



# Gravitative Massenbewegungen und Naturgefahren der Kryosphäre

*Thomas Glade*

## Inhaltsverzeichnis

- 12.1 Gravitative Massenbewegungen – 144**
  - 12.1.1 Felsstürze, Felsgleitungen und Felslawinen – 144
  - 12.1.2 Muren – 145
  - 12.1.3 Rutschungen – 146
- 12.2 Gefahren der Kryosphäre – 147**
  - 12.2.1 Auftauender Permafrost – 147
  - 12.2.2 Glaziale Systeme – 147
  - 12.2.3 Schneelawinen – 148
- 12.3 Ausblick – 148**
- 12.4 Kurz gesagt – 149**
  - Literatur – 150

## 12.1 Gravitative Massenbewegungen

Die Naturgefahren der gravitativen Massenbewegungen beinhalten Prozesse wie Felsstürze, Muren, flach- und tiefgründige Rutschungen sowie andere komplexe Bewegungen (Glade et al. 2005; Glade und Zangerl 2020). Diese sind auf verschiedenste Art von klimarelevanten Faktoren abhängig (Crozier 2010; Glade und Crozier 2010; Huggel et al. 2012; Nie et al. 2017; Rupp et al. 2018; Wiedenmann et al. 2016) und werden ganz unterschiedlich direkt und indirekt vom Menschen beeinflusst (Klose et al. 2015; Schmidt und Dikau 2004). Gravitative Massenbewegungen treten an vollkommen natürlichen, vom Menschen unbeeinflussten Hängen auf, z. B. im hochalpinen Gebiet (■ Abb. 12.1) (z. B. Knapp et al. 2021; Krautblatter et al. 2012), an Hängen von eingeschnittenen Tälern und Schichtstufen in Mittelgebirgen (u. a. Bell et al. 2010; Damm 2005; Hardenbicker et al. 2001; Leinauer et al. 2020; Terhorst 2001, 2009; Schmidt und Beyer 2001; Finkler et al. 2013; Bock et al. 2013; Garcia et al. 2010; Oeltzschner 1997) oder an Steilküsten (■ Abb. 12.2) (Günther und Thiel 2009; Kuhn und Prüfer 2014). Sie treten aber auch an Böschungen auf, die vom Menschen geschaffen wurden, oder an modifizierten Hängen, etwa in Gebieten, in denen Baugebiete ausgewiesen (Bell et al. 2010; Kurdal et al. 2006) oder flächenhafte Flurbereinigungen durchgeführt wurden. Je nach Lokalität sind demzufolge die Dispositionen der Gebiete gegenüber klimatischen und hydrometeorologischen Auslösern sehr divers (u. a. Dikau und Schrott 1999; Glade et al. 2020; Mergili und Glade 2020; Schmidt und Dikau 2004).

### 12.1.1 Felsstürze, Felsgleitungen und Felslawinen

Neben den hier nicht weiter behandelten Erdbeben sind besonders Starkniederschläge Auslöser von Felsstürzen, Felsgleitungen und Felslawinen, die häufig durch hydrometeorologische Vorgänge vorbereitet werden (Krautblatter et al. 2010a, b, 2012; Preh et al. 2020; Zangerl et al. 2020). Hierzu gehört z. B. ein langanhaltender Niederschlag, der die offenen Gesteinsklüfte ausfüllt und dort zu großen Porenwasserdrücken führen kann. Diese können besonders bei Felsgroßbewegungen auch durch eine Schneeschmelze im Frühjahr erreicht werden (Zangerl et al. 2020).

Solche vorbereitenden Faktoren lösen gravitative Massenbewegungen nicht direkt aus, sondern erhöhen die Disposition der entsprechenden stabilitätsbeeinflussenden Variablen. Einen weiteren derartigen Faktor im Hochgebirge stellt der Permafrost bzw. sein Rückgang dar. Der dauergefrorene Bereich stabilisiert die steilen alpinen Felswände zusätzlich (Haas et al. 2009). Durch die Klimaerwärmung werden bisher steile Gesteinsformationen in einen labilen Zustand versetzt und können sich dann entsprechend aus der Felswand ablösen (Krautblatter et al. 2009, 2013) oder ganze Felswände können in einer Felsgleitung oder einer Felslawine mobilisiert werden (Knapp et al. 2021; Zangerl et al. 2020).

Eine ganz andere Situation ist an den Steilküsten Norddeutschlands zu beobachten (Günther und Thiel 2009; Kuhn und Prüfer 2014). Für deren Stabilität sind wieder die Klüftung des Gesteins und der anzutreffende Porenwasserdruck maßgeblich verantwortlich. Hinzu kommt hier aber auch noch die Wellen-



■ **Abb. 12.1** Das Tal des Alpenrheins mit Ablagerungen verschiedener gravitativer Massenbewegungen an den Unterhängen und im Talboden. (Foto: Horst Meyenfeld)



■ **Abb. 12.2** Steilküste auf der Insel Rügen. Die Ablagerung einer gravitativen Massenbewegung, die bereits von Wellen wieder erodiert wird, ist deutlich sichtbar. (Foto: Horst Meyenfeld)

wirkung über die Brandung: Sie erodiert die Steilküsten kontinuierlich am Hangfuß, bis die darüber gelagerte Masse so instabil wird, dass sie kollabiert (■ Abb. 12.2). Diese Grenze zwischen der Stabilität des Kliffs und der Bewegungsauslösung kann durch interne Kräfteverschiebungen überschritten werden (verursacht z. B. durch die Verwitterung des Gesteins), kann aber auch durch externe Kräfte, beispielsweise über einen Sturm mit sehr hoher Brandung oder über Starkniederschläge, erreicht werden. Die klimatischen und hydrometeorologischen Faktoren beeinflussen folglich langfristig über die Wellenbewegungen und die Ausbildung der Brandungshohlkehlen die Stabilität ganzer Küstenabschnitte, lösen aber bei extremen Situationen wie Starkniederschlägen oder einer starken Wellenbrandung auch direkt Felsstürze aus.

Weiterhin treten Felsstürze an künstlichen Geländeanschnitten in vielfältigster Weise auf. Solche Anschnitte entstehen sehr häufig beim Bau der Verkehrsnetze (Straßen oder Eisenbahn, z. B. Röhlich et al. 2003; Schlögl und Matulla 2018) oder beim Hausbau in Hangbereichen. Hier kann es auch zur Auslösung von Felsstürzen durch hydrometeorologische Faktoren kommen, die eigentliche Ursache im Sinne eines vorbereitenden Faktors ist jedoch in der anthropogenen Übersteilung zu sehen. Untersuchungen zeigten auch, dass zwischen dem Zeitpunkt solcher Übersteilung (■ Abb. 12.3) und dem eigentlichen Auslösen der Felsstürze viele Jahre, manchmal sogar viele Jahrzehnte liegen können. Dies erschwert die klare Trennung zwischen dem menschlichen Einfluss und den deutlich auf die Klimaänderungen zurückzuführenden Folgewirkungen.

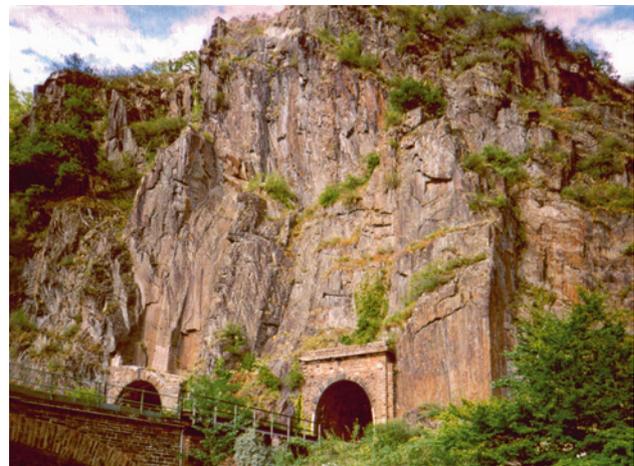
Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Felsstürze in den verschiedensten Regionen in Deutschland an natürlichen und künstlich übersteilten Felswänden auftreten (Röhlich et al. 2003). Die klimatischen und hydrometeorologischen Wirkungen sind dabei als vorbereitende Faktoren genauso wichtig wie für die Auslösung an sich (Krautblatter et al. 2006; Schmidt und

Dikau 2004). Eine klare Trennung zwischen den natürlichen und damit klar auf den Klimawandel zu beziehenden Gegebenheiten und den vom Menschen beeinflussten Faktoren ist überaus schwierig.

### 12.1.2 Muren

Muren sind Ströme aus Wasser mit einem sehr hohen Anteil an Schlamm- und Gesteinsmassen, die sich im Gebirge an Talflanken (Hangmuren) oder in Tiefenlinien (Gerinnemuren) bergabwärts bewegen. Die klimatischen und hydrometeorologischen Gegebenheiten wirken auch hier als vorbereitende und auslösende Faktoren: Wassergesättigtes Material ist leichter mobilisierbar als trockene Sedimente. Auftauender Permafrost ermöglicht in ausgewählten alpinen Hochlagen die Mobilisierung früherer gefrorener Bereiche. Weiterhin spielen auch Vegetationsänderungen für die Muraktivität eine große Rolle. Im Falle einer Rodung, eines Waldbrands oder eines natürlichen Windwurfs können bisher durch die Vegetation geschützte Bereiche bei einem folgenden Sturmereignis zu potenziellen Quellgebieten von Muren werden. Außerdem können Murerbauungen den Prozessablauf maßgeblich verändern, indem sie beispielsweise die Muren im Quellgebiet aufhalten oder im Verlauf abbremsen bzw. ganz aufhalten. All dies beeinflusst, wie oft Muren auftreten und wie stark sie sind, und es überlagert mögliche Klimafolgen. Zentral bei allen Untersuchungen ist eine detaillierte multitemporale Analyse der Muraktivität, also eine Untersuchung derselben Stelle zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Dietrich und Krautblatter 2019; Ozturk et al. 2018).

Es ist festzustellen, dass sich die durch Klimaereignisse ausgelöste Muraktivität verändert (Damm und Felderer 2013; Kaitna et al. 2020). Dies wurde bei-



■ **Abb. 12.3** Eisenbahntunnel im Ahrtal: Anthropogene Übersteilung einer Felswand durch den Bau von Verkehrsinfrastruktur.

spielsweise auch in dendromorphologischen Untersuchungen erkannt (Schneider et al. 2010), die in den veränderten Jahresringen die Wachstumsveränderungen von Bäumen, verursacht durch die Bewegung der Erdoberflächen, analysieren. Es ist aber nicht eindeutig, welche dieser Veränderungen auf die klimarelevanten Parameter zurückzuführen sind und welche von anderen Einflüssen in welcher Stärke überlagert werden.

### 12.1.3 Rutschungen

Bei Rutschungen werden meist Lockersedimente, aber auch geklüftete Felsmassen auf einer hangparallelen (Translationsrutschung) oder rotationsförmigen Gleitfläche (Rotationsrutschung) hangabwärts transportiert (■ Abb. 12.4). Rutschungen treten an natürlichen sowie an künstlich übersteilten Hängen gleichermaßen auf und bewegen sich mit den verschiedensten Geschwindigkeiten: von langsam kriechend bis spontan ausbrechend und extrem schnell (Glade und Zangerl 2020). Wichtig ist zu beachten, ob es Neuititierungen von Rutschungen sind oder ob es sich um Reaktivierungen bereits früherer Bewegungen handelt. Denn diese reagieren ganz unterschiedlich auf klimatische und hydrometeorologische Gegebenheiten.

Auch Rutschungen werden vorbereitet, werden nach Überschreitung von Schwellenwerten ausgelöst, und ihre Bewegung wird durch die Situation am Hang beeinflusst (Schmidt und Dikau 2005; Glade et al. 2020) – besonders davon, welche Pflanzen in welchem Alter den Hang bewachsen und durchwurzeln (Papathoma-Köhle et al. 2013), wie die Geländeoberfläche geformt ist, wie stark der Boden verwittert ist, welches Gestein ansteht und wie viel Material und Wasser verfügbar sind. So kann z. B. eine gleiche Niederschlagsmenge manchmal Rutschungen auslösen und manchmal nicht – je nach Situation am Hang. Viele Untersuchungen zu

Rutschungen zeigen auch, dass besonders der Wege- und Siedlungsbau und veränderte Hangdrainagen einen großen Einfluss auf das Rutschungsverhalten haben (Bell et al. 2010; Röhlich et al. 2003; Andrecs et al. 2007; Klose et al. 2016).

Wasser wird oberflächlich und unterirdisch gesammelt und umgeleitet, was wiederum die Hanghydrologie und -stabilität stark beeinflusst. Weiterhin werden auch agrarwirtschaftlich genutzte Flächen im Hangbereich sehr häufig von Landwirtinnen und Landwirten dräniert, um die Nutzung zu intensivieren. Von besonderer Bedeutung sind auch linienhafte Infrastrukturen wie Straßen und Wege oder Eisenbahnlinien (Wohlers et al. 2017; Schlögl und Matulla 2018). An diesen Strukturen wird die Oberflächengeometrie verändert, sei es durch Aufschüttungen oder Eintiefungen mit übersteilten Böschungen. Alle genannten Aktivitäten verändern die Hanghydrologie, d. h. vorher natürlich vorhandene Fließwege an der Erdoberfläche und/oder im Untergrund werden verändert. Das führt zu einer geänderten Rutschungsanfälligkeit, entweder zu einer Stabilisierung oder, im ungünstigsten Fall, auch zu einer Destabilisierung. Durch diese baulichen Eingriffe wird auf jeden Fall die Rutschungsaktivität beeinflusst.

Natürliche Auslöser von Rutschungen sind neben Erdbeben (z. B. Nepal-Erdbeben, 25.04.15; Kaikoura-Erdbeben, Neuseeland, 14.11.16; Palu, Indonesien, 28.09.18) besonders hydrometeorologische Faktoren. Hierzu zählen lang anhaltende Feuchteperioden (Klose et al. 2012a) oder eine schnelle Schneeschmelze genauso wie Starkregenereignisse (Krauter et al. 2012). Es gibt aber auch Untersuchungen, die eine erhöhte Rutschungsaktivität besonders nach lang anhaltenden Trockenperioden mit anschließenden, von der Stärke eher vernachlässigbaren Niederschlagsereignissen feststellen konnten (Glade et al. 2001). Analysen haben gezeigt, dass sich in der Trockenperiode tiefgreifende Risse im Oberboden bilden können, über die dann der Niederschlag sehr schnell in den Untergrund eindringen kann und eine Rutschung reaktiviert, obwohl die eigentliche Niederschlagsmenge sehr gering ist.

Aus diesen Ausführungen ist ersichtlich, dass es sicherlich einen Zusammenhang zwischen klimatischen Veränderungen und einer daraus resultierenden Rutschungsaktivität gibt (Dehn und Buma 1999; Krauter et al. 2012). Von besonderer Bedeutung sind bei den klimatischen Änderungen die starken, häufig lokal begrenzten Gewitterregen, die ein hohes Potenzial besitzen, auch Rutschungen auszulösen. Wie jedoch auch aus internationalen Studien abgeleitet werden kann (Mathie et al. 2007), ist aus den bisherigen Untersuchungen kein zwingender und eindeutiger Zusammenhang nachweisbar (Mayer et al. 2010), da es viele, sich teilweise überlagernde Faktoren gibt, die eine Rutschung auslösen (Mergili und Glade 2020). Eine



■ Abb. 12.4 Rotationsrutschung bei Ockenheim, Rheinhessen.

eindeutige Trennung zwischen den Auswirkungen des Klimawandels und den Konsequenzen menschlicher Eingriffe lässt sich momentan noch nicht direkt und gesichert ableiten.

## 12.2 Gefahren der Kryosphäre

Naturgefahren in der Kryosphäre – in Gebieten mit gefrorenem Wasser – sind ganz unterschiedlich in ihrer räumlichen Verbreitung, in ihrer zeitlichen Aktivität und in Bezug auf ihre Wechselwirkung mit der Gesellschaft zu betrachten (Damm et al. 2012). Jedoch greift der Mensch in die Kryosphäre weniger direkt ein, sodass die Auswirkungen seines Handelns auf diese Naturgefahren nicht so stark sind wie auf die Bereiche der gravitativen Massenbewegungen. Dieser Beitrag konzentriert sich auf die Naturgefahren, ausgelöst durch den flächenhaften Rückgang des Permafrosts, durch Veränderungen von glazialen Systemen und Schneelawinen (Haerberli und Beniston 1998).

### 12.2.1 Auftauender Permafrost

Dauergefrorener Boden und Fels unterliegen momentan global massiven Veränderungen (Kääb 2007; Otto et al. 2020). Auch in Deutschland werden – wenn auch nur in Hochgebirgsregionen – seit einigen Jahren signifikante Veränderungen dokumentiert (Krautblatter et al. 2010a; Nötzli et al. 2010), die sicherlich auch mit dem Klimawandel in Verbindung stehen (Verleysdonk et al. 2011). Der Anstieg der durchschnittlichen Jahrestemperatur und die damit verbundene Erhöhung der Null-Grad-Isotherme (Linie gleicher Temperaturen) im Hochgebirge führen dazu, dass sich der Permafrost kontinuierlich abbaut (Gude und Barsch 2005).

Wie bei den Felsstürzen und den Muren bereits ausgeführt, kann erwartet werden, dass der Rückgang des Permafrosts massive Veränderungen im Prozessgefüge und in der Dynamik der Naturgefahren bewirkt (Damm und Felderer 2013). In Regionen der Kryosphäre mit steilen Felswänden ist bereits zu beobachten, dass die Felssturzaktivität steigt (Krautblatter et al. 2010a). Durch den verschwindenden Permafrost tauen ganze Bergregionen auf, was besonders große Auswirkungen auf die dort vorhandene Infrastruktur hat, seien es die Bergbahnen mit den Bergstationen für den Tourismus, das Observatorium der Zugspitze oder die bewirtschafteten Berghütten der Alpenvereine sowie deren Zuwege (Weber 2003; Gude und Barsch 2005; Krautblatter et al. 2010b). Auch hochgelegene Schutthalden und Moränenzüge wurden bisher durch den Permafrost stabilisiert. Durch das

Auftauen des gefrorenen Schutts kann dieser bei Starkniederschlägen leichter mobilisiert werden, und es besteht die Gefahr von häufigeren und größeren Murgängen (Damm und Felderer 2013).

Neben diesen klassischen Naturgefahren verändert sich durch eine Klimaerwärmung auch das komplette Prozessgefüge in Hochgebirgsgebieten, die zwar unvergletschert, aber dennoch durch Frost geprägt sind. Es kann erwartet werden, dass sich die Solifluktion – die fließende Bewegung von Schutt- und Erdmassen an Hängen auf gefrorenem Untergrund – mit dem Auftauen des Permafrosts durch die erhöhte Wasserverfügbarkeit zuerst auf Bewegungsraten von bis zu mehreren Zentimetern bis Metern pro Jahr verstärkt. In einer nächsten Phase erwartet man allerdings wieder eine starke Reduktion der Solifluktion auf Millimeter bis Zentimeter pro Jahr. Der Einfluss des Klimawandels auf die komplexen Solifluktionsprozesse ist noch nicht komplett verstanden, was eine Vorhersage auf den Klimawandeleinfluss schwierig macht (Matsooka 2001).

Der Eisanteil in aktiven Blockgletschern kann stark abnehmen. Durch das Verschwinden des Eisanteils wird sich die interne Reibung der Schutt- und Geröllmasse kontinuierlich erhöhen, bis sich diese Massen nicht weiter bewegen (Kellerer-Pirklbauer und Kaufmann 2012). All diese Veränderungen werden u. a. die Oberflächenprozesse in ihren Eigenschaften und in ihrem räumlichen und zeitlichen Auftreten nachhaltig modifizieren.

### 12.2.2 Glaziale Systeme

Bereits seit vielen Jahren wird beobachtet, dass die glazialen Systeme global einer großen Veränderung unterliegen, was in den meisten Fällen einen massiven Gletscherrückzug bedeutet (Owen et al. 2009; Weber 2003; Zemp et al. 2006). Viele Studien zeigen, dass auch die in Deutschland befindlichen Gletscher an Masse verlieren und sich zurückziehen (Haerberli und Beniston 1998; Weber 2003). Bereits jetzt schmilzt der Schneeferner auf der Zugspitze im Sommer nahezu komplett ab, wie ein Vergleich der Bilder 12.5 (Winter) und 12.6 (Sommer), allerdings aufgenommen von unterschiedlichen Standorten, eindrücklich zeigt.

Dieser Trend wird sich in den kommenden Jahren noch fortsetzen (Fischer et al. 2020), und es ist bei einer anhaltenden Klimaerwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts sogar zu erwarten, dass auch die letzten Gletscher in Deutschland bald verschwunden sein werden.

Dies wird signifikante Auswirkungen in den hochalpinen Gebieten, aber auch in den glazial geprägten Flusssystemen haben (Blöschl et al. 2020). Momen-

tan ist in den europäischen Alpen zu beobachten, dass durch die erhöhten Schmelzraten im Sommer die Wasserverfügbarkeit in manchen Gebieten bedeutend steigt und deshalb die sommerliche Wasserführung in den glazialen Flussregimen zunimmt (Collins 2007). Hierdurch nehmen die Sedimentfrachten in den Flüssen zu. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich diese erhöhte Wasserführung mit dem Abschmelzen der Gletscher umgehend vermindert, wie dies bereits in anderen Regionen festgestellt wird (u. a. in Chile, Baraer et al. 2012). Wie es sich bereits andeutet, wird sich das Abflussregime von einem glazialen Regime mit sommerlichen Abflussspitzen zu einem schneegeprägten Abflussregime mit Spitzen im Frühjahr verändern (Blöschl et al. 2020). Dies wird sicherlich massive Auswirkungen auf das komplette hochalpine Ökosystem haben, aber auch das raumwirksame Handeln der Menschen in den Tallagen der Gebirge verändern. Besonders ist hier zu beachten, dass diese Veränderungen in den gesamten Alpen stattfinden. Für Deutschland bedeutet dies, dass sich auch Flusssysteme, die ihr Quellgebiet in den an Deutschland angrenzenden alpinen Gebieten haben (z. B. in Österreich und der Schweiz), stark verändern werden (Blöschl et al. 2020).

Auch das von Gletschern frei werdende Gebiet wird sich massiv wandeln. Es beginnen geomorphologische Prozesse in den bisher durch Eis bedeckten Regionen. Flächenmäßig sind dies, besonders in der Relation der gesamten Bundesrepublik, nur marginale Flächen. Diese werden sich jedoch signifikant verändern und auch angrenzende Tallagen potenziell betreffen.



■ **Abb. 12.5** Blick vom Zugspitzplateau auf den Schneeferner im Februar 2022.

### 12.2.3 Schneelawinen

Mit der gemessenen Erwärmung steigt die Null-Grad-Isotherme in den Hochgebirgen, und es ist zu erwarten, dass sich der Anteil des als Schnee fallenden Niederschlags in Zukunft zugunsten des Anteils des in flüssiger Form fallenden Niederschlags verschiebt. Die Erhöhung der Schneegrenze wird dazu führen, dass weniger Schnee als Wasserspeicher zur Verfügung steht (Matiu et al. 2021). Dies wird auch einen Einfluss auf den Schneedeckenaufbau haben, da in höheren Lagen aufgrund der veränderten Gegensätze der Tag-Nacht-Temperaturen die Anzahl der Frost-Tau-Zyklen steigen wird und somit eine stärkere Schichtung der Schneedecke mit verändertem Wasserhaushalt zu erwarten ist (Bernhardt et al. 2012; Steinkogler et al. 2014; Studerregger et al. 2020).

Neben der Schneedecke selbst sind gerade für Schneelawinen die Schneeakkumulationen durch Windverfrachtung von zentraler Bedeutung (Warscher et al. 2013). Inwieweit sich mit der Klimaerwärmung auch Windfelder und die Verteilung der winterlichen Schneeakkumulationen ändern werden, ist schwer zu beurteilen. Weiterhin wird sicherlich weniger Schnee in tiefen Lagen fallen (Eckert et al. 2010; Lavigne et al. 2015). Es ist aber auch zu erwarten, dass Extremereignisse große Schneemengen in kurzen Zeiträumen in die Hänge bringen und, kombiniert mit schnellen Wetteränderungen, in kurzen Perioden die Schneelawinenaktivität massiv erhöhen. Dies wird in manchen Teilen der europäischen Alpen bereits beobachtet (Pielmeier et al. 2013). Zusätzlich könnte die Schneelawinenaktivität über den ganzen Winter verteilt eher abnehmen, Extremniederschlagsereignisse mit entsprechenden Lawinenabgängen wird es aber durchaus weiterhin geben.

### 12.3 Ausblick

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Naturgefahren der gravitativen Massenbewegungen und ausgewählter hochalpiner Prozesse (Permafrost, glaziale Systeme, Schneelawinen) müssen sehr differenziert betrachtet werden. Einfache Kausalschlüsse zwischen Klimaveränderungen und natürlichen Prozessen an der Erdoberfläche können irreführend sein, da das Auftreten der präsentierten Naturgefahren von vielen vorbereitenden, auslösenden und kontrollierenden Faktoren abhängig ist. Wie dargelegt, unterscheidet sich die Bedeutung der jeweiligen Faktoren für die verschiedenen Naturgefahren signifikant (Glade et al. 2020). Zusätzlich wird die Einschätzung der Situation noch erschwert, da auch der Mensch direkt oder indirekt massiv in die Umwelt eingreift (Birkmann et al. 2011; Mergili und Glade 2020). Dadurch verändern

sich die Wirkungsketten bei den jeweiligen Naturgefahren und somit auch die Konsequenzen (Klose et al. 2012b; Wohlers und Damm 2021). Diese lassen sich dadurch schwerer von den aus dem Klimawandel resultierenden Kräften differenzieren.

Von besonderer Bedeutung für diesbezügliche Untersuchungen sind umfassende Datenbanken der angesprochenen Prozessbereiche, die zeitlich und räumlich hochauflösend sein müssen (Glade 2001).

Bei gravitativen Massenbewegungen gibt es besonders in den letzten Jahren aktuelle Forschungsaktivitäten (Damm und Klose 2015; Herrera et al. 2018; Jäger et al. 2018; Rupp und Damm 2020), die teilweise auch zusätzlich die sozioökonomischen Schäden erheben (Klose et al. 2016; Schlögl und Matulla 2018; Wohlers und Damm 2021; Wohlers et al. 2017). Datenbanken zu Permafrost, glazialen Systemen und Schneelawinen liegen lokal vor, sind jedoch größtenteils auch nur dort verfügbar. Es wäre unbedingt erstrebenswert, die durch öffentliche Mittel finanzierten Datenbanken zusammenzuführen und für eine bestmögliche Nutzung, gerade im Hinblick der Identifikation von klimainduzierten Veränderungen, auch frei zugänglich zu machen.

Um die Aspekte der gravitativen Massenbewegungen und von Naturgefahren in der Kryosphäre in der Zukunft umfassend und im Sinne eines besseren Verständnisses der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auch hinsichtlich einer Nachhaltigkeit besser verstehen zu können, sollten einige der angesprochenen Themenkomplexe bearbeitet werden. Neben vielen anderen Bereichen beinhaltet dies Folgendes:

- Die vielfältigen Wechselwirkungen der klimatologischen und hydrometeorologischen Faktoren müssen prozessorientiert durch Geländeuntersuchungen und ergänzende Modellierungen aufgearbeitet werden.
- Die unterschiedlichen Naturgefahren müssen in Monitoringprogrammen für ausgewählte Standorte langfristig und kontinuierlich an repräsentativen Standorten gemessen werden, um mögliche Veränderungen festzustellen und die verantwortlichen Faktoren charakterisieren zu können.
- Die vergangenen Situationen müssen den momentanen Gegebenheiten und den möglichen zukünftigen Entwicklungen gegenübergestellt werden.
- In Prozessuntersuchungen muss eindeutig zwischen vorbereitenden, auslösenden und kontrollierenden Faktoren unterschieden werden. Dies wird eine bessere Abschätzung der Auswirkungen der Änderungen im Klimasystem bei den verschiedenen Naturgefahren erlauben. Spezifisch müssten für jede Naturgefahr die möglichen menschlichen Eingriffe identifiziert und ihre Bedeutung für die jeweilige Kinematik abgeschätzt und kalkuliert werden.



■ **Abb. 12.6** Der nördliche Schneeferner im September 2020. (Foto:UFS Schneefernerhaus, all rights reserved)

- Die natürlichen und die menschlichen Eingriffe müssen vergleichend bewertet werden, um die Auswirkungen der Änderungen einzelner Faktoren für spezifische Naturgefahren eindeutig identifizieren und abschätzen zu können.
- Die Kaskadeneffekte zwischen den einzelnen Naturgefahren müssen stärker berücksichtigt werden. Beispielsweise können ein Waldbrand (► Kap. 11) oder eine Schneelawine dazu führen, dass in der darauffolgenden Zeit Felsstürze in tiefer gelegene Gebiete gelangen, da die frühere Schutzwirkung des Waldes entfällt. Oder Muren können Flüsse blockieren: Es bilden sich Seen, die dann den Damm durchbrechen und große Überschwemmungen in den talabwärtsgelegenen Gebieten verursachen können.
- Existierende Datenbanken müssen zusammengeführt werden, um die bestmögliche Inwertsetzung der verfügbaren Daten zu erreichen.

## 12.4 Kurz gesagt

Die Naturgefahren der gravitativen Massenbewegungen (Felsstürze, Muren, Rutschungen), ausgehend vom Permafrost und den glazialen Systemen sowie den Schneelawinen, sind auf vielfältige Faktoren zurückzuführen, deren Zusammenwirken in der Gesamtheit betrachtet werden muss. Die vorbereitenden, auslösenden und kontrollierenden Faktoren werden in unterschiedlichster Weise vom Klimawandel beeinflusst. Dieses Zusammenspiel zeigt sich durch schleichende Veränderungen wie beim Rückgang des Permafrosts und kriechenden gravitativen Massenbewegungen sowie an schnell ablaufenden Naturgefahren wie Muren, Fels- und Bergstürzen sowie Schneelawinen. Klimatische und hydrometeorologische Faktoren beeinflussen hierbei die Naturgefahren lang-

fristig auch überregional, beispielsweise lang anhaltende Niederschläge. Sie bestimmen aber auch ganz kurzfristig in kleinen Gebieten entsprechende Prozesse, etwa Muren nach einem lokal konzentrierten Starkniederschlagsereignis. Weiterhin erschwert der menschliche Einfluss auf diese natürlichen Prozesse die klare Zuordnung, welche der Veränderungen in der Häufigkeit oder der Stärke von Naturgefahren tatsächlich ausschließlich dem Klimawandel zuzuschreiben sind und welche Anteile hierbei der direkte menschliche Einfluss hat (z. B. besonders hinsichtlich Landnutzungsänderungen). Dies werden einige der zukünftigen Forschungsfelder im Kontext der klimarelevanten Naturgefahren ergründen.

Gravitative Massenbewegungen und andere klimarelevante Naturgefahren der Kryosphäre lassen sich zwar auf den Klimawandel zurückführen, dürfen aber auch nicht darauf reduziert werden. Es gibt neben den klimatischen Steuerungen noch viele weitere, vom Klima nicht direkt beeinflusste Faktoren, die diese Naturgefahren sehr stark beeinflussen und sich erschwerend mit den Klimaveränderungen überlagern.

## Literatur

- Andreas 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. Schriftenreihe des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Bd. 6. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, S 75
- Baraer M, Mark BG, McKenzie JM, Condom T, Bury J, Huh K-I, Portocarrero C, Gomez J, Rathay S (2012) Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *J Glaciol* 58(207):134–150
- Bell R, Mayer J, Pohl J, Greiving S, Glade T (Hrsg) (2010) Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS) – Monitoring, Modellierung Implementierung. Klartext Verlag, Essen, S 271
- Bernhardt M, Schulz K, Liston GE, Zängl G (2012) The influence of lateral snow redistribution processes on snow melt and sublimation in alpine regions. *J Hydrol* 424–425:196–206
- Birkmann J, Böhm HR, Buchholz F et al (2011) Glossar Klimawandel und Raumplanung Bd. 10. Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Hannover (E-Paper der ARL)
- Blöschl G, Hall J, Viglione A et al (2020) Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature* 583:560–566
- Bock B, Wehinger A, Krauter E (2013) Hanginstabilitäten in Rheinland-Pfalz – Auswertung der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz für die Testgebiete Wißberg, Lauterecken und Mittelmosel. *Mainzer Geowiss Mitt* 41:103–122
- Collins DN (2007) Changes in quantity and variability of runoff from Alpine basins with climatic fluctuation and glacier decline. *IAHS Publ* 318:75–86
- Crozier M (2010) Deciphering the effect of climate change on landslide activity: a review. *Geomorphology* 124:260–267
- Damm B (2005) Gravitative Massenbewegungen in Südniedersachsen. Die Altmündener Wand – analyse und Bewertung eines Rutschungsstandorts, *Zeitschrift für Geomorphologie NF Suppl-Bd* 138:189–209
- Damm B, Felderer A (2013) Impact of atmospheric warming on permafrost degradation and debris flow initiation – a case study from the eastern European Alps. *E&G Quaternary Sci J* 62:2
- Damm B, Klose M (2015) The landslide database for Germany: closing the gap at national level. *Geomorphology* 249:82–93
- Damm B, Pröbstl U, Felderer A (2012) Perception and impact of natural hazards as consequence of warming of the cryosphere in tourism destinations. A case study in the Tux Valley, Zillertaler Alps. Austria. *Interpraevent* 12:90–91
- Dehn M, Buma J (1999) Modelling future landslide activity based on general circulation models. *Geomorphology* 30(1–2):175–187
- Dietrich A, Krautblatter M (2019) Deciphering controls for debris-flow erosion derived from a LiDAR-recorded extreme event and a calibrated numerical model (Roßbichelbach, Germany). *Earth Surf Proc Land* 44(6):1346–1361
- Dikau R, Schrott L (1999) The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC): main objectives and results. *Geomorphology* 30:1–12
- Eckert N, Baya H, Deschamps M (2010) Assessing the response of snow avalanche runout altitudes to climate fluctuations using hierarchical modeling: application to 61 winters of data in France. *J Clim* 23:3157–3180
- Finkler C, Emde K, Vött A (2013) Gravitative Massenbewegungen im Randbereich des Mainzer Beckens: das Fallbeispiel Roterberg (Langenlonsheim, Rheinland-Pfalz). *Mainzer Geowiss Mitt* 41:51–102
- Fischer A, Schöner W, Otto J-C (2020) Gletschergefahren. In: Glade T, Mergili M, Sattler K (Hrsg) *ExtremA 2019: aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*. S 563–586
- García A, Hördt A, Fabian M (2010) Landslide monitoring with high resolution tilt measurements at the Dollendorfer Hardt landslide. Germany. *Geomorphology* 120(1–2):16–25
- Glade T (2001) Landslide hazard assessment and historical landslide data – an inseparable couple? Glade T, Frances F, Albini P (Hrsg) *The use of historical data in natural hazard assessments* 7:153–168
- Glade T, Anderson M, Crozier MJ (Hrsg) (2005) *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester, West Sussex, S 803
- Glade T, Crozier MJ (Hrsg) (2010) *Landslide geomorphology in a changing environment.- Special Volume in Geomorphology* 120(1–2):90
- Glade T, Dikau R (2001) Landslides at the tertiary escarpments in Rheinhessen, Southwest Germany. *Z Geomorphol, (Supplementband)* 125:65–92
- Glade T, Zangerl C (2020) Gravitative Massenbewegungen – terminologie und Charakteristika. In: Glade T, Mergili M, Sattler K (Hrsg) *ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*, S 367–382
- Glade T, Mergili M, Sattler K (Hrsg) (2020) *ExtremA 2019: aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*. Vienna University Press, S 776
- Gude M, Barsch D (2005) Assessment of geomorphic hazards in connection with permafrost occurrence in the Zugspitze area (Bavarian Alps, Germany). *Geomorphology* 66(1–4):85–93
- Günther A, Thiel C (2009) Combined rock slope stability and shallow landslide susceptibility assessment of the Jasmund cliff area (Rügen Island, Germany). *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9(3):687–698
- Haas F, Heckmann T, Klein T, Becht M (2009) Rockfall measurements in alpine catchments (Germany, Austria, Italy) by terrestrial laserscanning first results. *Geophys Res Abstr* 11:1607–7962
- Haerberli W, Beniston M (1998) Climate Change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio* 27(4):258–265
- Hardenbicker U, Halle S, Grunert JM (2001) Temporal occurrence of mass movements in the Bonn area. *Z Geomorphol, Supplementband* 125:14–24

- Herrera G, Mateos RM, García-Davalillo JC et al (2018) Landslide databases in the geological surveys of Europe. *Landslides* 15:359–379
- Huggel C, Clague JJ, Korup O (2012) Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surf Proc Land* 37(1):77–91
- Jäger D, Kreuzer T, Wilde M, Bemm S, Terhorst B (2018) A spatial database for landslides in northern Bavaria: a methodological approach. *Geomorphology* 306:283–291
- Kääh AFP (2007) Climate change impacts on mountain glaciers and permafrost. *Glob Planet Chang* 56:vii–ix
- Kaitna R, Prenner D, Hübl J (2020) Muren. In: Glade T, Mergili M, Sattler K (Hrsg) *ExtremA 2019: aktueller Wissenstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*. S 489–515
- Kellerer-Pirklbauer A, Kaufmann V (2012) About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria. *Austrian J Earth Sci* 105(2):94–112
- Klose M, Damm B, Gerold G (2012a) Analysis of landslide activity and soil moisture in hillslope sediments using a landslide database and a soil water balance model. *GEOÖKO* 33(3–4):204–231
- Klose M, Damm B, Terhorst B, Schulz N, Gerold G (2012b) Wirtschaftliche Schäden durch gravitative Massenbewegungen. Entwicklung eines empirischen Berechnungsmodells mit regionaler Anwendung. *Interpraevent* 12:979–990
- Klose M, Damm B, Terhorst B (2015) Landslide cost modeling for transportation infrastructures: a methodological approach. *Landslides* 12:321–334
- Klose M, Maurischat P, Damm B (2016) Landslide impacts in Germany: a historical and socioeconomic perspective. *Landslides* 13(1):183–199
- Knapp S, Anselmetti FS, Lempe B, Krautblatter M (2021) Impact of an 0,2km<sup>3</sup> rock avalanche on lake Eibsee (Bavarian Alps, Germany) – Part II: catchment response to consecutive debris avalanche and debris flow. *Earth Surface Processes and Landforms* 46(1):307–319
- Krautblatter M, Funk D, Günzel FK (2013) Why permafrost rocks become unstable: a rock–ice–mechanical model in time and space. *Earth Surf Proc Land* 38(8):876–887
- Krautblatter M, Moser M (2006) Will we face an increase in hazardous secondary rockfall events in response to global warming in the foreseeable future? In: Price MF (Hrsg) *Global change in mountain regions*. Sapiens Publishing, Duncow, S 253–254
- 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(4):1425–1432
- Krautblatter M, Moser M, Schrott L, Wolf J, Morche D (2012) Significance of rockfall magnitude and solute transport for rock slope erosion and geomorphic work in an Alpine trough valley (Reintal, German Alps). *Geomorphology* 167:21–34
- Krautblatter M, Moser M, Kemna A, Verleysdonk S, Funk D, Dräbing D (2010a) Climate change and enhanced rockfall activity in the European Alps. *Z Dtsch Ges Geowiss* 68:331–332
- Krautblatter M, Verleysdonk S, Flores-Orozco A, Kemna A (2010b) Temperature-calibrated imaging of seasonal changes in permafrost rock walls by quantitative electrical resistivity tomography (Zugspitze, German/Austrian Alps). *J Geophys Res* 115(F2):F02003
- Krauter E, Kumerics C, Feuerbach J, Lauterbach M (2012) Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau* (Heft 75, 61 S)
- Kuhn D, Prüfer S (2014) Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: a case study of Rügen, Germany. *Geomorphology* 213:153–165
- Kurdal S, Wehinger A, Krajewski W (2006) Entwicklung von Baugebieten in Rheinhessen/Rheinland-Pfalz bei möglicher Hangrutschgefährdung. *Mainz Geowiss Mitt* 34:135–152
- Lavigne A, Eckert N, Bel L, Parent E (2015) Adding expert contributions to the spatiotemporal modelling of avalanche activity under different climatic influences. *J R Stat Soc: Series C (Applied Statistics)* 64(4):651–671
- Leinauer J, Jacobs B, Krautblatter M (2020) Anticipating an imminent large rock slope failure at the Hochvogel (Allgäu Alps). *Geomechanics and Tunneling* 13(6):597–603
- Mathie E, McInnes R, Fairbank H, Jakeways J (2007) Landslides and climate change: challenges and solutions. *proceedings of the International Conference on Landslides and Climate Change, Ventnor, Isle of Wight, UK, 21.–24.05.2007*
- Matiu M, Crespi A, Bertoldi G et al (2021) Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019. *Cryosphere* 15(3):1343–1382
- Matsuoka N (2001) Solifluction rates, processes and landforms: a global review. *Earth Sci Rev* 55(1):107–134
- Mayer K, Patula S, Krapp M, Leppig B, Thom P, von Poschinger A (2010) Danger map for the Bavarian Alps. *Z Dtsch Ges Geowiss* 161(2):119–128
- Mergili M, Glade T (2020) Synthese. In: Glade T, Mergili M, Sattler K (Hrsg) *ExtremA 2019: aktueller Wissenstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*. S 31–41
- Nie W, Krautblatter M, Leith K, Thuro K, Festl J (2017) A modified tank model including snowmelt and infiltration time lags for deep-seated landslides in alpine environments (Aggenalm, Germany). *Nat Hazard* 17(9):1595–1610
- Nötzli J, Gruber S, von Poschinger A (2010) Modeling and measurement of permafrost temperatures in the summit crest of the Zugspitze Germany. *Geogr Helv* 65(2):113–123
- Oeltzschner H (1997) Untersuchungen von Massenbewegungen im südlichen Bayern durch das Bayerische Geologische Landesamt. *Wasser Boden* 49(1):46–50
- Otto J-C, Krautblatter M, Sattler K (2020) Permafrostgefahren. In: Glade T, Mergili M, Sattler K (Hrsg) *ExtremA 2019: aktueller Wissenstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*. S 537–586
- Owen LA, Thackray G, Anderson RS, Briner J, Kaufman D, Roe G, Pfeffer W, YiC (2009) Integrated research on mountain glaciers: current status, priorities and future prospects. *Geomorphology* 103(2):158–171
- Ozturk U, Wendi D, Crisologo I, Riemer A, Agarwal A, Vogel K, López-Tarazón JA, Korup O (2018) Rare flash floods and debris flows in southern Germany. *Sci Total Environ* 626:941–952
- Papathoma-Köhle M, Glade T (2013) The role of vegetation cover change for landslide hazard and risk. In: Renaud G, Sudmeier-Rieux K, Estrella M (Hrsg) *The role of ecosystems in disaster risk reduction*. UNU-Press, Tokio, S 293–320
- Pielmeier C, Techel F, Marty C, Stucki T (2013) Wet snow avalanche activity in the Swiss Alps – trend analysis for mid-winter season. In: Naaim-Bouvet F, Durand Y, Lambert R (Hrsg) *International Snow Science Workshop 2013 Proceedings*. ISSW 2013, Grenoble – Chamonix Mont Blanc, 07.–11.10.2013. ANENA, Grenoble, S 1240–1246
- Preh A, Mölk M, Illeditsch M (2020) Steinschlag und Felssturz. In: Glade T, Mergili M, Sattler K (Hrsg) *ExtremA 2019: aktueller Wissenstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*. S 425–460
- Röhlich B, Jehle R, Krauter E (2003) Systematische Bestandsaufnahme des Gefährdungspotentials an Bahnstrecken durch Steinschlag, Felssturz und Hangrutsch im Mittelrhein-, Mosel- und Lahnggebiet. 14. Tagung für Ingenieurgeologie, Kiel, 26.–29.03.2003, S 281–286
- Rupp S, Damm B (2020) A national rockfall dataset as a tool for analysing the spatial and temporal rockfall occurrence in Germany. *Earth Surf Proc Land* 45(7):1528–1538

- Rupp S, Wohlers A, Damm B (2018) Long-term relationship between landslide occurrences and precipitation in southern Lower Saxony and northern Hesse. *Z Geomorphol* 61(4):327–338
- Schlögl M, Matulla C (2018) Potential future exposure of European land transport infrastructure to rainfall-induced landslides throughout the 21st century. *Nat Hazard* 18(4):1121–1132
- Schmidt KH, Beyer I (2001) Factors controlling mass movement susceptibility on the Wellenkalk-scarp in Hesse and Thuringia. *Z Geomorphol*, (Supplementband) 125:43–63
- Schmidt J, Dikau R (2004) Modeling historical climate variability and slope stability. *Geomorphology* 60(3–4):433–447
- Schmidt J, Dikau R (2005) Preparatory and triggering factors for slope failure: analyses of two landslides near Bonn, Germany. *Z Geomorphol* 49(1):121–138
- Schneider H, Höfer D, Irmeler R, Daut G, Mäusbacher R (2010) Correlation between climate, man and debris flow events – a palynological approach. *Geomorphology* 120(1):48–55
- Steinkogler W, Sovilla B, Lehning M (2014) Influence of snow cover properties on avalanche dynamics. *Cold Reg Sci Technol* 97:121–131. ► <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.10.002>
- Studeregger A, Podesser A, Mitterer C, Fischer J-T, Ertl W, Nairz P, Mair R (2020) Lawinen. In: Glade T, Mergili M, Sattler K (Hrsg) *ExtremA 2019: aktueller Wissenstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*. S 511–536
- Terhorst B (2001) Mass movements of various ages on the Swabian Jurassic escarpment geomorphologic processes and their causes. *Z Geomorphol* 125, (Supplementband 125):105–127
- Terhorst B (2009) Landslide susceptibility in cuesta scarps of SW-Germany (Swabian Alb). In: Bierman P, Montgomery P (Hrsg) *Key concepts in geomorphology*
- Verleysdonk S, Krautblatter M, Dikau R (2011) Sensitivity and path dependence of mountain permafrost systems. *Geogr Ann Ser B* 93(2):113–135
- Warscher M, Strasser U, Kraller G, Marke T, Franz H, Kunstmann H (2013) Performance of complex snow cover descriptions in a distributed hydrological model system: a case study for the high Alpine terrain of the Berchtesgaden Alps. *Water Resour Res* 49(5):2619–2637. ► <https://doi.org/10.1002/wrcr.20219>
- Weber M (2003) Informationen zum Gletscherschwund – gletscherschwund und Klimawandel an der Zugspitze und am Vernagtferner (Ötztaler Alpen). Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, S 10
- Wiedenmann J, Rohn J, Moser M (2016) The relationship between the landslide frequency and hydrogeological aspects: a case study from a hilly region in Northern Bavaria (Germany). *Environ Earth Sci* 75(7):1–16
- Wohlers A, Damm B (2021) Analysis of historical data for a better understanding of post construction landslides at an artificial Waterway. *Earth Surf Proc Land* 46:344–356
- Wohlers A, Kreuzer TM, Damm B (2017) Case histories for the investigation of landslide repair and mitigation measures in NW Germany. In: Sassa K, Mikoš M, Yin Y (Hrsg) *Advancing culture of living with landslides*. WLF 2017. Springer, S 519–525
- Zangerl C, Mergili M, Prager C, Sausgruber J-T, Weidinger J-T (2020) Felsgleitung, Felslawine und Erd-/Schuttstrom. In: Glade T, Mergili M, Sattler K (Hrsg) *ExtremA 2019: aktueller Wissenstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*. S 383–424
- Zemp M, Haeberli W, Hoelzle M, Paul F (2006) Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophys Res Lett* 33(13):L13504

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

