materialtransport, Abb. 02b) in die Siedlungsgebiete gelangen, dort beträchtliche Schäden verursachen und eine Gefahr für die Bevölkerung sein können (Abb. 02c).

Im Rahmen der Dokumentation bisheriger regionaler Extremereignisses wurde oftmals festgestellt, dass bereits auf engstem Raum unterschiedliche Prozessstypen und -entwicklungsstadien vorkommen (vgl. Kapitel 18.3.1). Dies ist vornehmlich in der kleinräumigen Variabilität der für diese Prozesse relevanten natürlichen und anthropogenen Verhältnisse am Prozessstandort und im jeweiligen hydrogeologischen Einzugsgebiet (im Folgenden als »Standortfaktoren« bezeichnet) begründet. Hervorzuheben sind die Beschaffenheit und die geotechnischen und hydro(geo)logischen Eigenschaften der Lockergesteinsauflage sowie jene Standortfaktoren, die im Zusammenhang mit den vielerorts seit Jahrhunderten erfolgten anthropogenen Eingriffen in den ursprünglich natürlichen Zustand des Hangsystems stehen (z. B. Art der Landnutzung und Bewirtschaftung, Hangwasserbewirtschaftung (u. a. Hangdrainagen, Quellfassungen), Abgrabung und Anschüttung von Material).

In Österreich treten Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren vorwiegend als Einzelprozesse auf, die jedoch auch durch einen großräumigen Auslöser (z. B. Starkniederschlagsereignis) an vielen Stellen mehr oder weniger zeitgleich freigesetzt werden können und dadurch besonders für raumplanerische Fragestellungen bedeutsam sind.



Abbildung 02: Eine der zahlreichen progressiven Lockergesteinsrutschungen in der Region »Klingfurth (NÖ)« im Juni 2009 (a), die im Zuge von Starkniederschlagsereignissen aufgrund der jeweils einsetzenden fluviatilen Ufer- und Sohlerosion immer wieder reaktiviert werden. Das durch die Vielzahl der Lockergesteinsrutschungen gesamthaft freigesetzte Murschuttvolumen gelangt in weiterer Folge entlang der wiederholt einsetzenden Erosion und des fluvialer Materialtransports (b) entlang der hochwasserführenden Bäche sukzessiv-kaskadenartig in den Siedlungsbereich von Klingfurth (c).

Figure 02: One of the many progressive landslides in the region »Klingfurth (Lower Austria)« in June 2009 (a), which has been repeatedly reactivated due to strong precipitation events in combination with fluvial undercutting and incision. The total mobilized material reaches the channel, is eroded by bank erosion and is transported in cascades through the system (fluvial transport, b) and reaches the settlement of Klingfurth (c).

Bildquellen: Geologische Bundesanstalt

In Rahmen eines prozessauslösenden Niederschlagsereignisses können sich die Lockergesteinsmassen u. U. nur wenige Zentimeter bis Meter in unterschiedlichen Dimensionen (Tab. 01) hangabwärts bewegen, sich dann wieder stabilisieren und durch ein folgendes auslösendes Niederschlagsereignis reaktiviert werden. Sie können sich aber auch nach der Initiierung den gesamten Hang in verschiedenen Geschwindigkeiten (Tab. 02) abwärts bewegen und erst in den Tallagen am Hangfuß selbst zum Stillstand kommen oder bis zu einem Gerinne gelangen. Dann ist häufig auch zu beobachten, dass die zunächst kompakten, in sich geschlossenen kriechenden oder abgleitenden Lockersubstratkörper in breiige bis verflüssigte Fließmassen übergehen. Der jeweils stattfindende zeitlich-räumlich variable Bewegungsablauf wird neben der Beschaffenheit, den Eigenschaften und dem Wassergehalt des Substrats auch von der Hangtopographie und Vegetation maßgeblich bestimmt.

Zur Auslösung der gravitativen Lockergesteinsprozesse kommt es im Regelfall erst durch die Infiltration von Wasser in den Untergrund. Hierbei kann es sich ursächlich um räumlich und zeitlich variable kurz- bis mittelfristige Niederschläge (z. B. Regen, Schnee) und die mittel- bis langfristige Witterung (z. B. Bildung einer Schneedecke), sowie deren mittelbaren (z. B. Abschmelzen der Schneedecke) und unmittelbaren Einflüsse (z. B. Oberflächenabfluss, Infiltration) handeln. Diese haben wiederum einen raumzeitlich variablen Einfluss auf die Lockergesteinseigenschaften (Aufweichen des Lockergesteins und Kohäsionsverlust) sowie auf die natürlichen bedingten hanghydro(geo)logischen

Prozesse, bei denen es sich letztendlich um die direkten Prozessauslöser handelt (u. a. Ray et al., 2010; Brönnimann, 2011; Zieher et al., 2017).

Tabelle 01: Fläche und Volumen von Lockergesteinsrutschungen.

Table 01: Area and volume of soil and debris slides.

Quelle: Rokic, 2011, S. 442

Rutschungen	Rutschungsfläche (m ²)	Rutschungsvolumen (m ³)
Sehr klein	< 100	< 100
Klein	100–1.000	100–5.000
Mittlere Größe	1.000–10.000	5.000–100.000
Groß	10.000–50.000	100.000–1.000.000
Sehr groß	> 50.000	> 1.000.000

Tabelle 02: Klassifikation der Geschwindigkeit verschiedener Verschiebungen von Lockergesteinsrutschungen.

Table 02: Classification of velocities for different soils and debris slide displacements.

Quelle: Rokic, 2011, S. 442

Rutschungen	Geschwindigkeiten
Extrem langsam	< 0,06 m/Jahr
Sehr langsam	0,06 m/Jahr – 1,5 m/Jahr
Langsam	1,5 m/Jahr – 1,5 m/Monat
Mäßig	1,5 m/Monat – 1,5 m/Tag
Schnell	1,5 m/Tag – 0,3 m/Minute
Sehr schnell	0,3 m/Minute – 3,0 m/Sekunde
Extrem schnell	> 0,3 m/Sekunde

Mancherorts haben aber auch anthropogene Faktoren einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirksamkeit der direkten Prozessauslöser, wie z. B. die zeitlich variable Funktionalität von Hangdrainagen und Quellfassungen sowie das unkontrollierte Einleiten von Oberflächenwasser in die Hänge (z. B. aufgrund versiegelter Gebäude- und Siedlungsflächen, Wege- und Straßennetz; Andreu et al., 2007). Demzufolge ist für die räumlich und zeitlich variable Entstehung und Reaktivierung von gravitativen Lockergesteinsprozessen ein komplexes System von räumlich variablen Standortfaktoren sowie räumlich und zeitlich variablen ursächlichen und direkten Prozessauslösern verantwortlich.

Im Fall der betrachteten eher flachgründigen Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren erfolgt der Materialtransport hangabwärts zumeist in Richtung des maximalen Hanggefälles. Dabei wird der Bewegungsablauf und die Reichweite von Lockergesteinsrutschungen maßgeblich durch verschiedene bewegungskontrollierende Faktoren entlang der Gleitfläche, bzw. des Gleithorizontes (u. a. Materialeigenschaften und -zustand, Grundwasserverhältnisse) sowie bewe-

gungsbehindernde Objekte (u. a. Bauwerke, Vegetation) bestimmt. Diese Faktoren sind auch bei Hangmuren im Fall eines gleitenden Initialprozesses im Herkunftsbereich der Prozessmaterialien relevant. Im weiteren sekundären Prozessverlauf, während dem das Material auf der Geländeoberfläche abfließt (Transportbereich), sind neben bewegungsbehindernden Objekten vor allem die Viskosität und das Wasserbindevermögen des Hangmaterials, die Oberflächenrauigkeit (u. a. Geländeunebenheiten/ Mikrotopographie, Vegetationsbedeckung) sowie die Oberflächenfeuchtigkeit bedeutsam. Aufgrund dieser bewegungskontrollierenden Faktoren im Transportbereich erreichen auch Hangmuren insbesondere im Fall steiler, nasser und glatter Wiesenhänge besonders große Geschwindigkeiten und Reichweiten.

In Österreich kommen Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren als Extremereignisse entweder an einzelnen Hängen in Form von großvolumigen Einzelprozessen (z. B. Danöfen im August 2005; Amt der Vorarlberger Landesregierung, 2005, siehe auch Kapitel 18.3.2) oder aufgrund eines gemeinsamen großräumigen ursächlichen Prozessauslösers (z. B. regionales Starkniederschlagsereignis) in Form von zahlreichen Prozessen unterschiedlicher – aber zumeist kleinerer – Prozessvolumina innerhalb einer Region vor (z. B. Gasen-Haslau im August 2005; Tilch et al., 2011b; siehe auch Kapitel 18.3.1).

Aber auch die Bewegungsgeschwindigkeit ist hierfür ein weiteres zentrales Kriterium. Zusätzlich werden Extrema auch durch die realen oder potenziellen Konsequenzen (z. B. Sachschäden) charakterisiert, was den räumlichen Kontext berücksichtigt (wo passiert etwas?). Das Grundproblem bei allen Untersuchungen zu den Extremen ist jedoch, dass bisher zu wenig langfristige räumlich und zeitlich differenzierende Prozessaufzeichnungen und je nach Region unterschiedlich vollständige Prozessinformationen existieren, die konkrete Informationen zur Identifikation von Extremereignissen im Kontext einer räumlichen Frequenz-/Magnitudenverteilung für das österreichische Staatsgebiet liefern könnten.

18.2 Historischer Kontext und deren Dokumentation

Im historischen Kontext ist festzuhalten, dass Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren seit jeher landschaftsprägend sind, sei es in Form von Einzelprozessen oder in Form von großräumig zahlreich auftretenden Prozessereignissen. Solche Prozesse verursachen, besonders im alpinen Gebiet, immer wieder enorme Schäden in Siedlungsbereichen und an Infrastrukturbauten. Als Auslöser sind hierbei besonders hydrometeorologische Konditionen ausschlaggebend – Erdbeben spielen nach bisherigem Kenntnisstand eine eher unterge-

ordnete Rolle bei der Auslösung von Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren.

Seit vielen Jahrzehnten werden Maßnahmen getroffen, um die negativen Folgen von Extremereignissen bzw. Katastrophenereignissen aufgrund von Lockergesteinsprozessen und Hangmuren einzudämmen, was aber nicht vollständig gelingt. Dies liegt einerseits in den planerischen, technischen und ökonomischen Limitierungen, andererseits in den bestehenden grundsätzlichen Wissenslücken bezüglich der Entstehung, dem Ablauf und den Auswirkungen unwitterbedingter Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren begründet.

Ein wichtiges Mittel zum Verständnis der im Zuge eines Extremereignisses abgelaufenen Prozesse ist deren sorgfältige Dokumentation und eine digitale Zusammenführung von Fakten hinsichtlich der Prozesse sowie den Standortverhältnissen und -eigenschaften (z. B. Geologie, Vegetation, prozessauslösende Faktoren). Die Kenntnis dieser Fakten ist dann auch ein wichtiger Bestandteil der Ursachenforschung und stellt die Grundlage für die Einleitung von Sofortmaßnahmen und nicht zuletzt für die Planung von langfristigen Schutzmaßnahmen dar.

Die vollständige Erfassung der in der Vergangenheit stattgefundenen und in der Gegenwart stattfindenden Prozesse ist äußerst schwer, wenn nicht sogar unmöglich. Schon im Jahre 1938 schrieb J. Stiny: »[...] *eine Hauptschwierigkeit bietet die Lückenhaftigkeit der zugänglichen Angaben. Sie fließen umso spärlicher, je weiter wir die Naturereignisse zurückverfolgen wollen*« (Stiny, 1938). Dies ist auch noch heute festzustellen, denn je weiter die Ereignisse zurückliegen, umso unvollständiger und geringer ist die Qualität der zugänglichen Prozessinformationen.

Dies liegt einerseits darin begründet, dass viele Prozesse in entlegenen Gebieten stattfinden oder aufgrund ihrer kleinen Prozessvolumina und/oder -flächen keine Aufmerksamkeit erlangen. Im Gelände sind diese Prozesse häufig auch nach kurzer Zeit nicht mehr erkennbar, da die Formen nivelliert und die bewegten Materialien sekundär erodiert wurden. Hinzu kommt, dass es keine flächendeckende systematische, auf Standards basierende Prozessdokumentation gibt. Andererseits wurden und werden umfassende Erhebungen unmittelbar nach Extrem- bzw. Katastrophenereignissen leider nur selten durchgeführt. Dies liegt oft daran, dass die zuständigen Gebietskörperschaften und die betroffene Bevölkerung überwiegend mit den Rettungs- und Aufräumarbeiten beschäftigt sind, was zu diesem Zeitpunkt selbstverständlich oberste Priorität hat. Allerdings gehen durch die Aufräumarbeiten zahlreiche Prozessinformationen verloren, die für das Prozessverständnis wichtig sind. Die Prozessdokumentation sollte deshalb möglichst unmittelbar nach einem Extremereignis durch unabhängige Experten erfolgen.

Gegenwärtig sind in die Erhebung von Prozessinformationen im Konnex zu Extremereignissen in Österreich eine Vielzahl an Akteurinnen und Akteuren verschiedener Institutionen und Organisationen eingebunden, was die komplexe Organisationsstruktur auf Bundes- und Landesebene in Österreich widerspiegelt. Ferner sind auch eine Reihe wissenschaftlicher Institutionen und Privatunternehmen daran beteiligt. Da es keine flächendeckende systematische, auf Standards basierende Prozessdokumentationsmethodik gibt, wird jedes Ereignis individuell nach den vorherrschenden Kriterien der jeweils involvierten Institutionen oder Organisationen aufgenommen. Dies erschwert die Vergleichbarkeit der gesamthaft gesammelten Prozessdaten und deren Zusammenführung in einer bundesweiten gemeinsamen digitalen Prozessdatenbank. Dennoch werden seitens der Geologischen Bundesanstalt seit Jahrzehnten, u. a. im Rahmen des Schwerpunktprogrammes GEORIOS (GEORISiken Oesterreich) die verfügbaren Prozessdaten gesammelt und in einer solchen bundesweiten zentralen Prozessdatenbank zusammengeführt (Kociu et al., 2007; Tilch et al., 2011a), was einen wenn auch lückenhaften Überblick ermöglicht (siehe Abb. 03; beispielhaft für Vorarlberg). Gegenwärtig existieren allerdings noch viele Prozessinformationen in den Archiven verschiedenster Institutionen, seien es Universitäten, regionale Geologische Dienste, Ministerien oder Ingenieurbüros, die zukünftig noch in die zentrale Prozessdatenbank eingearbeitet werden müssen. Der darin begründete lückenhafte Kenntnisstand erschwert eine Beurteilung im historischen Kontext sehr.

18.3 Österreichische Fallbeispiele

18.3.1 Regionale Extremereignisse

In den vergangenen Jahrzehnten ereigneten sich in Österreich immer wieder regionale Extremereignisse, die durch zahlreiche Lockergesteinsrutschungen und/oder Hangmuren gekennzeichnet waren. Diese gravitativen Extremereignisse wurden zumeist ursächlich durch regionalspezifisch extreme Niederschlagsereignisse hervorgerufen.

Hierbei handelte es sich entweder um lokal bis regional begrenzte konvektive Niederschlagsereignisse, die durch enorme Niederschlagsintensitäten in kurzer Zeit gekennzeichnet waren, oder um regionale bis überregionale advective Niederschlagsereignisse, die aufgrund der möglicherweise über Tage andauernden kontinuierlichen Niederschläge enorme Niederschlagssummen hervorgerufen hatten. Beispiele für gravitative Extremereignisse infolge konvektiver Niederschlagsereignisse sind jene vom Juli 2016 in Stanz im Mürztal und Pernegg an der Mur (beide Steiermark; Tilch et al., 2017), wo sich jeweils

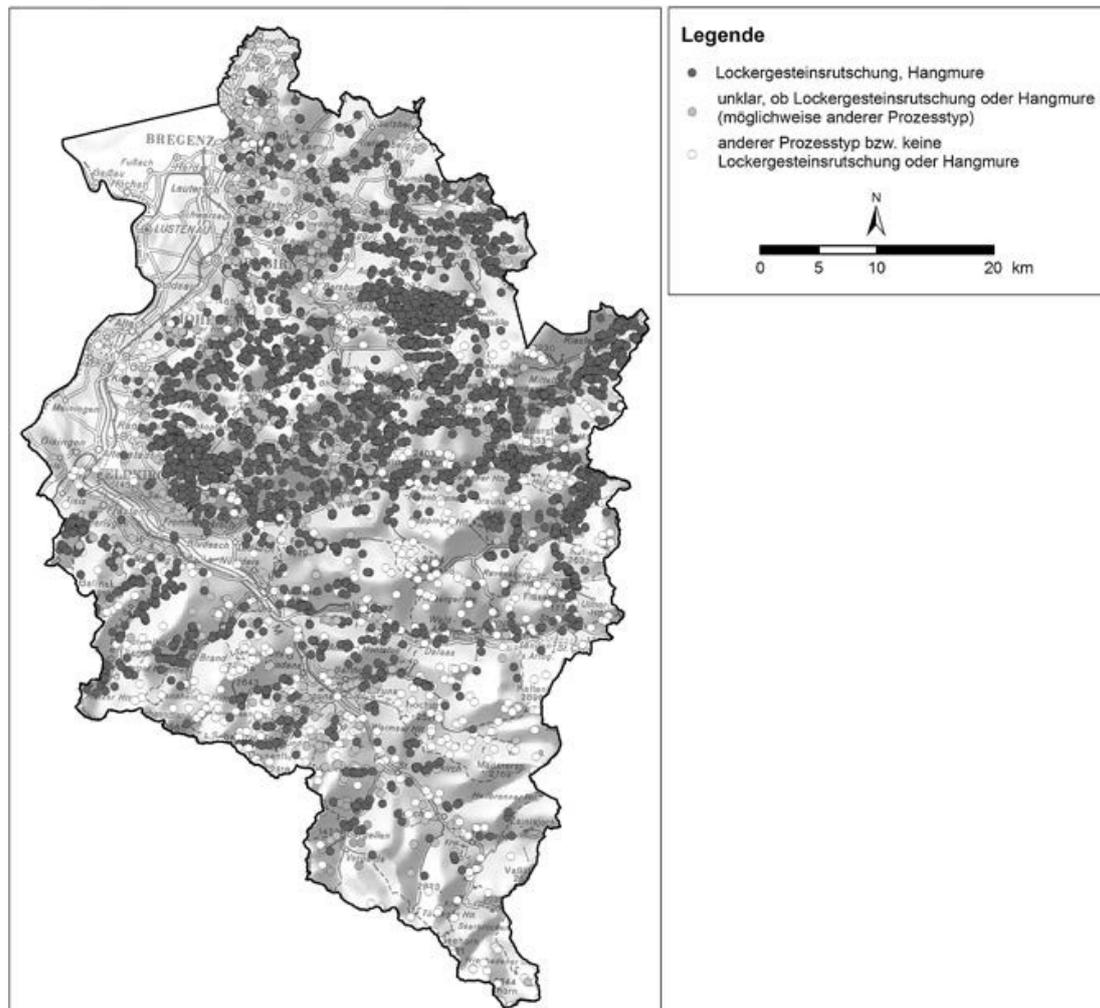


Abbildung 03: Auszug der Prozessdatenbank GEORIOS der Geologischen Bundesanstalt für das Bundesland Vorarlberg mit Informationen zu den bisher zentral erfassten Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren sowie anderen, u. U. unklaren Prozesstypen. Hinweis: Dargestellt sind nur die erfassten, und nicht alle bisher erfolgten Prozesse. Die dargestellten Punkte lassen weder auf die Magnitude noch auf die Frequenz des Auftretens schließen.

Figure 03: Excerpt from the database GEORIOS of the Geological Survey of Austria for the region Vorarlberg including information on currently centrally reported landslides including slope soil and debris flows as well as other process types. Note: Displayed are the recorded processes only, but not all processes that have occurred so far. The presented points do relate to neither magnitude nor frequency of landslides.

Quelle: Geologische Bundesanstalt

hunderte Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren auf Flächen von wenigen Quadratkilometern ereigneten. Beispiele für gravitative Extremereignisse infolge advektiver Niederschlagsereignisse aufgrund einer Vb-Großwetterlage, sind jene im September 1965 sowie im August und November 1966 im Lesachtal (Kärnten; Moser, 1973), im August 1999 in der Buckligen Welt (Niederösterreich; Hübl et al., 2009), im August 2005 im Bregenzerwald (Vorarlberg; Markart et al., 2007; Tilch, 2014), im oberen Lechtal (Tirol) und in Gasen-Haslau (Steir-

ermark; Andrecs et al., 2007; Hübl et al., 2009; Tilch et al., 2011b), im Juni 2009 in Feldbach (Steiermark; Haberler et al., 2009; Hornich et al., 2009) und in Klingfurth (Niederösterreich; Tilch 2009; Chiffard und Tilch, 2013). Diesbezüglich sei an dieser Stelle das Extremereignis im August 2005 im Bereich der Gemeinden Gasen und Haslau exemplarisch hervorgehoben (vgl. Abb. 04), da durch die äußerst zahlreichen Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren sowohl enorme monetäre Schäden (u. a. an Gebäuden und Verkehrswegen) entstanden, als auch zwei Todesfälle zu beklagen waren.

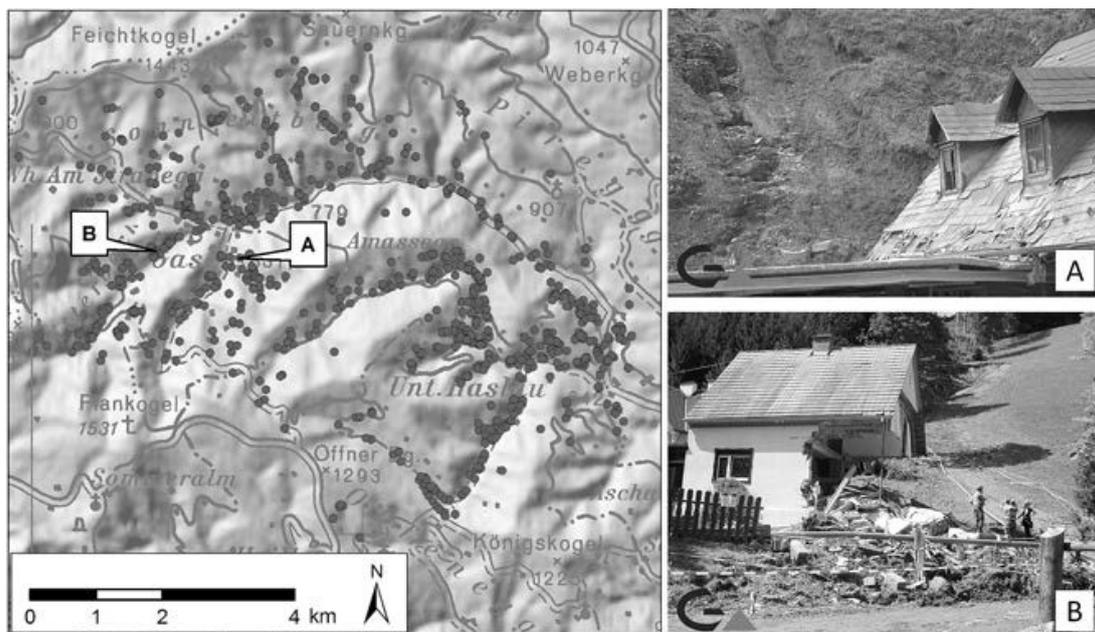


Abbildung 04: Auszug der Prozessdatenbank der Geologischen Bundesanstalt für das Gebiet »Gasen/Haslau (Steiermark)« im August 2005 mit Informationen zu den Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren. Durch eine große Anzahl dieser Prozesse kam es zu beträchtlichen Gebäude- und Straßenschäden (Bsp. A), zudem waren in Gasen aufgrund einer Hangmure zwei Tote zu beklagen (Bsp. B). Hinweis: Dargestellt sind nur die erfassten, und nicht alle bisher erfolgten Prozesse. Die Punkte lassen weder auf die Magnitude noch auf die Frequenz des Auftretens schließen.

Figure 04: Excerpt from the process database of the Geological Survey for the region »Gasen/Haslau (Styria)« from August 2005 including information on currently centrally reported soil slides and hillslope debris flows. A large number of these processes led to considerable damage to buildings and roads. (ex. A). Additionally two people died in Gasen due to hillslope debris flow (ex. B). Note: Displayed are the recorded processes only, but not all processes that have taken place so far. Single points do not refer to neither magnitude nor frequency of landslides.

Quellen: Topographie: GIS-Steiermark; Geologische Bundesanstalt (a, b)

Auch wenn es sich im Fall von regionalen gravitativen Extremereignissen zu meist um Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren mit relativ kleinen Volumina handelt, ist insbesondere das Schadenpotential im Prozessbereich von Hangmuren groß. Dies ist vornehmlich in der beschleunigten Materialumla-

gerung an steilen Hängen, der daraus resultierenden vergleichsweise großen Reichweite und dem hohen Druckimpuls selbst kleiner Volumina begründet.

Die maximal mögliche Reichweite von Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren ergibt sich zumeist durch hangabwärts folgende Hangverflachungen oder topographische Tiefenlinien, wo das Prozessmaterial akkumuliert oder einem Fließgewässer zugeführt wird. Letzteres kann zur Folge haben, dass das den Fließgewässern (u. a. Wildbäche) zugeführte Material im Rahmen von Hochwasserereignissen weitertransportiert wird und so in Siedlungsgebiete gelangt (vgl. Abb. 05).

Im Fall von Hochwasserereignissen werden vielerorts infolge von Ufererosion entlang der Fließgewässer, insbesondere entlang von Wildbächen, zahlreiche gravitative Lockergesteinsprozesse ausgelöst, die den Fließgewässern ebenfalls Geschiebe zuführen. Zusammen mit den Geschiebevolumina der fluvialen Sohl- und Ufererosion können so enorme kumulative Geschiebevolumina hervorgerufen werden. Das in Summe durch die Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren hervorgerufene potentielle Schadens- und Gefahrengebiet beschränkt sich somit nicht nur auf deren Prozessbereiche, sondern auf den Wirkungsbereich der gesamthaften Prozesskaskade (gravitative Lockergesteinsprozesse und fluvialer Feststofftransport).

Solche Extremereignisse treten immer wieder insbesondere in jenen Wildbacheinzugsgebieten auf, wo für die Entstehung von gravitativen Lockergesteinsprozessen sensitive Voraussetzungen vorherrschen (vgl. Kapitel 18.1). Beispiele hierfür sind die verheerenden Extremereignisse in Allerheiligen im Müürztal (Steiermark) im August 1958 (Richter, 1958; Zettl, 1958; Clar, 1959), St. Lorenzen im Paltental (Steiermark) im Juli 2012 (Janu et al., 2013) und Sellrain (Tirol) im Juni 2015 (vgl. Abb. 05; Lager, 2015). Diese Beispiele zeigen, dass Schäden und Gefahren innerhalb des Siedlungsraumes bzw. der raumplanungsrelevanten Bereiche durchaus eine Folge von relativ weit davon entfernt entstandenen gravitativen Massenbewegungen sein können. Deshalb ist es auch wichtig, dass auch solche Prozesskaskaden im Rahmen einer realistischen Gefahreneinschätzung und der Ausweisung von Gefahrenzonen für raumplanerische Zwecke berücksichtigt werden.

18.3.2 Lokale Einzelextremereignisse

Während im Fall von regionalen gravitativen Ereignissen ein Extremereignis erst durch die große Anzahl und räumliche Dichte der Einzelprozesse innerhalb einer Region entsteht, können einzelne Lockergesteinsrutschungen oder Hangmuren allein auch aufgrund eines hinreichend großen Prozessvolumens und/oder einer hohen Prozessgeschwindigkeit zu einem bedeutsamen Einzel-

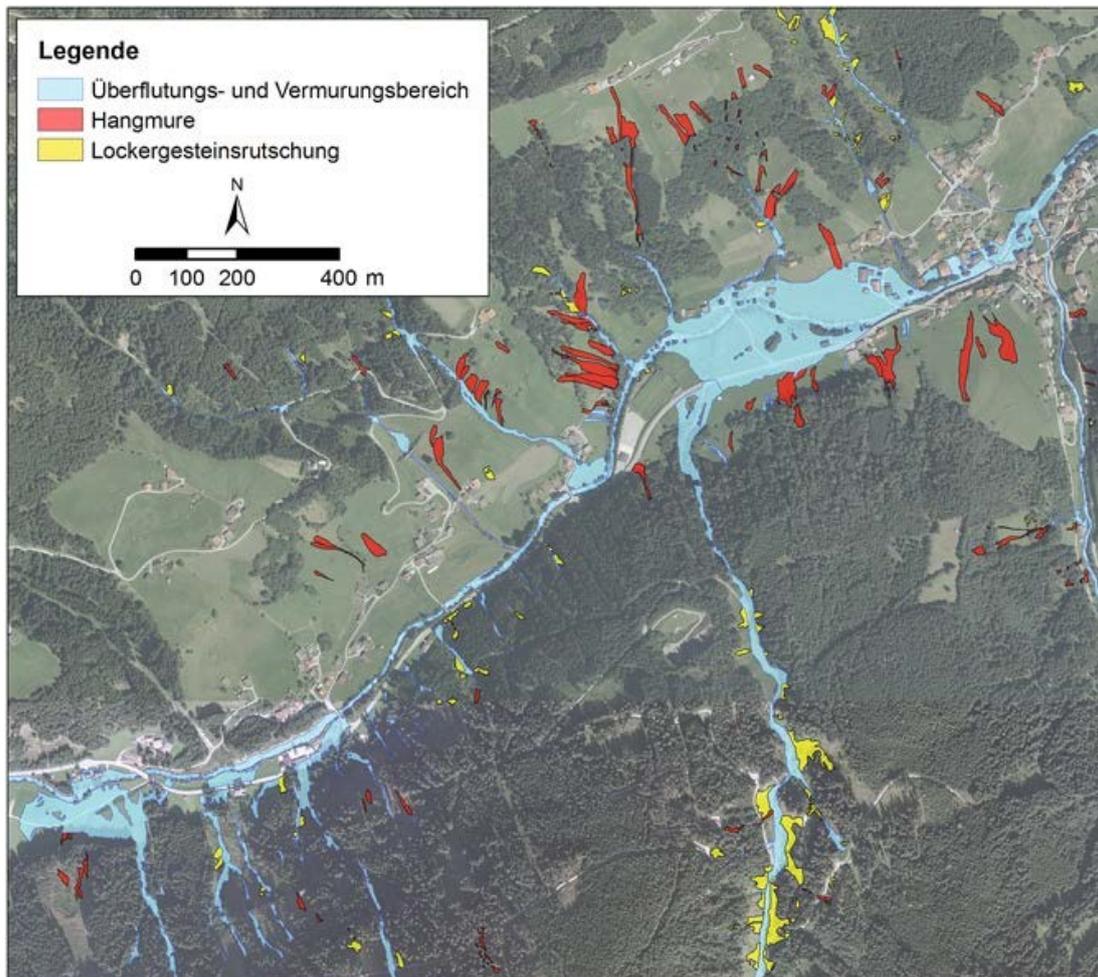


Abbildung 05: Auszug der Prozessdatenbank der Geologischen Bundesanstalt für das Gebiet »Sellrain (Tirol) Juni 2015« mit Informationen zu den Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren sowie zu den Überflutungs- und Vermurungsbereichen. Durch die Sohl- und Ufererosion entlang der Bäche wurden Lockergesteinsrutschungen ausgelöst, die wiederum beträchtlich zur Vermurung im Siedlungsbereich beigetragen hatten (Kaskadeneffekt).

Figure 05: Excerpt from the process database of the Geological Survey for the region »Sellrain (Tyrol) June 2015« including information on Soil and debris slides and hillslope debris flows as well as on flooded and debris covered areas. Due to riverbed erosion, landslides have been initiated which contributed significantly to the debris coverage in the settlements (cascading effect).

Bildquelle: Luftbild des TIRIS – Tiroler Rauminformationssysteme.

ereignis mit großen potenziellen Konsequenzen führen, welches als Einzelextremereignis zu betrachten ist. Ein prominentes Beispiel hierfür ist das Hangmureereignis in Danöfen (Vorarlberg) im August 2005, das Wohnhäuser involvierte (vgl. Abb. 06; Amt der Vorarlberger Landesregierung, 2005).

Dort bewegten sich tausende Kubikmeter Hangschutt talwärts, wodurch mehrere Wohnhäuser stark beschädigt wurden. Ein Wohnhaus musste sogar abgerissen werden, jedoch war nach der Errichtung eines Schutzdammes an gleicher Stelle ein Neubau möglich. Ein weiteres Beispiel für ein lokales Ein-

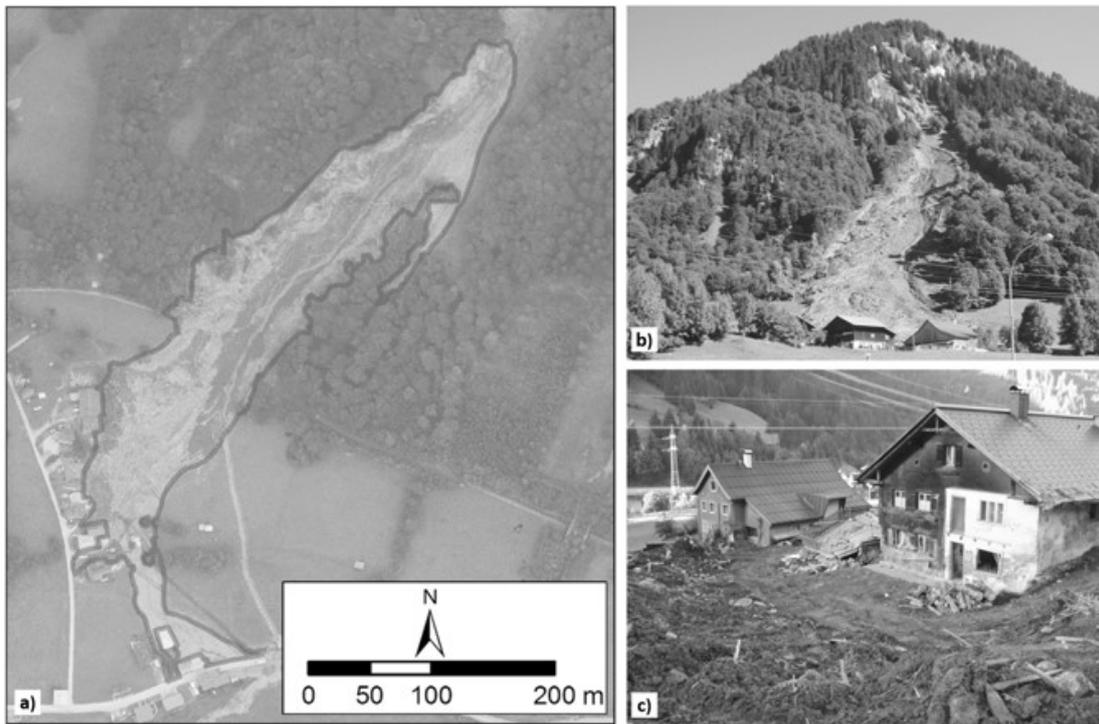


Abbildung 06: Beispiele für ein großes Einzelereignis: Hangmure bei Danöfen (Voralberg) am 23.08.2005.

Figure 06: Examples of a large individual extreme event: Hillslope debris flow near Danöfen (Voralberg) 23.08.2005.

Quellen: VOGIS – Vorarlberger Geographisches Informationssystem (a), Fotoquellen: Reiterer et al., 2018, 18–19 (b,c)

zelextremereignis ist eine große Lockergesteinsrutschung im oberen Drautal (Bereich Scheibenwand – Lienzer Klause) im Februar 2010, wo sich eine Kubatur mit einem Volumen von ca. 1 Mio. Kubikmeter talwärts bewegte, die Drau aufstaute und bis auf den unteren Gegenhang gelangte (Pargger, 2016). Die dort befindlichen Verkehrstrassen (Schiene, Straße) waren stark beschädigt und aufgrund der aufwändigen Sanierungsmaßnahmen lange Zeit nicht passierbar.

Wenn solche extremen Einzelereignisse in Folge eines extremen regionalen oder überregionalen Niederschlagsereignisses entstehen, sind sie aufgrund des lokal begrenzten enormen Schadens- und Gefahrenpotentials als alleinstehendes Extremereignis zu betrachten, auch wenn im Umfeld weitere zahlreiche kleinere Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren aufgetreten sind.

18.4 Einschätzung des Sachstandes und Unsicherheiten

18.4.1 Prozessdatenerhebung und -management

Daten zu gravitativen Lockergesteinsprozessen, insbesondere zu jenen im Zuge von Extremereignissen, werden durch viele Fachexperten verschiedener Institutionen und Organisationen mittels unterschiedlicher Methoden erhoben und gesammelt sowie zu digitalen Datensätzen aufbereitet. Aufgrund unterschiedlicher Erhebungsziele und -methoden führt dies zu vielen Teildatensätzen, die sich teilweise erheblich hinsichtlich der Datenformate/-inhalte und somit hinsichtlich der Qualitätsmerkmale unterscheiden. Dies stellt eine große Herausforderung für die Kompilation aller Daten zu einen gemeinsamen österreichweiten Datensatz dar (vgl. Kapitel 18.2).

In der Fachwelt gibt es eine übereinstimmende Meinung dahingehend, dass die verschiedenen Erhebungsmethoden unterschiedliche Leistungsmerkmale haben und deshalb durch deren Kombination eine deutliche Verbesserung hinsichtlich des Prozessverständnisses und der Datenqualität, und somit auch hinsichtlich der Aussagekraft für gefahrenpräventive Maßnahmen erreicht wird (Schweigl und Hervàs, 2009; ÖROK, 2015). Im Fall von regionalen Extremereignissen ist eine Kombination von verschiedenen Fernerkundungsmethoden mit Geländeerhebungsmethoden sehr vielversprechend. Dies liegt darin begründet, dass mittels der Auswertung von verschiedenen Fernerkundungsdaten schnell ein Überblick zu den Lockergesteinsprozessen der jeweils betroffenen Region erwartet werden kann. Dies kann per Drohne oder Flugzeug (u. a. Luftbilder (Tilch, 2014) und/oder Laserscans (Schwarz und Tilch, 2018)) sowie per satelliten-gestützter Systeme mit unterschiedlichen Sensoren (z. B. Hölbing et al., 2017) erfolgen. Durch zusätzliche Geländeerhebungen können die nicht per Fernerkundungsmethoden identifizierten Prozesse erfasst und zusätzlich Detaildaten zu den Prozessen und deren Materialien, wie auch zu den Standortfaktoren sowie zu den prozessauslösenden und -hemmenden Faktoren, erhalten werden (z. B. Tilch et al., 2017). Essentiell bei all diesen Methoden ist die möglichst genaue Verortung der Prozesse mit den jeweiligen Charakteristika (z. B. Fläche, Versatz, Gesteinsart, Reichweiten, ggfls. Volumen). Diese sogenannten Prozessinventare geben an sich einen räumlichen Überblick der Prozessverteilungen, stehen darüber hinaus aber auch für weiterführende Modellrechnungen zwecks flächendeckender und -detaillierter Rauminformationen (z. B. heuristischen Abschätzungen, statistischen Analysen und physikalisch-basierten Modellrechnungen) zur Verfügung.

Im Fall von lokalen Einzelextremereignissen variieren die Erhebungsmethoden erheblich, da diese sehr vom Prozesstyp und von der Fragestellung abhängen (u. a. Oberflächenanalyse mittels terrestrischen Laserscanner oder

UAV-Befliegungen bis zu Untergrunderkundungen mithilfe geotechnischer oder geophysikalischer Sondierungsverfahren). Zusätzlich werden im Fall von sich progressiv weiterentwickelnden Prozessen oft Monitoring-Systeme installiert (z. B. Supper und Baron, 2010; Stumvoll et al., 2019), um die zeiträumliche Variabilität des jeweiligen Lockergesteinsprozesses und der prozessauslösenden Faktoren zu beobachten und zu analysieren, was für eine Frühwarnung unerlässlich ist.

Unabhängig von Extremereignissen sind auch Kenntnisse zu allen sonstigen gravitativen Lockergesteinsprozessen im Betrachtungsraum von großer Wichtigkeit, da so erst eine hinreichende Prozessdatenlage entsteht, die für weiterführende Analysen – beispielsweise hinsichtlich der Frage, unter welchen Konditionen ein Extremereignis entsteht – sehr wichtig ist. Deshalb sind ergänzende, meist aufwändige Recherchen in zentralen und dezentralen Archiven immer begleitend durchzuführen.

An dieser Stelle sei betont, dass trotz größter Anstrengungen eine vollständige Prozessdatenlage nicht erreicht werden kann, da es sich bei den betrachteten gravitativen Lockergesteinsprozessen zumeist um Prozesse mit vergänglicher, also nicht dauerhaft identifizierbarer Prozessphänomenologie handelt (z. B. Tilch, 2014). Prozesse, die nicht in Archiven oder sonstigen Dokumenten aufscheinen, können demzufolge später auch weitestgehend nicht mehr identifiziert werden, trotz modernster Erkundungsmethoden. Umso mehr sollte sich daraus für die Zukunft der klare Forschungsauftrag ergeben, das auch zukünftig möglichst viele Prozessinformationen mit unterschiedlichen Erhebungsmethoden gesammelt und zu einem gesamthaften Datensatz zusammengeführt werden. Dies betrifft besonders die Datenaufnahme durch ein Expertenteam direkt nach einem Ereignis. Allerdings fehlen bisher harmonisierte österreichweite Mindeststandards hinsichtlich der Datenerhebung, was eine fachliche Datenkompilation erheblich erleichtern würde. Hinzu kommt, dass die Daten nach wie vor je nach den individuell verfügbaren IT-Technologien sowie Aufgaben- und Fragestellungen digital aufbereitet und verwaltet werden, was eine Zusammenführung aller verfügbaren Prozessdaten zu einer gemeinsamen österreichweiten zentralen Datenbank deutlich erschwert. Dennoch werden seitens der Geologischen Bundesanstalt im gesetzlichen Auftrag (Forschungsorganisationsgesetz, BGBl. 341/1981) seit Jahrzehnten Prozessdaten gesammelt und mit modernen IT-Technologien (u. a. GIS, Datenbank) aufbereitet und zusammengeführt (Tilch et al., 2011a).

18.4.2 Prozessdatenanalyse und Erstellung von gefahrenpräventiven Planungsgrundlagen

Wie im Fall der Erhebung und des Managements der Prozessdaten gibt es bisher in Österreich keine einheitliche, standardisierte Vorgehensweise im Rahmen der entsprechenden Datenanalyse, insbesondere hinsichtlich der Bereitstellung von gefahrenpräventiven Planungsgrundlagen (ÖROK, 2015). Erhebungs- und Managementverfahren werden von den jeweiligen involvierten Institutionen unterschiedlich und orientiert an der jeweiligen Fragestellung durchgeführt. Grundsätzlich besteht einhellige Meinung bei den Fachexperten dahingehend, dass die beste Gefahrenprävention vor Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren darin besteht, dass die bisher von diesen Prozessen betroffenen Hangbereiche im Rahmen nachfolgender Baumaßnahmen berücksichtigt werden sollten. Dies kann einerseits durch entsprechende hangstabilisierende Maßnahmen oder Schutzbauwerke erfolgen (z. B. BMNT/BMLFUW, 2015). Andererseits besteht die Möglichkeit des Meidens bzw. Umgehens der Prozessbereiche, insbesondere jener mit progressiven und initialen bis intermediären Entwicklungsstadien (z. B. Tilch et al., 2015).

Allerdings besteht bei diesen Vorgehensweisen im Fall von regionalen Betrachtungen das Problem, dass nur die bekannten Prozessräume für gefahrenpräventive Maßnahmen berücksichtigt werden, während unklar bleibt, wie viele Ereignisse, die u. U. vor längerer Zeit stattfanden, nicht bekannt sind und wo wann welche Prozesse zukünftig entstehen könnten. Diesen Umstand wurde in den vergangenen Jahrzehnten nicht zuletzt aufgrund der IT-Entwicklungen zunehmend mit Modellrechnungen begegnet, welche für die entsprechende Region flächendeckende und -detaillierte Karten mit Informationen zur räumlich variablen Prozessdisposition der Hänge liefern, die als Prozessdispositionskarten oder Gefahrenhinweiskarten bezeichnet werden (u. a. Tilch et al., 2011b; Glade et al., 2012; Petschko et al., 2014). In jüngster Zeit werden im Rahmen solcher Modellrechnungen auch zunehmend variable Niederschläge als ursächlich prozessauslösender Faktor berücksichtigt, was in gewisser Weise eine Ergebnisprojektion in mögliche zukünftige Niederschlagsszenarien (z. B. extreme Niederschlagsverteilung, -intensität, -summe) ermöglicht (z. B. Schwarz und Tilch, 2017; Canli et al., 2017, 2018). Andere Ansätze integrieren unterschiedliche Landnutzungen in die räumlichen Modellierungen (z. B. Schmaltz et al., 2019).

Hinsichtlich der verwendeten Modellrechnungen lassen sich grob physikalisch basierte, statistische und heuristische Methoden unterscheiden, die sich erheblich hinsichtlich des Anspruches an die Prozessdatenqualität unterscheiden: Während heuristische Methoden Prozessdaten nur für eine Validierung des Modellergebnisses benötigen, werden für statistische Methoden zwecks Mo-

delltraining und Validierung möglichst vollständige oder zumindest repräsentative Prozessdatensätze mit hoher Datenqualität benötigt, da sonst Ergebnisse zufällig hoher oder geringer Güte erzeugt werden (vgl. Abb. 07; Tilch et al., 2011b, 2013; ÖROK, 2015). Hierbei muss besonders auf die Qualität der finalen Kartenwerke geachtet werden (z. B. bei Rutschungsinventaren; Steger et al., 2016). Im Gegensatz zu den statistischen Modellrechnungen werden für physikalisch basierte Modellrechnungen zudem nicht nur relative, qualitative Daten, sondern quantitative Daten zur räumlich variablen Beschaffenheit der Standortfaktoren benötigt, die es häufig, insbesondere für größere Regionen, nicht gibt und die mit aufwändigen Methoden, z. B. mittels Feldkartierungen, erhoben werden müssten. All dies sind Gründe, warum die verschiedenen Modellierungsarten ihre Vor- und Nachteile haben, die nach Fragestellung und vorhandener gesamthafter Datenlage zum Tragen kommen (ÖROK, 2015).

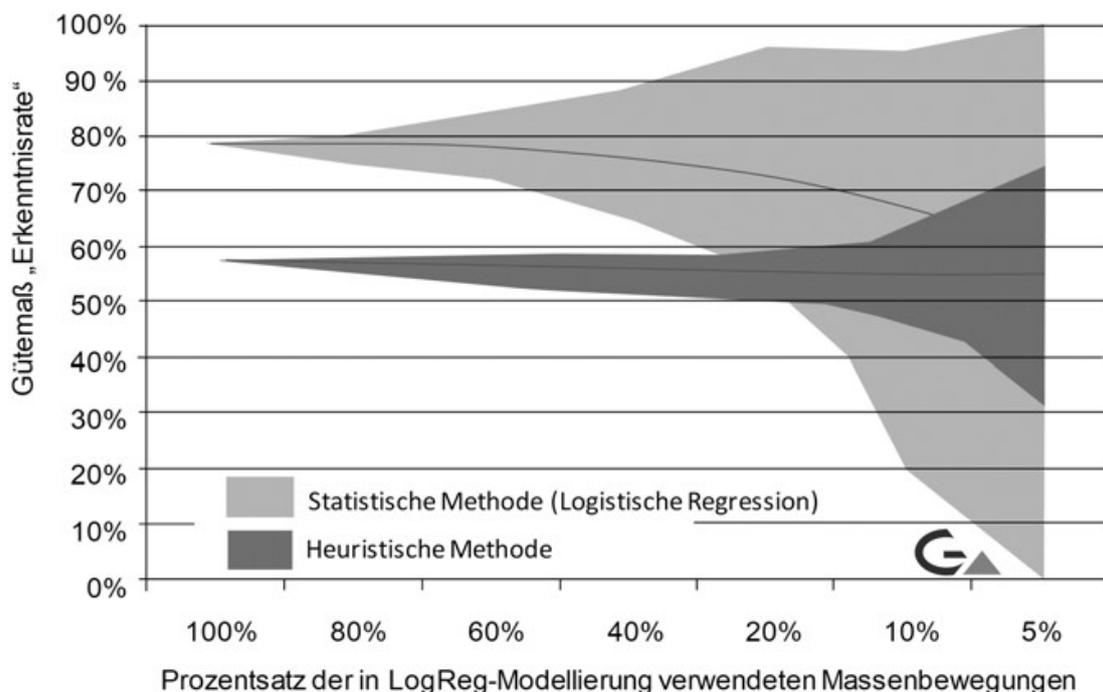


Abbildung 07: Streuung des Validierungsmaßes bzw. Gütemaßes »Erkenntnisrate« in Abhängigkeit von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Prozess-Daten (100 %: n = 368) und der angewendeten Modellierungsmethode am Beispiel der Modellergebnisse für die Region Gasen-Haslau (Steiermark).

Figure 07: The spread of the validation measure and the quality criterion »success rate« respectively according to the total number of available process data (100 %: n = 368) and the applied modelling method for the example of the region Gasen-Haslau (Styria).

Quelle: verändert nach ÖROK (2015)

Ferner werden für alle regionalen Modellanwendungen flächendeckende und möglichst flächendetaillierte Daten zu den räumlich variablen prozessrelevanten Standortfaktoren benötigt. Da diese nicht verfügbar sind, werden oft von den

allgemein verfügbaren Basisdaten (z. B. digitales Höhenmodell, Landnutzungskarte, Geologische Karte) ausgehend sogenannte Parameterkarten als Derivate abgeleitet. Die Verwendung insbesondere von Basisdaten mit klassifizierten Einheiten (z. B. Landnutzungskarte, Geologische Karte) beinhaltet jedoch zahlreiche Unsicherheiten, da deren Erstellung auf andere Fragestellungen und Zielsetzungen abzielt und somit die kartenspezifische Klassifikation oft keine direkte Prozessrelevanz hat. Deshalb müssen aus solchen Basisdaten in weiterer Folge mittels Expertenmethoden, die verschieden und individuell sind, prozessrelevante Parameterkarten abgeleitet werden (z. B. Tilch et al., 2011b; Lima et al., 2017). Solche Parameterkarten sind jedoch aufgrund des den jeweiligen Basisdaten zugrundeliegenden Maßstabes oft nicht für großmaßstäbige oder kleinräumige Fragestellungen geeignet. Dies wurde in der Vergangenheit immer wieder dadurch bestätigt, dass die berücksichtigten Parameterkarten, insbesondere jene, die auf Geologischen Karten basierten, meist keinen oder nur geringen Einfluss auf das Ergebnis von statistischen Modellrechnungen hatten. Vor diesem Hintergrund wurde in den letzten Jahren damit begonnen, nach methodischen Alternativlösungen zu suchen. Ein diesbezüglich optimistisch stimmender Ansatz ist beispielsweise, dass aeroradiometrische Daten als Prädiktorvariable zwecks flächendetaillierter Ausweisung von Bereichen gleicher bzw. unterschiedlicher Lockergesteinsbeschaffenheit herangezogen werden (Tilch et al., 2018, 2019). Aufgrund der Unsicherheiten müssen die modellierten Gefahrenhinweiskarten schlussendlich unbedingt validiert und evaluiert werden (u. a. Steger et al., 2016; Steger und Glade, 2017). Hierfür gibt es verschiedenste Methoden (ÖROK, 2015), die jedoch im Fall von Einzelanwendungen zu recht unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Deshalb wird auch seitens ÖROK (2015) empfohlen, stets eine Kombination verschiedener Validierungs- und Evaluierungsmethoden anzuwenden.

Über die Modellierung von potentiellen Entstehungsorten von gravitativen Lockergesteinsprozessen hinausgehend werden zunehmend Modellrechnungen hinsichtlich der Abschätzung der Reichweite bzw. Prozessbereiche von Hangmuren durchgeführt (Mergili et al., 2019), was sehr wichtig für eine Abschätzung von potentiellen Schaden- und Gefahrenbereichen ist. Allerdings bestehen noch zahlreiche Daten- und Modellunsicherheiten, so dass im Hinblick auf verlässliche Modellergebnisse noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Für Fragestellungen im Kontext mit zukünftigen Klimaentwicklungen ist es erforderlich die Schwellenwerte der prozessauslösenden Faktoren im Kontext zu den jeweils gebietsspezifisch vorhandenen räumlich variablen natürlichen und anthropogenen Standortfaktoren zu kennen. Diesbezüglich gibt es bereits eine Vielzahl von Fallstudien, die sich jedoch zumeist auf gut untersuchte und mit Monitoring-Systemen ausgestattete Einzelprozesse beziehen (z. B. Supper et al., 2014; Stumvoll et al., 2019). Eine Übertragbarkeit der diesbezüglichen Er-

kenntnisse auf andere Standorte oder gar flächendetailliert auf ganze Regionen ist im Regelfall nicht möglich. Deshalb muss sich für regionale Fragestellungen auf gebietsintegrale statistische Analysemethoden beschränkt werden, mittels derer Niederschlag-bezogene Schwellenwerte für bekannte regionale Extremereignisse der Vergangenheit in Abhängigkeit von den regionalspezifisch dominanten Standortfaktoren abgeleitet werden (z. B. Canli et al., 2017, 2018).

18.5 Mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen

Auf Basis der vorhandenen Kenntnisse zu Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren ist es sehr schwer zukünftige Prozessentwicklungen abzuschätzen. Als gesichert kann gelten, dass diese Prozesse wie in der Vergangenheit und Gegenwart auch in der Zukunft auftreten werden, da noch genügend mobilisierbare Lockersubstrate in den Hängen vorhanden sind.

Inwieweit sich die Einflüsse des Menschen und des Klimawandels auf die komplexen Hangsysteme und somit auch auf die zukünftigen Prozessentwicklungen auswirken, ist zwar in der Forschung thematisiert (z. B. Glade et al., 2014), jedoch noch kaum untersucht. Es kann erwartet werden, dass solche gravitativen Lockergesteinsprozesse sicherlich vor allem in den bekannten, empfindlichen Gebieten auftreten werden, entweder als Neuinitiiierungen an bisher unbekanntem oder bekanntem, aber noch nicht betroffenen Stellen oder in Lokalisationen, die früher bereits einmal aktiv waren und die sich ggffls. weiter hangaufwärts ausweiten.

Unter den Wissenschaftler*innen Österreichs besteht weitestgehend Konsens dahingehend, dass sich durch die mit den prognostizierten steigenden Lufttemperaturen einhergehende steigende Frequenz und Intensität der Niederschlagsextrema sehr bedeutsam auf die Intensität und Frequenz des Auftretens zukünftiger Extrema gravitativer Lockergesteinsprozesse auswirken wird (Andrecs et al., 2010). Allerdings ist die zukünftige Entwicklung der lokalen bis regionalen Niederschlagsextrema derzeit noch nicht sicher, hier besteht erheblicher Forschungsbedarf (u. a. Kromp-Kolb et al., 2014).

In allen Szenarien wird der regionale und globale Wandel von großer Bedeutung sein (Meusburger und Alewell, 2008; Glade et al., 2014). Dieser Wandel beinhaltet ganz maßgeblich die Veränderungen durch das Klima, seien es erhöhte und vermehrte Starkniederschläge oder die veränderten Niederschlagsformen durch wärmere Winter, aber auch durch intensive Kälteperioden mit erhöhtem Schneefall und daraus folgend später im Jahr eine große Wassersättigung des Untergrundes während und nach der Schneeschmelze. Der Wandel

beinhaltet aber auch anthropogene Eingriffe, z. B. die Veränderungen der Vegetationsbedeckung mit den dadurch veränderten Hangstabilitäten oder die Modifikation der Hanghydrologie, sei es durch die Ab- und Umleitung des Oberflächenabflusses oder durch den Einbau von Hangdrainagen. Zusätzlich können Hangsysteme auch komplett modifiziert werden, wenn beispielsweise Hangbereiche für den Tourismus begradigt wurden, oder Hänge großflächig und dauerhaft bewässert werden. Erschwerend kommt hinzu, dass manche der Veränderungen zeitgleich ablaufen, manche aber erst mit einem Zeitversatz von einigen Monaten bis zu mehreren Jahren stattfinden – das erschwert die Abschätzung der zukünftigen Prozessverhaltens bei Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren immens (Glade et al., 2014).

Eine der grundlegenden Fragen bezüglich der zukünftig zu erwartenden Extremereignisse ist, inwieweit die bisher existierenden Konzepte und Methoden der Analyse der Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren überhaupt geeignet sind, mögliche zukünftige Extreme abzubilden. Es bleibt festzustellen, dass die bisherigen Konzepte und Methoden nur begrenzt für die Abschätzung von Extremen herangezogen werden können. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass die Datenlage zu weiter zurückliegenden Extremen zu lückenhaft ist, bzw. die vorliegenden Daten nur begrenzte Aussagen zu den damals relevanten vorbereitenden, bewegungsauslösenden und -kontrollierenden Faktoren zulassen. Andererseits sind auch die meisten der existierenden Modellansätze nur sehr bedingt geeignet zukünftige Extremereignisse abzuschätzen, da vollkommen unklar ist, ob die Modelle sich überhaupt für Extreme eignen, da entsprechende Validierungen nicht möglich sind.

Auch im gesellschaftlichen Kontext ist eine Einordnung von Extremereignissen bei Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren eine große Herausforderung. Die Gesellschaft wirkt auf vielfältige Weise auf den Naturraum ein, sei es verursacht durch die Bevölkerungs- oder Tourismusentwicklung im Alpenraum, sei es aber auch durch einen veränderten Schutzbedarf, der nicht zuletzt aufgrund einer limitierten Nutzungsflächen entsteht. Die daraus resultierenden Wechselwirkungen beeinflussen somit auch die Exposition und Vulnerabilität der Gesellschaft durch Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren. Einerseits beinhalten die Extremereignisse ein sehr großes Bedrohungspotential für die exponierten Gesellschaftssysteme, andererseits muss man sich auch verdeutlichen, dass auch in der geologischen Erdgeschichte die Extremereignisse zur ganz natürlichen und normalen Landschaftsentwicklung gehören.

18.6 Perspektiven für Handlungsoptionen

Die Handlungsoptionen bei Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren variieren hinsichtlich der Extremereignisse sehr stark. In allen Fällen ist es grundlegend unabdingbar, dass langfristige Monitoring-Programme etabliert werden, sei es bei Extremereignissen an einzelnen Lokalitäten oder im Raum. Im Fall von progressiven Prozessen müssen die Veränderungen an den Oberflächen der bewegten Massen genauso kontinuierlich und in der erforderlichen Auflösung beobachtet und dokumentiert werden wie die Veränderungen im Untergrund, sei es in Bezug auf Verschiebungsmessungen oder hinsichtlich der Variationen der Hanghydrologie und Hanghydrogeologie. Nur mit einem solchen kontinuierlichen Monitoring (z. B. Stumvoll et al., 2019), wie es ja auch in anderen Prozessbereichen vollkommen üblich ist (u. a. Windgeschwindigkeit bei Stürmen, Wasserstand bei Flüssen, Höhe von Schneedecken), kann auch das grundlegende Prozessverständnis verbessert werden, können die existierenden Modelle angepasst werden und können final auch potentielle zukünftige Extremereignisse besser abgeschätzt werden. Nur mit dieser Kenntnis können zukünftige Handlungsoptionen adaptiert und entsprechend an die Erfordernisse durch die Extremereignisse angepasst werden (z. B. Schlögl und Matulla, 2018), sei es auf der Hangskala für Einzelobjekte oder auf der Regionalskala für große Gebiete mit vielen Quadratkilometern Ausdehnung. Da diese Informationen momentan aber noch nicht in der erforderlichen Güte vorliegen, muss versucht werden, Extremereignisse gemäß des momentanen Kenntnisstandes zu adressieren – trotz der vielen Unbekannten.

Im Risikomanagementzyklus müssen in Bezug auf die direkte Bewältigung von Extremereignissen schnell Einsatzkräfte im Sinne einer Task Force zur Verfügung stehen, um einerseits mit den Extremereignissen umzugehen, um aber andererseits auch eine genaue Dokumentation dieser Großereignisse zu ermöglichen (Hübl et al., 2002). Nur damit lassen sich nachhaltige Erkenntnisse aus diesen Ereignissen für zukünftige Extreme ziehen. Für den Wiederaufbau nach einem solchen Extremereignis müssen entsprechende Ressourcen bereitstehen, es muss aber auch eine sorgfältige Planung im Sinne einer zukünftigen Gefährdungsabschätzung und Risikodarstellung vorliegen, um eine nachhaltige Entwicklung zu ermöglichen. Hierbei spielt die Vorsorge eine zentrale Rolle. Dies beinhaltet geotechnische Maßnahmen im Sinne von Schutzbauwerken genauso wie eine zukunftsorientierte Raumplanung, die zukünftig potentiell gefährdete Gebiete berücksichtigt (Pomaroli et al., 2011). Hierzu müssen bereits vorbeugend die potenziellen »Hot Spots« der potenziell zukünftigen Gefahrenstellen erfasst werden. Schlussendlich müssen alle beteiligten Akteure, seien es die betroffenen Behörden, Firmen oder Privatpersonen, besser informiert und geschult werden, um die Extremereignisse besser zu verstehen und mit

diesen in der Zukunft besser umgehen zu können. Die oftmals komplizierten wissenschaftlichen Methoden, Ergebnisse und Erkenntnisse sollten deshalb für Entscheidungsträger und fachfremde Experten sowie für die Bevölkerung immer so aufbereitet werden, dass diese auch verstanden werden können. Diesbezüglich gibt es bereits viele Ansätze (z. B. Glade et al., 2013; Schwarz und Tilch, 2017) und Praxisbeispiele.

Zukünftig sollten solche Aspekte in Form von Citizen Science- und Sparkling Science-Projekten und -Programmen behandelt werden. Das »Denke das Undenkbare« soll also keine Verunsicherung oder gar Panik produzieren, sondern ganz im Gegenteil – es soll vor dem Ereignis die verschiedenen Optionen durchdacht worden sein um dann im real eintretenden Fall die bestmöglichen Handlungsoptionen zu kennen und anzuwenden.

Literatur

- Amt der Vorarlberger Landesregierung, 2005. Das Starkregen- und Hochwasserereignis des August 2005 in Vorarlberg. Ein Bericht des Amtes der Vorarlberger Landesregierung, Bregenz, 54 S.
- Andrecs, P., Hagen, K., Fromm, R., Gauer, P., Höller, P., Klebinder, K., Kohl, B., Lang, E., Markart, G., Perzl, F., Stary, U., Zeidler, A., 2010. Analyse der Sicherheit und Genauigkeit von Bemessungswerten bei gravitativen alpinen Naturgefahren und Ableitung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel. Endbericht des BFW im Auftrag des BMLFUW im Rahmen des Projektes AdaptEvent, Wien, 321 S.
- Andrecs, P., Hagen, K., Lang, E., Stary, U., Gartner, K., Herzberger, E., Riedel, F., Haiden, T., 2007. Dokumentation und Analyse der Schadensereignisse 2005 in den Gemeinden Gasen und Haslau (Steiermark). BFW-Dokumentation 6, Wien, 75 S.
- BMNT/BMLFUW, 2015. Leben mit Naturgefahren – Ratgeber für die Eigenvorsorge bei Hochwasser, Muren, Lawinen, Steinschlag und Rutschungen. Ratgeber des BMNT/BMLFUW, Wien, 35 S.
- Brönnimann, C.S., 2011. Effect of Groundwater on Landslide Triggering. Doktorarbeit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 223 S.
- Canli, E., Loigge, B., Glade, T., 2017. Spatially distributed rainfall information and its potential for regional landslide early warning systems. *Natural Hazards*, 91(1), S. 103–127.
- Canli, E., Mergili, M., Thiebes, B., Glade, T., 2018. Probabilistic landslide ensemble prediction systems: lessons to be learned from hydrology. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), S. 2183–2202.
- Chiffard, P., Tilch, N., 2013. Learning from Nature – Mapping of Complex Hydrological and Geomorphological Process Systems for More Realistic Modelling of hazard-related maps. 44. Jahrestreffen des Arbeitskreises Hydrologie in Lunz am See, 15.–17. November 2012, *Geographica Augustana*, S. 134–137.
- Clar, E., 1959. Geologische Beobachtungen von der steirischen Unwetterkatastrophe vom August 1958. *Geologie und Bauwesen*, 24(1), S. 131–140.

- Glade, T., Bell, R., Dobesberger, P., Embleton-Hamman, C., Fromm, R., Fuchs, S., Hagen, K., Hübl, J., Lieb, G., Otto, J.-C., Perzl, F., Peticzka, R., Pranger, C., Samimi, C., Sass, O., Schöner, W., Schröter, D., Schrott, L., Zangerl, C., Zeidler, A., 2014. Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (Hrsg.), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, S. 557–600.
- Glade, T., Petschko, H., Bell, R., Bauer, C., Granica, K., Heiss, G., Leopold, P., Pomaroli, G., Proske, H., Schweigl, J., 2012. Landslide susceptibility maps for Lower Austria – Methods and Challenges. In: G. Koboltschnig, J. Hübl, J. Braun (Hrsg.), *Interpraevent Conference Proceedings. Presented at the 12th Congress Interpraevent 2012, International Research Society Interpraevent, Grenoble*, S. 497–508.
- Glade, T., Petschko, H., Bell, R., Leopold, P., Proske, H., 2013. Karten zu gravitativen Massenbewegungen: Möglichkeiten und Grenzen ihrer Aussagekraft. *Raumdialog – Magazin für Raumplanung und Regionalentwicklung in Niederösterreich*, 2, S. 10–13.
- Haberler, A., Schwarz, L., Lotter, M., Kociu, A., 2009. Rutschungen in der Katastrophenregion Feldbach (Steiermark) im Sommer 2009. In: *Geoforum Tirol (Hrsg.), Tagungsband mit Kurzfassungen. 11. Geoforum, Niederthai/Umhausen*, 1 S.
- Hölbling, D., Eisank, C., Albrecht, F., Vecchiotti, F., Friedl, B., Weinke, E., Kociu, A., 2017. Comparing Manual and Semi-Automated Landslide Mapping Based on Optical Satellite Images from Different Sensors. *Geosciences*, 7(2), S. 37.
- Hornich, R., Paar, P., Baumann, N., Adelwöhrer, R., Prem, E., 2009. *Leistungsbericht 2009 der Abteilungsgruppe Landesbaudirektion Fachabteilung 19B des Amtes der steirischen Landesregierung*. Graz, 41 S.
- Hübl, J., Kienholz, H., Loipersberger, A. (Hrsg.), 2002. *DOMODIS – Documentation of Mountain Disasters, State of Discussion in the European Mountain Areas*. Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Schriftenreihe 1, Handbuch 1.
- Hübl, J., Kociu, A., Krissl, H., Lang, E., Länger, E., Rudolf-Miklau, F., Moser, A., Pichler, A., Rachoy, Ch., Schnetzer, I., Skolaut, Ch., Tilch, N., Totschnig, R., 2009. *Alpine Naturkatastrophen – Lawinen-Muren-Felsstürze-Hochwässer*. Leopold Stocker-Verlag, Graz, 120 S.
- Janu, S., Mehlhorn, S., Moser, M., 2013. Ereignisdokumentation und Analyse des Ereignisses vom 21. Juli 2012 in St. Lorenzen. *Bericht der Wildbach- und Lawinenverbauung*, 77(171), S. 208–219.
- Kociu, A., Kautz, H., Tilch, N., Grösel, K., Heger, H., Reischer, J., 2007. Massenbewegungen in Österreich. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt* 147(1/2), S. 215–220.
- Kromp-Kolb, H., Nakicenovic, N., Steininger, K., Gobiet, A., Formayer, H., Köppl, A., Prettenthaler, F., Stötter, J., Schneider, J. (Hrsg.), 2014. Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 1096 S.
- Lager, M. 2015. Sellraintal Juni 2015. Hangexplosionen und Muren – Eine Bestandsaufnahme. Tagungsband zum 17. Geoforum Umhausen, Niederthai, Innsbruck, S. 4–11.
- Lima P., Steger S., Glade T., Tilch N., Schwarz L., Kociu A., 2017. Landslide susceptibility mapping at national scale: a first attempt for Austria. In: M. Mikos, B. Tiwari, Y. Yin, K. Sassa (Hrsg.), *Advancing Culture of Living with Landslides. 4th World Landslide Forum (WLF4)*, Ljubljana, Springer, Cham, S. 943–951.

- Markart, G., Perzl, F., Kohl, B., Lizian, R., Kleemayr, K., Ess, B., Mayerl, J., 2007. 22. und 23. August 2005 – Analyse von Hochwasser- und Rutschereignissen in ausgewählten Gemeinden Vorarlbergs. BFW-Dokumentation 5, Innsbruck, 43 S.
- Mergili, M., Schwarz, L., Kociu, A., 2019. Combining release and runout in statistical landslide susceptibility modeling. *Landslides*, 16(11), S. 2151–2165.
- Meusburger, K., Alewell, C., 2008. Impacts of anthropogenic and environmental factors on the occurrence of shallow landslides in an alpine catchment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, S. 509–520.
- Moser, M., 1973. Analyse der Abruchsbildung bei den Hochwasserkatastrophen der Jahre 1965 und 1966 im mittleren Lesachtal (Kärnten). *Carinthia II*, 162./83. Jahrgang, S. 179–234.
- ÖROK (Hrsg.), 2015. Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung. ÖROK Schriftreihe 193, Wien.
- Pargger, M., 2016. Die instabile Talflanke südlich der Lienzer Klause – Osttirol. Masterarbeit, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Innsbruck, 254 S.
- Petschko, H., Brenning, A., Bell, R., Goetz, J., Glade, T., 2014. Assessing the quality of landslide susceptibility maps – case study Lower Austria. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(1), S. 95–118.
- Pomaroli, G., Bell, R., Glade, T., Heiss, G., Leopold, P., Petschko, H., Proske, H., Schweigl, J. 2011., Darstellung der Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen im Bundesland Niederösterreich als Grundlage der Raumplanung. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 166, S. 198–213.
- Ray, R. L., Jacobs, J. M., de Alba, P., 2010. Impacts of unsaturated zone soil moisture and groundwater table on slope instability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(10), S. 1448–1458.
- Reiterer, A., Wöhler-Alge, M., Burtscher, D., 2018. Best Practices in der Risikoabschätzung und Gefahrenzonenplanung in Vorarlberg.
- Richter, H., 1958. Die Wildbachkatastrophen des Jahres 1958 in Steiermark und Kärnten. *Österreichische Wasserwirtschaft*, 10(11), S. 241–247.
- Rokic, L.J., 2011. *Fizicka geologija*, Sarajevo.
- Schlögl, M., Matulla, Ch., 2018. Potential future exposure of European land transport infrastructure to rainfall-induced landslides throughout the 21st century. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, S. 1121–1132.
- Schmaltz, E., van Beek, L.P.H., Bogaard, T.A., Kraushaar, S., Steger, S., Glade, T., 2019. Strategies to improve the explanatory power of a dynamic slope stability model by enhancing land cover parameterisation and model complexity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(6), S. 1259–1273.
- Schwarz, L., Tilch, N., 2017. Generating Application-oriented susceptibility maps for shallow landslides understandable to the general public. *Tagungsband des 4th World Landslide Forum*, Ljubljana, S. 869–880.
- Schwarz, L., Tilch, N., 2018. Einfluss unterschiedlicher Prozessdatenquellen (ALS, Luftbild) auf die Modellierung von Prozessdispositionskarten für flachgründige Massenbewegungen im Lockergestein – Fallstudie Bregenzerwald. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 158(1–4), S. 73–103.

- Schweigl, J., Hervás, J., 2009. Landslide mapping in Austria. European Commission Joint Research. JRC Scientific and Technical Reports. Centre Institute for Environment and Sustainability, Luxemburg, 65 S.
- Steger, S., Brenning, A., Bell, R., Petschko, H., Glade, T., 2016. Exploring discrepancies between quantitative validation results and the geomorphic plausibility of statistical landslide susceptibility maps. *Geomorphology*, 262, S. 8–23.
- Steger, S., Glade, T., 2017. The Challenge of »Trivial Areas« in Statistical Landslide Susceptibility Modelling. In: M. Mikos, B. Tiwari, Y. Yin, K. Sassa (Hrsg.), *Advancing Culture of Living with Landslides. 4th World Landslide Forum (WLF4)*, Ljubljana, Springer, Cham, S. 803–808.
- Stiny, J. (1938). Über die Regelmäßigkeit der Wiederkehr von Rutschungen, Bergstürzen und Hochwasserschäden in Österreich. *Geologie und Bauwesen*, 2, S. 10–48.
- Stumvoll, M.J., Canli, E., Engels, A., Thiebes, B., Groiss, B., Glade, T., Schweigl, J., Bertagnoli, M., 2019. The »Salcher« landslide observatory – Experimental long-term monitoring setup in the Flysch Zone of Lower Austria. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, S. 1–18.
- Supper, R., Baron, I. (Hrsg.), 2010. Landslide: Monitoring Technologies & Early Warning Systems – Current Research and Perspectives for the Future. Book of extended abstracts, open workshop in frame of the EU FP7 »Safeland« project, February 24th. *Berichte der Geologischen Bundesanstalt*, 82, 68 S.
- Supper, R., Ottowitz, D., Jochum, B., Kim, J.-H., Römer, A., Baron, I., Pfeilder, S., Lovisolo, M., Gruber, S., Vecchiotti, F., 2014. Geoelectrical monitoring: an innovative method to supplement landslide surveillance and early warning. *Near Surface Geophysics*, 12, S. 133–150.
- Tilch, N., 2009. Gravitative Massenbewegungen in der Katastrophenregion Klingfurth (Walpersbach, Südliches Niederösterreich) im Juni 2009 – Erkundungsergebnisse und eine erste Abschätzung des rutschungsinduzierten Gefahrenpotentials. 11. Geoforum Umhausen 15.–16.10.09, Niederthai.
- Tilch, N., 2014. Identifizierung gravitativer Massenbewegungen mittels multitemporaler Luftbildauswertung in Vorarlberg und angrenzender Gebiete. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 154(1–4), S. 21–39.
- Tilch, N., Gruber, A., Schattauer, I., Motschka, K., 2019. Potentiale aerogeophysikalischer Methoden für Fragestellungen im Rahmen der Geologischen Landesaufnahme. In: G.E.U. Griesmeier, C. Iglseder (Hrsg.), *Arbeitstagung 2019 der Geologischen Bundesanstalt – Geologie des Kartenblattes GK25 Radenthein-Ost*, Murau 24.–27. Juni 2019, Tagungsband, Geologische Bundesanstalt, Wien, S. 196–202.
- Tilch, N., Haberler, A., Koçiu, A., 2017. Wissenschaftliche Dokumentation von Rutschungen und Hangmuren im Konnex zur Unwetterkatastrophe in Stanz im Mürztal (Steiermark) im Juli 2016. In: I. Wimmer-Frey, A. Römer, C. Janda (Hrsg.), *Arbeitstagung 2017 – Angewandte Geowissenschaften an der Geologischen Bundesanstalt*, 19.–22. Juni 2017, Bad Ischl, Hallstatt, Gmunden, S. 223–224.
- Tilch, N., Kociu, A., Haberler, A., Melzner, S., Schwarz, L., Lotter, M., 2011a. The Data Management System GEORIOS of the Geological Survey of Austria (GBA). In: Moelk et al. (Hrsg.), *Interdisciplinary workshop on rock fall protection 2011*, Innsbruck, S. 31–32.

- Tilch, N., Schwarz, L., Hagen, K., Aust, G., Fromm, R., Herzberger, E., Klebinder, K., Perzl, F., Proske, H., Bauer, Ch., Kornberger, B., Kleb, U., Granica, K., Pistotnik, G., Haiden, Th., 2011b. Modelling of Landslide Susceptibility and affected Areas – Process-specific Validation of Databases, Methods and Results for the Communities of Gasen and Haslau (AdaptSlide). Endbericht des Projektes ADAPTSLIDE im Rahmen des EU-Projektes ADAPTALP, Wien/Innsbruck/Graz, 325 S.
- Tilch, N., Schwarz, L., Kociu, A., Proske, H., Bauer, Ch., Hagen, K., Klebinder, K., Lang, E., Andrecs, P., Schmid, F., Ribitsch, R., Hermann, S., Loizenbauer, J., Pistotnik, G., 2015: Gefahrenprävention – von Katastrophen für die Zukunft lernen und Planungsgrundlagen schaffen. In: R. Schuster, T. Ilickovic (Hrsg.), Geologie der Kartenblätter GK50 ÖK 103 Kindberg und ÖK 135 Birkfeld. Tagungsband der Arbeitstagung 2015 der Geologischen Bundesanstalt, Mitterdorf im Müürztal (Stmk), S. 155–160.
- Tilch, N., Schwarz, L., Koçiu, A., Winkler, E., Motschka, K., 2018. Potentiale aerogeophysikalischer Daten hinsichtlich der Modellierung von realitätsnäheren Dispositionskarten für flachgründige Massenbewegungen – eine Fallstudie im Bregenzerwald (Vorarlberg, Österreich). Tagungsband zum 20. Geoforum Umhausen, Niederthai, S. 240–245.
- Tilch, N., Schwarz, L., Winkler, E., 2013. Gefahren(hinweis)karten für gravitative Massenbewegungen – Herausforderungen, Limitierungen, Chancen. Berichte der Geologischen Bundesanstalt, 100, S. 47–53.
- Zettl, H., 1958. Die Unwetterkatastrophe in der Steiermark am 12. und 13. August 1958. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, 23, 17 S.
- Zieher, T., Markart, G., Ottowitz, D., Römer, A., Rutzinger, M., Meißl, G., Geitner, C., 2017. Water content dynamics at plot scale – comparison of time-lapse electrical resistivity tomography monitoring and pore pressure modelling. *Journal of Hydrology*, 544, S. 195–209.

Thomas Glade / Martin Mergili / Katrin Sattler (Hg.)

ExtremA 2019

Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen
alpiner Naturgefahren in Österreich

Vienna University Press





unipress

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

Thomas Glade / Martin Mergili /
Katrin Sattler (Hg.)

ExtremA 2019

Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen
alpiner Naturgefahren in Österreich

Mit 150 Abbildungen

V&R unipress

Vienna University Press



universität
wien

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://dnb.de> abrufbar.

**Veröffentlichungen der Vienna University Press
erscheinen bei V&R unipress.**

Vorgeschlagene Zitierweise:

Gesamtes Buch:

Glade, T., Mergili, M., Sattler, K. (Hrsg.), 2020. ExtremA 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. Vienna University Press, 776 S.

Beispiel eines Buchkapitels:

Sattler, K., Mehlhorn, S., 2020. Überblick alpiner Naturgefahren in Österreich. In: T. Glade, M. Mergili, K. Sattler (Hrsg.), ExtremA 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. Vienna University Press, S. 45–58.

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Theaterstraße 13, D-37073 Göttingen
Dieses Werk ist als Open-Access-Publikation im Sinne der Creative-Commons-Lizenz BY-NC-ND International 4.0 (»Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen«) unter dem DOI 10.14220/9783737010924 abzurufen. Um eine Kopie dieser Lizenz zu sehen, besuchen Sie <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Jede Verwertung in anderen als den durch diese Lizenz zugelassenen Fällen bedarf der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlages.

Umschlagabbildung: Ablagerungen am Schwemmkegel des Tronitzerbachs, Gemeinde Afritz am See./Debris flow deposits on the fan of the Tronitzer creek, community Afritz am See.

Quelle: GLB Kärnten Nordost, WLW

Abbildungs- und Fotorechte liegen bei den angeführten Quellen.

Vandenhoeck & Ruprecht Verlage | www.vandenhoeck-ruprecht-verlage.com

ISBN 978-3-7370-1092-4