

Permafrost

in den Hohen Tauern

 permalp.at

Abschlussbericht

Projektdurchführung:

Universität Salzburg
Fachbereich Geographie und Geologie
Arbeitsgruppe „Geomorphologie und Um-
weltsysteme“

Prof. Dr. Lothar Schrott

Dr. Jan-Christoph Otto

Mag. Barbara Ebohon (2009-2010)

Msc. Magdalena Rupprechter (2010-2011)

Bsc. Marie-Luise Rosner (2011-2012)

In Kooperation mit:

Academia Engiadina, Samedan (CH)

Dr. Felix Keller

Geologischer Dienst Land Salzburg

Mag. Gerald Valentin

 **geomorphology.at**
surface and subsurface competence

 **ACADEMIA
ENGIADINA**

 **Land Salzburg**
Für unser Land!

Projektpartner:

 **Nationalpark
Hohe Tauern**

 **KITZSTEINHORN**
ZELL AM SEE · KAPRUN

Verbund

 **OBB**
Infrastruktur Bau

 **TAL**

 **Salzburg AG**

 **OeAV**
Oesterreichischer
Alpenverein

Salzburg, Januar 2012

Autoren:

Lothar Schrott

Jan-Christoph Otto

Felix Keller

Marie-Luise Rosner

Universität Salzburg

Arbeitsgruppe für Geomorphologie

und Umweltforschung

Hellbrunnerstrasse 34

5020 Salzburg



Permafrost in den Hohen Tauern Abschlussbericht

Inhalt:

Vorwort

1.	Einleitung und Motivation	5
2.	Projektziele und Produkte	7
3.	Methodik und Datenbasis.....	8
	3.1. Erfassung der lokalen Permafrostverbreitung	8
	3.2. Modellierung	9
4.	Ergebnisse	16
	4.1. Rezente Permafrostverbreitung	16
	4.2. Szenarien der Permafrostverbreitung.....	19
5.	Validierung der Modellergebnisse.....	21
6.	Die Permalp-Karte im Vergleich zur PermaNet-Karte	25
7.	Empfehlungen für Entscheidungsträger und die interessierte Öffentlichkeit	27
8.	Ausblick.....	29
	Zusammenfassung.....	29
	Anhang.....	30
I.	Öffentlichkeitsarbeit und Publikationen	30
II.	Literatur	32

Vorwort zum Abschlussbericht "Permalp"



Sehr geehrte Damen und Herren!

Das Bundesland Salzburg besitzt mit den Hohen Tauern einen maßgeblichen Anteil am österreichischen Alpenraum. Die gebirgige Topographie dieser Gebirgskette begünstigt die touristische Nutzung, stellt aber für die Erhaltung von Verkehrswegen und Infrastruktureinrichtungen eine große Herausforderung dar. Weiters ist zu beachten, dass sich das Hochgebirge ständig verändert. So ist seit dem 19. Jahrhundert die durchschnittliche Jahrestemperatur um rund 2° C gestiegen; Tendenz steigend. Als Folgeerscheinung wärmerer Temperaturen taut dauerhaft gefrorener Boden mehr und mehr auf und mit dem Rückschreiten des Permafrostes verlieren Hänge und Felswände an Stabilität. Felsstürze, Rutschungen und Muren sind die unmittelbare Folge.

Das Land Salzburg hat sich in Kooperation mit der Universität Salzburg dem Thema angenommen und das Projekt "Permalp" ins Leben gerufen. Permalp verfolgt das Ziel, das nicht sichtbare Phänomen Permafrost zu quantifizieren und dessen Verbreitung auf einer Karte darzustellen. Im Hinblick auf zukünftige klimatische Veränderungen können damit Gefahrenpotentiale erfasst und ein Hilfsmittel zur Risikobewertung für bestehende und zukünftige Infrastruktur - und Tourismusanlagen bereitgestellt werden. Konkrete Nutzungs- und Handlungsempfehlungen sollen in der Folge die Karte ergänzen und Entscheidungsträgern dabei helfen, den Permafrost zu erkennen, besser zu verstehen und bei Baumaßnahmen zu berücksichtigen.

Mein Dank gilt den Projektpartner, die einen wichtigen Beitrag zum Zustandekommen des Projektes Permalp geleistet haben und freue mich über die gelungene Kooperation des Landes Salzburg mit der Universität Salzburg und den damit einhergehenden Diskurs zwischen Wissenschaft und Praxis. Ich bin zuversichtlich, dass damit ein wichtiger Beitrag zur sinnvollen Nutzung des hochalpinen Raumes geleistet worden ist.

Ihr



Dr. Wilfried Haslauer

Landeshauptmann-Stellvertreter

1. Einleitung und Motivation

Im Rahmen der zunehmenden Berichterstattung zu den Folgen des Klima- und Umweltwandels ist auch das Thema Permafrost in den letzten Jahren verstärkt in der Öffentlichkeit und in den Medien bekannt geworden. Durch ein vermehrtes Auftreten von Felsstürzen in besonders heißen Sommern (z.B. 2003 und 2005) und durch Beeinträchtigung von hochalpinen Wanderwegen und Bauwerken machen sich Veränderungen des eher unscheinbaren Phänomens Permafrost bemerkbar, die direkte und indirekte Auswirkungen auf die Nutzung des Hochgebirgsraum haben können (s. Infobox 3 und 4). Die Erforschung des Permafrostes im Hochgebirge ist ein vergleichsweise junger Forschungszweig, der systematisch erst seit den 1970ern betrieben wird. Da es sich bei Permafrost um ein rein thermisches Phänomen handelt (s. Infobox 1) lässt sich die räumliche Verbreitung nur über Umwege aus der Oberfläche ableiten. Das Projekt Permalp hat das Ziel, eine bislang nicht verfügbare detaillierte Permafrostverbreitungskarte für die Hohen Tauern zu erstellen.

Erste Ansätze Permafrost-Indikatoren im Gelände zu nutzen und eine räumliche Verbreitung abzuschätzen wurden bereits 1975 von Wilfried Haerberli (Schweiz) unternommen. Er hat die Beziehung zwischen dem Auftreten von Permafrost und bestimmten topographischen Verhältnissen in sogenannten „Faustregeln“ festgehalten. Diese Faustregeln bilden die Basis für empirisch-statistische Modelle, die auch im Projekt Permalp verwendet wurden (siehe Kapitel 3, Methodik). Seit den 1990er Jahren wurden in der Schweiz eine ganze Reihe von unterschiedlichen Verbreitungsmodellen entwickelt, die im Jahre 2005 zu einer landesweiten Hinweiskarte der potentiellen Permafrostverbreitung in der Schweiz (BAFU

2005) geführt haben. Für Österreich lieferte Lieb (1996) die erste, flächendeckende Untersuchung zum Thema Permafrost und erfasste und analysierte den Permafrostzeiger Blockgletscher (siehe Infobox 2). Die erste landesweite, digital verfügbare Verbreitungskarte für Österreich wurde im Rahmen einer Diplomarbeit an der Universität Wien erstellt. In dieser Arbeit sind die Faustregeln aus der Schweiz mit Hilfe der Blockgletscherverbreitung von Lieb an die Österreichischen Alpen angepasst worden (Ebohon und Schrott 2008). Bei dieser Modellierung wurde eine Fläche von 2% des Landes Österreich als potentielle Permafrostverbreitung ausgewiesen. Eine Validierung dieser Modellierung war im Rahmen der Diplomarbeit nur sehr eingeschränkt möglich und bedarf weiterführender Studien.

Eine alpenweite Simulation der Permafrostverbreitung wurde mit dem AlpineSpace Projekt PermaNet realisiert (Mair et al. 2011). Diese Modellierung basiert auf 400 direkten und indirekten Permafrostnachweisen, wie z.B. Bohrlochtemperaturen, Untergrundtemperaturen, geophysikalischen Untersuchungen, Bewegungsmessungen, und auf einem alpenweiten Blockgletscherinventar. Die Abschätzung der Permafrostverbreitung erfolgte mit einem statistischen Verfahren und hat zu einer sehr weitläufigen Verbreitung geführt. Hierbei wird die tatsächliche Dimension der Permafrostgebiete wahrscheinlich stark überschätzt. Der Legendenschlüssel der PermaNet-Karte weist drei Kategorien auf (Permafrost unter nahezu allen Bedingungen, Permafrost meist unter kalten Bedingungen, Permafrost nur unter sehr kalten Bedingungen) die wahrscheinlich in der Praxis nur schwer verständlich sind. Eine Validierung der Modellergebnisse ist im Projekt PermaNet nicht erfolgt. Ein Vergleich der Modellergebnisse von Permalp mit PermaNet erfolgt in Kapitel 6.

Auch wenn die Kenntnisse über das Phänomen Permafrost in den Alpen besser sind als in den meisten Hochgebirgen der Welt, wissen wir sehr wenig über das tatsächliche Vorkommen.



Foto: R. Delleske

Daher ist die räumliche Verbreitung von Permafrost in Österreich weiterhin nicht zuverlässig großflächig und detailliert erfasst. Das Projekt Permalp hat sich zum Ziel gesetzt, diese Lücke zu schließen und für den Bereich der Hohen Tauern eine detaillierte, regional angepasste Permafrostkarte zu erstellen, die für unterschiedliche Anwender neben der wissenschaftlichen Aussagekraft auch einen praktischen Nutzen hat.

In Österreich muss auf rund 2% der Staatsfläche (~1600 km²) mit Permafrost gerechnet werden. Die räumliche Verbreitung von Permafrost ist in vielen Regionen noch nicht genau bekannt.

Infobox 1 Permafrost – Definition und Grundlagen

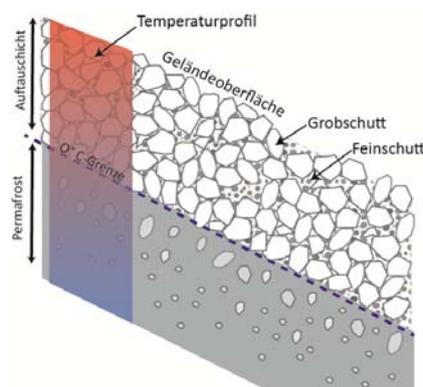
Permafrost ist eine thermische Eigenschaft des Untergrundes. Definiert wird das Phänomen, unabhängig von Wasser- bzw. Eisgehalt oder Lithologie, als Lithosphärenmaterial, das mindestens über zwei aufeinander folgende Jahre Temperaturen von $\leq 0^{\circ}\text{C}$ aufweist (IPA 2012). Laut dieser Definition ist Permafrost rein thermisch definiert, die Existenz von Eis ist folglich keine zwingende Notwendigkeit. Deshalb wird zwischen eishaltigem und eisfreiem Permafrost unterschieden. Eisfreier Permafrost kann in den Alpen im Festgestein vorkommen.

Rund ein Viertel der Erdoberfläche ist beeinflusst von Permafrost. Der größte Teil davon ist jedoch in den Hohen Breiten zu finden (polarer und subpolarer Permafrost). In Österreich wird von einer Permafrostfläche von etwa 2% der Landesfläche bzw. von rund 1600 km² ausgegangen (EBOHON & SCHROTT 2008).

Über dem permanent gefrorenen Permafrostkörper bildet sich eine Auftauschicht, die in den Sommermonaten bis zu 6 m auftauen kann.

Der Nachweis von Permafrost ist i.d.R. kompliziert, da an der Oberfläche meist keine Hinweise zu sehen sind. Deshalb muss die Prospektion von Permafrost mit Hilfe von aufwändigen Bohrungen oder indirekten Messmethoden (z.B. Geophysik) erfolgen. Ein sichtbarer Indikator für diskontinuierlichen Permafrost in den Alpen sind z.B. aktive Blockgletscher.

Permafrost ist nicht nur von der Lufttemperatur abhängig, sondern vor allem im Gebirge besonders von der Sonneneinstrahlung, der Beschaffenheit des Untergrundes und der Schneedecke (siehe Kapitel 3). Die Wirkungszusammenhänge zwischen diesen Faktoren sind jedoch sehr komplex, so dass viele von ihnen bis heute nur ansatzweise verstanden werden. Dazu trägt sicherlich auch bei, dass die Permafrostforschung in den Hochgebirgsregionen eine relativ junge Geschichte hat. In den Europäischen Alpen begann die Permafrostforschung in den 1970er Jahren und erfuhr besonders in der letzten Dekade enormen Aufschwung.



Schematische Darstellung der Auftauschicht

2. Projektziele und Produkte

Die Projektziele und Produkte im Einzelnen:

Hauptprodukt

- Karte der Permafrostverbreitung für die Region der Hohen Tauern auf Basis eines digitalen Höhenmodells mit hoher Auflösung (10 m Zellengröße).

Teilziele und weitere Produkte

- Anpassung des topographisch-klimatischen Verbreitungsschlüssels für das Gebiet der Hohen Tauern.
- Modellierung der Permafrostverbreitung für die Hohen Tauern mittels eines erweiterten empirisch-statistischen Modells (Permakart 3.1).

- Erfassung von Permafrost Hinweisen in lokalen Untersuchungsgebieten.
- Validierung der Modellergebnisse.
- Entwicklung von Permafrostszenarien unter Berücksichtigung einer möglichen zukünftigen Klimaentwicklung.
- Ausarbeitung von Empfehlungen im Umgang mit der Permafrostverbreitungskarte.

Das Hauptprodukt des Projektes ist die Erstellung einer detaillierten Karte der Permafrostverbreitung für die Hohen Tauern

Infobox 2

Blockgletscher

Ein aktiver Blockgletscher ist ein geomorphologischer Permafrostindikator des Hochgebirges, der aus einem Gemisch aus Schutt, Eis und Luft besteht und sich aufgrund der plastischen Verformung des Eises kriechend hangabwärts bewegt. Zu erkennen sind Blockgletscher gut an ihrer Zungen- bzw. Lobenform und an den sichtbaren Wülsten und Furchen, die sich infolge der Kriechbewegungen herausbilden. Blockgletscher bewegen sich i.d.R. mit Geschwindigkeiten von mehreren Zentimetern bis wenigen Metern pro Jahr hangabwärts. Die Aktivität lässt sich anhand von vertikalen und horizontalen Bewegungsmessungen feststellen. Die Voraussetzungen zur Blockgletscherbildung in den Alpen sind negative Jahresmitteltemperaturen bei ausreichender Schuttmenge und geringem Jahresniederschlag, der gleichermaßen die Entstehung von Gletschern verhindert. Neben aktiven Blockgletschern treten auch inaktive und fossile Blockgletscher auf. Bei inaktiven Blockgletschern ist noch ein gefrorener Rest in



Foto: J. Götz

Blockgletscher im Dösental, Kärnten

der Blockschuttmasse vorhanden – eine Bewegung kann jedoch nicht mehr erfolgen. Bei fossilen Blockgletschern ist der Eisgehalt vollständig ausgeschmolzen – darauf weisen die Kollapsspuren an der Oberfläche und eine teilweise vorhandene Vegetationsdecke hin. Sie sind Indikatoren kälterer Epochen in der Vergangenheit und Zeugnis einer tiefer liegenden Permafrostuntergrenze in den Alpen.

Aktive Blockgletscher sind zungen- oder lobenförmig gefrorene Schuttmassen, die sich plastisch-viskos hangabwärts bewegen. Sie sind geomorphologische Zeigerphänomene für diskontinuierlichen Permafrost im Hochgebirge.

3. Methodik und Datenbasis

In sechs lokalen Testgebieten (Abb. 1) wurden Hin- und Nachweise zu lokalen Permafrostvorkommen ermittelt. Die Auswertung der Geländedaten sowie die Anpassung und Erweiterung des Modells waren weitere methodische Schritte. Zusätzlich zu eigens erhobenen Daten sind externe Permafrostnachweise z.B. von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) aus dem Umfeld des Sonnblick-Observatoriums genutzt worden

3.1 Erfassung der lokalen Permafrostverbreitung

Um die lokale Permafrostpräsenz oder—absenz zu ermitteln sind neben dem direkten geomorphologischen Zeigerphänomen des Blockgletschers v.a. drei Hauptmethoden angewandt worden: Die Messung der Basistemperatur der Schneedecke (BTS), die Messung der oberflächennahen Untergrundtemperatur (*ground surface temperature* GST) und die geophysikalische Erkundung der Untergrundverhältnisse. Dabei erfolgte die Aufnahme der BTS-Werte im Spätwinter (März-April), während die geophysikalischen Messungen mehrheitlich im Sommer, in der schneefreien Zeit durchgeführt wurden (mit Ausnahme einzelner Radarmessungen auf Schnee). Die Erfassung der oberflächennahen Untergrundtemperatur erfolgte

Tab. 1: Übersicht der Geländemessungen in den Testgebieten

Methoden	Anzahl der Messungen	mit Hinweis auf Permafrost
BTS	614	332
UTL (GST)	25	12
Geoelektrik	25	12
Georadar	12	5

te mittels Datenlogger, die ganzjährig im Gelände installiert sind bzw. waren. Diese Messungen dienten zur Erfassung tatsächlicher Permafrostvorkommen auf lokaler Ebene und somit auch zur Validierung der modellierten Permafrostverbreitung in den Hohen Tauern (s. Abb.2 und Kap. 5).

BTS-Messungen

Bei der Basistemperatur der winterlichen Schneedecke (BTS) wird die Temperatur der Geländeoberfläche (Fels, Schutt oder Boden) an der Basis der spätwinterlichen Schneedecke (i.d.R. Ende März) gemessen; vorausgesetzt die Schneedecke ist ausreichend mächtig (mind. 80 cm) und kann die Bodenoberfläche vor atmosphärischen Einflüssen schützen. Mit Temperatursonden wird durch die Schneedecke hindurch die Temperatur an der Schneedeckenbasis, d.h. an der Boden-, Fels-, Schuttoberfläche gemessen. In den Testgebieten wurden insgesamt 614 BTS-Messungen vorgenommen. In den Alpen wird davon ausgegangen,

Die Karte der Permafrostverbreitung basiert zum einem auf einer Computersimulation und zum anderen auf im Gelände erhobenen Daten, die Permafrosthinweise geben.

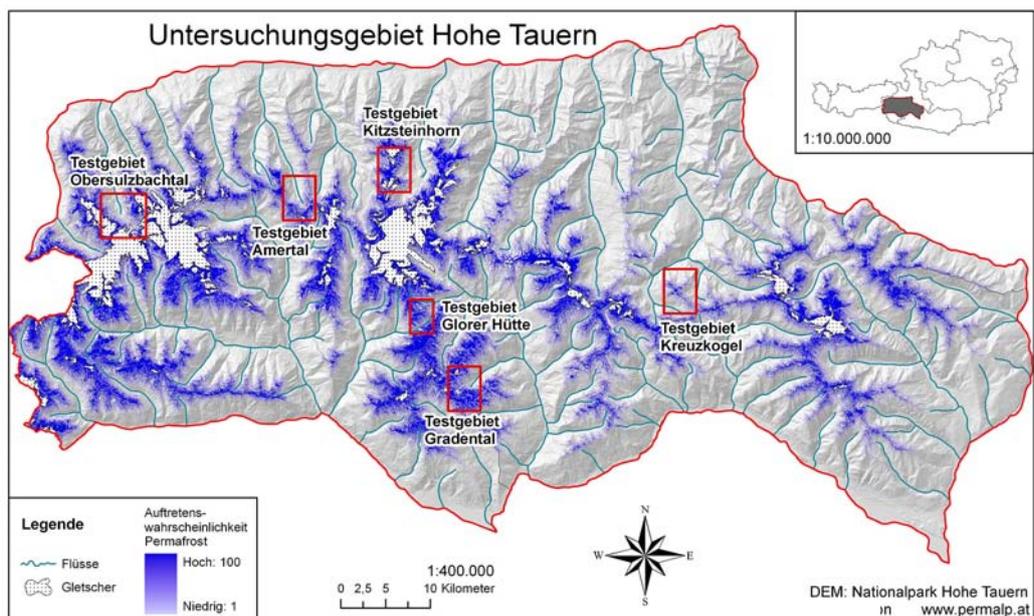


Abb. 1: Lokale Testgebiete im Gebiet der Hohen Tauern. In diesen Regionen wurde die Permafrostverbreitung mittels Temperaturloggern, BTS-Werten und geophysikalischen Methoden untersucht.

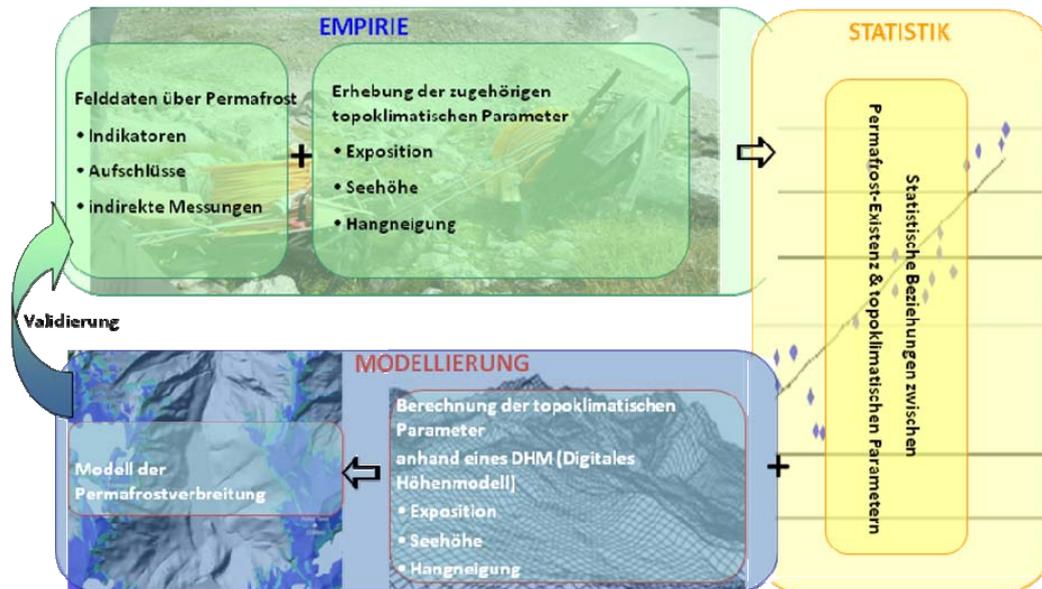


Abb. 2: Strategie zur Modellierung der Permafrostverbreitung im Geographischen Informationssystem.

dass BTS-Werte von unter -3°C und darunter wahrscheinliches Auftreten von Permafrost anzeigen. Liegen die Werte zwischen -2°C und -3°C ist das auf Auftreten von Permafrost möglich; bei Werten über -2°C ist das Auftreten von Permafrost unwahrscheinlich (Piemonte 2011). Obwohl sich die BTS-Messungen in den Alpen bewährt haben und seit den 1970er Jahren eingesetzt werden, unterliegt auch diese indirekte Messmethode gewissen Unsicherheiten. Besonders grobblockige Untergrundstrukturen, Luftzirkulationen in der Schneedecke und Eisbildungen können die BTS-Werte so verändern, dass nicht zweifelsfrei auf Permafrostpräsenz oder -absenz geschlossen werden kann (vgl. Kap. 5).

GST-Ground surface temperature

Eine weitere Messmethode, die der o.g. BTS ähnelt, ist die Messung der Boden-, Schutt-, Fels- oberflächentemperatur mittels eines wenige Zentimeter unter der Geländeoberfläche eingebrachten Temperaturloggers. Insgesamt wurden in den Testgebieten 25 solcher Miniaturtemperaturlogger—sogenannte UTL (Universal Temperature Logger) - installiert (Tab.1). Mit Hilfe des saisonalen Temperaturverlaufs kann auf Permafrostvorkommen geschlossen werden. Typischerweise stellt sich dabei folgender Temperaturverlauf dar (Vergleiche Abb. 3):

- Während der schneefreien Phase, Spätfrühling bis Herbst, ist die GST von den Temperaturschwankungen der Lufttemperatur bestimmt und zeigt daher ausgeprägte Tagesschwankungen.
- Im Spätherbst und Frühwinter zeigt die GST negative Werte, besonders bei geringmächtiger oder noch fehlender Schneedecke.
- Im weiteren Verlauf und bei anwachsender Schneedecke, spiegelt die GST die Isolation mit längeren kalten Tagesgängen wider. Diese werden bei Schmelze unterbrochen durch mögliche Warmphasen.
- Im Winter, bei genügend mächtiger Schneedecke, wird der Temperaturverlauf stabil und Schwankungen sind kaum auszumachen. Es wird eine sogenannte *Winter Equilibrium Temperature* durch den Wärmefluss im Untergrund erreicht.
- Während der Schneeschmelze verliert die schützende Schneedecke die Isolationseigenschaft und es kommt zu einer kontinuierlichen Erwärmung der Untergrundtemperatur. Erreicht die GST wieder Temperaturen um den Gefrierpunkt kommt es aufgrund der Schmelzwärme (latente Wärme) zu einer längeren Periode mit Temperatu-

Beim Temperaturphänomen Permafrost geben winterliche Temperaturen der Oberflächen-temperatur Hinweise auf Permafrost im Untergrund.

ren bei konstant 0°C. Dieser Effekt wird Nullschleier genannt (s. Abb. 3).

Bei Permafrostpräsenz wird die Untergrundtemperatur durch den gefrorenen Untergrund beeinflusst und führt zu stark negativen winterlichen Temperaturen. Bei konstant tiefen Temperaturen unter -3°C kann mit dieser Methode ebenfalls auf wahrscheinliches Permafrostvorkommen geschlossen werden.

Geophysikalische Erkundung des Untergrundes – Geoelektrik und Bodenradar

In den Testgebieten wurden entlang von rund 100–300 m langen Profillinien geoelektrische Sondierungen und Bodenradarmessungen vorgenommen. Sie dienen zur Absicherung der BTS-Werte und zur Prospektion von lokalen Permafrostvorkommen (vgl. Schrott & Sass 2008).

Bei der geoelektrischen Messung wird über Primärelektroden (Stahlspeie) ein elektrisches Feld im Untergrund aufgebaut. Mit Potenzial- oder Sekundärelektroden kann dann der Potenzialunterschied (Spannungsabfall) gemessen werden. Aus diesem Unterschied sowie der Stromstärke des elektrischen Feldes lassen sich Rückschlüsse

auf die spezifischen elektrischen Widerstände im Untergrund ableiten. Dies wird in Widerstandstomogrammen visualisiert (s. Abb. 4). Da Eis und Permafrost im Gegensatz zu Wasser oder ungefrorenem Boden schlechte Leiter sind und daher hohe Widerstandswerte aufweisen, kann damit ein Rückschluss auf gefrorenen und ungefrorenen Untergrundzustände getroffen werden.

Da es sich bei der geoelektrischen Sondierung um ein indirektes Verfahren handelt, ist es ratsam und nützlich, ein komplementäres Messverfahren einzusetzen. Das Bodenradar (oder auch GPR - Ground Penetrating Radar) ist ein hochfrequentes elektromagnetisches Impulsverfahren und verwendet Antennen zur Aussendung und Aufnahme von Impulsen von i.d.R. von 100 bis 500 MHz. Die Wahl der Frequenz hängt von der gewünschten Eindringtiefe bzw. Auflösung ab; je hochfrequenter die Impulse ausgesandt werden, desto besser ist die räumliche Auflösung aber umso geringer ist die Eindringtiefe. Je nach Untergrundbeschaffenheit werden die elektromagnetischen Pulse an markanten Gesteins- bzw. Substratwechseln oder Objekten reflektiert und von einer zweiten Antenne detektiert. Im Radargramm sind diese Reflektionen an Inhomogenitäten oder Hyperbeln zu er-

In den Testgebieten wurden 25 „Universal-Temperature-Logger“ installiert, um mit Hilfe des Verlaufs der oberflächennahen Bodentemperatur auf Permafrost im Untergrund zu schließen.

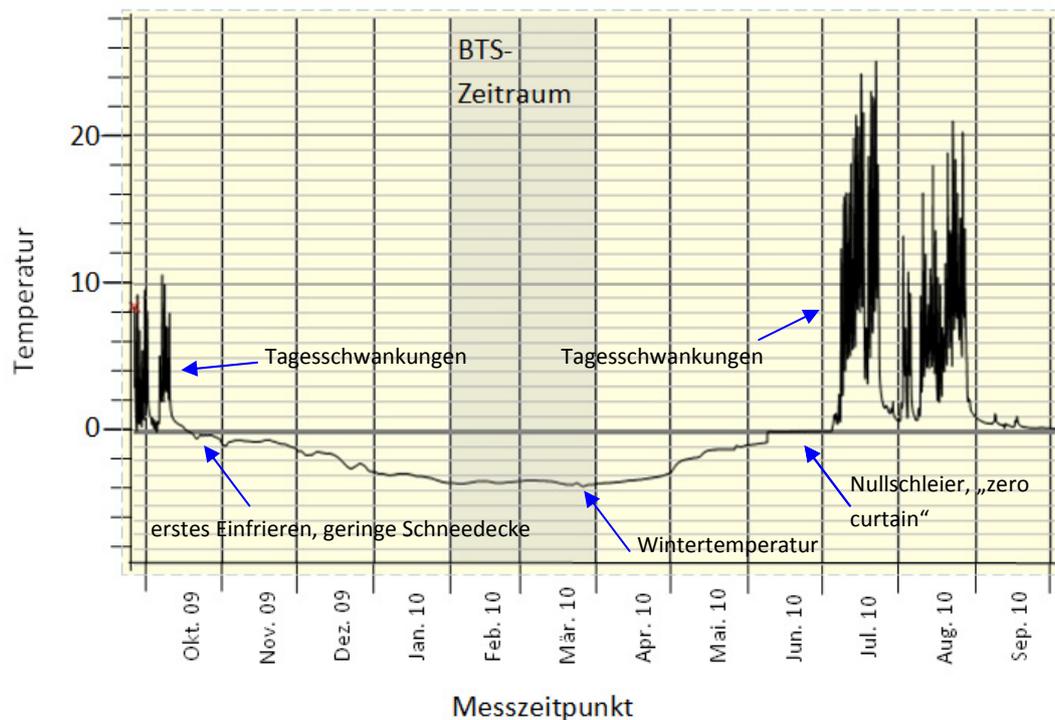


Abb. 3: Datenreihe eines UTL-Loggers zur Messung der oberflächennahen Bodentemperatur. Loggerstandort: Kitzsteinhorn (Maurerkogel), Höhe: 2890 m , Messzeitraum Sept. 2009—Sept. 2010 T-Min: -3,7°C, T-Mittel: -0,3°C, T-Max: 25,0°C

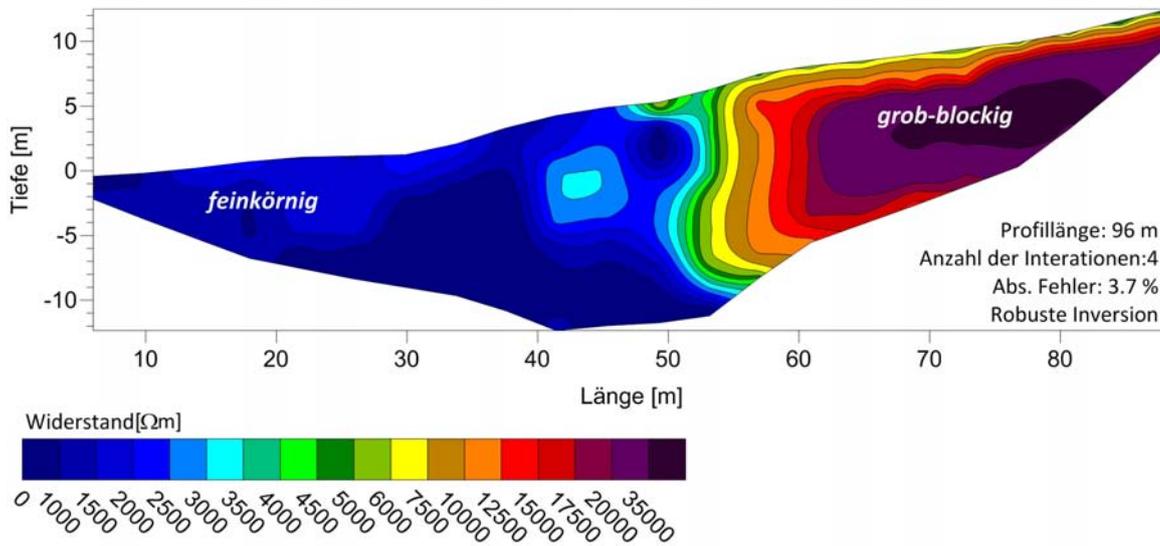


Abb. 4: Geoelektrisches Widerstandsfeld gemessen im Glatzbach-Einzugsgebiet (Kärnten). Werte oberhalb 10.000 Ohm m zeigen die Permafrostbereiche an diesem Hang an. Hier findet sich der Permafrost in Bereichen mit grobblockigen Material, während die feinkörnigen Schuttbereiche unterhalb eisfrei sind.

kennen. Aufgrund der Geschwindigkeit mit der sich die Radarwellen im Untergrund ausbreiten, kann auf das Material geschlossen werden. Eis, Luft und Gestein haben deutlich unterscheidbare Ausbreitungsgeschwindigkeiten (s. Abb. 5).

Die eingesetzten geophysikalischen Verfahren haben sich mittlerweile als Standardverfahren bei der Permafrostdetektion etabliert (Hauck & Kneisel 2008, Schrott & Sass 2008).

3.2 Modellierung

Grundlagen zur Berechnung der Permafrostverbreitung

Permafrost ist definitionsgemäss ein thermisches Phänomen des Untergrundes und hängt damit praktisch ausschliesslich von der Energiebilanz an der Erdoberfläche ab. Hinsichtlich der Permafrostverbreitung entscheiden klimatische Faktoren (Lufttemperatur, Strahlungseinflüsse und verschiedenste Wärmeaustauschprozesse), topographische Einflüsse (Exposition, Hangneigung) und ortsspezifische Charakteristiken (Vegetation, Schneebedeckung, Oberflächenstruktur). Im Hin-

Geophysikalische Informationen des Untergrunds, z.B. der elektrische Widerstand, werden zur Detektion von Permafrost genutzt.

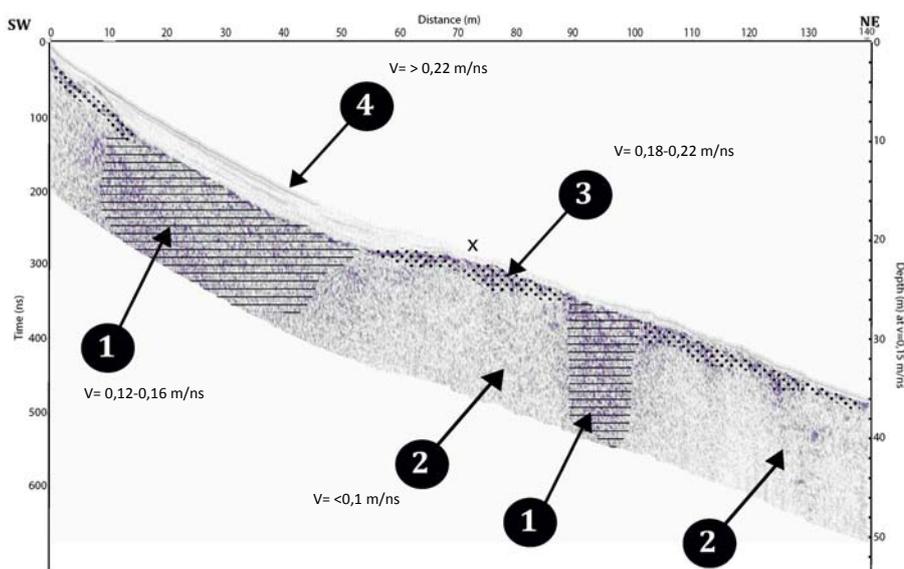


Abb. 5: Radarmessung im Glatzbach-Einzugsgebiet (Kärnten) mit isolierten Permafrostbereichen (1) neben ungefrorenen Bereichen (2). Da es sich um eine Messung im Winter handelt, ist dazu die Zone des Bodenfrosts an der Oberfläche (3) sowie die Schneebedeckung (4) deutlich zu erkennen.



Abb. 6: Geoelektrische Sondierung am Maurerkogel im Umfeld des Kitzsteinhorns

Abb. 7: GST Datalogger am Maurerkogel auf 2890m Höhe



Geländebefunde liefern wichtige Hinweise zu potenziellen Permafrostvorkommen und sind unverzichtbar bei der Validierung von Modellen.

blick auf die Modellierung der Permafrostverbreitung können die Lufttemperatur und die potenzielle kurzweilige Einstrahlung relativ einfach mit Hilfe des digitalen Höhenmodelles abgebildet werden. Auch die topographischen Aspekte wie Seehöhe, Exposition, Hangneigung, Wölbung sind ebenfalls relativ einfach unter Nutzung eines digitalen Höhenmodelles berechenbar. Über die Analyse der topographischen Faktoren können neben den Temperatur- und Strahlungseinflüssen auch Windeinflüsse und Schneedeckeneffekte berücksichtigt werden.

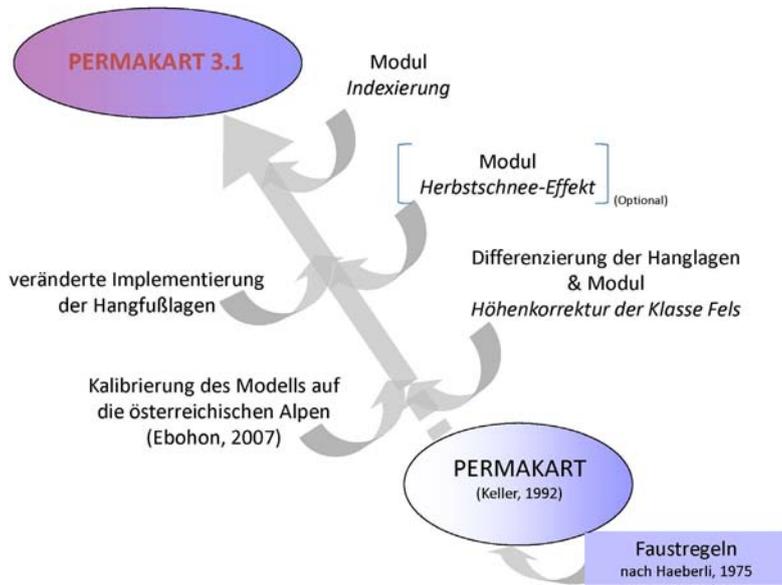
Berechnung der Permafrostverbreitung mit der Applikation Permakart

Infolge der komplexen Zusammenhänge zwischen klimatischen Einflussgrößen, Reliefeffekten und lokalen Aspekten ist für die grossmassstäbige Modellierung der Permafrostverbreitung die statistische Verknüpfung von empiri-

schen Daten mit geographischen Modellen zielführend. Dabei spielt der Einsatz von Geographischen Informationssystemen sowohl bei der Modellierung wie auch bei Verarbeitung der Felddaten eine zentrale Rolle. Feldmessungen können über die Verknüpfung ihrer geographischen Position mit aus dem digitalen Höhenmodell abgeleiteten Grössen wie Exposition, Seehöhe, Hangneigung, potenzielle Sonneneinstrahlung und Relieflage attribuiert werden. Mittels statistischer Beziehungen können Felddaten zur Entwicklung und Kalibrierung von Modellen zur Berechnung der Permafrostverbreitung verwendet werden. Dies führt zu einem iterativen Prozess, indem zur Validierung von berechneten Permafrostverbreitungskarten wiederum gezielt neue Felddaten erhoben werden können, die ihrerseits dazu beitragen, die Modellierungen laufend zu verbessern.

Die ersten GIS-Programme zur Berechnung der alpinen Permafrostverbreitung (z.B. Permakart

Abb. 8: Die Entwicklung des Programms Permakart



1.0, vgl. Abb. 8) konnten, basierend auf Teilen der bereits 1975 publizierten Faustregeln über die Permafrostverbreitung in den Alpen (Haerberli 1975), über einfache Geländeanalysen zur Höhenlage, Exposition und Hangfusslagen bereits verschiedene Grössen wie die höhenabhängige Lufttemperatur, expositionsbedingte Strahlungseffekte und stark vereinfachte Schneeeffekte (Lawinenschneeablagerungen) berücksichtigen (Keller 1992).

Dank der Zusammenarbeit von acht Schweizerischen Forschungsinstituten konnte mit Hilfe von ca. 4000 BTS-Sondierungen (Haerberli 1973) die erste empirisch validierte Schweizerische Permafrostkarte publiziert werden (Keller et al. 1998). Eine wesentliche Erweiterung brachte dann die im Nationalen (CH) Forschungsprogramm Nr. 31 entwickelte Indexierung (Permakart 2), welche die früher unterschiedenen drei Klassen mit einem Index zwischen 1 und 100 weiter über eine Höhenfunktion wesentlich weiter differenzierten. Als

Syntheseprodukt entstand aus diesem Forschungsprogramm die erste im Buchhandel erhältliche grossmasstäbige glaziologische Karte (Keller et al. 1998). Einen weiteren Fortschritt brachten die neuen Erkenntnisse über Temperaturen im Felspermafrost (Gruber et al. 2004).

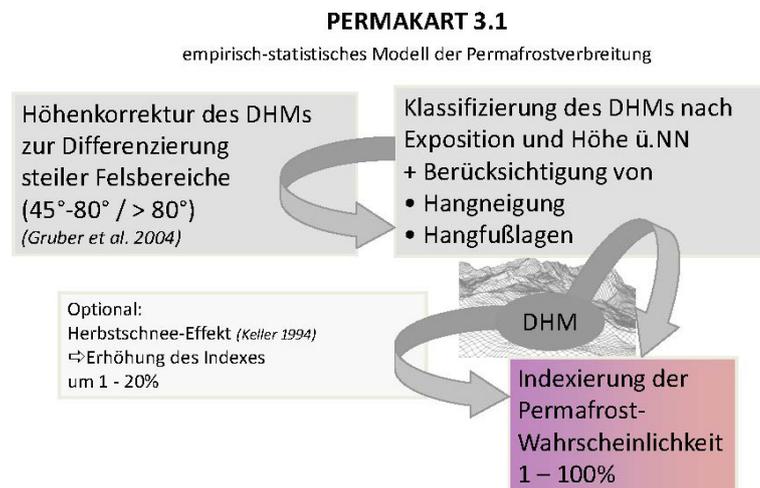
Die 2005 vom Schweizerischen Bundesamt für Umwelt (BAFU) unter *map.geo.admin.ch* publizierte hochauflösende Schweizerische Permafrostkarte wurde mit den im Permakart 3 eingeflossenen neuen Erkenntnissen zum Felspermafrost gerechnet (BAFU 2005). Auf der Basis von umfangreichen Felddaten gelang es Ebohon & Schrott (2008) den topoklimatischen Schlüssel auf die Verhältnisse in den österreichischen Alpen zu übertragen.

Zur Programmstruktur von Permakart 3.1

In der Abbildung 8 ist der in Permakart 3.1 realisierte Ablauf zur Berechnung der Permafrostverbreitung schematisch dargestellt. Als einzige not-

Das Modell Permakart wurde im Projekt Permalp um wichtige Attribute wie Felskorrektur oder Herbstschnee-Effekt erweitert.

Abb. 9: Berechnung der Permafrostverbreitung in Permakart 3.1



Der Herbstschnee-Effekt kann zu tiefer liegenden Permafrostvorkommen in den Alpen führen.

wendige Datengrundlage muss ein digitales Höhenmodell vorliegen. Liegt ein Datensatz mit Angaben über Felsgebiete vor, kann dieser zur Verbesserung des Ergebnisses eingesetzt werden.

Im ersten Block wird mit verschiedenen Reliefanalysen eine Klassifikation nach unterschiedlichen Kriterien vorgenommen (Abb. 9). Mittels der Berechnung der Hangneigung werden Hänge steiler als 11° ausgeschieden. Die darauffolgende Wölbungsanalyse ermöglicht die Identifikation von Hangfusslagen (= Übergang vom Hang zum ebenen Gelände). Somit liegen als Ergebnis der Reliefanalysen insgesamt 24 Geländeklassen vor (Abb. 10).

Im nächsten Modul erfolgt eine Höhenkorrektur des digitalen Höhenmodelles zur Differenzierung der Felsbereiche auf der Grundlage neuer Erkenntnisse (Gruber et al. 2004). Demnach kann die Permafrostgrenze in weniger steilen Felsgebieten mit 50° Hangneigung um über 500m höher liegen als in über 70°steilen Felspartien, was mit einer einfachen Polynomfunktion beschrieben werden kann. Um diesen Effekt bei der Modellierung der Permafrostverbreitung zu berücksichtigen, werden vorerst die Felsgebiete identifiziert. Liegt hierzu ein eigener Datensatz vor, kann dieser verwendet werden, andernfalls werden die mehr als 45° steilen aus der bereits erfolgten Hangneigungsanalyse des DHM's als Felsgebiete ausgeschieden. Mittels der aus Gruber et al. (2004) hergeleiteten einfachen Polynomfunktion wird nun das digitale Höhenmodell so modifiziert, dass die kalten steilen Felswänden eine tiefere Seehöhe, resp. weniger steilen Stellen eine grössere Seehöhe erhalten. Damit wird der später zu berechnende Permafrostindex in den kalten Felspartien erhöht und in „wärmeren“ steileren Gebieten relativ gesehen reduziert.

Nun liegen alle Zwischenresultate vor, die im vierten Modul zur Indexierung der Permafrostwahrscheinlichkeit gebraucht werden. Jetzt kommt der topoklimatische Schlüssel zur Anwendung, welcher ursprünglich aus Teilen der Faustregeln von (Haeberli 1975) bestand und später mit den Erkenntnissen über die Verbreitung von Permafrost in Felsgebieten von Gruber et al. (2004) erweitert wurde (Abb. 10). In diesem Schlüssel gibt es jeweils zwei höhen-, expositions- und reliefabhängige Grenzen, die für jede im ersten Modul ermittelte Geländeklasse wie auch für die Felsgebiete die

Höhenlage des Überganges von „kein Permafrost“ zu „Permafrost möglich“ sowie die Höhenlage des Überganges von „möglichem“ zu „wahrscheinlichem“ Permafrost angeben. Die ganze Höhenzone zwischen unterer Grenze und Übergang von „möglichem“ zu „wahrscheinlichem“ Permafrost wird mit einer linearen Funktion auf den Skalenbereich 1 bis 50 für den zu berechnenden Permafrostindex skaliert. Der Übergang von „möglichem“ zu „wahrscheinlichem“ Permafrost erhält in jeder Geländesituation den Wert 50 und weist eine gewisse Analogie zu einer Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Permafrost von 50% auf. Bei allen Punkten oberhalb dieser oberen Grenze nimmt der Permafrostindex um 10 Punkte pro 100 m zu und zwar bis zu einem Maximum von 100 Indexpunkte. Damit resultiert letztlich das Ergebnis der modellierten Permafrostverbreitung in einem Datensatz, welcher für jeden Rasterpunkt mit einem Wert zwischen 0 und 100 eine Art Wahrscheinlichkeit über das Auftreten von Permafrost enthält.

Mögliche Weiterentwicklung von Permakart — Der Herbstschnee-Effekt

Im Zusammenhang mit der vorliegenden Anpassung des Programmes Permakart an die Hohen Tauern ist der von Felix Keller postulierte Herbstschnee-Effekt von besonderer Bedeutung (Keller 1994). Bereits ab September/Oktober ist nämlich in den Alpen oberhalb der Waldgrenze mit Schneefällen zu rechnen. Durch die resultierende, oft dünne Schneedecke werden die einzelnen Komponenten der Energiebilanz vor allem bei klarem Himmel drastisch verändert (Lütschg 2005). Folgende Faktoren beeinflussen dabei die Wärmebilanz:

- Die hohe Emissivität von Schnee (um 0.99) verändert die langwellige Strahlungsbilanz.
- Die kurzweilig eingestrahelte Energie nimmt wegen der erhöhten Albedo ab.
- Die Isolationsfähigkeit der Schneedecke, die im Wesentlichen von der Schneehöhe und der -dichte abhängt, beeinflusst den Wärmefluss aus dem Untergrund.
- Kalte Lufttemperaturen über der Schneeoberfläche wirken sich auf die Energieaus-

tauschvorgänge der Atmosphäre mit der Oberfläche aus.

Alle diese Faktoren führen dazu, dass bei einer dünnen (maximal 40 cm) herbstlichen Schneedecke die Bodentemperaturen bis viermal schneller als im aperen Zustand abkühlen. Die heute im Alpenraum verfügbaren Bohrlochdaten weisen auf den grossen Einfluss der Schneedecke hin (Noetzi and Vonder Mühl 2010), womit die Implementation dieses Effektes notwendig erscheint und zu einer deutlichen Verbesserung des Modells führt.

Eine Möglichkeit den Herbstschnee-Effekt unter Nutzung von digitalen Geländemodellen zu modellieren besteht darin, eine Beziehung zwischen Solarstrahlung bzw. Schattenstunden, Höhe und Herbstschneeverbreitung herzustellen. Die dabei gefundene Funktion kann zur Modellierung der Gebiete mit einer Herbstschneedecke verwendet unter der Annahme, dass diese Schneedecke noch geringmächtig ist (max. 40 cm), damit die Bedin-

gungen für den oben beschriebenen Herbstschnee-Effekt erfüllt sind. Der dabei ebenfalls zu berücksichtigende Temperatureffekt wird über die Multiplikation des digitalen Höhenmodelles (Lufttemperatur als Funktion der Seehöhe) mit den Schattenstunden berücksichtigt. Daraus resultiert ein räumliches Muster über die potentielle Verbreitung des Herbstschnee-Effekts, das dann den Index der Permafrostverbreitung lokal reduziert. Erste Untersuchungen diesen Herbstschnee-Effekt in das Modell zu integrieren sind im Projekt Permalp bereits gelaufen, bedürfen aber noch weiterer Entwicklung und wurden daher in der aktuellen Auswertung nicht berücksichtigt.

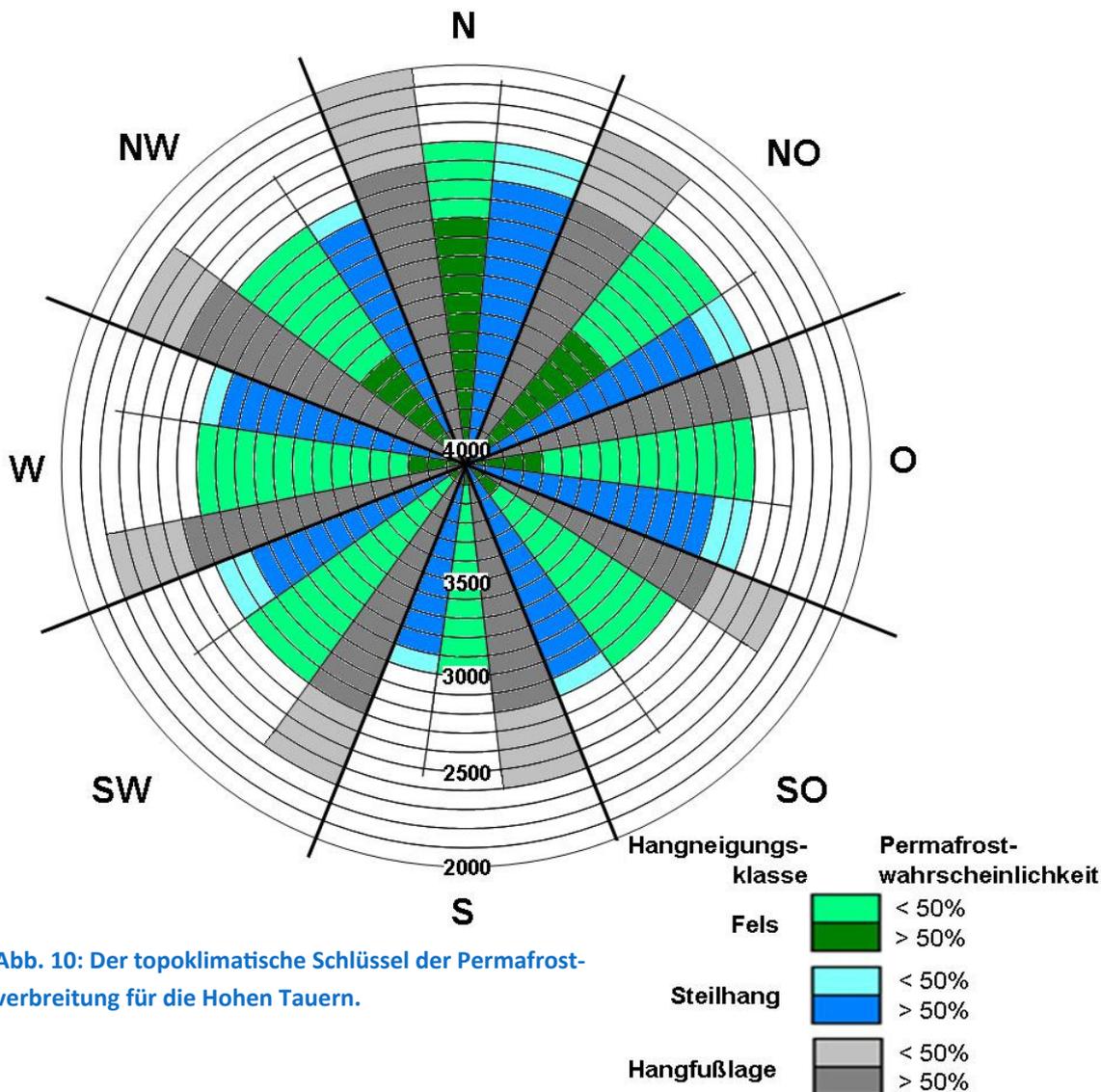


Abb. 10: Der topoklimatische Schlüssel der Permafrostverbreitung für die Hohen Tauern.

Der topoklimatische Schlüssel im Projekt Permalp ist eigens für die Hohen Tauern angepasst worden und weist bei drei Hangneigungsklassen und acht Expositionsklassen die Permafrostwahrscheinlichkeit aus.

4. Ergebnisse

4.1 Rezente Permafrostverbreitung

Im Untersuchungsgebiet Hohe Tauern ist auf einer Fläche von 550 km² mit dem Auftreten von Permafrost zu rechnen. Damit sind etwa 13 % der Gesamtfläche von Permafrost betroffen. Dem gegenüber steht eine Fläche von 160 km² bzw. knapp 4 % die von Gletschern eingenommen wird. Daraus wird deutlich, welche flächenhafte Bedeutung die Existenz von Eis im Untergrund hat. Bei ca. 40% der Permafrostfläche liegt die Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen von Permafrost über 50%. Aufgeteilt nach Bundesländern ergibt sich der größte Flächenanteil für das Gebiet von Osttirol. Hier sind etwa 10% der Landesfläche un-

ter Permafrosteinfluss, im Gegensatz zu nur 3% in Salzburg und weniger als 2% in Kärnten.

Ein Vergleich der neuen Modellierung mit dem bisherigen, von Ebohon und Schrott (2008) publizierten Modell zeigt deutliche Verbesserungen und eine Reduzierung der Permafrostfläche, die den realen Gegebenheiten besser entspricht (Abb. 11 und 12). Die höhere Auflösung des digitalen Geländemodells mit Permakart 3.1 ermöglicht einen höheren Detailgrad. Dadurch wird besser erkennbar, wie sich kleinräumige topographische Unterschiede auf die mögliche Verbreitung von Permafrost auswirken. Am Beispiel des Pasterzengebietes am Großglockner kann zudem die positive Auswirkung der Felskorrektur beobachtet werden (siehe Kapitel 3.3).

Tabelle 2: Modellerte Permafrostverbreitung im Bereich der Hohen Tauern.

Gesamtfläche UG: 4378,8	Permafrostwahrscheinlichkeit (km ²)			Landesfläche (%)	Gletscherfläche 2003 (km ²)
	< 50%	> 50%	Gesamt		
UG Hohe Tauern	346,4	206,8	553,2		163,2
Teil Salzburg	116,8	66	182,8	2,6	60,8
Teil Osttirol	131,2	87,3	218,4	10,8	66,2
Teil Kärnten	98,5	53,5	152	1,6	36,2
NP Hohe Tauern	272,6	182,9	455,4		159,8
Anteil an UG (%)	7,9	4,7	12,6		3,7

550 km² bzw. 12 % der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes sind von Permafrost beeinflusst.

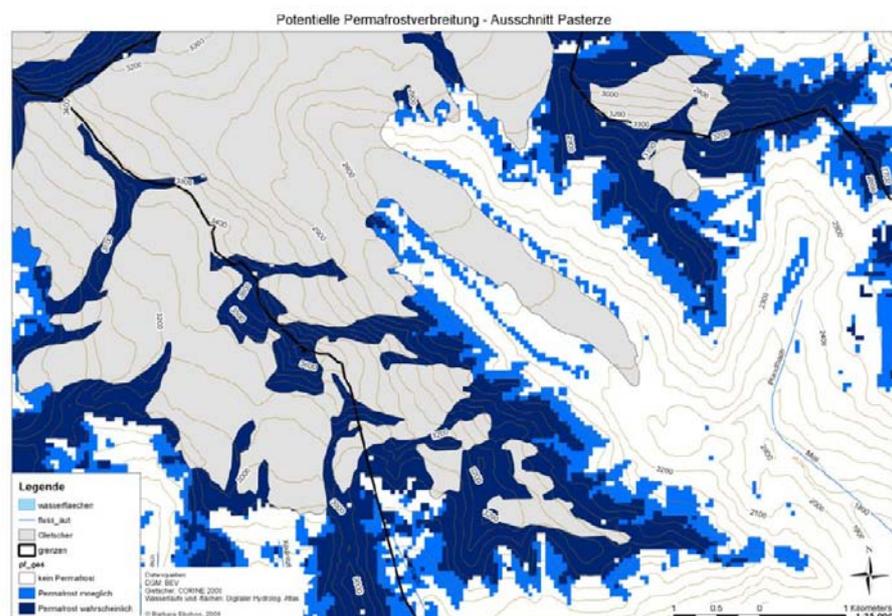


Abb. 11: Permafrostverbreitung Pasterzengebiet mit dem Modell von Ebohon & Schrott (2008) basierend auf einem 50 m Geländemodell.

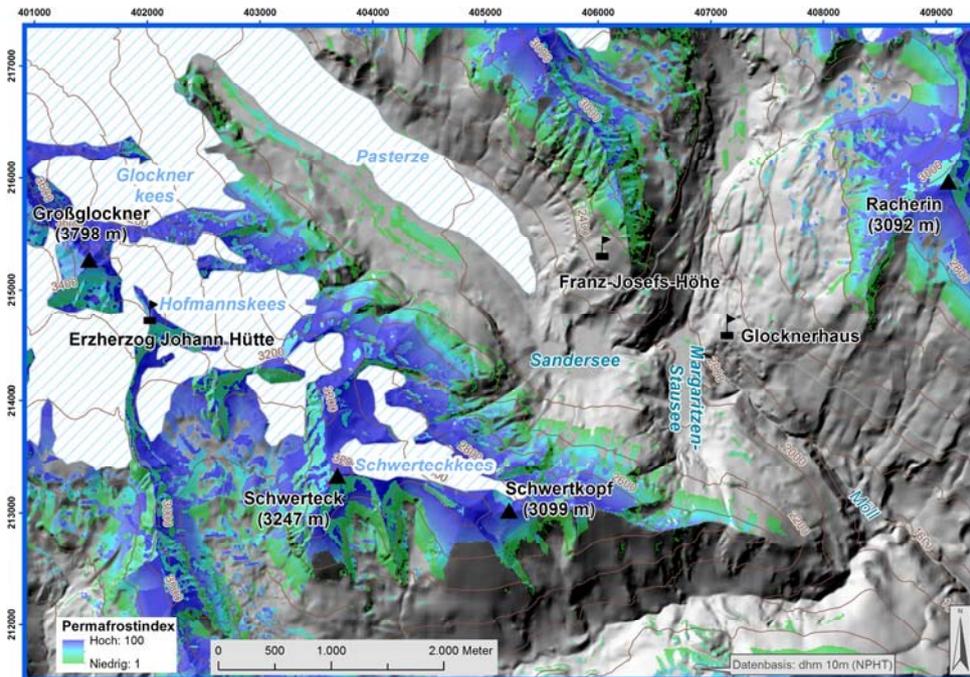


Abb. 12: Permafrostverbreitung Pasterzengebiet berechnet mit Permakart 3.1 auf einem 10 m Geländemodell.

Wie unterschiedlich die Permafrostverbreitung innerhalb der Hohen Tauern sein kann, zeigen zwei Detailkarten aus dem Amertal und dem Kapruner Tal (Abb. 13 und 14). Das Amertal ist ein Beispiel für die sensiblen Höhenlage zwischen 2600 und 3000 m, in denen kleinräumige topographische Unterschiede sowie die Charakteristik des Untergrundes einen großen Einfluss auf das Vorkommen von Permafrost haben können. Permafrost wird im Amertal nur flächendeckend am Talschluss rund um den Amersee modelliert und am Westhang unterhalb des Hochgasser. Wesentlich größere Flächen werden in den beiden westlich des Hochgasser, bzw. nördlich des Hörndl liegenden Kare angezeigt. Der Grund liegt hierfür vor allem in der Exposition dieser Kare nach Norden und Nordwesten, in der permafrostgünstige Bedingungen vorherrschen. Die Hänge östlich des Hochgasser haben dagegen einen niedrigeren Permafrostindex im Vergleich zu den Kare, da sich hier auf gleicher Höhe steil geneigte Felsflächen befinden, in denen die Permafrostwahrscheinlichkeit abnimmt. Das fleckenhafte Muster der Permafrostverbreitung südlich des Amersees konnte in einer Geländekampagne im Rahmen des Projektes mit Hilfe der Geoelektrik nachgewiesen werden.

Im Kapruner Tal sind wesentlich größere Bereiche von Permafrost beeinflusst. Hier nehmen auf-

grund der größeren Höhe auch die Indexwerte im Vergleich zum Amertal stark zu. Des Weiteren lässt sich im Kapruner Tal die Interaktion zwischen Permafrost und Gletschern sehr gut beobachten, da die meisten Kare hier noch Gletscher aufweisen. Besonders die west- und nordwestexponierten Hänge östlich des Mooserboden Speichers zeigen große Areale mit Permafrost in unmittelbarer Nähe zu den Gletschern. Gerade in diesen Bereichen wird die zukünftige Entwicklung des Permafrostes interessant werden. Denn bei fortschreitendem Abschmelzen der Gletscher kann in diesen Gebieten bei ausreichender Höhe durchaus auch eine Neubildung von Permafrost in den eisfrei gewordenen Zonen stattfinden. Welche Bereiche davon betroffen sein können wird in Kapitel 4.2 gezeigt, in dem verschiedene Szenarien der Permafrostentwicklung vorgestellt werden.

Besonders in Höhenlagen zwischen 2600 und 3000 m haben topographisch Einflüsse (Schattlagen) und die Substratverhältnisse großen Einfluss auf mögliche Permafrostvorkommen.

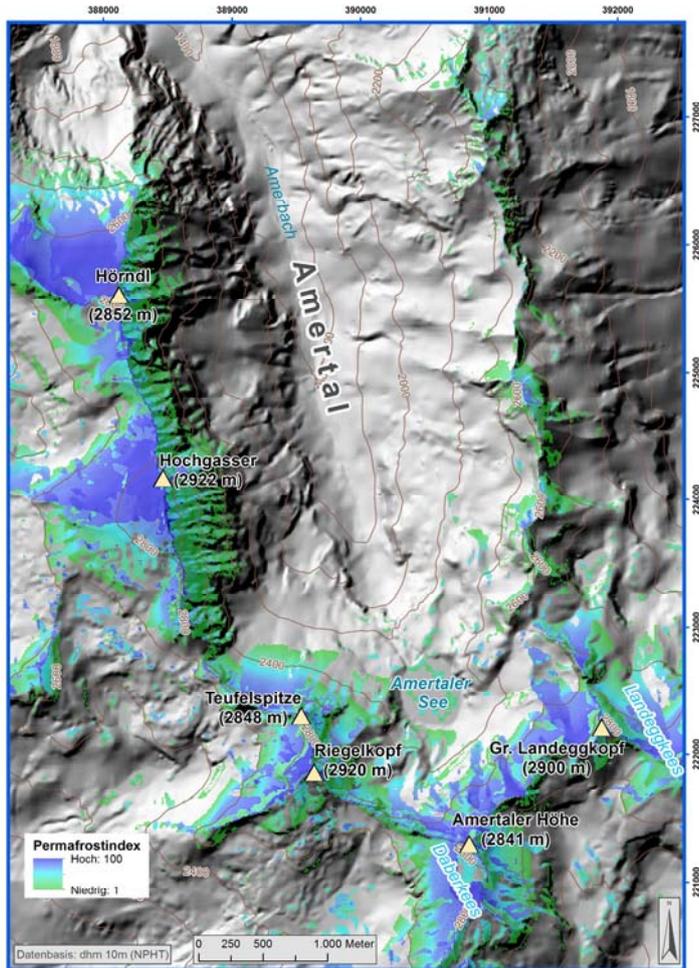
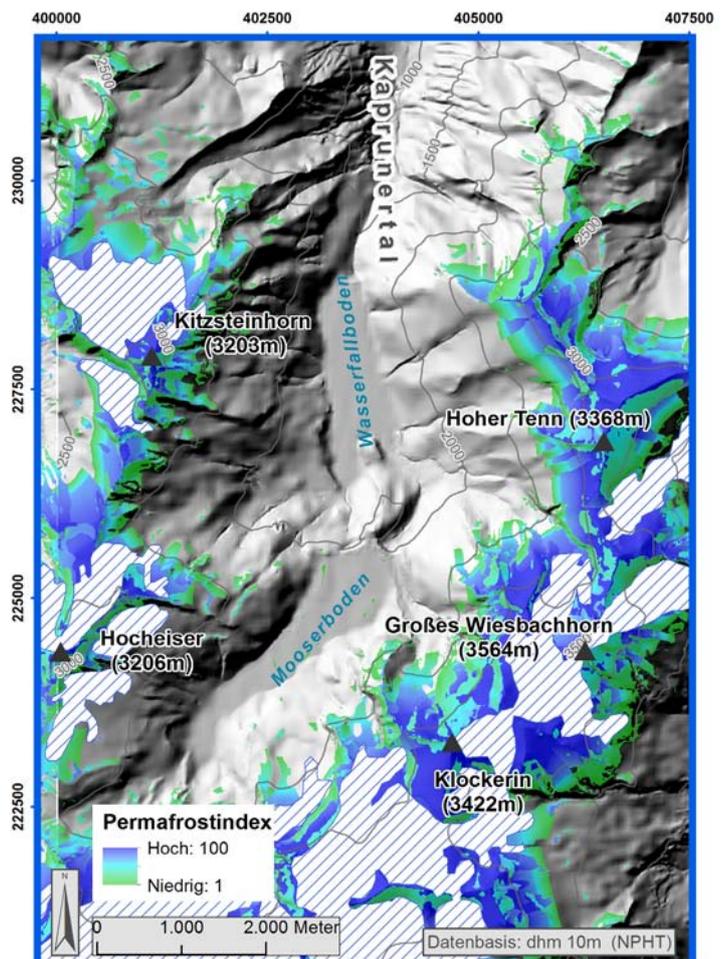


Abb.13: Permafrostverbreitung im Amertal

Abb.14: Permafrostverbreitung im oberen Kaprunertal



4.2 Szenarien der Permafrostverbreitung

Um abzuschätzen wie sich der Klimawandel in den Alpen auf die Permafrostausbildung auswirkt, wurden zwei Szenarien berechnet, die einen möglichen Temperaturanstieg von 1 bzw. 2°C simulieren. Basierend auf den aktuell verfügbaren, langjährigen Messreihen ausgewählter Klimastationen in den Hohen Tauern wurden zunächst Temperaturgradienten zwischen Berg- und Talstationen berechnet. Daraus ergibt sich für die Hohen Tauern ein adiabatischer Temperaturgradient von ca. $-0.51^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Bei einer zukünftigen Temperaturerhöhung um $+1^{\circ}\text{C}$ würden die Permafrostuntergrenzen um ca. 195 m (Szenario 1) ansteigen, unter der stark vereinfachten Annahme einer linearen Beziehung zwischen der Permafrostverbreitung und der Lufttemperatur. Äquivalent muss mit einem Anstieg um ca. 360 m (Szenario 2) bei einer Temperaturerhöhung von 2°C gerechnet werden.

Ein Anstieg der Permafrostuntergrenzen von 195 bzw. 390 Metern hätte aufgrund des Reliefs und der Höhererhebung der Hohen Tauern einen massiven Rückgang der Permafrostbereiche zur Folge (vgl. Abb. 15 u. 16). Ein Temperaturanstieg um 1°C (Jahresmitteltemperatur) könnte, unter den getroffenen Annahmen, zu einer Reduzierung der Permafrostareale um bis zu 70% führen. Im Bereich des Landes Salzburg wäre sogar eine Reduzierung über 70% möglich. Bei einem Temperaturanstieg von $+2^{\circ}\text{C}$ wären unter Verwendung dieses Szenarios nur noch ca. 10% der heutigen Permafrostfläche erhalten. Das bedeutet, dass nur noch die höchsten nordexponierten Gipfelbereiche Permafrostvorkommen aufweisen würden.

Wie aus den vorherigen Informationen zum Phänomen Permafrost deutlich wird, ist die Permafrostverbreitung allerdings nicht unmittelbar an die Lufttemperatur gekoppelt. Daher ist eine Mo-

Tabelle 3: Szenarien zur Permafrostverbreitung bei steigenden Temperaturen.

Szenarios	Fläche aktuell (km ²)	Fläche bei +1°C (km ²)	Veränderung (%)	Fläche bei +2°C (km ²)	Veränderung (%)
UG Hohe Tauern	553,2	166,0	-70,0	57,0	-89,7
Teil Salzburg	182,8	48,5	-73,4	17,3	-90,5
Teil Osttirol	218,4	72,4	-66,9	25,6	-88,3
Teil Kärnten	152,0	45,1	-70,4	14,1	-90,7

Schon ein Temperaturanstieg der Jahresmitteltemperatur von 1°C hätte eine gravierende Folgen für die Permafrostgebiete in den Hohen Tauern.

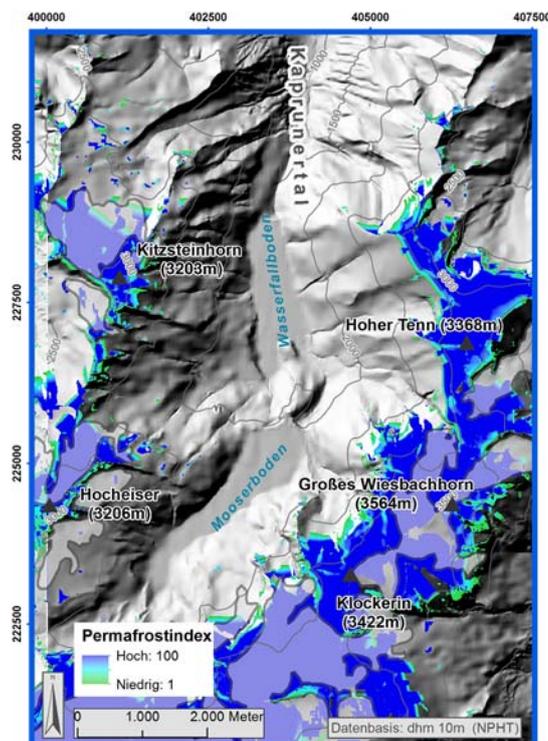


Abb. 15: Simulation der Permafrostverbreitung bei einem Temperaturanstieg von 1°C

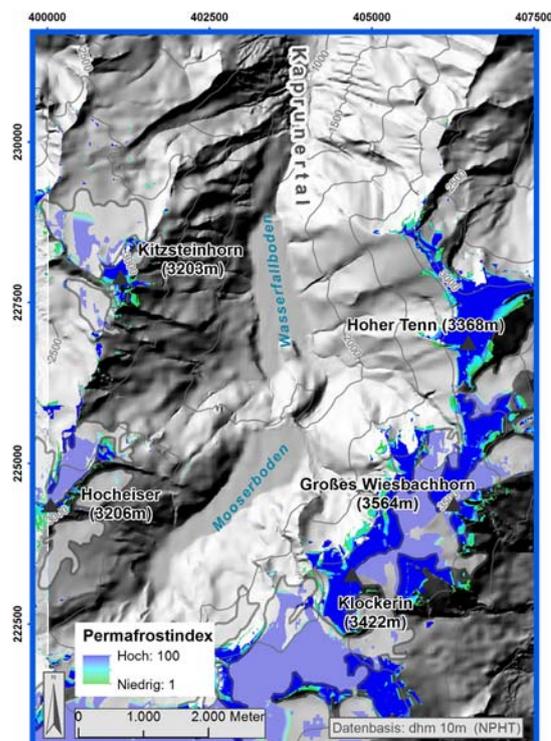
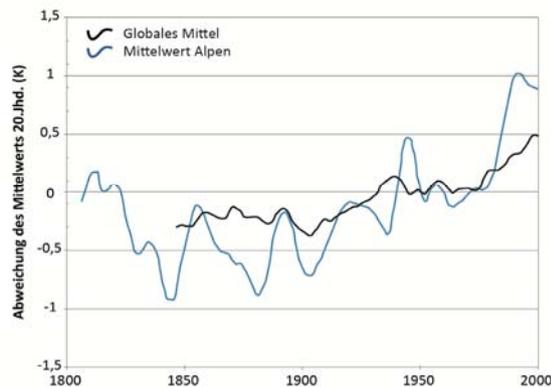


Abb. 16: Simulation der Permafrostverbreitung bei einem Temperaturanstieg von 2°C

dellierung der Permafrostverbreitung unter Berücksichtigung von Temperaturänderungen mit einigen Unsicherheiten verbunden. Es bestehen derzeit noch große Wissenslücken bezüglich der raum-zeitlichen Dynamik der Permafrostdegradation. Aufgrund der engen Beziehung zum Relief, der Schneedecke und den Substrateigenschaften wird sich in Zukunft die tatsächliche Veränderung der Permafrostfläche um einiges heterogener entwickeln. Anzeichen dafür geben azonale Permafrostvorkommen unterhalb 2000 m, wie sie im Alpenraum vielfach beobachtet wurden. Die Veränderung der Permafrostfläche steht in vielen Bereichen in direkten Zusammenhang mit dem Abschmelzen der Gletscher. Je nach Höhenlage können die vom Gletscher freigelegten Areale in den höheren Lagen von Permafrostdegradation oder Permafrostaggradation beeinflusst sein.

Hierbei sind drei Entwicklungen denkbar: Erstens können unter dem Eis bereits Permafrostbedingungen herrschen, die sich nach dem Abschmelzen des Gletschers erhalten. Zweitens kann es zu einem mehr oder weniger raschen Ausmelzen der Permafrostareale kommen und drittens ist schließlich auch eine Neubildung von Permafrost denkbar, wenn die lokalen Bedingungen Permafrost ermöglichen. Wie schnell und in welchem Ausmaß Permafrostdegradation stattfindet und inwieweit es in höheren Lagen vereinzelt gar zu einer Permafrostneubildung in den Alpen kommt, ist bisher nur sehr wenig erforscht. Die Interpretation der Permafrostszenerarien ist daher unter diesen Einschränkungen zu betrachten.

In den Alpen muss auch in Zukunft mit einem stärkeren Anstieg der Jahresmitteltemperatur als im weltweiten Mittel gerechnet werden.



Vergleich der Jahresmitteltemperatur im Alpenraum mit dem globalen Wert (verändert nach Auer 2003)

Infobox 3 Permafrost und Klimawandel in den Alpen

Die durchschnittliche Jahrestemperatur ist in Österreich seit dem 19. Jahrhundert um rund 2°C gestiegen (Böhm, 2009). Auch künftig ist im Alpenraum eine stärkere Temperaturerhöhung als im weltweiten Mittel zu erwarten. Eine Folgeerscheinung ist das partielle Auftauen des alpinen Permafrostes. Eine Erhöhung der Temperatur kann Hänge und steile Felsflanken destabilisieren, wenn der Permafrost (und somit auch Eis in Klüften) abschmilzt oder die Permafrosttemperatur nahe am Gefrierpunkt liegt. Aus diesen sensiblen Bereichen können sich zunehmend Felsstürze, Rutschungen oder Murgänge lösen und so zu Schäden an Infrastruktur führen.

In den Alpen erschwert die vielfältige Topographie und die Unsicherheit über die Entwicklung der Niederschläge (v.a. in Form von Schnee) in den kommenden Jahrzehnten die genaue Vorhersage von Reaktionen des Permafrostes auf den Klimawandel (HARRIS ET AL., 2003). Aus diesem Grund sind dringend Langzeitstudien zur Erfassung von Permafrosttemperaturen notwendig. In einem seit 2010 laufenden Projekt der Arbeitsgruppe Geomorphologie und Umweltsysteme der Universität Salzburg (MOREXPART – Monitoring potential hazardous rock walls and slopes in mountain regions – development of an expert system and adaptation strategies) wird dieser Fragestellung am Kitzsteinhorn nachgegangen. Hierbei wird ab Winter 2011/2012 u.a. anhand von Felstemperaturen in bis zu 30 m tiefen Bohrlöchern die Sensitivität gegenüber Veränderungen erfasst (Keuschnig et al. 2011)

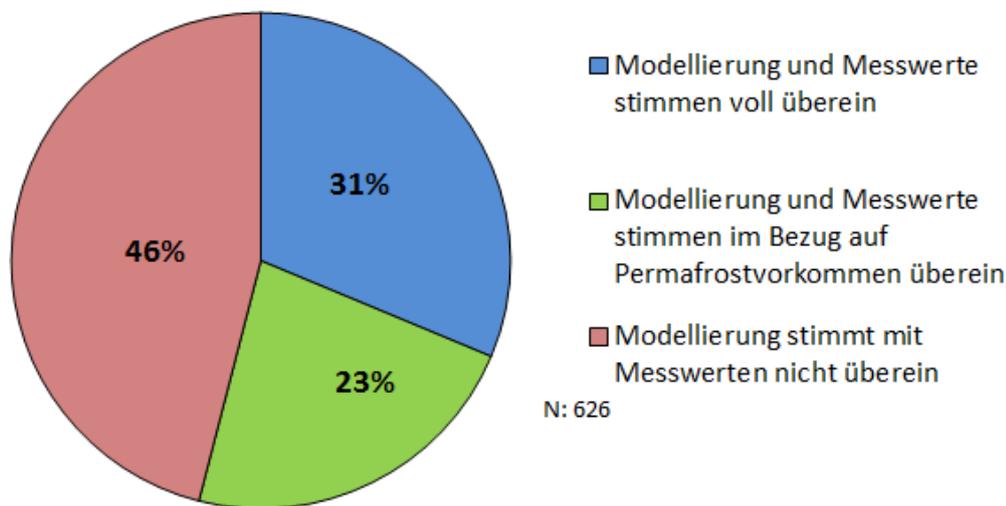
Alpenweite Messungen in Permafrostkörpern deuten darauf hin, dass mit fortlaufenden Veränderungen, d.h. mit einer zunehmenden Permafrostdegradation zu rechnen ist (HARRIS ET AL., 2009).

5. Validierung der Modellergebnisse

Zur Validierung des Modells sind insgesamt 626 Temperaturwerte der BTS- und GST-Messungen aus den Testgebieten herangezogen worden. Bei der Validierung sind drei Klassen ausgewiesen (Abb. 17):

- (a) Modellierung und Messwerte stimmen voll überein
- (b) Modellierung und Messwerte stimmen in Bezug auf Permafrostvorkommen überein
- (c) Modellierung stimmt mit Messwerten nicht überein

Wie Abb. 17 zeigt, stimmen 54% der Messwerte mit modellierten Permafrostvorkommen überein, 31% fallen gar in den exakten Indexbereich zwischen 1-50 % bzw. 51-100% Permafrostwahrscheinlichkeit. Sehr gute Übereinstimmungen sind vor allem in Südost, Süd- und Südwestlagen zu verzeichnen, wenn gleich in diesen Expositionsklassen deutlich weniger Datensätze vorhanden sind (Abb.18). Größere Abweichungen ergeben sich in Nord-, Nordost- und Ostlagen. Expositionslagen sind jedoch aufgrund der komplexen Wärmeleitungen im Untergrund nicht genügend aussagekräftig. Vielmehr müssen wir davon ausgehen, dass der Schneedeckenaufbau und die Substratbeschaffenheit im Untergrund maßgeblich den BTS-Wert steuern. Ein nicht übereinstimmender Validierungswert mit dem Modell muss daher



Die Validierung des Modells zur Permafrostverbreitung wurde in sechs Testgebieten und mit Hilfe von 626 Einzelmessungen (BTS und GST) durchgeführt.

Abb. 17: Vergleich der Modellergebnisse mit den BTS und GST Messwerten

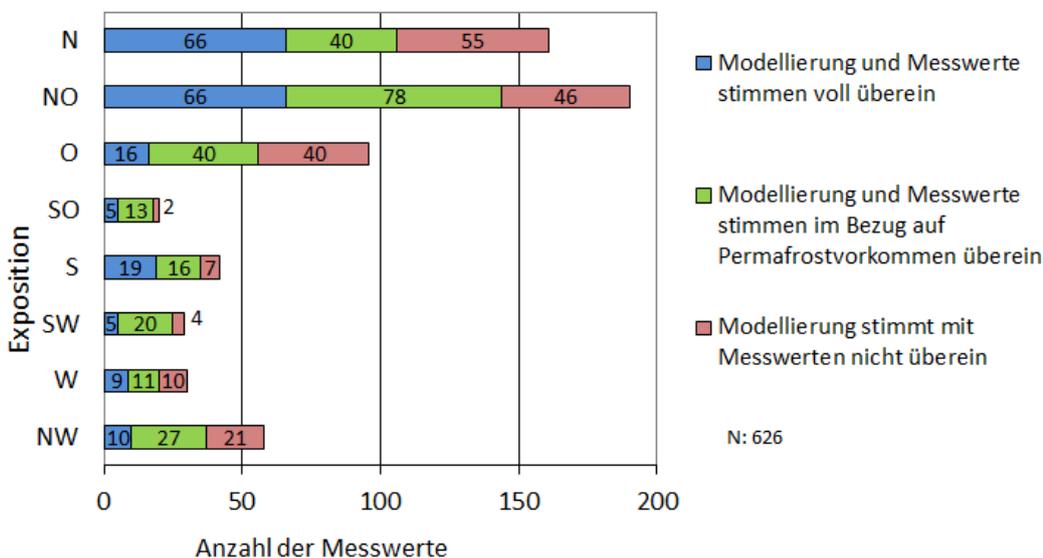


Abb. 18: Vergleich der Modellergebnisse mit den BTS und GST Messwerten—differenziert nach der Exposition der Messungen.

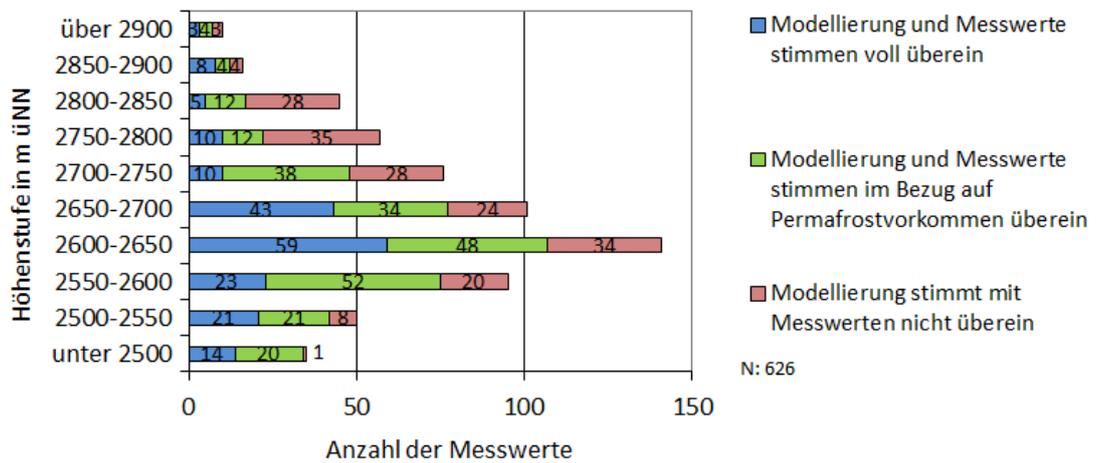


Abb. 19: Vergleich der Modellergebnisse mit den BTS und GST Messwerte differenziert nach Höhenstufen.

nicht zwingend ein falsches Modellergebnis widerspiegeln.

Das Projekt hat gezeigt, dass die BTS-Methode in einigen Fällen nur eingeschränkt zur Validierung geeignet ist. Je nach Untergrundbeschaffenheit (grobblockig, feinkörnig) und Schneesituation im Untersuchungsgebiet, können die Ergebnisse sehr unterschiedlich ausfallen. Während das Testgebiet Kreuzkogel (Abb. 21) eine sehr gute Übereinstimmung mit den Modellergebnissen zeigt, waren die BTS-Messungen in anderen Gebieten weniger aussagekräftig (Abb. 22). Als wichtigste Einflussfaktoren auf die Ergebnisse der BTS-Messung sind vor allem die Schneemächtigkeit sowie der Aufbau der Schneedecke, als auch die Charakteristik des Untergrunds zu nennen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine möglichst genaue Kenntnis der Oberflächenbedeckung für eine BTS Kampagne von großer Bedeutung ist, damit die Ergebnisse richtig interpretiert werden können. Hier spielt vor allem die Korngröße des Lockerschutts eine Rolle. Auf grobem Blockschutt kann es zu Luftzirkulation kommen, bei der die BTS-Temperatur beeinflusst wird und somit nicht die Permafrostbedingung widerspiegelt. Dieses Problem ergibt sich auch bei der GST-Messung, allerdings ist hier die Oberflächencharakteristik in der Regel bekannt, da die Platzierung der Logger im Sommer erfolgt. Um den Einfluss der Bodenbedeckung auf die BTS-Messungen zu reduzieren, wäre eine Vorkartierung im Sommer notwendig.

Die Messung der Basistemperatur der spätwinterlichen Schneedecke ist jedoch weiterhin die Me-



Abb. 20: Vergleich unterschiedlicher BTS-Sonden vor Beginn einer Messkampagne.

thode mit dem besten Aufwand/Nutzen Verhältnis. Unsicherheiten können zum Teil über eine sehr große Zahl an Messungen statistisch verkleinert werden. Außerdem gilt zu bedenken, dass die BTS-Methode Punktwerte liefert und nicht übereinstimmende Werte teilweise nur wenige Meter von den modellierten Rasterzellen entfernt liegen. Obwohl die Methode in der Permafrostforschung seit langem etabliert ist, hat das Projekt Permalp gezeigt, dass es weiterhin viele offene

Das Projekt Permalp hat auch dazu beigetragen, die BTS-Werte vorsichtig zu interpretieren bzw. ein besonderes Augenmerk auf die Oberflächencharakteristik zu legen.

Fragen bei diesem indirekten Verfahren gibt. Andere Validierungsmethoden, wie zum Beispiel die geophysikalischen Profilmessungen (Geoelektrik, Seismik, Bodenradar) sind mit größerem Arbeitsaufwand verbunden und daher räumlich nur begrenzt einzusetzen. Zukünftige Forschung sollte sich auch auf die möglichen Temperaturabweichungen der empirischen BTS-Werte und auf weitere Fehlergrößen konzentrieren.

Abbildung 23 zeigt die Ergebnisse der Geländearbeiten am Glatzbach (Kärnten) im Vergleich zur Modellierung. Während die BTS und GST-Daten hier ein sehr undeutliches Bild der Permafrostverhältnisse anzeigen, ergeben die geophysikalischen Messungen, dass in diesem Einzugsgebiet Permafrost nur noch in den oberen Bereichen des Kares zu finden ist. Die Modellierung geht in diesem Bereich über die Geländebefunde hinaus und gibt hier die sehr kleinräumigen Verhältnisse nicht genau wieder. Ursache für die lokale Permafrostverbreitung ist hier die sehr heterogene Schuttverteilung. Während große Teile des Kares mit feinkörnigem, phyllitischen

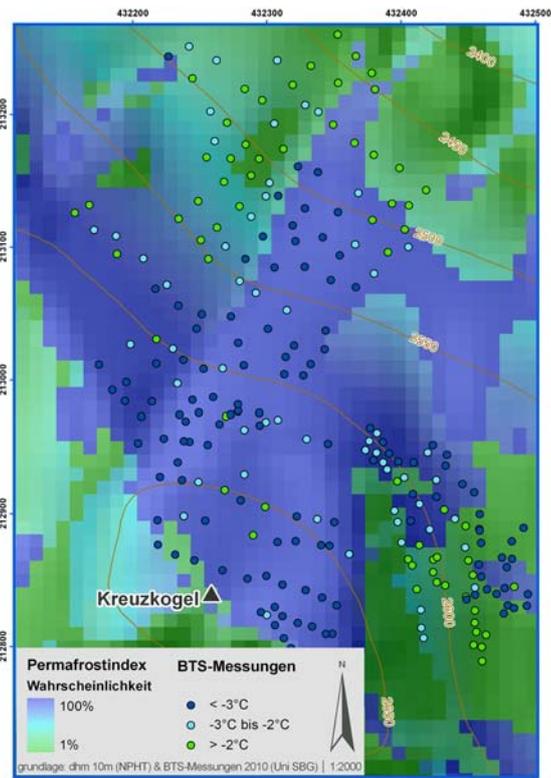


Abb. 21: Vergleich der Modellergebnisse mit den BTS-Messungen am Kreuzkogel (Gasteiner Tal). Die BTS-Messungen zeigen ein sehr regelmäßiges Bild und stimmen zum Teil sehr gut mit dem Modellergebnis überein.

Grobblockige Schuttverteilung führt zu heterogenen BTS-Werten, begünstigt aber das lokale Auftreten von Permafrostvorkommen.

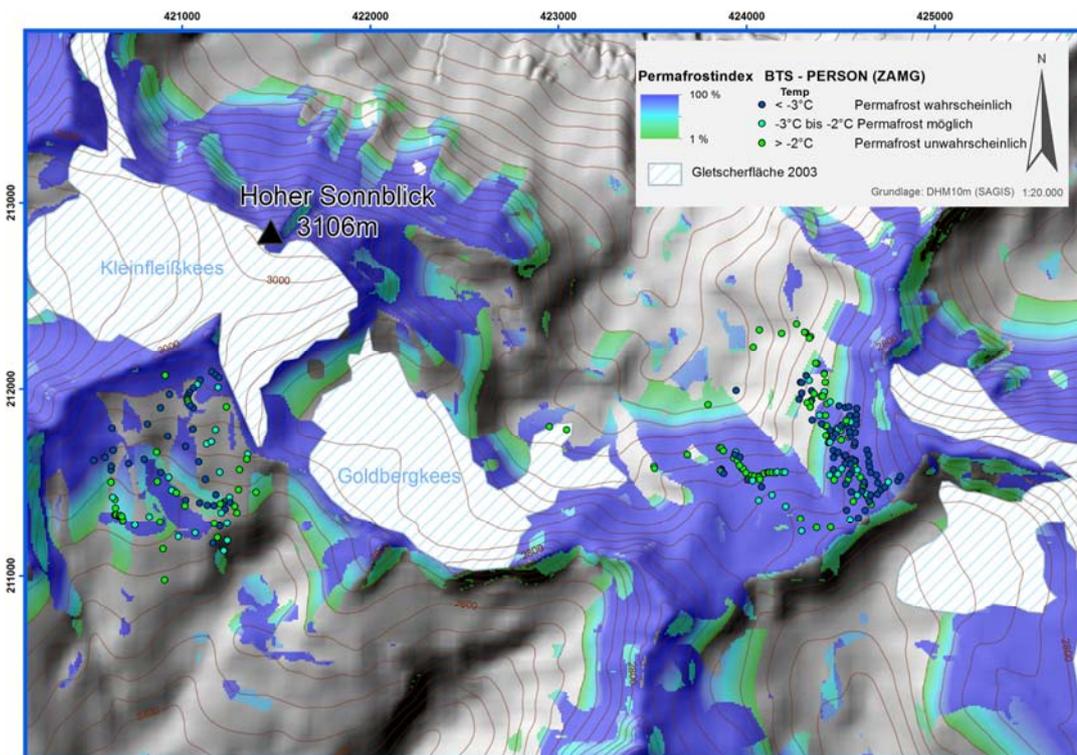


Abb. 22: Vergleich Permafrostmodellierung und BTS-Messungen am Beispiel des oberen Raurisertals (Goldbergkees/Hoher Sonnblick). Die Messungen aus verschiedenen Wintern zeigen ein sehr heterogenes Bild der Temperaturverteilung. Eine Übereinstimmung mit dem Modell ist nur teilweise zu erkennen.

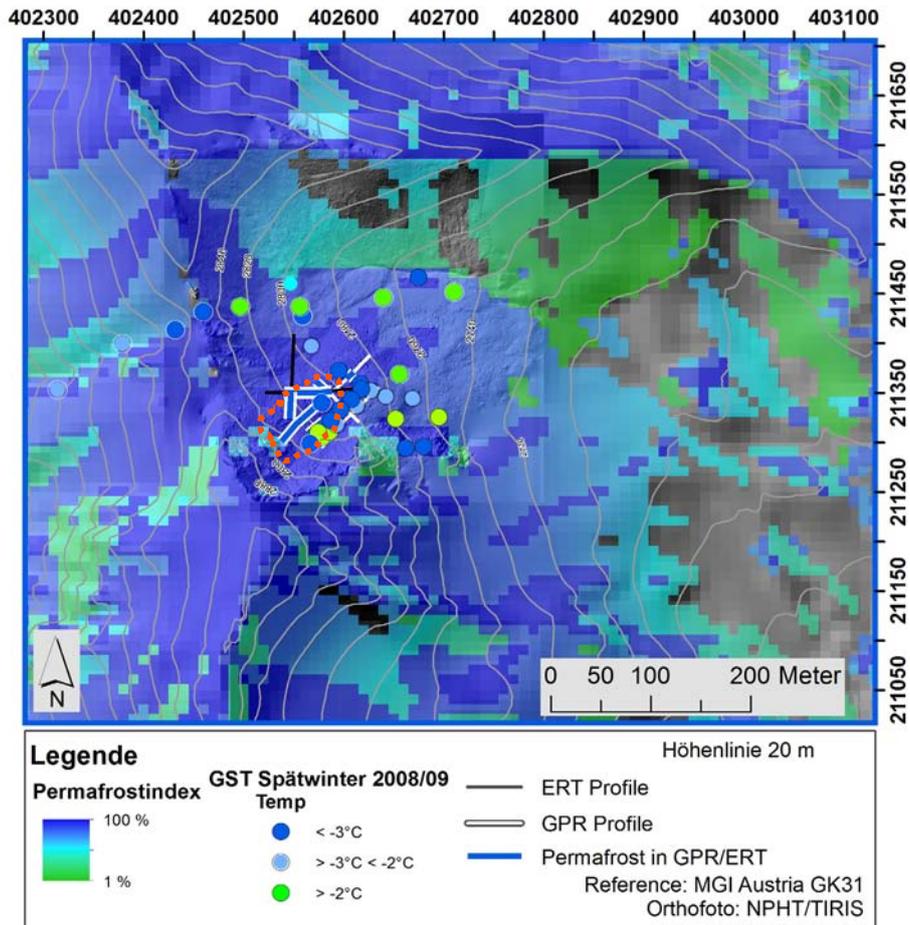


Abb. 23: Vergleich der Modellierungsergebnisse mit Geländedaten (GST, Geoelektrik, Radar) im Untersuchungsgebiet Glorer Hütte/Glatzbach, Kärnten. Die rote Linie umkreist die Zone mit grobblockigem Schutt in der die geophysikalischen Sondierungen (Geoelektrik und Bodenradar) auf Permafrost hinweisen.

Schutt bedeckt sind, treten grobblockige Zonen in der Mitte des Kares auf (rot umrandeter Bereich in Abb. 23, vgl. Abb. 24). Aufgrund der besonderen thermischen Eigenschaften des Grobschuttes kann sich in diesem Kar Permafrost nur in diesen Bereichen halten. (Die Messungen entsprechen den Beispielen aus Kapitel 3.)

Abb. 24: Blick in das untersuchte Kar im Glatzbachtal/Kärnten (Blickrichtung Süd-Ost). Zwischen den Schneeflecken auf der rechten Seite ist die Zone grobblockigen Gesteins sichtbar, unter der sich noch Permafrost befinden. Im feinkörnigen Substrat auf gleicher Höhe konnte Permafrost mit der Geophysik nicht nachgewiesen werden.



6. Die Permalp-Karte im Vergleich zur PermaNet-Karte

Im Herbst 2011 ist der Synthesebericht zum Projekt PermaNET erschienen (Mair et al. 2011). Darin wird unter anderem eine Karte der modellierten Permafrostverbreitung der Alpen dargestellt (s. auch www.permanet-alpinespace.eu/products/pfmap). Ein Vergleich dieser Permafrostkarte mit unseren Projektergebnissen erscheint daher aus mehreren Gründen sinnvoll. Was leistet das Permalp Projekt im Vergleich zu dem Interregprojekt PermaNet? Worin liegen die Gemeinsamkeiten, worin die Unterschiede? Hauptziele des PermaNET Projektes war die Erhebung von Daten und Fakten über die Permafrostverbreitung im gesamten Alpenraum und die Erweiterung von Monitoringstationen. Mit 13 Projektpartnern und 23 Projektbeobachtern war dieses grenzüberschreitende Projekt inhaltlich, institutionell und finanziell „großskaliger“ ausgerichtet. Es wurde vorwiegend an konsistenten Datensätzen über die Permafrost-

verbreitung gearbeitet. Methodisch basiert die Permafrostverbreitung im Projekt PermaNET auf einem statistischen Modell mit den Variablen Jahresmitteltemperatur, potentielle Sonneneinstrahlung und mittlerer Jahresniederschlag für zwei Klassen (Gebiet mit Schutt und steile Felsflanken). Die räumliche Auflösung beträgt 30 m. Das gesamte methodische Vorgehen ist in Boeckli et al. (in review) beschrieben und befindet sich gegenwärtig noch in Begutachtung. Ohne auf die weiteren Details einzugehen, macht ein erster Blick auf ein kleinräumiges Gebiet deutlich, (vgl. Abb.25) dass der alpenweite Ansatz lokale und regionale Unterschiede weniger detailliert abbildet. Leider wird die vorgenommene Dreiteilung von „Permafrost in nearly all conditions“, „Permafrost mostly in cold conditions“ und „Permafrost only in very cold conditions“ nicht weiter erläutert. Die qualitative Legende ist daher nicht als Wahrscheinlichkeit zu interpretieren und muss mit einem Interpretationsschlüssel ergänzt werden (z.B. Blockgröße, Hanglage, Felswände oder Vorhandensein von Blockgletschern). Das detaillierte

Die Permalp Karte zeigt für die Region der Hohen Tauern im Vergleich zur PermaNet Karte eine deutlich verbesserte und detailliertere Darstellung der Permafrostvorkommen.

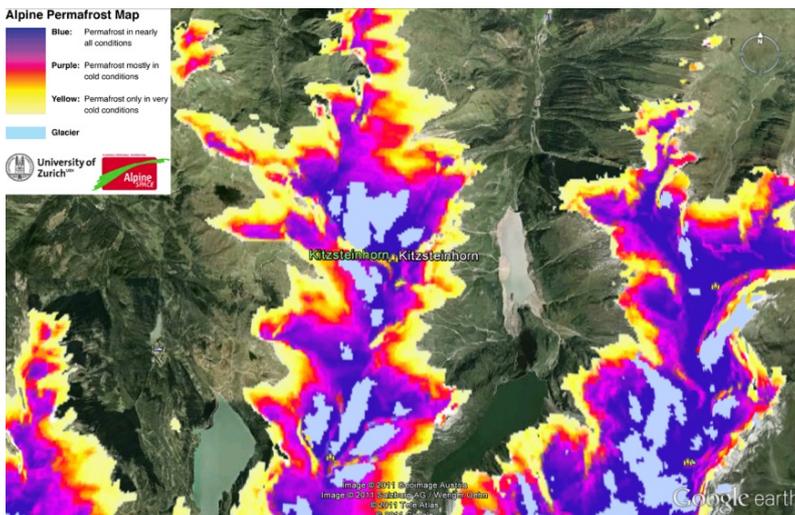
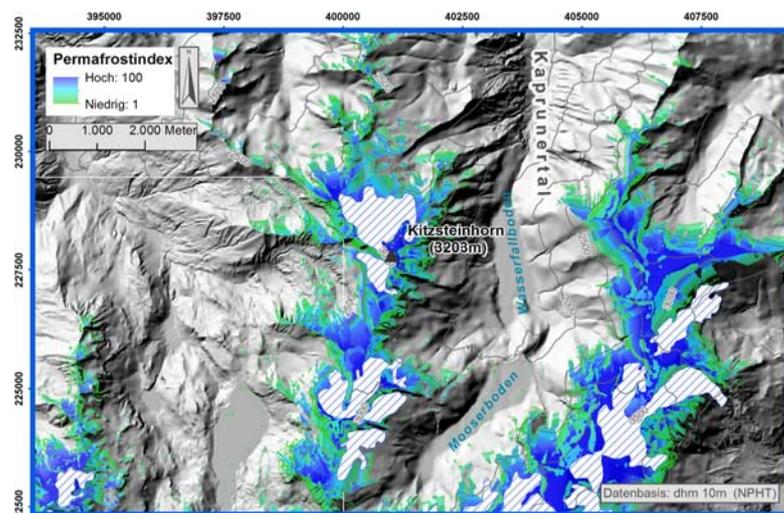


Abb. 25: Permafrostmodellierung im Bereich Kitzsteinhorn/Kapruner Tal des PermaNet Projektes (Boeckli et al., in review).

Abb. 26: Permafrostmodellierung im Bereich Kitzsteinhorn/Kapruner Tal mit Permakart 3.0 im Rahmen des Permalp Projektes.



Permafrostmodell von Permalp weist insgesamt offensichtlich weniger Areale mit Permafrostvorkommen aus (Abb. 26). Dies bedeutet das im Bereich der Ostalpen—wahrscheinlich sogar alpenweit—die Permafrostvorkommen durch die PermaNET Modellierung etwas überschätzt, d.h. weniger exakt abgebildet werden.

Beide Modelltypen und Ansätze erfüllen aber ihren spezifischen skalenbasierten Zweck, jedoch müssen die Ergebnisse entsprechend interpretiert werden. Für Vergleiche mit anderen Hochgebirgen ist die alpenweite Permafrostverbreitung äußerst nützlich. Dagegen kann die im Projekt Permalp erstellte Karte aufgrund der besserer Auflö-

sung (10 m) und eines eigens für diesen Gebirgsraum angepassten topoklimatischen Schlüssel schon recht detaillierte Hinweise auf Permafrost geben. Die Aussagekraft für die Hohen Tauern ist auch aufgrund der lokalen Validierung mit zahlreichen BTS- und GST-Werten sowie geophysikalischen Sondierungen damit deutlich besser.

Generell gilt, dass eine höhere Gewissheit über Permafrostpräsenz oder –absenz nur für eine kleinräumige Lokalität (z.B. 100m²) über Bohrungen und mittels geophysikalischer Erkundung erreicht werden kann.

7. Empfehlungen für Entscheidungsträger und die interessierte Öffentlichkeit

Die österreichischen Alpen und besonders die Hohe Tauern stehen im Spannungsfeld zwischen vielerlei Schutzbedürfnissen und Nutzungsansprüchen. Natur- und Kulturlandschaften sind wesentliche Elemente unseres Gebirgsraumes und vor dem Hintergrund des Klima- und Umweltwandels müssen vermehrt kurzfristig geeignete Anpassungsstrategien entwickelt werden. Eine wichtige Voraussetzung hierzu, ist auch die Kenntnis über rezente Permafrostbedingungen und deren potenzielle kurz- und mittelfristige Entwicklung in den Hohen Tauern.

Je nach Höhenlage, Exposition, Schneeverhältnissen und Untergrundbeschaffenheit variiert die Untergrenze des Permafrostes in den Hohe Tauern um wenige Meter bis zu einigen hundert Metern. Die vorliegende Permafrostkarte soll die Präsenz von Permafrost mittels einer indexierten Karte von 1 (keine Wahrscheinlichkeit von Permafrost) bis 100 (sehr große Wahrscheinlichkeit von Permafrost) bei einer Auflösung von 10 m (Rasterweite) widerspiegeln.

Dies bedeutet, dass die Karte in erster Linie als Hinweiskarte zu interpretieren ist. Sie dient deshalb besonders zur Orientierung der Permafrostverhältnisse im regionalen Maßstab, jedoch nicht zum zweifelsfreien lokalen Permafrostnachweis. Hierzu sind geeignete Prospektionsmethoden wie z.B. Bohrungen oder geophysikalische Sondierungen notwendig. Dies gilt insbesondere dann, wenn Schlussfolgerungen oder Entscheidungen im Risikomanagement getroffen werden. Dennoch kann die Karte genau im regionalen Maßstabsbereich allen Umweltplanern in Ingenieurbüros und in vielen Umweltämtern sowie in Nationalparkverwaltungen nützliche Dienste im Sinne einer Planungs- und Entscheidungshilfe für die Interpretation von Landschaftsveränderungen bieten. Die Charakteristiken eines Einzugsgebietes werden damit sehr viel umfassender beschrieben (z.B. Angaben zur mögliche Schutt- oder Wasserverfügbarkeit, Bewertung von Klüften im Festgestein, etc.).

Des Weiteren kann die Karte im Umgang mit Permafrostphänomenen (z.B. Blockgletscher) und



Abb. 27: Gebäude im Felspermafrost: Die Gipfelstation Kitzsteinhorn auf 3029 m.

Naturgefahren wertvolle Hinweise liefern. Die Dokumentation von Felsstürzen und anderen Massenbewegungen kann nun sehr viel besser mit möglichen Permafrostbedingungen verknüpft werden, womit auch aufwändige Voruntersuchun-



Abb. 28: Steinschlag und Felsstürze im Bereichen mit Felspermafrost

gen basierend auf den Hinweisen sehr viel effizienter umgesetzt werden können. Weiterführende Forschungsarbeiten in nahezu allen Geowissen-

Generell gilt, dass für Planungsmaßnahmen im Hochgebirge das Wissen zum Vorhandensein von Permafrost und dessen mögliche Auswirkungen entscheidenden Einfluss hat.

schaften bis hin zu den Gesellschaftswissenschaften sind zunehmend auf die genaue Kenntnis der heutigen Permafrostbedingungen angewiesen. Der Wert und die Genauigkeit zukünftiger Szenarien hängen nicht zuletzt von der Verfügbarkeit dieser Daten ab.

Auch Bergwanderern und Bergsteigern soll die Permafrostkarte dienen, Routen mit Sorgfalt und unter Einbezug aller Risiken auszuwählen. Schließlich dient die Karte auch allen Besuchern der Hohen Tauern und vermittelt ein tieferes Verständnis über unsere sensiblen alpinen Geoökosysteme. Die Karte hat somit auch einen Bildungsauftrag.

Infobox 4

Permafrost und Naturgefahren

Alpine Naturgefahren (Felsstürze, Muren, etc.), die sich durch Veränderungen im Permafrost ergeben, sind meist eine Folge von Schmelzprozessen in eisgesättigten Sedimentkörpern oder Felswänden. Gefahren können aber auch schon durch eine Erwärmung des Permafrostes hervorgerufen werden, da die Festigkeitseigenschaften schon bei Temperaturen um $-1,5^{\circ}\text{C}$ abnehmen (Harris et al. 2009).

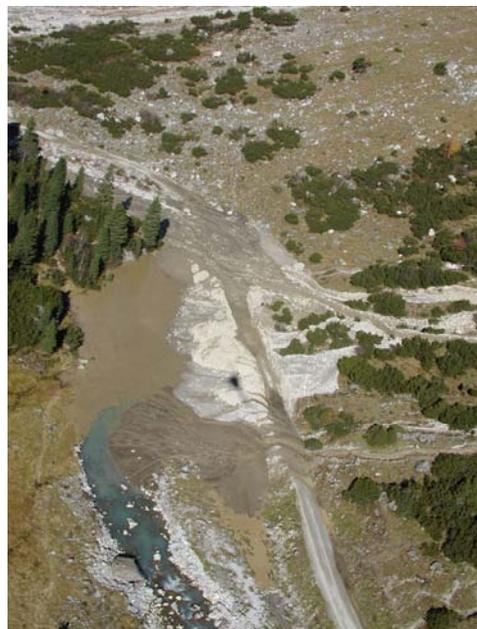


Anrissgebiet eines Murgangs im Obersulzbachtal (Foto: Valentin)

Die Temperatur von steilen Felswänden ist mangels isolierender Schneeschicht direkt mit atmosphärischen Einflüssen gekoppelt und reagiert deshalb besonders rasch auf Temperaturänderungen (HARRIS ET AL., 2009). Die hohen Rekordtemperaturen des Sommers 2003 führten beispielsweise zu mächtigen Auftauschichten und zu deutlich erhöhter Steinschlagaktivität (GRUBER ET AL., 2004).

Auch gefrorene Moränen bilden ein Gefahrenpotential. Schmelzen solche Moränenbänke aus, die beispielsweise als Damm eines Sees gewirkt haben, kann es zu bedrohlichen Wasserausbrüchen kommen (HAEBERLI, 1992). In Sedimentkörpern kann schon eine Zunahme der Mächtigkeit der Auftauschicht vermehrt Murgänge und Rutschungen ermöglichen, da das Sediment-Eisgemisch an innerem Zusammenhalt verliert (HAEBERLI & MAISCH, 2007). Die komplexen Zusammenhänge hierüber sind jedoch bislang nur teilweise geklärt und es liegen nur vereinzelt detaillierte Untersuchungen aus dem Alpenraum vor (Sattler et al. 2011).

Diese Veränderungen können zu einer Bedrohung für Menschen und Infrastruktur führen. Bauwerke werden in der Folge durch Setzungserscheinungen oder durch Massenbewegungen wie Hangrutschungen, Muren oder Steinschlag beschädigt und die Funktion von Anlagen (z.B. Seilbahnstützen) auf abwärts kriechenden Permafrostkörpern kann stark beeinträchtigt werden. Steinschlag- und Felssturzprozesse sind bereits heute eine zunehmende Gefährdung für Straßen, Wanderwege, Kletterrouten, Schipisten und Seilbahnen (Krainer 2007).



Murgangablagerung mit Folgen für die Umwelt: Ein Weg wird verschüttet und ein Bachlauf wird aufgestaut (Obersulzbachtal) (Foto: Valentin)

Alpine Naturgefahren sind häufig eine Folge von Schmelzprozessen in Gebieten mit alpinem Permafrost.

8. Ausblick

Das Projekt Permalp hat die Grundlage für weiterführende Arbeiten zur Erkennung und zur Entwicklung des Permafrostes in den Hohen Tauern geliefert. Erstmals liegt nun eine detaillierte und hochaufgelöste Verbreitungskarte zum Phänomen Gebirgspermafrost für einen bedeutenden Ausschnitt der österreichischen Alpen vor. Bereits jetzt zeigt sich, dass laufende Forschungsprojekte in Österreich (u.a. MOREXPART, permafrost) von den Ergebnissen des Permalp Projektes profitieren. Das derzeit größte Permafrostprojekt in Österreich — MOREXPART — widmet sich der Entwicklung eines Expertensystems zur Überwachung gefährlicher Felswände im Bereich des Felspermafrost am Kitzsteinhorn. Die dortigen fünf temperaturbestückten Bohrlöcher im Festgestein mit Tiefen zwischen 20 und 30 m werden neben geoelektrischem Monitoring und zahlreichen oberflächennahen Felstemperaturen (1m) ab 2012 wertvolle Daten zur Felspermafrosttemperatur und damit zur zukünftigen Entwicklung des Permafrostes liefern. Die im Rahmen des PermaNET Projektes gewonnenen Daten (u.a. zur Blockgletscher-Verteilung in Vorarlberg und Tirol) können nun ebenfalls genutzt werden, um für die gesamten österreichischen Alpen einen angepassten topoklimatischen Schlüssel zu entwickeln und die Validierung der Karte weiter zu verbessern.

Die Arbeitsgruppe Geomorphologie und Umweltsysteme der Universität Salzburg ist Teil des bestehenden Netzwerks der Permafrostforschung in Österreich. Ein Workshop im Herbst 2010 in Obergurgl brachte erstmals rund 40 Permafrostforscher österreichweit zusammen und es wurde eine „Permafrostgruppe Österreich“ ins Leben gerufen. Ein Sonderband zum Phänomen Permafrost in Österreich wird 2012 im Austrian Journal of Earth Science erscheinen.

Um das Phänomen Permafrost auch einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen ist geplant, die Permafrostkarte mit Erläuterungshinweisen über einen Kartenverlag zu publizieren.

Nicht zuletzt hat das Projekt Permalp auch dazu beigetragen, dass die Permafrostforschung in Österreich in den letzten Jahren einen enormen Aufschwung erfahren hat.

Zusammenfassung

Im Untersuchungsgebiet Hohe Tauern ist auf einer Fläche von 550 km² mit dem Auftreten von Permafrost zu rechnen. Damit sind etwa 12 % der Gesamtfläche von Permafrost betroffen. Dem gegenüber steht eine Fläche von 160 km² bzw. knapp 4 % die von Gletschern eingenommen wird. Daraus wird deutlich, welche flächenhafte Bedeutung die Existenz von Eis im Untergrund hat. Bei ca. 40% der Permafrostfläche liegt die Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen von Permafrost über 50%. Aufgeteilt nach Bundesländern ergibt sich der größte Flächenanteil für das Gebiet von Osttirol. Hier sind etwa 10% der Landesfläche unter Permafrosteinfluss, im Gegensatz zu nur 3% in Salzburg und weniger als 2% in Kärnten. Das empirisch-statistische Modell Permakart 3.1 differenziert Permafrostwahrscheinlichkeit in den Klassen Fels, Steilhang und Hangfußlagen in einem indexbasierten Verfahren von 1-100% in allen Expositionen. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit den Herbstschneeeffekt in das Modell zu integrieren. Die Modellergebnisse wurden mittels 626 Messungen der Basistemperatur der winterlichen Schneedecke und weiteren Dataloggern zur Oberflächentemperatur (GST) validiert. Insgesamt zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung. Abweichungen sind besonders bei grobblockigen Untergrundverhältnissen und heterogenen Schneemächtigkeiten zu beobachten. Zusätzlich sind in sechs Testgebieten 37 geophysikalische Messungen durchgeführt worden, um Hinweise zur lokalen Permafrostverbreitung zu erhalten. Zur zweifelsfreien Detektion von Permafrostpräsenz oder -abwesenheit wird ein kombiniertes Anwenden der Temperaturmessungen mit geophysikalischen Methoden empfohlen. Erste Szenarien unter der Annahme einer Temperaturerhöhung weisen auf eine mögliche großflächige Permafrostdegradation hin.

Die vorliegende Permafrostkarte dient als Hinweiskarte zur Abschätzung von Permafrostvorkommen im regionalen Maßstab. Sie liefert allen Umweltplanern nützliche Dienste im Sinne einer Einschätzung von alpinen Gefahren und Risiken und ist eine Entscheidungshilfe bei der Interpretation von Landschaftsveränderungen. Die Karte vermittelt ein tieferes Verständnis über unser sensibles Geoökosystem und hat damit auch einen wichtigen Bildungsauftrag.

Das Projekt Permalp hat die Permafrostforschung in Österreich bereichert und zu einem Aufschwung dieser Forschungsdisziplin beigetragen.

Anhang:

I Öffentlichkeitsarbeit und Publikationen

Publikationen:

- OTTO, J.-C.; KEUSCHNIG, M.; GÖTZ, J.; MARBACH, M. & SCHROTT, L. (2012): Detection of mountain permafrost by combining high-resolution surface and subsurface information – An example from the Glatzbach catchment. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, vol. 94, Issue 1, in press.
- EBOHON, B. AND L. SCHROTT (2010): Improving Permafrost Simulation in the Austrian Alps – Preliminary Modelling Results and New Field Data. In: *Thermal State of Frozen Ground in a Changing Climate during the IPY. Abstracts from the Third European Conference on Permafrost 13-17 June 2010*. S. 318.
- EBOHON, B. UND L. SCHROTT (2010): Permafrost in den Hohen Tauern. In: *ZAMG: Sonnblick - Observatorium über den Wolken – Wissenschaftliche Aktivitäten 2010*. S.35.
- OTTO, J.-C., EBOHON, B., KEUSCHNIG, M. UND L. SCHROTT (2010): Das Phänomen Permafrost in Österreich – meist unsichtbar, aber nicht unbedeutend. In: *BFW-Praxisbericht Nr. 23*, S. 11-13.
- EBOHON, B. AND L. SCHROTT (2008): Modeling Mountain Permafrost Distribution. A New Permafrost Map of Austria. – In: Kane, D. & K. Hinkel (Eds.): *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska*, 397-402.
- SCHROTT, L. (2011): Permafrostforschung in Österreich: Neue Projekte und Perspektiven. Jahrestagung des AK Permafrost, Rolands-eck/Bonn, Deutschland. Vortrag.
- OTTO, J.-C.; KEUSCHNIG, M.; GÖTZ, J.; MARBACH, M. AND SCHROTT, L. (2011): Detection of mountain permafrost by combining high-resolution surface and subsurface information – An example from the Glatzbach catchment, Austrian Alps. *EGU, Vienna Austria + Geophysical Research Abstracts*, Vol. 13. , Poster.
- OTTO, J.-C., RUPPRECHTER, M., EBOHON B., KELLER, F. AND SCHROTT, L. (2010): Permafrostverbreitung in den Hohen Tauern – Ein Zwischenbericht aus dem Projekt PERMALP.AT. Permafrostworkshop Obergurgl, Obergurgl, Österreich. Vortrag.
- EBOHON, B.; KELLER, F.; OTTO, J.-C. AND SCHROTT, L. (2010): Improving Permafrost Simulation in the Austrian Alps – Preliminary Modelling Results and New Field Data. 3rd European Conference on Permafrost, Svalbard, Norway. Vortrag + Poster.
- EBOHON, B. AND SCHROTT, L. (2010): Permafrost distribution in Austria – new field data and preliminary modelling results. *EGU, Vienna, Austria + Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12. Vortrag + Poster.
- EBOHON, B.; OTTO, J.-C. AND SCHROTT, L. (2010): Permafrost distribution of the Hohe Tauern range – a new modelling approach. PermaNET – Permafrost Long-term Monitoring Network for the Alpine Space, Mid-term conference, Innsbruck, Austria. Vortrag.
- EBOHON, B., KELLER, F., SCHROTT, L. AND J.-C., OTTO (2009): Modelling of permafrost in the region of the “Hohe Tauern”, Austria. 4th Symposium of the Hohe Tauern National Park for Research in Protected Areas, Kaprun, Austria. Vortrag + Poster.

Vorträge—Posterpräsentationen:

- SCHROTT, L. (2011): Mountain permafrost: local detection, regional modelling and monitoring systems. *Geological Survey Canada, Northern Canada Discussion Group*, 12.05.2011, Vortrag
- SCHROTT, L. (2011): Mountain permafrost studies in Austria (European Alps) - local detection, regional modelling and monitoring systems. *University of Ottawa, Geography special lecture*, 11.04.2011, Vortrag.
- OTTO, J.-C. (2011): Modellierung der Permafrostverbreitung in den Hohen Tauern (permalp.at). *Sonnblicktagung, Wien, Österreich*. Vortrag.
- EBOHON, B., KELLER, F. AND SCHROTT, L. (2009): Improving permafrost simulation in mountain areas - examples from the Austrian Alps. 7th International Conference on Geomorphology, Melbourne, Australia. Vortrag + Abstract + Poster.
- GEILHAUSEN, M.; EBOHON, B.; OTTO, J.-C.; SCHROTT, L.; SLUPETZKY, H.; WIESENEGGER, H. & KUM, G. (2009): Ausgewählte Aspekte der Kryosphäre um die Kürsingerhütte. *Klima- und Gletschertage, Neukirchen am Großvenediger, Österreich*. Poster.
- EBOHON, B., KELLER, F. AND SCHROTT, L. (2009): Modelling of permafrost in the region of the Upper Tauern, Austria. *EGU, Vienna*,

Austria + Geophysical Research Abstracts, Vol. 11. Vortrag + Abstract + Poster.

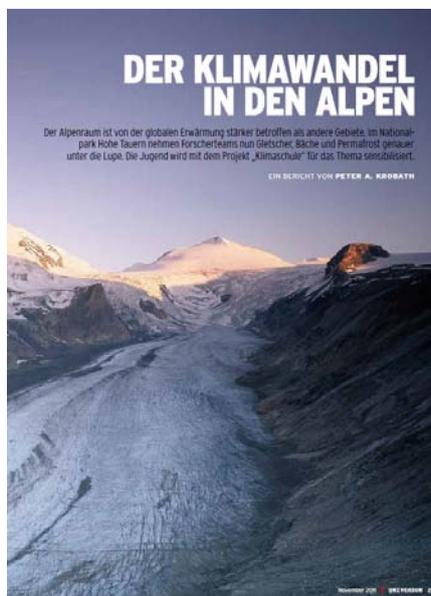
- EBOHON, B. & KEUSCHNIG, M. (2009): Kartierung und Modellierung der Permafrostverbreitung in den Hohen Tauern. 2. Treffen des AK Permafrost, Würzburg, Deutschland. Vortrag.
- EBOHON, B. (2009): Kartierung und Modellierung der Permafrostverbreitung in den Hohen Tauern. Forschung im Hochgebirge. Ergebnisse aktueller Projekte am Sonnblick Observatorium und ein Blick über die Grenzen. Sonnblick Symposium, Wien, Österreich. Vortrag.

Presseberichte:

- PROFIL, November 2011 (Print): „Bedrohungsszenario—Österreichische Forscher erstellen jetzt erstmals eine genaue Karte der Permafrostzonen. Das Auftauen dieser Regionen ist eine Folge des Klimawandels und kann massive Hangrutschungen auslösen.“
- UNIVERSUM MAGAZIN, November 2011 (Print): Der Klimawandel in den Alpen.
- ZDF.UMWELT, 25.09.2011 (TV): Klimawandel in den Alpen
- SALZBURGER NACHRICHTEN, 18. Juli 2011 (Print & Internet): Gletscherbäche künden vom Ende des Eises. (<http://search.salzburg.com/articles/20060605>)
- DER STANDARD (Forschung Spezial), 21.06.2011, (Print & Internet): Der Rückzug der trägen Monster. (<http://derstandard.at/1308679392660/Nationalpark-Hohe-Tauern-Der-Rueckzug-der-traegen-Monster>)
- ORF—HEUTE IN ÖSTERREICH, 14.Juli 2011 (TV): Klimawandel in den Hohen Tauern
- ORF—DIMENSIONEN - DIE WELT DER WISSENSCHAFT, 20.Juni 2011 (Radio): Auf den Spuren des Klimawandels. Folgen in den Hohen Tauern bereits sichtbar.
- DER STANDARD, September 2009 (Print): „Permafrostlandkarte für Österreich entsteht“
- OBERÖSTERREICHISCHE RUNDSCHAU AM SONNTAG (Print), September 2009: „Permafrost-Rückgang. Salzburger arbeiten an einer Permafrost-Landkarte.“
- SALZBURG NEWS, September 2009 (Internet): „Salzburger arbeiten an einer Permafrost-

Landkarte für Österreich“ (<http://www.salzburg24.at/salzbuerger-arbeiten-an-einer-permafrost-landkarte-fuer-oesterreich/news-20090918-09361973>)

ORF, November 2007 (Internet): „Untersuchung: Wie lange halten Felshänge?“ (<http://sbgv1.orf.at/stories/234267>)



II. Literatur

- AUER I. (2003). The instrumental period in the greater alpine region. Multi-centennial climate variability in the ALPs based on Instrumental data, Model simulations and Proxy data (Alp-IMP). ALP-IMP kick off meeting, May 5th to 6th 2003, Vienna with public session. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG).
- BAFU (2007). Hinweiskarte der potentiellen Permafrostverbreitung in der Schweiz. Bern, Bundesamt für Umwelt.
- BOECKLI, L., BRENNING, A., ET AL. (in Review). A statistical permafrost distribution model for the European Alps, *The Cryosphere Discussions*, 5, 1419-1459,
- BÖHM R, (2009). Geandertes Umfeld durch Klimawandel?/ Modified environment due to climate change? *Wildbach- und Lawinenverbau* 163: 73.Jg. 34-50
- EBOHON, B. AND L. SCHROTT (2008): Modeling Mountain Permafrost Distribution. A New Permafrost Map of Austria. – In: Kane, D. & K. Hinkel (Eds.): *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*, Fairbanks, Alaska, 397-402.
- GRUBER, S., M. HOELZLE, ET AL. (2004). "Rock wall temperatures in the Alps: Modelling their topographic distribution and regional differences." *Permafrost and Periglacial Processes* 15(3): 299-307.
- HAEBERLI, W. (1973). "Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost." *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 9(1-2): 221-227.
- HAEBERLI, W. (1975). Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (Graubünden). *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*.
- HAEBERLI, W.(1992). Possible effects of climatic change on the evolution of Alpine permafrost. – *Catena Supplement*, 22, 23–35.
- HAEBERLI, W. AND M. MAISCH (2007). Klimawandel im Hochgebirge. In: ENDLICHER, W. AND F.-W. GERSTENGARBE (Hrsg). *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*. Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, 98-107.
- HARRIS, C., D. VONDER MUHLL, ET AL. (2003). "Warming permafrost in European mountains." *Global and Planetary Change* 39(3-4): 215-225.
- HARRIS, C., L. U. ARENSON, ET AL. (2009). "Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses." *Earth-Science Reviews* 92(3-4): 117-171.
- IPA (2012). What is Permafrost? <<http://ipa.arcticportal.org/resources/what-is-permafrost.html>> letzter Zugang 15.1.2012.
- KELLER, F. (1992). "Automated mapping of mountain permafrost using the program PERMAKART within the geographical information system ARC/INFO." *Permafrost and Periglacial Processes* 3(2): 133-138.
- KELLER, F. (1994). Interaktionen zwischen Schnee und Permafrost. Eine Grundlagenstudie im Oberengadin. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*. P. D. D. h. c. D. Vischer. Zürich. 127: 145.
- KELLER, F., R. FRAUENFELDER, ET AL. (1998). Permafrost Map of Switzerland. VII. *International Conference on Permafrost*, Yellowknife, CA, Centre d'études nordique, Université Laval.
- KELLER, F., W. HAEBERLI, ET AL. (1998). Glaziologische Karte Julier - Bernina (Oberengadin). Synthesekarte NFP 31. Zürich, vdf, Hochschulverlag an der ETH.
- KEUSCHNIG M., HARTMEYER I., OTTO J.C., SCHROTT L. (2011): A new permafrost and mass movement monitoring test site in the Eastern Alps – Concept and first results of the MOREXPRT project. *Managing Alpine Future II - Inspire and drive sustainable mountain regions*. *Proceedings of the Innsbruck Conference*, November 21-23, 2011. (= IGF-Forschungsberichte 4). Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften: Wien.
- KRAINER, K. (2007): Permafrost und Naturgefahren in Österreich. – *Ländlicher Raum* (Online-Fachzeitung des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft). Jahrgang 2007:1-18.

LÜTSCHG, M. (2005). A Model and Field Analysis of the Interaction between Snow Cover and Alpine Permafrost. Zürich, Geographisches Institut der Universität Zürich.

MAIR, V., ZISCHG, A., ET AL. (2011). PermaNET - Permafrost Long-term Monitoring Network. Synthesebericht. INTERPRAEVENT Schriftenreihe 1, Report 3. Klagenfurt.

NOETZLI, J. AND D. VONDER MÜHLL, Eds. (2010). Permafrost in Switzerland 2006/2007 and 2007/2008. Glaciological Report Permafrost of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences.

PIEMENOTE, A. (2011): WP4-Final Report— Handbook to establish alpine permafrost monitoring network. <http://www.permanet-alpinespace.eu/archive/pdf/WP4_handbook.pdf> letzter Zugriff: 15.01.2012.

SATTLER, K., M. KEILER, ET AL. (2011). "On the Connection between Debris Flow Activity and Permafrost Degradation: A Case Study from the Schnalstal, South Tyrolean Alps, Italy." *Permafrost and Periglacial Processes* 22(3): 254-265.

SCHROTT, L. AND O. SASS (2008). "Application of field geophysics in geomorphology: Advances and limitations exemplified by case studies." *Geomorphology* 93(1-2): 55-73.

