



forschungsraum

Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen

Modul 07 – Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost
Bericht 2022-2023

IMPRESSUM

forschungsraum

Bericht 2022-2023 zum Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen: Modul 07
– Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost

Projektleitung:

Andreas KELLERER-PIRKLBAUER und Gerhard Karl LIEB, beide Universität Graz
(Arbeitsgruppe "CASCADE – The mountain processes and mountain hazards
group", Institut für Geographie und Raumforschung)

Für den Inhalt verantwortlich:

Andreas KELLERER-PIRKLBAUER, Gerhard Karl LIEB und Julia EULENSTEIN

Titelbild:

© Andreas KELLERER-PIRKLBAUER: Das Gletscherende des Schlatenkeeses mit dem Unteren Keesboden im Jahr 2023 mit einem proglazialen See. Am rechten oberen Bildbereich deutlich erkennbar die gut ausgeprägte Ufer moräne, welche den Hochstand des Schlatenkeeses um 1850 zeigt.

Zitiervorschlag:

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Eulenstein J. (2024): 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.

Weblink: http://www.parcs.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=xxxxx

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

Mit Unterstützung vom BMK

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie





Inhalt

1. Einleitung	1
2. Methodik und Datengrundlagen	2
2.1. Methoden im Bereich Witterung und Klima	2
2.2. Methoden im Bereich Abfluss	3
2.3. Methoden im Bereich Gletscherverhalten	4
2.4. Methoden im Bereich Permafrost	5
3. Ergebnisse.....	13
3.1. Ergebnisse zum Bereich Witterung und Klima 2022-2023	13
3.2. Ergebnis Bereich Abfluss 2022-2023	19
3.3. Ergebnis Bereich Gletscherverhalten 2022-2023.....	23
3.4. Ergebnis Bereich Permafrost 2022-2023	28
4. Diskussion.....	47
5. Fazit mit Ausblick	48
Literaturverzeichnis.....	49
Abbildungsverzeichnis	52
Tabellenverzeichnis.....	56



1. Einleitung

In diesem wissenschaftlichen Bericht zum Modul 07 des Langzeit-Ökosystem-Monitorings im Nationalpark Hohe Tauern werden im wesentlichen die im ersten Bericht (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2017) festgelegten abiotischen Faktoren bzw. Prozesse (Witterung/Klima, Abfluss, Gletscherverhalten und Permafrost) für die das glaziologische Haushaltsjahr 2022/23 (01.10.2022 bis 30.09. des Folgejahres) ausgewertet und interpretiert. Dieser Bericht ergänzt somit den Zwischenbericht von 2020 (Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2020), der auf die Permafrost- und Bodentemperatur-Bedingungen an der Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels in der Venedigergruppe (Osttirol) im Gletscherhaushaltsjahr 2019/20 fokussierte, sowie die Berichte von 2021 (Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2021), 2022 (Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2022) und 2023 (Kellerer-Pirklbauer et al. 2023a), die sämtliche im Modul 07 behandelten abiotischen Faktoren bzw. Prozesse in den drei Gletscherhaushaltsjahren 2019/20, 2020/21 und 2021/22 zum Inhalt hatten. An ausgewählten Stellen werden auch in diesem Bericht wiederum Ergebnisse der Auswertungen für die Periode 2022-2023 mit den entsprechenden Daten der Jahre zuvor (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2017, 2018, Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2019a) verglichen, um die aktuellen Ergebnisse in einen längeren zeitlichen Kontext zu bringen.

Ziel dieses Berichts ist es wiederum auf der Maßstabsebene des gesamten Nationalparks und – etwas detaillierter – auf jener der drei Flusseinzugsgebiete (Seebach in Kärnten, Untersulzbach in Salzburg, Gschlössbach in Tirol) valide Aussagen zu den Veränderungen der abiotischen Faktoren Witterung, Abfluss, Gletscher und Permafrost für das Gletscherhaushaltsjahr 2022/23 zu treffen. Für diese drei untersuchten Einzugsgebiete liegen Daten für den Abfluss (Pegel am unteren Ende der dadurch definierten hydrographischen Einzugsgebiete) und für die Gletscher-Längenänderungen vor. Für den Permafrost gibt es kontinuierliche Boden- bzw. Felstemperaturreihen seit Sommer 2018 im Einzugsgebiet Innerschlöss (Messstandort Innerer Knorrkogel). Weitere Daten zum Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern wurden durch andere Monitoringprogramme erhoben, die zu einem großen Teil auch von den Zwischenberichtslegern bzw. ihren Kooperationspartnern – wie z. B. der TU Graz oder der GeoSphere Austria – betrieben werden. Ähnliches gilt für Massenbilanzmessungen an Gletschern im Nationalparkgebiet. Die Daten zum Faktor Witterung/Klima stammen nicht aus den Einzugsgebieten (Gründe hierzu siehe Lieb et al. 2019) selbst, stattdessen wird auf nahe gelegene Stationen der GeoSphere Austria und der Hydrographischen Landesdienste der drei hier relevanten Bundesländer zurückgegriffen. Für eine detaillierte Beschreibung der Einzugsgebiete wird auf den ersten Teil des Syntheseberichtes verwiesen (Lieb et al. 2019).

2. Methodik und Datengrundlagen

Für allgemeine Hinweise zur Methodik in diesem Modul wird auf Kellerer-Pirklbauer & Lieb (2019b) verwiesen.

2.1. Methoden im Bereich Witterung und Klima

Die Witterungsbeschreibung für die Messperiode 2022-2023, die in diesem Bericht im Ergebnisteil präsentiert wird, beruht auf eigenen Beobachtungen sowie auf der Interpretation der von der GeoSphere Austria verfügbar gemachten Daten und Analysen. Eine solche Beschreibung des Witterungsgeschehens ist für das Verständnis klimatisch gesteuerter Phänomene wie Permafrost und Gletscher wichtig und fließt z. B. auch in die Beurteilung der österreichweiten Gletscherveränderungen in den einzelnen Gletscherhaushaltsjahren ein (wie zuletzt in Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2024).

Witterungs- bzw. klimarelevante Daten aus dem Bereich des Nationalparks Hohe Tauern für den Zeitraum 01.10.2022–30.09.2023 wurden wiederum von Stationen der GeoSphere Austria sowie der Hydrographischen Landesdienste akquiriert, wobei Niederschlags- (Tagessummen) und Temperaturdaten (Tagesmittelwerte) verwendet wurden (Lage der Standorte siehe Abb. 1). Tabelle 1 gibt einen Überblick über die für diesen Bericht verwendeten teilautomatischen Wetterstationen (TAWES) der GeoSphere Austria. Folgendes ist zu dieser Tabelle anzumerken: Synnr. ist die GeoSphere Austria-interne Stationsnummer, Lon ist die geographische Länge und Lat die geographische Breite; RW/Rechtswert und HW/Hochwert sind die Koordinatenangaben auf Basis der Projektion BMN-M31 (ESPG 31258). Die Stationsdaten der GeoSphere Austria konnten für das gegenständliche Projekt beruhend auf einer Kooperationsvereinbarung zwischen der Universität Graz und der GeoSphere Austria kostenfrei verwendet werden.

Tabelle 1: TAWES-Stationen der GeoSphere Austria, die für die gegenständliche Studie verwendet wurden, mit Angabe des jeweiligen Beginns der verfügbaren Datenreihe. Erläuterungen siehe Text. Lage der Stationen siehe Abbildung 1.

Stationsname	Synnr.	Lon [°]	Lat [°]	RW [m]	HW [m]	Höhe [m]	Land	seit
Rudolfshütte	11138	12,625833	47,134998	396379,5	222021,0	2317	Sbg.	1992
Kolm-Saigurn	11344	12,984722	47,069443	423573,8	214548,1	1626	Sbg.	1995
Sonnblick	11343	12,957500	47,054167	421497,8	212859,4	3109	Sbg.	1891

Von Seiten der Hydrographischen Landesdienste wurden für diesen Bericht Daten von sechs Klimastationen verwendet, die Tabelle 2 auflistet. Hierzu folgende Anmerkungen: HZB-Nr. ist die interne Stationsnummer, Lon, Lat, RW und HW bedeuten dasselbe wie in Tabelle 1. Die Stationsdaten stammen vom Amt der Kärntner Landesregierung, Abteilung 12: Wasserwirtschaft, Unterabteilung Hydrographie (Kontaktperson: Helge Vithanage, helge.vithanage@ktn.gv.at), vom Amt der Salzburger Landesregierung, Abteilung 7: Wasser, Hydrographischer Dienst (Kontaktperson: Stefan Schrofner, stefan.schrofner@salzburg.gv.at) und vom Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Wasserwirtschaft, Hydrographie und Hydrologie (Kontaktperson: Martin Neuner, martin.neuner@tirol.gv.at). Angemerkt wurde von allen drei Ämtern, dass es sich bei den übermittelten Daten um (auf Plausibilität) vorgeprüfte Rohdaten handelt, die sich bei der Jahrbuchsbearbeitung eventuell noch ändern können. Weiters wurde von allen drei Dienststellen angemerkt, dass eine Weitergabe der Daten an Dritte nicht gestattet sei. Zuletzt sei darauf hingewiesen, dass es an den beiden Messstationen Neukirchen und Bramberg keine Lufttemperaturaufzeichnungen gibt.

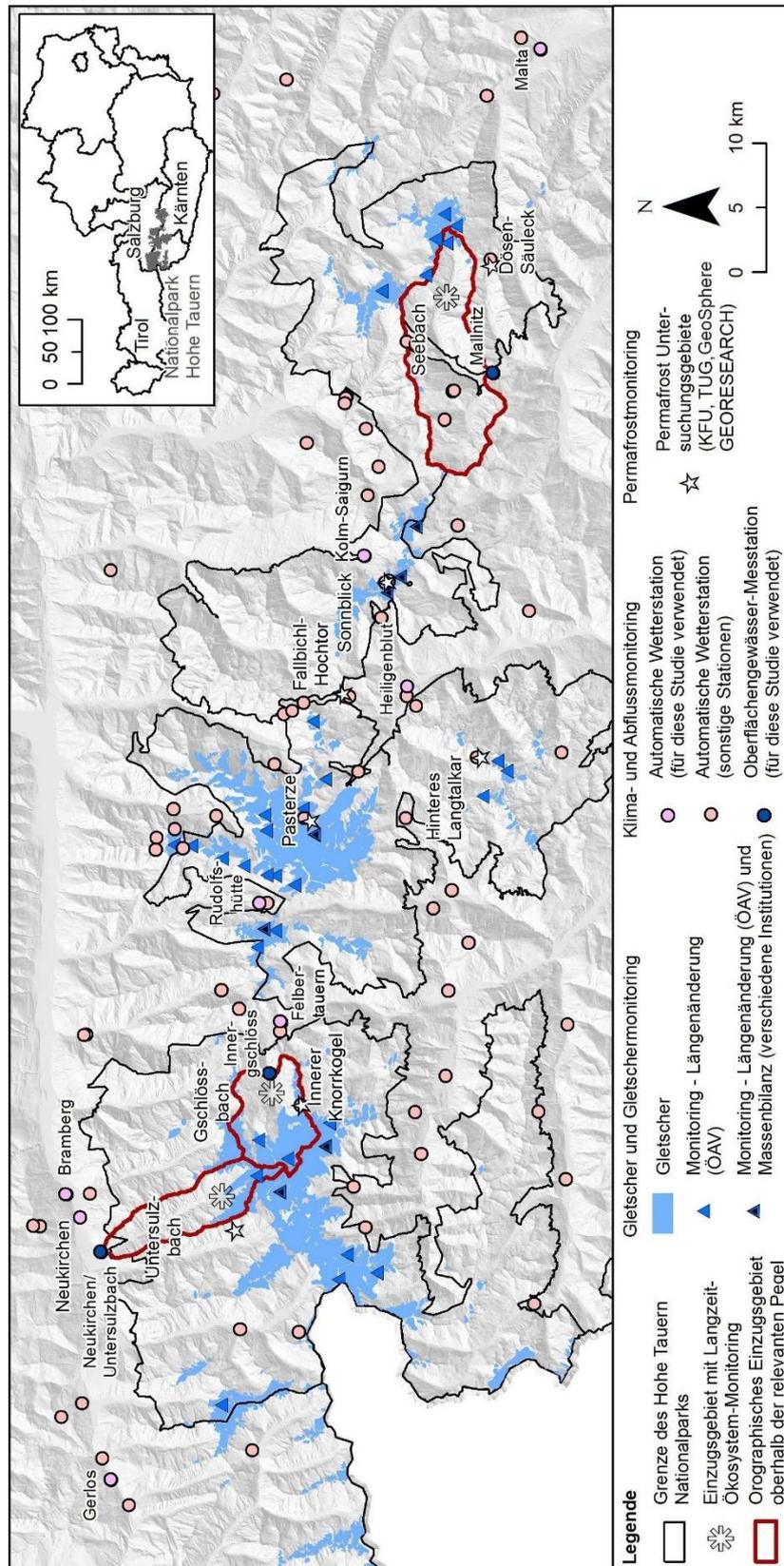


Abbildung 1: Lage der drei Untersuchungsgebiete für das Langzeit-Ökosystemmonitoring sowie die Lage der in dieser Studie verwendeten Klima- und Abflussmessstationen (GeoSphere Austria- oder HZB-Stationen), der durch Monitoring erfassten Gletscher und der Permafrost-Untersuchungsgebiete. Ergänzend sind auch alle automatischen Wetterstationen (n=85), die innerhalb des Nationalparks sowie in der näheren Umgebung installiert sind (hierzu Lieb et al. 2019), verortet. HZB=Hydrographisches Zentralbüro, KFU=Karl-Franzens-Universität Graz, ÖAV=Österreichischer Alpenverein, TUG=Technische Universität Graz, GeoSphere=GeoSphere Austria (bis 31.12.2022 Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

Tabelle 2: Klimastationen der Hydrographischen Landesdienste, die für die gegenständliche Studie verwendet wurden, mit HZB-Code (Hydrographischer Dienst Österreichs) und Beginn der verfügbaren Datenreihe. Erläuterungen siehe Text. Lage siehe Abbildung 1. (1) Datenlücke von 1.-31.3.2019. (2) nur Niederschlagsdaten (keine Temperatureaufzeichnung).

Stationsname	HZB-Nr.	Lon [°]	Lat [°]	RW [m]	HW [m]	Höhe [m]	Land	Seit
Heiligenblut	113175	12,851944	47,036667	413465,7	210958,1	1380	Ktn.	1877
Malta (1)	113399	13,506944	46,954722	463268,6	201748,5	830	Ktn.	1860
Neukirchen (2)	104059	12,297222	47,252222	371623,0	235332,2	857	Sbg.	1973
Bramberg (2)	106682	12,321111	47,263055	373447,0	236512,7	844	Sbg.	2006
Gerlos	102681	12,030000	47,224444	351343,5	232548,0	1263	Tirol	1896
Felbertauern-tunnel-Süd	114900	12,505555	47,118056	387234,7	220227,4	1650	Tirol	1979

2.2. Methoden im Bereich Abfluss

Hydrologische Daten, welche in Österreich durch die verschiedenen Hydrographischen Landesdienste gesammelt werden, sind grundsätzlich im Internet über die WebGIS-Applikation eHYD (<https://ehyd.gv.at>) frei zugänglich. Allgemein gilt für eHYD, dass die online verfügbaren Datenreihen meist nicht bis zum Ende des aktuellen Gletscherhaushaltsjahres (für 2022/23: Ende September 2023) reichen, sondern viele Monate oder sogar wenige Jahre zuvor enden. Beispielsweise konnte man am 22.4.2024 auf eHYD für die Messstelle Mallnitz die Abflusswerte (Q-Tagesmittel) nur für die Periode 01.01.1961 bis einschließlich 31.12.2021 abrufen. Diese mangelnde Aktualität der Datenreihen hängt in der Regel damit zusammen, dass die Rohdaten einen längeren Prüf- und eHYD-Einspielungsprozess durchlaufen und auch noch vom Hydrographischen Zentralbüro in Wien bestätigt werden müssen.

Da eine Station pro Einzugsgebiet für dessen hydrographische Charakterisierung ausreicht (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2018), wurden wie in den letzten Jahren die Daten der Stationen Mallnitz (für den Seebach), Neukirchen (für den Untersulzbach) und Innergschlöss (für den Gschlössbach) für die Untersuchung herangezogen. Tabelle 3 beinhaltet Metadaten zu den drei verwendeten Messstellen. Gleich wie bei Witterung und Klima wurde der Abfluss an den drei Messstellen für denselben einjährigen Zeitraum 01.10.2022 bis 30.09.2023 analysiert und in den Grafiken und Tabellen im Ergebniskapitel dargestellt.

Folgendes ist zur Tabelle 3 anzumerken: Höhe = Höhe des Pegelnullpunktes in m; o. Ezg. = orographisches Einzugsgebiet in km²; übrige Abkürzungen wie in den Tabellen 1 und 2. Die Messdaten stammen vom Amt der Kärntner Landesregierung, Abteilung 12: Wasserwirtschaft, Hydrographie (Kontaktperson: Elisabeth Gutsch, elisabeth.gutsch@ktn.gv.at), vom Amt der Salzburger Landesregierung, Abteilung 7: Wasser, Hydrographischer Dienst (Kontaktperson: Bernhard Werner, bernhard.werner@salzburg.gv.at) und vom Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Wasserwirtschaft, Hydrographie und Hydrologie (Kontaktperson: Hannes Raunigger, hannes.raunigger@tirol.gv.at). Laut Information der drei Hydrographischen Landesdienste handelt es sich auch bei den Abflussdaten der jüngeren Vergangenheit um nur vorläufig gültige (d. h. vom Hydrographischen Zentralbüro in Wien noch nicht bestätigte) Daten. Von Frau Gutsch sowie Herrn Werner wurde der konkrete Hinweis auf „Rohdaten/nicht bilanziert“ mitgeteilt. Allgemein gilt auch für die hydrologischen Daten, dass eine Weitergabe an Dritte nicht gestattet ist, wobei Projektbeteiligte ausgenommen sind.

Tabelle 3: HZB-Oberflächengewässer-Messstellen der Hydrographischen Landesdienste, die für die gegenständliche Studie verwendet wurden. Koordinaten sind als geographische Koordinaten sowie in BMN – M31 (EPSG 31258) als Rechtswert (RW) und Hochwert (HW) angegeben. Erläuterungen siehe Text. Lage siehe Abbildung 1.

Stationsname	Synnr.	Lon [°]	Lat [°]	RW [m]	HW [m]	Höhe [m]	o. Ezg. [km ²]	Land
Mallnitz	212381	13,174722	46,983056	437986,0	204896,9	1174	85,3	Kärnten
Neukirchen	203042	12,263056	47,237222	369013,8	233699,6	848	40,5	Salzburg
Innergslöss	212068	12,451944	47,124444	383174,2	220982,2	1686	39,3	Tirol



2.3. Methoden im Bereich Gletscherverhalten

(a) Längenänderung

Im Bereich des Nationalparks Hohe Tauern sind aktuell 36 Gletscher im Monitoring-Programm des Gletschermessdienstes des Österreichischen Alpenvereins (ÖAV) enthalten (Abb. 1). Die meisten beobachteten Gletscher liegen in der Glockner- (12), gefolgt von der Venediger- (9) und der Ankogelgruppe (6). Jeweils drei Gletscher werden jährlich in der Granatspitz-, der Schober- und der Goldberggruppe vermessen. Die wesentlichste Änderung im Projektzeitraum 2022-2023 betraf die Herausnahme des schwer zugänglichen Landeckkeeses (Granatspitzgruppe) ab 2023 (somit letzter Rückzugswert für diesen Gletscher im Messjahr 2022/23). An zwei Gletschern lagen für 2022/23 keine quantitativen Messwerte zur Gletscherlängenänderung vor (Obersulzbach- [Geigerzunge] und Winkelkees), jedoch konnte auf Basis von Fotovergleichen deren Tendenz klar festgestellt werden. Eine Auflistung der relevanten Gletscher befindet sich im Ergebnisteil dieser Arbeit.

Auf der Ebene der drei Flusseinzugsgebiete bietet das aktuelle Beobachtungsnetz des ÖAV-Gletschermessdienstes den Vorteil, dass der jeweils größte Gletscher darin jährlich prinzipiell vermessen wird. Diese sind das Winkelkees für das Seebachtal, das Untersulzbachkees für das Untersulzbachtal sowie das Schlattenkees für das Innerschlöss. Einschränkend muss jedoch festgehalten werden, dass das Messprogramm am Winkelkees aufgrund der erheblichen Steinschlag- und Eissturzgefahr in den Sommermonaten und der damit in Zusammenhang stehenden potenziellen Exponiertheit des dortigen Messteams unter der Leitung von Andreas Knittel und Jörg Färber gegenüber alpinen Naturgefahren bis 2022 komplett ausgesetzt war. Im Sommer 2022 konnte aber zumindest ein neuer Fotostandpunkt auf der Schneewinkelspitze (3016 m) eingerichtet werden, sodass das Winkelkees in Form einer Fotodokumentation des Gletschers wieder in das ÖAV-Messprogramm aufgenommen wurde.

Wie in Lieb et al. (2019) dargelegt, hängt es von unterschiedlichen Faktoren ab, wie viele Gletscher in den einzelnen Gletscherhaushaltsjahren tatsächlich vermessen werden können. Beispielsweise sind einschränkende Faktoren die Zugänglichkeit in den Einzeljahren (z. B. Witterungseinfluss; Bildung von Wasserflächen am Gletscherende) oder die Bedeckung der Gletscherstirn durch Schnee aus dem Vorwinter. So lag etwa an vier der fünf stationären Gletscher im Nationalpark Hohe Tauern im Gletscherhaushaltsjahr 2020/21 das Gletscherende entweder komplett (Roter-Knopf-Kees, Schobergruppe) oder teilweise (Freiwandkees, Glocknergruppe; Goldberg- und Kleinfleißkees, beide Goldberggruppe) unter Altschnee aus dem vorangegangenen Winter. In den Jahren 2021/22 sowie 2022/23 waren hingegen alle Gletscherenden frei von Altschnee und konnten daher auch vermessen werden, sofern dies nicht durch die schwierige Topographie (Winkelkees) oder einem See im Vorfeld (Obersulzbachkees) verhindert wurde. Für das letzte Haushaltsjahr 2022/23 lagen somit von 34 Gletschern Längenänderungswerte und von zwei weiteren zumindest Tendenzen der Längenänderung für diesen Bericht vor. Zum Vergleich gab es im Jahr 2021/22 für 32 Gletscher Jahreswerte, für zwei Gletscher konnten zumindest Mehrjahreswerte ermittelt (Roter-Knopf-Kees, Schobergruppe; Landeckkees, Granatspitzgruppe) und für einen weiteren Gletscher (Obersulzbachkees) die Veränderung auf Basis von Fotovergleichen festgestellt werden. Für die drei Jahre zuvor betrug die Anzahl von Gletschern mit jährlichen Längenänderungswerten 33 (2018/19), 32 (2019/20) und 30 (2020/21). Details zu diesem Berichtsjahr sowie zum Vergleich mit den drei Jahren davor finden sich in Lieb & Kellerer-Pirklbauer (2021, 2022, 2023, 2024).

(b) Massenbilanz

Gletschermassenbilanzmessungen gehören nicht zu den Aktivitäten des ÖAV-Gletschermessdienstes, sondern werden von verschiedenen wissenschaftlichen Institutionen an sieben Gletschern in den Hohen Tauern durchgeführt. Die Forscherteams bzw. Ansprechpersonen sowie die zuständigen Institutionen sind der Tabelle 4 zu entnehmen. Die laufenden Massenbilanzmessungen in der Tauernregion werden dabei durch das Hydrographische Zentralbüro in Wien in Kooperation mit den Bundesländern (insbesondere den jeweiligen Hydrographischen Diensten), dem Nationalpark Hohe Tauern, der Österreichischen Akademie der Wissenschaften sowie der GeoSphere Austria gefördert.





Daten des Massenbilanzjahres 2022/23 wurden entweder von der Datenbank des World Glacier Monitoring Service (WGMS 2024) bezogen (Kontakt: Isabelle Gärtner-Roer, WGMS Science Officer, Universität Zürich, isabelle.roer@geo.uzh.ch) oder direkt bei den zuständigen Institutionen angefragt, welche diese dankenswerter Weise kostenfrei für diesen Bericht zur Verfügung stellten. Die Massenbilanzergebnisse der letzten Jahre sind teilweise auch publiziert, z. B. für 2020/21 vom Stubacher Sonnblickkees (Zagel et al. 2022), Venedigerkees (Seiser & Fischer 2022) und Zettalunitz/Mullwitzkees (Stocker-Waldhuber & Fischer 2022) oder für 2021/22 (Zagel et al. 2023). Eine Besonderheit stellt das Wurtenkees dar, auf welchem die Massenbilanzermittlung im Zweijahresrhythmus erfolgt. Zum Zeitpunkt der Berichtslegung lag für diesen Gletscher aus diesem Grund noch kein Wert vor, zumindest konnten aber für die langfristige Einbettung der Massenbilanzen in der Tauernregion die früheren Werte von diesem Gletscher verwendet werden.

Tabelle 4: Gletscher in den Hohen Tauern, an denen aktuell Massenbilanzen durch verschiedene Institutionen bestimmt werden (Quelle: WGMS 2024, ergänzt). GeoSphere Austria (bis 31.12.2022: ZAMG); ÖAW=Österreichische Akademie der Wissenschaft; HD-Sbg=Hydrographischer Dienst des Landes Salzburg; Z_GIS= Fachbereich Geoinformatik, Universität Salzburg. *=keine Daten für 2022/23 aktuell vorliegend.

Gletscher (Gebirgsgruppe)	Forscherteam/Institution
Goldbergkees (Goldberggruppe)	B. Hynek, A. Neureiter (GeoSphere Austria)
Kleinfleißkees (Goldberggruppe)	B. Hynek, A. Neureiter (GeoSphere Austria)
Pasterze (Glocknergruppe)	B. Hynek, A. Neureiter (GeoSphere Austria)
Stubacher Sonnblickkees (Granatspitzgruppe)	B. Zagel, H. Wiesenegger, H. Slupetzky (Z_GIS/HD-Sbg/ÖAW)
Venedigerkees (Venedigergruppe)	B. Seiser (ÖAW/HD-Sbg)
Wurtenkees (Goldberggruppe)*	S. Reisenhofer (GeoSphere Austria)
Zettalunitz/Mullwitzkees (Venedigergruppe)	M. Stocker-Waldhuber (ÖAW)

2.4. Methoden im Bereich Permafrost

Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern sowie in Österreich allgemein wird nicht standardisiert von Institutionen durchgeführt, sondern beruht auf einzelnen wissenschaftlich motivierten Initiativen (z.B. Kellerer-Pirklbauer et al. 2015, 2024b). Die darin integrierten Forscherinnen und Forscher betreiben Permafrost-Monitoring kontinuierlich seit den 1990er (Blockgletscherbewegung) bzw. seit den 2000er Jahren (Temperaturen im Permafrost), wobei vor allem die Aktivitäten der Grazer Gruppe („Grazer Permafrost-Monitoring-Netzwerk“ seit den 1990er Jahren; Lieb et al. 2016), jene am Hohen Sonnblick (seit Mitte der 2000er Jahre) sowie jene in mehreren Karen im Obersulzbachtal (seit 2015) zu nennen sind. Hervorzuheben sind ferner die speziell für das gegenständliche Langzeit-Projekt eingerichteten Bodentemperatur- bzw. Permafrost-Messstellen am Inneren Knorrkogel (Venedigergruppe).

(a) Bodentemperatur- und Permafrostverhältnisse im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten

Für die Darstellung der Bodentemperaturverhältnisse im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten im Messjahr 2022/23 wird primär auf den im Auftrag des Nationalparks Hohe Tauern Kärnten erstellten Bericht für diesen Zeitraum verwiesen (Kellerer-Pirklbauer et al. 2024a). Für Vergleichszwecke werden zusätzlich noch Daten aus den davor liegenden Messjahren verwendet, insbesondere jene von 2019/20 (Kellerer-Pirklbauer et al. 2021a), 2020/21 (Kellerer-Pirklbauer et al. 2022) sowie 2021/22 (Kellerer-Pirklbauer et al. 2023b). Die Ergebnisse sind aufgrund der hohen Anzahl an Messstellen auch auf den gesamten Nationalpark übertragbar. Wegen der guten Verteilung dieser Messstellen auf unterschiedliche Expositionen, Höhenlagen, Geländekonfigurationen und Substrate kann eine valide Grundaussage zur thermischen Reaktion des Permafrostes auf die großräumigen Witterungsverhältnisse im Haushaltsjahr 2022/23 getroffen werden. Die den Ausführungen zugrundeliegenden Messungen fanden in den in Abbildung 1 ersichtlichen Untersuchungsgebieten statt.





Abbildung 2 und Tabelle 5 geben eine detaillierte Übersicht über die Lage und Instrumentierung der in den vier Permafrost-Untersuchungsgebieten in Kärnten gelegenen Messstandorte. In zwei der Gebiete (Dösen-Säuleck, Hinteres Langtalkar-Kögelekar) werden neben den sonst verwendeten Bodentemperatur-Loggern auch je eine automatische Klimastation und eine automatische optische Kamera betrieben, die bei der Interpretation der Ergebnisse hilfreich sind. Im Gebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar gibt es seit 2023 sogar eine zweite automatische Kamera. Für Einzelheiten zu den Standorten und deren Instrumentierung wird auf den detaillierten Bericht hierzu (Kellerer-Pirklbauer et al. 2024a) verwiesen.

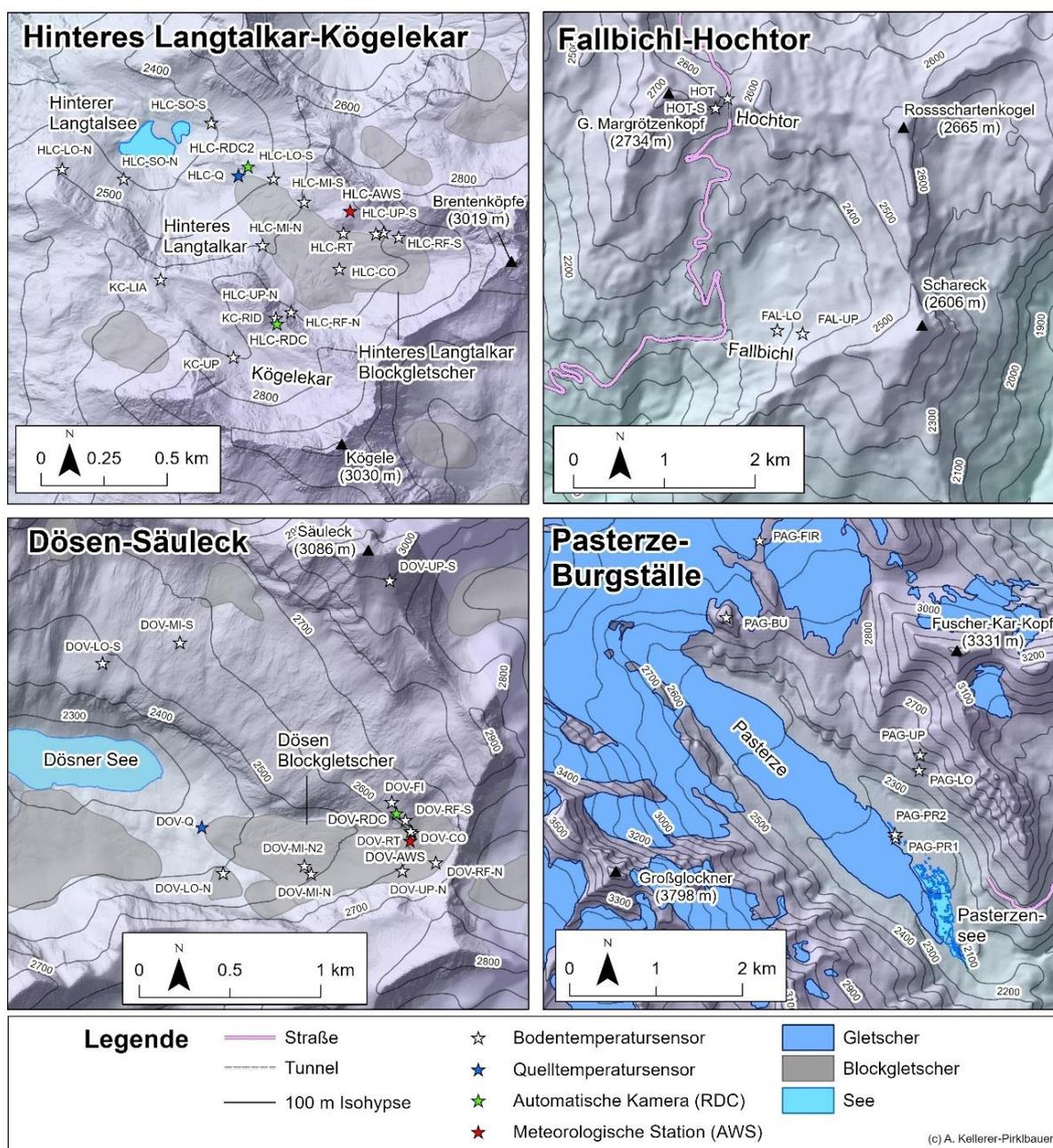


Abbildung 2: Detailkarten der vier Untersuchungsgebiete zum Permafrost-Monitoring im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten mit Lage nahezu aller Messstandorte, welche mit Miniatur-Temperaturdatenlogger ausgestattet sind, mit Stand Sommer 2023 (vgl. Tabelle 5). Die Standorte KC-LIA und KC-RID wurden 2022 neu eingerichtet, der Standort HOT-S im Jahr 2023 (Gletschermaske für Pasterze und benachbarte Gletscher nach Buckel et al. 2018).



Tabelle 5: Auflistung der vier lokalen Untersuchungsgebiete im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten und ihrer Instrumentierung mit Miniatur-Temperaturdatenloggern. Lage der Einzelstationen siehe Abbildung 2. Abbildungen 17 und 19 zeigen Auswertungen der jeweils grau hinterlegten Sensoren. HLC=Hinteres Langtalar-Kögelekar, FAL=Fallbichl, HOT=Hochtor, DOV=Dösen-Säuleck, PAG=Pasterze-Burgstall. GOE-PR ist ein Standort im Gößnitzkar, 2,6 km SW vom Kögelekar. Der Code für jeden Standort besteht (bis auf eine Ausnahme: GOE-PR) 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 (m)	Exposition (°)	Neigung (°)	Messtiefen (cm)
	RW	HW	RW	HW				
HLC-LO-S	407799	205640	331029	5206282	2489	290	32	0
HLC-MI-S	407916	205558	331145	5206197	2581	268	19	0
HLC-UP-S	408216	205455	331442	5206088	2696	256	22	0
HLC-LO-N	407013	205646	330244	5206305	2485	47	45	0
HLC-MI-N	407768	205389	330993	5206032	2601	17	28	0
HLC-UP-N	407883	205143	331103	5205783	2693	45	52	0
HLC-RF-S	408272	205439	331498	5206071	2725	241	75	3, 10, 40
HLC-RF-N	407883	205143	331103	5205783	2693	45	85	3, 10, 40
HLC-RT	408066	205447	331292	5206083	2650	252	7	3, 10, 40
HLC-CO	408056	205312	331279	5205949	2672	338	8	0, 30, 100
HLC-SO-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	407827	205118	331046	5205759	2769	177	11	0
GOE-PR	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	412726	216082	336177	5216616	2580	72	18	0, 10, 60
HOT-S	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-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	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



(b) Permafrost-Bohrlochtemperaturen am Hohen Sonnblick

Von den im Umfeld des Hohen Sonnblicks (GeoSphere Austria) und am Kitzsteinhorn (Kooperation verschiedener Institutionen und des Seilbahnunternehmens unter der Leitung der Firma GEORESEARCH) betriebenen Bohrlöchern werden in diesem Bericht die Messergebnisse des Bohrlochs 3 am Hohen Sonnblick verwendet, da dieses die geschlossenste Datenreihe besitzt und somit eine Kontinuität zu früheren Berichten, welche im Rahmen dieses Langzeit-Projektes verfasst wurden, sicherstellt.

Anzumerken sind folgende Aspekte zum Bohrloch 3 am Hohen Sonnblick für den Zeitraum Sommer 2020 bis 30.9.2023 (pers. Mitteilung Claudia Riedl): Im Sommer 2020 kam es durch einen Blitzeinschlag zur Zerstörung der Temperatursensoren-Messkette der Firma Geoprecision, weshalb für den Zeitraum 8.7.2020 bis 11.10.2020 keine Permafrost-Temperaturdaten vorliegen. Ab 12.10.2020 ging eine neue Temperatursensoren-Messkette in Betrieb, die einwandfrei bis zum 30.06.2021 Werte in mehreren Tiefen (bis max. 20 m) erfasste. Ab 1.7.2021 bis einschließlich 5.9.2023 konnten – bedingt durch ein technisches Gebrechen – keine Daten mehr vom untersten Sensor in 20 m Tiefe erfasst werden. Zusätzlich kam es auch noch in den Zeiträumen 20.7.2021 bis 3.8.2021 (15 Tage), 7.3.2023 bis 23.3.2023 (17 Tage) sowie 5.8.2023 bis 5.9.2023 zu einem kompletten Datenausfall, welcher u. a. mit den Auswirkungen von Gewittern in Zusammenhang zu bringen ist. Im September 2023 wurde wiederum eine neue Temperatursensoren-Messkette im Bohrloch 3 eingebaut, wobei man die alte nicht mehr entfernen konnte. Das Bohrloch 3 dürfte inzwischen ziemlich deformiert sein, sodass von Seiten der Betreiber ein neues Bohrloch notwendig erscheint. Nach erfolgter Neuinstrumentierung liegen ab dem 6.9.2023 wiederum Temperaturmessreihen für alle Tiefen vor. Zum Zeitpunkt der Berichtslegung lagen somit die Datenreihen bis einschließlich 30.9.2023 vor. Von Seiten der GeoSphere Austria wurde darauf hingewiesen, dass die uns übermittelten Daten zwar geprüft, aber nicht homogenisiert seien.

(c) Blockgletscherbewegung im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten

Auch für die Darstellung der Bewegungsraten in kriechendem Permafrost (Blockgletscher) wird auf die Berichte im Auftrag des Nationalparks Hohe Tauern Kärnten zurückgegriffen (zuletzt Kellerer-Pirklbauer et al. 2024a). Die den Ausführungen zugrundeliegenden Messungen fanden in den beiden Untersuchungsgebieten Dösen-Säuleck (Döser Blockgletscher) und Hinteres Langtalkar-Kögelekar (Hinteres Langtalkar Blockgletscher) statt (siehe Abbildung 2).

(d) Bodentemperatur- und Permafrostmonitoring Innerer Knorrkogel, Nationalpark Hohe Tauern Tirol

Die Geländearbeiten im Untersuchungsgebiet Innerer Knorrkogel, Venedigergruppe, wurden in den letzten Jahren immer im Zeitraum Ende August bis Anfang September durchgeführt. Die letztjährigen Geländearbeiten in diesem Gebiet erfolgten etwas früher, konkret zwischen 10.8.2023 und 12.8.2023. Die Anreise ins Innergschlöss geschah am 10.8.2023, die eigentliche Geländearbeit am Hochgebirgsstandort Innerer Knorrkogel am 11.8.2023 und die Abreise aus dem Gebiet am 12.8.2023. Bedingt durch die nahezu schneefreien Bedingungen im gesamten Untersuchungsgebiet sowie den relativ guten Witterungsbedingungen konnten die Geländearbeiten – gleich wie im Sommer 2022 – problemlos durchgeführt werden. Grundsätzlich waren die Schneeverhältnisse im Bereich der Gipfelpyramide (Abb. 3) Anfang September 2021 und Anfang September 2020 vergleichbar, in den Jahren 2022 und 2023 hingegen deutlich geringer mit nur mehr wenigen, teilweise oberflächlich recht sedimentreichen Restschneeflecken (2022) bzw. Resten von Neuschnee (2023). Der Neuschnee im Jahr 2023 stammte von einem Schneefallereignis zwischen 5. und 7.8.2023, für welches auf die Ausführungen in Abschnitt 3.1 verwiesen wird. Der Auf- und Abstieg zum bzw. vom Arbeitsgebiet erfolgte wie in den Vorjahren vom Innergschlöss über das Löbentörl. Die Geländearbeit selbst konnte bei optimalen Witterungsverhältnissen durchgeführt werden, wodurch auch zeiteffizient an einem langen Arbeitstag alle 18 Standorte aufgesucht und gewartet werden konnten (Abb. 4). Kein Standort war zum Zeitpunkt der Geländearbeit im Jahr 2023 unter Schnee.



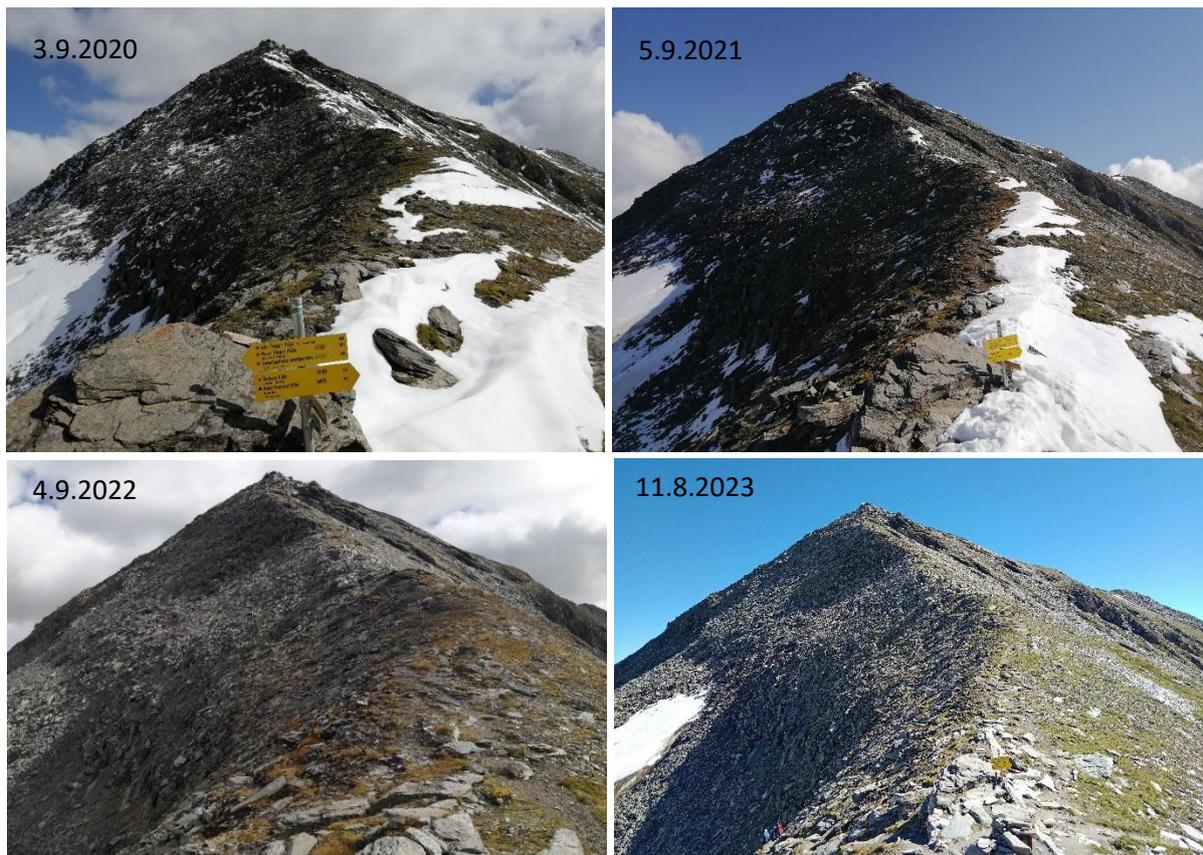


Abbildung 3: Vergleich der Schneebedingungen im Zuge der Geländearbeiten am 3.9.2020, 5.9.2021, 4.9.2022 sowie am 11.8.2023 im Bereich der Gipfelpyramide (hier zu sehen die Süd- und Westflanken) vom Löbbentörl aus betrachtet. Neuschnee war in den höheren Lagen in den Jahren 2020 und 2021 vielerorts anzutreffen und behinderte v. a. im Jahr 2021 an manchen Standorten auch die Geländearbeiten. 2022 verursachte Schnee keine Beeinträchtigung der Arbeit. 2023 waren nur mehr Reste des Neuschnees, welcher Anfang August 2023 gefallen war, vorhanden. Fotos: Andreas Kellerer-Pirklbauer.

Die einzelnen Messtandorte wurden im Jahr 2023 in der in Tabelle 6 aufgelisteten Abfolge aufgesucht. Diese Abfolge ähnelt im Wesentlichen jener der Vorjahre und ergibt sich aus einer möglichst zeiteffizienten Durchführung der Geländearbeit entlang einer möglichst kurzen Route. An allen bis auf einen Standort wurden via Funkverbindung die Temperaturdaten von den jeweiligen Datenloggern auf den Computer übertragen und als csv-Datei abgespeichert (siehe Tabelle 6). Einzig am Lufttemperaturmessstandort S-AT-2878 gab es erneut einen kompletten Datenausfall zu beklagen. Der dort installierte Datenlogger A52194 war auch nach Batterietausch nicht anzusprechen und dürfte möglicherweise – leider schon wieder – einem Blitzschlag zum Opfer gefallen sein.



Tabelle 6: Übersicht über die 18 Monitoring-Standorte an der Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels mit Angaben zu Code, interner Loggernummer, Tiefe des Sensors bzw. der Sensoren (bei Dreikanaldatenlogger eingebaut in Felsen) sowie die Bezeichnungen der diesem Bericht angehängten Dateien in Bezug auf Rohdaten (chronologische Codierung) sowie bearbeitete Daten (Codierung in Anlehnung an die vorjährigen Berichte). Siehe hierzu auch die Dokumentation in den beiden Dateien „rohdaten_metadaten_20240425.csv“ und „bearb_daten_metadaten_20240429.csv“.

Code	Log. Nr.	Sensortiefe (cm)	Dateibezeichnung Rohdaten	Dateibezeichnung bearbeitete Daten und ggf. Anmerkung
G-1K-SW-2840	A5223B	0	01-R-1K-SW-2840-A5223B_22-23*	01-G-1K-SW-2840-A5223B_18-23 Batterie leer mit 25.6.2023; Datenloch bis 11.8.2023 ergänzt mit Werten vom benachbarten Standort A5223F
F-1K-W-2840	A52220	0	02-F-1K-W-2840-A52220_22-23	02-F-1K-W-2840-A52220_18-23
G-1K-SW-2860	A5223F	0	03-R-1K-SW-2860-A5223F_22-23	03-G-1K-SW-2860-A5223F_18-23
F-1K-W-2860	A52244	0	04-F-1K-W-2860-A52244_22-23	04-F-1K-W-2860-A52244_18-23
G-1K-NW-2840	A52223	0	05-R-1K-NW-2840-A52223_22-23	05-G-1K-NW-2840-A52223_18-23
G-1K-NW-2860	A52227	0	06-R-1K-NW-2860-A52227_22-23	06-G-1K-NW-2860-A52227_18-23
F-3K-W-2869	A538B7	3	07-F-3K-W-2869-A538B7_22-23	07-F-3K-W-2869-A538B7_18-23-3cm
	A538B7	10	07-F-3K-W-2869-A538B7_22-23	07-F-3K-W-2869-A538B7_18-23-10cm
	A538B7	40	07-F-3K-W-2869-A538B7_22-23	07-F-3K-W-2869-A538B7_18-23-40cm
F-3K-NE-2871	A538AC	3	08-F-3K-NE-2871-A538AC_22-23	08-F-3K-NE-2871-A538AC_18-23-3cm
	A538AC	10	08-F-3K-NE-2871-A538AC_22-23	08-F-3K-NE-2871-A538AC_18-23-10cm
	A538AC	40	08-F-3K-NE-2871-A538AC_22-23	08-F-3K-NE-2871-A538AC_18-23-40cm
G-1K-E-2845	A5222E	0	09-R-1K-E-2845-A5222E_22-23	14-G-1K-E-2845-A5222E_18-23
G-1K-E-2860	A521CB	0	10-R-1K-E-2860-A521CB_22-23	13-G-1K-E-2860-A521CB_18-23
F-1K-NE-2840	A521A0	0	11-F-1K-NE-2840-A521A0_22-23	15-F-1K-NE-2840-A521A0_18-23
F-1K-NE-2860	A5226E	0	12-F-1K-NE-2860-A5226E_22-23	16-F-1K-NE-2860-A5226E_18-23
S-GT-2886	A521B7	0	13-GT-1K-2886-A521B7_22-23	09-S-GT-2886-A521B7_18-23
S-AT-2878	A53A9E (2018-22) A52194 (2022-23) A54C51 (seit 2023)	+200	Keine Lufttemperaturdaten für 2022-23 (Sensor defekt)	Logger A52194 von 4.9.2022 bis 11.8.2023 (defekt); Logger A54C51 seit 11.8.2023
	A52194 (2018-22) A504F4 (seit 2022)**	0	14a-GT1-1K-2878-A504F4_22-23 14b-GT1-1K-2878-A53A9E_22-23**	10-S-GT-2878-A52194_A504F4_18-23; Logger A52194 wurde 2022 zu AT-Logger; ab 4.9.2022 Logger A504F4 dort.
F-3K-S-2871	A538B1	3	15-F-3K-S-2871-A538B1_22-23	12-F-3K-S-2871-A538B1_18-23-3cm
	A538B1	10	15-F-3K-S-2871-A538B1_22-23	12-F-3K-S-2871-A538B1_18-23-10cm
	A538B1	40	15-F-3K-S-2871-A538B1_22-23	12-F-3K-S-2871-A538B1_18-23-40cm
F-1K-S-2860	A5222A	0	16-F1K-S-2860-A5222A_22-23	17-F-1K-S-2860-A5222A_18-23
F-1K-S-2840	A52230	0	17-F1K-S-2840-A52230_22-23	18-F-1K-S-2840-A52230_18-23

Anmerkungen: GT=Bodentemperatur, AT=Lufttemperatur, *neue Batterie 2023 (nur 1 Logger), ** an diesem Standort wurde ebenfalls der 2021-2022 mit Resetproblemen-behaftete Logger A53A9E zu Vergleichszwecken mit dem dort primären Logger A504F4 im Jahr 2022 eingerichtet. Beide Logger funktionierten im Zeitraum 2022-2023 einwandfrei



Abbildung 4: Blick vom Inneren Knorrkogel auf das Karleskees und den Äußeren Knorrkogel (2920 m) am 4.9.2022 und 11.8.2023. Zu beachten ist das weitgehende Fehlen von Schneefeldern (auch auf dem Gletscher) in der Hochgebirgslandschaft der Hohen Tauern im Jahr 2023. Mitte August 2023 war das Karleskees auch weitgehend schneefrei. Fotos: Andreas Kellerer-Pirklbauer.

Aufgrund einer leeren Batterie kam es nur an einem weiteren Standort zu einem Datenausfall, jedoch für einen deutlich kürzeren Zeitraum. Am Standort G-1K-SW-2840 war die Lithiumbatterie mit 25.6.2023 leer und somit ergibt sich ein Datenloch bis zum 11.8.2023 (47 Tage). Mit einem Datenverlust von 1,5 Monaten kann der Ausfall als moderat und für die Auswertung als gering relevant im Sinne fehlender Daten eingestuft werden. Für die Berechnung des Jahresmittelwertes für diesen Standort wurden die Daten des benachbarten Standortes G-1K-SW-2860, der an einer ähnlichen topographischen Position – jedoch 20 m höher – liegt, verwendet. Dies ist insofern legitim, als die Sommertemperaturwerte dieser beiden Standorte sehr gut miteinander korrelieren. Am Standort S-GT-2878 waren von 2022 bis 2023 zwei Datenlogger parallel im Einsatz (A504F4 und A53A9E), weshalb auch die Daten beider Datenlogger in der Rohdatenliste aufscheinen. Für die Auswertung wurde jedoch die Daten des primären Datenloggers dieses Standortes (A504F4) verwendet.

Nach Abschluss der Geländearbeiten am Inneren Knorrkogel erfolgte der Abstieg ins Tal, wo am Abend die gesammelten Daten auf einen externen Datenträger gesichert wurden. Die Langzeit-Datensichtung und die Analyse der Daten wurden am Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz durchgeführt, wobei für die Auswertung v.a. die Software Excel verwendet wurde.

Die Bezeichnung der Dateien in Bezug auf bearbeitete Daten für alle Standorte sowie für jeden Sensor bei 3-Kanaldatenloggern ist der Tabelle 6 zu entnehmen. In der Auswertung in Excel wurde auf die Stundenwerte, Monatsmittelwerte und – für diesen Bericht – insbesondere Jahresmittelwerte fokussiert, um ein übersichtliches Bild über die Zustände sowie Unterschiede der Bodentemperatur im Messjahr 2022/23 zu erhalten. Für Vergleichszwecke wurden auch die Ergebnisse der Vorjahre – Messjahren 2018/19, 2019/20, 2020/21 und 2021/22 – im Ergebnisteil berücksichtigt.



(e) Bodentemperatur- und Permafrostmonitoring Bereich Obersulzbachtal, Nationalpark Hohe Tauern Salzburg

Seit 2015 werden im Bereich des Sattelkars, Obersulzbachtal (Venedigergruppe, Salzburg), Bodentemperaturen kontinuierlich gemessen, wobei diese Aktivitäten gemeinsam vom Nationalpark Hohe Tauern Salzburg, dem Hydrographischen Dienst des Landes Salzburg sowie der Firma GEORESEARCH Forschungsgesellschaft durchgeführt werden. Ebenso zeichnen seit dem Sommer 2018, in den südlich an das Sattelkar anschließenden Karen (Ofen-, Mitter- und Steinkar), mehrere Datenlogger kontinuierlich Bodentemperaturen auf.

In Summe lagen in den vier genannten Karen zeitgleich maximal rund 30 Datenlogger, die alle in ca. 10 cm Tiefe im Lockermaterial platziert wurden (Details siehe hierzu Keuschnig 2018 sowie Lieb et al. 2019). Die Daten von 10 Standorten im Sattelkar für den Zeitraum 25.7.2022 bis einschließlich 27.09.2023 wurden uns freundlicherweise von der Firma GEORESEARCH (Ingo Hartmeyer sei an dieser Stelle für die Übermittlung herzlichst gedankt) zur Verfügung gestellt und für den Ergebnisteil ausgewertet. Wie im Kapitel 3.4. detailliert ausgeführt wird, gab es jedoch vor dem 25.07.2022 wesentliche Datenausfälle im Sattelkar bedingt durch Stromversorgungsprobleme einiger Datenlogger. Des Weiteren wurden bei der Neuinstrumentierung im Juli 2022 die einstigen Standorte 4, 5, 8, 11, 12, 15 dauerhaft aufgegeben, wohingegen der Standort 16 neu hinzugekommen ist. Somit lagen für die Analyse für 2022/23 Bodentemperaturdaten aus dem Sattelkar für zehn Standorte (1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 13, 14 und 16) vor, wobei nur am Standort 7 die Datenreihe schon einige Monate vor diesem Messjahr ansetzt.



3. Ergebnisse

3.1. Ergebnisse zum Bereich Witterung und Klima 2022-2023

In der Tabelle 7 sind die Jahreswerte der Lufttemperatur und des Niederschlags für das Gletscherhaushaltsjahr 2022/23 sowie zu Vergleichszwecken für die acht vorangegangenen Jahre für neun ausgewählte Klimastationen in der Nationalparkregion wiedergegeben. Das aktuelle Berichtsjahr ist grau hinterlegt. Diese neun Standorte können, wie in Lieb et al. (2019) dargelegt, als repräsentativ für größere Gebiete im Nationalparkgebiet angesehen werden.

Die Unterschiede der Werte zwischen den Stationen sind, bedingt durch die verschiedenen Seehöhen sowie die unterschiedlichen Lagen zum Hauptkamm, groß. Die Veränderlichkeit von einem Jahr auf das andere verläuft jedoch gleichsinnig. So ist etwa das relativ niederschlagsreiche Jahr 2019/20 an fünf der neun Stationen (Kolm-Saigurn, Heiligenblut, Malta, Neukirchen, Bramberg) das niederschlagsreichste und an den restlichen vier Stationen (Rudolfshütte, Sonnblick, Gerlos, Felbertauern) das zweitniederschlagsreichste der neun Jahre, wobei die Niederschlagswerte für die beiden Jahre 2019/20 und 2020/21 bei der Station Felbertauern nahezu identisch waren. Bei der Jahresmitteltemperatur wurde im Messjahr 2022/23 an sechs der sieben Stationen mit entsprechenden Daten ein neuer Rekord ermittelt. Der generelle Witterungscharakter der Jahre wird also mit hinreichender Genauigkeit durch die in Tabelle 7 gelisteten Stationen abgebildet.

Tabelle 7: Jahreswerte der Lufttemperatur (T, in °C) und Jahressummen des Niederschlags (P, in mm) in den neun hydrologischen Haushaltsjahren 2014/15 bis 2022/23 (jeweils 01.10.–30.09. des Folgejahres) der neun ausgewählten, als repräsentativ für das Arbeitsgebiet angesehenen Klimastationen in den Hohen Tauern. Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum. Fettstellung markiert den jeweils höchsten Wert der 9-jährigen Periode, kursiv hingegen den tiefsten Wert. n.d.=fehlende Daten. *Datenlücke 01.03.2019–31.03.2019.

Jahr	Rudolfshütte (2317 m)		Kolm-Saigurn (1626 m)		Sonnblick (3109 m)		Heiligenblut (1380 m)		Malta (830 m)	
	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P
2014/15	1,3	2232	6,0	1813	-4,0	1783	7,5	908	9,4	1084
2015/16	1,6	2442	6,0	1777	-3,3	1581	7,4	792	9,1	896
2016/17	0,9	2670	5,4	1912	-4,1	1882	7,0	915	9,0	1020
2017/18	1,1	2175	5,6	1677	-4,1	1748	6,9	755	8,9	910
2018/19	1,3	2366	5,8	1866	-4,0	2036	7,3	885	9,6	771
2019/20	1,5	2573	6,2	2073	-3,3	1902	7,1	1170	9,4	1232*
2020/21	0,6	2358	5,1	1829	-4,5	1850	6,4	1138	8,0	1018
2021/22	1,4	1867	5,8	1557	-3,8	1641	7,6	806	9,1	823
2022/23	2,0	1949	6,3	1461	-3,2	1620	7,8	758	9,5	914
Jahr	Neukirchen (857 m)		Bramberg (844 m)		Gerlos (1263 m)		Felbertauern (1650 m)			
	T	P	T	P	T	P	T	P		
2014/15	n.d.	1035	n.d.	1061	5,8	1204	5,3	1473		
2015/16	n.d.	1093	n.d.	1190	5,8	1270	5,4	1460		
2016/17	n.d.	1097	n.d.	1118	5,3	1340	5,0	1556		
2017/18	n.d.	1047	n.d.	1089	5,6	1231	5,3	1366		
2018/19	n.d.	1061	n.d.	1164	5,8	1442	5,2	1494		
2019/20	n.d.	1230	n.d.	1287	6,2	1419	5,2	1712		
2020/21	n.d.	1129	n.d.	1150	5,3	1351	4,1	1713		
2021/22	n.d.	1102	n.d.	1116	6,0	1222	5,4	1305		
2022/23	n.d.	1139	n.d.	1150	6,6	1170	5,7	1312		

In den Werten der Tabelle 7 fällt auf, dass das Jahresmittel der Temperatur an allen neun Standorten im Jahr 2020/21 im Vergleich zu den sechs Jahren zuvor und den beiden Jahren danach deutlich niedriger war und überall ein Minimum erzielt wurde (Ausnahme Station Gerlos mit identem Wert in 2016/17), was deutlich zu den äußerst warmen Jahren 2019/20 und vor allem 2022/23 kontrastiert. Das letzte Messjahr war an sechs der sieben Stationen deutlich wärmer als in allen anderen in Tabelle 7 gelisteten Jahren, wobei die neuen Rekorde die bisherigen um bis zu 0,5°C (Rudolfshütte) übertrafen. Bei den Jahressummen des Niederschlages fällt auf, dass nahezu an allen neun Stationen die Jahressumme des Niederschlags im Jahr 2022/23 unter dem 9-jährigen Mittel lag. Ausgenommen davon ist nur die Station Neukirchen, wo im Mittel über die 9 Jahre 1104 mm Niederschlag pro Jahr gemessen wurden, der Wert für 2022/23 aber etwas darüber (1139 mm) lag. Die nahegelegene Station Bramberg lag genau im langjährigen Mittel (Mittel 2014/15 bis 2022/23: 1147 mm; Wert für 2022/23 1150 mm).

Der Sachverhalt der außergewöhnlich hohen Temperaturen im letzten hydrologischen Haushaltsjahr wird gut in Abbildung 5 sichtbar. Bei der Gegenüberstellung der Temperaturwerte des Jahres 2022/23 mit dem Mittelwert der neun Jahre zwischen 2014/15 bis 2022/23 fällt deutlich auf, dass an allen sieben Stationen mit entsprechenden Daten der Jahresmittelwert im Jahr 2022/23 über jenem des Mittelwertes liegt. Am geringsten ist die positive (im Sinne höherer Temperaturen) Anomalie gegenüber dem Mittelwert an der Station Malta ausgeprägt, mit +0,4 °C, der größte Unterschied wurde hingegen für die Station Gerlos ermittelt, wo die Anomalie sogar +0,8 °C beträgt. Im Mittel über alle sieben hier relevanten Stationen beträgt die Abweichung vom Normalwert der neun Jahre +0,6 °C.

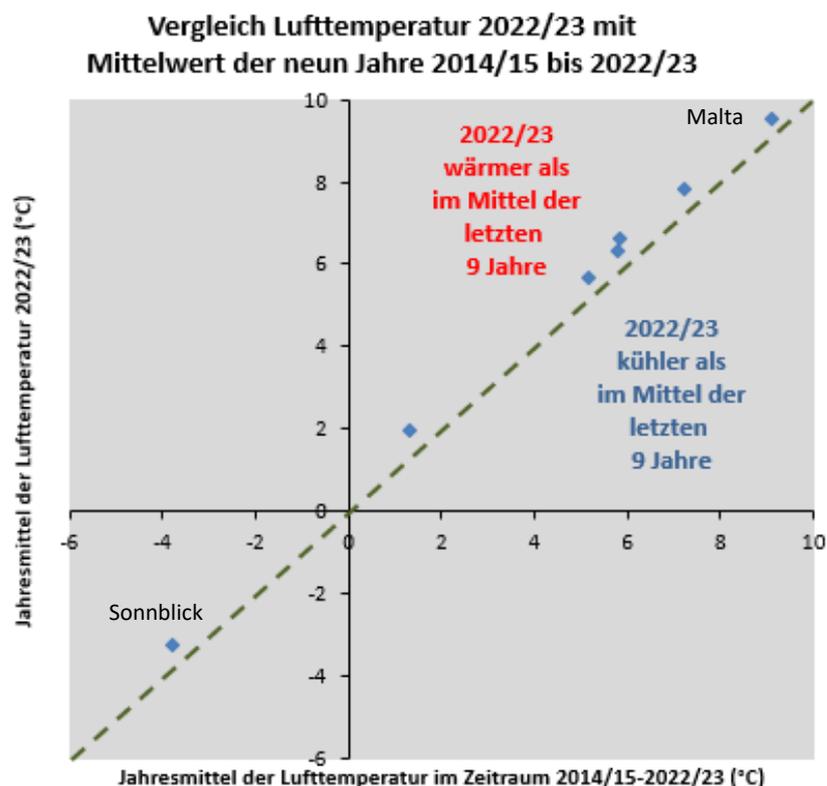


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Jahresmitteltemperaturen von 2022/23 mit dem Mittelwert für die neun Jahre zwischen 2014/15 und 2022/23 von sieben Klimastationen, deren Daten den Inhalt der Tabelle 7 bilden. Der wärmste Standort ist die Station Malta, der kälteste die Station Sonnblick.

Beim Vergleich der Niederschlagssummen vom letzten Haushaltsjahr mit dem Mittelwert für die letzten neun Jahren (Abb. 6) fällt auf, dass an sieben der neun Stationen das Jahr 2022/23 gering bis deutlich niederschlagsärmer als das Mittel von 2014/15 bis 2022/23 war. Am deutlichsten fällt dieser Unterschied am Standort Rudolfshütte auf, wo 1949 mm im Jahr 2022/23 einem Mittel von 2293 mm (und somit einem Unterschied von -343 mm) gegenüberstehen. Ähnlich hoch ist der Unterschied an der Station Kolm Saigurn mit einer Differenz von 313 mm (2023/23: 1461 mm; Mittelwert: 1774 mm). An den beiden nördlich des Alpenhauptkammes gelegenen Stationen Neukirchen und Bramberg lag der Niederschlagswert von 2022/23 gering über jenem des Durchschnitts der letzten Jahre (Bramberg um 2 mm; Neukirchen um 35 mm). Trotz des relativ ähnlichen Verlaufs von trockenen und feuchten Jahren variiert das niederschlagsärmste Jahr pro Standort: Für Neukirchen und Bramberg war dies 2014/15, für Sonnblick und Malta 2015/16, für Heiligenblut 2017/18, für Rudolfshütte und Felbertauern 2021/22 sowie schließlich für Kolm-Saigurn und Gerlos 2022/23.

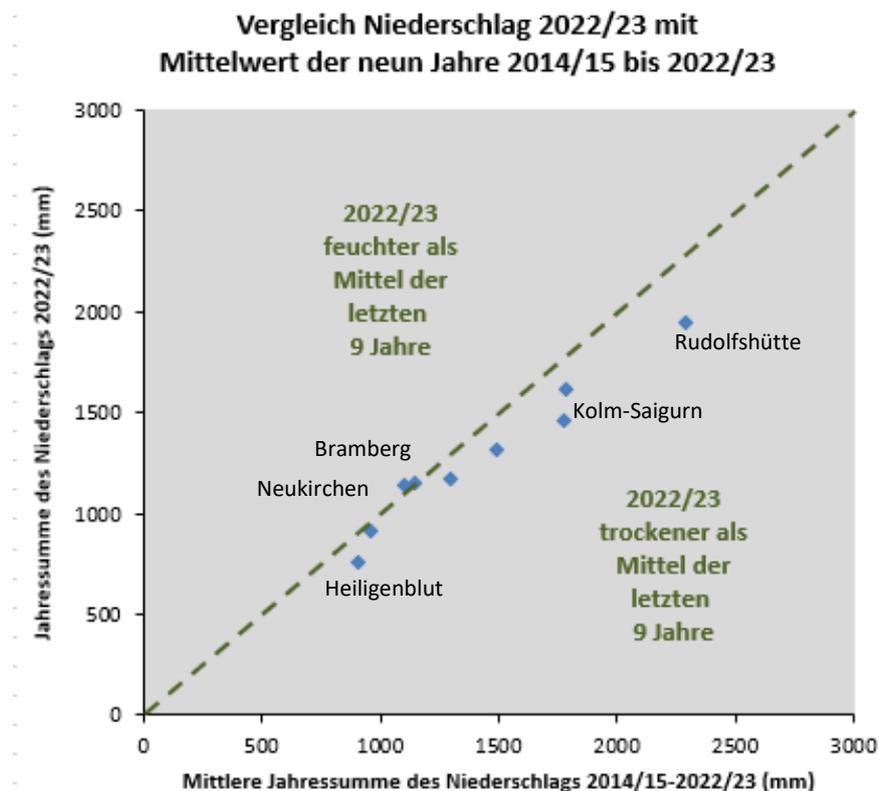


Abbildung 6: Gegenüberstellung der Jahressumme des Niederschlags von 2022/23 mit dem Mittelwert für die neun Jahre zwischen 2014/15 und 2022/23 von neun Klimastationen, deren Daten den Inhalt der Tabelle 7 bilden. Der niederschlagsärmste Standort ist Heiligenblut, der niederschlagsreichste die Rudolfshütte.

Die Witterungscharakter des Projektjahres 2022/23 lässt sich auf Basis der Monatswitterungsübersichten für Österreich, online veröffentlicht durch die GeoSphere Austria (www.geosphere.at), wie folgt charakterisieren: Die Niederschläge blieben im vor allem in seiner zweiten Hälfte des sehr warmen Oktobers weit unterdurchschnittlich. Die hierfür verantwortliche lange Hochdruckperiode endete mit ersten Schneefällen im Gebirge um den 4./5.11.2022, denen im Laufe des Monats noch weitere folgten, ohne dass die Schneemengen das langjährig zu erwartende Ausmaß erreichten. Der Dezember war außergewöhnlich mild und sehr trocken. Erst ab Mitte Jänner 2023 kam es verbreitet zu ergiebigen Schneefällen, sodass dieser Monat in den meisten Gebirgsregionen auch durchschnittlich schneereich ausfiel.

Der Februar und der März waren demgegenüber viel zu mild und der Februar auch niederschlagsarm. Erst am 26./27.3. ereignete sich ein Wettersturz mit ergiebigen Schneefällen, sodass die Niederschläge im März doch noch über den Normalwerten lagen. Weitgehend normal in Bezug auf die Niederschlagsmengen – mit Ausnahme der



Gebiete südlich des Alpenhauptkammes, die mit Niederschlagsdefiziten bilanzierten –, verlief der kühle April, der einzige (!) Monat im ganzen Projektjahr 2022/23 mit Temperaturen unter dem langjährigen Mittel. Auch der Mai wies gletschergünstige Witterung auf, wobei nicht nur die Reduktion der Einstrahlung durch reichlich Bewölkung die Winterschneedecke konservierte, sondern die Gesamtschneehöhe in den Hochlagen noch weiter anstieg.

Ab dem Beginn des Junis herrschte ein Witterungscharakter vor, der durch die Kombination aus weit unterdurchschnittlichem Niederschlag und weit überdurchschnittlich hohen Temperaturen charakterisiert werden kann. Dies führte zur raschen Reduktion der Winterschneedecke, welche auf den Gletschern zu früher Ausaperung und Eisabschmelzung führte (siehe hierzu das Beispiel des Karleskeeses in Abb. 4). Auf eine erste Hitzewelle noch in der zweiten Junihälfte folgten im Juli zwei weitere, sodass am Sonnblick am 11.7.2023 mit 15,7°C ein neues absolutes Maximum der Temperatur gemessen wurde. Ein Wettersturz am 25./26.7. leitete zu einer zweiwöchigen, von reger Tiefdrucktätigkeit dominierten Witterungsphase über, bei der zuletzt zwischen 5. und 7.8. die Schneefallgrenze bis gegen die Waldgrenze sank. Danach folgte für fast drei Wochen wieder sehr warme und gewitterreiche Witterung, sodass die Abschmelzung rasant voranschritt. Bei der Geländebegehung am Inneren Knorrkogel am 11.8.2023 waren noch Reste dieses Neuschnees vorhanden (siehe Abb. 3 und 4), behinderten jedoch die Geländearbeit nicht.

Ein Wettersturz vom 28.8. brachte an diesem und den Folgetagen zwar außerordentlich hohe Niederschlagsmengen, von denen der Großteil aber auch in den höchsten Lagen als Regen fiel. Erst in den letzten Augusttagen sank die Schneefallgrenze wenigstens regional so weit ab, dass sich auf einigen Gletschern eine kurzlebige Schneedecke bildete. Diese schmolz im sehr warmen September, von extrem schattigen Lagen an den höchsten Gipfeln abgesehen, rasch ab. Am Sonnblick wurde mit 13,0°C am 9.9. ein neues Temperaturmaximum für den September registriert. Der nächste Wettersturz ereignete sich um den 24.9., doch folgte auch auf diesen eine weitere Witterungsphase mit außergewöhnlich hohen Temperaturen, die erst am 14./15.10. mit einem Schneefallereignis zu Ende ging.

Abbildung 7 zeigt in einer Zusammenschau die Kurven der Monatsmitteltemperaturen aller in Tabelle 7 enthaltenen Stationen mit entsprechenden Daten für den Projektzeitraum 1.10.2022 bis 30.9.2023. Gut erkennbar ist hierbei, dass (a) die Kurven der Monatsmittelwerte der einzelnen Stationen einen gleichsinnigen Verlauf besitzen, (b) die Station am Sonnblick die bei weitem tiefsten Temperaturen aufweist (Jahresmittel: -3,2 °C), (c) die Station Rudolfshütte am zweitkühlsten ist (2,0 °C), (d) die Stationen Kolm-Saigurn (6,3 °C), Gerlos (6,6 °C) und Felbertauern (5,7 °C) relativ ähnlich sind und (e) die Stationen Heiligenblut (7,8 °C) und Malta (9,5 °C) die höchsten Jahresmittelwerte aufweisen, was im Wesentlichen der regelhaften Temperaturabnahme mit der Höhe entspricht. Hervorzuheben sind die auffallend tiefen Temperaturen im April (an den meisten Stationen kühler als der März) sowie die ähnlich hohen Temperaturen in den Monaten Juli, August und September, wobei v. a. der September 2023 außerordentlich warm und teilweise sogar sommerlich einzustufen war.

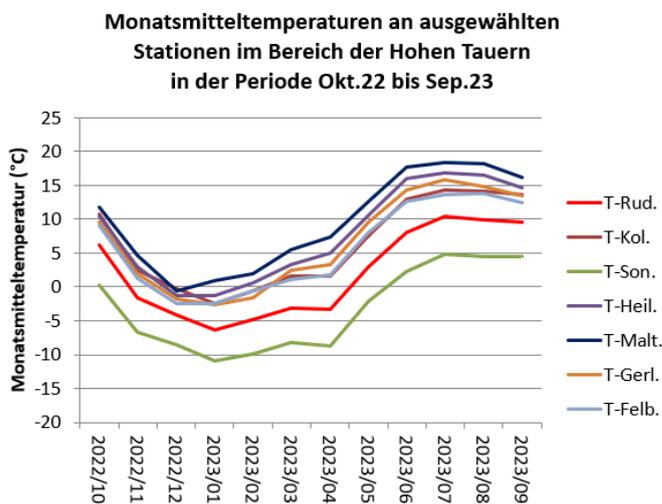


Abbildung 7: Monatswerte der Lufttemperatur (T) im Zeitraum Oktober 2022 bis September 2023 an den sieben Klimastationen Rudolfshütte, Kolm-Saigurn, Sonnblick, Heiligenblut, Malta, Gerlos und Felbertauern.



Die Monatswerte der Temperatur an der Station Sonnblick in den letzten vier Messjahren (2019/20 bis 2022/23) werden in Abbildung 8 und Tabelle 8 den entsprechenden Werten der Klimanormalperioden 1981–2010 und 1991-2020 gegenübergestellt, um einen Eindruck von den langfristigen Temperaturabweichungen zu erhalten. Bei der oberen Grafik in Abbildung 8 wird klar ersichtlich, dass nahezu alle Monate im letzten Messjahr deutlich über den Vergleichswerten der beiden Normalperioden lagen, nur der April 2023 bildete eine Ausnahme. Die untere Grafik in der Abbildung 8 zeigt, dass alle vier Jahre im Mittel gering (2020/21) bis deutlich (die drei anderen) übertemperiert waren. Dabei treten im Messjahr 2019/20 insbesondere der warme Oktober 2019, Jänner 2020, Februar 2020 und April 2020 in Erscheinung. Im Beobachtungsjahr 2020/21 waren einige Monate deutlich über- und einige deutlich untertemperiert. Demgegenüber waren es im vorletzten Jahr 2022 vor allem die hohen Sommertemperaturen, die auch das Jahresmittel für 2021/22 deutlich nach oben verschoben. Bemerkenswert ist auch, dass im Jahr 2021/22 einzig der Oktober 2021 unterdurchschnittlich temperiert war – 11 Monate dieses Jahres lagen gering (0,5 °C Jänner) bis extrem (3,9 °C Juni) über dem langjährigen Mittel. Das letzte Beobachtungsjahr 2022/23 war im Mittel sogar um 1,7 °C zu warm, wobei der Oktober 2022 (+3,2 °C) und v. a. der September 2023 (+4,6 °C) um mehr als 3 °C zu warm waren. Auch in diesem aktuell letzten Messjahr war nur ein Monat unterdurchschnittlich temperiert (April mit -1,3 °C). Die vier Beobachtungsjahre 2019/20 bis 2022/23 können somit aus thermischer Sicht als leicht (2020/21) bis äußerst (die drei anderen Jahre) abträglich für Schnee, Gletscher und Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern angesehen werden.

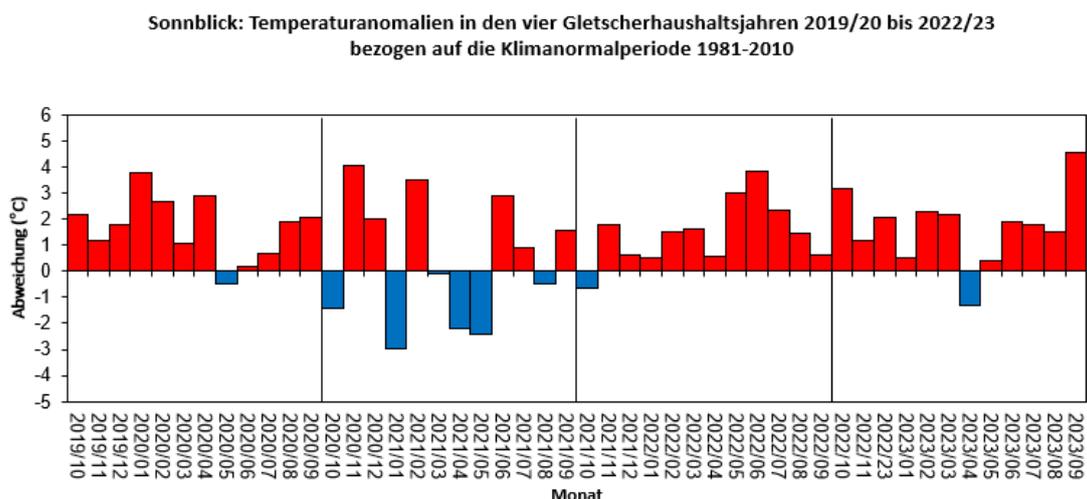
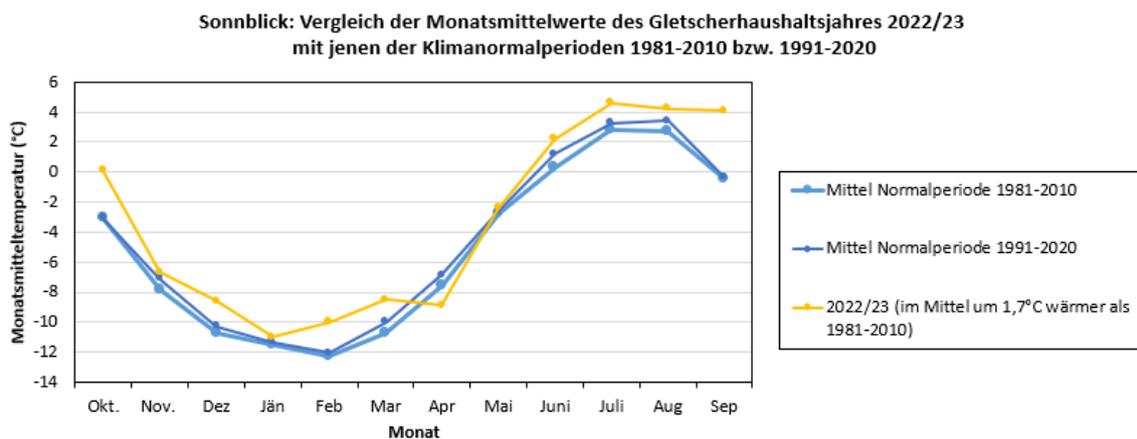


Abbildung 8: Vergleich der Monatsmittelwerte der Lufttemperatur (in °C) im Gletscherhaushaltsjahr 2022/23 mit jenen der Klimanormalperioden 1981–2010 sowie 1991-2020 (oben) und Abweichung der Monatsmitteltemperaturen zur Klimanormalperiode 1981-2010 in den vier Gletscherhaushaltsjahren 2019/20 bis 2022/23 (unten) an der Station Sonnblick (3109 m).

Tabelle 8: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur (in °C) und Abweichungen der Monatsmittelwerte in den vier Gletscherhaushaltsjahren 2019/20 bis 2022/23 von jenen der Klimanormalperiode 1981–2010 (in °C) an der Station Sonnblick (3109 m).

Monat	Mittel (°C)					Abweichung zu 1981-2010 (°C)			
	1981-2010	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23
Okt.	-3,1	-0,9	-4,5	-3,8	0,1	2,2	-1,4	-0,7	3,2
Nov.	-7,9	-6,7	-3,8	-6,1	-6,7	1,2	4,1	1,8	1,2
Dez.	-10,7	-8,9	-8,7	-10,1	-8,6	1,8	2	0,6	2,1
Jän.	-11,5	-7,7	-14,5	-11,0	-11,0	3,8	-3	0,5	0,5
Feb.	-12,3	-9,6	-8,8	-10,8	-10,0	2,7	3,5	1,5	2,3
März	-10,7	-9,6	-10,8	-9,0	-8,5	1,1	-0,1	1,7	2,2
Apr.	-7,6	-4,7	-9,8	-7,0	-8,9	2,9	-2,2	0,6	-1,3
Mai	-2,8	-3,3	-5,2	0,2	-2,4	-0,5	-2,4	3,0	0,4
Juni	0,3	0,5	3,2	4,2	2,2	0,2	2,9	3,9	1,9
Juli	2,8	3,5	3,7	5,2	4,6	0,7	0,9	2,4	1,8
Aug.	2,7	4,6	2,2	4,1	4,2	1,9	-0,5	1,4	1,5
Sep.	-0,5	1,6	1,1	0,1	4,1	2,1	1,6	0,6	4,6
Mittel	-5,1	-3,4	-4,7	-3,7	-3,4	1,7	0,5	1,4	1,7

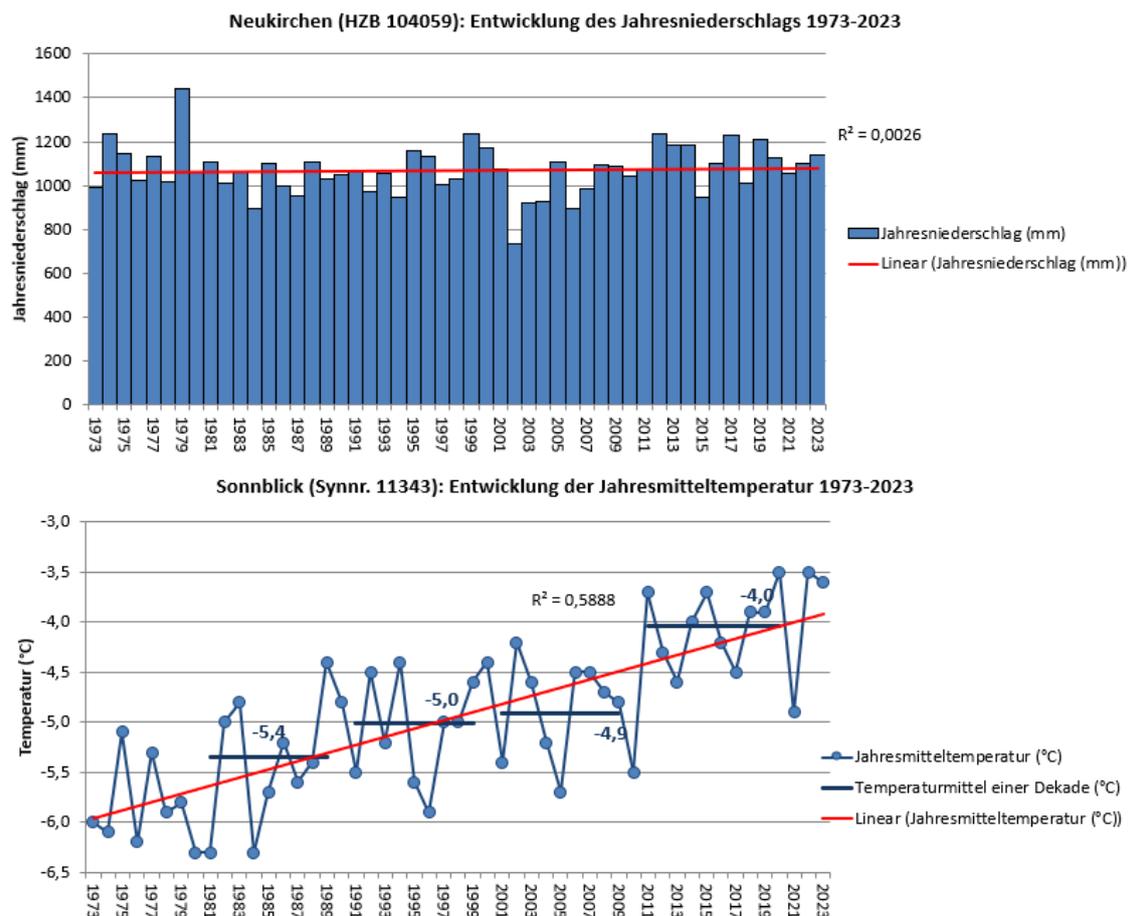


Abbildung 9: Langzeitentwicklung von Niederschlag (Station Neukirchen) und Temperatur (Station Sonnblick). Entwicklung der Jahreswerte (hier Kalenderjahre) im Zeitraum 1973–2023 und entsprechende Trends. Niederschlag: Keine signifikanten Veränderungen erkennbar. Temperatur: Klarer Erwärmungstrend. Für die Temperatur sind zusätzlich auch Dekadenmittelwerte (1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 und 2011-2020) angegeben.

Für eine Betrachtung der Langzeitentwicklung des Jahresniederschlags werden die Stationsdaten von Neukirchen verwendet, wo seit 1973 kontinuierlich durch den Hydrographischen Dienst des Landes Salzburg gemessen wird. In Abbildung 9 sind die Jahressummen des Niederschlags nach Kalenderjahren für den Zeitraum 1973–2023 sowie ein entsprechender linearer Trend dargestellt. Wie die Grafik gut zeigt, ist an dieser Station weder ein Trend noch eine signifikante Änderung der Jahressummen des Niederschlags zu erkennen, jedoch weisen diese eine starke Variabilität auf: Der Mittelwert im 51-jährigen Beobachtungszeitraum liegt bei 1070 mm, das Maximum wurde im Jahr 1979 mit 1440 mm gemessen, während das Minimum (2002) mit 731 mm nur knapp die Hälfte des Maximalwertes betrug.

Zusätzlich ist in der Abbildung 9 unten auch die Entwicklung der Jahresmittel der Lufttemperatur an der Station Sonnblick über denselben 51-jährigen Zeitraum dargestellt. Ganz deutlich ist – unabhängig von großen Schwankungen von Jahr zu Jahr – ein klarer Erwärmungstrend zu erkennen. In sieben der letzten zehn Jahren betrug das Jahresmittel der Temperatur $\geq -4^{\circ}\text{C}$, wobei die drei Kalenderjahre 2020, 2022 und 2023 als die absolut wärmsten hervorstechen: Mit jeweils $-3,5^{\circ}\text{C}$ stellen die beiden Jahre 2020 und 2022 auch einen neuen Stationsrekord in der gesamten Messreihe seit 1887 dar. Das bisher wärmste Jahr war am Sonnblick das Jahr 2011 mit einem Jahresmittel von $-3,7^{\circ}\text{C}$. Das Jahr 2021 war hingegen wieder relativ kalt mit einer Jahresmitteltemperatur, die den Mittelwert der Dekade 2001–2011 ($-4,9^{\circ}\text{C}$) entspricht. Abbildung 9 gibt auch die Veränderung der Dekadenwerte der Temperatur an der Station Sonnblick wieder: Lag der 10-Jahresmittelwert im Zeitraum 1981–1990 noch bei $-5,4^{\circ}\text{C}$, so liegt dieser Wert in der jüngsten Dekade bei nur mehr $-4,0^{\circ}\text{C}$.

3.2. Ergebnis Bereich Abfluss 2022-2023

Die Abflusswerte der drei Pegel Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) wurden für den Zeitraum 1.10.2014–30.9.2023 ausgewertet. Abbildung 10 zeigt die Tagesmittel der gemessenen Abflüsse an den drei Stationen für den neunjährigen Zeitraum. Die schon bei Lieb et al. (2019) beschriebenen Merkmale des Abflussgeschehens kommen besonders gut auch in Tabelle 9 mit Minima im Februar oder März (in Ausnahmen Jänner) und Maxima in den Monaten Juni oder Juli (in Ausnahmen Mai oder August) zur Geltung. Insgesamt verliefen die hier dargestellten Beobachtungsjahre in Bezug auf die Abflüsse relativ unauffällig, sieht man von einzelnen Hochwasserspitzen (am Pegel Innerschlöss mit Abflusswerten von $>30\text{ m}^3/\text{s}$ im Sommer 2020 und 2023 bzw. sogar $>50\text{ m}^3/\text{s}$ im Sommer 2021; am Pegel Neukirchen mit Abflusswerten $>25\text{ m}^3/\text{s}$ im Sommer 2023 bzw. $>55\text{ m}^3/\text{s}$ im Sommer 2021) ab.

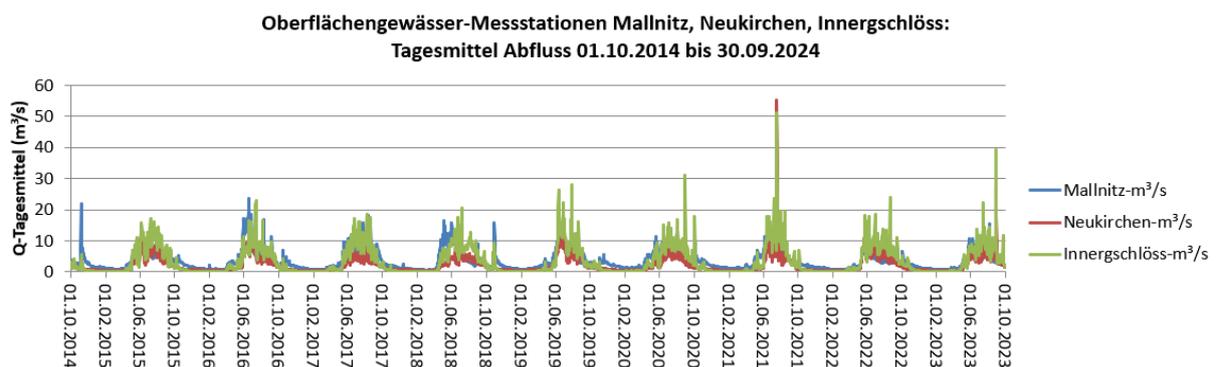


Abbildung 10: Vergleich der gemessenen mittleren täglichen Abflüsse (Q in m^3/s) der drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im neunjährigen Zeitraum 1.10.2014 bis 30.9.2024.

Extrem hohe Werte des mittleren täglichen Abflusses wurden am 18.7.2021 an den benachbarten Messstellen Neukirchen und Innerschlöss gemessen, wobei an beiden – zumindest für die Periode 1.10.2014 bis 30.9.2023 – jeweils neue Maximalwerte erzielt wurden (Pegel Neukirchen: $55,02\text{ m}^3/\text{s}$; Pegel Innerschlöss: $50,94\text{ m}^3/\text{s}$). Die allgemein schweren Hochwässer im Juli 2021 in Österreich wurden durch das Tiefdruckgebiet „Bernd“ verursacht, welches im Zeitraum vom 12. bis 19.07.2021 über Mitteleuropa wirksam war und großen Schaden in mehreren Ländern Mitteleuropas verursachte (Junghänel et al. 2021). Am Pegel Mallnitz wirkte sich dieses Tiefdruckgebiet weniger stark aus,

wobei dort am 18.7.2021 immerhin 17,14 m³/s gemessen wurden (Rekord an diesem Pegel im oben genannten Zeitraum ist 23,49 m³/s, gemessen am 17.6.2016). Das letzte Beobachtungsjahr 2022/23 erscheint auf den ersten Blick wenig auffällig, wenn man von den Maxima Mitte Juli und v. a. Ende August in der Abbildung 10 absieht.

Der Mallnitzbach weist wegen der Größe des Einzugsgebietes die höchsten aller Jahres- sowie zumeist auch Monatswerte – wie in Tabelle 9 ersichtlich – auf, wenngleich der Gschlössbach in manchen Beobachtungsjahren den höchsten Monatswert der drei Bäche (zuletzt Juni 2019, August 2020, Juli 2021 sowie Juli und August 2023) verzeichnete. Auffallend für 2021 sind die Monatsmaxima im Juli für Neukirchen und Innerschlöss, welche im letzten Absatz schon begründet worden sind. In Bezug auf Jahreswerte stechen jedoch für den Mallnitzbach die beiden Beobachtungsjahre 2021/22 und 2022/23 hervor, da an diesem Pegel nur 80,23 Mio. m³ bzw. 101,39 Mio. m³ als Jahressummen des Abflusses gemessen wurden, was deutlich unter den beiden Vergleichswerten des Gschlössbachs und nur um rund 10% (zumindest für 2021/22) über jenem bei Neukirchen liegt. Dieser geringe Abfluss gemessen in Mallnitz korreliert recht gut mit den geringen Jahresniederschlagswerten, welche an den Stationen in ähnlicher zentralalpiner Lage (Malta, Heiligenblut) 2021/22 sowie 2022/23 gemessen wurden.

Interessant ist auch der Vergleich der Abflussmengen in den Einzeljahren. Im Einzugsgebiet Innerschlöss variierte die Summe des Jahresabflusses in den sieben Messjahren um 16,4 %, während der relative Unterschied zwischen dem maximalen und minimalen Jahreswert an den Pegeln Neukirchen 27,6 % und Mallnitz 44,0 % beträgt. Im Falle des Pegels Mallnitz wird dieser große Schwankungsbereich stark durch den negativen „Ausreißer“ im trockenen Jahr 2021/22 beeinflusst. Relativ schwach ausgeprägte Monatsmaxima gab es an allen drei Pegeln im Beobachtungsjahr 2021/22. Im letzten Beobachtungsjahr waren diese ähnlich gering (Innerschlöss und Neukirchen) bzw. lagen deutlich über jenem des Vorjahres (Mallnitz). Für den Pegel Innerschlöss wurde im Februar 2023 mit 0,55 Mio. m³ ein neuer Positivrekord des monatlichen Minimumabflusses für die Periode 2014-2023 ermittelt.

Tabelle 9: Jahresmenge des Abflusses (Q) an den Abflussmessstationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im Zeitraum 1.10.2014–30.9.2023; Gesamtabfluss in den einzelnen Gletscherhaushaltsjahren sowie Monatsminima und Monatsmaxima. Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum.

Jahr	Q-Mallnitz (Mio. m ³)			Q-Neukirchen (Mio. m ³)			Q-Innerschlöss (Mio. m ³)		
	Jahres- summe	Q-Max (Monat)	Q-Min (Monat)	Jahres- summe	Q-Max (Monat)	Q-Min (Monat)	Jahres- summe	Q-Max (Monat)	Q-Min (Monat)
2014/15	114,49	20,16 (Juni)	2,38 (März)	77,20	18,51 (Juli)	0,96 (Februar)	110,00	31,42 (Juli)	0,31 (März)
2015/16	129,07	35,76 (Juni)	2,15 (März)	72,10	19,47 (Juni)	0,95 (März)	96,75	26,37 (Juli)	0,40 (Februar)
2016/17	112,44	21,23 (Juni)	1,71 (Februar)	57,70	11,78 (Juni)	0,85 (Februar)	103,40	26,53 (Juni)	0,41 (Februar)
2017/18	113,51	29,49 (Mai)	1,60 (Februar)	64,24	13,43 (Juli)	0,83 (Februar)	106,24	23,82 (Juni)	0,39 (Februar)
2018/19	102,20	24,97 (Juni)	2,14 (Februar)	77,16	23,49 (Juni)	1,28 (Februar)	103,20	32,92 (Juni)	0,27 (Februar)
2019/20	122,65	20,80 (Juni)	3,15 (Februar)	68,50	15,49 (Aug.)	1,44 (Februar)	109,37	27,34 (Aug.)	0,41 (Jänner)
2020/21	123,27	27,84 (Juni)	2,61 (Februar)	76,48	25,73 (Juli)	1,01 (Februar)	114,17	38,39 (Juli)	0,38 (Februar)
2021/22	80,23	15,28 (Juni)	1,93 (Februar)	73,10	16,12 (Juni)	0,88 (Februar)	107,65	25,56 (Juni)	0,24 (Februar)
2022/23	101,39	21,12 (Juni)	1,99 (Februar)	70,39	17,11 (Aug.)	1,07 (Februar)	103,03	26,57 (Juli)	0,55 (Februar)

Abbildung 11 stellt die Jahrgänge des Beobachtungsjahres 2022/23 für die drei Standorte dar. Die untere Grafik in dieser Abbildung zeigt zur besseren Veranschaulichung die Verhältnisse bei niedrigen Abflüssen von 0 bis 6 m³/s. Auffällig sind die nahezu gleichförmigen, relativ ruhigen Verläufe (Auslauf des Basisspeichers) in den Winter- und Frühjahrsmonaten bis etwa Mitte April 2023 und die darauf folgenden markanten Schwankungen verbunden mit Niederschlagsereignissen oder Schneeschmelze an allen drei Stationen. Von den drei Standorten hat der Pegel Innergöschl den schnellsten Abfall in der Schüttung im November sowie zwischen Dezember 2022 und Mitte März 2023 besonders konstante Abflüsse zu verzeichnen. Die Auslaufkurve am Pegel Mallnitz zeigt am besten die relativ stetige Abnahme des Abflusses im Winter, jene von Neukirchen liegt vom Verlauf und der Neigung her zwischen den beiden anderen.

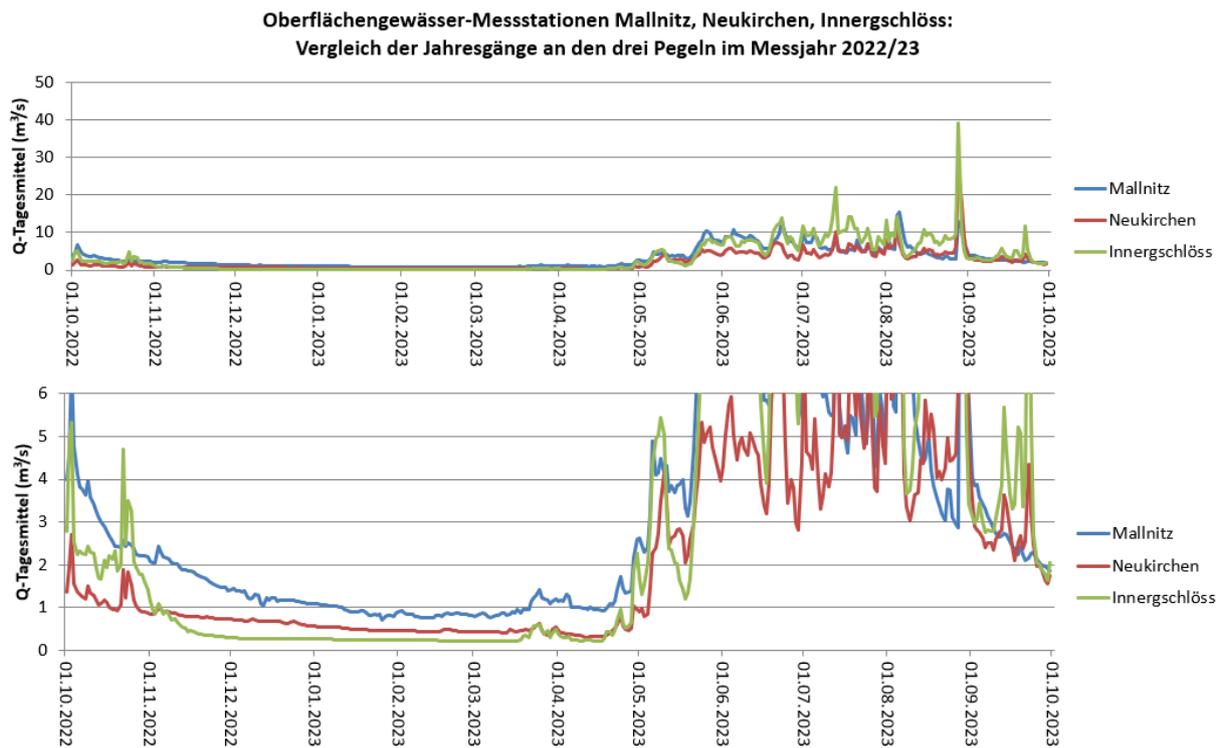


Abbildung 11: Vergleich des gemessenen mittleren täglichen Abflusses (Q im m³/s) an den drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innergöschl (Tirol) im Zeitraum 1.10.2022–30.9.2023. Die untere Kurve ist ein Ausschnitt aus der oberen mit veränderter Skalierung der Ordinate und fokussiert auf den Bereich bis zu 6 m³/s.

Am Pegel Innergöschl kam es am 28.8.2023 zu einem maximalen mittleren Abflusswert von 39,2 m³/s. Dieses Maximum ist jedoch weniger auf die Gletscherschmelze im Einzugsgebiet, sondern viel mehr auf hohe Niederschlagsmengen (siehe Kapitel 3.1.) zurückzuführen. Generell ist dieser Pegel jedoch durch die großflächige Vergletscherung im Einzugsgebiet in sehr hohem Ausmaß von der Gletscherschmelze beeinflusst, obschon das Schlatenkees in den letzten Jahren immer wieder als negativer österreichischer Rekordgletscher – oder zumindest im negativen „Spitzenfeld“ liegend – bei den Gletscherrückgängen in Erscheinung trat (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2022, 2023, 2024).

Das maximale Tagesmittel des Abflusses für das Jahr 2022/23 wurde an den Station Neukirchen mit 26,9 m³/s ebenfalls am 28.8.2023 registriert. Auch in Mallnitz wies dieser Tag mit 12,9 m³/s einen sehr hohen Abfluss auf, das Maximum im Berichtsjahr wurde hier jedoch am 6.8.2023 mit 15,4 m³/s (und 14,6 m³/s am 5.8.2023; bedingt durch eine mehrtägige, in Abschnitt 3.1 beschriebene Schlechtwetterphase) erreicht. Einen ähnlichen hohen Wert von 13,1 m³/s bewirkte ein anderes Niederschlagsereignis am 23.6.2023. Stimmig zu den hohen Abflüssen am 28.8.2023 wurden sehr hohe Tagesniederschlagssummen am 28.8.2023 an den Stationen Kolm-Saigurn (113 mm), Sonnblick (78 mm), Rudolfshütte (72 mm), Malta (64 mm), Gerlos (62 mm), Heiligenblut (58 mm), Bramberg (54 mm), Neukirchen (51 mm) und Felbertauern (46 mm) gemessen. Danach ebnete das Abschlussgeschehen wieder ab, abgesehen von einem weiteren Peak um den 22.9.2023 an den Pegeln Innergöschl und – etwas abgeschwächt – Neukirchen, der auf relativ hohe Temperaturen und massive Gletscherschmelze im jeweiligen Einzugsgebiet sowie einem Frontdurchgang mit relativ großen

Niederschlagsmengen (Tageswerte 22.9.2023: 23,4 mm an der Station Felbertauerntunnel-Süd, 23,9 mm an der Station Rudolfshütte; 13,0 mm an der Station Neukirchen oder 9,8 mm an der Station Bramberg) zurückzuführen war. Diesen Peak gab es nicht am Pegel in Mallnitz, bedingt durch die dort nur mehr geringe Vergletscherung im Einzugsgebiet sowie geringeren Niederschlagsmengen.

In Bezug auf die geringsten mittleren täglichen Abflussmengen in der gesamten Periode von 2014/15 bis 2022/23 fällt auf, dass an zwei der drei Pegel das Minimum auf das hydrologische Jahr 2021/22 fällt. Am 06.04.2022 war dies am Pegel Neukirchen (0,11 m³/s) und in der Periode 03. bis 08.03.2022 am Pegel Innerschlöss (mit 0,11 m³/s) der Fall. Am Pegel Mallnitz wurde das Tagesminimum für den 26.02.2018 mit 0,56 m³/s bestimmt. Im letzten Messjahr betragen die jeweiligen Minima 0,20 m³/s am Pegel Innerschlöss, 0,30 m³/s am Pegel Neukirchen und 0,70 m³/s am Pegel Mallnitz. Dies zeigt auch die außerordentlich niederschlagsarmen Bedingungen im letzten Haushaltsjahr.

Abbildung 12 zeigt die mittleren monatlichen Abflüsse und für das aktuelle Berichtsjahr 2022/23 sowie für die drei Jahre zuvor an allen drei Stationen. Klar erkennbar sind hier zum einen die alljährlich ähnlichen Bedingungen in den Wintermonaten (vor allem Dez.–Apr.). Zum anderen ist auffällig, dass die Monatssummen in den übrigen Monaten stark von Jahr zu Jahr, aber auch von Standort zu Standort variieren, was wiederum auf lokale Effekte – Niederschlag bzw. Schnee-/Eisschmelze – zurückzuführen ist. Auffallend ist der hohe Wert für Innerschlöss im Monat Juli 2021, der ein Maximum auch für den Zeitraum 2014/15 bis 2022/23 darstellt. Im vorletzten und letzten der vier hier dargestellten Jahre ist für denselben Pegel auffällig, dass die Monatssummen für Juni bis September sich deutlich von jenen der anderen beiden Pegel abheben, was mit der – relativ – verstärkten Wasserzufuhr durch Gletscherschmelze, bedingt durch die sehr gletscher-abträglichen sommerlichen Temperaturen zu erklären ist.

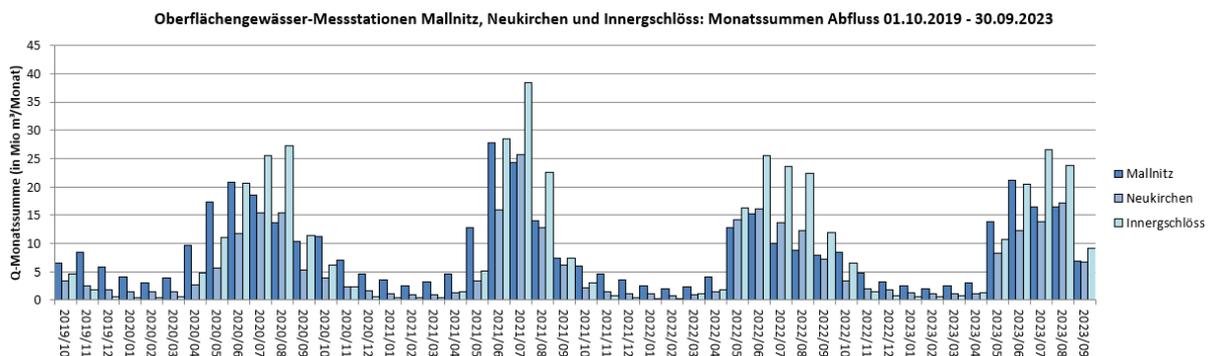


Abbildung 12: Monatssummen des Abflusses (Q) der drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im Zeitraum 01.10.2019 – 30.09.2023 in Mio. m³.

Tabelle 10 beinhaltet die auf mm Wassersäule umgerechneten Abflussmengen pro Jahr, die unmittelbar mit den Niederschlagswerten in den drei Untersuchungsgebieten verglichen werden können, wobei jedoch zu beachten ist, dass nur Stationsdaten der Niederschlagssummen (und somit nur an den Stationen gültig) und nicht gemittelte Gebietsniederschläge (repräsentativ für die drei Einzugsgebiete oberhalb der jeweiligen Pegel) vorliegen. Besonders die Werte an den Stationen Neukirchen und Innerschlöss sind stark von einer von den ungünstigen Bedingungen für Gletscher verursachten Gletscherspende (siehe Kapitel 3.3) beeinflusst. In allen neun Jahren wurde für den Pegel Innerschlöss die bei Weitem höchste Abflusshöhe ermittelt. Auffallend ist für das Beobachtungsjahr 2020/21 auch der – zumindest in den hier gezeigten neun Jahren – neue Rekord der Abflusshöhe an dieser Station mit erstmals über 2900 mm, was ziemlich genau dem Doppelten des Wertes von Mallnitz für dieses Jahr entspricht. Schließlich sticht die Abflusshöhe für die Station Mallnitz für 2021/22 hervor. Erstmals wurde an diesem Pegel eine Abflusshöhe von unter 1000 mm ermittelt, rund 250 mm weniger als im Berichtsjahr 2022/23.

Tabelle 10: Abflusshöhe (Quotient aus Durchflussvolumen pro Beobachtungsperiode und Einzugsgebietsfläche) in mm für die neun glaziologischen Haushaltsjahre 2014/15–2022/23 in den drei Einzugsgebieten oberhalb der Stationen Mallnitz (Einzugsgebiet 85,3 km²), Neukirchen (40,5 km²) und Innergöschl (39,3 km²). Grau hinterlegt das aktuelle Projektjahr.

Jahr	Abflusshöhe (in mm/a) für die Einzugsgebiete oberhalb der drei Stationen		
	Mallnitz	Neukirchen	Innergöschl
2014/15	1342	1906	2799
2015/16	1513	1780	2462
2016/17	1318	1425	2631
2017/18	1331	1586	2703
2018/19	1198	1905	2626
2019/20	1438	1691	2783
2020/21	1445	1888	2905
2021/22	941	1805	2739
2022/23	1189	1738	2622

3.3. Ergebnis Bereich Gletscherverhalten 2022-2023

(a) Längenänderung

Tabelle 11 listet die Ergebnisse der Längenänderungsmessungen an den 36 vom Gletschermessdienst des Österreichischen Alpenvereins erfassten Gletschern im Nationalpark Hohe Tauern nicht nur für die aktuelle Berichtsperiode 2022/23, sondern auch für die sieben glaziologischen Haushaltsjahre zuvor auf. Die Ergebnisse, geordnet nach Gebirgsgruppen, zeigen zum einen deutliche Schwankungen von Jahr zu Jahr (z. B. Winkelkees 2015/16 mit -0,8 m versus 2016/17 mit -118,1 m), aber zum anderen auch von Gebirgsgruppe zu Gebirgsgruppe. So waren beispielsweise die Werte der Längenänderung in der Ankogelgruppe in den drei Messjahren 2017/18–2019/20 auffallend niedrig im Verhältnis zu den anderen Gruppen, wohingegen die Werte in den anderen fünf Gebirgsgruppen im Wesentlichen als normal einzustufen waren. Die in Tabelle 11 unten angegebenen Mittelwerte basieren auf einer unterschiedlichen Anzahl von Gletschern von Jahr zu Jahr und sind somit nur bedingt miteinander vergleichbar. Nichtsdestotrotz wird hiermit klar gezeigt, dass das vorletzte Beobachtungsjahr mit einem Mittelwert von -28,7 m (was zufälligerweise genau dem Mittelwert aller 78 in Österreich im Jahr 2021/22 vermessenen Gletscher entspricht) das bei weitem schlechteste der neun hier dargestellten Jahre (und überhaupt in der Geschichte des Gletschermessdienstes des ÖAV; Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2023) war. Relativ dicht dahinter liegt das Jahr 2016/17, knapp gefolgt vom aktuellen Berichtsjahr 2022/23. Das in diesem achtjährigen Zeitraum günstigste – aber immer noch stark gletscherabträgliche – Jahr war 2020/21 mit einer mittleren Längenänderung von „nur“ -11,3 m.

Allgemein kann für das Gletscherhaushaltsjahr 22/23 – aber auch für den gesamten Beobachtungszeitraum seit 2015 – gesagt werden, dass in allen fünf Gebirgsgruppen Gletscherrückzüge bei Weitem dominierten und nur vereinzelt stationäres Verhalten und nur einmal ein Vorstoß registriert wurde. Letzterer trat im Messjahr 2018/19 am Maurerkees (an der Stubachtaler Seite der Glocknergruppe) mit +2,2 m auf, jedoch handelte es sich dabei nicht um ein aktives Vorrücken der Eismasse, sondern bloß um ein Nach-Vorne-Kippen eines Teils der Gletscherstirn (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2020). Die in Tabelle 11 zusammengefassten Daten spiegeln somit einen dynamisch voranschreitenden Gletscherschwund wider, wobei die einzelnen Maxima (wie etwa 2016/17 am Winkelkees oder 2022/23 der dramatisch hohe Rückzugswert an der Pasterze) meist durch Eiszerfallserscheinungen an den Gletscherstirnen verursacht werden.

Tabelle 11: Die im Nationalpark Hohe Tauern durch den Österreichischen Alpenverein jährlich vermessenen Gletscher mit Angaben zur Längenänderung in den Gletscherhaushaltsjahren 2015/16 bis 2022/23. Lage siehe Abbildung 1. Grau hinterlegt ist das gegenständliche Gletscherhaushaltsjahr 2022/23.

Gruppe	Gletscher	15/16	16/17	17/18	18/19	19/20	20/21	21/22	22/23
Venedigergruppe (n=10; 9 pro Jahr aktiv)	Untersulzbachkees	(-41,5)		-53	-21,5	-44,0	-35,3	-50,2	-32,7
	Obersulzbachkees	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	R (F)	R (F)	R (F)
	Krimmlerkees I	(-45,3)		-7,0	-14,1	-13,2	-15,8	-22,0	-8,3
	Umbalkees	-16,0	-29,3	-24,0	-22,0	-26,0	-22,0	-42,0	-36,0
	Simonykees	-17,0	0	0	0	-6,0	-6,0	-22,0	-17,0
	Zettalunitzkees	-51,0	-54,0	-16,0	-24,0	-35,0	-17,0	-31,0	-32,0
	Frosnitzkees	-36,0	-49,0	-29,0	-7,0	-10,0	-8,0	-38,0	-46,0
	Schlatenkees	-50,0	-70,0	-67,0	-23,0	-50,0	-54,5	-89,5	-92,8
	Viltragenkees	-15,0	-28,0	-128	-27,0	-11,0	aufg.		
	Venedigerkees						neu	-21,5	-19,7
Granatspitzgruppe (n=3)	Sonnblickkees	-8,8	-1,9	-0,1	-2,5	-1,5	-8,6	-22,1	-4,2
	Landeckkees	1,1	-14,7	-7,9	sn	-1,1	(-26,5)		-5,7
	Kaiser Bärenkopfkees	-4,9	-3,6	-3,1	-2,8	-1,03	-3,0	-18,1	-4,9
Glocknergruppe (n=12)	Pasterze	-44,3	-61,0	-31,9	-60,0	-52,5	-42,7	-87,4	-203,5
	Wasserfallwinkelkees	-39,4	-12,5	-13,9	-11,4	-14,9	-11,9	-28,5	-16,2
	Freiwandkees	-7,9	-89,1	-6,9	-5,9	-34	-1,0	-40,9	-65,8
	Brennkogelkees	-7,5	-14,2	-6,4	-8,6	-13,7	-2,0	-31,6	-12,5
	Bärenkopfkees	-6,5	-13,3	-5,4	-86,9	-9,7	0	-14,2	-0,5
	Karlingerkees	-28,2	-9,0	-10,1	-71,7	-23,5	-7,2	-24,2	-15,7
	Schmiedingerkees	-12,1	-11,3	-33,1	-15,9	-15,8	-7,6	-62,6	-6,9
	Maurerkees	-3,1	(-20,0)		2,2	(-15,3)			-16,6
	Schwarzkarlkees	-14,7	(-45,8)		-7,7	-11,8	-11,4		-10,0
	Unteres Riffelkees	-2,9	-11,1	-17,2	-6,2	-7,3	-12,3	-5,4	-15,3
	Totenkopfkees	-0,5	-2,3	-6,0	-2,4	-2,8	-1,3	-25,6	-16,1
	Ödenwinkelkees	-17,8	-22,3	-4,7	-10,6	-15,0	-25,5	-44,7	-37,9
Schobergruppe (n=3)	Hornkees	-7,1	-12,1	-8,0	-5,4	-2,6	-3,1	-2,3	-5,7
	Gössnitzkees	-8,2	-8,0	-27,1	-6,7	-3,1	-5,8	-1,9	-1,5
	Roter-Knopf-Kees	-2,2	-1,5	-0,4	0	(-1,7)			-6,7
Goldberggruppe (n=3)	Kleinfleißkees	-1,6	-4,5	-4,8	-0,2	-2,6	-0,2	-10,6	-4,8
	Östl. Wurten-/Schareckkees	-26	-11,4	-12,9	-5	-25,5	-6,8	-28,7	-18,7
	Goldbergkees	-10,5	-8,7	-4,4	-6,4	-7,6	-0,2	-14,6	-18,1
Ankogel Hochalm- spitzgruppe (n=6)	Winkelkees	-0,8	-118,1	sn	sn	sn	n.d.	n.d.	R (F)
	Westl Trippkees	-35,4	-49,3	-2,2	-1,3	-1,7	-4,2	-36,7	-22,2
	Hochalmkees	-7,1	-11,1	-3,3	-2,3	-2,3	-2,6	-7,2	-2,2
	Großelendkees	-4	-12,7	-4,9	-4,0	-2,2	-11,9	-32,1	-10,3
	Kälberspitzkees	-11,2	-13,7	-4,6	-4,5	-5,1	-7,3	-11,0	-10,8
Kleinelendkees	-17,1	-9,1	-4,4	1,0	-0,3	-3,9	-13,2	-14,9	
<i>Mittelwert (von allen mit entspr. Daten)</i>		<i>-15,6</i>	<i>-25,6</i>	<i>-17,1</i>	<i>-14,1</i>	<i>-14,2</i>	<i>-11,3</i>	<i>-28,7</i>	<i>-24,5</i>

Anmerkung: Angaben in Klammern sind in den Originalquellen als Zwei- oder Dreijahreswerte deklariert. Werte, die auf Jahre mit n.d. folgen, sind in der Regel ebenfalls Mehrjahreswerte. Datenbasis sind die publizierten Jahresberichte des ÖAV, die jährlich im Heft 2 der Zeitschrift „Bergauf“ erscheinen; n.d. = keine Daten; R (F) = Rückzug auf Basis von Fotovergleich zu Vorjahr; aufg. = aufgelassene Messreihe eines Gletschers (an seiner Stelle wurde in der Venedigergruppe ein neuer Gletscher ins Messnetz aufgenommen, das Venedigerkees, von dem im Messjahr 2021/22 erstmals berichtet wurde). Die in den drei untersuchten Einzugsgebieten gelegenen Gletscher sind fett hervorgehoben.

Auffällig ist auch in diesem Zusammenhang, dass die großen Gletscher im Nationalpark Hohe Tauern, wie das Schlatenkees oder die Pasterze, in den letzten Jahren immer zu den „Spitzenreitern“ bei den Längenverlusten im Nationalpark selbst, aber auch österreichweit gehörten. So wies im Berichtsjahr 2022/23 beispielsweise die Pasterze mit

203,5 m den bei Weitem höchsten Rückzugswert aller österreichischen Gletscher auf (in weitem Abstand gefolgt vom Rettenbachferner [Ötztaler Alpen] mit -127 m). Im Nationalpark Hohe Tauern wurden vom Schlatenkees (-92,8 m) der zweit- und vom Freiwandkees (-65,8 m) der dritthöchste Wert mitgeteilt. Ist man beim Schlatenkees die hohen Rückzugsbeträge fast schon gewohnt (siehe hierzu auch das Titelbild dieses Berichts mit der nur mehr schmalen Gletscherzunge), so verwundert doch der hohe Wert am relativ kleinen Freiwandkees. Dieser ist dadurch erklärbar, dass sich der Gletscher in immer steileres und von glatten Felsflächen geprägtes Gelände zurückzieht, worauf die von Gletscherspalten zerfurchten Eismassen leicht abrutschen können. Bei der Vermessung des Freiwandkeeses durch den Gebietsverantwortliche A. Kellerer-Pirklbauer, einen der Verfasser dieses Berichts, erschwerten große Eisschollen im Gletschervorfeld die Messtätigkeiten erheblich. In der Glocknergruppe befand sich mit dem Bärenkopfkees der einzige Gletscher Österreichs (von insgesamt 93, für die im Jahr 2022/23 die Änderungstendenz bekannt war), der im Berichtsjahr stationär geblieben war. 35 der 36 beobachteten Gletscher (davon 34 mit tatsächlichen Jahreswerten und zwei mit Tendenzbestimmung durch Fotovergleich) waren in Rückzug.

Zur besseren Vergleichbarkeit der acht Messjahre 2015/16 bis 2022/23 zeigt Abbildung 13 die mittlere Längenänderung hier gezeigten Gletscherhaushaltsjahre lückenlos Daten vorliegen. Im Gegensatz zum ersten Zwischenbericht (Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2021) reduzierte sich somit die Anzahl der hier berücksichtigten Gletscher um zwei, da zum einen das Viltragenkees im Jahr 2021 aus dem Gletschermessprogramm genommen werden musste, da dort keine sinnvolle Längenänderungsmessung mehr möglich war, und zum anderen das Rote-Knopf-Kees in der jüngeren Vergangenheit nur mit einem Mehrjahresrückzugswert erfasst ist. Zu erinnern ist in diesem Zusammenhang auch auf die Tatsache, dass im Jahr 2023 die Längenänderungsmessungen am Landeckkees in der Granatspitzgruppe aufgrund des anhaltenden Gletscherschwundes eingestellt werden mussten.

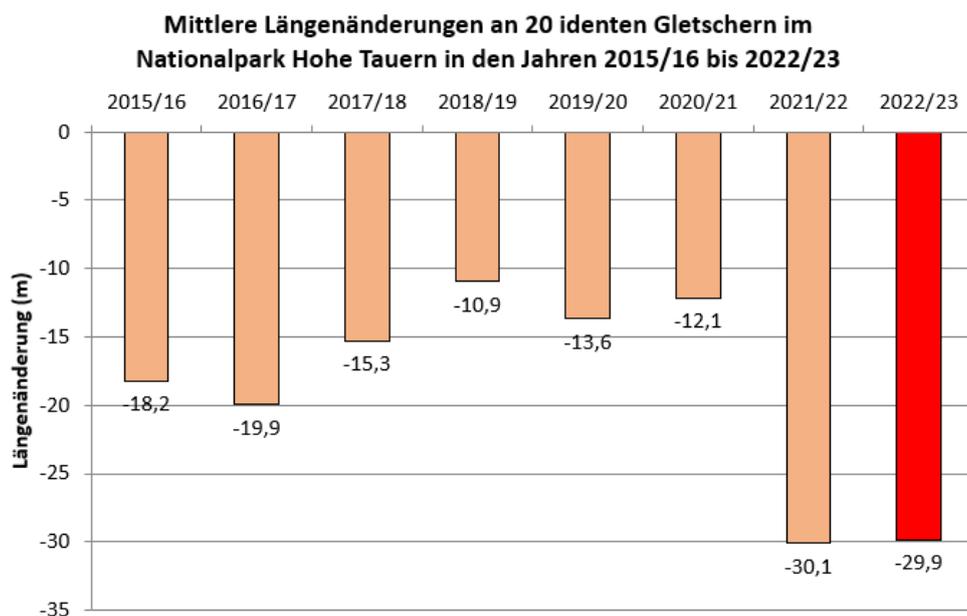


Abbildung 13: Mittlere Längenänderungen an 20 Gletschern im Nationalpark Hohe Tauern, von denen für die achtjährige Periode 2015/16 bis 2022/23 Längenänderungsdaten lückenlos vorliegen (siehe Tabelle 11). In Rot gehalten das aktuelle Beobachtungsjahr. Weitere Erläuterung siehe Text.

Durch die Berücksichtigung der nunmehr 20 Gletscher mit Daten der letzten sieben Jahre fließen immer dieselben Gletscher in die Berechnung dieses Mittelwertes ein und der Vergleich der Jahreswerte ist dadurch uneingeschränkt möglich (im Gegensatz zu den Jahresmittelwerten in Tabelle 11). Deutlich ersichtlich ist darin, dass in den drei Jahren 2018/19 bis 2020/21 geringere Mittelwerte erreicht wurden (-10,9 bis -13,6 m) als in den drei Jahren zuvor (-15,3 bis -19,9 m) sowie vor allem in den letzten beiden Jahren (-30,1 m und -29,9 m). Die hohen Mittelwerte für die Jahre 2016/17 und vor allem 2021/22 sind damit zu begründen, dass im ersten Fall mehrere Gletscher der Venedigergruppe zufällig zeitgleich besonders hohe Rückzugsbeträge zu verzeichnen hatten und im zweiten Fall alle Gletscher massiv an Länge

verloren. Einzig in der Schobergruppe fielen die Rückzüge allgemein eher moderat aus. Die dramatischen Mittelwerte für 2021/22 und 2022/23 kommen hingegen durch die großen Eisverluste v. a. der tief gelegenen Gletscher mit teilweise immer noch mächtigen Gletscherzungen zustande.

Auf der räumlichen Ebene der drei Flusseinzugsgebiete zeigt die Abbildung 14 die Längenänderungen der drei Gletscher Winkelkees (Seebachtal), Untersulzbachkees (Untersulzbachtal) und Schlatenkees (Innergsschlöss). Im Vergleich dazu ist auch die Pasterze in der Glocknergruppe für die – in diesem Fall – zwölf Gletscherhaushaltsjahre 2011/12–2022/23 dargestellt. Diese längere Zeitreihe wurde deshalb gewählt, da es beim Winkelkees in den letzten mittlerweile schon sechs Gletscherhaushaltsjahren zu messtechnischen Einschränkungen kam, die eine erfolgreiche Durchführung der Messungen dort nicht mehr erlaubten und somit ein längerfristiges Bild der Entwicklung bei diesem Gletscher nicht gezeigt werden kann. Dies offenbart aber auch die Problematik der Gebietsverantwortlichen, die alljährlich versuchen, die wertvollen langjährigen Messreihen fortzuführen, was – wie auch bereits für das Freiwandkees beschrieben – nahezu überall schwieriger wird. Das Winkelkees wird seit 2022 wieder durch Fotovergleiche beobachtet, sodass für die Periode 2022/23 zumindest die Tendenz der Längenänderung bestimmt werden konnte, während am Landeckkees, wie erwähnt, die Messungen im Sommer 2023 komplett eingestellt werden mussten.

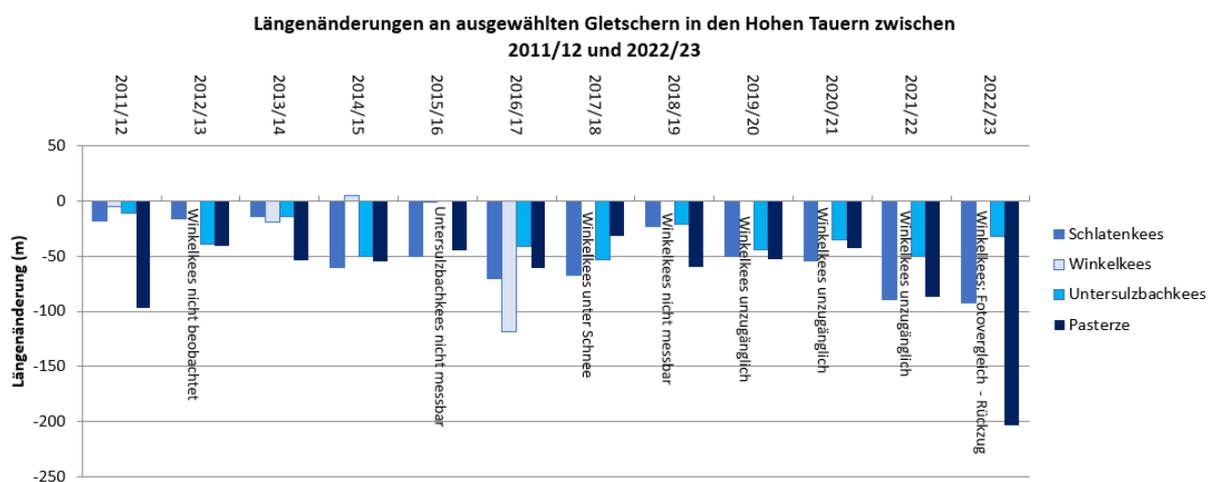


Abbildung 14: Längenänderungen an den vier Gletschern Schlatenkees (Venedigergruppe), Winkelkees (Ankogelgruppe), Untersulzbachkees (Venedigergruppe) und Pasterze (Glocknergruppe) im Zeitraum 2011/12–2021/22. Erläuterungen im Text.

Abbildung 14 zeigt das z. T. sehr unterschiedliche Verhalten der vier Gletscher in den einzelnen Jahren. Besonders stechen die extremen Rückzugswerte der Pasterze im Jahr 2022/23 (203,5 m) sowie 2011/12 (mit fast 100 m) und der Extremwert vom Winkelkees im Jahr 2016/17 mit 118,1 m hervor. Demgegenüber wurden am Schlatenkees 2022/23 mit 92,8 m und am Untersulzbachkees 2017/18 mit 53,0 m die maximalen Rückzugsbeträge der letzten zwölf Messjahre gemessen. Am wenigsten zog sich im Mittel über die zwölf Jahre das Winkelkees (27,8 m) zurück, wobei jedoch die letzten sechs Messjahre nicht berücksichtigt werden können und insofern dieser Wert nur wenig aussagekräftig ist. Knapp dahinter liegt das Untersulzbachkees mit 35,8 m im Mittel (jedoch ein Jahr ohne Daten), gefolgt vom Schlatenkees mit 50,5 m (ohne Datenlücke). Der höchste Mittelwert für die 11-Jahres-Periode wurde für die Pasterze mit 69,1 m (im Vorjahr betrug dieser Mittelwert noch 56,9 m und erklärt sich durch den neuen extremen Rekord 2022/23) ermittelt (ebenfalls keine Datenlücke). Allgemein kann somit festgehalten werden, dass die Gletscher im Nationalpark Hohe Tauern – so wie auch in anderen Teilen Österreichs und der Alpen – sich stetig in höhere Lagen zurückziehen, dieser Rückzug jedoch starken jährlichen Schwankungen unterworfen ist und nicht nur klimatisch, sondern auch von lokalen Gegebenheiten wie z. B. Seebildung (Kellerer-Pirklbauer et al. 2021b) oder Abreißen und Zerfall von Gletscherteilen bestimmt ist.

(b) Massenbilanz

Die in Tabelle 12 wiedergegebenen Ergebnisse der Massenbilanz-Bestimmungen und deren Visualisierung für vier ausgewählte Gletscher in Abbildung 15 bestätigen deutlich die schon im Abschnitt über die Längenänderungen dokumentierten langfristig vorherrschenden gletscherungünstigen Bedingungen. Mit keiner einzigen Ausnahme im hier gezeigten achtjährigen Beobachtungszeitraum 2015/16 bis 2022/23 konnten für alle hier betrachteten Gletscher ausschließlich negative bis hochnegative Massenbilanzen festgestellt werden. Nichtsdestotrotz kann das Beobachtungsjahr 2020/21 mit einer spezifischen Massenbilanz von -505 mm im Mittel der sieben Gletscher als relativ gletschergünstigstes Jahr gesehen werden. In den Jahren zuvor betrug dieser Mittelwert -797 mm (2019/20), -816 mm (2018/19), -1463 mm (2017/18), -1535 mm (2016/17) sowie -837 mm (2015/16). Außerordentlich sticht aus dieser Reihe das vorletzte Gletscherhaushaltsjahr hervor, in dem alle hier behandelten Gletscher neue Rekorde an spezifischen Massenverlusten aufwiesen. Im Mittel betrug die mittlere spezifische Massenbilanz der sieben Gletscher für dieses Jahr -2783 mm, was 1,8-mal so viel ist wie der Höchstwert der hier gezeigten Jahre davor. Die höchsten Negativwerte wiesen dabei das Wurtenkees sowie das Stubacher Sonnblickkees auf. Im aktuellen Beobachtungsjahr 2022/23 nahm die Rate des Massenverlustes an allen Gletschern im Nationalpark Hohe Tauern mit entsprechenden Daten deutlich ab. Im Durchschnitt lag der spezifische Massenverlust im Jahr 2022/23 um 36% unter dem Wert von 2021/22. Relativ günstig fällt dieser Vergleich für das Venedigerkees aus (2022/23 um 40,1% weniger Massenverlust als im Vorjahr), relativ ungünstig hingegen für Pasterze (nur -28,3%) und Zettalunitz/Mullwitzkees (nur -28,6%). Somit ist festzuhalten, dass auf Basis der Massenbilanzdaten der sieben hier berücksichtigten Gletscher in den letzten acht Jahren das drittletzte Beobachtungsjahr das bei Weitem günstigste von allen war, wohingegen in Bezug auf Eismassenverluste das vorletzte Beobachtungsjahr als dramatisch eingestuft werden muss. Das aktuelle steht dem Beobachtungsjahr zuvor allerdings nur wenig nach. Insgesamt ähnelt die Entwicklung der Massenbilanzen jener der Längenänderungen der Gletscher.

Tabelle 12: Spezifische Massenbilanzen an sieben Gletschern im Bereich des Nationalparks Hohe Tauern für die acht Gletscherhaushaltsjahre 2015/16–2022/23 in mm Wasseräquivalent. Grau hinterlegt ist das aktuelle Gletscherhaushaltsjahr. n.d.=fehlende Daten (die Daten von 2022/23 für das Wurtenkees werden, bedingt durch deren Bestimmung alle zwei Jahre durch Stefan Reisenhofer, GeoSphere Austria, erst 2024 vorliegen).

Gletscher	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23
Goldbergkees	-860	-1806	-1697	-845	-1093	-504	-2800	-1942
Kleinfleißkees	-432	-1791	-1377	-723	-738	-291	-2700	-1777
Pasterze	-1163	-1593	-1420	-1100	-1011	-900	-2300	-1650
Stubacher Sonnblickkees	-828	-1850	-1507	-699	-627	-688	-3417	-2294
Venedigerkees	-467	-659	-1045	-505	-392	-248	-2208	-1323
Wurtenkees	-1250	-1706	-1957	-1232	-1326	-458	-3604	n.d.
Zettalunitz/Mullwitzkees	-858	-1340	-1239	-611	-393	-447	-2449	-1749

Auffallend ist an den Werten von Tabelle 12 weiters, dass an fünf der sieben Gletscher die zweitgrößte negative spezifische Massenbilanz im Gletscherhaushaltsjahr 2022/23 erzielt wurde (Goldbergkees, Pasterze, Stubacher Sonnblickkees, Venedigerkees und Zettalunitz/Mullwitzkees) – die größte war an allen 2021/22, mit Ausnahme des Kleinfleißkeeses, das 2016/17 einen geringfügig größeren Massenverlust als 2022/23 aufwies. Die drittgrößte negative spezifische Massenbilanz wurde an den meisten der sieben Gletscher im Gletscherhaushaltsjahr 2016/17 erzielt. Dem stehen die – relativ gesehen – günstigeren Jahre für die Gletscher in den Hohen Tauern gegenüber. An fünf Gletschern wurden die niedrigsten spezifischen Massenverluste im Jahr 2020/21 ermittelt (Goldbergkees, Kleinfleißkees, Pasterze, Venedigerkees und Wurtenkees), an den beiden anderen Gletschern war dies im Berichtsjahr 2019/20 (Stubacher Sonnblickkees, und Zettalunitz/Mullwitzkees) der Fall.

Im Mittel der acht Jahre weisen die drei Gletscher Goldbergkees (-1443 mm), Stubacher Sonnblickkees (-1489 mm) und Pasterze (-1392 mm) ähnlich hohe Werte auf. Darüber liegt im Mittel nur das Wurtenkees, mit einem Mittelwert von -1648 mm (jedoch ohne den Messwert für 2022/23). Zu den im Mittel etwas besser abschneidenden Gletschern gehört hingegen das Kleinfleißkees mit -1229 mm, das Zettalunitz/Mullwitzkees mit -1136 mm und schließlich das

Venedigerkees mit „nur“ -856 mm. Der achtjährige Mittelwert über alle sieben Gletscher beträgt -1313 mm (im Vorjahr betrug dieser Wert bei einer siebenjährigen Messperiode noch -1248 mm), was einer aufsummierten gemittelten spezifischen Massenbilanz von -9192 mm (im Vorjahr waren es noch -8736 mm) Wassersäule entspricht. Diese mehrjährigen Ergebnisse zeigen, dass regionale Gegebenheiten die Extremwerte, aber auch die Variabilität des Massenverlustes stark beeinflussen, die Gesamttendenz einer in höchstem Maße gletscherungünstigen Witterungs- und Klimaentwicklung davon aber unberührt bleibt und vor allem die letzten beiden Messjahre außerordentlich ungünstig für die Eismassen der Gletscher der Hohen Tauern und Österreichs waren.

Abbildung 15 zeigt – ähnlich wie Abbildung 14 für die Längenänderungen – die Jahresmassenbilanzen seit 2015/16 exemplarisch für vier Gletscher. Aus dieser Grafik werden visuell die Unterschiede in den Einzeljahren zwischen den Gletschern noch deutlicher. Ebenso kommt die besondere Dramatik des Haushaltjahres 2021/22 in Bezug auf den Massenverlust der Gletscher zur Geltung – und dass das aktuelle Berichtsjahr nur wenig gletschergünstiger war.

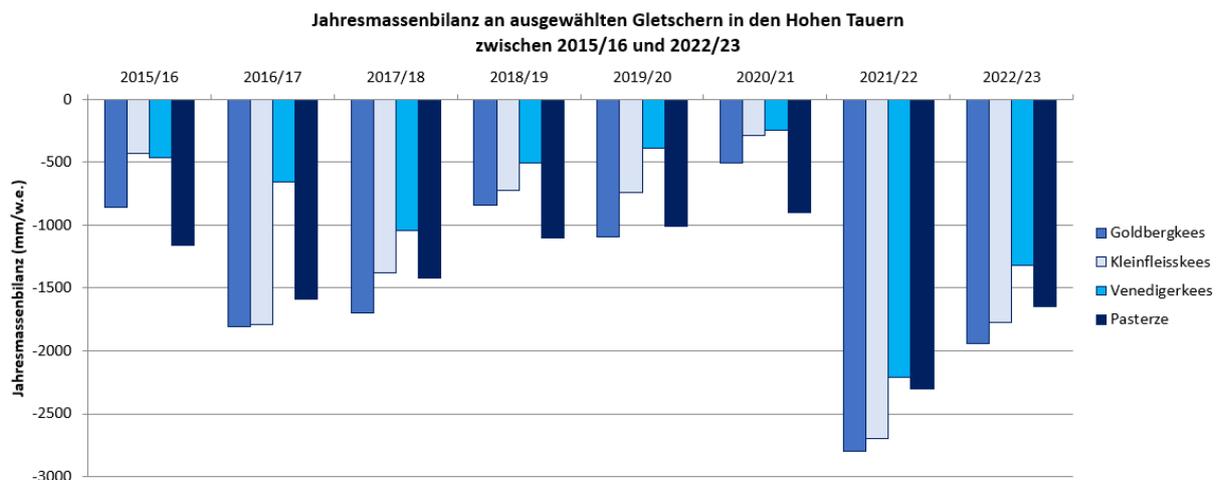


Abbildung 15: Spezifische Jahresmassenbilanz an vier ausgewählten Gletschern in den Hohen Tauern zwischen 2015/16 und 2022/23. Die Jahreswerte sind in mm Wasseräquivalent (mm w.e.) angegeben.

3.4. Ergebnis Bereich Permafrost 2022-2023

(a) Bodentemperatur- und Permafrostverhältnisse im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten

Dieses Messnetz wird durch die Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, betreut und von Andreas Kellner-Pirklbauer geleitet, was die Einbindung der Ergebnisse aus diesem Monitoringmessnetz in den vorliegenden Bericht erheblich erleichtert. Die an den Standorten ermittelten Jahresmitteltemperaturen für das Berichtsjahr 2022/23 sind in Abbildung 16 – aufgeteilt auf die vier Teilgebiete – dargestellt. Alle vier Teildiagramme sind auf der Ordinate gleich skaliert und damit direkt vergleichbar. Auf eine vertiefende Darstellung der Bodentemperatur- und Permafrostverhältnisse in diesem Gebiet wird auf die Berichte im Auftrag des Nationalparks Hohe Tauern Kärnten (zuletzt Kellner-Pirklbauer et al. 2024a) verwiesen.

Im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalar-Kögelekar (inklusive dem benachbarten Vergleichsstandort GOE-PRO) konnten an 16 Standorten Jahresmitteltemperaturen für das Messjahr 2022/23 ermittelt werden. An einem Standort in diesem Untersuchungsgebiet gab es bedingt durch Stromversorgungsprobleme einen Ausfall (KC-RID). Der Standort KC-LO musste steinschlagbedingt bereits im Jahr 2021 aufgegeben werden. Um jedoch spätere Vergleichsdarstellungen in der Langzeitbetrachtung (d. h. für Inhalte im Endbericht 2025) konsistent zu halten, scheint dieser nicht mehr aktive Standort jedoch noch in der Abbildung 16 auf.



Zumindest an vier Standorten lag die Jahresmitteltemperatur merklich unter 0 °C, dies waren HLC-MI-N, KC-UP, HLC-CO sowie HLC-UP-S. Für den Standort HLC-RT wurde ein Jahresmittel von knapp unter 0 °C (konkret -0,09 °C) ermittelt. Die höchsten Jahresmittelwerte wurden hingegen mit 4,4 °C am südexponierten Solifluktionsstandort (HLC-SO-S) gemessen, gefolgt vom südexponierten Felsmesstandort (HLC-RF-S) mit 2,9 °C. Der Standort HLC-SO-S war im Beobachtungsjahr 2022/23 wie schon im Jahr zuvor auch der wärmste im gesamten. Somit waren der jeweils kälteste und wärmste Standort in den beiden letzten Beobachtungsjahren identisch. Der Mittelwert der Jahresmitteltemperatur an den 16 Standorten in diesem Arbeitsgebiet mit entsprechenden Werten liegt bei 1,0 °C. Im Vergleich dazu lag der Mittelwert in diesem Arbeitsgebiet im Messjahr 2021/22 bei 1,5 °C sowie im Messjahr 2020/21 – gleich wie im letzten Jahr – bei 1,0 °C, wodurch die Bedingungen im Hinteren Langtalkar-Kögelekar und im hintersten Gössnitztal als relativ permafrostungünstig erscheinen. Nichtsdestotrotz war das letzte Messjahr in diesem Untersuchungsgebiet deutlich kühler als das Jahr zuvor.

Im Arbeitsgebiet Fallbichl-Schareck liegen zwei Jahreswerte für 2022/23 vor. Am Standort FAL-LO kam es bedingt durch Stromversorgungsprobleme ab dem 26.3.2023 zu einem Datenausfall, der keine Jahreswertberechnung für diesen Standort ermöglichte. Die Ergebnisse für die beiden Standorte mit Daten (FAL-UP, HOT) zeigen jeweils etwas wärmere Bedingungen als im Vorjahr. An keinem Standort wurde für das letzte Messjahr ein negativer Jahresmittelwert registriert, die Jahresmitteltemperaturen an den beiden Standorten lagen 2022/23 bei 0,5 °C. Dieser Wert ist aber nur bedingt mit dem Vorjahresmittelwert aus diesem Untersuchungsgebiet vergleichbar (1,1 °C), da im Vorjahr die Jahreswerte von drei Standorten zur Verfügung standen. Ohne Berücksichtigung des Jahreswertes 2021/22 vom Standort FAL-LO würde sich ein Mittelwert für 2021/22 von 0,2 °C ergeben. Somit war in diesem Arbeitsgebiet das Messjahr 2022/23 etwas wärmer als das Jahr zuvor.

Im Arbeitsgebiet Dösen-Säuleck liegen für 2022/23 Ergebnisse von 13 Standorten vor. Erfreulicherweise versagte kein einziger Datenlogger in diesem Arbeitsgebiet. Ähnlich dem ersten Untersuchungsgebiet wurde auch hier an mehreren Standorten – hier sechs – eine negative Jahresmitteltemperatur ermittelt. Vier dieser sechs Standorte sind nordexponiert mit Jahresmittelwerten zwischen -1,54 °C (DOV-MI-N) und -0,66 °C (DOV-LO-N). Der „traditionell“ kälteste Standort in diesem Arbeitsgebiet (DOV-UP-S) war auch im aktuellen Berichtsjahr jener mit dem deutlich niedrigsten Wert von -2,17 °C. Die Jahresmitteltemperaturen an diesem Standort betragen 2020/21 -2,15 °C und 2021/22 -2,23 °C. Der Mittelwert der Jahresmitteltemperatur an den 13 Standorten lag bei 0,3 °C und somit um 0,4 °C unter dem Vorjahreswert. Damit herrschten in Bezug auf den Mittelwert die nahezu gleichen Bedingungen wie im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar.

Schließlich konnten im Arbeitsgebiet Pasterze-Burgstall wie im Vorjahr für sechs Standorte Jahresmittelwerte errechnet werden, wobei zwei Standorte negative Werte aufwiesen. Dies waren die beiden hochgelegenen Standorte PAG-BU auf 2932 m (mit -1,46 °C) und PAG-FIR auf 3049 m (mit -3,22 °C). Der letztgenannte Standort wies – gleich wie in den beiden Vorjahren – den tiefsten Bodentemperatur-Jahresmittelwert des gesamten Messnetzes auf. Der Mittelwert der Jahresmitteltemperatur an den sechs Standorten dieses Messgebietes lag bei 1,2 °C. Der Mittelwert für das Jahr zuvor war mit 1,3 °C nahezu gleich.

In Summe konnte im Messjahr 2022/23 an 37 Standorten ein Jahresmittelwert der Bodentemperatur ermittelt werden (2021/22 waren es nur 34 Standorte), davon wiesen 13 Standorte (35 %) einen negativen und 24 (65%) einen positiven Mittelwert auf. Der Mittelwert der Temperatur für 2022/23 lag an diesen 37 Standorten bei 0,7 °C (zum Vergleich: 1,2 ° für 2021/22 sowie 1,1 °C für 2020/21), wobei die Werte der einzelnen Standorte zwischen 4,4 °C und -3,2 °C lagen.

An 32 Standorten lagen Jahresmittelwerte für 2020/21, 2021/22 sowie 2022/23 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 und für 2022/23 bei 0,84 °C. An 23 dieser 32 Standorte war das letzte Beobachtungsjahr kälter als das Jahr zuvor, an neun Standorten war dies umgekehrt. Dies zeigt, dass zumindest im Mittel das letzte Beobachtungsjahr etwas kühler war als die beiden vorangegangenen, und dass diese Mittelwerte in den letzten drei Messjahren innerhalb von 0,32 °C schwankten.

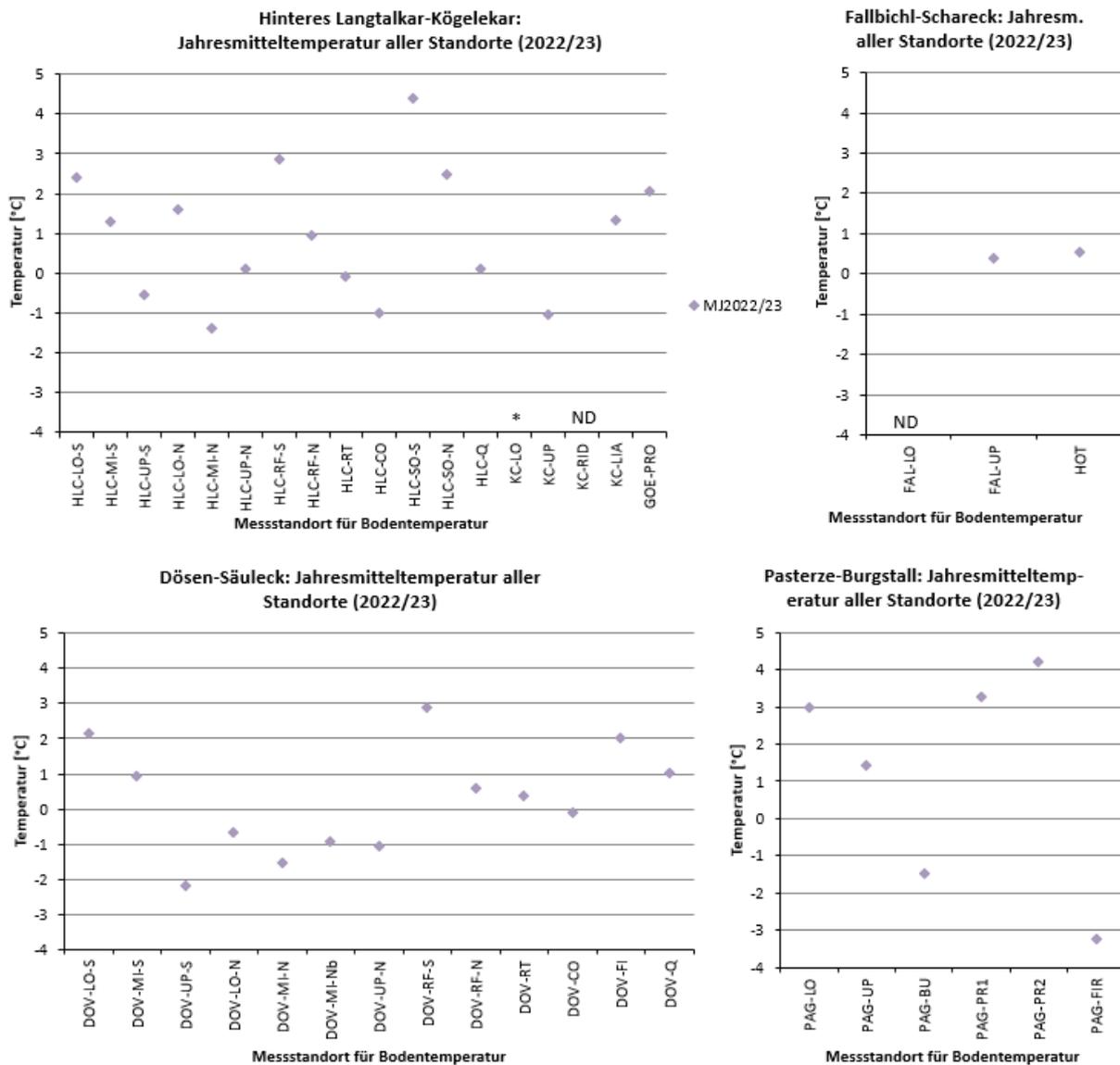


Abbildung 16: Jahresmitteltemperatur an/nah der Bodenoberfläche aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten für das Beobachtungsjahr 2022/23 (1.8.2022 bis 31.7.2023). Standorte, die mit ND (no data) markiert sind, verfügen aufgrund von Datenausfall (bedingt durch leere Batterien) über keine geschlossene Datenreihe für das letzte Berichtsjahr (KC-RID, FAL-LO). Altschnee war im Jahr 2023 keine Einschränkung bei der Geländearbeit.

Abbildung 17 zeigt die Tagesmitteltemperaturen der vier in Tabelle 2 grau hinterlegten Standorte (einer pro Untersuchungsgebiet) im Messjahr 2022/23. 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.

(1) Im Jahresgang für 2022/23 am Standort HLC-UP-N ist deutlich zu erkennen, dass wiederum eine winterliche Schneedecke sich dämpfend auf Schwankungen der Bodentemperatur ab spätestens Anfang Oktober 2022 und bis in die zweite Junihälfte 2023 auswirkte. Einerseits verhinderte diese fast neunmonatige Schneedecke im Herbst und Winter eine effektive Ausstrahlung und somit Abkühlung des Bodens (permafrostungünstig), andererseits wurde der Untergrund durch die Schneedecke bis Mitte Juni vor der solaren Einstrahlung effizient geschützt (somit erst ab Mitte Juni permafrostungünstig). Insgesamt lag die Jahresmitteltemperatur an diesem Standort mit 0,1 °C knapp über dem Gefrierpunkt, war aber um 0,5 °C tiefer als im Vorjahr.

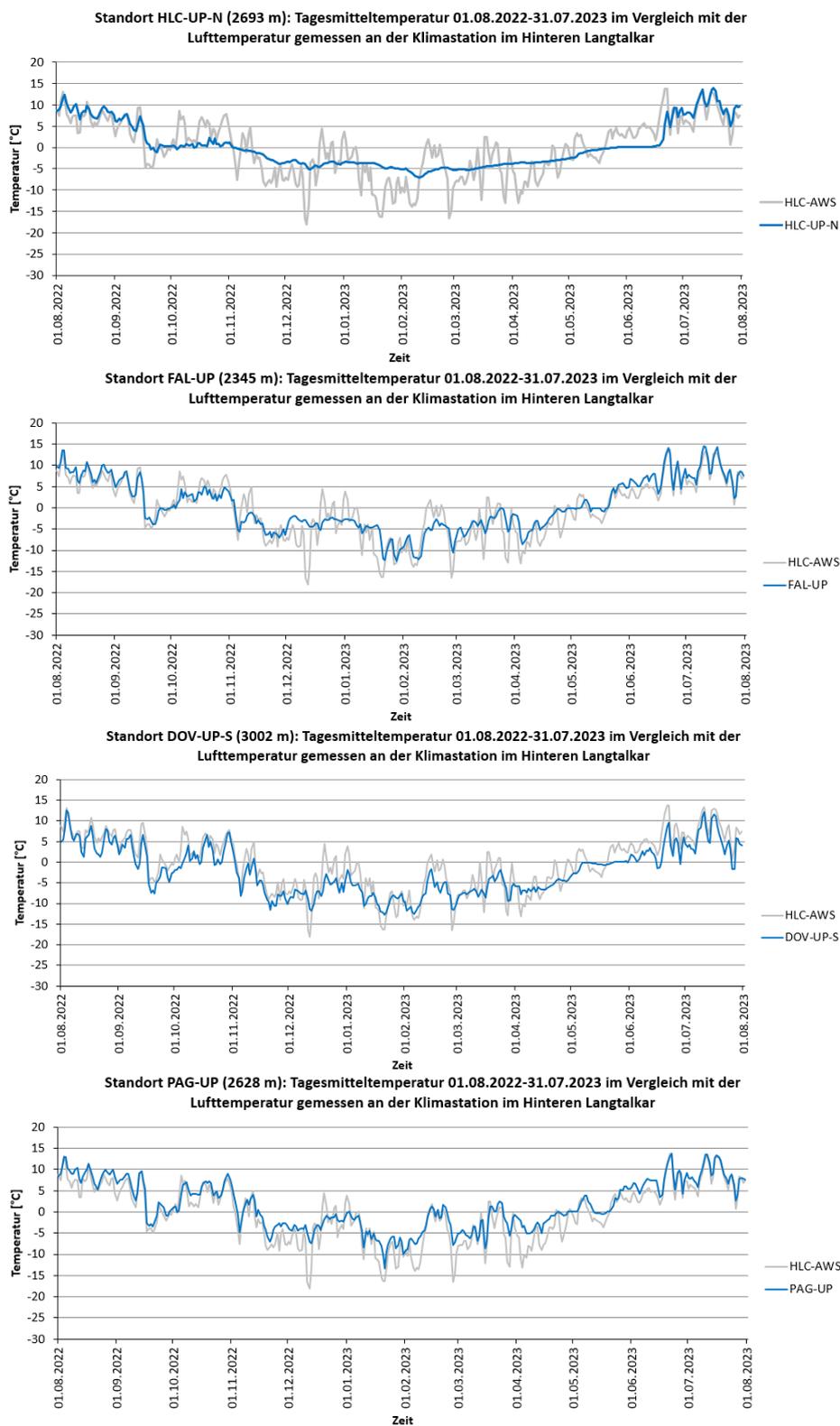


Abbildung 17: Tagesmitteltemperaturen der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten – HLC-UP-N, FAL-UP, DOV-UP-S und PAG-UP – im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten bzw. in dessen Nahbereich (Standort FAL-UP) für das Messjahr 2022/23 (1.8.2022 bis 31.7.2023). Messbereiche im Winterhalbjahr mit geringer Schwankung deuten auf Dämpfungseffekte durch eine mächtige Schneedecke (> ca. 80 cm) hin, was nur am Standort HLC-UP-N der Fall ist. In Grau sind die Tagesmittelwerte der automatischen meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS) dargestellt.





(2) Am Standort FAL-UP gab es im aktuellen Berichtsjahr – im Gegensatz zu den Berichtsjahren 2019/20 und 2020/21 und ähnlich dem Berichtsjahr 2021/22 – keine langanhaltende saisonale und thermisch isolierende Schneedecke. 2020/21 war eine solche zumindest von Anfang Dezember 2020 bis Mitte Juni 2021 wirksam gewesen. Bedingt durch das Fehlen des winterlichen Schnees konnte der Untergrund besser auskühlen als in den beiden erstgenannten Messjahren, sodass die Bedingungen vergleichbar mit denen des Vorjahres waren. Lag das Jahresmittel der Bodentemperatur an diesem Standort im Vorjahr noch bei $-0,02\text{ °C}$, so betrug dieser Wert im aktuellen Berichtsjahr $0,38\text{ °C}$ und war somit um $0,4\text{ °C}$ wärmer als 2021/22, aber immer noch um $0,8\text{ °C}$ kälter als 2020/21.

(3) Am Standort DOV-UP-S konnte – nach einer witterungsbedingten Pause im Jahr 2021 – die Datenauswertung in gewohnter Weise wie auch schon 2022 erfolgen. Die ermittelten Tagesmittelwerte für DOV-UP-S ähneln jenen vom zuvor besprochenen Standort FAL-UP im Sinne des weitgehenden Fehlens einer (merklichen) winterlichen Schneedecke (mit Ausnahme des Mais mit 18 Tagen Schneedecke). Auffällig sind die durchwegs tiefen Temperaturen bei DOV-UP-S aufgrund der größeren Seehöhe und die Tatsache, dass die Mittelwerte in den drei letzten Messjahren mit $-2,15\text{ °C}$ für 2020/21, $-2,23\text{ °C}$ für 2021/22 und $-2,17\text{ °C}$ für 2022/23 nahezu gleich waren.

(4) Am Standort PAG-UP zeigt sich wiederum ein ähnliches Bild wie am Standort zuvor mit weitgehend fehlendem Dämpfungseffekt der Schneedecke. Eine dünne, nur wenig isolierende winterliche Schneedecke dürfte an diesem Standort jedoch auch – wie in den Jahren zuvor – immer wieder vorhanden gewesen sein, wenn man die gedämpften Bodentemperaturminima im Winterhalbjahr (z. B. um die Jahreswende) im Vergleich zur Lufttemperatur betrachtet. Das Jahresmittel des Standorts PAG-UP lag um $0,3\text{ °C}$ unter jenem des Vorjahres ($1,43\text{ °C}$ in 2022/23; $1,71\text{ °C}$ in 2021/22). Das Messjahr 2022/23 war im Mittel auch das kälteste der zumindest letzten sechs Jahre.

Insgesamt repräsentieren die in Abbildung 17 dargestellten Temperaturkurven gut das breite Spektrum an Bodentemperatur-Messstandorten im Nationalpark Hohe Tauern. Dieses reicht von solchen mit dämpfender winterlicher Schneedecke in allen (auch in schneearmen) Jahren bis zu solchen, an denen selbst in schneereichen Wintern eine länger anhaltende Schneedecke fehlt. Im letzten Messjahr fällt jedoch wiederum auf, dass man nur an einem der vier Standorten von einer dämpfenden winterlichen Schneedecke sprechen kann, was jedoch auch mit der Auswahl der Stationen als am Fehlen einer saisonalen Schneedecke im Winter 2022/23 zu tun hat.

In der Abbildung 18 werden die Jahresmittelwerte aller Standorte der Periode 2022/23 jenen von 2021/22 gegenübergestellt. Die Darstellungsweise ist so gewählt, dass Datenpunkte, die oberhalb der strichlierten Linie liegen, Standorte zeigen, an denen die Jahresmitteltemperatur im jeweiligen Messjahr, welches an der Y-Achse ausgewiesen ist, höher als im jeweiligen Vergleichsjahr (X-Achse) war. Der Vergleich der Werte von 2022/23 mit jenen von 2021/22 zeigt, dass an den meisten Standorten ($n=24$) 2021/22 deutlich (im Extremfall um bis zu $1,3\text{ °C}$) bis leicht ($0,01\text{ °C}$) wärmer war als 2022/23. Nur an zehn Standorten war 2022/23 wärmer als das Jahr zuvor. Im Mittel war das Messjahr 2022/23 an den hier gezeigten Standorten um $0,3\text{ °C}$ kälter als das Vorjahr.

Die Abbildung 19 veranschaulicht die langjährige Entwicklung der Temperatur an denselben vier Standorten wie in der Abbildung 17. 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 bzw. September 2006 erfolgte, gibt es für keinen Standort Jahresmitteltemperaturen für das erste Messjahr 2006/07 (da ja in dieser Studie ein Messjahr mit 1.8. bis 31.7. des Folgejahres definiert ist). Die in der Grafik erkennbaren Trends 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. Detaillierte Erläuterungen zu den Trends der vier hier gezeigten Standorte finden sich in Kellerer-Pirklbauer et al. (2024a).



Vergleich 2021/22 vs. 2022/23

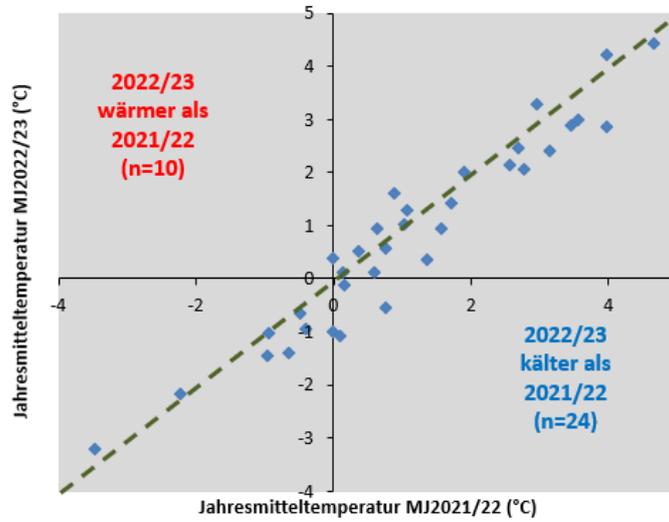


Abbildung 18: Gegenüberstellung der Jahresmittelwerte des gegenständlichen Projektjahres 2022/23 mit jenen des Vorjahres an allen Bodentemperaturmessstationen mit entsprechenden Daten.

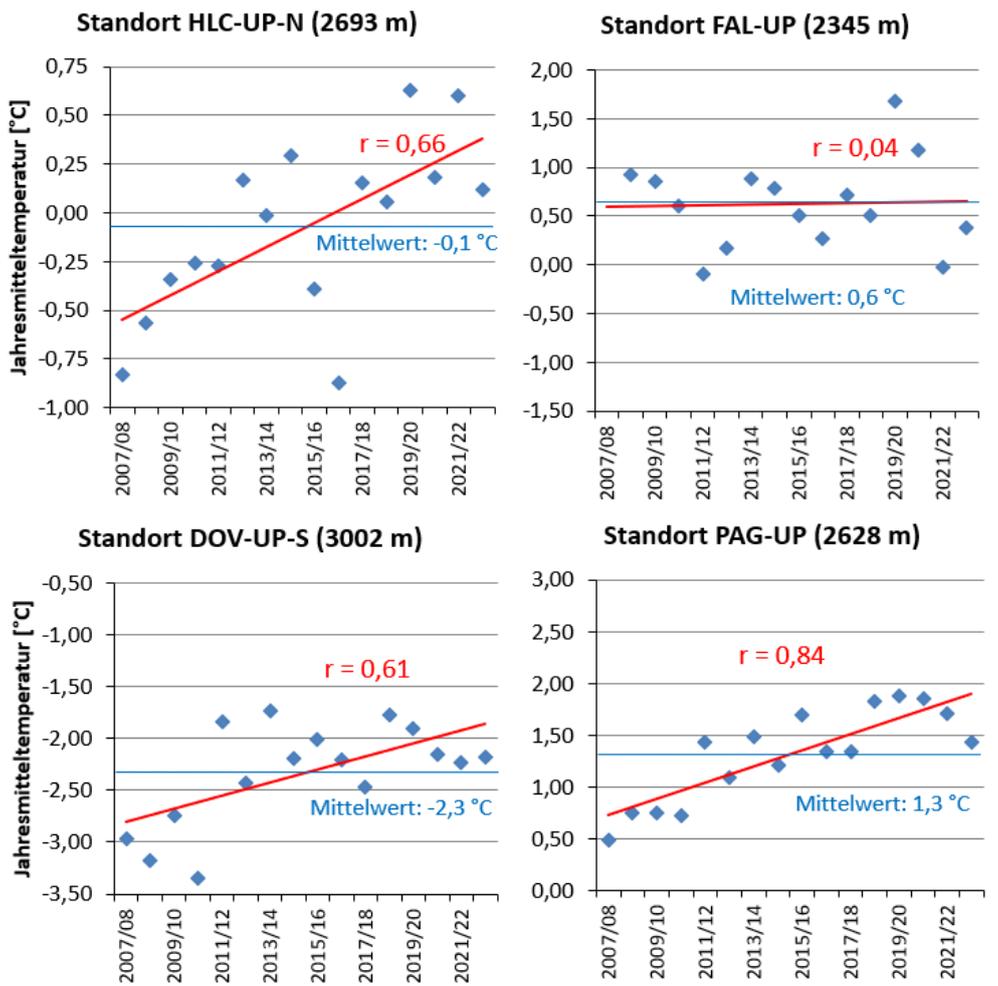


Abbildung 19: Jahresmitteltemperatur der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten für den Zeitraum 1.8.-31.7. des Folgejahres für die Messjahre von 2007/08 bis 2022/23. Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten sowie die jeweiligen Mittelwerte pro Standort sind dargestellt. Die Trends für DOV-UP-S, HLC-UP-N und PAG-UP sind statistisch signifikant (alle drei $p < 0,05$ – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 5 %; die beiden letztgenannten sogar $p < 0,01$ – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1 %). Zu beachten die unterschiedliche Skalierung der Ordinaten.

(b) Permafrost-Bohrlochtemperaturen am Hohen Sonnblick

Abbildung 20 zeigt die Messergebnisse von Bohrloch 3 auf dem Sonnblick für den Zeitraum 1.10.2022 bis 30.9.2023, ergänzt durch die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur am Sonnblick für denselben Zeitraum. Deutlich erkennbar ist die weitgehende Koppelung der Luft- und Bodentemperatur nahe der Oberfläche in den Sommermonaten bei Bedingungen ohne Schneedecke (z. B. zweite Augushälfte 2023). Komplette und teilweise Datenausfälle gab es, wie in Abschnitt 2.4 bereits dargelegt, mehrmals im Messjahr 2022/23. Die Tatsache, dass auch in den Wintermonaten der Sensor in 0 cm leichte Schwankungen aufweist, zeigt an, dass die Schneedecke am Standort des Bohrlochs auch im Winter generell eher geringmächtig ist, wenngleich die Zeit des Schneedeckenabbaus inklusive Schneedeckendurchtränkung (zero-curtain-Effekt) in diesem Jahr mehr als 1 Monat lang dauerte, und zwar von etwa Anfang Juni 2023 bis Mitte Juli 2023.

Der Herbst 2022 und der Hochwinter 2022/23 waren gekennzeichnet von einer gedämpften Reaktion der Boden- auf die Lufttemperatur, was auf die bereits angesprochene generell eher dünne saisonale Schneedecke hinweist. Erst gegen Ende Jänner 2023 war die Luft- von der Bodentemperatur endgültig entkoppelt, wobei dieser Effekt zumindest bis zum Ausfall der Sensoren Anfang März 2023 anhielt. Als Folge der erwähnten Datenausfälle lieferte der Sensor in 20 m Tiefe nach der Neuinstrumentierung des gesamten Bohrlochs am 6.9.2023 erstmals wieder nach dem Ausfall im Juni 2021 Daten. Die in Abbildung 20 ersichtlichen Ausfälle zeigen indirekt, dass das Monitoring von Permafrost an exponierten Standorten und mit Hilfe aufwändiger tiefer Bohrlocher personal- und kostenintensiv, aber dennoch fehleranfällig ist.

Zeigen die Sensoren in 0 und 1,2 m Tiefe noch eine starke Beeinflussung des Temperaturverlaufs durch die Lufttemperatur in der zweiten Augushälfte, so ist dieses Signal in 4 m schon stark gedämpft und in 12 m Tiefe lässt sich kein wirklicher Jahresgang mehr erkennen. Die Messwerte in 12 m Tiefe schwankten im Messjahr 2022/23 nur zwischen $-1,35\text{ °C}$ und $-1,68\text{ °C}$, somit um $0,33\text{ °C}$. Zum Vergleich betrug diese Schwankungsbreite bei den anderen Sensoren $2,85\text{ °C}$ in 4 m Tiefe, $9,29\text{ °C}$ in 1,2 m Tiefe, $16,2\text{ °C}$ in 0,4 m Tiefe sowie $20,9\text{ °C}$ an der Oberfläche.

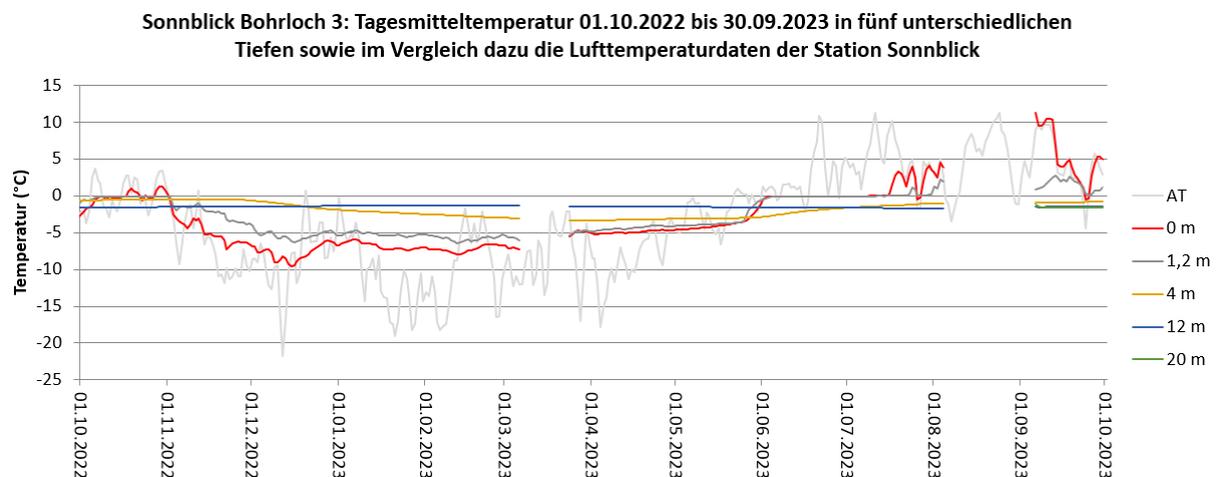


Abbildung 20: Tagesmitteltemperaturen im Bohrloch 3 am Sonnblick im Zeitraum 01.10.2022–30.09.2023 in fünf unterschiedlichen Tiefen sowie die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (AT) an der TAWES-Station Sonnblick. Die Lücken in den Kurven zeigen Zeiträume, in denen bedingt durch technische Probleme oder Wartungstätigkeiten keine Daten aufgezeichnet wurden (Daten: GeoSphere Austria).

Der Verlauf der Bodentemperatur in den unterschiedlichen Tiefen in der Periode 1.10.2014 bis 30.9.2023 ist in Abbildung 21 dargestellt und zeigt folgendes Bild: Zu beachten ist, dass im Beobachtungszeitraum in den beiden Wintern 2016/17 sowie 2022/23 – neben der zuvor schon aufgezeigten regelhaften Abnahme der Temperaturschwankungen mit der Tiefe – deutlich tiefere Temperaturniveaus in den Wintermonaten (bis -10 °C) herrschten. Klar erkennbar ist, dass dies in beiden Fällen eine Folge der ab Ende Oktober dynamischen Auskühlung des Untergrundes aufgrund geringer Schneelage war. In den fünf Wintern nach 2016/17 und bis 2021/22 wurden – trotz sehr tiefer Lufttemperaturen von zumindest rund -20 °C in jedem Jahr – so niedrigere Bodentemperaturen nicht mehr erreicht, wobei im drittletzten

Beobachtungsjahr (2020/21) zumindest noch -8,7 °C und im vorletzten Beobachtungsjahr 2021/22 noch -8,3 °C erreicht wurden. Im bisher letzten Messjahr 2022/23 wurde am 15.12.2022 mit -9,6 °C in 0 cm Tiefe beinahe der Minimalwert von 2017 (-9,7 °C am 28.1.2017) eingestellt. Die Minima der drei Winter direkt nach 2016/17 lagen bei -5,9 °C in 2017/18, -7,4 °C im Winter 2018/19 und -8,0 °C im Winter 2019/20. Auffallend sind die sehr hohen Sommertemperaturen am Sensor in 0 m mit 9,9 °C am 13.8.2021, 11,7 °C am 20.7.2022 und 11,3 °C am 6.9.2023. Der vorletzten genannte Wert ist der höchste in der vorliegenden Datenreihe seit 2014, der letztgenannte der höchste Septemberwert.

Sonnblick Bohrloch 3: Tagesmitteltemperatur 01.10.2014 bis 30.09.2023 in fünf unterschiedlichen Tiefen sowie im Vergleich dazu die Lufttemperaturdaten der Station Sonnblick

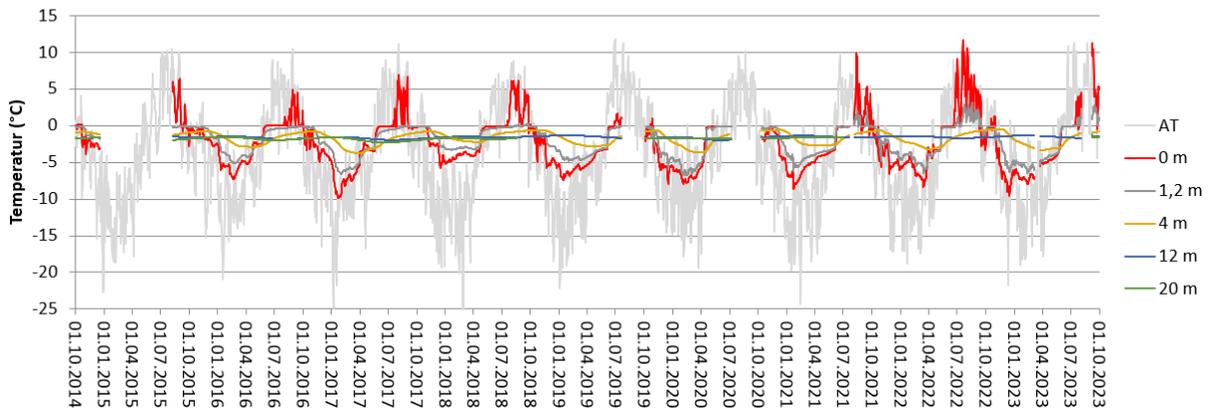


Abbildung 21: Tagesmitteltemperaturen im Bohrloch 3 am Sonnblick im Zeitraum 1.10.2014 bis 30.9.2023 in fünf unterschiedlichen Tiefen sowie die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (AT) an der TAWES-Station Sonnblick. Hinweise zu Quelle siehe Abbildung 20.

Sonnblick Bohrloch 3: Jahresmitteltemperaturen in unterschiedlichen Tiefen im Vergleich zur Lufttemperatur

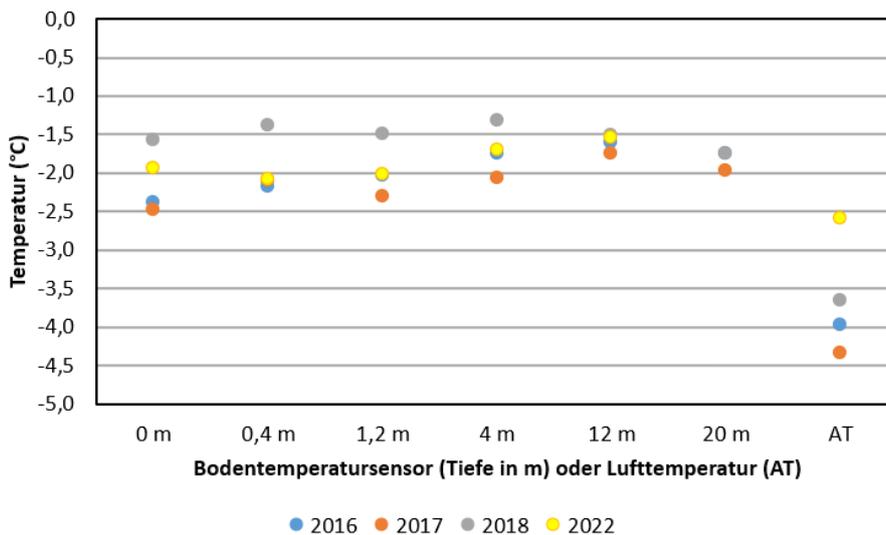


Abbildung 22: Jahresmitteltemperaturen für vier Kalenderjahre mit geschlossenen Datenreihen zwischen 2016 und 2022 im Bohrloch 3 am Sonnblick. Datenbasis hierzu siehe Abbildung 20.

Der Vergleich der Bodentemperatur an der Oberfläche und in den unterschiedlichen Tiefen sowie der Lufttemperatur an der nahen Klimastation am Hohen Sonnblick für die vier Kalenderjahre 2016, 2017, 2018 und 2022 (nur jene Jahre ohne Datenlücken seit 2014) in Abbildung 22 zeigt, dass sowohl die Luft- als auch die Bodentemperatur in unterschiedlichen Tiefen nahezu überall im Jahr 2017 tiefer war als in den Jahren 2016, 2018

oder 2022. Einzige Ausnahme war der Sensor in 0,4 m Tiefe, wo 2016 um 0,3 °C kühler war als 2017. Das Kalenderjahr 2018 wies in allen Tiefen höhere Temperaturen auf als in den beiden Vorjahren. Dies ist im Wesentlichen stimmig zu den Lufttemperaturdaten. Das Kalenderjahr 2022 hatte zwar die bei weitem höchste Lufttemperatur, die Bodentemperaturen waren jedoch relativ im Mittel in allen Tiefen mit Daten (Ausnahme 20 m bedingt durch Datenausfall).

Um für einen längeren Zeitraum einen Vergleich der Bodentemperaturdaten geben zu können, zeigt Abbildung 23 die Monatsmitteltemperatur für den Jänner für die acht Jahre zwischen 2016 bis 2023. Auf Basis dieser Werte erkennt man, dass der Jänner 2017 die tiefsten Werte im oberflächennahen Untergrund mit sich brachte, wohingegen der Jänner 2018 am wärmsten war. Der Unterschied dieser beiden Jänner-Werte betrug 3,6 °C. Der Jänner 2023 liegt eher im Mittel, insbesondere an der Oberfläche sowie bei der Lufttemperatur. Diese Unterschiede zwischen dem wärmsten und kältesten Jänner schwächen sich nach unten hin stark ab (in 0,4 m bei 3,1 °C; in 1,2 m bei 2,1 °C; in 4 m bei 1,1 °C), und in Tiefen von 12 und 20 m verringern sich diese Unterschiede zu Größenordnungen von nur mehr 0,2 °C, was auf relativ thermisch stabile Verhältnisse in großen Tiefen hinweist. Demgegenüber lagen die Monatsmittel der Lufttemperatur, die in den Jännermonaten zwischen 2016 und 2023 um 7,3 °C schwankten, geschlossen in allen Jahren deutlich unter den Temperaturen im Bohrloch – unabhängig von der Tiefe. Letzteres ist mit der erwähnten thermischen Isolierung durch die Schneedecke erklärbar.

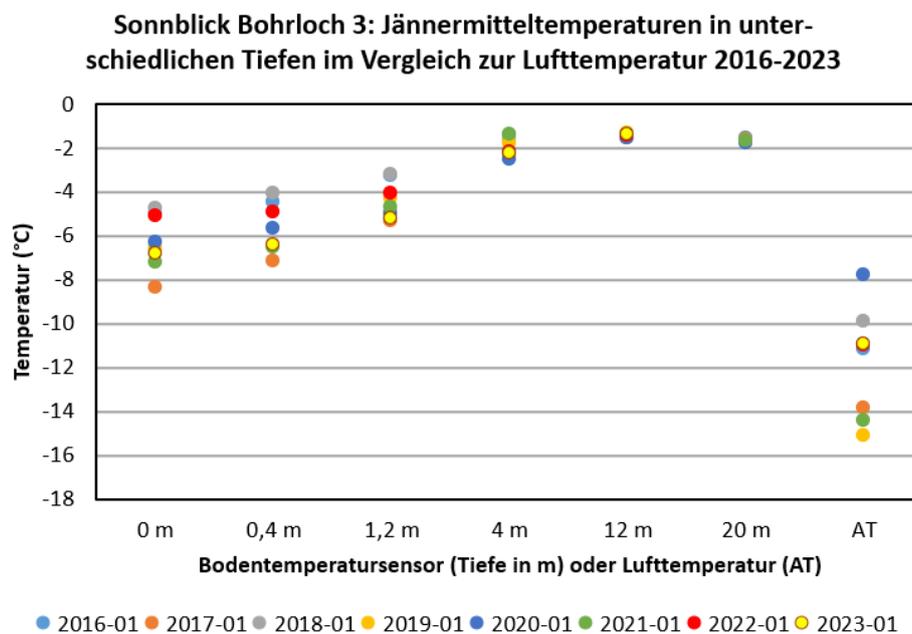


Abbildung 23: Mitteltemperatur der Jänner für die acht Jahre von 2016 bis einschließlich 2023 im Bohrloch 3 am Sonnblick. Datenbasis hierzu siehe Abbildung 21.

(c) Blockgletscherbewegung im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten

Auch für eine vertiefende Darstellung der Bewegungsraten in kriechendem Permafrost (Blockgletscher) wird auf die Berichte im Auftrag des Nationalparks Hohe Tauern Kärnten (zuletzt Kellerer-Pirklbauer et al. 2024a) zurückgegriffen.

Dösener Blockgletscher

Die Bewegungsmessungen am Dösener Blockgletscher mittels RTK-GNSS-Technologie mit Basisstation beziehen sich auf ein geodätisches Datum, das durch 12 markierte, stabile Punkte im Nahbereich des Blockgletschers definiert ist und die Bewegungsraten der 34 am Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte

bestimmt. Die Bewegungsraten für den Beobachtungszeitraum 2022/23 wurden durch Epochenvergleich (16.8.2022 mit 19.8.2023) ermittelt.

Die horizontalen Bewegungsvektoren der 34 Beobachtungspunkte an diesem Blockgletscher sind in Abbildung 24 graphisch dargestellt. Als Basisstation (= Referenzpunkt) für die differentielle GNSS-Messung im Echtzeitmodus (Real-Time Kinematic/RTK) wurde der Triangulationspunkt (interne Bezeichnung AVS) in der Nähe des Arthur-v.-Schmidhauses gewählt. Tabelle 13 fasst die zeitliche Änderung des Bewegungsverhaltens des Blockgletschers durch Angabe von Mittel- und Maximalwerten der Bewegungsraten für den Zeitraum 2016/17–2022/23 zusammen.

Eine maximale Bewegung von 56,5 cm/Jahr im Messjahr 2022/23 wurde im Punkt 15 im zentralen Teil des Blockgletschers gemessen. Dieser Punkt war auch der schnellste in den Jahren zuvor, wobei der Wert von 2022/23 der niedrigste der drei letzten Jahre war. Auffällig sind die geringen Bewegungsraten am orographisch rechten Rand und die graduelle Abnahme der Geschwindigkeit vom zentralen Bereich zur Stirn bzw. zum linken Blockgletscherrand. Für die Punkte 28 und 29 konnte keine signifikante Bewegung festgestellt werden. Die aktuelle Bewegung am Dösener Blockgletscher hat sich im Vergleich zum Vorjahr wiederum signifikant um weitere 8,4 % (im zentralen Bereich) verringert. Die aktuellen Bewegungsraten sind geringer als in den drei Jahren zuvor, liegen aber immer noch auf einem langfristig gesehen hohen Niveau.

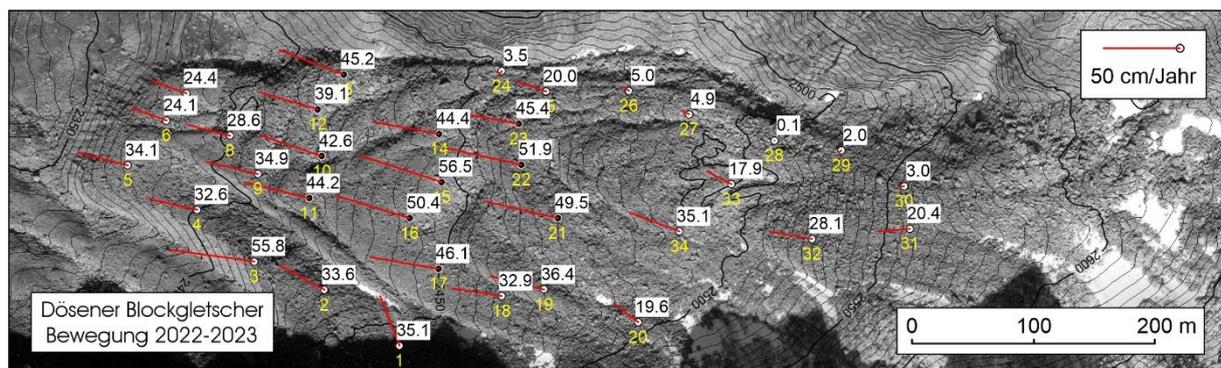


Abbildung 24: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Dösener Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2022/23. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (cm/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2\text{-}3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Orthofoto 20.9.2010 © Land Kärnten.

Tabelle 13: Bewegungsraten am Dösener Blockgletscher für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2016/17–2022/23. Die Mittelwerte wurden aus den Bewegungsraten der zentralen Punkte 10–17 und 21–23 gerechnet. Die Maximalwerte wurden jeweils im Punkt 15 festgestellt. Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum.

Werte (in cm/Jahr)	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23
Mittelwert	43,2	38,0	42,9	50,3	60,0	51,1	46,8
Maximalwert (Punkt)	53,1 (15)	46,4 (15)	51,1 (15)	58,9 (15)	71,0 (15)	61,4 (15)	56,5 (15)

Die Oberflächenbewegung am Dösener Blockgletscher war im Jahr 2020/21 die höchste im gesamten hier gezeigten Messzeitraum und hatte sich im Vergleich zum Jahr zuvor signifikant um weitere 19,3 % (im zentralen Bereich) vergrößert. Die Bewegungsraten von 2020/21 waren somit auch die höchsten seit Messbeginn im Jahr 1995. In den beiden letzten Messjahren hat die Bewegung wieder abgenommen, was sowohl mit den kühleren thermischen Bedingungen im Untergrund als auch mit trockeneren Bodenverhältnissen in Verbindung zu bringen ist (Kellerer-Pirklbauer et al. 2024a).

Tabelle 14: Bewegungsraten am Blockgletscher Hinteres Langtalkar für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2016/17 bis 2022/23 für zwei ausgewählte Punktgruppen A (oberer Bereich) und B (unterer Bereich). Die Mittelwerte wurden aus den Bewegungsraten aller Punkte der jeweiligen Punktgruppe gerechnet. Die Maximalwerte beziehen sich auf die jeweiligen Punktgruppen. Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum.

Obere Punktgruppe A (Punkte 10-17, 37)

Werte (in cm/Jahr)	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23
Mittelwert	19,4	16,3	19,1	27,7	37,3	35,3	27,3
Maximalwert (Punkt)	22,3 (11)	20,6 (11)	21,9 (17)	31,8 (10)	42,8 (11)	40,5 (16)	31,3 (16)

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

Werte (in m/Jahr)	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23
Mittelwert	4,60	4,77	5,20	5,48	5,74	4,73	3,81
Maximalwert (Punkt)	5,66 (24)	6,64 (24)	7,45 (24)	8,07 (25)	3,94 (23)	3,25 (27)	2,77 (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 Auswertung 2022/23 (ohne die Punkte 24, 25 und 31) verwendet. Die angegebenen Maximalwerte sind die tatsächlich gemessenen Größen.

Mit den hohen Bewegungsraten geht weiterhin eine morphologisch gut beobachtbare Destabilisierung der Blockgletscheroberfläche einher. Die Messung der Punkte im Einflussbereich der unteren Rutschzone ist weiterhin nur mehr mit einem erheblichen Gefahrenpotential oder gar nicht möglich, weshalb dort auch eine andere Methode verwendet wird (Kap. 4.3). Die aktuell festgestellten Bewegungsraten haben sich im Vergleich zum vorjährigen Beobachtungszeitraum signifikant (Punktgruppe A/oben mit 22,7 %) verringert. Die diesbezügliche Einschätzung für die Punktgruppe B ist unsicher, da dieser Bereich bereits stark von lokalen Rutschungsprozessen beeinflusst ist. Bei den noch messbaren Punkten (23, 27 und 28) ergibt sich hier ebenfalls eine Abnahme der mittleren Bewegungsrate um ca. 19,6 %. Für die Verhältnisse an der hoch aktiven Blockgletscherstirn wird auf Kapitel 4.3 verwiesen.

Oberflächenbewegung im Vergleich

Die vergleichende Darstellung der zeitlichen Änderung der Oberflächenbewegung der beiden untersuchten Blockgletscher ist Inhalt der Abbildung 26. Aus dem Bild der Geschwindigkeitsgraphen ist gut zu erkennen, dass (1) die Bewegungsraten der Blockgletscher gut miteinander korrelieren, (2) die Bewegungsraten im Messjahr 2020/21 die größten der gesamten Messreihe darstellen, (3) noch zwei zeitlich zurückliegende Bewegungsmaxima (2003/04 bzw. 2014/15) erkennbar sind, (4) die mittlere Geschwindigkeit gering (Bereich A Hinteres Langtalkar) bis massiv (die beiden anderen Kurven) zwischen 2020/21 und 2021/22 abgenommen hat und (5) zwischen 2021/22 und 2022/23 sich diese noch weiter reduzierte.

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden in der Abbildung 26a nur die beiden langsameren Kurven (Dösen und Hinteres Langtalkar oberer Bereich) dargestellt, wobei deren gleichsinniger Verlauf gut zum Ausdruck kommt. In Abbildung 26b sind alle drei Bewegungskurven zu sehen, wobei aber auch hier die gleichzeitigen Maxima gut zum Ausdruck kommen. Die hier dargestellte gute Korrelation der Blockgletscherbewegung lässt sich räumlich auch auf den gesamten Alpenraum erweitern. So flossen mittlerweile bereits viermal die hier gezeigten Blockgletscher-Bewegungsdaten sowie Informationen zur Entwicklung der Boden- und Lufttemperatur sowohl aus dem Hinteren Langtalkar als auch aus dem Dösental in Beiträge für die renommierte Zeitschrift „Bulletin of the American Meteorological Society“ (BAMS) ein (Pellet et al. 2021, 2022, 2023, 2024) – ein weiterer Hinweis für die große Bedeutung langfristigen Monitorings für wissenschaftlich fundierte Aussagen, was auch in Kellerer-Pirklbauer et al (2024c) bei einer vergleichenden Blockgletscherstudie für den ganzen Alpenraum zum Ausdruck kommt.

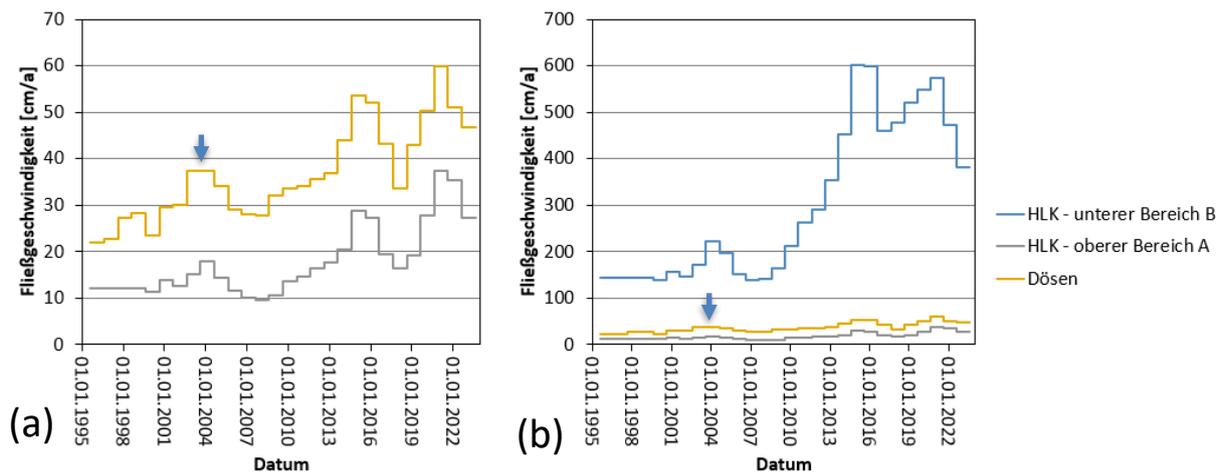


Abbildung 26: Direkter Vergleich der mittleren jährlichen horizontalen Oberflächenbewegung der beiden Blockgletscher Dösen – zentraler Bereich, Hinteres Langtalkar (HLK) – oberer Bereich A und Hinteres Langtalkar – unterer Bereich B für den Zeitraum 1995–2023. Mittelbildung über 11 Punkte (10–17, 21–23) am Dösener Blockgletscher, 9 Punkte (10–17, 37) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar (oberer Bereich A) und 8 Punkte oder reduzierte Punkteanzahl (23–25, 27–31) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar (unterer Bereich B). Im Jahr 2003 fand keine Messung am Blockgletscher Dösen (Pfeil) statt.

(d) Bodentemperatur- und Permafrostmonitoring Innerer Knorrkogel, Nationalpark Hohe Tauern Tirol

Das Messnetz am Inneren Knorrkogel wurde am 11.8.2023 gewartet, nahezu alle Standorte lieferten geschlossene Datenreihen für den gesamten bisherigen Monitoringzeitraum seit 2018. Auf Basis der vorliegenden Datenreihen war es möglich, als Bezugszeitraum für diesen Bericht – unter Berücksichtigung ganzer Monate für die Mittelbildung – die fünf Beobachtungsjahre 2018/19, 2019/20, 2020/21, 2021/22 und 2022/23 (jeweils 1.9. bis 31.8. des Folgejahres) zu analysieren und zu vergleichen, wobei einschränkend ergänzt werden muss, dass für das letzte Beobachtungsjahr die Augustmittelwerte nur die Tageswerte der Periode 1. bis 11.8. umfassen. Tabelle 15 gibt einen Überblick über die gemessenen Jahresmittelwerte für alle fünf Messjahre und für jeden Standort sowie Sensor (bei den Felssdatenloggern drei pro Standort). Ebenso sind die Mittelwerte der zumeist fünf – in wenigen Fällen vier – Messjahre sowie im unteren Teil der Tabelle Mittelwerte, Minimum, Maximum und Amplitude der Jahresmittelwerte an den 18 Standorten für jedes Messjahr angegeben.

Im Messjahr 2022/23 lag der Jahresmittelwert aller Standorte bzw. Sensoren ($n=23$) bei $-1,10$ °C. Dieser Wert stellt auch den Tiefstwert in der bisherigen 5-jährigen Messreihe dar, wobei im Mittel über alle Standorte bzw. Sensoren die Jahresmitteltemperatur um $0,14$ °C tiefer lag als im Jahr 2020/21, dem bisher kältesten Jahr. Der Sensor mit der tiefsten Jahresmitteltemperatur war in 2022/23 der NW-exponierte Grat-Standort G-1K-NW-2860 mit $-2,34$ °C, knapp gefolgt vom Standort direkt neben dem Gipfelkreuz (S-GT-2886) mit $-2,32$ °C. Der höchste Jahresmittelwert wurde hingegen am Süd-exponierten Felstemperaturstandort (F-3K-S-2871) mit $1,00$ °C ermittelt, sodass die gesamte Spannweite aller Jahresmitteltemperaturen in diesem Messjahr $3,34$ °C beträgt. An 19 der 23 Sensoren wurde ein negativer Jahresmittelwert ermittelt (zwischen $-2,34$ und $-0,20$ °C), an vier Sensoren hingegen ein positiver ($0,17$ bis $1,00$ °C). In den letzten Jahren errechneten sich negative Jahresmittelwerte an folgender Anzahl von Standorten: 15 für 2018/19, 10 für 2019/20, 17 für 2020/21 und 16 für 2021/22.

Vergleicht man die Messwerte von 2022/23 mit dem Mittelwert über den 5-jährigen Zeitraum 2018/19–2022/23, fällt auf, dass nur an zwei Standorten der 5-Jahres-Mittelwert etwas tiefer liegt (bei S-GT-2878 um $0,02$ °C; bei F-1K-NE-2860 um $0,46$ °C) als die Jahresmitteltemperatur von 2022/23. Auch dies weist darauf hin, dass 2022/23 bezogen auf die letzten 5 Jahre unterdurchschnittlich temperiert war. Einschränkend muss jedoch nochmals darauf hingewiesen werden, dass für die Bestimmung des August-2023er- Monatsmittelwertes nur 11 Tagesdaten zur Verfügung standen und somit die berechneten 2022/23-Jahresdaten wohl etwas niedriger ausfallen als die tatsächlichen Werte für das gesamte Monitoringjahr 2022/23. Diese fehlenden August-Daten werden jedoch im

Sommer 2024 vorliegen und somit werden sich mit der Berichtslegung 2025 die Jahreswerte für 2022/23 noch leicht, sicherlich aber nicht markant verändern. Auch unter Berücksichtigung dieser kleinen Dateneinschränkung bleibt festzuhalten, dass 2022/23 am Inneren Knorrkogel insgesamt ein relativ Permafrost-günstiges Jahr bezogen auf die letzten 5 Jahre darstellt.

Tabelle 15: Übersicht über die 18 Monitoring-Standorte an der Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels mit Angaben zu Code, interner Loggernummer, Tiefe des Temperatursensors bzw. der Sensoren (bei Dreikanaldatenlogger eingebaut in Felsen) mit den gemessenen Jahresmittelwerten für 2018/19 bis 2022/23 sowie deren Mittelwert über die 5 Jahre (in Ausnahmen 4 Jahre*). ND = no data (siehe hierzu Kapitel 2.4). Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum.

Code	Log. Nr.	Sensor-tiefe (cm)	Jahresmitteltemperatur (°C)					Mittelwert 2018/19-2022/23 (°C)
			2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23	
G-1K-SW-2840	A5223B	0	-1,52	0,25	-0,68	-0,06	-1,09	-0,62
F-1K-W-2840	A52220	0	-1,56	-0,67	-1,63	-1,60	-2,10	-1,51
G-1K-SW-2860	A5223F	0	0,41	0,63	-0,24	0,12	-0,94	0,00
F-1K-W-2860	A52244	0	-1,17	-1,27	-2,24	-1,79	-2,17	-1,69
S-GT-2886	A521B7	0	-1,77	-1,42	-2,70	-1,63	-2,32	-1,97
G-1K-NW-2860	A52227	0	-1,25	-0,95	-1,96	-2,02	-2,34	-1,71
G-1K-NW-2840	A52223	0	-1,27	-0,66	-1,84	-1,71	-1,92	-1,48
F-3K-W-2869	A538B7	3	-0,10	0,26	-0,85	-0,55	-1,24	-0,50
	A538B7	10	-0,16	0,13	-0,94	-0,71	-1,34	-0,60
	A538B7	40	-0,65	-0,45	-1,33	-1,37	-1,81	-1,12
F-3K-NE-2871	A538AC	3	-0,87	0,01	-0,64	-1,33	-1,37	-0,84
	A538AC	10	-0,98	-0,12	-0,77	-1,53	-1,47	-0,97
	A538AC	40	-1,03	-0,22	-0,85	-1,82	-1,47	-1,08
S-GT-2878	A52194	0	-1,09	-0,98	-2,29	0,31	-1,03	-1,05
S-AT-2878	A5223E	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
F-3K-S-2871	A538B1	3	1,04	1,73	0,63	1,67	1,00	1,21
	A538B1	10	0,74	1,37	0,31	1,33	0,68	0,89
	A538B1	40	0,71	1,22	0,18	1,11	0,51	0,75
G-1K-E-2860	A521CB	0	0,25	1,23	-0,61	-1,50	-1,16	-0,36
G-1K-E-2845	A5222E	0	0,40	0,82	0,02	-1,85	-0,75	-0,27
F-1K-NE-2860	A5226E	0	-0,72	0,30	-0,94	-1,72	-0,20	-0,65
F-1K-NE-2840	A521A0	0	-1,78	-1,54	-2,47	-2,35	-2,08	-2,04
F-1K-S-2860*	A5222A	0	1,19	0,54	ND	0,43	-0,81	0,34
F-1K-S-2840	A52230	0	1,96	1,68	0,53	1,83	0,17	1,23
<i>Mittelwert</i>			-0,40	0,08	-0,96	-0,73	-1,10	-0,61
<i>Minimum</i>			-1,78	-1,54	-2,70	-2,35	-2,34	-2,04
<i>Maximum</i>			1,96	1,73	0,63	1,83	1,00	1,23
<i>Amplitude</i>			3,74	3,26	3,33	4,18	3,34	3,28

Abbildung 27 stellt die Ergebnisse der Jahresmitteltemperaturen der letzten fünf Messjahre in Diagrammform dar, wobei für jene des letzten Messjahres auch Unterschiede in topographischer Lage und Untergrund (Standorten im Gipfelbereich, seichte Bohrlöcher in Felsen, an Flanken und Grat) ausgewiesen sind. Der Gipfelstandort, die beiden nach Westen exponierten Flankenstandorte in 2840 und 2860 m, der nach NE-exponierte Flankenstandort in 2840 m sowie der Standort am NW-Grat auf 2860 m weisen die tiefsten Temperaturen auf (alle mit Jahresmittel <-2,0 °C). Dieser Sachverhalt lässt sich durch die Kombination von geringer Schneedecke (geringe Schneedämpfung und relativ gute Lufttemperatur-Koppelung an den West-exponierten Flankenstandorten) bei

gleichzeitig tiefen Temperaturen erklären. An allen drei Felsstandorten wurden wiederum die höchsten Jahresmitteltemperaturen für den Sensor nahe der Oberfläche (3 cm Tiefe) sowie die tiefsten in 40 cm Tiefe ermittelt, wobei die Gradienten voneinander abweichen, was u. a. auch von der Exposition der Standorte abhängt. Der südexponierte Standort weist z. B. einen viel größeren Gradienten auf als der nordostexponierte. Bei den Felsstandorten kommt auch deutlich die Strahlungsungunst des NE-exponierten Standortes mit Jahresmitteltemperaturen im Bereich von -1,4 bis -1,3 °C gegenüber dem südexponierten mit leicht positiven Mitteltemperaturen (0,5 bis 1,0 °C) zum Vorschein. Die Werte am W-exponierten Felsstandort sind recht ähnlich jenem am NE-exponierten Standort, bedingt durch die effiziente winterliche Auskühlung des Felsens bei geringer Schneedecke, die auch durch die verstärkte Einstrahlung im Sommerhalbjahr nicht kompensiert wird. In Bezug auf die Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels lässt sich somit erneut festhalten, dass sich die Permafrostgunst der NE-Flanke deutlich von der Permafrostungunst der S-Flanke unterscheidet und die W-Flanke – je nach jahresspezifischer saisonaler Schnee- und Temperaurentwicklung – thermisch dazwischen liegt.

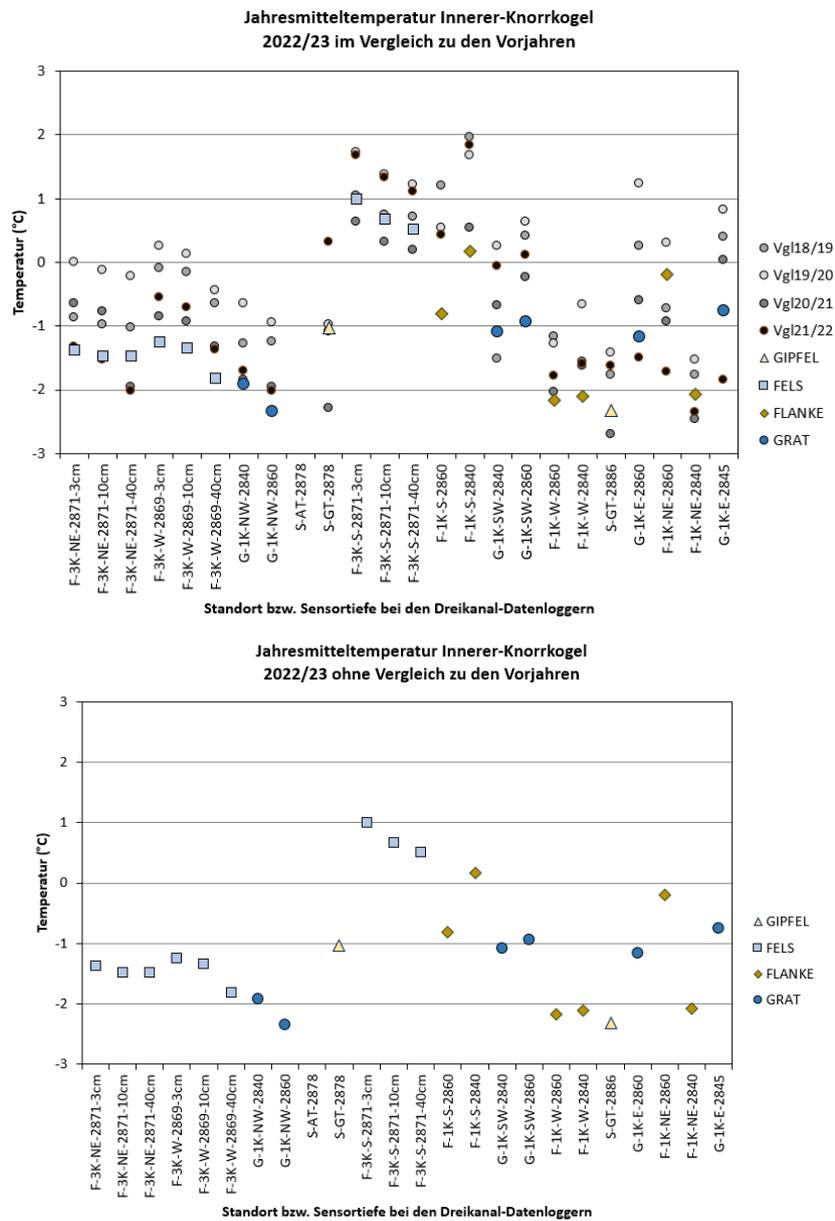


Abbildung 27: Jahresmitteltemperatur aller Messstandorte mit geschlossenen Datenreihen an/nah der Bodenoberfläche im Zeitraum 1.9.2022 bis 11.8.2023 am Inneren Knorrkogel (Messjahr 2022/23). Bei den Dreikanal-Datenloggern sind die Messsensoren in 3, 10 und 40 cm Tiefe im Felsen installiert und entsprechend in der Grafik ausgewiesen. Zum Vergleich sind die Mittelwerte der vier Vorjahre (siehe Tabelle 15) bei der oberen Grafik ebenfalls dargestellt.

Die größten thermischen Unterschiede finden sich wiederum in den Ergebnissen der oberflächennahen Flankenstandorte, wobei für den südexponierten Flankenstandort F-1K-S-2840 der höchste Wert – nach dem S-exponierten Felsstandort – ermittelt wurde. Interessanterweise war im letzten Messjahr der rund 20 m höher gelegene Standort F-1K-S-2860 im Mittel um ca. 1 °C kälter. Der Verlauf der Tagesmittelwerte dieser beiden Standorte für die Periode 2022/23 ist in Abbildung 28 dargestellt. Wie dieser Grafik zu entnehmen ist, war der Standort in 2860 m Höhe ab Mitte Dezember 2022 generell kälter als der Standort in 2840 m. Zusätzlich schmolz die – geringmächtige – saisonale Schneedecke am Standort in 2840 m am 11.6.2023 komplett ab, wohingegen dies am Standort in 2860 m erst ca. zwei Wochen später geschah. In Summe reichten diese lokalen Effekte aus, um auf recht kurzer vertikaler und horizontaler Distanz einen Jahresmittelwerteunterschied von 1 °C hervorzurufen.

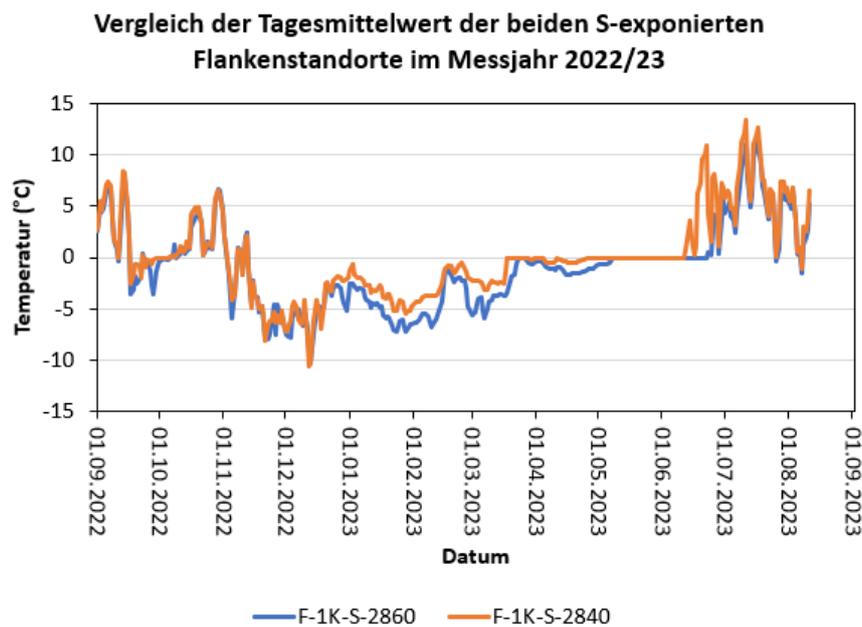


Abbildung 28: Entwicklung der Tagesmitteltemperatur an den beiden benachbarten südexponierten Flankenstandorten am Inneren Knorrkogel im Messjahr 2022/23. Beide Temperaturkurven weisen auf eine geringmächtige saisonale Schneedecke hin, die ab Anfang Mai wasserdurchtränkt und bis Mitte (F-1K-S-2840) bzw. Ende Juni 2023 (F-1K-S-2860) abgeschmolzen war. Im Mittel bewirkt dies einen Temperaturunterschied von ca. 1 °C.

Zusammenfassend kann somit auf Basis der Jahresmittelwerte festgehalten werden, dass im Gipfelbereich des Inneren Knorrkogels eine starke und durchaus erwartete thermische Heterogenität, welche durch Expositions-, Substrat- sowie saisonale Schneedeckenunterschiede bedingt ist, wiederum bestätigt werden konnte. Diese Heterogenität bestätigt die große Bedeutung von relativ engmaschigen Messnetzen wie am Inneren Knorrkogel und spiegelt auch die Schwierigkeit der Erfassung von Permafrost im Hochgebirge wider.

Die in diesem Messgebiet ermittelten Werte von bisher fünf Messjahren können nichtsdestotrotz wiederum als klarer Hinweis auf die Existenz von Permafrost im Untersuchungsgebiet gelten, zeigen jedoch auch die Notwendigkeit von längeren Messreihen zur besseren Charakterisierung von thermischen Verhältnissen im Hochgebirge, die insbesondere für Permafrost, Solifluktuationsprozesse, potentielle Verwitterung oder Blockgletscherdynamik relevant sind.

(e) Bodentemperatur- und Permafrostmonitoring Bereich Obersulzbachtal, Nationalpark Hohe Tauern Salzburg

Bedingt durch die Neuinstrumentierung im Juli 2022 (Kapitel 2.4) von acht alten, bereits früher instrumentierten (Logger_01, 02, 03, 06, 09, 10, 13 und 14) und einem komplett neuen Standort (Logger_16) lagen gemeinsam mit dem Logger_07 für die Berichtslegung für 2022/23 zehn Datenreihen vor. Das letzte Auslesen der Datenlogger durch GEORESEARCH erfolgte am 29.9.2023.

Die Tageswerte aller 10 Standorte im Sattelkar, die im Zeitraum 1.10.2021 bis 27.9.2023 Daten lieferten (unabhängig von der Anzahl der Tage mit Daten in diesem Zeitraum), sind in Abbildung 29 dargestellt. Auffällig ist sowohl im Winter 2021/22 (von Ende November bis Anfang Juni) als auch 2022/23 (von Ende November bis Mitte Juni), dass der Logger am Standort 07 über viele Monate unter einer thermisch isolierenden Schneedecke verborgen war, wobei die Temperatur an der Basis der winterlichen Schneedecke an diesem Standort immer nahezu 0 °C betrug und folglich der Standort als permafrostfrei einzustufen ist. Die tiefsten Tagesmitteltemperaturen im Sattelkar im Winter 2022/23 wurden am Standort Logger_16 mit -9,1 °C für den 13.12.2022 sowie am Standort Logger_10 mit -9,2 °C für den 10.2.2023 ermittelt. Diese beiden Standorte sind auch die einzigen im ganzen Messnetz (zumindest im Messjahr 2022/23), an welchen Temperaturen von weniger als -2 °C im Tagesmittel gemessen wurden. Bedingt durch die starke Schwankung der Bodentemperaturreihen bei den Loggern 10 und 16 kann aber davon ausgegangen werden, dass beide Standorte auch im Winter von den atmosphärischen Bedingungen direkt beeinflusst waren und sich keine stabile winterliche Basistemperatur, welche als Anzeiger für das Vorhandensein von Permafrost verwenden lässt, einstellen konnte. Die meisten Standorte zeigen recht hohe Temperaturen nahe 0 °C für die Wintermonate 2022/23, wobei alle Standorte im Zeitraum zwischen Ende Mai 2023 und Mitte Juli 2023 – und somit innerhalb von eineinhalb Monaten – schneefrei wurden. Die höchsten Tagesmitteltemperaturen im Sattelkar wurden im Sommer 2023 am Logger_14 am 22.8.2023 mit 17,1 °C gemessen.

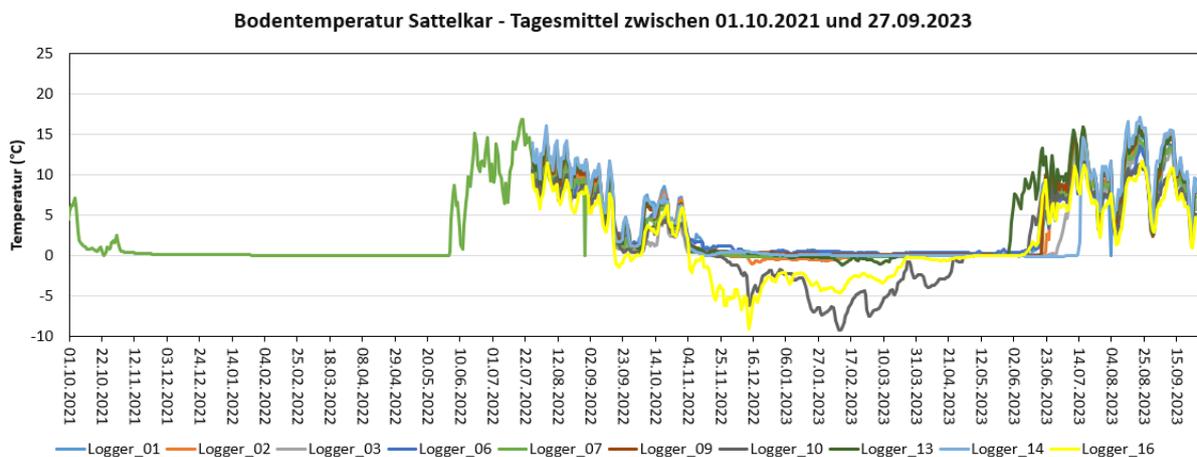


Abbildung 29: Tagesmitteltemperaturen der Bodentempersensoren im Sattelkar im Zeitraum 1.10.2021 bis 27.9.2023. Daten von nur einem Standort (07) lagen für den Zeitraum 1.10.2021 bis 25.7.2022 vor. Logger_16 wurde am 26.7.2022 neu eingerichtet. Details siehe Text. Zur Vergleichbarkeit mit der folgenden Abbildung 30 wurde in dieser Grafik die idente Legende inklusive Farbcodierung verwendet. Datenbasis: GEORESEARCH.

Die Tageswerte aller 14 Standorte (die Standorte bzw. Logger 04 und 15 scheinen in der Grafik nicht auf) für die gesamte Periode 22.10.2015 bis 27.9.2023 sind in Abbildung 30 wiedergegeben. Auffallend ist die starke Variation der Kurven untereinander, was mit den unterschiedlichen Standorttypen – wie z. B. Bereichen mit früher Schneebedeckung und thermisch stabilisierender Schneedecke sowie fehlendem Permafrost (konstante Wintertemperatur bei 0°C) oder Bereichen mit geringmächtiger winterlicher Schneedecke (und möglichem Permafrost) – zusammenhängt. Klar erkennbar ist in der bisherigen Datenreihe auch, dass der Sommer 2019 deutlich höhere Maximalwerte aufwies (21,8 °C beim Logger_13) als in allen anderen Sommer davor und danach

(mit Maxima stets unter 20 °C). Bei den Minimumwerten fällt hingegen auf, dass der Winter 2022/23 die bisher tiefsten Tagesmitteltemperaturen im Sattelkar brachte. Keine Vergleichsdaten liegen für den Standort Logger_16 vor (bedingt durch die komplette Neuinstrumentierung erst Ende Juli 2022). Für den Standort Logger_10 hingegen gibt es Daten für sechs Winter, wobei der letzte jener mit den bei Weitem tiefsten Tagesmittelwerten war. Die untere Grafik in Abbildung 30 zeigt zur besseren Veranschaulichung nur die Werte von diesem Standort. Deutlich erkennbar in allen Jahren ist auch die jeweils ca. einen Monat lang dauernde Periode, in der die wasserdurchtränkte Schneedecke konstant eine Temperatur von 0 °C (zero-curtain Periode) aufweist. Im aktuellen Berichtsjahr war dies von 4.5.2023 bis 10.6.2023 der Fall.

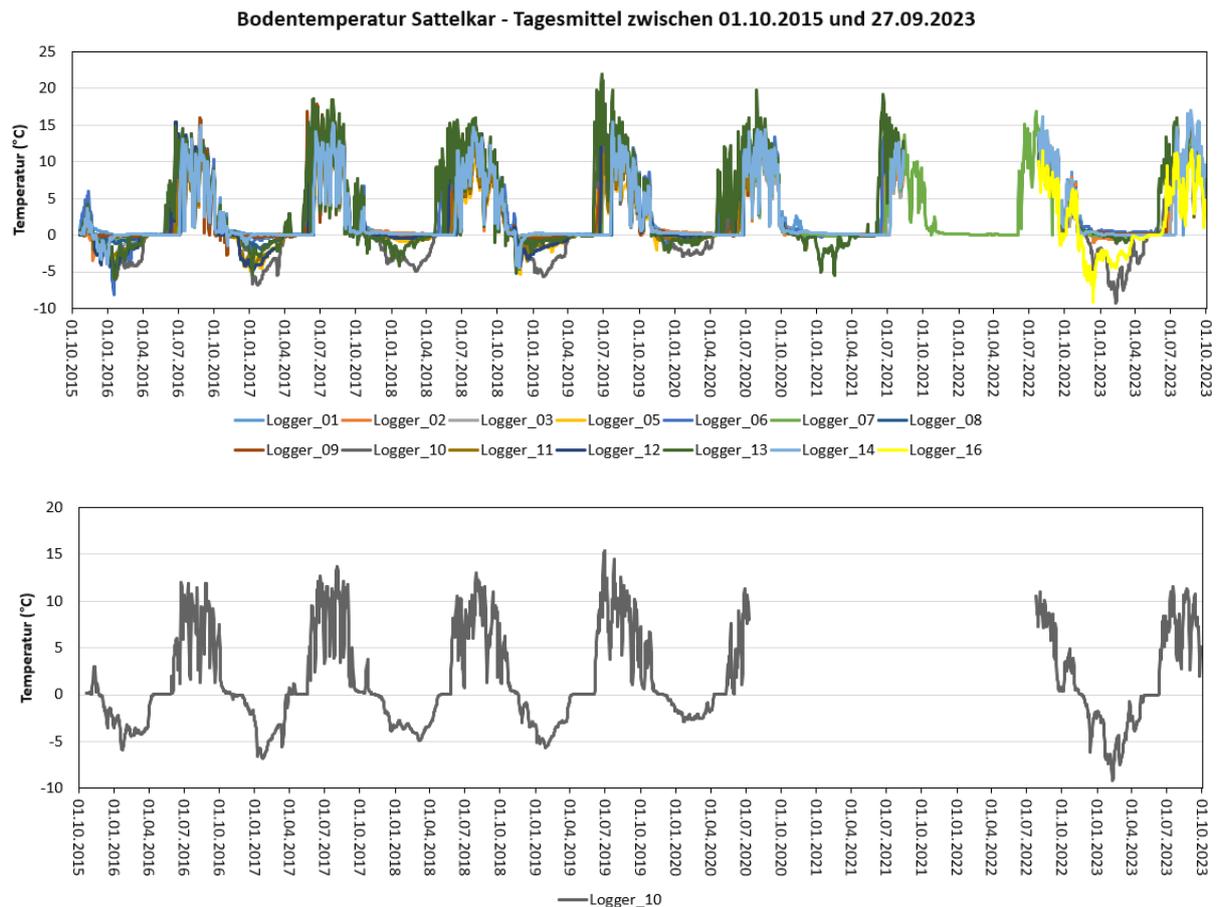


Abbildung 30: Tagesmitteltemperaturen von 14 Bodentemperatursensoren im Sattelkar im Zeitraum 1.10.2015 bis 27.9.2023. Die untere Grafik zeigt zur besseren Veranschaulichung nur die Daten vom Standort Logger_10. Datenbasis: GEORESEARCH.

Prinzipiell kann auch für das Sattelkar festgestellt werden, dass – wie in den Untersuchungsgebieten im Kärntner Anteil des Nationalparks Hohe Tauern – die winterliche Schneedecke in ihre Ausprägung und Variabilität eine wichtige Rolle in der Permafrostverbreitung sowie für die zeitlichen Veränderungen der Bodentemperaturen innehat. Die Temperaturkurven des letzten Beobachtungsjahres zeigen, dass die meisten Standorte wahrscheinlich von saisonalem Frost beeinflusst werden und nur zwei Standorte (Logger_10 und Logger_16) deutlich tiefere Temperaturen aufgezeichnet haben, die auf Permafrost hinweisen.

Um für einen längeren Zeitraum einen Vergleich der Bodentemperaturdaten geben zu können, zeigt Abbildung 31 die Monatsmitteltemperaturen des Jänners für die acht Jahre zwischen 2016 bis 2023. Aufgrund der längeren Datenlücken ist – ähnlich wie bei den Bohrlochdaten am Hohen Sonnblick – eine Darstellung von Ganzjahresdaten nicht möglich. Auf Basis der hier dargestellten Jänner-Werte erkennt man, dass an den meisten Standorten entweder der Jänner 2016 oder 2017 die tiefsten Werte im oberflächennahen Untergrund mit sich brachte. Die

höchsten Jännertemperaturen wurden hingegen entweder 2020 oder 2023 erzielt. An manchen Standorten variiert die Jännertemperatur nur wenig von Jahr zu Jahr (z. B. Logger 01, 09, 14 – um ca. 0,5 bis 07 °C in den bisherigen Jännern), wohingegen an anderen Standorten die Variabilität von Jahr zu Jahr viel höher ist wie beispielweise an den Standorten 06 (um 4,7 °C), 10 (um 3,5 °C) oder 12 (um 4,1 °C). Dies zeigt einmal mehr, dass erst längerfristige Datenreihen ein besseres Verständnis für die Bodentemperaturverhältnisse – und somit die Existenz und Veränderung von Permafrost oder saisonalem Frost – in einem Arbeitsgebiet wie im Sattelkar zulassen. Prinzipiell kann aber auch für das Sattelkar festgehalten werden, dass die Ergebnisse dort im Wesentlichen mit denen des „Grazer Permafrost-Monitoring-Netzwerkes“ im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten, die methodisch im Wesentlichen gleichartig gewonnen wurden, übereinstimmen.

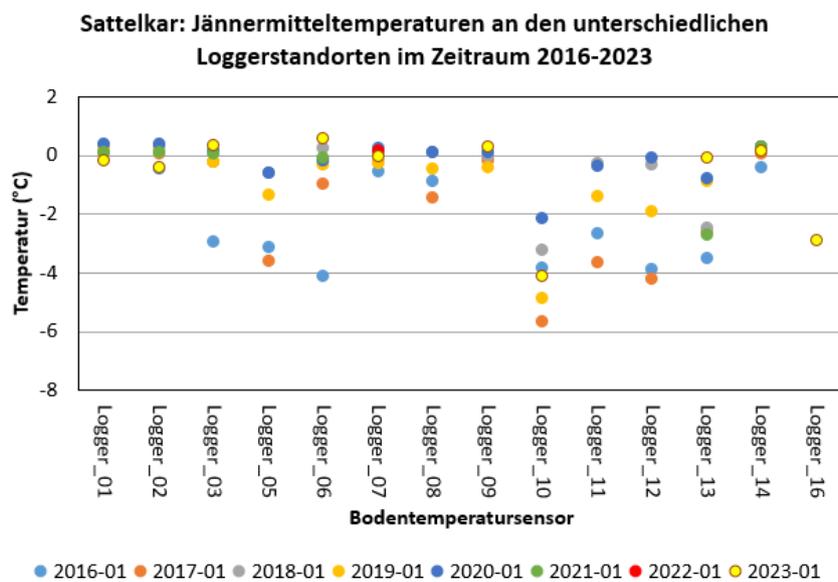


Abbildung 31: Vergleich der Jännermittelwerte von 14 Bodentemperatur-Messstandorten im Sattelkar mit entsprechenden Datenreihen für die acht Jänner zwischen 2016 und 2023. Datenbasis: GEORESEARCH.

4. Diskussion

Die Jahresmittel der Lufttemperatur waren im Berichtsjahr 2022/23 an den meisten Stationen die höchsten der letzten Jahre. Ähnlich wie schon im Beobachtungsjahr zuvor (2021/22) wiesen alle Monate mit Ausnahme des Aprils 2023 positive Temperaturabweichungen zur Klimanormalperiode 1981-2010 auf, wobei der Jänner 2023 und vor allem der September 2023 durch besonders hohe positive Abweichungen hervorstachen. Insgesamt ähnelten die Temperaturverhältnisse jenen des Vorjahres, während 2020/21 zuletzt ein generell deutlich tieferes Temperaturniveau aufgewiesen hatte. Kurz gesagt hat sich der seit dem ausgehenden 20. Jahrhundert herrschende Erwärmungstrend in den Hohen Tauern bzw. in den Alpen allgemein fortgesetzt.

Die Jahresniederschlagssumme blieben um einige Prozentpunkte hinter den Erwartungswerten zurück, ohne dass einzelne Messtationen wie etwa 2021/22 extrem geringe Niederschlagsmengen aufgewiesen hätten. Die Niederschlagsarmut einzelner Perioden wurde jeweils in nachfolgenden zyklonalen Phasen kompensiert, wobei die Hohen Tauern von herausragenden Starkniederschlagsereignissen verschont blieben. Ähnlich wie im Jahr zuvor darf somit das Niederschlagsgeschehen als eher unauffällig bewertet und die Aussage wiederholt werden, dass die Jahressummen des Niederschlags im Gegensatz zu den Jahrestemperaturen langfristig keinen klaren Trend erkennen lassen.

In Übereinstimmung mit dem soeben charakterisierten Niederschlagsverhältnissen blieb auch das Abflussgeschehen im aktuellen Berichtsjahr 2022/23 eher unauffällig – Abflussspitzen, die in ihrer Höhe mit jenen des Jahres 2020/21 vergleichbar wären, blieben in den Hohen Tauern – im Gegensatz etwa zu den weiter westlich gelegenen Gebieten der österreichischen Alpen – aus. Auch wenn die gemessenen Abflussspitzen in langfristiger Perspektive mäßig bleiben, zeugen sie doch einerseits vom Zusammenspiel zwischen Starkniederschlägen und gleichzeitig hoher Gletscherspende, aber auch davon, dass durch den voranschreitenden Gletscherschwund die Gletscher als hochwirksamer Rückhalt für Niederschläge an Bedeutung verlieren. Wie schon im Vorjahr zeigte sich der Einfluss der Eisabschmelzung am Pegel Innergschlöss besonders deutlich, weil dieser weiterhin den höchsten Anteil an vergletscherten Flächen (mehr als ein Viertel) aller untersuchten Einzugsgebiete aufweist.

Die Längenänderungen und Massenbilanzen der im Nationalpark Hohe Tauern beobachteten Gletscher waren im Berichtsjahr ähnlich negativ wie im Vorjahr, wenngleich an den meisten Gletschern die konkreten, die Gletscherungunst veranschaulichenden Werte etwas geringer als im Rekordjahr 2021/22 blieben. Bezogen auf die gesamtösterreichischen Werte des Längenänderung brachte das Berichtsjahr den drittgrößten Rückzug in der auf 1891 zurückgehenden Messreihe. Ursache hierfür waren einmal mehr die geringe Schneerücklagen aus dem Winter 2021/22 und die außerordentlich hohen Temperaturen über mehrere Monate hinweg im Sommerhalbjahr inklusive des Septembers. Dass die Bedingungen nicht ganz so gletscherungünstig wie im Jahr zuvor ausfielen, ist fast allein den beiden Monaten April und Mai zu verdanken, in denen sich auf den Gletschern noch eine Schneedecke aufbaute, die die Gletscher länger als zuletzt in den Frühsommer hinein vor der Abschmelzung schützte. Das Berichtsjahr passt uneingeschränkt in die herrschende Periode dramatischen Gletscherschwundes.

Die Daten zu den Bodentemperaturverhältnissen verweisen auf kühlere Untergrundverhältnisse als in 2020/21 und 2021/22, womit die Bedingungen für den Permafrost etwas günstiger waren als in den Vorjahren waren und sich Permafrost an einzelnen Standorten auch reaktivieren konnte. Die relative Permafrostgunst im Berichtszeitraum hatte zum einen – ähnlich wie die leicht abgemilderte Gletscherungunst – mit der relativ langen Andauer der spätwinterlichen Schneedecke bis in den Frühsommer, zum anderen aber auch mit einer im Herbst 2022 starken Auskühlung des Untergrundes durch den späten Aufbau einer Winterschneedecke zu tun. Diese Feststellungen dürfen jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Temperaturen im Untergrund weiterhin auf einem langfristig gesehen hohen Niveau sind, wie man insbesondere an den langen Datenreihen aus dem Kärntner Teil des Nationalparks erkennen kann. Damit in Übereinstimmung haben sich auch die Bewegungsraten der untersuchten Blockgletscher gegenüber dem Vorjahr etwas verringert, sind aber ebenfalls weiterhin auf hohem Niveau. Ein nicht quantifizierbarer Faktor der reduzierten Blockgletscher-Dynamik dürfte auch die verminderte Wasserverfügbarkeit in den Blockgletschersedimenten in den trockenen Sommermonaten sein.

5. Fazit mit Ausblick

Die Berichtszeitraum 2022/23 entspricht allen hierbei untersuchten Parametern zu Folge dem aktuellen, durch langfristige Erwärmung und ihren Folgen geprägten Klimageschehen:

- Die außerordentlich hohen Lufttemperaturen, verbunden mit neuen Temperaturrekorden an einzelnen Stationen sind das klarste Indiz für die den weiterhin ungebrochenen Erwärmungstrend. Im Gegensatz dazu blieben die Niederschlagsmengen im Berichtsjahr zwar etwas unterdurchschnittlich, doch ist hierbei langfristig kein signifikanter Trend erkennbar. Bei den stark zufallsgesteuerten Starkniederschlägen traten im Berichtsjahr keine herausragenden Ereignisse auf.
- Die Abflussverhältnisse werden in zwei der drei untersuchten Einzugsgebiete stark von der Gletscherspende beeinflusst, die dortigen Bäche zeichnen sich also durch ein nivales Abflussregime aus. Sommerliche Abflussspitzen kommen hier meist durch die Kombination hoher Temperaturen und hoher Niederschlagsmengen zustande. Übereinstimmend mit der oben getätigten Aussage zu den Niederschlagsmengen gab es im Berichtsjahr keine herausragenden Abflussereignisse.
- Der Gletscherschwund setzt sich trotz gegenüber dem Vorjahr etwas reduzierter Rückzugsbeträge und etwa weniger negativer Massenbilanzen letztlich ungebremst fort. Der drastische Gletscherschwund ist mit massiven Änderungen nicht nur des Landschaftsbildes, sondern auch der ökosystemaren Prozesse in den Gletschervorfeldern verbunden, worunter die Bildung neuer Seen als für die Hohen Tauern häufiger Prozess hervorzuheben ist. Wie auch die anderen Gletscher Österreichs haben auch die Gletscher der Hohen Tauern keine für eine Regeneration der Eismassen relevanten Nährgebiete mehr.
- In ähnlicher Weise sind die gegenüber dem Vorjahr etwas tieferen Bodentemperaturen und reduzierten Bewegungsraten der Blockgletscher im Berichtsjahr keineswegs als günstige Bedingungen für den Permafrost zu werten. Der Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern ist langfristig massiver Degradation ausgesetzt, auch wenn die konkrete Ausprägung dieser Dynamik nicht nur zeitlich variabel – im Berichtsjahr etwas gebremst – und von Standort zu Standort sehr verschieden ist.

Zusammengefasst können die Veränderungen der im gegenständlichen Modul beobachteten Geofaktoren im Berichtsjahr beinahe wortident zu den letzten Berichten charakterisiert werden: Die Hochgebirgsnatur unterliegt einer massiven Umwandlung, am deutlichsten sichtbar im Gletscherschwund und seinen Folgen. Die Permafrost-Degradation verläuft demgegenüber unbemerkt bzw. nur messtechnisch erfassbar ab, ist aber auf wesentlich größeren Flächen als der Gletscherschwund wirksam und verändert dort die Disposition für andere Naturprozesse. Gerade diese (z. B. Hochwässer, gravitative Massenbewegungen) sind es, die die Fortführung dieses Monitoring nicht nur aus wissenschaftlichem, sondern auch aus gesellschaftlichem Interesse heraus geraten erscheinen lassen.

Literaturverzeichnis

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.

Junghänel T., Bissolli P., Daßler J., Fleckenstein R., Imbery F., Janssen W., Kaspar F., Lengfeld K., Leppelt T., Rauthe M., Rauthe-Schöch A., Rocek M., Walawender E., Weigl E. (2021): Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. bis 19. Juli 2021. Deutscher Wetterdienst – Geschäftsbereich Klima und Umwelt, 16 Seiten. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20210721_bericht_starkniederschlaege_tief_bernd.html

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G. K. (2019a): Permafrostmonitoring am Inneren Knorrkogel 2018-2019 - Modul 07: „Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost, Geomorphodynamik“ im Rahmen des interdisziplinären, integrativen Monitoring- und Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern (Version 12/19). Wissenswert (unpubliziert). <http://www.parc.at/npht>

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G. K. (2019b): Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen im Nationalpark Hohe Tauern. Modul 07: Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost. Methoden-Handbuch. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien. ISBN-Online: 978-3-7001-8755-4, doi:10.1553/GCP_LZM_NPHT_Modul07. http://www.parc.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=38065

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 (unpubliziert). http://www.parc.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 (unpubliziert). http://www.parc.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 (unpubliziert). http://www.parc.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=51573

Kellerer-Pirklbauer A., Bartsch A., Gitschthaler C., Reisenhofer S., Weyss G., Riedl C., Avian M. (2015): permAT - Langzeitmonitoring von Permafrost und periglazialen Prozessen und ihre Bedeutung für die Prävention von Naturgefahren: Mögliche Strategien für Österreich. Endbericht von StartClim2014.F in StartClim2014: Beiträge zur Umsetzung der österreichischen Anpassungsstrategie, Auftraggeber: BMLFUW, BMFWF, ÖBF, Land Oberösterreich, 49 Seiten.

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M. (2021a): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2019/20. Zwischenbericht (unpubliziert), 48 Seiten. http://www.parc.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=42106

Kellerer-Pirklbauer A., Avian M., Benn D.I., Bernsteiner F., Krisch P., Ziesler C. (2021b): Buoyant calving and ice-contact lake evolution at Pasterze Glacier (Austria) in the period 1998-2019. *Cryosphere*, 15 (3), pp. 1237-1258. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1237-2021>

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

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Eulenstein J. (2023a): 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 (Version 04/23). Forschungsraum. https://www.parc.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=52647



Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M., Frießenbichler M., Eulenstein J. (2023b): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2022-2024. 1. Zwischenbericht für 2021/22, 48 Seiten. http://www.parks.at/nphkt/mmd_fullentry.php?docu_id=52505

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, 53 Seiten.

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

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., Noetzi 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>

Keuschnig M. (2018). Klimasensitive, hochalpine Kare: Projekt Sattelkar - Zwischenbericht 1: 2018, Nationalpark Hohe Tauern, 13 Seiten

Lieb G. K., Kellerer-Pirklbauer A., Kaufmann V., Avian M. (2016): The Graz permafrost monitoring network in the Hohe Tauern National Park (Austria). Joannea Geol. Paläont., 12, 9-16.

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 Seiten.

Lieb G. K., Kellerer-Pirklbauer A. (2018): 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 Seiten.

Lieb G. K., Kellerer-Pirklbauer A. (2021): Gletscherbericht 2019/2020 - Sammelbericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins im Jahr 2020. Bergauf 02/2021: 6–15. https://www.alpenverein.at/portal_wAssets/docs/service/bergauf/pdf_downloads/bergauf_2021/Bergauf_2_21_ebook.pdf

Lieb G. K., Kellerer-Pirklbauer A. (2022): Gletscherbericht 2020/2021 - Sammelbericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins im Jahr 2021. Bergauf 02/2022: 10–21. https://www.alpenverein.at/portal_wAssets/docs/service/bergauf/pdf_downloads/bergauf_2022/Bergauf_2_22_ebook.pdf

Lieb G. K., Kellerer-Pirklbauer A. (2023): Gletscherbericht 2021/2022 - Sammelbericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins im Jahr 2022. Bergauf 02/2023: 10–21. https://www.alpenverein.at/portal_wAssets/docs/service/bergauf/pdf_downloads/Bergauf_2023/Bergauf_EBOOK_2_23.pdf

Lieb G. K., Kellerer-Pirklbauer A. (2024): Gletscherbericht 2022/2023 - Sammelbericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins im Jahr 2023. Bergauf 02/2024: 10–21. https://www.alpenverein.at/portal_wAssets/docs/service/bergauf/pdf_downloads/Bergauf_2024/00_av_bergauf_2_24_gesamt_fin_screen_einzelseiten_klein_1.pdf

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



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

Pellet C., Bodin X., Cusicanqui D., Delaloye R., Käab A., Kaufmann V., Noetzli J., Thibert E., Vivero S., Kellerer-Pirklbauer A. (2022): Cryosphere - Rock glacier velocity. In: State of the Climate in 2021. Bull. Amer. Meteor. Soc., 103 (8), S43-S44. <https://doi.org/10.1175/2022BAMSStateoftheClimate.1>

Pellet C., Bodin X., Cusicanqui D., Delaloye R., Käab A., Kaufmann V., Noetzli J., Thibert E., Vivero S., Kellerer-Pirklbauer A. (2023): Cryosphere - Rock glacier velocity. In: State of the Climate in 2022. Bull. Amer. Meteor. Soc., Beitrag in Begutachtung.

Pellet C., Bodin X., Cusicanqui D., Delaloye R., Käab A., Kaufmann V., Noetzli J., Thibert E., Vivero S., Kellerer-Pirklbauer A. (2024): Cryosphere - Rock glacier velocity. In: State of the Climate in 2023. Bull. Amer. Meteor. Soc., Beitrag in Begutachtung.

Seiser B., Fischer A. (2022): Glacier mass balance Venedigerkees, Hohe Tauern, Austria, 2020/2021. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.942874>

Stocker-Waldhuber M., Fischer A. (2022): Glacier mass balance Mullwitzkees, Hohe Tauern, Austria, 2020/2021. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.940159>

WGMS (Hg.) (2024): Latest glacier mass balance data: 1 Summary of the balance years 2021/22 and 2022/23. <http://wgms.ch/latest-glacier-mass-balance-data> (zuletzt geprüft am 10.4.2024)

Zagel B., Ehgartner G., Slupetzky H. (2022): Glaziologisches Monitoring 2021: Stubachtal | Sonnblickkees: Beiträge zur Glazialhydrologie eines hochalpinen Einzugsgebietes im Oberen Stubachtal, Hohe Tauern, Land Salzburg. Berichtsjahr 2021. Paris-Lodron-University Salzburg, 11 Seiten.

Zagel B., Ehgartner G., Slupetzky H. (2023): Glaziologisches Monitoring 2022: LTER Stubachtal | Sonnblickkees: Beiträge zur Glazialhydrologie eines hochalpinen Einzugsgebietes im Oberen Stubachtal, Hohe Tauern, Land Salzburg. Berichtsjahr 2022. Paris-Lodron-University Salzburg, 11 Seiten.

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Lage der drei Untersuchungsgebiete für das Langzeit-Ökosystemmonitoring sowie die Lage der in dieser Studie verwendeten Klima- und Abflussmessstationen (GeoSphere Austria- oder HZB-Stationen), der durch Monitoring erfassten Gletscher und der Permafrost-Untersuchungsgebiete. Ergänzend sind auch alle automatischen Wetterstationen (n=85), die innerhalb des Nationalparks sowie in der näheren Umgebung installiert sind (hierzu Lieb et al. 2019), verortet. HZB=Hydrographisches Zentralbüro, KFU=Karl-Franzens-Universität Graz, ÖAV=Österreichischer Alpenverein, TUG=Technische Universität Graz, GeoSphere=GeoSphere Austria (bis 31.12.2022 Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).....2
- Abbildung 2: 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 Sommer 2023 (vgl. Tabelle 5). Die Standorte KC-LIA und KC-RID wurden 2022 neu eingerichtet, der Standort HOT-S im Jahr 2023 (Gletschermaske für Pasterze und benachbarte Gletscher nach Buckel et al. 2018). 6
- Abbildung 3: Vergleich der Schneebedingungen im Zuge der Geländearbeiten am 3.9.2020, 5.9.2021, 4.9.2022 sowie am 11.8.2023 im Bereich der Gipfelpyramide (hier zu sehen die Süd- und Westflanken) vom Löbbentörl aus betrachtet. Neuschnee war in den höheren Lagen in den Jahren 2020 und 2021 vielerorts anzutreffen und behinderte v. a. im Jahr 2021 an manchen Standorten auch die Geländearbeiten. 2022 verursachte Schnee keine Beeinträchtigung der Arbeit. 2023 waren nur mehr Reste des Neuschnees, welcher Anfang August 2023 gefallen war, vorhanden. Fotos: Andreas Kellerer-Pirklbauer..... 9
- Abbildung 4: Blick vom Inneren Knorrkogel auf das Karleskees und den Äußeren Knorrkogel (2920 m) am 4.9.2022 und 11.8.2024. Zu beachten ist das weitgehende Fehlen von Schneefeldern (auch auf dem Gletscher) in der Hochgebirgslandschaft der Hohen Tauern im Jahr 2023. Mitte August 2023 war das Karleskees auch weitgehend schneefrei. Fotos: Andreas Kellerer-Pirklbauer. 11
- Abbildung 5: Gegenüberstellung der Jahresmitteltemperaturen von 2022/23 mit dem Mittelwert für die neun Jahre zwischen 2014/15 und 2022/23 von sieben Klimastationen, deren Daten den Inhalt der Tabelle 7 bilden. Der wärmste Standort ist die Station Malta, der kälteste die Station Sonnblick. 14
- Abbildung 6: Gegenüberstellung der Jahressumme des Niederschlags von 2022/23 mit dem Mittelwert für die neun Jahre zwischen 2014/15 und 2022/23 von neun Klimastationen, deren Daten den Inhalt der Tabelle 7 bilden. Der niederschlagsärmste Standort ist Heiligenblut, der niederschlagsreichste die Rudolfshütte. 15
- Abbildung 7: Monatswerte der Lufttemperatur (T) im Zeitraum Oktober 2022 bis September 2023 an den sieben Klimastationen Rudolfshütte, Kolm-Saigurn, Sonnblick, Heiligenblut, Malta, Gerlos und Felbertauern..... 16
- Abbildung 8: Vergleich der Monatsmittelwerte der Lufttemperatur (in °C) im Gletscherhaushaltsjahr 2022/23 mit jenen der Klimanormalperioden 1981–2010 sowie 1991–2020 (oben) und Abweichung der Monatsmitteltemperaturen zur Klimanormalperiode 1981–2010 in den vier Gletscherhaushaltsjahren 2019/20 bis 2022/23 (unten) an der Station Sonnblick (3109 m). 17



Abbildung 9: Langzeitentwicklung von Niederschlag (Station Neukirchen) und Temperatur (Station Sonnblick). Entwicklung der Jahreswerte (hier Kalenderjahre) im Zeitraum 1973–2023 und entsprechende Trends. Niederschlag: Keine signifikanten Veränderungen erkennbar. Temperatur: Klarer Erwärmungstrend. Für die Temperatur sind zusätzlich auch Dekadenmittelwerte (1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 und 2011-2020) angegeben.	18
Abbildung 10: Vergleich der gemessenen mittleren täglichen Abflüsse (Q in m ³ /s) der drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innergschlöss (Tirol) im neunjährigen Zeitraum 1.10.2014 bis 30.9.2024.	19
Abbildung 11: Vergleich des gemessenen mittleren täglichen Abflusses (Q im m ³ /s) an den drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innergschlöss (Tirol) im Zeitraum 1.10.2022–30.9.2023. Die untere Kurve ist ein Ausschnitt aus der oberen mit veränderter Skalierung der Ordinate und fokussiert auf den Bereich bis zu 6 m ³ /s.	21
Abbildung 12: Monatssummen des Abflusses (Q) der drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innergschlöss (Tirol) im Zeitraum 01.10.2019 – 30.09.2023 in Mio. m ³	22
Abbildung 13: Mittlere Längenänderungen an 20 Gletschern im Nationalpark Hohe Tauern, von denen für die achtjährige Periode 2015/16 bis 2022/23 Längenänderungsdaten lückenlos vorliegen (siehe Tabelle 11). In Rot gehalten das aktuelle Beobachtungsjahr. Weitere Erläuterung siehe Text.	25
Abbildung 14: Längenänderungen an den vier Gletschern Schlatenkees (Venedigergruppe), Winkelkees (Ankogelgruppe), Untersulzbachkees (Venedigergruppe) und Pasterze (Glocknergruppe) im Zeitraum 2011/12–2021/22. Erläuterungen im Text.	26
Abbildung 15: Spezifische Jahresmassenbilanz an vier ausgewählten Gletschern in den Hohen Tauern zwischen 2015/16 und 2022/23. Die Jahreswerte sind in mm Wasseräquivalent (mm w.e.) angegeben.	28
Abbildung 16: Jahresmitteltemperatur an/nahe der Bodenoberfläche aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten für das Beobachtungsjahr 2022/23 (1.8.2022 bis 31.7.2023). Standorte, die mit ND (no data) markiert sind, verfügen aufgrund von Datenausfall (bedingt durch leere Batterien) über keine geschlossene Datenreihe für das letzte Berichtsjahr (KC-RID, FAL-LO). Altschnee war im Jahr 2023 keine Einschränkung bei der Geländearbeit.	30
Abbildung 17: Tagesmitteltemperaturen der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten – HLC-UP-N, FAL-UP, DOV-UP-S und PAG-UP – im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten bzw. in dessen Nahbereich (Standort FAL-UP) für das Messjahr 2022/23 (1.8.2022 bis 31.7.2023). Messbereiche im Winterhalbjahr mit geringer Schwankung deuten auf Dämpfungseffekte durch eine mächtige Schneedecke (> ca. 80 cm) hin, was nur am Standort HLC-UP-N der Fall ist. In Grau sind die Tagesmittelwerte der automatischen meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS) dargestellt.	31
Abbildung 18: Gegenüberstellung der Jahresmittelwerte des gegenständlichen Projektjahres 2022/23 mit jenen des Vorjahres an allen Bodentemperaturmessstationen mit entsprechenden Daten.	33
Abbildung 19: Jahresmitteltemperatur der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten für den Zeitraum 1.8.–31.7. des Folgejahres für die Messjahre von 2007/08 bis 2022/23. Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten sowie die jeweiligen Mittelwerte pro Standort sind dargestellt. Die Trends für DOV-UP-S, HLC-UP-N und PAG-UP sind statistisch signifikant (alle drei	





$p < 0,05$ – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 5 %; die beiden letztgenannten sogar $p < 0,01$ – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1 %). Zu beachten die unterschiedliche Skalierung der Ordinaten.....	33
Abbildung 20: Tagesmitteltemperaturen im Bohrloch 3 am Sonnblick im Zeitraum 01.10.2022–30.09.2023 in fünf unterschiedlichen Tiefen sowie die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (AT) an der TAWES-Station Sonnblick. Die Lücken in den Kurven zeigen Zeiträume, in denen bedingt durch technische Probleme oder Wartungstätigkeiten keine Daten aufgezeichnet wurden (Daten: GeoSphere Austria).	34
Abbildung 21: Tagesmitteltemperaturen im Bohrloch 3 am Sonnblick im Zeitraum 1.10.2014 bis 30.9.2023 in fünf unterschiedlichen Tiefen sowie die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (AT) an der TAWES-Station Sonnblick. Hinweise zu Quelle siehe Abbildung 20.	35
Abbildung 22: Jahresmitteltemperaturen für vier Kalenderjahre mit geschlossenen Datenreihen zwischen 2016 und 2022 im Bohrloch 3 am Sonnblick. Datenbasis hierzu siehe Abbildung 20.....	35
Abbildung 23: Mitteltemperatur der Jänner für die acht Jahre von 2016 bis einschließlich 2023 im Bohrloch 3 am Sonnblick. Datenbasis hierzu siehe Abbildung 21.	36
Abbildung 24: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Döener Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2022/23. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (cm/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2-3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Orthofoto 20.9.2010 © Land Kärnten.	37
Abbildung 25: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 33 am Blockgletscher Hinteres Langtalkar mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2022/23. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (m/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2-3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Die Punkte 21, 24, 25 und 31 sind nicht mehr im Gelände auffindbar, der Punkt 22 wurde 2023 nicht gemessen. Orthofoto 28.8.2012 © Land Kärnten.	38
Abbildung 26: Direkter Vergleich der mittleren jährlichen horizontalen Oberflächenbewegung der beiden Blockgletscher Dösen – zentraler Bereich, Hinteres Langtalkar (HLK) – oberer Bereich A und Hinteres Langtalkar – unterer Bereich B für den Zeitraum 1995–2023. Mittelbildung über 11 Punkte (10–17, 21–23) am Döener Blockgletscher, 9 Punkte (10–17, 37) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar (oberer Bereich A) und 8 Punkte oder reduzierte Punkteanzahl (23–25, 27–31) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar (unterer Bereich B). Im Jahr 2003 fand keine Messung am Blockgletscher Dösen (Pfeil) statt.	40
Abbildung 27: Jahresmitteltemperatur aller Messstandorte mit geschlossenen Datenreihen an/nah der Bodenoberfläche im Zeitraum 1.9.2022 bis 11.8.2023 am Inneren Knorrkogel (Messjahr 2022/23). Bei den Dreikanal-Datenloggern sind die Messsensoren in 3, 10 und 40 cm Tiefe im Felsen installiert und entsprechend in der Grafik ausgewiesen. Zum Vergleich sind die Mittelwerte der vier Vorjahre (siehe Tabelle 15) bei der oberen Grafik ebenfalls dargestellt.	42
Abbildung 28: Entwicklung der Tagesmitteltemperatur an den beiden benachbarten südexponierten Flankenstandorten am Inneren Knorrkogel im Messjahr 2022/23. Beide Temperaturkurven weisen auf eine geringmächtige saisonale Schneedecke hin, die ab Anfang Mai wasserdurchtränkt und bis Mitte (F-1K-S-2840) bzw. Ende Juni 2023 (F-1K-S-2860) abgeschmolzen war. Im Mittel bewirkt dies einen Temperaturunterschied von ca. $1\text{ }^{\circ}\text{C}$	43





Abbildung 29: Tagesmitteltemperaturen der Bodentemperatursensoren im Sattelkar im Zeitraum 1.10.2021 bis 27.9.2023. Daten von nur einem Standort (07) lagen für den Zeitraum 1.10.2021 bis 25.7.2022 vor. Logger_16 wurde am 26.7.2022 neu eingerichtet. Details siehe Text. Zur Vergleichbarkeit mit der folgenden Abbildung 30 wurde in dieser Grafik die idente Legende inklusive Farbcodierung verwendet. Datenbasis: GEORESEARCH.44

Abbildung 30: Tagesmitteltemperaturen von 14 Bodentemperatursensoren im Sattelkar im Zeitraum 1.10.2015 bis 27.9.2023. Die untere Grafik zeigt zur besseren Veranschaulichung nur die Daten vom Standort Logger_10. Datenbasis: GEORESEARCH.....45

Abbildung 31: Vergleich der Jännermittelwerte von 14 Bodentemperatur-Messstandorten im Sattelkar mit entsprechenden Datenreihen für die acht Jänner zwischen 2016 und 2023. Datenbasis: GEORESEARCH.46



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: TAWES-Stationen der GeoSphere Austria, die für die gegenständliche Studie verwendet wurden, mit Angabe des jeweiligen Beginns der verfügbaren Datenreihe. Erläuterungen siehe Text. Lage der Stationen siehe Abbildung 1.....	2
Tabelle 2: Klimastationen der Hydrographischen Landesdienste, die für die gegenständliche Studie verwendet wurden, mit HZB-Code (Hydrographischer Dienst Österreichs) und Beginn der verfügbaren Datenreihe. Erläuterungen siehe Text. Lage siehe Abbildung 1. (1) Datenlücke von 1.-31.3.2019. (2) nur Niederschlagsdaten (keine Temperaturaufzeichnung).....	3
Tabelle 3: HZB-Oberflächengewässer-Messstellen der Hydrographischen Landesdienste, die für die gegenständliche Studie verwendet wurden. Koordinaten sind als geographische Koordinaten sowie in BMN – M31 (EPSG 31258) als Rechtswert (RW) und Hochwert (HW) angegeben. Erläuterungen siehe Text. Lage siehe Abbildung 1.....	3
Tabelle 4: Gletscher in den Hohen Tauern, an denen aktuell Massenbilanzen durch verschiedene Institutionen bestimmt werden (Quelle: WGMS 2024, ergänzt). GeoSphere Austria (bis 31.12.2022: ZAMG); ÖAW=Österreichische Akademie der Wissenschaft; HD-Sbg=Hydrographischer Dienst des Landes Salzburg; Z_GIS= Fachbereich Geoinformatik, Universität Salzburg. *=keine Daten für 2022/23 aktuell vorliegend.....	5
Tabelle 5: Auflistung der vier lokalen Untersuchungsgebiete im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten und ihrer Instrumentierung mit Miniatur-Temperaturdatenloggern. Lage der Einzelstationen siehe Abbildung 2. Abbildungen 17 und 19 zeigen Auswertungen der jeweils grau hinterlegten Sensoren. HLC=Hinteres Langtalkar-Kögelekar, FAL=Fallbichl, HOT=Hochtor, DOV=Dösen-Säuleck, PAG=Pasterze-Burgstall. GOE-PR ist ein Standort im Gößnitzkar, 2,6 km SW vom Kögelekar. Der Code für jeden Standort besteht (bis auf eine Ausnahme: GOE-PR) aus diesen Bezeichnungen in Kombination mit weiteren, internen Kürzeln; z. B. N=Nord, S=Süd.....	7
Tabelle 6: Übersicht über die 18 Monitoring-Standorte an der Gipfelpyramide des Inneren Knorrhogels mit Angaben zu Code, interner Loggernummer, Tiefe des Sensors bzw. der Sensoren (bei Dreikanaldatenlogger eingebaut in Felsen) sowie die Bezeichnungen der diesem Bericht angehängten Dateien in Bezug auf Rohdaten (chronologische Codierung) sowie bearbeitete Daten (Codierung in Anlehnung an die vorjährigen Berichte). Siehe hierzu auch die Dokumentation in den beiden Dateien „rohdaten_metadaten_20240425.csv“ und „bearb_daten_metadaten_20240429.csv“.....	10
Tabelle 7: Jahreswerte der Lufttemperatur (T, in °C) und Jahressummen des Niederschlags (P, in mm) in den neun hydrologischen Haushaltsjahren 2014/15 bis 2022/23 (jeweils 01.10.–30.09. des Folgejahres) der neun ausgewählten, als repräsentativ für das Arbeitsgebiet angesehenen Klimastationen in den Hohen Tauern. Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum. Fettstellung markiert den jeweils höchsten Wert der 9-jährigen Periode, kursiv hingegen den tiefsten Wert. n.d.=fehlende Daten. *Datenlücke 01.03.2019–31.03.2019.....	13
Tabelle 8: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur (in °C) und Abweichungen der Monatsmittelwerte in den vier Gletscherhaushaltsjahren 2019/20 bis 2022/23 von jenen der Klimanormalperiode 1981–2010 (in °C) an der Station Sonnblick (3109 m).....	18



Tabelle 9: Jahresmenge des Abflusses (Q) an den Abflussmessstationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im Zeitraum 1.10.2014–30.9.2023; Gesamtabfluss in den einzelnen Gletscherhaushaltsjahren sowie Monatsminima und Monatsmaxima. Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum.	20
Tabelle 10: Abflusshöhe (Quotient aus Durchflussvolumen pro Beobachtungsperiode und Einzugsgebietsfläche) in mm für die neun glaziologischen Haushaltsjahre 2014/15–2022/23 in den drei Einzugsgebieten oberhalb der Stationen Mallnitz (Einzugsgebiet 85,3 km ²), Neukirchen (40,5 km ²) und Innerschlöss (39,3 km ²). Grau hinterlegt das aktuelle Projektjahr.	23
Tabelle 11: Die im Nationalpark Hohe Tauern durch den Österreichischen Alpenverein jährlich vermessenen Gletscher mit Angaben zur Längenänderung in den Gletscherhaushaltsjahren 2015/16 bis 2022/23. Lage siehe Abbildung 1. Grau hinterlegt ist das gegenständliche Gletscherhaushaltsjahr 2022/23.	24
Tabelle 12: Spezifische Massenbilanzen an sieben Gletschern im Bereich des Nationalparks Hohe Tauern für die acht Gletscherhaushaltsjahre 2015/16–2022/23 in mm Wasseräquivalent. Grau hinterlegt ist das aktuelle Gletscherhaushaltsjahr. n.d.=fehlende Daten (die Daten von 2022/23 für das Wurtenkees werden, bedingt durch deren Bestimmung alle zwei Jahre durch Stefan Reisenhofer, GeoSphere Austria, erst 2024 vorliegen).	27
Tabelle 13: Bewegungsraten am Dösener Blockgletscher für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2016/17–2022/23. Die Mittelwerte wurden aus den Bewegungsraten der zentralen Punkte 10–17 und 21–23 gerechnet. Die Maximalwerte wurden jeweils im Punkt 15 festgestellt. Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum.	37
Tabelle 14: Bewegungsraten am Blockgletscher Hinteres Langtalkar für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2016/17 bis 2022/23 für zwei ausgewählte Punktgruppen A (oberer Bereich) und B (unterer Bereich). Die Mittelwerte wurden aus den Bewegungsraten aller Punkte der jeweiligen Punktgruppe gerechnet. Die Maximalwerte beziehen sich auf die jeweiligen Punktgruppen. Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum.	39
Tabelle 15: Übersicht über die 18 Monitoring-Standorte an der Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels mit Angaben zu Code, interner Loggernummer, Tiefe des Temperatursensors bzw. der Sensoren (bei Dreikanaldatenlogger eingebaut in Felsen) mit den gemessenen Jahresmittelwerten für 2018/19 bis 2022/23 sowie deren Mittelwert über die 5 Jahre (in Ausnahmen 4 Jahre*). ND = no data (siehe hierzu Kapitel 2.4). Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum.....	41





Herausgeber:

Nationalparkrat Hohe Tauern

Kirchplatz 2, 9971 Matri

Tel.: +43 (0) 4875 / 5112 | E-Mail: nationalparkrat@hohetauern.at

www.hohetauern.at