

Periglacial Hazard Indication Map: A Basic Instrument in Prospective Hazard Management

Gefahrenhinweiskarte Periglazial: Instrument in der prospektiven Gefahrenbeurteilung

Daniel Tobler, dipl. natw. ETH, Geologe¹; Peter Mani, lic. phil. nat., Geograph²; Rachel Riner, lic. phil. nat., Geologin¹; Serena Liener, dr. phil. nat.², Geographin; Nils Hählen, dipl. natw. ETH, Forstingenieur³; Ricarda Bender-Gäl, Wasserbauingenieurin⁴

ABSTRACT

Based on glacier retreat and degrading permafrost in high alpine regions across the Bernese Oberland (central to western Switzerland), several new source areas for natural hazard processes became evident within the last years. The evaluation of susceptible periglacial areas and the assignment of resulting processes by modelling will be one of the major tasks to be solved in near future. The prediction of those processes and their consequences is an interdisciplinary question. Meteorological scenarios for the next 50 years derived from climate change scenarios stand at the beginning of the decision chain. The susceptible periglacial areas which act as starting zones for mass movements (rockfall, landslides, debris flows) or new sediment sources can be calculated through sophisticated permafrost and glacier retreat models.

Well established simulation tools have been used within the project. The result is a so-called periglacial hazard indication map visualizing endangered areas in the year 2060 for mass movement processes as well as other natural hazards like floods or subglacial lake outburst.

ZUSAMMENFASSUNG

Anhand von Klimaszenarien wurde die zukünftige Entwicklung der Einzugsgebiete sowie das Zusammenspiel der Veränderung der Gletscherausdehnung und des Permafrostes mit den Sturz- und Rutschprozessen, der Murgangauslösung, dem Geschiebetrieb sowie möglichen Folgeprozessen (z.B. Flutwelle) analysiert und modelliert. Die Resultate basieren auf einer neu entwickelten Methodik. Generell sind die einzelnen Prozessmodellierungen umfassend auf aktuellen, wissenschaftlichen Arbeiten abgestützt und mittels einer Sensitivitätsanalyse (vgl. separater Bericht) geprüft. Die Ergebnisse präsentieren die mögliche Gefahrensituation im Berner Oberland im Jahre 2060 unter Berücksichtigung der klimatischen Veränderungen. Die Modellresultate der einzelnen Prozesse verdeutlichen die mögliche Problematik im Zusammenhang mit degradierendem Permafrost, sich zurückziehenden Gletschern und damit

1 GEOTEST AG, Zollikofen, SWITZERLAND, daniel.tobler@geotest.ch

2 Geo7 AG 3012 Bern, SWITZERLAND

3 Amt für Wald des Kantons Bern, Abteilung Naturgefahren, Interlaken, SWITZERLAND

4 Tiefbauamt des Kantons Bern, Oberingenieurkreis 2, SWITZERLAND

einhergehenden Destabilisierungen der Talflanken. Die am stärksten betroffenen Regionen sind Kandersteg, das Haslital sowie die hinteren Lüttschinentäler.

KEYWORDS

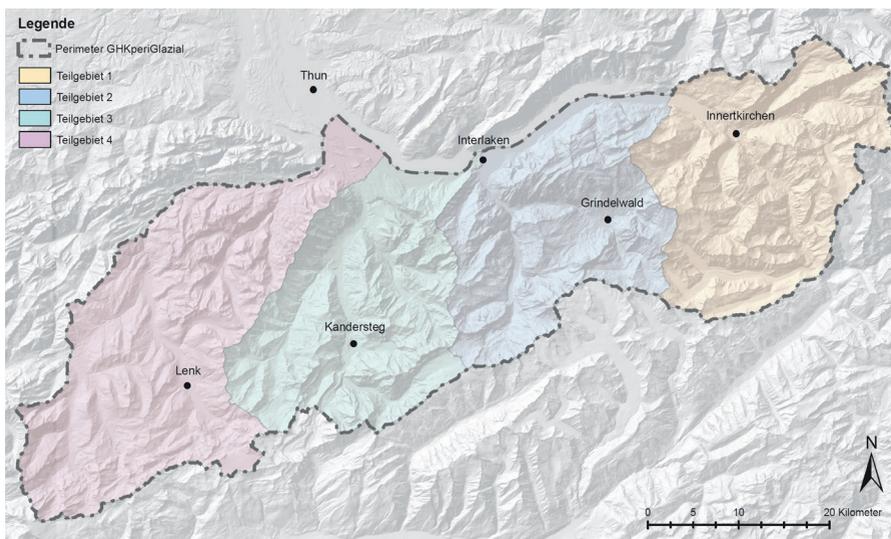
process chains, permafrost, mass movements, climate change, process modelling

EINFÜHRUNG

In den hochalpinen Gebieten des Berner Oberlandes treten seit Jahren immer wieder neue Naturgefahrenherde auf, die durch den Rückgang von Gletschern und Permafrost entstehen. Sie bedrohen teilweise die Sicherheit von Siedlungen und Infrastrukturen. Die kantonalen Fachstellen des Kantons Bern haben aus diesem Grund die Studie Gefahrenhinweiskarte periglazial (kurz GHKperiGlazial) initiiert. Die Studie soll aufzeigen, wo sich infolge degradierenden Permafrosts und Gletscherrückzugs eine Veränderung der Naturgefahrenprozesse ergibt.

BEARBEITUNGSGBIET

Der Untersuchungsperimeter umfasst sämtliche hydrologischen Einzugsgebiete im Berner Oberland, welche im Einflussbereich periglazialer Prozesse liegen (Figur 1). Der Perimeter reicht vom Simmental im Westen bis zum Gadmen- und Gental im Osten. Südlich verläuft der Perimeter entlang der hohen Alpengipfel an der Grenze zum Wallis; nördlich bilden Thuner- und Brienersee sowie das Gental die Begrenzung.

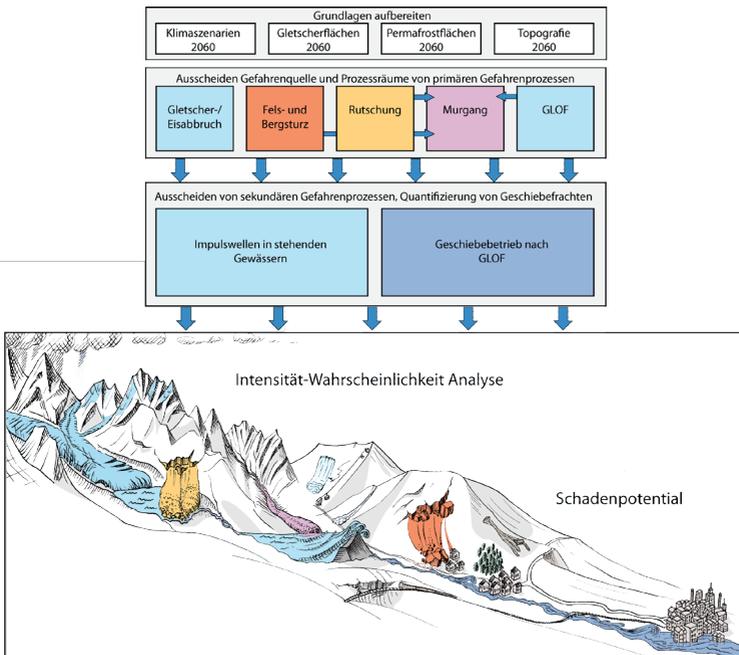


Figur 1: Der Untersuchungsperimeter Berner Oberland wurde für die Bearbeitung in vier Teilgebiete unterteilt. TG1 (Hasliaare), TG2 (Lüttschine), TG3 (Kander), TG4 (Simme) (Kartengrundlage: Swisstopo).

VORGEHEN

In einem ersten Schritt wurden die Klimaszenarien sowie Kenngrößen künftiger prozessauslösender Wetterereignisse, die bis 2060 im Berner Oberland zu erwarten sind, bestimmt. Basierend auf den prognostizierten Temperaturveränderungen wurde die künftige Ausdehnung von Gletscher- und Permafrostgebieten hergeleitet.

Die Klimaveränderungen haben Auswirkung auf die Häufigkeit und die Magnitude der Naturgefahrenprozesse. Für die Erstellung einer Hinweiskarte ist nur die Veränderung der Magnitude entscheidend. Basierend auf diesen Rahmenbedingungen wurden die Wirkungsräume sowie die potenziellen Ablagerungskubaturen von Sturz-, Rutsch- und Murgangprozessen modelliert. Weiter wurden glaziale Prozesse wie Gletscherhochwasser, Eisabbrüche sowie Sekundärprozesse in Form von Impulswellen und Dammbriichen analysiert (Figur 2). Die Bearbeitungstiefe der Prozessmodellierungen erfolgte auf Stufe „Gefahrenhinweis“, Masstab 1:25'000. D.h. von den modellierten Prozessräumen wurden deren Umhüllende ausgeschieden.



Figur 2: In der GHKperiGlazial modellierte Prozessketten.

KLIMASZENARIOEN

Wichtigste Grundlage für die Herleitung der Klimaszenarien sind die Szenariendaten CH2011 (2011), wobei die Daten des Emissionsszenarios A1B für den Szenarien-Zeitpunkt 2060 verwendet wurden. Zwar entspricht die aktuelle Emissionsentwicklung eher dem pessimistischen Szenario A2. Da für das Szenario A1B detailliertere Daten vorliegen und sich die Auswirkungen der beiden Szenarien bis zum Zeitpunkt 2060 noch nicht wesentlich unterscheiden, wurde dieses verwendet. Für den Szenarienzeitpunkt 2085 zeigt das Szenario A2 dann jedoch deutlich stärkere Auswirkungen als das Szenario A1B.

Basierend auf diesen Daten wurden Szenarien für die Temperatur und den Niederschlag definiert. Bei den Temperaturen wurden neben den saisonalen Mitteltemperaturen auch Hitzeperioden und die Anzahl von Tautagen ausgewertet. Für den Niederschlag wurden neben den saisonalen Niederschlagssummen die Veränderungen der Intensivniederschläge betrachtet (Rajczak et al., 2013).

GLETSCHER UND PERMAFROST

Das Szenario für den Gletscherrückzug wurde entsprechend dem Temperaturszenario aus den Daten von Linsbauer et al. (2013) abgeleitet. Zusätzlich zur zukünftigen Gletscherausbildung wurden auch die Topographie des freigelegten Gletscherbetts und dessen Charakteristik hergeleitet.

Grundlage für die Beurteilung der Veränderungen im Permafrost bildet die Karte der potenziellen Permafrostverbreitung (APIM) (Boeckli et al., 2012). Der darin abgebildete Index kann vereinfacht als anteilmässige Verbreitung von Permafrost interpretiert werden. Der Index liefert jedoch keine Angaben zur Mächtigkeit und Temperatur des Permafrosts. Deshalb wurde für die Abschätzung der Permafrostdegradation und deren Auswirkungen ein vereinfachter Ansatz entwickelt.

Ausgehend von der heutigen mittleren jährlichen Lufttemperatur wurde die heutige Oberflächentemperatur abgeschätzt. Die Temperaturoffsets konnten aus der Oberflächencharakteristik, der Hangneigung und der Exposition abgeleitet werden. In einem weiteren Schritt wurden für das Temperaturszenario die Offsets berechnet, wobei wiederum eine materialabhängige Sensitivität berücksichtigt wurde. Aus diesem Offset und dem Permafrostindex wurde ein Veränderungsfaktor abgeleitet, der in den Prozesssimulationen als Parameter für die Materialverfügbarkeit verwendet wird.

MASSENBEWEGUNGSPROZESSE

Die Simulation der betrachteten Massenbewegungsprozesse erfolgte für das Jahr 2060 in zwei verschiedenen Wahrscheinlichkeiten (gross, klein). Dabei wurden für sämtliche Prozessräume die möglichen Ablagerungskubaturen (Rutsch- und Sturzprozesse) respektive die maximalen Abflüsse (Flutwellen) und Geschiebefrachten (Murgänge) in Grössenordnungen von 10er Potenzen abgeschätzt.

STURZPROZESSE

Die Prozessräume potentieller Blockschläge und kleinerer Felsstürze wurden ausgehend von der Felsmaske (Swiss-TLM) sowie den ausgeaperten Felsbereichen in Gletscherrückzugsgebieten mit dem 3D-Sturzprogramm GEOTEST+Zinggeler (Tobler et al. 2009) modelliert. Basierend auf der Geologie und dem Durchtrennungsgrad des Gesteins (Kluftanalyse mit ColTop 3D (Bouissou 2011)) wurden die Ausbruchgebiete klassiert und Blockgrößen für die Modellierung festgelegt. Nach der Simulation wurden die Endpunkte der Sturztrajektorien mit den Informationen des Ausbruchgebietes attribuiert (Permafrostverhältnisse, Klüftungsgrad des Gesteines, Blockgrösse), um die gesamte Ablagerungskubatur im Ablagerungsraum zu berechnen. Diese ergab sich aus der Summe in einer Rasterzelle abgelagerter Sturzblöcken resp. deren Volumina.

RUTSCHPROZESSE

Die Anrissgebiete spontaner Rutschungen wurden mit dem Modell SliDisp+ (Tobler et al., 2013) modelliert, deren Auslaufbereiche mit dem GIS-Modell SliDepot (Tobler et al, 2013). Für die resultierenden Prozessflächen wurde pro Zelle die potenzielle Ablagerungskubatur kalkuliert, indem die mobilisierbare Mächtigkeit (Salciarini et al., 2006) mit der Rasterzellen-grösse multipliziert wurde. Die mobilisierbare Mächtigkeit wird in den periglazialen Bereichen im Wesentlichen von der Permafrostveränderung dominiert. Für das Jahr 2060 wurden zusätzlich neue Anrissflächen in den Gletscherrückzugsgebieten berücksichtigt. Die Auswirkung der Klimaszenarien auf die permanenten Rutschungen ist nur schwer zu erfassen. Die Rutschungen liefern einen kontinuierlichen Geschiebeeintrag in die Gerinne. Diese Eigenschaft wurde über die Erhöhung der materialspezifischen Erodierbarkeit innerhalb der Rutschungen berücksichtigt, wobei die Parameter Rutschaktivität, Hangneigung, Permafrostveränderungen nach einer empirischen Klassierung in die Berechnung einfließen. Für die Erhöhung wurden die Parameter Rutschaktivität, Hangneigung und Permafrostveränderung nach einer empirischen Klassierung berücksichtigt. Die Abgrenzungen des permanenten Prozesses basierte auf bestehenden Grundlagen sowie InSAR-Daten. Lagen in zukünftigen Gletscherrückzugsgebieten deutliche Indikatoren vor, welche auf eine Aktivierung einer permanenten Rutschung hinweisen könnten, wurden diese ebenfalls erfasst (z.B. Hangfussentlastung im Bereich einer übersteilten Seitenmoräne, Übersteilte Rutschfront gekoppelt mit Murganggerinne, dokumentierte Ereignisse spontaner Rutschungen).

MURGANPROZESSE

In einem ersten Schritt wurden die potenziellen Murganganrissgebiete ausgeschieden. Dabei wurden auch diejenigen Gebiete berücksichtigt, in welchen durch Gletscherrückzug oder als Folge von verstärkten Bergsturzablagerungen neue Murganganrisse entstehen können.

Zur Bestimmung der potenziellen Murgangfracht wurde für jeden Punkt entlang der Trajektorie definiert, wieviel Material durch einen Murgang erodiert werden kann. Dies entspricht der Erosionsleistung eines Murganges auf den entsprechenden Laufmetern an der

entsprechenden Stelle. Diese Erosionsleistung hängt im Wesentlichen von den geschieberelevanten Grundlagen sowie sämtlichen geschiebeliefernden Prozessen ab. Bei Murgängen aus Gletscherrückzugsgebieten oder aus auftauendem Permafrost wurde dabei von einer erhöhten Erosionsleistung ausgegangen. In den Permafrostdegradationsgebieten wurde dazu der Veränderungsfaktor verwendet.

Ausgehend von den Anrissgebieten wurden die Murgangtrajektorien mit dem Modell MGSIM/dfwalk (Gamma 2000) modelliert. Entlang des Fliessweges jeder Trajektorie konnte die Erosion pro Gerinneabschnitt entsprechend der Erosionsleistung sowie in Abhängigkeit der Murganggeschwindigkeit bestimmt und fortlaufend zur Geschiebefracht aufsummiert werden. Beim Kegelhalbs wurden die Geschiebekubaturen durch das Modell RAMMS (Christen et al., 2012) abgenommen, um die Ausbreitung auf dem Kegel zu simulieren. Sehr seltene Ereignisse mit grossem Impact

Zu den sehr seltenen Ereignissen mit grossem Impact zählen: Bergstürze, Gletscherabbrüche, Gletscherseeausbrüche. Gebiete mit einer Disposition für solche Grossereignisse wurden lediglich im periglazialen Raum für die kleine Wahrscheinlichkeit ausgeschieden und in der weiterführenden Prozesskette nicht weiter berücksichtigt.

RESULTATE

In den folgenden Abschnitten werden die Resultate der Modellierungen sowie die Veränderungen der Prozesse erläutert. Ein Darstellungsbeispiel findet sich Figur 3.

Periglazial: Die Veränderungen im Periglazialgebiet werden im Wesentlichen durch den Rückgang der Gletscher sowie degradierendem resp. verschwindendem Permafrost verursacht. Der Anteil an Permafrostflächen und entsprechenden Veränderungen ist in den Teilgebieten Hasliaare und Lütshine am grössten. Westlich des Kandertals nehmen die Permafrostflächen und somit deren Relevanz deutlich ab. Insgesamt sind rund 12 % des Berner Oberlandes von Permafrostflächen bedeckt.

Gletscherseen: Insbesondere im östlichen Berner Oberland kann durch den Rückzug von grossen und flachen Talgletschern eine hohe Anzahl neuer Gletscherseen entstehen, deren Volumina über 10 Mio. m³ liegen können. In den zentralen und westlichen Gebieten des Berner Oberlandes ist mit geringerer Gletscherseebildung zu rechnen. Viele dieser potenziellen Gletscherseen entwickeln sich in sehr abgelegenen Lagen und tangieren Siedlungsraum kaum. Wenn jedoch Massenbewegungsprozesse in einer Prozesskette in einen Gletschersee stossen und so zu einem Seeausbruch führen, können weit entfernte Schadenpotenziale plötzlich bedroht werden.

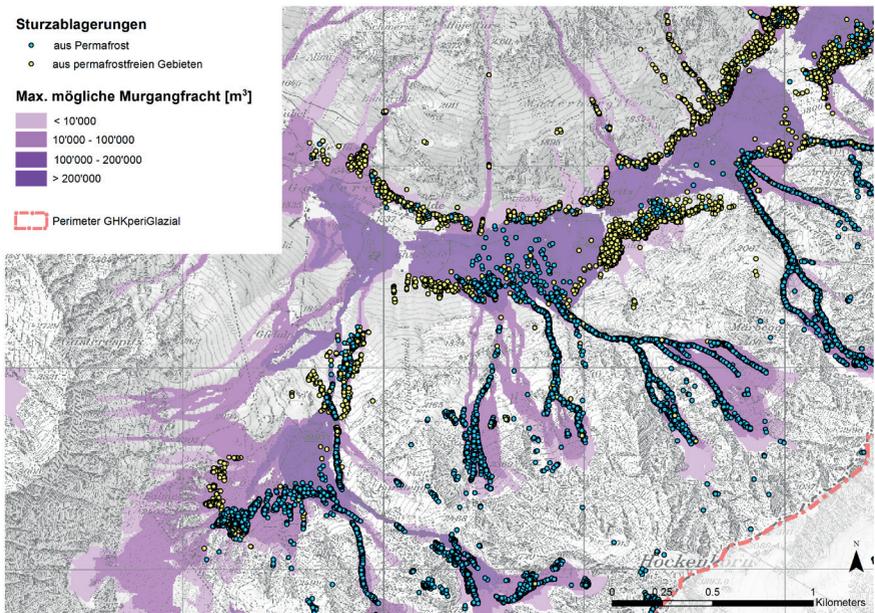
Gletscherabbrüche: Im östlichen Berner Oberland gibt es viele Gebiete mit steiler Vergletscherung, was beim Gletscherrückzug grundsätzlich zu einer hohen Anzahl von potentiellen Abbruchgebieten führt, die generell weit entfernt vom Schadenpotential liegen. Im zentralen

Teil des Untersuchungsgebietes sind zwar weniger Gebiete gletscherbedeckt, der Siedlungsraum befindet sich jedoch vielerorts näher an steilen Gletschergebieten. Daher existiert in diesen Gebieten eine grössere Anzahl von Abbruchgebieten, deren Eisabbrüche direkt Siedlungsraum und wichtige Infrastrukturen treffen können. Im westlichen Berner Oberland gibt es aufgrund der geringen und wenig steilen Vergletscherung ein geringeres Ereignispotential. Die Entwicklung von potenziellen Eisabbruchgebieten ist stark mit Gletscherveränderungen verbunden. Gletscher, welche heute kein Eisabbruchpotential aufweisen, können in Zukunft jedoch durch Rückzug und veränderte Gletschergeometrie ein Gefährdungspotenzial entwickeln.

Sturzprozesse: Die Ablagerungskubaturen aus Sturzprozessen sind im östlichen Berner Oberland aufgrund des grösseren Anteils von Felsgebieten höher als im Westen. Die angewandte Methodik, rohe Modellierung als Basis, Erhöhung der Ablagerungskubaturen aufgrund vermehrter Ausbrüche aus tektonischen Störzonen (Kluftsyste-men) sowie Permafrostzonen führt insgesamt etwa zu einer Verdoppelung der modellierten Ablagerungskubaturen im Jahr 2060. Nebst der regionalen Variabilität zeigt sich auch im Kleinräumlichen ein eindeutiges Muster der Ablagerungen: Die Trajektorien aus den höherliegenden Ausbruchgebieten sammeln sich in den Runsen und Rinnen. Nur ein kleiner Teil der Blöcke reicht bis in den Talboden und damit in den Bereich des Schadenpotenzials. Die beträchtlichen Ablagerungen in den Rinnen bilden ein wichtiges Geschiebepotential für Murgänge.

Rutschprozesse: Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass alle Typen von Rutschungen ein massgebliches Geschiebepotential für Murgänge bilden. Spontane Rutschungen in Gerinnen können teilweise direkt Murgangprozesse auslösen. Die grossen permanenten Rutschungen in Gerinnenähe bilden bei Reaktivierungen enorme Geschiebeherde. Bei den permanenten Rutschungen werden stärkere resp. häufigere Reaktivierungen gegenüber der heutigen Situation in jenen Bereichen erwartet, wo sie bereits heute zu Reaktivierungen neigen und/oder im Einflussbereich des Periglazials liegen.

Murgangprozesse: Veränderungen gegenüber der heutigen Situation sind v.a. dort zu erwarten, wo Murganganrisse im Permafrost oder in den Gletscherrückzugsgebieten liegen. Hier können einerseits neue Anrisse entstehen und andererseits deutlich grössere Geschiebefrachten verlagert werden. Dies wiederum führt zu grösseren Fliesshöhen (und damit Prozessintensitäten) sowie zu ausgedehnteren Ablagerungsflächen. Besonders betroffen sind das Haslital, die Lütschinentäler und das Kandertal. Im Engstligental sowie im Simmental sind grössere Veränderungen eher in den siedlungsfernen Gebieten zu erwarten.



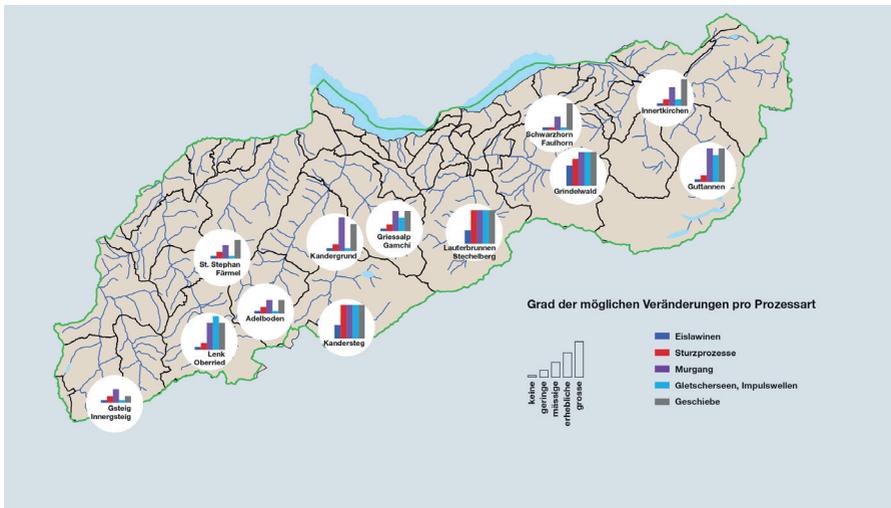
Figur 3: Detailausschnitt der modellierten Murgangprozessräume (violett) und Sturzablagerungen (blau und gelb). 167

FAZIT

Die GHKperiGlazial gibt für das Berner Oberland einen Überblick, wo als Folge der Klimaänderung am ehesten mit Veränderungen der Naturgefahren zu rechnen ist und welche Prozessarten davon betroffen sind. Die am stärksten betroffenen Regionen sind Kandersteg, das Haslital sowie die hinteren Lütschinentäler (Figur).

Die Studie beschreibt die massgeblichen Prozessketten und das Ineinandergreifen der einzelnen Teilprozesse. Am Anfang der Prozesskette liegen die Permafrostdegradation und der Gletscherrückzug. Je grösser die Veränderung, desto stärker die Reaktion des gesamten Systems. Der Norsektor umfasst rund ein Drittel der gesamten Permafrostflächen. Diese reichen hier in tiefere Höhenlagen. Mit dem Wissen, dass tieferliegende Gebiete von der Erwärmung generell stärker betroffen sind als höhere Lagen, ist es kaum erstaunlich, dass die Prozesse in den nordexponierten Gebieten im Jahre 2060 im Allgemeinen besonders verstärkt werden.

Sehr viele Veränderungen laufen weit entfernt von den für die vorliegende Studie relevanten Siedlungsräumen ab und tangieren daher kaum Schadenpotenzial. Bergstrassen, Wanderwege, Alphütten und Seilbahnmasten stellen in diesem Zusammenhang kein relevantes Schadenpotential dar. Durch die Klimaänderung sind im Siedlungsgebiet keine neuen



Figur 4: Zusammenfassende Übersicht zu den mutmasslich betroffenen Regionen im Berner Oberland. 173

Gefahrenflächen zu erwarten. Hingegen kann die Häufigkeit oder die Intensität von einzelnen Ereignissen gegenüber der Vergangenheit zunehmen.

Die GHKperiGlazial kann keine räumlich konkrete Aussage dazu machen, in welchen Gebieten effektiv Konflikte durch veränderte Gefahrenprozesse auftreten werden. Sie zeigt auf, wo grundsätzlich ein Potential dazu besteht. Auch Prozesse, die als Einzelereignis kein Problem darstellen, sondern erst in einer Häufung Schäden verursachen, lassen sich mit der gewählten Methode nicht bestimmen.

Der Hauptnutzen der GHKperiGlazial liegt darin, die potentiell heiklen Gebiete zu identifizieren und zu priorisieren. Darauf basierend wird in den nächsten Jahren ein systematisches Monitoring aufgebaut, welches sicherstellen soll, dass ungünstige Entwicklungen frühzeitig erkannt werden und somit mehr Reaktionszeit für präventive Massnahmen zur Verfügung steht.

LITERATUR

- AG NAGEF Arbeitsgruppe Naturgefahren des Kantons Bern (2015): Klimawandel und Naturgefahren – Veränderungen im Hochgebirge des Berner Oberlandes und ihre Folgen. Linsbauer A., Paul F., Machguth H., Haeblerli, W. (2013). Comparing three different methods to model scenarios of future glacier change for the entire Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 54 (63), 241-253.
- Rajczak J., Pall P., Schär C. (2013). Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 118, 3610-3626, doi: 10.1002/jgrd.50297.
- Tobler D., Riner R., Pfeifer R. (2013). Modelling potential shallow landslides over large areas with SliDisp+. C. Margottini et al. (eds.), *Landslide Science and Practice*, Vol. 3, DOI 10.1007/978-3-642-31310-3_6, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013
- Tobler D. Riner R., Pfeifer R. (2013). Runout modelling of shallow landslides over large areas with SliDepot. C. Margottini et al. (eds.), *Landslide Science and Practice*, Vol. 3, DOI 10.1007/978-3-642-31310-3_32, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013
- Boeckli L., Brenning A., Gruber S., Noetzi J. (2012). Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics. *The Cryosphere*, 6(4), S. 807-820.
- Christen, M.; Gerber, W.; Graf, Ch.; Bühler Y.; Bartelt, P.; Glover, J.; McARDell, B.; Feistl, T.; Steinkogler, W. 2012: Numerische Simulation von gravitativen Naturgefahren mit "RAMMS". *Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz*. 169, 282 - 293.
- CH2011 (2011). *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*. Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC. Zurich, Switzerland.
- Bouissou S., B. T. (2011). Influence of structural heterogeneities and of large scale topography on imbricate gravitational rock slope failures. *Tectonophysics* 526-529, S. 147-156.
- Tobler, D., Graf, K., Krummenacher, B. (2009). Rockfall assessment of natural hazards by 3D-simulation potential. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU2009-6666-1, 2009, EGU General Assembly 2009
- Gamma, P. (2000). *dfwalk - Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung*. Bern: Geographica Bernensia G66, Verlag des Geogr. Inst. Univ. Bern.