

ENDBERICHT

Permafrost-Monitoring Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2016-2018 – Projektendbericht

MMag. Dr. Andreas KELLERER-PIRKLBAUER ⁽¹⁾

Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Gerhard Karl LIEB ⁽¹⁾

Ao. Univ.-Prof. DI Dr. Viktor KAUFMANN ⁽²⁾

Mag. Dr. Michael AVIAN ^(1,3)

(1) Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz, Graz

(2) Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz, Graz

(3) Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Stabsstelle Erdbeobachtung, Wien

Graz, im März 2019

Permafrost-Monitoring Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2016-2018 – Projektendbericht

Zusammenfassung

Dieser Endbericht präsentiert und diskutiert Ergebnisse des Permafrost-Monitorings der Universität Graz und der Technischen Universität Graz in vier unterschiedlichen Untersuchungsgebieten im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten. Zum einen werden die Ergebnisse des Messjahres 2017/18 und zum anderen die Ergebnisse aus den letzten Jahren – auch unter Berücksichtigung der Zeit vor dem gegenständlichen Projekt – gemeinsam betrachtet, um die Ergebnisse in einen längerfristigen Kontext zu bringen. Dies hat zum Ziel, klimatisch gesteuerte Tendenzen aus den Messdaten erkennbar zu machen. Der Multimethoden-Ansatz umfasst Messungen der folgenden Indikatoren: (i) Bodentemperaturen an und nahe der Oberfläche, (ii) Oberflächenbewegung von Blockgletschern, (iii) Geländehöhenänderung bedingt durch Massenbewegungen und Abtragung an Felswänden sowie (iv) verschiedene Klimaelemente mit Fokus auf die Lufttemperatur.

Der Zeitraum 2017/18 wies für den Permafrost deutlich ungünstigere Bedingungen als das Vorjahr auf. Nur an 5 von 30 Standorten (17 %) mit entsprechenden Bodentemperaturdatenreihen lag der Jahresmittelwert 2017/18 unter jenem von 2016/17. Die Blockgletscherbewegung nahm hingegen ab – mit Ausnahme der sich weiterhin geländebedingt schnell bewegenden Zunge des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar.

Durch die mehrjährige Zusammenschau wird die generelle Zunahme der Luft- und Bodentemperatur seit dem Beginn der Messreihen im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten deutlich. Die aktuellen Bewegungsraten der Blockgletscher sind allgemein im Vergleich zu den letzten 20-25 Jahren sehr hoch. Der Blockgletscher im Hinteren Langtalkar stößt sogar dynamisch vor und entfaltet im davorliegenden Gelände eine Bulldozer-artige Wirkung mit Aufschiebung der alpinen Grasheide. Insgesamt spiegeln unsere Ergebnisse primär die hohe Variabilität der Permafrostdynamik von Jahr zu Jahr wider, wobei Unterschiede in der saisonalen Schneedecke eine große Rolle spielen. Die Ergebnisse lassen aber auch den generellen Erwärmungstrend in den österreichischen Alpen und dessen Wirkungen auf den Permafrost erkennen. Dies unterstreicht, dass erst langjähriges Monitoring allgemeine Aussagen über die Entwicklung des Permafrostes zulässt.

Permafrost monitoring in the Carinthian part of Hohe Tauern National Park 2016-2018 – final project report

Summary

This final report presents and discusses results of the permafrost-monitoring program carried out in four different local study areas in the Carinthian part of the Hohe Tauern National Park by the University of Graz and the Graz University of Technology. First, research results from the monitoring year 2017/18 are presented. Second, the monitoring data from the last years including pre-project period data were combined and jointly assessed in order to bring the results of the current project into a long-term context. This approach implies that climatically driven trends should be recognizable in the data. Our multi-methodological monitoring approach comprises measurements of the following indicators: (i) ground temperature at and near the surface, (ii) surface movement of rock glaciers, (iii) surface elevation changes due to mass movements and rock face denudation, and (iv) various meteorological elements focusing on air temperature.

In a synopsis, the period 2017/18 was characterized by rather unfavorable conditions for permafrost compared to the previous year. This conclusion is based on the fact that at 5 out of 30 sites (17%) with respective ground temperature data series the monitoring year 2017/18 was warmer compared to 2016/17. The surface velocity rates decreased with the exception of the rock glacier Hinteres Langtalkar. At this rock glacier at its steeper lower part the annual surface velocity rates even increased.

Our multi-annual assessment reveals well the general increase of air and ground temperatures since the onset of the monitoring program in the Carinthian part of the Hohe Tauern National Park. The surface velocity rates at the two monitored rock glaciers are generally very high compared to the last 20-25 years. Interestingly, the rock glacier at the Hinteres Langtal cirque is in an advance mode damaging and overriding the alpine meadow in front of the rock glacier terminus. In summary, our results clearly show (i) the high interannual variability of ground temperatures primarily related to variable seasonal snow cover conditions and (ii) the general warming trend in the high mountains of the Austria Alps. These observations underline the importance of long-term monitoring programs because short research programs fail to grasp the effects of climate trends on permafrost conditions and changes.

Inhalt

1. Einleitung	5
2. Monitoring im Messjahr 2017/18.....	6
2.1. Durchgeführte Aktivitäten 2017/18.....	6
2.2. Witterungsverlauf und Schneeeverhältnisse 2017/18	8
2.3. Ergebnisse Bodentemperatur-Monitoring 2017/18.....	10
2.4. Ergebnisse Blockgletscherbewegungs-Monitoring 2017/18	16
2.4.1. <i>Dösener Blockgletscher</i>	16
2.4.2. <i>Blockgletscher Hinteres Langtalkar</i>	17
2.5. Massenbewegungs-Monitoring 2017/18	18
2.5.1. <i>Blockgletscher Hinteres Langtalkar</i>	18
2.5.2. <i>Felssturzbereiche Mittlerer und Hoher Burgstall</i>	20
2.6. Lufttemperatur-Monitoring 2017/18.....	21
2.7. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse 2017/18.....	22
3. Zusammenfassende Ergebnisse im Gesamtprojektzeitraum und darüber hinaus.....	23
3.1. Ergebnisse Bodentemperatur-Monitoring	23
3.2. Ergebnisse Blockgletscherbewegungs-Monitoring.....	28
3.2.1. <i>Dösener Blockgletscher</i>	28
3.2.2. <i>Blockgletscher Hinteres Langtalkar</i>	29
3.2.3. <i>Oberflächenbewegung im Vergleich</i>	29
3.3. Ergebnisse Massenbewegungs-Monitoring	32
3.3.1. <i>Blockgletscher Hinteres Langtalkar</i>	32
3.3.2. <i>Felssturzbereiche Hoher Burgstall</i>	33
3.3.3. <i>Felssturzbereiche Mittlerer Burgstall</i>	35
3.4. Ergebnisse Lufttemperatur-Monitoring.....	37
3.5. Interpretation und Diskussion der langjährigen Ergebnisse	38
4. Gesamtbewertung und Ausblick	39
Literatur	40

1. Einleitung

Der vorliegende Bericht ist der vierte, der für den Kärntner Teil des Nationalparks Hohe Tauern zum Permafrost vorgelegt wird. Er ist gleichzeitig auch der Endbericht zum Projekt „Permafrost Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2016-2018“. Der erste Bericht (Kellerer-Pirklbauer et al. 2015) widmete sich dem Beobachtungszeitraum 2013/14 und ist als Pilotbericht zu verstehen. Der zweite Bericht (Kellerer-Pirklbauer et al. 2017a) behandelte das Berichtsjahr 2015/16 und verglich primär die Messergebnisse der Periode August 2015 bis Juli 2016 mit jenen der beiden Vorjahre. Der dritte Bericht (Kellerer-Pirklbauer et al. 2018a) hatte das Berichtsjahr 2016/17 sowie die Messjahre davor (zurückgehend bis 2013) zum Inhalt. Der nun vorliegende Endbericht präsentiert und diskutiert zum einen die Messergebnisse des Beobachtungsjahres 2017/18, zum anderen werden die zusammengefassten Ergebnisse im Gesamtprojektzeitraum 2015/18 und darüber hinaus – d. h. für die Berichtsjahre 2013/14, 2014/15 (hierfür wurde kein Jahresbericht verfasst) und 2015/16 – präsentiert und diskutiert.

Der erweiterte Betrachtungszeitraum erlaubt eine bessere Einordnung der aktuellen Ergebnisse in einen mehrjährigen Entwicklungsverlauf. In einem zweiten Schritt werden die Ergebnisse aus diesem Berichtsjahr mit jenen seit Beginn der langen Datenreihen (z. B. Bodentemperaturmonitoring-Beginn Sommer/Herbst 2006) in Zusammenhang gebracht, um darzustellen, wie sich Permafrost, saisonaler Frost und periglaziale Prozesse seit 2006 im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten verändert haben. Hierzu werden Daten aus dem von den Autoren (bzw. den von ihnen vertretenen Institutionen) betriebenen Permafrost-Messnetz als Grundlage verwendet. Die daraus gewonnenen Ergebnisse fließen seit 2017 auch in das Langzeit-Monitoring abiotischer Prozesse im Rahmen des interdisziplinären, integrativen Monitoring- und Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern (Modul 07 „Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost, Geomorphodynamik“) ein, wofür in den letzten beiden Jahren zwei Zwischenberichte gelegt wurden (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2017a, 2018a). Inhalte daraus wurden auch international präsentiert (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2018b).

Langjährige Permafrost-relevante Messreihen aus unterschiedlichen Gebieten des Nationalparks Hohe Tauern – aber auch des gesamten Alpenbogens – helfen auch Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Entwicklungen zu erfassen. So flossen Blockgletscher-Bewegungsdaten von 35 verschiedenen Blockgletschern in einen gemeinsamen Beitrag von Autoren aus Italien, der Schweiz, Frankreich und Österreich ein (Kellerer-Pirklbauer et al. 2018b) ein. Der Beitrag wurde auch in Form eines Vortrages bei der 5th European Conference on Permafrost in Chamonix, Frankreich (23. 6. – 1. 7. 2018), präsentiert.

Permafrost-relevante Monitoringdaten aus dem Bereich des Nationalparks Hohe Tauern flossen in ein weiteres internationales Publikationsprojekt ein (Krautblatter et al. 2018), wobei Erscheinungsformen, Verbreitung und zukünftige Entwicklung des Permafrosts im Alpenraum im Vordergrund standen. Die im Nationalpark Hohe Tauern gewonnenen Erkenntnisse waren auch darin ein wichtiger Bestandteil, um die Langzeitentwicklung von Bodentemperaturen im Alpenraum zu zeigen und erwiesen sich dadurch als wissenschaftlich wertvoll.

2. Monitoring im Messjahr 2017/18

2.1. Durchgeführte Aktivitäten 2017/18

Im Sommer bis Herbst 2018 konnten alle von uns betreuten Arbeitsgebiete besucht und die meisten Messaktivitäten ordnungsgemäß durchgeführt werden. Die relevanten Untersuchungsgebiete für diesen Bericht liegen in den Bereichen Dösen-Säuleck (Ankogelgruppe), Fallbichl-Hochtor (Goldberggruppe/Glocknergruppe), Hinteres Langtalkar-Kögelekar (Schobergruppe) und Pasterze-Burgstall (Glocknergruppe). Abbildung 1 zeigt deren Lage im Nationalpark Hohe Tauern, Tabelle 1 stellt eine Übersicht zu den nachfolgend kurz beschriebenen Geländearbeiten im Jahr 2018 dar.

Im Einzelnen wurden die Aktivitäten im Rahmen der folgenden vier Monitoring-Teilprogramme durchgeführt:

1. *Bodentemperatur-Monitoring*: Die zugehörige Messkampagne in den vier Untersuchungsgebieten bestand wiederum aus mehreren separaten Geländebegehungen (Tabelle 1), die zwischen dem 30. 7. und 15. 9. durchgeführt wurden. Die wesentlichsten Aufgaben waren wie alljährlich (a) das Auslesen der zahlreichen Datenlogger im Gelände, (b) die Kontrolle der Sensorenkabeln, (c) der an manchen Geräten notwendige Austausch der Batterien, (d) teilweise der Kompletttausch einzelner Sensoren bzw. Datenlogger, (e) der Abbau von Standorten, die (z. B. durch erschwerte Zugänglichkeit) problematisch geworden waren, und (f) die Einrichtung neuer Standorte. Die Witterungsbedingungen an den in Summe fünf Geländekampagnen, die von A. Kellerer-Pirklbauer geleitet wurden, waren im Allgemeinen recht gut und ermöglichten eine effiziente und erfolgreiche Durchführung der Arbeiten.
2. *Blockgletscherbewegungs-Monitoring*: Die geodätischen Wiederholungsmessungen zur Bestimmung der aktuellen Bewegungsraten an den beiden Blockgletschern Dösen und Hinteres Langtalkar erfolgten in gewohnter Weise im August 2018 unter der Leitung von V. Kaufmann. Alle Messungen wurden mittels RTK-GNSS durchgeführt. Interne Durchführungsberichte und auch Fotos (Kaufmann 2019) dokumentieren die getätigten Geländearbeiten. Die genauen Zeiten der Geländekampagnen sind der Tabelle 1 zu entnehmen. Einen kurzen Überblick über insgesamt 20 Jahre geodätischer Beobachtung (1995-2015) am Dösener Blockgletscher gibt Kaufmann (2016). Kellerer-Pirkblauer et al. (2017b) berichten von der allgemeinen Permafrost-bezogenen Erforschungsgeschichte am Dösener Blockgletscher, während der aktuelle Forschungsstand am Hinteren Langtalkar-Blockgletscher in Kellerer-Pirklbauer & Kaufmann (2018) dargelegt ist.
3. *Massenbewegungs-Monitoring*: Die Terrestrischen Laserscan (TLS)-Messungen zur Feststellung der Oberflächenveränderung am Blockgletscher im Hinteren Langtalkar sowie der Steinschlag- und Felssturzaktivität am Mittleren und Hohen Burgstall wurden unter der Leitung von M. Avian und mit Hilfe eines bis zu 5-köpfigem Teams im August 2018 umgesetzt (Tabelle 1). Beide Messkampagnen konnten – von Schwierigkeiten mit der Akkuleistung im Hinteren Langtalkar abgesehen – ohne größere Probleme durchgeführt werden.
4. *Klimaelemente-Monitoring*: Die beiden automatischen Klimastationen im Bereich Dösen-Säuleck sowie im Hinteren Langtalkar wurden im August 2018 gewartet.

2017 wurden in mehreren Geländekampagnen einige Bauteile der Station in der Dösen ausgetauscht und repariert. Die Sensoren funktionieren seither wieder einwandfrei, jedoch gab es beim Geländetermin 2018 Probleme mit der Auslesesoftware (unkorrektes Ausleseschema), sodass auch nach längeren Versuchen (durch A. Kellerer-Pirklbauer und A. Pilz/Pilz Umweltmesstechnik) die Wetterdaten der Station Dösen für das Messjahr 2017/18 nicht einwandfrei rekonstruiert werden konnten. Erfreulicherweise funktionierte aber die Klimastation im Hinteren Langtalkar auch im Messjahr 2017/18 einwandfrei, sodass für alle fünf gemessenen Parameter (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung) fehlerfreie Daten vorliegen. In dieser Arbeit wird wiederum auf den wichtigsten Parameter – die Lufttemperatur – fokussiert.

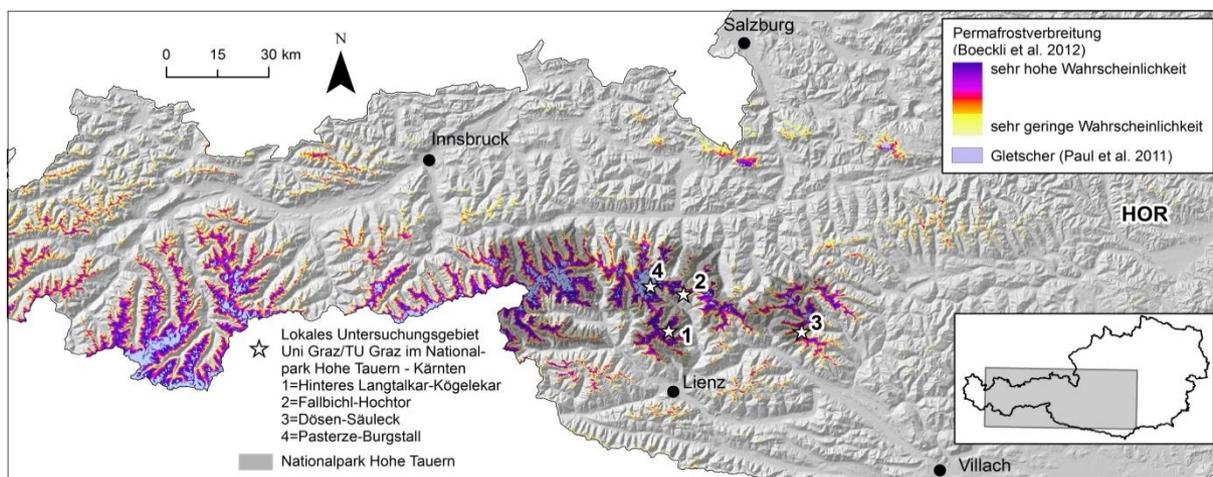


Abb. 1: Lage der vier Untersuchungsgebiete im Nationalpark Hohe Tauern in Kärnten sowie modellierte Verbreitung von Permafrost in den österreichischen Alpen nach Boeckli et al. (2012).

Tabelle 1: Geländebegehungen zur Durchführung der Feldarbeiten in den Teilbereichen (A) Bodentemperatur-Monitoring, (B) Blockgletscherbewegungs-Monitoring, und (C) Massenbewegungs-Monitoring zwischen Juli und September 2018.

Untersuchungsgebiet	Typ	Termin	Messteam
Fallbichl-Hochtor	A	30.07.2018	Andreas Kellerer-Pirklbauer (Uni Graz)
Hinteres Langtalkar-Kögelekar	A	31.07.-02.08.2018	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Doric (beide Uni Graz)
Dösen-Säuleck	A	14.-15.08.2018	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Doric (beide Uni Graz)
Pasterze-Burgstall	A	19.08.2018	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Doric (beide Uni Graz)
	A	10.-14.09.2018	Andreas Kellerer-Pirklbauer (Uni Graz) [zeitgleich mit den jährlich durchgeführten Gletschermessungen an der Pasterze]
Dösen-Säuleck	B	13.-15.08.2018	Viktor Kaufmann, Walter Krämer (beide TU Graz), Wolfgang Seka, Carlo Emanuelle Augello (beide TU Graz, zeitlich befristete Dienstverträge) und Hildegard Seka (Hilfskraft)
Hinteres Langtalkar-Kögelekar	B	16.-19.08.2018	Viktor Kaufmann, Walter Krämer (beide TU Graz), Wolfgang Seka, Carlo Emanuelle Augello (beide TU Graz, zeitlich befristete Dienstverträge) und Hildegard Seka (Hilfskraft)
Pasterze-Burgstall	C	04.-05.08.2018	Michael Avian, Stefan Brauchart, Daniel Winkler, Herwig Wurm, Matthias Lichtenegger (ZAMG, Universität Graz)
	C	13.-14.09.2018	Michael Avian, Armin Borovcnik (ZAMG, Universität Graz)
Hinteres Langtalkar	C	03.-04.08.2018	Michael Avian, Stefan Brauchart, Daniel Winkler, Herwig Wurm, Matthias Lichtenegger (ZAMG, Universität Graz)

2.2. Witterungsverlauf und Schneesverhältnisse 2017/18

August und September 2017 waren durchwegs übernormal warm, was sich für den Permafrost ungünstig auswirkte. Mehrere Schneefallepisoden prägten hingegen den September 2017, wobei sich in den meisten, von den von Permafrost unterlagerten schattseitigen Hochlagen bereits in diesem Monat eine Schneedecke bildete, die in diesem Jahr nicht mehr abschmelzen sollte. Die längeren antizyklonalen Witterungsphasen im Oktober ließen nur mehr sonnseitige Lagen und die weit herabreichenden Blockgletscherzungen schneefrei werden. Im November, Dezember und Jänner herrschten winterliche Witterungsbedingungen mit wiederholten Schneefallereignissen, wobei die überdurchschnittlich hohen Temperaturen im Jänner 2018 kaum Auswirkungen in Bezug auf den Permafrost hatten. Im Februar 2018 wurde mit $-12,7\text{ °C}$ der tiefste bisher gemessene Monatsmittelwert (Zeitraum 2006-2018) an der Station im Hinteren Langtalkar gemessen (Details siehe unten). Ähnliche extreme Tiefstwerte wurden alpenweit gemessen, wie Abbildung 2 – ein Vergleich der Monatsmittelwerte der Hochgebirgsstationen Sonnblick, Säntis (CH) und Zugspitze (D) im Zeitraum Juli 2017 bis August 2018 – zeigt.

Sonnblick-Zugspitze-Säntis: Abweichung der Monatsmittel der Temperatur vom langjährigem Mittel 1981-2010 zwischen August 2017 und Juli 2018

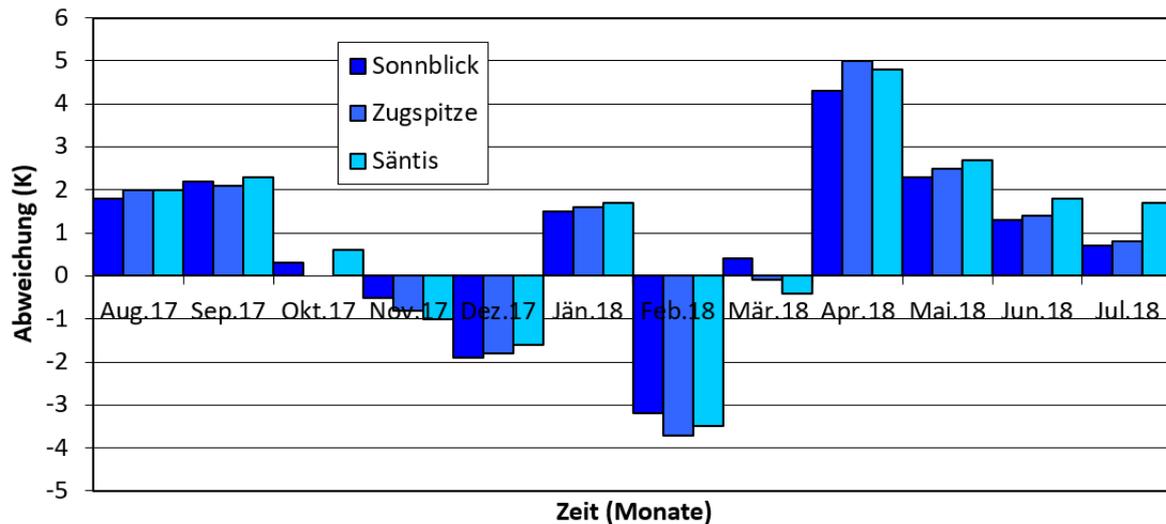


Abb. 2: Die Abweichung der monatlichen Temperaturen zwischen August 2017 und September 2018 (= Berichtsjahr 2017/18) vom Mittel 1981–2010 an den drei Gebirgswetterstationen Sonnblick, Zugspitze und Säntis. (Datenquellen: ZAMG für Sonnblick, Deutscher Wetterdienst für Zugspitze, Meteoschweiz für Säntis).

Nach dem kalten und weiterhin schneereichen März stellte sich ab April überdurchschnittlich warme und langanhaltend antizyklonale Witterung ein. In der Abbildung 2 sticht der April als stark übernormal temperiert hervor (Mittel der drei Stationen +4,7 °C über dem Mittel). Er bewirkte eine frühe und intensive Reduktion der Winterschneedecke durchaus auch schon in hohen Lagen. Auch die drei nachfolgenden Monate blieben überdurchschnittlich warm, sodass die meisten Permafrost-Standorte um die Monatswende Juni/Juli ausgeapert waren. Im Mittel war der Messzeitraum um 0,8 °C (Sonnblick, Zugspitze) und 0,9 °C (Säntis) wärmer als das langjährige Mittel.

Im Juli und August gab es nur (nach einer Auswertung der Bilder der auf die Pasterze gerichteten Webcam am Freiwandeck im Zeitraum 1. 6.–31. 8. 2018 [www.foto-webcam.eu/webcam/freiwandeck/]) am 24.-28. 6. sowie am 24.-26. 8. Schneefälle, von denen nur die zuletzt genannten die untersuchten Permafrostflächen kurzzeitig mit einer dünnen Schneedecke überzogen.

2.3. Ergebnisse Bodentemperatur-Monitoring 2017/18

Die Abbildung 3 sowie die Tabelle 2 geben eine Übersicht über die Lage und Instrumentierung der in den vier Untersuchungsgebieten gelegenen Messstandorte. Wie diesen Aufstellungen zu entnehmen ist, liegen die umfangreichsten Bodentemperaturmessnetze in den Untersuchungsgebieten Hinteres Langtalkar-Kögelekar und Dösen-Säuleck. In diesen beiden Untersuchungsgebieten stehen auch weitere für das Monitoring wichtige Geräte, und zwar je eine automatische Klimastation (siehe weiter unten) und eine automatische optische Kamera, welche die Ernährungsbedingungen von aktiven Blockgletschern – im Sinne von Lawinen- und Steinschlagfähigkeit – beobachten. Die Standorte der Klimastationen (AWS) sind den beiden angehängten ArcGIS-Shapefiles pf_moni_nphtkt_aws_UTM-33N.shp (Projektion UTM 33N) oder pf_moni_nphtkt_aws_BMN-M31.shp (Projektion BMN M31) zu entnehmen. Die Standorte der beiden automatischen optischen Kameras (RDC) finden sich in den beiden angehängten ArcGIS-Shapefiles pf_moni_nphtkt_rdc_UTM-33N.shp (Projektion UTM 33N) oder pf_moni_nphtkt_rdc_BMN-M31.shp (Projektion BMN M31).

Im Jahr 2018 konnte nach einer mehrjährigen Pause endlich wieder der Standort PAG-FI besucht werden. Der Standort liegt im Gletschervorfeld der Pasterze auf einer Insel, die von einem in den letzten Jahren entstanden See, gespeist von den Schmelzwässern der Pasterze, umgeben ist. Im September 2018 war es nun möglich über Steinbrücken diese Insel erstmals seit 2013 wieder zu erreichen. Der Datenlogger konnte erfolgreich ausgelesen werden. Es stellte sich jedoch bald heraus, dass die Datenreihe am 6.12.2013 endete, da nach einem Verbissschaden an diesem Tag der Sensor nur mehr unbrauchbare Fehlwerte aufzeichnete.

Im August (PAG-PR2) und im September 2018 (PAG-PR1) wurden jedoch zwei neue Bodentemperatursensoren im Gletschervorfeld der Pasterze installiert, und zwar direkt vor dem Gletscherende in den lockeren proglazialen Sedimenten. Zusätzlich wurden die Messungen am Standort GOE-PR – außerhalb der vier Kernuntersuchungsgebiete – erfolgreich fortgeführt. Dieser Standort liegt in einem benachbarten Kar des Untersuchungsgebiets Hinteres Langtalkar-Kögelekar direkt im Gletschervorfeld des Gößnitzkeeses auf einer Seehöhe von 2594 m und wurde 2015 instrumentiert.

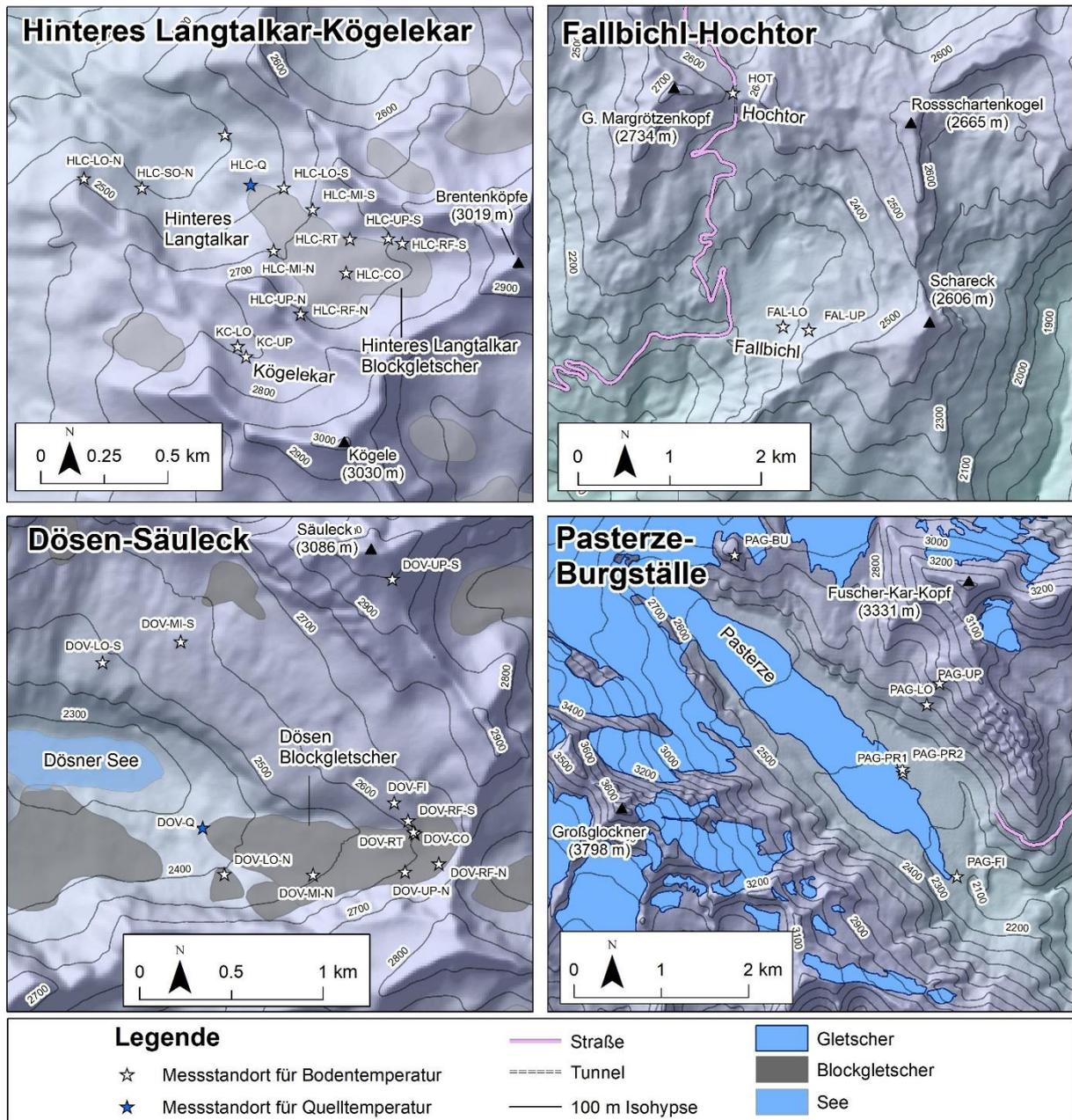


Abb. 3: Detailkarten der vier Untersuchungsgebiete mit Lage aller Messstandorte, welche mit Miniatur-Temperaturdatenlogger ausgestattet sind (vgl. Tabelle 2). Zu beachten ist, dass seit dem Berichtsjahr 2016/17 auch Quelltemperatur-Messstandorte im Bereich zweier Blockgletscherstirnen eingerichtet wurden (HLC-Q und DOV-Q). PAG-FI musste aufgegeben werden. PAG-PR1 und PAG-PR2 kamen neu hinzu. (Gletschermaske Pasterze nach Buckel et al. 2018)

Tabelle 2: Die vier lokalen Untersuchungsgebiete im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten und ihre Instrumentierung mit Miniatur-Temperaturdatenloggern. Lage siehe Abbildung 3. Abbildungen 6, 15, und 16 zeigen die Daten der jeweils grau hinterlegten Sensoren. HLC= Hinteres Langtalar-Kögelekar, FAL=Fallbichl, HOT=Hochtor, DOV=Dösen-Säuleck, PAG=Pasterze-Burgstall.

Code	Koord. BMN-M31		Koord. UTM-33N		Höhe (m)	Exposition (°)	Neigung (°)	Messtiefen (cm)
	RW	HW	RW	HW				
HLC-LO-S	407799	205640	331029	5206282	2489	290	32	0
HLC-MI-S	407916	205558	331145	5206197	2581	268	19	0
HLC-UP-S	408216	205455	331442	5206088	2696	256	22	0
HLC-LO-N	407013	205646	330244	5206305	2485	47	45	0
HLC-MI-N	407768	205389	330993	5206032	2601	17	28	0
HLC-UP-N	407883	205143	331103	5205783	2693	45	52	0
HLC-RF-S	408272	205439	331498	5206071	2725	241	75	3, 10, 40
HLC-RF-N	407883	205143	331103	5205783	2693	45	85	3, 10, 40
HLC-RT	408066	205447	331292	5206083	2650	252	7	3, 10, 40
HLC-CO	408056	205312	331279	5205949	2672	338	8	0, 30, 100
HLC-SO-N	407242	205618	330472	5206272	2407	34	34	0, 10, 40
HLC-Q	407668	205647	330899	5206292	2455	320	9	Wasser
KC-LO	407642	205006	330859	5205651	2690	22	25	0, 10, 50
KC-UP	407676	204966	330892	5205611	2703	12	28	0, 10, 20
FAL-LO	413089	214329	336502	5214856	2250	293	16	0, 10, 75
FAL-UP	413279	214303	336692	5214826	2345	332	26	0, 10, 75
HOT	412726	216082	336177	5216616	2580	72	18	0, 10, 60
DOV-LO-S	445487	205927	368710	5205768	2489	220	20	0
DOV-MI-S	445803	206025	369028	5205860	2586	213	19	0
DOV-UP-S	446659	206316	369889	5206132	3002	166	33	0
DOV-LO-N	446018	205072	369222	5204903	2407	342	22	0
DOV-MI-N	446381	205084	369585	5204907	2501	239	16	0
DOV-UP-N	446757	205111	369962	5204926	2626	331	25	0
DOV-RF-S	446761	205322	369970	5205137	2628	206	80	3, 10, 32
DOV-RF-N	446894	205150	370100	5204962	2638	300	90	3, 10, 40
DOV-RT	446791	205270	369999	5205084	2603	255	14	3, 10, 40
DOV-CO ^a	446785	205277	369993	5205091	2606	257	5	100, 200, 300
DOV-FI	446703	205395	369914	5205211	2644	213	28	0, 3, 10, 30, 70, 100
DOV-Q	445923	250261	370090	5250074	2334	335	21	Wasser
PAG-LO	404961	216580	328425	5217279	2509	185	25	0
PAG-UP	404965	216760	328433	5217459	2628	220	30	0
PAG-BU	402694	218222	326193	5218969	2932	95	7	0, 10, 55
PAG-FI ^b	405383	214607	328805	5215298	2074	120	2	0, 10, 75
PAG-PR1 ^c	404719	215779	328165	5216484	2078	0 ^d	0	0
PAG-PR2 ^c	404710	215824	328158	5216529	2080	0 ^d	0	0, 10, 40

^a Daten vom Sensor in 100 cm Tiefe; ^b Standort war erstmals (!) seit 2013 wieder zugänglich, musste jedoch aufgrund eines defekten Loggers und einer Messreihe, die bereits im Dezember 2013 endete, wegen zu großer Datenlücke aufgelassen werden; ^c neu eingerichteter Standort; ^d Ebene, deshalb 0.

Im Anhang zu diesem Bericht finden sich zwei ArcGIS-Shapefiles mit der Lage der in Tabelle 2 gelisteten Standorte, den darin auch gelisteten Raumlageparametern sowie die Jahresmittelwerte der Bodentemperatur (immer August bis Juli des Folgejahres) für die fünf Einzelmessjahre 2013/14 bis 2017/18, sowie die Angabe des maximalen und minimalen Wertes in diesem Zeitraum. Die Bezeichnungen der Dateien lauten:

- Für Projektion BMN M31: *pf_moni_nphkt_sites_13_18_BMN-M31.shp*
- Für Projektion UTM33N WGS84: *pf_moni_nphkt_sites_13_18_UTM-33N.shp*

Die Abbildung 4 zeigt die einzelnen Messstandorte nach Hangneigung (links), Exposition (rechts) und Seehöhe. Aus den beiden Teilabbildungen geht hervor, dass die meisten Messstandorte zwischen ca. 2400 und 2750 m Seehöhe liegen, die Hangneigungsbereiche 5-35° (Hangstandorte) sowie 75-90° (Felswandstandorte) dominieren, und alle Expositionen mit Ausnahme des Sektors Südost (um 135°) relativ gut repräsentiert sind.

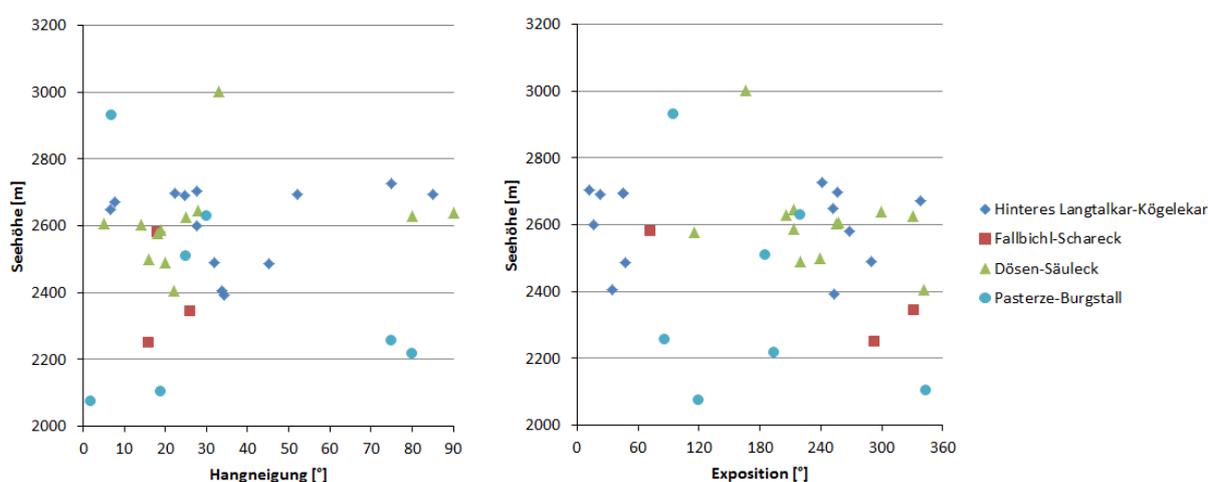


Abb. 4: Seehöhe, Hangneigung und Exposition der Standorte der Bodentemperaturmessungen in den vier Untersuchungsgebieten.

Die an den Standorten ermittelten Jahresmitteltemperaturen für das Berichtsjahr 2017/18 sind in Abbildung 5 – aufgeteilt auf die vier Teilgebiete – dargestellt. Alle vier Teildiagramme sind auf der Ordinate gleich skaliert und damit direkt vergleichbar. Im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar wurden an 15 Standorten Jahresmitteltemperaturen ermittelt. An sechs Standorten ergaben sich negative Jahresmittelwerte, wobei der tiefste Jahresmittelwert nur bei -0,9 °C lag (KC-UP). Die beiden wärmsten Standorte in diesem Arbeitsgebiet wiesen hingegen Jahresmittelwerte von nahe 3 °C auf. Von den drei Standorten im Arbeitsgebiet Fallbichl-Schareck wurde zumindest im Bereich des Hochtors (HOT, -0,4 °C) ein negativer Jahresmittelwert für 2017/18 ermittelt. Von den 11 Standorten mit entsprechenden Daten im Arbeitsgebiet Dösen-Säuleck wurden an vier Standorten negative Jahresmittelwerte gemessen, worunter der in über 3000 m gelegene Standort DOV-UP-S mit einer Jahresmitteltemperatur von -2,5 °C einen statistischen Ausreißer darstellt. Schließlich konnten noch im Arbeitsgebiet Pasterze-Burgstall für drei Standorte Jahresmittelwerte errechnet werden, wobei nur der Standort am Mittleren Burgstall (PAG-BU) einen negativen Mittelwert aufwies.

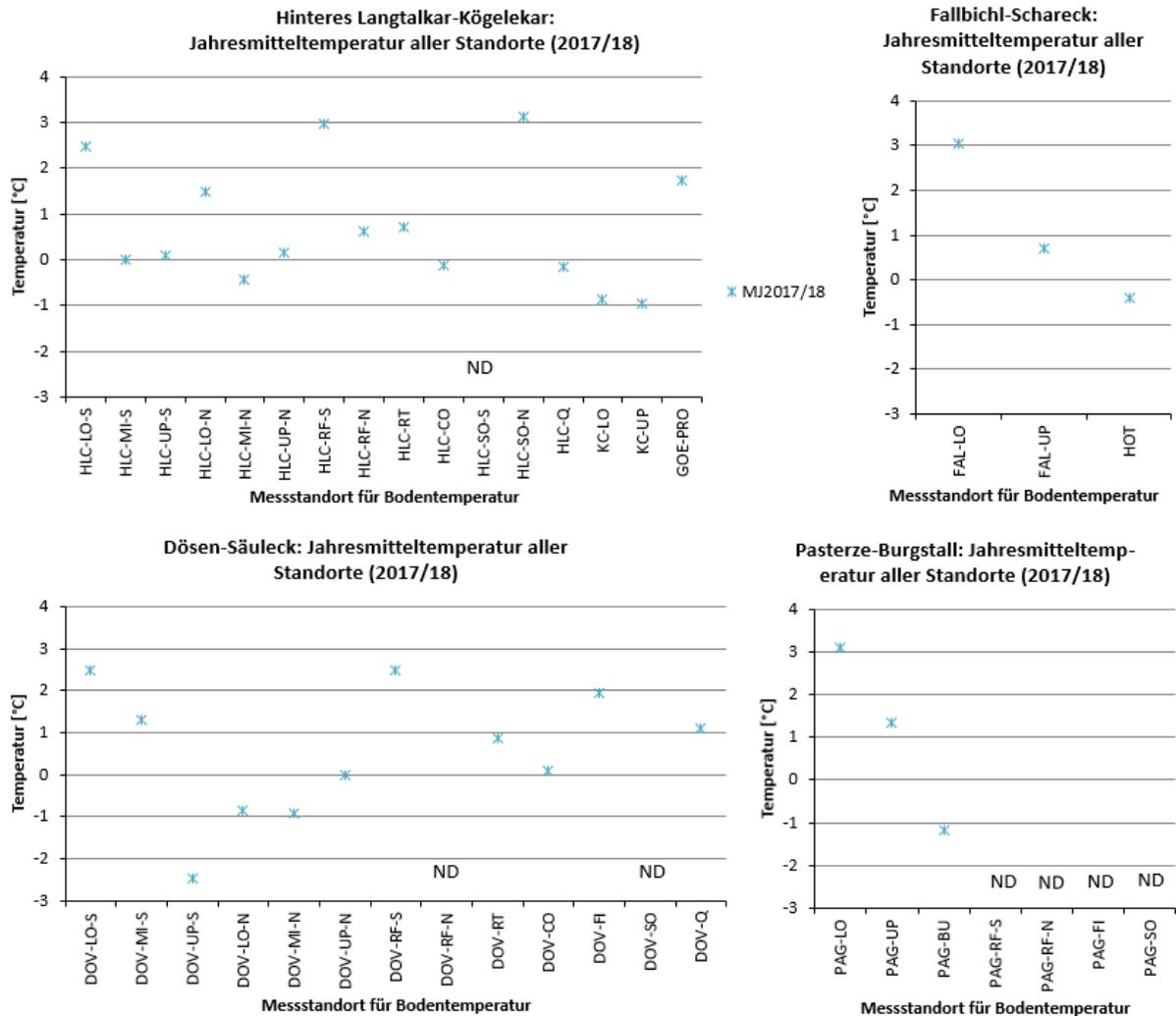


Abb. 5: Jahresmitteltemperatur an/nah der Bodenoberfläche (Zeitraum 1. 8. 2017 bis 31. 7. 2018) aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten für das Berichts- bzw. Messjahr 2017/18. Standorte, die 2017 oder 2018 aufgelassen wurden (siehe Text), sind mit ND (no data) gekennzeichnet; eine Ausnahme ist der Standort DOV-RF-N (Batterie leer im Februar).

Abbildung 6 zeigt die Tagesmitteltemperaturen der vier in Tabelle 2 grau hinterlegten Standorte (einer pro Untersuchungsgebiet) im Messjahr 2017/18. Zur besseren Unterscheidung der Perioden innerhalb des Messjahres mit (d. h. starken Schwankungen) und ohne thermalen Schneepufferwirkung (d. h. relativ stabile Verhältnisse der Bodentemperatur) wurde jeweils auch die Lufttemperaturkurve der Klimastation im Hinteren Langtalkar für denselben Zeitraum dargestellt. Im Jahresgang am ausgewählten Standort im Hinteren Langtalkar-Kögelekar (HLC-UP-N) ist deutlich zu erkennen, dass eine winterliche Schneedecke sich dämpfend auf Schwankungen der Bodentemperatur zwischen Anfang November 2017 und Mitte Juni 2018 auswirkte. Einerseits verhinderte diese 7,5-monatige Schneedecke zwischen November und Anfang April eine effektive Ausstrahlung und somit Abkühlung des Bodens (Permafrost-ungünstig), andererseits wurde der Untergrund durch die Schneedecke bis Mitte Juni vor der solaren Einstrahlung effizient geschützt (Permafrost-günstig).

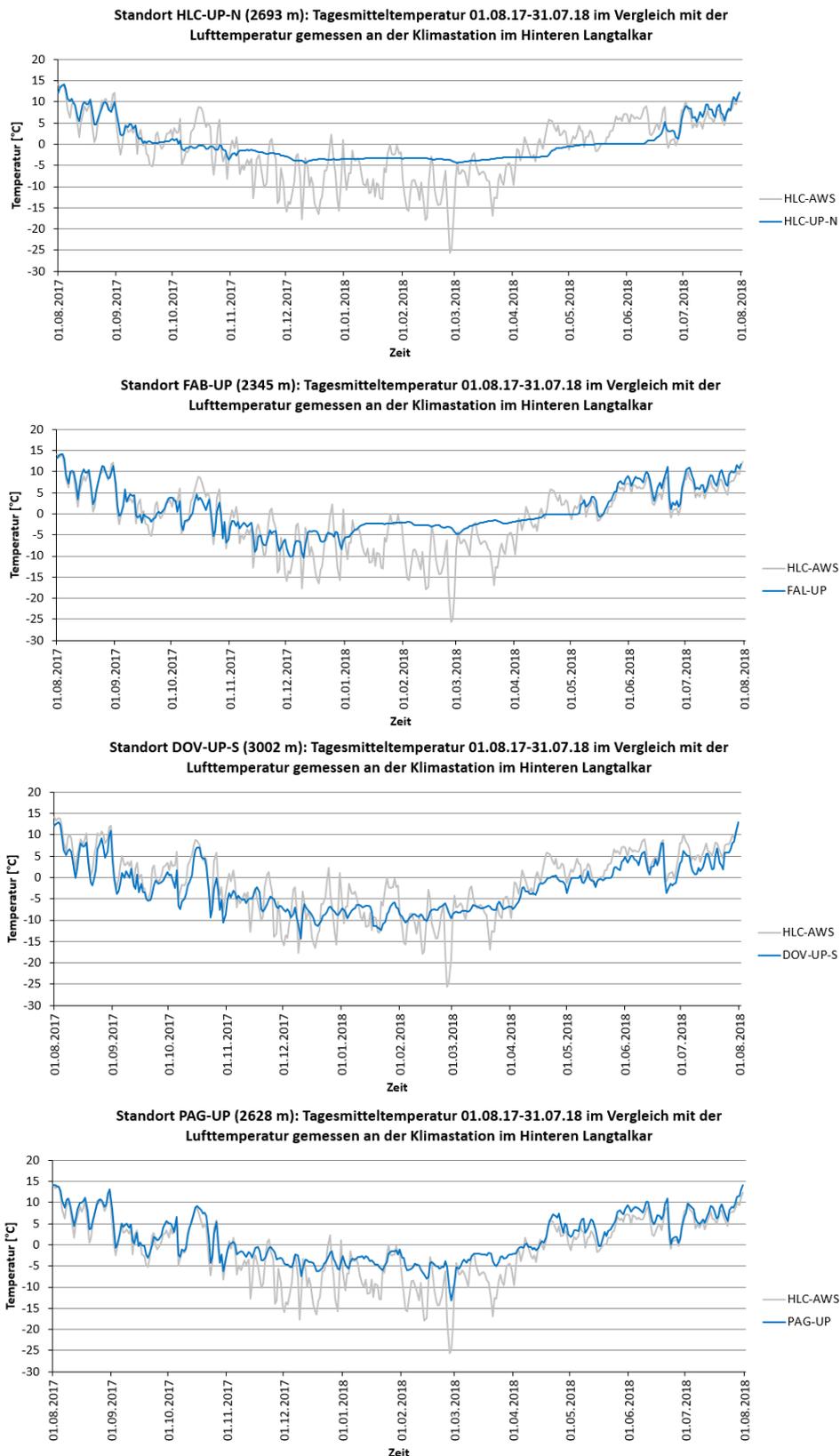


Abb. 6: Tagesmitteltemperaturen der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten für das Messjahr 2017/18 (1. 8. 2017 bis 31. 7. 2018). Messbereiche im Winterhalbjahr mit geringer Schwankung deuten auf Dämpfungseffekte durch eine mächtigere Schneedecke (>80 cm) hin. In grau sind zusätzlich die Tagesmittelwerte der automatischen Klimastation im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS) dargestellt.

Im Jahrgang am ausgewählten Standort im Bereich Fallbichl-Hochtor (FAL-UP) setzt erst mit Anfang Jänner 2018 eine isolierende Schneedecke ein, welche nur bis Anfang Mai vorhanden war. Zumindest in der ersten Winterhälfte konnte hier der Untergrund auskühlen bzw. die Kaltluft in den Untergrund eindringen. Auffallend ist auch, dass die extrem tiefen Temperaturen am 26. 2. 2018 mit 5 Tagen Verspätung auch unter der sicherlich relativ mächtigen Schneedecke registriert wurden. Ab Anfang Mai verläuft die Bodentemperatur gemessen am Standort Fallbichl nahezu parallel zur Lufttemperatur im Hinteren Langtalkar (ca. 11,5 km entfernt).

Am ausgewählten Standort im Untersuchungsgebiet Dösen-Säuleck (DOV-UP-S) ist während des gesamten Messjahres keine wesentliche Dämpfung der Lufttemperatur erkennbar, obschon die Minima im Winter – wie am 26. 2. 2018 – sich kaum in den Bodentemperaturen an diesem Standort niederschlugen. D. h. an diesem Standort ist von einer stets dünnen saisonalen Schneedecke auszugehen, was aufgrund der Windexponiertheit auch zu erwarten ist.

Am letzten hier gezeigten Standort vom Untersuchungsgebiet Pasterze-Burgstall (PAG-UP) zeigt sich prinzipiell ein ähnliches Bild wie am Standort DOV-UP-S mit weitgehend fehlendem Schneedämpfungseffekt. In diesem Fall verläuft aber die Bodentemperaturkurve deutlich paralleler zur Lufttemperatur als am Standort DOV-UPS-S, was beispielsweise auch sehr gut im absoluten Temperaturminimum dieser Periode am 26. 2. 2018 zu erkennen ist. Diesen Sachverhalt zeigt sich auch in einer einfachen Korrelationsanalyse. Während der Korrelationskoeffizient der Tagesmittelwerte im Zeitraum 1. 8. 2017 bis 31. 7. 2018 zwischen DOV-UP-S und HLC-AWS bei $r = 0,89$ liegt, errechnet sich für das Wertepaar PAG-UP und HLC-AWS ein Korrelationskoeffizient von $0,93$.

2.4. Ergebnisse Blockgletscherbewegungs-Monitoring 2017/18

2.4.1. Dösener Blockgletscher

Die Bewegungsraten für den Beobachtungszeitraum 2017/18 wurden durch Epochenvergleich (15. 8. 2017, 14. 8. 2018) ermittelt. Die horizontalen Bewegungsvektoren der 34 Beobachtungspunkte sind in Abbildung 7 graphisch dargestellt. Als Basisstation (= Referenzpunkt) für die differentielle GNSS-Messung im Echtzeitmodus (Real-Time Kinematic/RTK) wurde der Triangulationspunkt (interne Bezeichnung AVS) in der Nähe des Arthur-von-Schmid-Hauses gewählt. Die mittlere Bewegungsrate des Dösener Blockgletschers (Punkte 10-17, 21-23) hat im Vergleich zum Vorjahr um rund 5 cm/Jahr abgenommen. Wurde im Jahr 2016/17 noch ein Mittelwert von 43,2 cm/Jahr ermittelt, so lag dieser im aktuellen Berichtsjahr bei 38,0 cm/Jahr (vgl. Tabelle 5).

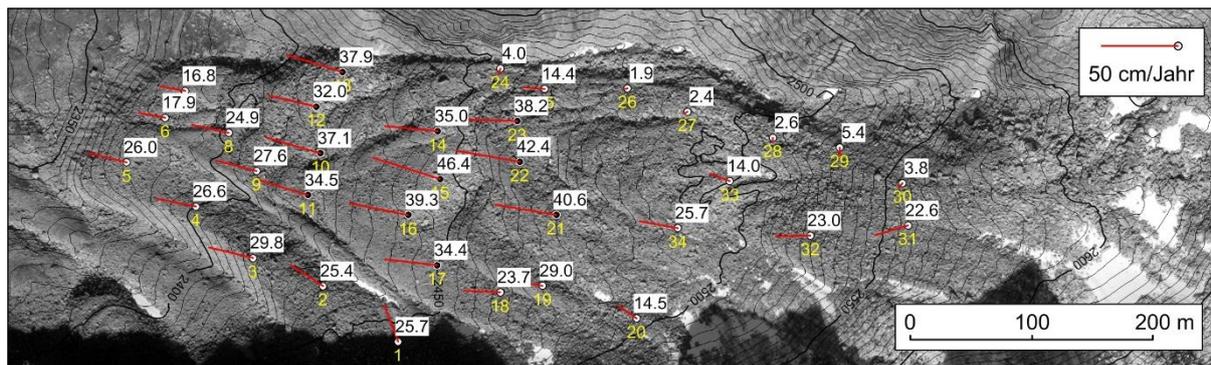


Abb. 7: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Dösender Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2017/18. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (cm/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2\text{-}3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Eine maximale Fließgeschwindigkeit von 46,4 cm/Jahr wurde am Punkt 15 gemessen. Orthophoto 20. 9. 2010 © Land Kärnten.

Anmerkungen zur Kinematik:

Die aktuelle Fließgeschwindigkeit am Dösender Blockgletscher hat sich im Vergleich zum Vorjahr signifikant um 12,9 % (im zentralen Bereich) verringert, d. h. die in den beiden Vorjahren 2016 und 2017 festgestellte Verlangsamung der Blockgletscherbewegung hat sich auch in diesem Jahr fortgesetzt. Die aktuellen Bewegungsraten liegen nunmehr wieder im Bereich jener der Jahre 2003 und 2004, in denen im Mittel 37,4 cm/Jahr gemessen wurden.

2.4.2. Blockgletscher Hinteres Langtalkar

Die Bewegungsraten für den Beobachtungszeitraum 2017/18 am Blockgletscher im Hinteren Langtalkar wurden durch Epochenvergleich (18. 8. 2017, 17. 8. 2018) ermittelt. Die horizontalen Bewegungsvektoren der 37 noch vorhandenen Beobachtungspunkte sind in der Abbildung 8 graphisch dargestellt. Der Punkt 25 ist im Beobachtungszeitraum 2015/16 in den weiter unten liegenden Steilbereich abgerutscht und konnte daher nicht mehr gemessen werden. Als Basisstation für den RTK-Einsatz diente der Festpunkt 7. Die mittlere Bewegungsrate des oberen Bereiches (Punktgruppe A, Punkte 10-17, 37) betrug 16,3 cm/Jahr, was eine deutliche Verlangsamung gegenüber dem Vorjahr bedeutet (2016/17: 19,4 cm/Jahr). Die mittlere Bewegungsrate des unteren Bereiches (Punktgruppe B, Punkte 23-25, 27-31) hat sich hingegen weiter von 4,60 m/Jahr im Messjahr 2016/2017 auf 4,77 m/Jahr im Messjahr 2017/18 erhöht (vgl. Tabelle 6).

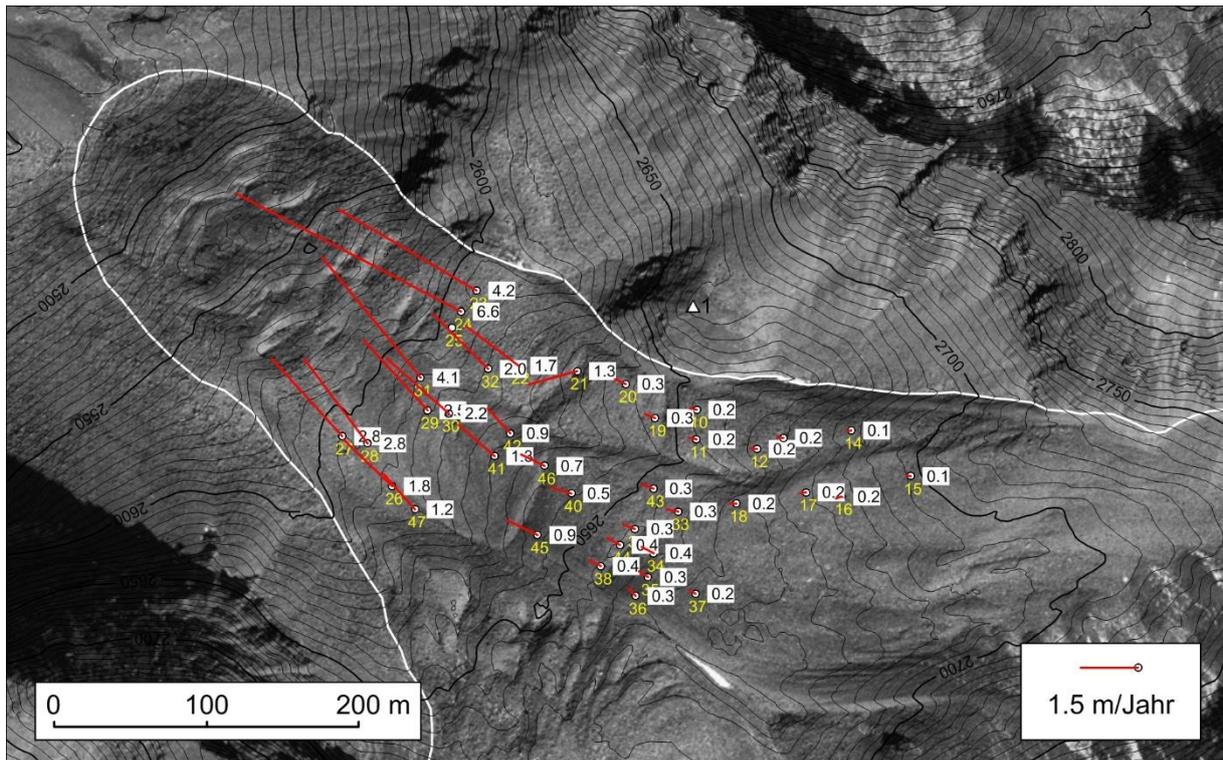


Abb. 8: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 37 am Blockgletscher Hinteres Langtalkar mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2017-2018. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (m/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2-3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Eine maximale Fließgeschwindigkeit von 6,64 m/Jahr wurde am Punkt 24 gemessen. Der Punkt 25 ist im Beobachtungszeitraum 2015/16 in den weiter unten liegenden Steilbereich abgerutscht und konnte daher nicht mehr gemessen werden. Die Punkte 31 und 45 werden aufgrund ihrer Verkippung in zwei unterschiedlichen Punktdefinitionen eingemessen. Orthophoto 28. 8. 2012 © Land Kärnten.

Anmerkungen zur Kinematik:

Mit den hohen Bewegungsraten geht weiterhin eine morphologisch gut beobachtbare Destabilisierung der Blockgletscheroberfläche einher. Die Messung der Punkte im Einflussbereich der unteren Rutschzone ist weiterhin nur mit einem erheblichen Gefahrenpotential möglich. Die aktuell festgestellten Bewegungsraten haben sich im Vergleich zum vorjährigen Beobachtungszeitraum signifikant (Punktgruppe A mit 16,0 %) verringert. Die diesbezügliche Einschätzung für die Punktgruppe B ist unsicher, da dieser Bereich bereits stark von lokalen Rutschungsprozessen beeinflusst ist. Unter Ausklammerung des verloren gegangenen Punktes 25 und des im Vorjahr stark beschleunigten Punktes 31 ergibt sich hier eine geringfügige Zunahme der mittleren Bewegungsrate um 3,6 %. Größere Massenumlagerungen/Rutschungen können im unteren hoch aktiven Teil des Blockgletschers für die nächsten Jahre weiterhin nicht ausgeschlossen werden.

2.5. Massenbewegungs-Monitoring 2017/18

2.5.1. Blockgletscher Hinteres Langtalkar

Die TLS-Messungen im Bereich des Blockgletschers wurden im Jahr 2018 ordnungsgemäß durchgeführt. Die Oberflächenmessungen im Hinteren Langtalkar finden seit 2000 vom Standpunkt HLK-front (2454,709 m) am unteren Bereich des

Blockgletschers statt. Ein entsprechendes Messnetz – bestehend aus einem Scanstandpunkt und fünf Referenzpunkten – wurde 2000 eingerichtet (Bauer et al. 2003). Die Fehlerkomponenten aus dem Vergleich stabiler Bereiche (Felsbereiche) sind Tabelle 3 zu entnehmen. Die Positionen des Scanstandpunktes (STP HLK/51) sowie der fünf Referenzpunkte sind den beiden angehängten ArcGIS-Shapefiles pf_moni_nphktk_tls_UTM-33N.shp (Projektion UTM 33N) oder pf_moni_nphktk_tls_BMN-M31.shp (Projektion BMN M31) zu entnehmen.

Tabelle 3: TLS-Messungen am Blockgletscher Hinteres Langtalkar: Vertikaler [z]-Medianfehler (m) im Vergleich stabiler Bereiche im Scanfeld zwischen den Epochen und berechnete Fehlertoleranz (aus Distanzmess- und Lagefehler). Mediane der vertikalen Veränderung zweier Teilgebiete (area1, area2, Lage siehe Abb. 20) für die verschiedenen Epochen sind ebenso angegeben.

Blockgletscher Hinteres Langtalkar (Angaben in m)						
Distanzfehler	0,022	0,027	0,039	-	Median vertikale Veränderung	
Epoche	Stabil 1	Stabil 2	Stabil 3			
	Höhenfehler			Nicht signifikant	Bereich/ Area 1	Bereich/ Area 2
2017/18	-0,061	-0,013	-	-0,10 bis 0,10	+2,21	+2,11
2016/17	-0,001	0,007	0,045	-0,10 bis 0,10	+1,83	+1,80
2014/16	0,004	0,005	0,001	-0,10 bis 0,10	+2,02	+1,72
2013/14	-0,007	-0,028	-0,015	-0,10 bis 0,10	+1,68	+1,51
2012/13	0,096	0,023	0,008	-0,10 bis 0,10	+0,95	+1,20
2011/12	-0,095	-0,130	-0,047	-0,13 bis 0,13	+0,41	+0,62

Detaillierte Ergebnisse des Berichtsjahres 2017/18 sind dem Kapitel 3.3.1. zu entnehmen, da ein langjähriger Vergleich aussagekräftiger ist. Wichtig ist an dieser Stelle der Hinweis darauf, dass die Blockgletscherstirn sich im Jahr 2017/18 weiter deutlich nach vorne geschoben hat. Dies ist eindrucksvoll in Abbildung 9 ersichtlich, worin die Distanz zwischen der Blockgletscherstirn und einem stabilen Block für 2017 und 2018 visualisiert ist. Diese Vorstoßtendenz ist deutlich auch direkt an der Stirn erkennbar, wo das Schuttmaterial des Blockgletschers die angrenzende alpine Grasheide Bulldozer-artig weiter aufschob (Abbildung 10).



Abb. 9: Gegenüberstellung der Position der Stirn des Blockgletschers Hinteres Langtalkar 2017 und 2018. Der massive Verstoß des Blockgletschers ist sowohl an der Position der Stirn als auch an der Vielzahl neuer Blöcke im Rasenbereich sichtbar. Der rote Pfeil symbolisiert den abnehmenden Abstand der Blockgletscherstirn zum Fixpunkt 3 (Foto links 5. 8. 2017, Foto rechts 4. 8. 2018, beide M. Avian).



Abb. 10: Deutliche Aufschiebung der alpinen Grasheide durch die Bulldozer-artige Wirkung der vorstoßenden Blockgletscherstirn im Hinteren Langtalkar 2017 und 2018 (Foto links 22. 8. 2017, Foto rechts 1. 8. 2018, beide A. Kellerer-Pirklbauer).

2.5.2. Felssturzbereiche Mittlerer und Hoher Burgstall

Die Messungen fielen 2017 aufgrund der Wetterbedingungen bzw. der sehr früh einsetzenden Schneebedeckung aus (Kellerer-Pirklbauer et al. 2018 a). Auch im Jahr 2018 waren die Bedingungen für TLS-Messungen erneut nicht optimal. Bei hochsommerlichem Gewitter mit heftigem Graupelschauer war die Durchführung der Messungen vom Standpunkt BUG aus eine Herausforderung, die jedoch gemeistert werden konnte. Ursprünglich war es 2018 noch geplant, den Bereich mit den aktiven Felsstürzen von 2017 (Zustiegsroute Oberwalderhütte) von einem zweiten, weiter nördlich gelegenen Scannerstandpunkt aus erstmals zu vermessen, was jedoch witterungsbedingt unmöglich war. Die Positionen des Scanstandpunktes (STP BUG) sowie der sechs Referenzpunkte sind den beiden angehängten ArcGIS-Shapefiles pf_moni_nphtkt_tls_UTM-33N.shp (Projektion UTM 33N) oder pf_moni_nphtkt_tls_BMN-M31.shp (Projektion BMN M31) zu entnehmen.

Tabelle 4: Vertikaler Medianfehler [m] im Vergleich stabiler Bereiche im Scanfeld zwischen den Epochen (Median der vertikalen Veränderung) und berechnete Fehlertoleranz (aus Distanzmess- und Lagefehler) für die Scanbereiche Hoher und Mittlerer Burgstall

Hoher Burgstall (Angaben in m)				
Epoche	Stabil 1	Stabil 2	Stabil 3	
Distanzfehler	±0,021	±0,024	±0,027	
	Höhenfehler			Fehlerbereich
2016/18	0,003	0,002	0,009	-0,01 bis 0,01
2015/16	0,001	-0,010	-0,022	-0,04 bis 0,04
2014/15	-0,044	-0,048	-0,022	-0,05 bis 0,05
2013/14	0,008	0,013	0,011	-0,04 bis 0,04
2012/13	0,034	0,042	0,039	-0,05 bis 0,05

Mittlerer Burgstall (Angaben in m)				
Epoche	Stabil 1	Stabil 2	Stabil 3	
Distanzfehler	±0,065	±0,063	±0,061	
	Höhenfehler			Fehlerbereich
2016/18	-0,063	0,182	0,015	-0,20 bis 0,20
2015/16	0,006	-0,021	0,154	-0,16 bis 0,16
2014/15	-0,009	-0,177	0,165	-0,23 bis 0,23
2013/14	0,068	-0,053	0,126	-0,16 bis 0,16
2012/13	0,044	-0,091	0,144	-0,18 bis 0,18

Die Oberflächenmessungen am Mittleren Burgstall finden seit 2010 vom Standpunkt BUG (2803,19 m) – am rechten Rand des Wasserfallwinkelkeeses aus – statt. Ein Messnetz – bestehend aus einem Scanstandpunkt und sechs Referenzpunkten – wurde im selben Jahr eingerichtet (Abbildung 11). Die Fehlerkomponenten aus dem Vergleich stabiler Bereiche (Felsbereiche) sind Tabelle 4 zu entnehmen. Für die detaillierten Ergebnisse des Berichtsjahres 2017/18 wird auf Kapitel 3.3.2. verwiesen, in dem diese im langjährigen Kontext dargestellt werden.

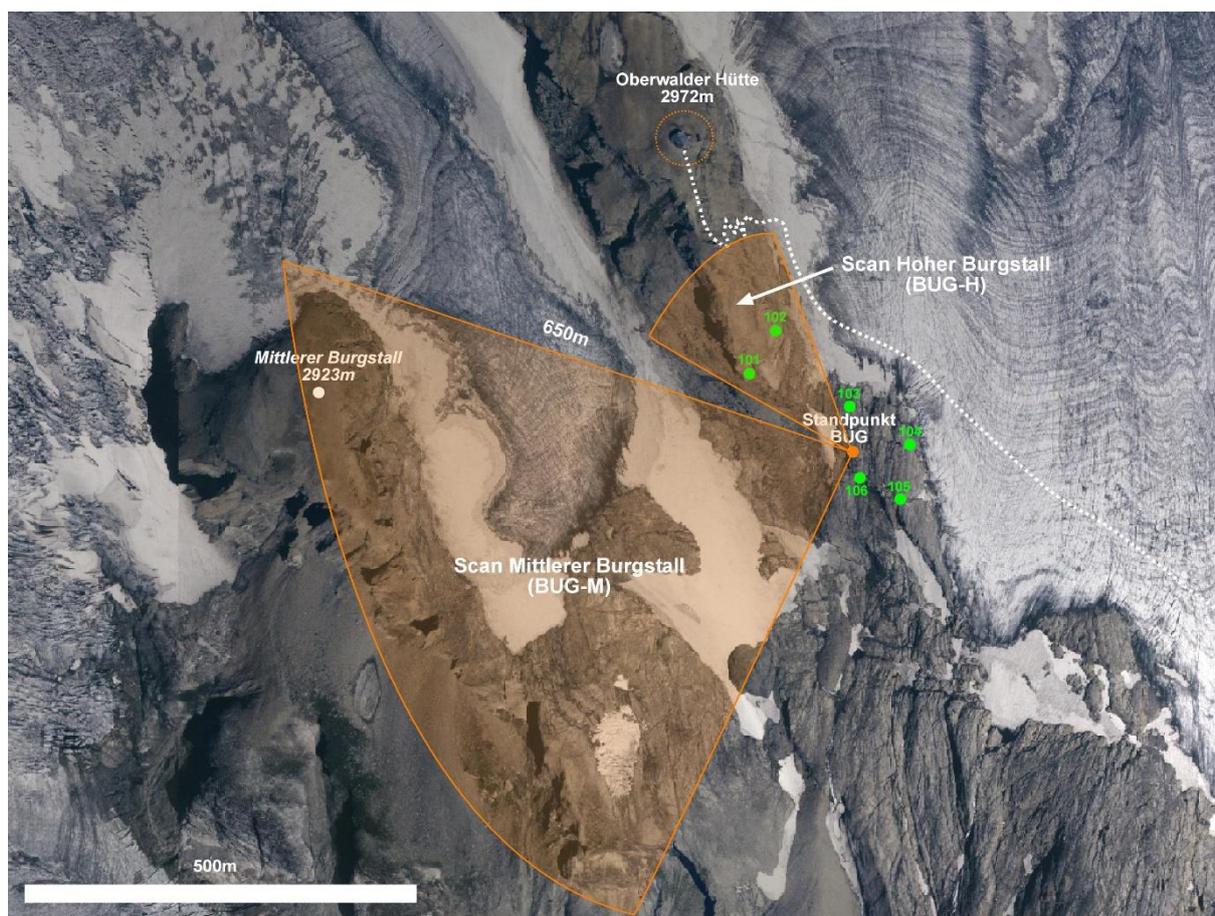


Abb.11: Messkonfiguration im Bereich des Standpunktes Burgstall (BUG: 2803,19 m) mit den zwei Scanbereichen der Messprojekte Mittlerer Burgstall BUG-M und Hoher Burgstall BUG-H (grün: Targetpunkte) (Orthofoto Nationalpark Hohe Tauern 1998).

2.6. Lufttemperatur-Monitoring 2017/18

Wie in Kapitel 2.1. ausgeführt, gab es mit der automatischen Klimastation am Dösener Blockgletscher leider auch in diesem Jahr technische Probleme. Diese konnten gemeinsam mit Pilz Umweltmesstechnik gelöst werden, sodass die Klimadatenaufzeichnung nunmehr wieder problemlos funktionieren sollte. Erfreulicherweise zeichnete die Klimastation im Hinteren Langtalkar ohne Probleme alle Klimadaten im Messjahr 2017/18 auf. Von den halbstündlich gemessenen Parametern (Kapitel 2.1.) wird im Folgenden auf die Lufttemperatur fokussiert, da diese für die Bodentemperatur und somit für den Permafrost am bedeutendsten ist.

Abbildung 12 zeigt den Gang der Tagesmitteltemperatur an der Klimastation im Hinteren Langtalkar im Zeitraum 1. 8. 2017–31. 7. 2018. Die höchsten Tagesmittelwerte erreichten im Sommer 14,2 °C, die kältesten hingegen -25,6 °C (am 26. 2. 2018). Dies ergibt eine Amplitude von 39,8 °C. Ebenfalls in dieser Abbildung dargestellt sind die Monatsmittelwerte desselben Zeitraumes. Klar ersichtlich sind hierin der sehr kalte Februar 2018 (-12,7 °C), die relativ kalten Monate Dezember und März, der relativ milde Jänner sowie die überdurchschnittlich warmen Monate April bis Juli. Der wärmste Monat in dieser Messperiode war der August 2017 mit +8,6 °C woraus sich eine Jahresschwankung der Temperatur von 21,3 °C errechnet. Diese hohe Amplitude ergibt sich primär aus den außergewöhnlich tiefen Temperaturen des Februars 2018 im gesamten Alpenraum (Kapitel 2.2.).

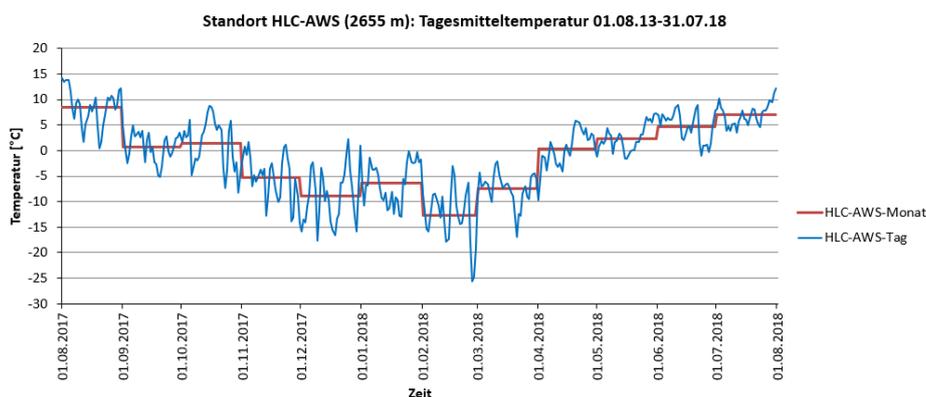


Abb. 12: Gang der Tagesmittel- sowie der Monatsmitteltemperatur an der Klimastation im Hinteren Langtalkar (2655 m) zwischen 1. 8. 2017 und 31. 7. 2018. Die Mitteltemperatur in diesem Zeitraum beträgt -1,27 °C.

2.7. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse 2017/18

Die ermittelten Bodentemperaturen waren 2017/18 an den meisten Messstellen höher als in den beiden Beobachtungszeiträumen davor und signalisieren somit Bedingungen, die der Erhaltung oder Neubildung von Permafrost weniger günstig sind. Dies erklärt sich dadurch, dass sich im Gegensatz zu 2015/16 und 2016/17 an vielen Permafrost-Standorten schon früh im Herbst eine Winterschneedecke ausbildete, die das Temperaturgeschehen im Untergrund, von dem in der Luft entkoppelte und somit die Auskühlung des Untergrundes behinderte (Kap. 2.2). Ein wenig kompensiert wurde die hierdurch gegebene Permafrost-Ungunst zumindest lokal durch die lange Schneedeckendauer, die sich trotz des warmen Frühlings und Frühlommers an den schneereichen Standorten einstellte.

Die Bewegungsraten an den untersuchten Blockgletschern gingen wie schon in den beiden letzten Jahren erneut zurück, sind aber immer noch auf einem relativ hohen Niveau. Der Rückgang der Bewegung ist mit dem in den beiden letzten Jahren ermittelten verringerten Temperaturniveau im Untergrund zu erklären, wobei sich die 2017/18 wieder etwas höheren Temperaturen wegen der für den Permafrost typischen Verzögerungseffekte noch nicht in den Bewegungsraten widerspiegeln. Hervorzuheben ist jedoch erneut die andauernde Vorstoßdynamik der Stirn des hochaktiven Blockgletschers im Hinteren Langtalkar.

Die Steinschlag- und Felssturzdynamik war im Beobachtungszeitraum an den untersuchten Flächen unauffällig.

3. Zusammenfassende Ergebnisse im Gesamtprojektzeitraum und darüber hinaus

3.1. Ergebnisse Bodentemperatur-Monitoring

Die an den Standorten ermittelten Jahresmitteltemperaturen für die fünf Berichts- bzw. Messjahre 2013/14 bis 2017/18 sind in Abbildung 13 – aufgeteilt auf die vier Teilgebiete – dargestellt. Standorte, die mit ND (= no data) gekennzeichnet sind, weisen Datenlücken auf, die keine Ermittlung von entsprechenden Mittelwerten zuließen. Alle vier Teildiagramme sind auf der Ordinate gleich skaliert, um sie besser vergleichbar zu machen.

Wie diesen Graphiken zu entnehmen ist, liegen die Jahresmitteltemperaturen vieler Standorte nahe dem Gefrierpunkt, was bedeutet, dass saisonaler Frost und häufige Frostwechsel die potentielle physikalische Verwitterung des Gesteins fördern. Abbildung 13 zeigt auch, dass die Maxima und Minima der Jahresmitteltemperaturen vielfach auf unterschiedliche Jahre fallen. Dies belegt die für die Beurteilung von Veränderungen im Permafrost sowie im saisonalen Frost wichtige Tatsache, dass die Lufttemperatur nur wenig mit den Temperaturen im Untergrund korreliert, sondern diese stark von anderen lokalen Faktoren beeinflusst werden. Hierbei hat die saisonale Schneedecke und ihrer Veränderung sowohl über das Jahr als auch zwischen mehreren Jahren die größte Bedeutung.

Es zeigt sich, dass im Messjahr 2016/17 an den meisten Standorten die tiefsten Jahresmittelwerte gemessen wurden, im Gebiet Fallbichl-Schareck war dies etwa an zwei von drei Standorten der Fall. Beachtenswert ist auch die Tatsache, dass die Jahresmittelwerte in den Gebieten Fallbichl-Schareck und Pasterze-Burgstall jeweils um weniger als 1 °C schwankten. Ganz anders verhält sich in den beiden anderen Gebieten, wo z. T. Unterschiede in den Jahresmittelwerten von über 2 °C (Maximum am Standort DOV-UP-N mit 2,3 °C) in den fünf Jahren zu verzeichnen waren. Die höchsten Jahresmittelwerte wurden an 18 von 29 Stationen mit entsprechenden Daten hingegen im Messjahr 2014/15 gemessen. Dies zeigt einmal mehr die Wichtigkeit von längeren Datenreihen bei der Erfassung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Hochgebirge.

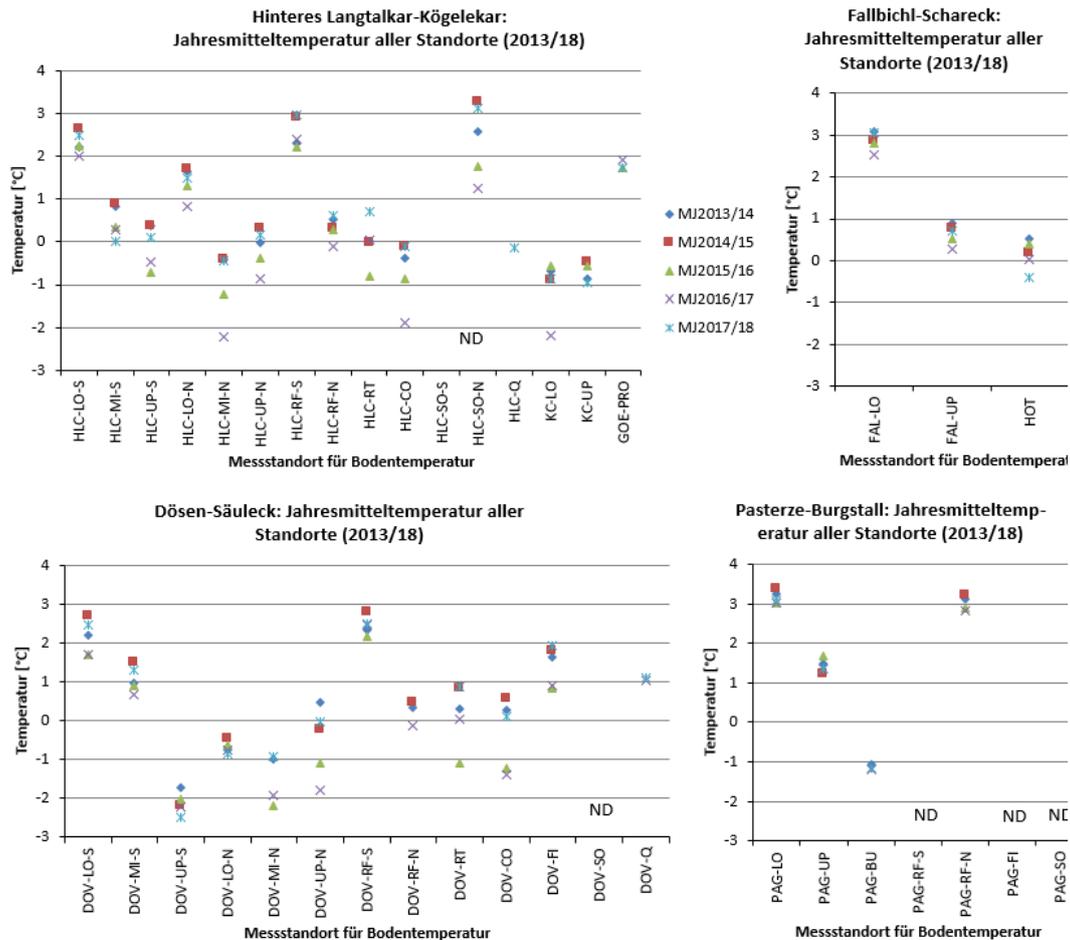


Abb. 13: Jahresmitteltemperatur an/nah der Bodenoberfläche (Zeitraum 1.8. bis 31.7. des Folgejahres) aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten für die fünf Messjahre (MJ) 2013/14, 2014/15, 2015/16, 2016/17 und 2017/18. Nur Messjahre mit lückenlosen Datenreihen sind dargestellt. Standorte, die 2017 oder 2018 aufgelassen wurden (siehe Text), sind mit ND (no data) gekennzeichnet.

Auch in der Abbildung 14 werden die Jahresmittelwerte aller Standorte mit entsprechenden Datenreihen einander gegenübergestellt. Die Darstellungsweise ist so gewählt, dass Datenpunkte, die oberhalb der strichlierten Linie liegen, Standorte zeigen, an denen die Jahresmitteltemperatur im Messjahr 2017/18 höher als im jeweiligen Vergleichsjahr war. Wie dieser Abbildung zu entnehmen ist, waren die thermischen Bedingungen in den Messjahren 2013/14, 2014/15 und 2017/18 einander sehr ähnlich, während in den beiden Messjahren 2015/16 und 2016/17 deutlich tiefere Bodentemperaturen registriert wurden. Dies hat auch mit der generellen Schneearmut in den beiden letztgenannten Wintern und somit mit den prinzipiell besseren Auskühlungsbedingungen zu tun.

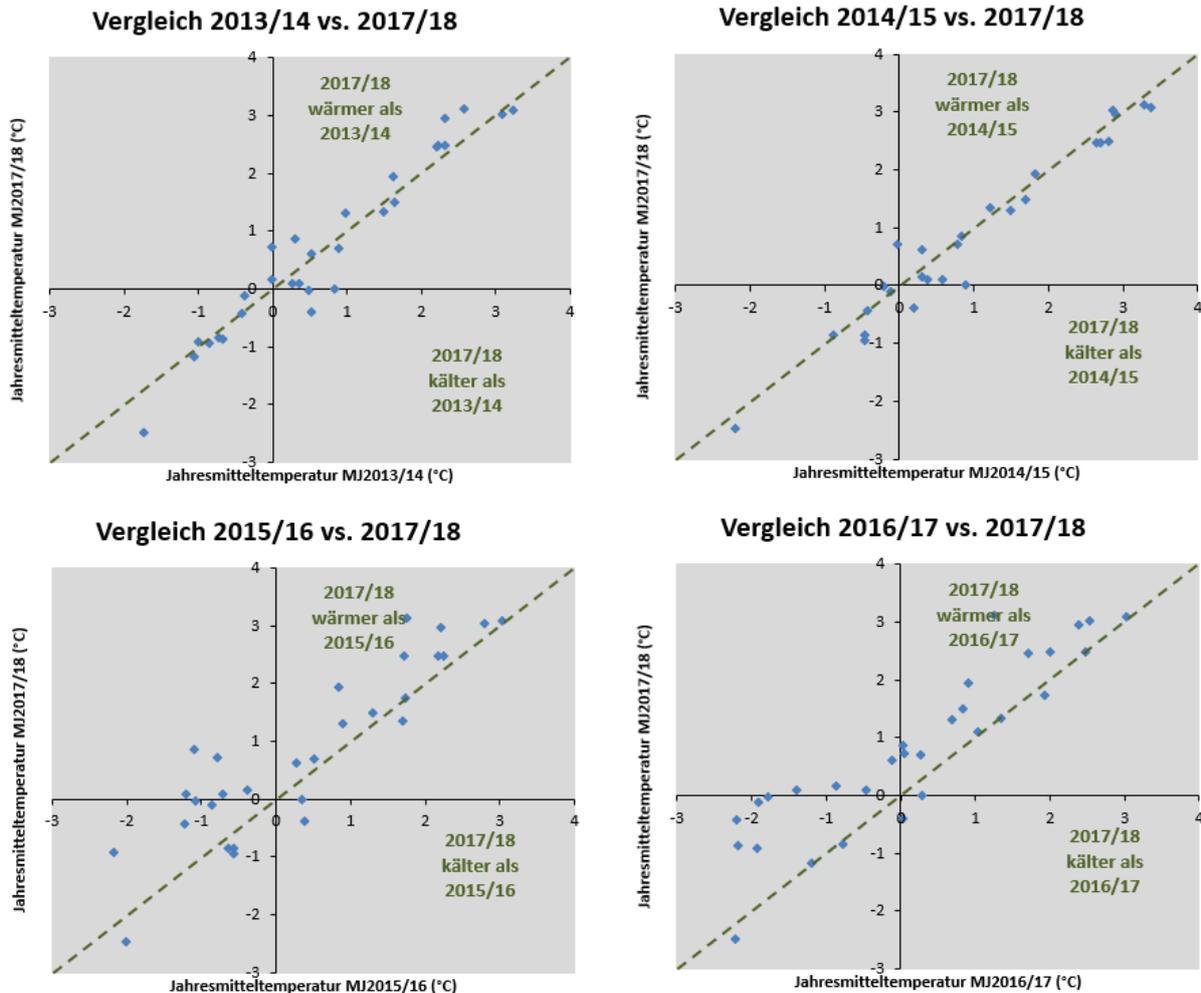


Abb. 14: Gegenüberstellung der Jahresmittelwerte von 2013/14, 2014/15, 2015/16, 2016/17 mit jenen von 2017/18 an allen Stationen mit entsprechenden Daten.

Abbildung 15 zeigt die Tagesmitteltemperaturen der vier in Tabelle 2 grau hinterlegten Standorte (einer pro Untersuchungsgebiet) im Zeitraum 1. 8. 2013 bis 31. 7.2018 (fünf Messjahre). Zu den einzelnen Graphiken ist Folgendes anzumerken:

- Im Jahrgang am ausgewählten Standort im Hinteren Langtalkar-Kögelekar (HLC-UP-N) ist klar zu erkennen, dass eine winterliche Schneedecke in allen fünf Winter sich dämpfend auf Schwankungen der Bodentemperatur auswirkt, wobei diese dämpfende Wirkung 2015/16 und 2016/17 deutlich geringer ausfiel und daher tiefere Temperaturen bei gleichzeitig höherer Schwankung gemessen wurden.
- Im Jahrgang am ausgewählten Standort im Bereich Fallbichl-Hochtor (FAL-UP) sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Messjahren sehr markant (Abb. 15, zweites Diagramm). Während der erste (2013/14) und der letzte Winter (2017/18) sich durch die starke Dämpfung der Temperaturgänge als relativ schneereich zu erkennen geben, waren die drei anderen Winter deutlich schneeärmer. Dies äußert sich in einem zur Lufttemperatur weitgehend parallelen Verlauf der Bodentemperatur-Kurve. Die bei weitem tiefsten Tagesmitteltemperaturen wurden im Winter 2016/17 erreicht.

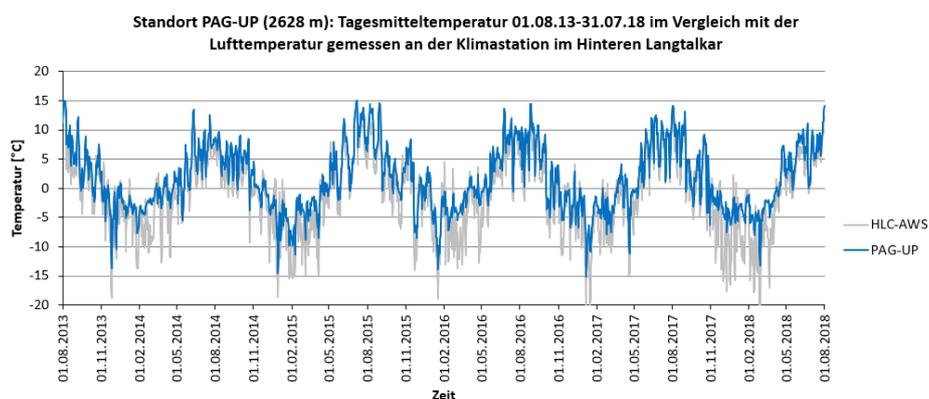
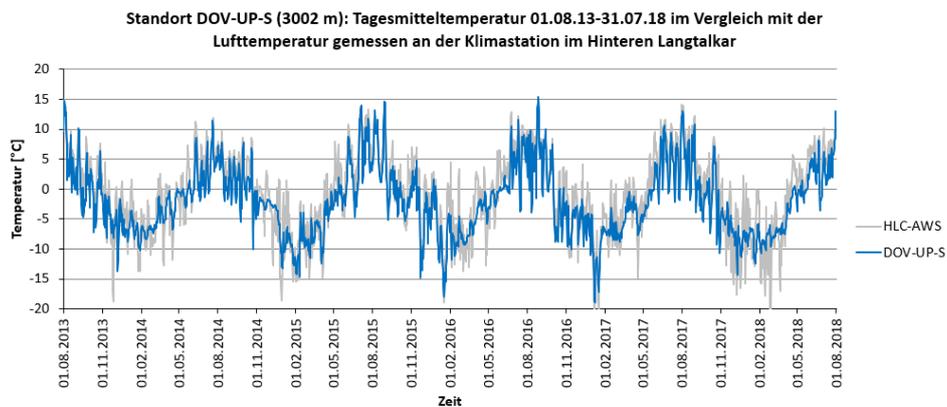
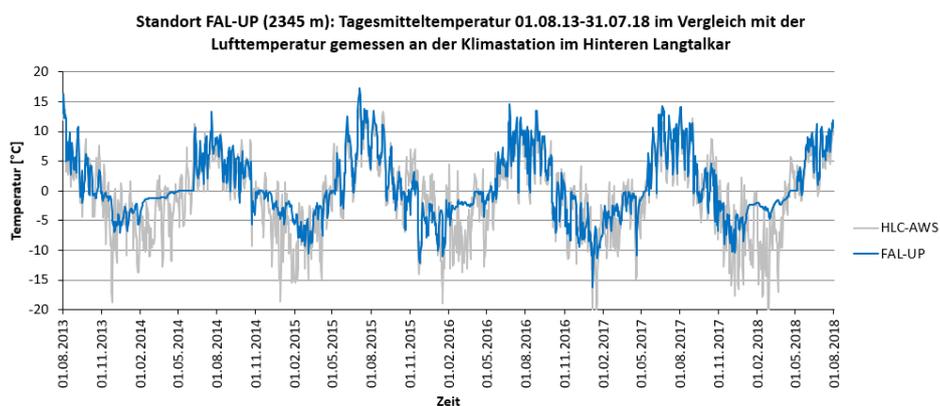
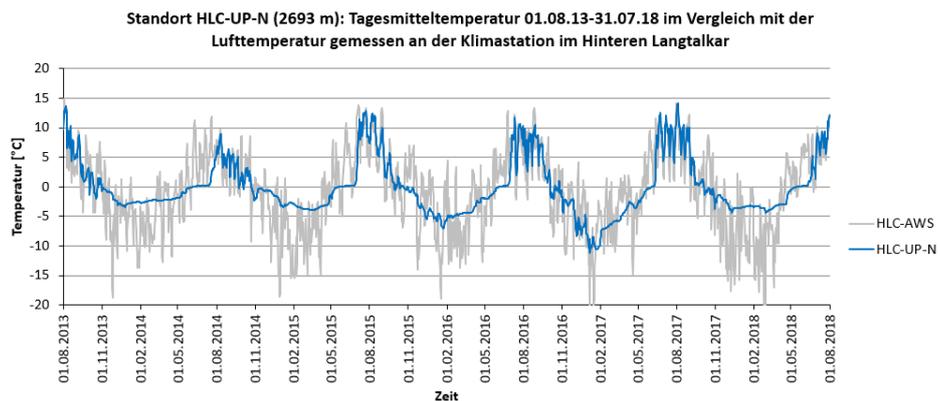


Abb. 15: Tagesmitteltemperaturen der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten für den Zeitraum 1. 8. 2013 bis 31. 7. 2018 sowie deren Vergleich zur Lufttemperatur am Standort HLC-AWS.

- Am ausgewählten Standort im Untersuchungsgebiet Dösen-Säuleck (DOV-UP-S) ist in keinem der fünf Messjahre eine wesentliche Dämpfung der Lufttemperatur durch eine Schneedecke zu erkennen. Die Bodenoberflächentemperatur zeigt deutliche Schwankungen über den gesamten Messzeitraum mit einem Minimum von $-19,0\text{ °C}$ im Winter 2016/17 und einem Maximum von $15,4\text{ °C}$ im Sommer 2016.
- Ganz ähnlich liegen die Verhältnisse am letzten hier detailliert gezeigten Standort vom Untersuchungsgebiet Pasterze-Burgstall (PAG-UP; Abb. 15, unten). Auch hier kam es in keinem der fünf Jahre zur Ausbildung einer Schneedecke, welche eine vollständige Entkoppelung der Luft- von der Bodentemperatur hätte bewirken können. Die Folge sind erneut hohe Temperaturschwankungen über den gesamten Messzeitraum, worin die gemessenen Minima bei jeweils rund -15 °C lagen.

Insgesamt repräsentieren die in Abbildung 15 dargestellten Temperaturkurven gut das Spektrum von Bodentemperatur-Messstandorten im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten von solchen mit dämpfender winterlicher Schneedecke in allen (auch in schneearmen) Jahren bis zu solchen, an denen selbst in schneereichen Wintern eine länger anhaltende Schneedecke fehlt.

Die Abbildung 16 veranschaulicht die langjährige Entwicklung der Temperatur an denselben vier ausgewählten Standorten wie in den Abbildungen 6 und 15. Zu diesem Zweck sind die Jahresmittel der Bodentemperaturen aller einzelnen Jahre seit Installierung des jeweiligen Messstandortes eingetragen. Da die Einrichtung des Messnetzes erst im August oder September 2006 erfolgte, gibt es für keinen Standort Jahresmitteltemperaturen für das erste Messjahr 2006/07 (da ja das Messjahr mit 1. 8. bis 31. 7. des Folgejahres definiert ist). Alle nachfolgend als „Trends“ geschilderten Entwicklungen sind statistisch nur zum Teil signifikant, was die Sinnhaftigkeit der Fortführung dieser Zeitreihen unterstreicht. Zu den Graphiken ist Folgendes anzumerken:

- Der Standort HLC-UP-N (Hinteres Langtalkar-Kögelekar) lässt über die Jahre einen Erwärmungstrend erkennen, obwohl die Werte nur um ca. 1 °C schwanken. Deutliche „Ausreißer“ in dieser Entwicklung sind aber die Messjahre 2015/16 und insbesondere 2016/17, in welchem der tiefste Wert in der 10-jährigen Messreihe registriert wurde.
- Der Standort FAL-UP (Fallbichl-Schareck) lässt demgegenüber einen schwach negativen Trend erkennen; die Werte schwanken um $1,1\text{ °C}$ und werden offensichtlich besonders stark von wechselnden Schneesverhältnissen beeinflusst (wie schon in Zusammenhang mit Abbildung 15 erläutert).
- Am Standort DOV-UP-S (Dösen-Säuleck) bleibt die Temperatur in allen Jahren deutlich unter 0 °C . Die Schwankungsbreite von $1,7\text{ °C}$ ist jedoch größer als bei den anderen dargestellten Standorten. Der Erwärmungstrend an diesem Standort ist deutlicher – und statistisch signifikant – als der am Standort HLC-UP-N.

- Ähnlich verhält es sich am allgemein schneearmen Standort PAG-UP (Pasterze-Burgstall). Die Jahresmitteltemperatur bleibt immer deutlich über 0 °C und weist Schwankungen von 1,2 °C auf, wobei der Trend der Jahresmitteltemperatur jenem des Standortes DOV-UP-S ähnelt und ebenso signifikant ist.

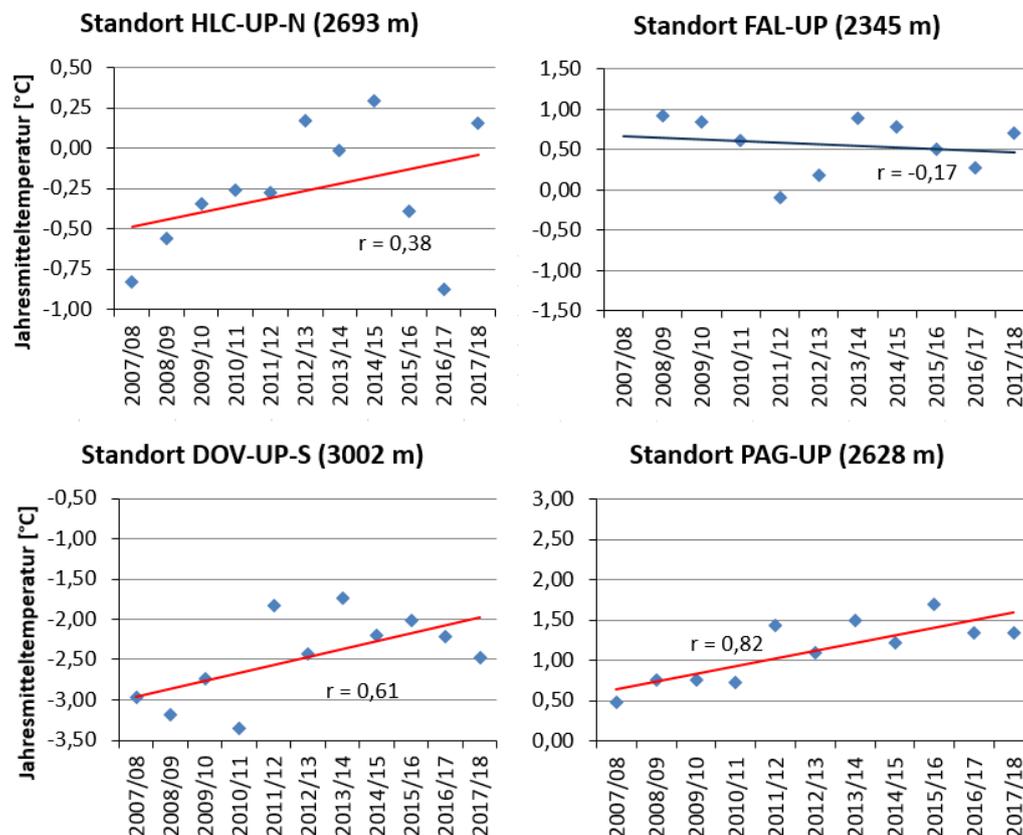


Abb. 16: Jahresmitteltemperatur der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten für den Zeitraum 1. 8. bis 31. 7. des Folgejahres für die Messjahre von 2007/2008 bis 2017/18. Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten sind dargestellt. Jene für DOV-UP-S und PAG-UP sind auch statistisch signifikant.

3.2. Ergebnisse Blockgletscherbewegungs-Monitoring

3.2.1. Dösener Blockgletscher

Die Bewegungsmessungen am Dösener Blockgletscher beziehen sich auf ein geodätisches Datum, das durch 12 markierte, stabile Punkte im Nahbereich des Blockgletschers definiert ist. Im Jahr 2014 erfolgte die Umstellung der geodätischen Messung von der konventionellen Messung mittels Totalstation auf RTK-GNSS-Technologie. Im Rahmen der alljährlichen Vermessung werden ab 2014 nur mehr die Bewegungsraten der 34 am Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte bestimmt. Tabelle 5 fasst die zeitliche Änderung des Fließverhaltens des Blockgletschers durch Angabe von Mittel- und Maximalwerten der Bewegungsraten (Fließgeschwindigkeit) für den Zeitraum von 2012 bis 2018 zusammen.

Tabelle 5: Bewegungsraten am Dösener Blockgletscher für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2012 bis 2018. Die Mittelwerte wurden aus den Bewegungsraten der zentralen Punkte 10–17 und 21–23 gerechnet. Die Maximalwerte wurden jeweils im Punkt 15 festgestellt.

Wert	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18
Mittelwert (cm/Jahr)	37,0	44,0	53,6	52,0	43,2	38,0
Maximalwert (cm/Jahr), immer Punkt 15	44,9	52,2	65,9	64,7	53,1	46,4

3.2.2. Blockgletscher Hinteres Langtalkar

Am Blockgletscher im Hinteren Langtalkar erfolgte ebenfalls im Jahr 2014 die in Kapitel 3.3.1. angesprochene Umstellung von der traditionellen Vermessung auf die moderne Satellitenpositionierung. Das geodätische Datum an diesem Blockgletscher ist durch insgesamt 15 Festpunkte definiert. Für die Charakterisierung der zeitlichen Änderung des Fließverhaltens des Blockgletschers Hinteres Langtalkar wurden für zwei ausgewählte Punktgruppen A (oberer Bereich) und B (unterer Bereich) die Mittel- und Maximalwerte der Bewegungsraten (Fließgeschwindigkeit) in Tabelle 6 für den Zeitraum von 2012 bis 2018 zusammengestellt.

Tabelle 6: Bewegungsraten am Blockgletscher Hinteres Langtalkar für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2012 bis 2018 für zwei ausgewählte Punktgruppen A (oberer Bereich) und B (unterer Bereich). Die Mittelwerte wurden aus den Bewegungsraten aller Punkte der jeweiligen Punktgruppe gerechnet. Die Maximalwerte beziehen sich auf die jeweiligen Punktgruppen.

Punktgruppe A (Punkte 10-17, 37)

Wert	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18
Mittelwert (cm/Jahr)	17,7	20,4	28,9	27,3	19,4	16,3
Maximalwert (cm/Jahr), immer Punkt 11	21,0	25,9	33,2	32,6	22,3	20,6

Punktgruppe B (Punkte 23-25, 27-31)

Wert	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18
Mittelwert (m/Jahr)	3,53	4,52	6,00	6,00	4,60	4,77
Maximalwert (m/Jahr)	4,22 (25)	5,92 (25)	8,40 (25)	9,83 (31)	5,66 (24)	6,64 (24)

Anmerkung: Bei den Mittelwertberechnungen ab 2015/16 wurden nur die Punkte 23, 24, 27 und 28 berücksichtigt. Die ermittelte Relativänderung wurde quantitativ auf einen sinnvollen Tabellenwert umgerechnet.

3.2.3. Oberflächenbewegung im Vergleich

Die vergleichende Darstellung der zeitlichen Änderung der Fließgeschwindigkeit der beiden untersuchten Blockgletscher ist Gegenstand der Abbildung 17. Für Vergleichszwecke wurden die fehlenden mittleren jährlichen Bewegungsraten am Dösener Blockgletscher für die Zeiträume 2002/03 und 2003/04 aus dem gemessenen

zweijährigen Mittelwert und entsprechenden Jahreswerten, welche am Blockgletscher Hinteres Langtalkar gemessen wurden, abgeleitet (vgl. Bericht 2013/14, Kellerer-Pirklbauer et al. 2015). Aus dem Bild der Geschwindigkeitsgraphen ist gut zu erkennen, dass (1) die Bewegungsraten der drei Blockgletscher gut miteinander korrelieren, (2) zwei Bewegungsmaxima (2003/04 bzw. 2014/15) gegeben sind und (3) die aktuellen Bewegungsraten etwa jenen des ersten, kleineren Bewegungsmaximums entsprechen.

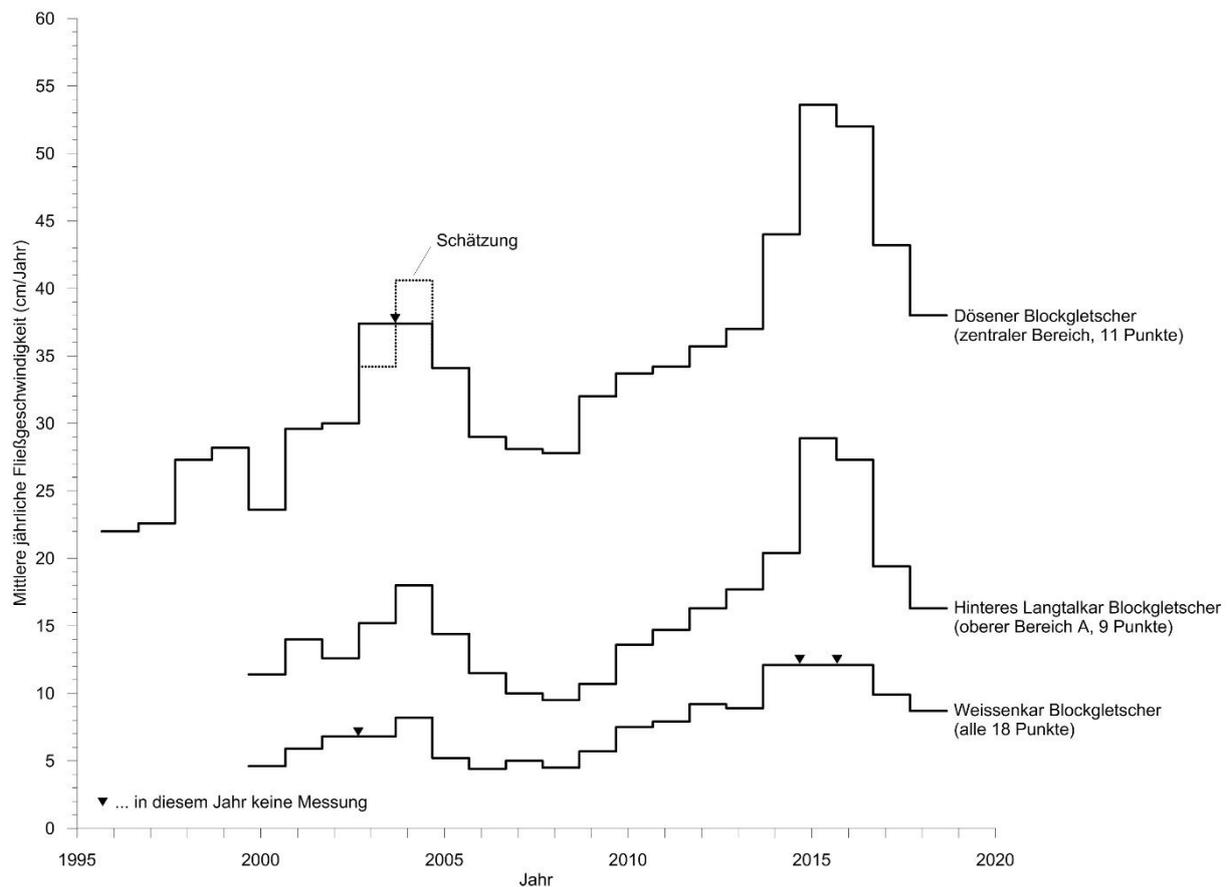


Abb. 17: Direkter Vergleich der mittleren jährlichen horizontalen Fließgeschwindigkeit der beiden Blockgletscher Dönes (zentraler Bereich) und Hinteres Langtalkar (oberer Bereich A) für den Zeitraum 1995-2018. Mittelbildung über 11 Punkte (10–17, 21–23) am Döneser Blockgletscher und 9 Punkte (10–17, 37) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar. Für Vergleichszwecke ist auch der zeitliche Verlauf der Fließgeschwindigkeit am Weissenkar-Blockgletscher (Schobergruppe, Osttirol) dargestellt.

Die Abbildung 18 zeigt den zeitlichen Verlauf der mittleren jährlichen horizontalen Fließgeschwindigkeit der sich besonders schnell bewegenden Punkte im unteren Bereich B des Blockgletschers Hinteres Langtalkar für den Beobachtungszeitraum 1999–2018. In dieser Abbildung sind für Vergleichszwecke auch die Werte vom ähnlich schnellen Leibnitzkopf-Blockgletscher (im Osttiroler Teil der Schobergruppe) dargestellt.

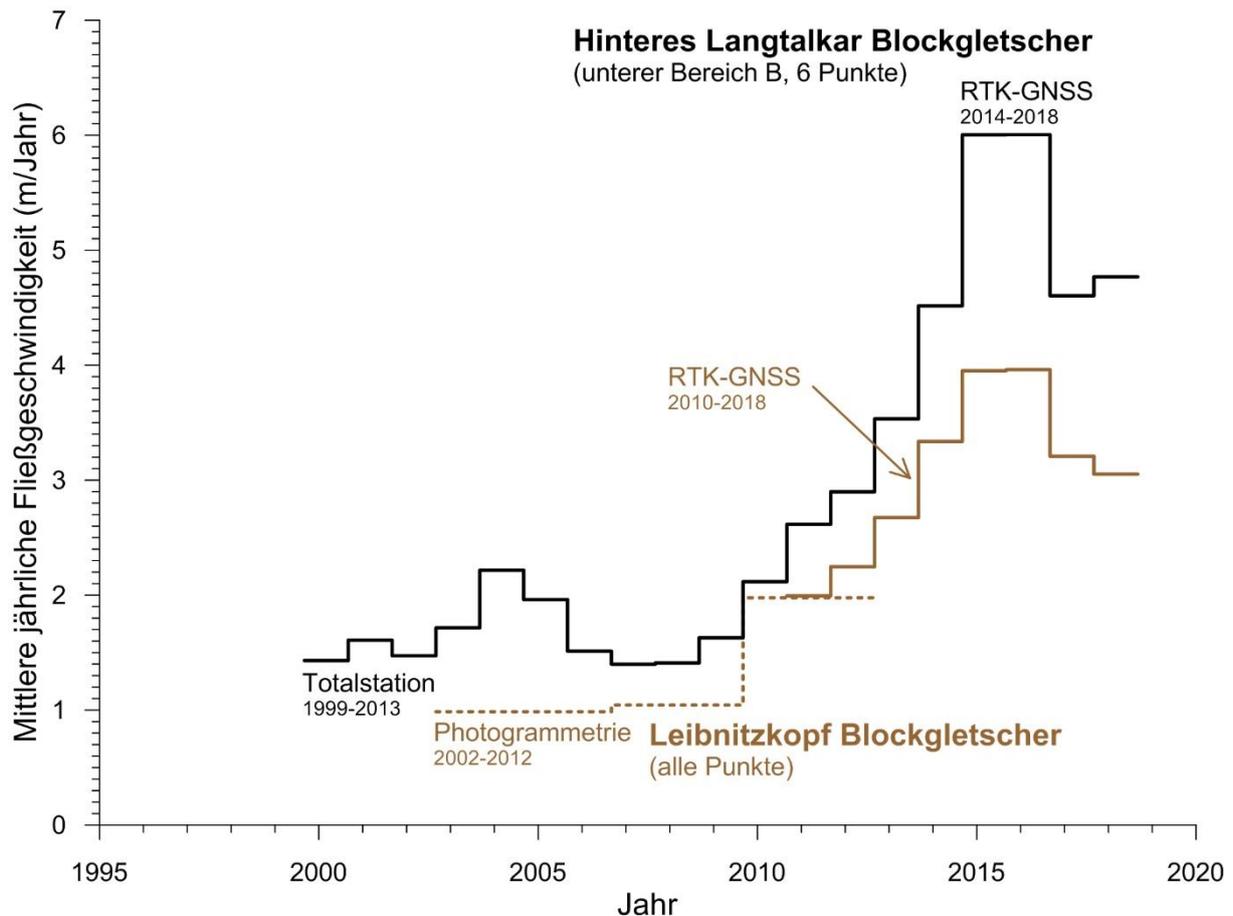


Abb. 18: Vergleich der mittleren jährlichen horizontalen Fließgeschwindigkeit zwischen dem Blockgletscher Hinteres Langtalkar und dem ebenfalls in der Schobergruppe liegenden hochaktiven Leibnitzkopf Blockgletscher.

Ein ähnliches Bewegungsverhalten wie bei den oben genannten Blockgletschern wurde auch am Tschadinhorn-Blockgletscher (Schobergruppe, Osttirol) festgestellt (Abbildung 19). Die Untersuchungen zum Tschadinhorn-Blockgletscher sind in Kaufmann et al. (2019) im Detail dokumentiert. Weitere ergänzende Informationen, wie z. B. Photos von den Geländearbeiten, finden sich in Kaufmann (2019).

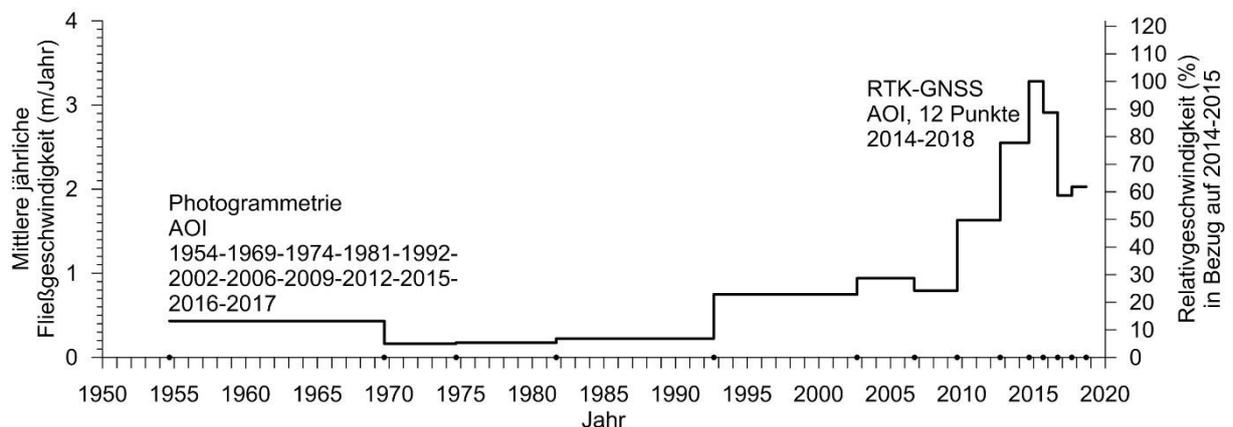


Abb. 19: Fließgeschwindigkeit am Tschadinhorn Blockgletscher (Schobergruppe, Osttirol).

3.3. Ergebnisse Massenbewegungs-Monitoring

3.3.1. Blockgletscher Hinteres Langtalkar

Abbildung 20 stellt Ergebnisse der Beobachtungsperiode 2013–18 da. Die vertikalen Veränderungen ausgewählter Bereiche (*area 1* und *2*; dargestellt für 2016/17) sind in der Tabelle 3 (Seite 19) zusammengefasst. Die TLS-Messungen im Jahr 2015 fielen aus, die Darstellung für 2014/16 zeigt aber die gemittelte jährliche Veränderung dieser Zweijahresperiode.

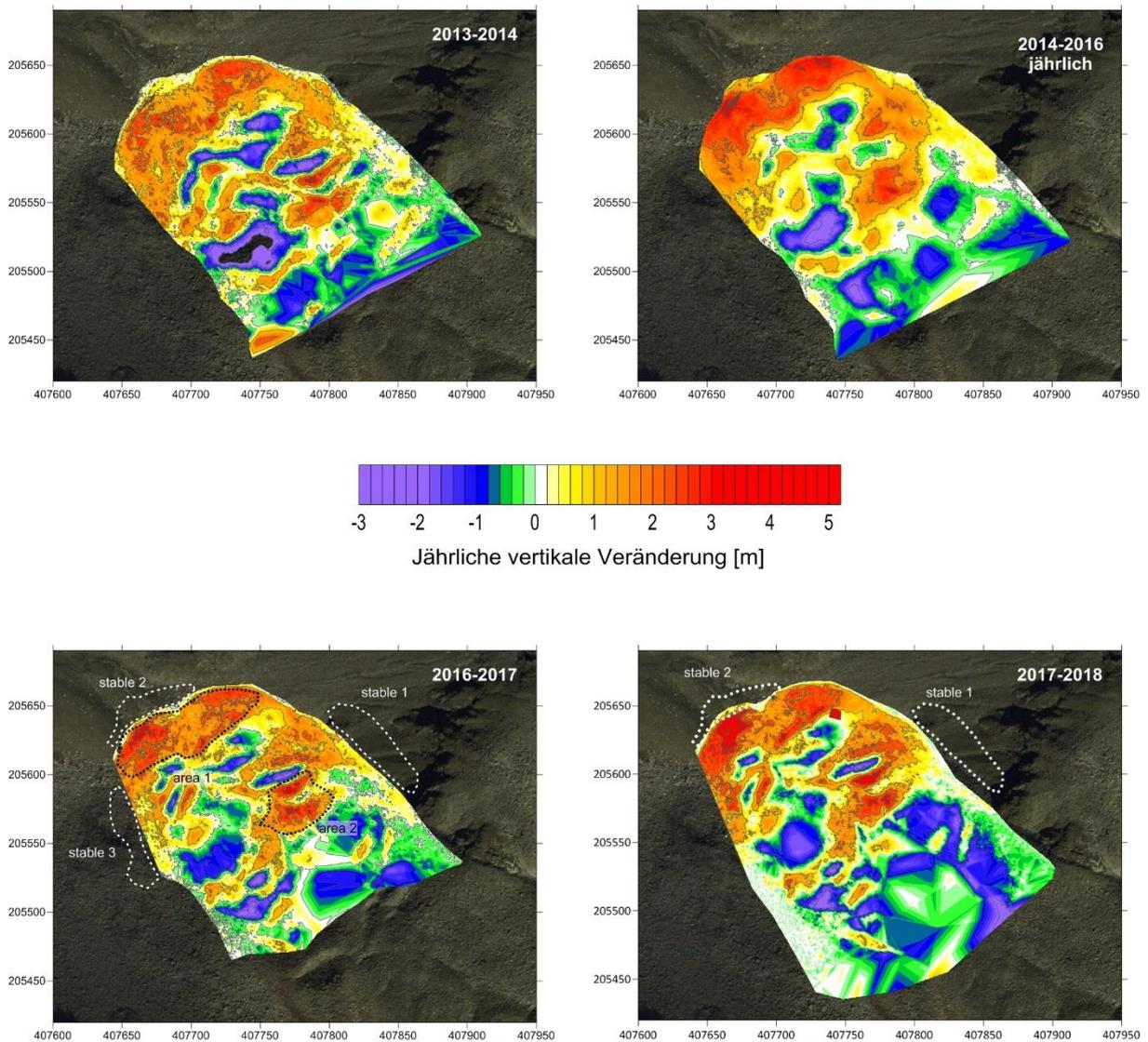


Abb. 20: Gegenüberstellung der jährlichen vertikalen Geländehöhenänderung im unteren Bereich des Blockgletschers Hinteres Langtalkar in den Perioden 2013/14, 2014/16, 2016/17 und 2017/18. Die stabilen Bereiche sind mit „stable 1–3“ bzw. stable 1-2 (2017/18), die Bereiche mit maximalen Veränderungsrate als „area 1“ und „area 2“ in 2016/17 dargestellt, die Bewegungen innerhalb der Fehlertoleranz (Tabelle 3) sind nicht dargestellt.

Aus der Abbildung 20 und Tabelle 3 ist zu entnehmen, dass die jährlichen vertikalen Geländehöhenänderungen im unteren Bereich des Blockgletschers Hinteres Langtalkar in den letzten fünf Jahren signifikant zugenommen haben, was gleichbedeutend mit einem Vorstoß ist. Im Bereich *area 1* nahe der Stirn des Blockgletschers nahmen die vertikalen Bewegungsbeträge von 41 cm/Jahr in der Periode 2011/12 auf 202 cm/Jahr in der Periode 2014/16, im Messbereich *area 2* im mittleren Bereich der Blockgletscherzunge von 62 cm/Jahr in der Periode 2011/12 auf 172 cm/Jahr in der Periode 2014/16 zu. Nach einer Stagnation der vertikalen Bewegungsraten in der Beobachtungsperiode 2016/17 (*area 1*: 183 cm/Jahr, *area 2*: 180 cm/Jahr) nehmen die Bewegungsraten im aktuellen Beobachtungszeitraum 2017/18 wieder deutlich zu (*area 1*: 221 cm/Jahr, *area 2*: 211 cm/Jahr).

Diese Zunahme der vertikalen Höhenänderung ist im gesamten unteren Bereich des Blockgletschers zu sehen und hängt mit der dort stattfindenden Massenumlagerungs-Dynamik und dem Vorrücken der Blockgletscherzunge zusammen, welche auch deutlich im Gelände erkennbar ist (Abbildungen 9 und 10).

3.3.2. Felssturzbereiche Hoher Burgstall

Die Felssturztätigkeit am Hohen Burgstall, die 2012/2013 in einigen Bereichen zu beobachten war (Kellerer-Pirklbauer et al. 2015), ist ab 2014/15 in der Grundriss-Darstellung (Abbildung 21) nicht mehr gesichert nachweisbar. Die Aufriss-Darstellungen der Punktwolken-Differenzmodelle von 2012/2013 und 2013/2014 (Normalvektorenanalyse; Kellerer-Pirklbauer et al. 2015) zeigen außerhalb einer Fehlertoleranz von ± 5 cm nur kleine Bereiche mit Ausbrechen von Felsmaterial. Die Quantifizierung ist aufgrund der geringen Größe nicht zielführend. Die erkennbaren großen Differenzbereiche repräsentieren die Unterscheide in den Oberflächen perennierender Schneefelder am Hohen Burgstall.

Die Auswertung der vertikalen Geländehöhenänderungen (Abbildung 21) zeigen in den Perioden 2015/16 und 2016/18 (jährliche Komponente) keine auffälligen Bereiche, die auf Felsstürze schließen lassen. Dies kann aber, bedingt durch den Standort des Laserscanners, nur für den frontalen Bereich der Südost-Wand des Hohen Burgstalls gesagt werden.

Im Sommer 2017 ereigneten sich einige Felsstürze in der Ostflanke des Hohen Burgstalls und zerstörten den Zustieg zur Oberwalderhütte zu einem beträchtlichen Teil. Erstmals wurde uns im Juli durch Matthias Lichtenegger davon berichtet, jedoch betrafen diese ersten Stürze den Hüttenweg noch nicht, sondern ereigneten sich etwas nordöstlich von diesem (Abbildung 22, links). Größer und in Bezug auf seine Wirkungen auf die alpine Infrastruktur wichtiger war jedoch ein Ereignis in der ersten Augustwoche 2017, das nach Auskunft des Hüttenwirts der Oberwalderhütte, Wolfgang Hackel, mit Starkregen und Hagel im Gefolge einer Gewitterzelle über der Glocknergruppe in Verbindung stand. Es war eine Neutrassierung des Weges sowie die Installation von 70 m Fixseilen notwendig (Abbildung 22, rechts); im Internet wurde den Gästen der Hütte aus Sicherheitsgründen der weite Umweg über die Winterroute empfohlen. Die vollständige Sanierung des Weges konnte erst im Sommer 2018 durchgeführt werden.

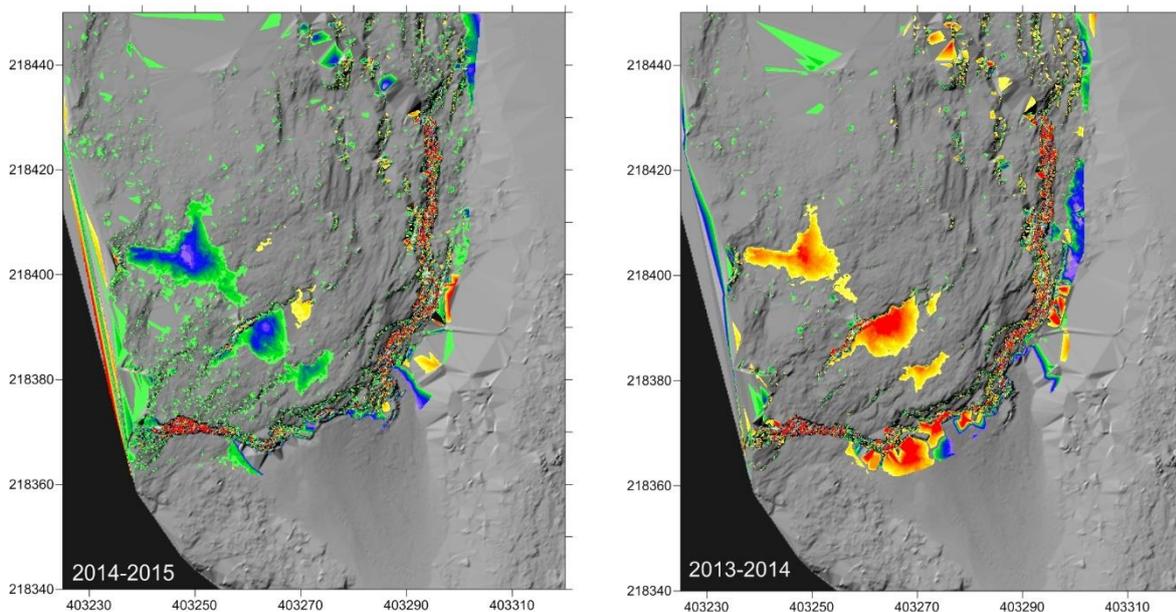
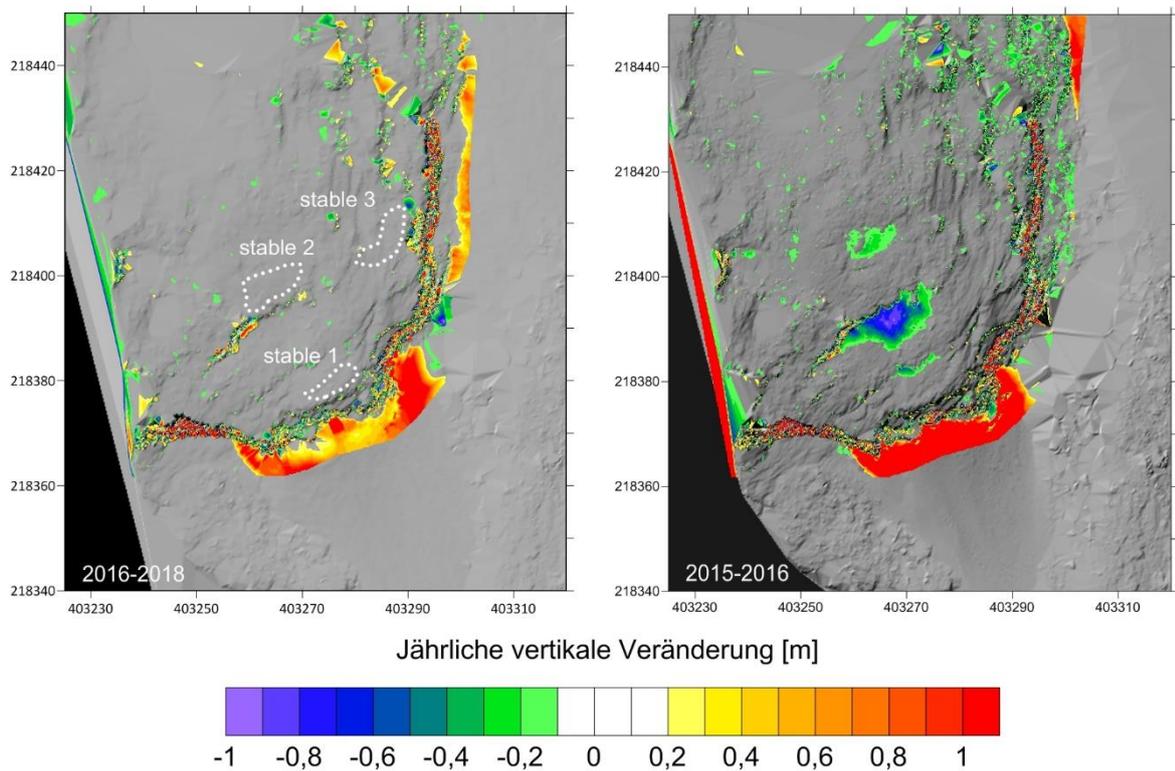


Abb. 21: Gegenüberstellung der jährlichen vertikalen Geländehöhenänderung am Hohen Burgstall in den Perioden 2013/14, 2014/15, 2015/16 und 2016/18 (jährliche Werte). Die stabilen Bereiche sind mit „stable 1–3“ bezeichnet. Bewegungsraten innerhalb der Fehlertoleranz (Tabelle 4) sind nicht dargestellt.

Die von den Felsstürzen betroffenen Bereiche konnten weder 2017 noch 2018 aufgenommen werden, weil in beiden Jahren ungünstige Wetterbedingungen keine direkte Messung der sehr aktiven Wandbereiche zuließen. Dies hätte nämlich eines neuen Standpunktes und der Einmessung neuer Referenzpunkte am Gletscher bedurft, was aufgrund der unsicheren Wetterlage nicht zu verantworten war. Die

Messung dieses äußerst interessanten Bereiches ist aber bereits im Messprogramm 2019 als Priorität gesetzt.



Abb. 22: Felssturzaktivität im Bereich des Hohen Burgstalls. Kleiner Felssturz in der Südost-Wand des Hohen Burgstalls (Foto M. Lichtenegger, 18. 7. 2017) (links). Behelfsmäßige Neuanlage des Hüttenwegs zur Oberwalderhütte, wie sie nach den großen Stürzen im Sommer 2017 notwendig wurde (rechts; Blickrichtung Südost) (Foto G. K. Lieb, 13. 9. 2017).

3.3.3. Felssturzbereiche Mittlerer Burgstall

Die Felssturztätigkeit, die nach dem massiven Felssturz 2007/2008 am Südost-Rücken des Mittleren Burgstalls zu beobachten war (Kellerer-Pirklbauer et al. 2012, Kaufmann et al. 2015), ist in ihrer jüngeren Dynamik wie folgt einzuschätzen. Die stabilen Bereiche sowohl im nordwestlichen als auch im südöstlichen Wandbereich weisen auch in den Differenzmodellen (Abbildung 23) Vertikalveränderungen unterhalb der Fehlertoleranz auf (Tabelle 4) auf. Dies ist beim Messobjekt Mittlerer Burgstall aufgrund der großen Messentfernung (~600 m) von großer Bedeutung.

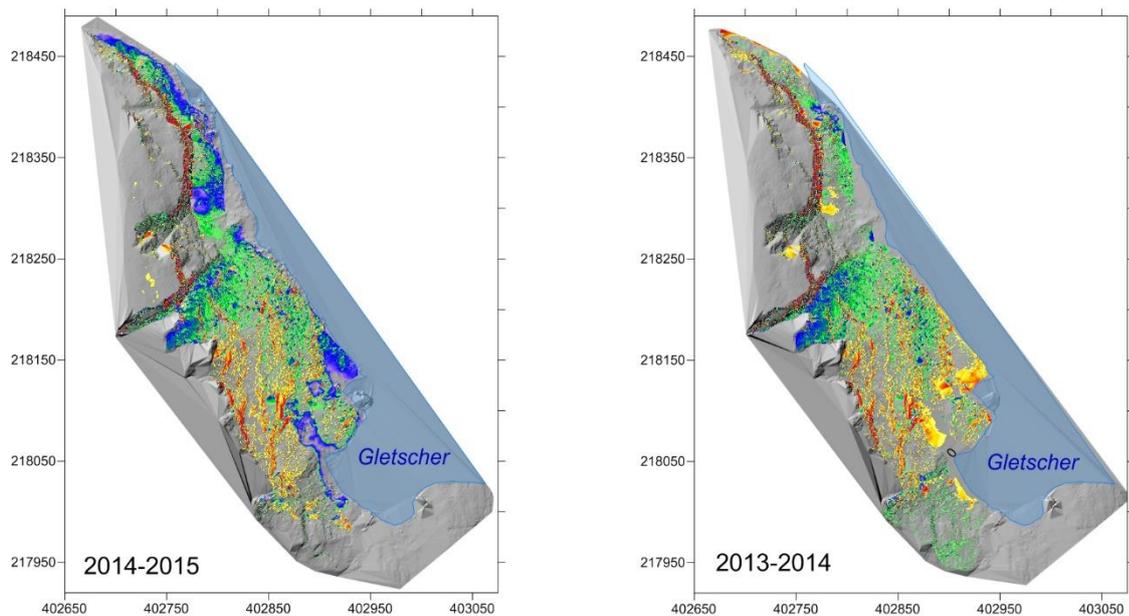
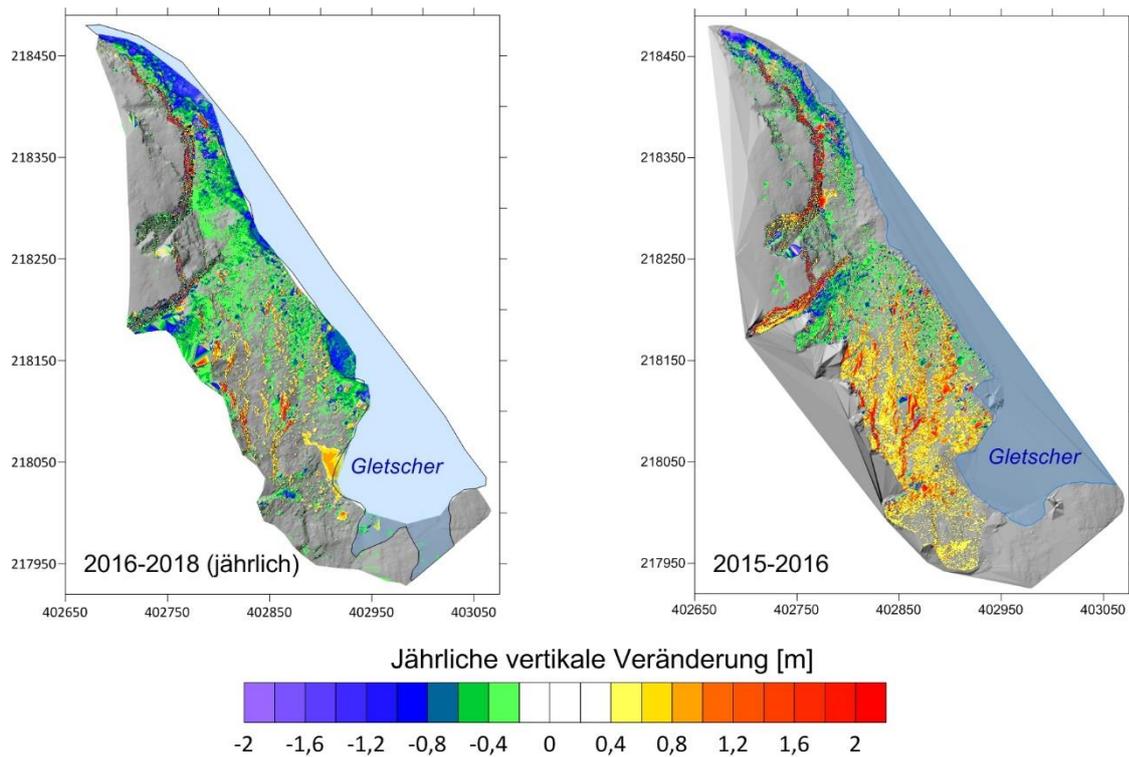


Abb. 23: Gegenüberstellung der jährlichen vertikalen Geländehöhenänderung im Bereich des Mittleren Burgstalls in den Perioden 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 und 2016/2018 (jährliche Komponente). Veränderungen innerhalb der Fehlertoleranzen sind nicht dargestellt.

Als allgemeines Merkmal der Entwicklung ist hervorzuheben, dass die Block- und Schuttakkumulationsbereiche im Felssturzgebiet einem geringen, aber stetigen Einsinken unterliegen, was mit einem Abschmelzen des unter der Schuttdecke liegenden Gletschereises erklärt werden kann.

3.4. Ergebnisse Lufttemperatur-Monitoring

In der Abbildung 24 sind Monats- und Jahresmittel der Lufttemperaturen (Bezugszeitraum 1. 8. bis 31. 7. des jeweiligen Folgejahres) an der Station im Hinteren Langtalkar dargestellt. Vom außergewöhnlich milden Winter 2006/07 abgesehen, lässt sich ein gewisser Erwärmungstrend sowohl im Sommer (schwächer ausgeprägt) als auch im Winter (stärker) erkennen. Dieser Erwärmungstrend zeigt sich besonders deutlich bei den Jahresmitteltemperaturen, deren Mittelwert bezogen auf die Messperiode 2007/08 bis 2016/17 bei $-1,2\text{ °C}$ liegt. Die Einzelwerte liegen zwischen dem wärmsten (2015/16 mit $-0,4\text{ °C}$) und dem kältesten Jahr (2008/09 mit $-1,9\text{ °C}$) innerhalb einer Schwankungsbreite von $1,5\text{ °C}$.

Die Abbildung 25 zeigt den Gang der Tagesmitteltemperatur an der Klimastation im Hinteren Langtalkar im Zeitraum 1. 8. 2013–31. 7. 2017. Die höchsten Tagesmittelwerte erreichen im Sommer fast 15 °C , die kältesten in diesem fünfjährigen Beobachtungszeitraum rund -23 °C . Die Temperaturamplitude liegt folglich bei ca. 38 °C , was auf kontinental geprägte klimatische Verhältnisse hinweist. Beachtlich ist, dass das Tagesminimum der Lufttemperatur von $-23,3\text{ °C}$ gemessen am 6. 1. 2017 um fast 4 °C tiefer liegt als der zuvor gemessene Tiefstwert im Winter 2015/16. Dies zeigt deutlich, dass der Jänner 2017 außergewöhnlich tiefe Temperaturen im Hochgebirge brachte.

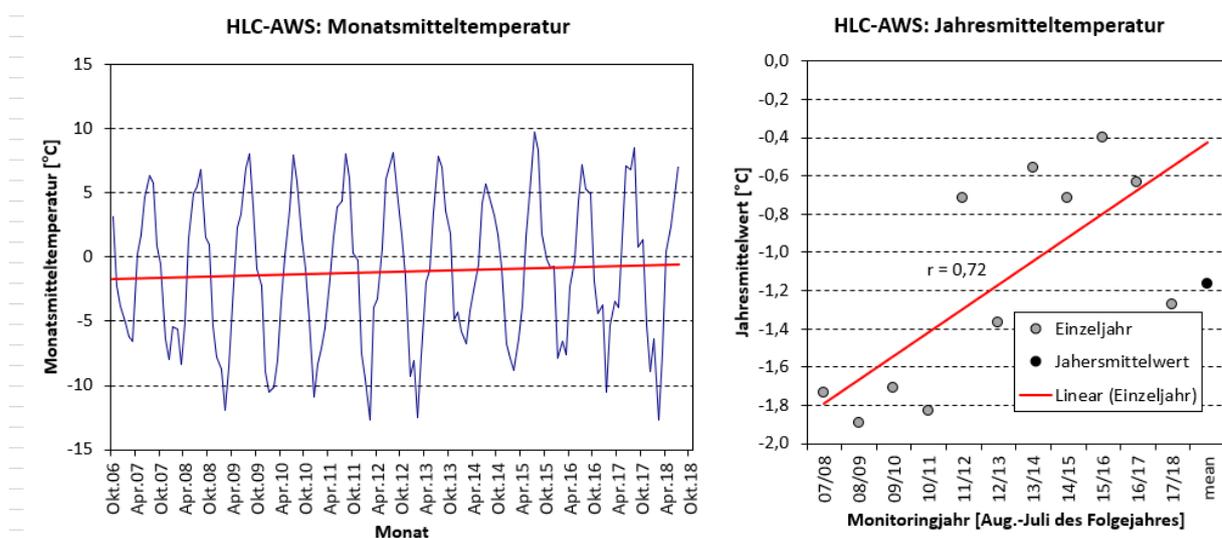


Abb. 24: Monatsmittelwerte (links) und Jahresmitteltemperatur (rechts) an der automatischen Klimastation im Hinteren Langtalkar (2655 m) 2006–2018 und lineare Trends.

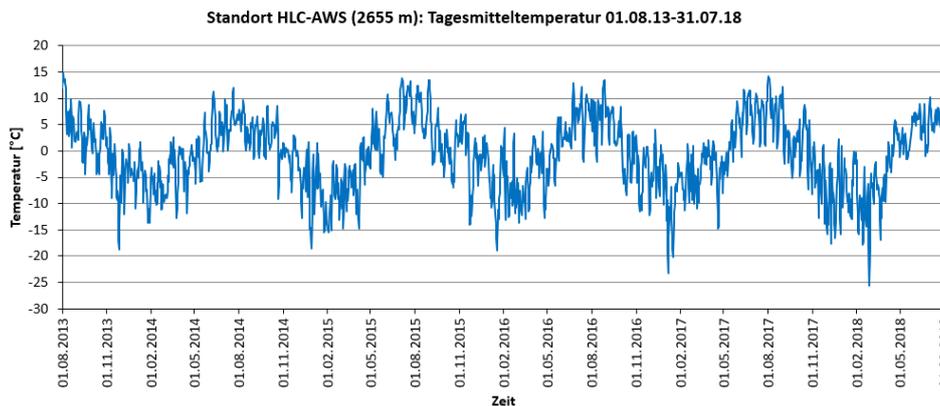


Abb. 25: Gang der Tagesmitteltemperatur an der Klimastation im Hinteren Langtalkar (2655 m) zwischen 1. 8. 2013 und 31. 7. 2018. Die Mitteltemperatur in diesem Zeitraum beträgt auf $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.5. Interpretation und Diskussion der langjährigen Ergebnisse

Aus den langen Datenreihen ist es nunmehr möglich, erste Tendenzen der mehrjährigen Variationen der einzelnen erhobenen Parameter abzuleiten. Wie in den Kapiteln 3.1. bis 3.5. dargelegt, handelt es sich dabei um folgende Veränderungen:

- Die Bodentemperaturen tendieren zu einer langfristigen Erhöhung. Diese ist jedoch keineswegs an allen Standorten zu beobachten, sondern es zeigt sich an vielen Messpunkten eine starke Beeinflussung des Temperaturregimes durch lokale Faktoren, unter welchen den von einer besonders hohen Variabilität geprägten Schneeverhältnissen die höchste Bedeutung zukommt. Hierin wiederum erscheint der Zeitpunkt des Beginns der winterlichen Schneebedeckung als Hauptfaktor: Liegt dieser spät im Jahr (wie in den beiden Herbst 2015 und 2016), so kann der Untergrund stark auskühlen und die sommerliche Auftauschicht über dem Permafrostspiegel vollständig abgebaut werden. Dadurch kann sich der Permafrost regenerieren und die Bedingungen sind als permafrostgünstig zu bewerten. Im untersuchten Zeitraum war dies in den Jahren 2015/16 und 2016/17 der Fall.
- Die Bewegungsraten der Blockgletscher hängen eng mit den thermischen Bedingungen im Untergrund zusammen. Dabei gilt die Regel, dass höhere Untergrundtemperaturen durch die erhöhte Plastizität des Eises und verstärkten Schmelzwasseranfall sich in höheren Geschwindigkeiten der Partikel an den Blockgletscher-Oberflächen niederschlagen. Dieser Prozess ist gegenüber dem Temperaturgeschehen jedoch zeitverzögert, weshalb auch noch im letzten Beobachtungsjahr (2017/18) die Bewegungsraten als Reaktion auf die tiefen Temperaturen der beiden Vorjahre zurückgingen. Eine Sonderstellung kommt dem Blockgletscher im Hinteren Langtalkar zu, dessen Stirn besonders dynamisch vorstößt. Die Ursache hierfür sind weniger klimatische Bedingungen als vielmehr die Tatsache, dass sich der Permafrostkörper hier über eine Karschwelle und die darunterliegende Steilstufe bewegt und so gravitativ beschleunigt wird.

- Die Felssturzaktivität ist naturgemäß stark zufallsgesteuert, was sich auch in den vorliegenden Ergebnissen widerspiegelt. Eine klare Tendenz einer regelhaften zeitlichen Veränderung ist nicht zu erkennen.
- Von den gemessenen Klimaelementen wird in diesem Bericht die Lufttemperatur an einer der beiden Messstellen gezeigt. Hierbei ist die zu erwartende Erwärmungstendenz durchaus zu erkennen – für den Nachweis eines „echten“ Trends ist die Messreihe jedoch bei weitem zu kurz.

4. Gesamtbewertung und Ausblick

Um die angestrebten Aussagen über die Reaktion des Permafrostes auf den Klimawandel und dessen Auswirkungen auf andere Prozesse (Bewegung von Blockgletschern, Felssturz-Dynamik) tätigen zu können, sind die vorgestellten Reihen weiterhin zu kurz. Noch werden diese viel zu stark von der jährlichen Veränderlichkeit der gemessenen Parameter dominiert, sodass nur wenige der in den Abbildungen gezeigten Trends auch als statistisch signifikant gelten. Dies wiederum bedeutet, dass allen Aussagen eine z. T. große Unsicherheit innewohnt. Oder anders formuliert: Es sind gute Zusammenhänge zwischen den gemessenen Parametern erkennbar, die deren Variabilität aufgrund der Witterung in den Einzeljahren zufriedenstellend erklären, noch nicht jedoch deren langfristige Reaktion auf ein sich änderndes *Klima*. Demnach erscheinen zwei der Beobachtungsjahre (2015/16 und 2016/17) als permafrostgünstig, die drei anderen nicht. Wie dieses Ergebnis in eine langfristige Entwicklung einzuordnen ist, bleibt aber selbst bei Betrachtung der zehnjährigen Reihe (z. B. in Abbildung 16) unklar.

Eine Schlussfolgerung daraus kann wie folgt formuliert werden: Für ein aussagekräftiges Monitoring liegt nunmehr eine solide Basis vor, auf der die Messungen weitergeführt werden können und sollen. Thermale Tendenzen – beispielsweise potentielle Verwitterung (Kellerer-Pirklbauer 2017a) – und daraus abgeleitet Auswirkungen auf die Oberflächendynamik – beispielsweise Solifluktion (Kellerer-Pirklbauer 2017b) – lassen sich erkennen. Ebenso lässt sich sagen, dass das Bewegungsmuster der geodätisch vermessenen Blockgletscher im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten typisch für den gesamten Alpenbogen ist, was aus einer vergleichende Studie von 35 Blockgletschern im Alpenraum (Österreich 6, Frankreich 1, Italien 2 und Schweiz 26) hervorgeht (Kellerer-Pirklbauer et al. 2018b).

Die dabei angewandte Methodik hat sich bewährt und sollte aufgrund ihrer routinemäßigen und kostengünstigen Anwendung sowie guten Interpretierbarkeit auch in Zukunft zum Einsatz kommen. Allerdings ist auch anzumerken, dass aus Bohrlochtemperaturmessungen – internationalen Standards gemäß – noch aussagekräftigere Daten gewonnen werden könnten. Temperaturmessungen in einem Bohrloch wären zum einen im Bereich eines aktiven Blockgletschers, zum anderen im Bereich von Festgestein interessant. Für den ersten Fall wäre eventuell der Dösender Blockgletscher eine gute Wahl, da dieser nicht zu schnell ist und somit Messungen für einen längeren Zeitraum gemacht werden könnten. Für den zweiten Fall wäre ein hochgelegener Standort über 3000 m optimal. Ein guter Standort – auch logistisch gesehen – wäre hier im Nahbereich der Erzherzog-Johann-Hütte auf rund 3450 m.

Literatur

- Bauer A., Paar G., Kaufmann V. (2003): Terrestrial laser scanning for rock glacier monitoring. Proceedings of the 8th International Permafrost Conference, Zurich, 55-60.
- Buckel J., Otto J.C., Prasicek G., Keuschnig M. (2018): Glacial lakes in Austria - Distribution and formation since the Little Ice Age. *Global and Planetary Change*, 164, 39-51. doi:10.1016/j.gloplacha.2018.03.003
- Kaufmann V. (2016): 20 Years of Geodetic Monitoring of Dösen Rock Glaciers (Ankogel Group, Austria): A Short Review. *Joannea Geologie und Paläontologie*, 12, 37-44.
- Kaufmann V. (2019): <https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/> (letzter Zugriff 30.1.2019)
- Kaufmann V., Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G. K., Slupetzky H., Avian M. (2015): Glaciological studies at Pasterze Glacier (Austria) based on aerial photographs 2003-2006-2009. Monitoring and Modelling of Global Changes: A Geomatics Perspective. Springer. 173-198.
- Kaufmann V., Sulzer W., Seier G., Wecht M. (2019): Panta rhei: Movement change of Tschadinhorn rock glacier (Hohe Tauern range, Austria) for the time period 1954-2017. Proceedings of the 11th ICA Mountain Cartography Workshop, May 21-25, 2018, Hvar, Croatia. To be published in <http://kig.kartografija.hr/index.php/kig>
- Kellerer-Pirklbauer A. (2017a): Potential weathering by freeze-thaw action in alpine rocks in the European Alps during a nine year monitoring period. *Geomorphology*, 296, 113-131. doi:10.1016/j.geomorph.2017.08.020
- Kellerer-Pirklbauer A. (2017b): Solifluction rates and environmental controls at local and regional scales in central Austria, *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography*, 72, 37-56. doi:10.1080/00291951.2017.1399164
- Kellerer-Pirklbauer A., Kaufmann V. (2018): Deglaciation and its impact on permafrost and rock glacier evolution: New insight from two adjacent cirques in Austria. *Science of The Total Environment*, 621, 1397-1414. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.10.087
- Kellerer-Pirklbauer A., Avian M., Lieb G.K., Carrivick J. (2012): 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, 59–78. doi:10.1111/j.1468-0459.2011.00449.x
- Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M. (2015): Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2013/14. Unveröffentlichter Bericht für den Nationalpark Hohe Tauern Kärnten, Graz, 17 S.
- Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M. (2017a): Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2015/16. Unveröffentlichter Bericht für den Nationalpark Hohe Tauern Kärnten, Graz, 29 S.
- Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V. (2017b): The Dösen Rock Glacier in Central Austria: A key site for multidisciplinary long-term rock glacier monitoring in the Eastern Alps. *Austrian Journal of Earth Sciences*, Volume 110/2. doi:10.17738/ajes.2017.0013
- Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann, Avian M. (2018a): Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2016/17. Unveröffentlichter Bericht für den Nationalpark Hohe Tauern Kärnten, Graz, 27 S.
- Kellerer-Pirklbauer A., Delaloye R., Lambiel C., Gärtner-Roer I., Kaufmann V., Scapozza C., Krainer K., Staub B., Thibert E., Bodin X., Fischer A., Hartl L., Morra di Cella U., Mair V., Marcer M., Schoeneich P. (2018b): Interannual variability of rock glacier flow velocities in the European Alps. 5th European Conference on Permafrost – Book of Abstracts, 23 June - 1 July 2018, Chamonix, France, 396-397.

- Krautblatter M., Kellerer-Pirklbauer, A., Gärtner-Roer I. (2018): Permafrost in den Alpen - Erscheinungsformen, Verbreitung und zukünftige Entwicklung. Geographische Rundschau. 11. 2018. 22-29.
- Lieb G.K., Kellerer-Pirklbauer A. (2017a): Langzeit-Monitoring abiotischer Prozesse im Nationalpark Hohe Tauern. Erster Zwischenbericht zum Modul 07 „Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost, Geomorphodynamik“ im Rahmen des interdisziplinären, integrativen Monitoring- und Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern. Unveröffentlichter Bericht für den Nationalpark Hohe Tauern, Graz, 9 S.
- Lieb G.K., Kellerer-Pirklbauer A. (2018a): Langzeit-Monitoring abiotischer Prozesse im Nationalpark Hohe Tauern. Zweiter Zwischenbericht zum Modul 07 „Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost, Geomorphodynamik“ im Rahmen des interdisziplinären, integrativen Monitoring- und Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern. Unveröffentlichter Bericht für den Nationalpark Hohe Tauern, Graz, 32 S.
- Lieb G.K., Kellerer-Pirklbauer A. (2018b): Monitoring of abiotic natural processes in the Hohe Tauern National Park, Austria: A long-term approach. 6th Symposium for Research in Protected Areas – Conference Proceedings, Salzburg, Salzburger Nationalparkfonds, 379-381. doi:10.1553/hp_symposium2017