

Nationalpark Hohe Tauern



Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2019-2021 Endbericht

www.hohetauern.at

Impressum

Für den Inhalt verantwortlich: KELLERER-PIRKLBAUER A., LIEB G.K. / UNIVERSITÄT GRAZ KAUFMANN V. / TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ AVIAN M., FRIESSENBICHLER M., WEYSS G. / ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern, Döllach 14, 9843 Großkirchheim Projektleitung: LIEB G.K., KELLERER-PIRKLBAUER A. Fotos: © Andreas Kellerer-Pirklbauer, Christian Lieb, Viktor Kaufmann, Michael Avian **Titelbild:** Die Klimastation in der Wurzelzone des Dösener Blockgletschers (Ankogelgruppe), auf 2603 m ü. A. gelegen, ist auf einem großen Block installiert. Aufnahme vom 31. 8. 2021 nach einem Kaltlufteinbruch.

Das Werk wurde aus Mitteln des ÖAV-Patenschaftsfonds Nationalpark Hohe Tauern gefördert.





Zitiervorschlag: Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M., Frießenbichler M., Weyss G. (2022): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2019-2021. Endbericht (unpubliziert), 56 Seiten. <u>http://www.parcs.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=50742</u>

Graz, 31.05.2022

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung1
Summary1
1. Einleitung
2. Monitoring im Messjahr 2020/21: Aktivitäten
3. Witterungsablauf und Schneeverhältnisse 2020/2110
4. Ergebnisse Monitoring 2020/21
4.1. Bodentemperatur-Monitoring12
4.2. Blockgletscherbewegungs-Monitoring
4.3. Massenbewegungs-Monitoring
4.4. Lufttemperatur-Monitoring
5. Ergebnisse des längerfristigen Monitorings
5.1. Bodentemperatur-Monitoring29
5.2. Blockgletscherbewegungs-Monitoring
5.3. Massenbewegungs-Monitoring
5.4. Lufttemperatur-Monitoring
6. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse46
7. Gesamtbewertung und Ausblick
Abbildungsverzeichnis
Tabellenverzeichnis
Literaturverzeichnis

Zusammenfassung

Dieser siebente Bericht über den Permafrost im Kärntner Teil des Nationalparks Hohe Tauern präsentiert und diskutiert einerseits Ergebnisse des Permafrost-Monitorings der Universität Graz, der Technischen Universität Graz sowie der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in vier unterschiedlichen Untersuchungsgebieten (Dösen-Säuleck, Fallbichl-Hochtor, Hinteres Langtalkar-Kögelekar und Pasterze-Burgstall) im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten im Berichtsjahr 2020/21 und gibt andererseits einen Überblick über die längerfristigen Monitoringergebnisse mit zeitlichem Fokus auf den Projektzeitraum 2018-2021. Der multidisziplinäre 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. In der Zusammenschau wies der gesamte Projektzeitraum 2018-2021 für den Permafrost wiederum sehr ungünstige Bedingungen auf, wobei in Bezug auf die Bodentemperatur das Messjahr 2019/20 bei weitem das wärmste der drei Jahre war: 81 % der Bodentemperatur-Monitoring-Standorte wiesen im Berichtsjahr 2019/20 neue Jahresmittel-Temperaturrekorde auf. In Bezug auf Blockgletscherbewegung war v. a. das letzte Messjahr 2020/21 eine Besonderheit, da neue Rekordwerte der Bewegung sowohl am Blockgletscher in der Dösen als auch im Hinteren Langtalkar ermittelt wurden. Die aktuellen Bewegungsraten liegen deutlich über jenen der Vorjahre, die bereits eine stetige Beschleunigung zeigten. Sie sind auch die höchsten seit den 1950er-Jahren. Quantifizierungen von Massenbewegungen zeigen u. a. großflächig instabile Flächen im Bereich des Mittleren Burgstalls und das weitere Vorrücken des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die gesamte Projektperiode 2018-2021 für den Permafrost äußerst ungünstig war und die unterschiedlichen untersuchten Parameter eine deutliche Permafrostungust für den Nationalpark Hohe Tauern aufzeigen.

Summary

Permafrost in the Carinthian part of Hohe Tauern National Park 2019-2021 – final report

This seventh report on permafrost in the Carinthian part of the Hohe Tauern National Park presents and discusses on the one hand results of permafrost monitoring by the University of Graz, the Graz University of Technology and the Central Institute for Meteorology and Geodynamics in four different study areas (Dösen-Säuleck, Fallbichl-Hochtor, Hinteres Langtalkar-Kögelekar and Pasterze-Burgstall) in the Hohe Tauern National Park of Carinthia in the reporting year 2020/21. On the other hand, it provides an overview of the longer-term monitoring results with a temporal focus on the project period 2018-2021. The multidisciplinary approach includes measurements of the following indicators: (i) ground temperatures at and near the surface, (ii) surface movement of rock glaciers, (iii) terrain height change due to mass movements and erosion on rock faces, and (iv) various climate elements with a focus on air temperature. In summary, the entire project period 2018-2021 again showed very unfavourable conditions for permafrost, although in terms of ground temperature, the 2019/20 monitoring year was by far the warmest of the three years with 81 % of ground temperature monitoring sites showing new annual mean temperature records in the 2019/20 reporting year. With regard to rock glacier movement, the last measurement year 2020/21 was particularly special, as new record values of the velocity were determined both at the rock glacier in the Dösen and in the Hinteren Langtalkar. The current velocity rates are clearly above those of the previous years, which already showed a steady acceleration. They are also the highest since the 1950s. Quantifications of mass movements show, among other things, large-scale unstable areas in the area of the Mittlerer Burgstall and the further advance of the rock glacier in the Hinteres Langtalkar. In summary, it can be stated that the entire project period 2018-2021 was extremely unfavourable for permafrost and the various parameters investigated show a clear permafrost disfavour for the Hohe Tauern National Park.

1. Einleitung

Für das Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten sind seit 2013/14 (Kellerer-Pirklbauer et al. 2015), meist jährlich, Berichte ähnlich diesem vorgelegt worden: Für die erste Projektperiode 2016–2018 waren dies Kellerer-Pirklbauer et al. (2017a, 2018a, 2019), wobei letzterer zugleich der Endbericht dieser Periode war. Für die zweite Projektperiode 2019–2021 lagen bisher die beiden Zwischenberichte für 2018/19 und 2019/20 vor (Kellerer-Pirklbauer et al. 2020, 2021). Der vorliegende Bericht ist der siebente und zugleich der Endbericht der auslaufenden Projektperiode. Dieser fokussiert auf das Berichtsjahr 2020/21 und setzt zusätzlich dessen Ergebnisse in Beziehung zu den langjährigen Messreihen mit zeitlichem Fokus auf den Projektzeitraum 2018-2021.

In diesem Bericht werden ähnlich den bisherigen in einem ersten Schritt die im Berichtsjahr 2020/21 durchgeführten Aktivitäten sowie deren Ergebnisse dargelegt und mit den meteorologischen Bedingungen in Verbindung gebracht. Im zweiten Schritt werden diese Ergebnisse mit jenen seit Beginn der langen Datenreihen (z. B. Bodentemperaturmonitoring-Beginn Sommer/Herbst 2006) – mit zeitlichem Fokus auf die gegenständliche Projektlaufzeit 2018-2021 in Beziehung gesetzt, um darzustellen, wie sich Permafrost, saisonaler Frost und periglaziale Prozesse seit 2006 im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten verändert haben. Hierzu werden im Wesentlichen Daten aus dem von den Autoren (bzw. den von ihnen vertretenen Institutionen) betriebenen Permafrost-Messnetz als Grundlage verwendet. Die bisher 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 Jahren vier Zwischenberichte (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2017, 2018a, Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2020, 2021), ein Endbericht für die dreijährige Pilotphase des Projektes (Lieb et al. 2019) sowie ein Beitrag zu einem zugehörigen Synthesebericht (Körner et al. 2020) verfasst wurden.

Die von uns gesammelten langjährigen Permafrost-relevanten Messreihen aus unterschiedlichen Gebieten des Nationalparks Hohe Tauern sind ein wichtiger Beitrag dafür, Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Entwicklungen nicht nur regional (z. B. Kellerer-Pirklbauer 2017, Kellerer-Pirklbauer & Kaufmann 2012), sondern auch im gesamten Alpenbogen und darüber hinaus zu erfassen (z. B. Kellerer-Pirklbauer et al. 2018b). So flossen bereits zweimal die langfristigen Blockgletscher-Bewegungsdaten sowie Informationen zur Entwicklung der Boden- und Lufttemperatur sowohl aus aus dem Hinteren Langtalkar als auch aus dem Dösental in für die renomierte Zeitschrift "Bulletin of the American Meteorological Society" (BAMS) geschriebene Beiträge ein (Pellet et al. 2021; 2022). Im Beitrag von 2021 wurde die Kinematik der Blockgletscherbewegung an fünf ausgesuchten Blockgletschern in den Alpen (Laurichard – Frankreich; Gemmi/Furggentälti und Grosses Gufer – beide Schweiz; Hinteres Langtalkar und Dösen) verglichen und in einen klimatischen Kontext gebracht. Im Beitrag von 2022 wurde die Messreihe zeitlich wie räumlich (Vergleiche mit Messreihen in Südamerika und Zentralasien) erweitert. Beide Beiträge sind Ausgaben von BAMS, die über den aktuellen Zustand des Klimas berichten. Dies bewirkt mittlerweile eine überregionale bis globale Verbreitung der Forschungsergebnisse unserer Aktivitäten im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten und zeigt einmal mehr die große Bedeutung und den Wert von langfristigen, oft mühsam erstellten und nicht immer gefahrlos durchgeführten Messreihen aus der Permafrostforschung.

2. Monitoring im Messjahr 2020/21: Aktivitäten

Im Sommer bis Herbst 2021 konnten alle von uns betreuten Arbeitsgebiete besucht und die meisten Messaktivitäten wiederum ordnungsgemäß durchgeführt werden. Die vier Untersuchungsgebiete für diesen Bericht liegen in den Bereichen Dösen-Säuleck (Ankogelgruppe), Fallbichl-Hochtor (Goldbergruppe/Glocknergruppe), Hinteres Langtalkar-Kögelekar (Schobergruppe) und Pasterze-Burgstall (Glocknergruppe). Abbildung 1 zeigt deren Lage, Tabelle 1 stellt eine Übersicht zu den nachfolgend kurz beschriebenen Geländearbeiten im Jahr 2021 dar.



Abbildung 1: Lage der vier Arbeitsgebiete im Nationalpark Hohe Tauern in Kärnten (1, 3, 4) bzw. in seinem Nahbereich (2), welche gemeinsam durch die Universität Graz, die Technische Universität Graz und durch die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynmamik untersucht werden, sowie die modellierte Verbreitung von Permafrost nach Boeckli et al. (2012).

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

(1) Bodentemperatur-Monitoring: Die Tätigkeiten rund um das Monitoring der Bodentemperaturen in den vier Untersuchungsgebieten bestand wie jedes Jahr auch 2021 wiederum aus mehreren Geländebegehungen, die in Tabelle 1 zusammengestellt sind. Zwischen 30. 8. und 16. 9. 2021 waren dies insgesamt 6 Kampagnen. Je zwei führten in die beiden Arbeitsgebiete Fallbichl-Hochtor und Pasterze-Burgstall, je eine konnte in den beiden weiteren Arbeitsgebieten Dösen-Säuleck und Hinteres Langtalkar-Kögelekar größtenteils erfolgreich durchgeführt werden, wobei ein Kaltlufteinbruch Ende August 2021 die Arbeiten v. a. in der Dösen beeinflussten. Die wesentlichsten Aufgaben waren dabei:

- a) das Auslesen der Datenspeicher der zahlreichen Datenlogger im Gelände,
- b) die Kontrolle der Sensorenkabeln,
- c) der z. T. notwendige Austausch der Batterien an manchen Geräten,
- d) der Austauch defekter Messgeräte (DOV-CO, DOV-RF-N),
- e) die Modernisierung der automatischen Kameras in den beiden Untersuchungsgebieten Hinteres Langtalkar-Kögelekar (erfolgreicher Umbau) und Dösen-Säuleck (witterungsbedingt war dies nicht möglich; wird 2022 durchgeführt), und
- f) die Einrichtung eines Ersatzstandortes (DOV-MI-N2) nahe dem ursprünglichen Standort (DOV-MI-N), da dieser seit mittlerweile 3 Jahren unter Schnee liegt und möglicherweise batteriebedingt mittlerweile ausgefallen sein könnte.

An zwei Monitoring-Standorten wurde wiederum auch die Wassertemperatur Blockgletscherquellen (im Hinteren Langtalkar am Standort HLC-Q; in der Dösen am Standort DOV-Q) erfolgreich gemessen. Die Witterungsbedingungen an den in Summe sechs Geländekampagnen, die wiederum von A. Kellerer-Pirklbauer geleitet wurden, waren im Allgemeinen gut bis zufriedenstellend und ermöglichten eine effiziente Durchführung der Arbeiten. Etwas einschränkend war jedoch ein Kaltlufteinbruch Ende August 2021, der die Durchführung der Geländearbeit im Gebiet Dösen-Säuleck deutlich erschwerte (umständliche Modifikation der tradionellen Messrunde, kein Auslesen des Standortes auf ca. 3000 m (DOV-UP-S), schwierige Wartung der Klimastation und vereitelter Umbau automatischen Kamera (Abb. 2). Auffallend war die der Tatsache, dass einige Bodentemperaturmessstandorte im August bzw. September 2021 - ähnlich wie in den beiden Vorjahren – noch unter einer Schneedecke lagen (Abb. 3), weshalb an einigen Messstandorten im Jahr 2021 keine Daten für 2020/21 gewonnen werden konnten (siehe Tabelle 2). Gleich wie den Vorjahren gilt hier aber, dass bedingt durch die Größe des internen Datenspeichers dies nicht einen Datenausfall bedeutet, sondern es können im Sommer 2022, sofern die Standorte dann schneefrei sind (so wie in den meisten Vorjahren), diese Datenlogger ausgelesen und gewartet werden. Weiters sei erwähnt, dass in Ergänzung zum Standardmessprogramm im Gebiet Pasterze-Burgstall auch geoelektrische Widerstandsmessungen zur Detektion von Toteis im Gletschervorfeld der Pasterze, nahe den beiden Bodentemperaturmessstandorten PAG-PR1 und PAG-PR2, durchgeführt wurden, die an eine Messreihe beginnend im Jahr 2015 anschließen (Kellerer-Pirklbauer et al. 2021)



Abbildung 2: Auswirkung eines Kaltlufteinbruchs Ende August 2021 auf die Geländearbeiten im Gebiet Dösen-Säuleck am 31. 8. 2021 (oben) sowie Fallbichl-Hochtor am 1. 9. 2021 (unten). Im Arbeitsgebiet Dösen-Säuleck konnte dadurch nicht wie geplant die automatische Kamera modernisiert werden. Ebenfalls unmöglich war das Auslesen der Daten und die Wartung des Messstandortes auf 3002 m (DOV-UP-S). Fotos A. Kellerer-Pirklbauer.



Abbildung 3: Verteilung von Schneeflecken im Hinteren Langtalkar am bzw. um den Blockgletscher am 15. 8. 2019 (oben), 12. 8. 2020 (Mitte) und 2. 9. 2021 (unten). Zu beachten die ähnliche, wenn auch etwas geringere Ausdehnung der Schneeflecken im Jahr 2020 im Vergleich zu 2019. Am Geländetermin 2021 war die Ausdehnung der Schneeflecken am geringsten. Im Sommer 2021 waren wie in den Vorjahren einige Bodentemperatur-Monitoringstandorte in den Untersuchungsgebieten noch von einer Schneedecke bedeckt. Im Ausschnitt hier war beispielsweise der Standort HLC-RT (Pfeil gelb) in allen drei Jahren unter Schnee. Fotos A. Kellerer-Pirklbauer.

(2) Blockgletscherbewegungs-Monitoring: Die geodätischen Wiederholungsmessungen zur Bestimmung der aktuellen Bewegungsraten an den beiden Blockgletschern Dösen (Abb. 4) und Hinteres Langtalkar (Abb. 5) erfolgten in gewohnter Weise im August 2021 unter der Leitung von V. Kaufmann. Alle Messungen wurden mittels RTK-GNSS (RTK = real time kinematic; GNSS = global navigation satellite system) durchgeführt. Interne Durchführungsberichte und auch eigene Fotos (Kaufmann 2022) 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. Der aktuelle Forschungsstand am Hinteren Langtalkar Blockgletscher hingegen ist in Kellerer-Pirklbauer & Kaufmann (2018) dargelegt.



Abbildung 4: Satellitengestützte Vermessung (Walter Krämer) des am Dösener Blockgletscher gelegenen Beobachtungspunktes 2 (2437 m). Dieser Punkt hat sich im Zeitraum 2020-2021 um 46,4 cm talabwärts bewegt. Blick nach W hinab zum Dösener See und zum Arthur-v.-Schmidhaus. Foto V. Kaufmann, 18. 8. 2020 (TU Graz).



Abbildung 5: Blick von der geodätischen Basisstation (Punkt 7, 2375 m) in Richtung Hinterer Langtalsee. Im linken oberen Bildviertel ist der Blockgletscher Hinteres Langtalkar, der sich über eine Geländestufe dynamisch unter Beteiligung von Rutschprozessen talabwärts bewegt, zu sehen. Foto V. Kaufmann, 21. 8. 2021 (TU Graz).



(3) Massenbewegungs-Monitoring: Die Messungen der Oberflächenveränderung am Blockgletscher im Hinteren Langtalkar (Abb. 6) sowie der Steinschlag- und Felssturzaktivität am Mittleren und Hohen Burgstall wurden von der ZAMG unter der Leitung von Michael Avian im Juli, August bzw. September 2021 durchgeführt (Tabelle 1). Wegen der anhaltenden technischen Probleme bei der Nutzung des terrestrischen Laserscanners RIEGL VZ6000 (Universität Graz) im Jahr 2021 wurden die Messungen 2021 ausschließlich drohnen-basiert (unmanned aerial vehicles - UAV) durchgeführt. Ergänzend, aber nicht durch das gegenständliche Projekt finanziert, wurden von der BOKU im September 2021 geologische Kartierungen im Bereich des Mittleren Burgstalls durchgeführt.



Abbildung 6: Einmessung zweier neuer Fixpunkte durch Gernot Weyss und Michael Avian (ZAMG) am Standort HLK_Grat am Rücken des Hinteren Seekamps, 2589 m. Foto Avian, 2. 9. 2021.

Zur UAV-Befliegung wurde der Multikopter Phantom 4 RTK der Firma DJI verwendet (Abb. 7). Die Position des Fluggerätes wird mittels GPS: L1/L2 und GLONASS: L1/L2 und den APOS (Austrian Positioning Service) -Korrekturdaten des BEV ermittelt. Der Multikopter ist mit einer Kamera mit einem 1" CMOS-Sensor ausgestattet (20 MP, RGB, 5472x3648, jpeg). Die Structure-from-Motion (SfM)-Auswertung der Luftbilder erfolgt mit Agisoft Metashape, die weiteren Analysen in CloudCompare 2.12beta bzw. Golden Software Surfer 10.



Abbildung 7: Start der zur Vermessung des Hinteren Langtalkars verwendeten Drohne (Multikopter Phantom 4 RTK der Firma DJI) durch Gernot Weyss am Standort HLK_Grat am Rücken des Hinteren Seekamps, 2589 m. Foto M. Avian, 2.9.2021.

(4) Lufttemperatur-Monitoring: Zusätzlich zu den Themenbereichen (1) bis (3) wurden die beiden automatischen Klimastationen auf dem Dösener Blockgletscher sowie im Hinteren Langtalkar gewartet. Im Gegensatz zum Sommer 2018, als ein viermaliger Besuch der Klimastation im Bereich des Dösener Blockgletschers durch einen Techniker (Andreas Pilz, Pilz Umweltmesstechnik, Graz; siehe Kellerer-Pirklbauer et al. 2019) notwendig war, konnten im August und September 2021 an beiden Klimastationen problemlos die Daten ausgelesen werden. Die Datenreihe für 2020/21 an der Station in der Dösen war geschlossen und einwandfrei, jene im Hinteren Langtalkar jedoch nicht durchgehend. Wie sich in der späteren Analyse der Klimadaten aus dem Hinteren Langtalkar zeigte, gab es einen Datenausfall zwischen 14. 5. 2021 und 12. 6. 2021 bedingt durch Stromversorgungsprobleme, was möglicherweise mit Abnützungserscheinungen des mittlerweile über 10 Jahre alten Bleiakkus zusammenhängt.

Um weitere Datenausfälle durch zu geringe Stromversorung zu minimieren, werden im Sommer 2022 voraussichtlich die schweren Bleiakkus (12V 25Ah dryfit Blei-Gel-Akku) an beiden Klimastationen getauscht. Strahlungsschutzschirme bei den beiden Globalstrahlungssensoren wurden im Sommer 2021 nicht nachgerüstet, da von Seiten der Firma Pilz Umweltmesstechnik dies nicht als wesentlich im Sinne der Messgenauigkeit eingestuft wurde. Die Auswirkungen dieses Defekts auf die

Globalstrahlungs-Messwerte sind insofern zu vernachlässigen, als die Strahlung gemessen wird, die direkt (im rechten Winkel) von oben kommt. Die Schutzvorrichtung hat v. a. die Funktion den Stecker trocken zu halten. Fehlwerte am Strahlungssensor in den Vorjahren dürften auf Akkuprobleme zurückzuführen sein. Weitere mechanische Probleme an den Sensoren, wie im Vorjahr, gab es 2021 nicht. Wie sich bei der langjährigen Datenauswertung der Globalstrahlungswerte aus dem Hinteren Langtalkar später herausstellte, sind zumindest dort die Daten nahezu einwandfrei bzw. zeigen keine merkbaren Unterschiede zum Verlauf der Globalstrahlung in den Vorjahren. Alle anderen Sensoren für Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit funktionierten an beiden Stationen – bis auf den - genannten Datenausfall im Hinteren Langtalkar – einwandfrei, weshalb die Lufttemperaturen für 2020/21 für beide Stationen nahezu geschlossen vorliegen.

Untersuchungsgebiet	Тур	Termin	Messteam [Anmerkung]
Dösen-Säuleck	A, D	30. 81. 9. 2021	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Dorić (beide Uni Graz)
Hinteres Langtalkar- Kögelekar	A, D	24. 9. 2021	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Dorić (beide Uni Graz) [zeitgleich tw. mit Michael Avian und Kollegen; siehe C]
Fallbichl-Hochtor	A	1. 9. 2021	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Dorić (beide Uni Graz)
	A	16. 9. 2021	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Dorić (beide Uni Graz) [Pressetermin]
Pasterze-Burgstall	A	1. 9. 2021	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Dorić (beide Uni Graz)
	A	1316. 9. 2021	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Dorić (beide Uni Graz) [zeitgleich mit den jährlichen Gletschermessungen an der Pasterze; mit Durchführung von geoelektrischen Widerstandsmessungen/ERT; unterstützt durch Dominik Herler, Nikolaus Königshofer (beide Graz)]
Dösen-Säuleck	В	1618. 8. 2021	Viktor Kaufmann, Walter Krämer (beide TU Graz), Wolfgang Seka, Carlo Emanuele Augello (beide TU Graz)
Hinteres Langtalkar- Kögelekar	В	19.–22. 8. 2021	Viktor Kaufmann, Walter Krämer (beide TU Graz), Wolfgang Seka, Carlo Emanuele Augello (beide TU Graz)
Pasterze-Burgstall	С	31. 7. 2021 und 19. 9. 2021	Michael Avian, Melina Frießenbichler, Gernot Weyss (ZAMG)
		25. 8. 2021	Michael Avian (ZAMG), Christian Zangerl, Reinhard Gerstner (BOKU) (geologische Begehung Mittlerer Burgstall)
		1316. 9. 2021	Reinhard Gerstner (BOKU, geologische Kartierung Mittlerer Burgstall)
Hinteres Langtalkar- Kögelekar	С	23. 9. 2021	Michael Avian, Melina Frießenbichler, Gernot Weyss (alle ZAMG)

Tabelle 1: Aufstellung der Geländebegehungen zur Durchführung der Geländearbeit in den thematischen Teilbereichen (A) Bodentemperatur-Monitoring, (B) Blockgletscherbewegungs-Monitoring, (C) Massenbewegungs-Monitoring und (D) Lufttemperatur-Monitoring zwischen Juli und September 2021.



3. Witterungsablauf und Schneeverhältnisse 2020/21

Der Witterungsverlauf in den Ostalpen im Messjahr 2020/21 (1. 8. 2020–31. 7. 2021) wird hier durch die Abweichungen von Monatsmittelwerten von der Klimanormalperiode (in diesem Fall die 30-jährige Periode 1981-2010) behandelt. Die Lufttemperatur wird in Abbildung 8 (links) als die Abweichungen der mittleren Monatsmittel der drei Bergstationen Sonnblick, Säntis (Schweiz) und Zugspitze (Deutschland) von den langjährigen Werten für die Monate August 2020 bis Juli 2021 dargestellt. Die Graphik lässt erkennen, dass 7 von 12 Monaten im Beobachtungsjahr 2020/21 übernormal, ein Monat nahezu normal und vier Monate deutlich unternormal temperiert waren. Im Mittel über die drei genannten Stationen sowie über das gesamte Beobachtungsjahr lag der Jahresmittelwert 0,6 °C über dem Normalwert.



Abbildung 8: Die Abweichung der monatlichen Temperaturen (in °C) und des Niederschlags (in %) zwischen August 2020 und Juli 2021 (= Berichtsjahr 2020/210) vom Mittel 1981–2010 an den drei Gebirgswetterstationen Sonnblick, Zugspitze und Säntis. Die Darstellung der Niederschlagsanomalie beruht nur auf Daten der Stationen Zugspitze und Säntis (Datenquellen: ZAMG für Sonnblick, Deutscher Wetterdienst für Zugspitze, MeteoSchweiz für Säntis).

Im Jahresverlauf ist auffällig, dass sowohl der August als auch der September 2020 deutlich zu warm ausfielen mit +1,7 bzw. +2,0 °C. Der Oktober 2020 war hingegen deutlich zu kalt mit 1,6 °C unter dem Normalwert, während der November 2020 der Monat mit der bei Weitem stärksten positiven Temperaturabweichung des gesamten Beobachtungsjahres (+4,4 °C) war, noch vor den Monaten Februar 2021 (+3,8 °C) und Juni 2021 (+3,2 °C). Der November 2020 war laut den Monatsberichten der ZAMG einer der zehn trockensten der Messgeschichte und auf den Bergen der drittwärmste November seit Messbeginn, höhere Temperaturwerte gab es nur in den Novembern der Jahre 2011 und 2014. Ganz ähnlich verhielt es sich mit dem Februar 2021. Im Gebirge war dies laut ZAMG der siebentwärmste Februar der 170-jährigen Gipfel-Messgeschichte. Dies ist jedoch im Hochwinter für den Permafrost wegen des ohnehin tiefen Temperaturniveaus weniger relevant als im Frühjahr. Beim Juni 2021 zeigen die Aufzeichnungen der ZAMG, dass es sich um den drittwärmsten und zweitsonnigsten Juni und einen der zehn trockensten der Messgeschichte handelte. Sowohl die Trockenheit als auch die hohen Temperaturen in den drei genannten extremen Monaten waren nicht



förderlich für den Permafrost, wobei v. a. der warme Juni 2021 für eine relativ schnelle Erwärmung des Bodens gesorgt hat.

Nur relativ wenig übertemperiert waren die beiden Monate Dezember 2020 und Juli 2021 (1,1 °C und 0,6 °C). Der März 2021 kann in Bezug auf die Monatasmitteltemperatur als "normal" für die Klimanormalperiode 1981-2010 angesehen werden. Mehr als 2 °C zu kalt gegenüber den Normalwerten waren die drei Monate Jänner, April und Mai 2021, mit -2,8 °C bis -2,2 °C gegenüber den Mittelwerten. Vor allem der deutlich zu kühle Mai 2021 bewirkte eine verzögerte Abschmelzung der Winterschneedecke und eine langsame Erwärmung des Bodens im Gebirge. Das Beobachtungsjahr 2020/21 kann somit aus thermischer Sicht im Mittel als abträglich für den Permafrost in den Hohen angesehen werden, wobei diese Abträglichkeit weniger deutlich ausfiel als im Berichtsjahr 2019/20.

Die Abweichungen der Niederschläge von den 30-jährigen Normalwerten werden in Abbildung 8 (rechts) für die beiden Gebirgsstationen Zugspitze und Säntis dargestellt (Datenlücke für den Sonnblick). Im Gegensatz zu den Temperaturen, die sich an den drei Stationen sich sehr ähnlich (im Sinne der Abweichung von den Normalwerten) verhalten, ist der Unterschied beim Niederschlag zwischen den Stationen deutlich größer, was auf kleinräumigere Niederschlagsereignisse zurückzuführen ist. Zu beachten ist, dass - trotz der starken Unterschiede zwischen den Einzelmonaten (zwischen +101,8 % im Jänner 2021 und -71,9 % im November 2020) – die Abweichung der Jahressumme des Niederschlags an den beiden Stationen im Mittel nur bei +1,1 % lag. Betrachtet man nur die winterliche Akkumulationszeit (Oktober 2020 bis April 2021), die für die Ernährung der Gletscher in den Hohen Tauern besonders wichtig ist, so war der Niederschlag im Mittel leicht negativ (-5,1 %). Der bei Weitem trockenste Monat im Messjahr 2020/21 war der November (einer der zehn trockensten November der Messgeschichte laut ZAMG; siehe oben). Zwischen 35 und 48 % niederschlagsärmer als normal waren die Monate September und Dezember 2020 sowie Februar und April 2021. Für den Permafrost gilt, dass schneefreie oder -arme Bereiche in den Gebirgslagen im Winter besser auskühlen und Permafrost konservieren können, bei schneefreien Bereichen, die sich im Frühjahr schneller erwärmen, ist das Gegenteil der Fall.

Deutlich mehr Niederschlag als normal fiel – neben dem bereits erwähten Jänner 2021 – in den Monaten Oktober 2020 sowie Jänner, Mai und Juli 2021 (zwischen +50 bis +74 %). Nicht erkennbar sind wegen der Lage der beiden hier verwendeten Stationen die besonders hohen Dezemberniederschläge im Süden des Alpenhauptkammes. Die spätwinterlichen Schneefälle, die sich in den überdurchschnittlichen Niederschlägen des Mais widerspiegeln, waren mit dafür verantwortlich, dass die Schneedecken im Gebirge der starken Abschmelzung im viel zu warmen Juni lange trotzten. Der Juli war zwar annähernd normal temperiert, jedoch deutlich zu nass, was sich insgesamt darauf hinauslief, dass die Bedingungen im Juli 2021 (aber auch August 2021) etwas weniger permafrostungünstig als in den Vorjahren waren. Nachdem ein Wettersturz Ende August nahezu alle österreichischen Hochgebirgsbereiche mit Schnee bedeckt hatte (und damit die Geländearbeit im Rahmen dieses Projektes erschwerte; vgl. Abb. 2), kam es im deutlich zu warmen und niederschlagsarmen September noch zu bedeutendem Abbau von Schneedecken (und auch Eisschmelze an den Gletschern), bis mit dem Kaltfrontdurchgang vom 5./6.10.2021 das Gletscherhaushaltsjahr 2020/21 endete und auch in den meisten Permafrostarealen die Temperaturen fortan im negativen Bereich blieben.

4. Ergebnisse Monitoring 2020/21 4.1. Bodentemperatur-Monitoring

Die Abbildung 9 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 (n=14; Standort KC-LO musste wegen Schuttkriechuns 2021 aufgegeben werden) und Dösen-Säuleck (n=12), gefolgt vom Arbeitsgebiet Pasterze-Burgstall (n=6) und Fallbichl-Hochtor (n=3). Ein weiterer Standort liegt etwas SW vom Kögelekar im Gößnitzkar (GOE-PR).



Abbildung 9: Detailkarten der vier Untersuchungsgebiete zum Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten mit Lage nahezu aller Messstandorte, welche mit Miniatur-Temperaturdatenlogger ausgestattet sind (vgl. Tabelle 2). Standort PAG-FI wurde 2020 aufgelassen (Insellage im Pasterzensee). Neuer Standort PAG-FIR im Pasterzengebiet (außerhalb des Kartenausschnitts) eingerichtet. Standort HLC-SO-S nach 7 Jahren im Jahr 2020 wieder reaktiviert. Logger am Standort KC-LO zerstört durch Schuttkriechbewegungen (Gletschermaske für Pasterze und benachbarte Gletscher nach Buckel et al. 2018).



Tabelle 2: Auflistung der vier lokalen Untersuchungsgebiete im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten und ihrer Instrumentierung mit Miniatur-Temperaturdatenloggern. Lage siehe Abbildung 9. Abbildungen 13, 25, 26 und 27 zeigen Daten bzw. Auswertungen der jeweils grau hinterlegten Sensoren. HLC = Hinteres Langtalkar-Kögelekar, FAL = Fallbichl, HOT = Hochtor, DOV = Dösen-Säuleck, PAG = Pasterze-Burgstall. GOE-PR ist ein Standort im Gößnitzkar, 2,6 km SW vom Kögelekar. Der Code für jeden Standort besteht (bis auf eine Ausnahme) aus diesen Bezeichnungen in Kombination mit weiteren, internen Kürzeln; z. B. N = Nord, S = Süd.

Code	Koord. B	MN-M31 31258)	Koord. UTM-33N (FPSG 32633)		Höhe	Exposition	Neigung	Messtiefen
	RW	HW	RW	HW	(m)	(°)	(°)	(cm)
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-S (c)	407560	205840	330795	5206487	2393	253	32	0, 10, 40
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
GOE-PR**	406099	202925	329272	5203604	2598	90	4	0, 30
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 (e)	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 (f)	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/f)	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	(b)
PAG-PR1	404719	215779	328165	5216484	2078	0 (e)	0	0
PAG-PR2	404710	215824	328158	5216528	2080	0 (e)	0	0, 10, 40
PAG-FIR (d)	403015	219187	326535	5219927	3049	256	7	0



Anmerkungen zu Tabelle 2: (a) Daten vom Sensor in 100 cm Tiefe; (b) Standort PAG-FI wurde bedingt durch Lage auf einer Insel im Paterzensee 2020 aufgelassen; (c) 2020 reaktivierter Standort HLC-SO-S; (d) 2020 neu eingerichteter Standort PAG-FIR; (e) ebene Lage, deshalb 0°. (d) 2021 witterungsbedingt nicht besucht. (f) 2021 mit neuen Sensor ausgestattet. * 2021 am Geländearbeitstermin unter Schnee (3 Standorte: HLC-RT, KC-UP und DOV-MI-N). ** Der Standort GOE-PR wurde 2015 eingerichtet, liegt rund 2,6 km SW vom Kögelekar bzw. 3 km SW vom Hinteren Langtalkar und misst in 0 und 30 cm Tiefe. Zur besseren Übersicht wurde dieser Standort nun auch in die Übersichtstabelle aufgenommen

Im Gößnitztal und im Dösental stehen auch noch weitere für das Permafrost-Monitoring wichtige Messinstrumente, und zwar je eine automatische Klimastation (siehe weiter unten) und je eine automatische optische Kamera, welche die Ernährungsbedingungen von aktiven Blockgletschern – im Sinne von Lawinen- und Steinschlagtätigkeit – beobachten sollen (vgl. Kellerer-Pirklbauer & Rieckh 2016). Die Kamera im Hinteren Langtalkar konnte 2021 bei optimalen Witterungsbedingungen modernisiert werden, bei jener in der Dösen vereitelte dies die Witterung.

Der im Jahr 2020 neu eingerichtete Standort PAG-FIR ist der höchstgelegene (3049,22 m) im aktuell 36 aktive Standorte umfassenden Messnetz und wurde im Jahr 2021 das erste Mal erfolgreich gewartet. Wie zu ewarten war, wies dieser Standort die tiefste Jahresmitteltemperatur von allen im ganzen Untersuchungszeitraum auf. An den beiden Standorten DOV-RF-N sowie DOV-CO mussten die Sensoren ausgetauscht bzw. ergänzt werden, da Kabelschäden in den letzten Jahren tw. zu Fehlwerten oder Datenausfällen geführt haben. Beim erstgenannten Standort musste hierzu noch ein 45 cm tiefes Bohrloch gebohrt werden (Abb. 10, links), bevor die neue Sensorkette mit Temperaturmesssensoren in 3, 10 und 40 cm eingebaut werden konnte. Die neue Temperaturmesskette ist ca. 20 cm vom alten Standort entfernt (Abb. 10, rechts) und kann somit als direkt vergleichbar angesehen werden. Am Standort DOV-CO wurde eine neue Temperaturmesskette mit Sensoren in 1, 2 und 3 m Tiefe in den grobblockigen Schutt eingebaut.



Abbildung 10: Am Standort DOV-RF-N wurde in den kompakten Fels eine neue Temperaturmesskette mit Sensoren in 3, 10 und 40 cm Tiefe eingebaut. Als Vorbereitung dazu musste ein 45 cm tiefes Loch erbohrt werden. Der neue Standort liegt nur rund 20 cm vom alten entfernt. Foto links, A. Dorić; Foto rechts, A. Kellerer-Pirklbauer, beide 31. 8. 2021.

Standort Zusätzlich wurden die Messungen am GOE-PR _ außerhalb der vier Kernuntersuchungsgebiete (und folglich in Abb. 9 nicht dargestellt) – erfolgreich fortgeführt (Start der Messreihe 2015). Dieser Standort liegt in einem dem Untersuchungsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar benachbarten Kar direkt im Gletschervorfeld des Gößnitzkeeses auf einer Seehöhe von 2594 m und dient dem Vergleich mit den Daten aus dem Untersuchungsgebiet. Angaben wie Koordinaten, Seehöhe, Exposition und Hangneigung sind auch für diesen Standort in Tabelle 2 erfasst. Die Abbildung 11 oben 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 ca 135°) relativ gut repräsentiert sind. Die drei unteren Grafiken in Abbildung 11 zeigen die statistische Verteilung der Seehöhe, Hangneigung und Exposition aller 36 Standorte in Form von Boxplot-Diagrammen. Innerhalb der Box liegen die mittleren 50 % der Daten; die Medianwerte (horizontale Linie in der Box) liegen bei 2601 m für Seehöhe (Interquartilsabstand: 2470–2681 m), bei 22,4° für Hangneigung (Interquartilsabstand: 12–32°) und bei 220° für Exposition (Interquartilsabstand: 60–279°). Dies besagt, dass Seehöhe und Hangneigung relativ konzentriert verteilt sind.



Abbildung 11: Seehöhe und Hangneigung sowie Seehöhe und Exposition aller 36 aktuell aktiven Standorte der Bodentemperatur-Messungen in den vier Untersuchungsgebieten mit Stand September 2021 (siehe Tabelle 2). Die unteren drei Diagramme zeigen die entsprechenden Boxplot-Diagramme zu den drei Parametern.

Bodentemperaturverhältnisse im Messjahr 2020/21

Die an den Standorten ermittelten Jahresmitteltemperaturen für das Berichtsjahr 2020/21 sind in Abbildung 12 – aufgeteilt auf die vier Teilgebiete – dargestellt. Alle vier Teildiagramme sind auf der Ordinate gleich skaliert und damit direkt vergleichbar.

Im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar (inklusive dem Vergleichsstandort im benachbarten Gößnitzkar; GOE-PRO) wurden an 12 Standorten Jahresmitteltemperaturen ermittelt. Zwei Standorte lagen zum Zeitpunkt des Geländetermins unter Schnee (HLC-RT und KC-UP) und an einem Standort musste ein zerstörter Datenlogger (KC-LO) geborgen werden, wobei an diesem Standort eine Neuinstrumentierung bedingt durch die große Instabilität des Standortes nicht als sinnvoll erscheint. Nur an zwei Standorten lag die Jahresmitteltemperatur (knapp) unter 0 °C, dies waren HLC-MI-N sowie HLC-CO. Die höchsten Jahresmittelwerte wurden hingegen mit ca. 3 °C am südexponierten

Felsmesstandort (HLC-RF-S) sowie am deutlich tiefer gelegenen südexponierten Solifluktionsmesstandort (HLC-SO-S) erzielt. Der Mittelwert der Jahresmitteltemperatur an den 12 Standorten mit entsprechenden Werten liegt bei 1,2 °C. Im Vergleich zum Vorjahr lagen die Jahresmitteltemperaturen 2020/21 an 10 von 11 Standorten mit Werten in beiden Messjahren unter jenen des Vorjahres, was auf – relativ gesehen – permafrostgünsterige Bedingungen hinweist.

Auch im Arbeitsgebiet Fallbichl-Schareck wurde an allen drei Standorten im Messjahr 2020/21 jeweils tiefere Temperaturen als im Vorjahr gemessen, wobei die Unterschiede zwischen 0,5 und 0,7 °C betrugen. An keinem der drei Standorte wurde eine negative Jahresmitteltemperatur erzielt, wobei am Standort HOT – der kälteste Standort in diesem Gebiet auf 2580 m gelegen – die Mitteltemperatur ganz knapp (0,05 °C) über dem Nullpunkt lag.



Abbildung 12: Jahresmitteltemperatur an/nahe der Bodenoberfläche (Zeitraum 1. 8. 2020 bis 31. 7. 2021) aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten für das Berichts- bzw. Messjahr 2020/21. Standorte, die mit ND (no data) markiert sind, waren im Sommer/Herbst 2021 unter Schnee (HLC-RT, KC-UP, DOV-MI-N), hatten einen technischen Defekt (KC-LO) oder konnten witterungsbedingt nicht erreicht werden (DOV-UP-S).

Im Arbeitsgebiet Dösen-Säuleck liegen für 2020/21 Ergebnisse von 10 Standorten vor. Gleich dem ersten Untersuchungsgebiet wurden auch im dritten nur für zwei Standorte eine negative Jahresmitteltemperatur ermittelt; beides sind nordexponierte Standorte mit Jahresmittelwerten von - 0,6 °C (DOV-UP-N) und -1,1 °C (DOV-LO-N). Der "traditionell" kälteste Standort in diesem Arbeitsgebiet

(DOV-UP-S; im Vorjahr mit einer Jahresmitteltemperatur von -1,9 °C) konnte aufgrund der Neuschneelage 2021 nicht besucht werden. An allen neun Standorten mit Messwerten in 2019/20 und 2020/21 wurden für das letztgenannte Jahr tiefere Temperatur gemessen, wobei die negative Abweichung zum Vorjahr zwischen 0,3 °C (DOV-RT) und 1,6 °C (DOV-LO-N) betrug. Der Standort DOV-MI-N war – wie in den beiden Messjahren zuvor – unter Schnee und konnte somit zum dritten Mal in Folge nicht gewartet werden. Es bleibt für diesen Standort zu hoffen, dass 2022 ein Batterietausch sowie eine Sicherung der Daten möglich sein wird.

Schließlich konnten noch im Arbeitsgebiet Pasterze-Burgstall für sechs Standorte (2 mehr als im Vorjahr) Jahresmittelwerte errechnet werden, wobei zumindest ein Standort einen leicht negativen Mittelwert der Jahresbodentemperatur (PAG-BU: -0,6 °C) und ein zweiter (der 2020 eingerichtete Standort PAG-FIR) 2020/21 mit -3,5 °C den tiefsten Jahresmittelwert der Temperatur des gesamten Messnetzes aufwies. An allen vier Standorten mit Messwerten in 2019/20 und 2020/21 waren jene vom letztgenannten zwischen 0,02 °C (PAG-UP) und 0,65 °C (PAG-PR1) tiefer. Der Mittelwert der Jahresmitteltemperatur an den sechs Standorten in diesem Messgebiet liegt bei 1,1 °C.

In Summe konnte im Messjahr 2020/21 an 31 Standorten ein Jahresmittelwert der Bodentemperatur ermittelt werden, davon wiesen 6 Standorte eine negative und 25 Standorte eine postiven Mittelwert auf. Der Mittelwert der Temperatur für 2020/21 liegt an diesen 31 Standorten bei 1,1 °C, wobei die Werte zwischen 3,2 °C und -3,5 °C liegen. An 26 Standorten lagen Jahresmittelwerte für 2019/20 und 2020/21 vor, an nur einem einzigen Standort (!) war der Wert 2019/20 niederer als 2020/21, was klar auf günstigere Bedingungen für den Permafrost im Kärntner Teil des Nationalparks im letzten Beobachtungsjahr hinweist.

Abbildung 13 zeigt die Tagesmitteltemperaturen von drei der vier in Tabelle 2 grau hinterlegten Standorte (einer pro Untersuchungsgebiet; Außnahme DOV-UP-S) im Messjahr 2020/21. Zur besseren Unterscheidung der Perioden innerhalb des Messjahres mit (d. h. relativ geringe Schwankungen der Bodentemperatur) und ohne (d. h. starke Schwankungen) thermischer Schneepufferwirkung wurde jeweils auch die Lufttemperaturkurve der Klimastation im Hinteren Langtalkar für denselben Zeitraum hinterlegt.

Im Jahresgang für 2020/21 am Standort HLC-UP-N ist deutlich zu erkennen, dass eine winterliche Schneedecke sich dämpfend auf Schwankungen der Bodentemperatur zwischen bereits ab Anfang Oktober 2020 und bis Anfang Juli 2021 auswirkte. Einerseits verhinderte diese neunmonatige Schneedecke im Herbst und Winter eine effektive Ausstrahlung und somit Abkühlung des Bodens (Permafrost-ungünstig), andererseits wurde der Untergrund durch die Schneedecke bis Anfang Juli vor der solaren Einstrahlung effizient geschützt (Permafrost-günstig). Nichtsdestotrotz liegt die Jahresmitteltemperatur an diesem Standort mit 0,2 °C knapp über dem Gefrierpunkt und war um 0,4 °C unter dem Rekordwert des Vorjahres (jedoch über jenem von 2018/19). Somit kann man immer noch von einer Permafrostungunst für diesen Standort für 2020/21 sprechen.





Standort HLC-UP-N (2693 m): Tagesmitteltemperatur 01.08.2020-31.07.2021 im Vergleich mit der Lufttemperatur gemessen an der Klimastation im Hinteren Langtalkar

Abbildung 13: Tagesmitteltemperaturen der Bodenoberfläche an drei ausgewählten Standorten im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten für das Messjahr 2020/21 (1. 8. 2020 bis 31. 7. 2021). Messbereiche im Winterhalbjahr mit geringer Schwankung deuten auf Dämpfungseffekte durch eine mächtigere Schneedecke (> 80 cm) hin. In Grau sind die Tagesmittelwerte der automatischen Klimastation im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS) dargestellt. Bedingt durch Probleme mit der Stromversorgung an der Klimastation im Hinteren Langtalkar (vgl. Kapitel 2), liegen von dort keine Lufttemperaturdaten für den Zeitraum 14. 5. 2021 bis 12. 6. 2021 vor. Für den vierten "klassischen" Vergleichsstandort DOV-UP (siehe Vorjahrsberichte) lagen 2020/21 keine Daten vor.

Ähnlich wie im Berichtsjahr zuvor gab es auch im aktuellen Berichtsjahr am Standort FAL-UP eine langanhaltende saisonale und thermisch isolierende Schneedecke, und zwar von Anfang Dezember 2020 bis zum 11. 6. 2021. Bedingt durch die deutliche Dämpfung des Lufttemperatursignals im Winter wurden an diesem Standort nach dem 6. 12. 2020 nur relativ milde Wintertemperaturen von wenig unter 0 °C gemessen. In Summe blieb dieser Standort zumindest im Mittel um 0,5 °C kälter als im Vorjahr. Auch gab es an diesem Standort einen neuen Wärmerekord mit +0,8 °C gegenüber dem bisherigen Höchstwert. Auffallend ist an diesem Standort für 2020/21 auch, dass die sogenannte Zero-Curtain-Periode (Periode mit 0° C, welche auf eine abbauende, durchtränkte Schneedecke hinweist) rund 40 Tage lang dauerte, was auf den langsamen Abbau der winterlichen Schneedecke im Mai durch



unterdurchschnittliche Temperaturen und überdurchschnittlichen Niederschlag (siehe Kapitel 3) zurückzuführen ist.

Am letzten gezeigten Standort PAG-UP zeigt sich ein deutliches anderes Bild mit weitgehend fehlendem Dämpfungseffekt der Schneedecke. Eine dünne, nur wenig isolierende winterliche Schneedecke ist an diesem Standort aber häufig vorhanden (v. a. Dezember 2020 und Jänner 2021), wenn man die gedämpften Bodentemperaturminima im Winterhalbjahr im Vergleich zur Lufttemperatur betrachtet. Im Jahresmittel wiederholte der Standort PAG-UP mit 1,86 °C fast den Maximalwert des Vorjahres, als die Jahresmitteltemperatur bei 1,88 °C lag.

4.2. Blockgletscherbewegungs-Monitoring

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Blockgletscherbewegungs-Monitorings für die beiden Blockgletscher separat präsentiert, für den Vergleich wird auf Kap. 5.2 verwiesen.

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. Die Bewegungsraten für den Beobachtungszeitraum 2020/21 wurden durch Epochenvergleich (18. 8. 2020, 17. 8. 2021) ermittelt.

Die horizontalen Bewegungsvektoren der 34 Beobachtungspunkte sind in Abbildung 14 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-Schmidhauses gewählt. Tabelle 3 fasst die zeitliche Änderung des Bewegungsverhaltens des Blockgletschers durch Angabe von Mittel- und Maximalwerten der Bewegungsraten (Fließgeschwindigkeit) für den Zeitraum 2015-2021 zusammen.



Abbildung 14: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Dösener Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2020/21. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (cm/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. ±2-3 cm/Jahr (1σ-Schranke). Eine maximale Fließgeschwindigkeit von 71,0 cm/Jahr wurde im Punkt 15 gemessen. Ein betragsmäßig größerer Wert von 135,0 cm/Jahr, gemessen im Punkt 3, ist nicht repräsentativ, da er von einer lokalen Rutschung rührt. Orthophoto 20. 9. 2010 © Land Kärnten.



Tabelle 3: Bewegungsraten am Dösener Blockgletscher für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2015-2021. Die Mittelwerte wurden aus den Bewegungsraten der zentralen Punkte 10-17, 21-23 gerechnet. Die Maximalwerte wurden jeweils im Punkt 15 festgestellt.

Werte (in	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21
cm/Jahr)						
Mittelwert	52,0	43,2	38,0	42,9	50,3	60,0
Maximalwert (Punkt)	64,7 (15)	53,1 (15)	46,4 (15)	51,1 (15)	58,9 (15)	71,0 (15)

Die aktuelle Fließgeschwindigkeit am Dösener Blockgletscher hat sich im Vergleich zum Vorjahr signifikant um weitere 19,3 % (im zentralen Bereich) vergrößert. Die aktuellen Bewegungsraten sind somit die höchsten seit Messbeginn 1995. Auffallend ist die beschleunigte Bewegung des Punktes 3. Der ermittelte Verschiebungsvektor lässt vermuten, dass die ermittelte Jahresbewegung auf eine lokale Rutschung zurückzuführen ist, ähnlich der Situation beim Punkt 1 im Vorjahr. Der gegenständliche Punkt ist somit nicht repräsentativ für die aktuelle Kinematik des Blockgletschers.

Blockgletscher Hinteres Langtalkar

Am Blockgletscher im Hinteren Langtalkar erfolgte im Jahr 2014 ebenfalls die vorhin angesprochene Umstellung von der traditionellen Vermessung auf die moderne Satellitenpositionierung. Das geodätische Datum an diesem Blockgletscher ist durch insgesamt 15 Festpunkte definiert. Die Bewegungsraten für den Beobachtungszeitraum 2020/21 wurden durch Epochenvergleich (21. 8. 2020, 21. 8. 2021) ermittelt. Im betrachteten Zeitraum sind zwei weitere Punkte, nämlich 25 und 31, im Stirnbereich des Blockgletschers durch anhaltend starke Rutschprozesse verloren gegangen. Die horizontalen Bewegungsvektoren der verbliebenen 34 Beobachtungspunkte sind in der Abbildung 15 graphisch dargestellt. Als Basisstation für den RTK-Einsatz diente der Festpunkt 7. Für die Charakterisierung der zeitlichen Änderung des Bewegungsverhaltens des Blockgletschers Hinteres Langtalkar wurden für zwei ausgewählte Punktgruppen A (oberer Bereich) und B (unterer Bereich) die Mittel- und Maximalwerte der Bewegungsraten (Fließgeschwindigkeit) tabellarisch (Tabelle 4) für den Zeitraum 2015-2021 zusammengestellt.

Tabelle 4: Bewegungsraten am Blockgletscher Hinteres Langtalkar für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2015/16 bis 2020/21 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. Der errechnete Mittelwert im unteren Bereich ist gegenüber der Referenzbewegung 2014/2015 betragsmäßig angepasst.

	Werte (in	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21		
	cm/Jahr)								
	Mittelwert	27,3	19,4	16,3	19,1	27,7	37,3		
	Maximalwert	32,6 (11)	22,3 (11)	20,6 (11)	21,9 (17)	31,8 (10)	42,8 (11)		
	(Punkt)								
P	unktgruppe B (Punkte 23-25, 27-31; alle Punkte bzw. reduzierte Punkteanzahl)								
	Werte (in	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21		
	m/Jahr)								
	Mittelwert	6,00	4,60	4,77	5,20	5,48	5,74		
	Maximalwert	9,83 (31)	5,66 (24)	6,64 (24)	7,45 (24)	8,07 (25)	3,94 (23)		
	(Punkt)								

Punktgruppe A (Punkte 10-17, 37)

Anmerkung: Bei den Mittelwertberechnungen ab 2015-2016 wurden nur die messbaren Punkte berücksichtigt. Die ermittelte Relativänderung wurde quantitativ auf einen sinnvollen Tabellenwert umgerechnet. Eine ähnliche Vorgangsweise

wurde auch für die Auswertung 2020/21 (ohne die Punkt 24, 25 und 31) eingeschlagen. Die angegebenen Maximalwerte sind die tatsächlich gemessenen Größen.



Abbildung 15: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Blockgletscher Hinteres Langtalkar mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2020/21. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (m/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. ±2-3 cm/Jahr (1σ-Schranke). Eine maximale Fließgeschwindigkeit von 3,94 m/Jahr wurde im Punkt 23 gemessen. Die Punkte 24 und 25 im Nahbereich des Punktes 23 sind nun endgültig in den unten liegenden Steilbereich abgerutscht und konnten daher nicht mehr nachgemessen werden. Die im Vorjahr angelegten Ersatzpunkte 25A bzw. 25B konnten heuer nicht mehr aufgefunden werden. Für den gefährdeten Punkt 27 wurde ein Ersatzpunkt 27A angelegt. Der Punkt 45 wurde aufgrund seiner Verkippung in zwei unterschiedlichen Punktdefinitionen eingemessen. Orthophoto 28. 8. 2012 © Land Kärnten.

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 mehr mit einem erheblichen Gefahrenpotential möglich. Die aktuell festgestellten Bewegungsraten haben sich im Vergleich zum vorjährigen Beobachtungszeitraum signifikant (Punktgruppe A mit 34,7%) vergrößert. Die diesbezügliche Einschätzung für die Punktgruppe B ist unsicher, da dieser Bereich bereits stark von lokalen Rutschungsprozessen beeinflusst ist. Unter Berücksichtigung der noch messbaren Punkte (23, 27 und 28) ergibt sich hier der ebenfalls eine Zunahme mittleren Bewegungsrate um 4,8 %. Größere Massenumlagerungen/Rutschungen können im unteren hoch aktiven Teil des Blockgletschers für die nächsten Jahre weiterhin nicht ausgeschlossen werden (siehe auch Kap. 4.3).

4.3. Massenbewegungs-Monitoring

Die Ergebnisse des Massenbewegungs-Monitorings 2020/21 werden in diesem Teilkapitel zuerst für den Blockgletscher Hinteres Langtalkar und anschließend für die Felssturzbereiche am Mittleren und am Hohen Burgstall dargestellt.

Blockgletscher Hinteres Langtalkar

Die Oberflächenmessungen im Hinteren Langtalkar finden seit 2000 vom Standpunkt HLK_Front (2.454,71 m) aus statt. Ein entsprechendes Messnetz – bestehend aus einem Scan-Standpunkt und fünf Referenzpunkten – wurde ebenso im Jahr 2000 eingerichtet (Bauer et al. 2003). Ein weiterer Standpunkt wurde 2010 am Standpunkt HLK-Grat am Rücken des Hinteren Seekamps ca. 600 m WSW der Blockgletscherstirn eingerichtet. Hier wurden im Jahr 2021 zwei Fixpunkte zur Positionsbestimmung für die UAV-Befliegung eingemessen (HLK_Grat_1: 2618,59 m, HLK_Grat_2: 2619,46 m, Abb. 6).

Seit 2019 werden vom Standpunkt HLK-Grat UAV-basierte optische Aufnahmen des Blockgletschers Hinteres Langtalkar durchgeführt. Dieser Standort bietet einen sehr guten Überblick über das Hintere Langtalkar, von dem aus v. a. die Funkverbindung zur Drohne durchgehend gegeben ist. In diesem Endbericht werden die Auswertungen der UAV-basierten Messungen 2019 und 2021 dargestellt, deren endgültige Auswertung bei der Berichtslegung im März 2022 jedoch noch nicht vorlag. Für die Berechnung der Oberflächendynamik am Blockgletscher im Hinteren Langtalkar werden die aus den UAV-basierten Daten abgeleiteten Höhenmodelle der Jahre 2019 und 2021 verwendet (Abb. 16). Dies hat einerseits den Vorteil, dass die Daten eine ähnliche Aufnahmegeometrie haben sowie den gesamten Bereich des Blockgletschers abdecken. Die Daten der TLS-Messungen der Blockgletscherstirn 2020 werden in dieser spezfischen Analyse nicht berücksichtigt.



Abbildung 16: Oberflächenbewegung (cm/a) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar in der Periode 2019-2021, abgeleitet aus respektiven Geländemodellen berechent auf UAV-basierten, optischen Bildaufnahmen. Bodenauflösung 5 cm. Koordinatensystem: MGI/Austria GK M31 - EPSG: 31258.

Der anhaltende Vorstoß der Blockgletscherstirn macht sich auch in der Morphologie deutlich bemerkbar, wie bereits in den letzten Jahren berichtet wurde oder exemplarisch der Abbildung 7 zu entnehmen ist. Darin ist erkennbar, dass das Schuttmaterial des Blockgletschers die angrenzende alpine Grasheide weiterhin aufschiebt (vgl. auch Kellerer-Pirklbauer et al. 2021). Als Folge davon wurde zwischen 2012 und 2021 der Fixpunkt 52 vom Blockgletscher überfahren. Das gleiche Schicksal steht Fixpunkt 3 bei gleichbleibenden Bewegungsraten in den nächsten Jahren bevor. Neue Fixpunkte für die TLS-Messungen müssen gegebenenfalls im Jahr 2022 eingerichtet werden.

Die Analyse der Oberflächendeformation des Blockgletschers Hinteres Langtalkar (Abb. 16) in der Periode 2019-2021 zeigt folgendes Bild: Der obere Bereich des Blockgletschers ist durch geringe Bewegungsbeträge gekennzeichnet, die sich ab den deutlich erkennbaren Transversalfurchen oberhalb der Talstufe erhöhen. In der Detailanalyse des untersten Bereichs des Blockgletschers in der Periode 2019-2021 lassen sich 3 Bereiche (area1 – area3) von besonderer Oberflächendynamik (Abb. 17) abgrenzen. Der orographisch linke Bereich der Blockgletscherstirn (area1) bewegt sich im Mittel mit 1,69 m/a, der rechte nahezu identisch mit im Mittel 1,71 m/a. Auch die Maximalwerte mit 2,05 (area1) und 2,48 m/a (area2) deuten demnach auf eine anhaltend hohe Bewegungsdynamik der gesamten Blockgletscherstirn hin. Die Oberflächenbewegung nimmt Richtung Talstufe (bergauf) deutlich zu, im Bereich area3 wurden Oberflächendeformationen mit im Mittel 2,27 m/a und Maximalwerte von 3,99 m/a berechnet (Tabelle 5).



Abbildung 17: Oberflächenbewegungen im unteren Bereich des Blockgletschers Hinteres Langtalkar für die Beobachtungsepoche 2019/21, abgeleitet aus respektiven Geländemodellen basierend auf UAV-basierten, optischen Bildaufnahmen. Bodenauflösung 5 cm. Die Ziffern 1-3 beschreiben area1-area3 in Tabelle 5. Koordinatensystem: MGI/ Austria GK M31 - EPSG: 31258

Tabelle 5: Median und 95 %-Perzentil der Oberflächenbewegung in ausgewählten Bereichen des Blockgletschers Hinteres Langtalkar. Die Lagen der Bereiche area1 bis area3 sind in Abbildung 17 ersichtlich. Zur Darstellung realistischer Maximalwerte wurde das 95 %-Perzentil verwendet.

Blockgletscher Hinteres Langtalkar (Angaben in m)								
Periode	area1 area2 area3					ea3		
	median	95 %	median	95 %	median	95 %		
2019-2021 1,69 2,05 1,71 2,48 2,27 3,99								

Im Frühsommer 2022 wird voraussichtlich die TLS-Messung des Jahres 2020 endgültig detailliert ausgewertet und mit den UAV-Messungen von 2019 und 2021 ein einer Analyse zusammengeführt. Aufgrund des logistischen Aufwands und der sehr guten Ergebnisse der Messungen 2019 und 2021 werden am Blockgletscher Hinteres Langtalkar ab 2022 planmäßig nur noch UAV-basierte Messungen durchgeführt.

Felssturzbereiche Mittlerer Burgstall

Die abgeleiteten Daten aus den UAV-Befliegungen 2019, 2020 und 2021 bilden nun eine flächendeckende Datenbasis zur Betrachtung der Prozesse v. a. am Mittleren Burgstall (Abb. 18). Die durch die TLS-Messungen ab 2010 detektierte, gravitative Bewegung der nordöstlichen Felssturzmasse in Richtung der kleineren Gletscherzunge der Pasterze, ist in den UAV-basierten Daten räumlich wesentlich besser und vollständiger abgrenzbar. Dadurch kann die in den TLS-Messungen nachgewiesene Bewegung der Sturzmasse in Richtung Gletscher nicht mehr allein durch Gletscherabschmelzung und Sturzmassenkonsolidierung interpretiert werden. Die Daten aus der UAV-Befliegung erweitern den Blick auf ein größeres Prozessystem, das den ganzen Südostrücken des Mittleren Burgstalls im Bereich des Felssturzes aus dem Jahr 2007 umfasst (Kellerer-Pirklbauer et al. 2012, Kaufmann et al. 2015).



Abbildung 18: Prozesscharakterisierung des Felssturzbereichs am Mittleren Burgstall: Farbliche Schummerungskarte basierend auf dem digitalen Geländemodel (DTM) der Befliegung von 2020. Ziffern: (1): Aus UAV-Analyse 2019/20 detektierter Bereich der aktiven Massenbewegung, (2) Bewegungsgrenze der aktiven Massenbewegung gegen den stabilen Bereich des Mittleren Burgstalls, (3) Bereich der aktiven Massenbewegung, der sich in nordöstliche Richtung bewegt, (4) Felsformation mit deutlicher, gravitativer Bewegung, (5) deutlich aktive Ablagerung der Felssturzmasse von 2007.

Die Kammlinie nach dem Felssturzereignis von 2007 ist demnach nicht stabil, sondern befindet sich inmitten des Prozesssystems. Dieses kann als tiefgründiger Gleitprozess betrachtet werden, der den gesamten Südostrücken des Mittleren Burgstalls ab einer markanten Grenze (Linie 2 in Abb. 18) umfasst, während der nordwestliche Rücken stabil ist. Die räumliche Größe dieses Prozesssystems macht eine geologische Betrachtung der Trennlinien und Kluftsysteme notwendig, die im August 2021 begonnen wurde (siehe Kapitel 2).

Felssturzbereiche Hoher Burgstall

Am Hohen Burgstall wurden 2019, 2020 und 2021 folgende Messungen durchgeführt: Zwei flächendeckende UAV-Befliegungen des gesamten Rückens des Hohen Burgstalls bis in etwa 3000 m Höhe (300 m nördlich der Oberwalder Hütte) bzw. eine Detailbefliegung der Ostwand inklusive des Aufstiegswegs zur Oberwalder Hütte (siehe Abb. 19), Die Messung von 2019 bildet die Referenz für alle Auswertungen der UAV-basierten Daten, insofern wird im Kapitel 5.3 näher auf die mehrjährige Veränderung eingegangen. Mit der Erweiterung des Messgebiets am Hohen Burgstall durch die Nutzung von UAVs soll dem sehr starken Rückgang des Gletschers bzw. der Steinschlagtätigkeit durch eine zumindest jährliche Überwachung dieses Bereichs Rechnung getragen werden.



Abbildung 19: Oberflächenbewegungen (räumliche Verteilung der Bewegungsbeträge lt. Legende, Richtung und relative Bewegungsbeträge in schwarz) am Hohen Burgstall in der Beobachtungsperiode 2020/21 aus UAV-basierten Messdaten. Orthophotos generiert aus UAV-basierten, optischen Bilddaten.

4.4. Lufttemperatur-Monitoring

In diesem Kapitel werden zuerst die Ergebnisse des Monitoringprogrammes für die Lufttemperatur für das Messjahr 2020/21 behandelt. Im Kapitel 5.4. werden diese mit den entsprechenden Werten der letzten Jahre verglichen.

Lufttemperaturverhältnisse im Messjahr 2020/21

Der im Jahr 2020 behelfsmäßig reparierte Strahlungsschutzschirm am Globalstrahlungssensor (CMP3 von Kipp&Zonen) an der Klimastation im Dösental hielt problemlos bis Sommer 2021. Die im Abschnitt über die durchgeführten Aktivitäten dargelegten technischen Probleme (Stromversorgung) an der Station im Hinteren Langtalkar (Kapitel 2) verursachten einen Komplettdatenausfall im Zeitraum 14. 5. 2021 bis 12. 6. 2021, weshalb für die letztgenannte Station keine geschlossene Jahresdatenreihe der Temperatur präsentiert werden kann. Die Erfassung der Messwerte für Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung erfolgte halbstündlich. Von den

gemessenen Parametern wird im Folgenden traditionellerweise auf die Lufttemperatur eingegangen, da diese für die Bodentemperatur und somit für den Permafrost am bedeutendsten ist.

Abbildung 20 zeigt den Gang der Tagesmitteltemperatur an der Klimastation im Hinteren Langtalkar im Zeitraum 1. 8. 2020–31. 7. 2021 mit einem Datenloch innerhalb der im Absatz oben genannten Periode. Der höchste Tagesmittelwert wurde am 21. 8. 2021 mit 13,5 °C erreicht, was recht ähnlich jenem im Vorjahr war (10. 8. 2019: 14,2 °C). Der tiefste Werte wurde für den 13. 2. 2021 mit -20,2 °C ermittelt. Dies war um rund 4 °C kälter als im Jahr zuvor – damals jedoch im März (-16,3 °C am 31. 3. 2020). Dies ergibt eine Amplitude für 2020/21 von 33,7 °C und somit etwas mehr als im Vorjahr (30,5 °C). Auffallend ist auch, dass im Dezember 2020 sowie gegen Ende Februar 2021 mehrmals leicht positive Tagesmittelwerte ermittelt wurden.

In der Abbildung 20 sind ebenfalls die Monatsmittelwerte desselben Zeitraumes dargestellt, jedoch ohne Mai und Juni. Der kälteste Monat war in diesem Messjahr der Jänner 2021 mit -11,2 °C (Vorjahr März 2019 mit -6,9 °C), wohingegen der August 2020 mit 7,8 °C der wärmste Monat war (nahezu identisch mit dem Vorjahr: August 2019 mit 8,0 °C). Dies ergibt eine Jahresschwankung der Temperatur von 19 °C. Dies liegt deutlich über jenem aus dem Vorjahr (14,9 °C für 2019/20) und ist in etwa gleich der Jahresschwankung von 2018/19 (19,8 °C bedingt durch die außergewöhnlich tiefen Temperaturen des Jänners 2019). Die Monate Dezember 2020, März 2021 und April 2021 waren recht ähnlich tempertiert mit Monatsmittelwerten zwischen -6,5 und -7,7 °C. Auffallend ist auch der wärmere November 2020 gegenüber dem leicht kühleren Oktober 2020 (um 0,7 °C),



Standort HLC-AWS (2655 m): Tages- und Monatsmitteltemperaturen 01.08.2020-31.07.2021

Abbildung 20: Tages- und Monatsmittelwerte der Lufttemperatur an der Klimastation im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS; 2655 m) zwischen 1. 8. 2020 und 31. 7. 2021. Eine Jahresmitteltemperatur für diesem Zeitraum konnte aufgrund eines Datenlochs im Zeitraum 14. 5. 2021 und 12. 6. 2021 nicht berechnet werden (im Vorjahr betrug dieser Wert -0,7 °C).

Abbildung 21 zeigt die entsprechenden Tagesmittel- und Monatsmittelwerte der Lufttemperatur für die Klimastation in der Dösen (DOE-AWS), wobei sich das zuvor für die Station im Hinteren Langtalkar Gesagte im Wesentlichen bestätigt. Der große Unterschied ist das nicht vorhandene Datenloch für die Station in der Dösen, wobei der Mai 2021 -2,3 °C und der Juni 2021 hingegen 6,2 °C aufwies (deutlich übertemperiert) und damit nahezu gleich warm war wie der Juli mit 6,4 °C. Interessant ist hierbei die Festellung, dass die Station am Dösener Blockgletschwer zwar um 52 m tiefer liegt als jene im Hinteren Langtalkar, die Jahresmitteltemperatur an dieser Station jedoch normalerweise unter jener der Station HLC-AWS liegt (im Vorjahr um 0,61 °C), was auf die unterschiedlichen topographischen Gegebenheiten an den beiden Klimastationen zurückzuführen ist.



Abbildung 21: Tages- und Monatsmittelwerte der Lufttemperatur an der Klimastation in der Dösen (DOE-AWS, 2603 m) zwischen 1. 8. 2020 und 31. 7. 2021. Die Jahresmitteltemperatur in diesem Zeitraum betrug -1,6 °C und lag somit um rund 1 °C unter jener vom Vorjahr.

Zur besseren Vergleichbarkeit sind in der Abbildung 22 links die Tagesmittelwerte und rechts die Monatsmittelwerte beider Klimastationen für 2020/21 dargestellt. Daraus wird klar ersichtlich, dass die ermittelten Tagesmittel- und Monatsmittelwerte für die Perioden mit gemeinsamer Datenverfügbarkeit sehr ähnlich sind (Ausnahme hiervor war lediglich Angang Mai 2021). Im Hinteren Langtalkar waren alle 10 Monate mit vorliegenden Vergleichsdaten etwas wärmer als an der Station in der Dösen (zwischen 0,04 °C im April 2021 und 0,94 °C im November 2020; im Mittel der 12 Monate um 0,43 °C; im Vorjahr 0,61 °C). Dies zeigt deutlich einmal mehr die hohe Korrelation von Lufttemperaturwerten benachbarter (in diesem Fall rund 38,5 km horizontal entfernter) Hochgebirgsklimastationen.



Abbildung 22: Vergleich der Tages- (links) und und der Monatsmittelwerte (rechts) der Lufttemperatur an den beiden Klimastationen im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS, 2655 m) sowie in der Dösen (DOE-AWS, 2603 m) zwischen 1. 8. 2020 und 31. 7. 2021. Zu beachten ist der nahezu gleichsinnige Verlauf der Temperaturen in beiden Diagrammen mit Ausnahme des Datenlochs zwischen 14. 5. 2021 und 12. 6. 2021 (links) bzw. Mai und Juni 2021 (rechts).

5. Ergebnisse des längerfristigen Monitorings5.1. Bodentemperatur-Monitoring

Einordnung des Messjahres 2020/21 in die längerfristige Datenreihe

Die an den Standorten ermittelten Jahresmitteltemperaturen für die acht Messjahre 2013/14 bis 2020/21 sind in Abbildung 23 – aufgeteilt auf die vier Teilgebiete – dargestellt. 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 potenzielle physikalische Verwitterung des Gesteins fördern. Abbildung 23 zeigt auch, dass die Maxima und Minima der Jahresmitteltemperaturen vielfach auf unterschiedliche Jahre fallen, wobei jedoch das vorletzte Beobachtungsjahr hervorsticht: Nachdem bereits im Messjahr 2018/19 an 14 von 27 Standorten neue Maxima in der langjährigen Messreihe registriert wurden, war dies im Messjahr 2019/20 an 22 von ebenfalls 27 Standorten der Fall, wobei sowohl schneereiche als auch schneearme Standorte betroffen waren. Die wichtigsten Ursachen hierfür waren für 2019/20 die mangelnde Auskühlung des Untergrundes im Herbst 2019 (bedingt je nach Standort durch noch im Oktober hohe Lufttemperaturen oder eine frühe Ausbildung der Schneedecke) und - an den schneearmen Standorten – deren Kopplung an die milden Lufttemperaturen im Winter. Dies konnte auch durch die verzögerte frühsommerliche Erwärmung aufgrund der lange liegenden Schneedecke nicht kompensiert werden. Im Gegensatz dazu sind die an vielen Standorten 2016/17 beobachteten außergewöhnlich tiefen Temperaturen interessant, die durch tendenziell schneearme Bedingungen in jenem Winter zu begründen sind. Insgesamt wird durch unsere Langzeitreile die für die Beurteilung von Veränderungen im Permafrost sowie im saisonalen Frost wichtige Tatsache bestätigt, dass die Lufttemperatur z. T. nur wenig mit den Temperaturen im Untergrund korreliert, sondern diese stark von anderen lokalen Faktoren, speziell der Schneedecke, beeinflusst werden.

Beachtenswert ist ferner die Tatsache, dass die Jahresmittelwerte an allen Bodentemperaturmessstandorten mit entsprechenden Datenreihen im achtjährigen Zeitraum 2013/14 bis 2010/21 zwischen 2,6 °C (HLC-MI-N) und nur 0,3 °C (GOE-PRO) schwanken, wobei der Mittelwert dieser Schwankung für alle Standorte bei 1,4 °C liegt. Diese Variabilität in den Jahresmittelwerten (wie auch in der saisonalen Schneedeckendynamik) zeigt einmal mehr die große Bedeutung von längeren Datenreihen bei der Erfassung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Hohen Tauern.



Abbildung 23: Jahresmitteltemperatur an/nahe der Bodenoberfläche (Zeitraum 1.8. bis 31.7. des Folgejahres) aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten für die acht Messjahre (MJ) 2013/14 bis 2020/21. Nur Jahresmittelwerte von Messjahren mit lückenlosen Datenreihen sind dargestellt.

In der Abbildung 24 werden die drei Jahresmittelwerte aller Standorte der für dieses Projekt relevanten Periode 2018-2021 miteinander verglichen und gegenübergestellt. Die Darstellungsweise ist so gewählt, dass Datenpunkte, die oberhalb der strichlierten Linie liegen, Standorte zeigen, an denen die Jahresmitteltemperatur im jeweiligen Messjahr, welches an der Y-Achse ausgewiesen ist, höher als im jeweiligen Vergleichsjahr (X-Achse) war. Der Vergleich der Werte von 2018/19 mit jenen von 2019/20 zeigt, dass nahezu an allen Standorten das Monitoringjahr 2019/20 deutlich (bis zu 1,5 °C) bis leicht wärmer war als das Jahr zuvor. Nur an vier Standorten war dies umgekehrt, jedoch deutlich weniger ausgeprägt (bis zu 0,5 °C). Der Vergleich der Werte von 2018/19 mit jenen von 2020/21 zeigt ein wesentlich differenzierteres Bild. Von den 28 Standorten mit ermittelten Mittelwerten für beide Jahre waren im letzten Beobachtungsjahr 2020/21 jeweils 14 Standorte entweder wärmer oder kälter als zwei Jahre zuvor. Der dritte Vergleich in dieser Abbildung zwischen den letzten beiden Monitoringjahren zeigt klar, dass das Jahr 2020/21 gering bis deutlich (bis zu 1,6 °C) kälter war als das Vorjahr. Nur an einem einzigen Standort war dies nicht der Fall; am Standort GOE-PRO war das letzte Jahr um jeweils 0,2 °C wärmer als die beiden Vorjahre. Abbildung 24 zeigt noch übersichtlicher, dass einerseits 2019/20 wesentlich wärmer als das Jahr davor und danach sowie anderseits die beiden Jahre 2018/19 und 2020/21 in Bezug auf die hohen Temperaturmittel einander ähnlich waren.





Abbildung 24: Gegenüberstellung der Jahresmittelwerte aller drei Projektjahre von 2018/19 bis 2020/21 an allen Bodentemperaturmessstationen mit entsprechenden Daten (2018/19 vs. 2019/20: n=26; 2018/19 vs. 2020/21: n=28; 2019/20 vs. 2020/21: n=26).

Abbildung 25 zeigt die Tagesmitteltemperaturen der vier in Tabelle 2 grau hinterlegten Standorte (einer pro Untersuchungsgebiet) im Zeitraum 1. 8. 2013–31. 7. 2021 (acht Messjahre; Ausnahme Standort DOV-UP-S wegen Datenausfall im letzten Beobachtungsjahr). Im Vergleich dazu sind jeweils auch die Lufttemperaturdaten der Klimastation im Hinteren Langtalkar dargestellt. Zu den einzelnen Graphiken sind folgende wesentliche Punkte anzumerken:

(1) Im Jahresgang am Standort HLC-UP-N ist klar zu erkennen, dass sich eine winterliche Schneedecke in allen acht Wintern dämpfend auf Schwankungen der Bodentemperatur auswirkte, wobei diese dämpfende Wirkung 2015/16 und 2016/17 deutlich geringer ausfiel und daher tiefere Temperaturen bei gleichzeitig höheren Schwankungen gemessen wurden.

(2) Im Jahresgang am Standort FAL-UP sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Messjahren sehr markant, wobei v. a. die letzten beiden Messjahre aus dem "üblichen" Muster herausfallen. Während der erste (2013/14) und der drittletzte Winter (2017/18) sich durch die zeitweise starke Dämpfung der Temperaturgänge als relativ schneereich zu erkennen geben, waren die Winter 2014/15, 2015/16, 2016/17 und 2018/19 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 (-16,3 °C). Die beiden letzten Messjahre 2019/20 und 2020/21 zeigen im Gegensatz zu allen sechs vorangegangen Jahren eine wirksame Dämpfung der Bodentemperatur von 6 bis 7 Monaten; im letzten Jahr bis zum 10. 6. 2021.

(3) Am Standort DOV-UP-S liegen witterungsbedingt aktuell nur Daten von 7 Jahren vor. In sechs der sieben Messjahre ist keine wesentliche Dämpfung der Lufttemperatur durch eine Schneedecke zu erkennen. Einzig im Winter 2018/19 ist diese dämpfende Wirkung Ende Mai/Anfang Juni ausgeprägt, was auf die außergewöhnlichen Schneebedinungen im Mai 2019 zurückzuführen ist. Die Bodenoberflächentemperatur zeigt sonst deutliche Schwankungen über den gesamten Messzeitraum mit einem Minimum von -19,0 °C im Winter 2016/17 und einem Maximum von 15,4 °C im Sommer 2016 (der Sommer 2019 war ähnlich warm).

(4) Ganz ähnlich liegen die Verhältnisse am Standort PAG-UP. Hier kam es in keinem der acht Jahre zur Ausbildung einer wesentlichen und langandauerenden Schneedecke, welche eine vollständige Entkoppelung der Luft- von der Bodentemperatur hätte bewirken können. Die Folge sind auch hier hohe Temperaturschwankungen über den gesamten Messzeitraum, worin die Minima bei jeweils zwischen -10 und -15 °C lagen. Der höchste Tagesmittelwert im sechsjährigen Zeitraum wurde an diesem Standort am 30. 6. 2019 mit 15,7 °C gemessen.

Insgesamt repräsentieren die in Abbildung 25 dargestellten Temperaturkurven gut das breite 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.



Standort HLC-UP-N (2693 m): Tagesmitteltemperatur 01.08.2013-31.07.2021 im Vergleich mit der Lufttemperatur gemessen an der Klimastation im Hinteren Langtalkar

Standort FAL-UP (2345 m): Tagesmitteltemperatur 01.08.2013-31.07.2021 im Vergleich mit der Lufttemperatur gemessen an der Klimastation im Hinteren Langtalkar



Standort DOV-UP-S (3002 m): Tagesmitteltemperatur 01.08.13-31.07.20 im Vergleich mit der Lufttemperatur gemessen an der Klimastation im Hinteren Langtalkar



Standort PAG-UP (2628 m): Tagesmitteltemperatur 01.08.2013-31.07.2021 im Vergleich mit der Lufttemperatur gemessen an der Klimastation im Hinteren Langtalkar



Abbildung 25: Tagesmitteltemperaturen der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten für den Zeitraum 1. 8. 2013 bis 31. 7. 2021 (außer Standort DOV-UP-S; dieser nur bis 2020) sowie deren Vergleich zur Lufttemperatur am Standort HLC-AWS.



Die Abbildung 26 veranschaulicht die langjährige Entwicklung der Temperatur an denselben vier Standorten wie in Abbildung 25. 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 in dieser Studie das Messjahr mit 1. 8.–31. 7. des Folgejahres definiert ist). Alle nachfolgend als "Trends" geschilderten Entwicklungen sind statistisch z. T. signifikant (p<0,01: DOV-UP-S, PAG-UP; p<0,05: HLC-UP-N), z.T. aber auch nicht (p>0,05: FAL-UP), was die Sinnhaftigkeit der Fortführung dieser Zeitreihen unterstreicht. Zu den vier Graphiken ist Folgendes anzumerken:

(1) Der Standort HLC-UP-N lässt über die Jahre einen Erwärmungstrend erkennen, obwohl die Werte nur um ca. 1,5 °C schwanken. Deutliche "Ausreißer" nach unten in dieser Entwicklung sind aber die Messjahre 2015/16 und insbesondere 2016/17, in welchem der tiefste Wert in der 12-jährigen Messreihe registriert wurde. Das deutlich wärmste Messjahr war 2019/20.

(2) Der Standort FAL-UP lässt demgegenüber nur einen schwach positiven Trend erkennen; die Werte schwanken um 1,0 °C und werden besonders durch von Jahr zu Jahr stark wechselnde Schneeverhältnisse (siehe unten) beeinflusst. Auffallend jedoch, dass die beiden letzten Messjahre hier auch die wärmsten in der gesammten Messgeschichte waren.

(3) Am Standort DOV-UP-S bleibt die Temperatur in allen Jahren deutlich unter 0 °C (höchste Jahresmitteltemperatur mit -1,7 °C im Jahr 2013/14) und somit im permafrosttypischen Bereich. Die Schwankungsbreite von 1,6 °C in 13 Jahren ist ähnlich dem Standort HLC-UP. Der Erwärmungstrend am Standort DOV-UP-S ist deutlicher ausgeprägt als der am Standort HLC-UP-N. Auffällig an diesem Standort ist die Beobachtung, dass die ersten vier "kalten" Jahre mit den darauffolgenden neun Jahren deutlich kontrastieren.

(4) Ganz ähnlich verhält es sich am allgemein schneearmen Standort PAG-UP. Die Jahresmitteltemperatur bleibt jedoch immer deutlich über 0 °C und weist Schwankungen von 1,4 °C auf, wobei der Trend der Jahresmitteltemperatur jenem des Standortes DOV-UP-S ähnelt, ebenso statistisch signifikant ist und von den hier gezeigten am deutlichsten einen klaren Erwärmungstrend aufzeigt. Hier kontrastieren die vier ersten "kalten" Jahre (<0,8 °C) mit den drei letzten "wärmsten" (>1,8 °C) Jahre.



Abbildung 26: Jahresmitteltemperatur der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten für den Zeitraum 1. 8.–31. 7. des Folgejahres für die Messjahre von 2007/08 bis 2020/21 (Ausnahmen FAL-UP und DOV-UP-S). Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten sind dargestellt. Jene für HLC-UP, DOV-UP-S und PAG-UP sind statistisch signifikant (alle drei p<0,05 – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 5 %; die beiden letztgenannten sogar p<0,01 – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1 %).

Abbildung 27 zeigt für die acht Messjahre 2013/14 bis 2020/21 die auf Basis der Bodentemperturwerte ermittelten Tage mit einer dämpfenden Schneedecke. Die Anzahl der Tage mit Schneedecke wurde auf Basis des Ansatzes von Staub et al. (2017) ermittelt. Dabei wird ein Tag als solcher mit dämpfendet Schneedecke definiert, wenn die Standardabweichung der Tagesmitteltemperatur innerhalb eines Zeitfensters von sieben Tagen ≤0,25 °C ist. Auch hier wurden alle vier Teildiagramme auf der Ordinate gleich skaliert, um sie besser vergleichbar zu machen. Zu den vier Graphiken in Abbildung 27 ist Folgendes anzumerken:

(1) Der Standort HLC-UP-N lässt über die Jahre keinen Trend erkennen. Die errechneten Schneedeckentage schwanken zwischen 239 Tagen 2019/20 und nur 104 Tagen (Differenz von 135 Tagen) im schneearmen Winter 2016/17. Die vier letzten Messjahre weisen mit 200 bis 239 Schneetagen ähnlich hohe Werte auf. Das Mittel liegt bei 198 Tagen.

(2) Der Standort FAL-UP ist geprägt von starken Unterschieden von Jahr zu Jahr mit nur vier Schneetagen 2016/17 und 186 Schneetagen 2020/21. An diesem Standort ist am deutlichsen der Unterschied in der Schneedeckendauer von Jahr zu Jahr ausgeprägt, wobei die beiden letzten Messjahre deutlich aus der zuvor liegenden Datenreihe als schneereich hervorstechen.

(3) Am Standort DOV-UP-S spielt eine isolierende Schneedecke in keinem der sieben Messjahre eine wesentliche Rolle, wobei die Tage mit Schneedecke zwischen 18 im Jahr 2018/19 (gefolgt von 17 im Jahr 2014/15) und nur 3 im Jahr 2016/17 schwanken. Somit kommt auch bei dieser Analyse sehr deutlich heraus, dass eine thermisch isolierende Schneedecke an diesem Standort keine Rolle spielt. Dieser Standort zeigt somit von den bisher drei hier gezeigten am besten die Auswirkungen der Lufttemperatur auf den Untergrund und somit auf den Permafrost.

(4) Ganz ähnlich wie am Standort DOV-UP-S verhält es sich auch am extrem schneearmen Standort PAG-UP. An diesem Standort schwankten bis 2020 die Jahreswerte zwischen nur einem Tag 2015/16 und zumindest neun Tagen 2019/20. Das letzte Beobachtungsjahr 2020/21 kann jedoch als "Ausreißer" angesehen werden, da gleich 29 Tage als Tage mit einer isolierenden Schneedecke ausgewiesen wurden. Dies bedeutet, dass auch an diesem an und für sich schneearmen Standort der letzte schneereiche Winter 2020/21 rechnerisch auch bei den Schneedeckentagen deutlich hervorsticht.



Abbildung 27: Schneedeckentage ermittelt aus den Bodentemperaturdaten (Basis: Ansatz von Staub et al. 2017) an vier ausgewählten Standorten für den Zeitraum 1. 8.–31. 7. des Folgejahres für die Messjahre von 2013/14 bis 2020/21 (Außnahme DOV-UP-S) mit Angabe der jeweiligen Mittelwerte.

5.2. Blockgletscherbewegungs-Monitoring

Einordnung des Messjahres 2020/21 in die längerfristige Datenreihe

Die vergleichende Darstellung der zeitlichen Änderung der Oberflächenbewegung der beiden untersuchten Blockgletscher und eines weiteren ist Gegenstand der Abbildung 28. 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). Aus dem Bild der Geschwindigkeitsgraphen ist gut zu erkennen, dass (1) die Bewegungsraten der drei Blockgletscher gut miteinander korrelieren, (2) die aktuellen Bewegungsraten die größten der gesamten Messreihe sind und (3) noch zwei zeitlich zurückliegende Bewegungsmaxima (2003/04 bzw. 2014/15) erkennbar sind.



Abbildung 28: Direkter Vergleich der mittleren jährlichen horizontalen Oberflächenbewegung der beiden Blockgletscher Dösen (zentraler Bereich) und Hinteres Langtalkar (oberer Bereich A) für den Zeitraum 1995-2021. Mittelbildung über 11 Punkte (10-17, 21-23) am Dösener Blockgletscher und 9 Punkte (10-17, 37) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar. Für Vergleichszwecke ist auch der zeitliche Verlauf der Oberflächenbewegung am Weissenkar Blockgletscher (Schobergruppe, Osttirol) dargestellt.

Die Abbildung 29 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 1999-2021. In dieser Abbildung sind für Vergleichszwecke in roter Farbe auch die Werte (eigentlich Maximalwerte) vom ähnlich schnellen Leibnitzkopf Blockgletscher (im Osttiroler Teil der Schobergruppe) dargestellt (Kaufmann et al. 2021). Die Prozentangaben der relativen Bewegungsskala beziehen sich auf den Leibnitzkopf Blockgletscher.



Abbildung 29: Vergleich der mittleren jährlichen horizontalen Fließgeschwindigkeit zwischen dem Blockgletscher Hinteres Langtalkar und dem ebenfalls in der Schobergruppe liegenden hochaktiven Leibnitzkopf-Blockgletscher (rote Farbe) seit den 1950er Jahren.

Ein vergleichbares, ähnliches Bewegungsverhalten wie bei den oben genannten Blockgletschern wurde auch am Tschadinhorn-Blockgletscher (Schobergruppe, Osttirol) festgestellt (Abb. 30). Die Untersuchungen zum Tschadinhorn-Blockgletscher sind in Kaufmann et al. (2019) im Detail dokumentiert. Sowohl für den Leibnitzkopf- als auch den Tschadinhorn-Blockgletscher ergaben sich im Beobachtungszeitraum 2020/21 die jeweils größten Bewegungsbeträge seit Messbeginn (1954).



Abbildung 30: Oberflächenbewegung am Tschadinhorn-Blockgletscher zwischen 1954 und 2021 (Schobergruppe, Osttirol).

Ergänzende Informationen zum Blockgletscherbewegungs-Monitoring, wie z. B. Fotos von den Geländearbeiten, finden sich in Kaufmann (2020, 2021, 2022).



5.3. Massenbewegungs-Monitoring

Blockgletscher Hinteres Langtalkar im mehrjährigen Vergleich

Die Einordnung der UAV-basierten Oberflächenveränderungen in die TLS-Messreihe 2011–2019 zeigt folgendes Bild: Die Analyse der UAV-basierten jährlichen Deformationsmessungen (2019–2021) stellt die räumliche Veränderung eines Punktes an der Oberfläche dar. Die Analyse der TLS-basierten Daten bis ins Jahr 2018 beschrieben die vertikale Veränderung einer Koordinate (*dz*) in einer Beobachtungsepoche.

Die Mediane der vertikalen Oberflächenveränderung zeigen an der Blockgletscherfront seit der Epoche 2016/17 das gleiche Bild: Die Werte schwanken im orographisch linken Bereich (area1) zwischen 2,10 und 2,60 m/a, im rechten Bereich (area2) zwischen 1,80 und 2,18 m/a. Von der Blockgletscherstirn aufwärts scheint die Dynamik seit 2019 leicht abzunehmen (Tabelle 6; Abb. 31).

Tabelle 6: Jährliche, vertikale Oberflächenänderungen aus TLS-Messungen (2011-2018) und UAV-basierten Messungen (2019-2021) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar: Vertikaler [z]-Medianfehler (m) im Vergleich stabiler Bereiche (stable) im Scanfeld zwischen den Epochen und berechnete Fehlertoleranz (aus Distanzmess- und Lagefehler). Mediane der vertikalen Veränderung zweier Teilgebiete (area1, area2, Lage siehe Abb. 31) für die verschiedenen Epochen sind ebenso angegeben.

Blockgletscher Hinteres Langtalkar (Angaben in [m])								
Epoche	Stabil 1	Stabil 2	Stabil 3	Signifikanzbereich	Median vertikale			
					Verä	nderung		
		Höhenfehler	dz	Nicht signifikant	area1	area2		
2019/21	-0,18	-0,10	-0,11	-0.18 bis 0.18	+2,14	+2,18		
2018/19	+0,41	+0,96	+0,95	-0.10 bis 0.95	+2,57	+2,07		
2017/18	-0,06	-0,01	-	-0.10 bis 0.10	+2,60	+1,89		
2016/17	-0,01	+0,01	0,05	-0.10 bis 0.10	+2,10	+1.80		

Daten aus den beiden unterschiedlichen Messkonfiguarationen (TLS vs. UAV) sind am Blockgletscher Hinteres Langtalkar nicht direkt vergleichbar: Oberflächendaten aus TLS-Messungen vom Standpunkt HLK_Front bilden v. a. die zum Sensor gerichteten Bereiche, also die vertikalen Bereiche der Blockgletscheroberfläche, ab. Der Grund liegt darin, dass der Standpunkt HLK_Front knapp tiefer als der Blockgletscher liegt. Die Lage des Fixpunktes und der Umstand, dass dies die einzige Scannerposition ist, sind dafür verantwortlich, dass es in den TLS_Messungen im oberen Bereich des Blockgletscherzunge großflächige Scanschatten gibt.

UAV-basierte Daten bilden hingegen die Blockgletscheroberfläche vollständig ab, wobei es aber bei der Abbildung von vertikalen Bereichen zu größeren Lagefehlern kommen kann. In den beiden unterschiedlichen Aufnahemgeometrien weisen jeweils jene Bereiche die beste Lagegenauigkeit auf, die in der anderen Methode eine schlechtere ausweisen. Aus diesem Grund sind die Medianfehler der 3 Stable areas in der Periode 2018/19 wesentlich höher als in den anderen Perioden (+41 cm, +96 cm, +95 cm).



Jährliche vertikale Oberflächenveränderung [m]



Abbildung 31: Gegenüberstellung der jährlichen vertikalen Oberflächenänderung im unteren Bereich des Blockgletschers Hinteres Langtalkar für die Perioden 2016/17 und 2017/18, 2018/19 und 2019/21. Die stabilen Bereiche für die Qualitätsabschätzung sind mit "stable 1–3" und die Bereiche mit besonderem Augenmerk sind als "area1" und "area2" ausgewiesen. Die Bewegungen innerhalb der Fehlertoleranz (siehe Tabelle 6) sind nicht dargestellt.

Felssturzbereiche Mittlerer Burgstall im mehrjährigen Vergleich

Die Auswertung der Bewegungsbeträge für 2019/20 und 2020/21 legt die Vermutung nahe, dass die Dynamik der Prozesse von 2019/20 auf 2020/21 leicht abgenommen hat. Dies zeigt sich v. a. am nordwestlichen Rand zur Bewegungsgrenze hin: Hier nahm die mittlere Oberflächenbewegung im Bereich area1 (Felsplatten) von 0,78 auf 0,27 m/a und im Bereich area2 (Felskamm Nord) von 0,93 auf 0,31 m/a ab (Abb. 32). Diese Tendenz ist ebenso in den Maximalwerten (95 %-Perzentil) zu erkennen, wobei Oberflächenbewegungen von bis zu 0,75 m/a noch immer als bemerkenswert hervorgehoben werden können. Am Übergang des anstehenden Felsens zur Sturzmasse Ost zeigt sich folgendes Bild: Hier nahmen die Oberflächenbewegungen sowohl in area3 (Felsplatten) von 0,23 auf 0,63 m/a als auch in area4 (oberster Bereich der Sturzmasse) von 0,33 auf 0,84 m/a deutlich zu.



Abbildung 32: Oberflächenbewegungen (räumliche Verteilung der Bewegungsbeträge It. Legende) am Mittleren Burgstall in den Beobachtungsperioden 2019/20 und 2020/21 aus UAV-basierten Messdaten. Die Ziffern 1-4 beschreiben area1area4 in Tabelle 7. Orthofotos generiert aus UAV-basierten, optischen Bilddaten. Bodenauflösung 5 cm. Koordinatensystem: MGI/ Austria GK M31 - EPSG: 31258.



Tabelle 7: Median und 95 %-Perzentil der Oberflächenbewegung in ausgewählten Bereichen des Felssturzbereiches Mittlerer Burgstall. Die Lage der Bereiche area1 bis area4 ist in Abbildung 32 ersichtlich. Zur Darstellung realistischer Maximalwerte wurde das 95 %-Perzentil verwendet.

Felststuzrbereich Mittlerer Burgstall (Angaben in [m])										
Periode	area	1	area2		area3		area4			
	median	95 %								
2020/19	0,78	1,25	0,93	1,75	0,23	0,63	0,33	0,87		
2021/20	0,27	0,75	0,31	1,09	0,62	0,98	0,84	1,79		

Aufgrund der UAV-basierten Deformationsmessungen ist eine Ostsüdost-gerichtete Bewegung des gesamten südöstlichen, instabilen Bereichs des Mittleren Burgstalls in Relation zum nordwestlichen, stabilen Bereich klar erkennbar. Diese Oberflächendeformation deutet auf einen tiefgründigen Gleitprozess hin, der den gesamten südöstlichen Bereich des Mittleren Burgstalls erfasst.

Weitere geologische Erkundungen (Sommer 2022) und Analysen der Deformationsmessungen sind nötig, um die Geometrie und das kinematische Bewegungsverhalten der Massenbewegung am Mittleren Burgstall im Detail zu bestimmen. Die geologischen Erkundungen des Jahres 2021 werden durch Detailkartierungen im Jahr 2022 ergänzt. Diese Arbeiten sind nun im Dissertationsvorhaben von Reinhard Gerstner (BOKU) integriert. Des Weiteren ist im Jahr 2022 geplant, die hochauflösenden Bilddaten als Basis für eine semi-automatische geologische Strukturanalyse zu verwenden.

Felssturzbereiche Hoher Burgstall im mehrjährigen Vergleich

Die Auswertungen der UAV-basierten Daten am Hohen Burgstall für die beiden Perioden 2019/20 und 2020/21 (Abb. 33) liefern folgendes Bild: Im Bereich des Aufstiegsweges zur Oberwalder Hütte können in den beiden Epochen einzelne Evidenzen von Sturzereignissen abgeleitet werden. Kleinräumige Sturzereignisse sind östlich des sog. Fahnenköpfels (in der Periode 2019/20) bzw. an der unteren Wandstufe nördlich des Aufstiegsweges an der Geländekante zum Gletscherende zu erkennen. Diese sind aber in ihrer räumlichen Ausdehnung klein und mit UAV-basierten Analysen im Detail nur bedingt interpretierbar.

Die Oberflächenveränderungen in Hangbereichen sind auch im Bereich des Aufstiegswegs zu erkennen, wobei diese Veränderungen durch Menschen-verursachte Massenbewegungen (Steinschlag) tw. zuzuschreiben sind. Der fortschreitende, massive Gletscherrückgang ist aufgrund der großen Bewegungsbeträge sehr gut aus den Daten ableitbar. Dies ist v. a. an der Grenze des Gletschers zu den Wandbereichen des Hohen Burgstalls zu erkennen, wo sich die Beträge der Oberflächenbewegungen Richtung Gletscher schlagartig erhöhen.



Abbildung 33: Oberflächenbewegungen (räumliche Verteilung der Bewegungsbeträge lt. Legende, Richtung und relative Bewegungsbeträge in Schwarz) am Hohen Burgstall in den Beobachtungsperioden 2019/20 und 2020/21 aus UAV-basierten Messdaten. Orthophotos generiert aus UAV-basierten, optischen Bilddaten. Nordöstlich der gelben Linie in der Abbildung für 2019-2020 sind die Vergleichsdaten unzreichend um gesichterte Aussagen über die Veränderung treffen zu können.

5.4. Lufttemperatur-Monitoring

Einordnung des Messjahres 2019/20 in die längerfristige Datenreihe

Die Abbildung 34 zeigt den Gang der Tagesmitteltemperatur an der Klimastation im Hinteren Langtalkar im Zeitraum 1. 8. 2013–31. 7. 2021. Die höchsten Tagesmittelwerte erreichen im Sommer 15,4 °C (im Juni 2019), die kältesten in diesem achtjährigen Beobachtungszeitraum -25,6 °C (im Februar 2018). Die Temperaturamplitude für Tageswerte liegt folglich bei 41 °C, was auf kontinental geprägte klimatische Verhältnisse verweist. Der außergewöhnlich kalte Februar 2018 sticht hervor.



Abbildung 34: Tagesmittel der Lufttemperatur an der Klimastation im Hinteren Langtalkar (2655 m) zwischen 1. 8. 2013 und 31. 7. 2021. Die Mitteltemperatur in diesem Zeitraum beträgt -0,56 °C. Zu beachten die Fehlwerte zwischen Mitte Mai und Mitte Juni 2019 (Pfeil).

Zu beachten ist in Abbildung 34 der fehlende Tagesgang zwischen Mitte Mai und Mitte Juni 2019 (Pfeil) bedingt durch Schnee-/Eisbeeinträchtigung (bei Negativwerten) bzw. stehendem Wasser (bei Positivwerten) im gekippten Strahlungsschutz des Temperatursensors (siehe hierzu Bericht für 2018/19, Kellerer-Pirklbauer et al. 2020). Der Tagesgang der Temperatur wurde dadurch – wie in den Daten ersichtlich – in diesem Zeitraum erheblich gedämpft.

In der Abbildung 35 sind Monats- und Jahresmittel der Lufttemperaturen (Bezugszeitraum 1.8. bis 31.7. des jeweiligen Folgejahres; Datenlücke durch Temperatursensorausfall für Mai und Juni 2021) 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 2019/20 bei -1,04 °C liegt. Die Einzelwerte liegen zwischen dem wärmsten (2019/20 mit - 0,1 °C) und dem kältesten Jahr (2008/09 mit -1,9 °C) innerhalb einer Schwankungsbreite von 1,8 °C. Auffallend ist auch die hohe jährliche Variabilität der Temperaturwerte. Diese Grafik zeigt einmal mehr, dass das Beobachtungsjahr 2019/20 nicht nur vielerorts neue Rekorde bei den Bodentemperaturmesstandorten mit sich brachte, sondern auch die Lufttemperatur im 13-jährigen Zeitraum im Messjahr 2019/20 am höchsten war, sogar um 0,23 °C höher als das zweitwärmste Jahr (2015/16). Auch wenn für Mai und Juni 2021 keine geschlossene Lufttemperaturdatenreihen von HLC-AWS vorliegen, kann auf Basis der Vergleichsdaten von der Station in der Dösen (siehe Kapitel 4.4.) davon ausgegangen werden, dass im Mai 2021 die Monatsmittellufttemperatur am Standort HLC-AWS ca. -2,0 °C und jene vom Juni 2021 bei 6,6 °C lagen, was in etwa einen Jahresmittelwert für 2020/21 von -1,2 °C ergibt und somit ähnlich jenem von 2017/18 wäre.



Abbildung 35: Monatsmittelwerte (links) und Jahresmittelwerte der Lufttemperatur (rechts) an der automatischen Klimastation im Hinteren Langtalkar (2655 m) zwischen Oktober 2006 und August 2021 (mit Datenlücke für Mai und Juni 2021; folglich kein Jahreswert). In beiden Diagrammen ist ein tendenzieller Anstieg der Lufttemperatur mit der Zeit sowie eine hohe jährliche Variabilität von Jahr zu Jahr erkennbar. Der Anstieg der Jahresmitteltemperatur ist signifikant (p<0,01).

6. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Bodentemperaturmessungen weisen das letzte Beobachtungsjahr 2020/21 als merklich permafrostgünstiger als die beiden davorliegenden Jahre aus, die beide als äußerst warm und daher für die Erhaltung von Permafrost ungünstig charakterisiert werden können. Dies gilt ganz besonders für das Messjahr 2019/20, das an 22 von 27 Messstandorten neue Maxima der Jahresmittel der Bodentemperaturen erbrachte. Die relative Permafrostgunst des letzten Messjahres dürfte sich primär aus der lange in den Sommer hinein liegenden Schneedecke und weniger aus den Gegebenheiten im Herbst erklären, wenngleich dieser an den meisten Standorten doch eine effektivere Auskühlung des Untergrundes als in den beiden Vorjahren bewirkt haben musste. Allerdings verdient die angesprochene Permafrostgunst für 2020/21 tatsächlich nur im Vergleich mit den beiden Vorjahren diese Bewertung, denn im langfristigen Vergleich des gegenständlichen Monitorings lagen die Bodentemperaturen 2020/21 sehr wohl auf einem hohen Niveau.

Diese Feststellung wird indirekt auch durch die Ergebnisse der Bewegungsmessungen an den untersuchten Blockgletschern belegt. Die gemessenen Oberflächenbewegungen setzten ihren deutlichen Anstieg weiter fort und erreichten am Dösener Blockgletscher und im oberen Bereich des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar neue Rekordwerte weit jenseits der bisherigen Maxima aus 2016/17 und wohl auch die höchsten Jahreswerte seit den 1950er Jahren. Dies steht im Einklang mit den hohen Bodentemperaturen der Vorjahre, die verzögert Bewegungsmaxima hervorrufen. So kann sich auch die leichte Dämpfung der Temperaturen im letzten Beobachtungsjahr noch nicht auf die Verringerung der Blockgletscherbewegung auswirken. Eine solche wäre wohl erst nach einem weiteren kühlen Jahr – verzögert um ein, zwei weitere Jahre – zu erwarten. Die hohen Bewegungsbeträge spiegeln höhere Deformationsraten des sich erwärmenden Eises und einen erhöhten hydrostatischen Druck in den internen Abflusssystemen der Blockgletscher wider. Die hohe Dynamik der Stirn des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar ist darüber hinaus auch mit der Steilheit der Karschwelle und den nach wie vor starken internen Rutschprozessen im Stirnbereich zu erklären.

Bei den Quantifizierungen von Massenumlagerungen liegen nunmehr für alle Untersuchungsgebiete Auswertungen von den im Jahr 2019 eingeführten Aufnahmen von UAV (unmanned arial vehicles; "Drohnen") aus vor. Damit sind nun ergänzende Auswertungen zur Bewegungsdynamik des gesamten Blockgletschers im Hinteren Langtalkar verfügbar, die in guter Übereinstimmung mit den traditionellen Bewegungsmessungen stehen. Besonders hervorzuheben sind auch die Ergebnisse für den Mittleren und Hohen Burgstall, die in besserer Auflösung eine in den letzten Jahren erhöhte Dynamik erkennen lassen. Dies gilt insbesondere für den Felssturzbereich von 2007 am Mittleren Burgstall, dessen Felsmasse sich nach Ostsüdosten hin – intern räumlich und zeitlich stark differenziert – bewegt.

Sinngemäß ähnliche Aussagen wie für die daran gekoppelten Bodentemperaturen gelten für die Ergebnisse des Lufttemperatur-Monitorings im Hinteren Langtalkar und im Bereich der Dösen. Nach neuen Temperaturrekorden im Beobachtungsjahr 2019/20 hat sich das thermische Geschehen 2020/21 wieder ein Stück weit normalisiert, wenngleich das Temperaturniveau weiterhin sehr hoch ist.

7. Gesamtbewertung und Ausblick

Im Kärntner Teil des Nationalparks Hohe Tauern herrschten über die gesamte gegenständliche Beobachtungsperiode 2018-2021 permafrostungünstige Bedingungen. Diese Ungunst erreichte ihren vorläufigen Höhepunkt im besonders warmen Jahr 2019/20, während im letzten Messjahr 2020/21 etwas permafrostgünstigere Gegebenheiten verzeichnet wurden. Allerdings ist das Boden- und Lufttemperatur-Niveau weiterhin hoch und von einer Trendwende kann keine Rede sein. Ähnlich wie bei den Gletschern, die ebenfalls 2020/21 geringere mittlere Rückgänge als in den Jahren davor aufwiesen, war die Ursache dieser etwas permafrostgünstigeren Verhältnisse primär der kalte Mai, der im Hochgebirge die Schneedecke noch weiter anwachsen ließ, sodass diese bis weit in den Sommer hinein andauerte und den Untergrund vor Erwärmung schützte. Besonders deutlich spiegeln die Bewegungsraten der Blockgletscher den steigenden Trend der Bodentemperaturen wider, indem 2020/21 verbreitet neue Bewegungsmaxima registriert wurden – eine Entwicklung, die aus dem thermischen Geschehen der Vorjahre erwartet und daher auch schon im letzten Bericht (Kellerer-Pirklbauer et al. 2021) vorausgesagt wurde.

Die relativ günstigeren Bedingungen des aktuellen Berichtsjahres bedeuten somit keine Trendwende, sondern fügen sich in die langfristig herrschende Periode mit einem – mit der globalen, anthropogen verstärkten Erwärmung zu begründenden – Trend zu zunehmend ungünstigen Bedingungen für den Permafrost (und die Gletscher) ein. Diese Entwicklung ist im Kärntner Teil des Nationalparks nunmehr seit dem Messjahr 2007/08 – für die Blockgletscherbewegung z. T. sogar bis in die 1990er Jahre zurück – lückenlos und methodisch stringent nachvollziehbar. Die Qualität und Länge der Datenreihe führt dabei zur immer höheren Aussagekraft durch statistisch bessere Signifikanz, weshalb an der langfristigen Gültigkeit der nachfolgenden Aussage nicht mehr zu zweifeln ist: Die Erhöhung der Permafrost (Permafrost-Degradation) an den meisten Standorten. Ausgenommen davon sind nur Standorte unter meist perennierenden Schneefeldern – für diese sind auch die vorhandenen eineinhalb Jahrzehnte Monitoring noch zu kurz, um klare Aussagen treffen zu können.

Die Erhöhung der Untergrundtemperaturen wirkt sich mit erhöhten Bewegungsraten auf die Dynamik der Blockgletscher aus. Noch recht unsicher sind die Aussagen in Bezug auf eine Tendenz zur Erhöhung der Häufigkeit (Frequenz) und Größe (Magnitude) von Massenumlagerungs-Prozessen in den Hochlagen der Hohen Tauern, da diese Prozesse stark zufallsgesteuert (u. a. lokale Gegebenheiten wie z. B. die Kluftsystem am Mittlerern Burgstall) bzw. von extremen Witterungsereignissen abhängig sind. Die jüngsten, UAV-basierten Ergebnisse von den beiden Burgställen im Bereich der Pasterze können jedoch als Indizien in diese Richtung betrachtet werden.

Auch wenn die Gesamttendenz zunehmender Permafrostungunst mittlerweile als sehr gut belegt gelten kann, lautet das aus den bisherigen Ergebnissen ableitbare Postulat weiterhin, dass es nicht nur sinnvoll ist, das Permafrost-Monitoring fortzusetzen, sondern auch in vielerlei Hinsicht wertvoll und notwendig. Im letzten Absatz sind mit den Hinweisen auf die Bedingungen in extrem schneereichen Standorten und die noch mangelnde Validität der Aussagen zur Entwicklung von Massenbewegungen beipsielhaft zwei Forschungsfragen genannt worden, zu deren Benatwortung aktuell die Datenlage noch unzureichend ist. Wie in den letzten Berichten wiederholt betont, sind in diesem Zusammenhang



auch die hohen Schwankungen von Jahr zu Jahr als Argument für die Verlängerung der Datenreihen zu nennen. Die Fortführung der Messreihe wird zu einer kontinuierlichen Verbesserung des Verständnisses der beschriebenen Prozesse und zur statistischen Absicherung des an den meisten Standorten schon jetzt deutlichen Klimawandelsignals führen. Die angewandten Methoden, seit 2019 durch den Einsatz von UAVs ergänzt, sind vor dem Hintergrund der zur Verfügung stehenden Mittel zukunftsfähig.



Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Lage der vier Arbeitsgebiete im Nationalpark Hohe Tauern in Kärnten (1, 3, 4) bzw. in seinem Nahbereich (2), welche gemeinsam durch die Universität Graz, die Technische Universität Graz und durch die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynmamik untersucht werden, sowie die modellierte Verbreitung von Permafrost nach Boeckli et al. (2012).

- Abbildung 9: Detailkarten der vier Untersuchungsgebiete zum Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten mit Lage nahezu aller Messstandorte, welche mit Miniatur-Temperaturdatenlogger ausgestattet sind (vgl. Tabelle 2). Standort PAG-FI wurde 2020 aufgelassen (Insellage im Pasterzensee). Neuer Standort PAG-FIR im Pasterzengebiet (außerhalb des Kartenausschnitts) eingerichtet. Standort HLC-SO-S nach 7 Jahren im Jahr 2020 wieder reaktiviert. Logger am Standort KC-LO zerstört durch

- Abbildung 11: Seehöhe und Hangneigung sowie Seehöhe und Exposition aller 36 aktuell aktiven Standorte der Bodentemperatur-Messungen in den vier Untersuchungsgebieten mit Stand September 2021 (siehe Tabelle 2). Die unteren drei Diagramme zeigen die entsprechenden Boxplot-Diagramme zu den drei Parametern.

- Abbildung 16: Oberflächenbewegung (cm/a) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar in der Periode 2019-2021, abgeleitet aus respektiven Geländemodellen berechent auf UAV-basierten, optischen Bildaufnahmen. Bodenauflösung 5 cm. Koordinatensystem: MGI/Austria GK M31 - EPSG: 31258.22

- Abbildung 18: Prozesscharakterisierung des Felssturzbereichs am Mittleren Burgstall: Farbliche Schummerungskarte basierend auf dem digitalen Geländemodel (DTM) der Befliegung von 2020.
 Ziffern: (1): Aus UAV-Analyse 2019/20 detektierter Bereich der aktiven Massenbewegung, (2) Bewegungsgrenze der aktiven Massenbewegung gegen den stabilen Bereich des Mittleren Burgstalls, (3) Bereich der aktiven Massenbewegung, der sich in nordöstliche Richtung bewegt, (4) Felsformation mit deutlicher, gravitativer Bewegung, (5) deutlich aktive Ablagerung der Felssturzmasse von 2007. 25
- Abbildung 20: Tages- und Monatsmittelwerte der Lufttemperatur an der Klimastation im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS; 2655 m) zwischen 1. 8. 2020 und 31. 7. 2021. Eine Jahresmitteltemperatur für diesem Zeitraum konnte aufgrund eines Datenlochs im Zeitraum 14. 5. 2021 und 12. 6. 2021 nicht berechnet werden (im Vorjahr betrug dieser Wert -0,7 °C).

- Abbildung 33: Oberflächenbewegungen (räumliche Verteilung der Bewegungsbeträge It. Legende, Richtung und relative Bewegungsbeträge in Schwarz) am Hohen Burgstall in den Beobachtungsperioden 2019/20 und 2020/21 aus UAV-basierten Messdaten. Orthophotos generiert aus UAV-basierten, optischen Bilddaten. Nordöstlich der gelben Linie in der Abbildung für 2019-2020 sind die Vergleichsdaten unzreichend um gesichterte Aussagen über die Veränderung treffen zu können.....43
- Abbildung 34: Tagesmittel der Lufttemperatur an der Klimastation im Hinteren Langtalkar (2655 m) zwischen
 1. 8. 2013 und 31. 7. 2021. Die Mitteltemperatur in diesem Zeitraum beträgt -0,56 °C. Zu beachten die Fehlwerte zwischen Mitte Mai und Mitte Juni 2019 (Pfeil).





Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Aufstellung der Geländebegehungen zur Durchführung der Geländearbeit in den thematischen

 Teilbereichen
 (A) Bodentemperatur-Monitoring, (B) Blockgletscherbewegungs

 Monitoring, (C) Massenbewegungs-Monitoring und (D) Lufttemperatur-Monitoring zwischen Juli und

 September 2021.
 9
- Tabelle 2: Auflistung der vier lokalen Untersuchungsgebiete im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten und ihrer Instrumentierung mit Miniatur-Temperaturdatenloggern. Lage siehe Abbildung 9. Abbildungen 13, 25, 26 und 27 zeigen Daten bzw. Auswertungen der jeweils grau hinterlegten Sensoren. HLC = Hinteres Langtalkar-Kögelekar, FAL = Fallbichl, HOT = Hochtor, DOV = Dösen-Säuleck, PAG = Pasterze-Burgstall. GOE-PR ist ein Standort im Gößnitzkar, 2,6 km SW vom Kögelekar. Der Code für jeden Standort besteht (bis auf eine Ausnahme) aus diesen Bezeichnungen in Kombination mit weiteren, internen Kürzeln; z. B. N = Nord, S = Süd.
- Tabelle
 4: Bewegungsraten am Blockgletscher Hinteres Langtalkar für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2015/16 bis 2020/21 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. Der errechnete Mittelwert im unteren Bereich ist gegenüber der Referenzbewegung 2014/2015 betragsmäßig angepasst.



Literaturverzeichnis

Bauer A., Paar G., Kaufmann V. (2003): Terrestrial laser scanning for rock glacier monitoring. In: Phillips, M., Springman, S.M. & Arenson, L.U. (eds), Proceedings of the 8th international conference on permafrost. Swets and Zeitlinger, Lisse, 1, 55–60.

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. In: The Cryosphere 6, 807–820. https://doi.org/10.5194/tc-6-807-2012

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. <u>https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.03.003</u>

Kaufmann V. (2016): 20 Years of Geodetic Monitoring of Dösen Rock Glaciers (Ankogel Group, Austria): A Short Review. In: Joannea Geol. Paläont. 12, 37–44.

Kaufmann V. (2020): <u>https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann</u> (letzter Zugriff 27.1.2020)

Kaufmann V. (2021): <u>https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann (</u>letzter Zugriff 23.2.2021)

Kaufmann V. (2022): <u>https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann</u> (letzter Zugriff 4.2.2022)

Kaufmann V., Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Slupetzky H., Avian M. (2015): Glaciological Studies at Pasterze Glacier (Austria) Based on Aerial Photographs. In: Li, J. and Yang, X. (eds.): Monitoring and Modeling of Global Changes: A Geomatics Perspective. Springer Remote Sensing/Photogrammetry, Springer Science+Business Media Dordrecht, 173–198. <u>https://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-9813-6_9</u>

Kaufmann, V., Kellerer-Pirklbauer, A., Seier, G. (2021): Conventional and UAV-based aerial surveys for long-term monitoring (1954-2020) of a highly active rock glacier in Austria. Front. Remote Sens. 2:732744. https://doi.org/10.3389/frsen.2021.732744

Kellerer-Pirklbauer A. (2017): Solifluction rates and environmental controls at local and regional scales in central Austria, Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography, 72, 37–56. https://doi.org/10.1080/00291951.2017.1399164

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., Kaufmann V. (2018): Deglaciation and its impact on permafrost and rock glacier evolution: New insight from two adjacent circues in Austria. In: Science of the Total Environment, 621: 1397–1414. <u>https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.087</u>

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G. K. (2020): Zwischenbericht 2020 im Modul 07 - Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost, Geomorphodynamik im Rahmen des interdisziplinären, integrativen Monitoringund Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern (Version 10/20). Wissenswert. <u>http://www.parcs.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=40611</u>

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G. K. (2021): Zwischenbericht 2021 im Modul 07 - Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost, Geomorphodynamik im Rahmen des interdisziplinären, integrativen Monitoringund Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern (Version 10/21). forschungsraum. <u>http://www.parcs.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=43285</u>

Kellerer-Pirklbauer A., Rieckh M. (2016): Monitoring nourishment processes in the rooting zone of an active rock glacier in an alpine environment. In: Z. Geomorph. N.F. 60, Suppl., 3, 99–121. https://dx.doi.org/10.1127/zfg suppl/2016/00245



Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G. K., Avian M., 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. <u>https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2011.00449.x</u>

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. In: Austrian Journal of Earth Sciences, Volume 110/2. <u>https://dx.doi.org/10.17738/ajes.2017.0013</u>

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G. K., Kaufmann V., Avian M. (2018a): Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2016/17. Unveröffentlichter Bericht, Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz, 33 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. In: 5th European Conference on Permafrost – Book of Abstracts, 23 June–1 July 2018, Chamonix, France, 396–397.

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G. K., Kaufmann V., Avian M. (2019): Permafrost-Monitoring Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2016–2018 – Projektendbericht. Unveröffentlichter Bericht, Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz, 41 S.

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M. (2020): Permafrost-Monitoring im Nationalpark HoheTauernKärnten2018/19.Zwischenberichthttps://www.parcs.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=39747

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M. (2021): Permafrost-Monitoring im Nationalpark HoheTauernKärnten2019/20.Zwischenberichthttps://www.parcs.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=42106

Körner C., Tappeiner U., Newesely C., Wittmann H., Eberl T., Kaiser R., Meyer E., Grube M., Fernández Mendoza F., Füreder L., Niedrist G.H., Daim A., Lieb G.K., Kellerer-Pirklbauer A., Wickham S., Petermann J., Berninger U. (2020): Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen im Nationalpark Hohe Tauern. Synthese der Startphase 2016-2018. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien. ISBN-Online: 978-3-7001-8748-6. <u>https://doi.org/10.1553/GCP_LZM_NPHT_Synthese</u>

Lieb G. K., Kellerer-Pirklbauer A. (2017): 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, Institut für Geographie und Raumforschung, Universität 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, Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz, 32 S.

Lieb G. K., Kellerer-Pirklbauer A. (2018b): Longterm-monitoring of abiotic processes in the Hohe Tauern National Park, Austria, within the framework of an ecosystem monitoring program. In: Abstracts for the 6th International Symposium for Research in Protected Areas 2017, 2-4 November 2017, Salzburg, Austria.



Lieb G. K., Kellerer-Pirklbauer A., Ziesler C. (2019): Langzeit-Monitoring abiotischer Prozesse im Nationalpark Hohe Tauern – Modul 07 "Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost, Geomorphodynamik" im Rahmen des interdisziplinären, integrativen Monitoring- und Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern, Endbericht (unpubliziert). https://www.parcs.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=38030.

Pellet C., Bodin X., Delaloye R., Kaufmann V., Noetzli J., Thibert E., Kellerer-Pirklbauer A. (2021): Rock glacier kinematics. In: Blunden, J. and T. Boyer, Eds., 2020: State of the Climate in 2020. Bull. Amer. Meteor. Soc., 102 (8), S44-45. <u>https://doi.org/10.1175/2021BAMSStateoftheClimate.1</u>

Pellet C., Bodin X., Cusicanqui D., Delaloye R., Kääb A., Kaufmann V., Noetzli J., Thibert E., Vivero S., Kellerer-Pirklbauer A. (2022): Rock glacier velocity. Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS) – Beitrag in Begutachtung.

Staub B., Hasler A., Noetzli J., Delaloy, R. (2017): Gap-filling algorithm for ground surface temperature data measured in permafrost and periglacial environments. In: Permafrost and Periglacical Processes, 28, 237–248. <u>https://dx.doi.org/10.1002/ppp.1913</u>







Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern Döllach 14 | 9843 Großkirchheim | Austria Tel.: +43 (0) 4825 / 6161, E-Mail: nationalpark@ktn.gv.at