

PHYSISCHE GEOGRAPHIE

KARTIERUNG UND REGIONALISIERUNG VON PERMAFROST- INDIKATOREN IM RIESERFERNERGEBIET (SÜDTIROL/OSTTIROL)

Bodo DAMM, Wien und Moritz LANGER, Göttingen*

mit 9 Abb. und 4 Tab. im Text

INHALT

<i>Summary</i>	295
<i>Zusammenfassung</i>	296
1 Einleitung	296
2 Untersuchungsgebiet	297
3 Methodische Grundlagen	299
4 Räumliche Verbreitung und physikalische Eigenschaften von Permafrostindikatoren	305
5 Abschätzung der Permafrostverbreitung durch Regionalisierung von perennierenden Schneeflecken	310
6 Literaturverzeichnis	312

Summary

Mapping and regionalisation of permafrost phenomena as a basis for natural hazard analyses in South Tyrol (Italy)

In the Rieserferner-Ahrn Nature Park (South Tyrolean Alps, Italy) a detailed mapping of the spatial distribution of permafrost phenomena is carried out in order to provide the basis for natural hazards analyses. The study is based on the surveying of the characteristics of geomorphological, hydrological and physical permafrost indicators, such as rock glaciers, ice-cored debris and moraine deposits, perennial snow patches, temperatures at the base of the winter snow cover (BTS) as well as temperatures and

* Gastprof. Dr. Bodo DAMM, Institut für Geographie und Regionalforschung, Universität Wien, A-1010 Wien, Universitätsstraße 7/5; e-mail: bodo.damm@univie.ac.at, <http://www.univie.ac.at/geographie>;
Dipl.-Geogr. Moritz LANGER, Geographisches Institut, Universität Göttingen, D-37077 Göttingen, Goldschmidtstraße 5; e-mail: mlanger@gwdg.de

electrical conductivity of melt water. By means of a statistical model an analysis is made as to what extent the spatial density of perennial snow patches is appropriate to forecast the spatial distribution of permafrost. First results show that this approach – that was not considered useful so far – provides a significant approximation for determining the lower limit of discontinuous permafrost areas.

Zusammenfassung

Als Grundlage einer Naturgefahrenanalyse wird im Naturpark Rieserferner-Ahrn in Südtirol eine Permafrostkartierung durchgeführt. Die Arbeiten stützen sich auf die Erfassung von geomorphologischen, hydrologischen und physikalischen Permafrostindikatoren, wie Blockgletscher, gefrorene Schutthalden und Moränen, perennierende Schneeflecken, Basistemperaturen der winterlichen Schneedecke (BTS) sowie Temperaturen und elektrische Leitfähigkeiten von Schmelzwässern. Ausgehend von einem statistischen Modell wird der Frage nachgegangen, inwieweit die unterschiedliche räumliche Dichte von Schneeflecken eine Prognose der Permafrostverbreitung erlaubt. Die Arbeit zeigt, dass durch Regionalisierung von Schneefleckenhäufigkeiten eine gute Annäherung an die Untergrenze der potenziellen Permafrostvorkommen erzielt werden kann.

1 Einleitung

In den Hochregionen der Alpen reagiert das Eis der Gletscher und des Permafrostes sehr sensibel auf Klimaänderungen. Gleichzeitig sind hier auch die Abtragungsprozesse intensiv. Der Temperaturanstieg seit dem Ende der neuzeitlichen Kaltphase (Little Ice Age) vor rund 150 Jahren hat sich daher in der glazialen und periglazialen Höhenstufe besonders markant ausgewirkt. Gletscherschwund, Anstieg der Permafrosttemperatur, Hanginstabilitäten und Massenbewegungen sind Indikatoren für die Reaktion der alpinen Umwelt auf die eingetretenen Klimaänderungen. Sie beeinflussen in erheblichem Umfang das gegenwärtige und künftige Naturgefahrenpotenzial (GRUBER et al. 2004, STÖTTER et al. 2003).

Der Rückgang der Vergletscherung seit dem neuzeitlichen Gletscherhochstand um 1850 ist im Alpenraum vergleichsweise gut belegt. Die Veränderungen des Permafrostes hingegen sind unzureichend bekannt. Schätzungen deuten darauf hin, dass die Temperaturen im Bereich der Permafrostspiegel seit 1880 um 1 bis 2°C zugenommen haben könnten (HAEBERLI 1992, 2005). Ausgehend von einem mittleren Temperaturgradienten von 0,5 bis 0,6°C/100 m dürften auch die Permafrostuntergrenzen in den vergangenen 100 Jahren um 150 bis 400 m angestiegen sein.

In Südtirol haben der Gletscherschwund und möglicherweise auch die Degradationsspanne des Permafrostes bereits die Grenze der Bandbreite nacheiszeitlicher Schwankungen erreicht. Sofern sich die beobachtete Schwundtendenz fortsetzt oder

beschleunigt, werden mittelfristig Verhältnisse ohne postglaziale oder historische Präzedenz eintreten. Ein Temperaturanstieg um 1 bis 2°C bis zum Jahr 2030 könnte die Gleichgewichtslinien der Gletscher um etwa 150 bis 350 m und die Permafrostuntergrenzen um 200 bis 400 m ansteigen lassen (KUHN 1990, PATZELT & AELLEN 1990). Bei einem solchen Szenario verschwinden in einzelnen Gebirgsgruppen Gletscher mit Nährgebieten unterhalb von 3.100-3.200 m völlig (vgl. ZEMP et al. 2006). Darüber hinaus würden auch nordexponierte Permafrosthänge unterhalb von 3.000 m ü.M. mit den entsprechenden Konsequenzen für deren Stabilität abtauen.

Im Südtiroler Ahrntal und in der benachbarten Rieserfernergruppe (Südtirol/Osttirol) sind in den vergangenen Jahren wiederholt Massenbewegungen und Muren in Geländebereichen angerissen, die vor 50 bis 60 Jahren noch vergletschert bzw. durch Permafrost verfestigt waren. An hochgelegenen Hütten, wie der Schwarzenstein- und der Rieserfernerhütte, werden neuerdings Schäden beobachtet, die auf Setzungen des Baugrundes zurückzuführen sind und hochgelegene Wasserreservoirs begannen, im Anschluss an den überdurchschnittlich warmen Sommer 2003 im Untergrund zu versickern. Das Amt für Naturparke der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol hat daher für den Naturpark Rieserferner-Ahrn eine Studie zur Erfassung, Berechnung und räumlichen Simulation der Gletscher- und Permafrostvorkommen sowie ihrer Veränderungen in Auftrag gegeben, welche auch die im Jahr 2005 angelaufene landesweite Permafrosterhebung in Südtirol (ZILGER et al. 2006) unterstützen soll. Späteres Ziel der Untersuchungen ist es, die Naturgefahrenpotenziale im Naturpark sowie die daraus resultierenden potenziellen Risiken für den Siedlungsraum zu ermitteln. Im Folgenden werden unter Einbeziehung umfangreicher Vorarbeiten die Ergebnisse des ersten Arbeitsabschnitts, die Untersuchungen zur Verbreitung des Permafrostes in der Rieserfernergruppe, vorgestellt.

2 Untersuchungsgebiet

Die Rieserfernergruppe (vgl. Abb. 1) ist ein den östlichen Zentralalpen im Südwesten vorgelagerter Gebirgsstock zwischen Venedigergruppe, Durreckgruppe, Deferegger Alpen und Pustertal. Höchster Punkt der Gebirgsgruppe mit einer Fläche von 250 km² ist der Hochgall (3.434 m). Der von West nach Ost verlaufende Hauptkamm der Gebirgsgruppe erstreckt sich bei einer mittleren Gipfelhöhe von knapp 3.100 m über eine Distanz von 21 km. Über dem Antholzer Tal erreicht er Vertikaldistanzen von 1.800 bis 2.000 m (DAMM 1996). Der Gebirgskomplex liegt innerhalb der *Zone der alten Gneise* und ist im Zentrum durch den tertiären Rieserfernerpluton aufgebaut (MAGER 1985, STAINDL 1982). Die Hauptgruppen der vorkommenden Gesteine umfassen plutonische Granodiorite und Tonalite, Pegmatitgesteine, Paragneise, voralpine Marmore und Amphibolite (HAMMERSCHMIDT 1981).

Klimadaten weisen die Rieserfernergruppe als kontinental geprägten Raum aus. Das Gebiet liegt am Ostrand einer inneralpinen Klimazone, die durch trockene, schneearme Winter mit häufigem lokalem Hochdruck gekennzeichnet ist sowie durch

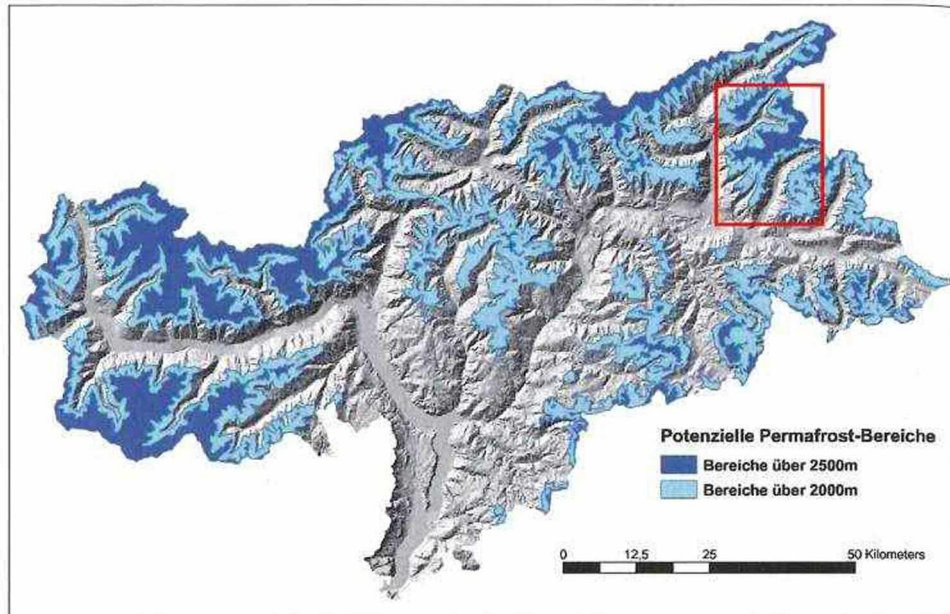


Abb. 1: DGM der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol mit potenziellen Permafrostarealen und der Lage der Rieserfernergruppe (verändert aus ZILGER et al. 2005)

Monat	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Gradient der Lufttemperatur [°C/100 m]	0,36	0,51	0,64	0,70	0,70	0,68	0,70	0,62	0,59	0,53	0,48	0,35	0,57
0°C-Isotherme [m ü. M.]	-34	917	1633	2009	2801	3356	3473	3857	3072	2536	1439	280	2323

Tab. 1: Gradienten der monatlichen und jährlichen Lufttemperatur sowie 0°C-Isothermen für das Gebiet der Rieserfernergruppe, ermittelt aus Temperaturdaten von neun Messstationen für den Zeitraum 1994 bis 2004. Datengrundlage: Hydrographisches Amt, Autonome Provinz Bozen-Südtirol

feuchte Sommer unter advektivem Einfluss (FLIRI 1962). An den Stationen des Untersuchungsgebietes ist die niederschlagsreichste Zeit der Sommer mit rund 40% des Jahresniederschlags, trockenste Monate sind Dezember und Januar. Linear berechnete Gradienten der Lufttemperatur für Höhen zwischen 820 und 3.100 m ü.M., sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Basisdaten wurden über den Zeitraum 1998 bis 2004 gemittelt, da die aktuelle Permafrostsituation weitgehend durch Klimaparameter der letzten Dekade bestimmt wird (vgl. HAEBERLI 1975). Die Gradienten schwanken in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Sie liegen innerhalb einer Spanne von 0,7°C/100 m im Sommer und 0,35°C/100 m während der Wintermonate. Für das Jahresmittel er-

rechnet sich ein Gradient von $0,57^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Die 0°C -Isotherme liegt im Jahresmittel bei 2.332 m ü.M.

In der Rieserfernergruppe ist die jüngere Entwicklung der Gletscher gut dokumentiert (DAMM 1996, 1998, 1999). Die Gletscherfläche nahm in den vergangenen 150 Jahren um über 50% ab. Die mit dem Gletscherrückgang verbundenen Volumenverluste betragen etwa 70% der Eismasse von 1850, entsprechend einem Wasseräquivalent von 610 Mio. m^3 . Die maximalen Dickenverluste entstanden zwar weitgehend in den Zungenbereichen, verschiedene Gletscher erlitten jedoch Totalverlust. Aufgrund der negativen Massenbilanz in den vergangenen Jahren befinden sich derzeit sämtliche Gletscher im Naturpark im Rückzug. Durch den Anstieg der Gleichgewichtslinien seit Anfang der 1990er-Jahre in Höhen von über 3.000 m ü.M. sind verschiedene Gletscher derzeit auch aus den Nährgebieten heraus in Auflösung begriffen und werden bei anhaltend gletscherungünstigen Witterungsbedingungen in den nächsten Jahren vollständig verschwinden.

Im Rieserfernergebiet ist ein umfangreiches Permafrostareal zu vermuten. Nach vorläufigen Schätzungen dürfte das vorhandene Permafrostareal 35 bis 40 km^2 umfassen, was etwa der 2,5 bis 3-fachen Gletscherfläche entspricht. Das im Dauerfrostboden gespeicherte Wasser dürfte danach etwa 100 Mio. m^3 umfassen (DAMM 1996). Aus verschiedenen Bereichen der Gebirgsgruppe liegen Hinweise darauf vor, dass kürzlich noch aktive Blockgletscher inzwischen in einen inaktiven Zustand geraten sind. Es ist davon auszugehen, dass sich diese Permafrostkörper während der kühleren neuzeitlichen Klimaphase (1600-1850) in aktivem Zustand befanden und die Kriechbewegungen infolge der Erwärmung während der vergangenen 150 Jahre zum Stillstand gekommen sind.

3 Methodische Grundlagen

Unter Permafrost wird Lithosphärenmaterial (Fels, Gesteinsschutt, Moräne, Boden usw.) verstanden, das für den Verlauf von mindestens zwei Jahren negative Temperaturen aufweist. Permafrostvorkommen sind glaziologisch-geothermische Phänomene, die insbesondere durch Lufttemperatur, Einstrahlung, Oberflächeneigenschaften, Wasserhaushalt und raum-zeitliche Schneedeckenverteilung gesteuert werden (vgl. HAEBERLI 1996). In Gebirgslandschaften gibt das regionale Klima weitgehend die Rahmenbedingungen für die Permafrostverbreitung vor, da die lokalen Temperaturverhältnisse überwiegend vom Relief gesteuert werden. Im Alpenraum ist im Allgemeinen oberhalb einer Höhenzone von 2.000-2.500 m mit Permafrost zu rechnen, der Mächtigkeiten von mehreren Metern und bis 100 m und darüber erreichen kann. Dabei ist die Verbreitung kontinuierlich (räumlich geschlossen bei einer mittleren jährlichen Lufttemperatur = MAAT von -4 bis -8°C), diskontinuierlich (fleckenhaft bei einer MAAT von -1 bis -4°C) oder sporadisch (inselförmig bei einer MAAT >0 bis -1°C). Eine sommerliche Auftauschicht kann mehrere Meter mächtig werden.

3.1 Geomorphologische und metrische Permafrostindikatoren

Permafrost entzieht sich der direkten Beobachtung, sofern keine natürlichen oder künstlichen Aufschlüsse vorhanden sind. Seine Kartierung und Beobachtung erfolgt daher in der vorliegenden Untersuchung unter Einbeziehung geomorphologischer und hydrologischer Indikatoren sowie direkter Messungen auf Indikatoren gestützt (vgl. Tab.2).

Direkte Indikatoren	Morphologische und hydrologische Indikatoren	Metrische Indikatoren	
		Geotechnik und -physik	Direkte Messungen
Natürliche Aufschlüsse	Blockgletscher und Fließformen	Bohrung	BTS
Künstliche Aufschlüsse	Gefrorene Schutthalden	Refraktionsseismik	Boden-, Felstemperatur
	Eisgesättigte Moränen	Geoelektrik	Quellwassertemperatur
	Perennierende Schneeflecken	Bodenradar	Quellwasserleitfähigkeit
	Permafrostquellen		Bewegungsraten Blockgletscher

Tab. 2: Indikatoren zur räumlichen Erfassung von Gebirgspermafrost (aus DAMM & Mitarbeiter 2006)

Blockgletscher

Als Permafrostindikatoren von Bedeutung sind intakte und aktive Blockgletscher (vgl. Abb. 2). Im aktiven Zustand treten horizontale und vertikale Bewegungen mit typischen Raten im Bereich von Zentimetern bis Dezimetern pro Jahr auf. An der Oberfläche von Blockgletschern bilden sich dabei charakteristische Fließstrukturen aus, die bei der Luftbildkartierung deutlich hervortreten. Der Zustand – aktiv oder inaktiv – kann anhand von geomorphologischen Kriterien, durch Bewegungsmessungen vor Ort oder durch Verschiebungsmessungen mit Hilfe von Luftbildern festgestellt werden (u.a. BARSCH 1996, HAEBERLI 1985).

Aufgrund der Fließbewegungen dringen aktive Blockgletscher häufig in permafrostfreies Gelände vor, weshalb Blockgletscheruntergrenzen diskontinuierlichen Permafrost repräsentieren. Sie korrelieren mit Werten der MAAT von -1 bis -3°C (u.a. BARSCH 1977, DAMM 1996, HAEBERLI 1982, KROBATH & LIEB 2002, ROLSHOVEN 1982). Neben Blockgletschern zeigen kriechende oder fließende loben- bzw. girlandenförmige Schuttkörper, die als flächenhafte Bewegungen von Sturz- oder Hangschutt bzw. Moräne über gefrorenem Untergrund durch Gelisolifluktion entstehen, häufig die räumliche Verbreitung von Permafrost an (EMBLETON & KING 1975, VEIT & HÖFNER 1993). Auch hier muss der Aktivitätszustand in Feldstudien überprüft werden.

Eisreiche Moränen

Für den Nachweis von rezentem Permafrost haben aus eisreichem Geschiebe aufgebaute Moränen (Ufermoräne, Grundmoräne) Indikatorfunktion, die im Zuge des Gletscherrückzugs seit 1850 entstanden sind. Im Untersuchungsgebiet kommen eisreiche Moränen überwiegend im näheren Umfeld der rezenten Gletscher vor – häufiger im Rückzugsgelände der vergangenen Jahrzehnte, seltener im Bereich der neuzeitlichen Maximalausdehnung. Das Vorkommen von Eis kann durch Augenschein oder Messverfahren nachgewiesen werden. Aus mehrjährigen Beobachtungen wird deutlich, dass sich als Folge des Abtauens des oberflächennahen Eises im Moränenmaterial eine Blockschicht anreichern kann, die sukzessive den verbleibenden Eiskern vor Wärmeeinstrahlung schützt und dessen Abschmelzen verzögert. Fortschreitendes Abtauen des Eises bewirkt mitunter Phänomene des Thermokarstes (vgl. Abb. 3) und führt zur Destabilisierung des Moränenmaterials.

Perennierende Schneeflecken

Perennierende Schneeflecken überdauern mindestens ein Jahr, weisen zum Ende des Sommers geringe Ausdehnungen und Mächtigkeiten auf, gehen häufig mit einem Eisabschluss in das unterlagernde Substrat oder den Fels über (u.a. ROLSHOVEN 1982) und sind typischerweise mit intakten und aktiven Blockgletschern vergesellschaftet (vgl. Abb. 4). Bereits früh machten FURRER & FITZE (1970) darauf aufmerksam, dass perennierende Schneeflecken lokal von Permafrost unterlagert werden, weshalb aus einer hohen Schneefleckendichte auf eine weiträumige Verbreitung von Permafrost im Untergrund geschlossen werden kann (vgl. auch HAEBERLI 1975). Bei geringerer Verteilungsdichte und tiefer Lage muss allerdings mit Einflüssen des Reliefs (Schneeansammlung in Mulden, Schneeflecken im Einzugsbereich von Lawenstrichen u.a.) und der Orographie (Luv-Lee-Situation) gerechnet werden. Darüber hinaus treten auch bei Lagekonstanz in Nivationsnischen und Mulden witterungsabhängig Varianzen in Ausdehnung und Schneemächtigkeit auf (vgl. ROLSHOVEN 1982).

Temperatur und elektrische Leitfähigkeit von Permafrostquellen

Ein auffallendes Merkmal von Permafrostvorkommen sind geringe, über die gesamte Sommerperiode weitgehend konstante Temperaturen der Schmelzwässer, die gefrierpunktnahe Temperaturen aufweisen. Sommerliche Temperaturen von Permafrostquellen im Stirnbereich von aktiven und intakten Blockgletschern untersuchten unter anderem SEPPI et al. (2005) im Ortlergebiet, in den Hohen Tauern sowie in den Stubaier Alpen KRAINER & MOSTLER (2001, 2004) sowie in der St. Elias Range (Kanada) BLUMSTENGEL & HARRIS (1988), die jeweils über Wochen hinweg im Bereich zwischen 0,2 und 1°C lagen. Dabei schwankten die täglichen Abflussmengen der Quellen weitgehend innerhalb geringer Spannen (vgl. auch SCHROTT 1994). Messungen im Naturpark Rieserferner-Ahrn machen darüber hinaus deutlich, dass auch Schmelzwässer aus eisreichen Moränen und Schutthalden gleich bleibend permafrosttypische Temperaturen aufweisen können.

Die spezifische elektrische Leitfähigkeit κ [$\mu\text{S}/\text{cm}$] ist ein Maß für die Fähigkeit einer Lösung, elektrischen Strom zu leiten. Sie dient im Wasser als Hinweis für den Gehalt an gelösten Inhaltsstoffen (Mineralisierung), weshalb bei stärkerer Mineralisie-



Abb. 2: Der Blockgletscher Napfen I in der nördlichen Rieserfernergruppe. Aufnahme: B. DAMM aus 2.750 m ü.M an der Nordflanke der Dreieckspitze (3.031m), Aufnahmerichtung Nord

nung höhere Messwerte angezeigt werden. Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Schmelzwässern zielt in diesem Falle darauf ab, Wässer nach ihrer Herkunft zu differenzieren (vgl. auch KRAINER & MOSTLER 2004). In der vorliegenden Untersuchung wird angenommen, dass in Wässern aus rezenten Permafrostvorkommen aufgrund der längeren Verweildauer im Gestein bzw. Sediment höhere Ionenkonzentrationen gelöst sind als in solchen aus Firnfeldern, Gletschern oder Regenwasser (vgl. DIN EN 27888). Das Verfahren erfordert vergleichende Messungen von unterschiedlichen Wässern bei sich entsprechenden petrographischen Verhältnissen innerhalb der Einzugsgebiete. Bei ausreichender Differenzierung sollte sich dann die elektrische Leitfähigkeit in Verbindung mit permafrosttypischer Wassertemperatur als indirekter Permafrostindikator heranziehen lassen. Das Verfahren ist bisher jedoch nicht erprobt (vgl. SCHROTT 1994, SEPPI et al. 2005).

Boden-, Felstemperatur, Basistemperatur der Schneedecke (BTS)

Als Klimaphänomen steht Permafrost in direktem Zusammenhang mit Bodenwärmefläüssen. Sommerliche Auftautiefe und Eindringtiefe des winterlichen Frostes bestimmen die Rahmenparameter für dessen Ausprägung (vgl. HAEBERLI 1985, STOCKER-MITTAZ 2002). Temperaturen an der Bodenoberfläche unterliegen aufgrund verschiedener Einflüsse erheblichen Schwankungen. Unter einer ausreichend mächtigen winterlichen Schneedecke stellt sich aufgrund der isolierenden Wirkung allerdings eine weitestgehend konstante Bodentemperatur ein. Sie entspricht dem Wärmefluss aus tieferen Bodenschichten an die Oberfläche. Die Basistemperatur der winterlichen Schneedecke (BTS) lässt sich daher zur Abschätzung der Permafrostverbreitung einsetzen (z.B. HAEBERLI 1975, HÖLZLE 1994, ISHIKAWA & HIRIKAWA 2000, LEWKOWICZ & EDNIE 2004). Basistemperaturen der winterlichen Schneedecke lassen sich nach ihrer Indikatorfunktion für Permafrost in empirisch ermittelte Klassen differenzieren (HAEBERLI 1985). Danach gilt das Vorhandensein von Permafrost bei BTS-Werten unter -3°C als wahrscheinlich und bei Werten über -2°C als unwahrscheinlich. Das BTS-Verfahren wurde verschiedentlich in Modellen zur Simulation der Permafrostverbreitung umgesetzt und dabei auch die empirische Klassifizierung bestätigt (u.a. HÖLZLE 1994, LEWKOWICZ & EDNIE 2004).



Abb. 3: Thermokarst in einer eisreichen Ufermoräne des neuzeitlichen Gletscherhochstandes am Nördlichen Gelltalferner (Rieserfernergruppe). Das Abschmelzen der Moräne lässt sich seit etwa fünf Jahren beobachten. Aufnahme: B. DAMM aus 2.800 m am Erlanger Weg, Aufnahmerichtung West



Abb. 4: Perennierende Schneeflecken in Vergesellschaftung mit einem Blockgletscher im Rötelsboden, östliche Rieserfernergruppe (Osttirol). Aufnahme: B. DAMM aus 2.600 m ü.M. am Seibl, Blickrichtung NW, Bretterspitzen

3.2 Kartierung und Feldarbeiten

Die Kartierungen stützen sich auf Luftbilder und Orthophotos der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol aus den Befliegungsjahren 1956 und 1985 (analog) sowie 1997 und 1999 (digital). Die Aufnahmen von 1999 liegen georeferenziert in UTM-WGS84 Koordinaten vor. Der Lagefehler beträgt maximal 4 m (ASCHBACHER & ZANVETTOR 2001). Die Aufnahmen aus dem Jahr 1997 wurden auf der Grundlage der Orthophotos von 1999 aus dem Gauß-Boaga-System in UTM- Koordinaten überführt. Die Bodenauflösung für beide Aufnahmejahre beträgt 1 m.

Die Luftbildanalyse erfolgte weitgehend zur Identifikation und Kartierung geomorphologischer Permafrostindikatoren. Blockgletscher, Fließformen, eisgesättigte Moränen und gefrorene Schutthalden konnten differenziert werden. Zum Nachweis des Aktivitätszustands an Blockgletschern wurden terrestrische Messungen und/oder multitemporale photogrammetrische Untersuchungen eingesetzt. Eisgesättigte Moränen und gefrorene Schutthalden konnten nur durch Geländearbeiten identifiziert und kartiert werden. Die Digitalisierung der Daten erfolgte mit der GIS-Software ArcGIS 9.1, wobei eine Kartiergenauigkeit mit einem Lagefehler von 1 bis 5 m angestrebt wurde.

Feldarbeiten beziehen neben Kartierungen Einzelmessungen und Messprogramme ein. Unter anderem werden an einem Blockgletscher in der nördlichen Rieserfernergruppe (Napfen I) seit 1992 terrestrische Verschiebungsmessungen mit jährlicher Wiederholung vorgenommen (vgl. auch DAMM 1996, DAMM & LANGER 2006). Bodentemperaturmessungen werden mit Hilfe von Datenloggern seit 2003 an bisher rund 30 Messstellen erfasst.

3.3 Messverfahren und Fehlerquellen

Bodentemperaturmessungen werden mit Datenloggern der Firma ONSET (HOBO® Pro-Serie) durchgeführt. Die Geräte sind mit Innenfühlern zur Messung der Umgebungstemperatur und Außenfühlern zur zeitgleichen Messung von Luftfeuchte oder Wassertemperaturen ausgestattet. Zur Messung von Bodentemperaturen werden die Geräte an den Messstellen in Dezimeter mächtige Schuttpackungen eingebaut, die den Schutz vor Strahlungseinfluss gewährleisten. Messungen erfolgten an jeweils drei Terminen täglich. Die Datenspeicher werden im Abstand von etwa zwölf Monaten ausgelesen. Die Genauigkeit für Temperaturmessungen mit hoher Auflösung liegt im Messbereich von 0°C bis -20°C bei $\pm 0,2$ °C.

Messungen von Quelltemperatur und elektrischer Leitfähigkeit erfolgen mit einem temperaturkompensierten WTW-Cond 340i Konduktometer mit einer TetraCon-325 Graphit-Messzelle. Die Toleranzen der Messeinheit liegen für die Messgenauigkeit der Leitfähigkeit bei $\leq 0,5\%$ des Messwertes ± 1 Digit und für Temperaturwerte bei $\leq 0,1$ K ± 1 Digit (WTW 2001).

Zur Rekonstruktion längerfristiger Deformationen an den Oberflächen von Blockgletschern wurden photogrammetrische Untersuchungen sowie GIS-gestützte Analysen mit Hilfe von Orthophotos und Luftbildern in den Zeitschnitten 1956 – 1985 – 1992

- 1999 auf der Grundlage von geomorphologischen Bewegungsindikatoren durchgeführt. Für zwei Blockgletscher (Napfen I, Sosseneck) konnten Bewegungsraten für die vergangenen 50 Jahre bestimmt werden (DAMM & LANGER 2006).

4 Räumliche Verbreitung und physikalische Eigenschaften von Permafrostindikatoren

Blockgletscher, eisreiche Moränen und gefrorene Schutthalden

In der Rieserfernergruppe wurden 25 intakte, häufig aktive Blockgletscher kartiert, die auf den nördlichen Bereich des Untersuchungsgebietes konzentriert sind und weitgehend in Paragneisen und Glimmerschiefern und nur vereinzelt in granitischen Gesteinen vorkommen. Die kartierten Blockgletscher erreichen Ausdehnungen zwischen einem und 53 ha und sind nach Flächenanteilen überwiegend zwischen 2.700 und 2.800 m ü.M. in Nord- bis Nordwest- Exposition verbreitet (vgl. Abb. 5). Ein den Blockgletschern ähnliches Verbreitungsmuster weisen die kartierten Fließformen auf, die sich auf den Höhenbereich 2.500 bis 3.000 m ü.M. und vorrangig auf Nordost-Exposition konzentrieren.

Die tiefstgelegene Stirn aktiver und intakter Blockgletscher erreicht in der Rieserfernergruppe eine Höhe von 2.400 m ü.M. Im Mittel liegen Untergrenzen der kartierten Blockgletscher in 2.550 m ü.M. und verglichen mit Gebirgsgruppen in den Italienischen Alpen tief (vgl. Tab. 3).

Gebirgsgruppe	Mittlere Höhe der Blockgletscherstirn [m ü.M.]	MAAT [°C]
Gran Paradiso	2.760	- 2,2
Monte Rosa	2.640	- 1,6
Ortler – Cevedale	2.770	- 2,9
Ötztaler Alpen	2.570	- 2,2
Rieserferner	2.550	- 1,3

Tab. 3: Mittlere Höhe von Blockgletscherstirnen und korrelierte MAAT in Gebirgsgruppen der Italienischen und Südtiroler Alpen nach BELLONI et al. (1988) und DAMM (1996)

Neben Blockgletschern konnten 25 Vorkommen eisreicher Moränen und gefrorener Schutthalden als Indikatoren für Permafrostvorkommen kartiert werden, bei denen der Eiskern entweder direkt beobachtet oder anhand der Schmelzwassertemperaturen nachgewiesen werden konnte. Die Vorkommen befinden sich innerhalb eines Höhenbereichs von 2.550 bis 3.150 m ü.M.

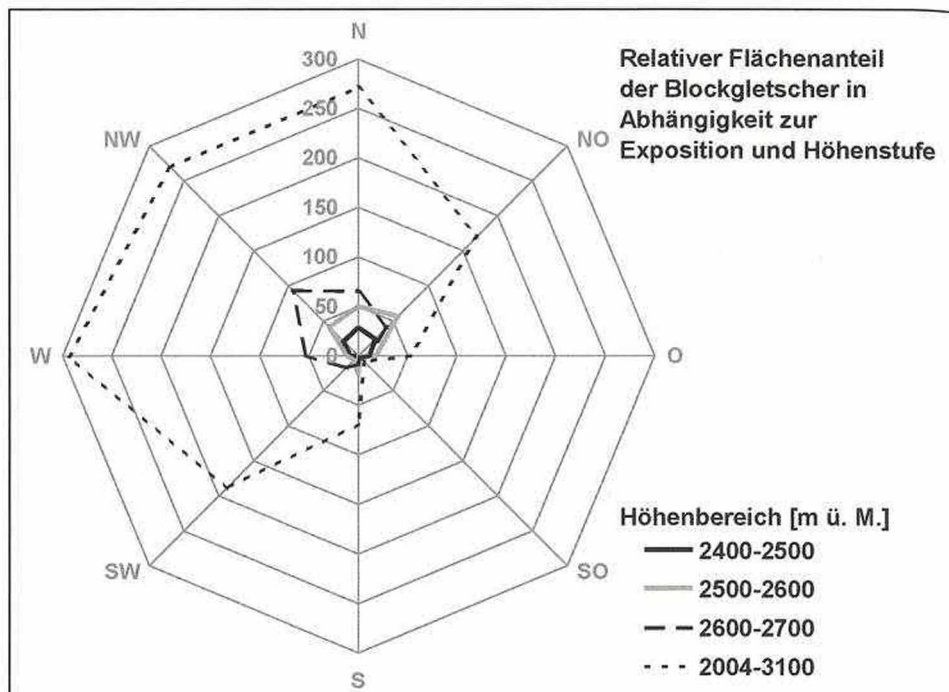


Abb. 5: Höhenlage und Verteilung aktiver und intakter Blockgletscher in der Rieserfernergruppe (Flächenanteile in Promille)

Perennierende Schneeflecken

Auf Grundlage der Orthophotos aus den Jahren 1997 und 1999 (Befliegungszeitraum Spätsommer) wurden rund 1.000 lagegleiche Einzelvorkommen von perennierenden Schneeflecken kartiert, deren Lage anhand der Aufnahme aus dem Jahr 1985 überprüft wurde. Die Kartierung erfolgte händisch, da nach eigenen Erfahrungen automatisierte Kartierungen die Anzahl und Ausdehnung von perennierenden Schneeflecken häufig überschätzen. Im Zuge der Kartierung konnten Reliefeinflüsse berücksichtigt werden, weshalb beispielsweise Schneeflecken unterhalb von Lawinenrutschen als mögliche Indikatoren für tief gelegene, sporadische oder inselhafte Permafrostvorkommen nicht einbezogen wurden.

Die horizontale Gesamtfläche perennierender Schneeflecken umfasst rund 90 ha. Ober- und Untergrenzen liegen innerhalb eines Höhenbereichs von 2.450 bis 3.400 m ü.M. Die relative Fläche nimmt mit zunehmender Höhe, abgesehen vom Höhenbereich 3.000 bis 3.300 m ü.M., zu. In dieser Höhenzone überwiegen in der Rieserfernergruppe sehr steiles und für die Entwicklung und Erhaltung von Schneeflecken ungünstiges Relief (Steilwände) sowie Gletscherflächen. Der relative Flächenanteil perennierender Schneeflecken ist zwischen 2.400 und 2.600 m ü.M. auf den Nordsektor konzentriert (vgl. Abb. 6), ein Effekt, der sich mit zunehmender Höhe verliert.

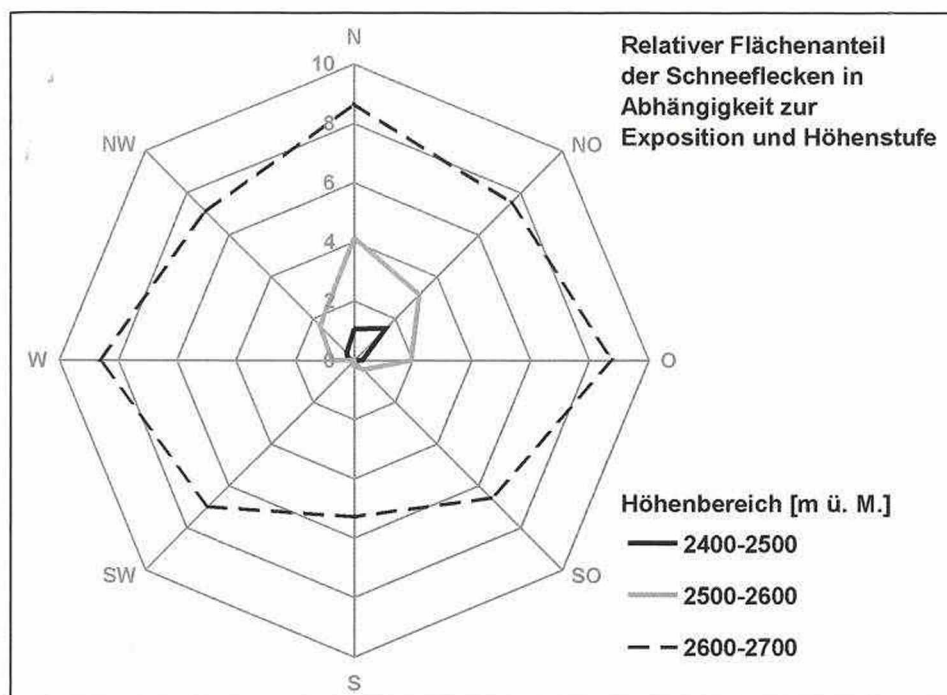


Abb. 6: Höhenlage und Verteilung perennierender Schneeflecken in der Rieserfernergruppe (Flächenanteile in Promille)

Temperatur und elektrische Leitfähigkeit von Permafrostquellen

Die Vorkommen von Permafrostquellen sind in der Rieserfernergruppe unregelmäßig verteilt und räumlich weitgehend an die Stirn- und Fußbereiche von Blockgletschern und eisreichen Moränen gebunden. An zugänglichen Quellen wurden zwischen 1992 und 2004 Wassertemperaturen gemessen. Seit 2004 wird auch die elektrische Leitfähigkeit des Quellwassers erfasst. Temperaturmesswerte ausgewählter Quellen zeigt Tabelle 4. Sie liegen zwischen 0,1 und 1,8°C und kennzeichnen den permafrosttypischen Wertebereich.

Zur Differenzierung von Quellwässern in den Permafrostregionen auf Grundlage der elektrischen Leitfähigkeit ist der Kenntnisstand bislang unzureichend. Permafrostquellen aus den Stirnbereichen verschiedener aktiver Blockgletscher untersuchten im Ortlergebiet SEPPI et al. (2005). Die an 16 Quellen im Temperaturbereich zwischen 0,2 und 2,0°C gemessene elektrische Leitfähigkeit lag innerhalb einer Spanne von 10 bis 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Als Ursache für die hohe Variabilität der Messwerte wurde eine Vermischung mit Niederschlags- und Schneeschmelzwasser angenommen. Sofern die Vermischung mit Fremdwässern reduziert war oder fehlte, lagen die Messwerte an verschiedenen Blockgletscherquellen in den Hohen Tauern und den Stubai Alpen im Wertebereich von 50 bis 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (KRAINER & MOSTLER 2001, 2004). Messungen an

Messstelle	Temperatur Quellwasser [°C]	Höhe (m ü.M.)	Zeitraum der Messungen
Blockgletscher Bärenluegscharte*	0,9	2.810	2004
Blockgletscher Napfen	0,1 – 1,1	2.560 – 2.595	1992 – 2006
Blockgletscher Malersee	0,4 – 0,6	2.500	2003 – 2006
Blockgletscher Pürschtal	0,1 – 1,2	2.340 – 2.475	2005
Schutthalden Malersee	0,9 – 1,1	2.530	2004 – 2006
Schutthalde Napfenseen*	1,8	2.400	2004
Moräne Südl. Gelltalferner	0,8	2.530	2004
Moräne Östl. Rieserferner	1,2	2.395	2005 – 2006

(*Einzelwert)

Tab. 4: Temperaturen von Permafrostquellen an aktiven und intakten Blockgletschern, gefrorenen Schutthalden und eisreichen Moränen in der Rieserfernergruppe

Quellen im Stirnbereich eines Blockgletschers in den argentinischen Hochanden durch SCHROTT (1994) ergaben Leitfähigkeiten von 317 bis 325 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die Werte, die in petrographisch unterschiedlichen Einzugsgebieten erhoben wurden, sind untereinander nicht vergleichbar, da die Mineralisierung von Schmelzwässern wesentlich durch die Löslichkeit der im Einzugsgebiet vorkommenden Gesteine bestimmt wird.

In der Rieserfernergruppe sind elektrische Leitfähigkeiten an Schmelzwässern aus Blockgletschern, gefrorenen Schutthalden, eisreichen Moränen sowie perennierenden Schneeflecken in petrographisch vergleichbaren Einzugsgebieten mit anstehenden Paragneisen bestimmt worden. Sie sind in Abbildung 7 den gemessenen Schmelzwassertemperaturen gegenübergestellt. Danach zeichnen sich ansatzweise diskrete Wertebereiche für Wässer unterschiedlicher Herkunft ab. Innerhalb einer sehr engen Wertespanne von 0,1 bis 7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ liegt die Leitfähigkeit von Schmelzwässern aus perennierenden Schneeflecken. Die hier vorhandenen Ionenkonzentrationen dürften im Wesentlichen auf atmosphärische Einträge zurückzuführen sein. Für Schmelzwässer aus Blockgletschern zeichnet sich eine Werthäufung innerhalb eines Bereichs von 25 bis 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ab. Darüber hinaus streuen jedoch weitere Einzelwerte zwischen 75 und 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$, wie auch die Schmelzwasser-Leitfähigkeiten in gefrorenen Schutthalden und eisreichen Moränen insgesamt sehr stark streuen. Auf der Grundlage der vorliegenden Daten lassen sich vorläufig nur die Schmelzwässer der perennierenden Schneeflecken von denen aus eishaltigen Schuttkörpern unterscheiden. Eine weitere Differenzierung nach der Herkunft aus Blockgletschern, gefrorenen Schutthalden und eisreichen Moränen ist auch unter Berücksichtigung der Schmelzwassertemperatur nur mit großen Einschränkungen möglich. Für weitergehende Aussagen sind zusätzliche Messungen, differenzierte Laboranalysen der Wässer sowie Messreihen erforderlich, mit denen der Einfluss von Fremdwasser auf die Ionenkonzentrationen in Permafrostquellen untersucht werden kann.

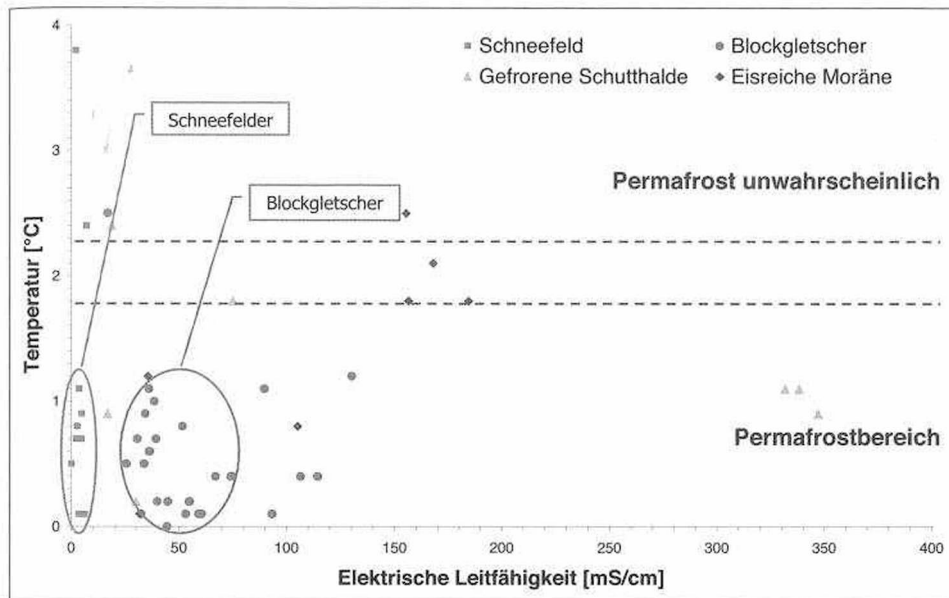


Abb. 7: Elektrische Leitfähigkeiten und Wassertemperaturen aus Permafrostquellen in der Rieserfernergruppe

Bodentemperatur und Basistemperatur der Schneedecke (BTS)

Zur Messung von Bodenoberflächentemperaturen wurden Datenlogger in einem Höhenbereich (2.490-3.350 m) eingesetzt, in dem grundsätzlich mit Permafrost zu rechnen ist. Um den Einfluss des unterschiedlichen Strahlungsgenusses abschätzen zu können, sind die Geräte in verschiedenen Expositionen und Hangneigungen eingebaut worden. Die Anordnung der Logger ermöglicht derzeit die Auswertung von fünf Temperaturprofilen, drei davon im Nord- und zwei im Südsektor. Mit Hilfe von Loggermessungen im Verlauf der Winterperiode lässt sich grundsätzlich auch die Entwicklung der Bodentemperaturen an der Basis der Schneedecke verfolgen. Bei ausreichender Schneedeckenmächtigkeit wurden mit den im Untersuchungsgebiet eingesetzten Geräten insbesondere während der Monate Februar und März vom Einfluss der Lufttemperatur unabhängige, sehr konstante Temperaturverläufe beobachtet. Die in diesem Zeitraum gemessenen Werte lassen sich analog zu den durch Sondenmessungen ermittelten Basistemperaturen der Schneedecke (BTS) verwenden. Zur Verdichtung der Messwerte wurden im Spätwinter 2006 zusätzlich BTS-Sondenmessungen in unterschiedlichen Gletschervorfeldern durchgeführt.

Die durchgeführten Messungen belegen einen signifikanten Zusammenhang zwischen den Basistemperaturen an der Schneedecke und der Geländehöhe der Messstellen (vgl. Abb. 8). Der Höhengradient der BTS folgt im Bereich von 2.500 bis 3.000 m einem linearen Trend mit einer mittleren Steigung von ca. 2°C/100 m. Der Expositionsunterschied führt zu einer Differenz der BTS-Werte von 3 bis 4°C. Die Untergrenze wahrscheinlicher Permafrostvorkommen liegt im Nordsektor bei ca. 2.530 m ü.M. und

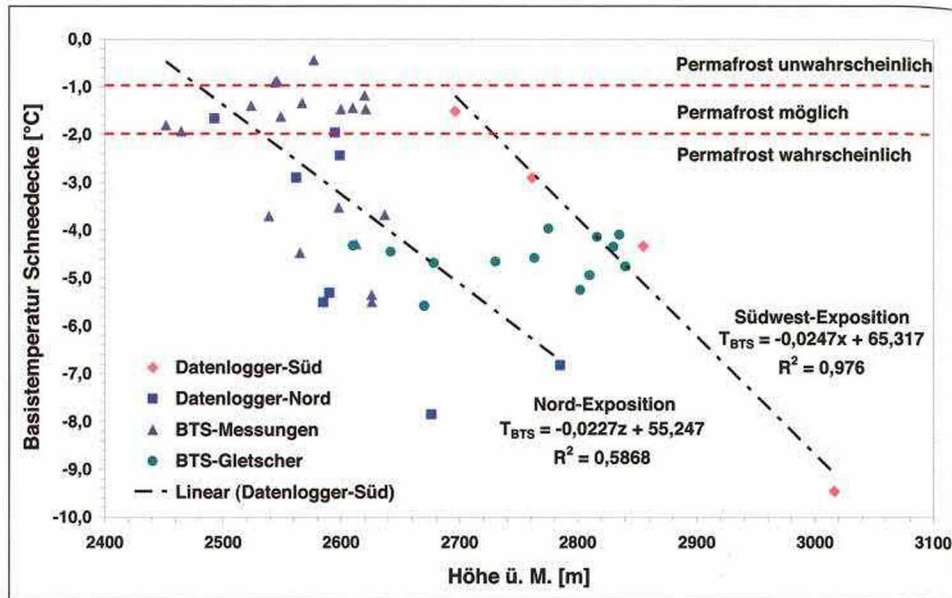


Abb. 8: Beziehung zwischen BTS-Werten aus Logger- und Sondenmessungen und der Geländehöhe der Messpunkte für den Nord- und den Südsektor in der Rieserfernergruppe

im Südsektor bei ca. 2.730 m ü.M. Die MAAT berechnet sich entsprechend auf $-1,5^{\circ}\text{C}$ bzw. $-2,6^{\circ}\text{C}$ (vgl. hierzu Literaturwerte nach BARSCH 1977, BELLONI et al. 1988, DAMM 1996, HAEBERLI 1982, KROBATH & LIEB 2002). Die Datenlage ist im Untersuchungsgebiet im Südsektor noch unzureichend. Hier sind zur Absicherung der berechneten Werte weitere Messungen erforderlich.

5 Abschätzung der Permafrostverbreitung durch Regionalisierung von perennierenden Schneeflecken

Mit Hilfe einer GIS-gestützten Analyse der räumlichen Verbreitung perennierender Schneeflecken im Vergleich zum Vorkommen weiterer Permafrostindikatoren wird der Frage nachgegangen, inwieweit die unterschiedliche räumliche Dichte von Schneeflecken eine Prognose der Permafrostverbreitung erlaubt.

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, nimmt der relative Flächenanteil von perennierenden Schneeflecken mit zunehmender Geländehöhe zu. Darüber hinaus liegt im Höhenbereich 2.400 bis 3.000 m ü.M. bei gleicher Häufigkeit perennierender Schneeflecken die Untergrenze ihrer Verbreitung in Nordexposition tiefer. Der statistische Zusammenhang zwischen Häufigkeitsverteilungen von Schneeflecken und topographischen Parametern lässt sich durch eine Klassifizierung der räumlichen

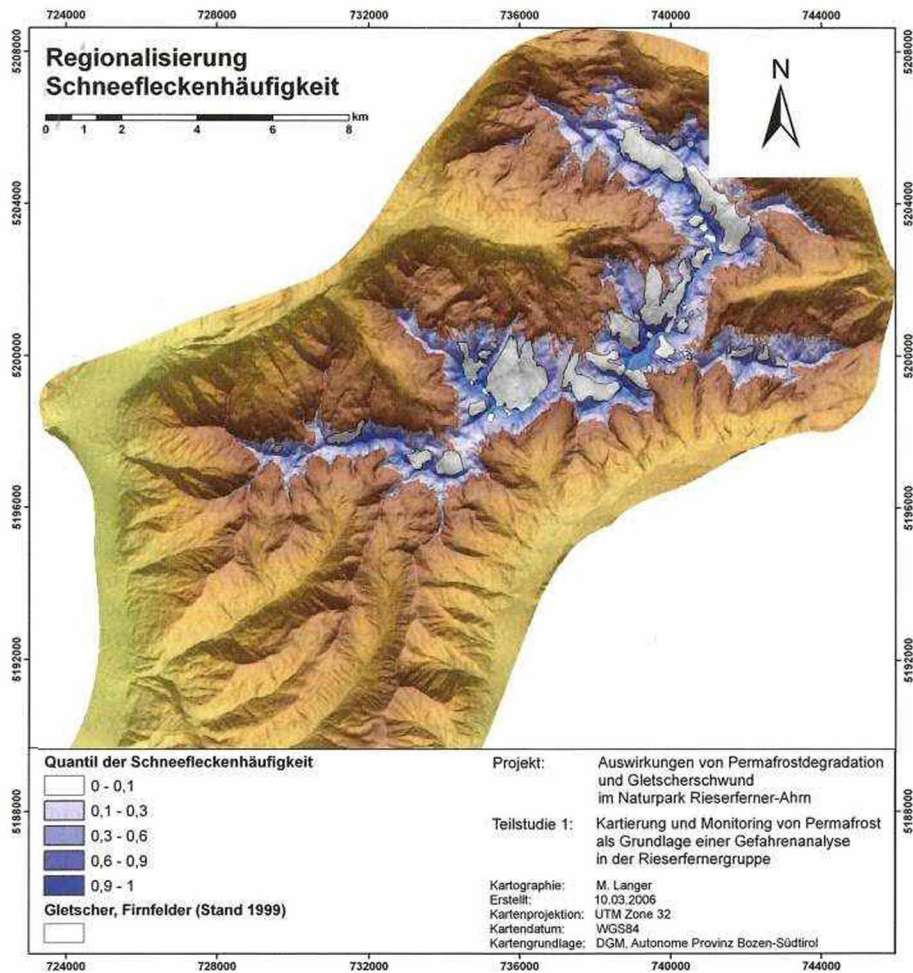


Abb. 9: Regionalisierung der Schneefleckenhäufigkeit in der Rieserfernergruppe unterteilt nach Quantilen (aus DAMM & Mitarbeiter 2006)

Verteilung nach Höhenlage und Exposition mit Hilfe von Quantilen herstellen. Durch eine Verschneidung des resultierenden statistischen Modells mit einem Digitalen Geländemodell des Untersuchungsgebietes (20-Meter-DGM der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol) kann die Häufigkeitsanalyse raumbezogen extrapoliert werden. In einem weiteren Schritt werden zur Abschätzung der potenziellen Verbreitung von Permafrostvorkommen oberhalb der Untergrenze von diskontinuierlichem Permafrost die Resultate der Schneefleckenregionalisierung mit den aus geomorphologischen und hydrologischen Permafrostindikatoren bekannten räumlichen und physikalischen Informationen abgeglichen. Hierzu werden die digitalisierten, permafrostrelevanten Punktdaten – Bodentemperaturen, Quellwassertemperaturen, Basistemperaturen der

Schneedecke, Vorkommen von Permafrostkörpern – nach Lage, Höhe und Exposition miteinander verschnitten.

Die Untergrenze von Permafrostkörpern und Quelltemperaturen wird bei einer Schneefleckenhäufigkeit von > 10% der Gesamtverteilung (10%-Quantil) gut getroffen (vgl. Abb. 9). Demzufolge stehen 80% der vorkommenden Schneeflecken mit einer hohen Wahrscheinlichkeit in Beziehung zu den übrigen Permafrostindikatoren. Das 10%-Quantil der Schneefleckendichte repräsentiert damit in guter Annäherung die Untergrenze der Permafrostverbreitung. In Südexposition verläuft diese bei 2.800 bis 2.870 m ü.M. und im Nordsektor bei 2.580 bis 2.650 m ü.M.

6 Literaturverzeichnis

- ASCHBACHER A., ZANVETTOR G. (2001), Landeskartographie und Geographisches Informationssystem – Beschreibung der Kartographischen Daten. Autonome Provinz Bozen-Südtirol, Amt f. überörtl. Raumordnung, Abt. Raumordnung. 13 S.
- BARSCHE D. (1977), Alpiner Permafrost – ein Beitrag zur Verbreitung, zum Charakter und zur Ökologie am Beispiel der Schweizer Alpen (= Abh. Akad. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl. 3, 31), S. 118-141.
- BARSCHE D. (1996), Rockglaciers. – Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments. Berlin, Heidelberg. 331 S.
- BELLONI S., PELFINI M., SMIRAGLIA C. (1988), Morphological features of the active rock glaciers in the Italian Alps and climate correlations. In: Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Permafrost, Trondheim (Norway), Aug. 2-5 1988, Vol. I, S. 678-682b.
- BLUMENSTENGEL W., HARRIS S.A. (1988), Observations on an active lobate rockglacier, Slims River Valley, St. Elias Range, Canada. In: Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Permafrost, Trondheim (Norway), Aug. 2-5 1988, Vol. I, S. 689-694.
- DAMM B. (1996), Gletscher-, Landschafts- und Klimaentwicklung in der Rieserfernergruppe (Tirol) seit dem Spätglazial (= Göttinger Geogr. Abh., 104). 186 S.
- DAMM B. (1998), Der Ablauf des Gletscherrückzuges in der Rieserfernergruppe (Tirol) im Anschluß an den Hochstand um 1850. In: Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie, 34, S. 141-159.
- DAMM B. (1999), L'evoluzione dei ghiacciai, del paesaggio e del clima nei Monti di Tures (Alto Adige) dal Tardiglaziale. In: Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 22, S. 49-55.
- DAMM B. und Mitarbeiter (2006), Auswirkungen von Permafrostdegradation und Gletscherschwund im Naturpark Rieserferner-Ahrn – Teilstudie 1: Kartierung und Monitoring von Permafrost als Grundlage einer Gefahrenanalyse in der Rieserfernergruppe (Teilprojekt im Rahmen der landesweiten Permafrosterhebung PROALP in Südtirol, FKZ 28.3.14.05/4144, Autonome Provinz Bozen Südtirol). Abschlussbericht Teil 1, März 2006. 32 S. + Anhang + Kartenteil.
- DAMM B., LANGER M. (2005), Permafrost – Gefahrenpotenziale durch Auftauen des Bodeneises. In: ParkS. Naturparke in Südtirol, 2, S. 14. Autonome Provinz Bozen-Südtirol, Amt f. Naturparke.
- DAMM B., LANGER M. (2006), Rockglacier Surface Kinematics over a 50-years Period – Examples from the South Tyrolean Alps (Italy). European Geosciences Union, General

- Assembly 2006, Vienna (Austria), 02-07 April 2006. In: *Geophysical Research Abstracts*, 8, S. 02585.
- DIN EN 27888 (1993), Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit. Dt. Inst. f. Normung Berlin, 11/93.
- EMBLETON C., KING C.A.M. (1975), *Periglacial Geomorphology*. London. 203 S.
- ETZELMÜLLER B., HOELZLE M., HEGGEM E., ISAKSEN K., MITTAZ C., VONDER MÜHLL D., ØDEGARD R., HAEBERLI W., SOLLID J. (2001), Mapping and Modelling the occurrence and distribution of mountain permafrost. In: *Norsk geogr. Tidsskr.*, 55, S. 186-194.
- FLIRI F. (1962), *Wetterlagenkunde von Tirol (= Tiroler Wirtschaftsstudien, 13)*. 436 S.
- FURRER G., FITZE P. (1970), Beitrag zum Permafrostproblem in den Alpen. In: *Vierteljahrsschrift Naturforsch. Ges. Zürich*, 115, S. 353-368.
- GRUBER S., HOELZLE M., HAEBERLI W. (2004), Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003. In: *Geophysical Research Letters*, 31/L13504.
- HAEBERLI W. (1973), Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. In: *Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie*, 9, S. 221-227.
- HAEBERLI W. (1975), Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (Graubünden). Zürich, Diss. Univ. Basel. 195 S.
- HAEBERLI W. (1982), Klimarekonstruktionen mit Gletscher-Permafrost-Beziehungen. In: *Materialien z. Physiogeogr.*, 4, S. 9-17.
- HAEBERLI W. (1985), Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of alpine rock glaciers. In: *Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie u. Glaziologie, ETH Zürich*, 77. 142 S.
- HAEBERLI W. (1992), Possible effects of climatic change on the evolution of Alpine permafrost. In: *Catena Supplement*, 22, S. 23-35.
- HAEBERLI W. (1996), On the morphodynamics of ice/debris-transport systems in cold mountain areas. In: *Norsk Polar Tidsskrift*, 50, S. 3-9.
- HAEBERLI W. (2005), Climate change and glacial/periglacial geomorphodynamics in the Alps: a challenge of historical dimensions. In: *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, Suppl.-Vol. II*, S. 9-14.
- HAMMERSCHMIDT K. (1981), Isotopengeologische Untersuchungen am Augengneis vom Typ Campo Tures bei Rain in Taufers, Südtirol. In: *Memorie di Scienze Geologiche*, XXXIV, S. 273-300.
- HARRIS S.A., FRENCH H.M., HEGINGBOTTOM J.A., JOHNSTON G.H., LADANYL B., SEGO D.C., VAN EVERDINGEN R.O. (Hrsg.) (1988), *Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms (= National Research Council Canada, Technical Memorandum, 142)*. 156 S.
- HOELZLE M. (1994), Permafrost und Gletscher im Oberengadin. In: *Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie u. Glaziologie, ETH Zürich*, 132. 121 S.
- ISHIKAWA M., HIRIKAWA K. (2000), Mountain Permafrost Distribution Based on BTS Measurements and DC Resistivity Soundings in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, Japan. In: *Permafrost Periglac. Process.*, 11, S. 109-123.
- KRAINER K., MOSTLER W. (2001), Der aktive Blockgletscher im Hinteren Langtal Kar, Gößnitztal (Schobergruppe, Nationalpark Hohe Tauern, Österreich). In: *Wiss. Mitt. Nationalpark Hohe Tauern*, 6, S. 139-168.
- KRAINER K., MOSTLER W. (2004), Aufbau und Entstehung des aktiven Blockgletschers im Sulzkar, Westliche Stubai Alpen (Tirol). In: *Geo.Alp*, 1, S. 37-55.
- KROBATH M., LIEB G.K. (2002), Der Permafrost in der Reißbeckgruppe (Hohe Tauern). In: *Grazer Schriften d. Geographie u. Raumforschung*, 38, S. 159-172.

- KUHN M. (1990), Energieaustausch Atmosphäre – Schnee und Eis. – Int. Facht. Schnee, Eis u. Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre. In: Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie u. Glaziologie, ETH Zürich, 108, S. 21-32.
- LEWKOWICZ A., EDNIE M. (2004), Probability Mapping of Mountain Permafrost Using the BTS Method, Wolf Creek, Yukon Territory, Canada. In: Permafrost Periglac. Process., 15, S. 67-80.
- MAGER D. (1985), Geologische und petrographische Untersuchungen am Südrand des Rieserferner-Plutons (Südtirol) unter Berücksichtigung des Intrusionsmechanismus. Erlangen-Nürnberg, Diss. an d. naturwiss. Fak. d. Univ. Erlangen-Nürnberg. 181 S.
- PATZELT G., AELLEN M. (1990), Gletscher. – Int. Facht. Schnee, Eis u. Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre. In: Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie u. Glaziologie, ETH Zürich, 108, S. 49-70.
- ROER I., AVIAN M., DELALOYE R., LAMBIEL C., DOUSSE J.-P., BODIN X., THIBERT E., KÄÄB A., KAUFMANN V., DAMM B., LANGER M. (2006), Rockglacier speed-up throughout European Alps – possible controls and implications. European Geosciences Union, General Assembly 2006, Vienna (Austria), 02-07 April 2006. In: Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, S. 06022.
- ROLSHOVEN M. (1982), Alpines Permafrostmilieu in der Lasörflinggruppe/ Nördliche Deferegger Alpen (Osttirol). In: Polarforschung, 52, S. 55-64.
- SCHROTT L. (1994), Die Solarstrahlung als steuernder Faktor im Geosystem der subtropischen semiariden Hochanden (Agua Negra, San Juan, Argentinien) (= Heidelberger Geogr. Arb., 94). 199 S.
- SEMPI R., BARONI C., CARTONI A., PILLA G. (2005), Thermal and physico-chemical characteristics of springs issuing from rock glaciers in the Ortles-Cevedale Region (Italian Alps). In: Terra Nostra, 2, S. 102-103.
- SIGNORELLI S., KOHL T. (2004), Regional ground surface temperature mapping from meteorological data. In: Global and Planetary Change, 40, S. 267-284.
- STAINDL A. (1982), Kurze Geologie von Südtirol. Brixen. 167 S.
- STOCKER-MITTAZ C. (2002), Permafrost Distribution Modeling Based on Energy Balance Data. Zürich, Diss. Univ. Zürich. 122 S.
- Stötter J., Fuchs S., Keiler M., Zischg A. (2003), Oberes Suldental – eine Hochgebirgsregion im Zeichen des Klimawandels. In: Innsbrucker Geogr. Studien, 33, 3, S. 239-281.
- VEIT H., HÖFNER T. (1993), Permafrost, gelifluction and fluvial sediment transfer in the alpine / subnival ecotone, central Alps, Austria: Present, past and future. In: Zeitschrift f. Geomorph., N.F., Suppl.-Bd., 92, S. 71-84.
- WTW (2001), Handbuch WTW Cond 340i. Wissenschaftlich Technische Werkstätten Weilheim. <http://www.WTW.com>
- ZEMP M., HAEBERLI W., HOELZLE M., PAUL F. (2006), Alpine glaciers to disappear within decades? In: Geophysical Research Letters, 33, L13504.
- ZILGER J., MAIR V., MUNARI M., FLORIAN M. (2005), PROALP: Mapping and Monitoring of Permafrost in the Alps using Differential Radar-Interferometry – First Results. 1st Intern. CRYOSAT Workshop, Frascati (Italy), 8.-10. March 2005, poster session.
- ZILGER J., MARKS F., MAIR V., BELITZ K., ZISCHG A. (2006), Kartierung und Überwachung von Permafrost-Phänomenen in den Alpen mit Hilfe Differentieller Radar-Interferometrie. In: Angew. Geoinformatik, S. 783-792.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft](#)

Jahr/Year: 2006

Band/Volume: [148](#)

Autor(en)/Author(s): Damm Bodo, Langer Moritz

Artikel/Article: [Physische Geographie. Kartierung und Regionalisierung von Permafrost - Indikatoren im Rieserfernergebiet \(Südtirol/Osttirol\) 295-314](#)