

Der Einfluss des Klimas auf Rutschungen im periglazialen Prozessbereich der Alpen

Daniel Tobler¹ (daniel.tobler@geotest.ch)

Kaspar Graf¹ (kaspar.graf@geotest.ch)

¹ GEOTEST AG, Zollikofen

1 Einleitung

Rutschungen sind gravitative (hangabwärts gerichtete) Verlagerungen von Fest- und/oder Lockergesteinen entlang einer Gleitfläche und können den Massenbewegungen zugeordnet werden. Diese Prozessart kann in den unterschiedlichsten Formen auftreten und je nach Untergrund, Gesteinsbeschaffenheit oder Wasseranteil anders verlaufen. Während Hangmuren und spontane Rutschungen schnell und plötzlich auftreten, bewegen sich die permanenten Rutschungen oder kriechende Hänge langsam und kontinuierlich. Schätzungsweise 7% der Gesamtfläche der Schweiz sind von Hanginstabilitäten betroffen. Ein zentraler Faktor für die Aktivierung von Rutschungen ist neben der geologischen und morphologischen Prädisposition das Wasser. Die Zunahme der Niederschläge in der Westschweiz seit den 1970er Jahren hat in verschiedenen Rutschgebieten zu erhöhten Bewegungen geführt. In jüngster Vergangenheit haben zunehmende Winterniederschläge in Kombination mit grossen Schmelzwassermengen ebenfalls mehr Rutschungen ausgelöst (OcCC, 2009). Generell ist heute erwiesen, dass Hanginstabilitäten in höheren Lagen wegen des Gletscherrückzugs, der auftauenden Permafrostböden, zunehmender Winterniederschläge und der steigenden Schneefallgrenze in Zukunft vermehrt auftreten werden (Auer, 2007).

2 Definitionen

2.1 Allgemeines

Bei Rutschungen kann grundsätzlich zwischen zwei Formen unterschieden werden -

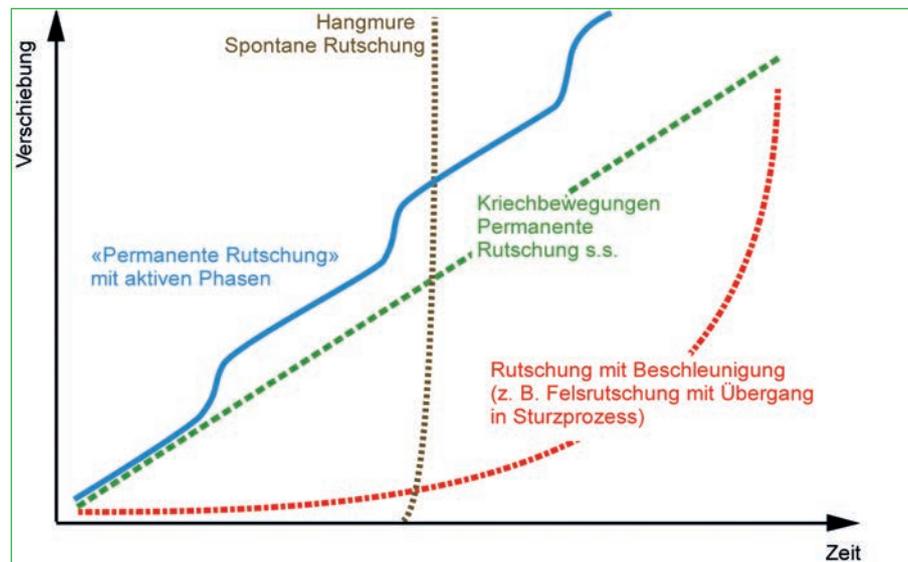


Abbildung 1: Schematische Darstellung von verschiedenen Verschiebungskurven bei Rutschungen (BAFU 2016). Die permanenten Rutschungen weisen oft eine Zyklizität im Jahresverlauf auf (z.B. erhöhte Bewegungen im Frühsommer bei Schneeschmelze) oder können in Jahren mit hohen Niederschlägen eine Aktivierung erfahren.

den Rotations- und Translationsrutschungen. Während Rotationsrutschungen an ihrer Basis eine mehr oder weniger konkave Gleitfläche aufweisen, verfügen Translationsrutschungen über mehrheitlich ebene oder abgestufte, hangauswärts gerichtete Gleitflächen (z.B. Varnes 1978). Die meisten grossen Hangbewegungen sind eine Kombination beider Typen.

Mit dem Fokus auf der Gefahrenbeurteilung unterscheidet die Bundesrichtlinie für Massenbewegungen die Rutschungen primär in Abhängigkeit der Prozessgeschwindigkeit (Abbildung 1). Die hydrogeologischen Bedingungen beeinflussen die Aktivität von Rutschungen in wesentlichen Teilen. Deshalb kommt dem Wasser im Untergrund sowie an der Oberfläche punkto Mechanismus und Aktivität eine zentrale Bedeutung zu. In Anleh-

nung an Selby (1993) werden in der Schweiz folgende Eigenschaften zur Differenzierung der Prozessarten als massgeblich erachtet: Geschwindigkeit und Bewegungsmechanismus, Deformationsart, Geometrie, Materialbeschaffenheit und Wassergehalt.

2.2 Permanente Prozesse

Permanente Rutschungen

Permanente Rutschungen verschieben sich kontinuierlich und gleichmässig über einen längeren Zeitraum hinweg hangabwärts (Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende). In besonderen Fällen kann eine Serie von Gleitflächen innerhalb einer Scherzone von mehreren Metern auftreten. Die permanenten Rutschungen können Zonen differenzieller Bewegungen aufweisen und Phasen der (Re)Aktivierung



Abbildung 2: (Fels)Rutschung Driest am Ende des grossen Aletschgletschers als Beispiel einer postglazialen Hangentlastung (Vogler et al., 2016) mit gut sichtbarem hellem Abrissrand der Rutschung (rote Pfeile). Die Bewegungen werden seit mehreren Jahren im Rahmen von Forschungsprojekten verfolgt (Foto M. Vogler).

durchlaufen.

Auslöser bilden oft aussergewöhnliche Witterungsverhältnisse (langanhaltende und/oder starke Niederschläge, Schneeschmelzen), Wasserinput von unten wie z.B. durch Karst, auftauenden Permafrost oder eine Störung des Gleichgewichtes durch Erosion (Entlastung) am Hangfuss (Abbildung 2). Gleitflächen bilden sich häufig in verwitterten, tonreichen, plastischen Lockergesteinen. Das darauf abgleitende Material kann durchaus aus kompetenten Gesteinen oder durchlässigem Lockermaterial bestehen. Gleitbewegungen sind je nach Eigenschaften der Gleitfläche und vorhandenem Wasserdruck auch in wenig geneigtem Gelände unterhalb von 15% Hangneigung möglich sind (Sidle und Ochiai, 2006).

Hangkriechen

Über lange Zeiträume anhaltende, langsame Verformungen im Lockergestein oder Fels können zu kriechenden Hangbewegungen führen. Dabei finden bruchlose, kontinuierliche Verformungen und/oder ein diskontinuierliches Kriechen mit Gleitvorgängen auf zahlreichen kleinen Trennflächen statt (Bründl, 2009). Im

Gegensatz zu den permanenten Rutschungen sind keine durchgehenden Gleitflächen ausgebildet. Ausgesprochen grossräumige Phänomene wie Talzusub und Bergzerreissung (z.B. Grindelwald, Kienholz 1977) können Formen tiefgründiger Kriechbewegungen sein. Im periglazialen Raum zeigen sich mit den Block-

gletschern und Solifluktionserscheinungen (Abbildung 3) Spezialfälle von Hangkriechen (siehe Beitrag Gebirgspermafrost). Bei diesen kriechenden Hangbewegungen kann das Vorhandensein einer durchgehenden Gleitfläche in gewissen Fällen jedoch nicht eindeutig ausgeschlossen werden – so treten z.B. im Fels generell Sprödbrüche auf.

2.3 Spontane Prozesse

Bei den spontanen Prozessen werden die spontanen Rutschungen und die Hangmuren unterschieden. Bei beiden Typen handelt es sich um ein schnell abfliessendes Gemisch aus Lockermaterial und Wasser, das sich in flacheren Gebieten, Mulden oder Runsen ablagert. Der Unterschied zwischen (kleinen) spontanen Rutschprozessen und Hangmuren liegt im Wassergehalt, der daraus entstehenden Verflüssigung sowie entsprechend unterschiedlichen Reichweiten. Sie treten spontan und an relativ steilen Hängen nach intensiver Schneeschmelze oder langanhaltenden Niederschlägen auf. Je nach bestehender Durchnässung der Böden (Vorfeuchte) können bereits kleine Gewitter Hangmuren auslösen.



Abbildung 3: Solifluktionsprozesse in einem permafrostdurchsetzten Abhang im Berner Oberland. Umgangssprachlich werden diese Erscheinungen oft auch als „Fliessböden“ bezeichnet (Foto D. Tobler).

Spontane Rutschungen

Grosse spontane Rutschungen (Abbildung 4) sind plötzlich und schnell abgleitende Massen. Nach Hungr (2003) liegt die Ursache einer spontanen Rutschung in der plötzlichen Reduktion der Scherfestigkeit durch Kohäsionsverlust, Reduktion des Reibungswinkels und/oder Zunahme des Porenwasserdruckes. Sie ereignen sich häufig als Sekundärprozess von permanenten Rutschungen in übersteilten Hangpartien (z.B. Tripfi) oder in Gletscherrückzugsgebieten infolge Hangentlastung (z.B. Stieregg). Spontane Rutschungen können grosse Volumina von bis zu mehreren Hunderttausend Kubikmetern umfassen (AGN, 2004). Dokumentierte Ereignisse im Alpenraum sind z.B. Riemenstalden (10'000-20'000 m³), Gryphenbach/Tripfi, 1966 (10'000-15'000 m³) oder die Rutschung Stieregg in Grindelwald (650'000 m³).

Hangmuren

Hangmuren sind ein Gemisch aus Lockergestein und Wasser, welches als viskose Masse hangabwärts fließt. Die Auslösung erfolgt durch einen erhöhten Wasserinput in den Untergrund wie z.B. durch Starkniederschläge, langandauernde Regenperioden oder intensive Schneeschmelze. Insbesondere der hohe Wasseranteil ist für eine hohe Prozessgeschwindigkeit (bis 10 m/s) mit oft zerstörerischer Wirkung verantwortlich. Hangmuren treten lokal und in steilen Abhängen (> 25°) auf, die mit gering durchlässigen, kohäsionsarmen Lockergesteinen bedeckt sind (Abbildung 5). Bei sehr hoher (geologischer) Disposition können Hangmuren bereits ab Hangneigungen von 20° auftreten. An den Seiten der Mure ist die Geschwindigkeit geringer, was manchmal die Ausbildung von kleinen Uferwällen („levées“) zur Folge hat. Falls eine Hangmure in ein Gerinne gelangt, kann sie dort zur Entwicklung eines Murganges beitragen.



Abbildung 4: Grosse, spontane Rutschung Feldweid: Spontanes Abgleiten eines Hanges nach den langanhaltenden und intensiven Niederschlägen im Sommer 2005 (Foto: Schweizer Luftwaffe).



Abbildung 5: Eine Serie von Hangmuren im Emmental, einem Gebiet mit untief anstehender Nagelfluh (Foto C. Haemmig).

3 Rutschdispositionen

Mit dem Begriff „Disposition“ werden Systeme erfasst, die zeitlichen Variationen unterworfen sind. Damit kann bei Rutschungen die Anfälligkeit oder die Anlage eines Gebietes für die Entstehung und Auslösung eines Prozesses quantifiziert werden. Die Disposition zu Hangprozessen ist von geologischen, hydrogeologischen und hydrologischen Faktoren, sowie von der Topographie anderen Merkmalen abhängig. Die verschiedenen Parameter werden unter den Begriffen der Grunddisposition und der variablen Disposition zusammengefasst werden (Abbildung 6). Für die Auslösung bedarf es einer externen Systembelastung (Trigger).

In der Folge wird die Disposition anhand der beiden wichtigsten Rutschtypen (permanente Rutschungen und Hangmuren) detailliert beschrieben.

3.1 Grunddisposition

Grunddispositionen sind zeitinvariante Faktoren, welche die grundlegende Charakteristik eines Hanges beschreiben: dazu gehören geomorphologische Variablen (Hangneigung, Topographie), Geologie (Lithologie, Mineralogie, Strukturen) sowie hydraulische und mechanische Eigenschaften von Lockergesteinen. Diese Grunddispositionen werden in den Modellierungen von potentiellen Rutschhängen berücksichtigt.

Permanente Rutschungen

Die Geologie und damit die geotechnischen Eigenschaften des Untergrundes resp. des Lockermaterials bilden zusammen mit den hydrologischen Eigenschaften die wichtigsten Parameter der Grunddisposition. Die Rutschanfälligkeit eines Gebietes wird durch die oben erwähnten Gegebenheiten sowie die Relief-eigenschaften (Exposition und Reliefenergie) definiert.

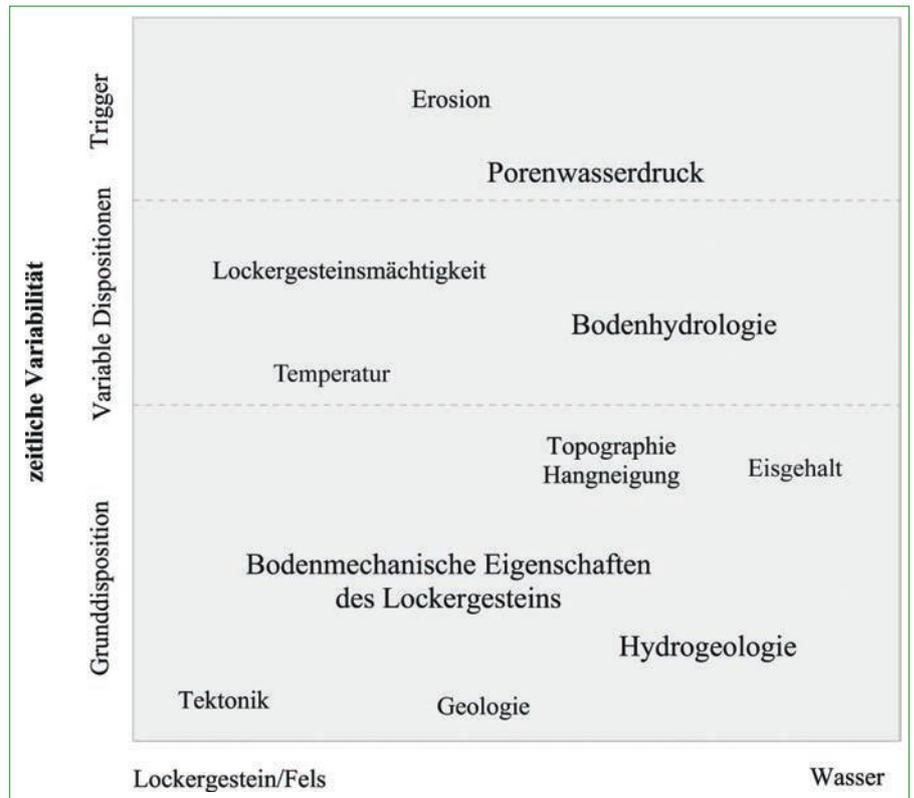


Abbildung 6: Rutschdispositionen leicht modifiziert nach AGN (2004). Nicht berücksichtigt sind die Einflussgrößen Landnutzung und anthropogene Faktoren. Die hier nicht abgebildeten Faktoren Exposition und die Höhenlage spielen im Periglazial eine wichtige Rolle und sind der Grunddisposition zuzuteilen.

Hangmuren

Die Lage im Relief und die geologischen Eigenschaften bestimmen die Grunddisposition für Hangmuren. Steile Hänge und Hangbereiche, in denen sich das Wasser konzentriert, sind bevorzugte Anrissgebiete von Hangmuren. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die Konzentration von Hangwasser auch durch unterirdische Strukturen, z.B. Stauschichten oder präferenzielle Fließwege beeinflusst werden kann. Weiter bestimmen die geologischen Eigenschaften den Reibungswinkel und damit die Stabilität einer Lockermaterialmasse. Feinkörniges Material weist einen niedrigeren Reibungswinkel auf als grobes Material.

3.2 Variable Disposition

Die variablen Dispositionen wirken sich je nach Gründigkeit der Hangbewegungen un-

terschiedlich aus. Je flachgründiger eine Rutschung ist, umso mehr verschieben sich die jeweiligen Parameter in Abbildung 6 nach oben (in Richtung «Auslösende Faktoren»). Die wohl entscheidendste Grösse in der variablen Disposition ist das hydro(geo)logische System, welches eine zeitlich fluktuierende Zustandsgrösse darstellt. Sie ist von der Durchlässigkeit, der Wasserwegsamkeit und der Hydraulik des Untergrundes abhängig (Maurer, 1997). Sie ist allerdings kurzfristig so veränderbar, dass sie auch zum auslösenden Faktor für Hanginstabilitäten werden kann.

Permanente Rutschungen

Die Festigkeit des Lockermaterials ist zu einem grossen Teil von den Reibungskräften bzw. den Normalkräften zwischen den Komponenten (Körnern) abhängig. Da zuneh-

mende Porenwasserdrücke die Normalkräfte zwischen den Körnern reduzieren, führt dies zu einer Verminderung der Festigkeit. Wasser kann somit die Hangstabilität kurzfristig entscheidend verändern. Die Disposition zur hangwasserbedingten Destabilisierung wird durch die Durchlässigkeit und Permeabilität des Materials bestimmt. Bei hoher Durchlässigkeit und Permeabilität ist eine rasche Drainage des anfallenden Wassers möglich. Dem Aufbau von Porenwasserdrücken sind Grenzen gesetzt, umso mehr wirken hingegen Strömungsdrücke. In heterogenem, nicht durchgehend permeablen Material kann der Hangwasseranfall zum Auffüllen lokaler „Reservoirs“ führen, welche bei weiter anhaltenden Zuflüssen Überdrücke bilden können, wodurch darüber liegende Schichten eine Entlastung erfahren.

Im Periglazial ist, wie auch bei den Hangmuren, Permafrost ein wichtiger Faktor der variablen Disposition (siehe Hangmuren).

Hangmuren

Die variable Disposition bei Hangmuren wird im Wesentlichen durch die Höhe des Hangwasserspiegels im Lockermaterial bestimmt: je höher der Hangwasserspiegel, desto geringer die Stabilität des Lockermaterials. Längere Niederschlagsperioden oder intensive Schneeschmelze können die variable Disposition für Hangmuren erhöhen.

Im Periglazial ist der Permafrost für die variable Disposition von zentraler Bedeutung. Intakter Permafrost hat eine stabilisierende Wirkung auf das Lockermaterial. Taut der Permafrost auf, geht diese Wirkung verloren. Dabei entscheidet die Mächtigkeit der Auftauschicht über die mobilisierbare Materialmenge.

3.3 Auslösende Faktoren

Auslösende Faktoren sind zeitvariante Einflussgrößen, welche den vorherrschenden Spannungszustand im Lockergestein kurzzei-

tig beeinflussen. Kommt das interne Kräfteverhältnis von treibenden und rückhaltenden Kräften (siehe Kapitel 2.4.1) dadurch ins Ungleichgewicht, führt dies zum Eintreten des plötzlichen Rutschereignisses. Auslösende Faktoren sind u.a.: Hangfusserosion, Änderungen der Bodenfeuchte durch Niederschläge oder Schneeschmelzen und anthropogene Einflüsse. Die obige Auflistung der häufigsten auslösenden Faktoren verdeutlicht die starke Abhängigkeit des Prozesses von klimabedingten Änderungen des Wasserhaushaltes.

Permanente Rutschungen

Eine durch Niederschlag hervorgerufene Gewichtsveränderung (Wasserzunahme) bewirkt im Allgemeinen noch keine Änderung der Stabilitätsverhältnisse. Niederschlag beeinflusst jedoch dann die Stabilität einer (potenziellen) Gleitschicht, wenn durch ihn ein Porenwasserdruck aufgebaut wird oder wenn infolge Durchnässung eine vorhandene Kohäsion verringert bzw. durch Bildung einer Schmier-schicht der Reibungswinkel herabgesetzt wird. Niederschlagsperiode und Schneeschmelzen sind auslösende Elemente einer (Re)aktivierungsphase bei permanenten Rutschungen.

Hangmuren

Die Auslösung von Hangmuren ist meistens mit einem raschen und starken Anstieg des Hangwasserspiegels verbunden. Aus diesem Grund sind es vor allem Intensivniederschläge, die Hangmuren auslösen.

Im alpinen Höhenlagen besteht der Untergrund meist aus wenig konsolidierten Schutthalden, in welche zur Bildung von Hangmuren grössere Wassermengen erforderlich sind. Deshalb sind hier eher länger andauernde Starkregen relevant. In den höher gelegenen Gebieten treten diese Niederschläge vor allem im Sommer und Herbst auf.

4 Klimasensitivität

4.1 Generelle Sensitivität

Die Klimaänderung kann sich hauptsächlich auf die variable Disposition und auf den auslösenden Prozess auswirken (Fort et al. 2009). Sowohl Kriechbewegungen als auch andere Massenbewegungen im hochalpinen Prozessbereich reagieren empfindlich auf Niederschlags- und Temperaturänderungen. Die Viskosität und Bruchfestigkeit von Eis ist stark temperaturabhängig und die Ausdehnung eines Permafrostkörpers passt sich zeitlich verzögert an sich verändernde Oberflächentemperaturen an. Damit hinken die Massenbewegungen den Temperaturveränderungen hinterher. Beschleunigungen von Blockgletschern und Rutschungen, erhöhte Murgangaktivität oder die Destabilisierung von Fels- und Sackungsmassen sind mögliche Folgen von Temperaturerhöhungen (BAFU 2016).

Als Folge des Klimawandels häufen sich Extremereignisse und/oder werden intensiver. Murgänge und Hangmuren treten aufgrund häufigerer Starkniederschläge vermehrt auf. Durch den Gletscherrückzug und den auftauenden Permafrost werden Hänge instabiler (Huggel et al. 2010).

Die verschiedenen Rutschprozesse bilden grundsätzlich nur in wenigen Fällen ein aktives Gefahrenpotenzial, vielmehr liefern sie einen u.U. entscheidenden Geschiebeeintrag in die Wildbachsysteme. Somit wird eine erhöhte Rutschaktivität mit einem verstärkten Geschiebeeintrag in Wildbäche und Gebirgsflüsse einhergehen. Dies kann sowohl das Murgangpotenzial in einem Gebiet deutlich erhöhen, oder aber flussabwärts bei flachem Gelände Verlauf zu Problemen führen (AG NAGEF 2016).

4.2 Permanente Rutschungen und Hangkriechen

Die klimatischen Veränderungen werden in allen Jahreszeiten zu intensiveren Niederschlä-

gen führen, was die Aktivität permanenter Rutschungen und von kriechenden Hängen begünstigt (AG NAGEF 2015). Deshalb ist in Zukunft mit langandauernden resp. generell stärkeren Aktivphasen zu rechnen - eine Tendenz, die in den alpinen Gebieten teilweise schon heute beobachtet wird. Diese Feststellung kann durch Messungen und Beobachtungen der grossen und ausgedehnten Rutschungen in Grindelwald bestätigt werden. Die Auswertungen der Niederschlags- und Rutschmessungen der vergangen 15 Jahre zeigen einen direkten Zusammenhang zwischen den Niederschlagsmengen im Winterhalbjahr und Reaktivierungen, welche zu merklichen Schäden an Infrastrukturen führen. So kam es nach niederschlagsreichen Winterhalbjahren jeweils im darauffolgenden Frühjahr zu starken Schäden infolge der Reaktivierungen der Rutschungen; nach Winterhalbjahren mit „normalen“ Niederschlagsmengen“ hingegen wurden keine Schäden gemeldet. Die Schneeverhältnisse im Winter haben insofern einen Einfluss auf das Rutschverhalten, dass die Beschleunigungsphase im Frühjahr bei hohen Schneemengen entsprechend verzögert eintritt, da die Ausaperung länger dauert (GEOTEST 2014). Die Auswirkungen von intensiven und allenfalls rasch ablaufenden Schneeschmelzen nach schneereichen Wintermonaten können auch bei solch grossen Rutschmassen weitreichende Konsequenzen haben. Die während der Wintermonate praktisch stillstehenden Rutschungen werden innert Monatsfrist grossflächig aktiviert. Diese Aktivierungsphasen halten über mehrere Wochen an und führen so nicht nur entlang der Scherzonen zu teils massiven Schäden. Stärkeres resp. häufigeres Voranschreiten permanenter Rutschungen ist vor allem dort zu erwarten, wo sie bereits heute aktiv sind. Aber auch Massenbewegungen im Einflussbereich von Gletschern und Permafrost sowie

solche, die in Wildbäche stossen, dürften in Zukunft stärkere Aktivierungen erfahren.

Generell kann festgehalten werden, dass in den überwiegenden Gebieten, wo heute keine Anzeichen auf grosse, permanente Rutschungen vorhanden sind, auch in naher Zukunft kaum neue, grosse Rutschgebiete zu erwarten sind. Im Periglazialraum hingegen kann es durchaus sein, dass in Bereichen mit stark auftauendem Permafrost neue permanente Rutschungen auftreten können.

4.3 Hangmuren

Die Häufigkeit von Hangmuren ist davon abhängig, wie oft der Wassergehalt im Untergrund genügend hoch ist, damit die Stabilitätsgrenze unterschritten wird und das Material in Bewegung kommt. Dies ist vom Wasserzufluss vor und während eines Ereignisses abhängig. Die Magnitude hängt vor allem von der Menge des verfügbaren Materials ab. Im hochalpinen Gelände bildet somit die Permafrost-Degradation den entscheidenden Parameter.

Bei der variablen Disposition können in tieferen Lagen die erwarteten höheren Niederschlagssummen im Winter häufiger zu einem höheren Hang- resp. Grundwasserspiegel und damit zu einer erhöhten Disposition führen. Verstärkend wirkt, dass im Winter dem Boden durch die Evapotranspiration kaum Wasser entzogen wird und damit länger eine hohe Bodensättigung erhalten bleibt (KOHS 2007). In hohen Lagen, wo der Winterniederschlag hauptsächlich als Schnee fällt, kann im Frühling wegen der intensiveren Schneeschmelze mehr Wasser in den Boden eindringen. Dadurch steigt der Hangwasserspiegel und damit auch die variable Disposition für Hangmuren. Bei den Starkniederschlägen, die für die Auslösung verantwortlich sind, ist in allen Jahreszeiten eine Intensivierung zu erwarten, wobei diese im Sommer nur gering ausfällt, in den andern Jahreszeiten aber mit 10 % bis gut 20 % deutlicher ist (geo7, 2015).

Im Periglazial stellt die Permafrostdegradation einen zusätzlichen Parameter dar. Für gefrorene Schuttkörper führt das Auftauen (des Permafrostes) dazu, dass die Stabilität des Lockermaterials abnimmt (Rist 2007). Der Klimaeinfluss wirkt sich somit in diesem Fall auf die Grunddisposition von Hangmuren aus. Die Geschwindigkeit und der Umfang der Degradation sind dabei von Faktoren wie Exposition und Ausaperung, sowie vom Eisgehalt des Permafrostkörpers abhängig. Eisreiche Permafrostkörper reagieren träger als eisarme, denn ein hoher Eisgehalt dämpft den Schmelzprozess. Das Wasser aus der Permafrostschmelze erhöht den Hangwasserspiegel v.a. im Sommer und kompensiert damit zumindest teilweise die Abnahme des Niederschlags im Sommer. Verminderte Stabilität und erhöhtes Wasserangebot verstärken die variable Disposition.

Hangmuren im Periglazial werden wegen der häufigeren Starkniederschläge während des ganzen Jahres (geringste Zunahme im Sommer) häufiger ausgelöst. Dies umso mehr, als auch die Grunddisposition mit Ausnahme des Sommers zunimmt (geo7, 2015).

4.4 Spontane Rutschungen

Das Auftreten spontaner Rutschungen als Sekundärprozess, z.B. in frontalen Bereichen von permanenten Rutschungen oder an Gerinneabhängungen, ist direkt an die Sensitivität der entsprechenden Primärprozesse gebunden. Häufigkeit und Magnitude hängen von der Wirkung des Hauptprozesses ab.

Spontane Rutschungen als Primärprozesse in Gletscherrückzugsgebieten aufgrund der Hangentlastung oder aus glazialen Sedimentdepots (Bastionsmoränen oder Blockgletschern) unterliegen dem direkten Einfluss der Permafrostdegradation und dem erhöhten Wasseranfall durch veränderte Niederschlagsverhalten. Die Klimasensitivität verhält sich analog den Hangmuren.

5 Beispiele

5.1 Permanente Rutschung - Rutschung Rotloui

Die Rutschung Rotloui (Abbildung 7) liegt auf der orografisch rechten Seite des Rotloubaches, welcher rund 600 m oberhalb von Guttannen in die Aare mündet. Der Fels besteht im Gebiet Rotloui aus Gneisen und Glimmerschiefern der Guttannen – Einheit. Die Lockergesteine innerhalb der Rutschmasse setzen sich aus glazialen Sedimenten, Hang- und Blockschuttablagerungen zusammen. Die Rutschmasse löst sich talseits der Felsen der Chammeegg, am Süd-Südwest exponierten Hang zwischen 2'200 und 2'000 m ü.M. Die Front der Rutschmasse grenzt im Süden an den Rotloui-graben und besteht dort aus stark verwitterten und teilweise versackten Felskomponenten. Die Mächtigkeit der Rutschmasse, welche wahrscheinlich bis auf die intakte Felsoberfläche reicht, ist nicht bekannt. Aufgrund von topographischen Aspekten wird von 30 m – 70 m ausgegangen.

Die Rutschmasse ist in sich zerrissen und zerfällt in verschieden grosse Schollen (Abbildung 8). Lokal manifestieren sich teilweise

starke Bewegungen vor allem in den frontalen Bereichen der Rutschung, welche grosse Pakete von bis zu 100'000 m³ Volumen umfassen. Die Rutschmasse wird zur Front hin zerrissen – es bilden sich Sekundärrutschkörper, welche spontan abgleiten können.

Für die Beurteilung der Murgangaktivität des Rotloui-grabens und damit verbunden die Abschätzung der Gefährdung der Grimselpass-

strasse sowie Installationen der Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) sind Kenntnisse über den Bewegungsverlauf und das Gefahrenpotenzial der Rutschmasse seit deren Aktivierung im 2005 von grosser Bedeutung. In Hinblick auf ein langfristiges Gefahrenmanagement wird die Rutschung daher mit GPS-Messungen überwacht. Die jährlichen Bewegungsraten variieren je nach Wasserdargebot zwischen 5 – 85 cm (GEOTEST 2015).

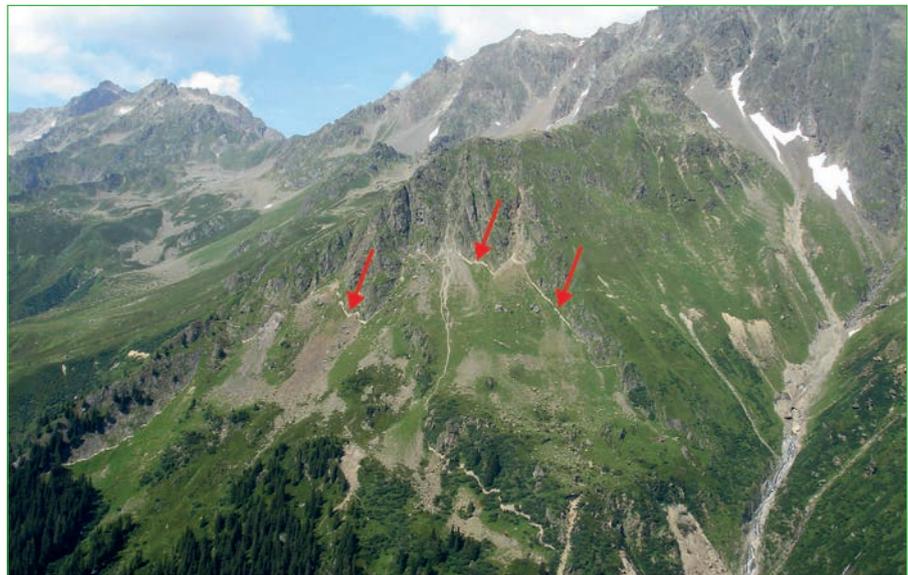


Abbildung 7: Rutschung Rotloui in Guttannen (Berner Oberland): Ausgelöst während den Unwettern 2005 weist die Rutschmasse heute einen Versatz am oberen Rutschrand (rote Pfeile) von 4 bis 7 m auf. Die durchschnittlichen, jährlichen Bewegungsraten liegen bei rund 0.5 – 0.8 m (Foto HR. Keusen).

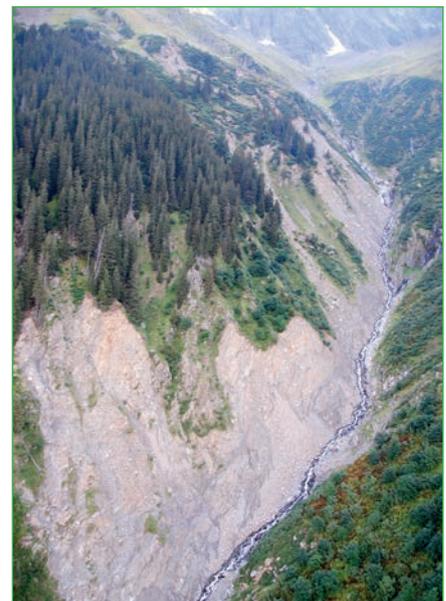


Abbildung 8: Frontaler Bereich der Rutschung Rotloui: Die Rutschmasse stösst in den Rotloui-graben (rechts) und weist im frontalen Bereich eine starke Zerreissung auf (blaue Pfeile) – die grossen Pakete können sich als plötzlich auftretende Sekundärrutschungen ausbilden. Die Hauptablösung ist mit den roten Pfeilen markiert (Fotos C. Kämpfer).

5.2 Spontane Rutschungen - Stiereggmoräne Grindelwald

Der Untere Grindelwaldgletscher reichte beim letzten Höchststand im Jahr 1860 noch gut zwei Kilometer weiter talabwärts als heute (Zumbühl et al., 2016). Im Bereich der Stiereggmoräne lag das Eis sogar über 200 Meter höher – es war problemlos möglich, über den Gletscher von einer Talseite auf die andere zu gelangen. Durch den Rückzug des Gletschers wurde seither eine über 200 Meter hohe, extrem steile Moräne freigelegt.

Der Gletscherrückgang sowie die starke Erosion durch Murgänge im Stieregggraben haben diese Moräne sukzessive destabilisiert. Am 16. Mai 2005 wurden um die Stieregghütte herum Risse im Boden entdeckt (Abbildung 9). Die Kante der Moräne war zu diesem Zeitpunkt noch 80 Meter vom Gebäude entfernt. Die dokumentierte Entwicklung der Rutschung betrug vom Erkennen der ersten Risse bis zum Absturz lediglich 13 Tage: Am 29. Mai 2005 rutschte eine Masse von ca. 650'000 Kubikmetern Gesteins- und Bodenmaterial ab und sammelte sich auf dem darunterliegenden Gletscher (AG NAGEF, 2015).

Nach dem Ereignis lag die Abrisskante direkt unter dem Eckfundament der Hütte. Das akut absturzgefährdete Gebäude war nicht mehr bewohnbar und wurde abgesperrt. Um zu vermeiden, dass Gebäudetrümmer auf dem Unteren Grindelwaldgletscher zu liegen kamen, wurde die 1952 errichtete Hütte am 3. Juni 2005 von der Feuerwehr kontrolliert abgebrannt.

5.3 Hangmuren - Unwetter Oktober 2011

Das Unwetterereignis vom 10. Oktober 2011 verursachte im Wallis, im Berner Oberland und in der Zentralschweiz teilweise schwere Schäden. Durch die Kombination von Niederschlägen und rasch ablaufender Schmelze der Schneedecke, wurden in mehreren Wildbächen hohe Abflüsse generiert. Stark betrof-



Abbildung 9: Situation der Stieregghütte vor (Bild oben), während (Bild mitte) und nach (Bild unten) dem Moränenabbruch 2005 (Fotos Stieregghütte D. Tobler; Foto Rutschung H.R. Burgener).



Abbildung 10: Anrissgebiete von Hangmuren im Lötschental nach den Unwettern im Oktober 2011. Die Rutschprozesse bilden hier eine eng ineinander verknüpfte Prozesskette mit den Murgängen, welche im Talboden zu massiven Schäden geführt haben (Foto D. Tobler).

fen war unter anderem das Lötschental. Die durch den Regen intensivierte Schneeschmelze steuerte bis auf eine Höhe von 2500 m ü. M. zusätzlich Schmelzwasser zum Abfluss bei. In mittleren Höhenlagen zwischen 1500 und 2100 m ü. M. lag der Schmelzanteil am Schneedeckenabfluss im Bereich von 30 bis 40 % (Badoux, 2013). Viele der grossen Murgänge, welche sich während des Unwetters im Oktober 2011 ereigneten, hatten ihren Ursprung im Grenzbereich des Permafrosts oder in Gebieten, in denen in den letzten Jahren kleine Gletscher oder Firnfelder weggeschmolzen sind. Hangmuren und spontane Rutschungen wurden im Wesentlichen am Fuss oder an der Front von alten Moränenbastionen oder steilen Schutthalden ausgelöst. Mit dem Abschmelzen der Gletscher oder des Permafrosts entfiel die massgeblich stabilisierende Wirkung der im Ereignis betroffenen steilen Schutt- und Felshänge. Bei entsprechendem Wasseranfall wurden somit bis anhin stabile Geländebereiche in diesen Höhenlagen plötzlich instabil. Besonders betroffen

waren dadurch steile Bastionsmoränen oder frontale Bereiche von Blockgletschern.

6 Literatur

AG NAGEF 2015: Klimawandel und Naturgefahren – welche Veränderungen sind im Berner Oberland zu erwarten? Interlaken, September 2015

AGN 2000: Ursachenanalyse der Hanginstabilitäten 1999. Separatdruck aus Bull. Angew. Ggeol. 5/1, September 2000.

Auer I., Böhm R., Jurkovic A., Lipa W., Orlik A., Potzmann R., Schöner W., Ungersböck M., Matulla C., Briffa K., Jones P., Efthymiadis D., Brunetti M., Nanni T., Maugeri M., Mercalli L., Mestre O., Moisselin J.-M., Begert M., Müller-Westermeier G., Kveton V., Bochnicek O., Stastny P., Lapin M., Szalai S., Szentimrey T., Cegnar T., Dolinar M., Gajic-Capka M., Zaninovic K., Majstorovic Z., Nieplova E. 2007: HISTALP - Historical instrumental climatologi-

cal surface time series of the Greater Alpine Region. International Journal of Climatology 27 (1): 17-46.

Badoux, A.; Hofer, M.; Jonas, T. (Red.) 2013: Hydrometeorologische Analyse des Hochwasserereignisses vom 10. Oktober 2011. Birnensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Davos, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF; Zürich, MeteoSchweiz; Bern, geo7; Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU. 92 S.

BAFU 2016: Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1608: 98 S.

Bründl M. (Ed.) 2009: Risikokzept für Naturgefahren - Leitfaden. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 420 S.

Fort M., Cossart E., Deline P., Dzikowski M., Nicoud G., Ravel L., Schoeneich P., Wassmer P. 2009: Geomorphic impacts of large and rapid mass movements: a review, Géomorphologie : relief, processus, environnement [En ligne], vol. 15 - n° 1 | 2009, mis en ligne le 01 avril 2011, consulté le 28 juillet 2016. URL : <http://geomorphologie.revues.org/7495> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.7495

GEOTEST AG 2014: Grindelwald, Monitoring Rutschungen, November 2014

GEOTEST AG 2015: Guttannen, Rutschung Rotlauri, Monitoring, September 2015

geo7 2015. Klimasensitivität Naturgefahren. Bern, April 2015.

Huggel Chr., Fischer L., Schneider D., Haeberli W. 2010: Research advances on climate-indu-

- ced slope instability in glacier and permafrost high-mountain environments, *Geographica Helvetica*, Jg 65, Heft 2010/2.
- Hungr O. 2003: Flow Slides and Flows in Granular Soils; IW-Flows, 14 - 16 May 2003, Sorrento, Italy
- KHOS 2007: Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. Ein Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHWS). *Wasser Energie Luft*, 2007; 99(1):55-59.
- Kienholz H. 1977: Kombinierte geomorphologische Gefahrenkarte 1:10'000 von Grindelwald. Geographisches Institut Universität Bern, G4, Bern
- Maurer T. 1997: Physikalisch begründete, zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten. *Mitteilungen des Institutes für Hydrologie und Wasserwirtschaft*, 61, Karlsruhe
- OcCC 2003: Extremereignisse und Klimaänderung. Bern: OcCC (www.occc.ch/reports_d.html).
- Rist A. 2007: Hydrothermal Processes within the Active Layer above Alpine Permafrost in Steep Scree slopes and their Influence on Slope Stability. Dissertation. University of Zurich.
- Selby, H.M. 1993: *Hillslope materials and Processes*, Oxford University Press, Oxford
- Sidle R.C., Ochiai H., 2016: Landslides – Processes, Prediction and Land use. AGU, Washington, 311 S.
- Tobler, D., Kull, I., Jacquemart, M., Haehlen, N. (2014). Hazard Management in a Debris Flow Affected Area: Case Study from Spreitgraben, Switzerland. In: Sassa, K., Canuti, P., Yin, Y., (Eds). *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*. Springer International Publishing AG.
- Tobler D., Mani P., Riner R., Liener S., Hählen N., Bender R. (2016). Periglazial Hazard Indication Map: A Basic Instrument in Prospective Hazard Management. *Interpraevent 2016, Tagungsbeiträge*, Klagenfurt.
- Vogler M., Löw S., Glueer F., Grämiger L. 2016: Glacial Debutressing and Displacement History of the Driest Rockslide (Central Alps, Switzerland), *Geophysical Research Abstracts*, Vol 18, EGU2016-8040-1, 2016
- Varnes D.J. 1978: Slope movement types and processes. In Schuster R.L., Krizek R.J. (eds.): *Landslides – Analysis and control*. National Research Council, Washington D.C., Transportation Research Board, Spec. report 176, p. 11 – 33.
- Zumbühl H., Nussbaumer S., Holzhauser H., Wolf R. (Eds) 2016: *Die Grindelwaldgletscher – Kunst und Wissenschaft*. Haupt Verlag, 254 S. (in press)