

## 7. ÖKONOMISCHE ASPEKTE, GEFAHREN UND MASSNAHMEN

Das Abschmelzen des Eises auf der Erde ist nicht nur ein Naturereignis, sondern betrifft auch die menschliche Gesellschaft in vielfältiger Weise. In alpinen Hochgebirgen kann das Auftauen von Permafrost zu instabilen Hängen und Erdbeben führen. Der Ausbruch von Gletscherseen bedroht talabwärts gelegene Siedlungen (Kap. 7.1). Schmelzende Gletscher können auch Vulkanausbrüche begünstigen, durch die Eis- und Geröllmassen ganze Ortschaften verschütten können (Kap. 7.2). In Sibirien sind zahlreiche Straßen, Eisenbahnlinien, Pipelines und Flughäfen durch auftauenden Permafrost gefährdet (Kap. 7.3). In Mittelasien und den tropischen Anden ist die Bevölkerung zu einem erheblichen Teil auf das Gletscherwasser als Trink- und Brauchwasser angewiesen, das in Zukunft versiegen könnte (Kap. 7.4 und 7.5). Durch die Schneeschmelze gibt es heute schon in manchen Hoch- und Mittelgebirgen Probleme für den Wintertourismus (Kap. 7.6). Positive ökonomische Folgen zeichnen sich durch die Verringerung der arktischen Meereisdecke ab, wodurch etwa der Seeweg zwischen Europa und China um mehrere tausend km verringert wird. Darüber gibt es Informationen im Kap. 4.7 im Band WARNSIGNAL KLIMA: Die Meere - Änderungen & Risiken.

### 7.1 Erdbeben, Lawinen und andere Gefahren

OLIVER KORUP

**Erdbeben, Lawinen und andere Gefahren:** In Zeiten globaler Erwärmung ist das Auftreten vieler geologischer Massenbewegungen an die Degradation von Eis und Permafrost gebunden. Viele große untermeerische Massenbewegungen haben sich entlang von instabilen Schichten aus gefrorenen Methanhydraten entwickelt und sind beispielhaft für die katastrophale Mobilisation von großen Mengen an Sediment und Treibhausgasen. Tauender Permafrost in Hochgebirgen und Polarregionen scheint zudem eine große Rolle beim Auslösen spektakulärer und zerstörerischer Eis-Fels-Lawinen zu spielen, die kaum zuvor in historischer Zeit dokumentiert wurden. Trotz dieser intuitiven Beziehungen zwischen globaler Erwärmung, schwindenden Eisressourcen und zunehmenden Hanginstabilitäten erlaubt bisher nur die jüngste Generation detaillierter Inventare an Massenbewegungen statistisch ausreichend robuste Schätzungen zu klima-induzierten Änderungen im Auftreten solcher Naturgefahren.

**Landslides, avalanches and other hazards:** Landslides, avalanches, and other hazards: In the age of global warming the occurrence of many types of geological mass movements is tied to degrading ice and permafrost. Many large submarine landslides have developed along layers of weakness tied to frozen methane hydrates, and are thus emblematic of the growing hazards of catastrophic sediment transport and concomitant release of greenhouse gases. The degradation of alpine and polar permafrost further seems to give rise to spectacular long-runout ice-rock avalanches with a destructive potential rarely witnessed in historic times. Despite these intuitive links between global warming, dwindling ice resources, and increased slope instability, only the most recent landslide datasets have begun to afford sufficient statistical robustness to start searching for significant increases in mass-movement activity triggered by climate change.

Erdbeben und Lawinen sind nur zwei von vielen Prozessen der geologischen Massenbewegungen und damit Teil der natürlichen Anpassung von Hängen und Böschungen unter dem Einfluss von Schwerkraft, Wasser und Verwitterung. Man unterscheidet zwischen Ursachen und Auslösern solcher Massenbewegungen. Zu den Ursachen zählen Faktoren, die das Versagen eines Hanges mit vorherbestimmten, wie etwa seine Geometrie, mechanische Boden- oder Felseigenschaften, sowie sein Grund- und Porenwassergehalt. Auslöser von Massenbewegungen hingegen sind Prozesse oder Ereignisse wie Unterschneidung, Erdbeben, Starkniederschläge oder Schneeschmelze, die Hänge letztlich destabilisieren und in Bewegung versetzen. Massen-

bewegungen lassen sich nach einem Baukastensystem klassifizieren, indem man die Art des vornehmlich bewegten Materials (Fels, Schutt, Erde) mit dem dominanten Umlagerungsprozess (Stürzen, Kippen, Gleiten, Fließen) und gegebenenfalls weiteren Merkmalen wie der durchschnittlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit kombiniert. Demnach sind gemäß dieser Einteilung mit Erdbeben (*englisch soil slides*) meist flachgründende, gleitende Bewegungen aus vornehmlich feinem und oberflächennahem Hangmaterial und mit Lawinen (*englisch avalanches*) meist fließende Massen aus Schnee gemeint. Lawinen aus Felstrümmern werden im deutschen Sprachgebrauch etwas inkonsistent als Bergstürze, im Englischen aber als rock avalanches angesprochen.

Das häufige Auftreten von Massenbewegungen in Gebirgslandschaften täuscht darüber hinweg, dass auch topographisch weniger ausgeprägte Gebiete ausgesprochen anfällig für Hanginstabilitäten sein können. Die plötzliche Mobilisierung von großen Paketen an Aufschichtungen (sogenannten *active layer detachments*) in polaren Permafrostgebieten kann schon bei kaum wahrnehmbaren Hangneigungen von etwa  $1\text{--}2^\circ$  beginnen und mehrere Kilometer Oberboden ablösen. Mehrere hundert Meter mächtige Sedimentstapel auf den ähnlich flachen Kontinentalschelfs haben wiederholt zu einigen der größten submarinen Massenbewegungen auf unserem Planeten geführt. Solche Ereignisse bewegen innerhalb von mehreren Minuten bis zu mehrere tausend Kubikkilometer(!) und lösen dabei oft meterhohe Tsunamiwellen aus; gleichmäßig verteilt würden die Ablagerungen solcher Massebewegungen die gesamte Oberfläche unseres Planeten mit mehreren Millimetern bedecken. Selbst geologisch scheinbar stabile Regionen wie die zentrale Sahara bergen zahlreiche Abrissnischen und Ablagerungen großflächiger Felsstürze, Schollengleitungen und Murgänge, deren Alter nur geschätzt werden kann, aber womöglich mehrere tausend bis hunderttausend Jahre umfasst. Da dort aktuell kaum große Hangdeformationen stattfinden, bieten solche Ablagerungen wertvolle Hinweise auf vergangene klimatische Gunstbedingungen, insofern andere Auslöser wie etwa starke Erdbeben ausgeschlossen werden können.

### Unterschätztes Schadensbild

Da Massenbewegungen häufige Denudationserscheinungen in fast allen Teilen der Welt sind, ist die detaillierte Erfassung ihres Auftretens und damit verbundener Schäden nur beispielhaft in bestimmten Gebieten realisierbar. So wurden insbesondere die Todesfälle durch Massenbewegungen bis in jüngste Zeit hinein deutlich unterschätzt. Neuere Schätzungen gehen davon aus, dass allein zwischen 2004 und 2010 weltweit mehr als 32.000 Menschen durch Massenbewegungen ums Leben kamen (PETLEY 2012); das ist um eine Größenordnung mehr als bisher angenommen. Allein 213 dokumentierte Murgänge haben zwischen 1950 und 2011 mehr als 77.000 Menschenleben gefordert (DOWLING & SANTI 2013). Gemäß dieser Studie haben die Hälfte aller Murgänge in Entwicklungsländern eine vierfach höhere Mortalitätsrate pro Ereignis als in besser entwickelten Staaten. Etwa ein Drittel dieser Murgänge hatte keine Starkniederschläge als Auslöser, forderte dafür jedoch tendenziell bis zu 50 mal mehr Todesopfer pro Ereignis.

### Klimawandel, Niederschlagsextreme und Massenbewegungen

In Zeiten des globalen Klimawandels ist seit langem die Diskussion darüber entfacht, ob im Durchschnitt höhere Oberflächentemperaturen zusammen mit häufiger auftretenden Wetterextremen das Auftreten von Massenbewegungen maßgeblich und negativ beeinflussen können (z.B. KEILER et al. 2010; HUGGEL et al. 2012). So gehen Wissenschaftler davon aus, dass eine Zunahme an Starkniederschlägen häufiger zu Hanginstabilitäten führen, und somit die Häufigkeit und Frequenz von Massenbewegungen erhöhen könnte. Eine Vielzahl von empirischen Studien belegt, dass vor allem flachgründende Massenbewegungen ab einer Kombination aus Niederschlagsintensität [mm/h] und -dauer [h] ausgelöst werden. Mit zunehmender Niederschlagsdauer zwischen 10 Minuten und 35 Tagen sinkt die minimale mittlere Intensität, ab der Hänge instabil werden können (GUZZETTI et al. 2007). Jedoch hängen solche Prognosen stark von örtlichen Gegebenheiten wie z.B. mittlerem Jahresniederschlag, Saisonalität, Bodentyp und -mächtigkeit oder Vegetationsbedeckung ab. So zeigt etwa eine detaillierte Untersuchung aus Japan, dass die Volumina von über 4.700 zwischen 2001 und 2011 aufgenommenen schadenbringenden Massenbewegungen nur bedingt mit Niederschlagskennzahlen in Verbindung gebracht werden können. Für das größte Materialaufkommen zeichneten nicht etwa die häufigsten, sondern vielmehr die sehr selten wiederkehrenden, Niederschlagssummen infolge tropischer Wirbelstürme verantwortlich. Hingegen war die am häufigsten wiederkehrende maximale Niederschlagsintensität mit den höchsten Gesamtvolumina an Massenbewegungen korreliert (SAITO et al. 2014). In Gebieten, die einen Großteil ihres Niederschlags als Schnee erfahren, würde eine abnehmende Schneebedeckung im Gegenzug sogar einen Rückgang an Lawinenaktivität bedeuten.

Solche Studien zeigen, dass pauschalisierte Schätzungen zum erhöhten Auftreten von Massenbewegungen infolge einer Zunahme von Extremwetterlagen selten angebracht sind. Zudem gibt es bisher nur wenige ausreichend bestückte Datenbanken, um verlässlich schätzen zu können, ob sich in den letzten Jahrzehnten tatsächlich ein signifikanter Trend in der Größen-Häufigkeits-Beziehung von Massenbewegungen in einem Gebiet abzeichnet. Solche Beziehungen folgen oft inversen Potenzgesetzen, so dass die beobachtete Häufigkeit von z.B. Steinschlägen und Felsstürzen indirekt proportional zu deren Fläche oder Volumen ist. Um statistisch robust zu sein, d.h. die Parameter dieser Größen-Frequenz-Beziehung hinreichend genau bestimmen zu können, benötigen Wissenschaftler Inventare solcher Felsbewegungen, die Stichprobenanzahlen von

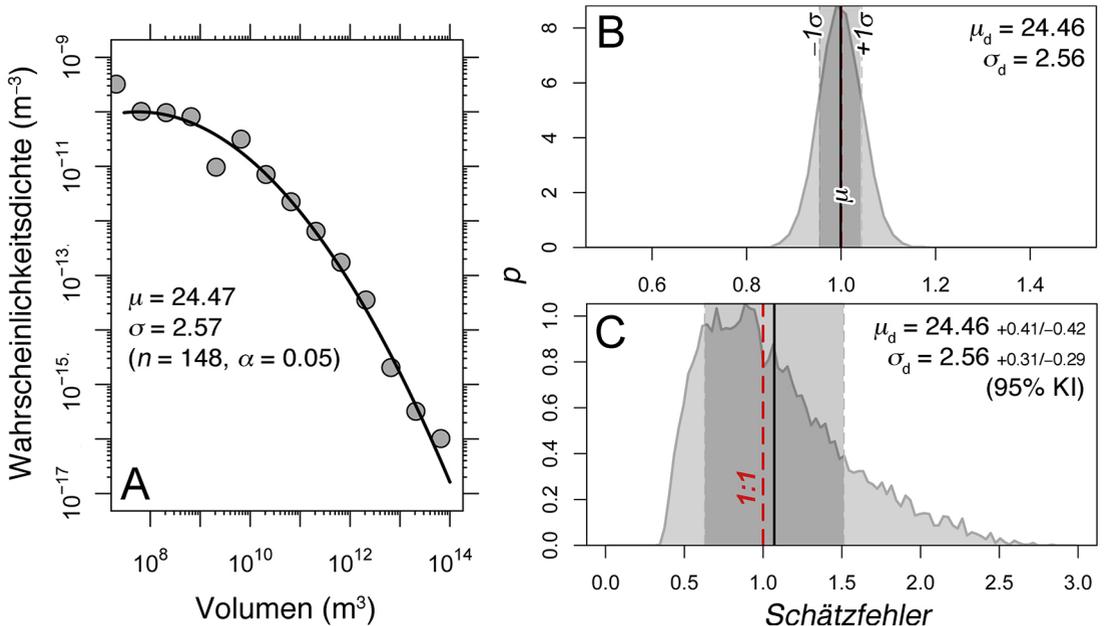
mindestens mehreren tausend Vorkommen beinhalten. Die meisten Aufnahmen solcher Ereignisse werden nur selten direkt im Gelände erhoben. Stattdessen werden die Massenbewegungen aus historischen Luftbildern oder hochauflösenden Satellitenaufnahmen kartiert. Dabei entstehen weitere Schätzfehler, die eine statistische Bestimmung von zeitlichen Änderungen in Größen-Frequenz-Beziehungen zusätzlich erschweren (Abb. 7.1-1). Obgleich also physikalisch plausibel, lässt die derzeitige Datenlage nur wenige aufschlussreiche Beweise für ein durch den Klimawandel verändertes Auftreten von Massenbewegungen zu.

### Permafrost und Felsinstabilitäten im Hochgebirge

Eine andere und etwas jüngere Forschungsrichtung widmet sich dem vor allem für die Hanginstabilität mindernd wirkenden Auftauen von Permafrost in Hochgebirgen, Polargebieten und Meeressedimenten. Spätestens seit dem außergewöhnlich warmen Sommer im Jahre 2003, der in den Alpen mit einer erhöhten Felssturzaktivität verbunden war, gewann die Forschung über alpinen Permafrost stark an Zuwachs (HARRIS et al. 2009). Dabei beschreibt der Begriff des

Permafrosts einen thermischen Zustand, in dem die Temperatur in Boden oder Fels für mindestens zwei Jahre unter 0 °C bleibt. Wasser bzw. Eis spielt also in dieser Definition vorerst keine Rolle. Jedoch haben alle natürlichen Hänge einen Mindestanteil an Wasser, so dass sich dessen thermische und mechanische Eigenschaften auf die lokale Hangstabilität auswirken sollten. Die mit häufigem Gefrieren und Auftauen verbundenen Volumenänderungen von Wasser können in Felsklüften Druckschwankungen verursachen und so zu einer graduellen Weitung führen, die den Fels weiter destabilisiert. Zunehmende Temperaturen senken die Scherfestigkeit von Eis in Klüften und reduziert damit den Zusammenhalt des Gesteins. Wasser hat überdies eine hohe Wärmekapazität und kann daher in Felsklüften die Wärme aus direkter Sonneneinstrahlung weiter in das Innere eines Permafrosthangs transportieren.

Ein sich häufendes Phänomen ist das der katastrophalen Eis- und Felslawinen, die sich ohne erkennbaren Auslöser von steilen vergletscherten Hochgebirgshängen lösen und innerhalb weniger Minuten mehrere Kilometer weit auslaufen können. Eines der prominentesten Beispiele war eine  $300 \times 10^6 \text{ m}^3$  große Eis-Fels-Lawine, die im Jahre 2002 vom Kolka-Gletscher im Kaukasus



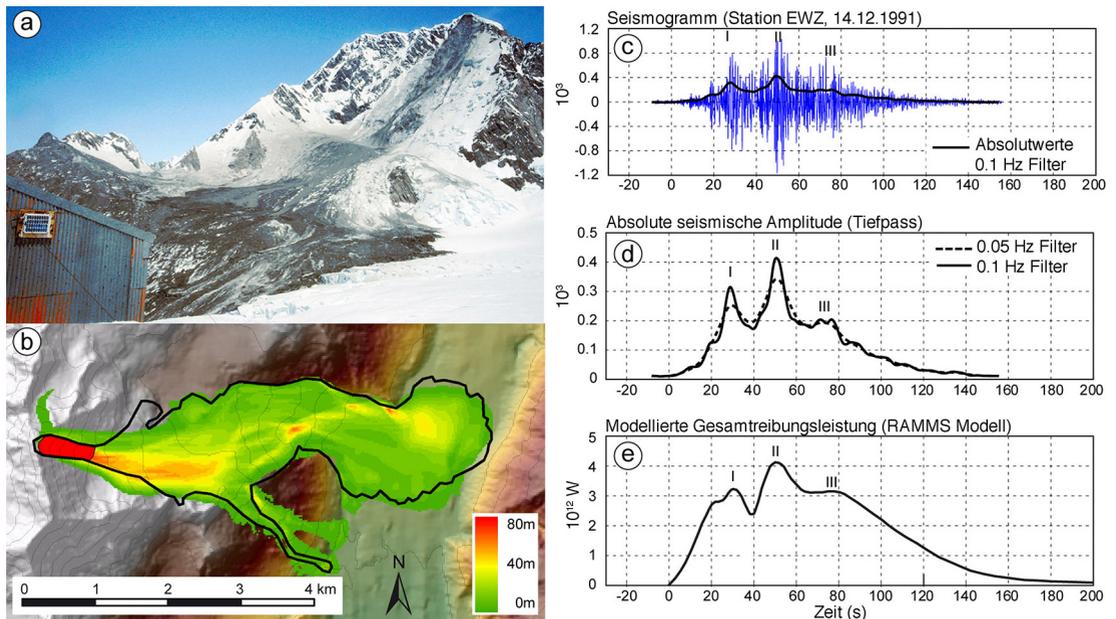
**Abb. 7.1-1:** Größen-Frequenz-Verteilungen geben Aufschluss über das relative Auftreten von Massenbewegungen, sind aber bei kleinen Datenmengen schwer zu schätzen. **A:** Die Größenverteilung einer Stichprobe aus  $n = 148$  großen sub-marinen Massenbewegungen kann z.B. mit einer logarithmischen Normalverteilung angenähert werden (Signifikanz  $\alpha = 0,05$ ); allerdings unterliegt die Bestimmung ihres Mittelwertes  $\mu$  und ihrer Standardabweichung  $\sigma$  sehr starken Schätzfehlern. **B.** Verteilung des relativen Schätzfehlers von  $\mu$  für 10.000 künstlich generierte und log-normalverteilte Datensets mit exakt gleichem Größenspektrum (Ein Fehler = 1 bedeutet perfekte Übereinstimmung mit dem theoretischen Wert). **C.** Verteilung des relativen Schätzfehlers aus der Stichprobe in A, ermittelt durch wiederholte Schätzung aus 1.000 zufällig gezogenen Teildatensets.

ihren Anfang nahm und das darunter liegende Tal binnen weniger Minuten über 19 Kilometer weit verfüllte, dabei mehrere Seen aufstaute und 140 Menschen das Leben kostete (EVANS et al. 2009). Das Volumen dieser Ablagerungen würde die Gesamtfläche Berlins unter mehr als 30 cm an Eis und pulverisiertem Gestein bedecken. Die genauen Mechanismen hinter dieser Katastrophe sind noch umstritten, obgleich vergleichbare Massenbewegungen bisher selten beobachtet wurden. Demnach hat dieses Ereignis das Gefährdungsspektrum von vergletscherten Hochgebirgsregionen um eine wichtige und momentan noch kaum vorhersagbare Facette erweitert. Numerische Modellierungen und mechanische Experiment bieten hier wichtige Einblicke (Abb. 7.1-2). Seit dem Beginn des 21. Jahrhunderts ereigneten sich mindestens 40 ähnlich schnell auslaufende, aber kleinere ( $10^6$ - $10^7$  m<sup>3</sup>), Bergstürze und Eis-Fels-Lawinen in vielen höhergelegenen Teilen vergletschelter Hochgebirgsregionen (Abb. 7.1-2).

### Permafrostdegradation in der Arktis und der Kohlenstoffkreislauf

Auch in arktischen Regionen führt das Auftauen von Permafrost zu Hanginstabilitäten wie den bereits er-

wähnten *active layer detachments*. Diese Massenbewegungen umfassen den gravitativen Transport von feinkörnigem Oberboden entlang der Grenze zwischen wassergesättigter Auftauschicht und dem dauergefrorenen und damit wasserundurchlässigen Unterboden. Arktische Dauerfrostböden sind aufgrund ihres hohen Wasser- bzw. Eisgehaltes natürliche Kühlschränke, die in vornehmlich sauerstoffarmer, also reduzierender, Umgebung den Zersetzungsprozess von totem organischen Material wie etwa von Tier- und Pflanzenresten stark verlangsamen (deswegen findet man heute noch in Permafrostböden sehr gut erhaltene Mammutkadaver aus der letzten Eiszeit). Dementsprechend ist der Gehalt an organischen Kohlenstoffverbindungen, die sich im Laufe der Jahrtausende angesammelt haben, sehr hoch in arktischen Böden; hinzu kommt windverfrachteter Löss, der stark karbonathaltig ist. Diese natürliche Kohlenstoffsenke wird, obgleich mit großen Unsicherheiten verbunden, auf mindestens  $400 \times 10^9$  t C geschätzt (O'CONNOR et al. 2010) und kann empfindlich durch oberflächliche Massenbewegungen gestört werden, die organische Substanzen und Nährstoffe sowohl in Gewässern als auch in der Atmosphäre wieder in Umlauf bringen können. Das beobachtete zuneh-



**Abb. 7.1-2:** Beispiel einer numerischen Modellierung des Bergsturzes von Aoraki/Mt. Cook, Neuseeland 1992. Diese Massenbewegung mobilisierte ursprünglich  $12 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, nahm jedoch noch Eis und Schnee mit auf, was zur Ablagerung von  $40$ - $80 \times 10^6$  m<sup>3</sup> führte. A. Abrissgebiet und Teil des Auslaufgebietes mit Ablagerungen (Foto: Ian Owens). B. Simulierte maximale Durchflusshöhen; rote Fläche zeigt das Abrissgebiet; schwarze Umrandung zeigt die im Gelände kartierten Ablagerungen. C. Seismogramm des Bergsturzeignisses, aufgezeichnet Station EWZ etwa 58 km östlich des Abrissgebietes. D. Detail der gefilterten absoluten seismischen Amplitude in C. D. Berechnete Gesamtreibungsleistung. Übereinstimmende Gipfel I, II und III erlauben eine Modellkalibration und Übertragung auf ähnliche Ereignisse (modifiziert nach SCHNEIDER et al. 2010).

mende Schwinden der arktischen Meereisdecke führt zudem zu längeren eisfreien Perioden, höherem Wellengang und damit einhergehender Erosion von arktischen Küstenlinien. Viele der dadurch entstandenen oder weiter übersteilten Kliffs versagen verstärkt durch Massenbewegungen und können so große Mengen an organischem Kohlenstoff in das marine Ökosystem einbringen.

### **Methanhydrate und Massenbewegungen**

Auch untermeerischer Permafrost in Form von methanhaltigen Gashydraten (auch *clathrates* genannt) spielt eine wichtige Rolle für Hanginstabilitäten (MASLIN et al. 2010). Diese Kohlenwasserstoffe sind in einem »Käfig« aus Wassermolekülen in Sedimenten der Meeresböden eingelagert und bei niedrigen Temperaturen und hohen Auflasten stabil. Bei Wassertemperaturen am Meeresboden von 5 °C sind Methanhydrate ab einer Meerestiefe von etwa mindestens 400 m stabil. Eine Erwärmung des Bodenwassers oder eine Abnahme des Druckes der aufliegenden Wassersäule führt zur Lösung dieser Methanhydrate und damit einer Freisetzung von hohen Mengen an Treibhausgasen in den Ozean und kurz darauf in die Atmosphäre. Allein im ostsibirischen Schelfmeer werden derzeit schätzungsweise bis zu  $44 \times 10^6$  t C/Jahr freigesetzt. Da Methan ein etwa 25-mal stärkeres Treibhausgas als Kohlendioxid ist, sind große untermeerische Methanhydratreserven potentielle Quellen für einen positiven Rückkopplungseffekt globaler Erwärmung. Untersuchungen an mehreren großen submarinen Massenbewegungen zeigen, dass deren Gleitflächen oft mit weiträumigen Methanhydratlagen zusammenfallen, die in die mehrere Kilometer mächtigen Sedimentstapel der Kontinentalschelfs eingelagert wurden. Bodenmechanische Studien belegen, dass die Stabilität eines untermee-

rischen Hanges mit zunehmendem Methanhydratgehalt abnimmt, wenn alle anderen Faktoren gleich bleiben. Ab einem Hydratgehalt von ~10% können bereits Hänge mit 2° Neigung theoretisch instabil werden.

Dieses Zusammenspiel von Permafrost-bedingten Schwachstellen in Meeresböden und großen Massenbewegungen wirft die Frage nach Ursache und Wirkung auf. Einerseits können große submarine Rutschungen z.B. durch erhöhte Sedimentauflast oder starke Seebeben ausgelöst werden. Die durch die sich ablösenden Sedimentstapel entstehende Entlastung kann Methanhydrate plötzlich destabilisieren und in die Atmosphäre freisetzen. Andererseits könnte auch eine klimabedingte Änderung des Stabilitätsfeldes der Methanhydrate deren Lösung herbeiführen und dadurch eine Reduzierung der lokalen Hangstabilität auslösen; eine katastrophale Massenbewegung wäre hier also die Folge, und nicht die Ursache. Wie wirkt sich die zunehmende globale Erwärmung auf die submarinen Methanhydrate aus? Simulationen zeigen, dass der Effekt des sich erwärmenden Bodenwassers stärker ins Gewicht fällt als die zunehmende Auflast der Wassersäule im Zuge steigender Meeresspiegel, sodass die Gefährdung katastrophaler Freisetzung von Methanhydraten (und damit möglicherweise verbundenen Massenbewegungen) im Durchschnitt eher steigen könnte.

### **Fazit**

In Zeiten der globalen Erwärmung ist das Auftreten von Massenbewegungen in mehrerlei Hinsicht an die Stabilität des Eises der Erde gekoppelt. Viele große submarine Sedimentrutschungen sind entlang von bodenmechanisch schwachen gashaltigen Permafrostschichten entstanden und belegen das Potenzial für eine gleichzeitige katastrophale Umlagerung von hohen Sedimentmengen und Treibhausgasen. Oberflächennahe Rutschungen und kollabierende Küstenkliffs



**Abb. 7.1-3:** Abrissgebiet und Auslaufbereich eines Bergsturz-Murgangs in Capricorn Creek, südliche Küstenkette British Kolumbiens, Kanada. Diese komplexe und extrem rapide Massenbewegung umfasste ca.  $40 \times 10^6$  m<sup>3</sup> und trat ohne erkennbaren Auslöser bei warmen Temperaturen in stark zerklüfteten, eisführenden Vulkangesteinen auf (Fotos: John J. Clague).

in den Böden der arktischen Tundren tragen weiter dazu bei, organischen Kohlenstoff in die Atmosphäre zu bringen und den Oberflächenabtrag weiter voranzutreiben. In Hochgebirgen trägt die Erwärmung von Eis und Permafrost dazu bei, neue Mischformen wie extrem schnelle und weitreichende Eis-Fels-Lawinen zu begünstigen sowie generell den Zusammenhalt des Gesteinsverbundes zu beeinträchtigen. Diesbezüglich sind bauliche wie planerische Gegenmaßnahmen von Vorteil, die nicht die Symptome, sondern die Ursachen solcher Massenbewegungen deutlich erkennen und einzugrenzen wissen.

## Literatur

- DOWLING, C. A. & P. M. SANTI (2013): Debris flows and their toll on human life: a global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011. *Nat. Hazards*, 71, 203-227.
- EVANS, S. G., TUTUBALINA, O. V., DROBYSHEV, V. L., CHERNOMORETS, S. S. et al. (2009): Catastrophic detachment and high-velocity long-runout flow of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia in 2002. *Geomorphology*, 105, 314-321.
- GUZZETTI, F., PERUCCACCI, S., ROSSI, M. & C. P. STARK (2007): The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5, 3-17.
- HARRIS, C., ARENSON, L. U., CHRISTIANSEN, H. H., ETZELMÜLLER, B. et al. (2009): Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Sci. Rev.*, 92, 117-171.
- HUGGEL, C., CLAGUE, J. J. & O. KORUP (2012): Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surf. Process. Landforms* 37, 77-91.
- KEILER, M., KNIGHT, J. & S. HARRISON (2010): Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. *Phil. Trans. Royal Soc. A*, 368, 2461-2479.
- MASLIN, M., OWEN, M., BETTS, R., DAY, S. et al. (2010): Gas hydrates: past and future geohazard? *Phil. Trans. Royal Soc. A*, 368, 2369-2393.
- O'CONNOR, F. M., BOUCHER, O., GEDNEY, N., JONES, C. D. et al. (2012): Possible role of wetlands, permafrost, and methane hydrates in the methane cycle under future climate change: A review. *Rev. Geophys.*, 48 RG4005.
- PETLEY, D. (2012): Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40, 927-930.
- SAITO, H., KORUP, O., UCHIDA, T., HAYASHI, S. & OGUCHI, T. (2014): Rainfall conditions, typhoon frequency, and contemporary landslide erosion in Japan. *Geology* 42, 999-1002.
- SCHNEIDER, D., BARTELT, P., CAPLAN-AUERBACH, J., CHRISTEN, M., HUGGEL, C. & B. W. McARDELL (2010): Insights into rock-ice avalanche dynamics by combined analysis of seismic recordings and a numerical avalanche model. *J. Geophys. Res.*, 115. doi:10.1029/2010JF001734.

## Kontakt:

Prof. PhD. Oliver Korup  
 Institut für Erd- und Umweltwissenschaften  
 Universität Potsdam  
 oliver.korup@geo.uni-potsdam.de

Korup, O. (2015): *Erdrutsche, Lawinen und andere Gefahren*. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp. 251-256. Online: [www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de). doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.38