

## AlpinRiskGP

**Abschätzung des derzeitigen und zukünftigen Gefährdungspotentials für Alpentouristinnen/-touristen und Infrastruktur bedingt durch Gletscherrückgang und Permafrostveränderung im Großglockner-Pasterzengebiet (Hohe Tauern, Österreich)**

**Karl-Franzens-Universität Graz  
Institut für Geographie und  
Raumforschung**



ProjektmitarbeiterInnen und AutorInnen des Berichts:

Projektleitung:

Ao.Univ.-Prof. Mag. Dr. Gerhard Karl Lieb

Unter Mitwirkung von:

Mag. Katharina Kern

Mag. Gernot Seier

Mit fachlicher Beratung von:

Mag. Mag. Dr. Andreas Kellerer-Pirklbauer-Eulenstein

Univ.-Prof. Dr. Ulrich Strasser

Institut für Geographie und Raumforschung

Karl-Franzens-Universität Graz

Graz, im November 2010

StartClim2009.F

Teilprojekt von StartClim2009

Projektleitung von StartClim2009:

Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt

Institut für Meteorologie, Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien

URL: <http://www.austroclim.at/startclim/>

StartClim2009 wurde aus Mitteln des BMLFUW, des BMWF, des BMWFJ und der ÖBf gefördert.

Diese Publikation sollte folgendermaßen zitiert werden:

Lieb, G.K., Kern, K., Seier, G. (2010): AlpinRiskGP - Abschätzung des derzeitigen und zukünftigen Gefährdungspotentials für Alpentouristen und Infrastruktur bedingt durch Gletscherrückgang und Permafrostveränderung im Großglockner-Pasterzengebiet (Hohe Tauern, Österreich). Endbericht von StartClim2009.F in StartClim2009: Anpassung an den Klimawandel: Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich, Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>5</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>F-1 Problemstellung, Zielsetzung</b>	<b>6</b>
<b>F-2 Aktueller Wissensstand</b>	<b>8</b>
<b>F-3 Begründung der Auswahl der Naturprozesse</b>	<b>12</b>
<b>F-4 Methodik</b>	<b>15</b>
<b>F-5 Dispositionsmodellierung</b>	<b>16</b>
<b>F-5.1 Disposition Sturzprozesse</b>	<b>16</b>
<i>F-5.1.1 Definition, Disposition und Auslösung von Steinschlag und Felsstürzen</i>	<i>16</i>
<i>F-5.1.2 Stand der Forschung – Sturzprozesse</i>	<i>18</i>
<i>F-5.1.3 Erstellung des Dispositionsmodelles – Sturzprozesse</i>	<i>18</i>
<b>F-5.2 Disposition zu sonstigen denudativen Prozessen</b>	<b>21</b>
<i>F-5.2.1 Definition, Disposition und Auslösung von sonstigen denudativen Prozessen</i>	<i>21</i>
<i>F-5.2.2 Stand der Forschung – Sonstige denudative Prozesse</i>	<i>22</i>
<i>F-5.2.3 Erstellung des Dispositionsmodelles – Sonstige denudative Prozesse</i>	<i>22</i>
<b>F-5.3 Zukünftiges Szenario 2030</b>	<b>23</b>
<i>F-5.3.1 Massenprozesse und Klimawandel</i>	<i>23</i>
<i>F-5.3.2 Erstellung des Dispositionsmodells</i>	<i>24</i>
<b>F-6 Prozessmodellierung</b>	<b>26</b>
<b>F-6.1 Abschätzung der Mächtigkeit mobilisierbarer Massen</b>	<b>26</b>
<b>F-6.2 Das Prozessmodell</b>	<b>27</b>
<b>F-6.3 Ergebnisse der Prozessmodellierung</b>	<b>29</b>
<b>F-7 Gefährdungsklassen und Gefahrenhinweiskarten</b>	<b>32</b>
<b>F-8 Vulnerabilitätskarten</b>	<b>35</b>
<b>F-9 Handlungsempfehlungen</b>	<b>38</b>
<b>F-10 Anleitung zur Übertragung der Methodik</b>	<b>40</b>
<b>F-11 Ausblick zur Zukunft des Hochgebirgstourismus</b>	<b>41</b>

<b>Literaturverzeichnis-----</b>	<b>44</b>
<b>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis -----</b>	<b>49</b>

## Kurzfassung

Natürliche Prozesse im Hochgebirge (z. B. Felsstürze) werden sich als Folge des Klimawandels verstärken und können somit eine Gefahr für Personen und Infrastruktur darstellen. Während für Siedlungen, Verkehrswege und touristisch intensiv genutzte Flächen (z. B. Skipisten) ein ausgeklügeltes System an permanenten und temporären Schutzmaßnahmen existiert, stellt sich zunehmend die Frage nach der Gewährleistung der Sicherheit für Personen, die sich abseits dieser geschützten Areale auf Bergwegen und Routen bewegen. In einer der meistbesuchten Hochgebirgslandschaften Österreichs, worin vor allem Gletscherschwund und auftauender Permafrost die Ursache für potenziell gefährliche Prozesse sind, wurden Sturz- und flächenhafte Abtragungsprozesse untersucht und modelliert. Daraus konnte eine Gefährdungskarte abgeleitet werden, die das untersuchte Gebiet flächenhaft in vier Gefährdungsklassen gliedert. Mit Hilfe von Daten aus Klimamodellen wurden die Bedingungen für ein Szenario 2030 abgeschätzt und auch für dieses Jahr eine Gefährdungskarte erstellt. Durch Überlagerung mit dem Wege- und Routennetz wurden Karten der Verletzlichkeit einzelner Wegabschnitte erstellt, welche von Kundigen der Region begutachtet und in Hinblick auf mögliche Maßnahmen bewertet wurden. Die vorgeschlagenen Maßnahmen reichen von konkreten Wegsicherungsarbeiten bis zu neuen Organisationsformen in der Weg-erhaltung. Die entwickelte Methodik ist auf andere Gebiete übertragbar.

## Abstract

As a result of climate change, natural processes in high mountains (e.g. rockfall) are increasing and hence can become a hazard for people and infrastructure. While an elaborate system of permanent and temporary protective measures exists for settlements, transport routes and touristic intensively used areas (e.g. ski slopes), safety for persons moving outside these protected areas on trails and routes cannot be ensured. Therefore, rock fall and other denudation processes, mainly caused by glacier retreat and permafrost degradation, were studied and modelled in one of the most visited high mountain areas in Austria. From the modelling results, geomorphological hazard maps that subdivide the study area into four hazard zones were derived. In addition, data from climate models was used to estimate the conditions for a scenario 2030 and to produce a geomorphological hazard map 2030. By overlaying the hazard maps with trail- and routenetwork information, vulnerability maps were created. Local stakeholders then reviewed these maps and evaluated them with regard to possible measures. The proposed measures range from concrete trail protection works to new organisational forms of trail maintenance. The developed method is easily transferable to other study sites.

## **F-1 Problemstellung, Zielsetzung**

Das Hochgebirge ist wegen seines Steilreliefs und der großen Höhenunterschiede Schauplatz häufiger und großer Naturprozesse, die die Erdoberfläche gestalten. Solche geomorphologischen Prozesse (wie z. B. Rutschungen, Felsstürze, Steinschlag oder Muren) können dadurch, dass sie Menschen oder Infrastruktur betreffen, zu Naturgefahren werden. Da die in Rede stehenden Prozesse allesamt klimagesteuert sind (z. B. stehen Steinschlag mit dem Frost- und Muren mit dem Niederschlagsgeschehen in Zusammenhang), muss auch der Klimawandel einen Einfluss auf sie haben. Theoretische Überlegungen hierzu haben ebenso wie die Erfahrungen der letzten rund zwei Jahrzehnte die Erkenntnis erbracht, dass sich die meisten der Prozesse intensivieren und somit auch Flächen betreffen können, auf denen solche Ereignisse zuvor noch nicht beobachtet wurden.

Darüber hinaus sind die Alpen von der globalen Erwärmung stärker betroffen als die Vorländer, was die ohnehin hohe Anfälligkeit zu von der Schwerkraft induzierten (gravitativen) Prozessen erhöht. Dazu kommen in den höchsten Lagen der österreichischen Alpen noch zwei unmittelbare Wirkungen des Klimawandels, die die Situation verschärfen. Es sind dies zum einen der seit den 1990er Jahren drastische Rückgang der Gletscher und zum anderen der – zumindest visuell – weniger dramatische Rückgang des Permafrostes (Permafrost-Degradation). Beide Prozesse resultieren mittelbar darin, dass für gravitative Prozesse mehr Material als früher zur Verfügung steht. All dies erklärt die regional bereits beobachtbare und in Zukunft weiterhin erwartete Zunahme der Häufigkeit (Frequenz) und Größe (Magnitude) der betreffenden Ereignisse.

Diese im Hochgebirge an sich ganz „normalen“ Prozesse werden erst dadurch zu Gefahren, dass sie Menschen oder Infrastruktur (Bauwerke, Verkehrs- und Sportanlagen; im Folgenden wird besonderes Augenmerk auf die Wege gelegt) betreffen können. Dies gilt unabhängig davon, ob die Prozesse im Einzelnen wirklich als Klimawandelfolgen zu deuten sind (was keineswegs immer der Fall ist) und ob ihre Frequenz und Magnitude wirklich zugenommen haben (was in Ermangelung kontinuierlicher Beobachtungen meist unbekannt ist). Faktum ist indes, dass auch im Hochgebirge – ja wegen seines hohen Freizeitwertes vielfach gerade dort – sich die Dichte der Infrastruktur ebenso wie die Zahl der Besucherinnen und Besucher zumindest im Zeitmaßstab mehrerer Jahrzehnte nachweislich vergrößert haben (Lieb 2007).

Zunehmende Intensität der Prozesse im Verein mit erhöhter Exposition von Infrastruktur und vergrößerter Anwesenheitswahrscheinlichkeit von Personen sind die Grundlage dafür, dass die Öffentlichkeit ein ausgeprägtes Problembewusstsein und eine starke Sensibilität für die (auch vermeintlichen) Folgen des Klimawandels im Hochgebirge entwickelt hat. Hierzu kommt ein erhöhtes Sicherheitsbedürfnis in der modernen Gesellschaft, das den Ruf nach dem Schutz vor Naturgefahren immer lauter werden lassen. Solche Schutzmaßnahmen haben im Bereich von Siedlungen, Verkehrswegen und Schipisten (sowie anderen Sportflächen) eine schon auf das 19. Jh. zurückgehende Tradition – wobei in Österreich sowohl der permanente Schutz durch (aktive) baulich-technische und (passive) raumplanerische Maßnahmen als auch ein ganzes Bündel temporärer Maßnahmen, eingebettet in ein vielfach erprobtes integrales Risikomanagement, hoch entwickelt und bestens etabliert ist. Abseits der genannten Areale hingegen fehlt ein solches „Sicherheitsnetz“, was im Besonderen für das in der Regel von alpinen Vereinen erhaltene alpine Wegenetz und die nicht speziell instand gehaltenen, aber häufig begangenen hochalpinen Routen gilt. Viele von ihnen mussten schon saniert und verlegt werden, was immense Kosten verursacht, weshalb auch schon eine Diskussion über die (partielle) Auflfassung dieser Infrastruktur in Gang gekommen ist. Dies allerdings würde einen „Lebensnerv“ des österreichischen Tourismus treffen, er-

schließen doch gerade diese Wege und Routen viele der attraktivsten Ziele in den alpinen Tourismusregionen.

Das Projekt AlpinRiskGP zielt mitten in dieses Spannungsfeld, indem es durch die flächenhafte Erfassung potenziell gefährlicher Prozesse und die Bewertung der Gefährdung der Wege und Routen in einer der meistbesuchten Hochgebirgslandschaften der österreichischen Alpen einen wesentlichen Beitrag für den laufenden Diskurs bietet, wie die Sicherheit für Personen, die sich im hochalpinen Gelände aufhalten, trotz der sich durch den Klimawandel verschärfenden Rahmenbedingungen beibehalten bzw. nachhaltig verbessert werden kann. Die Ziele des Projektes sind dabei im Einzelnen:

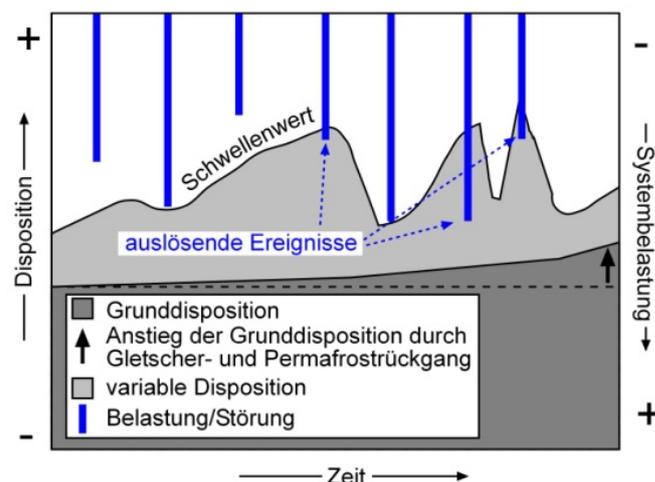
- Abschätzung der mobilisierbaren Massen, die sich durch Sturz und andere Abtragungsprozesse bewegen können,
- Ausweisung von Anriss-, Transport- und Ablagerungsbereichen von bewegten Massen und deren Bewertung,
- Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte für Sturz- und andere Abtragungsprozesse mit Dispositions- und Prozessmodellen für die gegenwärtige Situation mit definierten Gefährdungsklassen,
- Abschätzung der Auswirkung des Klimawandels auf die Prozesse auf Basis von regionalen Klimamodell-Berechnungen unter Berücksichtigung eines Szenarios der Entgletscherung und Permafrost-Degradation für das Jahr 2030,
- Erstellung von Vulnerabilitätskarten für die gegenwärtigen sowie zukünftigen Klimabedingungen im Szenario 2030,
- Formulierung von Handlungsoptionen bzw. Empfehlung von konkreten Maßnahmen auf verschiedenen räumlichen Ebenen und für unterschiedliche Akteursgruppen sowie
- Erstellung eines „Handbuches“ zur Anwendung der entwickelten Methodik auf andere Hochgebirgsräume.

## F-2 Aktueller Wissensstand

Die für die vorliegende Fragestellung in Betracht kommenden geomorphologischen Prozesse, welche durch die räumliche Überlagerung mit Infrastruktur oder menschlichem Aktionsraum zur Naturgefahr werden können, sind als solche gut bekannt und auch in monographischer Standardliteratur hinreichend beschrieben (z. B. Stahr u. Hartmann 1999). Solche Massenbewegungen werden räumlich in Herkunftsgebiet (Abbruchzone, Einzugsgebiet), Bewegungs- bzw. Transport- (worin ebenfalls Material aufgeschürft wird) und Ablagerungsbereich gegliedert, welche alle drei auch potentielle Gefahrenbereiche darstellen.

Die Anfälligkeit zur Auslösung solcher Massenbewegungen wird als Disposition bezeichnet, die von hydrologischen, morphologischen und geologischen Eigenschaften sowie klimatischen Rahmenbedingungen abhängig ist. Hierbei werden zwei Arten der Disposition unterschieden, die Grund- und die variable Disposition (Zimmermann et al. 1997). Die Grunddisposition ist über Jahrzehnte bis Jahrhunderte relativ konstant und bestimmt das räumliche Auftreten von Massenbewegungen und deren Größe (Magnitudo). Die variable Disposition ist mittelfristig über Tage bis Jahrzehnte variabel und bestimmt das zeitliche Auftreten und die Wiederkehr von Ereignissen (Frequenz). Schließlich müssen auch noch bestimmte Faktoren beachtet werden, die jene Ereignisse auslösen, welche den durch die Disposition definierten Schwellenwert überschreiten. Bei hoher Disposition ist der Schwellenwert für ein auslösendes Ereignis niedrig, bei niedriger Disposition hingegen hoch.

In Abb. F- 1 werden diese Zusammenhänge graphisch veranschaulicht: Kommt es zu einer Systembelastung von außen (blaue Stäbe oben; im Hochgebirge häufig durch plötzlich hohes Wasserdargebot auf Grund von Starkniederschlägen und/oder Schneeschmelze), die so stark ist, dass sie den durch die Disposition definierten Schwellenwert überschreitet, kommt es zur Auslösung des Prozesses (in Abb. F- 1 in drei Fällen).



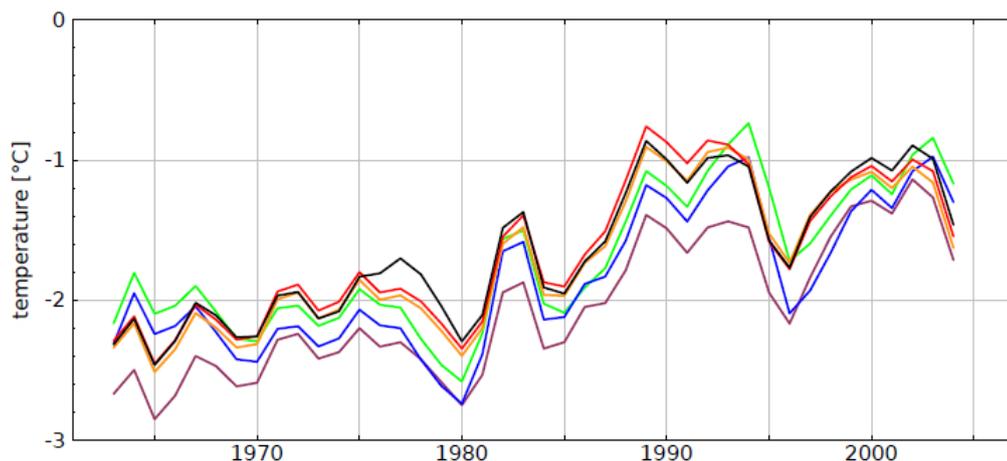
**Abb. F- 1:** Grunddisposition, variable Disposition und auslösende Ereignisse

Alle Angaben sind hier dimensionslos dargestellt (Grafik in Anlehnung an Zimmermann et al. 1997).

Trotz dieses grundsätzlich guten Verständnisses der Prozesse und ihrer Rahmenbedingungen bleiben für deren konkrete Bearbeitung im Rahmen eines auf Modellierungen basierenden Projekts wie AlpinRiskGP doch auch viele Einzelfragen offen. Hierzu gehören etwa die Quantifizierung der mobilisierbaren Massen, welche ohne aufwändige Ge-

ländearbeit (die in diesem Projekt, wie im methodischen Teil diskutiert, nicht möglich war) nur relativ grob abgeschätzt werden können. Ähnliches gilt für die Festlegung von Schwellenwerten der Hangneigungen zur Abgrenzung von Sturz- und Ablagerungsgebieten, wofür noch zu wenige empirische Angaben aus der Literatur zur Verfügung stehen (vgl. die Ausführungen zur Prozessmodellierung).

Gletscher gelten schon seit langem, Permafrost hingegen erst seit wenigen Jahrzehnten als wissenschaftliche Schlüsselindikatoren für die Auswirkungen der globalen Klimaveränderungen auf die Alpen (und andere Hochgebirge sowie Polarregionen). Gletscherrückgang und Veränderung des Permafrostmilieus, denen – wie bereits erwähnt – in den höchst gelegenen Teilen der österreichischen Alpen wegen ihrer dort flächenmäßig weiten Verbreitung besondere Bedeutung zukommt, sind der Grunddisposition zuzuordnen und somit bestimmend für räumliches Auftreten (neue Anrissgebiete) und Magnitude (z. B. größere Felsstürze als bisher bekannt). Der Gletscherrückgang ist durch standardisierte Monitoring-Programme in allen Alpenländern und somit auch in Österreich ausgezeichnet dokumentiert, das Projektteam ist seit Jahren mit den entsprechenden Aktivitäten im Untersuchungsgebiet Großglockner-Pasterze betraut (z. B. Wakonigg und Lieb 1996). Die Veränderungen im Permafrost-Milieu werden zwar noch weniger systematisch untersucht, doch sind auch hierzu ausreichend exakte Informationen verfügbar (z. B. Kellerer-Pirklbauer et al. 2009)

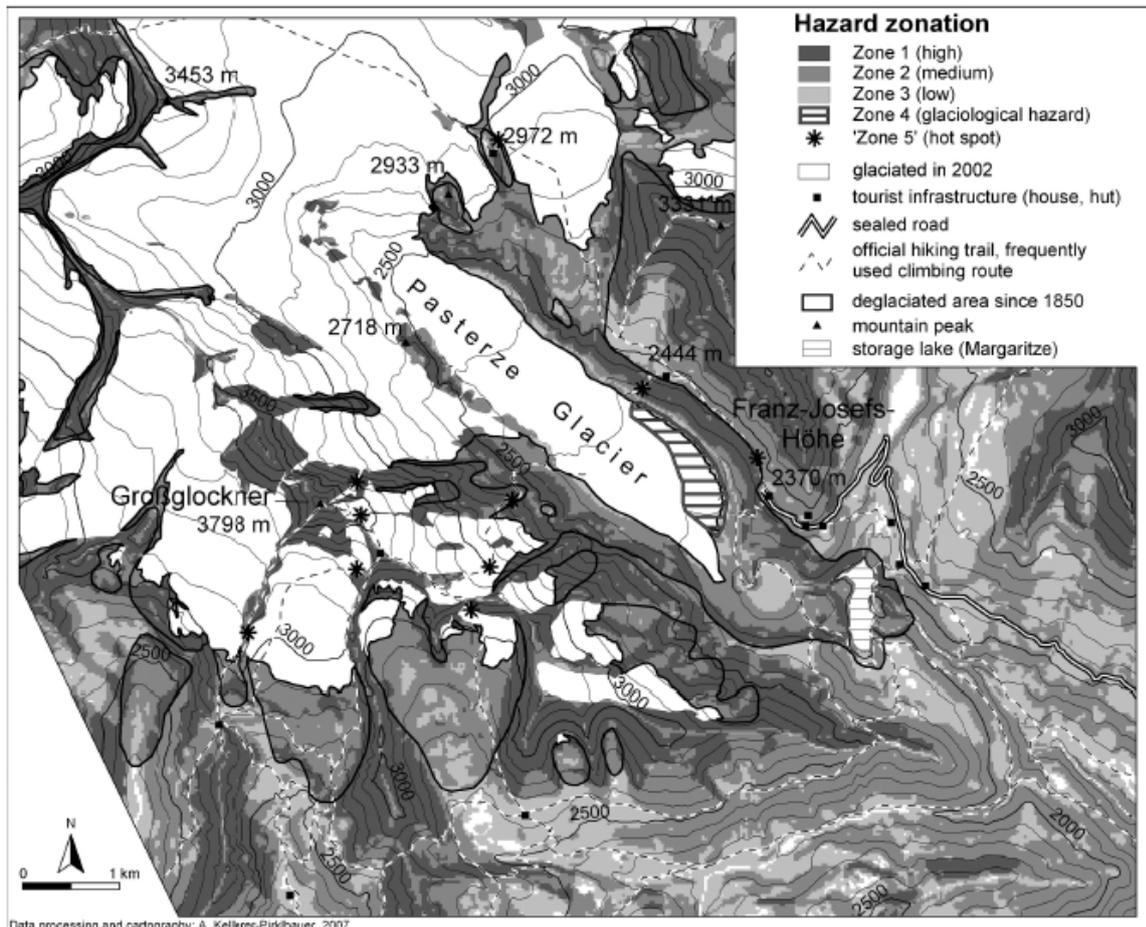


**Abb. F- 2:** Gleitende 5-jahres Temperaturmittel (Gauss Filter) für sechs ausgewählte Messgebiete, bezogen auf 2500m Seehöhe 1961-2006 (Taucher 2010).

Pasterze (schwarz), Schareck-Fallbichl (rot), zentrale Schobergruppe (orange), Dösental (blau), Hintereggeral (grün) und Hochreichart (violett).

Über den Klimawandel selbst ist der Kenntnisstand besonders gut, wenn auch die Ableitung regionaler Aussagen aus grob aufgelösten globalen Klimamodellen immer noch Gegenstand aktueller Forschungen ist. Sowohl für den gesamten Alpenraum (Auer et al. 2007) als auch für die Hohen Tauern und somit das Untersuchungsgebiet (z. B. Auer et al. 2002, Taucher 2010) ist die Klimaentwicklung der jüngeren Vergangenheit sehr gut bekannt (Abb. F- 2), wobei der seit 1886 durchgehenden Klimareihe des der Glocknergruppe benachbarten Sonnblick-Observatoriums eine besondere Bedeutung zukommt. All diese Daten lassen klar erkennen, dass die Alpen vom Klimawandel stärker als die außeralpinen Gebiete (und auch stärker als im globalen Mittel) betroffen waren, was auch weiterhin der Fall sein dürfte. Als Merkmale des zukünftig zu erwartenden Klimas werden mildere Winter, ein höherer Anteil von flüssigem Niederschlag sowie die Zunahme von Starkniederschlagsereignissen (IPCC 2007<sup>a</sup>; Näheres in Kap. F- 5.3.1)

angegeben – diese Faktoren gehören zur variablen Disposition und nehmen somit wesentlichen Einfluss auf die Frequenz von Massenbewegungen, während die allgemein fortschreitende Erwärmung ein Andauern des herrschenden Gletscherschwundes und der Permafrost-Degradation bewirken wird.



**Abb. F- 3:** Vorläufige geomorphologische Gefahrenhinweiskarte des Gebietes Großglockner-Pasterze (Lieb et al. 2007).

Auch die Interaktion zwischen den vom Klimawandel gesteuerten Naturprozessen im Hochgebirge und menschlichen Aktivitäten unter dem Aspekt von Gefahr, Risiko und Vulnerabilität (zu den Begriffen vgl. Felgentreff und Glade 2008) ist in den letzten Jahren von vielen Forscherinnen und Forschern aufgegriffen worden. Beispielhaft hierfür seien die vier folgenden Arbeiten, die jeweils wie AlpinRiskGP auf Bergsteigerinnen und Bergsteiger fokussieren und auch für das Glockner-Pasterzen-Gebiet relevant sind, genannt. In einer Studie des Umweltdachverbandes (2006) kam durch umfangreiche Befragungen von Akteurinnen und Akteuren ein außerordentlich hohes Problembewusstsein bei diesen für alpine Naturgefahren zum Ausdruck, eine Auseinandersetzung mit den gefährlichen Prozessen findet sich in dieser Arbeit jedoch nur exemplarisch. Ein StartClim Projekt des Vorjahres beschäftigte sich mit der Wahrnehmung und Bewertung von Naturgefahren durch Bergsteigerinnen und Bergsteiger im Tuxer Tal. In diesem Projekt werden bereits einige Anpassungsmaßnahmen vorgeschlagen, auf die aufgebaut werden kann (Pröbstl et al. 2009). Die monographische Arbeit von Braun (2009) lässt beinahe keine Facette im Umfeld des gegenständlichen Problemkreises unbeachtet und liefert für das Untersuchungsgebiet u. a. gute Karten potentieller Gefahrenstellen an

Wegen und Routen (jedoch keine flächenhafte Information!) sowie Meinungen von regionalen Fachleuten. Als unmittelbarer Vorläufer von AlpinRiskGP kann (gemäß den Ausführungen im Projektantrag) die Arbeit von Lieb et al. 2007 gelten, die eine „vorläufige Gefahrenkarte“ (Abb. F- 3) enthält, welcher jedoch noch keine Modellierung der Prozesse zu Grunde liegt.

Zur Bestimmung des flächenhaften Gefährdungspotentials muss neben einem Dispositionsmodell, welches die potentiellen Ursprungsgebiete bestimmt, auch ein Prozessmodell eingesetzt werden, womit die Reichweite und Ausbreitung von zuvor definierten Massenbewegungsarten – im vorliegenden Projekt zum einen Felsstürze und zum anderen sonstige flächenhafte Abtragungsprozesse (z.B. Abspülung, Muren) – modelliert wird. Eine Bewertung der solcherart modellierten Prozesse – im vorliegenden Fall in vier Klassen – erlaubt schließlich die Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte mit Ausweisung gegenwärtiger Gefährdungsflächen. Auf Basis regionaler Klimamodelle können schließlich zukünftige Szenarien abgeleitet werden – in AlpinRiskGP ein Szenario für das Jahr 2030 – für welche die Dispositions- und Prozessmodellierung erneut durchgeführt wird und zu merklich veränderten Ergebnissen führt. Verschneidet man diese Ergebnisse mit Rauminformationen menschlicher Aktivitäten – im konkreten Fall besonders Wege und Routen –, so erhält man Vulnerabilitätskarten, die zeigen, welche Objekte bzw. Weg- und Routenabschnitte zum jeweiligen Zeitpunkt welchen Gefährdungsgrad aufweisen.



**Abb. F- 4:** Impressionen unterschiedlicher geomorphologischer Prozessbereiche im Untersuchungsgebiet Großglockner-Pasterze.

### F-3 Begründung der Auswahl der Naturprozesse

AlpinRiskGP kann sich auf Grund des vorgegebenen Projektrahmens nicht mit allen potenziell gefährlichen Naturprozessen im Hochgebirge auseinandersetzen. Schon in der Projekt-Antragsphase wurde der gesamte Bereich der meteorologisch-hydrologischen Prozesse ausgeschlossen, zu denen etwa Stürme, Gewitter, Starkregen, Hochwässer oder Lawinen gehören. Besonders die zuletzt genannten stellen zwar eine „klassische“ alpine Naturgefahr dar, diese wurde jedoch schon sehr umfangreich bearbeitet und verfügt durch die Lawinenwarndienste der Bundesländer ([www.lawine.at](http://www.lawine.at)) über ein etabliertes und bewährtes Kommunikations- und Warnsystem. Der Forschungsbedarf erscheint somit geringer, zumal sich auch Frequenz und Magnitude von Lawinen bezüglich des Klimawandels indifferent verhalten dürften. Hinzu kommt, dass Lawinen das alpine Wegenetz, das im Zentrum des Interesses von AlpinRiskGP steht, weniger beeinflussen als gravitative Massenbewegungen von Gesteinsmaterial. Die Projektergebnisse sind somit (wie auch die Arbeit von Braun 2009) nur für den Sommer-Alpintourismus relevant.



**Abb. F- 5:** Felsstürze als potenzielle Naturgefahren – ein kleines Ereignis am 1.8.2009 oberhalb des Dösener Blockgletschers (Ankogelgruppe, Hohe Tauern) (Foto: T. Marke).

Aus der Vielfalt an geomorphologischen Naturprozessen, die im Hochgebirge wirksam sind und seine Oberfläche ständig umgestalten, wurden zwei herausgegriffen:

- Felsstürze und Steinschlag: Diese Prozesse gelten als rein gravitativ verursacht, d. h. sie finden meist ohne die Beteiligung von anderen Transportmedien (Wasser, Eis) rein der Schwerkraft folgend statt (Abb. F- 5). Herkunftsgebiete sind grundsätzlich Felswände, worin der Fels vor den betreffenden Ereignissen gelockert werden muss, was z. B. durch Frostverwitterung oder Permafrost-Degradation geschehen kann. Steinschlag ist dabei ein eher kontinuierlicher Prozess (hohe Frequenz, geringe Magnitude), Felsstürze haben den Charakter von Einzelereignissen (geringe Frequenz, hohe Magnitude).

- Unter sonstigen denudativen Abtragungsprozessen werden in AlpinRiskGP all jene verstanden, die nicht aus Felswänden, sondern aus in der Regel schuttreichen Hangbereichen stammen. Diese Prozesse haben zwar auch eine stark gravitative Komponente, doch ist hierbei vielfach auch das Medium Wasser stark beteiligt. Hierbei kommt der flächenhaften Abspülung von an der Oberfläche und im oberflächennahen Untergrund lagerndem Lockermaterial eine hohe Bedeutung zu – hangabwärts ist der Übergang zu Muren und somit Erosionsprozessen mit linearer Zerschneidung fließend. In diese bewusst recht offen definierte Prozessgruppe können auch seichtgründige Gleitprozesse in der Art von Blaiken (Geitner et al. 2010) fallen.

Als Argument für diese Auswahl kann – neben der Verfügbarkeit geeigneter Algorithmen für die Prozessmodellierung (siehe Kap. F- 6) – zum einen angeführt werden, dass sie sich als besonders signifikante Folgewirkungen von Gletscherschwund und Permafrost-Degradation einstellen, und zum anderen, dass es gerade diese gravitativen Prozesse sind, die für die Gefährdung von Touristinnen und Touristen auf alpinen Wegen und Routen relevant sind (vgl. auch Lieb 2007).

- Gravitative Prozesse können Menschen, die sich im Herkunfts-, Transport- oder Ablagerungsbereich eines Ereignisses aufhalten, unmittelbar gefährden, was bei langsamen Massenbewegungen (z. B. Kriechprozessen) im Allgemeinen nicht der Fall ist. Dies gilt speziell für hochfrequenten Steinschlag, während bei den sehr seltenen Felsstürzen die Anwesenheitswahrscheinlichkeit von Personen außerordentlich gering ist. Ähnliches gilt auch für die sonstigen Abtragungsvorgänge, die größere (und somit potenziell gefährliche) Magnituden nur bei Witterungsbedingungen erreichen, unter denen ein Aufenthalt im Freien ohnehin kaum mehr möglich ist.
- Insgesamt wohl noch bedeutender ist jedoch der Effekt der Verschlechterung der Begehrbarkeit des Geländes im Allgemeinen und der Wege und Routen im Besonderen (ausführlich hierzu Braun 2009, 5). So etwa kann eine seichtgründige Rutschung einen Steig erfassen und an seiner Stelle nur mehr abschüssiges Lockermaterial im Steilgelände zurücklassen. Eine andere Möglichkeit wäre die Verschüttung eines Weges durch Felsblöcke im Ablagerungsgebiet eines Felssturzes. In beiden Beispielen – für diese und für viele weitere gibt es unzählige Belegstellen – müssen als spontane Maßnahme die betreffenden Passagen durch untrassiertes Gelände umgangen (was eine zusätzliche Gefahrenquelle für die betroffenen Personen darstellt) bzw. in weiterer Folge aufwändig saniert werden (Abb. F- 6). Eine Verschlechterung der Wegverhältnisse kann auch ohne das Auftreten gravitativer Prozesse besonders durch den Gletscherschwund eintreten (Näheres hierzu bei Lieb 2007).

Schließlich sei an dieser Stelle auch noch die Unterscheidung von Wegen und Routen erläutert (Braun 2009): Unter Wegen werden in AlpinRiskGP markierte und gewartete Wander- oder Bergwege verstanden, die in der Regel von alpinen Vereinen unterhalten werden. Routen hingegen sind nicht markiert und gewartet, jedoch häufig begangen und somit im Gelände auch durch Trittsuren, eventuell auch durch Steinmänner o. ä. Orientierungsmarken erkennbar. Routen stellen höhere Anforderung an ihre Begeherinnen und Begeher, sind aber in vielen Fällen die einzige Möglichkeit, die höchsten Gipfel (auch den Großglockner) zu erreichen.



**Abb. F- 6:** Beispiel einer aufwändigen Wegsanierung durch Einbau einer Hangbrücke nach flächenhaftem Abgleiten des ursprünglichen Hanges auf Grund dessen Unterschneidung durch das im Vordergrund sichtbare Gerinne (Ridnauntal, Stubaier Alpen) (Foto: G. K. Lieb, 15.7.2010).

## F-4Methodik

Dieses Kapitel beschreibt nicht alle in AlpinRiskGP angewandten Methoden im Detail – dies geschieht bei den einzelnen Unterkapiteln – sondern gibt nur eine knappe Übersicht, um die methodische Pluralität des Projekts im Kontext seiner Zielsetzungen verständlich zu machen.

- Wohl an erster Stelle zu nennen sind Geographische Informationssysteme (GIS), mit deren Hilfe die gesamte Modellierung auf der Grundlage eines Digitalen Geländemodells (DGM) durchgeführt wurde. Beispielsweise beruhte die im Rahmen der Dispositionsmodellierung durchgeführte Modellierung der potentiellen Permafrost-Verbreitung rein auf empirischen Daten (die unserer Forschungsgruppe aus eigenen Untersuchungen vorliegen) und dem DGM.
- Herzstück des Projektes war die Prozessmodellierung mit einem massenkonservierenden, multiple direction flow propagation-Algorithmus (Gruber 2007). Basierend auf dem DGM werden dabei mobilisierbare Massen entlang von Sturz- und Gleitbahnen modelliert, wobei die Masse einer Rasterzelle – anteilmäßig in Abhängigkeit von der Hangneigung – in alle tiefer liegenden Rasterzellen verteilt wird. Massentransport und -ablagerung werden dabei mit einfachen Parametern dargestellt.
- Literaturrecherche ist für jede wissenschaftliche Arbeit selbstverständlich, in AlpinRiskGP wurden insbesondere die notwendige geologische Hintergrundinformation sowie Erfahrungswerte anderer Autorinnen und Autoren für die Parametrisierung der Prozesse verschiedenen Publikationen entnommen. Eine vollständige Aufarbeitung der prozess- und regionalspezifischen Literatur erschien demgegenüber nicht der Zielerreichung dienlich und unterblieb daher.
- Auch Geländearbeit spielte eine untergeordnete Rolle, wurde jedoch – im Rahmen anderer Forschungsvorhaben sowie der alljährlichen, vom Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz durchgeführten Gletschermessungen – ergänzend durchgeführt. Der Zweck war die exemplarische Überprüfung der Plausibilität der Modellierungsergebnisse an ausgewählten Einzelstellen (für die Sturzprozesse speziell die Felsstürze 2007 und 2008 am Mittleren Burgstall, für die sonstigen Prozesse die orographisch linke Begrenzungsflanke der Gletscherzunge der Pasterze zwischen Hofmannshütte und Franz-Josefs-Höhe).
- Ergänzend zu Literatur- und Geländearbeit wurden auch Methoden der Fernerkundung eingesetzt. Hiermit konnten beispielsweise die zur Abschätzung der Prozessdisposition wichtigen Informationen zur Vegetationsbedeckung verdichtet und die schon vorhandene Kartierung der Gletscherausdehnung beim Hochstand von 1850 reevaluiert werden.
- Neben diesem Set an stark geotechnologisch bzw. naturwissenschaftlich ausgerichteten Methoden kam im letzten Projektteil auch eine Methode der partizipativen, empirischen Sozialforschung zum Einsatz. In einem Workshop mit Stakeholdern bzw. Akteurinnen und Akteuren des Alpintourismus im Glockner-Pasterzen-Gebiet wurden nicht nur die Vulnerabilitätskarten (und somit die Ergebnisse der Modellierung) einer kritischen Prüfung unterzogen, sondern auch Maßnahmen-Empfehlungen erarbeitet.

## F-5 Dispositionsmodellierung

Modelle zur Simulation von Naturgefahren können nach Kienholz et al. (1993 zitiert bei Meißl, 1998) in Dispositions- und Prozessmodelle unterteilt werden. Mit Hilfe des Dispositionsmodells bestimmt man die Disposition einer Fläche für einen bestimmten geomorphologischen Prozess. Dispositionsmodelle weisen somit potentielle Ursprungsgebiete von Prozessen aus. Im Gegensatz dazu wird mit dem Prozessmodell die Dynamik eines Prozesses simuliert. Es beschreibt den Prozessablauf sowie dessen Reichweite und Ausbreitung. Durch die Kombination von Dispositions- und Prozessmodell kann nach der Modellierung auch eine räumliche Differenzierung der Wirkungsbereiche der Prozesse in Herkunfts-, Transport- und Ablagerungsgebiet erfolgen.

Unter Disposition versteht man die Bereitschaft oder die Anfälligkeit eines Gebietes zur Bildung und Auslösung von Prozessen (Zimmermann et al. 1997) (siehe Kapitel F-2). In Bezug auf AlpinRiskGP umfassen diese Prozesse einerseits Sturz- und andererseits sonstige flächenhafte Abtragungsprozesse (z. B. flächige Abspülung, Muren). Eine scharfe Trennung zwischen Grunddisposition, variabler Disposition und auslösendem Ereignis ist in vielen Fällen nicht möglich, aber für die Modellierung von Massenbewegungsprozessen dennoch hilfreich, auch dann, wenn nicht alle Bereiche modelliert werden. Im Rahmen dieses Projektes wird ausschließlich die Grunddisposition abgeschätzt. Die variable Disposition und die auslösenden Ereignisse werden, da ihre Bestimmungen mit großen Unsicherheiten behaftet sind, im Modell nicht berücksichtigt. Somit wird von einem stabilen System ausgegangen, dessen Analysen prinzipiell immer gültig sind, solange sich die Umweltbedingungen nicht ändern.

Die Grunddisposition einer Fläche kann durch eine Analyse unterschiedlicher Naturraumparameter bestimmt werden. Man geht dabei davon aus, dass jene Geofaktoren, die im Untersuchungsgebiet (oder dem Untersuchungsgebiet ähnlichen Naturräumen) bereits in der Vergangenheit zur Auslösung von Massenbewegungsprozessen geführt haben, solche Prozesse auch in Zukunft bestimmen werden. So können (potenzielle) Herkunftsgebiete auch in Bereichen, in denen aktuell die betreffenden Prozesse nicht beobachtet werden, die aber eine entsprechende Kombination der Geofaktoren aufweisen, bestimmt werden (Wichmann 2006).

Dispositions- und Prozessmodelle und daraus abgeleitete Gefahrenbeurteilungen können auf unterschiedlichen Maßstabsebenen (national, regional, lokal oder punktuell) erstellt werden. Da für das gegenständliche Forschungsprojekt Gefahrenbereiche in einem relativ großen Gebiet lokalisiert und eingeschätzt werden mussten, fanden alle Untersuchungen auf der regionalen Ebene statt. Die Ergebnisse sind daher Gefahrenhinweiskarten in einem Maßstab von 1:50.000. Konkrete Aussagen über die lokale Gefährdung (z. B. von einzelnen Parzellen) können mit Hilfe dieser Gefahrenhinweiskarten nicht getroffen werden.

### F-5.1 Disposition Sturzprozesse

#### *F-5.1.1 Definition, Disposition und Auslösung von Steinschlag und Felsstürzen*

Zur Gruppe der Sturzprozesse zählen die Phänomene Steinschlag, Blockschlag, Felssturz und Bergsturz. Eine eindeutige Zuordnung der Prozesse ist schwierig, da es unterschiedliche Begriffsdefinition gibt. In der Regel werden Prozesse aber entweder nach dem Volumen der bewegten Masse oder über die Größe der Ablagerungsfläche unterschieden. Für die Belange der Gefahrenbeurteilung werden die Sturzprozesse meist anhand der Bewegungsarten klassifiziert. Steine und/oder Felspakete können sich im freien Fall, springend, rollend oder teilweise gleitend hangabwärts bewegen, wobei die unterschiedlichen Bewegungsarten eng miteinander verbunden sind und sich meist ab-

wechseln. Der gesamte Sturzprozess erfolgt immer schnell – Sekunden oder wenige Minuten – und mit hoher Geschwindigkeit (Zangerl et al. 2008).

Steinschlag, Fels- und Bergstürze können prinzipiell in allen steilhang- bzw. wandbildenden Festgesteinen auftreten. Ausschlaggebend für die Disposition von Stürzen sind vor allem geologische, topographische und klimatische Faktoren, wobei die geologische Situation meist den wichtigsten vorbereitenden Faktor darstellt.

Stürze können entweder direkt aus dem anstehenden Gestein, aus in situ verwittertem Lockermaterial oder aber aus bereits einmal in Bewegung geraten und in steilen Gebieten wieder abgelagerten Steinen und Blöcken erfolgen. Herkunftsgebiete für Sturzprozesse können demnach nicht nur Fest-, sondern auch sehr steile Lockergesteinsbereiche sein (Wichmann 2006). Außerdem besteht kein Zusammenhang zwischen der Gesteinsart und Häufigkeit des Auftretens von Sturzereignissen. Es gibt lediglich einen Zusammenhang zwischen der Verwitterungsanfälligkeit des Gesteines und dem Volumen der Sturzmassen. So kommt es etwa bei Schiefen und weichen Gesteinen eher zu kleinen Stürzen, wohingegen z. B. bei Graniten in der Regel größere Massen zum Absturz kommen (Whalley 1984). Neben der Lithologie sind auch noch Klüftigkeit, Schichtung und Schieferung des Gesteins sowie dessen tektonische Beanspruchung mitverantwortlich für die Entstehung von Sturzprozessen.

Die wichtigsten topographischen Faktoren, die zur Sturzdisposition beitragen, sind die Hangneigung, die Geländeform, die Oberflächenrauigkeit des Hanges sowie die Höhenlage und die Exposition. Letztere bestimmt beispielsweise das Feuchtigkeits- und Wärmeangebot und hat damit Einfluss auf die Verwitterungsintensität. Der Einfluss der topographischen Faktoren ist aber allgemein sehr schwer eindeutig zu bestimmen, denn topographische Faktoren sind oft auch eng mit anderen Faktoren verknüpft. Ab welcher Hangneigung ein Hang als potentiell instabil angesehen werden kann, hängt z. B. in hohem Maße von dessen lithologischen und geologischen Eigenschaften ab.

Die Rolle der Vegetation als stabilisierender bzw. vorbereitender Faktor bei der Disposition von Steinschlag und Felssturz ist nicht immer eindeutig. Sie kann Sturzprozesse sowohl verhindern als auch mitverursachen. Einerseits erhöht das Wurzelsystem den Zusammenhalt der Hangfläche, andererseits führt das Wurzelwachstum aber zu einer Ausweitung von Klüften und begünstigt die chemische Verwitterung. Die Wirkung der Vegetation betrifft aber vor allem oberflächennahe Gesteinsbereiche und hat für die Ablösung größerer Gesteinspakete keine bis marginale Bedeutung. Viel größer ist der Einfluss der Vegetation auf die Vorgänge in der Sturzbahn und im Ablagerungsgebiet (Meißl 1998).

Die zuvor beschriebenen Faktoren bestimmen die Disposition, also die Bereitschaft einer Fläche zur Bildung von Sturzprozessen. Um einen Stein oder ein Felspaket in Bewegung zu bringen, braucht es aber zusätzlich einen Auslöser bzw. ein ganzes Bündel an prozessauslösenden Faktoren. Die wichtigsten Auslöser von Steinschlägen und kleinen Felsstürzen sind Übersteilung des Hanges infolge von Erosion am Hangfuß, Poren- und Kluftwasser, Frost-Tau-Wechsel, Wind, Erschütterungen und Erdbeben sowie längere Niederschlagsperioden oder Starkniederschläge. In jüngerer Zeit haben aber auch sekundäre Auslöser wie die Permafrost-Degradation und der Gletscherrückgang (Kap. F- 2) als Ursachen für Sturzprozesse an Bedeutung gewonnen.

Die Zusammensetzung und die Anzahl der Faktoren, die ein Steinschlag- oder Felssturzereignis auslösen können, sind vielfältig. Auch der Einfluss jedes einzelnen Faktors ist je nach Größe des Ereignisses unterschiedlich und oft schwer zu quantifizieren. Für die Erstellung des Dispositionsmodells müssen daher immer vereinfachte Annahmen getroffen werden. Die am häufigsten zur Abgrenzung von Herkunftsgebieten verwendeten Parameter sind Felsgebiete aus topographischen oder geomorphologischen Karten, Grenzwerte der Hangneigung und die Geologie.

### F-5.1.2 Stand der Forschung – Sturzprozesse

Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden mehrere unterschiedliche GIS-basierte Methoden zur Abschätzung von potentiellen Anrissflächen für Felsstürze auf regionaler Ebene entwickelt. Einen beispielhaften Überblick hierzu gibt Tab. F- 1.

**Tab. F- 1:** Methoden zur Erstellung von Dispositionsmodellen für regionale Modellierungen (verändert nach Meißl 1998 und Wichmann 2006).

Autorin/Autor	Dispositionsmodell
Grunder & Kienholz (1986)	Fels und Gratsteilrelief $\geq 30^\circ$
Toppe (1987)	Hangneigung $\geq 30^\circ$
Van Dijke & Van Westen (1990)	Hangneigung $\geq 60^\circ$ bzw. Flächen aus geomorph. Karten
Mani & Kläy (1992)	Felsbänder aus Übersichtsplan 1:5.000
Krummenacher (1995)	Felsflächen aus der Landeskarte 1:25.000
Meißl (1998)	Grenzneigungswerte bzw. Felsflächen aus Karten (DHM 10m)
Dorren & Seijmonsbergen (2003)	Hangneigung $\geq 40^\circ$ und Festgestein aus der geologischen Karte (DHM 25m)
Marquinez et al. (2003)	Hangneigung, Lithologie, Seehöhe, Rauigkeit, Sonneneinstrahlung (DHM 25m)
Ruff (2005)	Hangneigung $\geq 45^\circ$ und Lithologie (DHM 25m)
Wichmann (2006)	Hangneigung $\geq 40^\circ$ (DHM 5m)
Loye et al. (2009)	Hangneigungsverteilung und homogene morphometrische Flächen aus geologischen und topographischen Karten (DHM 1m)

Einfache Dispositionsmodelle bestimmen potentiell instabile Felshänge ausschließlich über einen Grenzwert der Hangneigung (Toppe 1978, Grunder und Kienholz 1986, Wichmann 2006) oder mit Hilfe von Karteninformation (Mani und Kläy 1992). In ähnlichen Ansätzen wird ein definierter Hangneigungswinkel mit zusätzlicher Information aus topographischen und/oder geomorphologischen Karten kombiniert (Krummenacher 1995, Meißl 1998, von Dijke und van Westen 1990, Dorren und Seijmonsbergen 2003, Ruff 2005). Anspruchsvollere Dispositionsmodelle verknüpfen beispielsweise Hanggeometrien, abgeleitet aus DHM, mit Daten über Lithologie, Exposition, Hangwölbung und Landbedeckung (Marquinez et al. 2003) oder verwenden Informationen zur Hangneigungsverteilung aus hochauflösenden DHM in Kombination mit topographischen und geomorphologischen Karten zur Bestimmung von Anrissstellen (Loye et al. 2009).

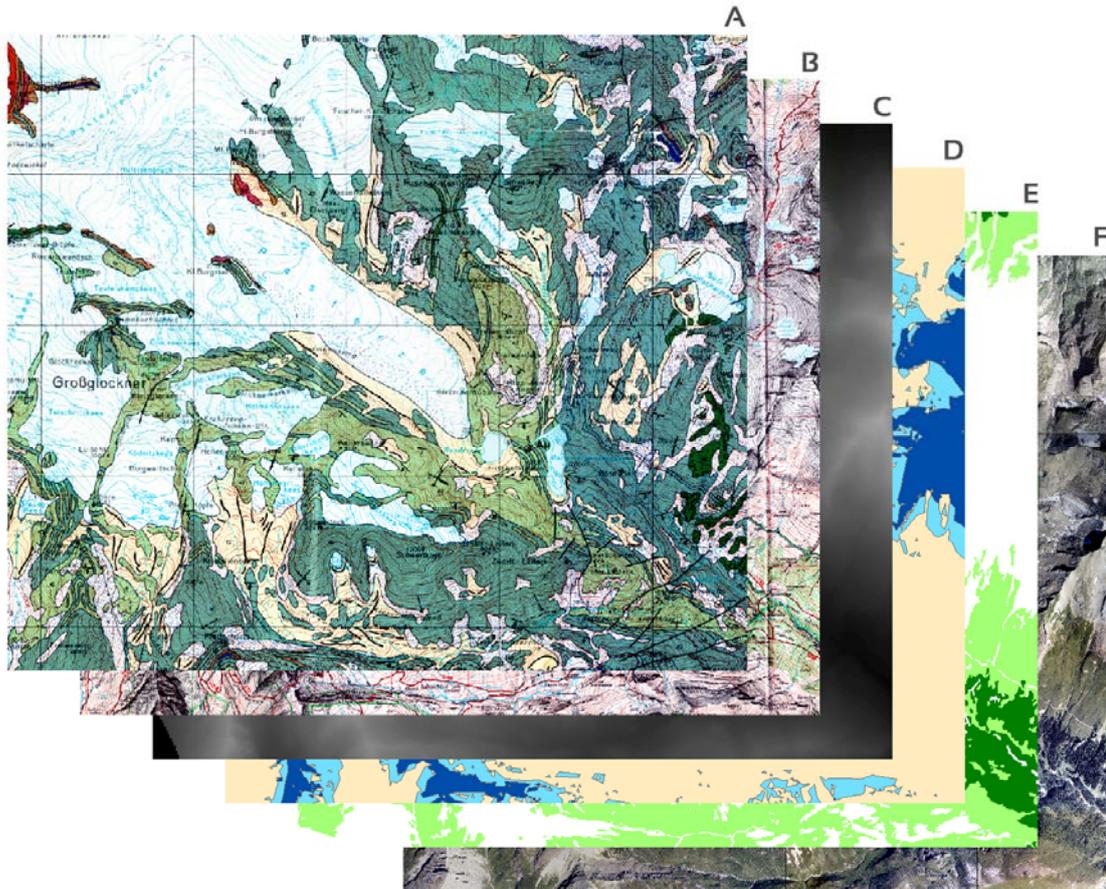
Automatisierte (GIS-basierte) Modelle auf regionaler Ebene ermöglichen es sehr schnell einen Überblick über potentielle Dispositionsgebiete zu erhalten. Man muss jedoch berücksichtigen, dass es durch die relativ grobe räumliche Auflösung der Eingangsdaten (5-25 m) und deren Auswahl lokal zu einer Über- oder Unterschätzung von Dispositionsgebieten kommen kann. Nicht alle steilen Hänge sind gleich sturzgefährdet und nicht alle flacheren Hangbereiche sind von Sturzprozessen ausgeschlossen.

### F-5.1.3 Erstellung des Dispositionsmodelles – Sturzprozesse

#### F-5.1.3.1 Eingangsdaten

Um die Übertragbarkeit des Modells auf andere Untersuchungsgebiete zu gewährleisten, benötigt das in diesem Projekt entwickelte Modell nur relativ wenige Eingangsdatensätze, die aber flächendeckend für das gesamte Untersuchungsgebiet vorhanden

sein müssen. Für die Erstellung des Dispositionsmodells wurden die in Abb. F- 7 gezeigten und im Folgenden näher beschriebenen Daten verwendet.



**Abb. F- 7:** Eingangsdaten für die Dispositionsmodellierung: A (Geologische Karte), B (Alpenvereinskarte), C (Digitales Geländemodell), D (Permafrostmodell), E (Vegetationsklassifikation), F (Orthophotos).

#### **Geologische Karte der Republik Österreich (Blatt 153, Grossglockner, 1:50.000, 1994)**

Die geologische Karte wurde im Vektorformat digitalisiert und entsprechend ihrer Legende attribuiert. Für die weiteren Arbeiten war es aber nicht sinnvoll alle in der Karte ausgewiesenen geologischen Klassen für sich zu betrachten. Daher wurden die geologischen Formationen – auf Grund von Geländebeobachtungen – in vier lithologische Klassen (stabiles Festgestein, mäßig stabiles Festgestein, Lockergestein und Sonstiges) zusammengefasst. Da die einzige verfügbare geologische Karte aus dem Jahr 1994 (Topographie Stand 1985) stammt, musste der Gletscherstand aktualisiert werden. Hierfür wurde die Information aus der geologischen Karte mit dem Gletscherstand aus der Alpenvereinskarte verschnitten. Alle Bereiche, die zwischen 1986 und 2002 eisfrei wurden, wurden durch visuelle Interpretation von Orthophotos aus dem Jahr 1998 (Unterscheidung Locker- oder Festgestein) bzw. entsprechend dem anstehenden Gestein in der geologischen Karte einer der vier lithologischen Klassen zugewiesen. Außerdem waren lokal inhaltliche Anpassungen der geologischen Karte notwendig, denn in sehr steilen, mit quartärem Lockermaterial bedeckten Hängen kam es im Laufe der letzten Jahrzehnte zu einem Abrutschen des Lockermaterials und somit zur Freilegung des anstehenden Felsen.

### **Alpenvereinskarte (Blatt 40, Glocknergruppe, 1:25.000, 2006)**

Mit Hilfe der Alpenvereinskarte wurde der aktuelle Gletscherstand (2002) ermittelt. Alle im Untersuchungsgebiet vorhandenen Gletscherflächen wurden im GIS digitalisiert und in einen Rasterdatensatz konvertiert.

### **Digitales Geländemodell des BEV mit 25 Meter Maschenweite und Ableitungen (Hangneigung, Exposition)**

Das Digitale Geländemodell (DGM) ist eines der wichtigsten Instrumente zur Darstellung und Modellierung von Massenbewegungsprozessen (Kap. F- 4). Prinzipiell ist es wünschenswert, Digitale Geländemodelle mit einer geringen Maschenweite zu verwenden, da das Relief so detailgenau wie möglich nachgebildet werden soll. Mit einem 10 m-DGM können reale Sturzbereiche bereits großteils realistisch nachgebildet werden. Eine höhere Auflösung verbessert das Ergebnis nur geringfügig (Wichmann 2006). Da die Maschenweiten bzw. Genauigkeiten des DGM mit dem Aufnahmemaßstab der Abbruchgebiete harmonisieren sollte und die geologische Karte nur im Maßstab 1:50.000 zur Verfügung stand, hätte ein höher als 25 m aufgelöstes DGM die Modellergebnisse kaum verändert. Zudem sind 25 m-Geländemodelle im Gegensatz zu 10 m-Modellen überall in Österreich flächendeckend und kostengünstig verfügbar.

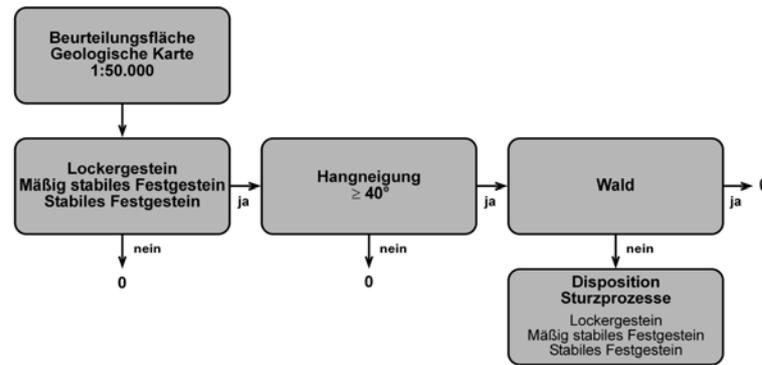
### **Digitale Farborthophotos, 1998**

Die Farborthophotos aus dem Jahr 1998 lagen als Einzelblätter mit einer geometrischen Auflösung von 0,25 m digital vor und wurden mit der Software Erdas Imagine zu einem Orthophotomosaik zusammengefügt. Die Orthophotos dienen einerseits zur visuellen Überprüfung und Anpassung anderer Eingangsdaten (z. B. geologische Karte, Gletscherstand) und andererseits zur Ermittlung der Vegetationsbedeckung im Untersuchungsgebiet. Letzteres erfolgte durch eine automatische Klassifikation der mosaikierten und auf 5 m resampten Orthophotos in vier Klassen: Wald, flächendeckende Vegetation, lückenhafte Vegetation und nicht vegetationsbedeckt.

#### *F-5.1.3.2      Ausweisung der Herkunftsgebiete*

Da das verwendete Prozessmodell ausschließlich mit Rasterdaten arbeitet und das DGM über eine Maschenweite von 25 m verfügt, wurde die im Vektorformat vorliegende, bearbeitete geologische Karte in einen Rasterdatensatz mit einer Auflösung von 25 m konvertiert und das Ergebnis der Vegetationsklassifikation ebenfalls auf eine Maschenweite von 25 m resampt. Zudem kommt das Prozessmodell ohne Projektionsinformation aus. Um Lageverschiebungen der Pixel auszuschließen und daraus resultierende Berechnungsfehler zu vermeiden, war es notwendig alle Eingangsdaten auf dieselbe Zeilen- und Spaltenanzahl zuzuschneiden.

Zur Ausscheidung potentieller Anrissgebiete wurde aus dem DGM die Neigung der Fallrichtung abgeleitet und ein einfacher Grenzwert von 40° angesetzt. In weiterer Folge wurde das DGM mit der geologischen Karte und mit der Vegetationsklassifikation (Klasse Wald) verschnitten (Abb. F- 8). Beim gewählten Grenzneigungswinkel von 40° kommen im Untersuchungsgebiet sowohl sehr steile Lockergesteinsbereiche als auch mäßig stabiles und stabiles Festgestein vor. Diese Flächen müssen bei der späteren Abschätzung der mobilisierbaren Massen (siehe Kapitel F-6.1) unterschiedlich gehandhabt werden. Um Zufälligkeiten bei der Modellierung auszuschließen, wurden in der Disposition nur potenzielle Anbruchstellen, die mindestens die Größe von zwei Pixeln erreichen, berücksichtigt. Alle Flächen kleiner als zwei Pixel wurden mit Hilfe eines Filters eliminiert.



**Abb. F- 8:** Flussdiagramm zur Bestimmung der Sturzdisposition an der Auslösstelle.

## F-5.2 Disposition zu sonstigen denudativen Prozessen

### F-5.2.1 Definition, Disposition und Auslösung von sonstigen denudativen Prozessen

Unter dem Begriff sonstige denudative Prozesse fallen im gegenständlichen Projekt Prozesse wie Murgang oder flächenhafte Abspülung (Kap. F- 3). Das durch diese Prozesse bewegte Material stammt großteils aus mächtigen Schutt- und Lockermaterialdecken (z. B. Moränen, Periglazialschutt, rezenter Schutt aus Frostverwitterung), die entweder vegetationslos oder nur mit einer spärlichen Pflanzendecke bedeckt sind.

Bei Muren handelt es sich um ein schnell fließendes Gemisch aus feinem bis grobblockigem Lockermaterial, Luft und einem variablen Anteil an Wasser, das sich in Form eines schlammigen Breies hangabwärts bewegt (Corominas et al. 1996) und meist en bloc und relativ ruckartig zum Stillstand kommt (Wichmann 2006). Die Fließeigenschaften dieses Gemisches aus Feststoffen und Wasser unterscheiden sich aber sowohl von jenen reinen Wassers als auch von jenen trockenen Schuttmaterialien (Rickenmann 1991). Initiiert werden Muren häufig in Dellen, Rinnen und Tälchen von Schutthängen. Durch die Vereinigung zahlreicher kleinerer Tiefenlinien kommt es schließlich zum Murgang, der Hindernisse wie Bäume, Häuser oder Infrastruktureinrichtungen wegreißen kann (Leser 2009).

Doch nicht jede destabilisierte, sich hangabwärts bewegende Masse geht in einen Murgang über, sondern es kann auch zu flächenhaften Abschwemmungen, Schuttrutschungen o. ä. kommen. Diese Prozesse sind überall dort möglich, wo ausreichend Lockermaterial, ein erhöhter Wassergehalt im Substrat, deutlich geneigte Hänge und keine bis geringe Vegetationsbedeckung vorhanden sind. Flächenhafte Abschwemmungen und Schuttrutschungen sind vorwiegend flachgründige Prozesse, die auf Hangneigungen von 20°-45° beschränkt sind und ein deutlich geringeres Längen-/Breitenverhältnis als Murgänge aufweisen.

Ausgelöst werden die sonstigen denudativen Prozesse im Hochgebirge durch lang andauernde, ergiebige Niederschläge oder Starkregenereignisse sowie durch eine schnelle Schneeschmelze und Permafrost-Degradation. Wie bei den Sturz- sind auch bei den sonstigen denudativen Prozessen die zur Prozessauslösung führenden physikalischen Mechanismen aufgrund der hohen räumlichen Variabilität der maßgebenden Parameter sehr schwer in ein Modell zur Abschätzung der Grunddisposition zu integrieren und daher und nur mit vereinfachten Annahmen zu modellieren.

### **F-5.2.2 Stand der Forschung – Sonstige denudative Prozesse**

Auf Grund der Komplexität der Prozesse wird bei vielen Dispositionsmodellen versucht, die für verschiedene Parameter benötigten Indikatoren aus einfacher zu gewinnenden Daten abzuleiten. Vor allem für die Dispositionsmodellierung von Muren gibt es in der Literatur unterschiedliche Ansätze. So ermittelt etwa Rieger (1999) die Disposition durch die unterschiedliche Gewichtung von Parametern und Klassen mit Hilfe einer bivariaten Methode. Mark und Ellen (1995) berechnen unter Zuhilfenahme einer logischen Regression Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Murgängen bzw. Jäger (1997) für Rutschungen. Zimmermann et al. (1997) bestimmen potentielle Anrisspunkte von Muren über regelbasierte Verfahren, wobei vier unterschiedliche Anrisstypen unterschieden werden. Ruff (2005) nimmt zur Dispositionsmodellierung von Rutschungen eine Indexmethode, die Parameter wie Hangneigung, Exposition, Lithologie, Vegetation u. a. berücksichtigt. Kellerer-Pirklbauer (2001) verwendet einen ähnlichen Ansatz zur Berechnung der Disposition von Murgängen. Hier werden Eingangsparameter wie Art und Verfügbarkeit der Geschiebequelle, Hangneigung, Lithologie, Hangstabilität, räumliche Lage der Schieferungsflächen, relativer Oberflächenabfluss usw. unterschiedlich gewichtet und miteinander verschnitten. Im Gegensatz dazu verwendet Wichmann (2006) die certainty factor (CF)-Methode, die über die Berechnung bedingter Wahrscheinlichkeiten potentielle Dispositionsgebiete ermittelt.

### **F-5.2.3 Erstellung des Dispositionsmodelles – Sonstige denudative Prozesse**

#### **F-5.2.3.1 Eingangsdaten**

Neben den bereits für die Sturzdispositionsmodellierung verwendeten Eingangsparametern (geologische Karte, Alpenvereinskarte, Digitales Geländemodell und Vegetationsklassifikation) wurde zur Modellierung der Disposition der sonstigen denudativen Prozesse zusätzlich die Information über die Permafrostverbreitung herangezogen.

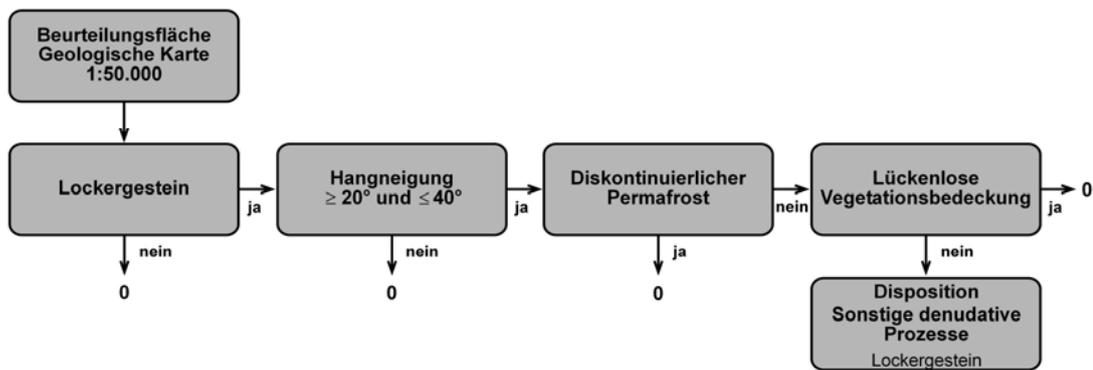
#### **Permafrostmodellierung (ALPCHANGE)**

Die Permafrostmodellierung wurde im Rahmen des FWF-Projektes ALPCHANGE (Climate Change and Impacts in Southern Austrian Alpine Regions), ein Kooperationsprojekt der Karl-Franzens-Universität Graz und der Technischen Universität Graz, erstellt und für das gegenständliche Projekt zur Verfügung gestellt. Für die Modellierung wurde eine Adaption des empirischen Programms PERMAKART (Keller 1992) verwendet, das eine automatische Unterscheidung von Flächen mit möglichem diskontinuierlichem Permafrost und permafrostfreien Flächen basierend auf Seehöhe, Exposition und topographischer Position ermöglicht. Die Permafrostuntergrenze wurde mit Hilfe der empirischen Daten von Lieb (1998) bestimmt. Dieser Datensatz lag ebenfalls im Vektorformat vor und musste entsprechend der Auflösung des DGM gerastert werden.

#### **F-5.2.3.2 Ausweisung der Herkunftsgebiete**

Ein bedeutender Faktor für die Entstehung von sonstigen denudativen Prozessen ist die Zusammensetzung und Verfügbarkeit von Lockermaterial. Daher wurden in der geologischen Karte nur jene Bereiche berücksichtigt, die zuvor der lithologischen Klasse Lockergestein zugewiesen wurden. Nach Corominas et al. (1996) und Ruff (2005) liegen Dispositionsgebiete von Muren und Rutschungen üblicherweise in Bereichen zwischen 20° und 40°. Folglich wurden im nächsten Schritt alle Lockergesteinsbereiche, die eine Hangneigung von weniger als 20° oder mehr als 40° aufwiesen, als potentielle Startgebiete eliminiert. In Bereichen mit diskontinuierlichem Permafrost ist das dort vorhandene Lockermaterial größtenteils gefroren und somit im Dispositionsmodell als Startpunkt für denudative Prozesse ausgeschlossen. Eine intakte Vegetationsdecke schützt vor Denu-

dition, doch kann selbst dichter Bewuchs die Entstehung von Muren nur teilweise verhindern. Die höchste Disposition besteht aber auf vegetationsfreien Flächen. Alle Flächen, die in der Vegetationsklassifikation keine lückenlose Vegetationsbedeckung aufwiesen, wurden somit als potentielle Dispositionsgebiete berücksichtigt. Eine schematische Darstellung des Ablaufes der Dispositionsmodellierung der sonstigen denudativen Prozesse bietet Abb. F- 9.



**Abb. F- 9:** Flussdiagramm zur Bestimmung der Disposition der sonstigen denudativen Prozesse an der Auslösungsstelle.

Zur Disposition von sonstigen denudativen Prozessen tragen natürlich noch viele weitere Faktoren wie etwa Exposition, Einzugsgebietsgröße, Entfernung zu den Hauptgerinnen oder Abstand zu Störungen bei. Um die Übertragbarkeit des Modells zu gewährleisten, wurden Faktoren, die nicht eindeutig einer Erhöhung oder Verringerung der Disposition zugeordnet werden konnten, nicht zur Modellbildung herangezogen.

### F-5.3 Zukünftiges Szenario 2030

#### F-5.3.1 Massenprozesse und Klimawandel

Gravitative Massenbewegungen treten prinzipiell in jeder Klimaphase auf, denn die Auslösung von Steinschlag, Bergsturz, Muren u. a. ist nicht nur klimaabhängig (siehe Kapitel F-5.1.1 und F-5.2.1). Die gegenwärtigen und zukünftig zu erwartenden Klimaänderungen (IPCC 2007<sup>b</sup>) führen aber möglicherweise zu deutlichen Änderungen von Frequenz und Magnitude von Massenbewegungen in Hochgebirgsregionen (Evans und Clague 1994), wobei der Einfluss klimabedingter Auslöser bei kleineren Ereignissen deutlich stärker ist als bei großen. Die Reaktion der Hänge auf den Klimawandel ist aber nicht überall in den Alpen gleich, denn die Materialverfügbarkeit und die Niederschlags- und Temperaturentwicklung sind lokal sehr unterschiedlich (Jomelli et al. 2007). Die im Laufe der letzten beiden Jahrzehnte generierten Regionalen Klimamodelle (RCM) sind sich aber einig, dass es zu einer allgemeinen Zunahme der Temperatur sowie zu Veränderungen des Jahresgangs des Niederschlages und zu höheren jährlichen Schwankungen durch die Zunahme von Starkniederschlägen im Alpenraum kommt (Gobiet und Truhetz 2008, Christensen und Christensen 2004, Tebaldi et al. 2006).

Mehrere Studien zeigen, dass es in den Alpen einen Zusammenhang zwischen der Frequenz von Murgängen und dem Klimawandel gibt (Zimmermann und Haeberli 1992, Gärtner 2003, Stoffel und Beniston 2006), denn sommerliche Murgänge werden häufig von Starkregenereignissen ausgelöst. Anders als bei Murgängen werden sommerliche Sturzprozesse kaum von Starkregenereignissen beeinflusst, da sich die Klüfte bei wärmeren Temperaturen im Sommer wieder schließen. Niederschläge führen im Frühjahr,

aber vor allem im Spätsommer und Herbst zu einer Häufung von Sturzaktivitäten. Im Frühjahr kommt es eher zu kleineren bis mittleren Stürzen, die durch Frost-Tau-Wechsel, Schneeschmelze und erste Frühjahrsniederschläge ausgelöst werden. Im Herbst können starke und langanhaltende Niederschläge zu einem erhöhten Bergwasserdruck führen, der sich destabilisierend auf Felswände auswirkt und größere Sturzprozesse in Gang setzen kann (Gruner 2008).

In den Hochlagen sind vor allem indirekt von Klimawandel abhängige Veränderungen wie die Permafrost-Degradation für das Auftreten von Sturzprozessen von Bedeutung. Stürze, welche auf Permafrost-Degradation zurückzuführen sind, haben vor allem in Jahren mit außerordentlich heißen Sommern (z. B. 2003) zugenommen (Nötzli et al. 2004), denn die Stabilität von eisgefüllten Klüften nimmt mit steigenden Eis- und Fels-temperaturen ab. Da in Zukunft deutlich mehr extreme Hitzesommer zu erwarten sind, wird es sehr wahrscheinlich auch zu einem höheren Auftreten von Sturzprozessen kommen, denn durch die schnellen, oberflächennahen thermischen Reaktionen von Felswänden kommt es zu größeren Auftautiefen des Permafrosts und somit zu einer erhöhten Hanginstabilität (Harris et al. 2009).

Neben der Vergrößerung der Auftautiefe des Permafrosts bzw. dessen Degradation ist auch der Gletscherrückgang mitverantwortlich für das häufiger werdende Auftreten von gravitativen Massenbewegungen. Durch den Gletscherrückgang kommt es zu erheblichen morphologischen Veränderungen des Reliefs wie Hangversteilung und glaziale Entlastung. Dies führt zu veränderten Spannungsverhältnissen und zum Wachstum neuer sowie der Vernetzung bestehender Klüfte. Diese Faktoren führen zu einer wachsenden Hanginstabilität (Prager et al. 2008).

### **F-5.3.2 Erstellung des Dispositionsmodells**

Die Erstellung der Dispositionsmodelle 2030, jeweils eines für Sturzprozesse und eines für sonstige denudative Prozesse, erfolgte nach dem gleichen Schema wie jene für die aktuelle Disposition. Lediglich die Eingangsparameter mussten an die zukünftigen Klimabedingungen angepasst, d.h. der zu erwartende Gletscherrückgang und der Anstieg der Permafrostuntergrenze modelliert werden.

Die Modellierung des Szenario 2030 basiert auf Temperaturwerten aus einem regionalisierten Klimamodell für den Alpenraum von Gobiet und Truhetz (2008). Dieses Modell geht von einem Temperaturanstieg in den Sommermonaten zwischen den 1980er und den 2040er Jahren von 2,3 K aus. Für die Modellierung des Gletscherrückganges wurde daher davon ausgegangen, dass die Gletscher im Untersuchungsgebiet in den nächsten 20 Jahren in etwa gleich schnell zurückschmelzen wie im vergangenen Jahrzehnt. Als Basis für die Berechnung dienten die Ergebnisse der jährlich vom Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz durchgeführten Gletschermessungen an der Pasterze sowie am Wasserfallwinkel- und Freiwandkees (siehe Tab. F- 2 und Tab. F- 3). Die durchschnittlichen jährlichen Längenänderungs- und Einsinkraten (nur für die Pasterze vorhanden) dieser drei Gletscher im Zeitraum 1999-2009 wurden für das Szenario 2030 linear fortgeschrieben, wobei der Gletscherstand aus der Alpenvereinkarte 2006 (Gletscherstand 2002) als Ausgangswert fungierte. Der Gletscherrückgang aller anderen Gletscher im Untersuchungsgebiet wurde anhand der Differenz der Gletscherstände aus der geologischen Karte (Gletscherstand 1985) und der Alpenvereinkarte (Gletscherstand 2002) und unter Einbezug der Exposition ermittelt. Alle Bereiche, die durch den angenommenen Gletscherrückgang eisfrei werden, wurden zuletzt in der geologischen Karte entsprechend der an die Gletscher anschließenden lithologischen Einheiten klassifiziert.

Viele Anrissstellen von Bergstürzen liegen nahe der Untergrenze der Permafrostverteilung (Nötzli et al. 2004) und auch für die Entstehung anderer denudativer Prozesse ist die Permafrostverteilung von Bedeutung. Von 1850 bis heute stieg die Untergrenze des

Permafrosts in den Schweizer Alpen durchschnittlich um 1-2 m pro Jahr an (Frauenfelder et al. 2001). Unter Berücksichtigung des verwendeten regionalen Klimamodells für das Szenario 2030 wurde im Gebiet Großglockner-Pasterze ein Anstieg der Permafrost-Untergrenze von 2 m pro Jahr angenommen.

**Tab. F- 2:** Durchschnittlicher und angenommener zukünftiger Längerrückgang der Pasterze, des Wasserfallwinkel- und des Freiwandkeeses.

	<b>Ø jährlicher Längerrückgang 1999-2009</b>	<b>Längerrückgang 2002-2030</b>
<b>Pasterze (eisfrei)</b>	- 36,3m	- 1016,4m
<b>Pasterze (schuttbedeckt)</b>	- 7,0m	- 196,0m
<b>Pasterze gesamt</b>	- 21,7m	- 607,6m
<b>Wasserfallwinkelkees</b>	- 7,1m	- 198,8m
<b>Freiwandkees</b>	- 5,9 m	- 165,2m

**Tab. F- 3:** Durchschnittliche und angenommene zukünftige Einsinkraten sowie Breitenrückgang der Pasterze.

	<b>Ø jährliche Einsinkraten 1999-2009</b>	<b>Einsinkrate 2002-2030</b>	<b>Breitenrückgang bei einer Ø Hangneigung von 35°</b>
<b>Seelandlinie</b>	- 4,5m	- 126,0m	- 179,9m
<b>Burgstalllinie</b>	- 3,2m	- 89,6m	- 128,0m

Neben der Modellierung des Gletscherrückganges und des Anstiegs der Permafrostuntergrenze musste auch das DGM an die zukünftigen Bedingungen angepasst werden, wobei Veränderungen des Reliefs durch mögliche Massenbewegungen im Zeitraum 2010-2030 unberücksichtigt blieben. Im DGM angepasst wurden lediglich jene Bereiche, die durch den angenommenen Gletscherrückgang eisfrei werden.

Die Veränderungen von Gletschern und Permafrost werden sich im Einzelfall nicht genau so entwickeln, wie es im Szenario 2030 angenommen wurde. Gletscher reagieren je nach Typ, Form und Lage unterschiedlich auf veränderte Klimabedingungen. Auch die Permafrostverteilung und deren Anstieg basiert auf allgemeinen Annahmen. Entscheidend für die Dispositionsmodellierung 2030 ist lediglich die Darstellung eines möglichst realistischen Gesamtbildes der zukünftigen Situation im Untersuchungsgebiet, um eine Abschätzung des Gefährdungspotentials zu ermöglichen.

## F-6 Prozessmodellierung

### F-6.1 Abschätzung der Mächtigkeit mobilisierbarer Massen

Ausgehend von der Überlegung, dass die Auftauschicht über dem Permafrostkörper maßgebend für die Mächtigkeiten mobilisierbarer Massen ist, wurden dementsprechende Messwerte für das untersuchte Gebiet oder dessen nähere Umgebung benötigt. Hierfür stand der Hohe Sonnblick (3106 m) zur Verfügung, wo 3 Bohrlöcher an einem südexponierten Standort Temperatur-Messwerte liefern. Die maximale Mächtigkeit der Auftauschicht betrug dort in den Sommern 2008 und 2009 im Mittel 0,8 m (ZAMG 2010). In weiterer Folge wurde eine Differenzierung der Mächtigkeit in Abhängigkeit von der Exposition durchgeführt. Nach Messungen in Felswänden (Gruber et al. 2003) beträgt der Temperaturunterschied im Untergrund zwischen N- und S-Hängen 5-8 K, wobei aufgrund der vorherrschend geringeren Hangneigungen 4,5 K als Temperaturunterschied in Anlehnung an Gruber et al. (2004, 354) für das Untersuchungsgebiet angenommen wurden. Demnach ergaben sich für 5 Expositionsklassen die folgenden Auftautiefen in 3106 m Höhe: SSE-SSW 0,8 m, SSE-ESE und SSW-WSW 0,625 m, ESE-ENE und WSW-WNW 0,45 m, ENE-NNE und WNW-NNW 0,275 m sowie NNE-NNW 0,1 m.

Die Berechnung der Mächtigkeit der Auftauschicht für verschiedene Seehöhen erfolgte unter Berücksichtigung des vertikalen Gradienten der Lufttemperatur, der mit  $-0,55$  K/100 m angenommen wurde (Gruber et al. 2004, 353). Die Umsetzung dieses Betrages zu Mächtigkeiten beruhte auf den expositionsbedingten Unterschieden: Ein Temperaturunterschied von 4,5 K zwischen N- und S-Hängen entspricht einem Mächtigkeitsunterschied von 0,7 m (siehe oben); demzufolge ergibt sich beim genannten Temperaturgradienten eine Änderung der Mächtigkeit von 8,5 cm/100m. Aufgrund der im Arbeitsprozess verwendeten geometrischen Auflösung von 25 m wurden, ausgehend von der Höhe 3106 m, für Höhenunterschiede von 25 m jeweils 2,1 cm an Mächtigkeit hinzu- bzw. abgerechnet. Diese Berechnungsweise wurde auch unterhalb der Untergrenze des diskontinuierlichen Permafrosts (im Mittel rund 2500 m) angewandt. Dem liegt die Überlegung zu Grunde, dass in vegetationsarmen Arealen unterhalb der Permafrost-Untergrenze grundsätzlich bedeutende Mengen an mobilisierbarem Material zur Verfügung stehen, da der Permafrost als stabilisierender Faktor im Untergrund völlig wegfällt. Die Berechnung wurde wie folgt umgesetzt:

$$\frac{0,7[m] \times 0,0055 [^{\circ}C m^{-1}]}{4,5 [^{\circ}C]} = 0,00085$$

$$0,00085 \times 25 [m] \approx 0,021 [m]$$

Die Umsetzung in ERDAS Imagine erfolgte in folgenden Arbeitsschritten:

1. Ausgehend von 800 mm für 3106 m Seehöhe wurden in Höhendifferenzen von jeweils 25 m 21 mm hinzu- bzw. abgerechnet.
2. Das Aspectfile wurde in 5 Expositionsklassen unterteilt.
3. Für 4 dieser 5 Klassen (Ausnahme S) wurden 175, 350, 525 sowie 700 mm als Mächtigkeiten vergeben (siehe oben) und von den Mächtigkeiten des im 1. Arbeitsschritt erhaltenen Files abgezogen.
4. Dieses (die Exposition und Höhenlage berücksichtigende und Mächtigkeiten darstellende) File bezieht sich auf das gesamte Untersuchungsgebiet: Die potentiellen Disposi-

tionsareale wurden davon (getrennt für die beiden Arten der Massenbewegungen) ausgeschnitten.

5. Die unterschiedlichen Lithologien wurden innerhalb der Sturzprozesse wie folgt berücksichtigt: Festgestein 100 %, mäßig stabiles Festgestein 75 % und labiles Festgestein/Lockermaterial 50 % der jeweils berechneten Mächtigkeit.

Dem Szenario 2030 wurden Temperaturwerte aus einer regionalisierten Klimamodellierung für den Alpenraum (Gobiet und Truhetz 2008) zu Grunde gelegt. Bei einer Maschenweite des Modells von 10 km beträgt der Temperaturanstieg in den Sommermonaten zwischen den 1980er und den 2040er Jahren 2,3 K (0,38 K pro Jahrzehnt). Bei der Einbeziehung dieses Wertes in die Abschätzung der Mächtigkeit der Auftauschicht wird wieder der Temperaturunterschied zwischen S- und N-Hängen berücksichtigt. Dieser beträgt an Felshängen 4,5 K, was einem Mächtigkeitsunterschied von 0,7 m entspricht (siehe oben): +1 K ergibt demnach eine Mächtigkeitsänderung von +0,15 m. Somit ergibt ein Temperaturanstieg von 0,76 K für 2010-2030 eine Zunahme der Mächtigkeit der Auftauschicht von 12,2 cm, die auf die Dispositionsareale des gesamten Untersuchungsgebietes aufaddiert wurden. Die Berechnung erfolgte folgendermaßen:

$$0,7 [m] \div 4,5 [^{\circ}C] = 0,15 [m^{\circ}C^{-1}]$$
$$0,76 [^{\circ}C] \times 0,015 [m^{\circ}C^{-1}] \approx 0,122 [m]$$

### F-6.2 Das Prozessmodell

So komplex, wie sich die genannten Prozesse darstellen (Kap. F- 5.1 und 5.2), so schwierig ist auch deren Modellierung. Verschiedenste Faktoren sind für eine annähernde Prozesswiedergabe zu beachten, wie z. B. die Materialzusammensetzung oder auch die Oberflächenrauigkeit. Die Herausforderung besteht nun darin, die entscheidenden Kriterien zu bestimmen. Hier stellt sich also die Frage nach der Art des zu verwendenden Modells. Dazu im Folgenden Wichmann (2006, 14 ff.): „White-box“-Ansätze versuchen, die kleinsten zu identifizierenden Systemelemente unter Berücksichtigung ihrer Wechselwirkungen zusammenzusetzen und haben den Nachteil, dass selbst die kleinsten Systemelemente für sich „black-box“-Modelle bleiben. Diese repräsentieren das System als Ganzes und teilen es in relative grobe Komponenten, die zusammen mit ihren Wechselwirkungen beschrieben werden.

Die „Black-box“-Verfahren finden als empirische Modelle deshalb oftmals Anwendung, weil sich die Prozesse nicht bis ins letzte Detail erfassen lassen. Zwar orientieren sich empirische Modelle an physikalischen Gegebenheiten, sie basieren allerdings auf Erfahrungswerten oder auch Modellversuchen. Als Vorteile prozessorientierter Modelle (white-box) sind eine höhere potentielle Genauigkeit und die Realitätsnähe der Prozesswiedergabe zu nennen. Der entscheidende Nachteil ist allerdings die Erhebung der vielen Parameter. Je mehr Parameter ein Modell als Input benötigt, desto größer werden auch die Unsicherheiten, desto komplizierter gestaltet sich die Handhabung des Modells und desto schwieriger ist die Kalibrierung (Fey 2010, 22 f.). Auch ist das Ergebnis der komplexen Ansätze nicht unbedingt besser als das der empirischen.

Es gibt demnach unterschiedliche Ansätze um Sturzprozesse und sonstige denudative Prozesse wiederzugeben. Bei der Wahl des geeigneten Modells sind neben der Zielsetzung u.a. die Verfügbarkeit von Datengrundlagen, der Zeitaufwand i. S. des Rechenganges und die Maßstabsfrage zu berücksichtigen. Im Zuge der Prozessmodellierung werden folgende Komponenten ausgewiesen: Grunddisposition (Dispositionsmodell), Prozesswege (Trajektorienmodell) und Reichweite (Reibungsmodell). Zur Modellierung der Prozesswege sind verschiedene Methoden möglich (Wichmann 2006, Gruber 2007): Als Gemeinsamkeit der Algorithmen ist zu nennen, dass die Höhenunterschiede be-

nachbarter Rasterzellen in digitalen Geländemodellen (DGM) mögliche Transportwege für Stoff- und Energieflüsse beinhalten. Beim single-neighbor-Ansatz wird Masse von einer Ausgangs- in nur eine einzige Zielrastrerzelle verfrachtet. Der single-direction multiple-neighbor-Ansatz lässt hingegen Transport in zwei Nachbarzellen zu, sofern die Zellen dieselbe Richtung aufweisen. Weiters gibt es auch Methoden, die eine divergente Aufteilung der Flüsse auf mehrere Nachfolger erlauben (multiple flow direction). Als weiterer Ansatz kann ein random walk zur Bestimmung der Prozesswege verwendet werden. Dabei geht es aber nicht wie bei den bisher genannten Verfahren darum, einen Materiestrom aufzuteilen, sondern vielmehr darum, mögliche Sprungkandidaten unter den Nachbarzellen zu finden (Gamma 2000, 52). Der größte Unterschied liegt folglich darin, dass mehrere Prozessläufe mit veränderten topographischen Verhältnissen simuliert werden können.

Im vorliegenden Fall wurden die Prozesse mit einem massenkonservierenden, multiple direction flow propagation-Algorithmus (Gruber 2007) mithilfe der Software IDL parametrisiert. Basierend auf dem DGM werden dabei mobilisierbare Massen entlang von Sturz- und Gleitbahnen modelliert, wobei die Masse einer Rasterzelle – anteilmäßig in Abhängigkeit von der Hangneigung – in alle tiefer liegenden Rasterzellen verteilt wird. Massentransport und -ablagerung werden mithilfe einfacher Parameter wiedergegeben, d. h. die physikalischen Parameter des jeweiligen Transport- und Ablagerungsprozesses bleiben im Modell unberücksichtigt, wodurch auch die Unterschiedlichkeit der Prozesse unbeachtet bleibt. Als weitere Einschränkung ist zu nennen, dass eine Prozessmodellierung an horizontalen Flächen bzw. hangaufwärts nicht möglich ist. Grund dafür ist, dass nur der Höhenunterschied (potentielle Energie) zwischen zwei Rasterzellen ausschlaggebend ist und die Bewegungsgeschwindigkeit unberücksichtigt bleibt. Als Vorteil ist erwähnenswert, dass – i. S. eines massenkonservierenden Ansatzes – hydrologisch korrekte Massenumsätze erzeugt werden können (Strasser 2008). Die Tatsache, dass beim verwendeten Ansatz jede tieferliegende Rasterzelle Masse erhalten kann, ist grundsätzlich als weiterer Vorteil anzusehen – nachteilig ist jedoch, dass dies obligatorisch der Fall ist. Bei der Ergebnisdarstellung musste dies berücksichtigt werden, weshalb ein Mindestwert an erhaltener Massenmächtigkeit (1 cm) definiert wurde.

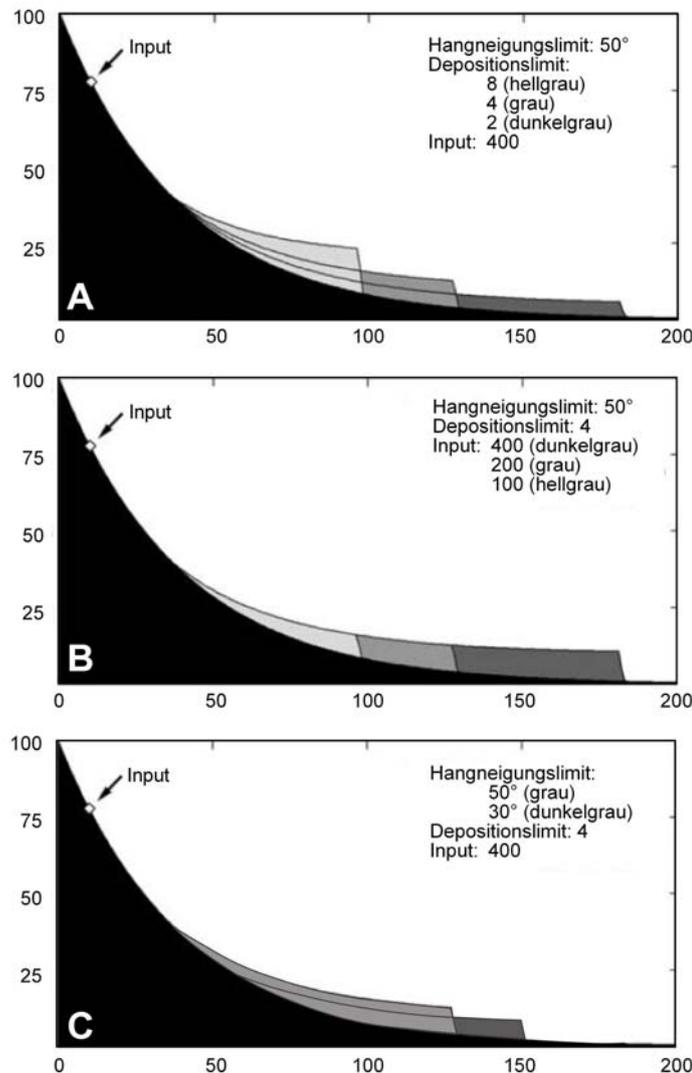
Im Konkreten werden als Eingabedaten reguläre Grids der Höhe (DGM), der Dispositionsgebiete sowie der (parametrisierten) Maximalablagerung je Rasterzelle  $D_{max}$  verwendet.  $D_{max}$  wird im Zuge des Rechenvorganges wie folgt berechnet (Gruber 2007):

$$D_{max} = \begin{cases} \left(1 - \frac{\beta}{\beta_{lim}}\right)^{\gamma_s} \times D_{lim} & \text{if } \beta \leq \beta_{lim} \\ 0 & \text{if } \beta > \beta_{lim} \end{cases}$$

Das Hangneigungslimit  $\beta_{lim}$  gibt die maximale Hangneigung an, an der es zu Ablagerung kommt. Das Depositionslimit  $D_{lim}$  ist die maximale Ablagerung an horizontalen Flächen. Die Angabe von  $\gamma_s$  (shape exponent) definiert, ob  $D_{max}$  linear oder exponentiell bei veringertem Hangneigungslimit zunimmt. In Abb. F- 10 sind die Auswirkungen veränderter Parameter dargestellt. Ein erhöhter Wert des  $D_{lim}$  (A) führt zu mächtigerer Akkumulation in hangoberen Bereichen. Bei gleichem  $D_{lim}$  und  $\beta_{lim}$ , aber größerer Massenmächtigkeit der Dispositionsgebiete (B) ergibt sich dieselbe Ablagerung in den oberen Bereichen, die Ablagerung reicht jedoch weiter hangabwärts. Ähnliche Auswirkungen wie bei (A) und (B) ergeben sich durch veränderte Werte des  $\beta_{lim}$  (C). Ein verringerter Wert ergibt dabei geringer mächtige Ablagerungen in weiter hangabwärts reichenden Bereichen, wobei  $\gamma_s$  maßgebend ist. Für die Modellierung im Rahmen des gegenständlichen Projektes (Abb. F- 11-14) wurden folgende Werte verwendet:  $D_{lim} = 2000$  mm,  $\beta_{lim} = 19^\circ$ ,

der Input kann aufgrund der Berechnungsweise bei jeder Rasterzelle variieren (Wertebereich: 0,002-2,079 m),  $\gamma_s = 2$ .

Für die Aussagekraft der Prozessmodellierung ist entscheidend, dass die genannten Prozesse getrennt voneinander bearbeitet wurden, d. h. es gab je einen voneinander unabhängigen Rechenvorgang für die Dispositionsgebiete der Sturzprozesse sowie sonstigen denudativen Prozesse.



**Abb. F- 10:** Die Ablagerung wird gesteuert durch Depositionslimit (A), Input (B) sowie Hangneigungslimit (C). Erläuterungen im Text. Nach Gruber (2007), verändert.

### F-6.3 Ergebnisse der Prozessmodellierung

Die Abbildungen Abb. F- 11-14 geben die Resultate der Prozessmodellierung in kartographischer Form wieder. In jeder dieser Karten ist eine Prozessraumzonierung i. S. der Unterscheidung von Herkunfts-, Transport- und Ablagerungsgebiet vollzogen worden. Die Darstellung erfolgt – entsprechend der Modellierung – getrennt nach dem jeweiligen Prozess sowie nach dem betreffenden Jahr (2010 bzw. Szenario 2030). Wie der Vergleich der Abb. F- 11 und Abb. F- 12 bzw. Abb. F- 13 und Abb. F- 14 zeigt, konzentrieren sich die Unterschiede der rezenten Situation zum Szenario 2030 – innerhalb einer Prozessart – auf die Pasterze bzw. ihre unmittelbare Umgebung. Der Vergleich der beiden Prozessarten lässt deutliche Unterschiede der jeweils betroffenen Areale erkennen. Während Sturzprozesse in allen topographischen Bereichen und Höhenlagen vorkom-

men, konzentrieren sich die sonstigen denudativen Prozesse – entsprechend der Lage der Dispositionsgebiete – auf die mittleren bis unteren Hanglagen.

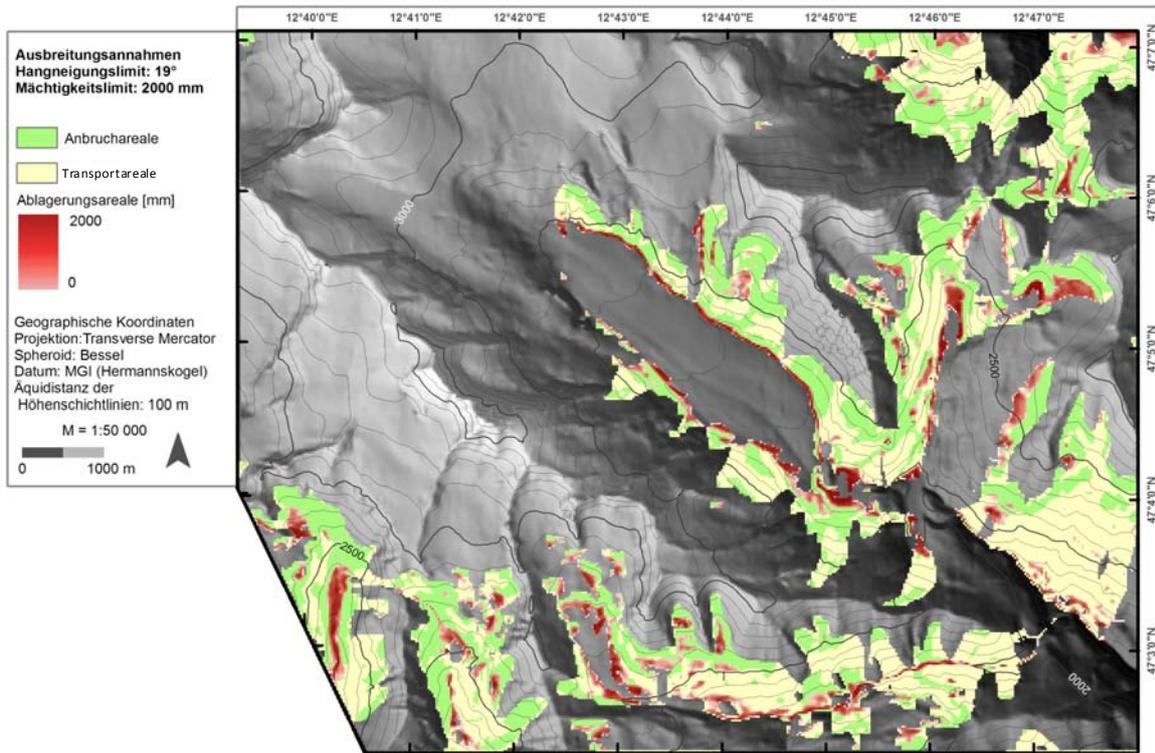


Abb. F- 11: Ausbreitungsmodellierung für sonstige denudative Prozesse 2010.

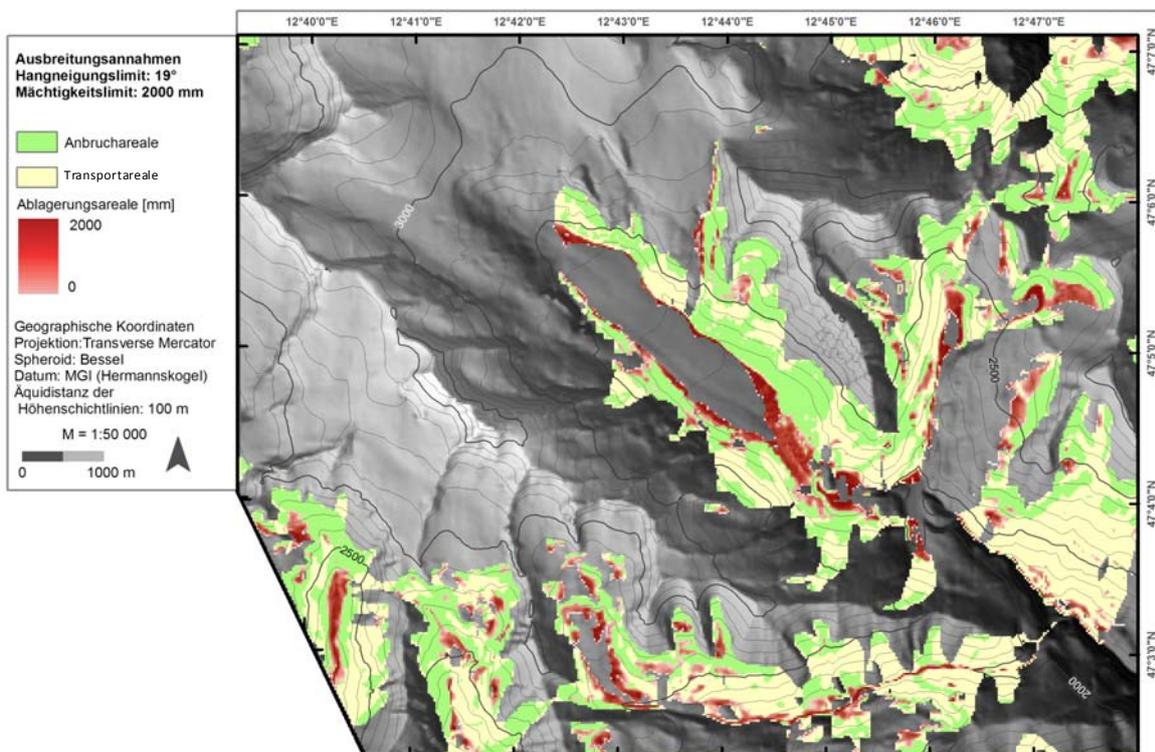


Abb. F- 12: Ausbreitungsmodellierung für sonstige denudative Prozesse im Szenario 2030.

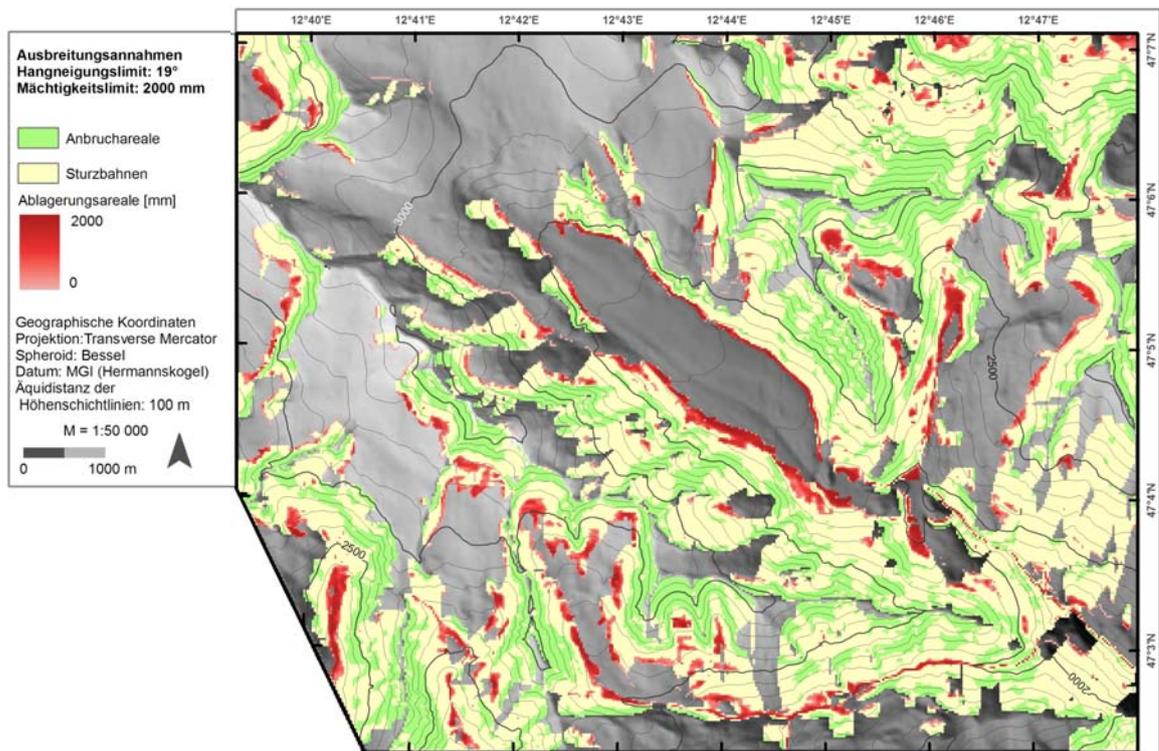


Abb. F- 13: Ausbreitungsmodellierung für Sturzprozesse 2010.

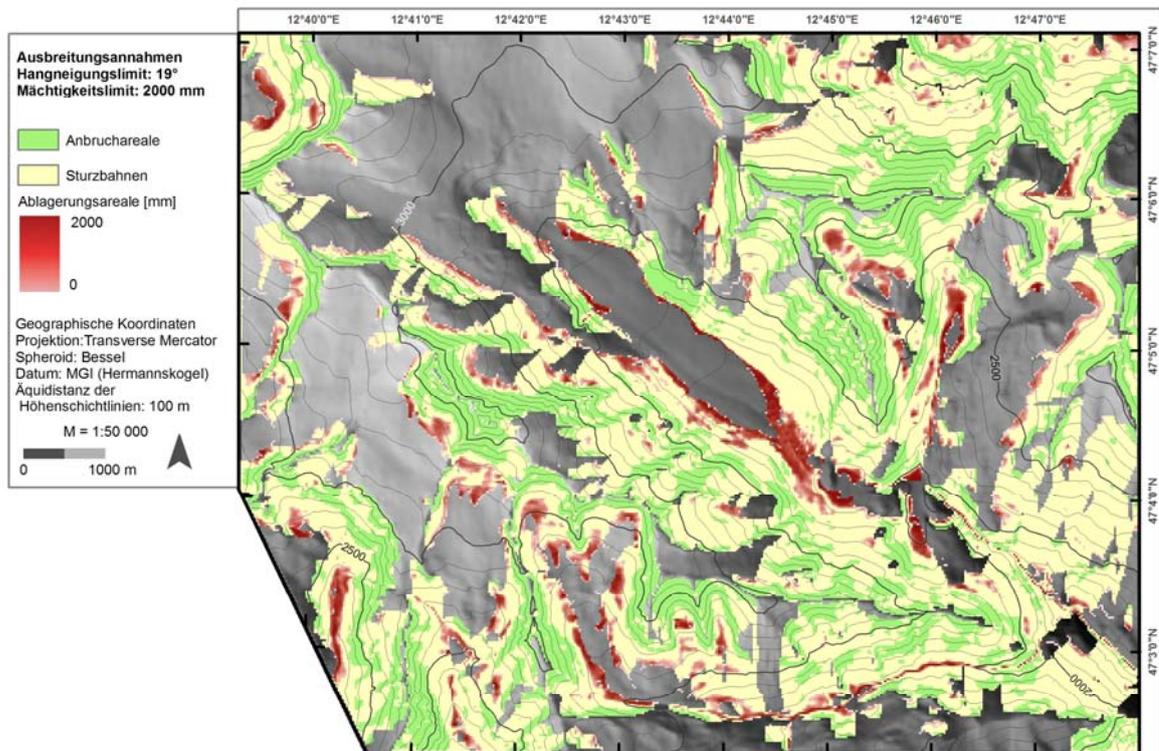


Abb. F- 14: Ausbreitungsmodellierung für Sturzprozesse im Szenario 2030.

## F-7 Gefährdungsklassen und Gefahrenhinweiskarten

In Österreich sind Konzepte zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten für sämtliche Hangbewegungen in Arbeit. Auch von Seiten der Bundesländer und Universitäten gibt es einige Vorschläge zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten, wie z. B. die „Georiskokarte Vorarlberg“ (Ruff 2005). Bundesweit gültige Vorgaben gibt es bisher allerdings noch nicht. Im Projekt AdaptAlp (Posch-Trözmüller 2010) sollen basierend auf einer Literaturstudie Vorschläge hierzu gemacht werden.

Hier kann z. B. das Schweizer Bundesamt für Umwelt (BUWAL 2001, 19) zitiert werden: „Eine Gefahrenhinweiskarte gibt eine erste Übersicht über die Gefährdungssituation. Sie enthält Angaben zur Gefahrenart, jedoch nicht zum Grad der Gefährdung, d.h. sie enthält keine Angaben zu Intensität und Eintretenswahrscheinlichkeit. Die Erstellung sollte objektunabhängig erfolgen, d.h. ohne Rücksicht auf potentiell betroffene Objekte und bereits bestehende Schutzmaßnahmen. Der Maßstab liegt zwischen 1:10.000 und 1:50.000, womit keine parzellenscharfen Abgrenzungen von Gefahrenbereichen möglich sind. Sie ... soll Interessenkonflikte zwischen Nutzung und Gefahr aufzeigen. Eine Gefahrenkarte gibt im Gegensatz dazu eine detaillierte Übersicht über die Gefährdungssituation und basiert auf einer Detailuntersuchung. Sie enthält genaue Angaben zur Gefahrenart, zur räumlichen Ausdehnung und dem Grad der Gefährdung in mehreren Stufen. Der Grad der Gefährdung enthält dabei Aussagen über Intensität und Eintretenswahrscheinlichkeit der Gefahr. Der Maßstab liegt zwischen 1:2.000 und 1:10.000.“

Demgegenüber ist Schweigl (2009, in Posch-Trözmüller 2010, 86) anderer Auffassung: „Unter Gefahrenhinweiskarten versteht man Karten, die Zonen zeigen, wo in Zukunft Massenbewegungen (eines bestimmten Typs) auftreten können. Für jede Massenbewegungszone geben sie auch den Grad der Anfälligkeit (Prädisposition) oder der Wahrscheinlichkeit für eine Massenbewegung an. Gefährdungskarten (= Suszeptibilitätskarten) treffen räumliche Vorhersagen über das Auftreten von Massenbewegungen; die Gefährdung eines Bereiches durch Massenbewegungen kann dabei als die Wahrscheinlichkeit definiert werden, mit der ein potentiell gefährliches Ereignis zeitlich („hazard“) oder räumlich („susceptibility“) eintritt.“

Wie die genannten Begriffe zu definieren sind, bleibt somit umstritten. Würden wir uns der ersten Definition zuwenden, so müssten unsere Karten „erweiterte Gefahrenhinweiskarten“ darstellen, die zwar die strengen Voraussetzungen einer Gefahrenkarte nicht erfüllen, aber dennoch zusätzliche Aussagen treffen (Patula 2009, 12). In der vorliegenden Arbeit beinhalten die Gefahrenhinweiskarten auch eine graduelle Klassifizierung der Gefährdung.

Die Intensität der Prozesse wurde dabei für die Gefährdungsbeurteilung als entscheidendes Kriterium herangezogen. Problematisch dabei ist jedoch, dass es kein allgemein gültiges Maß gibt, um die Intensität von Massenbewegungen zu beschreiben. Aufgrund der Wirkungsmechanismen der verschiedenen Prozesse können hingegen Werte festgelegt werden, die eine Einordnung in Klassen mit starker, mittlerer und schwacher Intensität erlauben (Tab. F- 4). Die dazu verwendeten Kriterien beziehen sich auf das vom jeweiligen Prozess betroffene bzw. gefährdete Gebiet.

Um der oben genannten Definition gerecht zu werden soll aber auch die Wahrscheinlichkeit miteinfließen. Da es sich bei Rutschungen (ähnliches gilt auch für Hangmuren) um meist kontinuierliche Prozesse handelt, gibt es eine Eintrittswahrscheinlichkeit im engeren Sinne gar nicht, weshalb dieses Kriterium auch unberücksichtigt blieb. Denn aktive Rutschphasen sind witterungsabhängig und unterliegen daher der Eintrittswahrscheinlichkeit besonderer Witterungsverhältnisse (BUWAL 2001, 27).

**Tab. F- 4:** Beurteilung der Intensität nach verschiedenen Prozessen.

E = kinetische Energie, M= Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht, h = Mächtigkeit der Ablagerung durch Hangmure, v = langfristige durchschnittliche Rutschgeschwindigkeit (BUWAL 2001, 26).

Prozess	Schwache Intensität	Mittlere Intensität	Starke Intensität
<b>Block-/Steinschlag</b>	E < 30 kJ	30 < E < 300kJ	E < 300kJ
<b>Fels- und Bergsturz</b>	-	-	E < 300kJ
<b>Rutschung</b>	v: ≤ 2cm/Jahr	v: dm/Jahr (> 2cm/Jahr)	starke Differentialbewegungen; v > 0,1m/Tag bei oberflächlichen Rutschungen; Verschiebungen > 1m pro Ereignis
<b>Hangmure potentiell</b>	M < 0.5m	0.5m < M < 2m	M > 2m
<b>Hangmure real</b>	-	h < 1m	h > 1m
<b>Absenkung, Einsturz</b>	-	Dolinen	-

Wie schon erwähnt, wurde die Intensität der Prozesse für die Gefährdungsbeurteilung verwendet, wobei die Hangneigung einerseits und die Massenmächtigkeit andererseits - siehe Tab. F- 4 - Berücksichtigung fanden. Die Bewertung aller flächenhaft dargestellter Informationen (Tab. F- 5) basiert daher auf diesen beiden Faktoren. D. h. den potentiellen Dispositionsgebieten, modellierten Sturzbahnen und Ablagerungsgebieten wurden in Abhängigkeit von der Hangneigung folgende 4 Gefährdungsklassen zugeteilt und gleichzeitig auf den Mittelwert der abgelagerten Massen Bezug genommen: 1 = gravitative Prozesse nicht zu erwarten; 2 = gravitative Prozesse mit geringer Frequenz/Magnitude möglich; 3 = gravitative Prozesse mit hoher Frequenz/Magnitude möglich; 4 = gravitative Prozesse mit hoher Frequenz/Magnitude wahrscheinlich (Tab. F- 5).

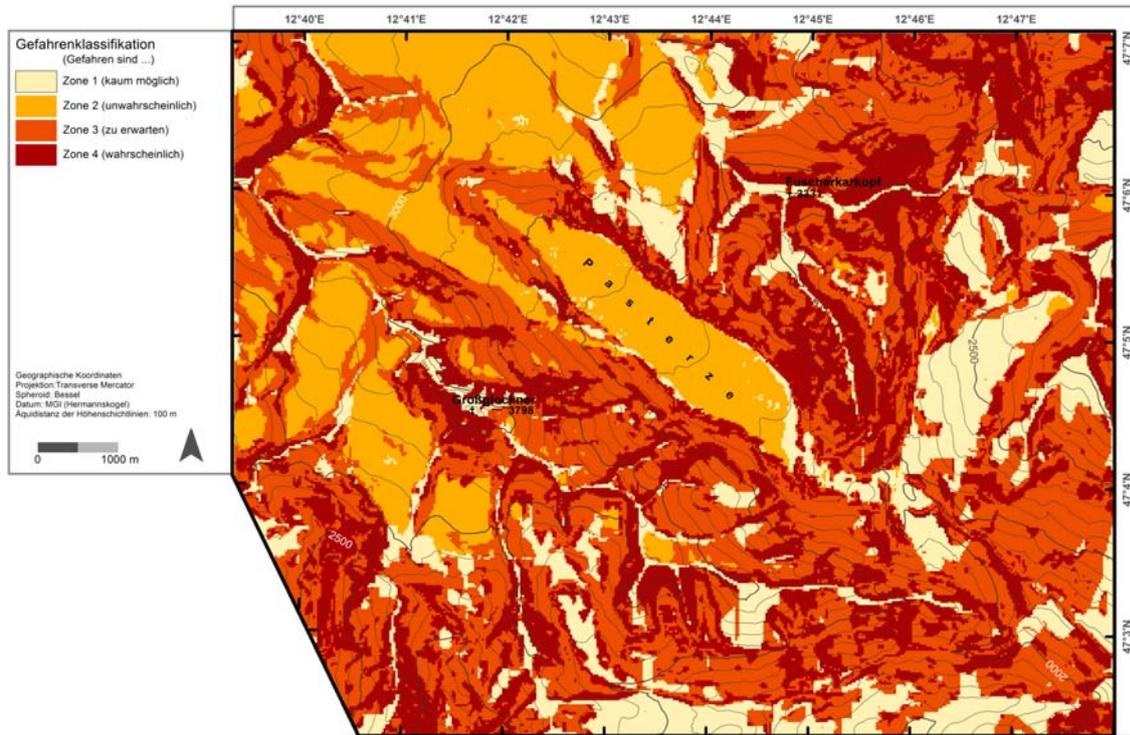
**Tab. F- 5:** Bewertung der Intensität (Frequenz/Magnitude) von Prozessen an den von ihnen betroffenen Flächen.

Die Abkürzung a.M. steht für arithmetisches Mittel; Gebiete mit über dem jeweiligen a.M. gelegenen modellierten Materialmengen werden meist der jeweils höheren Intensitätsklasse zugeordnet.

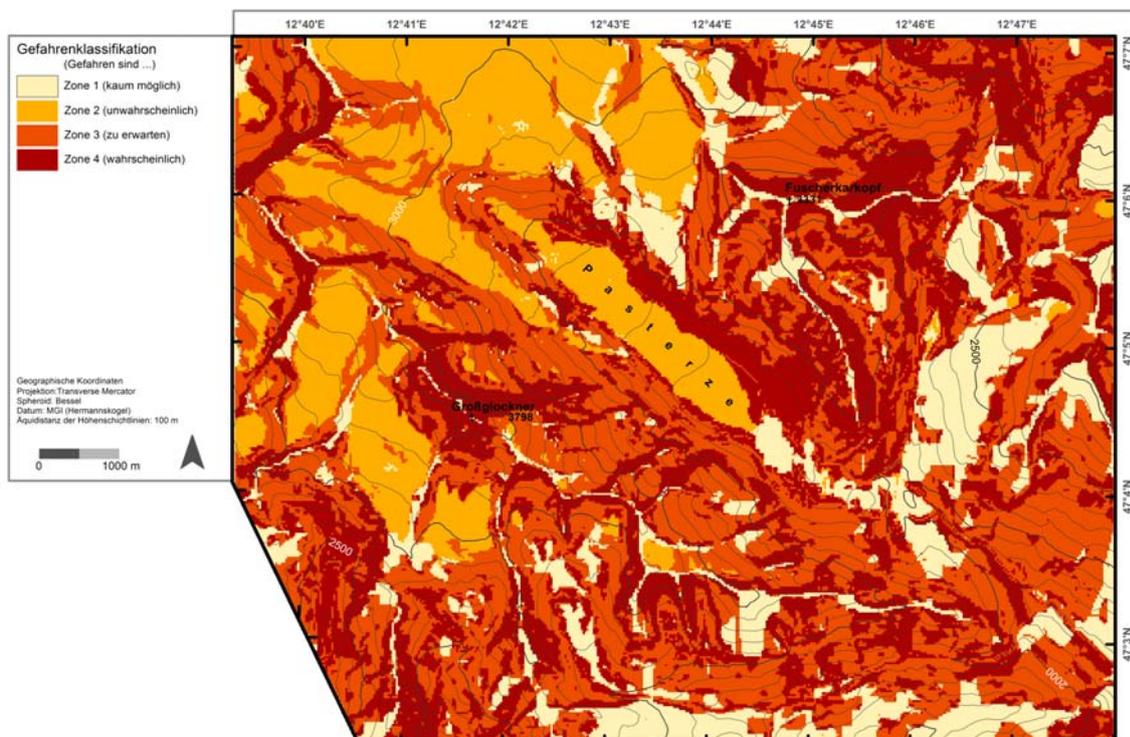
Hangneigung	Herkunftsgebiete				Sturzbahnen	Ablagerungsgebiete		Gletscherflächen
	Lockermaterial		Festgestein			> a.M.	< a.M.	
	> a.M.	< a.M.	> a.M.	< a.M.				
>40°	4	3	4	4	4	-	-	4
≥20° - ≤40°	4	3	-	-	3	-	-	3
>1° - <20°	-	-	-	-	-	4	3	2
0° - ≤1°	-	-	-	-	-	3	2	1

Da die Gletscher nicht in die Prozessmodellierung miteinbezogen wurden, erfolgte die Bewertung nur anhand der Neigung ihrer Oberfläche. Dem liegt die Überlegung zu Grunde, dass gravitative Prozesse auf Gletscherflächen mit zunehmender Neigung wahrscheinlicher und ihre Begehung gefährlicher wird. Auch wurde bei der Gefährdungsbeurteilung der Dispositionsgebiete zwischen Locker- und Festgestein unterschieden. Durch die Zuordnung der aus der Prozessmodellierung gewonnenen Flächen

zu den Intensitätsklassen gemäß Tab. F- 5 entstand je eine Gefahrenhinweiskarte für den aktuellen Stand (Abb. F- 15) und das Szenario 2030 (Abb. F- 16).



**Abb. F- 15:** Gefahrenhinweiskarte 2010.



**Abb. F- 16:** Gefahrenhinweiskarte Szenario 2030.

## F-8 Vulnerabilitätskarten

Per Definition (IUGS 1997 in Patula 2009) ist unter Vulnerabilität die Verletzbarkeit eines Objektes, d.h. der zu erwartende Schaden in Relation zu Intensität und Eintretenswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses zu verstehen. Da in dieser Arbeit zwar die Intensität, aber weder die zeitliche noch die räumliche Eintretenswahrscheinlichkeit berücksichtigt wird, muss die Bewertung von Gefahren für Infrastruktur auf eine andere Art erfolgen. Aleotti und Chowdhury (1999) teilen verschiedene Möglichkeiten zu Gefahrenbeurteilungen mit. In deren Sinne beruhen unsere kartographischen Ergebnisse auf den indizierten Faktoren Hangneigung und Massenmächtigkeit. Im letzten Schritt wurde die bestehende Gefahrenbeurteilung auf potentiell gefährdete Objekte angewendet, d.h. die Karten wurden mit der vorhandenen alpin-touristischen Infrastruktur überlagert und somit Vulnerabilitätskarten (Abb. F- 17 und Abb. F- 18) generiert, die erkennbar machen, welche Wegabschnitte in welcher Gefährdungsklasse liegen.

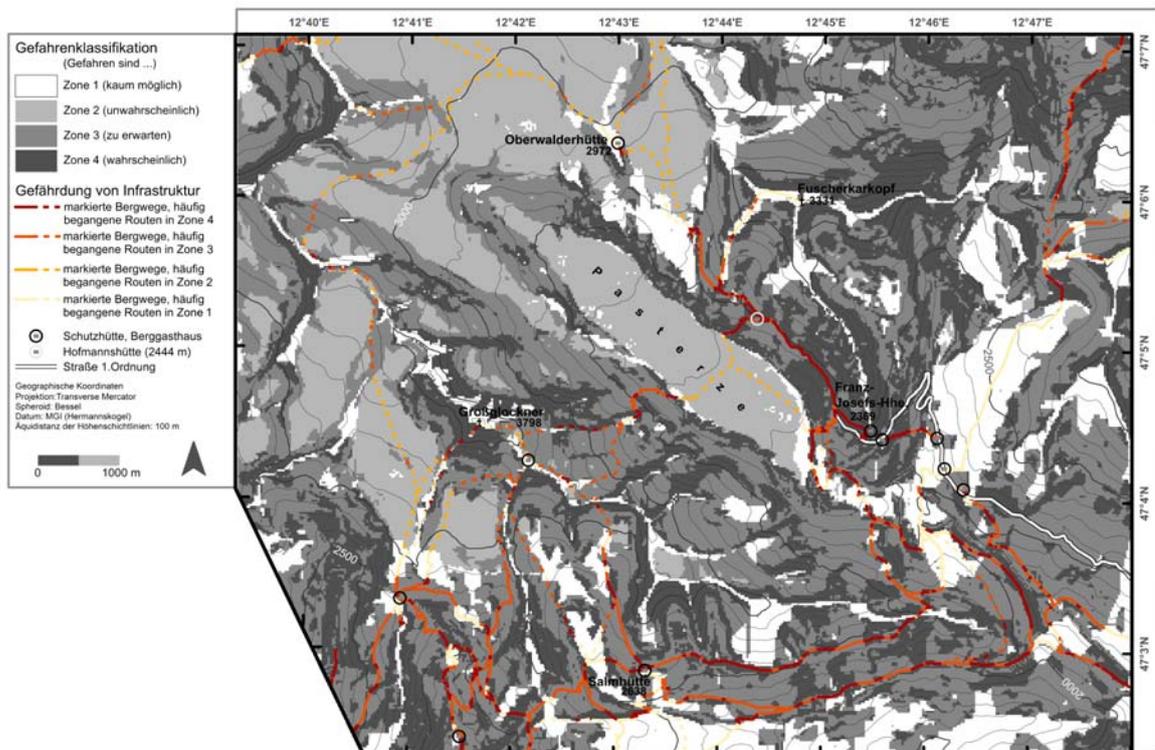


Abb. F- 17: Vulnerabilitätskarte 2010.

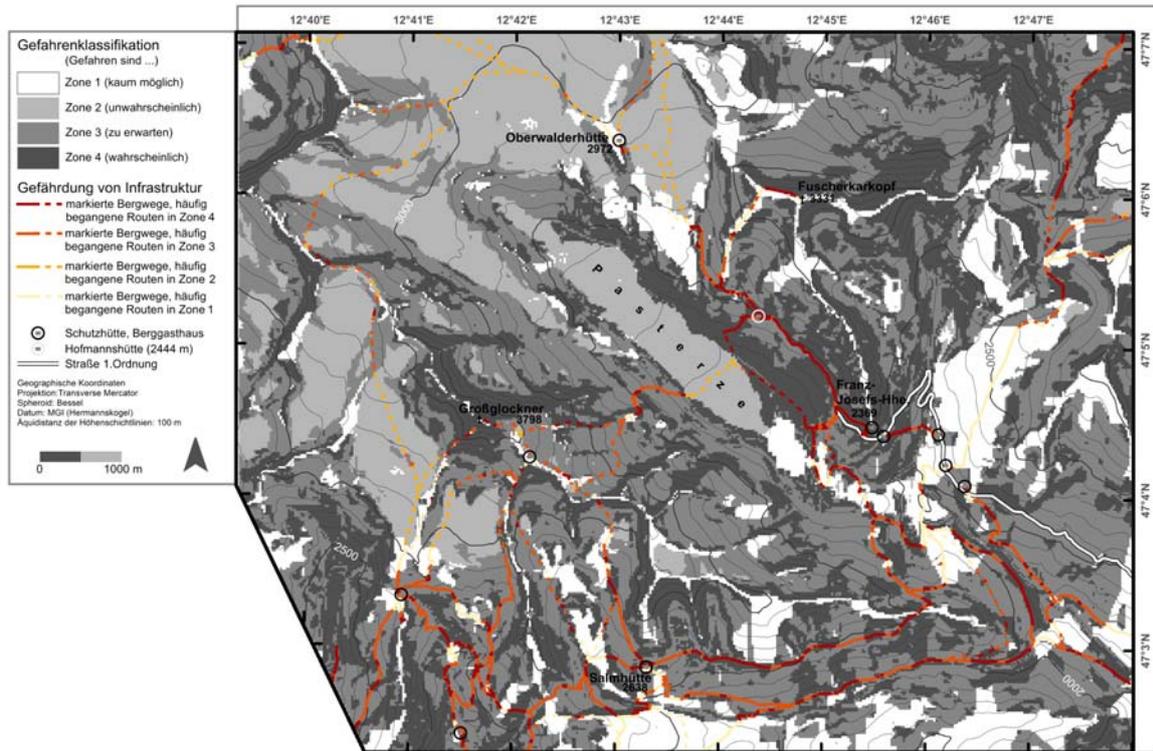


Abb. F- 18: Vulnerabilitätskarte Szenario 2030.

### Statistische Auswertung in Bezug auf die Gefahrenklassifikation

Die tabellarische Auflistung der nach Gefährdungsklassen berechneten Flächenanteile macht für die Kartendarstellungen der Situation 2010 (Tab. F- 6) deutlich, dass etwa auf 2/3 der Fläche gravitative Prozesse möglich (Klasse 3) bzw. zu erwarten (Klasse 4) sind. Das restliche Drittel der Fläche teilt sich beinahe gleichmäßig auf die beiden minder gefährdeten Klassen 1 und 2 auf. Im Vergleich zu den Flächenanteilen in den Karten des Szenarios 2030 (Tab. F- 7) sind grundsätzlich nur geringe Änderungen zu bemerken, wobei der Anteil der Klasse 4 auf Kosten der beiden minder gefährdeten Klassen zunimmt. Es ist demnach insgesamt mit einem leichten Anstieg des Gefährdungspotentials zu rechnen.

Tab. F- 6: Flächenanteile der Gefahrenklassen in den klassifizierten Karten 2010.

Gefahrenklasse	absolut [ha]	relativ [%]
1	1458	15,5
2	1625	17,3
3	3767	40,1
4	2550	27,1
Σ	9400	100

**Tab. F- 7:** Flächenanteile der Gefahrenklassen in den klassifizierten Karten 2030.

<b>Gefahrenklasse</b>	<b>absolut [ha]</b>	<b>relativ [%]</b>
<b>1</b>	1333	14,2
<b>2</b>	1463	15,6
<b>3</b>	3815	40,6
<b>4</b>	2789	29,7
<b>Σ</b>	9400	100

Wenn man Anteile der Wegabschnitte (Tab. F- 8 und Tab. F- 9) an den jeweiligen Gefährdungsklassen im Untersuchungsgebiet betrachtet, so ergibt sich ein vorerst wohl unerwartetes Bild. Denn gerade die markierten Bergwege liegen zu mehr als 2/3 in den beiden gefährdeteren Bereichen, wohingegen die häufig begangenen Routen zu mehr als der Hälfte auf die beiden minder gefährdeten Bereiche zu liegen kommen (was damit begründet werden kann, dass diese zum überwiegend Teil über relativ gering geneigte Gletscherflächen führen). Der Unterschied zwischen Wegabschnittanteilen der Karten für 2010 und des Szenarios 2030 gibt natürlich die Verhältnisse der Flächenanteile wieder: die Anteile an Klasse 4 nehmen zu Ungunsten jener der Klassen 1 und 2 – mit der größeren Abnahme bei Klasse 1 – zu.

**Tab. F- 8:** Anteil der Weglängen an den Gefahrenklassen in den klassifizierten Karten 2010.

<b>Gefahrenklasse</b>	<b>markierte Bergwege</b>		<b>häufig begangene Routen</b>		<b>Wege und Routen gesamt</b>	
	absolut [m]	relativ [%]	absolut [m]	relativ [%]	absolut [m]	relativ [%]
<b>1</b>	17939	27,0	7447	18,0	25386	23,5
<b>2</b>	161	0,2	16942	40,9	17103	15,9
<b>3</b>	30095	45,4	13178	31,8	43273	40,1
<b>4</b>	18151	27,4	3902	9,4	22053	20,5
<b>Σ</b>	66346	100	41469	100	107815	100

**Tab. F- 9:** Anteil der Weglängen an den Gefahrenklassen in den klassifizierten Karten 2030.

<b>Gefahrenklasse</b>	<b>markierte Bergwege</b>		<b>häufig begangene Routen</b>		<b>Wege und Routen gesamt</b>	
	absolut [m]	relativ [%]	absolut [m]	relativ [%]	absolut [m]	relativ [%]
<b>1</b>	16453	24,8	6910	16,7	23259	21,6
<b>2</b>	173	0,3	15542	37,5	15715	14,6
<b>3</b>	30489	46,0	13315	32,1	43804	40,7
<b>4</b>	19231	29,0	5702	13,8	24933	23,1
<b>Σ</b>	66346	100	41469	100	107815	100

## F-9 Handlungsempfehlungen

Die Vulnerabilitätskarten (Kap. F-8) können als zentrale Ergebnisse des Modellierungsteiles in AlpinRiskGP gelten, geben sie doch sowohl flächenhafte Information zur Gefährdung im Gesamtgebiet als auch lineare Information für Wege und Routen mit hohem Detaillierungsgrad. Um diese Informationen auf Plausibilität zu prüfen, d. h. die Modellierungsergebnisse zu validieren, sowie daraus Maßnahmen-Empfehlungen für die Praxis abzuleiten, wurden die Vulnerabilitätskarten im Rahmen eines Workshops mit dem Titel „Werden die Bergwege und Routen am Großglockner gefährlicher?“ am 12.10.2010 im Nationalparkzentrum BIOS in Mallnitz einer Gruppe von Expertinnen und Experten vorgelegt. Dabei waren die wichtigsten, in ihrer Arbeit mit der Gefährdung von Wegen und Routen konfrontierten Organisationen vertreten (Bergrettung – eine Person, Bergführerverein – eine Person, Hüttenwirtsleute – eine Person, alpine Vereine – 4 Personen, Nationalpark Hohe Tauern – 3 Personen). Die Vulnerabilitätskarten wurden von den Expertinnen und Experten in vielen Details geprüft und insgesamt sehr positiv bewertet: Obwohl festgestellt wurde, dass die Gefährdungsklassen lokal das real vorhandene Gefahrenpotential etwas überschätzen, wurde das Vorhandensein der Karten als wertvolle Grundlage für das Management der hochalpinen Wege und Routen begrüßt.

Aus dem Workshop, dessen genauer Ablauf samt vielen Einzelheiten durch einen Bericht im Anhang I der digitalen Version des Dokuments beschrieben ist, können die folgenden Handlungs- bzw. Maßnahmenempfehlungen abgeleitet werden:

- Für Hochgebirgsregionen kann die modellierungsbasierte **Erstellung von Vulnerabilitätskarten gemäß den Anleitungen in Kap. F-8 generell empfohlen** werden, sofern die entsprechenden Eingangsdaten vorhanden sind (was in allen österreichischen Hochgebirgsregionen im Wesentlichen der Fall sein sollte). Die Darstellungen erlauben sowohl einen schnellen regionalen Überblick als auch die exakte Lokalisierung potentieller Gefahrenstellen. Ungeachtet der Tatsache, dass das Wissen lokaler und regionaler Akteurinnen und Akteure in der Weganlage und -erhaltung natürlich auch in Zukunft unentbehrlich bleiben wird, stellen die Karten gerade für diese Gruppe von Personen ebenso wie für Tourenführerinnen und -führer eine ideale Entscheidungs- und Planungsgrundlage dar.
- Die Vulnerabilitätskarten sollen **nicht einer breiten Öffentlichkeit zugänglich** gemacht werden – alpinistische und touristische Organisationen sollten also davon absehen, die Karten in Printmedien oder im Internet zu veröffentlichen. Dies kann damit begründet werden, dass zum einen die Interpretation der Karten für „normale“ Touristinnen und Touristen schwierig ist und diese sich über Gebühr von hohen Gefahrenstufen abschrecken lassen könnten. So etwa sind viele Streckenabschnitte in der Klasse 4 längst durch „lokale Maßnahmen“ (siehe unten) gesichert und somit bei guten sommerlichen Witterungs- und Wegverhältnissen problemlos begehbar. Zum anderen können, etwa auf Grund der z. T. unsicheren Eingangsgrößen sowohl bei der Dispositions- als auch bei der Prozessmodellierung und Bewertung, die ausgewiesenen Gefahrenklassen keineswegs als unumstößliche Sachverhalte gelten, was jedoch eine Publikation an leicht zugänglicher Stelle suggerieren würde. Sehr wohl sollten die Karten jedoch den oben genannten Akteurinnen und Akteuren verfügbar sein.
- Auf der Grundlage der Vulnerabilitätskarten ist die Planung von **lokalen Maßnahmen** der Wegerhaltung erleichtert bzw. kann gezielter erfolgen. Zu diesen Maßnahmen gehören das Abräumen von Schutt und Felsblöcken aus Wänden, die Errichtung permanenter Schutzvorrichtungen, die Errichtung neuer Wegabschnitte (Umleitungen), die völlige Neuanlage von Wegen oder gegebenenfalls auch die Auflassung von Wegen und Routen. So etwa kann die Neutrassierung in bisher nicht durch Wege erschlossenem Gelände (worin somit auch keine oder

kaum Erfahrungen über das Gefahrenpotential vorliegen) mit Hilfe der Karten besser geplant werden, zumal man dabei nicht nur auf intuitive Einschätzungen angewiesen ist, sondern objektiv nachvollziehbare Quantifizierungen als Grundlage hat.

- Im **organisatorischen Bereich sollte eine Professionalisierung der Wegerhaltung und des Wegemanagements** vorangetrieben werden, was auch ein wichtiges Ergebnis der Arbeit von Braun 2009 war. Mögliche Ansätze hierfür wären eine verstärkte Kooperation der für die Wegerhaltung verantwortlichen bzw. davon profitierenden Organisationen und/oder der Aufbau eines Wege-Informationssystems, worin auch die Vulnerabilitätskarten implementiert werden könnten. Schließlich könnten auch professionelle Wegearbeiter-Teams (Bautrupps) auf regionaler Ebene eingerichtet werden, die auf Grund der Gefährdungsklassen von Wegen eine Prioritätenliste bei deren Sanierung erstellen könnten (als Vorbild hierfür könnte z. B. die „Arbeitsgemeinschaft Inneres Ötztal“ dienen, vgl. Braun 2009, 105).
- Relativ schwer in eine Handlungs-Empfehlung zu fassen, aber doch von großer Bedeutung im Gesamtkontext der alpinen Gefahren ist die **subjektive Ebene der Besucherinnen und Besucher**. Da tendenziell eine Gewährleistung höherer Sicherheitsstandards trotz gleichzeitig steigenden Gefahrenpotentials von Seiten der Touristinnen und Touristen erwartet wird, befürchten die Wege erhaltenden Organisationen zunehmend mit Haftungsfragen konfrontiert zu werden. Als Mechanismus der Gegensteuerung ist hierbei eine verstärkte Aufklärung der Besucherinnen und Besucher notwendig, welche wiederum primär über eine fundierte alpine Ausbildung erfolgen müsste. Im vorliegenden Rahmen muss freilich offen bleiben, wie die betroffenen Personen konkret erreicht und ihre Bereitschaft zur Eigenverantwortlichkeit gesteigert werden könnte.

Eine exakte Zuweisung von Handlungs- oder konkreten Maßnahmenempfehlungen zu den Gefahrenklassen erwies sich als nicht möglich. Dennoch soll an dieser Stelle der Versuch unternommen werden, die Gefahrenklassen in ihrer Wirkung auf Begeherinnen und Begeher sowie Wege erhaltende Organisationen grob zu beschreiben (Tab. F- 10).

**Tab. F- 10:** Wirkungen der Gefahrenklassen.

<b>Gefahrenklasse</b>	<b>Prozessuale Wirkung auf Wege</b>	<b>Wirkung auf Personen, die die Wege begehen</b>	<b>Wirkung auf Wege erhaltende Organisationen</b>
<b>1 gefährliche Prozesse kaum möglich</b>	Wege werden von untersuchten Prozessen nicht beeinflusst	Wege unter „normalen“ Bedingungen gefahrlos begehbar	Keine besonderen Maßnahmen erforderlich
<b>2 gefährliche Prozesse unwahrscheinlich</b>	Wege werden von untersuchten Prozessen kaum beeinflusst	Wege unter „normalen“ Bedingungen gefahrlos begehbar	Lokale Maßnahmen möglicherweise erforderlich
<b>3 gefährliche Prozesse zu erwarten</b>	Lokale Beschädigung der Wege durch untersuchte Prozesse	Verschlechterung der Begehrbarkeit ist lokal zu erwarten	Lokale Maßnahmen jedenfalls und immer wieder notwendig
<b>4 gefährliche Prozesse wahrscheinlich</b>	Beschädigung oder Zerstörung ganzer Wegabschnitte nicht auszuschließen	längere Wegabschnitte sind schlechter oder gar nicht mehr begehbar	Aufwändige lokale Maßnahmen bis hin zur Neuanlage von Wegen notwendig

## F-10 Anleitung zur Übertragung der Methodik

Prinzipiell ist die in den Kapiteln F-5 bis F-8 im Detail beschriebene Methodik direkt auf andere Untersuchungsgebiete im Hochgebirge übertragbar. Der Datenbedarf für die Modellierung ist gering und die Rechenzeiten daher vergleichsweise kurz, so dass die Modelle gegebenenfalls auch auf größere Areale wie ganze Gebirgsgruppen oder Tourismusregionen angewendet werden können. Für die Anwendung auf andere Untersuchungsgebiete sind aber folgende Punkte zu beachten:

- Alle Eingangsdaten müssen flächendeckend im Rasterformat vorhanden sein und die gleiche Anzahl von Zeilen und Spalten aufweisen.
- Um Fehlkalkulationen zu vermeiden empfiehlt sich eine Co-Registrierung der gesamten Daten zum Untersuchungsgebiet.
- Die Qualität des DHMs hat maßgebenden Einfluss auf die Modellergebnisse. Fehler bzw. Ungenauigkeiten im DHM machen sich bei der Dispositionsmodellierung sowie bei der Prozessmodellierung deutlich bemerkbar. Bei einer Auflösung von 25m x 25m sind kleinere Gerinne oder Geländestufen nur sehr schlecht aufgelöst, obwohl diese in der Realität für die gegenständlichen Prozesse eine beachtliche Rolle spielen können.
- Die geologische Karte stellt die Basis der Dispositionsmodellierung dar. Die Einteilung der geologischen Formationen in lithologische Klassen sollte sorgfältig durchgeführt werden. Viele kleinere Lockergesteinsbereiche (z. B. in situ verwittertes Festgestein) sind in der geologischen Karte nicht erfasst. Es empfiehlt sich daher, die Information aus der geologischen Karte mit Information aus Luftbildern oder Geländearbeiten zu ergänzen, denn besonders für die Entstehung von sonstigen denudativen Prozessen sind diese Bereiche nicht unerheblich.
- Die Grenzwerte der Hangneigung zur Ermittlung der Disposition sind Standardwerte aus der Literatur und müssen gegebenenfalls an die geologischen Situation im Untersuchungsgebiet angepasst werden.
- Es ist möglich das Prozessmodell auf unterschiedliche Reichweiten zu kalibrieren, um so verschiedene Szenarien zu modellieren. Mit Hilfe von bereits bekannten Sturzbahnen kann ermittelt werden, auf welche Reichweiten die Prozesse kalibriert werden sollten bzw. welche Reichweiten als maximal angesehen werden können. Zur Kalibrierung bzw. Validierung des Prozessmodells sollten diese möglichst gut über das Untersuchungsgebiet verteilt sein.
- Bei der Simulation mit dem verwendeten Prozessmodell werden Materialeigenschaften wie Dämpfungseigenschaften des Untergrundes und Hangrauigkeit nicht berücksichtigt. Die Übertragbarkeit des Modells auf Gebiete unter der Waldgrenze ist nicht geprüft und daher nicht zu empfehlen.

Eine detaillierte Anleitung zur Erstellung von Vulnerabilitätskarten nach dem Muster von AlpinRiskGP findet sich im Anhang II der digitalen Version des Berichts.

## F-11 Ausblick zur Zukunft des Hochgebirgstourismus

Die Ergebnisse von AlpinRiskGP zeigen zwei Sachverhalte deutlich auf: Zum einen sind große Teile des Hochgebirgsraumes oberhalb der Waldgrenze von Naturprozessen betroffen, welche für die Besucherinnen und Besucher entweder eine unmittelbare Gefahr darstellen oder die Begehbarkeit von Wegen und Routen verschlechtern können. Zum anderen kann kein Zweifel daran bestehen, dass der in Gang befindliche Klimawandel eine klare Tendenz zu einer Verschärfung dieser Situation bewirken wird. Obwohl dem Projekt AlpinRiskGP nur ein schwaches Erwärmungsszenario für den kurzen, überschaubaren Zeitrahmen von zwei Jahrzehnten (Szenario 2030) zu Grunde gelegt wurde, ist auf dem überwiegenden Teil der sich bezüglich der Gefahrenklasse verändernden Flächen eine Erhöhung der Gefahr festzustellen, während die Herabsetzung des Gefahrenpotenzials nur punktuell vorkommt (Abb. F- 19, Tab. F- 11 und Tab. F- 12). Eine solche Verbesserung der Situation wäre im lokalen Scale längerfristig durchaus zu erwarten, denkt man z. B. an die Stabilisierung von Lockergestein durch die in größere Seehöhe vordringende Vegetation oder das Ausschmelzen von flachen Felsbereichen unterhalb von Gletscherzungen. Effekte dieser Art können jedoch mit den der Modellierung zu Grunde liegenden, stark generalisierten Annahmen nicht nachgebildet werden, ganz abgesehen davon, dass hierfür auch der betrachtete Zeitraum zu kurz sein dürfte.

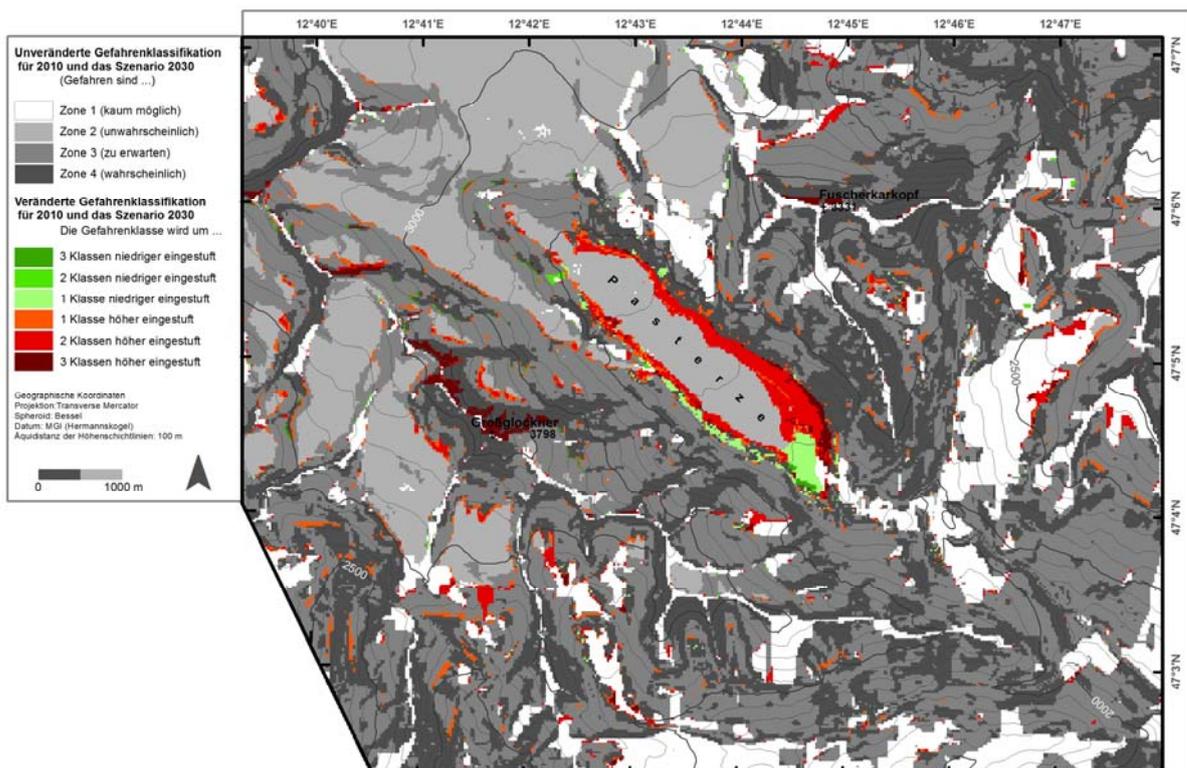


Abb. F- 19: Differenzkarte der Gefahrenstufen 2010-2030.

**Tab. F- 11:** Flächenanteile der Gefahrenklassen in Bezug auf die veränderte Klassifikation zwischen 2010 und 2030.

Gefahrenklasse	absolut [ha]	relativ [%]
<b>1 (2010) bleibt 2030 unverändert</b>	1293	13,8
<b>2 (2010) bleibt 2030 unverändert</b>	1460	15,5
<b>3 (2010) bleibt 2030 unverändert</b>	3635	38,7
<b>4 (2010) bleibt 2030 unverändert</b>	2504	26,6
<b>wird um 3 Klassen niedriger eingestuft</b>	11	0,1
<b>wird um 2 Klassen niedriger eingestuft</b>	9	0,1
<b>wird um 1 Klasse niedriger eingestuft</b>	57	0,6
<b>wird um 1 Klasse höher eingestuft</b>	168	1,8
<b>wird um 2 Klassen höher eingestuft</b>	198	2,2
<b>wird um 3 Klassen höher eingestuft</b>	65	0,7
$\Sigma$	9400	100,0

**Tab. F- 12:** Anteil der Weglängen an den Gefahrenklassen in Bezug auf die veränderte Klassifikation zwischen 2010 und 2030.

Gefahrenklasse	markierte Bergwege		häufig begang. Routen		Wege und Routen gesamt	
	absolut [m]	relativ [%]	absolut [m]	relativ [%]	absolut [m]	relativ [%]
<b>1 (2010) bleibt 2030 unverändert</b>	16083	24,2	6696	16,1	22779	21,1
<b>2 (2010) bleibt 2030 unverändert</b>	159	0,2	15477	37,3	15636	14,5
<b>3 (2010) bleibt 2030 unverändert</b>	28405	42,8	12652	30,5	41057	38,1
<b>4 (2010) bleibt 2030 unverändert</b>	16975	25,6	3617	8,7	20592	19,1
<b>um 3 Klassen niedriger eingestuft</b>	117	0,2	75	0,2	192	0,2
<b>um 2 Klassen niedriger eingestuft</b>	251	0,4	74	0,2	325	0,3
<b>um 1 Klasse niedriger eingestuft</b>	1064	1,6	332	0,8	1396	1,3
<b>um 1 Klasse höher eingestuft</b>	1447	2,2	656	1,6	2103	2,0
<b>um 2 Klassen höher eingestuft</b>	1025	1,5	1347	3,2	2372	2,2
<b>um 3 Klassen höher eingestuft</b>	820	1,2	543	1,3	1363	1,3
$\Sigma$	66346	100,0	41469	100,0	107815	100,0

Es ist jedoch festzuhalten, dass – wie mehrfach betont – die untersuchten Prozesse für das Hochgebirge zum ganz normalen Prozessinventar gehören und die von ihnen geschaffenen Geländeformen nicht nur für das Erscheinungsbild der Hochgebirgslandschaft typisch sind, sondern vielfach ihren spezifischen Reiz ausmachen (z. B. pittoreske Felssturzbereiche). Personen, die sich im Gebirge außerhalb der gesicherten Siedlungs-, Verkehrs- und Wirtschaftsflächen aufhalten, waren seit jeher mit diesen Prozessen als potenziellen Gefahren konfrontiert. So ist etwa die Geschichte des Alpinismus seit der zweiten Hälfte des 19. Jhs. parallel zum seit damals erfolgten Gletscherschwund verlaufen und hat den Bergsteigerinnen und Bergsteigern ebenso wie den hinter diesen Aktivitäten stehenden Organisationen fortwährend Adaptationsstrategien und -maßnahmen abverlangt. Die gegenwärtige Entwicklung fügt sich somit in ein Kontinuum von Veränderungen ein, die nicht nur die Naturprozesse, sondern auch die Vorlieben, Entscheidungen und Handlungen der beteiligten Menschen und sozialen Gruppen betreffen. Wenn hierbei die gegenwärtige Situation als kritisch wahrgenommen wird (Umweltdachverband 2006), so resultiert dies sowohl aus dem dynamischen Wandel

der hochalpinen Umwelt – am besten visualisiert durch den seit den 1990er Jahren beschleunigten Gletscherschwund – als auch aus veränderten Werthaltungen und Ansprüchen der Gesellschaft, speziell in Bezug auf das Freizeitverhalten, wobei u. a. die Suche nach Selbsterfahrung durch authentisches Naturerlebnis mehr Menschen als früher motiviert, das (viel leichter zugänglich gewordene) Hochgebirge zu besuchen.

Unter diesem Aspekt erscheinen die für das Untersuchungsgebiet im Rahmen der vorgenommenen Szenario-Entwicklung für 2030 modellierten Veränderungen der Gefahrenstufen als vergleichsweise moderat, erhöht sich doch etwa der Anteil der Wege und Routen in den Gefahrenklassen 3 und 4 von 2010 auf 2030 nur von 60,6 auf 63,8 % (Tab. F- 8 und Tab. F- 9). Man darf annehmen, dass die Veränderungen in den vergangenen zwei Jahrzehnten ein ähnliches Ausmaß hatten und somit durch die bewährten „lokalen Maßnahmen“ (Kap. 9) zumindest in Bezug auf das in AlpinRiskGP untersuchte Wege- und Routennetz auch in Zukunft beherrschbar sein sollten. Diese Aussage gilt insbesondere dann, wenn auf der Grundlage einer fundierten Gefahrenmodellierung wie im vorliegenden Projekt die entsprechenden Planungen verbessert sowie einige der „organisatorischen Maßnahmen“ umgesetzt werden. Wenn schließlich noch die potenziell gefährlichen Prozesse aufmerksam beobachtet (und auf der Grundlage gut dotierter Grundlagenforschung besser verstanden) werden und es auch gelingt, das Bewusstsein der Eigenverantwortlichkeit bei Besucherinnen und Besuchern besser zu verankern, dann wird das Hochgebirge auch in Zukunft eine der wichtigsten Attraktionen des österreichischen Tourismus bleiben.

## Literaturverzeichnis

Aleotti, P. und Chowdhury R. (1999): Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 58, 21-44.

Auer, I., Böhm, R., Leymüller, M. und Schöner, W. (2002): Das Klima des Sonnblicks. *Österr. Beitr. Z. Meteorologie u. Geophysik* 28, Wien, 304 S.

Auer, I. et al. (2007): HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *Internat. Journal of Climatology* 27, 17-46.

Braun, F. (2009): Sommer-Bergtourismus im Klimawandel: Szenarien und Handlungsbedarf am Beispiel des hochalpinen Wegenetzes. Unpubl. Diss., Univ. f. Bodenkultur, Wien, 142 S.

BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft et al. (Hrsg.) (2001): Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten – Empfehlungen 1997. Bern 42 S.

[http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren/01923/01952/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,Inp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCEdIJ5fmym162epYbg2c\\_JjKbNoKSn6A--](http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren/01923/01952/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,Inp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCEdIJ5fmym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--) (Zugriff 10/2010)

Corominas, J., Remondo, J., Farias, P., Estevano, M., Zézere, J., Díaz de Terán, J., Dikau, R., Schrott, L., Moya, J. und González, A. (1996): Debris Flow. In: Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L. und Ibsen, M.L. (Hrsg.): *Landslide Recognition: Identification, Movement and Courses*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 161-180.

Christensen, O. B. und Christensen, J. H. (2004): Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate. *Global Planet Change* 44, 107–117.

Dorren, L.K.A. und Seijmonsbergen, A.C. (2003): Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale. *Geomorphology* 56, 49-64.

Evans, S. G. und Clague, J. J. (1994): Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments. *Geomorphology* 10, 107–128.

Felgentreff, C. und Glade, T. (Hrsg.) (2008): *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, Heidelberg, 454 S.

Fey, C. (2010): Modellierung von Steinschlag, Blockschlag und Felsstürzen auf alpinen Bergwegen – Kalibrierung und Anwendung von Sturzmodellierungsprogrammen zur sichereren Gestaltung des Hüttenzustiegweges zur Winnebachseehütte in Tirol. Unpubl. Diplomarbeit am Institut für Geographie, Universität Heidelberg, 125 S.

Frauenfelder, R., Haerberli, W., Hoelzle, M. und Maisch, M. (2001): Using relict rockglaciers in GIS-based modelling to reconstruct younger dryas permafrost distribution patterns in the Err-Julier area, Swiss Alps. *Norwegian Journal of Geography* 55/4, 195–202.

Gamma, P (2000): Dfwalk – Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. *Geographica Bernensia* 66, Univ. Bern, Bern, 144 S.

Gärtner, H., Stoffel, M., Lièvre, I., Conus, D., Griching, M. und Monbaron, M. (2003): Debris flow frequency derived from tree-ring analyses and geomorphic mapping, Valais, Switzerland. In: Chen, R. (Hrg): *Debris flow hazards mitigation*. Millpress, Rotterdam, 207–217.

Geitner, C. et al. (2010): Flachgründiger Abtrag auf Wiesen- und Weideflächen in den Alpen (Blaiken) – Wissensstand, Datenbasis und Forschungsbedarf. Mitteilung der Österr. Gesellschaft, 152 (in Druck).

Gobiet, A. und Truhetz, H. (2008): Klimamodelle, Klimaszenarien und ihre Bedeutung für Österreich. – In: Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.P. Pirker, O. (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien, 71-82.

Gruber, S., Peter, M., Hoelzle, M., Woodhatch, I. und Haerberli, W. (2003): Surface temperatures in steep alpine rock faces – a strategy for regional-scale measurement and modelling. In: Phillips, M., Springman, S. und Arenson, L. (Hrsg.): 8th International Conference on Permafrost, Zurich 2003, Proceedings, 325-330.

Gruber, S., King, L., Kohl, T., Herz, T., Haerberli, W. und Hoelzle, M. (2004): Interpretation of geothermal profiles perturbed by topography: the Alpine permafrost boreholes at Stockhorn Plateau, Switzerland. Permafrost and Periglacial Processes 15/4, 349-357.

Gruber, S. (2007): A mass-conserving fast algorithm to parameterize gravitational transport and deposition using digital elevation models. Water Resour. Res., 43, W06412. doi:10.1029/2006WR004868.

Gruner, U. (2008): Klimatische und meteorologische Einflüsse auf Sturzprozesse. INTERPRAEVENT 2008 – Conference Proceedings, Vol. 2., 147-158.

Harris, C., Arenson, L.U., Christiansen, H.H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haerberli, W., Hauck, C., Hölzle, M., Humlum, O., Isaksen, K., Käab, A., Kern-Lütschg, M.A., Lehning, M., Matsuoka, N., Murton, J.B., Nötzli, J., Phillips, M., Ross, N., Seppälä, M., Springman, S.M. und Mühl, D.V. (2009): Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. – Earth-Science Reviews 92, 117-171.

IPCC (2007)<sup>a</sup>: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (2007)<sup>b</sup>: Climate Change 2007: Synthesis Report. 52 S. IPCC: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf) (Zugriff 10/2010).

Jäger, S. (1997): Fallstudien zur Bewertung von Massenbewegungen als geomorphologische Naturgefahr. Heidelberger Geographische Arbeiten 108, 151 S.

Jomelli, V., Brunstein, D., Grancher, D. und Pech, P. (2007): Is the response of hill slope debris flows to recent climate change univocal? A case study in the Massif des Ecrins (French Alps). Climate Change 85, 119-137.

Keller, F. (1992): Automated mapping of mountain permafrost using the program PERMAKART within the Geographical Information System ARC/INFO. Permafrost and Periglacial Processes 3, 133-138.

Kellerer-Pirklbauer, A. (2001): GIS-gestützte Analyse der Murgangdisposition im Einzugsgebiet des Ennslingbaches bei Haus im Ennstal. Unpubl. Diplomarbeit, Karl-Franzens-Universität Graz, 156 S.

Kellerer-Pirklbauer A. und Mitglieder des PermaNET Teams (2009): Assessment of the thermal and dynamic reaction scenarios of different permafrost typologies in the European Alps: A PermaNET initiative. Geophysical Research Abstracts, 11, EGU2009-7990-1.

Leser, H. (2009): Geomorphologie. Das Geographische Seminar, Westermann, Braunschweig, 400 S.

Lieb, G.K. (1998): High-mountain permafrost in the Austrian Alps (Europe). Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost, Yellowknife, Canada, 663-668.

Lieb, G.K. (2007): Vom Klimawandel beeinflusste Naturprozesse im Hochgebirge als potenzielle Gefahren für Freizeitaktivitäten – qualitative Überlegungen mit Beispielen aus den Hohen Tauern. Geographischer Jahresbericht aus Österreich LXII/LXIII, 79-94.

Lieb, G.K., Kellerer-Pirklbauer, A. und Avian, M. (2007): Preliminary Map of Geomorphological Hazards caused by Climate Change in the Großglockner Mountains (Austria). Geomorphology for the Future – Conference Proceedings, Innsbruck University Press, Innsbruck, 137-144.

Loye, A., Jaboyedoff, M. und Pedrazzini A. (2009): Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis. Natural Hazards and Earth System Sciences 9, 1643-1653.

Mark, R. K. und Ellen, S. D. (1995): Statistical and simulation models for mapping debris-flow hazard. In: Carrara, A. und Guzzetti, F. (Hrsg.): Geographical Information System in Assessing Natural Hazards 5, 93-106.

Marquinez, J., Menéndez Duarte, R., Farias, P., und Juménez Sánchez, M. (2003): Predictive GIS-based Model of Rockfall Activity in Mountain Cliffs. Natural Hazards 30, 341-360.

Meißl, G. (1998): Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem bayrischen und Tiroler Alpenraum. Selbstverlag d. Inst. für Geographie d. Univ. Innsbruck, Innsbrucker Geographische Studien 28, 249 S.

Nötzli, J., Gruber, S. und Hölzle, M. (2004): Permafrost und Felsstürze im Hitzesommer 2003. GEOForum aktuell 20, 11-14.

Patula, S. (2009): Erweiterte Gefahrenhinweiskarte und Risikohinweiskarte für Steinschlag am Beispiel des Landkreises Miesbach und Erstellung einer Georisiko-Toolbox zur Automatisierung des Workflows. Master Thesis am Zentrum für Geoinformatik, Universität Salzburg, 113 S.

Prager, C., Zangerl, C., Patzelt, G. und Brandner, R. (2008): Age distribution of fossil landslides in the Tyrol (Austria) and its surrounding areas. Natural Hazards and Earth System Sciences 8/2, 377-407.

Pröbstl, U., Damm, B., Rid, W., Mau, P., Felber, A., Swoa, M. und Pichler, I. (2009): Wahrnehmung und Bewertung von Naturgefahren als Folge von Gletscherschwund und Permafrostdegradation in Tourismusdestinationen am Beispiel des Tuxer Tals (Zillertaler Alpen/Österreich). Endbericht von StartClim2008.F in StartClim2008: Anpassung an den Klimawandel in Österreich: Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich, Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF, 51 S. <http://www.austroclim.at/startclim/>

Posch-Trözmüller, G. (2010): Hazard Mapping – Geological hazards. Literature survey regarding methods of hazard mapping and evaluation of danger by landslides and rock fall. – GBA, AdaptAlp WP 5.1, Final report, 278 S.

Amt der Kärntner Landesregierung, Zugriff 10/2010: [http://www.ktn.gv.at/197395\\_DE-.pdf](http://www.ktn.gv.at/197395_DE-.pdf)

Rickenmann, D. (1991): Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering* 117/11, 1419–1439.

Rieger, D. (1999): Bewertung der naturräumlichen Rahmenbedingungen für die Entstehung von Hangmuren. Möglichkeiten zur Modellierung des Murpotentials. *Münchner Geographische Abhandlungen* 51, 149 S.

Ruff, M. (2005): GIS-gestützte Risikoanalyse für Rutschungen und Felsstürze in den Ostalpen (Vorarlberg, Österreich). Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 148 S.

Stahr, A. und Hartmann, T. (1999): Landschaftsformen und Landschaftselemente im Hochgebirge. Springer, Berlin, Heidelberg, 398 S.

Stoffel, M. und Beniston, M. (2006): On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: a case study from the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters* 33, L16404.

Strasser, U. (2008): Die Modellierung der Gebirgsschneedecke im Nationalpark Berchtesgaden. Modelling of the mountain snow cover in the Berchtesgaden National Park, Berchtesgaden National Park Research Report 55, 184 S.

Taucher, W. (2010): Climatic conditions of six selected sites in the Hohe and Niedere Tauern Range 1961-2006. Unpubl. Diplomarbeit, Universität Graz, 156 S.

Tebaldi, C., Hayhoe, K., Arblaster, J. M. und Meehl, G. A. (2006): Going to the extremes: an intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Climate Change* 79, 185–211.

Umweltdachverband (Hrsg.) (2006): Auswirkungen der Klima- und Gletscheränderung auf den Alpinismus. *text.um* 1/06, Wien, 96 S.

Wakonigg, H. und Lieb, G. K. (1996): Die Pasterze und ihre Erforschung im Rahmen der Gletschermessungen. *Kärntner Nationalpark-Schriften* 8, Großkirchheim, 99-115.

Whalley, W. B. (1984): Rockfalls. In: Brunsden, D. und Prior, D. B. (Hrsg.): *Slope Instability*. Wiley, Chichester, 217-256.

Wichmann, V. (2006): Modellierung geomorphologischer Prozesse in einem alpinen Einzugsgebiet. Abgrenzung und Klassifikation der Wirkungsräume von Sturzprozessen und Muren mit einem GIS. Profil Verlag, München/Wien, *Eichstätter Geographische Arbeiten* 15, 231 S.

Zangerl, C., Prager C., Brandner, R., Brückl, E., Eder, S., Fellin, W., Tentschert, E., Poscher, G. und Schönlaub, H. (2008): Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. *Geo.Alp* 5, 1-51.

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (2010): Excel-Tabellen mit Bohrlochmessdaten. Persönliche Korrespondenz (Juni, 2010).

Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., Gsteiger, P., Heiniger, O. und Hunziker, G. (1997): Murgangefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Zürich, vdf, Hochsch.-Verlag an der ETH, 161 S.

Zimmermann, M. und Haeberli, W. (1992): Climatic Change and Debris Flow Activity in High-Mountain Areas - A Case Study in the Swiss Alps, Catena Suppl. 22, 59–72.

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

### Abbildungen

Abb. F- 1:	Grunddisposition, variable Disposition und auslösende Ereignisse.....	8
Abb. F- 2:	Gleitende 5-jahres Temperaturmittel (Gauss Filter) für sechs ausgewählte Messgebiete, bezogen auf 2500m Seehöhe 1961-2006 (Taucher 2010).....	9
Abb. F- 3:	Vorläufige geomorphologische Gefahrenhinweiskarte des Gebietes Großglockner-Pasterze (Lieb et al. 2007).....	10
Abb. F- 4:	Impressionen unterschiedlicher geomorphologischer Prozessbereiche im Untersuchungsgebiet Großglockner-Pasterze.....	11
Abb. F- 5:	Felsstürze als potenzielle Naturgefahren – ein kleines Ereignis am 1.8.2009 oberhalb des Dösener Blockgletschers (Ankogelgruppe, Hohe Tauern) (Foto: T. Marke).....	12
Abb. F- 6:	Beispiel einer aufwändigen Wegsanierung durch Einbau einer Hangbrücke nach flächenhaftem Abgleiten des ursprünglichen Hanges auf Grund dessen Unterschneidung durch das im Vordergrund sichtbare Gerinne (Ridnauntal, Stubai Alpen) (Foto: G. K. Lieb, 15.7.2010).....	14
Abb. F- 7:	Eingangsdaten für die Dispositionsmodellierung: A (Geologische Karte), B (Alpenvereinskarte), C (Digitales Geländemodell), D (Permafrostmodell), E (Vegetationsklassifikation), F (Orthophotos).....	19
Abb. F- 8:	Flussdiagramm zur Bestimmung der Sturzdisposition an der Auslösungsstelle.....	21
Abb. F- 9:	Flussdiagramm zur Bestimmung der Disposition der sonstigen denudativen Prozesse an der Auslösungsstelle.....	23
Abb. F- 10:	Die Ablagerung wird gesteuert durch Depositionslimit (A), Input (B) sowie Hangneigungslimit (C). Erläuterungen im Text. Nach Gruber (2007), verändert.....	29
Abb. F- 11:	Ausbreitungsmodellierung für sonstige denudative Prozesse 2010.....	30
Abb. F- 12:	Ausbreitungsmodellierung für sonstige denudative Prozesse im Szenario 2030.....	30
Abb. F- 13:	Ausbreitungsmodellierung für Sturzprozesse 2010.....	31
Abb. F- 14:	Ausbreitungsmodellierung für Sturzprozesse im Szenario 2030.....	31
Abb. F- 15:	Gefahrenhinweiskarte 2010.....	34
Abb. F- 16:	Gefahrenhinweiskarte Szenario 2030.....	34
Abb. F- 17:	Vulnerabilitätskarte 2010.....	35
Abb. F- 18:	Vulnerabilitätskarte Szenario 2030.....	36
Abb. F- 19:	Differenzkarte der Gefahrenstufen 2010-2030.....	41

## Tabellen

Tab. F- 1:	Methoden zur Erstellung von Dispositionsmodellen für regionale Modellierungen (verändert nach Meißl 1998 und Wichmann 2006). ....	18
Tab. F- 2:	Durchschnittlicher und angenommener zukünftiger Längenrückgang der Pasterze, des Wasserfallwinkel- und des Freiwandkeeses. ....	25
Tab. F- 3:	Durchschnittliche und angenommene zukünftige Einsinkraten sowie Breitenrückgang der Pasterze.....	25
Tab. F- 4:	Beurteilung der Intensität nach verschiedenen Prozessen. ....	33
Tab. F- 5:	Bewertung der Intensität (Frequenz/Magnitude) von Prozessen an den von ihnen betroffenen Flächen. ....	33
Tab. F- 6:	Flächenanteile der Gefahrenklassen in den klassifizierten Karten 2010. ....	36
Tab. F- 7:	Flächenanteile der Gefahrenklassen in den klassifizierten Karten 2030. ....	37
Tab. F- 8:	Anteil der Weglängen an den Gefahrenklassen in den klassifizierten Karten 2010. ....	37
Tab. F- 9:	Anteil der Weglängen an den Gefahrenklassen in den klassifizierten Karten 2030. ....	37
Tab. F- 10:	Wirkungen der Gefahrenklassen.....	39
Tab. F- 11:	Flächenanteile der Gefahrenklassen in Bezug auf die veränderte Klassifikation zwischen 2010 und 2030. ....	42
Tab. F- 12:	Anteil der Weglängen an den Gefahrenklassen in Bezug auf die veränderte Klassifikation zwischen 2010 und 2030. ....	42