

Permafrostmonitoring am Messstandort Hochreichart, Seckauer Tauern: Ein Überblick über 11 Jahre Forschungsaktivitäten am östlichsten Messstandort im gesamten Alpenraum

Permafrost monitoring in the Hochreichart area, Seckauer Tauern Range, Austria: A review of 11 years of research activities at the eastern-most monitoring site of the European Alps

Andreas KELLERER-PIRKLBAUER

3 Abbildungen und 1 Tabelle

Zusammenfassung: Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Forschungsaktivitäten im Themenbereich Permafrost und Periglazial am Messstandort Hochreichart mit seinen sechs Teilgebieten, welche zwischen 2004 und 2015 durchgeführt wurden. Chronologisch wird der Leser informiert warum der Messstandort überhaupt als solcher ausgewählt wurde, welche Tätigkeiten es in der Frühphase des Monitorings (vor 2006) dort gab, was in der sogenannten „Entwicklungsphase“ zwischen 2006 und 2012 im Wesentlichen passierte und welche Forschungsaktivitäten seither durchgeführt wurden. Schließlich wirft der Beitrag auch die Frage auf, ob der Messstandort in Zukunft auch Teil eines im Initialstadium befindlichen nationalen Permafrostmessnetzes sein sollte. Bedingt durch die Ergebnisse im Teilgebiet Reichartkar konnte beispielsweise gezeigt werden, dass es neben den drei „klassischen“ Blockgletschertypen (bezogen auf die gegenwärtige Permafrostverbreitung und Bewegung) aktiv, inaktiv und reliktsch noch einen vierten Typ gibt. Dieser Typ wurde als „pseudoreliktscher“ Blockgletscher bezeichnet, der zwar reliktsch aussieht, jedoch noch sporadischen (10–50 % Permafrostflächenanteil) bis inselhaften (<10 %) Permafrost im obersten Bereich des Blockgletschers sowie in seiner Wurzelzone aufweist.

Abstract: This paper presents a review about permafrost and periglacial related research activities at the monitoring site Hochreichart with its six subareas (Hochreichart summit & flanks, Reichart cirque, Brandstätter cirque, Höll valley, Dürr valley, and

Schöneben cirque), where relevant research were accomplished between 2004 and 2015. The paper begins with a discussion why this monitoring site was chosen originally and what sort of research was carried out in the early phase before 2006, in the development phase between 2006 and 2012, and, respectively, what has been done at the monitoring site since then. Furthermore, this paper stresses the point that the monitoring site Hochreichart should get integrated in the currently initiated national permafrost monitoring network. Based on the data gained in the subarea Reichart cirque, it was for instance shown that a fourth type of rock glaciers exists besides the three “classical” rock glacier types (based on present permafrost content and downvalley/downslope movement) active, inactive, and relict. The new type of rock glacier was termed “pseudo-relict” because such landforms look superficially relict but contain sporadic (10–50 % of area) or isolated (<10 %) permafrost at and near the root zone of the rock glacier.

Schlüsselworte: Seckauer Tauern; Permafrostmonitoring; Geophysik; Bodentemperatur; Felstemperatur; Schmidt-Hammer Datierung; Hydrogeologie.

Key Words: Seckauer Tauern Range; Permafrost monitoring; Geophysics; Ground temperature; Rock temperature; Schmidt-hammer dating; Hydrogeology.

1. Warum wurde der Messstandort Hochreichart für ein Permafrostmonitoring gewählt?

Die Verbreitung von Permafrost (ganzjährig gefrorener Untergrund mit einer saisonalen zumeist wenige Meter mächtigen Auftauchschicht) im östlichen Teil von Österreich und insbesondere im Bundesland Steiermark ist auf Basis von verschiedenen Modellierungsansätzen (KELLERER-PIRKLBAUER 2005; BOECKLI et al. 2012) sehr gering. Nach BOECKLI et al. (2012) sind ca. 50 km² der Steiermark von Permafrost beeinflusst, wobei sich der Großteil davon in den höher gelegenen Bereichen der Schladminger Tauern (KELLERER-PIRKLBAUER 2005) sowie am Dachsteinmassiv (RODE 2014) befinden. Ein sehr tief gelegenes Permafrostvorkommen ist der „Toteisboden“ im Schladminger Untertal. Dieses inselhafte Permafrostvorkommen ist vorwiegend auf dem speziellen inneren Aufbau der dortigen Blockschutthalde zurückzuführen, welche ein Permafrost-günstiges Bodenklima ermöglicht (WAKONIGG 2001; STIEGLER et al. 2014). Weiter im Osten, beispielsweise in den Seckauer Tauern, ist auf Basis der besagten numerischen Modelle nur mehr in den äußersten klimatischen Ungunstlagen (höchste Gipfel, Wandfußlagen) mit Permafrost zu rechnen (Abb. 1).

Die tiefen Wassertemperaturen von Quellen aus Blockgletscherablagerungen (UNTERSWEIG & SCHWENDT 1995), sowie das lange Überdauern von Winterschnee in

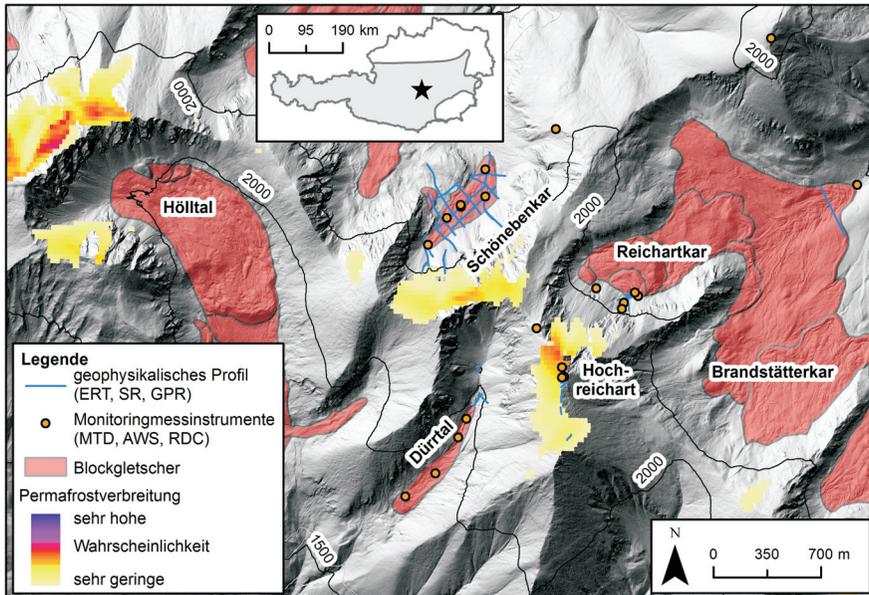


Abb. 1: Permafrostmonitoring am Messstandort Hochreichart mit den sechs Teiluntersuchungsgebieten (Hochreichart Gipfel und Flanken, Reichartkar, Brandstätterkar, Hölltal, Dürrtal und Schönebenkar). Positionen von Monitoringmessinstrumenten (MTD, AWS, RDC) sowie die Lage von geophysikalischen Messprofilen (SR, ERT, GPR) sind in der Karte verortet. Verbreitung von Permafrost auf Basis von BOECKLI et al. (2012). MTD: Miniaturtemperaturdatenlogger, AWS: automatische Klimastation, RDC: Remote Digital Camera zur Erfassung der Schneedeckendynamik, SR: Refraktionsseismik, ERT: Geoelektrik, GPR: Bodenradar.

Fig. 1: Permafrost monitoring in the Hochreichart area with its six subareas (Hochreichart summit and flanks, Reichart cirque, Brandstätter cirque, Höll valley, Dürre valley and Schöneben cirque). Location of monitoring instruments (MTD, ASW, RDC) as well as the location of geophysical measurement profiles (SR, ERT, GPR) are depicted in the map. Permafrost distribution based on BOECKLI et al. (2012). MTD: miniature temperature datalogger, AWS: automatic weather station, RDC: remote digital camera used for monitoring the seasonal snow cover, SR: seismic refraction, ERT: electric resistivity tomography, GPR: ground penetrating radar.

strahlungsgeschützten Hangfußlagen bis in den Sommer hinein (GÖDEL 1993), haben bereits in den 1990er Jahren die Existenz von Permafrost in den Seckauer Tauern erahnen lassen und das Interesse geweckt, ein Programm für Permafrostmonitoring in dieser Region zu initiieren. Im Jahr 2004 sprachen die folgenden Punkte für die Einrichtung eines solchen Messprogramms im Gebiet der zentralen Seckauer Tauern: relativ gute Kenntnisse zur Verbreitung von Blockgletschern (NAGL 1976, UNTERSWEIG & PROSKE 1996), erste Erkenntnisse über den internen Aufbau dieser Blockgletscher basierend auf künstliche Aufschlüsse (UNTERSWEIG & PROSKE 1996) oder geophysikalischer Messungen (FRUHWIRTH & SCHMID 1998), die Existenz von Schneeresten im Hochsommer (GÖDEL 1993) als Indikator für tiefe Bodentemperaturen, das Vorhandensein einer

automatischen Wetterstation (Hydrographischer Dienst des Landes Steiermark), sowie die guten logistischen Gegebenheiten (Hochreichartschutzhäuser, Erreichbarkeit von Graz, Fahrgenehmigungen). Als Messgebiet wurde vom Autor dieses Beitrages der Bereich um den des zweithöchsten Gipfel der Seckauer Tauern, dem Hochreichart (2416 m ü.A.) gewählt.

In den beiden Anfangsjahren erfolgte das Permafrostmonitoring nur mit geringen budgetären Mitteln (gedankt sei hier Gerhard K. LIEB), in weiterer Folge jedoch im Rahmen von nationalen und internationalen Projekten. Räumlich gesehen wurden im Zeitraum 2004 bis 2015 neben dem eigentlichen Gipfel und seiner Flanken Permafrost relevante Messungen auch in den benachbarten Reichartkar, Brandstätterkar, Hölltal, Dürrtal sowie im Schönebenkar durchgeführt (Abb. 1). Ein chronologischer Abriss dieser Tätigkeiten wird in den folgenden Kapiteln kurz dargestellt.

2. Frühphase: Messungen und Modellierungen vor 2006

Erste speziell auf Permafrost ausgerichtete Messungen im Untersuchungsgebiet erfolgten im Jahr 2004. Am 31. März 2004 kam im Reichartkar das erste Mal die sogenannte „BTS-Methode“ zum Einsatz. Bei dieser Methode wird die Basistemperatur der winterlichen Schneedecke (BTS) im Spätwinter (Februar-März) unter einer Schneedecke von mindestens 70 cm Mächtigkeit (somit angenommener Isolation der Bodenoberfläche vor atmosphärischen Einflüssen) gemessen. Dabei wird eine spezielle Lawinsonde, welche zusätzlich mit einem Temperatursensor an der Spitze sowie einem durch ein Kabel verbundenen Temperaturllesegerät am oberen Ende der Sonde ausgestattet ist, verwendet. Nach HAEBERLI (1973) deuten BTS-Werte < -3 °C auf wahrscheinlichen Permafrost, Werte zwischen -3 und -2 °C auf möglichen Permafrost und Werte > -2 °C auf permafrostfrei hin. BTS-Ergebnisse sind jedoch mit Vorsicht zu interpretieren, da die zeitliche und räumliche Entwicklung der winterlichen Schneedecke, welche das thermale Regime der Bodenoberfläche wesentlich beeinflusst, vor dem Messtermin häufig unbekannt ist. Bei einer geringmächtigen oder nicht geschlossenen Schneedecke ist diese Methode nicht sinnvoll anzuwenden. Die BTS-Messungen vom März 2004 ergaben an insgesamt 26 BTS-Messpunkten siebenmal möglichen Permafrost sowie achtmal wahrscheinlichen Permafrost (siehe Abb. 8 in KELLERER-PIRKLBAUER 2005).

Im Oktober 2004 wurden das erste Mal Miniaturtemperaturdatenlogger (MTDs) im Untersuchungsgebiet eingesetzt, wobei 1 Standort am Gipfel des Hochreicharts und zwei im Reichartkar ausgewählt wurden (Abb. 1). Der Standort am Gipfel lief im Zeitraum 2004 bis 2015 problemlos und bildet die längste geschlossene Temperaturmessreihe eines Permafroststandortes in Österreich. Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur (hydrologisches Jahr Okt.-Sept.) zwischen 2007 und 2015 an diesem Standort, wobei ein Erwärmungstrend erkennbar ist. Diese Abbildung offenbart

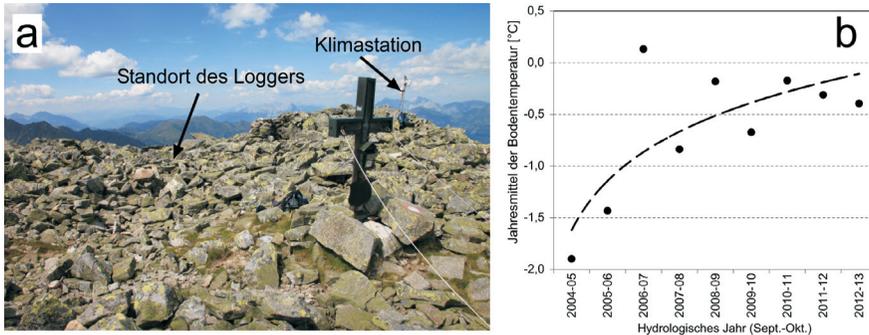


Abb. 2: Die längste geschlossene Bodentemperaturmessreihe an einem Permafroststandort in Österreich im Gipfelbereich des Hochreicharts auf 2416 m: (a) Geländesituation mit Lage des Sensors nahe dem Gipfelkreuz sowie einer Klimastation – Blick nach N; (b) Entwicklung der Jahresmitteltemperatur auf Basis hydrologischer Jahre (Okt.–Nov.) zwischen 2004–2005 und 2012–2013.

Fig. 2: The longest continuous ground temperature data series at a permafrost site in Austria at the summit of Hochreichart at 2416 m a.s.l.: (a) terrestrial view with position of the ground temperature sensor near the summit cross and a automatic weather station – view towards north; (b) Evolution of the mean annual ground temperature (hydrological year) between 2004–2005 and 2012–2013.

auch, dass erst langfristige Aufzeichnungen ein gewisses thermales Verständnis des Standortes ermöglichen.

Neben diesen Tätigkeiten am Hochreichart sowie im Reichartkar wurde bereits in den 1990er Jahren von Joanneum Research, Graz, begonnen hydrologisch am Reichartblockgletscher sowie am benachbarten Schönebenblockgletscher zu arbeiten (UNTERSWEIG & SCHWENDT 1995). Bei diesen Tätigkeiten stand aber weniger der Permafrost im Vordergrund, sondern wasserwirtschaftliche Überlegungen im Zusammenhang mit Blockgletschersedimenten und deren Einzugsgebieten. Als Folge dieser Tätigkeiten wurde im Jahr 2002 vom Hydrographischen Dienst des Landes Steiermark ein hydrologisches Messwehr ca. 40 m unterhalb der Schöneben-Blockgletscherquelle eingerichtet. Seither wird an der „Schönebenquelle“ (HZB-Nummer 396762) Pegelstand und Wassertemperatur kontinuierlich aufgezeichnet. Diese Blockgletscherquelle wurde in weiterer Folge ab 2008 mit weiteren Messinstrumenten bestückt (elektrische Leitfähigkeit und Wassertemperatur am Quellaustritt), welche vom Institut für Erdwissenschaften installiert und zur Verfügung gestellt wurden. Die dadurch gewonnenen Daten bildeten eine wichtige Basis für das von 2011 bis Ende 2014 am Institut für Erdwissenschaften der Universität Graz durchgeführte Projekt „RrgAlpCatch“ (Grundwasserspeicherung und Entwässerungsdynamik reliktscher Blockgletscher in den steirischen Niederen Tauern, EFRE-finanziert; siehe Kapitel 3).

3. Entwicklungsphase: Die Zeit von 2006 bis 2012

Ein wichtiger Schritt für den Ausbau und die Kontinuität des Messnetzes waren die drei auf Permafrost ausgerichtete Projekte „ALPCHANGE – Climate Change and Impacts in Southern Austrian Alpine Regions“ (FWF-finanziert; Laufzeit 2006–2010), „PermaNET – Permafrost Longterm Monitoring in the European Alps“ (Alpine Space Programm, Laufzeit 2009–2011) und „permAfrost – Austrian Permafrost Initiative“ (ÖAW-finanziert; Laufzeit 2010–2012). Durch diese unterschiedlichen Förderprogramme wurde das Messnetz an MTD-Standorten erweitert (neben der Oberflächentemperatur wurde fortan auch die Temperatur im bodennahen Untergrund – inklusive einem seichten Bohrloch – gemessen), weitere Gerätschaften installiert (z. B. mehrere Klimastationen; eine automatische Kamera, welche die Schneedeckendynamik im Reichartkar aufzeichnete), BTS-Messungen wiederholt, sowie geoelektrische Messungen durchgeführt (KELLERER-PIRKLBAUER 2011). Im Jahr 2007 erfolgten weitere BTS-Messungen im Hölltal, zwei Jahre später auch im Brandstätterkar. Die bereits zuvor getätigte Annahme des marginalen Vorhandenseins von Permafrost im Untersuchungsgebiet hatte sich im Zuge dieser Monitoringaktivitäten bestätigt und räumlich konkretisiert.

Bedingt durch die Ergebnisse im Teilgebiet Reichartkar konnte gezeigt werden, dass es neben den drei „klassischen“ Blockgletscherklassen (nach Aktivität und Permafrostverbreitung; aktiv, inaktiv und reliktsch; vgl. BARSCH 1996) noch einen vierten Typ gibt. Dieser Typ wurde als „pseudoreliktscher“ Blockgletscher bezeichnet, der zwar in seinem Erscheinungsbild reliktsch aussieht (Bewuchs, Stabilität, eingesunkene Oberfläche und somit akzentuierter Fließstruktur an der Oberfläche), jedoch noch sporadischen (10-50 % Permafrostflächenanteil) bis inselhaften (<10 %) Permafrost an der Wurzelzone des Blockgletschers und an dessen oberen Ende aufweist (KELLERER-PIRKLBAUER 2008; Abb. 3).

Mitte 2011 begann das zuvor bereits genannte Projekt RrgAlpCatch, wobei u. a. in den beiden Karräumen Schönebenkar und Dürrtal zehn weitere Monitoringstandorte für Bodentemperatur mit insgesamt 20 Datenlogger, 4 Klimastationen (drei einfache und eine komplexe), sowie eine automatische Kamera (RDC) zur Beobachtung der Schneedeckendynamik eingerichtet wurden (Abb. 1). Nur einer der 20 Datenlogger weißt in kühleren Jahren leicht negative Jahresmitteltemperaturen auf. Des Weiteren wurden im Rahmen dieses Projektes Bodenradar- und Refraktionsseismikmessungen sowie Farbtacerversuche durchgeführt, welche jedoch das Vorhandensein von Permafrost nicht bestätigten (WINKLER et al. 2012, 2016a, 2016b). Komplexe Hohlsystems mit relativ kühler Porentemperatur in den Sedimenten des Schönebenblockgletschers sind jedoch recht wahrscheinlich (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2015a).

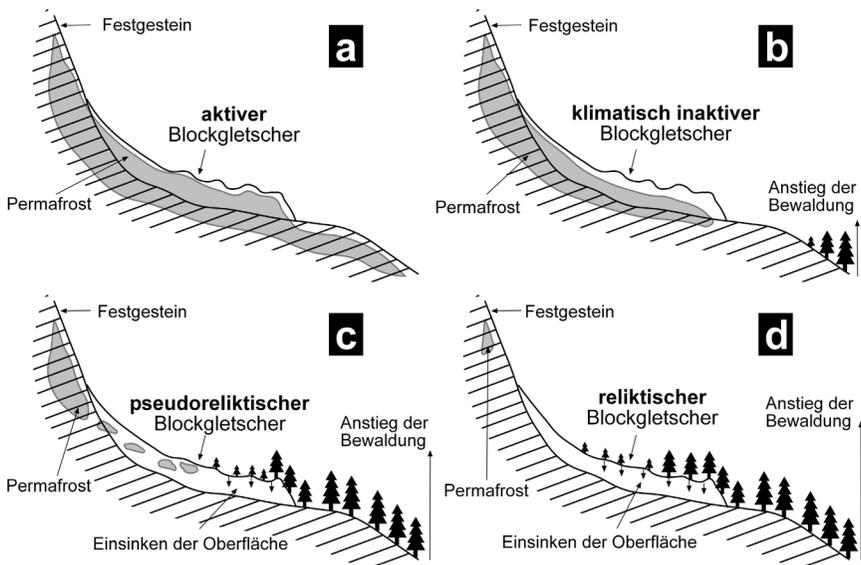


Abb. 3: Schematische Entwicklung der Blockgletscherklassifikation nach Aktivität und Permafrostverbreitung. Die Typen a, b und d wurden von BARSCH (1996) definiert. Typ c ist ein Mischtyp von b und d, welcher zwar reliktsch aussieht (mit Kollapsstrukturen; teilweise Vegetationsbewuchs, weitgehend stabilen Blöcken) jedoch noch sporadischen oder zumindest inselhafte Permafrost beinhaltet (nach Abb. 5.2. in KELLERER-PIRKLBAUER 2008; verändert).

Fig. 3: Schematic diagram of rock glacier classification according to activity and permafrost content. Types a, b and d are defined as proposed in BARSCH (1996). Type C is regarded as an intermediate type between b and d which looks superficially relict (with collapse features due to subsidence processes and partly covered by vegetation) but contains sporadic to discontinuous permafrost, thus the term pseudo-relict was suggested (after Fig. 5.2. in KELLERER-PIRKLBAUER 2008; modified).

4. Konsolidierungsphase: Die Zeit nach 2012

Nach Abschluss der drei oben genannten Permafrostprojekte wurden weitere Untersuchungen entweder im Rahmen des allgemeinen Permafrostmonitoringprogrammes des Instituts für Geographie und Raumforschung der Universität Graz oder in Lernveranstaltungen durchgeführt. So konnten beispielsweise im Jahr 2014 im Schönebenkar und am Gipfel des Hochreicharts, sowie im Jahr 2015 im Dürrtal und im Reichartkar zahlreiche Geoelektrikprofile im Übergangsbereich zwischen Blockgletscher und Schutthalde gemessen werden (Abb. 1), wobei Permafrostlinsen dadurch detektiert werden konnten (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2014; KELLERER-PIRKLBAUER 2015). Mit Hilfe der Schmidt-Hammer Methode, welche schon zuvor in den Niederen und Hohen Tauern erfolgreich zur Datierung von Blockgletschern eingesetzt wurde (KELLERER-PIRKLBAUER 2009; RODE & KELLERER-PIRKLBAUER 2012), konnte das relative Alter einiger Blockglet-

scher im Untersuchungsgebiet bestimmt werden, wobei frühe Initiierungen (frühes Spätglazial), lange Bildungszeiträume und hohe Stabilisierungsalter ermittelt wurden (KELLERER-PIRKLBAUER 2016). Weiters wurde und wird das installierte Messnetz im Schönebenkar sowie im Dürrtal auch nach Projektabschluss durch das Institut für Erdwissenschaften der Universität Graz weiter betrieben und gewartet. Tabelle 1 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Permafrost relevanten Forschungsaktivitäten am Messstandort Hochreichart im Zeitraum 2004 und 2015.

Teilgebiet	Methode									Zeitraum	
	BTS	MTD	RDC	ERT	SR	GPR	SHD	AWS	HYD	von	bis
Hochreichart Gipfel & Flanken		X		X	X	X	X	X		2004	lauf.
Reichartkar	X	X	X	X	X		X	X		2004	lauf.
Brandstätterkar	X									2009	
Hölltal	X									2007	
Dürrtal		X		X			X	X	X	2011	lauf.
Schönebenkar	X	X	X	X	X	X	X	X	X	2002	lauf.

Tab. 1: Übersicht Permafrost relevanter Forschungsaktivitäten zwischen 2004 und 2015 am Messstandort Hochreichart aufgeteilt auf die im Text genannten einzelnen Teilgebiete. BTS: Basistemperatur der winterlichen Schneedecke, MTD: Miniaturtemperaturdatenlogger, RDC; Remote Digital Camera, ERT: Geoelektrik, SR: Refraktionsseismik, GPR: Bodenradar, SHD: Schmidt-Hammer Datierung, AWS: automatische Klimastation, HYD: hydrologische/hydrogeologische Messungen, lauf.: laufend.

Tab. 1: Overview of permafrost related research activities between 2004 and 2015 in the Hochreichart area. The respective activities are listed for each of the six subareas. BTS: base temperature of the winter snow cover, MTD: miniature temperature datalogger, RDC: remote digital camera, ERT: electric resistivity tomography, SR: seismic refraction, GPR: ground penetrating radar, SHD: Schmidt-Hammer dating, AWS: automatic weather station, HYD: hydrological/hydrogeological measurements, lauf.: ongoing.

5. Ein Blick in die Zukunft: Teil eines nationalen Messnetzes für Permafrostmonitoring?

Die Einrichtung eines landesweit koordinierten nationalen Messnetzes für Permafrostmonitoring steckt in Österreich noch in den Kinderschuhen. In dem im Herbst 2015 abgeschlossenen, durch StartClim2014 finanzierten Projekt „permAT - Langzeitmonitoring von Permafrost und periglazialen Prozessen und ihre Bedeutung für die Prävention von Naturgefahren: Mögliche Strategien für Österreich“ wurde gezeigt, dass aktuell an nur 22 Messstandorten in Österreich Permafrostmonitoring betrieben wird (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2015b); der Hochreichartstandort ist einer davon.

Neben dem Messstandort am Dachstein ist der Messstandort Hochreichart auch der einzige in der Steiermark und der östlichste aller Messstandorte überhaupt. Somit ist aus vielerlei Hinsicht dieser Monitoringstandort, an welchem im Laufe der Zeit interessante wissenschaftliche Erkenntnisse erarbeitet werden konnten, zu wahren, ob schon bedingt durch das marginale Vorhandensein von aktuellem Permafrost und der

prognostizierten Klimaerwärmung, vielleicht in naher Zukunft nur mehr mit saisonalem Frost und somit mit dem Ende des Permafrosts im gesamten Untersuchungsgebiet zu rechnen ist. Welchen Zeitraum man unter „naher Zukunft“ hierbei verstehen kann, muss aktuell noch unbeantwortet bleiben, wobei jedoch eine Größenordnung von maximal Jahrzehnten anzunehmen ist.

Dank

Neben den im Beitrag genannten Geldgebern FWF (für ALPCHANGE), Alpine Space Programm (für PermaNET), ÖAW (für permAfrost), EFRE Fonds und Land Steiermark (RrgAlpCatch) sollte an dieser Stelle sehr herzlich den zahlreichen Helfern bei den Feldkampagnen (Studierende wie Kollegen) gedankt sein, die im Laufe der Jahre die oft schwierige Geländearbeit tatkräftig unterstützt haben. Ein weiterer Dank gilt dem Hydrographischen Dienst des Landes Steiermark für die Bereitstellung von Klimadaten, sowie der Stiftung Fürst Liechtenstein – Forst Kalwang und dem Stift Heiligenkreuz – Forstverwaltung Wasserberg für die jahrelange logistische Unterstützung bei den Messkampagnen. Zuletzt sei noch dem Begutachter dieses Beitrages Gerfried WINKLER für seine konstruktiven Anmerkungen gedankt.

Literatur

- BARSCHE, D. (1996): Rock Glaciers: Indicators for the Present and Former Geocology in High Mountain Environments. – Springer Series in Physical Environment, 16, 331 S., Springer Verlag, Berlin.
- BOECKLI, L., BRENNING, A., GRUBER, S. & NOETZLI, J. (2012): Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics. – *The Cryosphere*, 6: 807-820.
- FRUHWIRTH, R. & SCHMID, C. (1998): Blockgletscher Hochreichart: Refraktionsseismische Untersuchungen. – Unpublizierter Bericht, 2 S., Joanneum Research, Graz.
- GÖDEL, S. (1993): Geohydrologie der Blockgletscher im Hochreichart-Gebiet (Seckauer Tauern, Steiermark). – Unpublizierte Diplomarbeit, 165 S., Universität Wien, Wien.
- HAEBERLI, W. (1973): Die Basis-Temperatur 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. (2008): Aspects of glacial, paraglacial and periglacial processes and landforms of the Tauern Range, Austria. – Unpublizierte Doktorarbeit, 200 S., Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.

- KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2009): Wie alt sind Blockgletscher in den Österreichischen Alpen? Das Beispiel der Blockgletscher im Dösener Tal, Ankogelgruppe, datiert mit Hilfe der Schmidt-Hammer Methode. – In: SCHMIDT R. (Hrsg.): *alpine space - man & environment*, Vol. 6, Klima im Wandel - 20 000 Jahre Klimaentwicklung in Österreich. – 65-76, Innsbruck University Press, Innsbruck.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2011): Chapter 3.2: Case studies in the European Alps – Hochreichart, Eastern Austrian Alps. – In: KELLERER-PIRKLBAUER, A. LIEB, G.K., SCHOENEICH, P., DELINE, P. & POGLIOTTI, P (Hrsg.): *Thermal and geomorphic permafrost response to present and future climate change in the European Alps*. – 35-44, PermaNET project, final report of Action 5.3, on-line publication ISBN 978-2-903095-58-1.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2015): Application of 2-D geoelectrical resistivity tomography for mountain permafrost detection in sporadic permafrost environments: Experiences from Eastern Austria. – *Geophysical Research Abstracts*, 17: 13491.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2016): Schmidt-hammer exposure-age dating (SHD) of Lateglacial rock glacier systems near the eastern margin of the European Alps. – *Geophysical Research Abstracts*, 18: 13977.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., PAURITSCH, M., MORAWETZ, R., KUEHNAST, B., SCHREILECHNER, M. & WINKLER, G. (2014): Thickness and internal structure of relict rock glaciers – a challenge for geophysics: Examples from two rock glaciers in the Eastern Alps. – *Geophysical Research Abstracts*, 16: 12581.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., PAURITSCH, M. & WINKLER, G., (2015a): Widespread occurrence of ephemeral funnel hoarfrost and related air ventilation in coarse-grained sediments of a relict rock glacier in the Seckauer Tauern Range, Austria. – *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 97(3): 453-471.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., BARTSCH, A., GITSCHHALER, C., REISENHOFER S., WEYSS, G., RIEDL, C. & AVIAN, M. (2015b): permAT - Langzeitmonitoring von Permafrost und periglazialen Prozessen und ihre Bedeutung für die Prävention von Naturgefahren: Mögliche Strategien für Österreich. – Endbericht von StartClim2014.F in StartClim2014: Anpassung an den Klimawandel in Österreich: Beiträge zur Umsetzung der österreichischen Anpassungsstrategie. – 49 S., Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, ÖBf, Land Oberösterreich, StartClim Eigenverlag, Wien.
- NAGL, H. (1976): Die Raum-Zeit Verteilung der Blockgletscher in den Niederen Tauern und die eiszeitliche Vergletscherung der Seckauer Tauern. – *Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*, 106: 95-118.
- RODE, M. (2014): Permafrost und Frostverwitterung am Dachstein. – In: PISTOTNIK, U., SPITZBART, I. & WEIDINGER, J.T. (Hrsg.): *Der Dachstein im Klimawandel*. – *Gmundner Geo-Studien*, 5: 31-37.
- RODE, M. & KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2012): Schmidt-hammer exposure-age dating (SHD) of rock glaciers in the Schöderkogel-Eisenhut area, Schladminger Tauern Range, Austria. – *The Holocene*, 22: 761-771.
- STIEGLER, C., RODE, M., SASS, O. & OTTO, J.C. (2014): Sporadic permafrost below 1000 m a.s.l. in central Austria: Evidences at an undercooled scree slope detected by geophysical investigations. – *Permafrost and Periglacial Processes*, 25: 194-207.
- UNTERSWEIG, T. & PROSKE, H.(1996): Untersuchungen an einem fossilen Blockgletscher im Hochreichartgebiet (Niedere Tauern, Steiermark). – *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, 33: 201-207.

- UNTERSWEIG, T. & SCHWENDT, A. (1995): Die Quellen der Blockgletscher in den Niederen Tauern. – Berichte der wasserwirtschaftlichen Planung, 78: 1-76.
- WAKONIGG, H. (2001): Ergebnisse von Temperatur-Dauerregistrierungen am „Toteisboden“ im Schladminger Untertal. – Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark, 131: 41-56.
- WINKLER, G., KELLERER-PIRKLBAUER, A. & PAURITSCH, M. (2012): Reliktische Blockgletscher – Grundwasserkörper in alpinen kristallinen Einzugsgebieten. – Beiträge zur Hydrogeologie, 59: 105-122.
- WINKLER, G., PAURITSCH, M., WAGNER, T. & KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2016a): Grundwasserspeicherung und Entwässerungsdynamik reliktscher Blockgletscher. – Berichte der wasserwirtschaftlichen Planung, 86:1-128.
- WINKLER, G., WAGNER, T., PAURITSCH, M., BIRK, S., KELLERER-PIRKLBAUER, A., BENISCHKE, R., LEIS, A., MORAWETZ, R., SCHREILECHNER, M. & HERGARTEN, S. (2016b): Identification and assessment of groundwater flow and storage components of the relict Schöneben Rock Glacier, Niedere Tauern Range, Eastern Alps (Austria). – Hydrogeology Journal, 24(4):937-953.

Anschrift des Verfassers:

Andreas Kellerer-Pirklbauer

Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, Arbeitsgruppe Alpine Landschaftsdynamik (ALADYN), Heinrichstraße 36, 8010 Graz

andreas.kellerer@uni-graz.at