NATIONAL PARKS AUSTRIA

Nationalpark Hohe Tauern

Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2022-2024

Endbericht

www.hohetauern.at

IMPRESSUM

forschungsraum
Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2022-2024
Endbericht

Projektleitung und Koordination:
Andreas Kellerer-Pirklbauer, Cascade - The mountain processes and mountain hazards group, Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz

Für den Inhalt verantwortlich:
Andreas Kellerer-Pirklbauer, Gerhard Karl Lieb / Universität Graz
Viktor Kaufmann / Technische Universität Graz
Michael Avian, Melina Frießenbichler / GeoSphere Austria

Projektpartner:
Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern, Döllach 14, 9843 Großkirchheim

Titelbild:
Wartung der Klimastation auf einem Rundhöcker oberhalb des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar (Schobergruppe), auf 2655 m Seehöhe gelegen, im Bildhintergrund der Großglockner (Aufnahme vom 30.8.2024 mit Blick nach Nordwesten, © A. Kellerer-Pirklbauer)

Zitiervorschlag:
Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M., Frießenbichler M. (2025): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2022-2024. Endbericht, 65 Seiten.

Weblink: https://www.parcs.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=55269

Die Forschungsarbeiten wurden aus Mitteln des ÖAV-Patenschaftsfonds Nationalpark Hohe Tauern gefördert.

Trotz gebotener Sorgfalt können Satz- und Druckfehler nicht ausgeschlossen werden.

Graz, Mai 2025, Version 1.2

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung *1*

Summary *1*

1. Einleitung 2

2. Monitoring im Messjahr 2023/24: Aktivitäten 4

3. Witterungsablauf und Schneeverhältnisse 2023/24 13

4. Ergebnisse Monitoring 2023/24 16

   4.1. Bodentemperatur-Monitoring 16

   4.2. Blockgletscherbewegungs-Monitoring 23

   4.3. Massenbewegungs-Monitoring 26

   4.4. Lufttemperatur-Monitoring 29

5. Ergebnisse des längerfristigen Monitorings 34

   5.1. Bodentemperatur-Monitoring 34

   5.2. Blockgletscherbewegungs-Monitoring 40

   5.3. Massenbewegungs-Monitoring 43

   5.4. Lufttemperatur-Monitoring 47

6. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse 51

7. Gesamtbewertung und Ausblick 53

Abbildungsverzeichnis 55

Tabellenverzeichnis 60

Literaturverzeichnis 61

Zusammenfassung

Dieser Bericht über den Permafrost im Kärntner Teil des Nationalparks Hohe Tauern ist der zehnte zu diesem Thema. Er präsentiert und diskutiert einerseits Ergebnisse des Permafrost-Monitorings der Universität Graz, der Technischen Universität Graz sowie der GeoSphere Austria in vier unterschiedlichen Untersuchungsgebieten (Dösen-Säuleck, Fallbichl-Hochtor, Hinteres Langtalkar-Kögelekar und Pasterze-Burgstall) im und nahe dem Nationalpark Hohe Tauern Kärnten im Berichtsjahr 2023/24 und gibt andererseits einen Überblick über die längerfristigen Monitoringergebnisse mit zeitlichem Fokus auf den Projektzeitraum 2022-2024. Der multidisziplinäre Ansatz umfasst in gewohnter Weise die Messungen der folgenden Indikatoren: (a) Bodentemperaturen an und nahe der Oberfläche, (b) Oberflächenbewegung von Blockgletschern, (c) Geländeveränderung bedingt durch Massenbewegungen und Abtragung an Felswänden sowie (d) verschiedene Klimaelemente mit Fokus auf die Lufttemperatur. Die Ergebnisse belegen bisher beispiellos permafrostungünstige Bedingungen, was im Berichtsjahr 2023/24 vor allem durch das hohe Bodentemperatur-Niveau mit neuen Maxima der Jahrestemperaturen an den meisten Standorten (32 von 41) zum Ausdruck gebracht wird. Der Mittelwert der Bodentemperatur für 2023/24 lag an den 39 Standorten mit entsprechenden Daten bei 1,8 °C. Das aktuelle Messjahr war dabei um 0,43 °C wärmer als der bisherige Rekordhalter 2019/20. Zum Vergleich, in den beiden Vorjahren war dies 0,7 °C für 2022/23 und 1,2 °C für 2021/22. Der Gradient der Erwärmung der Bodentemperatur liegt dabei im Zeitraum 2006-2024 bei 0,08 bis 0,10 °C/Jahr. Mit den hohen Bodentemperaturwerten verbunden erhöhten sich die Bewegungsraten der Blockgletscher-Oberflächen im selben Berichtsjahr wieder geringfügig gegenüber den Vorjahren (+5 bis +18 %), in denen sie aber stets auf hohem Niveau verblieben waren. Auch die Bewegung der Trümmermasse des Felssturzes am Mittleren Burgstall hat an Dynamik gewonnen. Die registrierten Lufttemperaturwerte, bei denen teilweise ebenfalls neue Maxima registriert wurden, spiegeln die anthropogen überwärmte Atmosphäre als letzte Ursache dieser Entwicklungen wider. Der Permafrost ist in den Hohen Tauern – ebenso wie in den gesamten Alpen – in allen Höhenlagen im Rückzug begriffen, was zu massiven Veränderungen der hochalpinen Geo- und Ökosysteme beiträgt.

Summary

Permafrost in the Carinthian part of Hohe Tauern National Park 2022-2024 – final report: This report on permafrost in the Carinthian part of the Hohe Tauern National Park is the tenth on this topic. It presents and discusses current results of permafrost monitoring by the University of Graz, the Graz University of Technology, and GeoSphere Austria in four different study areas (Dösen-Säuleck, Fallbichl-Hochtor, Hinteres Langtalkar-Kögelekar, and Pasterze-Burgstall) in and near the Hohe Tauern National Park, Carinthia, in the reporting year 2023/24. It also provides an overview of the longer-term monitoring results with a temporal focus on the project period 2022-2024. The multidisciplinary approach includes measurements of the following indicators: (a) ground temperatures at and near the surface, (b) surface movement of rock glaciers, (c) terrain change due to mass movements and erosion of rock faces, and (d) various climate elements with a focus on air temperature. The results demonstrate unprecedentedly unfavorable permafrost conditions, which are reflected in the 2023/24 reporting year, primarily by the high ground temperature level with new maximum in the annual temperatures at most locations (32 of 41). The mean ground temperature for 2023/24 was 1.8 °C at the 39 locations with corresponding data. The current measurement year was 0.43 °C warmer than the previous record holder, 2019/20. For comparison, in the two previous years, this was 0.7 °C for 2022/23 and 1.2 °C for 2021/22. The gradient of soil temperature warming between 2006 and 2024 is 0.08 to 0.10 °C/year. Associated with the high ground temperatures, the movement rates of the rock glacier surfaces increased slightly in the same reporting year compared to previous years (+5 to +18%), during which they had always remained at a high level. The movement of the debris mass from the rockfall at Mittlerer Burgstall also gained momentum. The recorded air temperatures, some of which also reached new maximums, reflect the anthropogenically overheated atmosphere as the ultimate cause of these developments. Permafrost in the Hohe Tauern – as in the entire Alps – is retreating at all altitudes, contributing to massive changes in the high-alpine geo- and ecosystems.

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), für die zweite dreijährige Projektperiode 2019–2021 Kellerer-Pirklbauer et al. (2020, 2021, 2022a), wobei die 2019 und 2022 publizierten Berichte die jeweiligen Endberichte waren. Die Berichte von 2023 (Kellerer-Pirklbauer et al. 2023a) und 2024 (Kellerer-Pirklbauer et al. 2024a) waren der insgesamt achte und neunte Bericht und zugleich der 1. sowie 2. Zwischenbericht der aktuellen Projektperiode 2022–2024. Der vorliegende Bericht ist nun der Endbericht hierzu. Dieser behandelt das Berichtsjahr 2023/24 und setzt zusätzlich wiederum dessen Ergebnisse in Beziehung zu den langjährigen Messreihen mit Fokus auf die aktuelle Projektperiode 2022-2024.

In diesem Beitrag werden wie in den bisherigen in einem ersten Schritt die im Berichtsjahr 2023/24 durchgeführten Aktivitäten sowie deren Ergebnisse dargelegt und mit den allgemeinen meteorologischen Bedingungen im weiteren Untersuchungsgebiet in Verbindung gebracht. Im zweiten Schritt werden diese Ergebnisse mit jenen seit Beginn der langen Datenreihen (z. B. Beginn Bodentemperatur-Monitoring Sommer/Herbst 2006) 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, worüber in den letzten Jahren Zwischenberichte (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2017, 2018a, Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2020, 2021, 2022; Kellerer-Pirklbauer et al. 2024b), zwei Endberichte für jeweils dreijährige Projektphasen (Lieb et al. 2019, Kellerer-Pirklbauer et al. 2023b), ein Tagungsbeitrag (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2018b) 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 – vorwiegend in Kärnten, zu einem geringen Anteil in Tirol – 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, 2022b, 2022c). Bereits fünfmal flossen die langfristigen Blockgletscher-Bewegungsdaten sowie Informationen zur Entwicklung der Boden- und Lufttemperatur sowohl aus dem Hinteren Langtalkar als auch aus dem Dösental in für die renommierte Zeitschrift „Bulletin of the American Meteorological Society“ (BAMS) geschriebene Beiträge ein (Pellet et al. 2021, 2022, 2023, 2024, 2025). 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. In den Beiträgen von 2023 und 2024 blieb die Anzahl der darin behandelten Blockgletscher – und somit die prominente Darstellung der Blockgletscher im Hinteren Langtalkar und im Dösental – gleich. Im Beitrag von 2025 kamen noch Beispiele aus den USA hinzu. Alle fünf Blockgletscher-bezogenen Beiträge sind integriert in die Berichtslegung zum aktuellen Zustand des Weltklimas („State of the Climate“).

Zur weiteren Erhöhung der Sichtbarkeit der durchgeführten Forschungsaktivitäten im Nationalpark Hohe Tauern sind unsere Permafrost-Monitoring-Aktivitäten auch mit nationalen und internationalen Forschungsprojekten und Netzwerken verknüpft wie GTN-P (Global Terrestrial Netzwerk für Permafrost) oder KryoMon.AT (Kryosphären Monitoring Österreich). Schließlich sei noch auf eine Publikation verwiesen, worin der Projektleiter gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen aus der Schweiz, Frankreich, Italien, Deutschland und Japan einen umfassenden Beitrag

zu Blockgletschern und Blockgletscherbewegung im Alpenraum im Zeitraum 1995–2022 verfasst hat. Auch darin spielt die bisherige Permafrost- und Periglazialforschung im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten eine gewichtige Rolle (Kellerer-Pirklbauer et al. 2024c).

Die genannten Aktivitäten und Netzwerke bewirken eine überregionale bis globale Verbreitung der Forschungsergebnisse unserer Aktivitäten im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten und zeigen somit die große Bedeutung und den Wert von langfristigen Messreihen aus der Permafrostforschung im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten. Dies ist auch in dem im März 2024 erschienenen Heft 74 der Zeitschrift GeoGraz belegt: Dieses behandelt das Schwerpunktthema „Permafrost – 25 Jahre Österreich in der International Permafrost Association" (siehe auch Kellerer-Pirklbauer 2023) und beinhaltet eine breite Palette von Beiträgen mit Bezug zu unseren Forschungsaktivitäten im Nationalpark Hohe Tauern in Kärnten (Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2024, Kellerer-Pirklbauer et al. 2024d, Pfeffer et al. 2024, Zandler & Sulzer 2024, Eulenstein & Kellerer-Pirklbauer 2024 und Dorić 2024).

Der zehnte Bericht in dieser nunmehr schon als „Langzeitprojekt" anzusprechenden Initiative stellt somit auch einen Meilenstein dar. Wie der Inhalt dieses Berichts zeigen wird, gilt der Begriff „Meilenstein" nicht nur deshalb, weil mit dem Bericht Nr. 10 ein Jubiläum zu feiern ist, sondern auch deshalb, weil das letzte Messjahr und die aktuelle Projektperiode 2022-2024 neue Rekordwerte mit sich brachten.

2. Monitoring im Messjahr 2023/24: Aktivitäten

Im Sommer bis Herbst 2024 konnten alle von uns betreuten Arbeitsgebiete besucht und die meisten Messaktivitäten und Wartungsarbeiten wiederum ordnungsgemäß durchgeführt werden. Die für diesen Bericht relevanten Untersuchungsgebiete 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 2024 dar. Im Einzelnen wurden die Aktivitäten im Rahmen der vier Monitoring-Teilprogramme durchgeführt, welche nachfolgend in den entsprechenden Unterkapiteln (A-D) kurz erläutert werden.

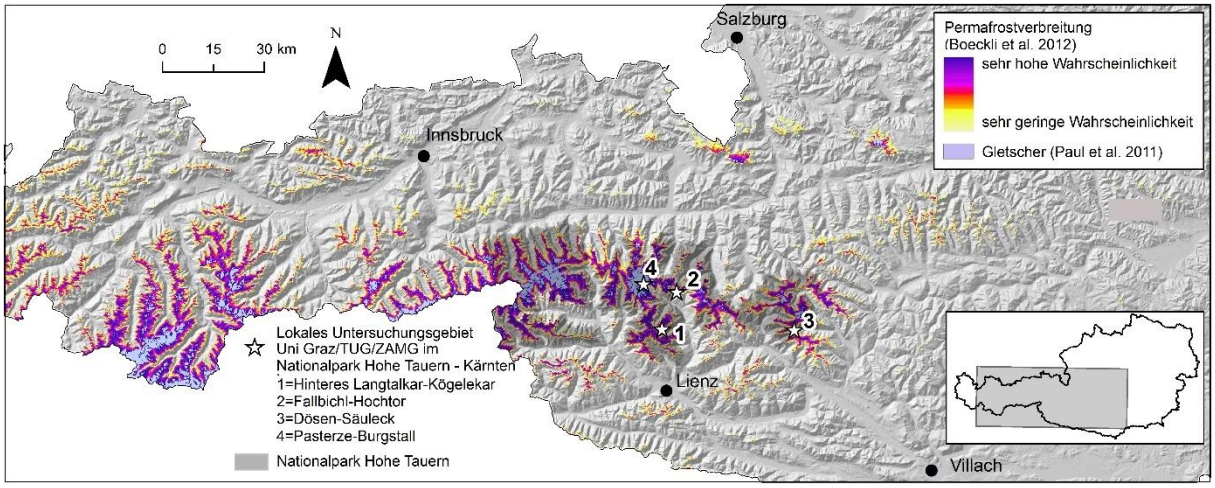

Abbildung 1: Lage der vier Arbeitsgebiete im Nationalpark Hohe Tauern in Kärnten (1, 3, 4) bzw. in seinem Nahbereich (2), in denen die gegenständlichen Untersuchungen durch die Universität Graz, die Technischen Universität Graz sowie die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (seit 1.1.2023 und somit in dieser Projektphase unbenannt in „GeoSphere Austria") gemeinsam durchgeführt werden, sowie die modellierte Verbreitung von Permafrost in Österreich nach Boeckli et al. (2012) und die kartierte Verteilung von Gletschern nach Paul et al. (2020). Karte: A. Kellerer-Pirklbauer.

(A) Bodentemperatur-Monitoring: Die Tätigkeiten rund um das Monitoring der Bodentemperaturen in den vier Untersuchungsgebieten bestanden 2024 wie auch in den letzten Jahren aus mehreren Geländebegehungen, die in Tabelle 1 (darin als „Typ A" ausgewiesen) zusammengestellt sind. Zwischen 26.8. und 25.9.2024 waren dies insgesamt acht Kampagnen. Je zwei führten in die beiden Arbeitsgebiete Pasterze-Burgstall und Dösen-Säuleck, eine konnte im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar erfolgreich durchgeführt werden und zu sogar drei Kampagnen kam es im Arbeitsgebiet Fallbichl-Hochtor. Angemerkt sei hierzu, dass die drei Geländebegehungen in die Arbeitsgebiete Dösen-Säuleck (23.-24.9.2024), Pasterze-Burgstall (24.9.2024) und Fallbichl-Hochtor (25.9.2024) im Rahmen einer durch A. Kellerer-Pirklbauer geleiteten universitären Exkursion, durchgeführt wurden und somit nicht dem Budget des Projektes zu Lasten fielen.

Die wesentlichsten Aufgaben im Tätigkeitsbereich Bodentemperatur-Monitoring waren dabei im letzten Beobachtungsjahr:

- das Auslesen der Datenspeicher der zahlreichen Bodentemperaturdatenlogger im Gelände,
- die Kontrolle der Sensorenkabel,
- der teilweise notwendige Austausch der Batterien an manchen Geräten,
- Tausch eines defekten Datenloggers am Standort KC-RID,
- die Erneuerung mancher Markierungen zum Auffinden von Sensoren,

- die Reparatur einer zweiten automatischen Kamera (Remote Digital Camera/RDC) im Untersuchungsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar mit Blickrichtung auf die hochaktive Blockgletscherstirn (HLC-RDC2), die erst im Jahr 2023 eingerichtet wurde, und
- die Einrichtung eines neuen Bodentemperatur-Messstandortes im Arbeitsgebiet Dösen-Säuleck in einer Seehöhe von ca. 3000 m in der Nähe vom Standort DOV-UP-S. Dies war notwendig, da dieser Standort durch Schuttkriechen und Schuttkippung verschüttet, aber nicht zerstört worden war (Abb. 2) und eine Neueinrichtung dieses wichtigen Standortes als notwendig erachtet wurde. Der Zugriff auf den Datenlogger war mit Funksignal im Sommer 2024 noch möglich, eine Wartung inklusive Tausch der Batterie aber nicht. Der neue Standort (DOV-UP-S2) wurde in der Nähe (Details siehe Abbildungsunterschrift) eingerichtet, und es ist zu hoffen, dass durch möglichst lange Parallelmessung der beiden Logger eine Datenhomogenisierung möglich sein wird.
- An den beiden Standorten HLC-Q im Hinteren Langtalkar und DOV-Q in der Dösen wurden wiederum auch Datenlogger zur Messung der Wassertemperatur von Blockgletscherquellen gewartet.

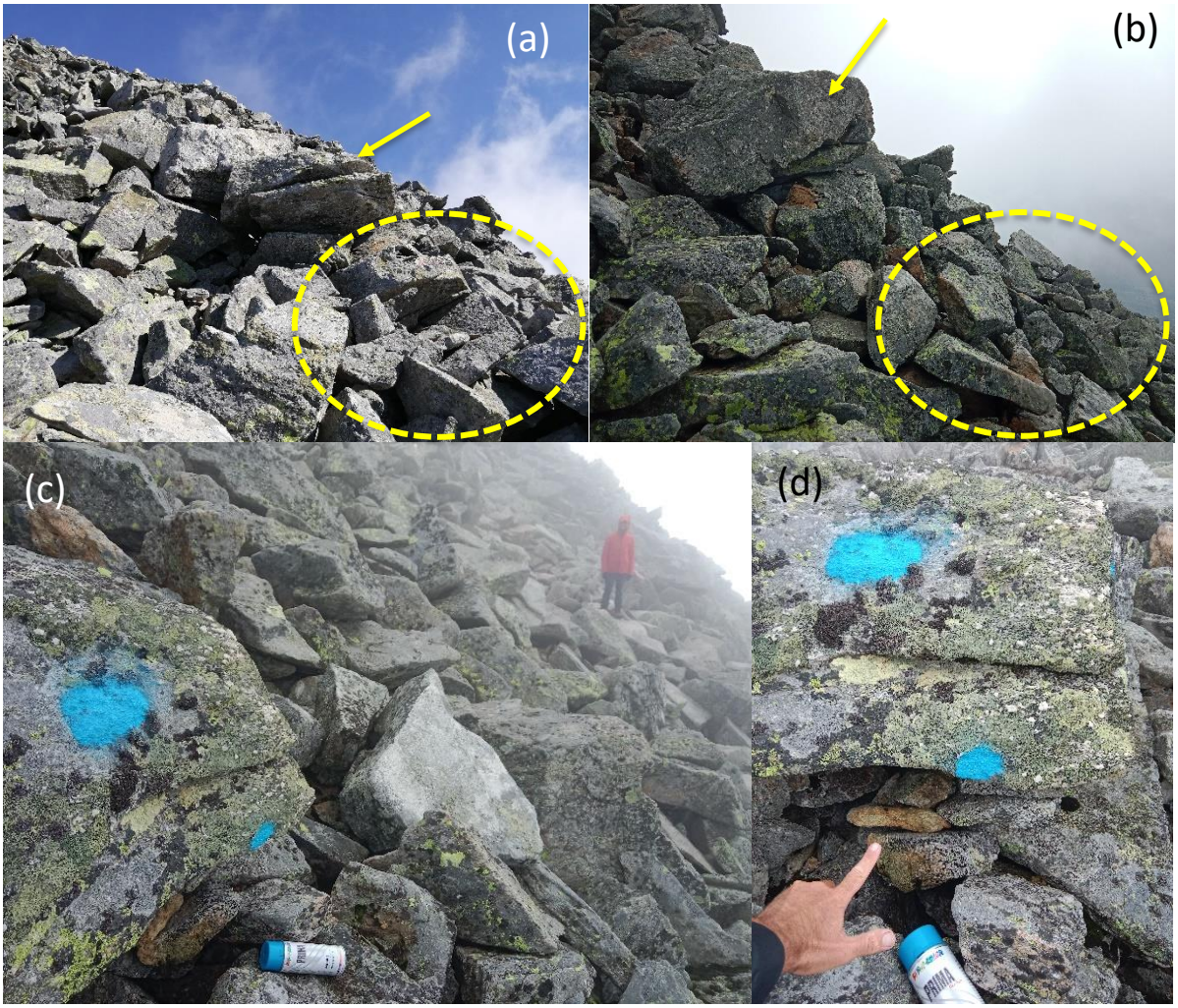

Abbildung 2: Standort DOV-UP-S am 30.8.2022 (a) und 27.8.2024 (b): Bedingt durch labile Verhältnisse im Bereich der großen Blöcke am Standort DOV-UP-S kam es vor dem 27.8.2024 zu Materialbewegungen mit Blockkippung. Dadurch wurde der Datenlogger von Blöcken begraben. Per Funk ist dieser jedoch noch ansprechbar. Der Pfeil markiert einen markanten Block in beiden Abbildungen, der ebenfalls verkippte. Das strichliertes Oval kennzeichnet den bewegten Bereich um den Datenlogger. Ein Ersatzstandort (DOV-UP-S2) wurde 2024 in ca. 25 m horizontaler Distanz und ca. 5 m höher als zuvor eingerichtet (c) und (d). Fotos. A. Kellerer-Pirklbauer.

Abbildung 3: Für die Geländearbeit unvorteilhafte Witterungs- und Schneeverhältnisse im Zuge der Geländearbeit am (a) 9.9.2024 im Arbeitsgebiet Fallbichl-Hochtor und am (b) 24.9.2024 im Arbeitsgebiet Pasterze-Burgstall. Fotos: A. Kellerer-Pirklbauer.

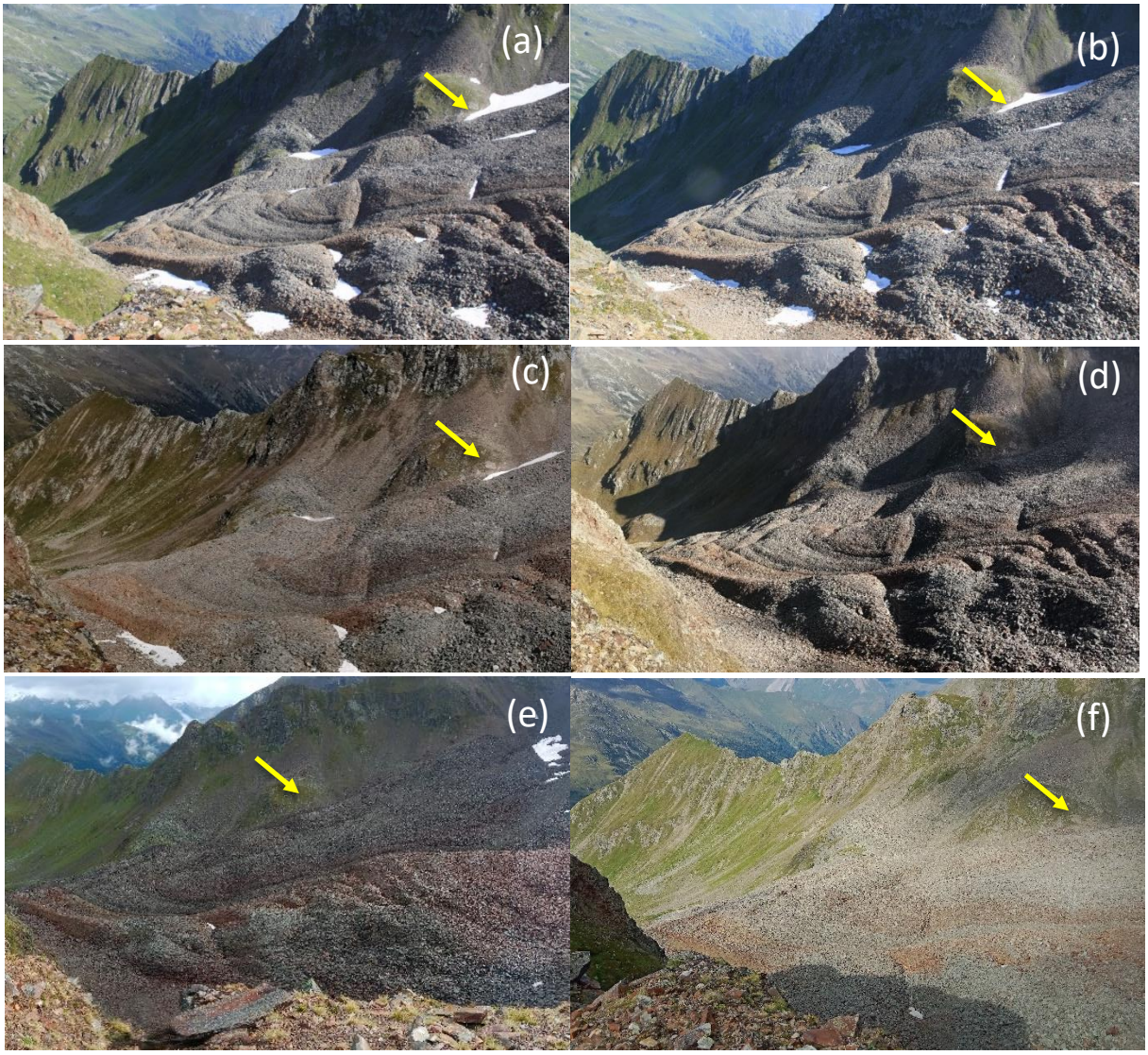

Abbildung 4: Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar: Verteilung von Schneeflecken im Hinteren Langtalkar am bzw. um den Blockgletscher am (a) 15.8.2019, (b) 12.8.2020, (c) 2.9.2021, (d) 3.9.2022, (e) 10.8.2023 und (f) am 29.8.2024. Der Pfeil markiert in jedem Foto den Standort HLC-RT, der in den ersten drei hier gezeigten Jahren unter Schnee lag. Das Foto von 2024 zeigt auch, dass im Bildausschnitt in den letzten Augusttagen kein nennenswerter Restschnee mehr lag.

Tabelle 1: Aufstellung der Feldbegehungen zur Durchführung der Geländearbeit in den thematischen Teilbereichen (A) Bodentemperatur-, (B) geodätisches Blockgletscherbewegungs-, (C) Massenbewegungs- und (D) Lufttemperatur-Monitoring zwischen Juli und September 2024.

Untersuchungsgebiet	Typ	Termin	Messteam [Anmerkung]
Dösen-Säuleck	A, D	26.-28.8.2024	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Dorić, Wolfgang Sulzer, Harald Zandler, Marco Kirchmair, Lea Schramml, Benjamin Signitzer (alle Uni Graz)
	A	23.-24.9.2024	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Raphael Burtscher, Erik Heiarz (alle Uni Graz)
Hinteres Langtalkar-Kögelekar	A, D	29.-31.8.2024	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Dorić (beide Uni Graz)
Fallbichl-Hochtor	A	28.8.2024	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Dorić (beide Uni Graz)
	A	9.9.2024	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Dorić (beide Uni Graz)
	A	25.9.2024	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Raphael Burtscher, Erik Heiarz (alle Uni Graz)
Pasterze-Burgstall	A	11.-13.9.2024	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Alexander Dorić (alle Uni Graz) [zeitlich überlappend mit den jährlichen Gletschermessungen an der Pasterze; unterstützt von Michael Bliem (Gmünd), Gerhard Karl Lieb (Graz), Hanna Pfeffer (Graz), Rupert Schwarzl (Stainz), Wolfgang Sulzer (Graz) und Harald Zandler (Graz)]
	A	24.9.2024	Andreas Kellerer-Pirklbauer, Raphael Burtscher, Erik Heiarz (alle Uni Graz)
Dösen-Säuleck	B	26.-28.8.2024	Walter Krämer, Francesca Baldacchino, David Clara, Jakob Siebenhofer (alle TU Graz)
Hinteres Langtalkar-Kögelekar	B	29.8.-1.9.2024	Walter Krämer, David Clara, Jakob Siebenhofer, Florian Kothgasser, Tobias Bolch [30.-31.8.2024] (alle TU Graz)
Hinteres Langtalkar-Kögelekar	C	12.8.2024	Melina Frießenbichler, Anton Neureiter (beide GeoSphere Austria)
Pasterze-Burgstall	C	16.7.2024	Melina Frießenbichler, Anton Neureiter (beide GeoSphere Austria)
	C	4.9.2024	Melina Frießenbichler, Anton Neureiter (beide GeoSphere Austria)

Die Witterungsbedingungen an den acht Geländekampagnen, die alle von A. Kellerer-Pirklbauer geleitet wurden, waren ungünstiger als in der Geländearbeitssaison 2022 und somit ähnlich wie 2023. Insbesondere beeinflusste im Jahr 2024 entweder eine instabile oder eine kühle Witterung mit Schneeflecken basierend auf dem Kaltlufteinbruch mit Schneefällen zwischen dem 9. und 15. September 2024 die Geländearbeiten. Dies war in den drei Arbeitsgebieten Dösen-Säuleck (Kampagne im September 2024), Fallbichl-Hochtor (zwei der drei Kampagnen, einzig die Kampagne am 28.8.2024 erfolgte bei gutem Wetter) und Pasterze-Burgstall (eine angekündigte Kaltfront erzwang ein zeitliches Vorverschieben der 1. Kampagne in diesem Gebiet; die 2. Kampagne dort Ende September war von kühler Witterung und zahlreichen Restschneefeldern begleitet; Abb. 3) der Fall. Einzig im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar konnten die Arbeiten bei guten Bedingungen (abgesehen von Schauern jeweils nachmittags) durchgeführt werden. Im Gegensatz zu den Jahren 2019 bis 2021 war im Jahr 2024 – gleich wie 2022 und 2023– kein Standort von einer winterlichen (oder mehrjährigen) Restschneedecke bedeckt. Abbildung 4 zeigt diesen Sachverhalt exemplarisch für einen Teilbereich des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar. Im Gegensatz zu den drei Sommern 2019, 2020 und 2021 waren die Schneeverhältnisse in den Sommer 2022, 2023 und 2024 deutlich andere, indem nahezu kein Altschnee mehr am unteren Bereich des Blockgletschers vorhanden war. Das

weitgehende Fehlen von Altschnee im Spätsommer war in allen vier Arbeitsgebieten in ähnlicher Weise zu beobachten.

Bedingt durch die Schneearmut im Spätsommer 2024 (bis einschließlich 8.9.2024) konnten alle Standorte wieder erfolgreich ausgelesen werden. Erfreulicherweise blieben Stromversorgungsprobleme oder Probleme mit den Datenloggern weitgehend aus (nur am Standort KC-RID im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar) und somit kam es auch zu keinen wesentlichen Ausfällen in der Datenaufzeichnung (siehe Kapitel 4). Ergänzend angemerkt sei, dass im Zuge der schon erwähnten Exkursion im Arbeitsgebiet Fallbichl-Hochtor (25.9.2024) noch geoelektrische Profilmessungen an einem markanten Solifluktionslobus im Bereich des Bodentemperatur-Monitoringstandortes FAL-LO durchgeführt wurden. Diese Messungen erfolgten zum Zweck der Analyse des internen Aufbaus im Bereich der Solifluktionsstirn, die schon früher Gegenstand prozessualer Untersuchungen war (Kellerer-Pirklbauer 2017).

An den beiden bereits erwähnten Monitoring-Standorten mit Messung der Wassertemperaturen von Blockgletscherquellen (HLC-Q im Hinteren Langtalkar, DOV-Q in der Dösen) zeigte sich im Projektjahr 2023/24, dass die Quellen teilweise wiederum im Winter trockengefallen waren und somit die ermittelten Werte teilweise die Wasser- und teilweise die Bodentemperatur am jeweiligen Messstandort widerspiegeln.

Zuletzt sei darauf hingewiesen, dass in Ergänzung zum Standardmessprogramm im Arbeitsgebiet Dösen-Säuleck das zweite Mal nach 2023 der gesamte Dösener Blockgletscher mit einer Drohnenbefliegung durch H. Zandler und W. Sulzer (beide Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz) zeitgleich mit der Geländearbeit von A. Kellerer-Pirklbauer und A. Dorić photographisch aufgenommen wurde. Zu Kontroll- und Vergleichszwecken wurden hierzu auch zeitgleich die geodätischen Vermessungspunkte am Blockgletscher durch A. Kellerer-Pirklbauer und A. Dorić mit GNSS (Global Navigation Satellite System) eingemessen (Abb. 5).

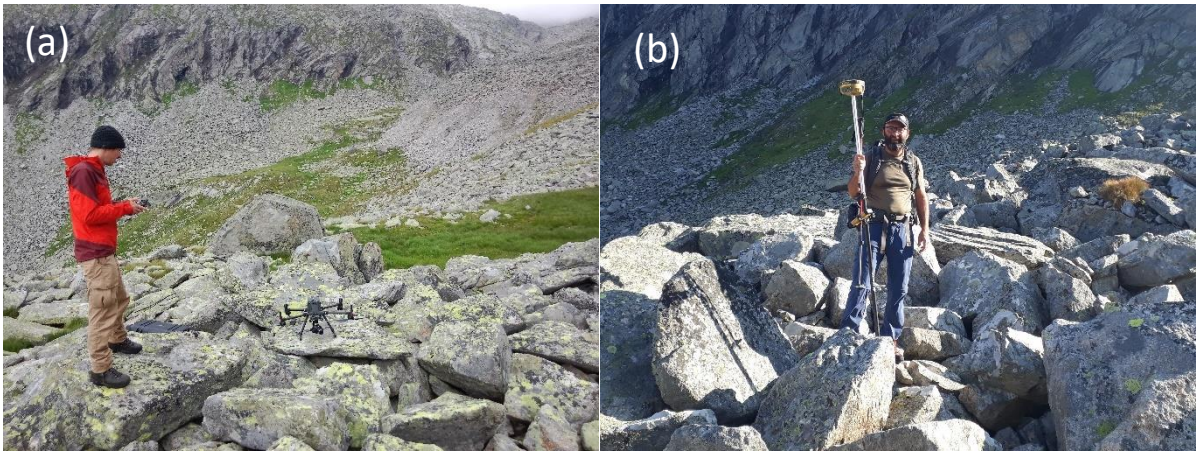

Abbildung 5: Ergänzende Drohnenbefliegung (a) und geodätische Vermessungsarbeiten (b) am Dösener Blockgletscher durch Mitarbeiter des Instituts für Geographie und Raumforschung, Universität Graz. H. Zandler und W. Sulzer führten am 2.8.2023 erstmals an diesem Standort eine Drohnenbefliegung durch (a) – im Bildhintergrund ist die Stirn des Blockgletschers zu erkennen. Am 27.8.2024 erfolgte durch dieselben zwei Personen die erste Wiederholungsbefliegung bzw. -messung. Für Kontroll- und Genauigkeitsanalysen führten A. Kellerer-Pirklbauer und A. Dorić jeweils zeitgleich geodätische Vermessungen an Referenzpunkten (Ground Control Points/GCPs) durch. Fotos: (a) A. Kellerer-Pirklbauer; (b) A. Dorić.

(B) Geodätisches Blockgletscherbewegungs-Monitoring:

Die geodätischen Wiederholungsmessungen zur Bestimmung der aktuellen Bewegungsraten an den beiden Blockgletschern Dösen und Hinteres Langtalkar erfolgten im Zeitraum vom 26.8. bis 1.9.2024. Aus organisatorischen Gründen musste der Geländeeinsatz, der routinemäßig sonst immer um den 15.8.

durchgeführt wird, zeitlich um zwei Woche nach hinten verschoben werden. Die gegebene zeitliche Verschiebung der Messungen hat jedoch auf das Messergebnis und die damit verbundenen Schlussfolgerungen keinen wesentlichen Einfluss, da die Bewegungswerte immer auf ein Kalenderjahr bzw. 365 Tage normalisiert werden. Die genauen Termine der Geländearbeiten für beide Untersuchungsgebiete Dösen-Säuleck und Hinteres Langtalkar-Kögele sowie die Liste der teilnehmenden Personen (Messteams) sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Koordination der Geländearbeiten 2024 lag in den Händen von V. Kaufmann (TU Graz), der jedoch – wie im Jahr zuvor – aus gesundheitlichen Gründen nicht ins Gelände mitgehen konnte. Kaufmann hatte die Leitung im Gelände an seinen langjährigen Kollegen und Messmitarbeiter W. Krämer übertragen. Die Auswertung der Messdaten sowie die diesbezügliche Berichtlegung wurden in gewohnter Weise durch V. Kaufmann durchgeführt.

Die geodätischen Wiederholungsmessungen zur Bestimmung der aktuellen Bewegungsraten an den beiden Blockgletschern Dösen und Hinteres Langtalkar erfolgten routinemäßig mittels satellitengestützter Einzelpunktmessung unter Anwendung der GNSS-RTK (Global Navigation Satellite Systems-Real-time Kinematic Positioning)-Technologie; Abb. 6). Dieses in der Geodäsie eingesetzte Standardverfahren zur Ermittlung von exakten 3D-Punktkoordinaten ermöglicht neben der Koordinatenbestimmung in Echtzeit auch eine sofortige Bestimmung der Oberflächenbewegung (Jahresbewegung) des beobachteten Messpunktes vor Ort. Ein interner Durchführungsbericht, verfasst von J. Siebenhofer, und auch ausgewählte Fotos (Kaufmann 2025) von Teammitgliedern dokumentieren die getätigten Geländearbeiten. Einen kurzen Überblick über insgesamt 20 Jahre geodätischer Beobachtung (1995-2015) am Dösener Blockgletscher gibt Kaufmann (2016). Kellerer-Pirklbauer et al. (2017, 2022) berichten von der allgemeinen Permafrost-bezogenen Erforschungsgeschichte am Dösener Blockgletscher inklusive der nationalen Einbettung dieser Tätigkeiten. Ein relativ aktuelle Forschungsstand am Hinteren Langtalkar Blockgletscher ist hingegen in Kellerer-Pirklbauer u. Kaufmann (2018) dargelegt.

Abbildung 6: Geodätische Vermessungsarbeiten im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar am 31.8.2024: (a) Blick von der geodätischen Basisstation (Punkt 7, 2375 m) in Richtung Hinterer Langtalsee. Im oberen Bildzentrum ist der Blockgletscher Hinteres Langtalkar, der sich über eine Geländestufe dynamisch unter Beteiligung von Rutschprozessen talabwärts bewegt, zu sehen. (b) GNSS-gestützte geodätische Einmessung des Punktes 15 im oberen Bereich des Blockgletschers Hinteres Langtalkar. David Clara mit Lotstab und aufgesetzter GNSS-Antenne (= Rover). Im Hintergrund links ist der Gipfel des Roten Knopfs (3281 m) zu sehen. Fotos: (a) W. Krämer; (b) J. Siebenhofer.

(C) Massenbewegungs-Monitoring: Die Messungen der Oberflächenveränderung am Blockgletscher im Hinteren Langtalkar (Abb. 7) sowie der Steinschlag- und Felssturzaktivität am Mittleren und Hohen Burgstall wurden von der GeoSphere Austria unter der Leitung von Michael Avian im Juli und September 2024 durchgeführt (Tabelle 1). Die Messungen werden seit 2021 ausschließlich drohnen-basiert (unmanned aerial vehicles - UAV) durchgeführt.

Die Geländearbeit vor Ort wurde von M. Frießenbichler geleitet. Die Koordination der Geländearbeiten 2024 lag in den Händen von Michael Avian (GeoSphere Austria), der jedoch aus gesundheitlichen Gründen nicht ins Gelände mitgehen konnte.

Zur UAV-Befliegung wurde die Drohen Multikopter Phantom 4 RTK bzw. DJI Mavic 3E der Firma DJI verwendet. 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 (20 MP, RGB), Mavic 3E, mit einem 4/3 CMOS-Sensor (20 MP) ausgestattet. Die Structure-from-Motion (SfM)-Auswertung der Luftbilder erfolgt mit Agisoft Metashape, die weiteren Analysen in CloudCompare 2.12beta bzw. Golden Software Surfer 10. Ergänzend, aber nicht durch das gegenständliche Projekt finanziert, wurden von der Universität für Bodenkultur nach Feldkartierungen im September 2021 und August 2023 geologische Laboruntersuchungen durchgeführt.

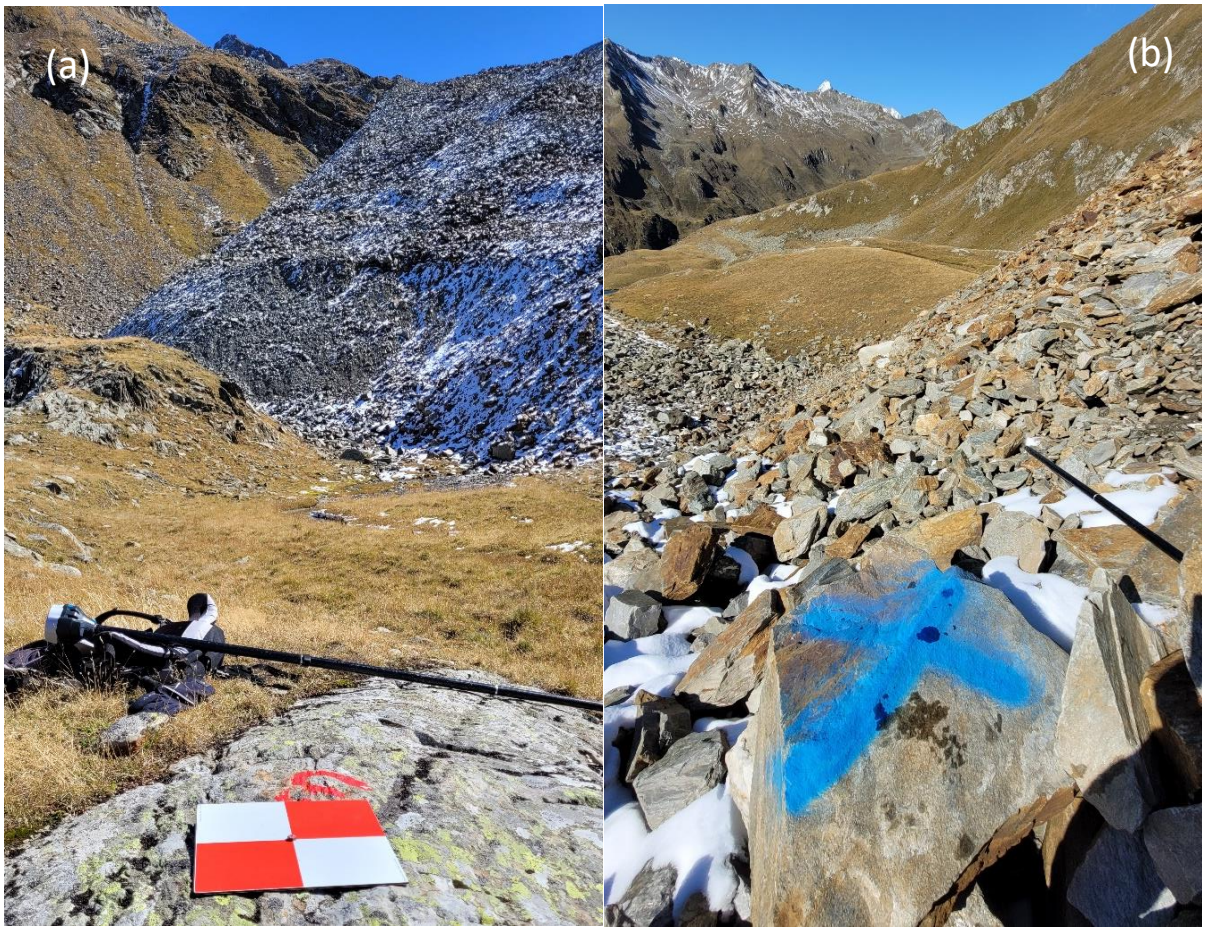

Abbildung 7: Geodätische Einmessung von Ground Control Points (GCP) vor (a) und am (b) Blockgletscher Hinteres Langtalkar am 22.09.2022. Im Jahr 2024 lagen keine aussagekräftigen Fotos hiervon für die Berichtslegung vor, insofern werden zur Situationsbeschreibung die hier gezeigten verwendet, da sich die Grundprinzipien der Datenerhebung nicht verändert haben. Fotos: (a) und (b) A.M. Tilg.

(D) Lufttemperatur-Monitoring: In den Arbeitsgebieten Dösen-Säuleck sowie Hinteres Langtalkar-Kögelekar stehen als weitere, für das Permafrost-Monitoring wichtige Messeinrichtungen noch je eine automatische meteorologische Station (siehe Kapitel 4.1.; HLC-AWS und DOV-AWS in Abb. 11) sowie drei automatische optische Kameras, eine in der Dösen, im Hinter Langtalkar seit Sommer 2023 zwei. Zwei Kameras beobachten die Ernährungsbedingungen von aktiven Blockgletschern (HLC-RDC; DOV-RDC) im Sinne von Lawinen- und

Steinschlagtätigkeit (vgl. Kellerer-Pirklbauer & Rieckh 2016). Die dritte Kamera fokussiert auf den Stirnbereich des immer noch vorrückenden Blockgletschers im Hinteren Langtalkar (HLC-RDC2). Da die Lufttemperatur einen sehr wichtigen Klimaparameter für den Permafrost darstellt und auch vorwiegend die Ergebnisse daraus weiter unten präsentiert werden, wird dieses Arbeitspaket vereinfacht mit „Lufttemperatur-Monitoring" betitelt.

In diesem vierten Monitoring-Arbeitspaket wurden die beiden automatischen meteorologische Stationen auf dem Dösener Blockgletscher sowie jene auf einem periglazial überprägten Rundhöcker oberhalb des Blockgletschers Hinteres Langtalkar gewartet. Die Datenreihe für 2023/24 war erfreulicherweise wieder an beiden Stationen geschlossen und nahezu fehlerfrei. Die Sensoren für Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit funktionierten an beiden Stationen einwandfrei, sodass die Datenreihen dieser Parameter für 2023/24 für beide Stationen geschlossen vorliegen. Der Sensor für die Globalstrahlung funktionierte im Hinteren Langtalkar ebenso, jener im Dösental zeichnete wie schon in den Jahren zuvor teilweise Fehlerwerte auf, die mit dem schon seit Jahren bestehenden technischen Gebrechen dieses Sensors zusammenhängen.

Die automatische Kamera im Hinteren Langtalkar mit Fokus auf die Wurzelzone des Blockgletschers (HLC-RDC) wurde bereits 2021 bei optimalen Witterungsbedingungen modernisiert. Die Modernisierung bestand aus einem neuen Akku (12V 25Ah dryfit Blei-Gel-Akku), einer neuen Kamera (GoPro Action Cam Hero7 Black), einer neuen Steuerungseinheit (UpBlink Time Lapse Controller for GoPro) sowie dem partiellen Tausch von Kabeln zwischen den Komponenten. Die Kamera im Dösental (DOV-RDC) wurde im Juli 2022 mit den oben gelisteten Komponenten modernisiert. Sowohl HLC-RDC als auch DOV-RDC funktionierten bedingt durch einen Programmierfehler (der 2024 behoben wurde) nicht über die gesamte Monitoringperiode 2023-2024, lieferten jedoch interessante Informationen zum Ab- und Aufbau der Schneedecken in den jeweiligen Wurzelzonen der Blockgletscher.

Bedingt durch die hohe Dynamik der Stirn des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar wurde zum Monitoring dieses unteren Bereiches des Blockgletschers am 9.8.2023 eine zweite automatische Kamera im Hinteren Langtalkar (HLC-RDC2) installiert. Als Fixierung der Kamera fungierte ein beweglicher Standfuß an einem windexponierten Felsen. Dies folgte der Überlegung, dass damit die Kamera an einer im Winter hoffentlich relativ schneearmen Stelle angebracht wurde. Das Kamerasystem umfasste eine GoPro Action Cam Hero7 Black mit einer Steuerungseinheit (UpBlink Time Lapse Controller for GoPro), zwei Solarpaneelen und einem Akku (siehe hierzu auch den Vorjahresbericht).

Im Zuge der Geländearbeit im Hinteren Langtalkar am 30.8.2024 musste festgestellt werden, dass die Kamera zwar noch an der Fixierung befestigt, ihre Ausrichtung – und damit das Sichtfeld in den Fotos – jedoch eine ganz andere war. Das Kameragehäuse wurde wohl bedingt durch Wind (zu sehen in den Fotos vom 17. auf den 18.9.2023) und auch Schnee zum Felsen gedrückt und dürfte auch länger unter Schnee gewesen sein, was eine Unterbrechung der Stromversorgung durch die Solarpanele bewirkte. Dennoch wurden zwischen 22.8.2023 und 8.5.2024 Fotos aufgezeichnet, jedoch mit erheblichen Datenausfällen dazwischen. Relevante Fotos für die Auswertung lagen für HLC-RDC2 somit nur bis zum 19.9.2023 vor. Zum Zeitpunkt der Wartung der Kamera hatte diese noch genug Spannung im Akku und konnte daher aktiviert werden. Die Ausrichtung der Kamera wurde am 30.8.2024 korrigiert und die Fixierungen (zum Felsen sowie zu den Paneelen) wurden stärker angezogen (Abb. 8).

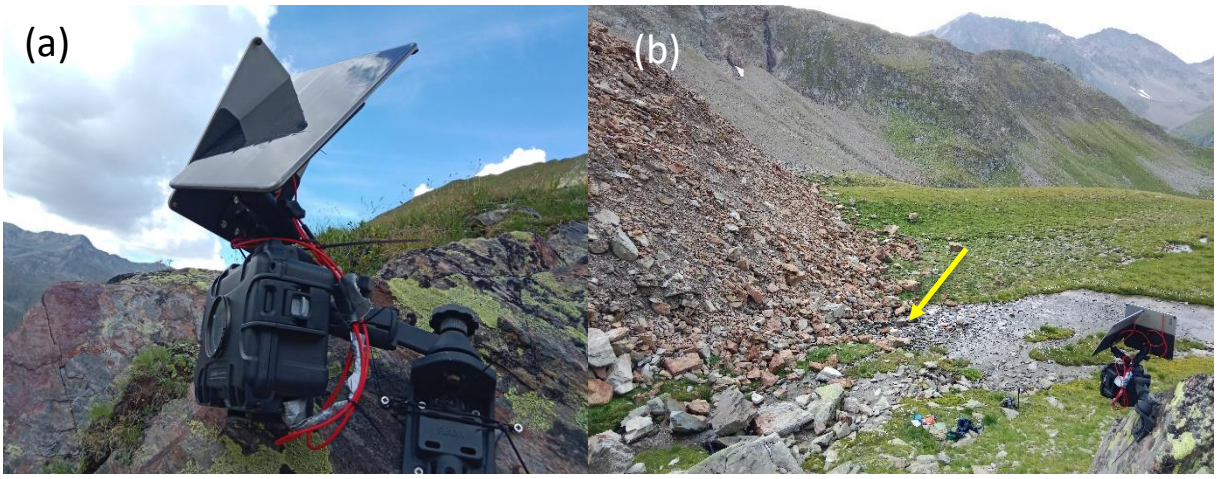

Abbildung 8: Die gewartete automatische Kamera vor der Stirn des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar am 30.8.2024 (Standort HLC-RDC2). Die beiden Fotos zeigen (a) die installierte Kamera mit ihrer Verankerung zum Felsen sowie (b) einen Überblick des Standortes mit Blockgletscherstirn und Blockgletscherquelle. Der Pfeil markiert die Position des Standortes des Blockgletscher-Quelltemperatur-Monitorings (HLC-Q). Fotos: A. Kellerer-Pirklbauer.

3. Witterungsablauf und Schneeverhältnisse 2023/24

Der Witterungsverlauf in den Ostalpen im Messjahr 2023/24 (1.8.2023–31.7.2024) wird hier zuerst anhand der Abweichungen von Monatsmittelwerten von der Klimanormalperiode (in diesem Fall die 30-jährige Periode 1981–2010) dargestellt. Die Lufttemperatur wird in Abbildung 9a als die Abweichungen der mittleren Monatsmittel der drei Bergstationen Sonnblick (Österreich), Säntis (Schweiz) und Zugspitze (Deutschland) von den langjährigen Werten für die Monate August 2023 bis Juli 2024 gezeigt. Die Graphik lässt erkennen, dass 11 der 12 Monate im Beobachtungsjahr 2023/24 übernormal und nur ein einziger Monat unternormal temperiert waren, wobei diese negative Abweichung im November 2023 -1,5 °C betrug. In den beiden vorherigen Beobachtungjahren 2021/22 und 2022/23 waren zumindest jeweils zwei Monate unternormal temperiert. Im Mittel der drei genannten Stationen sowie über das gesamte Beobachtungsjahr lag der Jahresmittelwert mit 2,1°C (!) über dem Normalwert, was einen neuen Rekordwert darstellt. In den beiden Vorjahren waren dies „nur" 1,3 °C (2022/23) sowie 1,4 °C (2021/22). In den Monaten August, September, Oktober, Dezember (alle 2023), Jänner, Februar, März, April, Juni und Juli (alle 2024) lag dieser Wert immer bei >1,5 °C, bei sieben dieser zehn Monate sogar bei >2.0 °C. Vor allem die sehr hohen Mitteltemperaturen der Monate September 2023 (mit +4,9 °C) sowie Februar 2024 (mit +4,4 °C) waren hauptverantwortlich für das extrem hohe Jahresmittel. Die übernormal warmen Monate ab Februar, gepaart mit relativer Schneearmut ab dem Frühsommer 2024 bedingt durch mehrere Hitzeperioden, waren die Hauptverursacher der Permafrost-Ungunst in diesem Beobachtungsjahr. Zusätzlich erschwerte der übernormal hohe Niederschlag im November und Dezember 2023 (in Form einer Schneedecke) die effiziente Auskühlung des Bodens im meteorologischen Spätherbst und Frühwinter

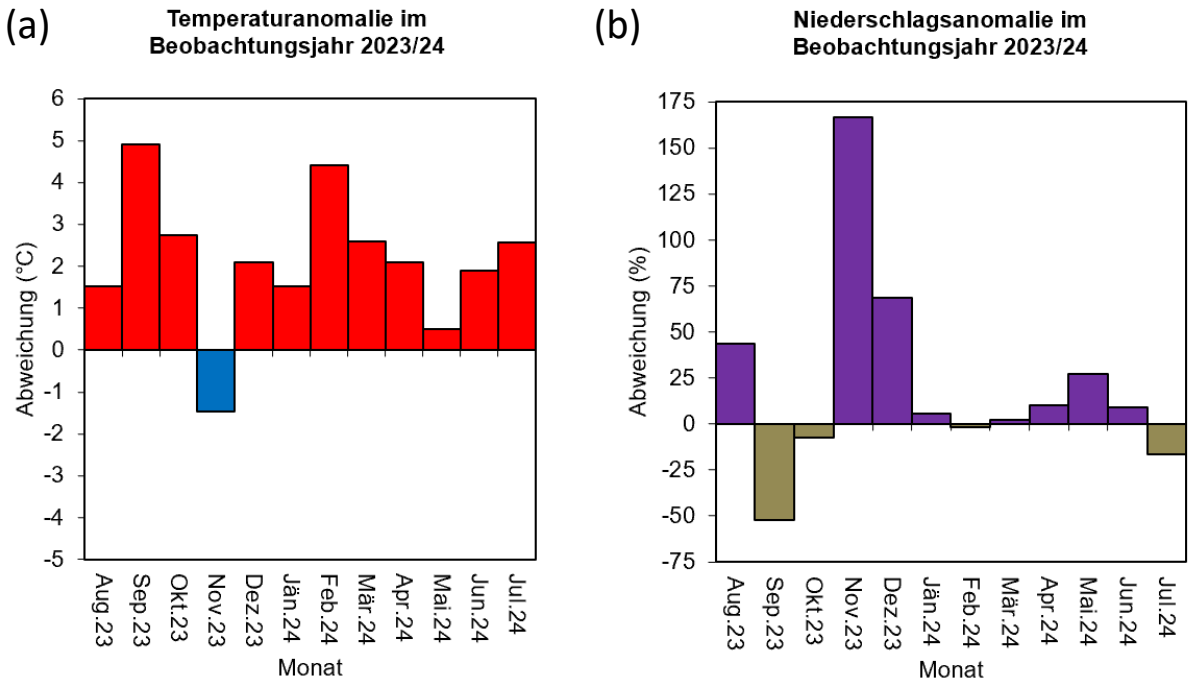

Abbildung 9: Die Abweichung der monatlichen Temperaturen in °C (a) und des Niederschlags in % (b) zwischen August 2023 und Juli 2024 (= Berichtsjahr 2023/24) vom Mittel 1981–2010 an den drei Gebirgswetterstationen Sonnblick, Zugspitze und Säntis. Grafik: A. Kellerer-Pirklbauer; Datenquellen: GeoSphere Austria für Sonnblick, Deutscher Wetterdienst für Zugspitze, MeteoSchweiz für Säntis.

Die Abweichungen der Niederschläge von den 30-jährigen Normalwerten werden in Abbildung 9b im Mittel für die drei Gebirgsstationen Zugspitze, Sonnblick und Säntis dargestellt. Im Gegensatz zu den Temperaturen, die sich an den drei Stationen sehr ähnlich (im Sinne der Abweichung von den Normalwerten) verhalten, ist der Unterschied beim Niederschlag zwischen den Stationen deutlich größer, was u. a. auf kleinräumige Niederschlagsereignisse bzw. die größere räumliche Variabilität der Niederschläge zurückzuführen ist. Nichtsdestotrotz spiegelt wiederum der jeweilige Monatsmittelwert über die drei Stationen sehr gut die allgemeinen Niederschlagsverhältnisse im österreichischen Alpenraum wider.

Betrachtet man nur die winterliche Akkumulationszeit (Oktober 2023 bis April 2024), die für die Ernährung der Gletscher und den Aufbau einer Schneedecke über Permafrost-Vorkommen besonders wichtig ist, so war der Niederschlag im Mittel mit 34,9 % deutlich positiv. Der bei Weitem niederschlagsärmste Monat im Messjahr 2023/24 war der September 2023 mit -52,1 %. Weit dahinter lag mit -16,5 % der Juli 2024. Im Gegensatz dazu waren acht der zwölf Monate überdurchschnittlich niederschlagsreich, wobei v. a. der November (+166,9 %) und der Dezember (+68,7 %) hervorstachen. Der zu feuchte Mai 2024 brachte nochmal viel Schnee in den Hochlagen. Für den Permafrost gilt, dass schneefreie oder -arme Bereiche in den Gebirgslagen im Winter besser auskühlen und Permafrost konservieren können. Diese winterliche Auskühlung war im Winter 2023/24 in schneereichen Lagen (Schneeeinwehung im Lee oder Akkumulation von Schnee durch normalen Schneefall) eingeschränkt. In schneefreien Bereichen, die sich im Frühjahr schneller erwärmen, ist das Gegenteil der Fall und somit für den Permafrost ungünstig. Ist es jedoch im Frühjahr und Sommer übernormal temperiert und fehlt eine schützende Restschneedecke aus der Zeit davor, so erwärmt sich der Untergrund umso schneller, was zu größeren saisonalen Auftauschichten und langfristig zur Degradation von Permafrost führen kann.

Auf Basis der Monatswitterungsübersichten für Österreich, online veröffentlicht durch die GeoSphere Austria (www.geosphere.at), können in Bezug auf die Schnee- sowie generellen Witterungsverhältnisse im Beobachtungsjahr 2023/24 folgende zusammenfassende Aussagen getroffen werden: Ein Wettersturz am 25./26.7.2023 leitete zu einer zweiwöchigen, von reger Tiefdrucktätigkeit dominierten Witterungsphase über, bei der zuletzt zwischen 5. und 7.8.2023 die Schneefallgrenze bis gegen die Waldgrenze sank. Danach folgte für fast drei Wochen wieder sehr warme und gewitterreiche Witterung (die auch die Geländearbeit deutlich erschwerte), sodass die Abschmelzung von Schneefeldern und Gletschereis rasant voranschritt. Ein Wettersturz vom 28.8.2023 brachte an diesem und den Folgetagen zwar außerordentlich hohe Niederschlagsmengen, von denen der Großteil aber auch in den höchsten Lagen in den Hohen Tauern als Starkregen fiel, wie auch in den automatischen Kameras zu sehen war. Erst in den letzten Augusttagen sank die Schneefallgrenze zwar etwas nach unten, brachte aber keine in den automatischen Kamerabildern erkennbare Schneedecke. Am Sonnblick wurde mit 13,0 °C am 9.9.2023 ein neues Temperaturmaximum für den September registriert. Der nächste Wettersturz in den Hohen Tauern ereignete sich um den 23.9.2023 Dieser brachte auch eine erste dünne Schneedecke in die Arbeitsgebiete, wie in den Kamerabildern zu sehen ist. Es folgte auch auf diesen Wettersturz eine weitere Witterungsphase mit spätsommerlichen Temperaturen, die erst am 14./15.10.2023 zu Ende ging. Mit 19.10.2023 lag auch eine dünne Schneedecke im Hinteren Langtalkar, die bis ca. 2800 m herabreichte (Abb. 10).

Der viel zu kalte November 2023 brachte überall in Österreich und somit auch in den Permafrost- und Gletschergebieten fast doppelt so viel Niederschlag wie erwartet und gehörte somit zu den zehn niederschlagsreichsten Novembern der Messgeschichte. Auch der Dezember 2023 blieb überwiegend kalt und feucht, während ab Weihnachten die Zufuhr milder Luftmassen dominierte (und deshalb das Monatsmittel wieder übernormal ausfiel), was auch für die nachfolgenden Monate, besonders Februar und März 2024, gilt, wobei der Februar 2024 an den meisten Messstationen neue Höchstwerte der Mitteltemperatur brachte. Die Niederschlagsmengen waren in dieser Zeit unterdurchschnittlich, sodass der Hochwinter insgesamt als eher schneearm gelten muss.

Abbildung 10: Fotos von der automatischen Kamera im Hinteren Langtalkar mit Fokus auf die Wurzelzone des Blockgletschers (HLC-RDC)): Aufbau der Winterschneedecke im Herbst 2023 mit beispielhaften Fotos vom 9.9.2023 (noch komplett schneefrei) und 24.10.2023 (frühwinterliche Bedingungen im ganzen Bildausschnitt).

In der zweiten Aprilhälfte 2024 stellte sich eine winterliche Witterungsphase mit viel Schneefall im Gebirge ein, und – nach einem knapp zweiwöchigen milden Intermezzo – verlief auch die zweite Maihälfte 2024 ähnlich. Der anfangs noch niederschlagsreiche Juni 2024 war ab der Monatsmitte sehr warm und niederschlagsarm, sodass die Ausaperung der tief gelegenen Schneeareale und Gletscherzungen rasch voranschritt und ab etwa Mitte Juli 2024 auch die höheren Lagen erfasste. Noch bis Ende Juli 2024 zogen sich die winterlichen Schneerücklagen in die höchst gelegenen oder schattigen Bereiche zurück. Der Sommer blieb auch in der Folge bis zu einem massiven Wettersturz am 12.9.2024 außerordentlich gletscher- und permafrostungünstig (vgl. Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2025). In Summe kann man somit von einem äußerst permafrostungünstigen Messjahr 2023/24 sprechen.

4. Ergebnisse Monitoring 2023/24

4.1. Bodentemperatur-Monitoring

Abbildung 11 sowie Tabelle 2 geben eine Übersicht über die Lage und Instrumentierung der in den vier Untersuchungsgebieten gelegenen Messstandorte. Die umfangreichsten Bodentemperaturmessnetze liegen in den Untersuchungsgebieten Hinteres Langtalkar-Kögelekar (n=16) und Dösen-Säuleck (n=14), gefolgt vom Arbeitsgebiet Pasterze-Burgstall (n=6) und Fallbichl-Hochtor (n=4). Ein weiterer Standort liegt etwas südwestlich vom Kögelekar im Gößnitztal (GOE-PR). Somit ergeben sich inklusive des letztgenannten 41 Standorte in den vier Arbeitsgebieten. Wegen der Neueinrichtung des Ersatzsstandortes DOV-UP-S2 bedeutet dies einen Zuwachs von einem Standort gegenüber dem Vorjahr.

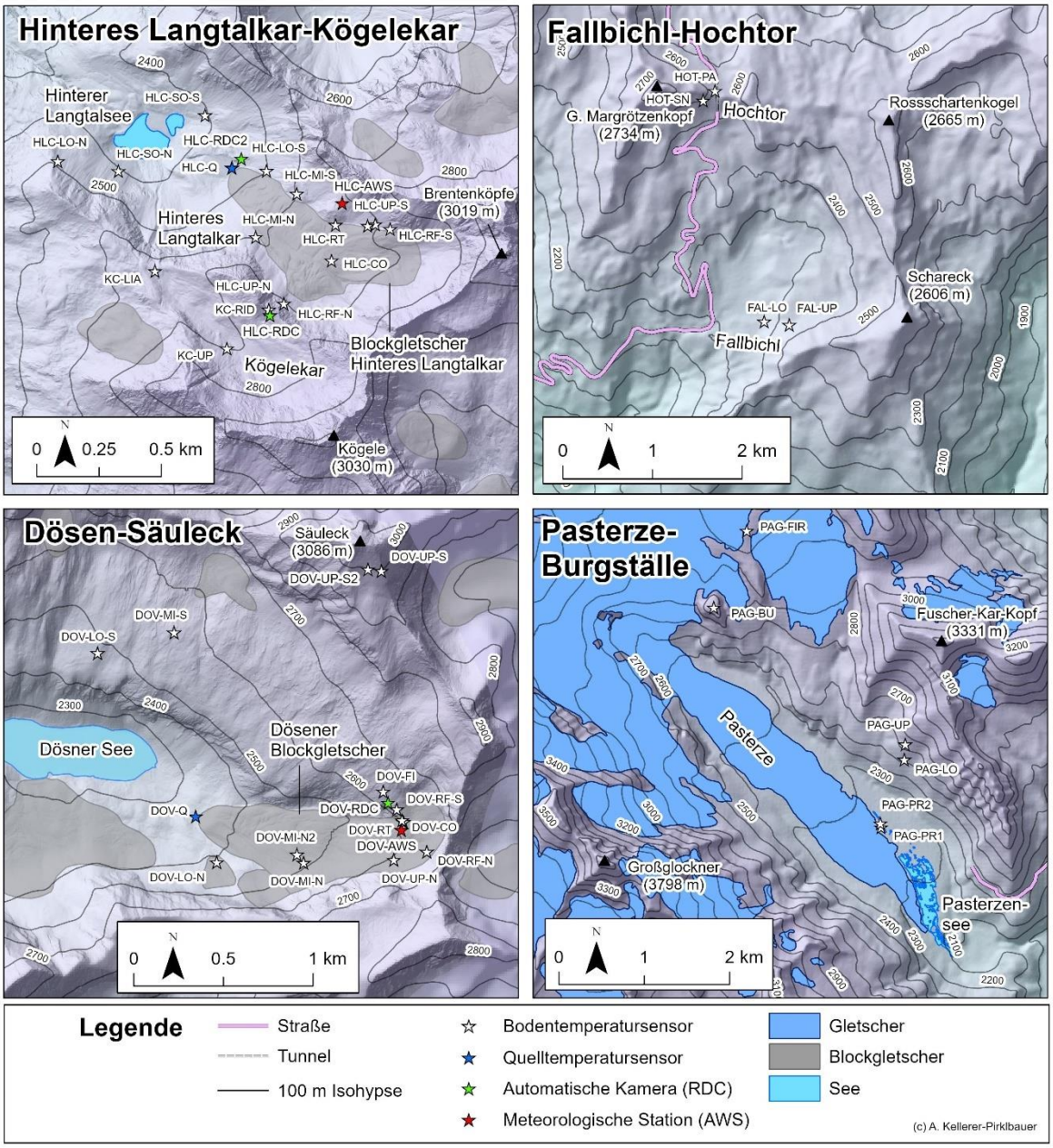

Abbildung 11: Detailkarten der vier Untersuchungsgebiete zum Permafrost-Monitoring im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten mit Lage nahezu aller Messstandorte, welche mit Miniatur-Temperaturdatenlogger ausgestattet sind, mit Stand 2024 (vgl. Tabelle 2). Die Standorte KC-LIA und KC-RID wurden 2022 neu eingerichtet, der Standort HOT-S im Jahr 2023 und der Standort DOV-UP-S2 im Jahr 2024 (Gletschermaske für Pasterze und benachbarte Gletscher nach Buckel et al. 2018).

Tabelle 2: Auflistung der vier Untersuchungsgebiete im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten und deren Instrumentierung mit Miniatur-Temperaturdatenloggern. Lage siehe Abbildung 11. Abbildungen 14 sowie 27-29 zeigen Daten bzw. Auswertungen der jeweils grau hinterlegten Sensoren. HLC = Hinteres Langtalkar-Kögelekar, FAL = Fallbichl, HOT = Hochtor, DOV = Dösen-Säuleck, PAG = Pasterze-Burgstall. Der Code für jeden Standort besteht im Wesentlichen aus diesen Bezeichnungen in Kombination mit weiteren, internen Kürzeln; z. B. N = Nord, S = Süd.

Code	Koord. BMN-M31 (EPSG 31258)		Koord. UTM-33N (EPSG 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	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-UP	407676	204966	330892	5205611	2703	12	28	0, 10, 20
KC-LIA	407394	205247	330616	5205898	2636	348	8	0
KC-RID[d]	407827	205118	331046	5205759	2769	177	11	0
GOE-PR [c]	406099	202925	329272	5203604	2598	90	4	0, 30
FAL-LO	413089	214329	336502	5214856	2250	293	16	0, 10, 75
FAL-UP	413279	214303	336692	5214826	2345	332	26	0, 10, 75
HOT-PA[e]	412726	216082	336177	5216616	2580	72	18	0, 10, 60
HOT-SN	412757	216086	336208	5216619	2575	185	10	0
DOV-LO-S	445487	205927	368710	5205768	2489	220	20	0
DOV-MI-S	445803	206025	369028	5205860	2586	213	19	0
DOV-UP-S	446659	206316	369889	5206132	3002	166	33	0
DOV-UP-S2[b]	446633	206334	369864	5206151	3004	180	30	0
DOV-LO-N	446018	205072	369222	5204903	2407	342	22	0
DOV-MI-N	446381	205084	369585	5204907	2501	239	16	0
DOV-MI-N2	446418	205126	369623	5204948	2491	174	8	0
DOV-UP-N	446757	205111	369962	5204926	2626	331	25	0
DOV-RF-S	446761	205322	369970	5205137	2628	206	80	3, 10, 32
DOV-RF-N	446894	205150	370100	5204962	2638	300	90	3, 10, 40
DOV-RT	446791	205270	369999	5205084	2603	255	14	3, 10, 40
DOV-CO[a]	446785	205277	369993	5205091	2606	257	5	100, 200, 300
DOV-FI	446703	205395	369914	5205211	2644	213	28	0, 3, 10, 30,
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-PR1	404719	215779	328165	5216484	2078	0 (f)	0	0
PAG-PR2	404710	215824	328158	5216528	2080	0 (f)	0	0, 10, 40
PAG-FIR	403015	219187	326535	5219927	3049	256	7	0

Anmerkungen: (a) Daten vom Sensor in 100 cm Tiefe; (b) 2024 eingerichteter Ersatzstandort DOV-UP-S2; (c) Standort GOE-PR wurde 2015 eingerichtet und liegt 2,6 km SW vom Kögelekar; (d) für 2023/24 kein geschlossener Datensatz (KC-RID). (e) HOT-PA war bisher nur HOT.

Der im Jahr 2020 eingerichtete Standort PAG-FIR in der Nähe der Oberwalder Hütte ist der höchstgelegene (3049,22 m) im aktuell 41 aktive Standorte umfassenden Messnetz. Dieser Standort wies im Beobachtungsjahr 2023/24 mit -1,9 °C die tiefste Jahresmitteltemperatur von allen Standorten in den vier Untersuchungsgebieten auf. Dieser Wert war aber deutlich höher als der Vorjahreswert mit -3,2 °C, was ebenfalls damals die tiefste Jahresmitteltemperatur von allen Standorten war.

Die Abbildung 12 oben zeigt die einzelnen Messstandorte nach Hangneigung (a), Exposition (b) 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 (von ca. 100° bis 160°) relativ gut repräsentiert sind. Die drei unteren Grafiken in Abbildung 12 zeigen die statistische Verteilung der Seehöhe (c), Hangneigung (d) und Exposition (e) aller 41 Standorte in Form von Boxplot-Diagrammen. Innerhalb der jeweiligen Box liegen die mittleren 50 % der Daten; die Medianwerte (horizontale Linie in der Box) liegen bei 2601 m für Seehöhe (Interquartilsabstand: 2489–2672 m), bei 21,0° für Hangneigung (Interquartilsabstand: 9–30°) und bei 220° für Exposition (Interquartilsabstand: 95–268°). Dies besagt, dass Seehöhe und Hangneigung relativ konzentriert, die Exposition hingegen relativ gleichmäßig (bis auf den zuvor erwähnten Sektor Südost) verteilt sind.

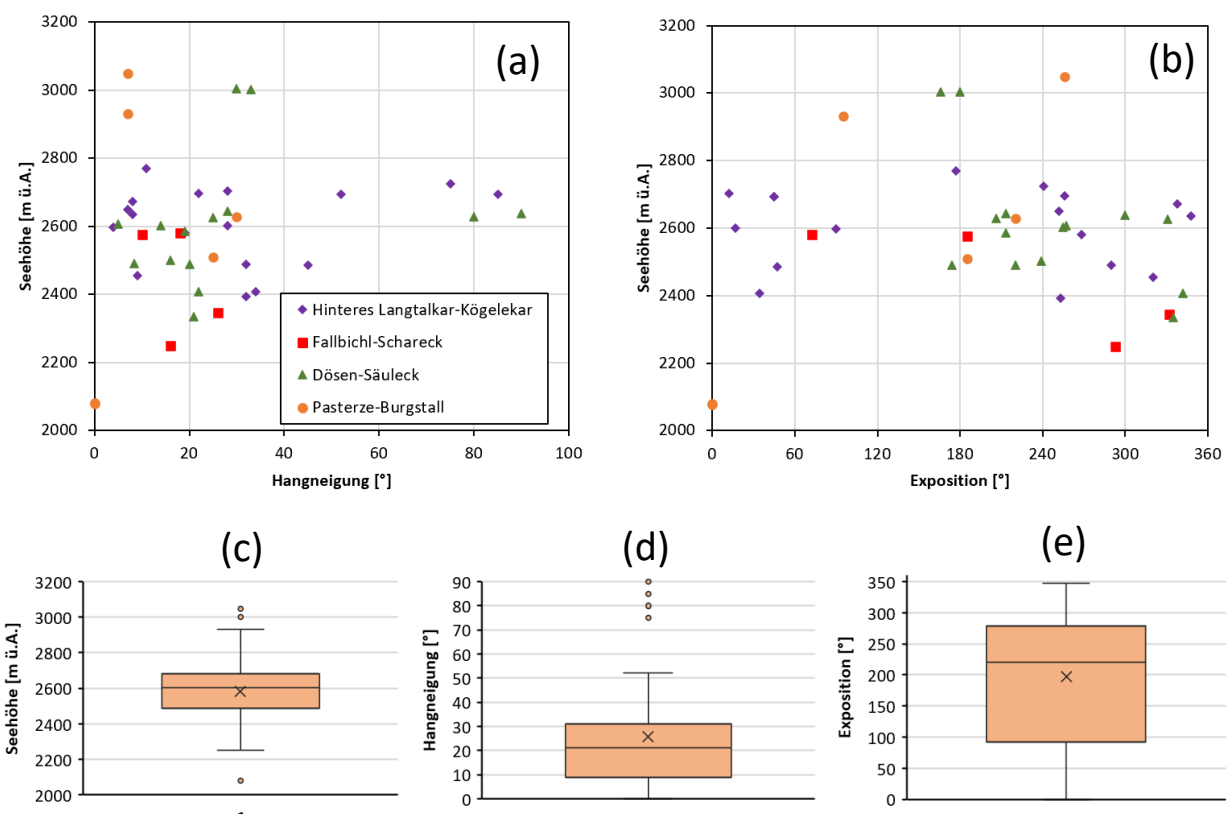

Abbildung 12: Verteilung der Bodentemperatur-Monitoringstandorte: (a) Seehöhe versus Hangneigung sowie (b) Seehöhe versus Exposition aller 41 aktuell aktiven Standorte der Bodentemperatur-Messungen in den vier Untersuchungsgebieten mit Stand September 2024 (siehe Tabelle 2). Die unteren drei Diagramme zeigen die entsprechenden Boxplot-Diagramme zu den drei Parametern (c) Seehöhe, (d) Hangneigung und (e) Exposition. Details siehe Text.

Ergebnisse Monitoring 2023/24

Die an den Standorten ermittelten Jahresmitteltemperaturen für das Berichtsjahr 2023/24 sind in Abbildung 13 – aufgeteilt auf die vier Teilgebiete – dargestellt. Alle vier Teildiagramme sind auf der Ordinate gleich skaliert und damit direkt vergleichbar.

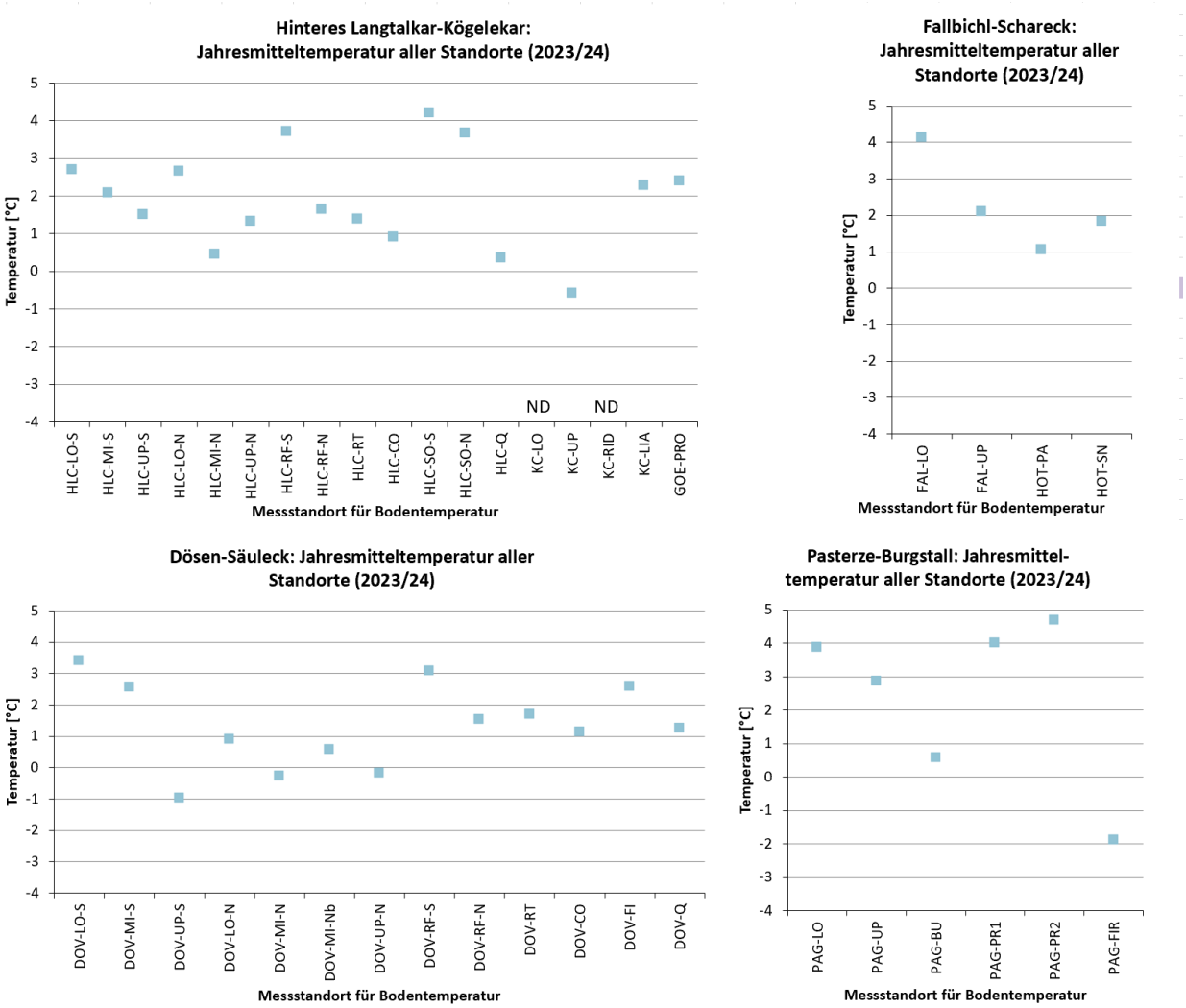

Abbildung 13: Jahresmitteltemperatur an/nahe der Bodenoberfläche im Zeitraum 1.8.2023 bis 31.7.2024 (Messjahr 2023/24) aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten. Für HOT-SN liegen mit 2023/24 erstmals Daten vor. Der neue eingerichtete Standort DOV-UP-S2 ist hier selbstverständlich noch nicht enthalten. Standorte, die mit ND (no data) markiert sind, verfügen aufgrund technischer Probleme über keine geschlossene Datenreihe für das letzte Berichtsjahr (KC-RID) oder sind aktuell steinschlagbedingt nicht instrumentiert (KC-LO).

Im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar (inklusive dem benachbarten Vergleichsstandort GOE-PRO) konnten für 16 Standorte Jahresmitteltemperaturen für das Messjahr 2023/24 ermittelt werden. An einem Standort in diesem Untersuchungsgebiet gab es bedingt durch anhaltende Stromversorgungsprobleme einen Ausfall (KC-RID; Datenlogger wurde deshalb erneuert). Der Standort KC-LO musste steinschlagbedingt bereits im Jahr 2021 aufgegeben werden. Um jedoch spätere Vergleichsdarstellungen in der Langzeitbetrachtung (vgl. Kapitel 5.1) konsistent zu halten, erscheint dieser nicht mehr aktive Standort jedoch noch in der Abbildung 13.

Nur an einem einzigen Standort, dem Standort KC-UP, lag die Jahresmitteltemperatur mit -0,6 °C merklich unter 0 °C. Im Vorjahr hatten zumindest noch vier Standorte eine negative Jahresmitteltemperatur (HLC-MI-N, KC-UP, HLC-CO und HLC-UP-S). Die höchsten Jahresmittelwerte wurden hingegen mit 4,2 °C am südexponierten

Solifluktionsstandort (HLC-SO-S) gemessen, gefolgt vom südexponierten Felsmessstandort (HLC-RF-S) mit 3,7 °C. Der Standort HLC-SO-S war auch der zweitwärmste im gesamten Messnetz (in den Jahren 2021/22 und 2022/23 jeweils sogar der wärmste). Im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar war somit in den letzten drei Beobachtungsjahren zwar der wärmste Standort immer identisch (HLC-SO-S), der kälteste jedoch nicht (entweder KC-UP oder HLC-MI-N). Der Mittelwert der Jahresmitteltemperatur an den 16 Standorten in diesem Arbeitsgebiet mit entsprechenden Werten liegt bei 1,9 °C (im Vergleich zu 1,0 °C in 2022/23 und 2020/21 sowie 1,5 °C in 2021/22). Dadurch erscheinen die Bedingungen im Hinteren Langtalkar-Kögelekar und im hintersten Gößnitztal im letzten Beobachtungsjahr mit Unterschieden von 0,4 bis 0,9 °C zu den Vorjahren als äußerst permafrostungünstig. Dies zeigt sich auch darin, dass an 11 der 16 Standorte neue höchste Jahresmittelwerte ermittelt wurden.

Im Arbeitsgebiet Fallbichl-Hochtor liegen vier Jahreswerte für 2023/24 vor (im Vorjahr waren es nur zwei). Am Standort FAL-LO kam es im Vorjahr bedingt durch Stromversorgungsprobleme zu einem Datenausfall, der keine Jahreswertberechnung für diesen Standort ermöglichte. Für den Standort HOT-SN liegt erstmals ein Jahreswert vor. Die Ergebnisse für die beiden übrigen Standorte mit Daten für 2022/23 und 2023/24 zeigen jeweils gering (+0,5 °C; HOT-PA; bis 2023 nur als „HOT" bezeichnet) bis deutlich (+1,7 °C; FAL-UP) wärmere Bedingungen als im Vorjahr. An keinem der vier Standorte wurde für das letzte Messjahr eine negative Jahresmitteltemperatur ermittelt. Der Mittelwert der Jahresmitteltemperatur an den beiden Standorten mit Daten für 2022/23 und 2023/24 lag bei 0,5 °C für das erste und bei 1,6 °C für das zweite Messjahr. Dieser Wert ist nur bedingt mit dem Mittelwert aus diesem Untersuchungsgebiet für 2021/22 vergleichbar (1,1 °C), da in 2021/22 die Jahreswerte von drei Standorten zur Verfügung standen. Ohne Berücksichtigung des Jahreswertes 2021/22 vom Standort FAL-LO würde sich ein Mittelwert für das Arbeitsgebiet Fallbichl-Hochtor für 2021/22 von 0,2 °C ergeben. An allen drei Standorten mit längeren Datenreihen wurde ein neuer höchster Jahresmittelwert erzielt. Somit war in diesem Arbeitsgebiet das Messjahr 2023/24 deutlich wärmer als die Jahre zuvor und auch sehr permafrostungünstig.

Im Arbeitsgebiet Dösen-Säuleck liegen für 2023/24 Ergebnisse von 13 Standorten vor. Erfreulicherweise versagte im Berichtsjahr kein einziger Datenlogger in diesem Arbeitsgebiet. An drei Standorten wurden negative Jahresmitteltemperaturen ermittelt (DOV-UP-S, DOV-UP-N; DOV-MI-N), im Messjahr zuvor waren es noch sechs (zusätzlich zu den drei genannten noch DOV-LO-N, DOV-MI-Nb und DOV-CO). Zwei dieser drei im Messjahr 2023/24 im Mittel negativ temperierten Standorte sind nordexponiert (DOV-MI-N mit -0,27 °C und DOV-UP-N mit -0,17 °C). Der „traditionell" kälteste Standort in diesem Arbeitsgebiet (DOV-UP-S) wies auch im aktuellen Berichtsjahr den deutlich niedrigsten Wert von -0,98 °C auf. Die Jahresmitteltemperaturen an diesem Standort waren in den letzten drei Jahren deutlich tiefer (-2,17 °C in 2022/23, -2,23 °C in 2021/22 und -2,15 °C in 2020/21), was einmal mehr die extreme Permafrostungunst von 2023/24 illustriert. An den 13 Standorten mit entsprechenden Werten lag der Mittelwert der Jahresmitteltemperatur 2023/24 bei 1,3 °C und somit um 1 °C über dem Wert von 2022/23. Damit herrschten in Bezug auf den Mittelwert auch hier die nahezu gleichen Bedingungen wie im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar (dort ein Plus von 0,9 °C). Ebenso wiesen 11 der 13 Standorte mit entsprechenden Daten im Arbeitsgebiet Dösen-Säuleck neue Maxima der Jahresmittelwerte auf.

Im Arbeitsgebiet Pasterze-Burgstall konnten (wie im Vorjahr) für sechs Standorte Jahresmittelwerte errechnet werden, wobei 2023/24 nur ein Standort einen negativen Mittelwert aufwies. Dies war mit -1,9 °C der höchstgelegene Standort des gesamten Messnetzes, PAG-FIR auf 3049 m. Im Vorjahr waren es noch zwei Standorte mit negativen Mittelwerten (PAG-FIR und PAG-BU). Der Standort PAG-FIR wies – gleich wie in den drei Vorjahren – auch den tiefsten Jahresmittelwert der Temperatur des gesamten Messnetzes auf. Dieser Wert lag jedoch im Jahr 2022/23 um 1,3 °C tiefer als im aktuellen Berichtsjahr. Der Mittelwert der Jahresmitteltemperatur an den sechs Standorten in diesem Messgebiet lag bei 2,4 °C, 2022/23 mit 1,2 °C und 2021/22 mit 1,3 °C jedoch deutlich niedriger. Am Standort PAG-PR2 wurde auch der höchste Jahresmittelwert im Messjahr 2023/24 gemessen (+4,7 °C). Die extreme Permafrostungunst zeigt sich auch darin, dass an allen sechs Standorten in diesem Arbeitsgebiet neue höchste Jahresmittelwerte erzielt wurden.

In Summe konnte im Messjahr 2023/24 an 39 Standorten ein Jahresmittelwert der Bodentemperatur ermittelt werden (2022/23 waren es nur 37, 2021/22 sogar nur 34 Standorte). Der Unterschied erklärt sich aus den gültigen Daten für 2023/24 für FAL-LO (nach einem Jahr mit Datenloch) und HOT-SN (erstmals Daten). Der Standort KC-RID lieferte in keinem der beiden letzten Jahre geschlossene Datenreihen. Von den 39 Standorten mit Jahresdaten in 2023/24 wiesen nur 5 Standorte (12,8 %) einen negativen, 34 Standorte (87,2 %) hingegen einen positiven Mittelwert auf. Im Vorjahr waren es noch 35 % negative und 65 % positive Mittelwerte. Der Mittelwert der Temperatur für 2023/24 lag an den 39 Standorten bei 1,8 °C (zum Vergleich: 0,7 °C für 2022/23, 1,2 °C für 2021/22 sowie 1,1 °C für 2020/21), wobei die Werte der einzelnen Standorte im Jahr 2023/24 zwischen 4,7 °C und -1,9 °C lagen. An 32 Standorten lagen für die letzten vier Messjahre Mittelwerte vor, sodass diese direkt miteinander verglichen werden können. Für 2020/21 lag das Mittel dieser 32 Standorte bei 0,92 °C, für 2021/22 bei 1,16 °C, für 2022/23 bei 0,84 °C und für 2023/24 bei 1,83 °C. An 31 der 39 Standorte mit Jahresdaten in 2023/24 wurde ein neues Temperaturmaximum ermittelt. Das letzte Beobachtungsjahr war nicht nur bloß deutlich wärmer als die drei vorangegangen, sondern zeichnete sich durch eine bislang beispiellose Permafrostungunst aus.

Abbildung 14 zeigt die Tagesmitteltemperaturen der vier in Tabelle 2 grau hinterlegten Standorte (einer pro Untersuchungsgebiet) im Messjahr 2023/24. 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 meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar für denselben Zeitraum hinterlegt.

Im Jahresgang für 2023/24 am Standort HLC-UP-N ist deutlich zu erkennen, dass wiederum eine winterliche Schneedecke sich dämpfend auf Schwankungen der Bodentemperatur ab Anfang November 2023 und bis Anfang Juli 2024 auswirkte. Einerseits verhinderte diese rund achtmonatige Schneedecke im Herbst und Winter eine effektive Ausstrahlung und somit Abkühlung des Bodens (permafrostungünstig). Andererseits wurde der Untergrund durch die Schneedecke bis Ende Juni 2024 vor der solaren Einstrahlung effizient geschützt (somit erst ab Anfang Juli permafrostungünstig). Insgesamt lag die Jahresmitteltemperatur an diesem Standort mit 1,3 °C deutlich über dem Gefrierpunkt und war um 1,2 °C höher als im Vorjahr und um 0,7 °C höher als 2021/22.

Im Gegensatz zu den Berichtsjahren 2021/22 und 2022/23 und ähnlich dem Berichtsjahr 2020/21 gab es im aktuellen Berichtsjahr am Standort FAL-UP eine langanhaltende saisonale und relativ gut (wenn auch nicht so gut wie am Standort HLC-UP-N) isolierende Schneedecke. Diese bestand von Anfang November 2023 bis Anfang Juni 2024, war aber bis Mitte Februar 2024, wie die leichten Temperaturschwankungen erkennen lassen, nur dünn. Bedingt durch das Vorhandensein der winterlichen Schneedecke konnte der Untergrund diesmal bei Weitem nicht so auskühlen wie in den beiden Messjahren zuvor, sodass die Bedingungen vergleichbar mit denen von 2020/21, aber auch 2019/20 waren. Lag das Jahresmittel der Bodentemperatur an diesem Standort im Jahr 2021/22 noch bei -0,02 °C, so betrug dieser Wert im Berichtsjahr 2022/23 bei 0,38°C und 2023/24 sogar bei 2,11 °C. Somit war das aktuelle Berichtsjahr an diesem Standort sogar um 1,7 °C (!) wärmer als das Vorjahr.

Die ermittelten Tagesmittelwerte für DOV-UP-S zeigen gegenüber den beiden Standorten zuvor eine wesentlich stärkere Koppelung der Boden- mit der Lufttemperatur, zumindest bis Ende Februar 2024. Ab Ende Februar 2024 bis Mitte Juni 2024 ist auch hier klar eine thermisch dämpfende Wirkung einer saisonalen Schneedecke erkennbar. Ab spätestens Mitte Juni ist diese aber abgeschmolzen und die Bodentemperatur folgt weitgehend der Lufttemperatur. Auffällig sind die sonst durchgehend tieferen Temperaturen bei DOV-UP-S aufgrund der größeren Seehöhe. Dabei wurde in diesem Messjahr am 16.1.2024 die tiefste Temperatur mit -12,3 °C erzielt. Während die Mittelwerte in den drei Messjahren vor 2023/24 mit -2,15 °C für 2020/21, -2,23 °C für 2021/22 und -2,17 °C für 2022/23 nahezu gleich waren, lag dieser Wert diesmal bei nur -0.98 °C und somit um 1,19 °C über jenem des Vorjahres.

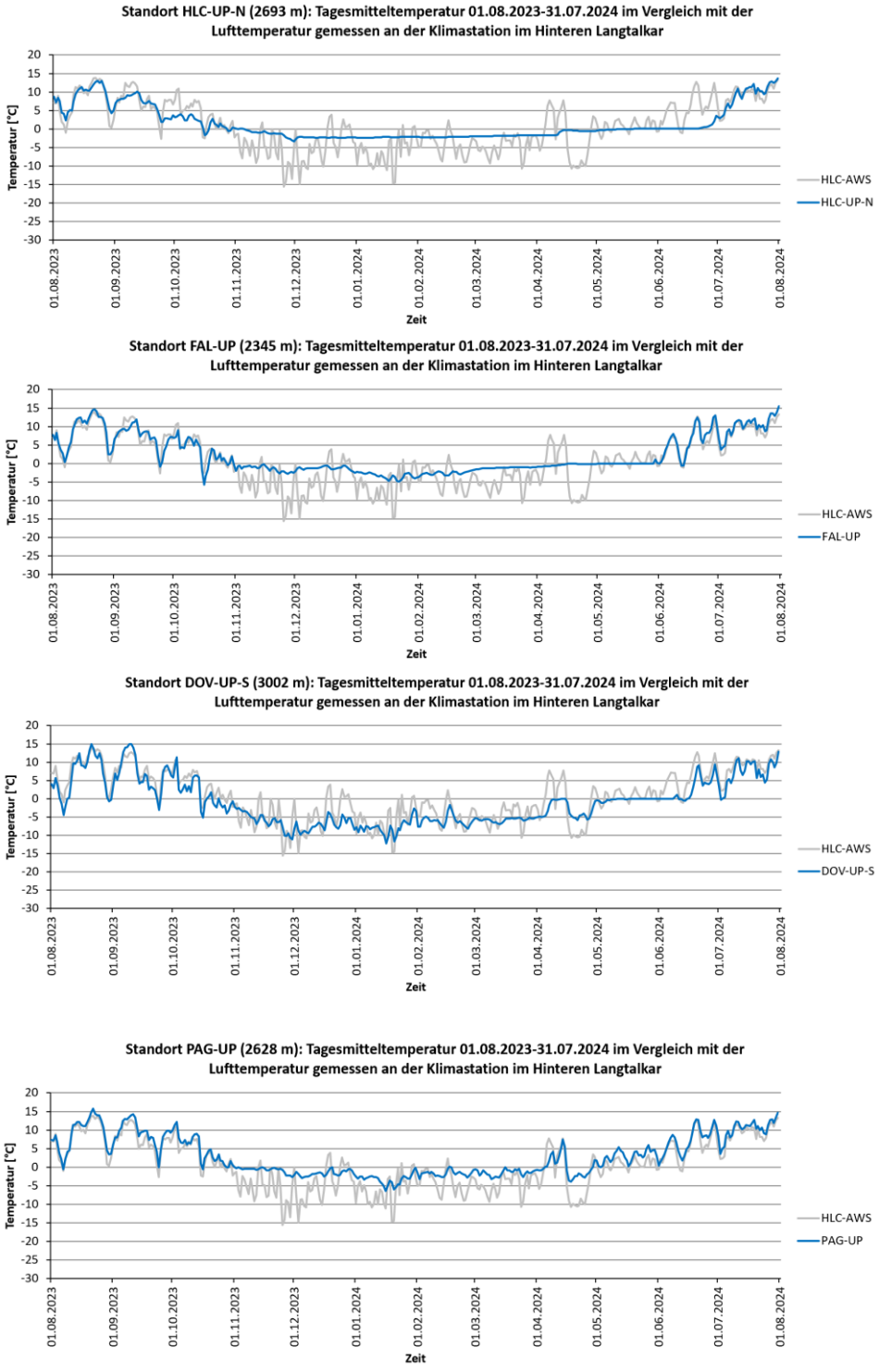

Abbildung 14: Tagesmitteltemperaturen der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten – HLC-UP-N, FAL-UP, DOV-UP-S und PAG-UP – im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten bzw. dessen Nahbereich (Standort FAL-UP) für das Messjahr 2023/24 (1.8.2023 bis 31.7.2024). Messbereiche im Winterhalbjahr mit geringer Schwankung deuten auf Dämpfungseffekte durch eine mächtige Schneedecke (> 80 cm) hin (Erläuterungen im Text). In Grau sind die Tagesmittelwerte der automatischen meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS) dargestellt.

Am vierten und letzten hier vorgestellten Standort PAG-UP zeigt sich ein ähnliches Bild wie am Standort zuvor mit gering ausgeprägtem Dämpfungseffekt der Schneedecke. Eine dünne, nur wenig isolierende winterliche Schneedecke dürfte an diesem Standort – wie in den Jahren zuvor – immer wieder vorhanden gewesen sein, v. a. wenn man die gedämpften Bodentemperaturminima von Anfang November 2023 bis Mitte April 2024 im Vergleich

zur Lufttemperatur betrachtet. Auffallend ist dabei v. a. der November 2023, in dem sich eine Schneedecke aufbaute (siehe Kapitel 3), die die Luft- von der Bodentemperatur nahezu komplett entkoppelte. Da der Untergrund dabei noch nicht ausgekühlt war, lag die Bodentemperatur über nahezu dem gesamten November 2023 bei ca. 0 °C. Im Jahresmittel lag die Temperatur am Standort PAG-UP 2023/24 mit 2,87 °C um 1,44 °C über jener des Vorjahres und um immer noch mehr als ein Grad über jenem von 2021/22. Das Messjahr 2023/24 war auch hier im Mittel das wärmste der letzten Jahre.

4.2. Blockgletscherbewegungs-Monitoring

Im Jahr 2022 wurde die Blockgletscher-Oberflächengeschwindigkeit (rock glacier velocity: RGV) als neuer, zusätzlicher assoziierter Parameter (associated parameter oder product) der essentiellen Klimavariablen (essential climate variable: ECV) von GCOS (Global Climate Observing System) zur Beschreibung der Klimaveränderung in Hinblick auf die Kryosphäre festgelegt (GCOS-Imp 2022, GCOS-Req 2022, GCOS-ECV 2025, ECV 2025). In der Literatur bzw. in der Forschungspraxis werden die assoziierten Parameter der ECV meist direkt als ECV bezeichnet. Für den zum Bereich Kryosphäre gezählten Permafrost sind dies die Parameter/Produkte permafrost temperature (PT), active lawer thickness (ALT) sowie rock glacier velocity (RGV). Gegenwärtig sind etwas mehr als 50 ECVs definiert, für deren Erfassung und Mitteilung es Richtlinien gibt (GCOS-Req 2022). Die entsprechenden Definitionen und Erfordernisse für die Messung der ECV Blockgletscher-Oberflächengeschwindigkeit wurden im IPA (International Permafrost Association) Standing Committee „Rock Glacier Inventories and Kinematics (RGIK)" bzw. zuvor in einer gleichlautenden IPA Task Force erarbeitet (RGIK, 2023a-c; Hu et al., 2025; RGIK, 2025): RGV ist ein auf ein Jahr homogenisierter Wert der oberflächlichen Geschwindigkeit an einem Blockgletscher bzw. einem Teil von ihm, abgeleitet aus jährlichen oder mehrjährlichen Messungen. Die gemessenen Geschwindigkeiten entsprechen dabei dem Prozess des Permafrostkriechens. Dabei bezeichnet mal als „Permafrostkriechen" die Kombination aus innerer Verformung des Eises des gefrorenen Materials (Kriechen des Permafrostkörpers im engeren Sinne) und Scherung an einem oder mehreren unterschiedlichen Horizonten innerhalb oder nahe der Basis des gefrorenen Körpers (Arenson 2002, Cicoira et al. 2020, RGIK 2022).

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Blockgletscherbewegungs-Monitorings für den Dösener Blockgletscher und dem Blockgletscher im Hinteren Langtalkar separat präsentiert, für den Vergleich miteinander bzw. mit jenen von ausgewählten, benachbarten Blockgletschern 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 GNSS-RTK-Technologie. Im Rahmen der alljährlichen Vermessung werden ab 2014 nur mehr die Bewegungsraten der 34 am Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte bestimmt. Als Basisstation (= Referenzpunkt) für die differentielle GNSS-Messung im Echtzeitmodus (Real-Time Kinematic/RTK) wurde der Triangulationspunkt (interne Bezeichnung AVS) in der Nähe des Arthur-von-Schmid-Hauses gewählt. Die Bewegungsraten für den Beobachtungszeitraum 2023/24 wurden durch Epochenvergleich (19.8.2023 mit 27.8.2024) ermittelt und auf einen Jahreswert normalisiert.

Die horizontalen Bewegungsvektoren der 34 Beobachtungspunkte sind in Abbildung 15 graphisch dargestellt. Auffällig sind die geringen Bewegungsraten am orographisch rechten Rand und die graduelle Abnahme der Geschwindigkeit vom zentralen Bereich zur Stirn bzw. zum linken Blockgletscherrand. Tabelle 3 fasst die zeitliche Änderung der Blockgletscherkinematik durch Angabe von Mittel- und Maximalwerten der Bewegungsraten für den Zeitraum 2018-2024 zusammen.

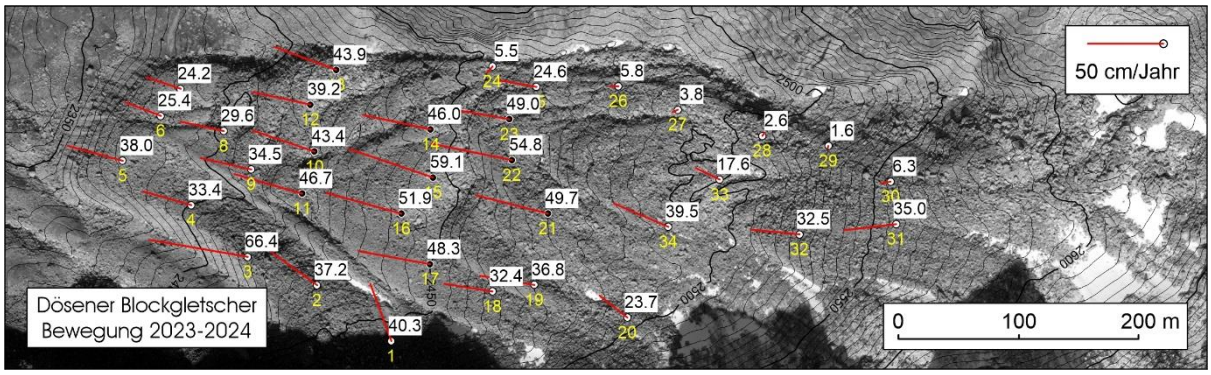

Abbildung 15: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Dösener Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2023/24. Punktnummern in Gelb, 11 zentrale Punkte (10-17, 21-23) mit schwarzgefüllten Kreisen, Bewegungsraten (cm/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. ±2-3 cm/Jahr. Orthophoto 20.9.2010 © Land Kärnten.

Tabelle 3: Bewegungsraten am Dösener Blockgletscher für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2018/19 bis 2023/24. Die Mittelwerte wurden aus den Bewegungsraten der 11 zentralen Punkte 10-17, 21-23 gerechnet. Der diesjährige Maximalwert wurde nicht, wie in den Jahren zuvor, im Punkt 15 ermittelt, sondern im Punkt 3. Für die Punkte 28 und 29 konnte wiederholt keine signifikante Bewegung festgestellt werden.

Werte (in cm/Jahr)	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23	2023/24
Mittelwert	42,9	50,3	60,0	51,1	46,8	48,4
Maximalwert (Punkt)	51,1 (15)	58,9 (15)	71,0 (15)	61,4 (15)	56,5 (15)	66,4 (3)

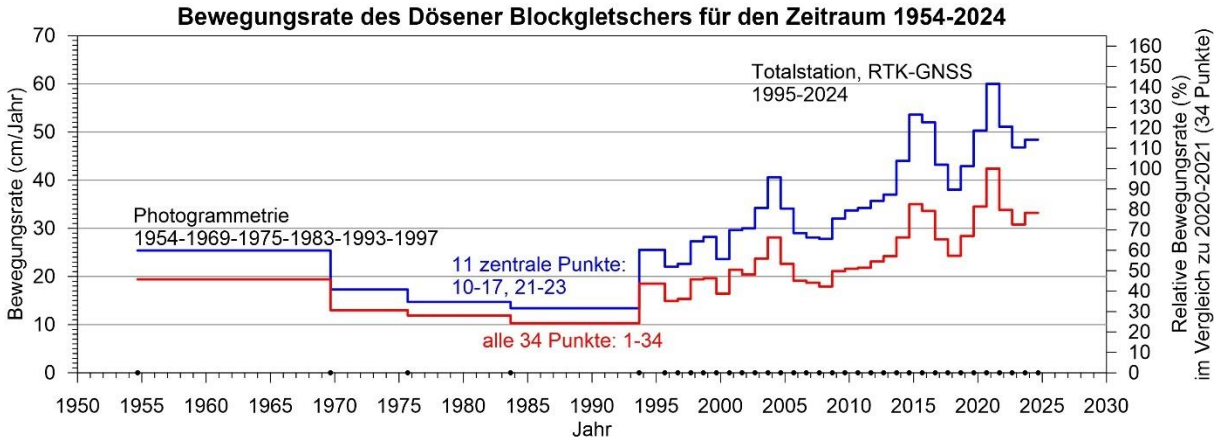

Abbildung 16: Vergleich der mittleren jährlichen Oberflächenbewegung am Dösener Blockgletscher für den Zeitraum 1954-2024, berechnet aus allen 34 Messpunkten (rot) bzw. den 11 zentralen Messpunkten (blau). Die Bewegungsraten vor 1995 wurden photogrammetrisch ermittelt.

Die aktuelle mittlere Bewegungsgeschwindigkeit von 48,4 cm/Jahr im zentralen Bereich des Dösener Blockgletschers (11 Messpunkte: 10-17 und 21-23) hat sich im Vergleich zum Vorjahr signifikant um 4,8 % erhöht. Der berechnete Mittelwert ist der sechshöchste seit Messbeginn 1995. Die größte Bewegungsrate (66,4 cm/Jahr) wurde heuer zum ersten Mal nicht im Punkt 15 gemessen, sondern im Punkt 3. Dies ist einem offensichtlichen, seitlichen Rutschprozess, dem der Punkt 3 unterliegt, geschuldet. Die Abbildung 16 zeigt einen Vergleich der Geschwindigkeitsgraphen, die sich für die beiden Punktgruppen, alle Punkte (34) bzw. nur zentrale Punkte (11), für den Zeitraum 1954-2024 ergeben. In dieser Darstellung wurden die geodätischen Messergebnisse durch ältere photogrammetrische Messungen (1954-1995) ergänzt.

Blockgletscher Hinteres Langtalkar

Am Blockgletscher im Hinteren Langtalkar erfolgte im Jahr 2014 ebenfalls die vorhin angesprochene Umstellung von der traditionellen Tachymetermessung auf die moderne Satellitenpositionierung. Das geodätische Datum an diesem Blockgletscher ist durch insgesamt 15 Festpunkte definiert. Die Bewegungsraten für den Beobachtungszeitraum 2023/24 wurden durch Epochenvergleich (22.8.2023 mit 31.8.2024) ermittelt. Im Stirnbereich (untere Punkte) des Blockgletschers stehen nur mehr die Punkte 23, 27 und 28 für eine aktuelle Messung zur Verfügung. Die nicht mehr vorhandenen Punkte 24, 25 und 31 in diesem Bereich sind in den Vorjahren durch Rutschprozesse verloren gegangen. Ebenfalls nicht mehr auffindbar ist der Punkt 21, welcher in eine zerrspaltenartige Struktur im oberen Bereich des sich stark bewegenden Teils des Blockgletschers abgerutscht ist. Die aktuelle Bewegungsrate des Punktes 22 konnte für das Beobachtungsjahr 2023/24 nicht ermittelt werden, da dieser im Vorjahr nicht gemessen wurde. Als Basisstation für die GNSS-RTK-Messung diente der Festpunkt 7 im Blockgletscher-Vorfeld. Die horizontalen Bewegungsvektoren der auswertbaren 33 Beobachtungspunkte sind in der Abbildung 17 graphisch dargestellt. Für die Charakterisierung der zeitlichen Änderung des Bewegungsverhaltens des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar wurden für zwei ausgewählte Punktgruppen, oberer Bereich (A) und unterer Bereich (B), die Mittel- und Maximalwerte der Bewegungsraten tabellarisch (Tabelle 4) für den Zeitraum 2018-2024 zusammengestellt.

Tabelle 4: Bewegungsraten am Blockgletscher Hinteres Langtalkar für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2018/19 bis 2023/24 für die beiden 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.

Punktgruppe A (Punkte 10-17, 37)

Werte (in cm/Jahr)	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23	2023/24
Mittelwert	19,1	27,7	37,3	35,3	27,3	28,7
Maximalwert (Punkt)	21,9 (17)	31,8 (10)	42,8 (11)	39,9 (16)	31,3 (16)	32,4 (15)

Punktgruppe B (Punkte 23-25, 27, 28, 31; alle Punkte bzw. reduzierte Punkteanzahl)

Werte (in m/Jahr)	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23	2023/24
Mittelwert	5,20	5,48	5,74	4,73	3,81	4,50
Maximalwert (Punkt)	7,45 (24)	8,07 (25)	3,28 (23)	3,28 (27)	2,77 (27)	3,48 (27)

Anmerkung: Bei den Mittelwertberechnungen werden nur die messbaren Punkte berücksichtigt. Die ermittelte Relativänderung wurde quantitativ auf einen sinnvollen Tabellenwert umgerechnet (im Sinne von Ergänzung von Fehlwerten). Eine ähnliche Vorgangsweise wurde auch für die Auswertungen 2022/23 (ohne die Punkte 24, 25 und 31) verwendet. Die angegebenen Maximalwerte sind die tatsächlich gemessenen Größen.

Mit den hohen Bewegungsraten im unteren Blockgletscherbereich geht weiterhin eine morphologisch gut beobachtbare Destabilisierung der Blockgletscheroberfläche einher. Die Messung der Punkte im Einflussbereich der unteren Rutschzone ist weiterhin nur mit einem erheblichen Gefahrenpotential möglich. Die aktuelle mittlere Bewegungsgeschwindigkeit von 28,7 cm/Jahr im oberen Bereich des Blockgletschers Hinteres Langtalkar (11 Messpunkte: 10-17, 21-23) hat sich im Vergleich zum Vorjahr signifikant um 5,1 % erhöht. Der berechnete Mittelwert ist der vierthöchste seit Messbeginn 1995. Dieser Wert steht im Einklang mit jenem vom Dösener Blockgletscher. Die diesbezügliche Einschätzung für den unteren Bereich des Blockgletschers ist eher unsicher, da dieser bereits stark von lokalen Rutschprozessen beeinflusst ist. Unter Berücksichtigung der noch messbaren Punkte 23, 27 und 28 ergibt sich hier ebenfalls eine Zunahme der mittleren Bewegungsrate, jedoch mit 18,2 % ist die ermittelte prozentuelle Geschwindigkeitszunahme größer als der vergleichbare Wert der oberen Punktgruppe. Größere Massenumlagerungen/Rutschungen können im unteren, hochaktiven Teil des Blockgletschers für die nächsten Jahre weiterhin nicht ausgeschlossen werden (siehe auch Kap. 4.3).

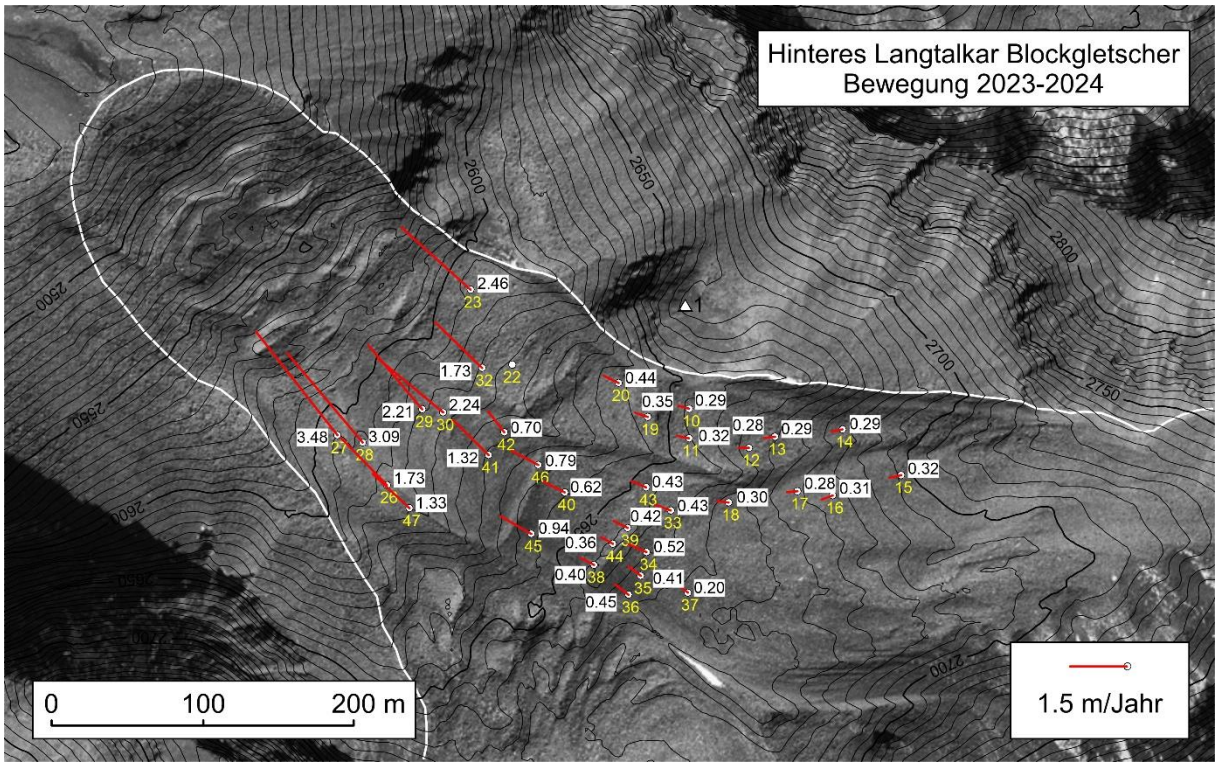

Abbildung 17: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 33 am Blockgletscher im Hinteren Langtalkar mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2023/24. Punktnummern in Gelb, Bewegungsraten (m/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. ±2-3 cm/Jahr. Eine maximale Bewegungsrate von 3,48 m/Jahr wurde am Punkt 27 gemessen. Die Punkte 21, 24, 25 und 31, in der Abbildung nicht mehr ersichtlich gemacht, sind nicht mehr im Gelände auffindbar. Der Punkt 22 wurde 2023 nicht gemessen. Orthofoto 28.8.2012 © Land Kärnten.

4.3. Massenbewegungs-Monitoring

Die Ergebnisse des Massenbewegungs-Monitorings 2023/24 werden in diesem Teilkapitel zuerst für den Blockgletscher Hinteres Langtalkar und anschließend für die Felssturzbereiche am Mittleren und am Hohen Burgstall dargestellt. Ergänzend werden hier schließlich erste Ergebnisse vom UAV-gestützten Monitoring am Dösener Blockgletscher in den Jahren 2023 und 2024 präsentiert, die freundlicherweise von H. Zandler, Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz, zur Verfügung gestellt wurden

Blockgletscher Hinteres Langtalkar

Die jährlichen Drohnenaufnahmen fanden am Blockgletscher im Hinteren Langtalkar (HLK) am 12.8.2024 statt. Leider verhinderten unvorhersehbare, äußere Einflüsse eine fehlerlose bzw. vorbehaltlos verwertbare Datenaufnahme: Der drittstärkste geomagnetische Sturm dieses Sonnenzyklus, der nur sehr kurzfristig vorhersehbar war, beeinflusste das GNSS-Signal zur Lagebestimmung der Drohne massiv. Auch nach einem stark erweiterten Post-Prozessierung der Geländedaten (Einbeziehung der Ground Control Points, Integration mehrerer Stationen in der Post-Prozessierung und weiterer, stabiler Bereiche) zeigten die entzerrten Bilder Lage- und Höhenfehler von fast einem Meter, was einem Vielfachen des mittleren Fehlers der Bilder der vergangenen Jahre entspricht. Aus diesem Grund können die aufgenommenen Daten des Blockgletschers Hinteres Langtalkar für das Jahr 2024 trotz großen Aufwands nicht verwendet werden.

Felssturzbereiche Mittlerer Burgstall

Die durch die Terrestrischen Laserscan (TLS)-Messungen ab 2010 detektierte, gravitative Bewegung der nordöstlichen Felssturzmasse in Richtung der kleineren Gletscherzunge der Pasterze ist in den Drohnen (UAV)-basierten Daten räumlich wesentlich besser und vollständiger abgrenzbar. Hiermit liegt eine umfangreiche

Datenbasis zur Betrachtung der primären und sekundären Prozesse am Mittleren Burgstall vor. Die aus den UAV-Befliegungen 2022 bis 2024 abgeleiteten Oberflächendaten finden sich in Tabelle 5.

Dadurch kann die in den TLS-Messungen bis 2019 nachgewiesene Bewegung der Sturzmasse in Richtung Gletscherzunge zwischen dem Hohen und Mittleren Burgstall nicht mehr ausschließlich durch Gletscherabschmelzung und Sturzmassenkonsolidierung interpretiert werden. Neben den Daten aus den jährlichen UAV-Befliegungen erweitern nun auch die ersten Ergebnisse einer umfassenden, geologischen Untersuchung den Blick auf ein größeres Prozesssystem, 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).

Tabelle 5: Median und 95 %-Perzentil der 3D-Oberflächenbewegung in ausgewählten Bereichen des Mittleren Burgstalls im Messjahr 2023/24. Die Lage der Bereiche 1 bis 4 sind in Abbildung 34 (Kapitel 5.3) ersichtlich. Zur Darstellung realistischer Maximalwerte wird das 95 %- Perzentil verwendet.

Mittlerer Burgstall – Oberflächenveränderung ausgewählter Bereiche [in m/Jahr]								
Epoche	Bereich 1		Bereich 2		Bereich 3		Bereich 4	
	Median	95 %	Median	95 %	Median	95 %	Median	95 %
2023/24	0,37	1,61	0,34	1,56	0,37	1,59	0,37	1,58

Die mittlere Oberflächenbewegung nahm am Mittleren Burgstall, nach rückläufiger Tendenz seit 2019 (vgl. Kapitel 5.3), im Beobachtungszeitraum 2023/24 gegenüber dem Vorjahr wieder deutlich zu. In allen vier in Tabelle 5 dargestellten Teilbereichen der Felssturzmasse bzw. des Südostrückens des Mittleren Burgstalls war im Vergleich zur Vorperiode 2022/23 eine Zunahme der mittleren Oberflächenbewgung auf fast 40 cm zu beobachten. Die Maximalwerte nahmen noch deutlicher zu, die höchsten Bewegungsraten lagen in allen Teilbereichen nahe 160 cm/Jahr.

Die Ergebnisse aus den flächendeckenden Analysen der Oberflächendeformation deuteten schon bisher auf einen tiefgründigen Gleitprozess hin, der den gesamten südöstlichen Bereich des Mittleren Burgstalls erfasst. Im August 2022 wurden aus diesem Grund geologische Felderkundungen neben den Deformationsmessungen am Mittleren Burgstall durchgeführt, um das Bewegungsverhalten der Massenbewegung am Mittleren Burgstall besser zu verstehen. Die anschließenden geologisch-geotechnischen Laboruntersuchungen wurden von Reinhard Gerstner (Universität für Bodenkultur, Institut für Angewandte Geologie) durchgeführt. Grundlage dafür war ein zweifacher numerischer Ansatz, der Modelle mit diskreten Elementen (DEM, z. B. Itasca 2016 und 2018) und hybride Modelle mit finiten und diskreten Elementen (FDEM, Rockfield 2017; Geomechanica Inc. 2024) umfasst. Indem das Potenzial beider Ansätze genutzt wurde, wird eine sogenannte Rückwärtsanalyse des Bergsturzes durchgeführt und in weiterer Folge die Rolle der zuvor bestehenden Felsstruktur und die fortschreitende Zerlegung der Felsmasse, die zum Versagen des Hanges führt, bestimmt. Um die komplexen Prozesse am Mittleren Burgstall noch besser abbilden zu können, wurde im Spätsommer 2024 eine automatische, hochauflösende Kamera am Hohen Burgstall installiert. Diese ist auf den gesamten Bereich des Mittleren Burgstalls gerichtet und soll mit der zeitlichen Auflösung von 10 Minuten auch Detailprozesse hochauflösend erfassen (Abb. 18).

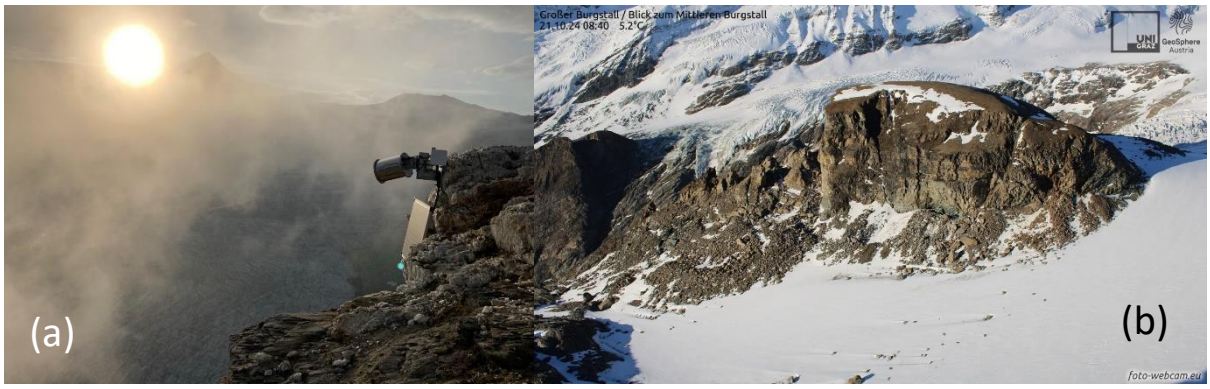

Abbildung 18: Neue, im Spätsommer 2024 installierte automatische Kamera am Hohen Burgstall: (a) die neue Kamera nach erfolgter Installation am 3.9.2024; (b) Blickrichtung der Kamera am Hohen Burgstall, gezeigt an einer Aufnahme des Felssturzbereiches am Mittleren Burgstall vom 21.10.2024, 08:40 h. Kamera: Canon EOS1300D Spiegelreflex mit EF-S 18-55mm Objektiv, zeitliche Auflösung 10 min. Foto (a) M. Frießenbichler.

Felssturzbereiche Hoher Burgstall

Am Hohen Burgstall wurde 2024 parallel zu den Messungen am Mittleren Burgstall eine flächendeckende UAV-Befliegung des gesamten Rückens des Hohen Burgstalls bis in etwa 3000 m Höhe (300 m nördlich der Oberwalder Hütte) durchgeführt. Die Auswertung der Beobachtungsperiode 2023/24 ergab keine erkennbaren, flächigen Prozessausprägungen im Bereich des Hohen Burgstalls, außer einzelnen, sehr kleinen Felssturzereignisse (siehe Kapitel 5.3.).

Dösener Blockgletscher

Zusätzlich zu den bisher in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen an als hochdynamisch bekannten Arealen in den beiden Gebieten Hinteres Langtalkar (Blockgletscher: rasche Bewegung und Vorstoß) und Pasterze-Burgstall (Mittlerer Burgstall: große Massenbewegung) werden im Arbeitsgebiet Dösen-Säuleck nun auch die photogrammetrischen, auf Basis von UAV-Befliegungen durchgeführten Messungen am Dösener Blockgletscher mit dem Sommer 2025 offiziell ins Messprogram dieses Projektes aufgenommen.

Diese Tätigkeiten wurden seit 2023 für das Projekt bisher kostenfrei von der Universität Graz durchgeführt und bilden eine sinnvolle und günstige Ergänzung (da nur Reisekosten budgetär in Zukunft berücksichtigt werden) zu den bisherigen Messungen. Abbildung 19 zeigt hierzu die aktuellen Veränderungen am Dösener Blockgletscher zwischen 2023 und 2024 auf Basis der UAV-Befliegungen von H. Zandler und W. Sulzer am 2.8.2023 und 26.8.2024. Das erfasste Muster sowie die ermittelten Beträge sind stimmig zu den geodätisch erfassten Bewegungsbeträgen (vgl. Abb. 5 in Kapitel 2).

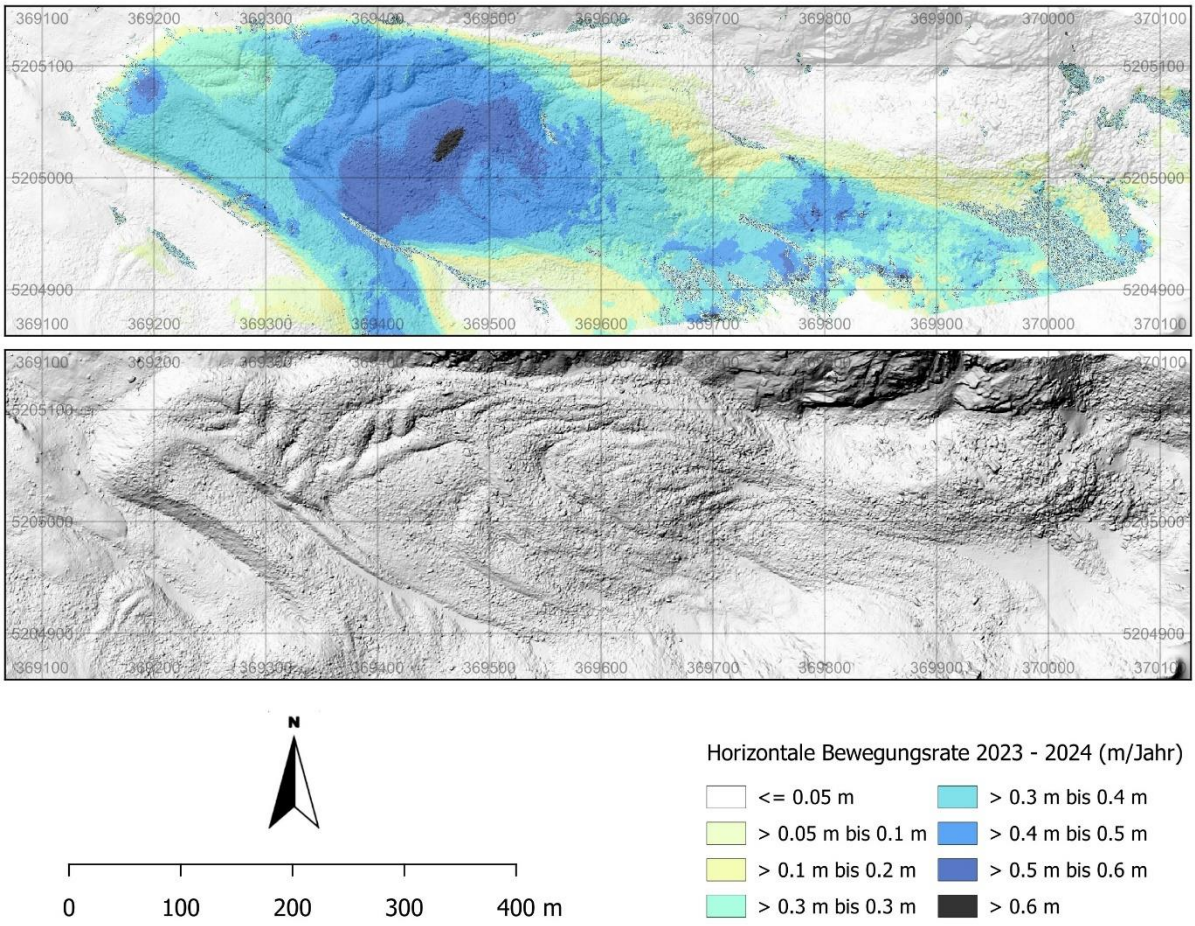

Abbildung 19: Photogrammetrisch erfasste horizontale Bewegungsraten des Dösener Blockgletschers 2023-2024. Oben: Oberflächenbewegung des Dösener Blockgletschers vom 2.8.2023 bis 27.8.2024, errechnet durch normalisierte Kreuzkovarianz der drohnenbasiert erstellten Orthofotos. Unten: Schummerungsdarstellung des Geländemodells von 2023 (räumliche Auflösung 3 cm). Datenauswertung und Grafik: H. Zandler. Koordinatensystem ETRS89 / UTM zone 33N.

4.4. Lufttemperatur-Monitoring

Wie in den letzten Messjahren lagen für das Messjahr 2023/24 sowohl für die meteorologische Station in der Dösen als auch für jene im Hinteren Langtalkar geschlossene Datenreihen vor. 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 meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar im Zeitraum 1.8.2023–31.7.2024. Der höchste Tagesmittelwert wurde am 22.8.2023 mit 13,8 °C erreicht, nachdem bereits in den vier Vorjahren ähnlich hohe absolute Maxima (2022/23: 22.6.2023: 13,8 °C; 2021/22: 20.7.2022: 13,7 °C; 2020/21: 21.8.2020: 13,5 °C) auftraten. Der tiefste Wert wurde am 25.11.2023 mit -15,6 °C ermittelt. Er lag deutlich über den absoluten Minima der beiden Vorperioden (2022/23: -18,0 °C am 12.12.2022; 2021/22: -16,6° am 21.1.2022). Dies ergibt eine Amplitude für 2023/24 von 29,4 °C, die jener vom Vorjahr (32°C) etwas nachsteht.

In der Abbildung 20 sind ebenfalls die Monatsmittelwerte desselben Zeitraumes dargestellt. Der kälteste Monat war in diesem Messjahr der Jänner 2024 mit -6,2 °C (zum Vergleich: Jänner 2023 -7,4 °C; Jänner 2022 -7,1 °C;

Jänner 2021 -11,2 °C), wohingegen der Juli 2024 mit 9,0 °C der wärmste Monat war (deutlich wärmer als 2022/23, als der Juli als wärmster Monat 8,0 °C erreichte). Die Jahresschwankung der Monatsmitteltemperatur von 15,2 °C ähnelt der der beiden Vorjahre mit 15,4 °C (2022/23) und 15,6 °C (2021/22). Die Monate November 2023 bis März 2024 waren mit Monatsmittelwerten zwischen -4,0 und -6,2 °C relativ ähnlich temperiert. Die meteorologischen Wintermonate Dezember, Jänner und Februar waren also nicht viel kälter als die zeitlich benachbarten Monate.

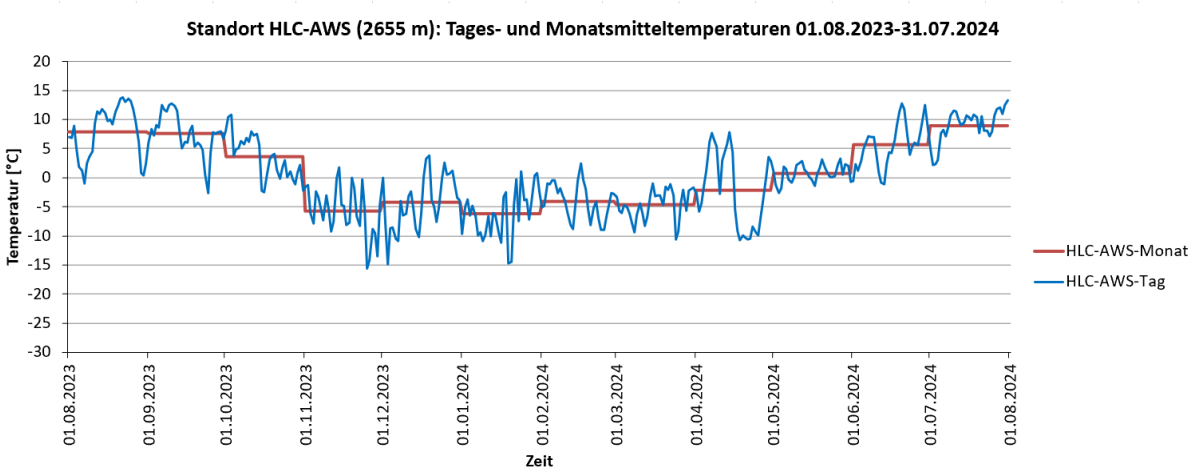

Abbildung 20: Tages- und Monatsmittelwerte der Lufttemperatur an der meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS; 2655 m) zwischen 1.8.2023 und 31.7.2024. Die Jahresmitteltemperatur für diesen Zeitraum lag bei 0,64 °C (zum Vergleich 2022/23: -0,38 °C; 2021/22: -0,28 °C).

Abbildung 21 zeigt die entsprechenden Tagesmittel- und Monatsmittelwerte der Lufttemperatur für die meteorologische Station in der Dösen (DOE-AWS) für 2023/24, wobei sich das zuvor für die Station im Hinteren Langtalkar Gesagte im Wesentlichen bestätigt. Der kälteste Monat war auch hier der Jänner 2024 (-7,2 °C). Dem stand der Juli 2024 als der wärmste Monat (8,6 °C) gegenüber. Damit ergibt sich eine Jahresamplitude auf Basis von Monatswerten von 15,8 °C (im Vorjahr: 15,4 °C), was ähnlich dem Wert der Station im Hinteren Langtalkar ist. Wieder bestätigt sich die Beobachtung, dass die Station am Dösener Blockgletscher trotz ihrer um 52 m tieferen Lage eine um durchschnittlich 0,56 °C tiefere Jahresmitteltemperatur als jene im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS) aufweist (2023/24: 0,56 °C; 2022/23: 0,54 °C; 2021/22: 0,53 °C; 2019/20: 0,61 °C). Dies ist auf die unterschiedlichen topographischen Gegebenheiten an den beiden meteorologischen Stationen zurückzuführen.

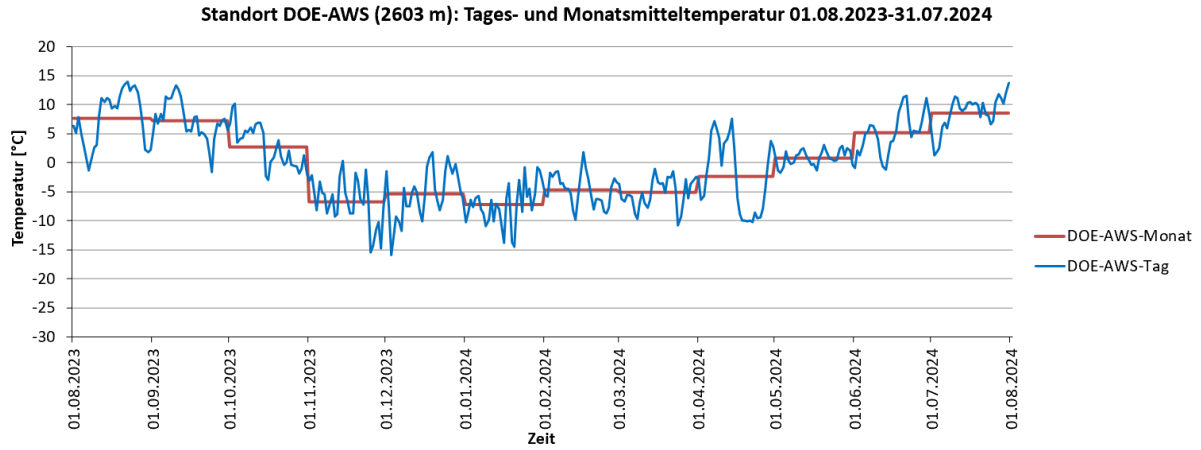

Abbildung 21: Tages- und Monatsmittelwerte der Lufttemperatur an der meteorologischen Station in der Dösen (DOE-AWS, 2603 m) zwischen 1.8.2023 und 31.7.2024. Die Jahresmitteltemperatur betrug in diesem Zeitraum 0,08 °C (zum Vergleich 2022/23: -0,92 °C, 2021/22: -0,81 °C).

Zur besseren direkten Vergleichbarkeit der beiden Standorte sind in der Abbildung 22 links die Tagesmittelwerte und rechts die Monatsmittelwerte beider meteorologischen Stationen für 2023/24 dargestellt. Daraus wird wiederum klar ersichtlich, dass die ermittelten Tagesmittel- und Monatsmittelwerte sehr ähnlich sind. Im Hinteren Langtalkar waren 11 der 12 Monate etwas wärmer als an der Station in der Dösen (zwischen nur 0,2 °C im April 2024 und 1,1 °C im Dezember 2023). Lediglich im Mai 2024 war es an der Station im Hinteren Langtalkar geringfügig (um 0,09 °C) kühler als in der Dösen. Im Mittel über alle 12 Monate beträgt der Unterschied nur 0,56 °C, was – wie bereits oben beschrieben – den Gegebenheiten in den Vorjahren entspricht. Dies bestätigt einmal mehr die hohe Korrelation von Lufttemperaturwerten benachbarter (hier rund 38,5 km voneinander entfernter) Stationen.

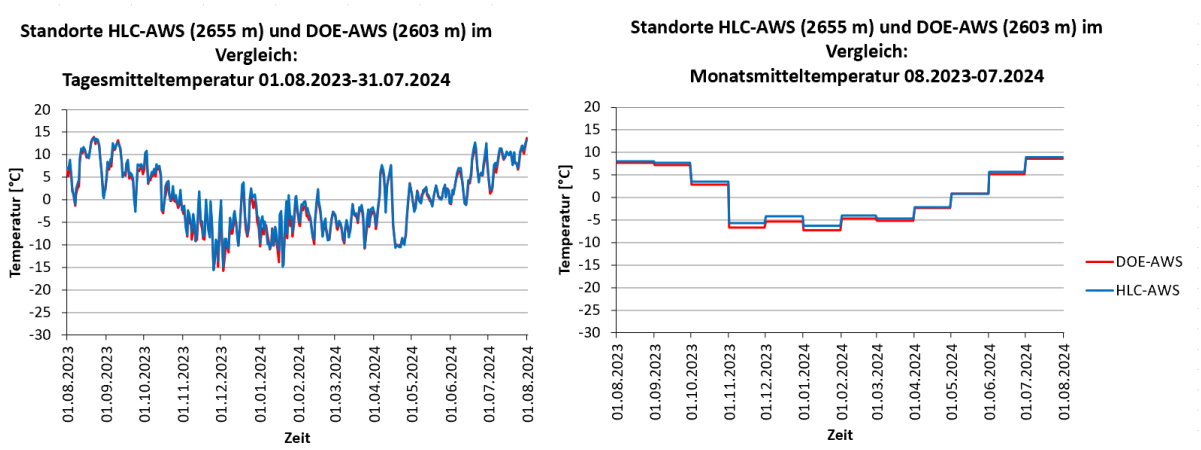

Abbildung 22: Vergleich der Tages- (links) und der Monatsmittelwerte (rechts) der Lufttemperatur an den beiden meteorologischen Stationen im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS, 2655 m, blau) sowie in der Dösen (DOE-AWS, 2603 m, rot) zwischen 1.8.2023 und 31.7.2024. Zu beachten ist der nahezu gleichsinnige Verlauf der Temperaturkurven.

Die hohen Temperaturen im August und September 2023 waren auch dafür verantwortlich, dass die Reste der winterlichen Schneedecke rasch abgebaut wurden. Abbildung 23 zeigt mit Bildern der automatischen Kamera DOV-RDC, wie Ende September 2023 nahezu der gesamte Schnee in der Wurzelzone des Dösener Blockgletscher verschwunden war. Schon am 2.9.2023 waren die meisten Schneeflecken nicht mehr existent, am 29.9.2023 blieb nur mehr ein einziger kleiner Schneefleck über.

9.8.2023 2.9.2023 29.9.2023

Abbildung 23: Bilder der automatischen Kamera im Dösental mit Fokus auf die Wurzelzone des Blockgletschers: Abbau der letzten Winterschneefelder zwischen 9.8. und 29.9.2023.

Bilder von der neuen automatischen Kamera an der Stirn des Blockgletschers Hinteres Langtalkar hielten die Auswirkungen eines Starkniederschlagsereignisses am 27.8.2023 im Bereich der Blockgletscherstirn fest. Wie in Abbildung 24 ersichtlich, nahm die Schüttung der Quelle zwischen 27.8. und 28.8.2023 drastisch zu, und es entsprang nahezu ein Wildbach direkt aus den Blockgletschersedimenten. Neben der hohen Schüttung ist in den Fotos auch auffällig, dass von der Quelle am 28.8. deutlich trüberes, also sedimentreicheres Wasser abfloss. Dieser deutliche Anstieg des Abflusses ist auch in den Quelltemperaturdaten ersichtlich. Wie Abbildung 25a zeigt, ist durch das Niederschlagsereignis zuerst kaltes Wasser aus dem Blockgletscher gedrückt worden (Temperaturabsenkung von 0,4°C auf 0,2°C), danach stieg die Temperatur langsam wieder an und erreichte nach zwei Tagen einen Wert von 0,7°C. Auffällig ist auch, dass die Abkühlung schneller als die Erwärmung war. Interessant dazu sind die Niederschlagsdaten der benachbarten Station in Heiligenblut, die vom Hydrographischen Landesdienst in Kärnten betrieben wird (Abb. 25b). Am 27.7. wurden dort 27 mm gemessen, am 28.8. sogar 57,6 mm. Somit fielen an den beiden Tagen ca. 85 mm Niederschlag. Unter der Annahme, dass im Hinteren Langtalkar ähnlich hohe Niederschlagsmengen zu verzeichnen waren, kann man schließen, dass solche Niederschläge bei gleichzeitig relativ hohen Temperaturen (die Tagesmittelwerte an der Station Heiligenblut lagen an den zehn Tagen 21. bis 30.8.2023 zwischen 10,5 und 23,1 °C, an der Station HLC-AWS zwischen 0,4 und 13,8 °C), zu massiven Schüttungsanstiegen der Blockgletscherquelle im Hinteren Langtalkar führen. Desweiteren stellt sich die Frage, ob dieser Blockgletscher überhaupt eine ausgiebige Retentionswirkung entfaltet (was für viele Blockgletscher typisch ist; z.B. Winkler et al. 2016) oder ob das Wasser nicht quasi relativ ungebremst über den gefrorenen Anteil des Blockgletschers fließt.

27.8.2023/15:00 h 28.8.2023/15:00 h

Abbildung 24: Bilder von der automatischen Kamera im Hinteren Langtalkar mit Fokus auf die Stirn und die Quelle des Blockgletschers: Ein Starkniederschlagsereignis löste einen sprunghaften Anstieg der Quellschüttung aus, die auch in den Wassertemperaturdaten ersichtlich war.

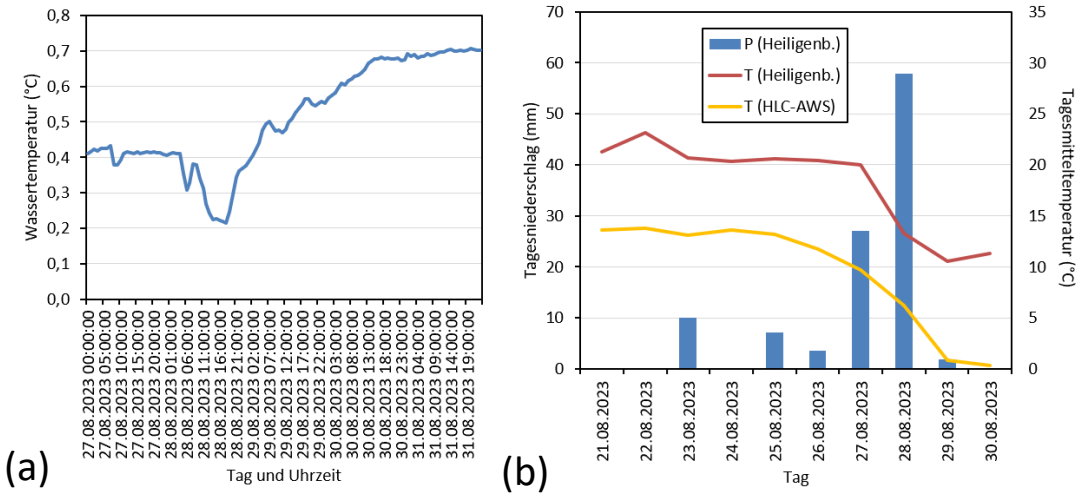

Abbildung 25: Quellschüttungsereignis am 28.8.2024 an der Quelle des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar und zeitgleiche meteorologische Bedingungen: (a) stündliche Werte der Wassertemperatur, gemessen an der Hauptquelle am Blockgletscher zwischen 27.8.2023, 0 h, und 31.8.2023, 23 h; (b) Tagessummen des Niederschlages und Tagesmitteltemperatur an der HZB-Station Heiligenblut (Nr. 113175; 1325 m) sowie der Station HLC-AWS zwischen 21. und 30.8.2023. Quelle von (b): Amt der Kärntner Landesregierung, Abteilung 12: Wasserwirtschaft, Unterabteilung Hydrographie (Kontakt Helge Vithanage).

5. Ergebnisse des längerfristigen Monitorings

5.1. Bodentemperatur-Monitoring

Einordnung des Messjahres 2023/24 in die längerfristige Datenreihe

Die an den Standorten ermittelten Jahresmitteltemperaturen für die elf Messjahre 2013/14 bis 2023/24 sind in Abbildung 26 – 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.

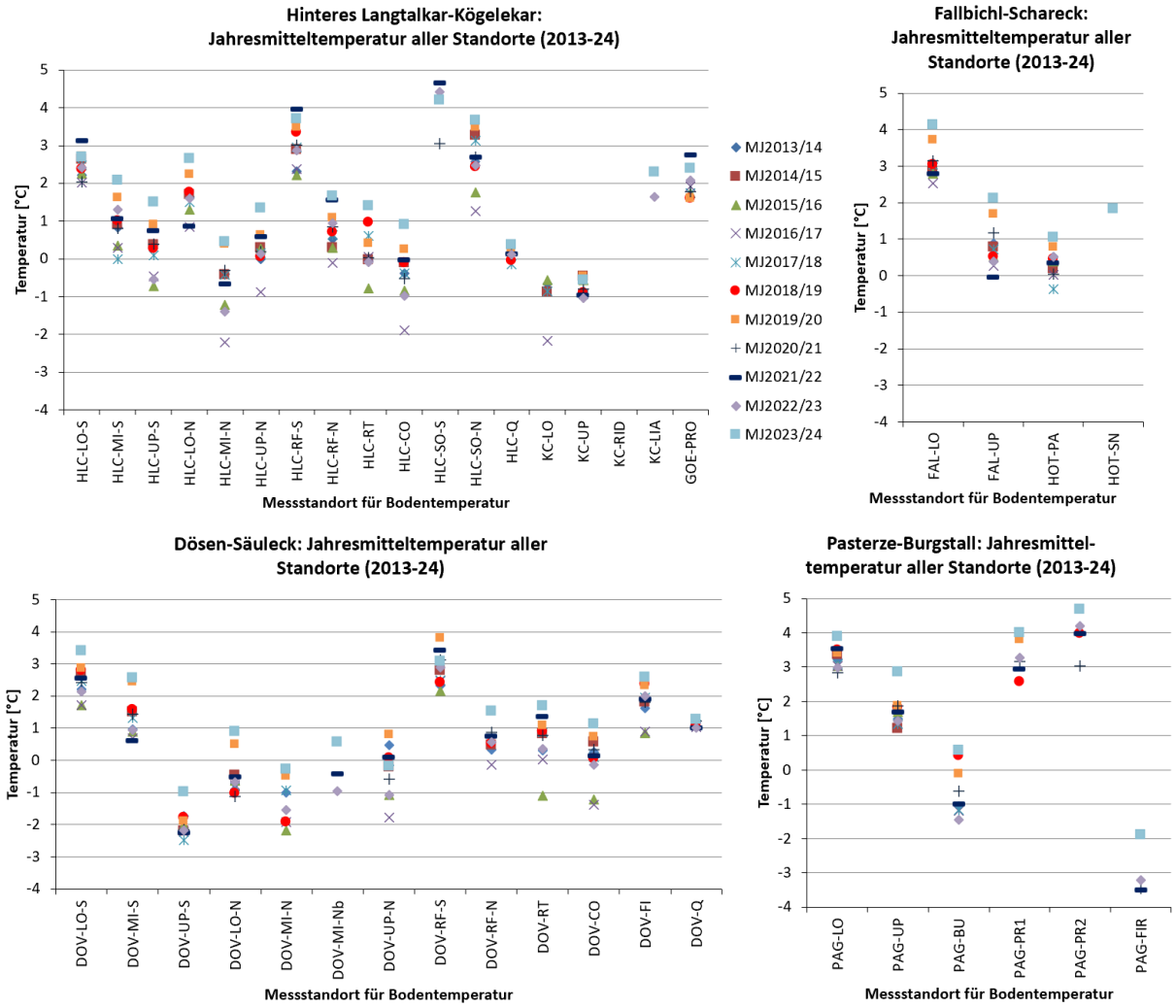

Abbildung 26: Jahresmitteltemperatur an/nahe der Bodenoberfläche (Zeitraum 1.8. bis 31.7. des Folgejahres) aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten für die elf Messjahre (MJ) zwischen 2013/14 und 2023/24. Nur Jahresmittelwerte von Messjahren mit lückenlosen Datenreihen sind dargestellt. Standort KC-RID hat bisher keine einzige geschlossene Jahresdatenreihe.

Abbildung 26 zeigt weiters, dass die Maxima und Minima der Jahresmitteltemperaturen vielfach auf unterschiedliche Jahre fallen, wobei jedoch das letzte Beobachtungsjahr hervorsticht: Nachdem bereits im Messjahr 2018/19 an 14 von 27 Standorten damals 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 im Jahr 2020 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. Im Messjahr 2023/24 wurden an 32 der nun 41 Messstandorte neue Maximarekorde im Jahresmittelwert erzielt, wobei bei einem Standort – HOT-SN – erst ein Wert vorliegt. Der Mittelwert über alle Standorte in den vier Untersuchungsgebieten ist der bisher bei weitem höchste mit 1,83 °C, der 1,1 °C über dem des Vorjahres liegt und 0,4 °C über den bisherigen Rekord von 2019/20. Insgesamt wird durch unsere Langzeitreihe 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 elfjährigen Zeitraum 2013/14 bis 2023/24 zwischen 2,8 °C (DOV-RT) und nur 0,4 °C (PAG-RF-N) schwanken, wobei der Mittelwert dieser Schwankung für alle Standorte bei 1,7 °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 27 zeigt exemplarisch die Tagesmitteltemperaturen der vier in Tabelle 2 grau hinterlegten Standorte (einer pro Untersuchungsgebiet) im Zeitraum 1.8.2013–31.7.2024 (elf Messjahre). Im Vergleich dazu sind jeweils auch die Lufttemperaturdaten der meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar dargestellt. Zu den einzelnen Graphiken sind folgende wesentliche Punkte anzumerken:

(1) Im Jahresgang am Standort HLC-UP-N (Hinteres Langtalkar) ist klar zu erkennen, dass sich eine winterliche Schneedecke in allen elf Wintern dämpfend auf Schwankungen der Bodentemperatur auswirkte, wobei dieser Effekt 2015/16 und 2016/17 deutlich geringer ausfiel und daher tiefere Temperaturen bei gleichzeitig höheren Schwankungen registriert wurden. Das vorletzte Beobachtungsjahr 2022/23 lag – ähnlich wie schon das Jahr zuvor – in Bezug auf Schwankungen im Mittelfeld der bisherigen Messjahre mit geringen Schwankungen im negativen Temperaturbereich von Anfang November 2022 bis in die zweite Junihälfte 2023. Das letzte Beobachtungsjahr 2023/24 war von relativ hohen Temperaturen gekennzeichnet, mit den tiefsten Temperaturen Ende November bis Anfang Dezember um -3 °C. Die allgemein tiefen und stabilen Temperaturen im Hochwinter an diesem Standort sind – nach Haeberli (1973) – als klare Permafrostzeiger zu sehen.

(2) Im Jahresgang am Standort FAL-UP (Fallbichl-Hochtor) zeigen sich markante Unterschiede zwischen den einzelnen Messjahren, wobei v. a. die drei Messjahre 2019/20, 2020/21 und 2023/24 aus dem „üblichen" Muster herausfallen. Diese drei Messjahre zeigten im Gegensatz zu den anderen Messjahren eine wirksame Dämpfung der Bodentemperatur in 6 bis 7 Monaten, 2020/21 sogar bis zum 10.6.2021. Während der erste (2013/14) und die Winter 2019/20 und 2020/21 sich durch die zeitweise starke Dämpfung der Temperaturgänge als relativ schneereich zu erkennen geben, waren die Winter 2014/15, 2015/16, 2016/17, 2018/19, 2021/22 und auch 2022/23 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 mit Werten von bis zu -16,3 °C erreicht. Die tiefste Tagesmitteltemperatur im letzten Messjahr 2023/24 lag bei lediglich -5,75 °C am 16.10.2023, also in einer Zeit, als noch relativ wenig Schnee lag und der Untergrund gut auskühlen konnte. Im Messjahr zuvor lag das Minimum immerhin noch bei -12,6 °C am 28.1.2023.

(3) Am Standort DOV-UP-S (Dösen-Säuleck) war in acht der elf Messjahre keine wesentliche Dämpfung der Lufttemperatur durch eine Schneedecke zu erkennen. Einzig in den drei Wintern 2018/19, 2022/23 und 2023/24 ist diese dämpfende Wirkung im Mai/Juni, jeweils nur kurz, ausgeprägt. Jene von 2023/24 dauerte jedoch – für

diesen Standort außergewöhnlich lange – ca. einen Monat an, was auf die besonderen Schneebedingungen in den Monaten April und Mai 2024 zurückzuführen ist (siehe Kapitel 3). 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. Das Minimum des letzten Messjahres unterschritt hingegen -12,3 °C am 16.1.2024 nicht (im Jahr zuvor war dies recht ähnlich mit -12,8 °C). Das Maximum mit 14,9 °C trat zweimal, am 21.8.2023 und am 10.9.2023, auf (im Vorjahr 12,5 °C).

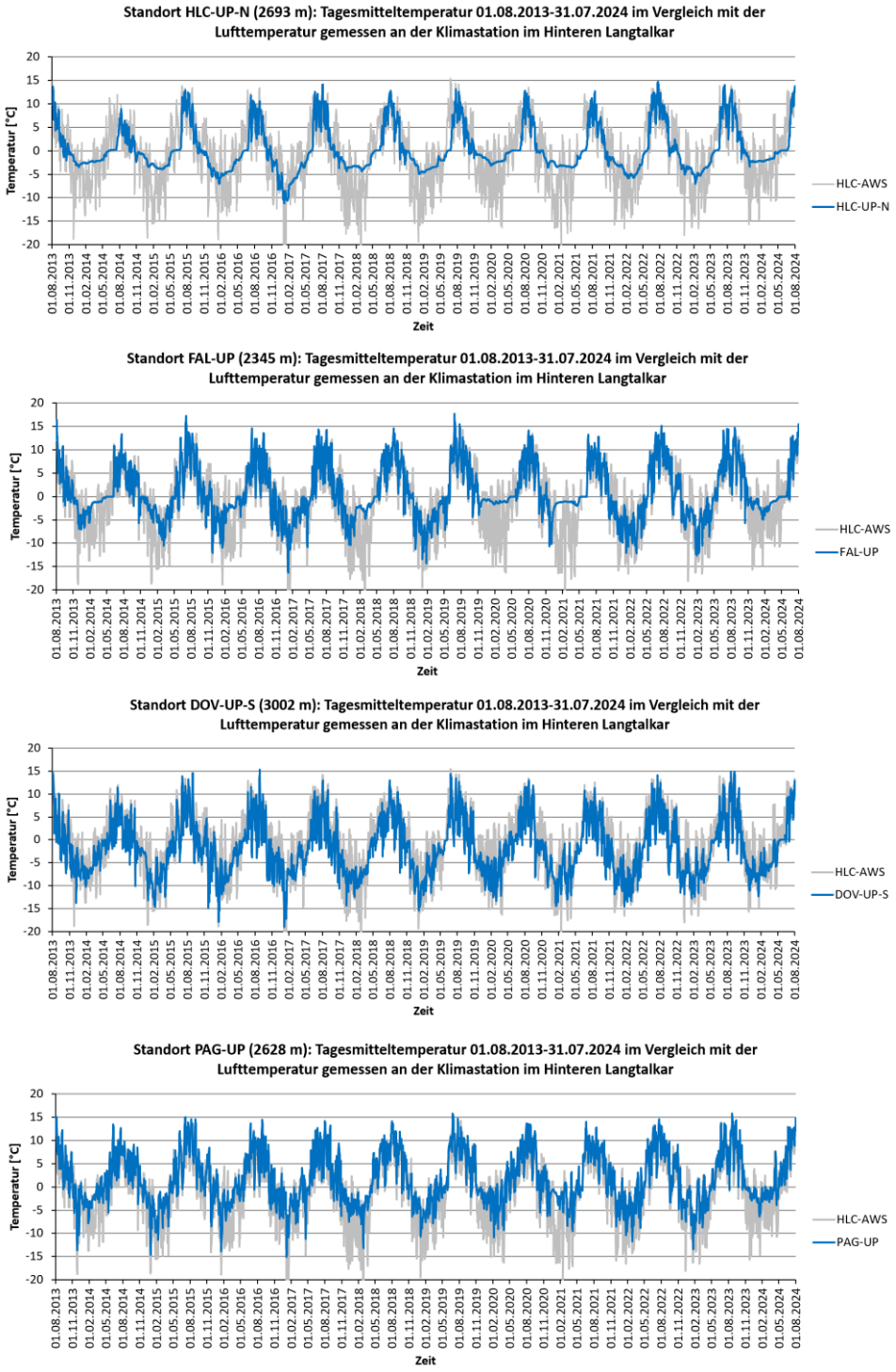

Abbildung 27: Tagesmitteltemperaturen der Bodenoberfläche an den vier selben Standorten wie in im Abbildung 14 und 28 für den Zeitraum 1.8.2013 bis 31.7.2024 sowie deren Vergleich zur Lufttemperatur am Standort HLC-AWS.

(4) Relativ ähnlich liegen die Verhältnisse am Standort PAG-UP (Pasterze-Burgstall). Hier kam es in keinem der elf Jahre zur Ausbildung einer langandauernden Schneedecke, welche eine länger wirksame und vollständige Entkoppelung der Luft- von der Bodentemperatur hätte bewirken können. Die Folge sind auch hier zumeist hohe Temperaturschwankungen über den gesamten Messzeitraum, worin die Minima jeweils zwischen -10 und -15 °C lagen. Eine Ausnahme war hier jedoch das letzte Messjahr, worin es v. a. wegen der außergewöhnlich hohen Novemberniederschläge zu einer Entkoppelung von Luft- und Bodentemperatur kam. Im Winter 2023/24 lag deshalb das Minimum auch bei nur -6,4 °C (gleich wie am Standort DOV-UP-S am 16.1.2024). Im Jahr zuvor lag das Minimum mit -13,4°C deutlich tiefer. Der höchste Tagesmittelwert im elfjährigen Zeitraum wurde an diesem Standort sowohl am 30.6.2019 als auch am 22.8.2023 mit je 15,7 °C gemessen. In den beiden Jahren zuvor wurde dieser maximale Tageswert mit 13,7 °C (2022/23) und 14,2 °C (2021/22) nicht übertroffen, sondern lag in Bezug auf die absoluten jährlichen Maxima im Mittelfeld dieses Standortes.

Insgesamt repräsentieren die in Abbildung 27 dargestellten Temperaturkurven 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 weitgehend fehlt. Für das Messjahr 2023/24 ist jedoch auffällig, dass die außergewöhnlich hohen Novemberniederschläge auch an sonst schneearmen Standorten und über den November hinaus dämpfend wirkten. Dies Entkoppelung von Luft- und Bodentemperatur war somit stärker als normal und behinderte eine effiziente spätherbstlich/frühwinterliche Bodenauskühlung.

Die Abbildung 28 veranschaulicht die langjährige Entwicklung der Temperatur an denselben vier Standorten wie in der Abbildung 27. 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). Die nachfolgend als „Trends“ geschilderten Entwicklungen sind statistisch z. T. signifikant ($p<0,01$: HLC-UP-N, PAG-UP; $p<0,05$: DOV-UP-S), z. T. aber auch nicht ($p>0,05$: FAL-UP), was den großen Wert der langjährigen Fortführung dieser Zeitreihen unterstreicht. Zu den vier Graphiken ist Folgendes anzumerken:

(1) Der Standort HLC-UP-N lässt über die Jahre einen deutlichen Erwärmungstrend erkennen, wobei die Werte in den 16 Jahren bis einschließlich 2022/23 nur um ca. 1,5 °C schwanken. Das Messjahr 2023/24 brachte jedoch mit 1,33 °C einen neuen Extremwert, der 0,7 °C über dem bisherigen Maximum (0,63 °C in 2019/20) lag. Deutliche „Ausreißer“ nach unten in dieser Entwicklung sind aber die Messjahre 2015/16 und insbesondere 2016/17, in welchem das Minimum der bisher 17-jährigen Messreihe registriert wurde. Der Temperaturanstieg an diesem Standort ist im Beobachtungszeitraum statistisch signifikant und ergibt eine mittlere Erwärmungsrate von 0,0794 °C/Jahr.

(2) Der Standort FAL-UP lässt demgegenüber nur einen schwach positiven Trend, den bei Weitem schwächsten aller Standorte, erkennen. Die Amplitude der Jahresmittelwerte beträgt 2,2 °C und wird besonders durch von Jahr zu Jahr stark wechselnde Schneeverhältnisse (siehe weiter unten) beeinflusst. Auffallend ist, dass die drei Messjahre 2019/20, 2020/21 und v. a. 2023/24 auch hier die wärmsten der Messgeschichte waren. Das aktuelle Messjahr 2023/24 war dabei um 0,43 °C wärmer als der bisherige Rekordhalter 2019/20. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass das Messjahr 2021/22 mit -0,02 °C das zweitkälteste der gesamten Messgeschichte war (knapp hinter 2011/12 mit -0,10 °C). Dies lässt sich aus der Kombination von an diesem Standort fehlendem Schnee im Winter mit tiefen winterlichen Temperaturen erklären. Der errechnete Temperaturanstieg ist im Beobachtungszeitraum statistisch nicht signifikant und ergibt eine mittlere Erwärmungsrate von 0,0361 °C/Jahr.

(3) Am Standort DOV-UP-S bleibt die Temperatur in allen Jahren deutlich unter 0 °C. Die bei Weitem höchste Jahresmitteltemperatur betrug -0,98 °C im Jahr 2023/24 gefolgt, von -1,7 °C in 2013/14. Die tiefste Temperatur wurde 2010/11 mit -3,4 °C ermittelt. Somit liegen die Werte in allen Jahren im permafrosttypischen Bereich. Die

Schwankungsbreite von 2,4 °C in 17 Jahren ist den anderen drei Standorten ähnlich (je 2,2 °C für HLC-UP und FAL-UP; 2,4 °C für PAG-UP). Der allgemeine Erwärmungstrend am Standort DOV-UP-S ist ähnlich ausgeprägt wie am Standort HLC-UP-N, jedoch mit einer Konstanz des Temperaturniveaus in den drei Jahren 2020/21 bis 2022/23. Auffällig an diesem Standort ist jedoch die Beobachtung, dass die ersten vier „kalten" Jahre mit den darauffolgenden 12 wärmeren Jahren deutlich kontrastieren und das letzte Beobachtungsjahr bei Weitem das wärmste Jahr war. Der Temperaturanstieg an diesem Standort ist im Beobachtungszeitraum statistisch signifikant, die mittlere Erwärmungsrate von 0,0791 °C/Jahr jenem vom Standort HLC-UP-N sehr ähnlich.

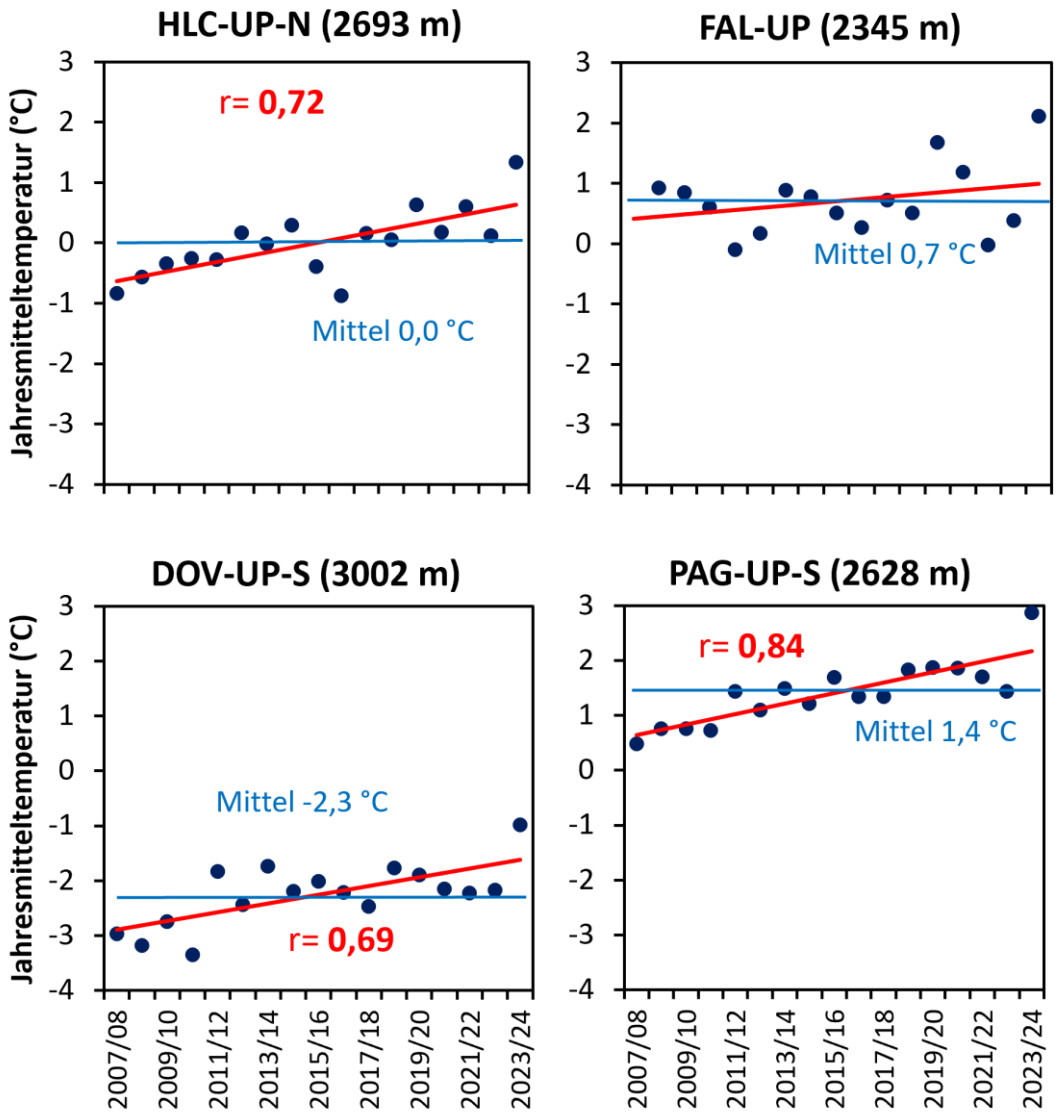

Abbildung 28: Jahresmitteltemperatur der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten für den Zeitraum 1.8.–31.7. des Folgejahres für die Messjahre von 2007/08 bis 2023/24. Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten sind dargestellt. Jene für DOV-UP-S, HLC-UP-N und PAG-UP sind statistisch signifikant (alle drei $p<0,01$ – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1 %). Zu beachten die gleiche Skalierung der Ordinaten.

(4) Ähnlich verhält es sich am allgemein schneearmen Standort PAG-UP. Die Jahresmitteltemperatur blieb dort jedoch immer deutlich über 0 °C und weist, wie erwähnt, Schwankungen von 2,4 °C auf, wobei der Trend der Jahresmitteltemperatur von allen hier gezeigten am deutlichsten noch oben zeigt. Auffallend ist auch hier, dass das Messjahr 2023/24 mit 2,87 °C einen neuen Rekord mit sich brachte, der das bisherige Maximum (1,88 °C in

2019/20) um ca. 1 °C übertraf. Der Temperaturanstieg an diesem Standort ist statistisch signifikant und ergibt eine mittlere Erwärmungsrate von 0,0956 °C/Jahr.

Abbildung 29 zeigt für denselben Zeitraum 2006/07 bis 2023/24 die auf Basis der Bodentemperaturwerte ermittelten Tage mit einer für das thermale Regime relevanten dämpfenden Schneedecke (mit weitgehender Entkoppelung von Luft- und Bodentemperatur). Die Anzahl der Tage mit Schneedecke wurde auf Basis des Ansatzes von Staub et al. (2017) ermittelt, wobei ein Tag als solcher mit dämpfendet Schneedecke definiert wird, wenn die Standardabweichung der Tagesmitteltemperatur innerhalb eines Zeitfensters von sieben Tagen ≤0,25 °C ist. Zur Graphik in Abbildung 29, die als gemeinsames Merkmal das Fehlen von klaren Trends aufweist, ist Folgendes anzumerken:

(1) Am Standort HLC-UP-N schwanken die errechneten Schneedeckentage zwischen 252 Tagen im Jahr 2007/08 und 104 Tagen (Differenz von 148 Tagen) im schneearmen Winter 2016/17. In jüngerer Vergangenheit war das Jahr 2022/23 recht schneearm, das Jahr 2023/24 recht schneereich. Das Mittel liegt bei 196 Tagen.

(2) Der Standort FAL-UP ist geprägt von starken Unterschieden von Jahr zu Jahr mit nur null Schneetagen in 2021/22 und 183 Schneetagen 2019/20. Windverfrachtung – Einwehung oder Auswehung – spielt hier neben dem generellen Schneedeckenauf- und -abbau eine wichtige Rolle. Im Mittel errechnen sich für diesen Standort für den Zeitraum 2007/08 bis 2023/24 62 Tage mit Schneedecke.

(3) Am Standort DOV-UP-S spielt eine isolierende Schneedecke in keinem der 18 Messjahre eine wesentliche Rolle, wobei die Tage mit Schneedecke zwischen einem im Jahr 2021/22 (gefolgt von vier im Jahr 2010/11) und 42 im Jahr 2023/24 schwankten. Im Mittel sind nur 14 Tage mit Schneedecke an diesem Standort zu erwarten, weshalb das letzte Messjahr als ein schneereiches gelten muss.

(4) Ganz ähnlich verhält es sich am besonders schneearmen Standort PAG-UP. Hier schwanken die Jahreswerte zwischen keinem Tag in 2009/10 und 29 Tagen in 2020/21. Im Mittel sind nur 5 Tage mit Schneedecke zu erwarten.

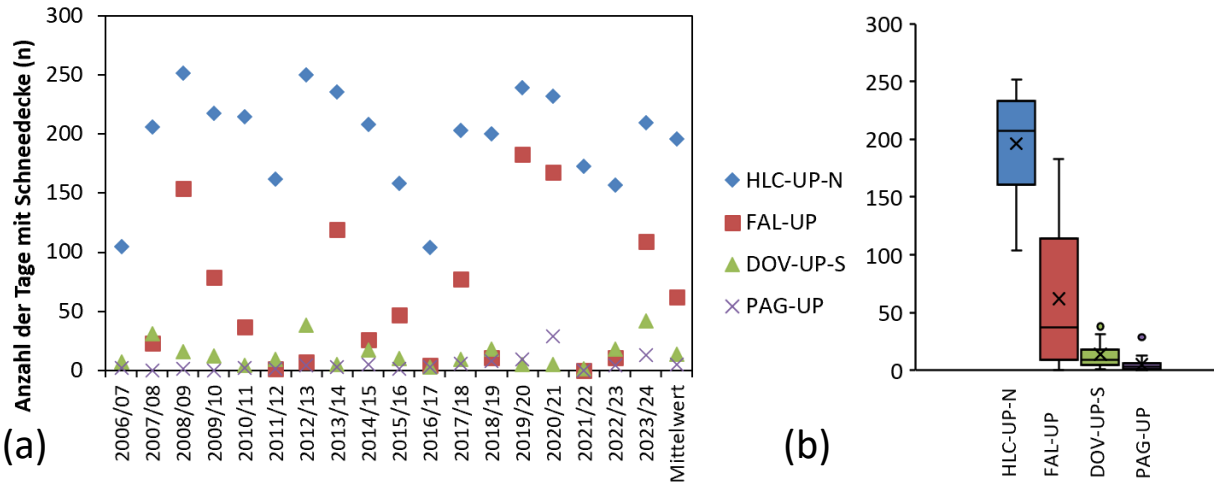

Abbildung 29: Schneedeckentage ermittelt aus den Bodentemperaturdaten (nach dem Ansatz von Staub et al. 2017) an den vier ausgewählten Standorten für den Zeitraum 1.8.–31.7. des Folgejahres für die Messjahre von 2006/07 bis 2023/24. (b) Zusammenfassendes Boxplot-Diagramm für jeden Standort. Fehlende Schneedeckendaten für Standort FAL-UP für Winter 2006/07.

5.2. Blockgletscherbewegungs-Monitoring

Einordnung des Messjahres 2023/24 in die längerfristige Datenreihe

Die vergleichende Darstellung der zeitlichen Änderung der geodätisch ermittelten Oberflächenbewegung der beiden untersuchten Blockgletscher ist Inhalt der Abbildung 30. Für Vergleichszwecke wurden die fehlenden mittleren jährlichen Bewegungsraten am Dösener Blockgletscher für die Zeiträume 2002/03 und 2003/04 aus dem gemessenen zweijährigen Mittelwert und entsprechenden Jahreswerten, welche am Blockgletscher Hinteres Langtalkar gemessen wurden, abgeleitet (vgl. Bericht 2013/14; Kellerer-Pirklbauer et al. 2015). Für Vergleichszwecke ist auch der zeitliche Verlauf der Bewegungsraten des ebenfalls im Nationalpark Hohe Tauern gelegenen Weißenkar-Blockgletschers (Schobergruppe, Osttirol) dargestellt, für den das geodätische Blockgletscher-Monitoring in Kaufmann et al. (2006) beschrieben wird. Die diesjährige Wiederholungsmessung am Weißenkar Blockgletscher erfolgte am 8.8.2024 durch A. Kellerer-Pirklbauer und A. Dorić in Fortsetzung der Messungen im Jahr 2023 sowie jener von 2019 (damals unter der Leitung von V. Kaufmann). Aus dem Bild der Geschwindigkeitsgraphen ist gut zu erkennen, dass (1) die Bewegungsraten der drei Blockgletscher gut miteinander korrelieren, (2) die Bewegungsraten im Messjahr 2020/21 die größten der gesamten geodätischen Messreihe waren, (3) noch zwei zeitlich zurückliegende Bewegungsmaxima (2003/04 bzw. 2014/15) erkennbar sind und (4) die Bewegungsraten über den gesamten Messzeitraum hinweg tendenziell zunehmen.

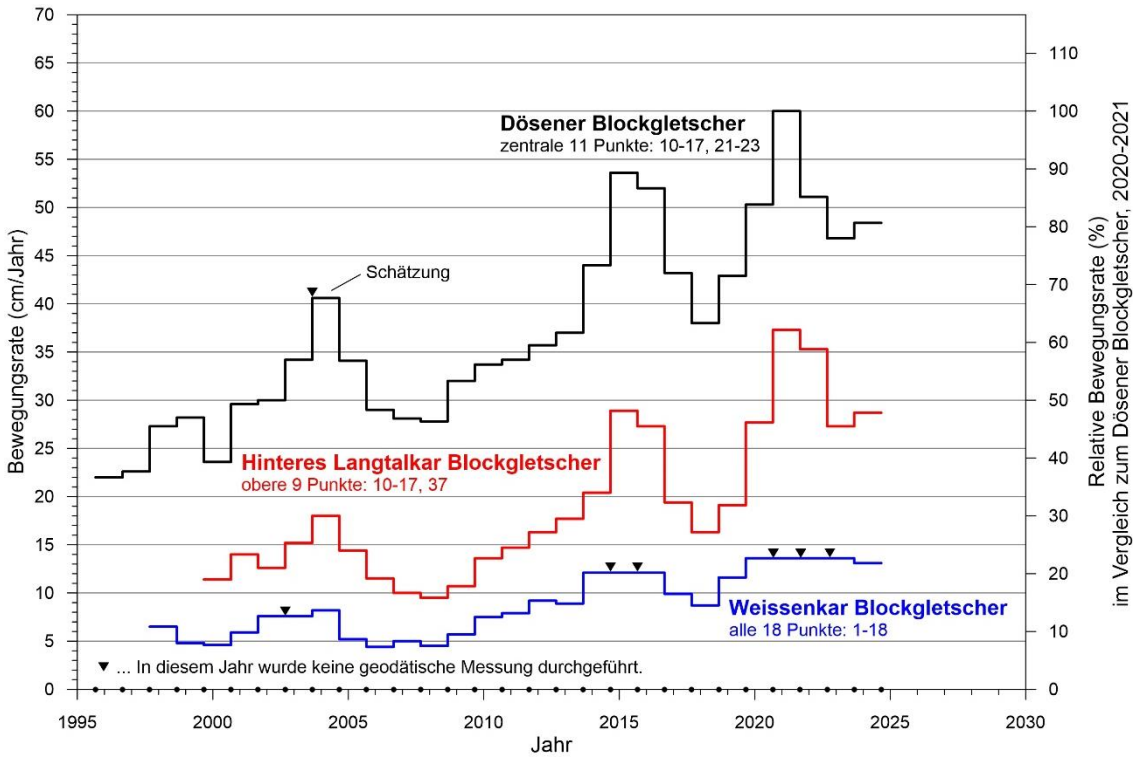

Abbildung 30: Vergleich der mittleren jährlichen horizontalen Oberflächenbewegung der beiden Blockgletscher Dösen (zentraler Bereich) und Hinteres Langtalkar (oberer Bereich) für den Zeitraum 1995-2024. Mittelbildung über 11 Punkte (10-17, 21-23) am Dösener Blockgletscher und 9 Punkte (10-17, 37) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar. Für Vergleichszwecke ist auch der zeitliche Verlauf der Bewegungsraten am Weißenkar-Blockgletscher (Schobergruppe, Osttirol) dargestellt.

Für die weitere Diskussion werden zu den gezeigten drei Bewegungskurven jene der Blockgletscher Leibnitzkopf und Tschadinhorn (Abb. 31) hinzugenommen. Die beiden letztgenannten Blockgletscher liegen im Nahbereich der beiden Blockgletscher Hinteres Langtalkar und Weißenkar, ebenfalls in der Schobergruppe, Osttirol. Der Leibnitzkopf-Blockgletscher befindet sich im Talschluss des Leibnitztales knapp außerhalb der Kernzone des Nationalparks Hohe Tauern, wohingegen der Tschadinhorn-Blockgletscher zur Gänze in der Kernzone des

Nationalparks Hohe Tauern liegt. Nähere Informationen zu den beiden Blockgletschern und ihren geodätischen Monitoring-Programmen geben Kaufmann et al. (2019 und 2021).

Alle dargestellten Geschwindigkeitskurven setzen sich aus einem photogrammetrischen (ältere Epochen) und einem geodätischen Anteil (jüngere Epochen) zusammen. Die Abbildung 31 zeigt die Geschwindigkeitskurven der fünf genannten Blockgletscher mit linearer Wiedergabe der Oberflächengeschwindigkeit entlang der vertikalen Achse. Zur besseren Visualisierung der Geschwindigkeitsgraphen wird in der Abbildung 32 der Wertebereich der Bewegungsraten logarithmisch (Basis 10) dargestellt. In der gewählten Darstellungsart kann nun die Relativänderung der Bewegungsraten von sich langsam bzw. schnell bewegenden Blockgletschern bzw. ausgewählten Blockgletscherzonen besser vergleichend erfasst werden. Die hierzu abschließende Abbildung 33 ist eine Modifikation der vorherigen, wobei der Geschwindigkeitsgraph des unteren Bereichs des Blockgletschers Hinteres Langtalkar anhand der aktuell noch messbaren Punkte 23, 27 und 28 ermittelt wurde.

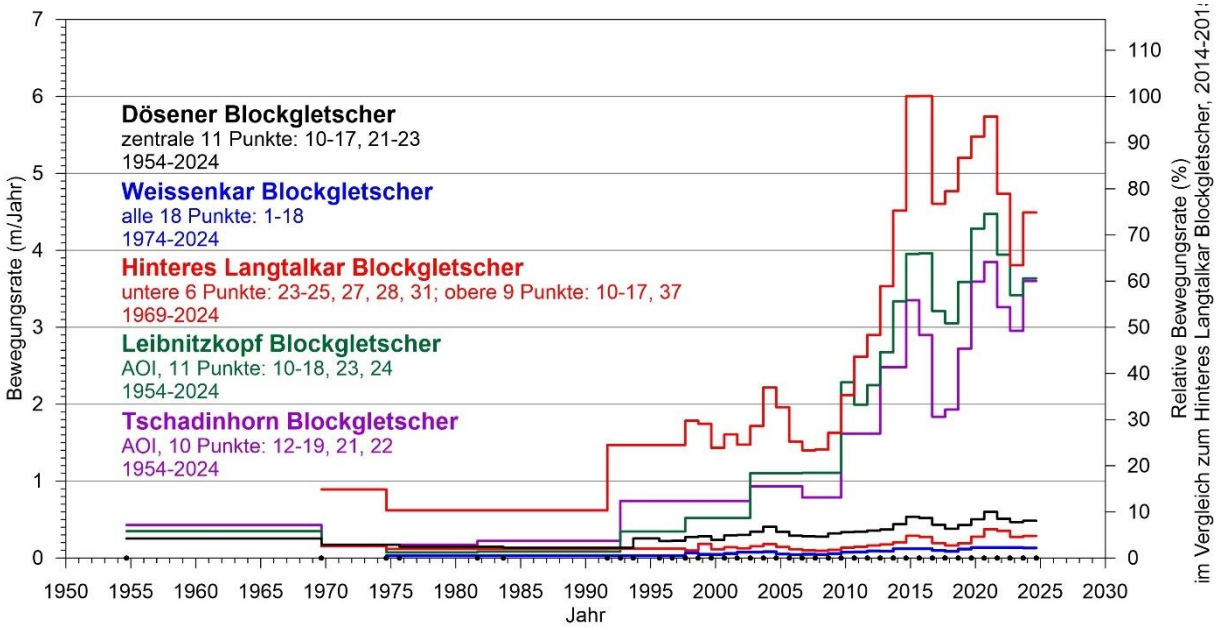

Abbildung 31: Vergleich der mittleren jährlichen Oberflächengeschwindigkeit der Blockgletscher Dösen (zentraler Bereich) und Hinteres Langtalkar (2 Zonen: oberer Bereich, 9 Punkte, und unterer Bereich, 6 Punkte) mit jener der Blockgletscher Weißenkar, Leibnitzkopf und Tschadinhorn im Zeitraum 1954-2024. Die Bewegungsraten sind linear skaliert.

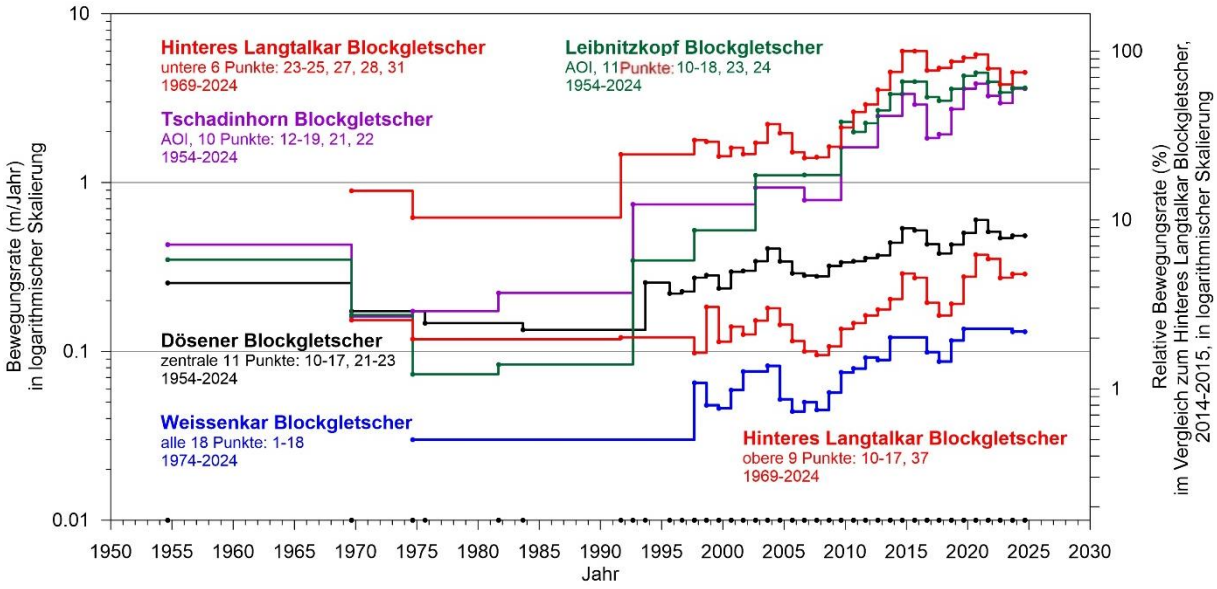

Abbildung 32: Vergleich der mittleren jährlichen Oberflächengeschwindigkeit der Blockgletscher Dösen (zentraler Bereich) und Hinteres Langtalkar (2 Zonen: oberer Bereich, 9 Punkte und unterer Bereich, 6 Punkte) mit jener der Blockgletscher Weißenkar, Leibnitzkopf und Tschadinhorn im Zeitraum 1954-2024. Die Bewegungsraten sind logarithmisch (Basis 10) skaliert.

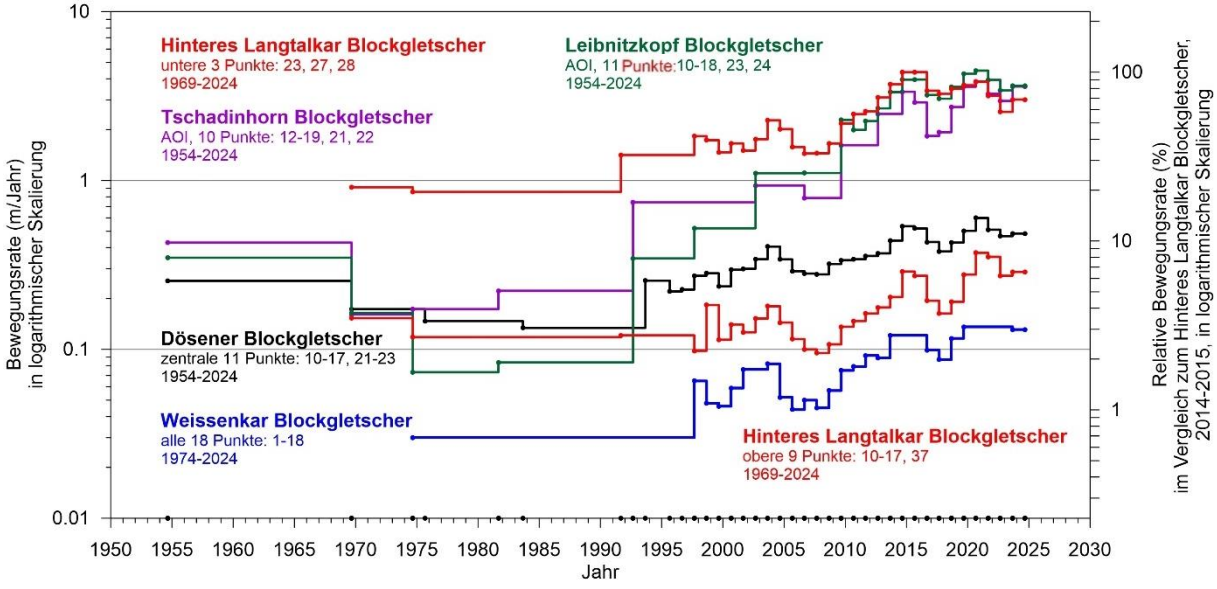

Abbildung 33: Vergleich der mittleren jährlichen Oberflächengeschwindigkeit der Blockgletscher Dösen (zentraler Bereich) und Hinteres Langtalkar (2 Zonen: oberer Bereich, 9 Punkte und unterer Bereich, 3 Punkte) mit jener der Blockgletscher Weißenkar, Leibnitzkopf und Tschadinhorn im Zeitraum 1954-2024. Die Bewegungsraten sind logarithmisch (Basis 10) skaliert.

In der Zusammenschau zeigen alle fünf Blockgletscher ein recht ähnliches Bewegungsverhalten über die Zeit. Generell ist seit Beobachtungsbeginn in den frühen 1950er-Jahren bis in die Gegenwart ein Ansteigen der Bewegung im Laufe der Zeit zu erkennen, wiewohl einander Zeiträume mit Beschleunigung und Verlangsamung abwechseln. Die kleinsten Bewegungsraten haben sich für den Zeitraum zwischen etwa 1975 und 1992 anhand von photogrammetrischen Messungen ergeben. Aus den geodätischen Messungen (ab 1995) sind kongruente beschleunigte Bewegungen für die Zeiträume 2000-2004, 2008-2015 bzw. 2018-2021 zu erkennen, mit temporären Maxima und anschließender Verlangsamung. Die an diesen fünf Blockgletschern festgestellte Kinematik ist im hohen Maße vergleichbar mit jener anderer Gebirgsregionen inner- und außerhalb Europas

(Kellerer-Pirklbauer et al. 2024c). Aufgrund der langen Beobachtungsreihe und der Genauigkeit der ermittelten Bewegungsraten für die genannten Blockgletscher, insbesondere für die Blockgletscher Dösen und Hinteres Langtalkar, stützen sich u. a. internationale Klimastudien/-berichte auf die Grazer Messergebnisse (Pellet et al. 2022-2025). Ergänzende Informationen, wie z.B. Fotos von den Geländearbeiten, finden sich in Kaufmann (2025).

5.3. Massenbewegungs-Monitoring

Blockgletscher Hinteres Langtalkar im mehrjährigen Vergleich

Der weiter anhaltende Vorstoß der Blockgletscherstirn macht sich auch in der Morphologie deutlich bemerkbar, wie bereits in den letzten Jahren immer wieder berichtet wurde oder wie der Verlust von geodätischen Messpunkten (Kapitel 4.2, 5.2) indirekt zeigt. 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 bis 2021 der Fixpunkt 52 vom Blockgletscher überfahren.

Die Analyse der Oberflächendeformation des Blockgletschers Hinteres Langtalkar zwischen 2020/21 und 2021/22 zeigt folgendes Bild: Der obere Bereich des Blockgletschers ist in beiden Perioden durch geringe Bewegungsbeträge gekennzeichnet, die sich ab den deutlich erkennbaren Transversalfurchen oberhalb der Karschwelle erhöhen. Die Oberflächenbewegung sowie die generelle Veränderung der Oberfläche nimmt Richtung Talstufe (bergab) deutlich zu, wobei v. a. Abschiebungen und relative Höhenveränderungen markant in Erscheinung treten (Abb. 34a).

Das bereits für 2021/22 gezeigte Bild bestätigt sich im Wesentlichen 2022/23 (Abb. 34b). Die Veränderungen in der oberen Hälfte des Blockgletschers sind marginal. Die markanten Höhenunterschiede in der Wurzelzone des Blockgletschers sind durch verstärktes Abschmelzen der (teilweise perennierenden) Schneefelder zu erklären. Die markanten morphologischen Veränderungen im Bereich der Blockgletscherzunge haben sich seit 2021/22 abgeschwächt. Die abnehmenden Oberflächenbewegungswerte könnten auf eine beginnende Stabilisierung der Blockgletscherzunge hinweisen.

In Abbildung 34b sind drei Teilgebiete (Bereich 1-3) im Stirnbereich des Blockgletschers ausgewiesen, die einen guten Eindruck von den massiven Veränderungen geben (Tabelle 6). In allen drei Bereichen zeigt der Median der Oberflächenveränderung 2022/23 eine deutliche Abnahme zu den Jahreswerten der vorangegangenen Periode 2021/22. An der Blockgletscherfront selbst verringerten sich die Werte von 105 auf 80 cm/Jahr (Bereich 1, orografisch linker Bereich der Blockgletscherstirn) bzw. von 78 auf 52 cm/Jahr (Bereich 2, orografisch rechter Bereich der Blockgletscherstirn). Diese Abschwächung der Dynamik ist ebenso am hochaktiven Bereich 3 in der Blockgletschermitte zu erkennen, wo der Median der Oberflächenbewegung von 114 auf 49 cm/Jahr abgenommen hat.

Tabelle 6: Jährliche, 3D-Oberflächenbewegung aus UAV-basierten Messungen (2019-2023) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar: Median und 95 %-Perzentil der Oberflächenbewegungen in drei ausgewählten Bereichen des Blockgletschers Hinteres Langtalkar (Lage der Bereiche 1 bis 3 in Abbildung 34b). Zur Darstellung realistischer Maximalwerte wurde das 95 %-Perzentil verwendet. Für das Jahr 2024 sind aus messtechnischen Gründen (vgl. Kap. 4.3) keine Daten vorhanden.

Blockgletscher Hinteres Langtalkar – 3D Oberflächenbewegung ausgewählter Bereiche in cm/Jahr						
Epoche	Bereich 1		Bereich 2		Bereich 3	
	Median	95 %	Median	95 %	Median	95 %
2019/21	169	205	171	248	227	399
2021/22	105	181	78	126	114	261
2022/23	80	134	52	75	49	138
2023/24	-	-	-	-	-	-

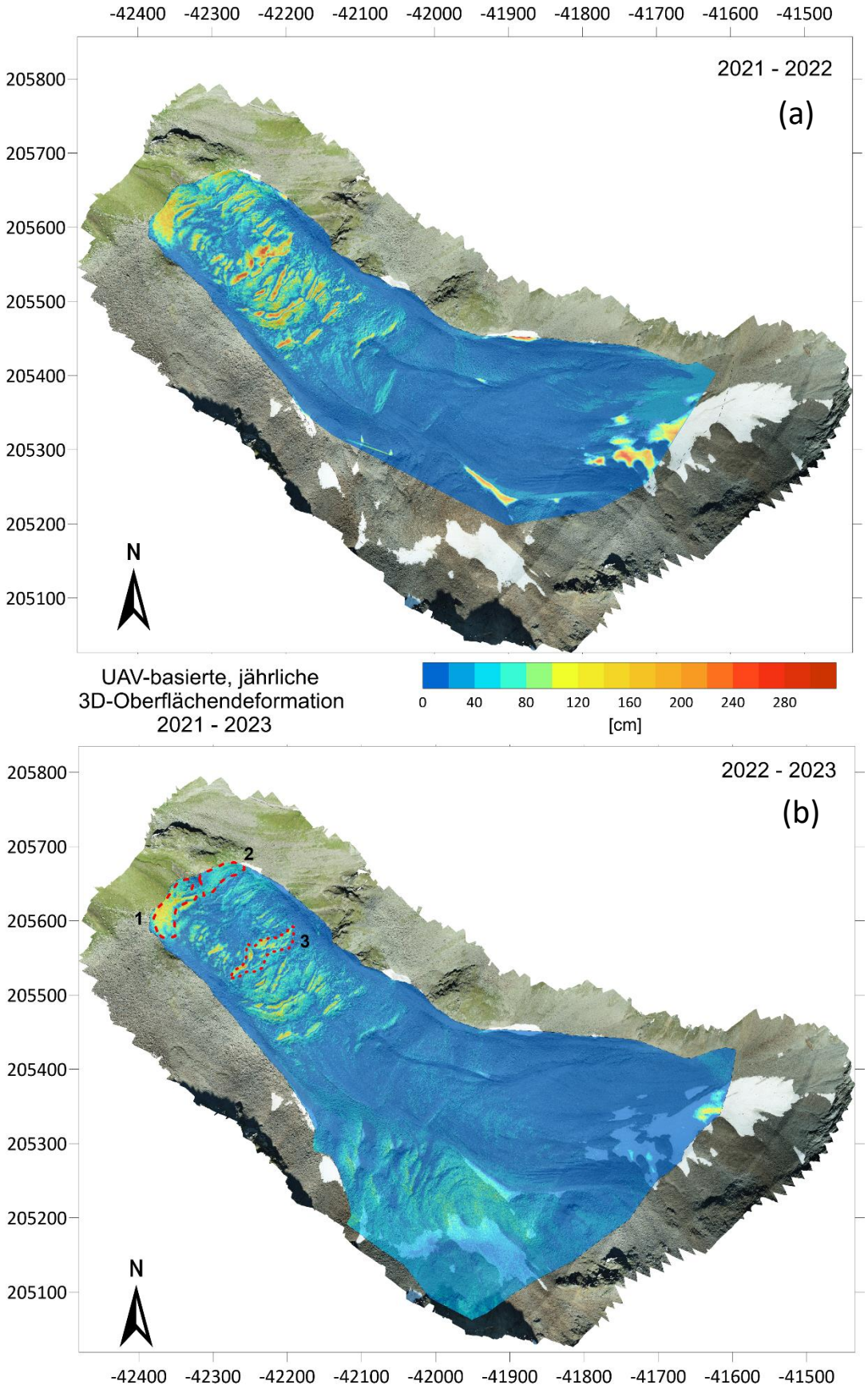

Abbildung 34: Jährliche Oberflächenveränderung (3D-Oberflächendeformation in cm/Jahr) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar für die Beobachtungsperioden 2021/22 (a) und 2022/23 (b), abgeleitet aus entsprechenden Geländemodellen, berechnet aus UAV-basierten, optischen Bildaufnahmen. Ziffern 1-3 bezeichnen die ausgewählten Bereiche zum Vergleich der Oberflächendynamik (siehe Tabelle 6). Geometrische Auflösung 5 cm. Koordinatensystem: MGI/Austria GK M31 – EPSG: 31258.

Felssturzbereiche Mittlerer Burgstall im mehrjährigen Vergleich

Der Felssturzbereich am Mittleren Burgstall zeichnete sich in der gesamten Beobachtungsperiode 2020 bis 2024 als hochdynamisch aus. In Abbildung 35 sind vier Teilgebiete (1–4) am instabilen Südost-Rücken des Mittleren Burgstalls ausgewiesen, die einen beispielhaften Eindruck über die zeitlichen Veränderungen der Oberflächenbewegung und somit der Massenverlagerung geben (siehe 7).

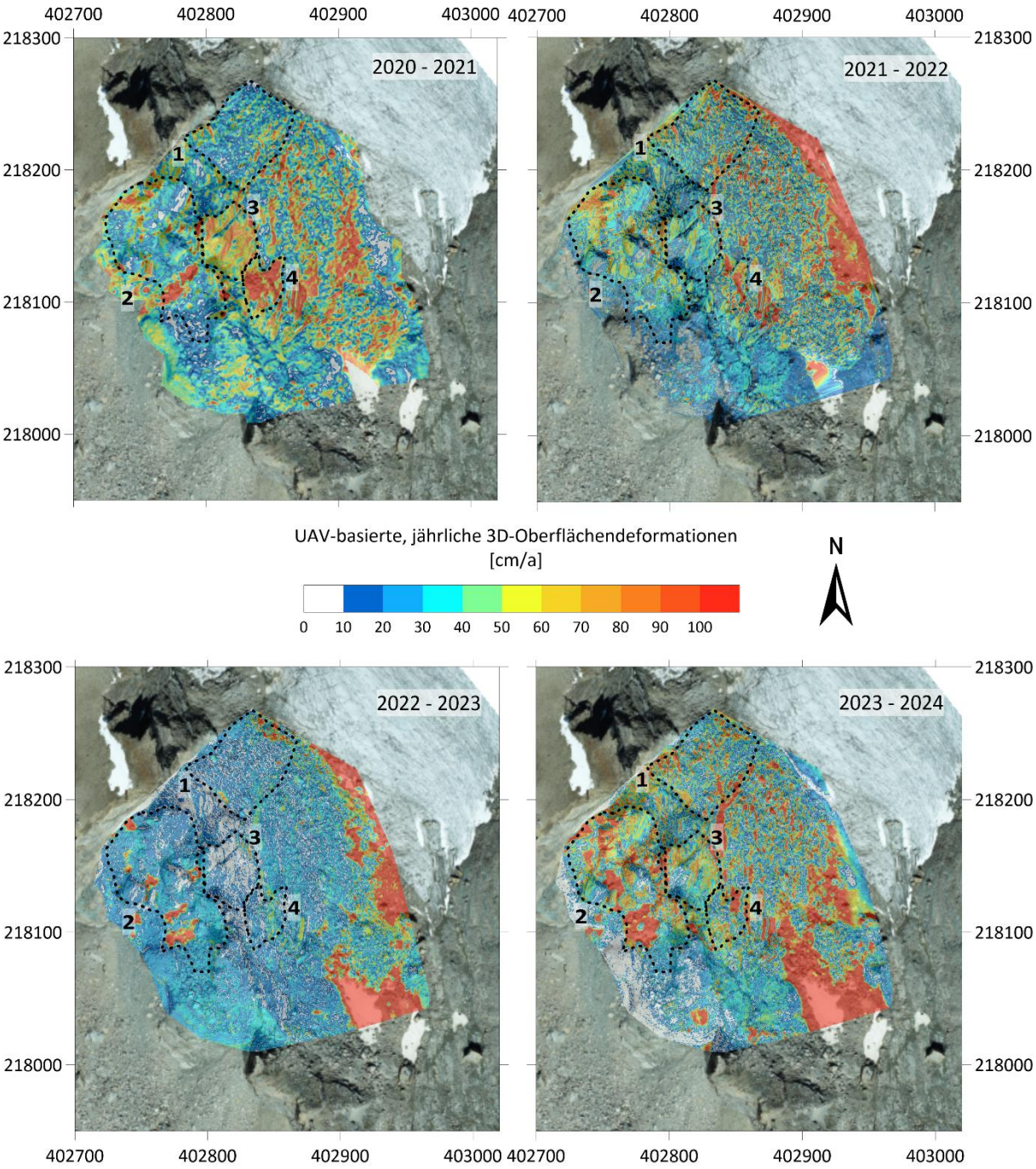

Abbildung 35: Oberflächenbewegungen (räumliche Verteilung der Bewegungsbeträge laut Legende) am Mittleren Burgstall in den vier Beobachtungsjahren 2020/21 bis 2023/24 aus UAV-basierten Messdaten. Die Ziffern 1-4 beschreiben die Bereiche 1-4 in Tabelle 5 und 7. Orthofotos generiert aus UAV-basierten, optischen Bilddaten. Geometrische Auflösung 5 cm. Koordinatensystem: MGI/ Austria GK M31 - EPSG: 31258.

Die Auswertung der 3D-Bewegungsbeträge der Epoche 2023/24 im Vergleich zu 2020/21, 2021/22, und 2022/23 zeigen, dass es nach dem Abschwächen der Oberflächenbewegung zwischen 2019 und 2023 nun 2023/24 zu einer deutlichen Zunahme der Dynamik gekommen ist. Dies zeigt sich v. a. am nordwestlichen Rand zur Bewegungsgrenze hin: Hier nahm die mittlere Oberflächenbewegung im Bereich 1 (Felsplatten) von 0,16 auf 0,37 m/Jahr und im Bereich 2 (Felskamm Nord) von 0,23 auf 0,34 m/Jahr zu. Diese Tendenz ist ebenso in den Maximalwerten (95 %-Perzentil) zu erkennen, wobei Oberflächenveränderungen von bis zu 0,60 m/Jahr als bemerkenswert gelten können. Am Übergang vom anstehenden Felsen zur Sturzmasse Ost zeigt sich folgendes Bild: Hier nahmen die Oberflächenbewegungen sowohl im Bereich 3 (Felsplatten) nach einem Anstieg in der Periode 2020/21 (0,62 m/Jahr) und 4 (oberster Bereich der Sturzmasse, 0,84 m/Jahr) mit 0,10 m/Jahr bzw. 0,51 m/Jahr im Vergleich zur Periode 2020/21 bis 2022/23 deutlich ab. Dem steht eine Umkehrung der Tendenz der Oberflächenbewegung zu einer deutlichen Zunahme der mittleren Oberflächenbewegung in allen Teilbereichen (Bereich 1-4) im Beobachtungszeitraum 2023/24 gegenüber: Sowohl die mittlere Oberflächenbewegung in den einzelnen Bereichen nahmen von 0,16-0,32 m/Jahr auf 0,34–0,37 m/Jahr deutlich zu. Dies ist auch in den Maximalwerten zu erkennen, die deutlich von 0,32–1,00 m/Jahr auf 1,56–1,61 m/Jahr zunahmen (für weitere Details siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Median und 95 %-Perzentil der Oberflächenbewegung in ausgewählten Bereichen des Mittleren Burgstalls. Die Lage der Bereiche 1 bis 4 sind in Abbildung 35 ersichtlich. Zur Darstellung realistischer Maximalwerte wird das 95 %-Perzentil verwendet.

Mittlerer Burgstall – Oberflächenbewegung ausgewählter Bereiche in [m/Jahr]								
Epoche	Bereich 1		Bereich 2		Bereich 3		Bereich 4	
	Median	95 %	Median	95 %	Median	95 %	Median	95 %
2019/20	0,78	1,25	0,93	1,75	0,23	0,63	0,33	0,87
2020/21	0,27	0,75	0,31	1,09	0,62	0,98	0,84	1,79
2021/22	0,34	0,97	0,35	0,80	0,31	0,78	0,40	1,17
2022/23	0,16	0,60	0,23	1,00	0,10	0,32	0,17	0,51
2023/24	0,37	1,61	0,34	1,56	0,37	1,59	0,37	1,58

Felssturzbereiche Hoher Burgstall im mehrjährigen Vergleich

Die Auswertungen der UAV-basierten Daten am Hohen Burgstall für die beiden Perioden 2022/23 und 2023/24 (Abb. 36) liefern folgendes Bild: Im Bereich des Aufstiegsweges zur Oberwalder Hütte können in den beiden Epochen nur einzelne Evidenzen von Sturzereignissen abgeleitet werden. Die Daten von 2022 bis 2024 zeigen aber keine wesentlichen Änderungen im Felsbereich, sondern nur die anhaltende Entglescherung des Hangfußes im Bereich des Wasserfallwinkelkeeses.

Die langfristige Beobachtung der Felswände des Hohen Burgstalls, zuerst mit TLS, seit 2022 mit UAV, erbrachten immer wieder Evidenzen von Sturzereignissen, etwa im Bereich des Aufstiegsweges zur Oberwalder Hütte. Kleinräumige Sturzereignisse waren östlich des sogenannten 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 so klein, dass UAV-basierte Analysen hierzu an ihre Grenzen stoßen. Direkt am Aufstiegsweg sind Oberflächenveränderungen teilweise auch von Menschen verursacht (Steinschlag durch Betritt). Der fortschreitende, massive Gletscherrückgang am Hangfuß ist mit großen Bewegungsbeträgen 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.

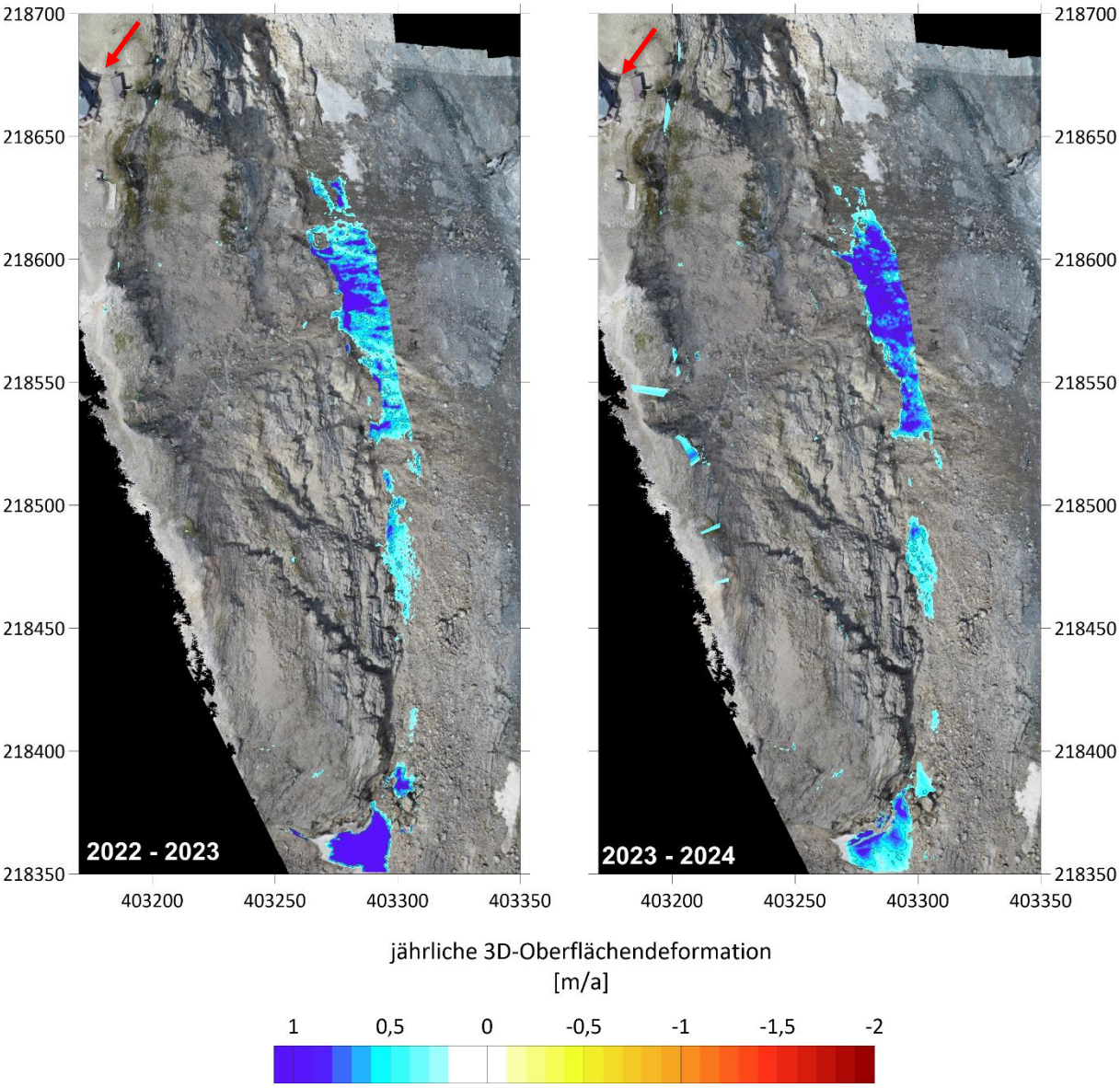

Abbildung 36: Oberflächenbewegungen (räumliche Verteilung der Bewegungsbeträge laut Legende) am Hohen Burgstall in den beiden Beobachtungsjahren 2022/23 und 2023/24 aus UAV-basierten Messdaten. Orthofotos generiert aus UAV-basierten, optischen Bilddaten. Pfeil markiert die Oberwalderhütte auf 2972 m. Geometrische Auflösung 5 cm. Koordinatensystem: MGI/ Austria GK M31 - EPSG: 31258.

5.4. Lufttemperatur-Monitoring

Einordnung des Messjahres 2023/24 in die längerfristige Datenreihe

Die Abbildung 37 zeigt den Gang der Tagesmitteltemperatur an der meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar zwischen 1.8.2013 und 31.7.2024. Die höchsten Tagesmittelwerte erreichen im Sommer 15,4 °C (im Juni 2019), die kältesten in diesem elfjährigen 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 besonders hervor, das Messjahr 2023/24 wirkt in dieser Darstellung relativ unauffällig, obschon in diesem Winter die tiefsten Temperaturen bei nur ungefähr -15 °C lagen (Rekord -15.6 °C am 25.11.2023).

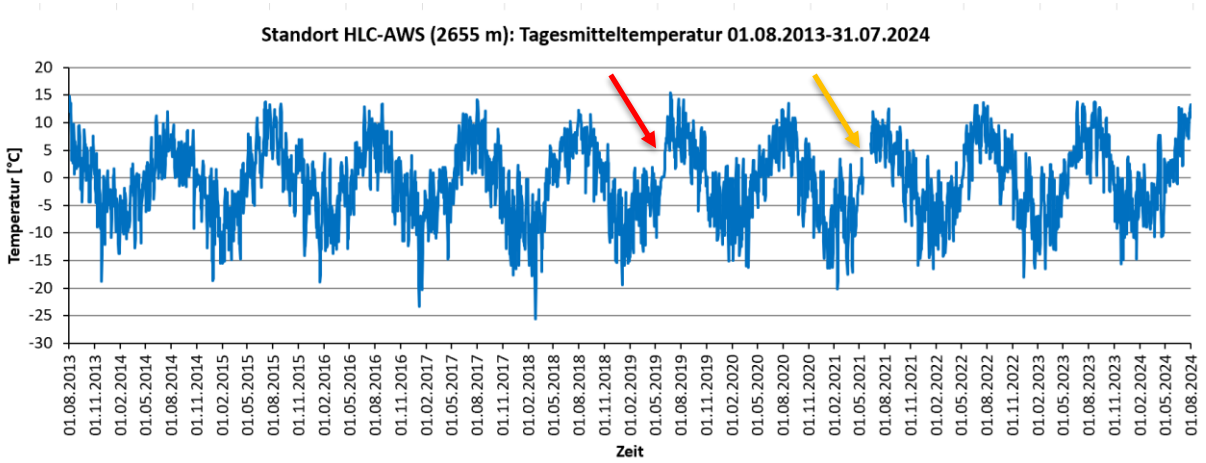

Abbildung 37: Tagesmittel der Lufttemperatur an der meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar (2655 m) zwischen 1.8.2013 und 31.7.2024. Die Mitteltemperatur in diesem Zeitraum beträgt -0,46 °C. Fehlwerte bedingt durch Schnee zwischen Mitte Mai und Mitte Juni 2019 (Pfeil rot); Sensorausfall Mitte Mai bis Mitte Juni 2021 (Pfeil dunkelgelb).

Wie bereits im Kapitel 4.4. ausgeführt, verhalten sich die Veränderungen der Lufttemperatur an den beiden Stationen im Hinteren Langtalkar sowie in der Dösen sehr ähnlich zueinander, wobei im Jahresmittel die Station im Hinteren Langtalkar trotz etwas höherer Lage um rund 0,55 °C wärmer ist. Abbildung 38 stellt die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur der beiden meteorologischen Stationen einander gegenüber. Der Verlauf ist an beiden Stationen recht ähnlich. Der Temperaturanstieg an den beiden Standorten ist im Beobachtungszeitraum in beiden Fällen statistisch signifikant und ergibt eine mittlere Erwärmungsrate von rund 0,10 °C/Jahr für die Station in der Dösen und sogarca. 0,12 °C/Jahr für die Station im Hinteren Langtalkar. Diese Erwärmungstrends sind somit teilweise mit jenen der Bodentemperatur vergleichbar (PAG-UP-S mit 0,0956 °C/Jahr) vergleichbar oder liegen darüber. Auffällig ist in der Abbildung 38 auch, dass das letzte Beobachtungsjahr das bei Weitem wärmste war.

Abbildungen 39 und 40 zeigen schließlich die Entwicklung der Monatsmitteltemperaturen für Jänner und Juli für die Zeitperiode 2007 bis 2024 für beide Stationen. Datenlöcher darin konnten durch Korrelationsanalyse mit den benachbarten Stationen Dösen oder Hoher Sonnblick geschlossen werden (nach dem Ansatz in Kellerer-Pirklbauer und Kaufmann 2012). Wie diese Abbildungen zeigen, sind die Entwicklungen für beide Monatswerte unterschiedlich. Bei den Jännertemperaturen fällt auf, dass die Schwankung von Jahr zu Jahr sehr groß ist und sich für beide Standorte sogar eine leichte Abkühlungstendenz zeigt, die aber bei Weitem nicht signifikant ist. Die Julitemperaturen hingegen scheinen seit 2007 tendenziell höher geworden zu sein, wobei vor allem seit 2016 (nach sehr hohen Werten im Jahr 2015) ein relativ klarer Trend erkennbar ist. Nichtsdestotrotz muss aber festgehalten und betont werden, dass es in beiden Monaten keinen statistisch signifikanten Trend der Temperaturveränderung an der Station in der Dösen gibt. Im Hinteren Langtalkar hat zumindest die Entwicklung der Julitemperatur mittlerweile eine statistische Signifikanz erreicht, die mit einem r-Wert von 0,5 und einem p-Wert von 0,034 aber noch recht schwach ausgeprägt ist.

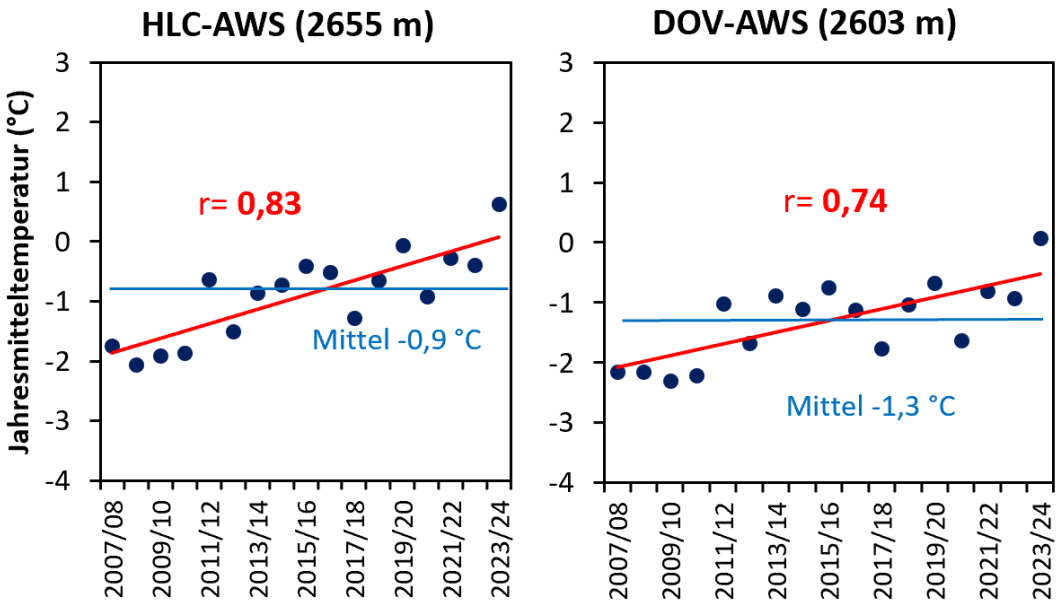

Abbildung 38: Jahresmittel der Lufttemperatur an den beiden meteorologischen Stationen im Messnetz für den Zeitraum 1.8.–31.7. des Folgejahres für die Messjahre von 2007/08 bis 2023/24. Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten sind dargestellt. Beide sind statistisch signifikant (beide p<0,01 – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1 %). Zu beachten die gleiche Skalierung der Ordinaten.

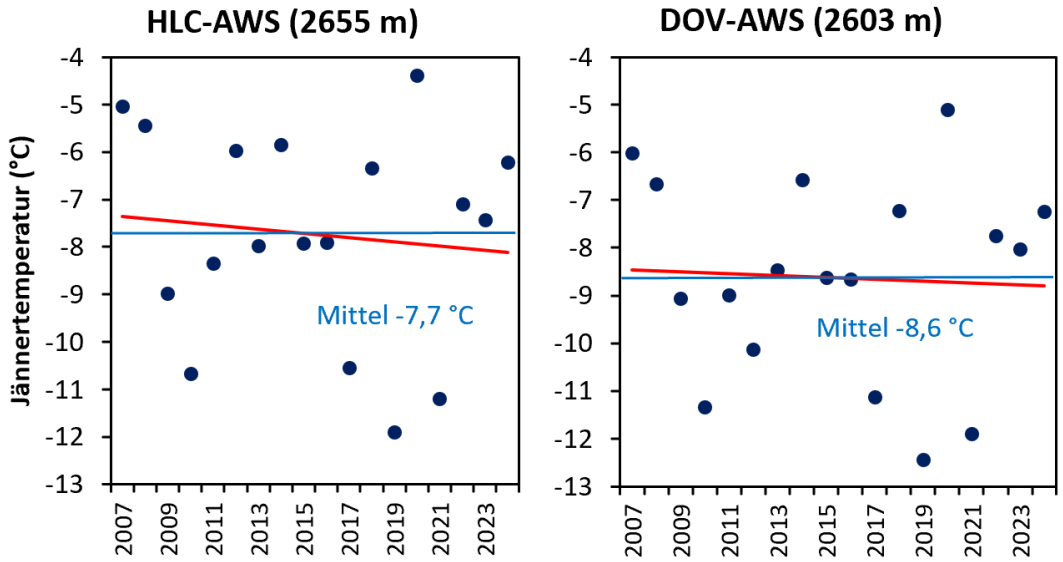

Abbildung 39: Jännermittel der Lufttemperatur an den beiden meteorologischen Stationen im Messnetz für die Messjahre von 2007/08 bis 2023/24. Lineare Trends sind dargestellt, die Korrelationen sind jedoch statistisch nicht signifikant. Zu beachten die gleiche Skalierung der Ordinaten.

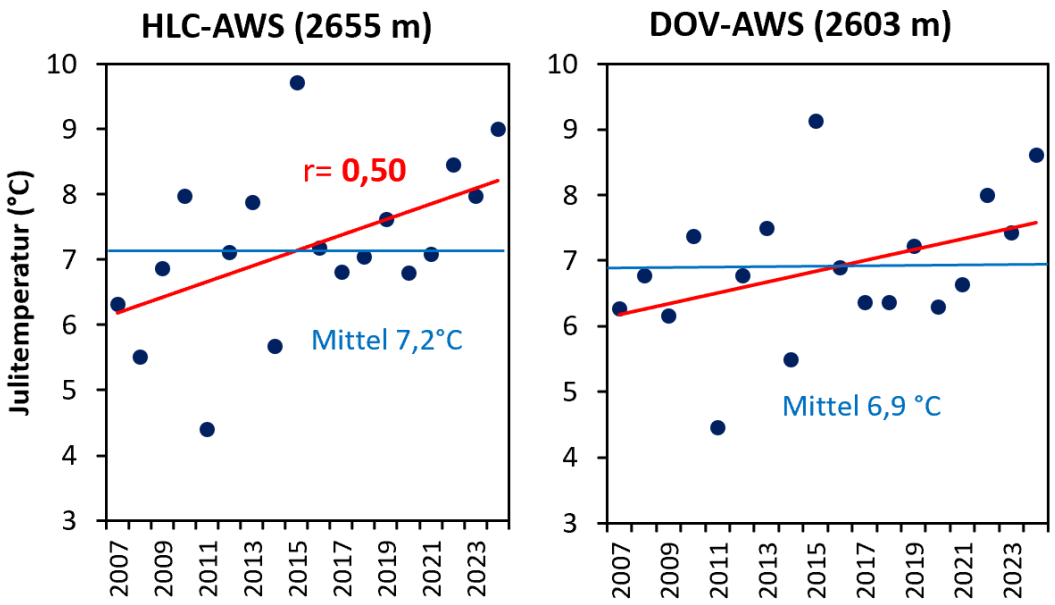

Abbildung 40: Julimittel der Lufttemperatur an den beiden meteorologischen Stationen im Messnetz für die Messjahre von 2007/08 bis 2023/24. Lineare Trends sowie ein entsprechender Korrelationskoeffizient für HLC-AWS sind dargestellt. An dieser Station ist die Entwicklung statistisch signifikant ($p<0,05$ – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 5 %). Zu beachten die gleiche Skalierung der Ordinaten.

6. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Das letzte Beobachtungsjahr 2023/24:

Ausnahmslos alle dargestellten Beobachtungs- und Messergebnisse weisen das letzte Berichtsjahr als außerordentlich permafrostungünstig aus.

- Bei den Bodentemperaturen wurden an nahezu allen Messstandorten neue Maxima der Jahrestemperaturen registriert, daneben auch an vielen neue maximale Tagesmittelwerte. Hierfür sind zwei Faktoren hauptverantwortlich, und zwar zum einen die frühe Ausbildung einer Winterschneedecke, welche die Auskühlung des Untergrundes im Herbst verhinderte, und zum anderen die hohen sommerlichen Lufttemperaturen, die verknüpft mit intensiver Einstrahlung die Winterschneedecke rasch dezimierte. Daran konnte auch die Tatsache nichts ändern, dass die Winterschneedecke sich relativ lange in den Frühsommer hinein hielt.
- Die Bewegungsraten der Blockgletscher erbrachten zwar keine neuen Maxima, stiegen aber doch gegenüber der letzten Berichtsperiode an und liegen insgesamt auf einem hohen Niveau. Bedenkt man die Verzögerung, bis sich höhere Untergrundtemperaturen in höheren Bewegungsraten kriechenden Permafrostes niederschlagen, so darf im kommenden Berichtsjahr von weiter steigenden Bewegungsraten ausgegangen werden.
- Auch wenn im Berichtsjahr keine spektakulären Massenbewegungen stattfanden, haben sich doch auch in diesen Milieus die Bewegungsraten erhöht – konkret quantifizierbar im Felssturz- und Kammbereich unterhalb des Mittleren Burgstalls. Hinzu kommen Einzelbeobachtungen, die ebenfalls auf eine weitere Destabilisierung des Untergrundes in Permafrostgebieten mit voranschreitender Permafrost-Degradation hinweisen. Beispiele hierfür sind etwa die Labilisierung der Felsblöcke an der südseitigen Gipfelflanke des Säulecks, wodurch der dortige Logger verschüttet wurde, sowie neue große Felsblöcke auf hoch gelegenen Gletscherflächen im Umkreis der Pasterze. Schon außerhalb der Beobachtungsperiode, aber prozessual diese Überlegungen bestätigend, ereignete sich am 8.9.2024 ein mittleres Felssturzereignis am Glocknerkamp (unterhalb des Großglockners), das von G. K. Lieb zufällig fotographisch dokumentiert werden konnte und worüber im nächsten Bericht Details zu finden sein werden.
- Auch bei den Lufttemperaturen wurden an den beiden meteorologischen Stationen, die Teil des gegenständlichen Messnetzes sind, neue Maxima der Jahresmitteltemperaturen registriert. Dies passt gut zum übergeordneten Bild des alpenweiten Temperaturgeschehens, worin etwa das Kalenderjahr 2024 als bisher wärmstes erscheint. Im Berichtsjahr lagen die Lufttemperaturen in 11 Monaten über den langjährigen Durchschnitten.

Der Blick auf die Beobachtungsperiode 2022-24 und darüber hinaus:

Ganz allgemein kann festgestellt werden, dass das außerordentlich permafrostungünstige letzte Berichtsjahr 2023/24 dem relativ dazu günstigeren Berichtsjahr 2022/23 gegenübersteht und in gewisser Weise besser mit 2021/22, das sich ebenfalls als sehr ungünstig für den Permafrost erwies, verglichen werden kann. Dennoch muss klar festgestellt werden, dass nicht nur die Periode seit 2022, sondern der gesamte Zeitraum des gegenständlichen Monitorings seit 2006/07 als von zunehmender Permafrostungunst geprägt bezeichnet werden muss.

- Dies zeigt sich besonders deutlich an den Bodentemperaturen, wobei an drei von vier näher analysierten Standorten signifikante Erwärmungstrends (langfristig um bis zu 0,1 °C/Jahr; im

Mittel um 0,08 °C/Jahr) festgestellt werden können. Diese Entwicklungen gipfelten in jeweils neuen Maxima der Bodentemperatur-Jahresmittel im letzten Berichtsjahr 2023/24, nachdem es schon in den Jahren zuvor jeweils neue Maxima an verschiedenen Standorten gegeben hatte. Auch wenn einzelne schneearme Winter wie zuletzt 2022/23 eine Abkühlung des Untergrundes ermöglichen, wird dieser positive Aspekt für die mögliche Regeneration des Permafrosts durch die übernormal temperierten und strahlungsreichen Hochsommer mit frühem Abschmelzen der Schneedecke, die die Kälte im Untergrund konserviert, zunichte gemacht.

- Die gegenüber dem thermischen Geschehen um 1-2 Jahre retardierte Oberflächenbewegung der Blockgletscher erreichte 2021/22 ihr letztes Maximum, ging danach ein wenig zurück und stieg im letzten Berichtsjahr 2023/24 wieder etwas an. Das hohe Bodentemperaturniveau dieses letzten Berichtsjahres macht nach den bisherigen Erfahrungen einen weiteren Anstieg der Bewegungsraten wahrscheinlich. Diese Aussage ist jedoch unsicher, da man zwar weiß, dass hohe Temperaturen die Deformierbarkeit des Eises erhöhen und insgesamt mehr Wasser durch erhöhten hydrostatischen Druck in den internen Abflusssystemen der Blockgletscher deren Dynamik erhöht, nicht jedoch, wie die zugrundeliegenden Prozesse im Einzelnen interagieren. Jedes weitere Messjahr ist damit auch ein Mosaikstein zum besseren Prozessverständnis der Blockgletscher-Kinematik.
- Die Dynamik der beobachteten Massenbewegungen ähnelte stark jener der Blockgletscher mit Rückgang in den ersten Jahren des laufenden Jahrzehnts – in guter Übereinstimmung mit den alpenweiten Verhältnissen (Pellet et al. 2021-2024) – und einer erneuten Zunahme im letzten Berichtsjahr 2023/24. In beiden Systemen deutet sich daher noch nicht das vollständige Verschwinden des Eises (Permafrost-Degradation) und somit deren Stabilisierung an. Die seit 2019 der Quantifizierung von Massenumlagerungen zugrundeliegenden Auswertungen von drohnen- (UAV-)basierten Aufnahmen hat sich bewährt und erleichtert flächendeckende Analysen der Bewegungsdynamik, auch wenn dies im letzten Berichtsjahr 2023/24 für den Blockgletscher im Hinteren Langtalkar (aus den in Kapitel 4.2 genannten Gründen) nicht möglich war. Die im letzten Bericht angekündigte Installation einer automatischen Kamera zur besseren Überwachung des Felssturzes am Mittleren Burgstall ist ebenso wie eine geologische Detailaufnahme und Prozessmodellierung erfolgt, sodass in Zukunft noch detailliertere Aussagen über diesen interessanten Massenbewegungs-„Hotspot" getroffen werden können.
- Für die Ergebnisse des Lufttemperatur-Monitorings an den beiden Messstationen gilt sinngemäß dasselbe wie für die Bodentemperaturen. Nach den Rekorden an beiden Stationen im Beobachtungsjahr 2019/20 nahmen die Jahresmitteltemperaturen zwischenzeitlich wieder ab, erreichten jedoch im letzten Berichtsjahr jeweils einen neuen Maximalwert. Während die Monatswerte der Lufttemperaturen hohe interanuelle Variabilitäten aufweisen und daher keine klaren Trends erkennen lassen, zeichnet sich für die Jahreswerte an beiden Stationen ein signifikanter Anstieg der Jahresmitteltemperaturen ab, mit Werten von rund 0,10 °C/Jahr in der Dösen und sogar 0,12 °C/Jahr im Hinteren Langtalkar.

7. Gesamtbewertung und Ausblick

Nachdem in den letzten Berichten jeweils mit Formulierungen wie etwa „die permafrostungünstigen Bedingungen der letzten Jahre setzen sich im Kärntner Teil des Nationalparks Hohe Tauern fort“ geschlossen wurde, darf im gegenständlichen Bericht die Formulierung schärfer ausfallen: Die Permafrost-Ungunst hat im Berichtsjahr 2023/24 ein in Bezug auf die bisherige langjährige Beobachtungsreihe (seit 2006/07) beispielloses Ausmaß erreicht. Diese Aussage gewinnt an Gewicht, wenn man bedenkt, dass schon die Vorjahre allesamt – keineswegs nur das besonders warme Jahr 2019/20 – ausgesprochen permafrostungünstig waren und die Permafrostungunst – mit durchwegs hohem Niveau der Boden- und Lufttemperaturen – nur graduell variierte.

Die Witterungsbedingungen, die dazu führen, sind seit Langem wohl bekannt und bestätigen sich in den Ausführungen der Einzelberichte dieses Monitoring-Programms stets von Neuem. Ein später Aufbau der winterlichen Schneedecke erlaubt die effiziente Auskühlung des Untergrundes, frühes „Einschneien“ speichert die Sommerwärme im Untergrund und erlaubt keine Reaktivierung oder zumindest Erhaltung des Permafrostes. Im Berichtsjahr 2023/24 bildete sich – als Folge der niederschlagsreichen Witterung im November 2023 – schon früh im Herbst eine mächtige Winterschneedecke aus und schuf somit ungünstige Voraussetzungen für den Permafrost. Späte Schneefälle im Mai und Juni verlängerten zwar die Schneedeckendauer in den Frühsommer hinein, doch sind die Sommer längst so warm und strahlungsreich, dass diese schützende Schneedecke meist noch im Laufe des Julis so weit reduziert ist, dass sie nur wenige Messstandorte in diesem Monat dann auch noch bedeckt. Wiederum pointiert formuliert: Die Hohen Tauern sind bis ins 3000 m-Niveau ab dem Hochsommer keine Schneeflecken-Landschaft mehr, wie die Bildfolge in Abbildung 4 exemplarisch zeigt. Da Schneeflecken geringe Auftautiefen in ihrer Umgebung anzeigen, ist diese Beobachtung ein untrügliches Zeichen für die Zunahme der Auftautiefen und die damit verbundene Inaktivierung des Permafrostes. Auch wenn die Auftautiefen im gegenständlichen Monitoring aus finanziellen Gründen nicht gemessen werden, besteht daher kein Zweifel an deren Zunahme.

Die Bewegungsraten im kriechenden Permafrost und den anderen durch das gegenständliche Monitoring erfassten Massenbewegungen bleiben, unbeschadet geringer interannueller Variationen – etwa bedingt durch unterschiedliche Wasserverfügbarkeit in Abhängigkeit vom Niederschlag –, auf hohem Niveau. Die zuletzt wieder geringfügig steigenden Bewegungsraten belegen, dass die Permafrostkörper noch hohe Eisanteile aufweisen und noch nicht in jenem (zukünftig zu erwartenden) Stadium sind, bei dem die Bewegungsraten aufgrund des Ausschmelzens des Permafrosteises (Permafrost-Degradation) immer geringer werden, bis die Bewegung zuletzt zum Erliegen kommt. Es darf angenommen werden, dass diese Inaktivierung bei manchen Blockgletschern auch im Kärntner Anteil der Hohen Tauern längst stattfindet oder schon abgeschlossen ist, doch werden diese nicht von uns beobachtet. Während durch die Permafrost-Degradation kriechende Schuttmassen (Blockgletscher) ihre Bewegung langfristig beenden und sich das Material daher stabilisiert, ist eine solche Stabilisierung bei den übrigen Massenbewegungen nicht zu erwarten – so etwa sind Felswände mit aktivem Permafrost stabiler als solche mit degradiertem. Zwischen dem Zeitpunkt des Verschwindens des Permafrosts aus einer Felswand oder Steilflanke und jenem, an dem sich ein neuer Gleichgewichtszustand einstellt, können lange Zeiträume liegen, in denen Frequenzen (Häufigkeiten) und Magnituden (Größen) von Massenbewegungs-Ereignissen erhöht sind. Genauere Angaben hierzu

können nicht getätigt werden, da es hierzu in der Forschung sowohl an Prozessverständnis als auch an einer ausreichenden Zahl dokumentierter Ereignisse sowie von Monitoring erfasster Flächen mangelt. Das gegenständliche Monitoring trägt zum Ausgleich beider Wissensdefizite bei.

Zusammenfassend können folgende Aussagen – ganz ähnlich wie in den letzten Berichten – getroffen werden: Die Ergebnisse sowohl des letzten Berichtsjahres 2023/24 als auch der letzten Projektperiode passen zu der langfristig herrschenden – mit der globalen, anthropogen verstärkten Erwärmung zu begründenden – Periode mit ungünstigen Bedingungen für den Permafrost (und die Gletscher). Für den Kärntner Teil des Nationalparks ist diese Tendenz nunmehr seit dem Messjahr 2007/08 – für die Blockgletscherbewegung auch schon länger – kontinuierlich dokumentiert, wobei die Datenreihe allmählich jene Länge gewinnt, die für eine zunehmende Zahl von Parametern statistisch signifikante Aussagen ermöglicht. Auf den Punkt gebracht: Der Permafrost steht (ebenso wie die Gletscher) nicht mehr mit den herrschenden klimatischen Bedingungen im Einklang. Die Tiefe der Auftauschicht nimmt zu, deren winterlicher Abbau ist nicht mehr gewährleistet und auch die schneelosen Sommer verändern das Temperaturregime des Untergrundes zulasten des Permafrostes. Was an Permafrost (und Gletschereis) noch vorhanden ist, ist ein Relikt früherer klimatischer Bedingungen und im Begriff zu verschwinden. Dieser Prozess ist dynamisch in Gang – daran ändert auch die verglichen mit Gletschern trägere Reaktion des Permafrostes auf den Klimawandel nichts – und verändert die Geo- und Ökosysteme im Hochgebirge massiv. Es ist ein Gebot der Stunde, diese Veränderungen weiterhin wissenschaftlich exakt zu verfolgen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der vier Arbeitsgebiete im Nationalpark Hohe Tauern in Kärnten (1, 3, 4) bzw. in seinem Nahbereich (2), in denen die gegenständlichen Untersuchungen durch die Universität Graz, die Technischen Universität Graz sowie die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (seit 1.1.2023 und somit in dieser Projektphase unbenannt in „GeoSphere Austria") gemeinsam durchgeführt werden, sowie die modellierte Verbreitung von Permafrost in Österreich nach Boeckli et al. (2012) und die kartierte Verteilung von Gletschern nach Paul et al. (2020). Karte: A. Kellerer-Pirklbauer. 4

Abbildung 2: Standort DOV-UP-S am 30.8.2022 (a) und 27.8.2024 (b): Bedingt durch labile Verhältnisse im Bereich der großen Blöcke am Standort DOV-UP-S kam es vor dem 27.8.2024 zu Materialbewegungen mit Blockkippung. Dadurch wurde der Datenlogger von Blöcken begraben. Per Funk ist dieser jedoch noch ansprechbar. Der Pfeil markiert einen markanten Block in beiden Abbildungen, der ebenfalls verkippte. Das strichliertes Oval kennzeichnet den bewegten Bereich um den Datenlogger. Ein Ersatzstandort (DOV-UP-S2) wurde 2024 in ca. 25 m horizontaler Distanz und ca. 5 m höher als zuvor eingerichtet (c) und (d). Fotos. A. Kellerer-Pirklbauer. 5

Abbildung 3: Für die Geländearbeit unvorteilhafte Witterungs- und Schneeverhältnisse im Zuge der Geländearbeit am (a) 9.9.2024 im Arbeitsgebiet Fallbichl-Hochtor und am (b) 24.9.2024 im Arbeitsgebiet Pasterze-Burgstall. Fotos: A. Kellerer-Pirklbauer. 6

Abbildung 4: Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar: Verteilung von Schneeflecken im Hinteren Langtalkar am bzw. um den Blockgletscher am (a) 15.8.2019, (b) 12.8.2020, (c) 2.9.2021, (d) 3.9.2022, (e) 10.8.2023 und (f) am 29.8.2024. Der Pfeil markiert in jedem Foto den Standort HLC-RT, der in den ersten drei hier gezeigten Jahren unter Schnee lag. Das Foto von 2024 zeigt auch, dass im Bildausschnitt in den letzten Augusttagen kein nennenswerter Restschnee mehr lag. 6

Abbildung 5: Ergänzende Drohnenbefliegung (a) und geodätische Vermessungsarbeiten (b) am Dösener Blockgletscher durch Mitarbeiter des Instituts für Geographie und Raumforschung, Universität Graz. H. Zandler und W. Sulzer führten am 2.8.2023 erstmals an diesem Standort eine Drohnenbefliegung durch (a) – im Bildhintergrund ist die Stirn des Blockgletschers zu erkennen. Am 27.8.2024 erfolgte durch dieselben zwei Personen die erste Wiederholungsbefliegung bzw. -messung. Für Kontroll- und Genauigkeitsanalysen führten A. Kellerer-Pirklbauer und A. Dorić jeweils zeitgleich geodätische Vermessungen an Referenzpunkten (Ground Control Points/GCPs) durch. Fotos: (a) A. Kellerer-Pirklbauer; (b) A. Dorić. 8

Abbildung 6: Geodätische Vermessungsarbeiten im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar am 31.8.2024: (a) Blick von der geodätischen Basisstation (Punkt 7, 2375 m) in Richtung Hinterer Langtalsee. Im oberen Bildzentrum ist der Blockgletscher Hinteres Langtalkar, der sich über eine Geländestufe dynamisch unter Beteiligung von Rutschprozessen talabwärts bewegt, zu sehen. (b) GNSS-gestützte geodätische Einmessung des Punktes 15 im oberen Bereich des Blockgletschers Hinteres Langtalkar. David Clara mit Lotstab und aufgesetzter GNSS-Antenne (= Rover). Im Hintergrund links ist der Gipfel des Roten Knopfs (3281 m) zu sehen. Fotos: (a) W. Krämer; (b) J. Siebenhofer. 9

Abbildung 7: Geodätische Einmessung von Ground Control Points (GCP) vor (a) und am (b) Blockgletscher Hinteres Langtalkar am 22.09.2022. Im Jahr 2024 lagen keine aussagekräftigen Fotos hiervon für die

Berichtslegung vor, insofern werden zur Situationsbeschreibung die hier gezeigten verwendet, da sich die Grundprinzipien der Datenerhebung nicht verändert haben. Fotos: (a) und (b) A.M. Tilg. 10

Abbildung 8: Die gewartete automatische Kamera vor der Stirn des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar am 30.8.2024 (Standort HLC-RDC2). Die beiden Fotos zeigen (a) die installierte Kamera mit ihrer Verankerung zum Felsen sowie (b) einen Überblick des Standortes mit Blockgletscherstirn und Blockgletscherquelle. Der Pfeil markiert die Position des Standortes des Blockgletscher-Quelltemperatur-Monitorings (HLC-Q). Fotos: A. Kellerer-Pirklbauer. 12

Abbildung 9: Die Abweichung der monatlichen Temperaturen in °C (a) und des Niederschlags in % (b) zwischen August 2023 und Juli 2024 (= Berichtsjahr 2023/24) vom Mittel 1981–2010 an den drei Gebirgswetterstationen Sonnblick, Zugspitze und Säntis. Grafik: A. Kellerer-Pirklbauer; Datenquellen: GeoSphere Austria für Sonnblick, Deutscher Wetterdienst für Zugspitze, MeteoSchweiz für Säntis. ..13

Abbildung 10: Fotos von der automatischen Kamera im Hinteren Langtalkar mit Fokus auf die Wurzelzone des Blockgletschers (HLC-RDC)): Aufbau der Winterschneedecke im Herbst 2023 mit beispielhaften Fotos vom 9.9.2023 (noch komplett schneefrei) und 24.10.2023 (frühwinterliche Bedingungen im ganzen Bildausschnitt). 15

Abbildung 11: Detailkarten der vier Untersuchungsgebiete zum Permafrost-Monitoring im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten mit Lage nahezu aller Messstandorte, welche mit Miniatur-Temperaturdatenlogger ausgestattet sind, mit Stand 2024 (vgl. Tabelle 2). Die Standorte KC-LIA und KC-RID wurden 2022 neu eingerichtet, der Standort HOT-S im Jahr 2023 und der Standort DOV-UP-S2 im Jahr 2024 (Gletschermaske für Pasterze und benachbarte Gletscher nach Buckel et al. 2018). 16

Abbildung 12: Verteilung der Bodentemperatur-Monitoringstandorte: (a) Seehöhe versus Hangneigung sowie (b) Seehöhe versus Exposition aller 41 aktuell aktiven Standorte der Bodentemperatur-Messungen in den vier Untersuchungsgebieten mit Stand September 2024 (siehe Tabelle 2). Die unteren drei Diagramme zeigen die entsprechenden Boxplot-Diagramme zu den drei Parametern (c) Seehöhe, (d) Hangneigung und (e) Exposition. Details siehe Text. 18

Abbildung 13: Jahresmitteltemperatur an/nahe der Bodenoberfläche im Zeitraum 1.8.2023 bis 31.7.2024 (Messjahr 2023/24) aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten. Für HOT-SN liegen mit 2023/24 erstmals Daten vor. Der neue eingerichtete Standort DOV-UP-S2 ist hier selbstverständlich noch nicht enthalten. Standorte, die mit ND (no data) markiert sind, verfügen aufgrund technischer Probleme über keine geschlossene Datenreihe für das letzte Berichtsjahr (KC-RID) oder sind aktuell steinschlagbedingt nicht instrumentiert (KC-LO). 19

Abbildung 14: Tagesmitteltemperaturen der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten – HLC-UP-N, FAL-UP, DOV-UP-S und PAG-UP – im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten bzw. dessen Nahbereich (Standort FAL-UP) für das Messjahr 2023/24 (1.8.2023 bis 31.7.2024). Messbereiche im Winterhalbjahr mit geringer Schwankung deuten auf Dämpfungseffekte durch eine mächtige Schneedecke (> 80 cm) hin (Erläuterungen im Text). In Grau sind die Tagesmittelwerte der automatischen meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS) dargestellt. 22

Abbildung 15: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Dösener Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2023/24. Punktnummern in Gelb, 11 zentrale Punkte (10-17, 21-23) mit schwarzgefüllten Kreisen, Bewegungsraten (cm/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. ±2-3 cm/Jahr. Orthophoto 20.9.2010 © Land Kärnten. 24

Abbildung 16: Vergleich der mittleren jährlichen Oberflächenbewegung am Dösener Blockgletscher für den Zeitraum 1954-2024, berechnet aus allen 34 Messpunkten (rot) bzw. den 11 zentralen Messpunkten (blau). Die Bewegungsraten vor 1995 wurden photogrammetrisch ermittelt. 24

Abbildung 17: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 33 am Blockgletscher im Hinteren Langtalkar mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2023/24. Punktnummern in Gelb, Bewegungsraten (m/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. ±2-3 cm/Jahr. Eine maximale Bewegungsrate von 3,48 m/Jahr wurde am Punkt 27 gemessen. Die Punkte 21, 24, 25 und 31, in der Abbildung nicht mehr ersichtlich gemacht, sind nicht mehr im Gelände auffindbar. Der Punkt 22 wurde 2023 nicht gemessen. Orthofoto 28.8.2012 © Land Kärnten.....26

Abbildung 18: Neue, im Spätsommer 2024 installierte automatische Kamera am Hohen Burgstall: (a) die neue Kamera nach erfolgter Installation am 3.9.2024; (b) Blickrichtung der Kamera am Hohen Burgstall, gezeigt an einer Aufnahme des Felssturzbereiches am Mittleren Burgstall vom 21.10.2024, 08:40 h. Kamera: Canon EOS1300D Spiegelreflex mit EF-S 18-55mm Objektiv, zeitliche Auflösung 10 min. Foto (a) M. Frießenbichler. 28

Abbildung 19: Photogrammetrisch erfasste horizontale Bewegungsraten des Dösener Blockgletschers 2023-2024. Oben: Oberflächenbewegung des Dösener Blockgletschers vom 2.8.2023 bis 27.8.2024, errechnet durch normalisierte Kreuzkovarianz der drohnenbasiert erstellten Orthofotos. Unten: Schummerungsdarstellung des Geländemodells von 2023 (räumliche Auflösung 3 cm). Datenauswertung und Grafik: H. Zandler. Koordinatensystem ETRS89 / UTM zone 33N.....29

Abbildung 20: Tages- und Monatsmittelwerte der Lufttemperatur an der meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS; 2655 m) zwischen 1.8.2023 und 31.7.2024. Die Jahresmitteltemperatur für diesen Zeitraum lag bei 0,64 °C (zum Vergleich 2022/23: -0,38 °C; 2021/22: -0,28 °C). 30

Abbildung 21: Tages- und Monatsmittelwerte der Lufttemperatur an der meteorologischen Station in der Dösen (DOE-AWS, 2603 m) zwischen 1.8.2023 und 31.7.2024. Die Jahresmitteltemperatur betrug in diesem Zeitraum 0,08 °C (zum Vergleich 2022/23: -0,92 °C, 2021/22: -0,81 °C).....30

Abbildung 22: Vergleich der Tages- (links) und der Monatsmittelwerte (rechts) der Lufttemperatur an den beiden meteorologischen Stationen im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS, 2655 m, blau) sowie in der Dösen (DOE-AWS, 2603 m, rot) zwischen 1.8.2023 und 31.7.2024. Zu beachten ist der nahezu gleichsinnige Verlauf der Temperaturkurven. 31

Abbildung 23: Bilder der automatischen Kamera im Dösental mit Fokus auf die Wurzelzone des Blockgletschers: Abbau der letzten Winterschneefelder zwischen 9.8. und 29.9.2023. 31

Abbildung 24: Bilder von der automatischen Kamera im Hinteren Langtalkar mit Fokus auf die Stirn und die Quelle des Blockgletschers: Ein Starkniederschlagsereignis löste einen sprunghaften Anstieg der Quellschüttung aus, die auch in den Wassertemperaturdaten ersichtlich war.....32

Abbildung 25: Quellschüttungsereignis am 28.8.2024 an der Quelle des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar und zeitgleiche meteorologische Bedingungen: (a) stündliche Werte der Wassertemperatur, gemessen an der Hauptquelle am Blockgletscher zwischen 27.8.2023, 0 h, und 31.8.2023, 23 h; (b) Tagessummen des Niederschlages und Tagesmitteltemperatur an der HZB-Station Heiligenblut (Nr. 113175; 1325 m) sowie der Station HLC-AWS zwischen 21. und 30.8.2023. Quelle von (b): Amt der Kärntner Landesregierung, Abteilung 12: Wasserwirtschaft, Unterabteilung Hydrographie (Kontakt Helge Vithanage). 33

Abbildung 26: Jahresmitteltemperatur an/nahe der Bodenoberfläche (Zeitraum 1.8. bis 31.7. des Folgejahres) aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten für die elf Messjahre (MJ) zwischen 2013/14 und 2023/24. Nur Jahresmittelwerte von Messjahren mit lückenlosen Datenreihen sind dargestellt. Standort KC-RID hat bisher keine einzige geschlossene Jahresdatenreihe.....34

Abbildung 27: Tagesmitteltemperaturen der Bodenoberfläche an den vier selben Standorten wie in im Abbildung 14 und 28 für den Zeitraum 1.8.2013 bis 31.7.2024 sowie deren Vergleich zur Lufttemperatur am Standort HLC-AWS. 36

Abbildung 28: Jahresmitteltemperatur der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten für den Zeitraum 1.8.–31.7. des Folgejahres für die Messjahre von 2007/08 bis 2023/24. Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten sind dargestellt. Jene für DOV-UP-S, HLC-UP-N und PAG-UP sind statistisch signifikant (alle drei $p<0,01$ – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1 %). Zu beachten die gleiche Skalierung der Ordinaten. 38

Abbildung 29: Schneedeckentage ermittelt aus den Bodentemperaturdaten (nach dem Ansatz von Staub et al. 2017) an den vier ausgewählten Standorten für den Zeitraum 1.8.–31.7. des Folgejahres für die Messjahre von 2006/07 bis 2023/24. (b) Zusammenfassendes Boxplot-Diagramm für jeden Standort. Fehlende Schneedeckendaten für Standort FAL-UP für Winter 2006/07. 39

Abbildung 30: Vergleich der mittleren jährlichen horizontalen Oberflächenbewegung der beiden Blockgletscher Dösen (zentraler Bereich) und Hinteres Langtalkar (oberer Bereich) für den Zeitraum 1995-2024. 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 Bewegungsraten am Weißenkar-Blockgletscher (Schobergruppe, Osttirol) dargestellt.....40

Abbildung 31: Vergleich der mittleren jährlichen Oberflächengeschwindigkeit der Blockgletscher Dösen (zentraler Bereich) und Hinteres Langtalkar (2 Zonen: oberer Bereich, 9 Punkte, und unterer Bereich, 6 Punkte) mit jener der Blockgletscher Weißenkar, Leibnitzkopf und Tschadinhorn im Zeitraum 1954-2024. Die Bewegungsraten sind linear skaliert.....41

Abbildung 32: Vergleich der mittleren jährlichen Oberflächengeschwindigkeit der Blockgletscher Dösen (zentraler Bereich) und Hinteres Langtalkar (2 Zonen: oberer Bereich, 9 Punkte und unterer Bereich, 6 Punkte) mit jener der Blockgletscher Weißenkar, Leibnitzkopf und Tschadinhorn im Zeitraum 1954-2024. Die Bewegungsraten sind logarithmisch (Basis 10) skaliert. 42

Abbildung 33: Vergleich der mittleren jährlichen Oberflächengeschwindigkeit der Blockgletscher Dösen (zentraler Bereich) und Hinteres Langtalkar (2 Zonen: oberer Bereich, 9 Punkte und unterer Bereich, 3 Punkte) mit jener der Blockgletscher Weißenkar, Leibnitzkopf und Tschadinhorn im Zeitraum 1954-2024. Die Bewegungsraten sind logarithmisch (Basis 10) skaliert. 42

Abbildung 34: Jährliche Oberflächenveränderung (3D-Oberflächendeformation in cm/Jahr) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar für die Beobachtungsperioden 2021/22 (a) und 2022/23 (b), abgeleitet aus entsprechenden Geländemodellen, berechnet aus UAV-basierten, optischen Bildaufnahmen. Ziffern 1-3 bezeichnen die ausgewählten Bereiche zum Vergleich der Oberflächendynamik (siehe Tabelle 6). Geometrische Auflösung 5 cm. Koordinatensystem: MGI/Austria GK M31 – EPSG: 31258.....44

Abbildung 35: Oberflächenbewegungen (räumliche Verteilung der Bewegungsbeträge laut Legende) am Mittleren Burgstall in den vier Beobachtungsjahren 2020/21 bis 2023/24 aus UAV-basierten Messdaten. Die Ziffern 1-4 beschreiben die Bereiche 1-4 in Tabelle 5 und 7. Orthofotos generiert aus

UAV-basierten, optischen Bilddaten. Geometrische Auflösung 5 cm. Koordinatensystem: MGI/ Austria GK M31 - EPSG: 31258. 45

Abbildung 36: Oberflächenbewegungen (räumliche Verteilung der Bewegungsbeträge laut Legende) am Hohen Burgstall in den beiden Beobachtungsjahren 2022/23 und 2023/24 aus UAV-basierten Messdaten. Orthofotos generiert aus UAV-basierten, optischen Bilddaten. Pfeil markiert die Oberwalderhütte auf 2972 m. Geometrische Auflösung 5 cm. Koordinatensystem: MGI/ Austria GK M31 - EPSG: 31258. 47

Abbildung 37: Tagesmittel der Lufttemperatur an der meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar (2655 m) zwischen 1.8.2013 und 31.7.2024. Die Mitteltemperatur in diesem Zeitraum beträgt -0,46 °C. Fehlwerte bedingt durch Schnee zwischen Mitte Mai und Mitte Juni 2019 (Pfeil rot); Sensorausfall Mitte Mai bis Mitte Juni 2021 (Pfeil dunkelgelb). 48

Abbildung 38: Jahresmittel der Lufttemperatur an den beiden meteorologischen Stationen im Messnetz für den Zeitraum 1.8.–31.7. des Folgejahres für die Messjahre von 2007/08 bis 2023/24. Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten sind dargestellt. Beide sind statistisch signifikant (beide p<0,01 – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1 %). Zu beachten die gleiche Skalierung der Ordinaten. 49

Abbildung 39: Jännermittel der Lufttemperatur an den beiden meteorologischen Stationen im Messnetz für die Messjahre von 2007/08 bis 2023/24. Lineare Trends sind dargestellt, die Korrelationen sind jedoch statistisch nicht signifikant. Zu beachten die gleiche Skalierung der Ordinaten. 49

Abbildung 40: Julimittel der Lufttemperatur an den beiden meteorologischen Stationen im Messnetz für die Messjahre von 2007/08 bis 2023/24. Lineare Trends sowie ein entsprechender Korrelationskoeffizient für HLC-AWS sind dargestellt. An dieser Station ist die Entwicklung statistisch signifikant (p<0,05 – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 5 %). Zu beachten die gleiche Skalierung der Ordinaten. 50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufstellung der Feldbegehungen zur Durchführung der Geländearbeit in den thematischen Teilbereichen (A) Bodentemperatur-, (B) geodätisches Blockgletscherbewegungs-, (C) Massenbewegungs- und (D) Lufttemperatur-Monitoring zwischen Juli und September 2024. 7

Tabelle 2: Auflistung der vier Untersuchungsgebiete im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten und deren Instrumentierung mit Miniatur-Temperaturdatenloggern. Lage siehe Abbildung 11. Abbildungen 14 sowie 27-29 zeigen Daten bzw. Auswertungen der jeweils grau hinterlegten Sensoren. HLC = Hinteres Langtalkar-Kögelekar, FAL = Fallbichl, HOT = Hochtor, DOV = Dösen-Säuleck, PAG = Pasterze-Burgstall. Der Code für jeden Standort besteht im Wesentlichen aus diesen Bezeichnungen in Kombination mit weiteren, internen Kürzeln; z. B. N = Nord, S = Süd. 17

Tabelle 3: Bewegungsraten am Dösener Blockgletscher für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2018/19 bis 2023/24. Die Mittelwerte wurden aus den Bewegungsraten der 11 zentralen Punkte 10-17, 21-23 gerechnet. Der diesjährige Maximalwert wurde nicht, wie in den Jahren zuvor, im Punkt 15 ermittelt, sondern im Punkt 3. Für die Punkte 28 und 29 konnte wiederholt keine signifikante Bewegung festgestellt werden. 24

Tabelle 4: Bewegungsraten am Blockgletscher Hinteres Langtalkar für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2018/19 bis 2023/24 für die beiden 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. 25

Tabelle 5: Median und 95 %-Perzentil der 3D-Oberflächenbewegung in ausgewählten Bereichen des Mittleren Burgstalls im Messjahr 2023/24. Die Lage der Bereiche 1 bis 4 sind in Abbildung 34 (Kapitel 5.3) ersichtlich. Zur Darstellung realistischer Maximalwerte wird das 95 %- Perzentil verwendet. 27

Tabelle 6: Jährliche, 3D-Oberflächenbewegung aus UAV-basierten Messungen (2019-2023) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar: Median und 95 %-Perzentil der Oberflächenbewegungen in drei ausgewählten Bereichen des Blockgletschers Hinteres Langtalkar (Lage der Bereiche 1 bis 3 in Abbildung 34b). Zur Darstellung realistischer Maximalwerte wurde das 95 %-Perzentil verwendet. Für das Jahr 2024 sind aus messtechnischen Gründen (vgl. Kap. 4.3) keine Daten vorhanden. 43

Tabelle 7: Median und 95 %-Perzentil der Oberflächenbewegung in ausgewählten Bereichen des Mittleren Burgstalls. Die Lage der Bereiche 1 bis 4 sind in Abbildung 35 ersichtlich. Zur Darstellung realistischer Maximalwerte wird das 95 %- Perzentil verwendet. 46

Literaturverzeichnis

Arenson L.U., Hoelzle M., Springman S. (2002): Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland. Permafrost and Periglacical Processes, 13 ,117–35. https://doi.org/10.1002/ppp.414

Boeckli L., Brenning A., Gruber S., Noetzli J. (2012): Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics. The Cryosphere, 6, 807–820. 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. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.03.003

Cicoira A., Marcer M., Gärtner-Roer .I, Bodin X., Arenson L.U., Vieli A. (2020): A general theory of rock glacier creep based on in-situ and remote sensing observations. Permafrost Permafrost and Periglacical Processes, 32, 139–53. https://doi.org/10.1002/ppp.2090

Dorić A. (2024): „Wo die wilden Daten wohnen" – Geländearbeit und Datenerhebung im Rahmen von Periglazial- und Glazialforschungen im Hochgebirge. GeoGraz, 74, 33–39. https://unipub.uni-graz.at/download/pdf/9898464.pdf

ECV (2025): Essentielle Klimavariable (ECV), Eintrag im Lexikon der Fernerkundung, https://www.fe-lexikon.info/lexikon/ecv (letzter am Zugriff 24.2.2025)

Eulenstein J., Kellerer-Pirklbauer A. (2024): Herkules, Permafrost und der Klimawandel: Eine umwelthistorische Betrachtung periglazialer Bedingungen am Hochtor in den Hohen Tauern. GeoGraz, 74, 20–27. https://unipub.uni-graz.at/download/pdf/9898462.pdf

GCOS-Imp (2022): The 2022 GCOS Implementation Plan (GCOS-244). World Meteorological Organization (WMO), 98p. https://library.wmo.int/idurl/4/58104 (letzter am Zugriff 24.2.2025)

GCOS-Req (2022): The 2022 GCOS ECVs Requirements (GCOS 245). World Meteorological Organization (WMO), pp. 218-219. https://library.wmo.int/idurl/4/58111 (letzter Zugriff am 24.2.2025)

GCOS-ECV (2025): Permafrost https://gcos.wmo.int/site/global-climate-observing-system-gcos/essential-climate-variables/permafrost (letzter Zugriff am 24.2.2025)

Geomechanica Inc. (2024): IRAZU 2D TUTORIAL MANUAL. In (Version 6.2)

Haeberli W. (1973): Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 9, 221–227.

Hu Y., Arenson L.U., Barboux C., Bodin X., Cicoira A., Delaloye R., Gärtner-Roer I., Kääb A., Kellerer-Pirklbauer A., Lambiel C., Liu L., Pellet C., Rouyet L., Schoeneich P., Seier G., Strozzi T. (2025): Rock glacier velocity: An essential climate variable quantity for permafrost. Reviews of Geophysics, 63, e2024RG000847. https://doi.org/10.1029/2024RG000847

Itasca (2016): PFC2D (particle flow code in 2 dimensions) manual. Version 5. Minneapolis, MN. In Itasca Consulting Group Inc.

Itasca (2018): UDEC—Universal distinct element code, Version 7.0, User's Manual. In (Version 7.0) Itasca Consulting Group.

Kaufmann V. (2016): 20 Years of Geodetic Monitoring of Dösen Rock Glaciers (Ankogel Group, Austria): A Short Review. Joannea Geol. Paläont. 12, 37–44. https://www.zobodat.at/pdf/JoanGeo_12_0037-0044.pdf

Kaufmann V. (2025): https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann (letzter Zugriff 25.3.2025)

Kaufmann V., Ladstädter R., Lieb G.K. (2006): Quantitative assessment of the creep process of Weissenkar rock glacier (Central Alps, Austria). 8th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung, Band 41, Institute of Geography and Regional Science, University of Graz, 77-86. https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/Grazer_Schriften_Band41_HMRSC-VIII_Kaufmann.pdf

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., Yang X. (eds.): Monitoring and Modeling of Global Changes: A Geomatics Perspective. Springer Remote Sensing/Photogrammetry, Springer Science+Business Media Dordrecht, 173–198. https://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-9813-6_9

Kaufmann V., Sulzer W., Seier G., Wecht M. (2019): Panta rhei: Movement change of Tschadinhorn rock glacier (Hohe Tauern Range, Austria) for the time period 1954-2017. Proceedings of the 11th ICA Mountain Cartography Workshop, May 21-25, 2018, Hvar, Croatia. To be published in http://kig.kartografija.hr/index.php/kig

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. Frontiers in Remote Sensing 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. (Hg.) (2023): 25 Jahre International Permafrost Association (IPA)-Austria: 1998–2023. Book of Abstracts. Symposium; 27.–29.9.2023, Mallnitz, Nationalpark Hohe Tauern Kärnten. https://www.parcs.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=53147

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 cirques in Austria. In: Science of the Total Environment, 621, 1397–1414. https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.087

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

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

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K. (2022): Zwischenbericht 2022 im Modul 07 – Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost, Geomorphodynamik im Rahmen des interdisziplinären, integrativen Monitoring- und Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern (Version 10/22). Forschungsraum. http://www.parcs.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=51573

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K. (2024): Mallnitz 2023 – Ein Symposium zum Jubiläum 25 Jahre Mitgliedschaft Österreichs bei der International Permafrost Association. GeoGraz, 74, 4–5. https://unipub.uni-graz.at/download/pdf/9898459.pdf

Kellerer-Pirklbauer A., Rieckh M. (2016): Monitoring nourishment processes in the rooting zone of an active rock glacier in an alpine environment. Zeitschrift für Geomorphologie 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. https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2011.00449.x

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M. (2015): Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2013/14. Unveröffentlichter Bericht für den Nationalpark Hohe Tauern Kärnten, Graz, 17 S.

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M. (2017a): Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2015/16. Unveröffentlichter Bericht für den Nationalpark Hohe Tauern Kärnten, Graz, 29 S.

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V. (2017b): The Dösen Rock Glacier in Central Austria: A key site for multidisciplinary long-term rock glacier monitoring in the Eastern Alps. In: Austrian Journal of Earth Sciences, Volume 110/2. https://dx.doi.org/10.17738/ajes.2017.0013

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. https://hal.science/hal-01816115/

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M. (2019): Permafrost-Monitoring Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2016–2018. Projektendbericht. Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz. https://www.parcs.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=42111

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M. (2020): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2018/19. Zwischenbericht. Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz. https://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 Hohe Tauern Kärnten 2019/20. Zwischenbericht. Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz. https://www.parcs.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=42106

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M., Frießenbichler M., Weyss G. (2022a): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2019–2021. Endbericht. Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz. https://www.parcs.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=50742

Kellerer-Pirklbauer A., Gärtner-Roer I., Bodin X., Paro L. (2022b): European Alps. In: Oliva M., Nývlt D., Fernández-Fernández J.M. (eds): Periglacial Landscapes of Europe. Springer, Cham. 147-224. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14895-8_9

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V. (2022c): Rock glaciers in the Austrian Alps—a general overview with a special focus on Dösen Rock Glacier, Hohe Tauern Range. In: Embleton-Hamann C. (ed.), Landscapes and Landforms of Austria, World Geomorphological Landscapes, Springer Nature, 393-406. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92815-5

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M., Frießenbichler M., Eulenstein J. (2023a): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2022–2024. 1. Zwischenbericht für 2021/22. Zwischenbericht. Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz. http://www.parcs.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=52505

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Eulenstein J. (2023b): Endbericht 2019–2022 im Modul 07 – Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost, Geomorphodynamik im Rahmen des interdisziplinären, integrativen Monitoring- und Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern. Forschungsraum. http://www.parcs.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=52647

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M., Frießenbichler M., Eulenstein J. (2024a): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2022-2024. 2. Zwischenbericht für 2022/23. http://www.parcs.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=54088

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Eulenstein J. (2024b): Bericht 2022-2023 im Modul 07 – Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost, Geomorphodynamik im Rahmen des interdisziplinären, integrativen Monitoring- und Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern (Version 04/24). Forschungsraum. http://www.parcs.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=52647

Kellerer-Pirklbauer A., Bodin X., Delaloye R., Lambiel C., Gärtner-Roer I., Bonnefoy-Demongeot M., Carturan L., Damm B., Eulenstein J., Fischer A., Hartl L., Ikeda A., Kaufmann V., Krainer K., Matsuoka N., Morra di Cella U., Noetzli J., Seppi R., Scapozza C., Schoeneich P., Stocker-Waldhuber M., Thibert E., Zumiani M. (2024c): Acceleration and interannual variability of creep rates in mountain permafrost landforms (rock glacier velocities) in the European Alps in 1995–2022. Environ. Res. Lett. 19 034022 https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad25a4

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V. (2024d): Dem Permafrost der Alpen auf der Spur: Langzeitforschung (1993–2023) im Dösental, Kärnten. GeoGraz, 74, 6–11. https://unipub.uni-graz.at/download/pdf/9898460.pdf

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. https://doi.org/10.1553/GCP_LZM_NPHT_Synthese

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. (2025): Gletscherbericht 2023/24 – Sammelbericht über die Gletschervermessungen des Österreichischen Alpenvereins im Jahr 2024. Bergauf 1/2025, 12-25.

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. https://www.parcs.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=38030.

Paul F., Rastner P., Azzoni R. S., Diolaiuti G., Fugazza D., Le Bris R., Nemec J., Rabatel A., Ramusovic M., Schwaizer G., Smiraglia C. (2020): Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2. In: Earth System Science Data 12: 1805–1821. https://doi.org/10.5194/essd-12-1805-2020

Pellet C., Bodin X., Delaloye R., Kaufmann V., Noetzli J., Thibert E., Kellerer-Pirklbauer A. (2021): Rock glacier kinematics. In: Blunden J., Boyer T., (eds.): State of the Climate in 2020. Bulletin of the American Meteorological Society, 102 (8), S44–S45. https://doi.org/10.1175/2021BAMSStateoftheClimate.1

Pellet C., Bodin X., Cusicanqui D., Delaloye R., Kääb A., Kaufmann V., Noetzli J., Thibert E., Vivero S., Kellerer-Pirklbauer A. (2022): Cryosphere – Rock glacier velocity. In: State of the Climate in 2021. Bulletin of the American Meteorological Society, 103 (8), S43–S44. https://doi.org/10.1175/2022BAMSStateoftheClimate.1

Pellet C., Bodin X., Cusicanqui D., Delaloye R., Kääb A., Kaufmann V., Noetzli J., Thibert E., Vivero S., Kellerer-Pirklbauer A. (2023): Cryosphere – Rock glacier velocity. In: State of the Climate in 2022. Bulletin of the American Meteorological Society, 104 (9), S41–S42. https://doi.org/10.1175/2023BAMSStateoftheClimate.1.

Pellet C., Bodin X., Cusicanqui D., Delaloye R., Kääb A., Kaufmann V., Thibert E., Vivero S., Kellerer-Pirklbauer A. (2024): Cryosphere - Rock glacier velocity. In: State of the Climate in 2023. Bulletin of the American Meteorological Society, 105 (8), S44–S46. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-24-0116.1

Pellet C., Bodin X., Cusicanqui D., Delaloye R., Kääb A., Kaufmann V., Thibert E., Vivero S., Kellerer-Pirklbauer A. (2025): Cryosphere - Rock glacier velocity. In: State of the Climate in 2024. Bulletin of the American Meteorological Society, Beitrag in Begutachtung.

Pfeffer H., Kellerer-Pirklbauer A., Mergili M., Kaufmann V. (2024): Der Dösener Blockgletscher: Bewegungsdynamik als Indikator des Umweltwandels. GeoGraz, 74, 12–19. https://unipub.uni-graz.at/download/pdf/9898461.pdf

RGIK (2022): Towards standard guidelines for inventorying rock glaciers: baseline concepts (version 4.2.2) IPA Action Group Rock Glacier Inventories and Kinematics p 13. https://bigweb.unifr.ch/Science/Geosciences/Geomorphology/Pub/Website/IPA/Guidelines/V4/220331_Baseline_Concepts_Inventorying_Rock_Glaciers_V4.2.2.pdf

RGIK (2023a): Rock Glacier Inventories and Kinematics (RGIK), October 2021 – September 2023, Final Report, Authors: Delaloye, R., Pellet, C., Vivero, S., Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, in the framework of GCOS Switzerland, 15 pp. https://www.meteoswiss.admin.ch/dam/jcr:65b55832-88d6-4929-821c-64e4f11b4c43/RGIK_Final_report_GCOS-website_v2.1.pdf

RGIK (2023b): Rock Glacier Velocity as an associated parameter of ECV Permafrost: Baseline concepts (Version 3.2). IPA Action Group Rock glacier inventories and kinematics, 12 pp. https://bigweb.unifr.ch/Science/Geosciences/Geomorphology/Pub/Website/IPA/CurrentVersion/Current_RockGlacierVelocity.

RGIK (2023c): Rock Glacier Velocity as an associated parameter of ECV Permafrost: Practical concepts (Version 1.2). IPA Action Group Rock glacier inventories and kinematics, 12 pp. https://bigweb.unifr.ch/Science/Geosciences/Geomorphology/Pub/Website/IPA/CurrentVersion/Current_RGV_PC.pdf

RGIK (2025): Rock Glacier Inventories and Kinematics (RGIK), IPA Standing Committee, https://www.permafrost.org/group/rock-glacier-inventories-and-kinematics-rgik

Rockfield. (2017): ELFEN Manual, Version 4,7.1. Rockfield Software Ltd. In. https://www.rockfieldglobal.com/software/elfen-forward-modelling/

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

Winkler G., Wagner T., Pauritsch M., Birk S., Kellerer-Pirklbauer A., Benischke R., Leis A., Morawetz R., Schreilechner M.G., Hergarten S. (2016): Identification and assessment of groundwater flow and storage components of the relict Schöneben Rock Glacier, Niedere Tauern Range, Eastern Alps (Austria). Hydrogeology Journal, 24, 937-953. https://doi.org/10.1007/s10040-015-1348-9

Zandler H., Sulzer W. (2024): Luftgestütztes Blockgletschermonitoring in den Hohen Tauern – und eine Premiere. GeoGraz, 74, 28–32. https://unipub.uni-graz.at/download/pdf/9898463.pdf

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

www.hohetauern.at