

Permafrostforschung: „heißes“ Thema in Zeiten des Klimawandels

Vorwort

Permafrost research: a “hot” topic in times of climate change

Preface

Andreas KELLERER-PIRKLBAUER, Gerfried WINKLER, Katharina KRENN & Ingomar FRITZ

Vom 14. bis 16. Oktober 2015 diskutierten rund 20 WissenschaftlerInnen aus ganz Österreich im Rahmen des sogenannten „2. Permafrost Austria Workshop“ im Schloss Trautenfels im Ennstal sowie im Zuge einer Exkursion in den Niederen Tauern über die neuesten Erkenntnisse aus dem Forschungsbereich Permafrost (Abb. 1). Der Workshop wurde vom Institut für Geographie und Raumforschung (vertreten durch Andreas KELLERER-PIRKLBAUER) gemeinsam mit dem Institut für Erdwissenschaften (Gerfried WINKLER), beide Karl-Franzens-Universität Graz sowie dem Universalmuseum Joanneum, Trautenfels und Graz (Katharina KRENN & Ingomar FRITZ) veranstaltet.

Permafrost – als thermisches Phänomen – beschreibt einen Temperaturzustand des Untergrundes mit einer Temperatur von weniger als 0 °C, die zumindest einen Sommer lang überdauert und somit der Untergrund ganzjährig gefroren ist. Da jedoch im Sommer die oberflächennahe Schicht des Permafrosts auftaut (in Österreich im Meterbereich), ist Permafrost auch im Sommer oberflächlich nicht erkennbar. Rund 2000 km² von Österreich sind von diesem thermischen Phänomen direkt beeinflusst. Aktuelle Klimaveränderungen, wie der tendenzielle Anstieg der Lufttemperatur, führen im Allgemeinen zur Bodenerwärmung und im extremsten Fall zum Auftauen von Permafrost. Dadurch kann ein zuvor gefrorener Hangbereich labil werden und Massenbewegungen unterschiedlicher Ausprägung können entstehen. Kommt es bei solchen Ereignissen zur räumlichen Überlagerung mit dem von Menschen genutzten Raum, so kann aus einem natürlichen Prozess eine Naturgefahr werden. Ein Aspekt, dem derzeit und auch in Zukunft in Österreich eine stärkere Beachtung gewidmet werden muss.

Der 14. Oktober galt als Anreisetag zum Workshop, wobei sich bereits ein Großteil der WorkshopteilnehmerInnen am Abend beim Hotel Poschenhof in Wörschach zum informellen Ice Breaker-Treffen einfand. Der theoretische Teil des Workshops am 15. Oktober umfasste Vorträge, eine Postersession und sehr angeregte Diskussionen, wobei Schloss Trautenfels, am Fuß des Grimmings, als Workshoplokalität genutzt werden konnte.



Abb. 1: TeilnehmerInnen am „2. Permafrost Austria Workshop“.
Fig 1: Participants of the “2. Permafrost Austria Workshop“.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über das wissenschaftliche Programm am Tag 2 des Workshops. Beiträge, die in dieser Auflistung mit einem Asterisk gekennzeichnet sind, werden in vorliegendem Band der „Joannea – Geologie und Paläontologie“ publiziert. Den Begutachtern der sieben Beiträge sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Der 16. Oktober war schließlich dem praktischen Teil des Workshops gewidmet. Unter der Leitung von Gerfried WINKLER und Andreas KELLERER-PIRKLBAUER wurden einem Teil der WorkshopteilnehmerInnen die laufenden Forschungsaktivitäten im Schönebenkar, Hochreichartgebiet, Seckauer Tauern, vor Ort präsentiert.

Die im Rahmen des Workshops diskutierten Themen umfassten lokale und regionale Aspekte wie beispielsweise die Veränderungen in bekannten Hochgebirgsstandorten am Hohen Sonnblick, am Kitzsteinhorn oder ganz allgemein im Nationalpark Hohe Tauern. Im Zusammenhang mit dem Nationalpark Hohe Tauern konnte basierend auf Ergebnissen eines Langzeitbeobachtungsprogrammes gezeigt werden, dass im Messjahr 2014/15 außergewöhnlich hohe Boden- und somit Permafrosttemperaturen in den Zentralalpen herrschten. Ein weiterer Schwerpunkt im Tagungsprogramm war das Abflussverhalten von Quellen aus einstigen Permafrostsedimentkörpern, im Konkreten von reliktschen Blockgletschern.

08:30-08:45h	Begrüßung Katharina Krenn & Andreas Kellerer-Pirklbauer
08:45-10:15h	Vortragsblock 1 Sitzungsleiter: Andreas Kellerer-Pirklbauer Karl Krainer: <i>Das Permafrost-Vorkommen „Eiskeller Matzen“ in den Karawanken (Kärnten)</i> Gerhard Karl Lieb: <i>The Permafrost-Monitoring Network of the Universities of Graz in the Hohe Tauern National Park*</i> Viktor Kaufmann: <i>20 Years of Geodetic Monitoring of Dösen Rock Glacier (Ankogel Group, Austria) - A Short Review*</i>
10:45-12:15h	Vortragsblock 2 Sitzungsleiter: Ingomar Fritz Matthias Rode: <i>Aktuelle Permafrostforschung am Dachsteinmassiv</i> Gerfried Winkler: <i>Was kommt nach dem Permafrost? - Bedeutung reliktscher Blockgletscher für das Abflussverhalten alpiner Einzugsgebiete*</i> Andreas Kellerer-Pirklbauer: <i>Permafrostmonitoringstandort Hochreichart, Seckauer Tauern: Ein Überblick über 11 Jahre Forschungsaktivitäten am östlichsten Permafrostmonitoringstandort im gesamten Alpenraum*</i>
13:45-14:45h	Posterblock Sitzungsleiter: Andreas Kellerer-Pirklbauer G. Heinrich, W. Schoener, A. Flores-Orozco, R. Supper, S. Pfeiler, J.H. Kim: <i>ATMOperm: Atmosphere-permafrost relationship in the Austrian Alps</i> H. Schnepfleitner, M. Rode, A. Kellerer-Pirklbauer: <i>The new GTN-P Permafrost borehole Koppenkarstein North Face, Dachstein Massif, Northern Calcareous Alps*</i> T. Mikl: <i>Photogrammetrische Dokumentation der raumzeitlichen Veränderung von ausgewählten Blockgletschern in der Schoberggruppe*</i> C. Riedl, S. Reisenhofer, D. Binder, A. Florzes-Orozco, S. Pfeiler, D. Ottowitz, W. Schöner, R. Supper: <i>Permafrost Monitoring am Hohen Sonnblick im Sommer 2015</i> I. Hartmeyer, M. Keuschnig: <i>Long-term Monitoring of Permafrost-Rockfall-Interaction at the Kitzsteinhorn (3.203 m), Hohe Tauern Range, Austria - An Update from the MOREXPART Project</i> A. Kellerer-Pirklbauer, T. Wagner, G. Winkler: <i>Inventarisierung von Blockgletschern und deren hydrologische Einzugsgebieten in den Steirischen Niederen Tauern mit Hilfe von hochaufgelösten Geländemodellen*</i> T. Wagner, M. Pauritsch, G. Winkler: <i>Influence of relict rock glaciers on stream flow of alpine catchments: Examples of the Niedere Tauern Range (Austria)</i>
15:15-17:30h	Workshop mit Impulsreferaten Sitzungsleiter: Gerfried Winkler A. Kellerer-Pirklbauer: <i>Impulsreferat</i> I. Hartmeyer: <i>Global Terrestrial Network on Permafrost (GTN-P)</i>

Tab. 1: Das Programm des Workshops am 16. 10. 2015 (* = in vorliegendem Band publiziert).
Tab. 1: Scientific program of the workshop scheduled on the 16. October 2015 (* = published in this issue).

Diese Landschaftsformen spielen im gesamten Alpenraum und somit auch in den Niederen Tauern eine bedeutende Rolle für den alpinen Wasserhaushalt und auch für die Ökologie in alpinen Regionen. Des Weiteren wurde auch das Permafrostbeobachtungsprogramm am Dachstein vorgestellt, welches seit einigen Jahren läuft.

Im Zuge dieses Programmes konnte im Jahr 2014 ein 7 m tiefes Bohrloch im massiven Dachsteinkalk erbohrt werden, welches seither Veränderungen im Permafrost registrieren kann. Dieser Permafrostbohrlochstandort ist der Dritte in ganz Österreich, einer von rund 1000 Bohrlöchern global gesehen und auch ein Bestandteil des globalen Beobachtungsnetzes GTN-P.

Ein wesentliches Ergebnis der intensiven Diskussionen aller Forschungsrichtungen, die sich mit Permafrost beschäftigen, war die Erkenntnis, dass die österreichische Permafrost- und damit verbundene Naturgefahrendauerbeobachtung noch deutlich intensiviert werden muss, um beispielsweise die Standards der Schweiz oder Frankreichs erreichen zu können. Für sämtliche Forschungsrichtungen sind zuverlässige Daten unerlässlich, um die Prozesse zu verstehen und in weiterer Folge etwaige Änderungen durch klimatisch bedingte Veränderungen vorhersagen zu können. Einen ersten Schritt in diese Richtung war das im Herbst 2015 abgeschlossene Projekt permAT, welches zum Ziel hatte, die Weichen verstärkt in Richtung eines nationalen Messnetzes zur Beobachtung von Permafrost zu stellen. Einigkeit herrschte auch von Seiten aller WorkshopteilnehmerInnen in Bezug auf das gemeinsame Bestreben, die Permafrost-bezogenen Forschungsaktivitäten zum Wohle für Mensch und Natur weiter voranzutreiben. Die Erkenntnisse der Forschungsarbeiten aber auch die Sensibilisierung der Bevölkerung für das Thema Permafrost sollte auf unterschiedlichen Kommunikations-ebenen auch an öffentliche Vertreter sowie der Öffentlichkeit kommuniziert werden.

Anschrift der Verfasser:

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

Gerfried Winkler

Karl-Franzens-Universität Graz, NAWI Graz Geozentrum, Institut für Erdwissenschaften, Heinrichstraße 26, 8010 Graz
gerfried.winkler@uni-graz.at

Katharina Krenn

Universalmuseum Joanneum, Abteilung Schloss Trautenfels, Trautenfels 1, 8951 Stainach-Pürgg
katharina.krenn@museum-joanneum.at

Ingomar Fritz

Universalmuseum Joanneum, Abteilung für Geologie & Paläontologie, Weinzöttlstraße 16, 8045 Graz
ingomar.fritz@museum-joanneum.at

The Graz permafrost monitoring network in the Hohe Tauern National Park (Austria)

Das Grazer Permafrost-Monitoring-Netzwerk im Nationalpark Hohe Tauern (Österreich)

Gerhard Karl LIEB, Andreas KELLERER-PIRKLBAUER, Viktor KAUFMANN & Michael AVIAN

2 Figures and 2 tables

Abstract: Based on the project ALPCHANGE researchers from both the University of Graz and Graz University of Technology established a permafrost monitoring network at five different monitoring areas in the Hohe Tauern National Park, Central Austria, in 2006. Methodically this network is primarily based on ground temperature measurements, geodetic surface velocity measurements of rock glaciers and surface change detection (e. g. rock fall) using terrestrial laser scanning. For the period 2013/14 the first report on these activities was delivered to the national park authorities indicating very permafrost-unfavourable conditions for the reporting year. Additionally, the paper discusses the concept for the documentation of gravitational processes which is going to be implemented in the next years.

Zusammenfassung: Auf der Grundlage des Projekts ALPCHANGE wurde im Jahr 2006 von Forschenden der Universität Graz und der Technischen Universität Graz ein Permafrost-Monitoring-Netzwerk in fünf Untersuchungsgebieten im Nationalpark Hohen Tauern eingerichtet. Methodisch umfasst dieses Netzwerk primär Bodentemperaturmessungen, geodätische Bewegungsmessungen an Blockgletschern und die Erfassung von Oberflächenveränderungen (z. B. Steinschlag) durch terrestrisches Laserscanning. Für den Zeitraum 2013/14 wurde erstmals ein Bericht über diese Aktivitäten der Verwaltung des Nationalparks übergeben, welcher aufzeigt, dass dieses Beobachtungsjahr sehr ungünstig für Permafrost ausfiel. In der Arbeit wird auch ein Konzept für die in den nächsten Jahren geplante ergänzende Dokumentation von gravitativen Prozessen diskutiert.

Key Words: Permafrost; Long-term monitoring; Rock glacier; Effects of climate warming; Hohe Tauern National Park.

Schlüsselworte: Permafrost; Langzeitmonitoring; Blockgletscher; Auswirkungen des Klimawandels; Nationalpark Hohe Tauern.

1. Introduction

Systematical research on permafrost in the Hohe Tauern National Park started already in the early 1990s and was intensified in the period 2006–2011 during the project “ALPCHANGE“ which was funded by the Austrian Science Fund (FWF). Within this project the research areas, which are still used for the ongoing monitoring program, were initially instrumented with different types of measurement devices. Later, these monitoring activities were continued within the framework of the Alpine Space project “PermaNET“ funded by the European Union. PermaNET aimed at establishing a permafrost monitoring network across the entire Alpine Arc also providing a manual for this purpose (MAIR et al. 2011). “PermaNET” was followed by the project “permAfrost”, which was nationally funded by the Austrian Academy of Sciences and was running until 2013. The continuation of the monitoring activities was endangered due to the lack of funding. Fortunately, since 2016 the Hohe Tauern National Park is financially supporting the maintenance of the previously established monitoring network while on the national level (Austria) this problem is still unsolved (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2015a).

Permafrost as a natural phenomenon is a sensitive indicator for climate change and its variations affect a lot of processes (such as rock fall or debris flows) in high mountain areas (e. g. SCHOENEICH et al. 2014). Different to e. g. water, weather and glacier variations, permafrost is not monitored on a regular basis by certain institutions or organizations in Austria. This is a further reason why the Hohe Tauern National Park in the Austrian Federal State of Carinthia has decided to support our already established monitoring of permafrost.

2. Methods

The methods used in our monitoring network are well established methods of permafrost research which cannot be explained in detail here (e. g. MAIR et al. 2011). Table 1 gives an overview of these methods and the five study areas where they have been applied. The methods can be grouped into three categories (cf. LIEB et al. 2014) as follows: (a) ground temperature measurements aiming to achieve information on the ther-

mal regime at the surface and at near-surface layers in different substrates (GST, GT, RST, RT; for abbreviations see Tab. 1); (b) surface velocity measurement of creeping permafrost (active rock glaciers, TS, AS); (c) detecting changes in surface morphology (TS, AS). Additional information is derived from two automatic weather stations (AWS), visual interpretation of daily terrestrial photographs taken by remote digital cameras (RDC) and documentation of natural geomorphic events, the latter being in preparation (see below).

No.	Name of local study area	GST	GTx	RST	RTx	TS	AS	AWS	RDC
1	Dösen-Säuleck	X	X	X	X	X	X	X	X
2	Hinteres Langtalkar-Kögelekar	X	X	X	X	X	X	X	X
3	Hochtor-Fallbichl	X	X			X			
4	Pasterze-Burgstall	X	X	X	X	X	X		
5	Weißenkar	X	X			X	X		

Tab. 1: Measured parameters at the five local study areas in the Hohe Tauern National Park. GST: ground surface temperature, GTx: ground temperature at different depths in shallow soil boreholes or in voids of coarse sediments, RST: rock surface temperature, RTx: rock temperature at different depths in shallow boreholes, TS: terrestrial survey (geodesy, terrestrial laserscanning, differential GPS), AS: airborne survey (aerial photographs, airborne laserscanning), AWS: automatic weather station, RDC: automatic remote digital camera.

Tab. 1: Gemessene Parameter in den fünf lokalen Untersuchungsgebieten im Nationalpark Hohe Tauern: GST: Bodentemperatur an der Oberfläche, GTx: Bodentemperatur in unterschiedlichen Tiefen in seichten Bodenbohrlöchern oder in Hohlräumen von grobblockigen Sedimenten, RST: Felstemperatur an der Oberfläche, RTx: Felstemperatur in unterschiedlichen Tiefen in seichten Felsbohrlöchern, TS: terrestrische Vermessung (Geodäsie, terrestrisches Laserscanning, differential GPS), AS: luftgestützte Vermessung (Luftbilder, luftgestütztes Laserscanning), AWS: automatische Wetterstation, RDC: automatische Digitalkamera.

Figure 1 shows the location of the monitoring areas and their relation to the modelled permafrost distribution, glaciers and rock glaciers. The best information on permafrost and permafrost variations provide boreholes with temperature sensors in different depths. Currently no deep borehole (i. e. deeper than the active layer thickness; in Austria in the range of several meters) in the Hohe Tauern National Park is run by the institutions involved in the presented monitoring activities. However, at Hoher Sonnblick (Fig. 1) three 20 m deep boreholes in permafrost are operated by the Central Institute for Meteorology and Geodynamics (SCHÖNER et al. 2012).

3. Results

A comprehensive report on the monitoring activities outlined above has been prepared for the period 2013/14 (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2015b). In this short communication, however, the results cannot be provided in detail. Instead of this and as an example, the evolution of the mean annual ground surface temperatures for 2006–2014 for two selected sites is shown in Figure 2.

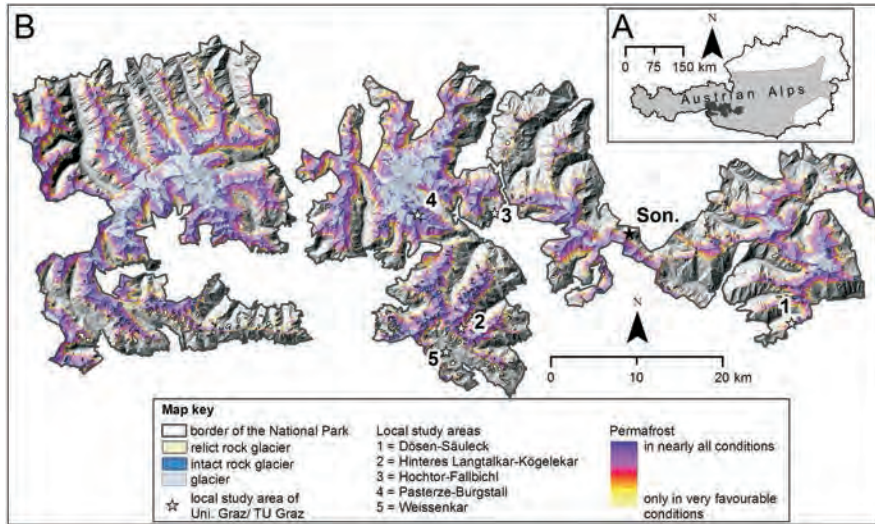


Fig. 1: Study areas: (A) Location of the Hohe Tauern National Park in Austria and the Austrian Alps; (B) Spatial distribution of modelled potential permafrost and glaciers (BOECKLI et al. 2012), intact and relict rock glaciers (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2012a) as well as the location of the five monitoring areas of the Graz permafrost monitoring network within the Hohe Tauern National Park. Furthermore, the Hoher Sonnblick (Son.) site with three deep boreholes is indicated. *Abb. 1:* Untersuchungsgebiete: (A) Lage des Nationalparks Hohe Tauern in Österreich und den österreichischen Alpen; (B) Räumliche Verbreitung von modelliertem potenziellem Permafrost und Gletschern (BOECKLI et al. 2012), intakten und reliktschen Blockgletschern (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2012a) sowie die Lage der fünf lokalen Untersuchungsgebiete des Grazer Permafrost-Monitoring-Netzwerkes im Nationalpark Hohe Tauern. Weiters ist der Hohe Sonnblick (Son.) mit drei tiefen Bohrlöchern verortet.

While the left diagram in Figure 2 shows a clear warming trend (interpreted as a result of the ongoing global climate change) at a permafrost site, the right diagram indicates more variable mean annual temperatures which is related to variable seasonal snow cover conditions from year to year at a site most likely lacking permafrost. Taking into account all the results documented in the above mentioned report, the following conclusions can be drawn:

Ground temperatures: The period 2013/14 was comparatively warm leading to new maxima of GST at some measurement points and to very unfavourable conditions for conservation or aggradation of permafrost. 2013/14 thus fits to the long-term development of GST visible in Figure 2.

Surface velocity of rock glaciers: The values recorded in 2013/14 were higher than in all previous years which can be explained by high deformation rates typical for relatively warm permafrost and the increased existence of liquid water. This parameter is also characterized by a clear trend towards higher velocities in the last decade reflecting global warming too (cf. SCHOENEICH et al. 2014).

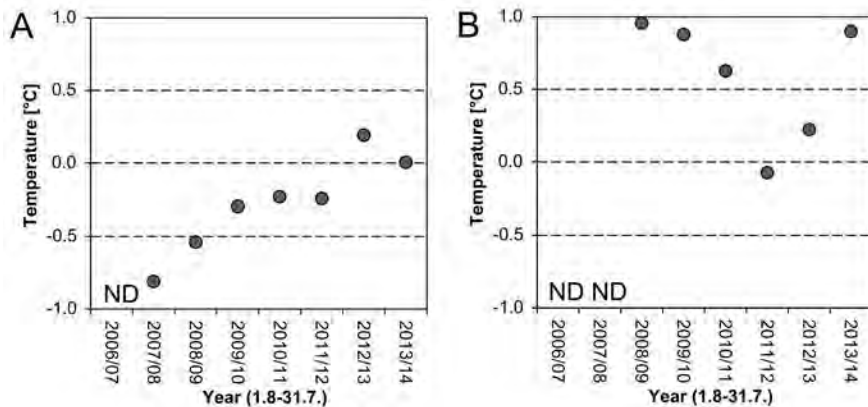


Fig. 2: Mean annual ground surface temperature (GST) at two selected monitoring sites in the Hohe Tauern National Park. One is a permafrost site (A) and one is characterized by seasonal frost (B): (A) site HLC-UP-N in the monitoring area Hinteres Langtal Cirque (HLC) at 2693 m a.s.l. indicating a clear warming trend; (B) site FAL-UP in the monitoring area Hochtör-Fallbichl (FAL) at 2345 m a.s.l. indicating no clear trend related to variable seasonal snow conditions. ND = no data.

Abb. 2: Die Jahresmitteltemperatur an der Oberfläche (GST) an zwei ausgewählten Monitoringstandorten im Nationalpark Hohe Tauern; ein Permafroststandort (A) und ein Standort mit saisonalem Bodenfrost (B): (A) Standort HLC-UP-N im Untersuchungsgebiet Hinteres Langtal Kar (HLC) auf 2693 m ü.A. mit einem klaren Erwärmungstrend; (B) Standort FAL-UP im Untersuchungsgebiet Hochtör-Fallbichl (FAL) auf 2345 m ü.A. ohne Trend bedingt durch eine stark variierende winterliche Schneedecke. ND = keine Daten.

Changes in surface morphology: There was little dynamics in rock falls and rock face denudation at the relevant monitoring sites which most likely can be explained due to the lack of long lasting heat waves in 2013/14. However, numerous and extensive rock falls have been reported in the previous years (e. g. KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2012b).

4. Documentation of natural geomorphic processes

Permafrost in the Alps exists in high mountain areas which are prone to gravitational processes of different types. Especially permafrost degradation which is proved by the results of our monitoring leads to destabilization of substrate when this substrate was rich in ice before melting. The processes triggered by this effect such as rock fall or debris flows are a potential hazard for humans and infrastructure, a problem which has been addressed in the Hohe Tauern National Park e. g. by KERN et al. (2012). In order to document such potentially hazardous processes a questionnaire (Tab. 2) is in preparation which will be provided to the staff of the Hohe Tauern National Park from summer

2017 on. This questionnaire aims at gathering information on large areas of the national park and will also provide information on processes which occur in permafrost-free areas.

Question	Parameter	Example
Which event has taken place?	e.g. rock fall, ice avalanche, debris flow, inundation	rock fall
Who has observed the event?	person, profession, address	Lieb and monitoring team, gerhard.lieb@uni-graz.at
When was the observation?	date, time	2012-09-10; 08.00-10.00 h
Where has the event taken place?	location, elevation a.s.l., slope aspect	Kellersberg-NE-crest, ca. 2650-2700 m, aspect NE; 12°43'19"E, 47°04'09" N
What was the lower extent and range of the event?	area affected, type of substrate, estimated volume	valley near Hofmannskees, rock fall reaching downward to 2200 m a.s.l.; ca. 1.000 m ³ rock
When did the event took place?	approximation of date and time	during the observation, main event 9.35-9.36 h
When was a similar event observed here before?	statement on singularity or frequency of the event	never
Who or what was affected by the event?	damage to persons, infrastructure, animals, plants	none
What else is worth mentioning concerning the event?	additional observations of any kind	series of rock falls; huge cloud of dust developed
How is the event documented?	map, photograph, video (upload)	https://www.youtube.com/watch?v=io2GwoCiWQswww.uni

Tab. 2: Parameters to be documented in the questionnaire of natural geomorphic events (working table).

Tab. 2: Parameter, welche im Erfassungsbogen für geomorphologische Ereignisse erfasst werden (Arbeitsdokument).

5. Conclusions

The results of the Graz permafrost monitoring network presented in this contribution lead to a clear statement on the current development of permafrost: The climatic conditions in 2013/14 as well as in the entire time span since the establishment of the monitoring network (2006) are unfavourable for permafrost which is especially proved

by increasing ground temperatures and surface velocities of rock glaciers. The continuation of the measurements which seems to be secured for the years to come will provide further insight to the process of permafrost degradation which will most likely occur as judged from predicted climate change.

Acknowledgments

This monitoring activity was initiated during the project ALPCHANGE – Climate change and impacts in southern Austrian alpine regions funded by the Austrian Science Fund (FWF) through project FWF P18304-N10 and subsequently funded by the projects PermaNET – Permafrost long-term monitoring network in the European Alps and permAfrost – Austrian Permafrost Initiative. PermaNET was part of the European Territorial Cooperation and co-funded by the European Regional Development Fund (ERDF) in the scope of the Alpine Space Programme. permAfrost was funded by the Austrian Science Foundation. The comments of Gerfried WINKLER helped to improve an earlier version of this paper.

References

- 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.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., LIEB, G.K. & KLEINFERCHNER, H. (2012a): A new rock glacier inventory in the eastern European Alps. – *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2): 78-93.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., LIEB, G.K., AVIAN, M. & CARRIVICK, J. (2012b): Climate change and rock fall events in high mountain areas: numerous and extensive rock falls in 2007 at Mittlerer Burgstall, Central Austria. – *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 94(1): 59-78.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., BARTSCH, A., GITSCHTHALER, 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.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., AVIAN, M., LIEB, G.K. & KAUFMANN, V. (2015b): Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2013/14. – *Unpublished report*, 17 p., Institute of Geography and Regional Science, University of Graz, and Institute of Geodesy, Graz University of Technology, Graz.
- 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* 105(2): 113-127.

- LIEB, G.K., KELLERER-PIRKLBAUER, A., KAUFMANN, V. & AVIAN, M. (2014): Ein Konzept für das Monitoring von Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern, Kärnten. – Berichte des Institutes für Erdwissenschaften der Karl-Franzens-Universität Graz, 20(1): 122.
- MAIR, V., ZISCHG, A., LANG, K., TONIDANDEL, D., KRÄINER, K., KELLERER-PIRKLBAUER, A., DELINE, P., SCHOENEICH, P., CREMONESE, E., POGLIOTTI, P., GRUBER, S. & BÖCKLI, L. (2011): PermaNET - Permafrost Long-term Monitoring Network. Synthesis Report. – 28 p., Interpraevent, Journal Series 1, Report 3, Klagenfurt.
- SCHÖNER, W., BOECKLI, L., HAUSMANN, H., OTTO, J.-C., REISENHOFER S., RIEDL, C. & SEREN, S. (2012): Spatial patterns of permafrost at Hoher Sonnblick (Austrian Alps) – extensive field-measurements and modelling approaches. – Austrian Journal of Earth Sciences Volume 105(2): 154-168.
- SCHOENEICH, P., BODIN, X., ECHELARD, T., KAUFMANN, V., KELLERER-PIRKLBAUER, A., KRYSIECKI, J.M. & LIEB, G.K. (2014): Velocity changes of rock glaciers and induced hazards. – In: LOLLINO, G., MANCONI, A., CLAGUE, J., SHAN, W. & CHIARLA, M. (eds.): Engineering Geology for Society and Territory. Volume 1. – 223-227, Springer International Publishing, Switzerland.

Authors addresses:

Gerhard Karl Lieb

University of Graz, Department of Geography and Regional Science, Working Group Alpine Landscape Dynamics (ALADYN), Heinrichstrasse 36, 8010 Graz
gerhard.lieb@uni-graz.at

Andreas Kellerer-Pirklbauer

University of Graz, Department of Geography and Regional Science, Working Group Alpine Landscape Dynamics (ALADYN), Heinrichstrasse 36, 8010 Graz
andreas.kellerer@uni-graz.at

Viktor Kaufmann

Graz University of Technology, Institute of Geodesy, Working Group Remote Sensing and Photogrammetry, Steyrergasse 30, 8010 Graz
viktor.kaufmann@tugraz.at

Michael Avian

AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Energy Department, Environmental Resources & Technologies
Konrad-Lorenz-Straße 24, 3430 Tulln
michael.avian@ait.ac.at

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

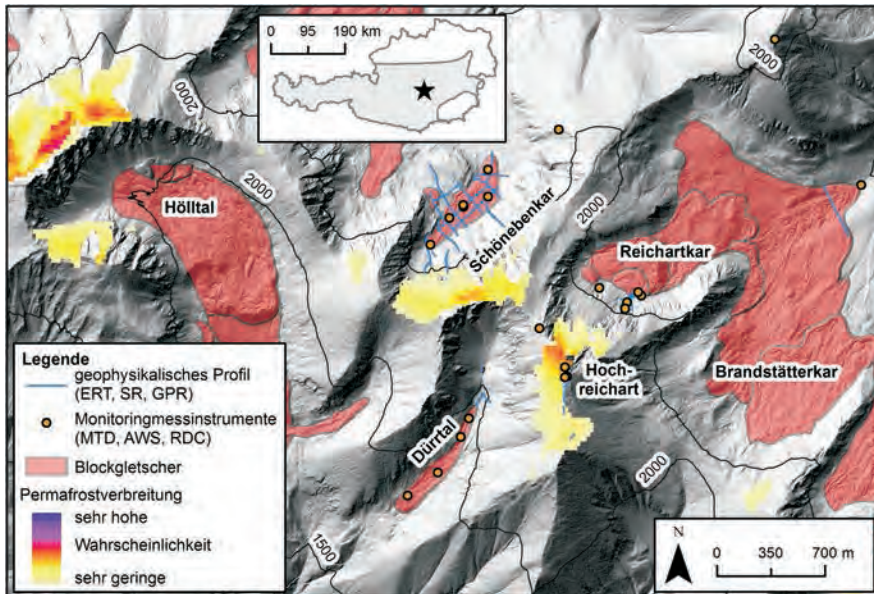


Abb. 1: Permafrostmonitoring am Messstandort Hochreichart mit den sechs Teiluntersuchungsgebieten (Hochreichart Gipfel und Flanken, Reichartkar, Brandstätterkar, Hölltal, Dürrtal und Schönebenkar). Positionen von Monitoringmessinstrumenten (MTD, AWS, RDC) sowie die Lage von geophysikalischen Messprofilen (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, Dürr 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

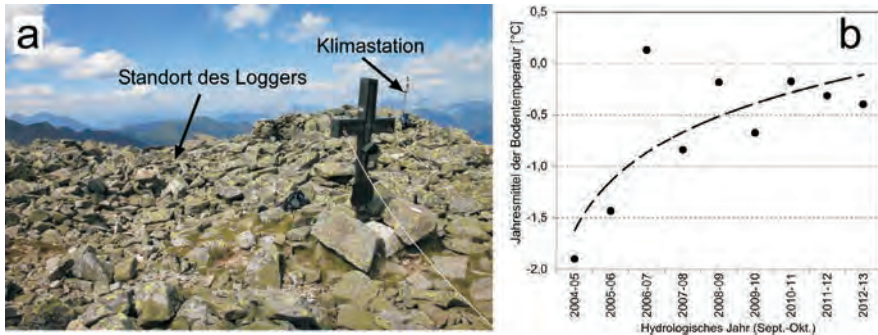


Abb. 2: Die längste geschlossene Bodentemperaturmessreihe an einem Permafroststandort in Österreich im Gipfelbereich des Hochreicharts auf 2416 m: (a) Geländesituation mit Lage des Sensors nahe dem Gipfelkreuz sowie einer Klimastation – Blick nach N; (b) Entwicklung der Jahresmitteltemperatur auf Basis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

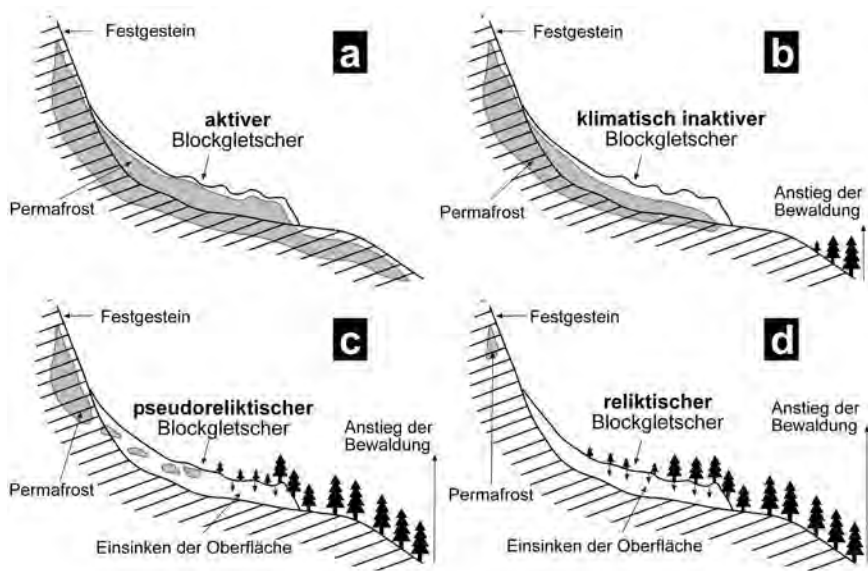


Abb. 3: Schematische Entwicklung der Blockgletscherklassifikation nach Aktivität und Permafrostverbreitung. Die Typen a, b und d wurden von BARSCH (1996) definiert. Typ c ist ein Mischtyp von b und d, welcher zwar reliktsch aussieht (mit Kollapsstrukturen; teilweise Vegetationsbewuchs, weitgehend stabilen 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, obschon 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.

- UNTERSWEG, 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

Das Permafrostbohrloch „Koppenkarstein North Face“ am Dachsteinmassiv: Ein österreichischer Beitrag zum Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P)

The permafrost borehole „Koppenkarstein North Face“, Dachstein Massif: An Austrian contribution to the Global Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P)

Harald SCHNEPFLEITNER, Andreas KELLERER-PIRKLBAUER & Matthias RODE

4 Abbildungen

Zusammenfassung: Permafrost ist ein klimatisch gesteuertes thermisches Phänomen. Zwei Messgrößen des Permafrosts werden aktuell durch das globale Beobachtungsnetz Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P) als *Essential Climate Variables* (ECVs) geführt, diese sind die Permafrosttemperatur sowie die Mächtigkeit der sommerlichen Auftauchschicht über dem eigentlichen Permafrostkörper. Beides kann im Alpenraum nur mit Bohrlochdaten an Permafroststandorten ermittelt werden, wobei diesbezügliche Messungen in Österreich bisher nur am Kitzsteinhorn (5 Bohrlöcher) sowie am Hohen Sonnblick (3 Bohrlöcher) durchgeführt wurden. Im Jahr 2014 wurde im Dachsteinmassiv der nunmehr dritte Permafrostbohrlochstandort in Österreich eingerichtet. Dieser Beitrag gibt einen kurzen Überblick über Hintergründe der Standortwahl, Bohrung sowie die technische Instrumentierung des Bohrlochs und schließt mit ersten Ergebnissen und einem Ausblick ab.

Abstract: Permafrost distribution and thermal conditions are influenced by climatic conditions and therefore are prone to climate change. Two permafrost-derived variables are considered as Essential Climate Variables (ECV) by the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). The two ECVs are permafrost temperature and thickness of the seasonally unfrozen layer above the permafrost body. In alpine areas at mid-latitude mountains the two ECVs can only be measured at monitoring sites with boreholes

deeper than the active layer. Until 2014 only two locations in Austria were equipped with such permafrost boreholes (Kitzsteinhorn and Hoher Sonnblick). In 2014 a third permafrost borehole site was established in at a north facing rockwall site at the Koppenkarstein mountain. This paper gives a short overview about drilling site selection, drilling procedure, and installation of technical equipment for monitoring. Furthermore, first results and an outlook complete this paper.

Schlüsselworte: Permafrostmonitoring; Nördliche Kalkalpen; Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P).

Key Words: Permafrost monitoring; Northern Calcareous Alps; Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P).

1. Einleitung

Permafrost ist ein klimatisch gesteuertes, thermisches Phänomen in alpinen und polaren Regionen. Dabei ist Permafrost als Untergrund zu verstehen, welcher zumindest zwei aufeinander folgende Jahre gefroren ist und von einer geringmächtigen (in Österreich generell einige Meter) saisonalen Auftauschicht überlagert sein kann (VAN EVERDINGEN 1998). Bedingt durch diese klimatische Steuerung werden zwei Permafrost-bezogene Parameter als *Essential Climate Variables* (ECVs) vom globalen Beobachtungsnetz *Global Climate Observing System* (GCOS) geführt. Diese sind die Temperatur von Permafrost sowie Mächtigkeit der saisonalen Auftauschicht. Beide können im österreichischen Alpenraum nur an Bohrlöchern im Permafrostmilieu gemessen werden, welche mit Temperaturmessketten ausgestattet sind (KELLERER-PIRKLBAUER 2014). Die Beobachtung dieser Permafrost-bezogenen ECVs wird durch das *Global Terrestrial Network for Permafrost* (GTN-P) koordiniert, welches 1999 durch die *International Permafrost Association* (IPA) gegründet wurde. Seit 1998 ist Österreich Mitglied der IPA. Vor der Bohrung des neuen Permafrostbohrlochs *Koppenkarstein North Face* hat Österreich mit acht Permafrostbohrlöcher von zwei Standorten (Hoher Sonnblick und Kitzsteinhorn, beide in den Hohen Tauern; Abb. 1) zu dem GTN-P Netzwerk beigetragen (BISKABORN et al. 2015).

Das Dachsteinmassiv ist ein Hochgebirgsstock, welcher am Hohen Dachstein mit 2995 m ü.A. seine größte Höhe erreicht. Geologisch gesehen dominiert in den höheren Lagen (>2000 m) – und somit im potentiellen Permafrost – der Verwitterungsbeständige gebankte Dachsteinkalk. Erste Forschungstätigkeiten am Dachstein mit Fokus auf den Permafrost wurden in den 1990er Jahren durchgeführt (LIEB & SCHOPPER 1991). Aktuelle Permafrostforschung im Gebiet des Dachsteins wird in den beiden Projekten ROCKING ALPS (finanziert vom Fonds zur Wissenschaftlichen Förderung/FWF) und INFRAROCK (finanziert durch das Institut für Geographie und Raumforschung, Universi-

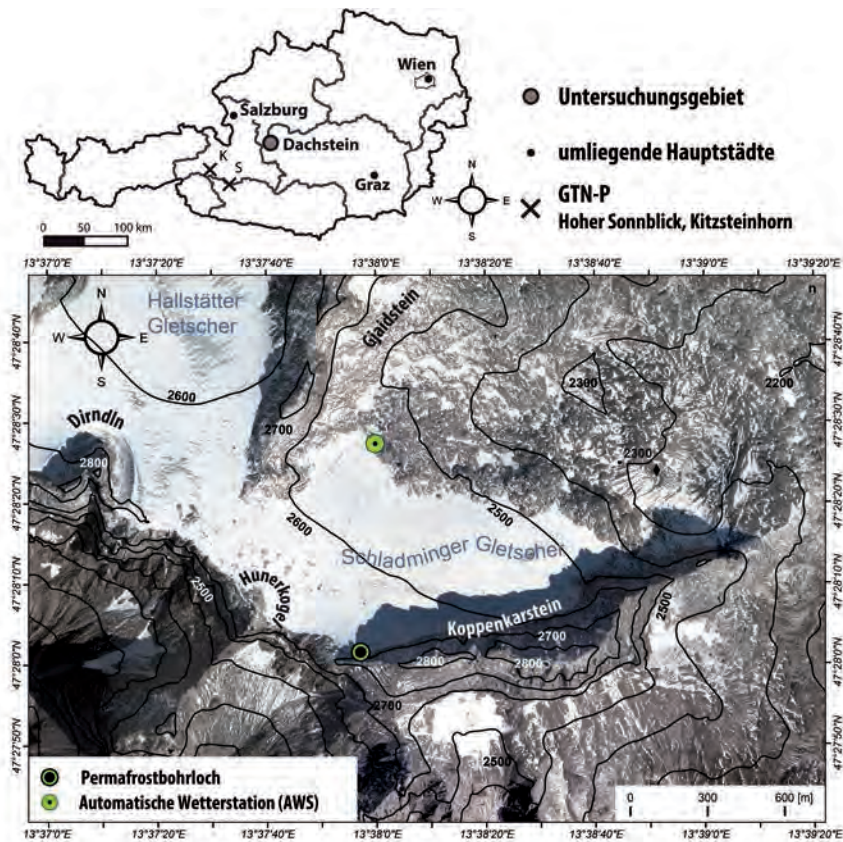


Abb. 1: Lage des Arbeitsgebietes in Österreich und Lage des Bohrloches an der Nordflanke des Koppenkarsteins im Übergangsbereich zum Schladminger Gletscher. Orthofoto im Hintergrund wurde 2009 aufgenommen (Quelle: Digitales Oberösterreichisches Raum-Informationssystem/DORIS).

Fig. 1: Overview map of the location of the study area in Austria and the position of the permafrost borehole at the Koppenkarstein mountain south of the Schladminger Glacier. Orthophoto in the background dates to 2009 (Source: DORIS).

tät Graz) durchgeführt. Im Rahmen dieser Tätigkeiten erfolgte im Sommer 2014 in einem von Permafrost beeinflussten Felsbereich (basierend auf geoelektrische Widerstandsmessungen) die Bohrung eines 7 m tiefen Bohrloches. Dieses Bohrloch ist nun das neunte österreichische GTN-P Bohrloch am dritten Standort in Österreich. Dieser Beitrag gibt einen kurzen Überblick über die Bohrtätigkeiten sowie die technische Instrumentierung und präsentiert erste Daten.

2. Bohrung und Instrumentierung

Am 13. August 2014 wurde eine zur Felswand nahezu vertikale Bohrung (-15° zur Horizontalen) am Hangfuß des Koppenkarsteins (Gipfelhöhe 2863 m ü.A.) im Übergangsbereich zum Schladminger Gletscher durchgeführt (Abb. 2). Die gewählte Lokalität erleichterte die Bohrung wesentlich, da die pneumatische Bohrgerätschaft, welche an einer Baggerschaufel befestigt wurde, relativ einfach am Standort eingerichtet und fixiert werden konnte. Das Bohrloch hatte nach Abschluss der mehrstündigen Bohrtätigkeiten bei einem Durchmesser von 85 mm eine Gesamttiefe von 7 m. Die Bohrarbeiten konnte im Rahmen von Wartungsarbeiten der Dachstein Gletscherbahnen durchgeführt werden, weshalb die Bohrkosten gering gehalten werden konnten.

Die erste Instrumentierung mit Temperatursensoren wurde rund 4 Wochen später, am 9. September 2014 durchgeführt. Bedingt durch in das Bohrloch eingetretenes Wasser, war das Bohrloch ab einer Tiefe von 4 m zugefroren. Dieser Zustand bekräftigte die Hypothese, dass im Bereich des Bohrloches Permafrost auftritt.

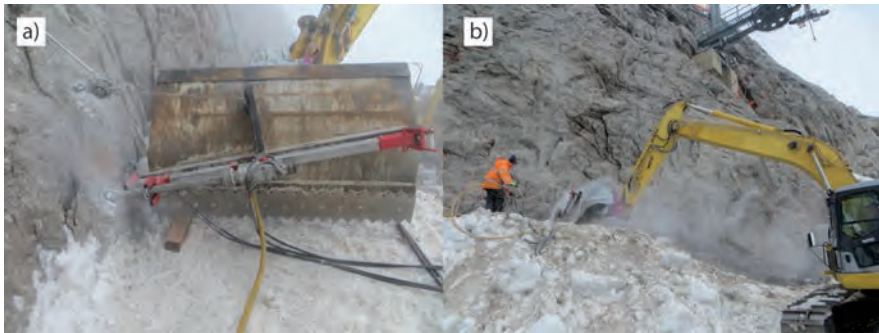


Abb. 2: Bohrtätigkeiten am neuen Permafrostbohrlochstandort: a) pneumatische Bohrgerätschaft, welche an einer Baggerschaufel verankert wurde; b) der Bohrlochstandort und seine nähere Umgebung; zu beachten die steile, aus Dachsteinkalk aufgebaute Felswand sowie die Liftbergstation im Hintergrund.

Fig. 2: Drilling activities at the new borehole: a) pneumatic drilling equipment attached to an excavator shuffle; b) the drilling campaign itself; note the cable lift infrastructure in the background.

Um das Bohrloch wieder zu enteisen, wurde ein Heizstabsystem verwendet, wobei die ständige Stromversorgung durch die nahe liegende Infrastruktur der Dachstein Gletscherbahnen gewährleistet wurde. Aufgrund der Anfang September 2014 fehlenden Verfügbarkeit einer 7 m langen Temperaturmesskette, welche für eine optimale Instrumentierung des Bohrlochs notwendig gewesen wäre, wurde alternativ dazu eine zu diesem Zeitpunkt vorhandene 5 m lange Temperaturmesskette verbunden mit einem

Mehrkanaldatenlogger (für die oberen 5 m des Bohrlochs) sowie einem weiteren Einkanaldatenlogger (für die Messung in 7 m Tiefe) in das Bohrloch eingebaut. Das Messsystem für die oberen 5 m des Bohrloches war ein GeoPrecision (Ettlingen, Germany) Logger vom Typ M-Log7 mit zehn digitalen Sensoren (DALLAS 1820), welche in 0, 10, 20, 40, 60, 100, 150, 200, 350, und 500 cm von der Felsoberfläche gerechnet eingebaut wurden.

Die verwendeten Sensoren haben laut GeoPrecision eine Auflösung von $0,065\text{ }^{\circ}\text{C}$ und eine Genauigkeit von $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Um die Sensoren direkt an den Felsen zu koppeln, wurde die Temperaturmesskette an einem PVC-Rohr ($\text{Ø } 75\text{ mm}$) befestigt und eingeführt (Abb. 3). Für die Messung in 7 m Tiefe wurde ein Einkanallogger der Marke iButton (Typ DS1922L) verwendet.

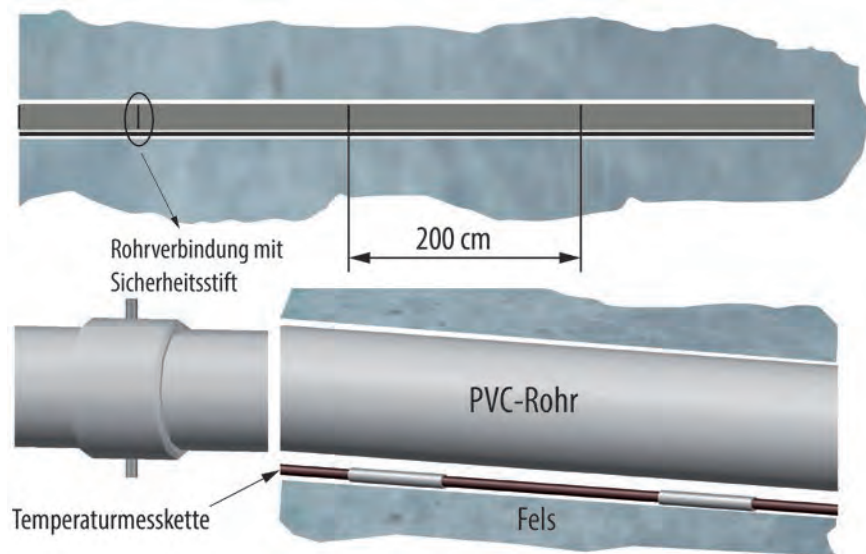


Abb. 3: Konstruktion und Installation des Bohrloches für das Permafrostmonitoring. Die Temperaturmesskette wurde an die Aussenseite des PVC-Rohres mittels Gewebepapier befestigt.

Fig. 3: Construction and installation scheme of the permafrost borehole. The thermistor string is attached to the outer surface of the PVC pipes by adhesive tape.

Die Messkette konnte im Juli 2015 wieder ausgebaut werden, leider hielt der iButton-Logger den Bedingungen in 7 m Tiefe nicht stand (Batterie leer). Somit liegen keine Daten aus dieser Tiefe für das Messjahr 2014/15 vor.

Eine neue, speziell für dieses Bohrloch konstruierte Temperaturmesskette wurde am 28. August 2015 in das Bohrloch eingebaut. Vor dieser zweiten Instrumentierung musste wiederum das teilweise gefrorene Bohrloch enteist werden, wobei das zuvor

beschrieben Heizstabsystem erneut zum Einsatz kam. Zwischen dem 22. Juli 2015 und dem 28. August 2015 erfolgte die Enteisung des Bohrlochs. Der neue Datenlogger wurde wiederum von der Firma GeoPrecision konstruiert (iLOG-GPRS-3V). Der Logger ist mit zwölf digitalen Sensoren (Typ M-Log5W-DALLAS), welche in 0, 10, 20, 40, 60, 100, 150, 200, 350, 500, 600 und 700 cm Tiefe eingebaut wurden, verbunden. Diese Temperatursensoren haben – entsprechend den Angaben des Herstellers – eine Auflösung von 0,06 °C sowie eine Genauigkeit von +/-0,25 °C.

3. Erste Ergebnisse und Ausblick

Abbildung 4 zeigt eine Grafik der Boden- und Lufttemperaturentwicklung (ausgewählte Sensoren bis in eine Tiefe von 5 m) von Oktober 2014 bis 1. Juli 2015. Klare Aussagen bezüglich Permafrost können auf Basis dieser Daten noch nicht getroffen werden, dennoch wird in weiterer Folge versucht Indikatoren zu interpretieren. In der Grafik ist deutlich der allmähliche Temperaturabfall ab ca. Anfang November zu erkennen, wobei die tiefsten Temperaturen – in allen Tiefen – Anfang Mai 2015 erreicht wurden. Grundsätzlich folgt die Temperatur im Gestein, je nach Tiefe in gedämpfter Form, jener der Luft. Ab Mitte Februar scheint sich eine ausreichend dicke Schneeauflage aufgebaut zu haben um Temperaturschwankungen in „größeren“ Tiefen nahezu zu unterbinden. Es stellt sich durchgehend ein Wert von $\sim -1,5$ °C ein.

Anzeichen von Permafrost sind zwar nur schwer daraus zu erkennen jedoch sind beim Gefrier- bzw. Auftauprozess diverse Indizien zu finden. Auffällig ist dabei der Vergleich der Dauer der beiden Prozesse. Nach dem Einbau der Messkette benötigte es nur einen Frostwechsel um durchgehend Temperaturen unter null zu erreichen obwohl bis Anfang Dezember die Lufttemperatur immer wieder klar positive Werte bis 5 °C vorweist. Auch die Schwankungsbreite von ~ 1 K, ab dem ersten Frostwechsel der Messperiode, in 3,5 m sowie 5 m ist sehr gering. Die Temperaturzunahme (ab Mitte Mai) des Untergrundes benötigt hingegen klar positiver Werte über eine längere Zeitperiode (Mitte April bis Ende des Messzeitraumes). Aus infrastrukturellen Gründen (Stromversorgung, Zugänglichkeit des Bohrlochs) wurde, wie oben schon erwähnt am 22. Juli 2015, um die alte Messkonstruktion aus dem Bohrloch zu entfernen, ein Heizband eingesetzt, welches die weiteren Messergebnisse unbrauchbar machte.

Die Temperaturen von $-1,5$ °C zeigen, dass Permafrost im Bereich des Bohrlochs als warm einzustufen wäre, wobei jedoch bedingt durch die kurze Messdauer, dem möglichen Einfluss von eindringender Luft von außen, sowie dem möglichen Eindringen von Schmelzwasser in das Bohrloch noch große Unsicherheiten bestehen. Um diesen externen Einfluss und somit eine Verfälschung der Daten zu unterbinden, wurde bei der neuen Konstruktion das Loch mit witterungsbeständiger Karrosseriedichtmasse versiegelt.

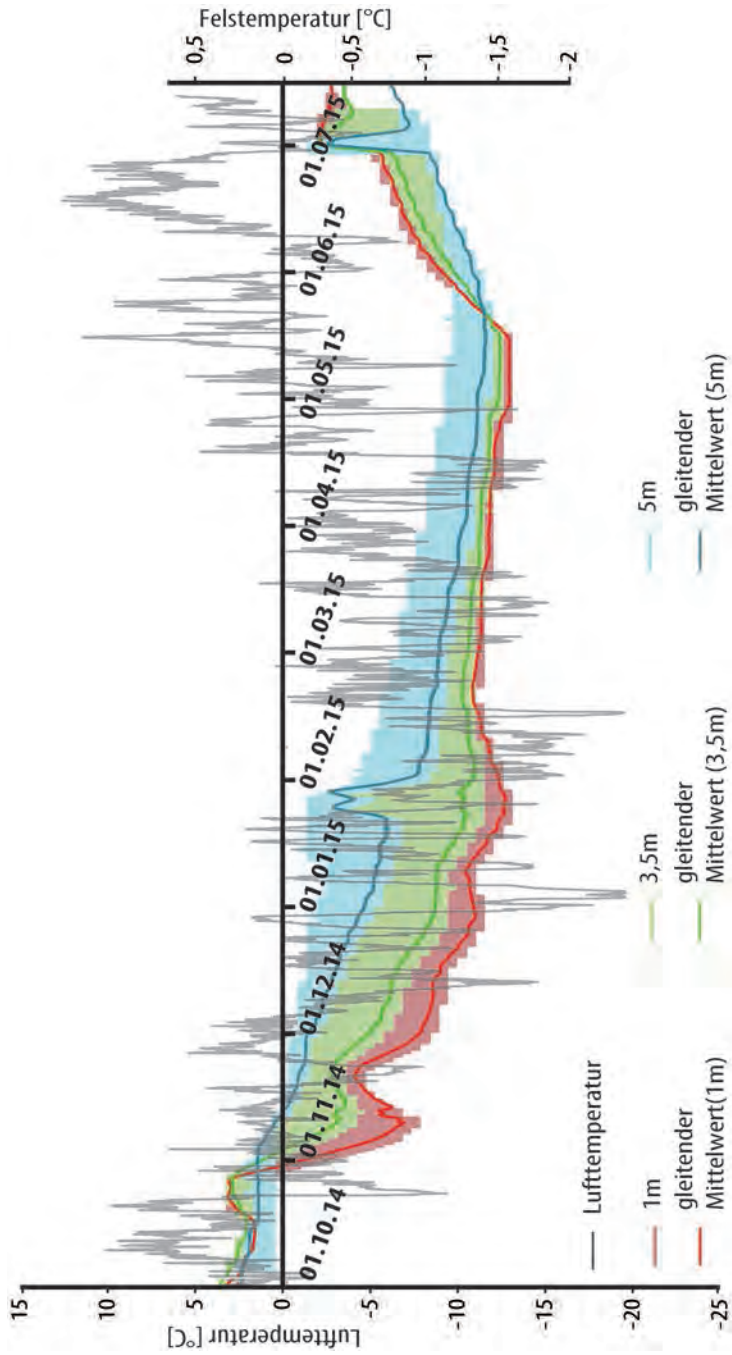


Abb. 4: Erste Ergebnisse vom GTN-P Bohrloch am Koppenkarstein zwischen Oktober 2014 und Juli 2015. Die Lufttemperaturdaten stammen von einer automatischen Wetterstation, welche nahe dem Schladminger Gletscher durch das Institut für Geographie und Raumforschung betrieben wird (AWS in Abb. 1).

Fig. 4: First results from the GTN-P borehole at the Koppenkarstein between October 2014 and July 2015. The depicted air temperature data are from an automatic weather station (AWS) north of the Schladminger glacier as indicated in Fig. 1.

Wie Eingangs schon erwähnt können angesichts des kurzen Messzeitraumes und der oben angesprochenen Einflüsse keine klaren Aussagen bezüglich Permafrost getroffen werden können. Eine längere Messreihe, welche nun mit der neuen Messkette erzielt werden sollte, dürften diese Unsicherheiten aus dem Weg räumen und kann somit einen noch wertvolleren Beitrag zum globalen GTN-P Netzwerk liefern.

Dank

Die Forschungstätigkeiten zu Permafrost und periglazialen Prozessen am Dachstein werden zum einen durch den Fonds zur Wissenschaftlichen Förderung in Österreich (FWF) im Rahmen des Projektes ROCKING ALPS (Rockfall and Weathering in the Eastern Alps; Projekt Nr. FWF: P24244) und zum anderen durch das Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz finanziert. Den Dachstein Gletscherbahnen sei für die logistische Unterstützung sehr gedankt. Unser weiterer Dank gilt Oliver SASS, Johannes STANGL, Eric RASCHER, Reinhold SCHÖNGRUNDNER, Patrick ZINNER, Georg TUPPINGER, Andreas SCHAFFER und Christian FINK. Schließlich bedanken wir uns noch beim Begutachter dieses Beitrages für seine konstruktiven Anmerkungen.

Literatur

- BISKABORN, B.K., LANCKMAN, J.P., LANTUIT, H., ELGER, K., STRELETSKIY, D.A., CABLE, W.L. & ROMANOVSKY, V.E. (2015): The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). – *Earth System Science Data*, 7: 245-259.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2014): Permafrost. – In: STOWASSER, R. & KÖHLER, M. (Hrsg.): *Global Climate Observing System – Bericht Österreich*. – 58-59, Eigenverlag Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.
- LIEB, G. & SCHOPPER, A. (1991): Zur Verbreitung von Permafrost am Dachstein (Nördliche Kalkalpen, Steiermark). – *Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*, 121: 149-163.
- RÖDE, 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.

VAN EVERDINGEN, R. (1998): Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology, Boulder, CO, USA. (updated 2005, <https://nsidc.org/fgdc/glossary/>).

Anschrift der Verfasser:

Harald Schnepfleitner, Andreas Kellerer-Pirklbauer & Matthias Rode
Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, Arbeits-
gruppe Alpine Landschaftsdynamik (ALADYN), Heinrichstraße 36, 8010 Graz
harald.schnepfleitner@uni-graz.at, andreas.kellerer@uni-graz.at,
matthias.rode@uni-graz.at

20 Years of Geodetic Monitoring of Dösen Rock Glacier (Ankogel Group, Austria): A Short Review

20 Jahre geodätischer Beobachtung am Dösener Blockgletscher (Ankogelgruppe, Österreich): Ein kurzer Überblick

Viktor KAUFMANN

3 Figures

Abstract: This paper gives a condensed account of the geodetic measurements carried out at Dösen rock glacier during the last 20 years (1995–2015). The measurements were taken on an annual basis in order to determine the mean annual flow velocity of the rock glacier. The long-term monitoring program was interrupted only once, i. e. in 2003. The geodetic network comprises 107 observation points located on the rock glacier (34 of which have been stabilized with brass bolts) and 17 stable reference points situated in the vicinity of the rock glacier. In 2014 traditional surveying using a total station was replaced by satellite-based surveying (real-time kinematic - global navigation satellite systems, RTK-GNSS). The flow velocities obtained reveal very well the kinematic behaviour of Dösen rock glacier over the course of time and are an excellent basis for subsequent climate change studies. The mean annual flow velocity of the 11 fastest points varied between 22.0 and 53.6 cm/a during the observation period. The highest flow velocities (up to 65.9 cm/a) were recorded for 2014–2015, confirming the ongoing speed-up of this rock glacier.

Zusammenfassung: Dieser Aufsatz gibt einen kurzen Überblick über die geodätischen Messungen, welche am Dösener Blockgletscher im Zeitraum 1995–2015, also über einen Zeitraum von 20 Jahren hinweg, getätigt wurden. Aus den jährlichen Messungen konnten mittlere jährliche Fließgeschwindigkeiten des Blockgletschers abgeleitet werden. Im Jahr 2003 wurde jedoch keine Wiederholungsmessung durchgeführt. Das geodätische Beobachtungsnetz umfasst 107 Beobachtungspunkte am Blockgletscher, wovon 34 Punkte mit Messingbolzen stabilisiert sind, und 17 stabile, unbewegte

Referenzpunkte im Außenbereich des Blockgletschers. Im Jahr 2014 wurde das traditionelle Messverfahren unter Verwendung einer Totalstation durch die satellitengestützte Echtzeit-Positionierung (RTK-GNSS) abgelöst. Die ermittelten Fließgeschwindigkeiten beschreiben sehr gut die Kinematik des Dösener Blockgletschers und sind eine ausgezeichnete Datengrundlage für weiterführende Studien zur Klimaänderung. Die mittlere jährliche Fließgeschwindigkeit der 11 schnellsten Blockgletscherpunkte variierte zwischen 22.0 und 53.6 cm/Jahr. Für den jüngsten Beobachtungszeitraum 2014–2015 wurden die höchsten Fließgeschwindigkeiten (bis zu 65.9 cm/Jahr) in allen Messpunkten seit Messbeginn festgestellt; dies bestätigt die in den letzten Jahren bereits festgestellte Beschleunigung des Blockgletschers.

Key Words: Rock glacier; Geodetic monitoring; Flow velocity; RTK-GNSS; Dösen Valley.

Schlüsselworte: Blockgletscher; Geodätisches Monitoring; Fließgeschwindigkeit; RTK-GNSS; Dösental.

1. Introduction

Dösen rock glacier (46°59'12" N, 13°17'08" E) is located in the Ankogel Group (Hohe Tauern Range, Carinthia, Austria). With an area of 28.8 ha this rock glacier is one of the largest in the Austrian Alps. It is situated at the head of Dösen Valley stretching from 2650 m to 2339 m a.s.l. (Fig. 1). The tongue-shaped rock glacier is approximately 950 m long and 300 m wide and was formed during a period of several thousand years as revealed by relative dating approaches (KELLERER-PIRKLBAUER 2008). Surface features, such as furrows and ridges, and a steep frontal slope are visual expressions of surface deformation and inherent creep. See computer animations prepared by KAUFMANN (2015a). Creep/flow direction is from east to west. Dösen rock glacier is indexed as *mo 238* in the rock glacier inventory of the eastern European Alps (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2012).

Scientific investigations at Dösen rock glacier started under the leadership of Gerhard Karl LIEB (Department of Geography and Regional Science, University of Graz) in the early 1990s (LIEB 1996, 1998). The former Institute of Applied Geodesy and Photogrammetry, Graz University of Technology, was responsible for determining the rock glacier's kinematic state and subsequently setting up a geodetic long-term monitoring program (KAUFMANN 1996, 1998, 2015b). Over the last 20 years (1995–2015) several projects have been carried out to support this ambitious program (KIENAST & KAUFMANN 2004). A large number of persons, i. e. colleagues, guests from abroad, students, volunteers and others, actively contributed to this program, either in the field or at the desk.

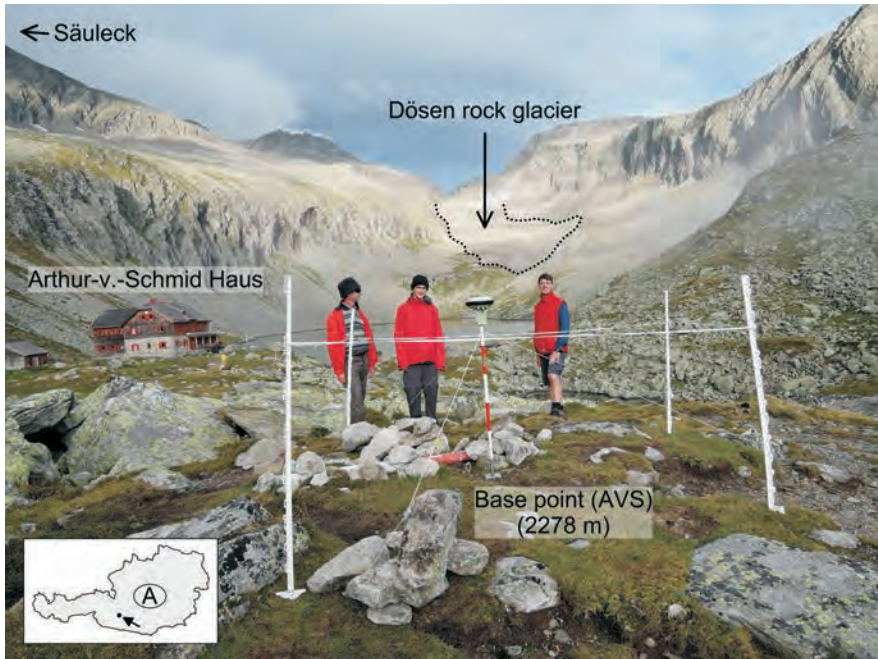


Fig. 1: Terrestrial view of Dösen rock glacier. The foreground shows the GNSS base station used for satellite-based surveying. The station is marked by a fence (white color). Photograph taken 18. August 2015.

Abb. 1: Dösener Blockgletscher im Talschluss. Im Vordergrund sieht man die mit einem provisorischen Zaun gesicherte GNSS-Basisstation für die relative Satellitenpositionierung. Photo vom 18. August 2015.

2. Methods

The movement of a rock glacier can be detected and quantified by different means, such as geodetic surveys using a total station or GPS/GNSS-based relative positioning, terrestrial and aerial photogrammetry, terrestrial or airborne laser scanning and satellite-based SAR interferometry (KÄÄB 2005).

Our measurement methods at Dösen rock glacier included not only in-situ geodetic surveys, which have been referred to previously, but also aerial photogrammetry (KAUFMANN & LADSTÄDTER 2002; KAUFMANN & KELLERER-PIRKLBAUER 2015) and satellite-based SAR interferometry (KENYI & KAUFMANN 2003). The latter two methods are powerful remote measurement techniques for area-wide mapping of surface parameters, such as flow velocity or surface height change. In this paper, however, we focus on the geodetic surveys.

2.1. Geodetic surveys using a total station

In 1995 a geodetic network consisting of observation points (in total 107) on rocks of the glacier surface presumed to be moving and stable reference points (in total 11) positioned in the surroundings of the rock glacier was set up (KAUFMANN 1996). Since that time, geodetic measurements have been carried out on an annual basis, with the exception of 2003, when measurements were interrupted due to a shortage of funds. In 2006 and 2013 the network of stable reference points was expanded with an additional 6 points in lower-lying areas for easier access. The set of observation points on the rock glacier consists of 34 points stabilized with brass bolts and 73 supplemental points marked with red colour forming two longitudinal and two transversal profiles. In 2014 this traditional surveying method was replaced by satellite-based surveying. Geodetic surveys using a total station are highly accurate and productive in terms of measured points per hour. Such surveys however, require experienced operators (at the instrument) and several helpers for carrying the equipment and for in-situ positioning of the geodetic reflectors. In 2013 a comparative study was carried out on Dösen rock glacier to confirm that state-of-the-art satellite-based surveying, i. e. real-time kinematic (RTK) technique, can deliver positions with an accuracy in the centimetre range (± 1 to 3 cm), which allows to compute annual flow velocities with an accuracy of a few centimetres. Since the flow velocity of Dösen rock glacier (up to 0.5 m/a on average) is in the intermediate range in relation to other monitored rock glaciers in Austria, the relative accuracy of the annual flow velocities obtained is in the range of several percent, which is sufficient to support, for instance, climate change studies.

2.2. Geodetic surveys using RTK-GNSS

Since 2014 geodetic surveys have been carried out using RTK-GNSS only. In order to support the ease of measurement we use a triangulation point (named AVS, see Figure 1) located in the vicinity of the Arthur-v.-Schmid Haus refuge as a local reference point for setup of the GNSS base station and 3 dedicated stable points (M1 to M3; M1 and M2 are located next to Arthur-v.-Schmid Haus, and M3 is close to the rock glacier next to the walking trail) for quality control of the RTK-GNSS setup. Because of potential shadowing of the satellite signals and multipath effects, both GPS and GLONASS must be available simultaneously to assure accurate point positioning within a short period of time. If the weather is fine and the surface of the rock glacier is dry, all 34 observation points can be measured within one work day. The measurement of the additional four profiles would require another full day of work in the field. As a result of these time factors and also financial constraints we were obliged to abandon the annual measurement of the four profiles.

3. Results

Based on the annual geodetic measurements, three-dimensional displacement vectors can be computed. These vectors serve as a basis for further analysis and visualization. For example, the mean annual horizontal flow/creep velocity can be computed for each observation point. Observed acceleration or deceleration of the movement is highly indicative of environmental changes, e. g. atmospheric warming or cooling. In figure 2 the multi-annual horizontal movement (1995–2015) of the 34 observation points of Dösen rock glacier is depicted. A good approach is to spatially average concordant velocities in order to derive mean values. Their temporal change (revealing acceleration/deceleration) can be best visualized in a graph (Fig. 3). Furthermore, strain parameters can get computed by means of stringent deformation analysis or estimates for permafrost degradation (ice melt) were deduced (KAUFMANN 1998). Such an estimate is quite ambitious and needs additional information, e. g. a rheological model.

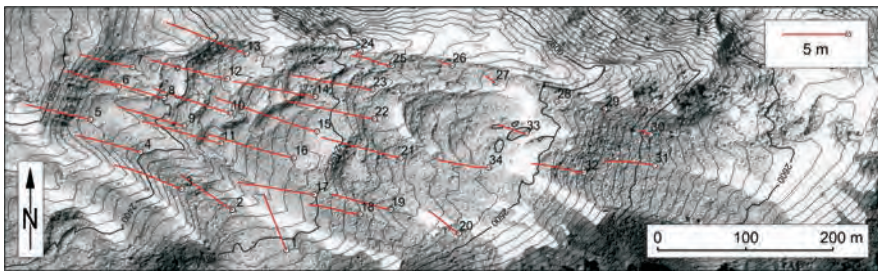


Fig. 2: Multi-annual movement (1995–2015) of the 34 observation points at Dösen rock glacier. The horizontal movement (tracks shown in red colour) is exaggerated by a factor of 15. Highest flow velocities were always measured at point 15.

Abb. 2: Bewegungsspur der 34 am Döserer Blockgletscher gemessene Beobachtungspunkte für den Zeitraum 1995–2015 (rote Linien). Die Bewegungen sind mit einem Skalierungsfaktor von 15 gestreckt. Die größten Fließgeschwindigkeiten wurden jeweils im Punkt 15 in allen Epochen gemessen.

4. Discussion and Outlook

Figure 3 reveals that the flow velocity of Dösen rock glacier has changed significantly over time. There are periods of acceleration and deceleration leading to higher or lower flow velocities. A possible explanation for this behaviour is given in KELLERER-PIRKLBAUER & KAUFMANN (2012) revealing synchronous velocity changes for several rock glaciers in the Hohe Tauern Range attributed to climatic conditions. The most recent observation period (2014–2015) showed the highest flow velocities (up to 65.9 cm/a at point 15) ever measured at this rock glacier. The fastest point (15) has moved some 8.1 m in horizontal direction during the last 20 years.

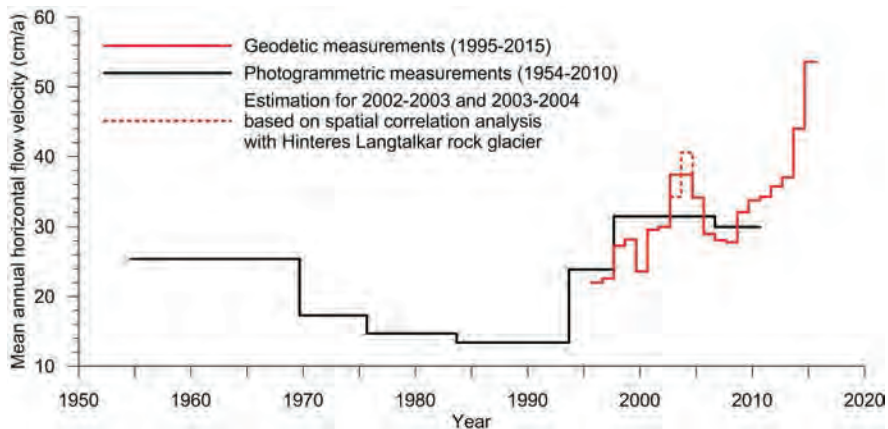


Fig. 3: Mean annual horizontal flow velocity of Dösen rock glacier for the time period 1995–2015 (red line). For reasons of comparison, photogrammetrically derived flow velocities are added for the time period 1954–2010 (black line). The velocities shown are mean values derived from 11 representative observation points (10–17, 21–23).

Abb. 3: Mittlere jährliche horizontale Fließgeschwindigkeit am Dösener Blockgletscher für den Zeitraum 1995–2015 (rote Linie). Für Vergleichszwecke sind auch die photogrammetrisch ermittelten Geschwindigkeiten für den Zeitraum 1954–2010 eingetragen (schwarze Linie). Alle Geschwindigkeiten sind Mittelwerte aus 11 repräsentativen Beobachtungspunkten (10–17, 21–23).

The observation period covered by the geodetic measurements was extended by photogrammetric analysis of aerial photographs dating back to the early 1950s (Figure 3), which showed the lowest flow velocities (down to 13.4 cm/a) for the time period from 1983 to 1993. Furthermore, it is worthwhile to note that rock glaciers not only in Austria but also in other European countries, e. g. Switzerland, France and Italy, seem to behave in a similar way from a kinematic point of view (DELALOYE et al. 2008). This phenomenon is still a hotly debated research question and good answers have not yet been given, although natural hazards might emerge from rock glacier movement changes (SCHOENEICH et al. 2015). From this point of view, continuation of the work is of great importance, at least by maintaining the existing annual observation plan. A future scenario for Dösen rock glacier would be to monitor its movement on a daily basis using freely deployable Web-based sensor nodes hosting, e. g. GNSS receivers, temperature loggers, and other sensors.

Acknowledgements

The author would like to thank in particular his colleagues Gerhard KIENAST, Walter KRÄMER, Richard LADSTÄDTER and Gernot HOLLINGER for their long-term support in the geodetic monitoring of Dösen rock glacier. Furthermore, the financial support of Hohe Tau-

ern National Park Carinthia and OeAV-Patenschaftsfonds Nationalpark Hohe Tauern is kindly acknowledged. Johann FLEISSNER-RIEGER of Arthur-v.-Schmid Haus is thanked heartily for great food and excellent service. The critical comments of Andreas KELLERER-PIRKLBAUER helped to improve an earlier version of this paper.

References

- DELALOYE, R., PERRUCHOU, E., AVIAN, M., KAUFMANN, V., BODIN, X., HAUSMANN, H., IKEDA, A., KÄÄB, A., KELLERER-PIRKLBAUER, A., KRAINER, K., LAMBIEL, C., MIHAJLOVIC, D., STAUB, B., ROER, I. & THIBERT, E. (2008): Recent interannual variations of rockglaciers creep in the European Alps. – In: KANE, D.L. & HINKEL, K.M. (eds.): Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost (NICOP). – 343-348, University of Alaska, Fairbanks, USA.
- KAUFMANN, V. (1996): Der Dösen Blockgletscher - Studienkarten und Bewegungsmessungen. – Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung, 33: 141-162.
- KAUFMANN, V. (1998): Deformation analysis of the Doesen rock glacier (Austrian Alps, Europe). – In: LEWKOWICZ, A.G. & ALLARD, M. (eds.): Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost, Collection Nordicana, 55: 551-556, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec.
- KAUFMANN, V. (2015a): <http://www.geoimaging.tugraz.at/viktor.kaufmann/animations.html>. (Web page accessed 29 October 2015).
- KAUFMANN, V. (2015b): http://www.geoimaging.tugraz.at/viktor.kaufmann/Doesen_Rock_Glacier.html. (Web page accessed 29 October 2015).
- KAUFMANN, V. & KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2015): Active Rock Glaciers in a Changing Environment. Geomorphometric Quantification and Cartographic Presentation of Rock Glacier Surface Change with Examples from the Hohe Tauern Range, Austria. – In: KRIZ, K. (ed.): Mountain Cartography. 16 Years ICA Commission on Mountain Cartography (1999-2015). – Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, 21: 179-190.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R. (2002): Monitoring of active rock glaciers by means of digital photogrammetry. – Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium "Photogrammetric Computer Vision", Graz, Austria, IAPRS, 34(3B): 108-111.
- KÄÄB, A. (2005): Remote Sensing of Mountain Glaciers and Permafrost. – Schriftenreihe Physische Geographie, 48: 1-264.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2008): The Schmidt-Hammer as a Relative Age Dating Tool for Rock Glacier Surfaces: Examples from Northern and Central Europe. – In: KANE, D.L. & HINKEL, K.M. (eds.): Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost (NICOP), 913-918, University of Alaska, Fairbanks, USA.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. & KAUFMANN, V. (2012): About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria. – Austrian Journal of Earth Sciences, 105(2): 94-112.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., LIEB, G.K. & KLEINFERCHNER, H. (2012): A new rock glacier inventory of the eastern European Alps. – Austrian Journal of Earth Sciences, 105(2): 78-93.

- KENYI, L.W. & KAUFMANN, V. (2003): Estimation of Rock Glacier Surface Deformation Using SAR Interferometry Data. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(6): 1512-1515.
- KIENAST, G. & KAUFMANN, V. (2004): Geodetic measurements on glaciers and rock glaciers in the Hohe Tauern National Park (Austria). – In: Proceedings of the 4th ICA Mountain Cartography Workshop, Monografies tècniques, 8: 101-108, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona.
- LIEB, G.K. (1996): Permafrost und Blockgletscher in den östlichen österreichischen Alpen. – Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung, 33: 9-125.
- LIEB, G.K. (1998): High-mountain permafrost in the Austrian Alps. – In: LEWKOWICZ, A.G. & ALLARD, M. (eds.): Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost, Collection Nordica, 55: 663-668, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec.
- SCHOENEICH, P., BODIN, X., ECHELARD, T., KAUFMANN, V., KELLERER-PIRKLBAUER, A., KRYSIECKI, J.M. & LIEB, G.K. (2014): Velocity changes of rock glaciers and induced hazards. – In: LOLLINO, G., MANCONI, A., CLAGUE, J., SHAN, W. & CHIARLA, M. (eds.): Engineering Geology for Society and Territory. Volume 1. – 223-227, Springer International Publishing, Switzerland.

Author's address:

Viktor Kaufmann

Graz University of Technology, Institute of Geodesy, Working Group Remote Sensing and Photogrammetry, Steyrergasse 30, 8010 Graz

viktor.kaufmann@tugraz.at

Photogrammetrische Dokumentation der raumzeitlichen Veränderung von ausgewählten Blockgletschern in der Schobergruppe

Photogrammetric documentation of spatiotemporal changes of selected rock glaciers in the Schober Mountains, Austria

Thomas MIKL

4 Abbildungen

Zusammenfassung: Dieser Beitrag beschreibt die Erfassung der raumzeitlichen Veränderung von drei ausgewählten Blockgletschern (Hinteres Langtalkar, Leibnitzkopf und Weissenkar) in der Schobergruppe, Hohe Tauern, mithilfe von multitemporalen Luftbildern (2002, 2009 und 2012). Für diese Blockgletscher wurden die jährliche horizontale Fließgeschwindigkeit und die Höhenänderung der Blockgletscheroberfläche flächendeckend innerhalb eines Zeitintervalls (2009–2012 oder 2002–2012) bestimmt und in thematischen Karten visualisiert. Den Ergebnissen zufolge kann bei der Betrachtung eines Zeitintervalls von drei Jahren eine signifikante Fließgeschwindigkeit der Blockgletscheroberfläche größer als 22,5 cm/a [3σ] nachgewiesen werden.

Abstract: This paper describes the detection of spatiotemporal changes of three selected rock glaciers (Hinteres Langtal Cirque, Leibnitzkopf and Weissen Cirque) in the Schober Mountains, Hohe Tauern Range, using multi-temporal aerial photographs (2002, 2009 and 2012). The mean annual horizontal flow velocity of these rock glaciers and their surface height change within one time interval (2009–2012 or 2002–2012) were comprehensively determined and visualized in thematic maps. According to the results it is possible to prove a significant flow rate of the rock glacier surface greater than 22.5 cm/a [3σ] when considering a time interval of three years.

Schlüsselworte: Permafrost; Blockgletscher; Luftbildphotogrammetrie; Schobergruppe; Hinteres Langtalkar; Leibnitzkopf; Weissenkar.

Key Words: Permafrost; Rock glacier; Aerial photogrammetry; Schober Group; Hinteres Langtal Cirque; Leibnitzkopf; Weissen Cirque.

1. Einleitung

Blockgletscher sind Kriechphänomene des alpinen Permafrosts und treten in vielen Hochgebirgsregionen der Erde auf. Im aktiven Zustand bewegen sie sich mit einer Bewegungsrate von bis zu mehreren Metern im Jahr tal- oder hangabwärts. Blockgletscher reagieren bezüglich ihrer Kinematik auf Klimaveränderungen und können somit als Indikator für den Klimawandel angesehen werden (BARSCH 1996; KELLERER-PIRKLBAUER & KAUFMANN 2012).

Die derzeitigen Beobachtungsmethoden zu Erfassung der raumzeitlichen Veränderung lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: (1) Einzelpunktbestimmung und (2) Methoden aus der Fernerkundung (KAUFMANN & KELLERER-PIRKLBAUER 2015). Die Einzelpunktbestimmung kann mithilfe von GPS-Empfängern oder Totalstationen erfolgen. Ein Nachteil der Einzelpunktbestimmung ist, dass nur eine diskrete Menge von Messpunkten aufgenommen werden kann. Das komplexe Fließverhalten der Blockgletscher kann somit nur schwer beschrieben werden. Ein weiterer Nachteil dieser Messmethode ist die oft beschwerliche und aufwändige Durchführung im schwer zugänglichen Hochgebirge. Alternativen zur Einzelpunktbestimmung bilden die verschiedenen berührungslosen Methoden der Fernerkundung, wie z. B. die Luftbildphotogrammetrie. Mit diesen Methoden kann die Kinematik der Blockgletscher, ohne sie eben berühren zu müssen, flächendeckend erfasst werden.

2. Studiengebiet

Die drei ausgewählten Blockgletscher (Hinteres Langtalar, Leibnitzkopf und Weissenkar) befinden sich in der Schobergruppe, Hohe Tauern (Abb. 1). Die Kinematik der genannten Blockgletscher wird alljährlich mit geodätischen Messungen aufgenommen (KAUFMANN 2015). Zur Verifizierung der Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung wurden diese mit den geodätischen Ergebnissen verglichen.

3. Datengrundlage und Auswertung

Als Datengrundlage für die Quantifizierung und Visualisierung der raumzeitlichen Veränderung der Blockgletscheroberfläche wurden für die schnell fließenden Blockgletscher (Hinteres Langtalar und Leibnitzkopf) Luftbilder aus den Epochen 2009 und

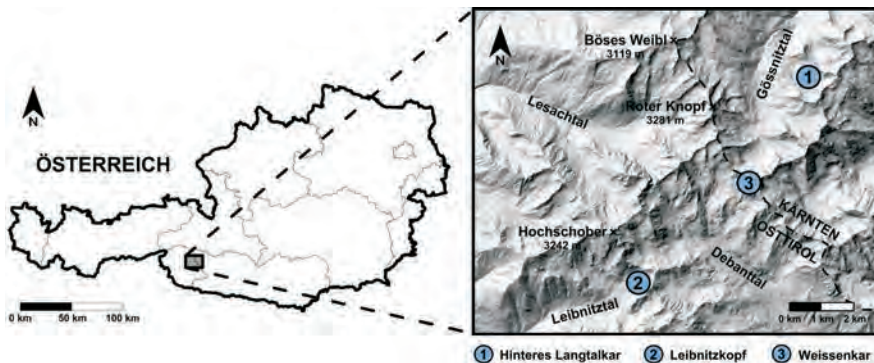


Abb. 1: Lage der drei ausgewählten Blockgletscher in Österreich und in der der Schobergruppe. Hillshade abgeleitet aus einem digitalen Geländemodell (DGM) mit einer Auflösung von 10×10 m (Quelle: Kärntner Geoinformationssystem/KAGIS und Tiroler Rauminformationssystem/TIRIS 2014).

Fig. 1: Location of the three selected rock glaciers in Austria and the Schober Mountains. Hillshade is based on a digital elevation model (DEM) with a spatial resolution of 10×10 m (Source: KAGIS and TIRIS 2014).

2012 herangezogen, für den langsam fließenden Blockgletscher (Weissenkar) Luftbilder aus den Epochen 2002 und 2012. Die Luftbilder wurden von KAGIS (Kärntner Geoinformationssystem) und TIRIS (Tiroler Rauminformationssystem) bezogen.

Die Erfassung der raumzeitlichen Veränderung wurde in zwei Schritten durchgeführt: (1) Berechnung der horizontalen Fließgeschwindigkeit und (2) Berechnung der Höhenänderung der Blockgletscheroberfläche. Für die Umsetzung werden Orthophotos und digitale Geländemodelle in zwei Epochen benötigt. Im Zuge des Langzeitbeobachtungsprogramms des Instituts für Geodäsie an der Technischen Universität Graz wurden mit den analogen Luftbilder der Epochen 2002 und 2009 bereits digitale Geländemodelle mit einer Auflösung von $2,5 \times 2,5$ m und Orthophotos mit einer Bodenauflösung (ground sampling distance) von 20 cm für die drei Blockgletscher erzeugt (KAUFMANN et al. 2006; FILWARNY & WISIOL 2012).

Für die lagegenaue Auswertung der digitalen Luftbilder aus der Epoche 2012 wurde ihre Orientierung mithilfe der mitgelieferten Kalibrierungsparameter und Orientierungsparameter vom BEV (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen) hergestellt. Auf Grundlage von Stereomodellen mit den orientierten Luftbildern konnten digitale Geländemodelle mit einer Auflösung von $2,5 \times 2,5$ m erstellt und in weiterer Folge Orthophotos mit einer Bodenauflösung (ground sampling distance) von 20 cm für die Epoche 2012 erzeugt werden. Diese Vorgangsweise hat den Vorteil, dass sich das digitale Geländemodell und die Luftbilder für die Orthophotoerstellung auf den gleichen Zeitpunkt beziehen.

Die Bestimmung der horizontalen Fließbewegung erfolgte schließlich mithilfe eines Matching-Verfahrens unter Verwendung der normalisierten zweidimensionalen Kreuzkorrelation. Bei dieser Methode werden homologe Punkte in zwei Orthophotos von unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten detektiert. Durch Differenzbildung konnten die mittleren jährlichen horizontalen Verschiebungsvektoren zwischen den Epochen bestimmt werden. Ein diesbezügliches Programm wurde mit der Software Matlab entwickelt (KAUFMANN & KELLERER-PIRKLBAUER 2015).

4. Ergebnisse

Im Zuge der photogrammetrischen Auswertung wurden für die drei Blockgletscher die horizontale Fließbewegung und die Höhenänderung der Blockgletscheroberfläche bestimmt. Exemplarisch werden in weiterer Folge die Ergebnisse vom Blockgletscher Hinteres Langtalkar präsentiert.

4.1. Fließgeschwindigkeit

Für die flächige Darstellung der Fließgeschwindigkeit wurden die aus den Vektoren abgeleiteten Geschwindigkeiten auf ein regelmäßiges Raster linear interpoliert und mit Isotachen dargestellt (Abb. 2). Die Genauigkeit der horizontalen Fließgeschwindigkeit wurde aus den Messergebnissen stabiler Gebiete abgeleitet. Für den Blockgletscher Hinteres Langtalkar wurde ein Wert von $\pm 7,5$ cm/a erreicht. Maximale Geschwindigkeiten von bis zu 4 m/a wurden zwischen 2009 und 2012 im unteren Bereich des Blockgletschers festgestellt.

4.2. Höhenänderung

Die Berechnung der Höhenänderung der Blockgletscheroberfläche erfolgte durch Differenzbildung der multitemporalen digitalen Geländemodelle der verschiedenen Epochen. Die Visualisierung der Höhenänderung der Blockgletscheroberfläche wurde farbcodiert vorgenommen (Abb. 3). Die Genauigkeit der ermittelten Höhenänderung wurde aus stabilen Gebieten abgeleitet. Aufgrund der Aufnahmegeometrie der verwendeten Luftbilder konnte die vertikale Komponente nicht so genau bestimmt werden wie die horizontale. Für den Blockgletscher Hinteres Langtalkar konnten somit nur Höhenänderungen größer als 20 cm nachgewiesen werden. Ergebnisse zeigen hier für den Zeitraum von 2009 bis 2012 Höhenänderungen von zwischen +4,6 m bzw. -6,8 m im unteren Bereich des Blockgletschers.

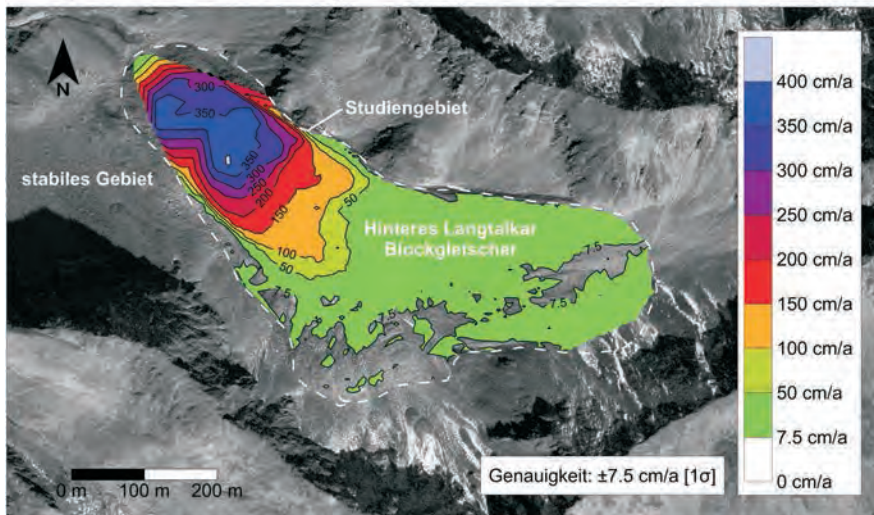


Abb. 2: Mittlere jährliche Fließgeschwindigkeit des Hinteren Langtalkar Blockgletschers zwischen 2009 und 2012. Orthophoto Epoche 1: 8. September 2009, RGB, GSD (ground sampling distance) 25 cm; Orthophoto Epoche 2: 28. August 2012, RGB, GSD (ground sampling distance) 20 cm; Zeitraum 1085 Tage (2,97 Jahre); Genauigkeit: $\pm 7,5$ cm/Jahr $[1\sigma]$. Im Hintergrund Orthophoto von 2012 (Quelle: KAGIS).

Fig. 2: Mean annual flow velocity of the Hinteres Langtal Cirque Rock Glacier between 2009 and 2012. Orthophotograph epoch 1: 8. September 2009, RGB, GSD (ground sampling distance) 25 cm; Orthophotograph epoch 2: 28. August 2012, RGB, GSD (ground sampling distance) 20 cm; time period 1085 days (2.97 years); accuracy : ± 7.5 cm/year $[1\sigma]$. In the background the orthophotograph of 2012 (Source: KAGIS).

5. Diskussion und Fazit

Die ermittelten Fließgeschwindigkeiten der untersuchten Blockgletscher wurden mit jährlichen geodätischen Messungen (KAUFMANN 2015) verglichen und sie stimmen mit ihnen im Bereich der erzielten Genauigkeit gut überein (Abb. 4). So wurde für den Zeitraum von 2009 bis 2012 für mehrere markierte Punkte im unteren Bereich des Hinteren Langtalkar Blockgletschers mithilfe der photogrammetrischen Auswertung von Luftbildern ein Wert von 2,51 m/a und mit den jährlichen geodätischen Messungen ein Mittelwert von 2,54 m/a erzielt.

Mit den Ergebnissen der photogrammetrischen Auswertung können folgende Schlussfolgerungen getroffen werden:

(1) Bei der Betrachtung eines Zeitintervalls von drei Jahren ist es möglich eine signifikante Fließgeschwindigkeit größer als 22,5 cm/a $[3\sigma]$ nachzuweisen. So konnte für die Blockgletscher Hinteres Langtalkar und Leibnitzkopf, welche im Zeitraum von 2009

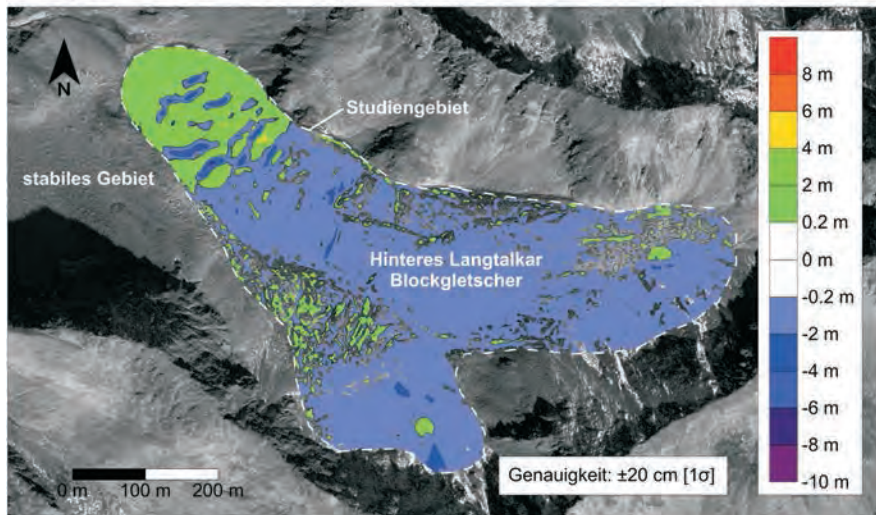


Abb. 3: Mittlere jährliche Höhenänderung der Blockgletscheroberfläche des Hinteren Langtalkar Blockgletschers zwischen 2009 und 2012. Digitale Geländemodelle: 8. September 2009 und 28. August 2012 Auflösung von $2,5 \times 2,5$ m; Zeitraum 1085 Tage (2,97 Jahre), Genauigkeit: ± 20 cm/Jahr [1σ]. Im Hintergrund Orthophoto von 2012 (Datengrundlage KAGIS).

Fig. 3: Mean annual surface elevation change of the Hinteres Langtal Cirque Rock Glacier between 2009 and 2012. Digital elevation models of 8. September 2009 and 28. August 2012); spatial resolution of 2.5×2.5 m; time period 1085 days (2.97 years); accuracy : ± 20 cm/year [1σ]. In the background the orthophotograph of 2012 (Source: KAGIS).

bis 2012 maximale Fließgeschwindigkeiten von mehreren m/a aufwiesen, die Kinematik signifikant bestimmt werden. Um die Fließgeschwindigkeit von langsam fließenden Blockgletschern, wie für den Blockgletscher Weissenkar, nachweisen zu können, muss ein längerer Zeitraum von 2002 bis 2012 untersucht werden. Mit dieser Vorgangsweise konnten für den genannten Blockgletscher mittlere Fließgeschwindigkeiten größer als 3 cm/a [3σ] signifikant detektiert werden.

(2) Wegen der beschränkten Genauigkeit der photogrammetrischen Auswertung können prozentuale Änderungen der Fließgeschwindigkeit nur für schnell fließende Blockgletscher (Hinteres Langtalkar und Leibnitzkopf) bestimmt werden.

(3) Aufgrund der Aufnahmegeometrie der verwendeten Luftbilder können nur signifikante Höhenänderungen der Blockgletscheroberfläche größer als 30 cm/a [3σ] ermittelt werden. Das Signifikanzniveau kann in Zukunft durch Verwendung hochauflösender multitemporaler digitaler Geländemodelle aus ALS-Daten (Airborne Laserscanning) verbessert werden.

Da es sich bei den Projektgebieten um schwer zugängliche alpine Regionen handelt, bietet die photogrammetrische Auswertung multitemporaler Luftbilder neben den

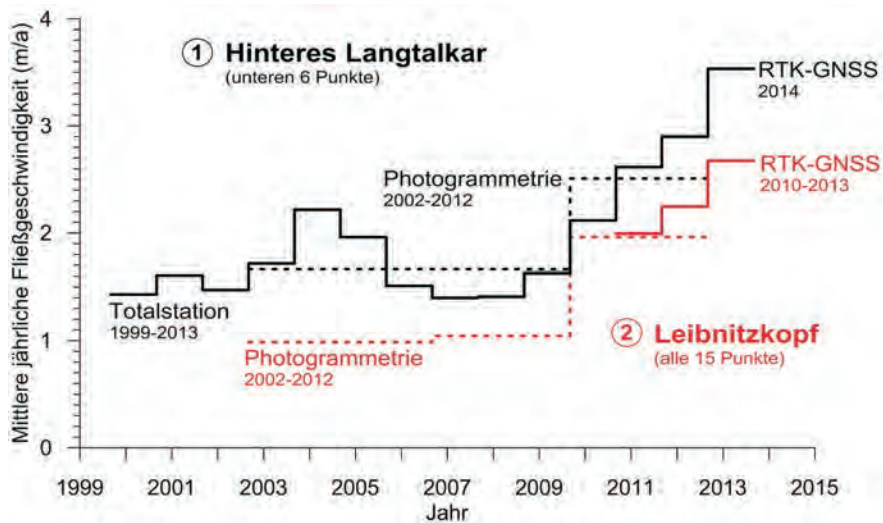


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der photogrammetrisch und geodätisch erfassten mittleren jährlichen Fließgeschwindigkeit markierter Punkte an der Oberfläche des Hinteres Langtalkar und des Leibnitzkopf Blockgletschers seit 1999 (basierend auf KAUFMANN 2015). Der Datenbestand wurde mit den photogrammetrischen Ergebnissen des Zeitintervalls von 2009 bis 2012 ergänzt.
 Fig. 4: Mean annual horizontal flow velocities of Hinteres Langtal Cirque and Leibnitzkopf rock glaciers since 1999 based on selected observation points using geodetical and photogrammetrically derived data (based on KAUFMANN 2015). The photogrammetrically derived data presented in this study covering the period 2009-2012 have been complemented.

geodätischen Messungen eine effiziente Möglichkeit, um die raumzeitliche Veränderung von aktiven Blockgletschern zu quantifizieren und in weiterer Folge zu visualisieren.

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.
- FILWARNY, J.O. & WISJOL, K. (2012): Quantifizierung der Oberflächendeformation von aktiven Blockgletschern in Osttirol durch photogrammetrische Zeitreihenanalyse. – Unveröffentlichte Bakkalaureatsarbeit, 49 S., Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, Graz.

- KAUFMANN, V. (2015): Blockgletschermonitoring Nationalpark Hohe Tauern 2013-2014. – Unveröffentlichter Endbericht, 43 S., Institut für Geodäsie, Arbeitsgruppe für Fernerkundung und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, Graz.
- KAUFMANN, V. & KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2015): Active Rock Glaciers in a Changing Environment. Geomorphometric Quantification and Cartographic Presentation of Rock Glacier Surface Change with Examples from the Hohe Tauern Range, Austria. – In: KRIZ, K. (ed.): Mountain Cartography. 16 Years ICA Commission on Mountain Cartography (1999-2015). – Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, 21: 179-190.
- KAUFMANN, V., LADSTÄDTER, R. & LIEB, G.K. (2006): Quantitative assessment of the creep process of Weissenkar rock glacier (Central Alps, Austria). – Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung, 41: 77-86.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. & KAUFMANN, V. (2012): About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria. – Austrian Journal of Earth Sciences, 105(2): 94-112.

Anschrift des Verfassers:

Thomas Mikl

Technische Universität Graz, Institut für Geodäsie, Arbeitsgruppe für Fernerkundung und Photogrammetrie, Steyrergasse 30, 8010 Graz

mikl@student.tugraz.at

Inventarisierung von blockgletscherverdächtigen Formen und deren hydrologischen Einzugsgebieten in den steirischen Niederen Tauern mit Hilfe von hochaufgelösten Geländemodellen

Inventorying rock glacier-suspected landforms and their hydrological catchments in the Styrian part of the Niedere Tauern Range using high-resolution digital elevation models

Andreas KELLERER-PIRKLBAUER, Thomas WAGNER & Gerfried WINKLER

4 Abbildungen und 1 Tabelle

Zusammenfassung: Blockgletscher sind weitverbreitete Landschaftselemente im Hochgebirge, die als wichtige Grundwasserspeicher vor allem in kristallinen Gebieten angesehen werden können. In diesem Beitrag wird die Inventarisierung von 561 blockgletscherverdächtigen Formen und ihren hydrologischen Einzugsgebieten in einem 2440 km² großen Gebiet in der Steiermark beschrieben. Das Arbeitsgebiet umfasst die vier Teilgebiete Schladminger Tauern, Wölzer Tauern, Rottenmanner Tauern und Seckauer Tauern. Als wichtigste Kartierungsgrundlage dienten hochaufgelöste Geländemodelle (1 m Rasterauflösung) abgeleitet aus Airborne Laserscanning (ALS) Daten. Ergebnisse zeigen, dass Blockgletscher 31 km² des Untersuchungsgebietes bedecken. Rund 150 km² umfassen die dazugehörigen hydrologischen Einzugsgebiete. 27 % der Fläche über 2000 m ü.A. in den steirischen Niederen Tauern werden von Blockgletschern und ihren hydrologischen Einzugsgebieten beeinflusst. Im Teilarbeitsgebiet Seckauer Tauern liegt dieser Wert sogar bei 51 % was auf die große Bedeutung von tiefer liegenden Blockgletschern in dieser östlichsten Untergruppe der Niederen Tauern hinweist.

Abstract: Rock glaciers are widespread landforms in high mountain areas acting as important aquifers particularly in crystalline mountain regions. This contribution discusses the inventorying of 561 rock glacier-suspected landforms (i. e. rock glaciers and protalus ramparts) and their hydrological catchments in a 2440 km² large study area in Styria.

The study area consists of the Styrian part of the Niedere Tauern Range with its four subunits Schladminger Tauern Range, Wölzer Tauern Range, Rottenmanner Tauern Range and Seckauer Tauern Range. The most important basis for the inventorying process was a digital terrain model with a resolution of 1 m based on airborne laser scanning (ALS) data. Results show that some 31 km² of the study area are covered by rock glacier-suspected landforms. 150 km² of the study area belong to hydrological catchments of rock glacier-suspected landforms. 27 % of all areas above 2000 m a.s.l. in the Styrian part of the Niedere Tauern Range are hydrologically influenced by rock glacier-suspected landforms and their catchments. In the subunit Seckauer Tauern Rang this value increases to 51 % highlighting the importance of low-elevated rock glaciers in the eastern-most subunit of the Niedere Tauern Range.

Schlüsselworte: Niedere Tauern; Steiermark; Blockgletscher; Hydrologische Einzugsgebiete; Hydrogeologie.

Key Words: Niedere Tauern Range; Styria; Rock glacier; Hydrological catchment; Hydrogeology.

1. Einleitung

Blockgletscher bilden auffallende periglaziale Landschaftsformen in den höheren Zonen vieler Hochgebirge der Erde. Aktive Blockgletscher sind an Permafrost (d.h. Dauerfrostboden mit einer saisonalen geringmächtigen Auftauchschicht) gebunden und kriechen gravitativ langsam talwärts, wobei die jährlichen Bewegungsraten im Dezimeter- bis Meterbereich liegen. Bedingt durch klimatische Veränderungen können Blockgletscher ihre Bewegungsgeschwindigkeit erhöhen oder labil werden und somit in weiterer Folge zur Naturgefahr werden (SCHOENEICH et al. 2014). Die Verbreitung dieser Formen wurde vielerorts im Rahmen von Inventarisierungen erfasst, wie beispielsweise für die italienischen Alpen durch GUGLIELMIN & SMIRAGLIA (1998) oder für die spanischen Pyrenäen durch CHUECA (1992). Eine Erwärmung des Klimas kann ein Ansteigen der Permafrostuntergrenze bewirken, wodurch aktive Blockgletscher zuerst klimatisch inaktiv (weit verbreiteter Permafrost, jedoch keine Bewegung), in weiterer Folge pseudoreliktsch (sporadisch bis inselhafter Permafrost; keine Bewegung, z.T. auch Baumbewuchs) und schließlich reliktsch (kein Permafrost, keine Bewegung, weitreichend mit Vegetation bedeckt) werden können. Reliktische Formen sind nicht immer einfach als solche im Gelände zu erkennen, da sie von dichter Vegetation bedeckt sein können (BARSCH 1996; KELLERER-PIRKLBAUER 2008).

Das erste Blockgletscherinventar für weite Teile Österreichs wurde durch LIEB (1996) veröffentlicht. In diesem ersten Inventar wurde jedoch nicht die Abgrenzung der Blockgletscher durch Polygone erfasst, sondern nur die zentrale Koordinate als Punkt.

Vor wenigen Jahren erfolgte die Veröffentlichung von zwei Polygon-basierten Blockgletscherinventaren; eines für Zentral- und Ostösterreich (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2012) und eines für Tirol (KRAINER & Ribis 2012). Auf Basis des Inventars von LIEB et al. (2010) wurde für ein 2440 km² großes Gebiet der Steiermark (steirischer Anteil der Niederen Tauern) ein Blockgletschereinzugsgebietsinventar erstellt (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2013), welches – wie die Blockgletscher selbst – händisch ausgewiesen wurde. Ermöglicht durch die Verfügbarkeit von neueren, hochaufgelösten Geländemodellen (1 × 1 m Raster; Basis Airborne Laser Scanning/ALS Daten zur Verfügung gestellt vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung; vgl. WINKLER et al. 2016) wurde ein neues Blockgletscherinventar (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2014), sowie darauf aufbauend ein Blockgletschereinzugsgebietsinventar (WAGNER et al. 2014) für den steirischen Anteil der Niederen Tauern generiert. Ergebnisse daraus werden in diesem Beitrag dargestellt.

2. Arbeitsgebiet

Das Arbeitsgebiet mit einer Flächenausdehnung von 2440 km² umfasst den steirischen Anteil der Niederen Tauern mit den zentralen und östlichen Schladminger Tauern (ScT) sowie den Wölzer (WoT), Rottenmanner (RoT) und Seckauer Tauern (SeT) (Abb. 1). Rund die Hälfte der Gesamtfläche liegt über 1500 m ü.A. und 11 % über 2000 m ü.A. Der höchste Gipfel ist der Hochgolling mit 2862 m ü.A. Geologisch gesehen ist das Untersuchungsgebiet vorwiegend aus den zwei kristallinen Grundgebirgseinheiten des Oberostalpins (Silvretta-Seckau und Koralpe-Wölz Deckensysteme) und den darüber liegenden mesozoischen Deckschichten aufgebaut, welche primär aus unterschiedlichen Typen von Gneisen und Glimmerschiefern bestehen. Im nördlichen Bereich des Untersuchungsgebiets bilden die Gesteine der Grauwackenzone die hangendste Gesteinseinheit (z. B. GASSER et al. 2009).

3. Datengrundlage und Methodik

Das bestehende Polygon-basierte Blockgletscherinventar von Ost- und Zentralösterreich von LIEB et al. (2010) diente als Grundlage für die Erstellung des neuen Blockgletscherinventars. Bildeten die damaligen Datengrundlagen bei LIEB et al. (2010) noch ein 10 × 10 m Geländemodell, so konnte das neue Blockgletscherinventar auf hochaufgelöste ALS-Daten (1 m Raster) zurückgreifen. Basierend auf den deutlichen räumlichen Auflösungsunterschied (10 m vs. 1 m) sowie der technischen Möglichkeit der ALS-Datenaufnahme die Vegetationsschicht zu durchdringen und somit die für die Blockgletscherabgrenzung „störende“ Vegetation (Bäume, Sträucher) auszublenden, konnte eine

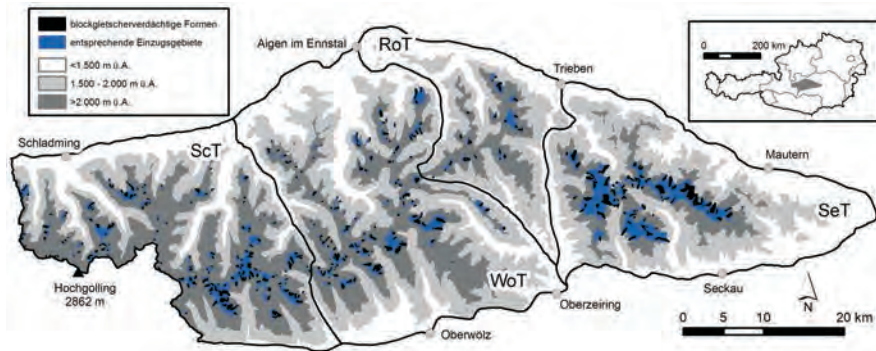


Abb. 1: Das 2440 km² große Arbeitsgebiet der steirischen Niederen Tauern mit den vier Untergruppen ScT (Schladminger Tauern), WoT (Wölzer Tauern), RoT (Rottenmanner Tauern) und SeT (Seckauer Tauern). Ausgewählte Ortschaften und der höchste Gipfel im Arbeitsgebiet (Hochgolling) sind zur Orientierung eingezeichnet. Die flächenhafte Verbreitung der kartierten blockgletscherverdächtigen Formen (n = 561; KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2014) und deren hydrologische Einzugsgebiete (WAGNER et al. 2014) ist in der Karte verortet.

Fig. 1: The 2440 km² large study area in the Styrian part of the Niedere Tauern Range with its four sub-units ScT (Schladminger Tauern Range), WoT (Wölzer Tauern Range), RoT (Rottenmanner Tauern Range) and SeT (Seckauer Tauern Range). Selected settlements and the highest mountain peak in the study area (Hochgolling) are indicated for orientation. The spatial distributions of rock glaciers (n = 561; KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2014) and respective catchments (WAGNER et al. 2014) are depicted.

wesentliche Verbesserung des Blockgletscherinventars und in weiterer Folge des Einzugsgebietsinventars erzielt werden (Abb. 2). Neben klar erkennbaren Blockgletschern wurden auch Initialformen (embryonale Blockgletscher bzw. *protalus ramparts*; BAL-LANTYNE & KIRKBRIDGE 1986) im Inventar miterfasst. Die Abgrenzung der Blockgletscher erfolgte manuell in ArcGIS (Version 10.0) auf Basis von Schummerungsdarstellungen (mit unterschiedlichen Azimut der Beleuchtung), abgeleitet aus dem 1 m Geländemodell, wobei morphologische Gegebenheiten (z. B. Stirn, Wülste) für die Abgrenzung herangezogen wurden. Die Blockgletschereinzugsgebiete wurden auf Basis des 1 m Geländemodells sowie der Ausdehnung der kartierten Blockgletscher in ArcGIS ermittelt, indem für jedes Pixel die Fließrichtung bestimmt wurde und ausgehend von den Blockgletscherflächen selbst jeder zufließende Punkt dem Einzugsgebiet zugerechnet wurde.

In einem nächsten Schritt wurden zahlreiche Attribute (wie Länge, Breite, etc.) für jeden Blockgletscher (26 Attribute) bzw. jedes Blockgletschereinzugsgebiet (18 Attribute) ermittelt. Diese Attribute beziehen sich im Wesentlichen auf Codierung, Name, Bezug zu früherem Inventar (LIEB et al. 2010), Raumlage, Geometrie, Aktivitätsgrad, Komplexität der Blockgletscherform, Angaben zu Quellen oder Länge der hydrologischen Fließstrecken. Diese Attribute wurden für weitere Auswertungen herangezogen; nur ein Auszug aus diesen Auswertungen wird in diesem Beitrag präsentiert.

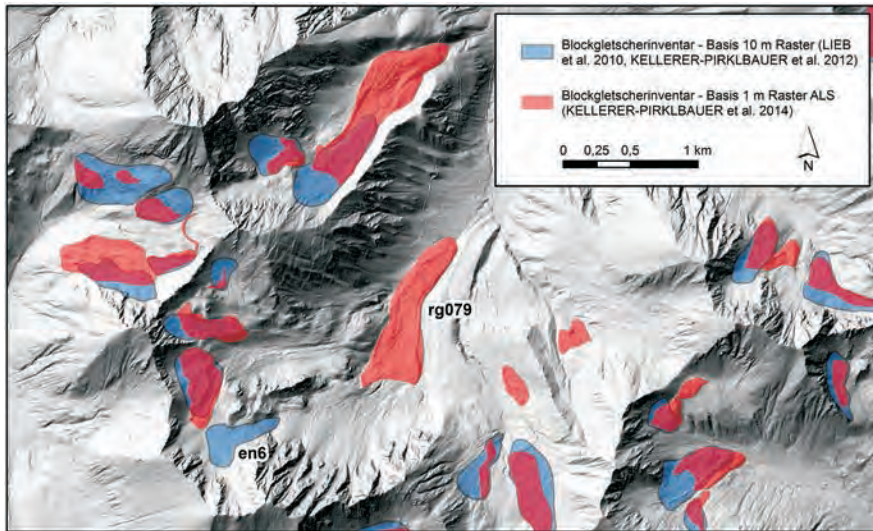


Abb. 2: Unterschiede in der Ausweisung von Blockgletschern auf Basis divergierender Datengrundlagen (photogrammetrisch erstellte Geländemodelle mit 10 m Auflösung versus Laserscanning-basierte Geländemodelle mit 1 m Auflösung). Tief liegende Formen in bewaldeten Arealen (z. B. rg079) konnten nunmehr durch die vorhandenen ALS-Daten mit 1 m Rasterauflösung erfasst werden. Früher erfasste Blockgletscher (z. B. en6) wurden nicht immer als solche bestätigt.

Fig. 2: Differences in the delineation of rock glaciers based on divergent digital elevation models/DEMs (photogrammetrically-derived with 10 m resolution versus laserscanning-derived with 1 m resolution). Low elevated rock glaciers in forested areas (e. g. rg079) were now detected and included in the inventory based on the used ALS data which penetrate through the forest layer to the ground surface. In contrast, suspected rock glaciers which were mapped in the earlier inventory (e. g. en6) were not always confirmed as such in the new inventorying process.

4. Blockgletscherinventar

Das neue Blockgletscherinventar umfasst 561 blockgletscherverdächtige Formen, von denen 89 als embryonale Blockgletscher und 472 als eigentliche Blockgletscher klassifiziert wurden (Abb. 1). In Summe bedecken sie 31,3 km² bzw. 1,3 % der Gesamtfläche (Tab. 1). Die meisten Blockgletscher finden sich in den ScT, die meisten embryonalen Blockgletscher in den WoT (Abb. 3a). Im Vergleich dazu erfassten LIEB et al. (2010) nur 376 Blockgletscher im gegenständlichen Untersuchungsgebiet. Von den 561 kartierten Blockgletscher sind 7 als intakt (aktuell noch mit Permafrost) und 554 als reliktsch klassifiziert worden. Alle intakten Blockgletscher befinden sich in der Untergruppe ScT. Die meisten blockgletscherverdächtigen Formen finden sich im Teilgebiet ScT (220), die wenigsten in den RoT (27) und die im Durchschnitt größten und längsten vorwiegend in den SeT. Unter den 10 längsten sind 8 in den SeT zu finden und 2 in den WoT. 85 % aller Formen sind monomorph, d.h. sie sind relativ einfach aufge-

baut mit einer klar abgrenzbaren Blockgletschergeneration. 78 % weisen eine Zungenform auf (Länge > Breite) und 80 % haben sich primär aus Hangschuttablagerungen gebildet. Den höchsten Anteil von Blockgletscherflächen an der Gesamtfläche bzw. der Flächen über 1500 m ü.A. findet man im Teiluntersuchungsgebiet SeT (Abb. 3b, Tab. 1).

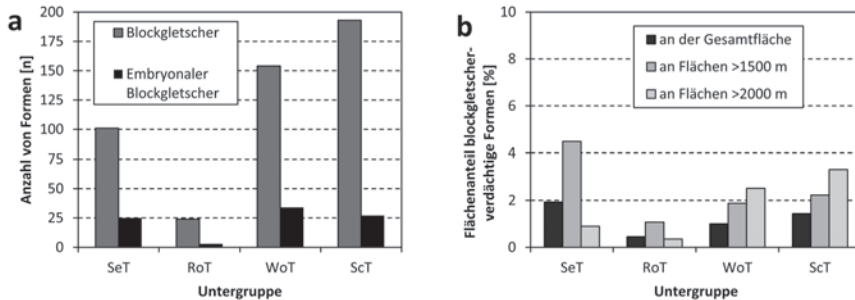


Abb. 3: Ergebnisse aus dem Blockgletscherinventar: (a) Anzahl von Blockgletschern und embryonalen Blockgletschern in den Teilgebieten; (b) Flächenanteile von blockgletscherverdächtigen Formen an der Gesamtfläche sowie Flächen über 1500 m bzw. 2000 m ü.A. in den Teilgebieten. Fig. 3: Results of the rock glacier inventory: (a) numbers of rock glaciers and protalus ramparts in the four different subunits; (b) percentage of rock glacier covered areas based on the total area, the area above 1500 m a.s.l., and, respectively, the area above 2000 m a.s.l. of the individual subunit.

Gebirgsgruppe	Anzahl	Gesamtfläche		Fläche >1500 m ü.A.		Fläche >2000 m ü.A.	
	[n]	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]
blockgletscherverdächtige Form							
SeT/Seckauer Tauern	126	12,1	1,9	11,7	4,5	0,4	0,9
RoT/Rottenmanner Tauern	27	1,5	0,5	1,5	1,1	0,1	0,4
WoT/Wölzer Tauern	188	8,2	1,0	8,0	1,9	1,6	2,5
ScT/Schladminger Tauern	220	9,5	1,4	9,5	2,2	5,2	3,3
<i>Steirische Niedere Tauern</i>	<i>561</i>	<i>31,3</i>	<i>1,3</i>	<i>30,7</i>	<i>2,5</i>	<i>7,1</i>	<i>2,6</i>
hydrologische Einzugsgebiete der blockgletscherverdächtigen Formen							
Seckauer Tauern	126	57,7	9,2	57,0	21,8	20,6	51,2
Rottenmanner Tauern	27	7,7	2,4	7,7	5,6	3,5	21,2
Wölzer Tauern	188	36,9	4,5	36,2	8,5	14,5	23,4
Schladminger Tauern	220	46,6	7,0	46,6	10,9	35,4	22,7
<i>Steirische Niedere Tauern</i>	<i>561</i>	<i>149,0</i>	<i>6,1</i>	<i>147,6</i>	<i>11,8</i>	<i>74,0</i>	<i>27,0</i>

Tab. 1: Anzahl und Flächen der blockgletscherverdächtigen Formen und ihren Einzugsgebieten in den steirischen Niederen Tauern aufgeschlüsselt auf die einzelnen Teiluntersuchungsgebiete und Höhenbereiche.

Tab. 1: Number and extent of rock glacier-suspected landforms and their catchments in the four subunits and the entire study area. For each of the four subunits and the entire study area the three distinctions total area, the area above 1500 m a.s.l., and the area above 2000 m a.s.l. were made.

5. Inventar von Blockgletschereinzugsgebieten

Die hydrologischen Einzugsgebiete wurden automatisiert in ArcGIS ermittelt und umfassen die Einzugsgebietsfläche des tiefsten Punktes der Stirn (tw. mit Quelle) einer blockgletscherverdächtigen Form. Die hydrologischen Einzugsgebiete schließen somit auch die blockgletscherverdächtigen Formen mit ein. Ihre Gesamtfläche in den steirischen Niederen Tauern beträgt mit 149 km² 6,1 % der Gesamtfläche (Tab. 1). Dieser Flächenanteil ist deutlich höher als jener basierend auf dem älteren Blockgletscherinventar, worin 295 Blockgletschereinzugsgebiete eine Fläche von 108 km² umfassten (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2013). Die um 41 km² deutliche größere Gesamtfläche lässt sich vor allem durch die Erfassung von tiefliegenden Blockgletschern (z. B. Abb. 2, Bildmitte) erklären, die früher – bedingt durch Waldbewuchs – bei der manuellen Kartierung nicht erfasst werden konnten. Hydrologische Einzugsgebiete von blockgletscherverdächtige Formen sind vor allem im Teiluntersuchungsgebiet SeT von großer Bedeutung.

Werden im neuen Einzugsgebietsinventar nur die Bereiche über einer Seehöhe von 1500 m ü.A. betrachtet, steigt der Anteil von 6,1 % auf fast 12 %; bei Gebieten von über 2000 m ü.A. sind es sogar 27 %. Im Vergleich dazu waren es im früheren Blockgletschereinzugsgebietsinventar nur 23 % der Gebiete über 2000 m, die als Blockgletschereinzugsgebiete ausgewiesen wurden. Betrachtet man nur das Teilgebiet SeT, so sind im neuen Inventar 51,2 % der Flächen über 2000 m ü.A. von Blockgletschern und ihren Einzugsgebieten beeinflusst (Abb. 4a, Tab. 1). Das Blockgletschereinzugsgebiet ist flächenmäßig durchschnittlich 5-mal größer als die blockgletscherverdächtige Form selbst. In Abbildung 4b ist das Flächenverhältnis der Blockgletscher zu deren Einzugsgebieten dargestellt. In extremen Fällen kann das Blockgletschereinzugsgebiet rund 60-mal größer sein, was dadurch zu erklären ist, dass kleine embryonale Blockgletscher relativ große Einzugsgebiete aufweisen können.

6. Fazit

Die Bedeutung von räumlich hochaufgelösten, vegetationsdurchdringenden Höhenmodellen zur Bestimmung und Ausweisung von Landschaftsformen, wie beispielsweise Blockgletscher, als wesentliche Landschaftselemente im steirischen Anteil der Niederen Tauern wird hier verdeutlicht. Mit Hilfe der ALS-Daten konnten sowohl tiefer liegende Blockgletscherformen, die aufgrund des hohen Vegetationsbewuchses (Wald) bisher nicht identifizierbar waren, sowie Blockgletscherinitialformen (*protalus rampart*) erfasst werden. Des Weiteren wurden zum Teil aber auch Landschaftsformen als Blockgletscherform nicht bestätigt, die im früheren Inventar als Blockgletscher ausgewiesen waren. In Summe überwog der Zugewinn von neuen blockgletscherverdächtigen Formen. Die nunmehr 561 kartierten Formen mit ihren hydrologischen Einzugsgebieten

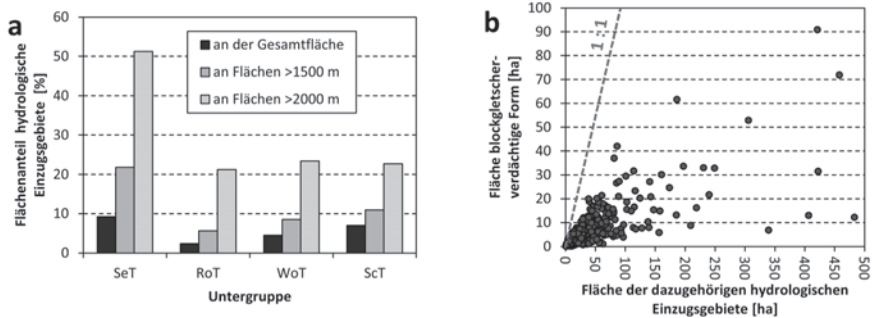


Abb. 4: Ergebnisse aus dem Blockgletschereinzugsgebietsinventar: (a) Flächenanteile von hydrologischen Blockgletschereinzugsgebieten an der Gesamtfläche sowie an Flächen über 1500 m bzw. 2000 m ü.A. in den Teilgebieten; (b) Flächenverhältnis der blockgletscherverdächtigen Form zu dessen Einzugsgebiet. Die strichlierte Linie markiert jenen Bereich, wo die Blockgletscherfläche gleich der Einzugsgebietsfläche ist.

Fig. 4: Results of the rock glacier catchment inventory: (a) percentage of hydrological catchments based on the total area, the area above 1500 m a.s.l., and the area above 2000 m a.s.l. of the individual subunit, respectively; (b) ratio between area of rock glacier-suspected landform and area of respective catchment. The dashed line marks the division where the area of the rock glacier-suspected landform equals the area of the respective catchment.

umfassen rund 6 % der Gesamtfläche der steirischen Niederen Tauern. Deutlich höher liegt dieser Wert mit 12 % für die Höhenzone über 1500 m ü.A. In einem Teilgebiet (SeT) sowie in diesem Gebiet in Höhen von über 2000 m ü.A. wurde sogar ein Wert von über 50 % ermittelt. Diese hier ausgewiesenen Prozentsätze deuten auf die hydrologische Relevanz der Blockgletscher und deren Einzugsgebieten in den betrachteten Gebieten hin.

Dank

Die Erstellung der beiden hier dargestellten Inventare wurde im Rahmen des Projektes „Grundwasserspeicherung und Entwässerungsdynamik reliktscher Blockgletscher“ durchgeführt, welches durch das Amt der Steirischen Landesregierung sowie dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) finanziert wurde. Ingomar FRITZ ist für die Begutachtung des Beitrages herzlich gedankt.

Literatur

- BALLANTYNE, C.K. & KIRKBRIDGE, M.P. (1986): The Characteristics and significance of some lateglacial proglacial ramparts in upland Britain. – *Earth Surfaces Processes and Landforms*, 11: 659-671.
- BARSCHE, D. (1996): *Rock Glaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments*. – Springer Series in Physical Environment, 16, 331 S., Springer Verlag, Berlin.
- CHUECA, J. (1992): A statistical analysis of the spatial distribution of rock glaciers, Spanish Central Pyrenees. – *Permafrost and Periglacial Processes*, 3: 261-265.
- GASSER, D., GUSTERHUBER, J., KRISCHE, O., PUHR, B., SCHEUCHER, L., WAGNER T., & STÜWE K. (2009): *Geology of Styria: An Overview*. – *Mitteilungen des Naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*, 139: 5-36.
- GUGLIELMIN, M. & SMIRAGLIA, C. (1998): The rock glacier inventory of the Italian Alps. – In: LEWKOWICZ, A.G. & ALLARD M. (Hrsg.): *Proceedings of the 7th International Permafrost Conference, Collection Nordicana*, 55: 375-382,, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec.
- 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., LIEB, G.K. & KLEINFERCHNER, H. (2012): A new rock glacier inventory in the eastern European Alps. – *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2): 78-93.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., PAURITSCH, M. & WINKLER, S. (2013): Relict rock glaciers as important aquifers in sensitive ecosystems: The example of the Natura 2000 protection area Niedere Tauern Range, Styria. – In: BAUCH, K. (Hrsg.): *5th Symposium for Research in Protected Areas*. – 373-378, Conference Volume, Salzburger Nationalparkfonds, Mittersill.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., WAGNER, T. & WINKLER, G. (2014): *Blockgletscherinventar der Steirischen Niederen Tauern*. – Unpublizierter digitaler Datensatz, Institut für Erdwissenschaften und Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.
- KRAINER, K. & RIBIS, M. (2012): A Rock Glacier Inventory of the Tyrolean Alps (Austria). – *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2): 32-47.
- LIEB, G.K. (1996): *Permafrost und Blockgletscher in den östlichen österreichischen Alpen*. – Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Karl-Franzens-Universität Graz, 33: 9-125.
- LIEB, G.K., KELLERER-PIRKLBAUER, A. & KLEINFERCHNER, H. (2010): *Rock glacier inventory of Central and Eastern Austria elaborated within the PermaNET project*. – Unpublizierter digitaler Datensatz, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.
- SCHOENEICH, P., BODIN, X., ECHELARD, T., KAUFMANN, V., KELLERER-PIRKLBAUER, A., KRYSIECKI, J.M. & LIEB, G.K. (2014): Velocity changes of rock glaciers and induced hazards. – In: LOLLINO, G., MANCONI, A., CLAGUE, J., SHAN, W. & CHIARLA, M. (eds.): *Engineering Geology for Society and Territory. Volume 1*. – 223-227, Springer International Publishing, Switzerland.
- WAGNER, T., KELLERER-PIRKLBAUER, A. & WINKLER, G. (2014): *Blockgletschereinzugsgebietsinventar der Steirischen Niederen Tauern*. – Unpublizierter digitaler Datensatz, Institut für Erdwissenschaften und Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.

WINKLER, G., PAURITSCH, M., WAGNER, T. & KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2016): Grundwasserspeicherung und Entwässerungsdynamik reliktscher Blockgletscher. – Berichte der wasserwirtschaftlichen Planung, 86: 1-134.

Anschrift der Verfasser:

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

Thomas Wagner & Gerfried Winkler

Karl-Franzens-Universität Graz, NAWI Graz Geozentrum, Institut für Erdwissenschaften, Arbeitsgruppe für Hydrogeologie, Heinrichstraße 26, 8010 Graz

thomas.wagner@uni-graz.at, gerfried.winkler@uni-graz.at

Was kommt nach dem Permafrost? Bedeutung reliktscher Blockgletscher für das Abflussverhalten alpiner Einzugsgebiete

What will occur after permafrost? Relevance of relict rock glaciers for the discharge behaviour of alpine catchments

Gerfried WINKLER, Thomas WAGNER, Marcus PAURITSCH & Andreas KELLERER-PIRKLBAUER

3 Abbildungen und 1 Tabelle

Zusammenfassung: Reliktische Blockgletscher, also Blockgletscher die aktuell keinen Permafrost mehr beinhalten, sind weitverbreitet im österreichischen Alpenraum und stellen Grundwasserspeicher in alpinen Regionen dar. An der Quelle des reliktschen Schöneben-Blockgletschers in den Seckauer Tauern, Steiermark, wurden mit Hilfe von Quellschüttungsdaten sowie natürlichen und künstlichen Tracerdaten die Entwässerungsdynamik und das Speicherverhalten einer solchen Landschaftsform näher untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass der Grundwasserkörper im Blockgletscher und somit der Abfluss über die Quelle des reliktschen Schöneben-Blockgletschers eine schnelle Abflusskomponente (Verweilzeit von einigen Stunden bis wenigen Tage) und eine langsame Abflusskomponente (Verweilzeit von mehreren Monaten) aufweist. Mit Hilfe von geophysikalischen Untersuchungen (Refraktionsseismik) wurde zusätzlich der Aufbau des Blockgletschers untersucht. Der reliktsche Blockgletscher ist durch eine ca. 10–15 m mächtige feinkörnige Schicht (feinsandig, schluffig) an der Basis und darüber durch eine mehrere Zehnermeter mächtige, grobkörnige Sedimentschicht (Sand bis Blöcke) aufgebaut, welche von einer mehreren Meter mächtigen grobblockigen Deckschicht (Blöcke bis ca. 2 m Durchmesser) überlagert wird. Des Weiteren konnte mit Hilfe eines einfachen Niederschlag-Abflussmodells auf Tagesbasis gezeigt werden, dass der Anteil des Abflusses, der aus den hydrologischen Einzugsgebieten von reliktschen Blockgletschern kommt, in den unterstromigen Gewässern temporär deutlich (mehr als das Vierfache) über dem rein flächenmäßig für das Einzugsgebiet berechneten Abflussanteil liegt. Dies zeigt die Bedeutung dieser Landschaftsformen für das Abflussverhalten in alpinen Einzugsgebieten und ihre wasserwirtschaftliche Bedeutung.

Abstract: Relict rock glaciers which contain no permafrost at present are widespread landforms in the Austrian Alps representing groundwater storages. At the spring of the relict Schöneben Rock Glacier in the Seckauer Tauern Range, Styria, the discharge dynamics and the storage capacity of such a landform was investigated using discharge data and natural and artificial tracer data. The analyses reveal that the discharge of this relict rock glacier aquifer comprises a fast flow component (with a retention time of several hours to a few days) and a base flow component (with a retention time of several months). Based on additional surface geophysical investigations (seismic refraction) the internal structure of this landform was investigated. The relict rock glacier is built up by an approximately 10–15 m thick fine grained base layer (fine sand, silt) and coarse grained main layer (sand to blocks) with a thickness up to several tens of meters. This layer is finally covered by a coarse blocky layer (blocks with a diameter up to 2 m) with a thickness up to several meters. In addition a simple rainfall-runoff model was applied showing that the contribution of the discharge draining the rock glacier catchments is temporally much higher (more than four times) than its areal share. This highlights the importance of these landforms for the flow behaviour of alpine catchments and for the water resources management.

Schlüsselwörter: Reliktischer Blockgletscher; Entwässerungsdynamik; Speicherkapazität; Alpines Einzugsgebiet; Niedere Tauern.

Key Words: Relict rock glacier; Flow dynamics; Storage capacity; Alpine catchment; Niedere Tauern Range.

1. Einleitung

Alpine Regionen sind geprägt durch periglaziale Landschaftsformen wie Blockgletscher, die Indikatoren von Gebirgspermafrost beeinflussten Gebieten darstellen. Aktive Blockgletscher sind gefrorene Schutt- und Eismassen, die sich gravitativ talwärts bewegen und bei geeigneten topographischen Bedingungen stauchungsbedingte, charakteristische wulstartige Erscheinungsformen aufweisen (z. B. BARSCH 1996; HAEBERLI et al. 2006). Ein Klimawandel-bedingtes Ansteigen der alpinen Permafrostuntergrenze führt zum Schmelzen des Eises in aktiven Blockgletschern, wodurch diese zuerst inaktiv (noch Permafrost vorhanden, jedoch keine Bewegung) und schließlich reliktsch (permafrostfrei, Bewuchs) werden können (BARSCH 1996; KELLERER-PIRKLBAUER 2008). Mehr als 1700 reliktsche Blockgletscher wurden in Tirol ausgewiesen (KRAINER & RIBIS 2012). Etwa 1300 kartierte man in Zentral- und Ostösterreich (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2012), wovon 554 in den steirischen Niederen Tauern liegen (z. B. WINKLER et al. 2016a).

Veränderungen im Permafrost haben einen wesentlichen Einfluss auf den hydrologischen Kreislauf alpiner Einzugsgebiete, da die Entwässerung in diesen Regionen

größtenteils vom Abschmelzen des Eises und Schnees dominiert wird (z. B. BARNETT et al. 2005). Reliktische Blockgletscher als Lockersedimentakkumulationen in alpinen Einzugsgebieten ohne Permafrost stellen potentielle Grundwasserkörper dar. Ziel dieses Beitrags ist es, die in jüngster Zeit gewonnenen Erkenntnisse zur Entwässerungsdynamik und dem Speicherverhalten dieser Landschaftsformen und ihre Auswirkungen auf unterstromige Oberflächengerinne zusammengefasst darzulegen.

2. Untersuchungsgebiet

Das diesbezügliche Untersuchungsgebiet ist das Schönebenkar, welches nordnordwestlich des Hochreichharts in den Seckauer Tauern (östlichstes Teilgebiet der steirischen Niederen Tauern) liegt. In diesem Kar befindet sich der reliktsche Schöneben-Blockgletscher (SRG) mit einer Gesamtfläche von 0,17 km².

Beschreibung	Zeitraum	Parameter/Details	Standorte
Monitoring - meteorologische Station (1820 m ü.A.)	Nov. 2011-laufend	AT, AH, P, WD, WV, GR, RB	S-AWS
Monitoring - zusätzliche AT/AH-Station (1909 m ü.A.)	Nov. 2011-laufend	AT, AH	S-ATH
Monitoring - Schneedeckendynamik	Mai 2012-laufend	automatisches Kamerasystem	S-RDC
Refraktionsseismische Messungen am Blockgletscher	Juli 2013	Hammerschlag- und Sprengseismik, 3 Profile	RS-P2, RS-P6, RS-P8
Monitoring der Blockgletscherquelle (1720 m ü.A.)	Sept. 2008-laufend	WT, EC, Q	SEQ
Wasserprobenahme (Quell- und Niederschlagswasser) für Isotopenuntersuchungen	Sept. 2011-Sept. 2014	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	SEQ, SEN bei S-AWS
Markierungsversuche	Juni 2009-Mai 2010, Juni 2012-Dez. 2013	Tracer 2009: Uranin, Naphtionat Tracer 2012: Uranin, Eosin und Sulfo-rhodamin B (2012)	T-IP1, T-IP2, T-IP3, SEQ, PLB, PLQ

Tab. 1: Auflistung und Beschreibung der durchgeführten Geländearbeiten und des Monitorings am Schöneben-Blockgletscher. Lufttemperatur (AT), Luftfeuchte (AH), Niederschlag (P), Windrichtung (WD), Windgeschwindigkeit (WV), Globalstrahlung (GR) und Strahlungsbilanz (RB), Wassertemperatur (WT), elektrische Leitfähigkeit des Wassers (EC), Schüttungsmenge der Quelle (Q). Lage der Messstandorte sind Abb. 1 zu entnehmen.

Tab. 1: List and description of the applied field work and monitoring at the Schöneben Rock Glacier. Air temperature (AT), air humidity (AH), precipitation (P), wind direction (WD), wind velocity (WV), global radiation (GR) and net radiation (RB), water temperature (WT), electrical conductivity of the water (EC), discharge of the spring (Q). Locations of the monitoring stations are shown in Fig. 1.

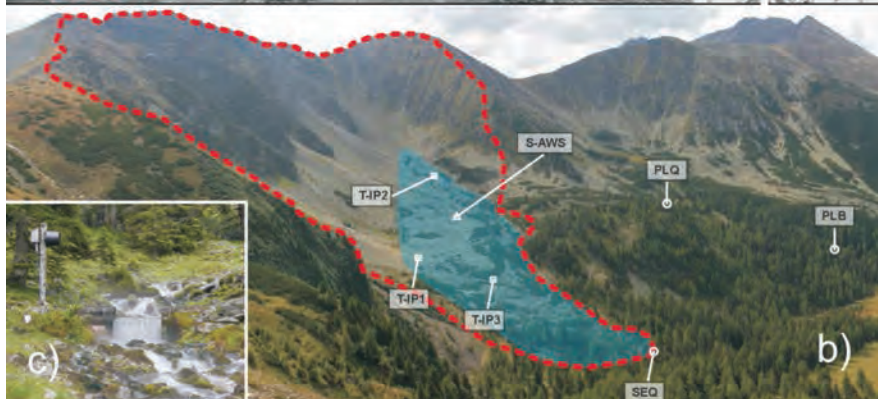
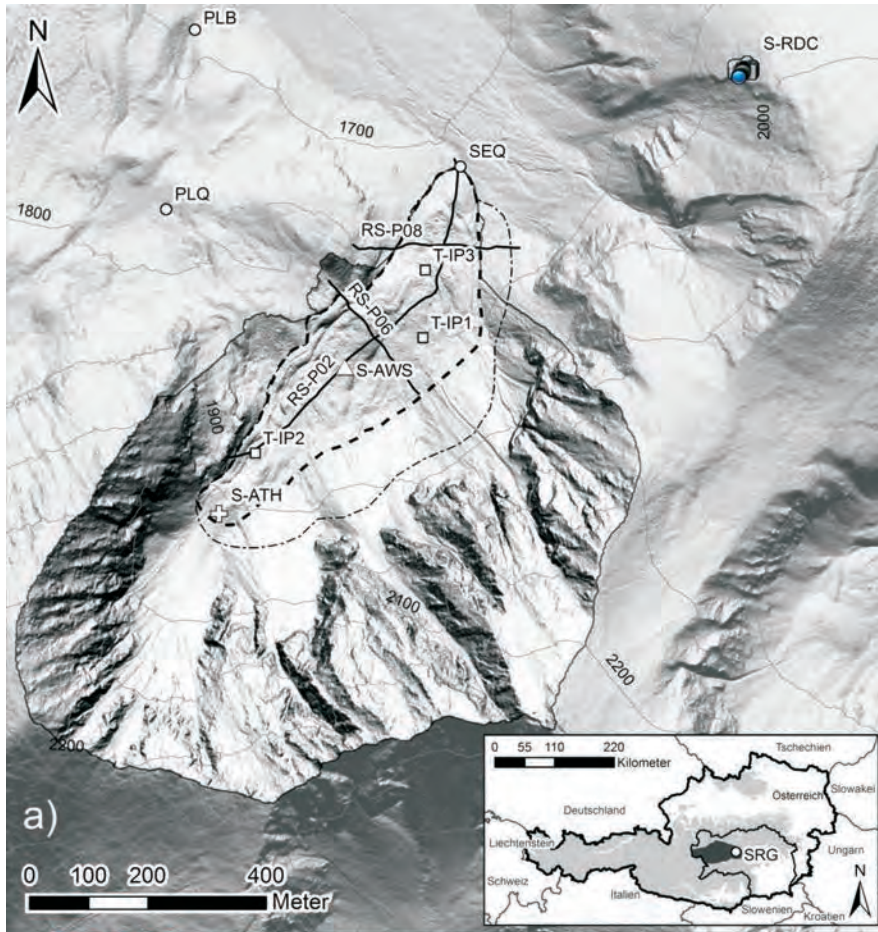


Abb. 1: a) Karte des reliktschen Schöneben-Blockgletschers (SRG) inklusive der Messinstrumentierung und dem dazugehörigen orographischen Einzugsgebiet der Schönebenquelle (SEQ), basierend auf einem Höhenmodell mit einer Auflösung von 1 m resultierend aus Airborne-Laser-scan Daten (modifiziert nach WINKLER et al. 2016a). Dicke, strichlierte Linie: Oberflächenausdehnung des SRG; dünne, strichpunktete Linie: eine mögliche Erweiterung unter die Schuttfächer im Südosten; RS-PO2, RS-PO6 und RS-PO8 und die dazu gehörigen Linien: Refraktionsseismikprofile. Rechtecke: Tracer-Einspeisungspunkte (T-IP1, T-IP2 und T-IP3); Dreieck: meteorologische Station (S-AWS); Kreuz: Lufttemperatur und Luftfeuchte Messstation (S-ATH); Kamerasymbol: digitale Kamera (S-RDC); Kreise: Quellen (SEQ: Schönebenquelle, PLQ: Postlleitenquelle) und Probenahmepunkt (PLB: Postlleitenbach). Die regionale Lage ist in der eingefügten Österreichkarte dargestellt in der das dunkelgraue Polygon die Ausbreitung des steirischen Anteils der Niederen Tauern (NiT) darstellt. b) Foto auf das orographische Einzugsgebiet (rote, strichlierte Linie) des reliktschen Schöneben-Blockgletschers (blau eingefärbte Fläche). c) Pegelmessstation SEQ, welche ca. 40 m unterhalb des Quellaustritts installiert wurde.

Fig. 1: a) Map delineating the relict Schöneben Rock Glacier (SRG), the monitoring stations and the hydrological catchment of the Schöneben-spring (SEQ) based on airborne laser scan data with a resolution of 1 m (modified after WINKLER et al. 2016a). The thick dashed line: the surface delineation of the SRG; thin dot-dashed line: possible extend below the talus slopes to the south-east; RS-PO2, RS-PO6 and RS-PO8 shown by solid lines: seismic refraction profiles; rectangles: tracer injection points (T-IP1, T-IP2 and T-IP3); triangle: the weather station S-AWS; cross: the air temperature and humidity station S-ATH; camera symbol: the remote camera (S-RDC); circles: springs (SEQ: Schöneben spring, PLQ: Postlleiten spring) as well as the sampling location (PLB: Postlleitenbach). The inset shows the location of the SRG within Austria and the Styrian part of the Niedere Tauern Range (NiT) in dark grey. b) Photo with the SRG highlighted in blue and its catchment is surrounded by a dashed red line. c) gauging station of SEQ which is installed about 40 m downstream of the spring.

An dessen tiefstem Punkt entspringt die Schönebenquelle, die den Blockgletscher und das gesamte Kar als orographisches Einzugsgebiet mit einer Fläche von 0,67 km² entwässert. Der Blockgletscher wurde mit zahlreichen Messsystemen zur Erfassung unter anderem der Quelldaten wie Quellschüttung, Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit und meteorologische Daten für die Berechnung der Wasserbilanz ausgestattet (Tab. 1, Abb. 1).

3. Hydraulische Eigenschaften und interne Struktur reliktscher Blockgletscher

Die Untersuchungen umfassen die Analyse des Quellschüttungsverhaltens (Hydrographanalyse) und die Auswertung der natürlichen Tracer Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit und stabile Isotope ($\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$). Zudem wurden in den Jahren 2009 und 2012 zwei Markierungsversuche mit Fluoreszenzfarbstoffen durchgeführt, wobei die Eingabestellen in Abbildung 1 eingezeichnet sind. Zusätzlich wurde mittels refraktionsseismischer Untersuchungen die Geometrie des Schöneben-Blockgletschers und seine Schuttmächtigkeit bestimmt, welche in weiterer Folge in eine numerische hydrau-

liche Modellierung des Blockgletschers eingingen (PAURITSCH et al. 2016). Die Untersuchungsmethoden und die nachstehend zusammengefassten Ergebnisse werden ausführlich in WINKLER et al. (2016a und 2016b) diskutiert. Des Weiteren wurde die Bedeutung einer geneigten Aquiferbasis auf das Entwässerungsverhalten durch PAURITSCH et al. (2015) untersucht.

Die Untersuchungen am Schöneben-Blockgletscher ergaben ein Abflussverhalten ähnlich dem von Karstquellen mit einer kurzfristig gespeicherten (mehrere Stunden bis Tage) und einer längerfristig gespeicherten (mehrere Monate) Abflusskomponente. In Kombination mit den geophysikalischen Untersuchungen kann auf einen konzeptionellen Aufbau (Abbildung 2) mit einer sehr grobblockigen, mehrere Meter mächtigen Deckschicht (Blöcke bis zu ca. 2 m Durchmesser), einem sandig bis blockigen, hochdurchlässigen Hauptschuttkörper mit mehreren Zehnermeter Mächtigkeit und einer schluffigen bis feinsandigen, geringer durchlässigen Basis mit einer Mächtigkeit bis zu 15 m geschlossen werden.

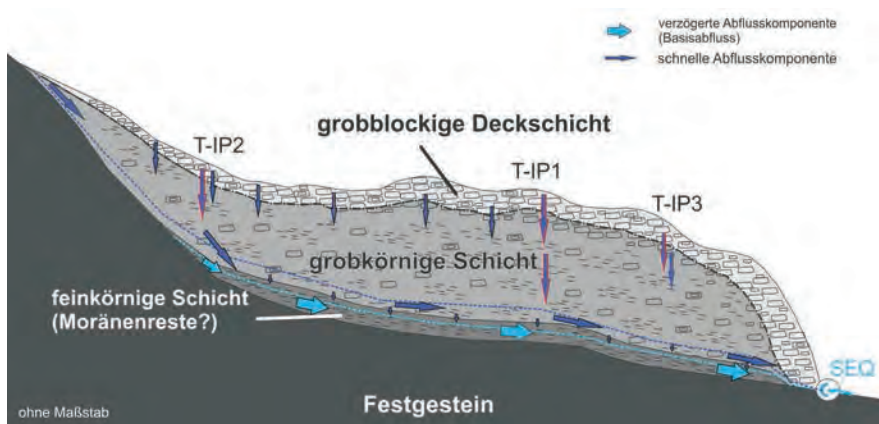


Abb. 2: Konzeptionelles Modell des reliktschen Schöneben-Blockgletschers (Längsprofil) mit einem dreischichtigen Aufbau (nicht maßstabsgetreu). T-IP1–T-IP3: Tracereingabestellen; SEQ: Blockgletscherquelle. Längserstreckung des SRG ca. 700 m, Mächtigkeit des SRG von einigen Metern bis einige Zehnermeter (modifiziert nach WINKLER et al. 2016a).

Fig. 2: Conceptual model of the relict Schöneben Rock Glacier (longitudinal cross section) with three layers (not to scale). T-IP1–T-IP3: tracer injection points; SEQ: spring of the rock glacier. Length of SRG of about 700 m, thickness of SRG ranges from a few meters up to several tens of meters (modified after WINKLER et al. 2016a).

Aufgrund der gering durchlässigen Basisschicht ergibt sich eine hohe Speicher- bzw. Pufferwirkung des Schöneben-Blockgletschers, was eine wasserwirtschaftliche Bedeutung dieser Schuttformen als Wasserspender in Trockenzeiten bewirkt. Eine Wasserspeicherung bei Starkregenereignissen zur Prävention von Hochwässern ist dann gegeben, wenn die Basisschicht noch nicht vollkommen gesättigt ist, da sonst die

schnellere Abflusskomponente überwiegt und nur eine begrenzte Pufferwirkung des reliktschen Blockgletschers vorliegt. Das dynamische Verhalten der Schönebenquelle ist zusätzlich zum internen Aufbau des Blockgletschers auch stark von der Hangneigung und der Topographie des darunter liegenden Festgesteins abhängig (PAURITSCH et al. 2015, 2016).

4. Auswirkungen auf das Abflussverhalten unterstromiger Gewässer

In weiterer Folge wurden die Auswirkungen dieses Grundwasserkörpers und dessen übergeordneten Einzugsgebiete auf die darunter liegenden Flusssysteme untersucht (Abb. 3; WAGNER et al. 2016; WINKLER et al. 2016b).

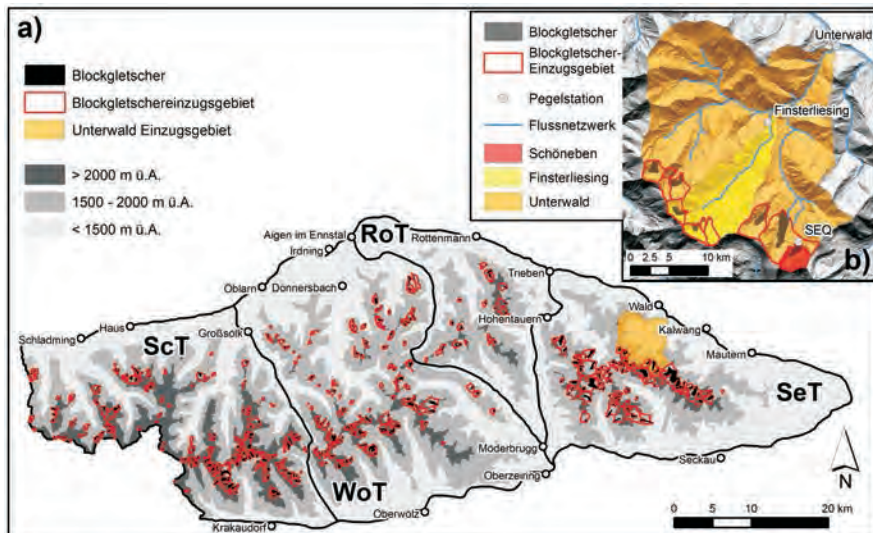


Abb. 3: a) Überblickskarte der steirischen Niederen Tauern (NiT) mit den vier Subeinheiten Schladminger Tauern (ScT), Wölzer Tauern (WoT), Rottenmanner Tauern (RoT) und Seckauer Tauern (SeT), den Blockgletschern (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2014) und den dazugehörigen orographischen Blockgletschereinzugsgebieten (WAGNER et al. 2014) sowie dem orographischen Einzugsgebiet Unterwald. b) Orographische Einzugsgebiete Unterwald, Finsterliesing und Schöneben und die darin enthaltenen orographischen Blockgletschereinzugsgebiete. Lage der NiT innerhalb von Österreich siehe graues Polygon in Abb. 1 (nach WAGNER et al. 2016).

Fig. 3: a) Overview map of the Styrian Niedere Tauern Range (NiT) including the four subunits Schladminger Tauern Range (ScT), Wölzer Tauern Range (WoT), Rottenmanner Tauern Range (RoT) and Seckauer Tauern Range (SeT), the rock glaciers (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2014), the hydrological rock glacier catchments (WAGNER et al. 2014) and the catchments Unterwald. b) Catchments of Unterwald, Finsterliesing and Schöneben and the rock glacier catchments therein. Position of NiT within Austria is shown as a grey polygon in Fig. 1 (after WAGNER et al. 2016).

Mehr als 50 % der Seckauer Tauern und ca. 27 % der Niederen Tauern über 2000 m ü.A. entwässern über Blockgletscher (WAGNER et al. 2014; WINKLER et al. 2016b). Auf regionalem Maßstab konnte die potentielle Speicher- bzw. Pufferwirkung anhand einfacher Niederschlags-Abfluss Modellierungen untermauert werden (WAGNER et al. 2016; WINKLER et al. 2016b). Hierbei wurde ein einfaches konzeptionelles parameterarmes Niederschlags-Abflussmodell (GR4J, modifiziert nach PERRIN et al. 2003) angewandt, welches lediglich Niederschlag und Temperatur als Eingangsparameter und beobachtete Abflussganglinien von Pegelmessstellen zur Kalibration benötigt. Einerseits konnte das Abflussverhalten der Schönebenquelle ausreichend gut simuliert werden und die Parameter des Niederschlags-Abfluss Modells so gedeutet werden, dass der Aquifer des Schöneben-Blockgletschers als Grundwasserspeicher eine wichtige Rolle spielt. Andererseits konnte in einem einfachen semi-distributiven Ansatz der Abfluss aller reliktscher Blockgletscher der Einzugsgebiete Finsterliesing und Unterwald (Abb. 3) explizit berücksichtigt werden. Hierzu wurde der gesamte Abfluss der blockgletscherbeeinflussten Einzugsgebiete mit den Parametern des Schöneben Blockgletschereinzugsgebiets errechnet und dem restlichen Abfluss der übergeordneten Einzugsgebiete gegenüber gestellt. Diese Analyse ergab, dass auf Tagesbasis der Anteil des Abflusses, der durch die reliktschen Blockgletscher entwässert, in den unterstromigen Gewässern an den Pegelmessstellen Finsterliesing und Unterwald ein Vielfaches (bis hin zu mehr als das Vierfache) des rein flächenmäßig für diese Teileinzugsgebiete berechneten Abflussanteiles liegt (WAGNER et al. 2016).

5. Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigen, dass reliktsche Blockgletscher Grundwasserkörper beinhalten können, die ein komplexes Abflussverhalten und ein hohes Speicherpotential aufweisen, was in ihrem heterogenen, mehrschichtigen Aufbau begründet zu sein scheint. Die hohe Speicherkapazität hat eine wesentliche Bedeutung für das Abflussverhalten alpiner Einzugsgebiete und der unterstromigen Oberflächengerinne, da diese Landschaftsformen einerseits Wasserressourcen in Trockenzeiten zur Verfügung stellen und andererseits eine Pufferfunktion zur Prävention von Hochwässern bei Starkniederschlagsereignissen darstellen können.

Dank

Das Projekt wurde aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und aus Mitteln des Landes Steiermark, Investition in ihre Zukunft, finanziert. Unser Dank gilt dem Hydrographischen Dienst Steiermark, dem Hydrographischen Zentralbüro (HZB), der GIS-Abteilung der Steiermärkischen Landesregierung, der Zen-

tralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und dem Umweltbundesamt (ANIP-Datenbank), die Daten für das gegenständliche Forschungsprojekt zur Verfügung gestellt haben.

Literatur

- BARNETT, T.P., ADAM, J.C. & LETTENMAIER, D.P. (2005): Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. – *Nature*, 438: 303-309.
- BARSCHE, D. (1996): *Rock Glaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments*. – Springer Series in Physical Environment, 16, 331 S., Springer Verlag, Berlin.
- HAEBERLI, W., HALLET, B., ARENSON, L., ELCONIN, R., HUMLUM, O., KÄÄB, A., KAUFMANN, V., LADANYI, B., MATSUOKA, N., SPRINGMAN, S. & VONDER MÜHLL, D. (2006): Permafrost creep and rock glacier dynamics. – *Permafrost Periglacial Processes*, 17(3): 189-214.
- 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., LIEB, G.K. & KLEINFERCHNER, H. (2012): A new rock glacier inventory in the eastern European Alps. – *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2): 78-93.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., WAGNER, T. & WINKLER, G. (2014): *Blockgletscherinventar der Steirischen Niederen Tauern*. – Unpublizierter digitaler Datensatz, Institut für Erdwissenschaften und Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.
- KRAINER, K. & RIBIS, M. (2012): A rock glacier inventory of the Tyrolean Alps (Austria). – *Austrian Journal of Earth Sciences* 105(2): 32-47.
- PAURITSCH, M., BIRK, S., WAGNER, T., HERGARTEN, S. & WINKLER, G. (2015): Analytical approximations of discharge recessions for steeply sloping aquifers in alpine catchments. – *Water Resources Research*, 51(11): 8729-8740.
- PAURITSCH, M., WAGNER, T., WINKLER, G. & BIRK, S. (2016): Investigating groundwater flow components in an Alpine relict rock glacier (Austria) using a numerical model.. – *Hydrogeology Journal*, DOI: 10.1007/s10040-016-1484-x.
- PERRIN, C., MICHEL, C. & ANDRÉASSIAN, V. (2003): Improvement of a parsimonious model for stream-flow simulation. – *Journal of Hydrology*, 279: 275-289.
- WAGNER, T., KELLERER-PIRKLBAUER, A. & WINKLER, G. (2014): *Blockgletschereinzugsgebietsinventar der Steirischen Niederen Tauern*. – Unpublizierter digitaler Datensatz, Institut für Erdwissenschaften und Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.
- WAGNER, T., PAURITSCH, M. & WINKLER, G. (2016): Impact of relict rock glaciers on spring and stream flow of alpine watersheds: Examples of the Niedere Tauern Range, Eastern Alps (Austria). – *Austrian Journal of Earth Sciences*, 109(1): 84-89.

- WINKLER, G., WAGNER, T., PAURITSCH, M., BIRK, S., KELLERER-PIRKLBAUER, A., BENISCHKE, R., LEIS, A., MORAWETZ, R., SCHREILECHNER, M.G. & HERGARTEN, S. (2016a): Identification and assessment of flow and storage components of the relict Schöneben Rock Glacier, Niedere Tauern Range, Eastern Alps (Austria). – *Hydrogeology Journal*, 24(4): 937-953.
- WINKLER, G., PAURITSCH, M., WAGNER, T. & KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2016b): Grundwasserspeicherung und Entwässerungsdynamik reliktscher Blockgletscher. – *Berichte der wasserwirtschaftlichen Planung*, 87:1-134.

Anschrift der Verfasser:

Gerfried Winkler, Thomas Wagner & Marcus Pauritsch
Karl-Franzens-Universität Graz, NAWI Graz Geozentrum, Institut für Erdwissenschaften,
Heinrichstraße 26, 8010 Graz
gerfried.winkler@uni-graz.at, thomas.wagner@uni-graz.at,
marcus.pauritsch@edu.uni-graz.at

Andreas Kellerer-Pirklbauer
Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, Arbeits-
gruppe Alpine Landschaftsdynamik (ALADYN), Heinrichstraße 36, 8010 Graz
andreas.kellerer@uni-graz.at