

Permafrost und Bodentemperatur zwischen 2006 und 2011 in der Reißeckgruppe, Hohe Tauern, Österreich

Von Andreas KELLERER-PIRKLBAUER & Michael AVIAN

Zusammenfassung

Permafrost ist ein prägendes Element des Hochgebirges und so auch in weiten Teilen der Alpen verbreitet. Dessen Verbreitung ist im Gegensatz zu beispielsweise Gletschern schwierig fassbar und großteils auf Modellierungsansätzen basierend. Blockgletscher bilden die markanteste Leitform des Gebirgspermafrostes. Permafrostgebiete in relativ warmen Klimaten wie den Alpen sind vom gegenwärtigen Klimawandel besonders stark betroffen, weshalb das Phänomen Permafrost und dessen Veränderung auch in Österreich von steigender gesellschaftlicher Relevanz ist. Langjährige Messreihen der Bodentemperatur sind notwendig, um Veränderungen im klimasensiblen Hochgebirge verstehen zu können, bisher fehlen jedoch solche Messreihen. Im Jahr 2006 wurde im Rahmen des Projektes ALPCHANGE in den Hohen und Niederen Tauern an verschiedenen Standorten begonnen, kontinuierlich Bodentemperaturen mit Hilfe von automatischen Miniaturtemperaturdatenloggern (MTD) zu messen. In diesem Beitrag werden Ergebnisse von acht solcher MTD-Standorten (Standorthöhe zwischen 2.320 und 2.600 m ü. A.) mit Messreihen von bis zu 5 Jahren (2006–2011) aus einem gerade noch von Permafrost beeinflussten Gebiet in den südöstlichen Hohen Tauern (Hintereggengraben-Hohe Leier) behandelt. Im Zuge der Datenanalyse wurden zahlreiche unterschiedliche temperaturabhängige Parameter ermittelt, wobei Daten von der Bodenoberfläche und dem oberflächennahen Untergrund in Fels, Feinmaterial und grobem Blockwerk aus Tiefen von bis zu 1,75 m zur Verfügung standen. Die Ergebnisse zeigen, dass im Mittel über die 5 Jahre nur Blockgletscher im Untersuchungsgebiet auch in tieferen Lagen (bis zumindest 2.400 m ü. A.) noch von Permafrost beeinflusst sind, wohingegen bis in die Gipfelregion der Hohen Leier Permafrost nur mehr kleinfächig und in besonderen topoklimatischen Ungunstlagen (z. B. kalte Nordwände) auftritt. Dies bedeutet weiter, dass neben den aktiven Blockgletschern nur die höchsten Gipfel der Reißeckgruppe rezent noch von Permafrost weitgehend beeinflusst sind. Die Messergebnisse vom außergewöhnlich milden Winter 2006/07 zeigen auf, dass bei anhaltender Klimaerwärmung auch im Hochwinter sogar im Hochgebirge mit verstärkten Frostwechsel und dem damit in Zusammenhang stehenden Steinschlag zu rechnen sein wird.

Abstract

Permafrost and ground temperatures between 2006 and 2011 in the Reisseck Mountains, Hohe Tauern Range, Austria. Permafrost is an important element of high mountain environments and widespread in the European Alps. However, permafrost occurrence is much more difficult to delineate compared to for instance glaciers. Therefore, recent knowledge regarding absence or presence of permafrost largely depends on modelling approaches. Rock glaciers are typical permafrost landforms in alpine relief. Permafrost in warm climates such as in the Alps is particularly sensitive to on-going climate warming. Therefore, permafrost occurrence and its changes are of increasing relevance for the Austrian public. Long-term monitoring of ground temperature is necessary in order to understand permafrost distribution and its thawing. However, so far such data are widely lacking in Austria. Within the project ALPCHANGE, such long-term monitoring was initiated in 2006 at a number of study areas in the Hohe and Niedere Tauern Ranges using miniature temperature dataloggers (MTD). In this article we present results from eight MTD-sites located between 2.320 and 2.600 m a.s.l. with data series of up to 5 years (2006–2011) from a study area marginally

Schlüsselworte

Bodentemperaturmonitoring, Permafrost, Klimawandel, Bodenerwärmung, Hohe Leier, Reißeckgruppe, Hohe Tauern

Keywords

monitoring of ground temperature, permafrost, climate change, ground temperature warming, Hohe Leier, Reisseck Mountains, Hohe Tauern range

influenced by permafrost in the SE of the Hohe Tauern Range (Hintereggengraben-Hohe Leier). Different temperature-related parameters were calculated based on data from the ground surface as well as from depths of up to 1.75 m. Relevant sensors are located in coarse debris, in fine-grained material or in rock walls. Results show that at lower locations only rock glaciers are currently underlain by permafrost at least down to 2.400 m a.s.l. In contrast, permafrost occurs only sporadically or as isolated patches all the way up to the summit of Hohe Leier (2.774 m) apart from topoclimatically permafrost-suitable sites (e.g. north facing rock walls). This further means that – apart from the active rock glaciers in the area – only the highest summits of the entire Reisseck Mountains are underlain by discontinuous permafrost. Finally, the monitoring results from the exceptionally warm winter 2006/07 indicate that on-going climate change will cause even during the coldest winter months freeze-thaw cycles within the ground. This will consequently lead to rock falls events in periods which are currently thought to be safe for mountaineers.

Einleitung

Permafrost ist ein prägendes Element des europäischen Hochgebirges, wobei dessen Verbreitung nicht so einfach erfassbar ist wie etwa im Vergleich dazu die Vergletscherung. Als Permafrost – oder Dauerfrost – versteht man definitionsgemäß Boden, Sediment oder Festgestein, welches zumindest zwei Jahre ununterbrochen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt aufweist (FRENCH 2007). Permafrost ist somit ein rein thermisches Phänomen und dessen Vorhandensein nicht unbedingt abhängig davon, ob wirklich Bodeneis vorhanden ist oder nicht. In unseren Breiten ist ganzjährig vorhandenes Bodeneis häufig mit Permafrost in Verbindung zu bringen, im Gegensatz zu trockenen Hochgebirgsgebieten der Erde (Teile des Altiplanos in Bolivien oder des tibetischen Hochplateaus in China). In den Alpen tauen im Zuge der sommerlichen Bodenerwärmung die oberen Zentimeter bis Meter des Permafrostes saisonal auf, wobei diese Schicht als sommerlicher Auftauboden (engl. *active layer*) bezeichnet wird. Die Mächtigkeit des Auftaubodens hängt von Faktoren wie Seehöhe, Schneedeckeneigenschaft (z. B. Dauer und Mächtigkeit einer winterlichen oder gar perennierenden Schneedecke), Untergrundeigenschaften (Fels, Schutt) und Hangausrichtung (Exposition) ab.

Blockgletscher sind die markanten Leitformen des Gebirgspermafrostes und zeigen Permafrostbedingungen während ihrer Bildungs- bzw. Aktivitätszeit an. Aktive Blockgletscher sind gefrorene Schutt- und Eismassen, welche sich langsam lavastromartig talwärts bewegen und dabei an der Oberfläche durch Stauchung oder Dehnung bedingte Formen wie Wülste oder Furchen bilden. Reliktische Formen sind ähnlich wie aktive Formen an dieser markanten Fliesstruktur erkennbar, zeigen jedoch einstige Permafrostbedingungen an, welche im Hoch- und Spätglazial im Alpenraum auch in tieferen Lagen geherrscht haben. Blockgletscher sind im gesamten Alpenbogen weit verbreitet und in vielen Regionen der Alpen inzwischen inventarisiert (CREMONESE et al. 2011). Alleine für Zentral- und Ostösterreich wurden 1.430 einfach aufgebaute Blockgletscher sowie 98 komplexer aufgebaute Formen, bestehend aus zwei oder mehreren Generationen, durch LIEB et al. (2010) inventarisiert und in KELLERER-PIRKLBAUER et al. (2012) umfassend beschrieben.

In einer vergleichbaren Studie wurden alle Blockgletscher Tirols inventarisiert, wobei alleine in diesem Bundesland 1.432 intakte Blockgletscher ausgewiesen werden konnten (KRAINER & RIBIS 2012). Dies ist vor allem mit dem großflächigeren Vorhandensein von Permafrost und

Blockgletscher-günstigen Bedingungen in den Zentralalpen Tirols zu erklären (EBOHON & SCHROTT 2008). Untergrenzen von Blockgletscher werden deshalb sehr gerne dazu verwendet, in einer Region die Permafrostuntergrenze abzuschätzen, was jedoch durch das spezielle Mikroklima von Blockgletschern (bedingt durch die Grobblockigkeit von Blockgletschern ergeben sich im Vergleich zur nicht grobblockigen Umgebung kühlere Bodentemperaturen; siehe dazu z. B. GRUBER & HOELZLE 2008) nur bedingt möglich ist.

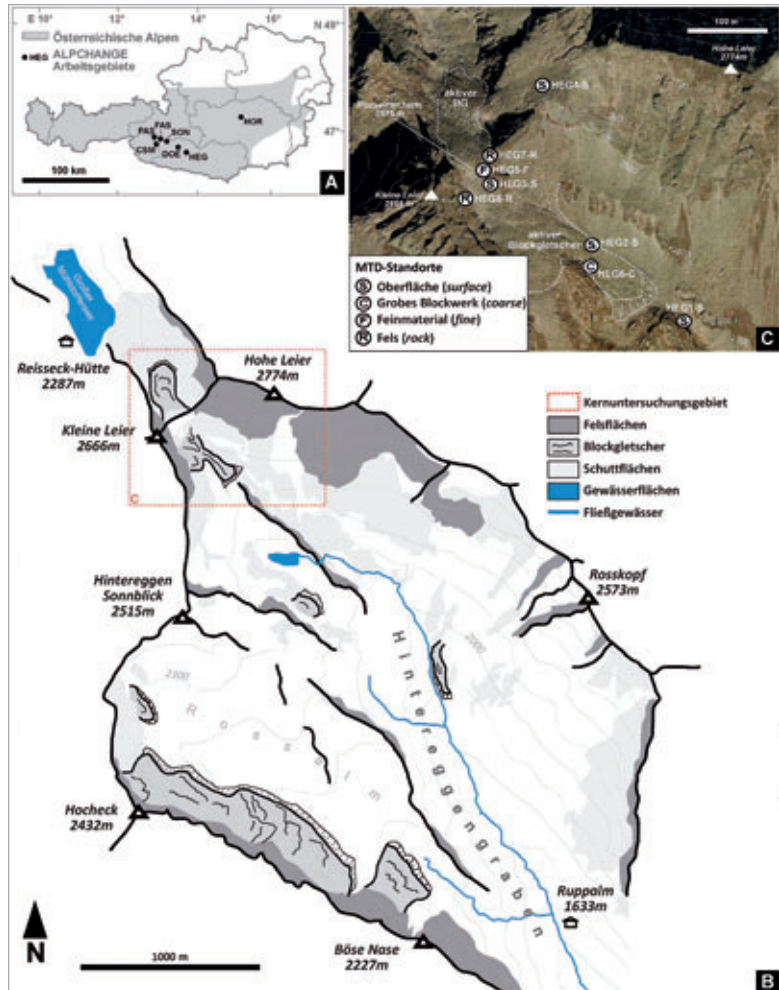
Abhängig vom Modellierungsansatz wird angenommen, dass gegenwärtig rund 1.600 (EBOHON & SCHROTT 2008) bis 2.000 km² (LIEB 1998) der Österreichischen Alpen von Permafrost beeinflusst sind, mit nur mehr kleineren Permafrostgebieten im Osten Österreichs (KELLERER-PIRKLBAUER 2005). Permafrostgebiete in relativ warmen Klimaten sind vom gegenwärtigen Klimawandel besonders stark betroffen, was auf weite Teile des Permafrostes in Österreich zutreffend ist. Da durch die nachgewiesene Permafrostabschmelzung geomorphologische Prozesse (z. B. Muren, Steinschlag) auch in tieferen Lagen wirksam werden und somit verstärkt Mensch und Infrastruktur potentiell negativ beeinflussen können (z. B. KERN et al. 2012), ist die Erforschung des Phänomens Permafrost und dessen Veränderung auch in Österreich von steigender gesellschaftlicher Relevanz.

Im Jahr 2006 wurde im Zuge des Projektes „ALPCHANGE – Climate Change and Impacts in Southern Austrian Alpine Regions“ an unterschiedlichen Untersuchungsgebieten in den Hohen und Niederen Tauern begonnen, Permafrost und folglich die Bodentemperatur an zahlreichen Standorten zu überwachen (Abb. 1A). Weitere Informationen zu ALPCHANGE werden bei LIEB et al. (2006) oder KELLERER-PIRKLBAUER et al. (2009) gegeben.

Frühere Messungen zur Bodentemperatur in Permafrostgebieten in den Hohen Tauern wurden bereits in den 1990er Jahren durchgeführt, wobei jedoch zumeist nur Einzelmessungen (z. B. Messung der Basis-temperatur der winterlichen Schneedecke – „BTS-Methode“ nach HÄEBLERI 1973 – in den Spätwintern 1994 und 1995 im Dösener Tal, Ankogelgruppe; beschrieben in LIEB 1996) oder nur kürzere Messreihen (Sommer 1998 bis Sommer 1999 an mehreren Blockgletschern in der Schobergruppe; beschrieben in KRÄINER et al. 2000) vorliegen. Die längste relativ kontinuierliche Messreihe von Bodentemperaturdaten auf einem aktiven Blockgletscher gibt es vom Blockgletscher im Weissenkar, Schobergruppe, wo die Messungen 1997 begonnen wurden (KELLERER-PIRKLBAUER & KAUFMANN 2012).

An und für sich eignen sich jedoch Temperatursensoren in Bohrlöchern für das Monitoring von Permafrost wesentlich besser, da neben den Temperaturen im Untergrund auch die Mächtigkeit des sommerlichen Auftaubodens gemessen werden kann. Aufgrund der aufwändigen Logistik sowie der hohen Kosten für diesbezügliche Bohrungen gibt es aktuell in Österreich jedoch nur zwei Standorte mit Bohrlöchern im Permafrostmilieu. Zum einen gibt es drei 20 m tiefe Bohrlöcher am Hohen Sonnblick, welche 2005 abgeteuft wurden und seit 2006 Bodentemperaturdaten liefern, wobei aus technischen Gründen leider immer wieder längere Datenausfälle zu beklagen sind (pers. Mitteilung Claudia Riedl, Salzburg, Sept. 2012). Zum anderen gibt es fünf Bohrlöcher im Bereich

Abb. 1:
Die sieben verschiedenen lokalen Arbeitsgebiete im Projekt ALPCHANGE im österreichischen Alpenraum (A), das Untersuchungsgebiet Hintereggen-Graben-Hohe Leier (HEG) mit markanten Landschaftsformen, insbesondere der Verbreitung von Blockgletschern (B), sowie Detailkarte des Talschlusses mit den acht MTD-Standorten (C).
Abkürzungen:
CSM = Zentrale Schoberggruppe,
DOE = Dösener Tal,
FAS = Fallbichl-Schareck,
HEG = Hintereggen-Graben-Hohe Leier,
HOR = Hochreichart, PAS = Pasterze, SON = Sonnblick.
Vergleiche Tabelle 1 für Details betreffend Standorte.
Orthofoto in (C) sowie Kartierung der Blockgletscher, Fels- und Schuttfächen auf Basis von Orthofotos aus 2003, © Nationalpark Hohe Tauern 2006.



des Kitzsteinhorns (3 x 30 m, 2 x 20 m), welche in den Jahren 2010 und 2011 gebohrt wurden und aktuell noch instrumentiert werden (pers. Mitteilung Ingo Hartmeyer, Salzburg, Sept. 2012).

Wesentlich anders ist die Situation in unserem westlichen Nachbarland, der Schweiz, wo einige kontinuierliche Messreihen der Bodentemperatur in Permafrostgebieten bis in die 1990er-Jahre zurückreichen und es 27 Bohrlöcher im Permafrost an 14 verschiedenen Standorten gibt. Die längste Bohrlochmessreihe geht sogar bis ins Jahr 1988 zurück, wobei sich jedoch auch aus solchen langjährigen Messreihen keine eindeutigen Trends ableiten lassen (PERMOS 2010). Mit diesem Vergleich wird deutlich, dass in Österreich der Aufholbedarf groß ist und langjährige Bodentemperaturmessreihen von großer Wichtigkeit für ein besseres Verständnis des Permafrost-Klima-Zusammenhangs sind.

Zurück zu ALPCHANGE: Bedingt durch die im Ausgangsjahr des Projektes 2006 vorab angenommene geringe Verbreitung von Permafrost

im äußersten Südosten der Hohen Tauern wurde der Talschluss Hintereggengraben-Hohe Leier als ein Untersuchungsgebiet ausgewählt. Das Gebiet wurde fortan mit Hilfe unterschiedlicher Methoden untersucht. Eine der verwendeten Methoden ist der Einsatz von automatischen Miniaturtemperaturdatenloggern (MTD), welche seit nunmehr über fünf Jahren kontinuierlich Daten über die Entwicklung der Bodentemperatur und somit auch über das Verhalten des Permafrostes liefern. Ergebnisse dieser für Österreich relativ langen Datenreihe werden in diesem Beitrag vorgestellt und deren Relevanz diskutiert.

Das Untersuchungsgebiet Hintereggengraben-Hohe Leier (HEG)

Die Reißbeckgruppe umfasst den südöstlichsten Teil der Hohen Tauern und liegt innerhalb der Zentralalpen. Die Gebirgsgruppe umfasst etwa 320 km² und erreicht mit dem Großen Reißbeck, 2.965 m ü. A., die größte absolute Höhe. Das lokale Arbeitsgebiet Hintereggengraben-Hohe Leier (HEG) umfasst den Talschluss des Hintereggengrabens ab einer Seehöhe von ca. 2.100 m bis zum Gipfel der Hohen Leier (2.774 m ü. A.) und umschließt somit eine Fläche von rund 6,7 km² (Abb. 1, 2A). Die Jahresmitteltemperatur liegt bei –0,25 °C (meteorologische Station Reißbeckhütte 900 m nordwestlich, 1961–2006), der mittlere Jahresniederschlag für denselben Zeitraum bei nur 1.265 mm (TAUCHER 2010). Es ist zu bemerken, dass es im Zeitraum 1961–2006 zu einer signifikanten Temperaturerhöhung von 1,35 K kam (TAUCHER et al. 2009). Das Klima der Reißbeckgruppe ist somit stark inneralpin geprägt und vergletscherte Flächen sowie perennierende Schneeflächen haben nur eine geringe flächenmäßige Bedeutung.

Geologisch wird die Reißbeckgruppe vor allem durch subpenninische und penninische Einheiten des Tauernfensters aufgebaut, wobei für das lokale Arbeitsgebiet Gesteine aus der subpenninischen Decke von Relevanz sind. Diese sind einerseits im Bereich der Rossalmscharte Augengneise, zugehörig den Granitoiden des Hochalmkerns, und andererseits migmatische Bändergneise, welche dem altpaläozoischen Reißbeck-Komplex zugerechnet werden (SCHUSTER et al. 2006). Wichtig für die Oberflächenformen der Reißbeckgruppe ist hierbei auch die allgemeine Tendenz dieser Gesteine zur Bildung von grobglockigem Schutt unter dem Einfluss von saisonalem Frost und Permafrost, welcher in weiterer Folge relativ weiträumig Blockgletscherformen (Abb. 1B) im Spätglazial bzw. im Holozän bilden lies (KROBATH & LIEB 2001, AVIAN & KELLERER-PIRKLBAUER 2012). Eine frühere Arbeit über die mögliche Verbreitung von Permafrost in der Reißbeckgruppe (KROBATH & LIEB 2001) beruhte auf (a) Kartierung von Blockgletschern, (b) Quelltemperaturmessungen und (c) Messungen der Basistemperatur der winterlichen Schneedecke/BTS (HAEBERLI 1973; siehe hierzu auch Methodenkapitel weiter unten). Eine kontinuierliche Messung der Bodentemperatur an unterschiedlichen Standorten, welche die vorhandenen methodischen Schwächen von (a) – spezielles Mikroklima von Blockgletschern, (b) – nur zwei Quellen – aber auch (c) – BTS-Werte sind stark von der Entwicklung der winterlichen Schneedecke abhängig – mildern würde, konnte damals noch nicht durchgeführt werden.

METHODEN

Monitoring der Bodentemperatur

Bodentemperaturen an der Bodenoberfläche sowie im oberflächen-nahen Untergrund werden im Arbeitsgebiet HEG seit September 2006 automatisch und kontinuierlich mit 60-Minuten-Intervall gemessen. Für die gegenständliche Studie wurden Daten von acht verschiedenen Standorten mit Miniaturtemperaturdatenlogger (MTD) mit Datenreihenlängen von zwei bis maximal fünf Jahren verwendet (Abb. 1C, 2A). Tabelle 1 gibt einen Überblick über diese acht Standorte. An vier Standorten wird nur die Bodenoberflächentemperatur (engl.: *ground surface temperature/GST*) gemessen (Standorte HEG1-S bis HEG4-S). Der MTD selbst

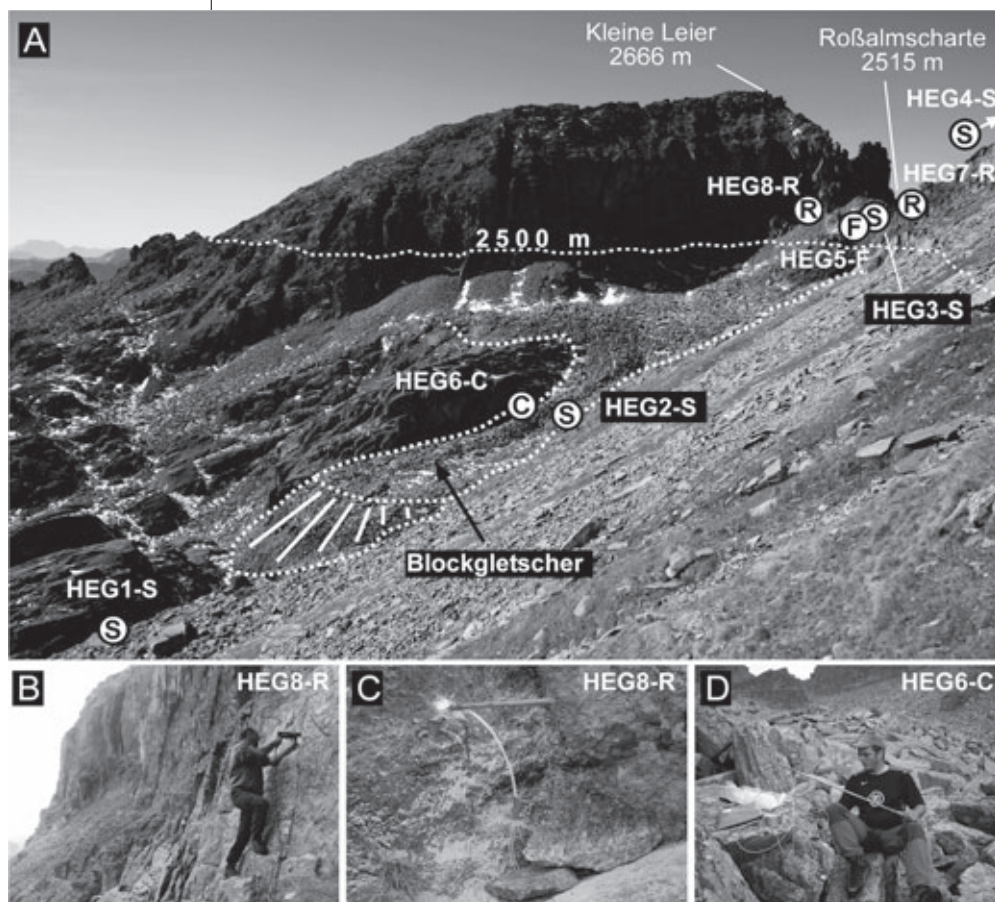


Abb. 2: Das Untersuchungsgebiet Hintereggengraben-Hohe Leier (HEG) sowie die Standorte der acht verschiedenen Miniaturtemperaturdatenlogger (MTD) im Nahbereich eines aktiven Blockgletschers (A). Die acht Datenlogger wurden zum Monitoren der Bodentemperaturoberfläche (S = *surface*), im Bereich von grobem Blockwerk am Blockgletscher (C = *coarse debris*), im Feinmaterial (F = *fine-grained material*) sowie im Fels (R = *rock*) eingesetzt. Abbildungen (B) und (C) zeigen die Felsbohrung sowie fertige Instrumentierung am MTD-Standort HEG8-R, Abbildung (D) zeigt die Instrumentierung am Blockgletscherstandort HEG6-C. Photographien von M. Avian und A. Kellerer-Pirklbauer.

MTD-Standort	Messsensortiefe (cm)	Datenreihe	Exposition (°)	Hangneigung (°)	Seehöhe (m ü. A.)	Anmerkung
HEG1-S	0	30.09.06–17.10.11 (ca. 5 Jahre)	SE	25	2320	1-Kanal-MTD; tiefster Standort, Standort auf grobem Blockwerk
HEG2-S	0	30.09.06–17.10.11 (ca. 5 Jahre)	S	20	2404	1-Kanal-MTD; Standort auf einem intakten Blockgletscher, bestehend aus grobem Blockwerk
HEG3-S	0	30.09.06–06.11.08 (ca. 2 Jahre)	S	25	2501	1-Kanal-MTD; Standort auf grobem Blockwerk
HEG4-S	0	30.09.06–17.10.11 (ca. 5 Jahre)	W	30	2600	1-Kanal-MTD; Standort auf mittelgrobem Blockwerk
HEG5-F	3, 10, 40	30.09.06–05.11.08 (ca. 2 Jahre mit Datenlöchern)	S	5	2500	3-Kanal-MTD, in Feinmaterial bis 40 cm Tiefe, nahe Standort HEG3-S
HEG6-C	50, 100, 175	30.09.06–15.09.08 (ca. 2 Jahre mit Datenlöchern)	SE	20	2401	3-Kanal-MTD, in grobem Blockwerk bis 175 cm Tiefe, nahe Standort HEG2-S
HEG7-R	3, 10, 30	30.09.06–12.08.09 (ca. 3 Jahre)	W	85	2510	3-Kanal-MTD; nach West exponierte Felswand
HEG8-R	3, 10, 30	30.09.06–03.02.09 (ca. 2,5 Jahre)	E	75	2515	3-Kanal-MTD; nach Ost exponierte Felswand

(1-Kanal-Datenloggermodell M-Log1 mit einem integrierten PT1000-Temperatursensor, GeoPrecision) wird an diesen vier Standorten jeweils durch eine dünne Gesteinsplatte vor direkter Strahlung geschützt, wobei unter der Gesteinsplatte noch ungehinderte Luftzirkulation möglich ist.

An weiteren vier Standorten wird die Bodentemperatur (engl.: *ground temperature/GT*) in Tiefen von 30 bis 175 cm gemessen (3-Kanal-Datenloggermodell M-Log6, GeoPrecision). Bei diesen Standorten sind jeweils drei PT1000-Temperaturmesssensoren über Teflonkabel mit dem MTD verbunden, wobei die Sensoren in Feinmaterial (HEG5-F; für *fine-grained material*), in Hohlräumen von grobem Blockwerk (HEG6-C; für *coarse-grained material*) sowie in Felswänden mit Hilfe von Felsbohrungen (HEG7-R und HEG8-R; für *rock*) installiert wurden. Die Felsbohrungen an den Standorten HEG7-R und HEG8-R (je 16 mm Durchmesser) wurden in 3, 10 und 30 cm Tiefe mit Temperatursensoren instrumentiert und nachfolgend mit verdichtetem Quarzsand, welcher dem Ausfallmaterial am ehesten entspricht, verfüllt und abschließend mit Silikon verschlossen. Gemäß der Firma GeoPrecision haben die verwendeten PT1000-Temperatursensoren folgende messtechnische Eigenschaften: Messgenauigkeit: $\pm 0,05$ °C, Messbereich von -40 bis +100 °C und eine Messdrift von $< 0,01$ °C a⁻¹. Die Analyse des Bodenmaterials am Standort HEG5-F wurde unter Berücksichtigung der ÖNORM 4412 (1974) durchgeführt und ergaben einen moderat sortierten Sand (91,6 %) mit einem geringen Anteil von Schluff und Ton (8,4 %).

Bodentemperaturanalyse

Die Analyse der Bodentemperaturdaten umfasst vorwiegend Betrachtungen zu folgenden Parametern:

- Jahresmittelbodentemperatur (*mean annual ground temperature/MAGT*) an der Oberfläche und in unterschiedlichen Tiefen
- jährliche Temperatursumme positiver Gradtage und folglich die positive Gradtagzahl (*thawing degree days/TDD*)

Tab. 1: Überblick über die acht Standorte mit Miniaturtemperaturdatenloggern (MTD) im Untersuchungsgebiet HEG. Bei den ersten vier Standorten wird die Bodenoberflächentemperatur gemessen (*GS7*). Bei den Standorten fünf bis acht wird auch die Temperatur im bodenoberflächennahen Untergrund in unterschiedlichen Tiefen (*GT*) gemessen. Anmerkungen zu den Standortabkürzungen: **S** (*surface*) an der Bodenoberfläche, **C** (*coarse-grained material*) im Bereich von grobem Blockwerk am Blockgletscher, **F** (*fine-grained material*) im Feinmaterial und **R** (*rock*) in Felswand. Die Lage der acht Standorte ist in Abb. 1C und 2A ersichtlich.

- jährliche Temperatursumme negativer Gradtage und somit die negative Gradtagzahl (*freezing degree days/FDD*)
- Bodengefrierindex (*ground freezing index/GFI*)
- winterliche Schneedeckendauer (*snow cover duration/SCD*)
- Höhe der Nullgradisotherme (*zero degree isotherm/ZDI*)
- winterliche Gleichgewichtstemperatur (*winter equilibrium temperature/WEqT*)
- Anzahl der Eistage (*ice days/ID*)
- Anzahl der Frostwechseltage (*days with freeze-thaw cycles/FTC*)
- Anzahl der frostfreien Tage (*days with positive temperature/DPT*)

Tage mit positiven Mittelwerten der Bodentemperatur sind positive Gradtage, wohingegen negative Mittelwerte der Bodentemperatur als negative Gradtage bezeichnet werden. Die jährliche Temperatursumme positiver Gradtage ergibt die positive Gradtagzahl (*TDD*), die jährliche Temperatursumme der negativen Gradtage die negative Gradtagzahl (*FDD*). Ist an einem Standort die *FDD* höher als die *TDD*, dann kann daraus geschlossen werden, dass die Energiebilanz in einem Jahr an diesem Standort negativ ist und somit permafrostgünstig wirkt. NELSON & OUTCALT (1987) führten den Ansatz der *Surface Frost Number* (F_+) ein, welcher *FDD* und *TDD* als Basis verwendet und wie folgt zu ermitteln ist:

$$F_+ = \frac{\sqrt{|FDD|}}{\sqrt{|FDD|} + \sqrt{TDD}}$$

Ergebnisse von F_+ (dimensionslos) sind laut NELSON & OUTCALT (1987) wie folgt zu interpretieren: $F_+ < 0,50$ = kein Permafrost; $F_+ = 0,50$ bis $0,60$ = sporadischer Permafrost; $F_+ = 0,60$ bis $0,67$ = diskontinuierlicher Permafrost; und $F_+ \geq 0,67$ = kontinuierlicher Permafrost.

Der Bodengefrierindex (*GFI*) errechnet sich prinzipiell gleich der negativen Gradtagzahl, umfasst jedoch nur den Zeitraum 1. Oktober bis 30. Juni. Der *GFI* gibt an, wie kalt ein Winter an der Bodenoberfläche war. Die Dauer der winterlichen Schneedecke (*SCD*) lässt sich aus der Tagesschwankung der Bodentemperatur ableiten. Dabei werden die Tage mit wesentlicher Dämpfung der Tagestemperaturschwankung unter Verwendung einer Tagestemperaturschwankung von $< 0,3$ K im negativen Temperaturbereich sowie einer Mindestdauer von drei Tagen aufsummiert (DANBY & HIK 2007, LEWKOWICZ 2008, KELLERER-PIRKLBAUER & ROUBAL 2009).

Die Höhe der Nullgradisotherme (*ZDI*) kann stellvertretend für die Höhe der Permafrostuntergrenze angesehen werden, wobei jedoch im strikten Sinne die Bodenoberflächentemperatur nicht mit Permafrostvorkommen im Untergrund gleichzusetzen ist. Die Temperatur an der Permafrosttafel (= Obergrenze des Permafrosts im vertikalen Bodenprofil) ist abhängig von der Lufttemperatur, dem sogenannten Oberflächen-temperaturversatz (*surface offset*, abhängig von Schnee und Vegetation), und dem thermalen Temperaturversatz (*thermal offset*, abhängig von der saisonalen Schwankung der thermalen Eigenschaft des Bodens), wodurch sich an der Permafrosttafel tiefere Temperaturen ergeben als an der Oberfläche (SMITH & RISEBOROUGH 2002). Die *ZDI* für jeden Standort

wurde mit Hilfe eines Temperaturgradienten von $0,0065 \text{ K m}^{-1}$ bestimmt.

Die winterliche Gleichgewichtstemperatur (*WEqT*) basiert auf die Annahme, dass sich die Bodenoberflächentemperatur unter einer dicken Schneedecke stabilisiert und ein Gleichgewicht erreicht, welches letztendlich nur mehr vom Bodenwärmestrom beeinflusst ist. Die *WEqT* an einem Standort hängt somit von der Entwicklungsgeschichte der winterlichen Schneedecke (frühes Einschneien sowie generelle Schneedeckendicke von zumindest 80–100 cm) sowie der Bodentemperatur und dadurch Vorhandensein von Permafrost ab. Die *WEqT* ist die mehr oder weniger gleich bleibende mittlere Bodenoberflächentemperatur im Februar und März. Die ermittelten Temperaturwerte sind gleich der Basistemperatur der winterlichen Schneedecke (BTS) nach HAEBERLI (1973) wie folgt zu interpretieren: $> -2 \text{ °C}$ = kein Permafrost, -2 bis -3 °C = Permafrost möglich, $< -3 \text{ °C}$ = Permafrost wahrscheinlich. Hierbei ist zu betonen, dass die *WEqT* an einem Standort – bedingt durch die unterschiedliche Entwicklung der Schneedecke – nicht in jedem Jahr erreicht werden muss. Das hydrologische Jahr (Okt.–Sept) bildete generell die zeitliche Dimension der Analyse mit Ausnahme der beiden Parameter *GFI* (Okt.–Juni) sowie *WEqT* (Feb.–März).

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse des Bodentemperaturmonitorings zeigen, dass die Jahresmittelbodentemperatur (*MAGT*) an sieben der acht Standorte positiv ist und dass an den 16 Temperatursensoren Mittelwerte der *MAGT* zwischen $+3,25 \text{ °C}$ und $-0,94 \text{ °C}$ gemessen wurden (Tabelle 2, Abb. 3).

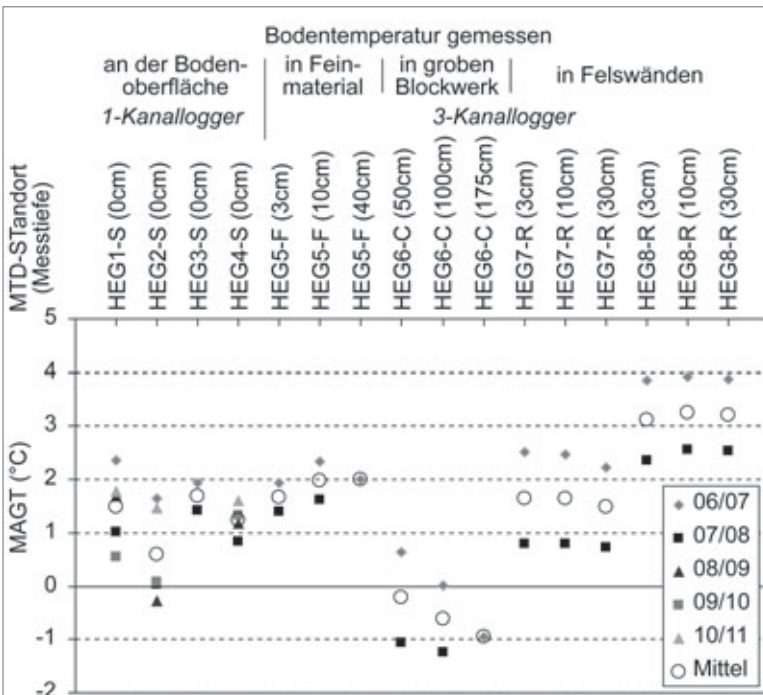
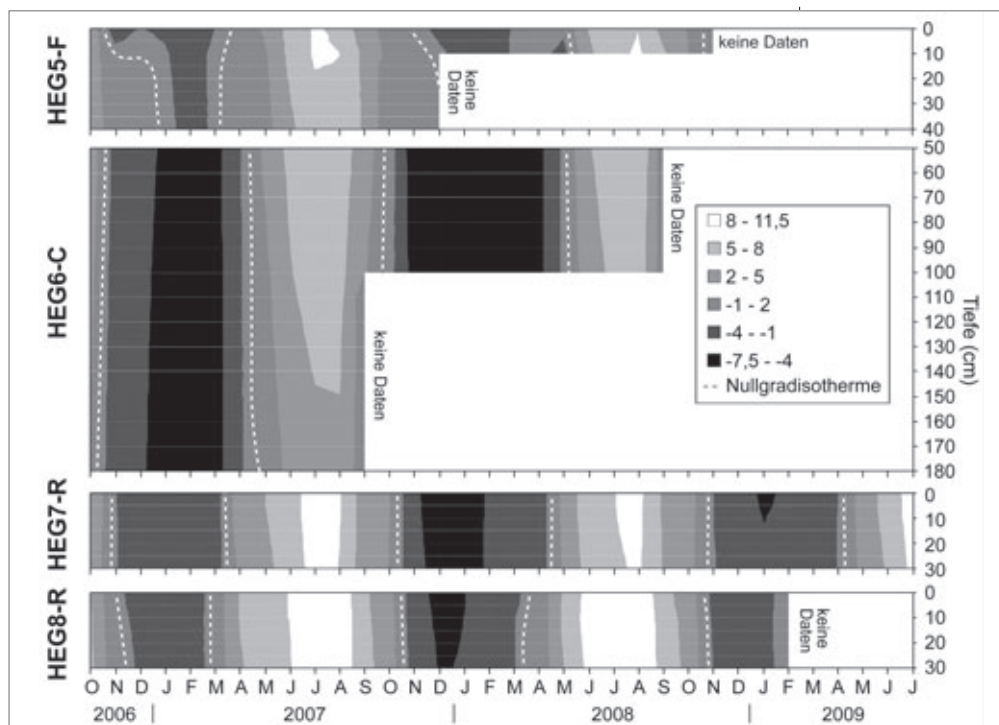


Abb. 3: Jahresmitteltemperaturen (*MAGT*) an allen acht Standorten mit in Summe 16 Temperatursensoren für die Messjahre 2006 bis 2011. Vergleichs-Tabelle 1 für Details betreffend Standorte sowie Tabelle 2 für numerische Auflistung der Analyseergebnisse. Lage der Standorte siehe Abb. 1C und 2A.

Nur die drei Temperatursensoren am groblockigen Standort des Blockgletschers (HEG6-C) zeigen deutlich negative *MAGT*-Werte, obschon der Standort selbst rund 200 m niedriger liegt als der höchste Standort (HEG4-S). Wie jedoch die Ergebnisse in Abbildung 3 ebenso zeigen, beträgt der gemessene Temperaturunterschied zwischen zwei Einzelmessjahren bis zu 1,9 K. Hier ist weiters festzuhalten, dass an den meisten Standorten im warmen, schneearmen Winter 2006/07 die höchsten (sieben von acht Standorten) *MAGT*-Werte gemessen wurden. Die niedrigsten *MAGT*-Werte wurden hingegen an den unterschiedlichen Stand-

MAGT	HEG1-S	HEG2-S	HEG3-S	HEG4-S	HEG5-F	HEG6-C	HEG7-R	HEG8-R
06/07	2,36	1,64	1,96	1,31	1,94	0,65	2,51	3,86
07/08	1,03	0,03	1,40	0,84	1,41	-1,05	0,79	2,36
08/09	1,70	-0,28	nda	1,18	nda	nda	nda	nda
09/10	0,54	0,09	nda	1,34	nda	nda	nda	nda
10/11	1,78	1,47	nda	1,61	nda	nda	nda	nda
Mittel	1,48	0,59	1,68	1,25	1,67	-0,20	1,65	3,11
GFI	HEG1-S	HEG2-S	HEG3-S	HEG4-S	HEG5-F	HEG6-C	HEG7-R	HEG8-R
06/07	-394	-521	-245	-366	-243	-654	-391	-245
07/08	-687	-809	-241	-499	-242	-1108	-757	-504
08/09	-491	-784	nda	-147	nda	nda	-543	nda
09/10	-883	-903	nda	-279	nda	nda	nda	nda
10/11	-609	-587	nda	-198	nda	nda	nda	nda
Mittel	-613	-721	-244	-298	-243	-881	-574	-374
SCD	HEG1-S	HEG2-S	HEG3-S	HEG4-S	HEG5-F	HEG6-C	HEG7-R	HEG8-R
06/07	55	120	138	188	140	94	6	33
07/08	99	214	205	189	202	151	45	61
08/09	171	239	nda	275	nda	nda	145	nda
09/10	73	175	nda	224	nda	nda	nda	nda
10/11	96	190	nda	246	nda	nda	nda	nda
Mittel	99	188	172	224	171	123	26	47
ZDI	HEG1-S	HEG2-S	HEG3-S	HEG4-S	HEG5-F	HEG6-C	HEG7-R	HEG8-R
06/07	2683	2656	2799	2801	2798	2501	2896	3109
07/08	2478	2409	2723	2730	2717	2239	2632	2879
08/09	2582	2361	nda	2781	nda	nda	nda	nda
09/10	2403	2418	nda	2806	nda	nda	nda	nda
10/11	2593	2630	nda	2847	nda	nda	nda	nda
Mittel	2548	2494	2761	2793	2758	2370	2764	2994
WEqT	HEG1-S	HEG2-S	HEG3-S	HEG4-S	HEG5-F	HEG6-C	HEG7-R	HEG8-R
06/07	na	-3,18	-1,64	-2,42	-1,65	-5,37	na	na
07/08	na	-2,74	-1,59	-3,08	-1,60	-4,89	na,	na
08/09	na	-4,14	nda	-1,37	nda	nda	na	na
09/10	na	-6,16	nda	-1,95	nda	nda	na	na
10/11	na	-3,37	nda	-1,66	nda	nda	na	na
Mittel		-3,92	-1,61	-2,10	-1,63	-5,13		

Tab. 2: Zusammenfassende Ergebnisse von den acht Standorten auf Basis von Jahreswerten (hydrologisches Jahr Okt.–Sept.) für die Periode 2006 bis 2011. Bei den Standorten mit 3-Kanal-Datenloggern werden nur die Ergebnisse des jeweils obersten Sensors, welcher zwischen 3 (HEG5-F, HEG7-R, HEG8-R) und 50 cm (HEG6-C) Tiefe installiert ist, dargestellt. Abkürzungen: *MAGT* = Jahresmittelbodentemperatur *GFI* = Bodengefroierindex, *SCD* = Schneedeckendauer, *ZDI* = Höhe der Nullgradisotherme, *WEqT* = winterliche Gleichgewichtstemperatur. *WEqT* ist nicht anwendbar (*na*) für die drei Standorte HEG1-S, HEG7-R und HEG8-R, bedingt durch die generelle kurze Schneedeckendauer. *nda* = keine Daten verfügbar.



orten entweder 2007/08, 2008/09 oder 2009/10 gemessen. Betrachtet man somit nur die kältesten Messjahre, so liegen auch die *MAGT* an der Bodenoberfläche am Standort HEG2-S unter 0 °C. An den drei Standorten HEG1-S, HEG4-S (beide Bodenoberfläche) und HEG7-R (West-exponierte Felswand) liegt die *MAGT* an der Oberfläche in kalten Einzeljahren zumindest noch unter +1 °C.

Abbildung 4 ist eine Isothermendarstellung von Bodentemperaturen, basierend auf Monatsmittelwerten an vier Standorten mit Temperaturmessung in drei unterschiedlichen Tiefen. Durch die Datenverfügbarkeit wird zeitlich maximal der Zeitraum Oktober 2006 bis Juli 2009 abgedeckt. Die Monatsmittelwerte der Bodentemperatur schwanken insgesamt um 18,8 K, wobei die beiden Extremmonatswerte an den Standorten HEG8-R (+11,4 °C) sowie HEG6-C (−7,4 °C) gemessen wurden. Die einzelnen Teilabbildungen zeigen sehr gut, dass die trügste Erwärmung und Abkühlung des Untergrundes erwartungsgemäß beim Feinmaterialstandort (HEG5-F) gemessen wurden, wobei die Monatsmittelwerte hier zwischen +8,3 und −2,4 °C (Amplitude 10,7 K) schwanken. Dem gegenüber stehen die drei anderen Standorte mit Temperaturmessungen in drei unterschiedlichen Tiefen (HEG5-C, HEG7-R, HEG8-R), wobei die Spannbreiten zwischen dem wärmsten und dem kältesten Monat mit 15,1 bis 16,0 K an den drei Standorten sehr ähnlich sind. Die Temperaturveränderungen an den beiden Felsstandorten verhalten sich sehr ähnlich, wobei Abbildung 4 deutlich zeigt, dass die Felstemperaturen beim wärmeren Standort HEG8-R rund ein bis zwei Monate länger positiv sind als beim kühleren Standort HEG7-R. Die kürzeste Periode

Abb. 4: Isothermendarstellung der Bodentemperaturen an vier Standorten mit Messung der Bodentemperatur in drei unterschiedlichen Tiefen für den Zeitraum Oktober 2006 bis maximal Juli 2009, basierend auf Monatsmittelwerten. Die Werte zwischen den Messtiefen wurden linear interpoliert, die Werte bis zur Bodenoberfläche bei den drei Standorten HEG5-F, HEG7-R sowie HEG8-R wurden linear extrapoliert.

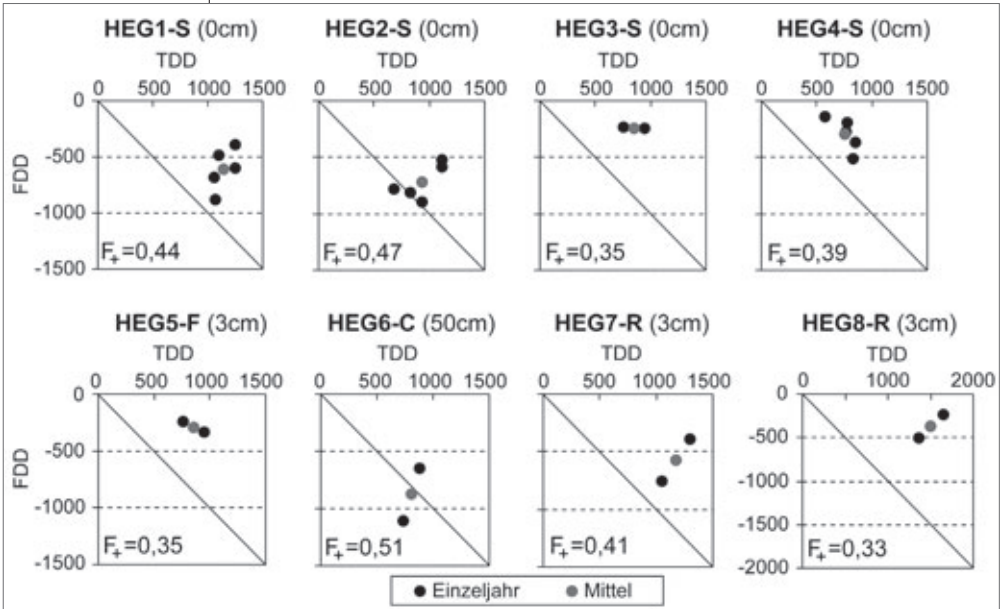


Abb. 5:
Jährliche Temperatursumme positiver Gradtage (*TDD*) im Verhältnis zur jährlichen Temperatursumme negativer Gradtage (*FDD*) an allen acht Standorten. An den vier Standorten mit mehr als einem Sensor wurden *TDD* und *FDD* nur für den obersten Sensor (d. h. in einer Tiefe von 3 bis 50 cm) ermittelt. Die auf Basis von *TDD* und *FDD* ermittelte *Surface Frost Number* (*F₊*) für den jeweiligen Mittelwert ist angegeben.

mit positiven Temperaturen (ca. 5 Monate) findet sich beim grobblockigen Standort HEG6-C, wo die entsprechend kühlestn Monatsmittelwerte (zw. +7,8 und -7,4 °C) gemessen wurden. Die Abkühlung ist an diesem Standort bis zum untersten Temperatursensor in 1,75 m Tiefe sehr rasch und ohne Verzögerung im Verhältnis zum Sensor in 50 cm Tiefe. Die Erwärmung in die tieferen Hohlräume am grobblockigen Standort HEG6-C verläuft hingegen etwas träger, was auch die deutlich kühleren Mitteltemperaturen in 1,75 m Tiefe im Verhältnis zu jenen in 50 cm Tiefe widerspiegeln.

Die Gegenüberstellung in Abb. 5 der jährlichen Temperatursummen positiver Gradtage (*TDD*) mit den jährlichen Temperatursummen negativer Gradtage (*FDD*) zeigt wiederum, dass im Mittel nur am Standort HEG6-C die *FDD* überwiegen und somit als Permafrost günstig einzustufen ist. Auf Basis der Fünfjahresmittelwerte ergibt sich für diesen Standort eine *Surface Frost Number* (*F₊*) von 0,51, was laut NELSON & OUTCALT (1987) auf sporadischen Permafrost hinweist. Bei allen anderen Standorten ergeben sich *F₊*-Werte von unter 0,50 und somit ist dort laut diesem Ansatz eher nicht mit Permafrost zu rechnen. Ausnahmen bilden hier wiederum Einzeljahre bei den Standorten HEG1-S, HEG7-R und v. a. HEG2-S, wo die *F₊*-Werte um 0,50 zu liegen kommen können. In warmen Jahren mit einer hohen *TDD*-Zahl hingegen deuten die ermittelten *F₊*-Werte nur auf saisonalen Frost für alle acht Standorte hin.

Tabelle 2 listet weiter den Bodengefrierindex (*GFI*) für alle acht Standorte auf, wobei für vier Standorte (HEG1-S, HEG2-S, HEG6-C, HEG7-R) relativ hohe Mittelwerte errechnet wurden (-570 bis -890). An den vier anderen Standorten liegt der *GFI* nur bei -243 bis -374, dies weist auf wärmere Hänge bedingt durch längere Schneedeckendauer und/oder Strahlungsgunst hin. Die Dauer der winterlichen Schneedecke (*SCD*) ist an den beiden Felswandstandorten HEG7-R und HEG8-R sehr

kurz, wobei die *SCD*-Werte zwischen Einzeljahren sehr stark schwanken. Relativ kurz – 3 bis 4 Monate im Mittel – ist die *SCD* bei den beiden grobblockigen Standorten HEG1-S und HEG6-C. Mehr als 170 Tage wurden lediglich für die Standorte in Geländedepressionen (HEG2-S, HEG3-S, HEG5-F) sowie am höchst gelegenen Standort (HEG4-S) ermittelt (Tabelle 2).

Die Höhe der Nullgradisotherme (*ZDI*) ist ein einfacher Ansatz, um auf Basis der Jahresmittelbodentemperatur und eines angenommen vertikalen Temperaturgradienten die einzelnen Standorte zu vergleichen. Daraus kann bei entsprechend großer Zahl an Standorten weiters auf eine regionale Permafrostuntergrenze geschlossen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die tiefste *ZDI* für den Blockgletscherstandort HEG6-C mit 2370 m ü. A. ermittelt wurde, wobei die Einzeljahre zwischen 2501 (2006/07) und 2239 m ü. A. (2007/08) schwanken. Die zweitiefste *ZDI* wurde für den Standort HEG2-S ermittelt mit fast 2500 m ü. A., knapp gefolgt vom Standort HEG1-S. Auffallend sind die ähnlichen Ergebnisse für die vier Standorte HEG3-S, HEG4-S, HEG5-F und HEG7-R mit Werten zwischen 2758 und 2793 m ü. A. trotz markanten Unterschieden bei der Schneedeckendauer (*SCD*), dem Bodengefrierindex (*GFI*), der Hangausrichtung sowie geringen Unterschiede der Höhenlage von 110 m.

Die winterliche Gleichgewichtstemperatur (*WEqT*) als weiterer permafrost-beschreibender Parameter ist bedingt durch die im Methodenkapitel beschriebene Einschränkung nur für fünf Standorte relevant (Tabelle 2). Entsprechend dieses Ansatzes gelten die beiden auf dem Blockgletscher liegenden Standorte HEG2-S (mit fast -4°C) und HEG5-C ($> -5^{\circ}\text{C}$) als „Permafrost wahrscheinlich“, der höchstgelegene Standort HEG4-S als (mit wenig unter -2°C) als „Permafrost möglich“ und die beiden restlichen Standorte (HEG3-S und HEG5-F) als „Permafrost frei“.

Abbildung 6 zeigt die Verteilung der Anzahl der Eistage (*ID*), der Frostwechseltage (*FTC*) sowie frostfreien Tage (*DPT*) an sechs Standorten und umfasst die Periode Oktober 2006 bis maximal September 2011. Die Abbildung zeigt deutlich, dass im Winter 2006/07 die Monate mit ausschließlich *ID* deutlich kürzer waren als in den vier Folgewintern. Meist sind im Winter alle Standorte über zumindest drei bis maximal sieben Monate dauernd unter 0°C . Ausnahmen bilden die Standorte mit einer geringeren Schneedecke (HEG1-S, HEG7-R, HEG8-R), in welchen sich wärmere Luft im Winter rasch im Untergrund widerspiegelt und Frostwechseltage (*FTC*) verursacht. Im Sommer hingegen sind lediglich ein bis drei Monate ohne *FTC* und ein bis fünf Monate ohne *ID*. Am schneereichen Blockgletscherstandort HEG2-S ist die frostfreie Zeit mit ein bis zwei Monaten am kürzesten. Der Wechsel von permanent gefroren zu frostfrei im Frühling verläuft schneller als der Wechsel von frostfrei zu permanent gefroren im Herbst, was durch die Anzahl von *FTC* an allen sechs Standorten gut gezeigt werden kann.

An den vier Standorten mit Temperaturmessungen in drei verschiedenen Tiefen ist es möglich, die Permafrosttafel und somit die Mächtigkeit der sommerlichen Auftauschicht abzuschätzen. Nach VAN EVERDINGEN (1985) treffen sich die Trendlinien der Bodentemperatur des wärmsten sowie des kältesten Monats an einem Punkt, wo die tägliche

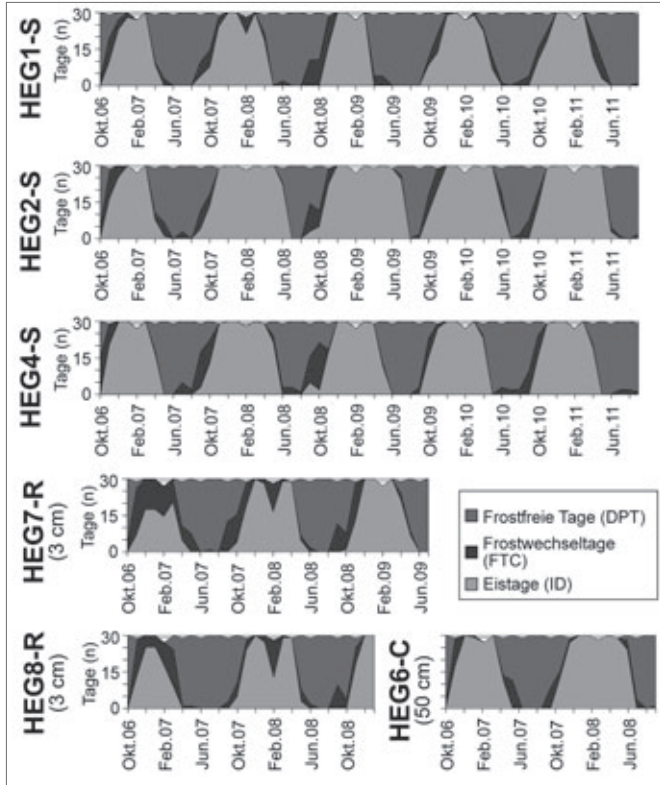


Abb. 6: Monatliche Verteilung der Tage mit rein positiven Temperaturen bzw. frostfreien Tage (DPT), Frostwechseltage (FTC) und Eistage (ID) basierend auf Stundenwerte an sechs verschiedenen Standorten für den Zeitraum Oktober 2006 bis September 2011.

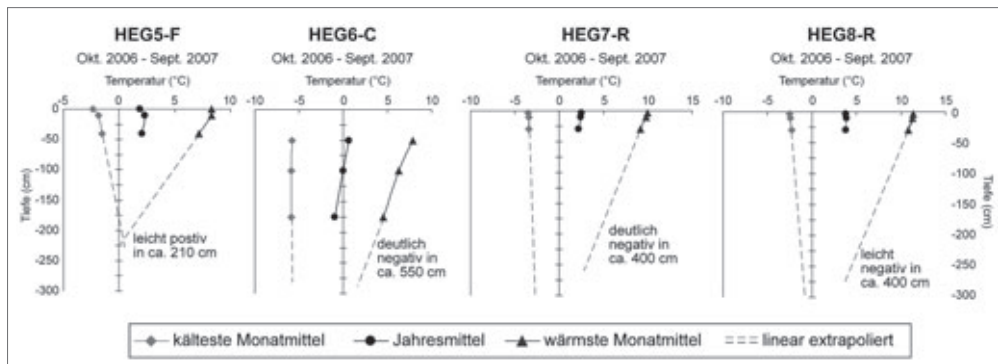
über 3 m. Am vierten Standort mit Profildaten (HEG8-R) sind entsprechend der Daten vom Winter 2006/07 vielleicht noch Linsen von Permafrost mit Temperaturen von wenig unter 0 °C in dieser Felswand vorhanden. Die verfügbaren relativ kurzen Datenreihen (keine geschlossenen Jahresdaten für die kühleren Jahre nach 2006/07) lassen dennoch schlussfolgern, dass lediglich zwei der vier hier genannten Standorte – am Blockgletscher/HEG6-C und in der kälteren Felswand/HEG7-R – Permafrost in einer Tiefe von zumindest mehr als 3 m erwarten lassen.

Schlussfolgerung

Die Analysen der Bodentemperatur an acht verschiedenen Standorten zwischen 2320 und 2600 m ü. A. im Untersuchungsgebiet Hintereggengraben-Hohe Leier im Zeitraum 2006 bis 2011 zeigen sehr gut, dass das Untersuchungsgebiet im Übergangsbereich zwischen gerade noch Permafrost-beeinflusst zu Permafrost-frei liegt. Unterschiedliche Ansätze der Datenanalyse von Bodenoberflächentemperaturen sowie von Bodentemperaturen bis in eine Tiefe von 1,75 m und damit in Zusammenhang stehenden Interpretationen wurden angewendet, um für jeden der acht Standorte Aussagen über das Ausmaß des Permafrostvorkommens zu treffen und in weiterer Folge auch eine gewisse regionale Aussage der Permafrostverbreitung machen zu können.

Analyseergebnisse der Jahresmittelbodentemperatur (MAGT) an der Oberfläche und in unterschiedlichen Tiefen ergaben lediglich für einen

bzw. auch die jährliche Temperaturamplitude 0 K ist. Dadurch kann mit dieser Methode sowie den extrapolierten Monatstemperaturwerten die Lage der thermischen Null-Amplitude (*zero annual amplitude/ZAA*) abgeschätzt werden. Monatstrends sind nicht unbedingt linear, weshalb dieser Ansatz – dargestellt in Abbildung 7 – nur eine erste, jedoch durchaus wertvolle Abschätzung liefert. Die Ergebnisse in Abbildung 7 zeigen dennoch gut, dass auf Basis der Daten vom warmen Winter 2006/07 am Standort HEG5-F kein Permafrost zu erwarten ist, wohingegen an den beiden Standorten HEG6-C sowie HEG7-R dies durchaus der Fall ist. An den beiden letztgenannten Standorten betrug die Mächtigkeit der sommerlichen Auftauchschicht entsprechend dieses Ansatzes



einigen Standort – HEG6-C, gelegen auf grobem Blockwerk eines aktiven Blockgletschers – im Mittel negative Werte und somit deutliche Gunstbedingungen für Permafrost. Nimmt man die Messergebnisse von den kältesten Messjahren heraus, so können in kühleren Jahren auch am benachbarten, ebenfalls am Blockgletscher gelegenen Standort HEG2-S negative Jahresmitteltemperaturen erreicht werden. Die Grobblockigkeit begünstigt effizienteres Abkühlen im Verhältnis zur Erwärmung (siehe Abb. 4) sowie kühlere Bodentemperaturen im Verhältnis zur Lufttemperatur, wie auch frühere Studien bereits gezeigt haben (vergl. dazu z. B. GRUBER & HOELZLE 2008). Trotz der relativ niedrigen Seehöhe im Vergleich zu fünf anderen Standorten sind somit lediglich an den beiden Blockgletscherstandorten negative *MAGT* möglich. Bei den drei Standorten HEG1-S, HEG4-S und HEG7-R liegt in kalten Einzeljahren die *MAGT* zumindest noch unter +1 °C. Auf Basis dieser Temperaturen sowie der weiter oben beschriebenen Überlegungen von SMITH & RISEBOROUGH (2002), betreffend wärmerer Temperatur an der Oberfläche im Verhältnis zur Temperatur an der Permafrosttafel, kann somit für die fünf Standorte HEG1-S, HEG2-S, HEG4-S, HEG6-C und HEG7-R rezent von permafrostgünstigen Bedingungen ausgegangen werden.

Die Ergebnisse aus jährlichen Temperatursummen positiver (*TDD*) und negativer (*FDD*) Gradtage unter Verwendung des *Surface Frost Number*-Ansatz von NELSON & OUTCALT (1987) zeigen, dass im Mittel nur der Standort HEG6-C als Standort mit sporadischem Permafrost ausgewiesen wird. Am benachbarten Standort HEG2-S fallen zumindest noch Einzeljahre in die Klasse sporadischer Permafrost. Milde Jahre mit niedrigen *FDD*-Werten und andererseits hohen *TDD*-Werten (z. B. Winter 2006/07) lassen erkennen, wie nahe das Untersuchungsgebiet dem permafrostfreien Zustand ist, denn an allen Standorten wird entsprechend der *Surface Frost Number* nur mehr saisonaler Frost nachgewiesen. Dies wiederum weist auf die Wichtigkeit von längeren Messreihen hin, um Geländebedingungen, „Ausreißer“ bzw. anormale Jahre besser erfassen und bewerten zu können.

Der Bodengefrierindex (*GFI*) weist ähnlich der *Surface Frost Number*-Methode kühle, „Permafrost günstigere“ Bedingungen für die Standorte HEG1-S, HEG2-S, HEG6-C und HEG7-R aus, wobei diese kühlen Standorte entweder kurze (HEG7-R), mittellange (HEG1-S, HEG6-C) oder sogar lange (HEG2-S) Schneedeckendauern aufweisen

Abb. 7: Mittlere Temperaturprofile an den vier Standorten mit Bodentemperaturprofilmessungen, basierend auf Monatsmittelwerten, und davon abgeleitet Jahresmittel, Mittel des kältesten Monats, Mittel des wärmsten Monats für das hydrologische Jahr 2006/07. Die extrapolierten linearen Trends der maximalen und minimalen Temperaturen sowie die Tiefe, wo sich die beiden Linien ungefähr treffen, sind angegeben.

und somit gut gezeigt wird, dass die Länge der saisonalen Schneedecke nicht direkt Aussagen über wahrscheinliches oder unwahrscheinliches Auftreten von Permafrost an einem Standort zulässt. Wie in der Tabelle 2 ersichtlich ist, sind MTD-Standorte mit einer langen Schneedeckendauer nicht zwingend auch „warme Standorte“. Ein spätes Einschneien eines MTD-Standes begünstigt im Herbst die Abkühlung des Untergrundes, wohingegen ein frühes Einschneien für die Abkühlung des Bodens hinderlich ist. Dem gegenüber steht die Ausaperung im Frühjahr: Je früher die Schneedecke abgebaut ist, desto früher kann die Lufttemperatur den Boden erwärmen. Eine Schneedecke, die bis in den Sommer liegen bleibt, begünstigt hingegen kühlere Bodentemperaturen. Somit kann festgehalten werden, dass für die Existenz von Permafrost einerseits ein spätes Einschneien sowie andererseits ein spätes Ausapern förderlich sind.

Die Ermittlung der Höhe der Nullgradisotherme (*ZDI*) ergab erwartungsgemäß die tiefsten mittleren *ZDI*-Werte für die beiden benachbarten Blockgletscherstandorte HEG2-S und HEG6-C mit 2370 und 2500 m ü. A. Auffallend ähnliche Ergebnisse lieferten vier Standorte mit wesentlichen Unterschieden bei der Dauer der Schneedecke, dem Bodengefrorenindex, der Hangausrichtung sowie ihrer Höhenlage. Dies könnte auf eine regionale Lage der Nullgradisotherme und somit +/- Permafrost in 2760–2790 m ü. A. hinweisen, wobei jedoch für eine Festigung diese Hypothese eine größere Anzahl von MTD-Standorten notwendig wäre.

Ergebnisse aus der Analyse der winterlichen Gleichgewichtstemperatur (*WEqT*) bestätigen die bisherigen Erkenntnisse, dass lediglich an den beiden benachbarten Blockgletscherstandorten HEG2-S und HEG6-C Permafrost wahrscheinlich und der höchstgelegene Standort auf 2600 m zumindest noch in die Klasse Permafrost möglich zu liegen kommt. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass v. a. Blockgletscher im Untersuchungsgebiet auch in tieferen Lagen (bis zumindest 2400 m ü. A.) noch von Permafrost beeinflusst sind, wohingegen in höheren Lagen bis in die Gipfelregion der Hohen Leier Permafrost eher nur mehr kleinfächig und in besonderen topoklimatischen Ungunstlagen auftritt.

Die Analyse der Anzahl der Eistage (*ID*), der Frostwechseltage (*FTC*) sowie frostfreien Tage (*DPT*) zeigte u. a., dass sich warme Winter wie 2006/07 wesentlich auf das thermale Regime des Bodenuntergrundes – vor allem in schneearmen Bereichen – auswirken können. Der Winter 2006/07 ermöglichte über das ganze Winterhalbjahr hinweg Frostwechsel an den beiden Felswandstandorten, was in weiterer Folge die Frostverwitterung in den Felswänden erhöht und Steinschlag auch in den ansonsten subjektiv gesehen „sicheren“ Wintermonaten ermöglichen kann. Im Folgewinter 2007/08 war dieser Effekt der erhöhten *FTC* nicht mehr ganz so stark ausgeprägt. Dies zeigt aber auch, dass bei anhaltender Klimaerwärmung sich Bergsteiger in Zukunft bei entsprechender Witterung auch in den Wintermonaten Gedanken über die Gefahr von Steinschlag machen müssen.

Als letzter analytischer Schritt wurde versucht, die Mächtigkeit der sommerlichen Auftauschicht an den Standorten mit vertikalen Temperaturprofilmessungen sowie mit Hilfe linearer Interpolation abzuschätzen. Zusammenfassend kann hier gesagt werden, dass entsprechend der Daten vom warmen Winter 2006/07 am Blockgletscherstandort HEG6-C

sowie am kühleren Felswandstandort HEG7-R unter einer gut 3 m mächtigen sommerlichen Auftauchschicht mit Permafrost zu rechnen ist. Tiefere – jedoch kostenintensive – Bohrlöcher bis zu 20 m wären zur besseren Beantwortung dieser Fragen sehr hilfreich.

Zusammenfassend zeigen die hier vorgestellten Ergebnisse und unterschiedlichen Ansätze der Datenanalyse, dass Permafrost im Untersuchungsgebiet Hintereggengraben-Hohe Leier nur eine sehr kleine Fläche einnimmt und dabei vor allem grobblockige Blockgletscherflächen sowie kühle, strahlungsarme Felswände als Permafrost-günstig hervorzuheben sind. Regional kann auf Basis unserer Erkenntnisse interpretiert werden, dass neben den zahlreichen aktiven Blockgletschern lediglich die Hauptgipfelregionen der Reißeckgruppe rezent noch von aktivem Permafrost weiträumig beeinflusst sind und somit frühere Untersuchungen im Untersuchungsgebiet (KROBATH & LIEB 2001, AVIAN & KELLERER-PIRKLBAUER 2012) gestützt werden.

LITERATUR

- AVIAN, M. & KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2012): Modelling of potential permafrost distribution during the Younger Dryas, the Little Ice Age and at present in the Reisseck Mountains, Hohe Tauern Range, Austria. – *Austrian Journal of Earth Sciences* (Beitrag in Druck).
- BOHON, B. & SCHROTT, L. (2008): Modelling Mountain Permafrost Distribution. A New Permafrost Map of Austria. – In: KANE, D. L. & K. M. HINKEL (Eds.) (2008): *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost (NICOP)*, University of Alaska, Fairbanks, USA, 397–402.
- CREMONESE, E., GRUBER, S., PHILLIPS, M., POGGIOTTI, P., BOECKLI, L., NOETZLI, J., SUTER, C., BODIN, X., CREPAZ, A., KELLERER-PIRKLBAUER, A., LANG, K., LETEY, S., MAIR, V., MORRA DI CELLA, U., RAVANEL, L., SCAPOZZA, C., SEPPI, R. & ZISCHG, A. (2011): An inventory of permafrost evidence for the European Alps. – *The Cryosphere*, 5, 651–657. doi:10.5194/tc-5-651–2011.
- DANBY, R. K. & HIK, D. S. (2007): Responses of white spruce (*Picea glauca*) to experimental warming at subarctic alpine treeline. – *Global Change Biology* 13: 437–451. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01302.x.
- FRENCH, H. M. (2007): *The Periglacial Environment – Third Edition*. John Wiley & Sons Ltd., 478 Seiten.
- GRUBER, S. & HOELZLE, M. (2008): The cooling effect of coarse blocks revisited: a modeling study of a purely conductive mechanism. – In: KANE, D. L. & K. M. HINKEL (Eds.) (2008): *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost (NICOP)*, University of Alaska, Fairbanks, USA, 557–561.
- HAEBERLI, W. (1973): Die Basistemperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. – *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 9, 221–227.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2005): Alpine permafrost occurrence at its spatial limits: First results from the eastern margin of the European Alps, Austria. – *Norsk Geografisk Tidsskrift/Norwegian Journal of Geography*, 59, 184–193.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. & KAUFMANN, V. (2012): About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria. – *Austrian Journal of Earth Sciences* (Beitrag in Druck).
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. & ROUBAL, R. (2009): Towards using ground surface and air temperature data for assessing the thickness of winter snow covers. – *Geophysical Research Abstracts* 11: EGU2009–8082.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., AVIAN, M., LIEB, G. K. & KAUFMANN, V. (2009): The project “ALP-CHANGE – Climate Change and Impacts in Southern Austrian Alpine Regions”

Dank

Diese Studie wurde im Rahmen der Projekte *ALPCHANGE – Climate Change and Impacts in Southern Austrian Alpine Regions* – gefördert durch den Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) als Projekt Nr. FWF P18304-N10 – sowie *permafrost – Austrian Permafrost Initiative* – gefördert durch die Österreichische Akademie der Wissenschaft – durchgeführt. Herzlich gedankt sei an dieser Stelle auch Prof. Karl Krainer für die Durchsicht des Manuskripts sowie den konstruktiven Verbesserungsvorschlägen.

Anschrift der Autoren

MMag. Dr.
Andreas Kellerer-
Pirklbauer, Institut
für Fernerkundung
und Photogramme-
trie, Technische
Universität Graz,
Steyrergasse 30,
8010 Graz,
E-Mail: andreas.
kellerer@tugraz.at,
sowie Institut für
Erdschaften,
Karl-Franzens-
Universität Graz,
Heinrichstraße 26,
8010 Graz,
E-Mail: andreas.
kellerer@uni-graz.
at

Mag. Michael
Avian, Institut für
Fernerkundung und
Photogrammetrie,
Technische Univer-
sität Graz, Steyrer-
gasse 30, 8010 Graz,
E-Mail: michael.
avian@tugraz.at

- with research results from the study area Schober Mountains, Hohe Tauern Range. In: BAUCH, K. (Ed.) (2009): Proceedings of the 4th Symposium of the Hohe Tauern National Park for Research in Protected Areas, Kaprun, Austria, September 2009, 157–162.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., LIEB, G. K. & KLEINFERCHNER, H. (2012): A new rock glacier inventory for the eastern-most part of the European Alps. – *Austrian Journal of Earth Sciences* (Beitrag in Druck).
- KERN, K., LIEB, G. K., SEIER, G. & KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2012): Modelling geomorphological hazards to assess the vulnerability of alpine infrastructure: The example of the Großglockner-Pasterze area, Austria. – *Austrian Journal of Earth Sciences* (Beitrag in Druck).
- KRAINER, K. & RIBIS, M. (2012): A Rock Glacier Inventory of the Tyrolean Alps (Austria). – *Austrian Journal of Earth Sciences* (Beitrag in Druck).
- KRAINER, K., MASSIMO, I. & MOSTLER, W. (2000): Blockgletscher im Gößnitz Tal, Schobergruppe (Nationalpark Hohe Tauern), Endbericht, Innsbruck, 123 Seiten.
- KROBATH, M. & LIEB, G. K. (2001): Der Permafrost in der Reißeckgruppe (Hohe Tauern, Kärnten). – *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, 38, 159–172.
- LEWKOWICZ, A. G. (2008): Evaluation of miniature temperature-loggers to monitor snow-pack evolution at mountain permafrost sites, Northwestern Canada. – *Permafrost and Periglacial Processes*, 19, 323–331. doi:10.1002/ppp.625.
- LIEB, G. K. (1996): Permafrost und Blockgletscher in den östlichen österreichischen Alpen. – *Arbeiten aus dem Institut für Geographie in Graz*, 33, 9–125.
- LIEB, G. K. (1998): High-mountain permafrost in the Austrian Alps (Europe). In: LEWKOWICZ A.G. & M. ALLARD (Eds.) (1998): Proceedings of the 7th International Permafrost Conference, Yellowknife, Canada, pp. 663–668.
- LIEB, G. K., AVIAN, M. & KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2006): ALPCHANGE – ein interdisziplinäres Forschungsprojekt zum Klimawandel und seinen Folgen im Hochgebirge. – *Mitteilungen aus dem Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz*, 39, 3–7.
- LIEB, G. K., KELLERER-PIRKLBAUER, A. & KLEINFERCHNER, H. (2010): Rock glacier inventory of Central and Eastern Austria elaborated within the PermaNET project. Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz, digitaler Datensatz (Inventory Version Nr. 2: Jänner 2012).
- NELSON, F. E. & OUTCALT, S. I. (1987): A computational method for prediction and regionalization of permafrost. – *Arctic and Alpine Research*, 19, 279–288.
- ÖNORM 4411 (1974): Geotechnik – Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung von Fließ-, Plastizitäts- und Schrumpfgrenze unter Einbeziehung der VORNORM ÖNORM CEN ISO/TS 17892-12. – *Österreichische Normungsinstitut*, 9 Seiten.
- PERMOS (2010): Permafrost in Switzerland 2006/2007 and 2007/2008. NOETZLI, J. and VONDER MUEHLL, D. (Eds.), Glaciological Report (Permafrost) No. 8/9 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, 68 Seiten.
- SCHUSTER, R., PESTAL, G. & REITNER, J. (2006): Erläuterungen zu Blatt 182 Spittal an der Drau, Geologische Karte der Republik Österreich 1 : 50 000. – *Geologische Bundesanstalt, Wien*, 115 Seiten.
- SMITH, M. W. & RISEBOROUGH, D. W. (2002): Climate and the Limits of Permafrost: A Zonal Analysis. – *Permafrost Periglacial Processes*, 13, 1–15. doi:10.1002/ppp.410
- TAUCHER, W., KELLERER-PIRKLBAUER, A., LIEB, G. K. & AVIAN, M. (2009): Climate change in alpine areas in central Austria between 1961 and 2006. In: BAUCH, K. (Ed.) (2009): Proceedings of the 4th Symposium of the Hohe Tauern National Park for Research in Protected Areas, Kaprun, Austria, September 2009, 305–310.
- TAUCHER, W. (2010): Climatic conditions of six selected sites in the Hohe and Niedere Tauern Range 1961–2006. – Unpublizierte Diplomarbeit, Karl-Franzens-Universität Graz, 157 Seiten.
- VAN EVERDINGEN, R. O. (1985): Unfrozen permafrost and other taliks. In: BROWN, J., METZ, M. C. & HOEKSTRA, P. (Eds) (1985): Permafrost Geophysics, Golden, Colorado, 23–24 October, 1984. US Army Corps of Engineers Cold regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 85, 5, 101–105.