



forschungsraum

Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen

Modul 07 – Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost
Bericht 2023-2024

IMPRESSUM

forschungsraum

Bericht 2023-2024 zum Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen: Modul 07
– Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost

Projektleitung:

Andreas KELLERER-PIRKLBAUER, 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 Raphael BURTSCHER

Titelbild:

© Andreas KELLERER-PIRKLBAUER: Wartungsarbeiten und Dokumentation der Geländearbeit am westexponierten Flankenstandort F-1K-W-2860 am Inneren Knorrkogel (Venedigergruppe, Osttirol). Im Bildhintergrund das heute nahezu eisfreie Kar unterhalb der Kristallwand, das um das Jahr 1850 noch einen gut ausgeprägten Gletscher beherbergte (2.9.2024).

Zitiervorschlag:

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Burtscher R. (2025): Bericht 2023-2024 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 04/25). 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	6
3.	Ergebnisse.....	14
3.1.	Ergebnisse zum Bereich Witterung und Klima 2023-2024	14
3.2.	Ergebnis Bereich Abfluss 2023-2024	20
3.3.	Ergebnis Bereich Gletscherverhalten 2023-2024.....	26
3.4.	Ergebnis Bereich Permafrost 2023-2024	32
4.	Diskussion.....	53
5.	Fazit mit Ausblick	55
	Literaturverzeichnis.....	56
	Abbildungsverzeichnis	60
	Tabellenverzeichnis.....	64



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 das glaziologische Haushaltsjahr 2023/24 (01.10.2023 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) in den beiden Beobachtungsjahre 2018/19 und 2019/20 fokussierte, sowie die Berichte von 2021 (Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2021), 2022 (Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2022), 2023 (Kellerer-Pirklbauer et al. 2023a) und 2024 (Kellerer-Pirklbauer et al. 2024a), die alle im Modul 07 behandelten abiotischen Faktoren bzw. Prozesse in den vier Haushaltsjahren zwischen 2019/20 und 2022/23 zum Inhalt hatten. An ausgewählten Stellen werden auch in diesem Bericht Ergebnisse der Auswertungen für die Periode 2023/24 mit den entsprechenden Daten der Jahre zuvor 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 2023/24 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 2018 im Einzugsgebiet Innergschlöss (Messgebiet 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, 2025) verwiesen.

2.1. Methoden im Bereich Witterung und Klima

Die Witterungsbeschreibung für die Messperiode 2023/24, 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 2025).

Witterungs- bzw. klimarelevante Daten aus dem Bereich des Nationalparks Hohe Tauern für den Zeitraum 01.10.2023–30.09.2024 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 meteorologischen Stationen verwendet, die in Tabelle 2 auflistet sind. 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 wiederum 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. Schließlich sei an dieser Stelle auch darauf hingewiesen, dass es an den beiden Messstationen Neukirchen und Bramberg keine Lufttemperaturaufzeichnungen gibt.

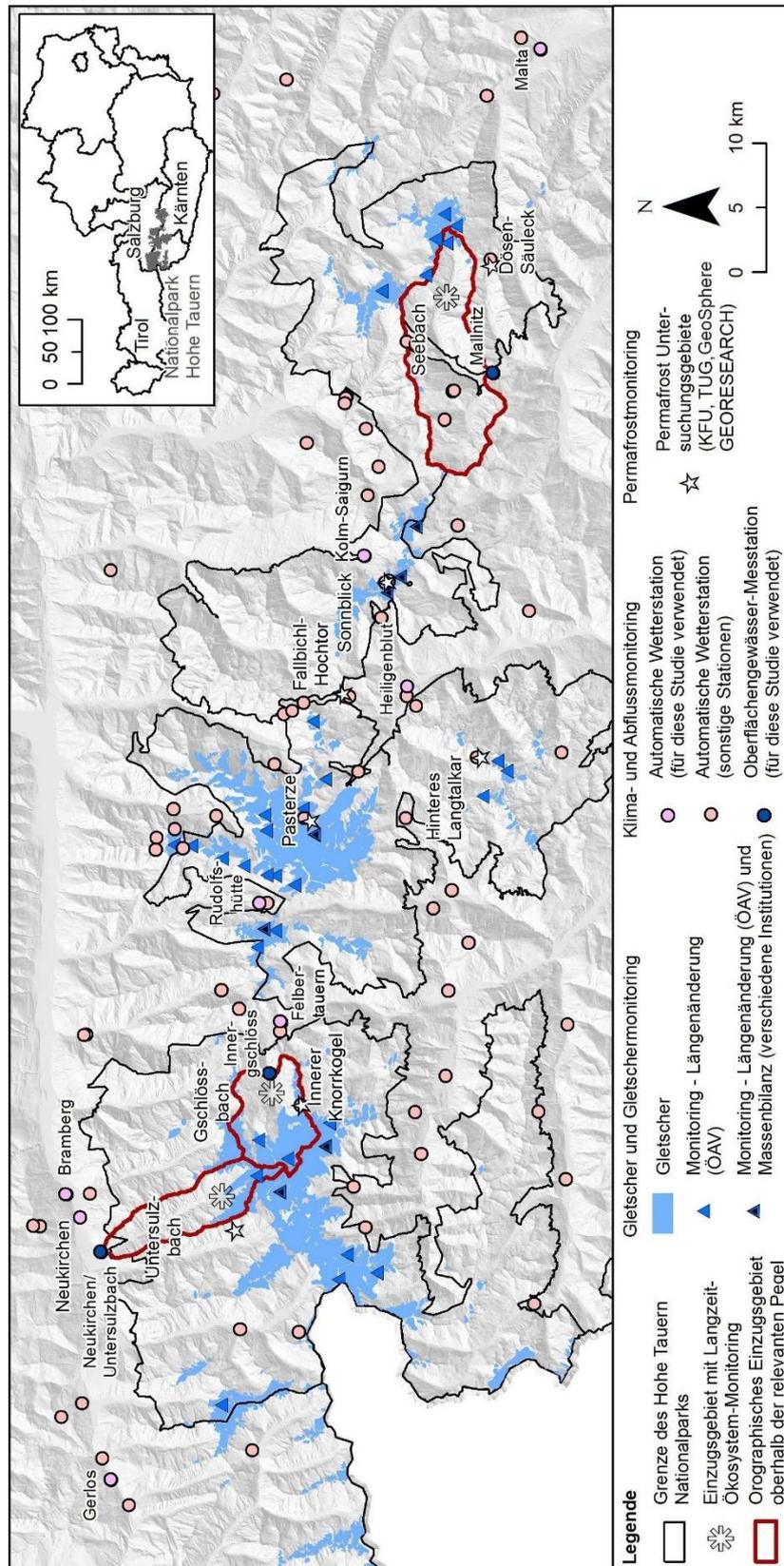


Abbildung 1: Lage der drei Untersuchungsgebiete für das Langzeit-Ökosystemmonitoring sowie die Lage der in dieser Studie verwendeten Klima- und Abflussmessstationen (GeoSphere Austria- oder HZB-Stationen), der durch Monitoring erfassten Gletscher und der Permafrost-Untersuchungsgebiete. Ergänzend sind 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/ZAMG).

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 01.-31.03.2019. (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 2023/24: Ende September 2024) reichen, sondern viele Monate oder sogar wenige Jahre zuvor enden. Beispielsweise konnte man am 15.04.2025 auf eHYD für die Messstelle Mallnitz die Abflusswerte (Q-Tagesmittel) nur für die Periode 01.01.1961 bis einschließlich 31.12.2022 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 01.10.2023 bis 30.09.2024 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: Florian Bergerweiß, florian.bergerweiss@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. Bei der Erstsichtung der Daten am Pegel Neukirchen fiel auf, dass im Dezember 2023 und Jänner 2024 hier der Tagesmittel des gemessenen Abflusses ungewöhnlich (und unrealistisch) gering war. Bei Nachfrage wurde mitgeteilt, dass in diesem Zeitraum umfangreiche Baggerarbeiten im Flussbett durchgeführt wurden, weshalb die Sondenaufzeichnungen nicht gut waren. In weiterer Folge wird von Seiten des Hydrographischen Landesdienstes noch der Wasserstand rekonstruiert und mit einem Pegelschlüssel angepasst. Der bilanzierte Q-Wert lag im April 2025 noch nicht vor, da die Bilanzierung erst im Juni in Wien durchgeführt wird, wobei der Pegel mit anderen verglichen wird, um plausible Werte zu bekommen. Für diesen Bericht musste somit mit den noch nicht korrigierten Daten gearbeitet werden. Schließlich sei auch hier angemerkt, dass allgemein auch für die hydrologischen Daten gilt, 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. [km²]	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
Innergschlöss	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 derzeit 39 Gletscher im Monitoring-Programm des Gletschermessdienstes des Österreichischen Alpenvereins (ÖAV) erfasst (Abb. 1). Zwei weitere Gletscher liegen etwas außerhalb des Nationalparkgebietes (Schmiedingerkees und Östl. Wurten-/Schareckkees). Die meisten der jährlich beobachteten Gletscher liegen in der Glocknergruppe (14), gefolgt von der Venedigergruppe (9), der Ankogelgruppe (6), der Granatspitzgruppe (5), der Goldberggruppe (4) und der Schobergruppe (3). Die wesentlichste Änderung im Projektzeitraum 2023/24 betraf die Aufnahme von vier zusätzlichen Gletschern bzw. Gletscherteilen infolge der Aufteilung bestehender Gletscherzungen: Die Pasterze wurde bei der Vermessung im Jahr 2023 in Hauptzunge und Burgstallzunge unterteilt, das Sonnblickkees in der Granatspitzgruppe in Sonnblickzunge, Granatspitzzunge und Filleckzunge, und das Goldbergkees in der Goldberggruppe wird seit 2023/24 in „Unterer Boden“ und „Mittlerer Boden“ untergliedert. Für einige Gletscher lagen im Messjahr 2023/24 keine oder nur eingeschränkt gültige quantitativen Werte zur Längenänderung vor (Obersulzbachkees, Umbalkees, Frosnitzkees, Schlatenkees, Venedigerkees, Schmiedlingerkees, Landeckkees, Winkelkees und westliches Trippkees). Bei Obersulzbachkees, Schlatenkees, Venedigerkees und Schmiedlingerkees konnte die Veränderung zumindest auf Basis von Fotovergleichen plausibel abgeschätzt werden (alle diese Gletscher im Rückzug). Beim Landeckkees wurden die Distanzen zum neuen Gletscherrand oberhalb einer Felsstufe gemessen. Da unterhalb der Felsstufe noch Gletschereis liegt, repräsentiert der mitgeteilte Wert (-281,3 m) keinen realen Rückzug und blieb für die Mittelbildung unberücksichtigt. Sämtliche Daten zu den Längenänderungen der Gletscher im Nationalpark Hohe Tauern (sowie die beiden in nächster Nähe) sind dem aktuellen Gletscherbericht des ÖAV entnommen, wobei zwei der drei Autoren dieses Berichts hierfür die Verantwortung tragen (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2025). Eine detaillierte Auflistung der berücksichtigten Gletscher findet sich im Ergebnisteil dieser Arbeit (Kap. 3.3.).

Auf der Ebene der drei für das Langzeitmonitoring relevanten 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 Schlatenkees für das Innergschlöss. Einschränkend muss jedoch wiederum betont werden, dass das Messprogramm am Winkelkees aufgrund der erheblichen Steinschlag- und Eissturzfaher in den Sommermonaten und der damit in Zusammenhang stehenden potenziellen Exponiertheit des dortigen Messteams unter der Leitung von Jörg Färber und Martin Rößler gegenüber alpinen Naturgefahren aktuell ausgesetzt ist. 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. Im Sommer 2024 waren jedoch der Besuch des Fotopunktes für das nur mehr fotografisch beobachtete Winkelkees und die Messung am Westlichen Trippkees aus Witterungsgründen unmöglich. Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass die Venedigergruppe im Berichtsjahr 2023/24 die Gebirgsgruppe in Österreich mit der höchsten Anzahl an witterungs- bzw. schneebedingten Datenausfällen war, weshalb nur von vier Gletschern Messwerte vorliegen. Die Tendenz des Schlatenkees konnte zumindest durch Fotovergleiche bestimmt werden.



Wie in Lieb et al. (2019) dargelegt, hängt die Anzahl tatsächlich vermessener Gletscher in den einzelnen Gletscherhaushaltsjahren von verschiedenen Faktoren ab. Einschränkende Bedingungen sind beispielsweise die Zugänglichkeit in den jeweiligen Jahren (z. B. durch Witterungseinflüsse oder die Bildung von Wasserflächen am Gletscherende) sowie eine mögliche Schneebedeckung der Gletscherstirn infolge einer spät abtauenden Altschneedecke. So war im Gletscherhaushaltsjahr 2020/21 an vier der fünf stationären Gletscher im Nationalpark Hohe Tauern das Gletscherende entweder vollständig oder teilweise von Altschnee bedeckt. In den beiden darauffolgenden Jahren 2021/22 und 2022/23 waren hingegen alle Gletscherenden schneefrei und konnten somit vermessen werden – sofern nicht andere Faktoren wie die topographisch schwierige Erreichbarkeit (z. B. Winkelkees) oder die Bildung eines Gletschersees im Vorfeld (z. B. Obersulzbachkees) eine Vermessung verhinderten. Für das Gletscherhaushaltsjahr 2023/24 liegen Längenänderungswerte im Vergleich zum Vorjahr von 32 Gletschern vor (im Vorjahr waren es 35 Gletscher). Für fünf weitere Gletscher konnten zumindest Tendenzen der Längenänderung festgestellt werden (Landeckkees, Obersulzbachkees, Schlattenkees, Venedigerkees und Schmiedlingerkees. Weitere Details zu den Ergebnissen dieses und der vorherigen Jahre finden sich in Lieb & Kellerer-Pirklbauer (2021 bis 2025).

(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 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 2023/24 wurden entweder von der Datenbank des World Glacier Monitoring Service (WGMS 2025) 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. vom Stubacher Sonnblickkees (Zagel et al. 2022, 2023, 2025), Venedigerkees (Seiser & Fischer 2022) oder Zettalunitz/Mullwitzkees (Stocker-Waldhuber & Fischer 2022). Eine Besonderheit stellt das Wurtenkees dar, auf welchem die Massenbilanzermittlung im Zweijahresrhythmus erfolgt. Zum Zeitpunkt der Berichtslegung lag für diesen Gletscher deshalb neben dem Wert für 2023/24 auch jener für 2022/23 vor, der in der Datenanalyse nun auch mitberücksichtigt wurde.

Tabelle 4: Gletscher in den Hohen Tauern, an denen aktuell Massenbilanzen durch verschiedene Institutionen bestimmt werden (Quelle: WGMS 2025, ergänzt). GeoSphere Austria (bis 31.12.2022: ZAMG); ÖAW=Österreichische Akademie der Wissenschaft; HD-Sbg=Hydrographischer Dienst des Landes Salzburg; HD-Tirol= Hydrographischer Dienst des Landes Tirol; Z_GIS= Fachbereich Geoinformatik, Universität Salzburg. *= Daten lagen für diesen Bericht nun auch für 2022/23 vor.

Gletscher (Gebirgsgruppe)	Forscherteam/Institution
Goldbergkees (Goldberggruppe)	B. Hynek, A. Neureiter (GeoSphere Austria)
Kleinfleißkees (Goldberggruppe)	B. Hynek, A. Neureiter (GeoSphere Austria)
Pasterze (Glocknergruppe)	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/HD-Tirol)





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 im Messjahr 2023/24 wird wiederum primär auf den im Auftrag des Nationalparks Hohe Tauern Kärnten erstellten Bericht für diesen Zeitraum verwiesen (Kellerer-Pirklbauer et al. 2025a). Für Vergleichszwecke werden zusätzlich noch Daten aus den davor liegenden Messjahren verwendet (u.a. Kellerer-Pirklbauer et al. 2021a, 2022, 2023b, 2024c). Die Ergebnisse sind aufgrund der hohen Anzahl an Messstellen und der unterschiedlichen lokalklimatischen Gegebenheiten 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 2023/24 getroffen werden. Die den Ausführungen zugrundeliegenden Messungen fanden in den in Abbildung 1 ersichtlichen Untersuchungsgebieten statt.

Abbildung 2 und Tabelle 5 geben eine 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. Schließlich wurde im Gebiet Pasterze-Burgstall seit 2024 eine automatische Kamera installiert, die auf den instabilen Felsbereich am Mittleren Burgstall ausgerichtet ist. Für Einzelheiten zu den Standorten und deren Instrumentierung wird auf den detaillierten Bericht hierzu (Kellerer-Pirklbauer et al. 2025a) verwiesen.



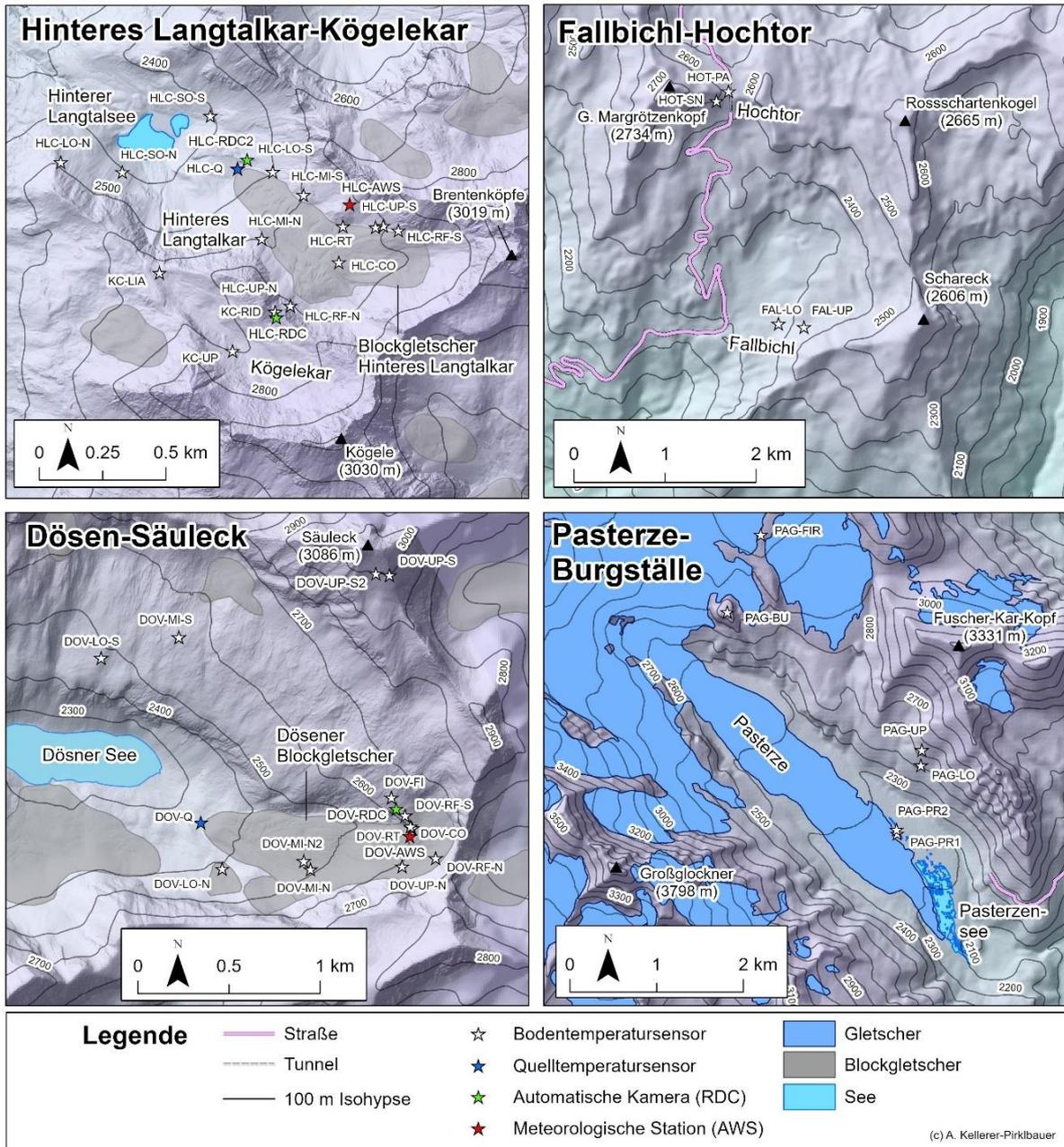


Abbildung 2: Detailkarten der vier Untersuchungsgebiete zum Permafrost-Monitoring im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten mit Lage nahezu aller Messstandorte, welche mit Miniatur-Temperaturdatenlogger ausgestattet sind, mit Stand 2024 (vgl. Tabelle 5). Die Standorte KC-LIA und KC-RID wurden 2022 neu eingerichtet, der Standort HOT-S im Jahr 2023 und der Standort DOV-UP-S2 im Jahr 2024 (Gletschermaske für Pasterze und benachbarte Gletscher nach Buckel et al. 2018).

Tabelle 5: Auflistung der vier Untersuchungsgebiete im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten und deren Instrumentierung mit Miniatur-Temperaturdatenloggern. Lage siehe Abbildung 2. Abbildungen 14 sowie 27-29 zeigen Daten bzw. Auswertungen der jeweils grau hinterlegten Sensoren. HLC = Hinteres Langtalkar-Kögelekar, FAL = Fallbichl, HOT = Hochtor, DOV = Dösen-Säuleck, PAG = Pasterze-Burgstall. Der Code für jeden Standort besteht im Wesentlichen aus diesen Bezeichnungen in Kombination mit weiteren, internen Kürzeln; z. B. N = Nord, S = Süd.

Code	Koord. BMN-M31 (EPSG 31258)		Koord. UTM-33N (EPSG 32633)		Höhe (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 ^(d)	407827	205118	331046	5205759	2769	177	11	0
GOE-PR ^(c)	406099	202925	329272	5203604	2598	90	4	0, 30
FAL-LO	413089	214329	336502	5214856	2250	293	16	0, 10, 75
FAL-UP	413279	214303	336692	5214826	2345	332	26	0, 10, 75
HOT-PA ^(e)	412726	216082	336177	5216616	2580	72	18	0, 10, 60
HOT-SN	412757	216086	336208	5216619	2575	185	10	0
DOV-LO-S	445487	205927	368710	5205768	2489	220	20	0
DOV-MI-S	445803	206025	369028	5205860	2586	213	19	0
DOV-UP-S	446659	206316	369889	5206132	3002	166	33	0
DOV-UP-S2 ^(b)	446633	206334	369864	5206151	3004	180	30	0
DOV-LO-N	446018	205072	369222	5204903	2407	342	22	0
DOV-MI-N	446381	205084	369585	5204907	2501	239	16	0
DOV-MI-N2	446418	205126	369623	5204948	2491	174	8	0
DOV-UP-N	446757	205111	369962	5204926	2626	331	25	0
DOV-RF-S	446761	205322	369970	5205137	2628	206	80	3, 10, 32
DOV-RF-N	446894	205150	370100	5204962	2638	300	90	3, 10, 40
DOV-RT	446791	205270	369999	5205084	2603	255	14	3, 10, 40
DOV-CO ^(a)	446785	205277	369993	5205091	2606	257	5	100, 200, 300
DOV-FI	446703	205395	369914	5205211	2644	213	28	0, 3, 10, 30,
DOV-Q	445923	250261	370090	5250074	2334	335	21	Wasser
PAG-LO	404961	216580	328425	5217279	2509	185	25	0
PAG-UP	404965	216760	328433	5217459	2628	220	30	0
PAG-BU	402694	218222	326193	5218969	2932	95	7	0, 10, 55
PAG-PR1	404719	215779	328165	5216484	2078	0 (f)	0	0
PAG-PR2	404710	215824	328158	5216528	2080	0 (f)	0	0, 10, 40
PAG-FIR	403015	219187	326535	5219927	3049	256	7	0

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

(b) Permafrost-Bohrlochtemperaturen am Hohen Sonnblick

Von den im Umfeld des Hohen Sonnblicks (GeoSphere Austria) und am Kitzsteinhorn (Kooperation verschiedener Institutionen und des Seilbahnunternehmens; wissenschaftliche Leitung 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 30.9.2024 (pers. Mitteilung Claudia Riedl): Im Sommer 2020 kam es durch einen Blitzeinschlag zur Zerstörung der Temperatursensoren-Messkette der Firma Geoprecision, weshalb für den Zeitraum 08.07.2020–11.10.2020 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 01.07.2021 bis einschließlich 05.09.2023 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 20.07.2021–03.08.2021 (15 Tage), 07.03.2023–23.03.2023 (17 Tage) sowie 05.08.2023–05.09.2023 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 die Betreiber ein neues Bohrloch mittelfristig für notwendig erachten. Nach erfolgter Neuinstrumentierung am 05.09.2023 liegen ab dem Folgetag wiederum Temperaturmessreihen für alle Tiefen vor, wobei von Seiten der GeoSphere Austria empfohlen wurde, die Bodentemperaturdaten erst ab dem 08.09.2023 zu verwenden – unter der Annahme, dass sich bis dahin im Bohrloch nach der erfolgten Instrumentierung eine stabile Luftschichtung eingestellt hatte. Zum Zeitpunkt der Berichtslegung lagen somit Datenreihen bis einschließlich 30.09.2024 vor. Von Seiten der GeoSphere Austria wurde auch 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. 2025a). Die den Ausführungen zugrundeliegenden Messungen fanden in den beiden Untersuchungsgebieten Dösen-Säuleck (Dösender 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 fast immer im Zeitraum Ende August bis Anfang September durchgeführt. Das Jahr 2023 war witterungsbedingt eine Ausnahme mit der Geländearbeit zwischen 10.08.2023 und 12.08.2023. Im Jahr 2024 erfolgte diese jedoch wieder im gewohnten Zeitraum, konkret zwischen 01. und 03.09.2024. Nach der Anreise ins Innergschlöss erfolgte die eigentliche Geländearbeit am Inneren Knorrkogel am 02.09.2024 und die Abreise aus dem Gebiet am 03.09.2024. Bedingt durch die nahezu vollständige Schneefreiheit im gesamten Untersuchungsgebiet sowie die guten Witterungsbedingungen konnten die Geländearbeiten – gleich wie in den Sommern 2022 und 2023 – problemlos durchgeführt werden. Grundsätzlich waren die Schneesverhältnisse im Bereich der Gipfelpyramide an den Geländeterminen im Jahr 2020 und 2021 vergleichbar mit einigen Schneeflecken (Abb. 3), in den Jahren 2022 bis 2024 hingegen deutlich geringer mit nur mehr wenigen, teilweise oberflächlich recht sedimentreichen Restschneeflecken (2022) bzw. Resten von Neuschnee (2023). Der Auf- und Abstieg zum bzw. vom Arbeitsgebiet erfolgte wie in den Vorjahren vom Innergschlöss über das Löbbentörl. Die Geländearbeit selbst konnte bei optimaler Witterung zeiteffizient an einem langen Arbeitstag mit Besuch aller 18 Standorte durchgeführt werden (Abb. 4). Kein Standort war zum Zeitpunkt der Geländearbeit im Jahr 2024 unter Schnee.

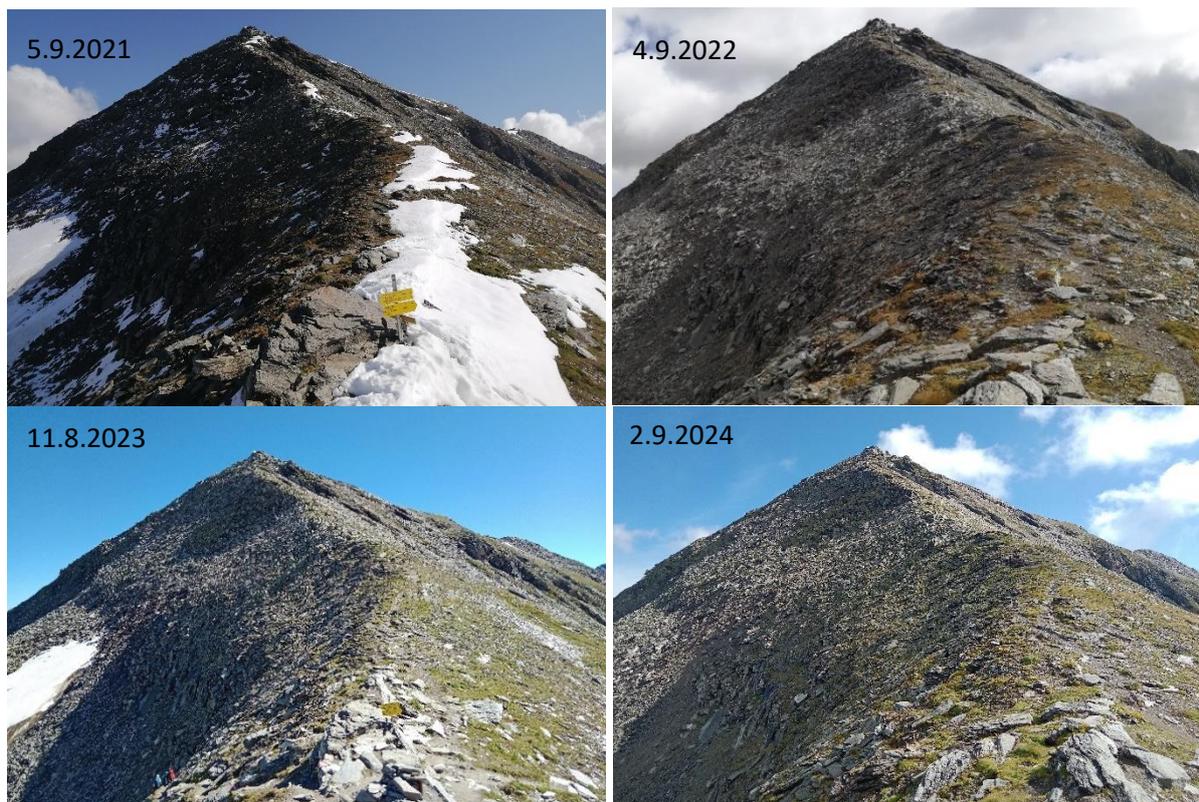


Abbildung 3: Vergleich der Schneebedingungen im Zuge der Geländearbeiten am 05.09.2021, 04.09.2022, 11.08.2023 sowie am 02.09.2024 im Bereich der Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels (hier zu sehen die Süd- und Westflanken), vom Löbbentörl aus betrachtet. Neuschnee war in den höheren Lagen in den Jahren 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. 2024 war das Gelände nahezu schneefrei. Fotos: Andreas Kellerer-Pirklbauer.

Die einzelnen Messtandorte wurden im Jahr 2024 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 erst 2023 installierte Datenlogger A54C51 war auch nach Batterietausch nicht anzusprechen und dürfte möglicherweise – leider schon wieder und fast schon zur jährlichen „Tradition“ geworden – einem Blitzschlag zum Opfer gefallen sein. Als nächster Datenlogger wurde dort das Modul mit dem Code A50354 installiert, in der Hoffnung, dass dieser endlich auch längere Datenreihen für die Lufttemperatur liefert.



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_20240425.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_23-24	01-G-1K-SW-2840-A5223B_18-24
F-1K-W-2840	A52220	0	02_F_1K_W_2840_A52220_23-24	02-F-1K-W-2840-A52220_18-24
G-1K-SW-2860	A5223F	0	03_R_1K_SW_2860_A5223F_23-24*/**	03-G-1K-SW-2860-A5223F_18-24; <i>Batterie leer mit 26.7.2024; mit Daten von Standort A5223B und mittleren, stündlichen Temperaturunterschied Datenloch aufgefüllt</i>
F-1K-W-2860	A52244	0	04_F_1K_W_2860_A52244_23-24*	04-F-1K-W-2860-A52244_18-24
F-3K-W-2869	A538B7	3	05_F_3K_W_2869_A538B7_23-24	07-F-3K-W-2869-A538B7_18-24-3cm
	A538B7	10	05_F_3K_W_2869_A538B7_23-24	07-F-3K-W-2869-A538B7_18-24-10cm
	A538B7	40	05_F_3K_W_2869_A538B7_23-24	07-F-3K-W-2869-A538B7_18-24-40cm
G-1K-NW-2840	A52223	0	06_R_1K_NW_2840_A52223_23-24	05-G-1K-NW-2840-A52224_18-24
G-1K-NW-2860	A52227	0	07_R_1K_NW_2860_A52227_23-24	06-G-1K-NW-2860-A52227_18-24
F-3K-NE-2871	A538AC	3	08_F_3K_NE_2871_A538AC_23-24	08-F-3K-NE-2871-A538AC_18-24-3cm
	A538AC	10	08_F_3K_NE_2871_A538AC_23-24	08-F-3K-NE-2871-A538AC_18-24-10cm
	A538AC	40	08_F_3K_NE_2871_A538AC_23-24	08-F-3K-NE-2871-A538AC_18-24-40cm
S-GT-2886	A521B7	0	09_S_GT_2886_A521B7_23-24	09-S-GT-2886-A521B7_18-24
F-3K-S-2871	A538B1	3	10_F_3K_S_2871_A538B1_23-24	12-F-3K-S-2871-A538B1_18-24-3cm
	A538B1	10	10_F_3K_S_2871_A538B1_23-24	12-F-3K-S-2871-A538B1_18-24-10cm
	A538B1	40	10_F_3K_S_2871_A538B1_23-24	12-F-3K-S-2871-A538B1_18-24-40cm
S-GT-2878	A53A9E (seit 2018) A504F4 (seit 2022)	0	11a_S_GT_2878_A53A9E_23-24*/** 11b_S_GT_2878_A504F4_23-24*	10-S-GT-2878-A52194_A504F4_18-24; <i>Logger A53A9E - am 28.4.2024 war die Batterie leer, deshalb Daten von A504F4 verwendet</i>
S-AT-2878	A53A9E (2018-22) A52194 (2022-23) A54C51 (2023-24) A50354 (seit 2024)	+200	Keine Lufttemperaturdaten für 2022-23 (Sensor defekt)	Logger A52194 von 4.9.2022 bis 11.8.2023 (defekt); Logger A54C51 von 11.8.2023 bis 2.9.2024 (defekt); Logger A50354 seither
G-1K-E-2860	A521CB	0	12_R_1K_E_2860_A521CB_23-24*/**	13-G-1K-E-2860-A521CB_18-24; <i>am 8.10.2023 war die Batterie leer; Daten von A5222E verwendet</i>
G-1K-E-2845	A5222E	0	13_R_1K_E_2845_A5222E_23-24	14-G-1K-E-2845-A5222E_18-24
F-1K-NE-2840	A521A0	0	14_F_1K_NE_2840_A521A0_23-24	15-F-1K-NE-2840-A521A0_18-24
F-1K-NE-2860	A5226E	0	15_G_1K_NE_2860_A5226E_23-24*	16-F-1K-NE-2860-A5226E_18-24
F-1K-S-2860	A5222A	0	16_F_1K_S_2860_A5222A_23-24	17-F-1K-S-2860-A5222A_18-24
F-1K-S-2840	A52230	0	17_F_1K_S_2840_A52230_23-24	18-F-1K-S-2840-A52240_18-24

Anmerkungen: GT=Bodentemperatur, AT=Lufttemperatur, *neue Batterie 2024 (5 Logger, 3 mit Datenlöcher), **teilweise Datenausfall; konnte mit Korrelationsanalyse und Korrekturwerten zu benachbartem Standort aufgefüllt werden



Abbildung 4: Blick vom Inneren Knorrkogel nach Osten auf das Karleskees und den Äußeren Knorrkogel (2920 m) am 11.08.2023 und 02.09.2024. Zu beachten ist das weitgehende Fehlen von Schneefeldern (auch auf dem Karleskees) in der Hochgebirgslandschaft der Hohen Tauern in beiden Jahren. Fotos: Andreas Kellerer-Pirklbauer.

An drei weiteren Standorten gab es teilweise Datenausfälle bedingt durch leere Batterien. Diesen Datenlöcher konnten jedoch mit Daten jeweils benachbarter Stationen (oder sogar Backup-Datenlogger wie am Standort S-GT-2878) in Kombination mit Vergleichsanalysen und daraus basierenden Korrekturwerten gefüllt werden. Davon betroffen waren die drei Datenlogger A52220 (F-1K-W-2840), A53A9E (S-GT-2878) sowie A521CB (G-1K-E-2860). Am Standort S-GT-2878 waren von 2023 bis 2024 wiederum 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, welche die bearbeiteten 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 – Messjahre 2018/19 bis 2022/23 – im Ergebnisteil berücksichtigt.

Datenverfügbarkeit dieser im Modul 07 erhobenen Daten: Die Autoren erklären, dass Bodentemperaturdaten aller einzelnen Monitoringstandorte im Messgebiet Innerer Knorrkogel, die eigens für diese Studie eingerichtet und alljährlich gesammelt werden, übersichtlich im Zenodo-Repository für den Zeitraum September 2023 bis August 2024 öffentlich verfügbar sind. Siehe hierzu Kellerer-Pirklbauer (2025) bzw. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15280626>.



(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 25.07.2022 bis einschließlich 27.09.2023 wurden uns von der Firma GEORESEARCH für die Berichtslegung im Jahr 2024 zur Verfügung gestellt. Im Jahr 2024 konnten das Sattelkar nicht besucht und deshalb die Datenlogger auch nicht ausgelesen werden. Wie uns Ingo Hartmeyer von der Firma GEORESEARCH mitteilte, gab es im Mai 2023 im Zuge der Einrichtung von Sicherungsseilen am Zustieg ins Kar einen größeren Steinschlag, der den Personen vor Ort gefährlich nahekam. Daraufhin wurde beschlossen, die Begehung für 2024 auszusetzen und die Steinschlag-gefährdete Stelle zu beobachten.

Wie im Kapitel 3.4. ausgeführt wird, gab es jedoch auch schon 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, für 2023/24 hingegen keine.



3. Ergebnisse

3.1. Ergebnisse zum Bereich Witterung und Klima 2023-2024

In der Tabelle 7 sind die Jahreswerte der Lufttemperatur und des Niederschlags für das Gletscherhaushaltsjahr 2023/24 sowie zu Vergleichszwecken für die neun 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 zwischen den Stationen fallen, bedingt durch ihre unterschiedliche Seehöhe sowie die variierende Lage relativ zum Alpenhauptkamm, beträchtlich aus. Dennoch zeigen sich über die Jahre hinweg an allen Stationen gleichsinnige Entwicklungen. So stellt das hydrologische Jahr 2023/24 an sieben der neun analysierten Stationen (Rudolfshütte, Kolm-Saigurn, Sonnblick, Malta, Neukirchen, Bramberg und Gerlos) das niederschlagsreichste innerhalb des betrachteten Zeitraums dar. Bei der Jahresmitteltemperatur wurde im Messjahr 2023/24 an sämtlichen Stationen mit verfügbaren Daten jeweils ein neuer Höchstwert registriert. Die bereits schon sehr hohen Werte im Vorjahr – die damals zumeist den Höchstwert bis dorthin darstellten – wurden noch einmal deutlich übertroffen.

Tabelle 7: Jahresmittelwerte der Lufttemperatur (T, in °C) und Jahressummen des Niederschlags (P, in mm) in den zehn hydrologischen Haushaltsjahren 2014/15 bis 2023/24 (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 10-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
2023/24	2,25	2766	6,9	2182	-2,8	2097	8,5	980	10,3	1323
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		
2023/24	n.d.	1438	n.d.	1481	7,2	1620	6,2	1625		

Die in Tabelle 7 dargestellten Werte zeigen deutlich, dass das Jahresmittel der Lufttemperatur an allen sieben betrachteten Stationen im Jahr 2020/21 im Vergleich zu den vorangegangenen sechs sowie den nachfolgenden drei Jahren deutlich niedriger ausfiel. An allen Stationen wurde in diesem Jahr das jeweilige Minimum des Betrachtungszeitraums verzeichnet – mit Ausnahme der Station Gerlos, an der in den Jahren 2016/17 (5,30 °C) ein nahezu identischer Wert wie in 2020/21 (5,33 °C) registriert wurde. Dieses niedere Temperaturniveau steht in starkem Kontrast zu den außergewöhnlich warmen Jahren 2019/20, 2022/23 und insbesondere 2023/24. Letzteres stellt an allen sieben Stationen das wärmste Jahr des Zeitraums dar; die jeweiligen Rekordwerte übertrafen die bisherigen Maxima teils deutlich – in Heiligenblut und Malta sogar um 0,7 °C. Auch die jährlichen Niederschlagssummen lagen im hydrologischen Jahr 2023/24 an allen neun Stationen über dem 10-jährigen Mittel. Besonders markant ist dies an den Stationen Rudolfshütte und Kolm-Saigurn, wo die langjährigen Mittelwerte um 426 mm bzw. 368 mm überschritten wurden.

Der Sachverhalt der außergewöhnlich hohen Temperaturen im letzten hydrologischen Haushaltsjahr wird gut in Abbildung 5 sichtbar. Bei der Gegenüberstellung der Temperaturwerte des Jahres 2023/24 mit dem Mittelwert der Dekade zwischen 2014/15 bis 2023/24 fällt deutlich auf, dass an allen sieben Stationen der Jahresmittelwert im Jahr 2023/24 über jenem des Mittelwertes liegt. Am geringsten ist die positive Anomalie gegenüber dem Mittelwert an den Stationen Rudolfshütte und Sonnblick mit Werten von „nur“ +0,87 °C bzw. +0,88 °C. Der größte Unterschied wurde hingegen für die Station Gerlos ermittelt, wo die Anomalie sogar +1,23 °C beträgt. Im Mittel über alle sieben Stationen beträgt die Abweichung vom Normalwert der zehn Jahre +1,02 °C.

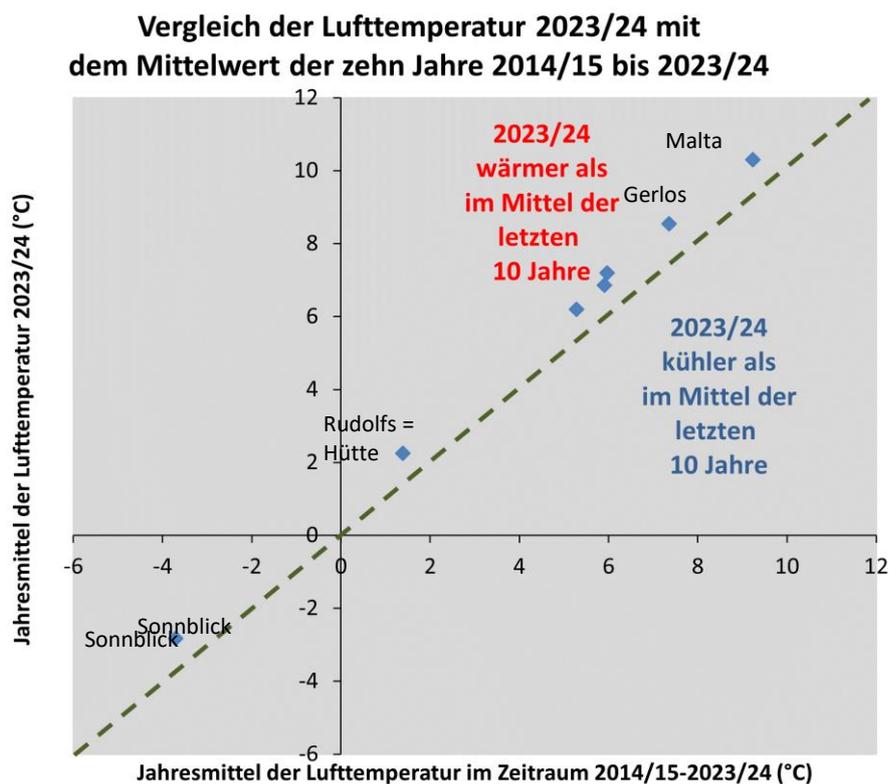


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Jahresmitteltemperaturen von 2023/24 mit dem Mittelwert für die zehn Jahre zwischen 2014/15 und 2023/24 von sieben Klimastationen in den Hohen Tauern, deren Daten den Inhalt der Tabelle 7 bilden. Primär bedingt durch deren Seehöhe, ist der wärmste Standort die Station Malta, der kälteste die Station Sonnblick.

Der Vergleich der Niederschlagssummen des hydrologischen Jahres 2023/24 mit dem Mittelwert der letzten zehn Jahre (2014/15 bis 2023/24) in Abbildung 6 zeigt, dass an allen neun untersuchten Stationen eine z. T. deutlich erhöhte Jahresniederschlagsmenge registriert wurde. Besonders ausgeprägt ist diese positive Abweichung an der Station Rudolfshütte, wo im Jahr 2023/24 eine Gesamtsumme von 2766 mm gemessen wurde – ein Plus von 426 mm oder 18,2 % gegenüber dem Dekadenmittel von 2340 mm. Vergleichbare Abweichungen zeigen sich auch an den Stationen Kolm-Saigurn mit 2182 mm (Differenz: +367 mm oder +20,2 % gegenüber einem Mittelwert von 1815 mm) sowie Malta mit 1323 mm (Differenz: +324 mm oder +32,4 % gegenüber 999 mm). Auch an den nördlich des Alpenhauptkammes gelegenen Stationen Neukirchen und Bramberg lagen die Jahresniederschläge im Jahr 2023/24 deutlich über dem langjährigen Mittel: In Neukirchen wurden 1438 mm gemessen (Mittelwert: 1137 mm; Differenz: +301 mm, +26,4 %), in Bramberg 1481 mm (Mittelwert: 1181 mm; Differenz: +300 mm, +25,4 %). Trotz eines insgesamt ähnlichen Musters von niederschlagsreichen und niederschlagsarmen Jahren variiert das jeweils trockenste Jahr zwischen den Stationen deutlich: Für Neukirchen und Bramberg war dies 2014/15, für den Sonnblick 2015/16, für Malta 2018/19, für Heiligenblut 2017/18, für Rudolfshütte und Felbertauern 2021/22 sowie für Kolm-Saigurn und Gerlos 2022/23. Dies zeigt die deutlich größere räumliche Variabilität des Niederschlags gegenüber Temperatur im Gebiet der Hohen Tauern.

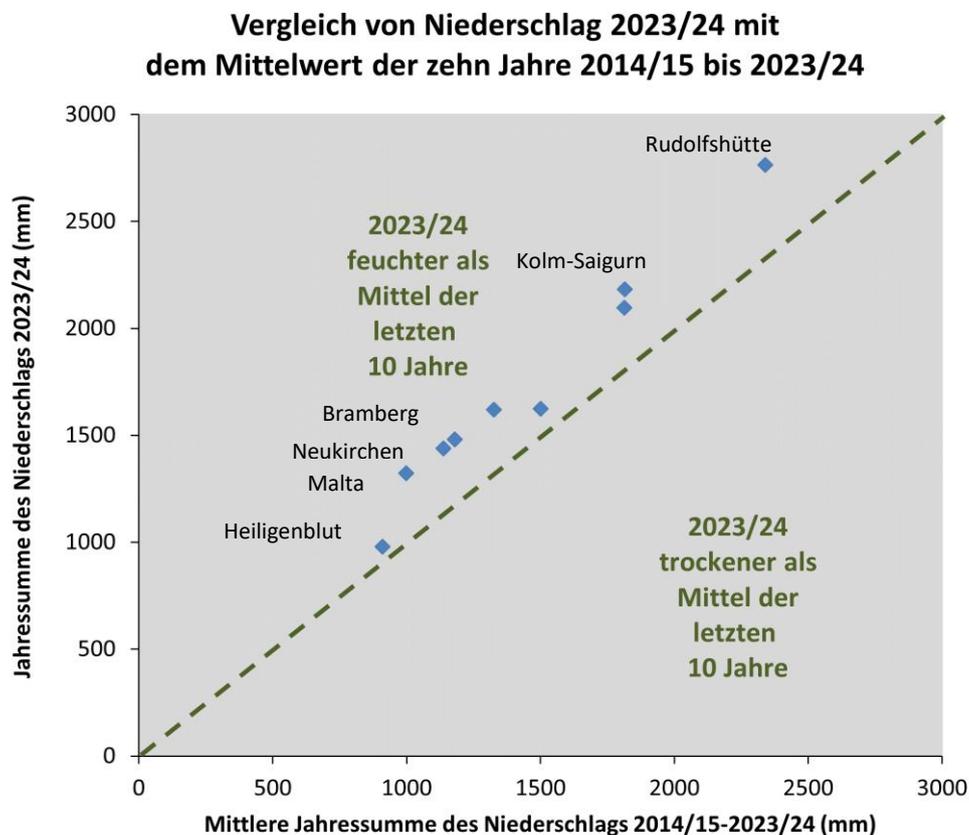


Abbildung 6: Gegenüberstellung der Jahressummen des Niederschlags von 2023/24 mit dem Mittelwert für die zehn Jahre zwischen 2014/15 und 2023/24 von neun Klimastationen, deren Daten den Inhalt der Tabelle 7 bilden. Der niederschlagsärmste Standort ist Heiligenblut, der niederschlagsreichste die Rudolfshütte.

Auf Basis der Monatswitterungsübersichten für Österreich, online veröffentlicht durch die GeoSphere Austria (www.geosphere.at), können die Witterungsverhältnisse für das Gletscherhaushaltsjahr bzw. hydrologische Jahr 2023/24 wie folgt beschrieben werden: Nach dem späten Ende des vorangegangenen Haushaltsjahres am 15.10.2023 brachte der viel zu kalte November überall in Österreich und somit auch in den Gebirgsregionen fast doppelt so viel Niederschlag wie erwartet und gehörte somit zu den zehn niederschlagsreichsten Novembere der Messgeschichte. Auch der Dezember blieb überwiegend kalt und feucht, während ab Weihnachten die Zufuhr milder Luftmassen dominierte, sodass die nachfolgenden Monate, besonders Februar und März, zu warm ausfielen, wobei der Februar an den meisten Messstationen neue Höchstwerte der Mitteltemperatur brachte. Die



Niederschlagsmengen waren in dieser Zeit unterdurchschnittlich, sodass der Hochwinter insgesamt als eher schneearm gelten muss.

In der zweiten Aprilhälfte stellte sich eine winterliche Witterungsphase mit viel Schneefall im Gletschniveau der Hohen Tauern ein, und – nach einem knapp zweiwöchigen milden Intermezzo – verlief auch die zweite Maihälfte ähnlich. Der anfangs noch niederschlagsreiche Juni war ab der Monatsmitte sehr warm und niederschlagsarm, sodass die Ausaperung der in der alpinen Höhenstufe inklusive der tief gelegenen Gletscherzungen rasch voranschritt und ab etwa Mitte Juli auch die höheren Lagen erfasste. Im viel zu warmen und trockenen August zogen sich die winterlichen Schneerücklagen in die höchst gelegenen oder schattigsten Gelände- bzw. Gletscherteile zurück oder verschwanden überhaupt. Gegen Ende der ersten Septemberdekade endete die letzte von mehreren Hitzewellen abrupt und wurde schlagartig am 12.9.2024 von einem Arktikluftvorstoß, verbunden mit ergiebigen Schneefällen im Gebirge, abgelöst, womit das Haushaltsjahr für die Gletscher endete. Der September war primär aufgrund dieses – nicht zuletzt wegen der damit verbundenen Hochwässer in tiefen Lagen medial sehr präsenten – mehrtägigen Niederschlagsereignisses vielerorts der niederschlagsreichste der Messgeschichte.

Der entscheidende Faktor für die erneut gletscherabträglichen Bedingungen waren neben den hohen Sommertemperaturen die geringen Niederschläge im Juli und August 2024 sowie das Ausbleiben sommerlicher Schneefälle ausgelöst durch Kaltluftereinbrüche, die die Gletscherschmelze wenigstens kurzzeitig unterbrochen hätten.

Abbildung 7 zeigt in einer Zusammenschau die Kurven der Monatsmitteltemperaturen aller in Tabelle 7 enthaltenen Stationen mit entsprechenden Daten für den Projektzeitraum 01.10.2023 bis 30.09.2024. 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: $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), (c) die Station Rudolfshütte am zweitkälteste ist ($2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), (d) die Stationen Kolm-Saigurn ($6,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), Gerlos ($7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) und Felbertauern ($6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) relativ ähnlich sind und (e) die Stationen Heiligenblut ($8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) und Malta ($10,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) die höchsten Jahresmittelwerte aufweisen, was im Wesentlichen der regelhaften Temperaturabnahme mit der Höhe entspricht. Hervorzuheben sind die auffallend tiefen Temperaturen im März (an den meisten Stationen kühler als der – wie erwähnt – übernormal temperierte Februar) sowie – nach dem zu erwartenden kontinuierlichen Temperaturanstieg vom Frühjahr bis zum August –, die deutlich als nahezu 90° -Knick erkennbare Temperaturabnahme im September, welche mit dem zuvor erwähnten Arktikluftvorstoß und der nachfolgenden, unterkühlten zweiten Septemberhälfte zu erklären ist.

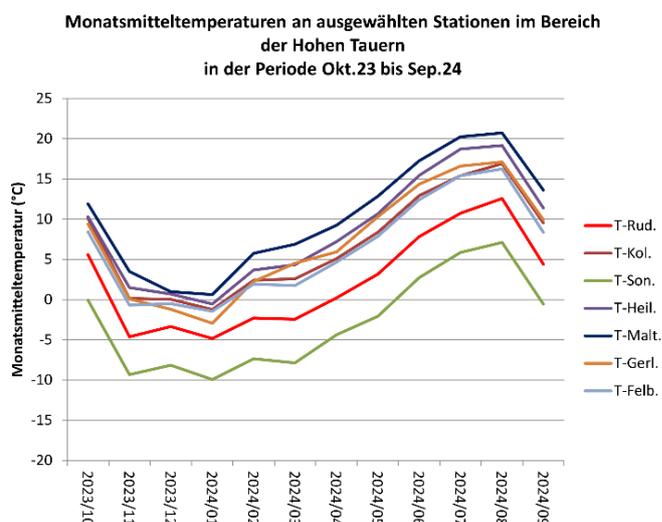


Abbildung 7: Monatswerte der Lufttemperatur (T) im Zeitraum Oktober 2023 bis September 2024 an den sieben Klimastationen Rudolfshütte, Kolm-Saigurn, Sonnblick, Heiligenblut, Malta, Gerlos und Felbertauern.



Die Monatsmittelwerte der Temperatur an der Station Sonnblick in den letzten vier Messjahren (2020/21 bis 2023/24) 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 geben.

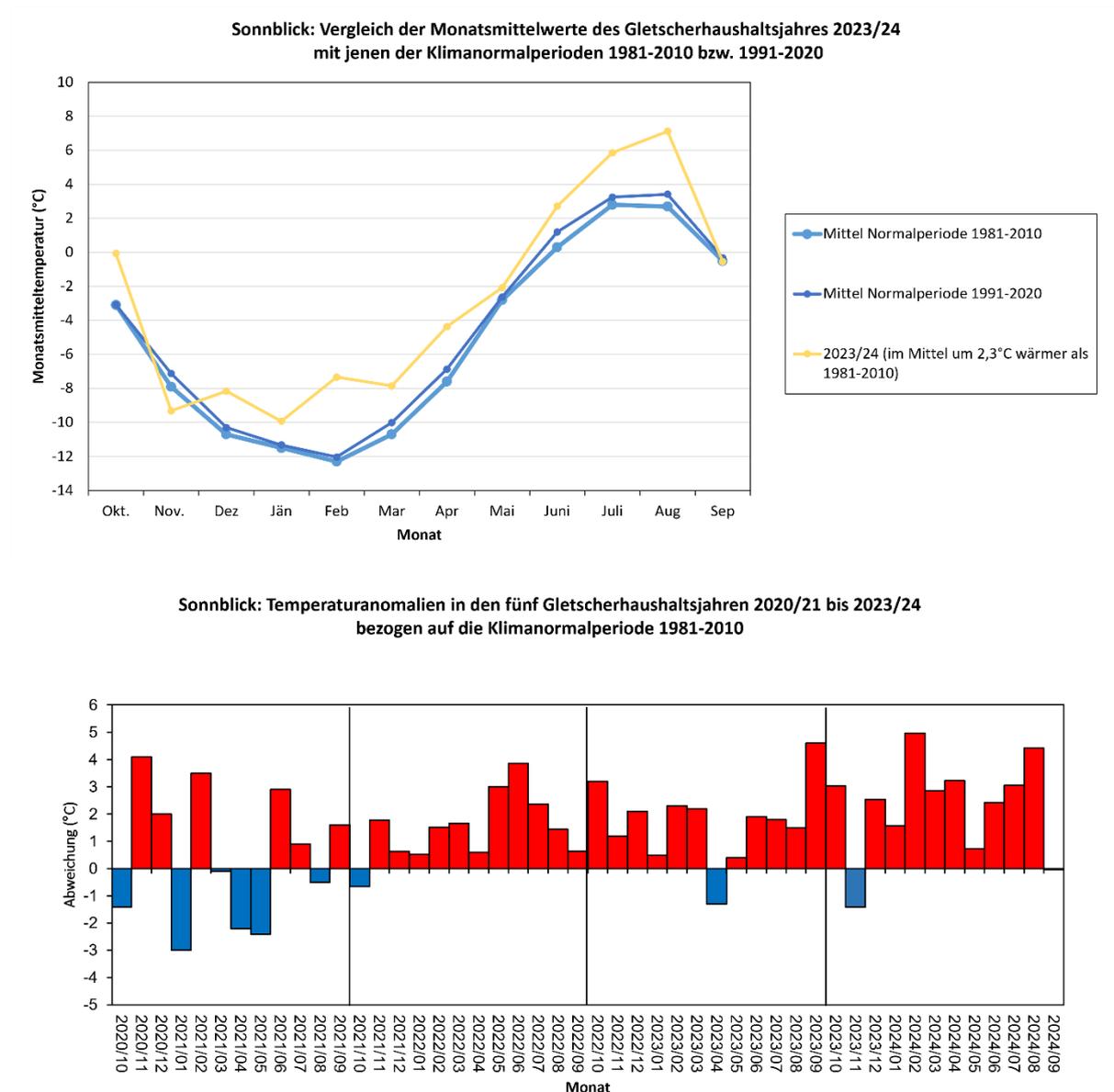


Abbildung 8: Vergleich der Monatsmittelwerte der Lufttemperatur (in °C) im Gletscherhaushaltsjahr 2023/24 mit jenen der Klimanormalperioden 1981–2010 sowie 1991–2020 (oben) und Abweichung der Monatsmitteltemperaturen zur Klimanormalperiode 1981–2010 in den vier Gletscherhaushaltsjahren 2020/21 bis 2023/24 (unten) an der Station Sonnblick (3109 m).

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 November 2023 mit etwas tieferen und der September 2024 mit etwa denselben Temperaturen 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. Das letzte Beobachtungsjahr 2023/24 weist mit einem Mittel von +2,3°C deutlich zu hohe Temperaturen auf, wozu insbesondere der Februar mit +5,0°C (!) und August mit +4,4°C beigetragen haben. Die vier Beobachtungsjahre 2012/21 bis 2023/24 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.

Tabelle 8: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur (in °C) und Abweichungen der Monatsmittelwerte in den fünf Gletscherhaushaltsjahren 2019/20 bis 2023/24 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	2023/24	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23	2023/24
Okt.	-3,1	-0,9	-4,5	-3,8	0,1	-0,1	2,2	-1,4	-0,7	3,2	3,0
Nov.	-7,9	-6,7	-3,8	-6,1	-6,7	-9,3	1,2	4,1	1,8	1,2	-1,4
Dez.	-10,7	-8,9	-8,7	-10,1	-8,6	-8,2	1,8	2	0,6	2,1	2,5
Jän.	-11,5	-7,7	-14,5	-11,0	-11,0	-9,9	3,8	-3	0,5	0,5	1,6
Feb.	-12,3	-9,6	-8,8	-10,8	-10,0	-7,3	2,7	3,5	1,5	2,3	5,0
März	-10,7	-9,6	-10,8	-9,0	-8,5	-7,8	1,1	-0,1	1,7	2,2	2,9
Apr.	-7,6	-4,7	-9,8	-7,0	-8,9	-4,4	2,9	-2,2	0,6	-1,3	3,2
Mai	-2,8	-3,3	-5,2	0,2	-2,4	-2,1	-0,5	-2,4	3,0	0,4	0,7
Juni	0,3	0,5	3,2	4,2	2,2	2,7	0,2	2,9	3,9	1,9	2,4
Juli	2,8	3,5	3,7	5,2	4,6	5,9	0,7	0,9	2,4	1,8	3,1
Aug.	2,7	4,6	2,2	4,1	4,2	7,1	1,9	-0,5	1,4	1,5	4,4
Sep.	-0,5	1,6	1,1	0,1	4,1	-0,5	2,1	1,6	0,6	4,6	0,0
<i>Mittel</i>	<i>-5,1</i>	<i>-3,4</i>	<i>-4,7</i>	<i>-3,7</i>	<i>-3,4</i>	<i>-2,8</i>	<i>1,7</i>	<i>0,5</i>	<i>1,4</i>	<i>1,7</i>	<i>2,3</i>

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 1973–2024 sowie ein entsprechender linearer Trend dargestellt. Wie die Grafik zeigt, ist an dieser Station keine signifikante Änderung der Jahressummen des Niederschlags zu erkennen, jedoch weisen diese eine starke Variabilität auf: Der Mittelwert im 52-jährigen Beobachtungszeitraum beträgt 1077 mm, das bisherige Maximum wurde im Jahr 1979 mit 1440 mm erreicht. Im Jahr 2024 wurde mit 1438 mm nahezu derselbe Spitzenwert registriert. Somit kann festgehalten werden, dass die Niederschlagsmenge von 2024 auch auf der Skala eines halben Jahrhunderts außergewöhnlich hoch war. Das Minimum wurde im Jahr 2002 mit lediglich 731 mm verzeichnet und entspricht damit nur rund der Hälfte des Maximalwertes.

Zusätzlich ist in der Abbildung 9 unten auch die Entwicklung der Jahresmittel der Lufttemperatur an der Station Sonnblick über denselben 52-jährigen Zeitraum dargestellt. Ganz deutlich ist – unabhängig von großen Schwankungen von Jahr zu Jahr – ein klarer Erwärmungstrend zu erkennen. In acht der letzten zehn Jahren betrug das Jahresmittel der Temperatur $\geq -4^\circ\text{C}$, wobei die vier Kalenderjahre 2020, 2022, 2023 und 2024 als die absolut wärmsten hervorstechen: Mit jeweils $-3,5^\circ\text{C}$ erreichten die drei Jahre 2020, 2022 und 2024 jeweils den neuen Stationsrekord der gesamten Messreihe seit 1887. Das Jahr 2021 war im Vergleich zu den Jahren vorher und nachher 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 $-4,0^\circ\text{C}$.

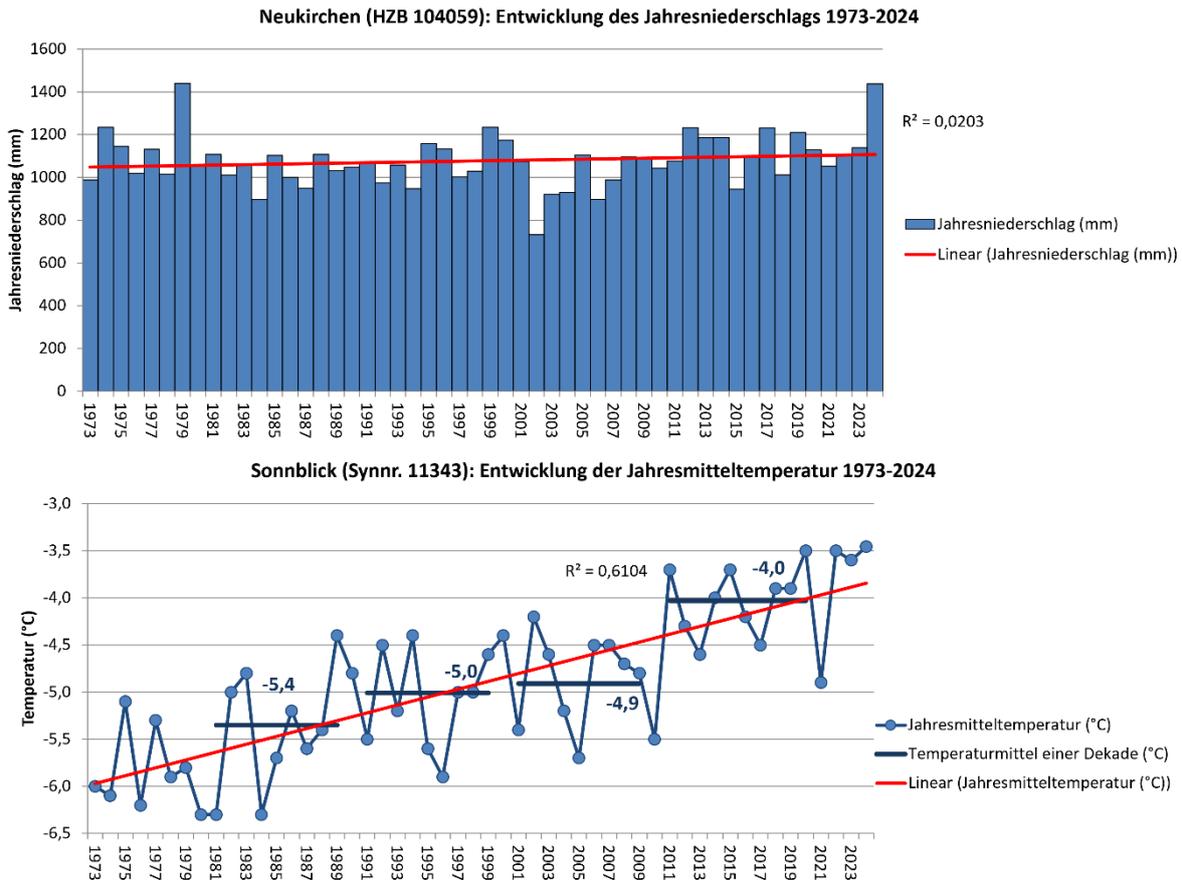


Abbildung 9: Langzeitentwicklung von Niederschlag (Station Neukirchen) und Temperatur (Station Sonnblick). Entwicklung der Jahreswerte (hier Kalenderjahre) im Zeitraum 1973–2024 und entsprechende lineare Trends (rote Linien). Niederschlag: Keine signifikanten Veränderungen erkennbar. Temperatur: Klarer Erwärmungstrend. Für die Temperatur sind zusätzlich auch Dekadenmittelwerte (1981–1990, 1991–2000, 2001–2010 und 2011–2020) angegeben.

3.2. Ergebnis Bereich Abfluss 2023-2024

Die Abflusswerte der drei Pegel Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) wurden für den Zeitraum 01.10.2014–30.09.2024 ausgewertet. Abbildung 10 zeigt die Tagesmittel der gemessenen Abflüsse an den drei Stationen für den nunmehr zehnjährigen 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. In den dargestellten Abflusskurven stechen einzelne Hochwasserspitzen hervor: 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.

Der Mallnitzbach weist wegen der Größe des Einzugsgebietes ($85,3 \text{ km}^2$) die höchsten aller Jahres- sowie zumeist auch Monatswerte – wie in Tabelle 9 ersichtlich – auf, wenngleich der Gschlössbach (Einzugsgebiet von nur $39,3 \text{ km}^2$) in manchen Beobachtungsjahren den höchsten Monatswert der drei Bäche (zuletzt Juni 2019, August 2020, Juli 2021 sowie Juli und August 2023 und 2024) verzeichnete. In Bezug auf Jahreswerte stechen jedoch für den Mallnitzbach die beiden Beobachtungsjahre 2021/22 und 2022/23 hervor, da an diesem Pegel nur $80,23 \text{ Mio. m}^3$ bzw. $101,39 \text{ Mio. m}^3$ 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 von Neukirchen liegt. Dieses Muster änderte sich im hydrologischen Jahr 2023/24, in dem am Pegel Mallnitz mit $149,01 \text{ Mio. m}^3$ ein deutlich überdurchschnittlicher Jahreswert registriert wurde. Auch der Pegel Neukirchen (Einzugsgebiet von $40,5 \text{ km}^2$; somit ähnlich zum Gschlössbach) zeigte mit $78,64 \text{ Mio. m}^3$ den höchsten Abflusswert des

Beobachtungszeitraums auf, während Innerschlöss mit 109,17 Mio. m³ ebenfalls einen Anstieg im Vergleich zu den Vorjahren aufwies, es jedoch schon ähnlich hohe Werte in dieser Dekade gab. Dieser hohe Abfluss im Jahr 2023/24 spiegelt sich auch in den Monatswerten wider. So wurden in Mallnitz und Neukirchen im Juni und Juli außergewöhnlich hohe Monatsmaxima registriert. Besonders bemerkenswert ist zudem der neue Positivrekord des monatlichen Minimumabflusses am Pegel Innerschlöss im Februar 2024 mit 0,60 Mio. m³. Dies stellt die höchste je gemessene Monatsminimum-Summe für die Periode 2014–2024 dar.

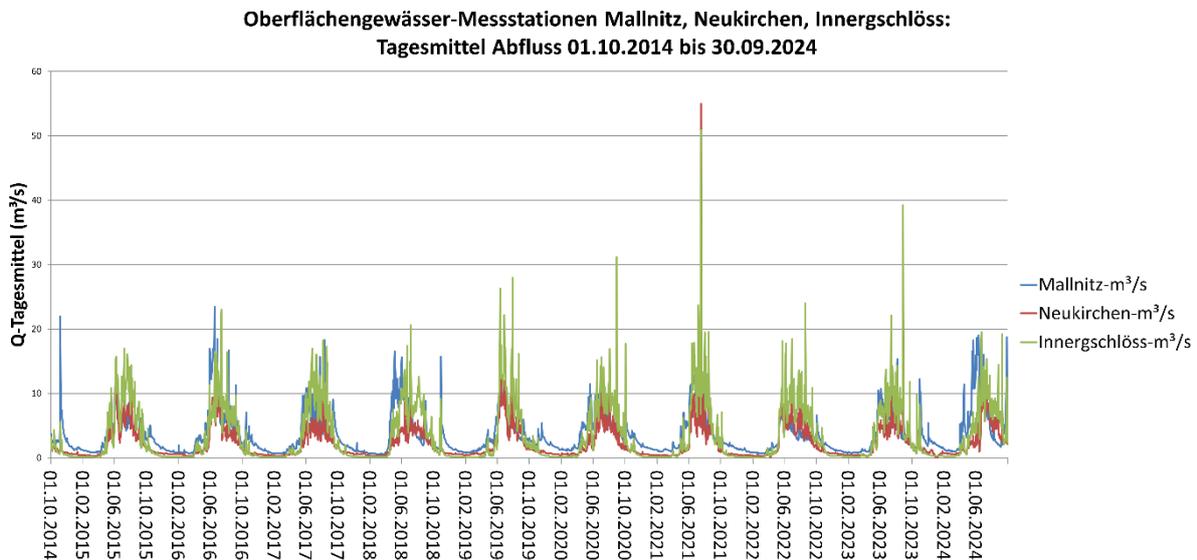


Abbildung 10: Vergleich der gemessenen mittleren täglichen Abflüsse (Q in m³/s) der drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im zehnjährigen Zeitraum 01.10.2014 bis 30.09.2024.

Ein Vergleich der jährlichen Abflussmengen offenbart deutliche Unterschiede in der interannuellen Variabilität der drei untersuchten Pegel. Im Einzugsgebiet Innerschlöss schwankte die Summe des Jahresabflusses im Zeitraum 01.10.2014 bis 30.09.2024 um nur 16,39 % (d.h. Spannweite in % zwischen höchsten und niedrigsten Wert in der Dekade relativ zum Mittelwert). Demgegenüber zeigten die Pegel Neukirchen und Mallnitz deutlich stärkere Abweichungen, mit relativen Differenzen zwischen dem höchsten und niedrigsten Jahreswert von 29,27 % bzw. 59,90 %. Besonders der hohe Variabilitätswert in Mallnitz verdeutlicht das Potenzial für starke jahreszeitliche Unterschiede in diesem Einzugsgebiet. Diese ausgeprägten Schwankungen resultieren einerseits aus einem stark unterdurchschnittlichen Abfluss im hydrologisch trockenen Jahr 2021/22 (negativer Ausreißer), andererseits aus dem außergewöhnlich wasserreichen Jahr 2023/24, in dem mit 149,01 Mio. m³ ein Spitzenwert erzielt wurde. An allen drei Pegeln wurden im Jahr 2021/22 vergleichsweise niedrige Monatsmaxima registriert, wohingegen im Jahr 2023/24 insbesondere die Sommermonate Juni und Juli durch deutlich erhöhte Spitzenabflüsse geprägt waren. Während die Monatsmaxima in Innerschlöss und Neukirchen im hydrologischen Jahr 2023/24 ähnliche Werte wie im Vorjahr erreichten, lagen die entsprechenden Werte in Mallnitz signifikant über jenen des Vorjahres. Besonders hervorzuheben ist der Monat Februar 2024, in dem für den Pegel Innerschlöss mit 0,60 Mio. m³ ein neuer Höchstwert für den monatlichen Mindestabfluss innerhalb des Beobachtungszeitraums (2014–2024) verzeichnet wurde. Dieser Befund weist auf ungewöhnlich hohe Abflussmengen selbst in den winterlichen Niedrigabflussphasen hin.

Tabelle 9: Jahresmenge des Abflusses (Q) an den Abflussmessstationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innergschlöss (Tirol) im Zeitraum 01.10.2014–30.09.2024; 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-Innergschlöss (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)
2023/24	149,01	37,61 (Juni)	2,87 (Februar)	78,64	19,77 (Juli)	1,35* (Jänner)	109,17	25,47 (Juli)	0,60 (Februar)

*Problem durch Bauarbeiten im Gerinnebett – siehe hierzu Hinweis im Methodenkapitel.

Abbildung 11 stellt die Jahresgänge des Beobachtungsjahres 2023/24 für die drei Standorte dar. Die untere Grafik in dieser Abbildung zeigt zur besseren Veranschaulichung die Verhältnisse bei niedrigen Abflüssen von 0 bis 5 m³/s. Im Vergleich zum Vorjahr fällt auf, dass die Wintermonate von höheren Grundabflüssen geprägt waren, insbesondere am Pegel Mallnitz, wo die Werte durchgehend leicht über denen des Vorjahres lagen. Die annähernd gleichförmigen und vergleichsweise ruhigen Abflussverläufe (Auslauf des Basisspeichers) sind im Beobachtungszeitraum von Anfang Dezember 2023 bis Anfang April 2024 deutlich erkennbar, wenngleich sie etwas kürzer ausfallen als im Vorjahr, in dem diese Phase bis Mitte April andauerte. Ab Mitte April 2024 führten die einsetzende Schneeschmelze und damit verbundene hydrologische Prozesse zu markanten Schwankungen im Abflussgeschehen. Wie bereits im vorangegangenen Beobachtungsjahr zeigt auch im aktuellen hydrologischen Jahr der Pegel Innergschlöss erneut den schnellsten Rückgang der Abflussmengen im November. Im Unterschied zum Vorjahr ist jedoch auffällig, dass die Abflüsse in den anschließenden Wintermonaten weniger konstant verlaufen. Die Abflusskurve des Pegels Mallnitz bestätigt weiterhin eine vergleichsweise gleichmäßige Abnahme während des Winters, wobei der Anstieg im Frühjahr 2024 durch eine ungewöhnlich starke und zugleich volatile Dynamik gekennzeichnet ist – auf diesen Aspekt wird im weiteren Verlauf noch näher eingegangen. In der unteren Darstellung von Abbildung 11 ist zudem deutlich erkennbar, dass die Abflusswerte am Pegel Neukirchen im Zeitraum vom 26. 12.2023 bis zum 10. 1.2024 deutlich unter dem zu erwartenden Niveau liegen und nicht dem typischen Verlauf eines glazial-nival geprägten Abflussregimes entsprechen. Diese Anomalie ist jedoch nicht auf natürliche Ursachen zurückzuführen, sondern resultiert aus umfangreichen Baggerarbeiten im Flussbett während dieses Zeitraums (vgl. die Erklärungen im Kapitel 2.2.). Infolge dieser baulichen Eingriffe kam es zu erheblichen Störungen bei der Datenerfassung, weshalb die aufgezeichneten Werte in diesem Abschnitt nur eingeschränkt aussagekräftig und mit Vorsicht zu interpretieren sind. Für den Bericht 2024/25 sollten dann von Seiten des Hydrographischen Dienstes die korrigierten Werte vorliegen.

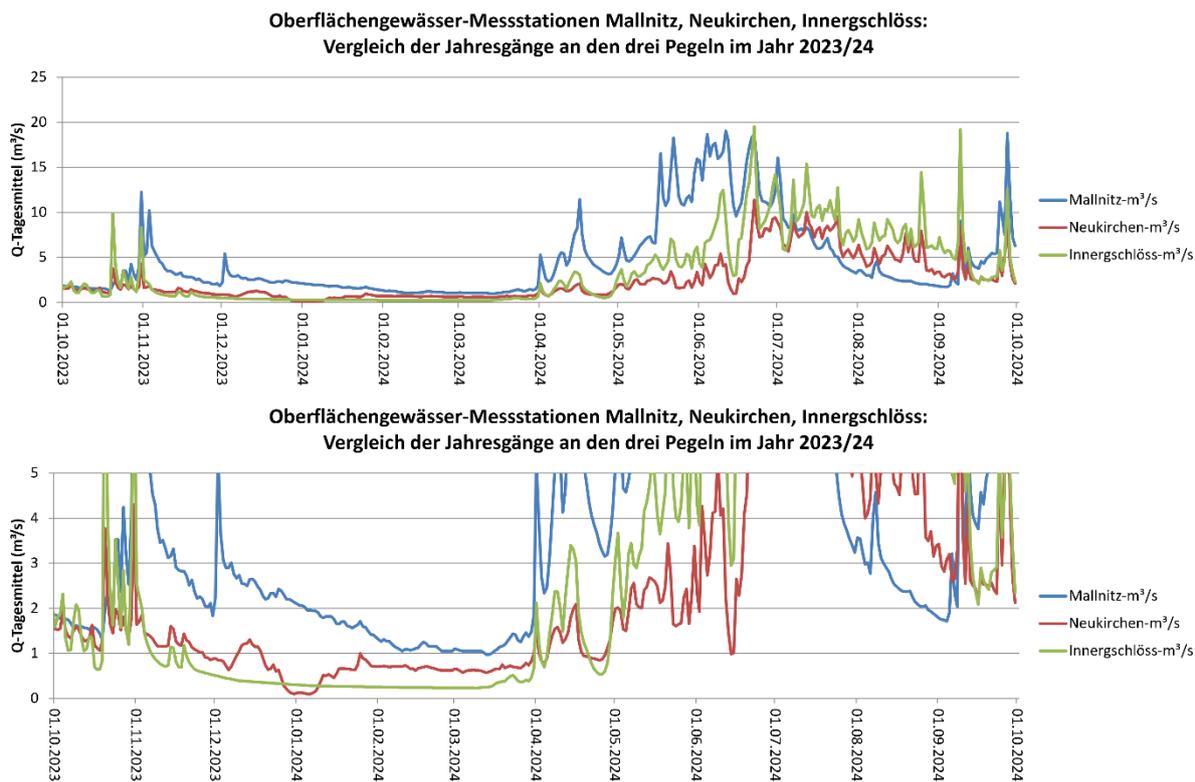


Abbildung 11: Vergleich des gemessenen mittleren täglichen Abflusses (Q im m³/s) an den drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im Zeitraum 01.10.2023–30.09.2024. Die untere Kurve ist ein Ausschnitt aus der oberen mit veränderter Skalierung der Ordinate und fokussiert auf den Bereich bis zu 5 m³/s.

Im Vergleich zum Vorjahr fällt der Höchstwert des Pegels Innerschlöss im August deutlich geringer aus. Während am 28.08.2023 ein maximaler mittlerer Abfluss von 39,2 m³/s verzeichnet wurde, lag der höchste Wert im aktuellen Jahr mit 14,5 m³/s am 25.08.2024 merklich darunter. Das Maximum im Jahr 2024 am Pegel Innerschlöss war weniger auf die Gletscherschmelze im Einzugsgebiet zurückzuführen, sondern vielmehr auf hohe Niederschlagsmengen im September (09.09.2024: 19,2 m³/s) bzw. Schneeschmelze im Juni (22.6.2024: 19,5 m³/s; siehe Kapitel 3.1.). 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, 2025).

Wie bereits erwähnt, wurde das maximale Tagesmittel des Abflusses im hydrologischen Jahr 2023/24 am 22.06.2024 an der Station Neukirchen mit 11,37 m³/s sowie an der Station Innerschlöss mit 19,54 m³/s verzeichnet. Auch an der Station Mallnitz wurde an diesem Tag mit 18,70 m³/s ein überdurchschnittlich hoher Abfluss registriert, wobei der jahreszeitliche Höchstwert dort bereits elf Tage zuvor, am 11. Juni 2024, mit 19,06 m³/s auftrat. Ein Vergleich dieser erhöhten Abflussraten mit den registrierten Niederschlagssummen am 21. und 22.06.2024 (zugeordnete Klimastationen: Felbertauern für Innerschlöss, Neukirchen für die gleichnamige Station sowie Malta für Mallnitz) verdeutlicht, dass die gemessenen Niederschläge an diesen Tagen mit 34,2 mm in Felbertauern, 21,0 mm in Neukirchen und 28,7 mm in Malta zwar als moderat bis stark einzustufen sind, allein jedoch nicht ausreichen, um die beobachteten Abflussspitzen zu erklären. Von zentraler Bedeutung ist vielmehr die außergewöhnliche Wärmeperiode zwischen dem 18. und 22.06.2024: In Felbertauern lagen die Tagesmitteltemperaturen bei 15,7 °C, 17,6 °C, 18,7 °C, 18,0 °C und 11,9 °C, in Malta sogar bei 20,5 °C, 21,4 °C, 23,3 °C, 23,4 °C und 19,6 °C. Diese im Vergleich zu den Vorjahren deutlich erhöhten Temperaturen führten zu einer massiven, durchgängigen Schneeschmelze in den höher gelegenen Einzugsgebieten, wodurch der Abfluss in kurzer Zeit stark anstieg. Die Kombination aus mehreren Tagen intensiver Schmelzprozesse und begleitenden



Niederschlägen ist daher als Hauptursache für die beobachteten Abflussspitzen zu werten – insbesondere an der Station Innergschlöss. Der bereits am 11.06.2024 erreichte Abflusshöchstwert an der Station Mallnitz lässt sich ebenfalls eindeutig auf eine vorangegangene Phase intensiver Schneeschmelze zurückführen: Zwischen dem 04. und 11.06.2024 lagen die Tagesmitteltemperaturen in Malta durchgehend zwischen 15,2 °C und 18,1 °C – also auf einem für die Jahreszeit ungewöhnlich hohen Niveau. Parallel dazu stiegen die täglichen Niederschlagsmengen von anfangs geringen Werten (1 mm am 4.06.) bis auf 22,4 mm am 11.06. an. Die hohe Temperatur über mehr als eine Woche hinweg setzte großflächig Schmelzwasser frei, das – in Kombination mit dem einsetzenden Niederschlag – zu einem stark erhöhten Abfluss führte. Die zeitliche Übereinstimmung des Abflusshöchstwertes mit dem Höhepunkt dieser Schmelzperiode belegt, dass die Schneeschmelze im Einzugsgebiet von Mallnitz die dominierende Steuergröße für den frühzeitigen Peak war.

Im weiteren Verlauf des Sommers nahm der Abfluss ab Juli sukzessive ab, was dem typischen saisonalen Verlauf nach der Hauptphase der Schneeschmelze entspricht. Dennoch kam es auch in den Spätsommermonaten zu einzelnen markanten Abflussspitzen. So wurden am Pegel Innergschlöss am 25.08.2024 und am 09.09.2024 mit 14,45 m³/s bzw. 19,20 m³/s zwei weitere signifikante Peaks verzeichnet. Zwar zeigen auch die Pegel Mallnitz und Neukirchen zu denselben Zeitpunkten Anstiege, jedoch mit deutlich geringeren Abflussmengen. Darüber hinaus wurde am 27.09.2024 am Pegel Mallnitz ein weiterer spätsommerlicher Maximalwert von 18,78 m³/s registriert. Auch an den Stationen Neukirchen und Innergschlöss lässt sich an diesem Datum ein, wenn auch moderater, Anstieg der Abflusswerte feststellen. Diese spätsommerlichen Abflussspitzen lassen sich sowohl auf fortgesetzte Gletscherschmelzprozesse (August) als auch auf lokal begrenzte, jedoch hydrologisch relevante Niederschlagsereignisse (September) zurückführen.

Bezogen auf die geringsten mittleren täglichen Abflussmengen im Zeitraum 2014/15 bis 2023/24 zeigt sich, dass an zwei der drei untersuchten Pegel das absolute Minimum im hydrologischen Jahr 2021/22 auftrat. Am Pegel Neukirchen wurde am 17.02.2022 ein Wert von 0,10 m³/s registriert, während am Pegel Innergschlöss zwischen dem 03. und 08.03.2022 ein Minimum von 0,08 m³/s gemessen wurde. Bemerkenswert ist, dass letzterer Wert im aktuellen Beobachtungsjahr erneut erreicht wurde. Am Pegel Mallnitz fiel das niedrigste Tagesmittel mit 0,56 m³/s auf den 26.02.2018. Im jüngsten Messjahr lagen die jeweiligen Minimalwerte bei 0,23 m³/s (Innergschlöss), 0,10 m³/s (Neukirchen) und 0,97 m³/s (Mallnitz).

Abbildung 12 veranschaulicht die mittleren monatlichen Abflüsse für das aktuelle hydrologische Jahr 2023/24 sowie für die fünf vorangegangenen Jahre an allen drei Messstationen. Deutlich erkennbar sind dabei einerseits die regelmäßig wiederkehrenden geringen Abflüsse in den Wintermonaten (insbesondere Dezember bis April). Andererseits zeigen die übrigen Monate eine ausgeprägte Variabilität sowohl zwischen den Jahren als auch zwischen den Standorten, was auf lokale Einflussfaktoren wie Niederschlag sowie Schnee- und Eisschmelze zurückzuführen ist. Besonders hervorzuheben ist der außergewöhnlich hohe Monatswert am Pegel Innergschlöss im Juli 2021, der zugleich das Maximum im gesamten Beobachtungszeitraum 2014/15 bis 2023/24 darstellt. Im hydrologischen Jahr 2021/22 sowie 2022/23 fällt zudem auf, dass die Monatsabflüsse am selben Pegel im Zeitraum Juni bis September signifikant über jenen der beiden anderen Stationen liegen. Diese Abweichung lässt sich durch eine verstärkte Wasserzufuhr infolge intensiver Gletscherschmelze erklären, die wiederum durch die ausgesprochen gletscherungünstigen sommerlichen Temperaturverhältnisse begünstigt wurde. Ein weiterer auffälliger Befund betrifft das aktuelle Beobachtungsjahr: Am Pegel Mallnitz wurde im Juni 2024 mit 37,61 m³/s der höchste Monatswert der letzten fünf Jahre gemessen. In den Vergleichsjahren blieb der Juniabfluss dort stets unterhalb von 30,00 m³/s.

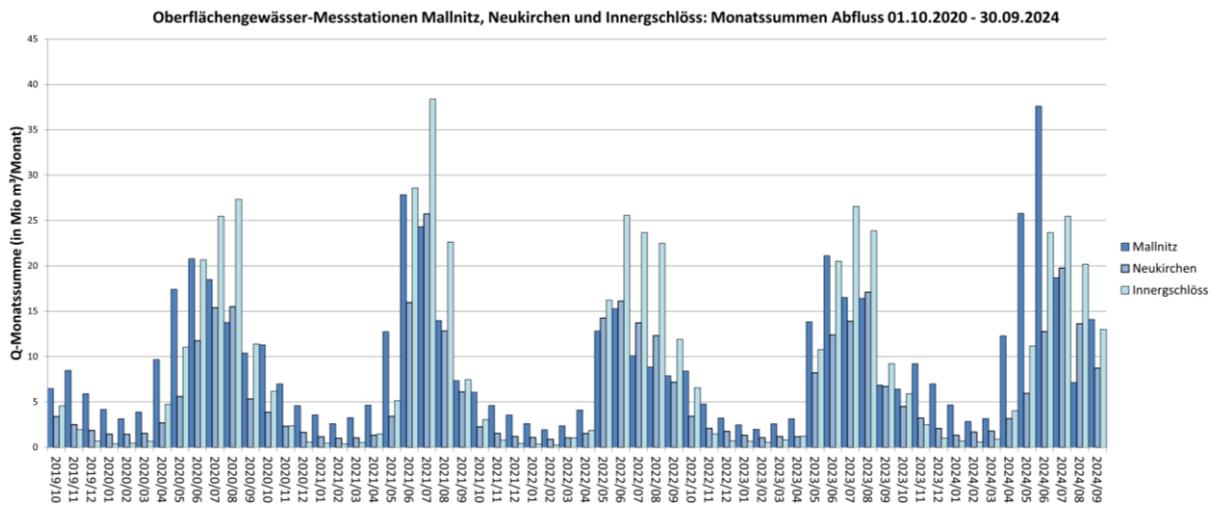


Abbildung 12: Monatssummen des Abflusses (Q) der drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im Zeitraum 01.10.2019 – 30.09.2024 in Mio. m³.

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.

Über den gesamten Beobachtungszeitraum hinweg wurden die höchsten jährlichen Abflusshöhen immer am Pegel Innerschlöss verzeichnet. Besonders herausragend an diesem Pegel ist das Jahr 2020/21, in welchem erstmals eine jährliche Abflusshöhe von über 2.900 mm registriert wurde. Dies ist ein Rekordwert innerhalb des hier betrachteten Zeitraums, der knapp mehr als dem Doppelten des Wertes von Mallnitz im selben Jahr entspricht. Im Gegensatz dazu fiel der Jahresabfluss am Pegel Mallnitz im hydrologischen Jahr 2021/22 mit unter 1.000 mm so niedrig aus wie nie zuvor. Die aktuellen Werte für das Jahr 2023/24 sowohl für Mallnitz als auch Neukirchen ragen ebenfalls deutlich aus dem Zehnjahresvergleich als neue Maxima hervor. Bei Mallnitz übertrifft der neue Rekord von 1747 mm den alten um 234 mm. Beim Pegel Neukirchen ist der neue Rekord nicht ganz so auffällig, wobei jedoch – wie schon mehrmals erwähnt – die dortigen Abflussdaten für 2023/24 wegen der Bauarbeiten im Gerinne unsicher sind.

Tabelle 10: Abflusshöhe (Quotient aus Durchflussvolumen pro Beobachtungsperiode und Einzugsgebietsfläche) in mm für die zehn glaziologischen Haushaltsjahre 2014/15–2023/24 in den drei Einzugsgebieten oberhalb der Stationen Mallnitz (Einzugsgebiet 85,3 km²), Neukirchen (40,5 km²) und Innerschlöss (39,3 km²). Grau hinterlegt das aktuelle Projektjahr. Fettstellung markiert den jeweils höchsten Wert der 10-jährigen Periode, kursiv den tiefsten Wert.

Jahr	Abflusshöhe (in mm/a) für die Einzugsgebiete oberhalb der drei Stationen		
	Mallnitz	Neukirchen	Innerschlöss
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	<i>941</i>	1805	2739
2022/23	1189	1738	2622
2023/24	1747	1942	2778



3.3. Ergebnis Bereich Gletscherverhalten 2023-2024

(a) Längenänderung

Tabelle 11 listet die Ergebnisse der Längenänderungsmessungen an den vom Gletschermessdienst des Österreichischen Alpenvereins erfassten Gletschern im Nationalpark Hohe Tauern nicht nur für die aktuelle Berichtsperiode 2023/24, sondern auch für die acht glaziologischen Haushaltsjahre zuvor auf. Die Messungen am Viltragenkees sind mittlerweile eingestellt worden, die Ergebnisse bis 2019/20 sind jedoch zusätzlich in der Tabelle noch dargestellt, da dieser Gletscher im Einzugsgebiet des Gschlössbachs liegt und somit für die Langzeitbetrachtung von Relevanz ist. 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), 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 im Vergleich zu den anderen Gruppen auffallend niedrig, während 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.

Der mittlere Längenrückgang aller beobachteten und vermessenen Gletscher im Gletscherhaushaltsjahr 2023/24 beträgt -15,0 m. Im Vergleich zu den Vorjahren 2022/23 (-23,9 m) und 2021/22 (-28,4 m) fällt dieser Wert deutlich moderater aus, liegt jedoch über den Werten von 2018/19 bis 2020/21. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass im Jahr 2023/24 vier zusätzliche Gletscher bzw. Gletscherteile in die Auswertung aufgenommen wurden. Dabei handelt es sich gemäß den Ausführungen in Kapitel 2.3 um die Teilzungen des Stubacher Sonnblickkeeses (Granatspitzgruppe), den oberen und unteren Teil des Goldbergkeeses (Goldberggruppe) sowie die beiden Gletscherzungen an der Pasterze (Glocknergruppe). Diese Gletscher verzeichneten geringe bis moderate Längenverluste, was sich dämpfend auf den Gesamtdurchschnitt auswirkte.

Das Gletscherhaushaltsjahr 2021/22 bleibt – unter der Einschränkung einer unterschiedlichen Anzahl von Gletschern, welche für die Mittelbildung berücksichtigt wurden – mit einem mittleren Längenrückgang von -28,4 m das mit Abstand negativste Jahr im gesamten Beobachtungszeitraum und stellt zugleich das schlechteste Jahr seit Beginn der systematischen Erhebungen durch den Gletschermessdienst des Österreichischen Alpenvereins dar (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2025). Das im betrachteten Zeitraum vergleichsweise günstigste, aber dennoch stark negativ bilanzierende Jahr war 2020/21 mit einem mittleren Rückgang von -11,4 m.

Allgemein kann für das Gletscherhaushaltsjahr 2023/24 – aber auch für den gesamten hier dargestellten 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. Das Abreißen ganzer Gletscherteile, wie zuletzt am Landeckkees, ist ein weiterer typischer Prozess dieses anhaltenden Eiszerfalls.



Tabelle 11: Die im Nationalpark Hohe Tauern bzw. im Nahbereich davon (*) durch den Österreichischen Alpenverein jährlich vermessenen Gletscher mit Angaben zur Längenänderung in den Gletscherhaushaltsjahren 2015/16 bis 2023/24. 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	23/24
Venediger- gruppe (aktuell 9)	Untersulzbachkees	(-41,5)		-53	-21,5	-44,0	-35,3	-50,2	-32,7	-29,6
	Obersulzbachkees	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	R (F)	R (F)	R (F)	R (F)
	Krimmlerkees I	(-45,3)		-7,0	-14,1	-13,2	-15,8	-22,0	-8,3	-1,2
	Umbalkees	-16,0	-29,3	-24,0	-22,0	-26,0	-22,0	-42,0	-36,0	n.d.
	Simonykees	-17,0	0	0	0	-6,0	-6,0	-22,0	-17,0	-14,0
	Zettalunitzkees	-51,0	-54,0	-16,0	-24,0	-35,0	-17,0	-31,0	-32,0	-54,0
	Frosnitzkees	-36,0	-49,0	-29,0	-7,0	-10,0	-8,0	-38,0	-46,0	n.d.
	Schlatenkees	-50,0	-70,0	-67,0	-23,0	-50,0	-54,5	-89,5	-92,8	R (F)
	Viltragenkees	-15,0	-28,0	-128	-27,0	-11,0	aufg.			
Venedigerkees						neu	-21,5	-19,7	R (F)	
Granatspitz- gruppe (aktuell 5)	Sonnblickkees (Sonnblickzunge)	-8,8	-1,9	-0,1	-2,5	-1,5	-8,6	-22,1	-4,2	-17,1
	Sonnblickkees (Filleckzunge)									-3,6
	Sonnblickkees (Granatspitzzunge)									-20,7
	Landeckkees	1,1	-14,7	-7,9	sn	-1,1	(-26,5)		-5,7	(281,3)
	Kaiser Bärenkopfkees	-4,9	-3,6	-3,1	-2,8	-1,03	-3,0	-18,1	-4,9	-1,4
Glockner- gruppe (aktuell 14)	Pasterze (Hauptzunge)	-44,3	-61,0	-31,9	-60,0	-52,5	-42,7	-87,4	-203,5	-66,3
	Pasterze (Burgstallzunge)									-9,4
	Wasserfallwinkel- kees	-39,4	-12,5	-13,9	-11,4	-14,9	-11,9	-28,5	-16,2	-20,5
	Freiwandkees	-7,9	-89,1	-6,9	-5,9	-34	-1,0	-40,9	-65,8	-5,1
	Brennkogelkees	-7,5	-14,2	-6,4	-8,6	-13,7	-2,0	-31,6	-12,5	-6,8
	Bärenkopfkees	-6,5	-13,3	-5,4	-86,9	-9,7	0	-14,2	-0,5	-8,0
	Karlingerkees	-28,2	-9,0	-10,1	-71,7	-23,5	-7,2	-24,2	-15,7	-13,6
	Kleinererkees	-1,1	(-10,0)		-5,4	-4,3	-15,0	-9,3	-3,1	-7,1
	Schmiedingerkees*	-12,1	-11,3	-33,1	-15,9	-15,8	-7,6	-62,6	-6,9	R (F)
	Maurerkees	-3,1	(-20,0)		2,2	(-15,3)			-16,6	-10,3
	Schwarzkarlkees	-14,7	(-45,8)		-7,7	-11,8	-11,4		-10,0	-7,6
	Unteres Riffelkees	-2,9	-11,1	-17,2	-6,2	-7,3	-12,3	-5,4	-15,3	-25,6
	Totenkopfkees	-0,5	-2,3	-6,0	-2,4	-2,8	-1,3	-25,6	-16,1	-10,0
Ödenwinkelkees	-17,8	-22,3	-4,7	-10,6	-15,0	-25,5	-44,7	-37,9	-59,1	
Schober- gruppe (aktuell 3)	Hornkees	-7,1	-12,1	-8,0	-5,4	-2,6	-3,1	-2,3	-5,7	-5,9
	Gössnitzkees	-8,2	-8,0	-27,1	-6,7	-3,1	-5,8	-1,9	-1,5	-4,3
	Roter-Knopf- Kees	-2,2	-1,5	-0,4	0	(-1,7)			-6,7	-5,8
Goldberg- gruppe (aktuell 4)	Kleinfleißkees	-1,6	-4,5	-4,8	-0,2	-2,6	-0,2	-10,6	-4,8	-0,8
	Östl. Wurten/ Schareckkees*	-26	-11,4	-12,9	-5	-25,5	-6,8	-28,7	-18,7	-14,7
	Goldbergkees (unterer Boden)									-2,8
	Goldbergkees (mittlerer Boden)	-10,5	-8,7	-4,4	-6,4	-7,6	-0,2	-14,6	-18,1	-9,9
Ankogel Hochalm- Spitz- gruppe (aktuell 6)	Winkelkees	-0,8	-118,1	sn	sn	sn	n.d.	n.d.	R (F)	n.d.
	Westl. Trippkees	-35,4	-49,3	-2,2	-1,3	-1,7	-4,2	-36,7	-22,2	n.d.
	Hochalmkees	-7,1	-11,1	-3,3	-2,3	-2,3	-2,6	-7,2	-2,2	-8,9
	Großelendkees	-4	-12,7	-4,9	-4,0	-2,2	-11,9	-32,1	-10,3	-7,5
	Kälberspitzkees	-11,2	-13,7	-4,6	-4,5	-5,1	-7,3	-11,0	-10,8	-16,9
Kleinelendkees	-17,1	-9,1	-4,4	1,0	-0,3	-3,9	-13,2	-14,9	-13,0	
<i>Mittelwert (alle mit Messwerten)</i>		<i>-15,1</i>	<i>-24,4</i>	<i>-17,1</i>	<i>-13,8</i>	<i>-13,9</i>	<i>-11,4</i>	<i>-28,4</i>	<i>-23,9</i>	<i>-15,0</i>



Anmerkung: Angaben in Klammern sind in den Originalquellen zumeist 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, zuletzt Lieb & Kellerer-Pirklbauer (2025); 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. Im Jahr 2023/24 wurde 4 weitere Gletscher bzw. Gletscherteile in das Inventar aufgenommen: Sonnblickkees (Sonnblickzunge), Sonnblickkees (Granatspitzzunge), Pasterze (Burgstallzunge), Goldbergkees (unterer Boden). Zwei Gletscher liegen etwas außerhalb des Nationalparkgebietes, werden jedoch trotzdem aufgrund geografischer Nähe in das Inventar mit aufgenommen (siehe *).

Im hydrologischen Jahr 2023/24 setzte sich der Gletscherschwund in den Ostalpen fort, wenn auch mit etwas geringerer Intensität als im Extremjahr 2022/23. Der stärkste Rückzug wurde – erneut – an der Pasterze (Hauptzunge) mit –66,3 m gemessen. Auch das Ödenwinkelkees verzeichnete mit –59,1 m einen extremen Rückgang, der sich deutlich vom langjährigen Mittel abhebt und in seiner Messreihe einen neuen Höchstwert markiert. Weitere stark betroffene Gletscher waren etwa das Zettalunitzkees (–54,0 m) sowie das Schlattenkees (keine quantitativen Daten für 2023/24, aber sehr hohe Werte in den Vorjahren). Vier Gletscher wiesen 2023/24 noch Rückzugswerte zwischen 20 und 30 m auf (Untersulzbachkees, Sonnblickkees, Wasserfallwinkelkees und Unteres Rifflees). Verglichen mit dem Vorjahr zeigen viele Gletscher geringere Rückzugswerte, was etwa am Kleinfleiß- und Hornkees auffällt. Dennoch bleibt der Rückzug in nahezu allen Gruppen markant. Die geringsten Rückzugsraten verzeichneten das Kaiser Bärenkopfkees (–1,4 m), das Krimmlerkees (–1,2 m) sowie das Kleinfleißkees, das mit –0,8 m Längenänderung als einziger Gletscher im Nationalpark bzw. dessen Nahbereich stationär blieb. Insgesamt lässt sich für das Jahr 2023/24 trotz regionaler Unterschiede erneut ein flächenhafter Rückzug aller beobachteten Gletscher feststellen – mit einem klaren Schwerpunkt auf große, tief gelegene Gletscher mit (noch vorhandenen) Gletscherzungen.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Messjahre 2015/16 bis 2023/24 zeigt Abbildung 13 die mittlere Längenänderung jener 16 Gletscher im Nationalpark Hohe Tauern, für die über den gesamten Zeitraum durchgehend Daten vorliegen. Gegenüber dem Vorjahr wurde die Auswertungsbasis um drei Gletscher reduziert – das Umbalkees, Frosnitzkees und Schlattenkees –, da diese im Jahr 2024 nicht vermessen werden konnten. Für die 16 identen Gletscher kann über den Zeitraum seit 2015/16 festgehalten werden, dass die mittlere Längenänderung im aktuellen Berichtsjahr mit –20,4 m den dritthöchsten Wert im betrachteten Zeitraum darstellt und nur wenig unter den beiden bisherigen Höchstwerten von 2022/23 und 2021/22 bleibt. Deutlich erkennbar ist dabei ein Muster in der zeitlichen Entwicklung: In den Jahren 2017/18 bis 2020/21 wurden vergleichsweise moderate Rückzugsraten verzeichnet, während die beiden Jahre davor (2015/16 und 2016/17) deutlich höhere Mittelwerte zeigten. Demgegenüber wurden in den Jahren 2021/22 bis 2023/24 außergewöhnlich hohe Rückzugswerte dokumentiert. Die hohen Mittelwerte in den Jahren 2016/17 sowie vor allem in den letzten drei Jahren lassen sich u. a. dadurch erklären, dass im ersten Fall mehrere Gletscher der Venedigergruppe zeitgleich hohe Rückzugsraten aufwiesen, während in den Jahren 2021/22 bis 2023/24 nahezu alle beobachteten Gletscher massive Längenverluste verzeichneten. Eine Ausnahme bildete lediglich die Schobergruppe, in der die Rückgänge wegen der dortigen geringen Größe der Gletscher tendenziell moderater ausfielen. Somit kann zusammenfassend erneut festgestellt werden, dass die extremen Mittelwerte der letzten Jahre in erster Linie auf die erheblichen Eisverluste tief gelegener Gletscher mit noch immer ausgeprägten Gletscherzungen zurückzuführen sind.

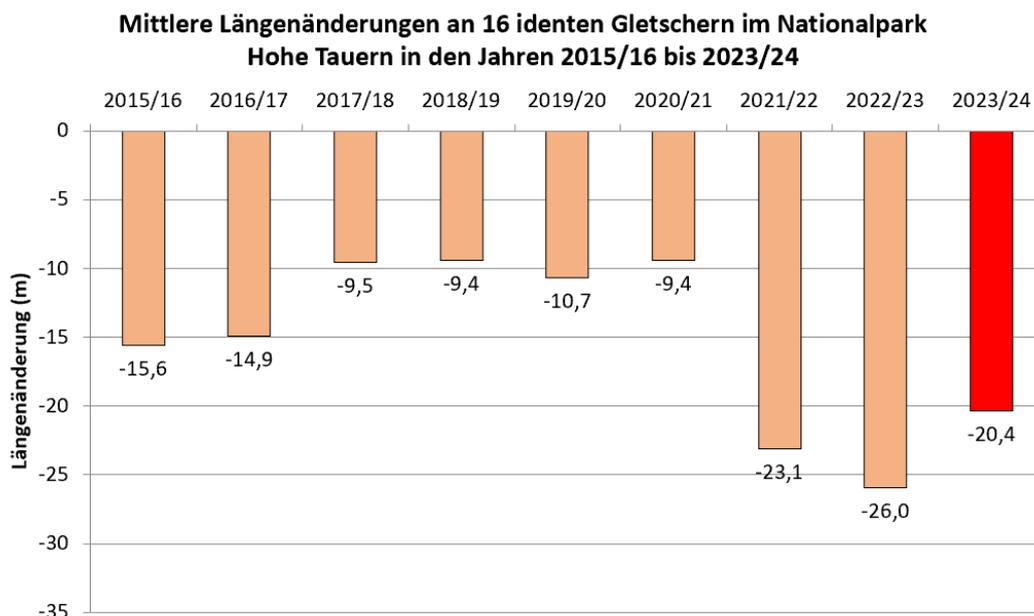


Abbildung 13: Mittlere Längenänderungen an 16 Gletschern im Nationalpark Hohe Tauern, von denen für die neunjährige Periode 2015/16 bis 2023/24 Längenänderungsdaten lückenlos vorliegen (siehe Tabelle 11). In kräftigem Rot gehalten das aktuelle Beobachtungsjahr. Weitere Erläuterung im Text.

Auf der räumlichen Ebene der drei Flusseinzugsgebiete zeigt die Abbildung 14 die Längenänderungen der drei Gletscher Winkelkees (Seebachtal), Untersulzbachkees (Untersulzbachtal) und Schlatenkees (Innerschlöss). Im Vergleich dazu ist auch die Pasterze in der Glocknergruppe für die – in diesem Fall – 13 Gletscherhaushaltsjahre 2011/12–2023/24 dargestellt. Diese längere Zeitreihe wurde deshalb gewählt, da am Winkelkees in den letzten mittlerweile schon 7 Gletscherhaushaltsjahren keine Messungen mehr möglich waren. Dies offenbart auch die Problematik der Gebietsverantwortlichen, die alljährlich versuchen, die wertvollen langjährigen Messreihen fortzuführen, was nahezu überall schwieriger wird. Leider war die seit 2022/23 vollzogene Einschätzung der Änderungstendenz des Winkelkeeses wurde durch Fotovergleiche 2023/24 nicht möglich.

Abbildung 14 veranschaulicht das teils sehr unterschiedliche Längenänderungsverhalten der vier ausgewählten Gletscher in den einzelnen Beobachtungsjahren. Besonders hervorzuheben sind die extremen Rückzugswerte der Pasterze in den Jahren 2022/23 (-203,5 m) sowie 2011/12 (rund -100 m) und der Rekordrückzug des Winkelkeeses im Jahr 2016/17 mit -118,1 m. Demgegenüber wurden am Schlatenkees im Jahr 2022/23 mit -92,8 m sowie am Untersulzbachkees 2017/18 mit -53,0 m die höchsten Rückzugsbeträge dieser Gletscher innerhalb der letzten 13 Messjahre registriert. Im aktuellen Gletscherhaushaltsjahr 2023/24 wurde für die Pasterze erneut ein markanter Rückzugswert von 66,3 m festgestellt, was die außergewöhnlich hohe Zerfallsdynamik der letzten Jahre eindrucksvoll bestätigt. Auch das Untersulzbachkees verzeichnete mit -29,6 m weiterhin einen deutlichen Rückgang, während für das Schlatenkees und das Winkelkees in diesem Jahr keine Längenänderungswerte vorlagen. Über den gesamten Beobachtungszeitraum hinweg wies mit einem Mittelwert von -27,8 m das Winkelkees den geringsten durchschnittlichen Rückzug auf, wobei aber die für die letzten sieben Messjahre fehlenden Daten die Aussagekraft dieses Wertes deutlich einschränken. Es folgt das Untersulzbachkees mit einem Mittelwert von -35,2 m (bei einem Jahr ohne Daten), gefolgt vom Schlatenkees mit durchschnittlich -50,5 m (ebenfalls mit einem fehlenden Jahr). Den mit Abstand höchsten Mittelwert über den gesamten Zeitraum zeigt weiterhin die Pasterze (Hauptzunge): Mit nunmehr 68,9 m pro Jahr bleibt sie auf einem außergewöhnlich hohen Niveau (im Vorjahr lag dieser Wert bei 69,1 m), was sich vor allem durch die extremen Rückzüge der letzten drei Jahre erklären lässt.



Insgesamt lässt sich festhalten, dass sich die Gletscher im Nationalpark Hohe Tauern – wie auch in anderen Regionen der österreichischen Alpen – kontinuierlich in höhere Lagen zurückziehen. Dieser Rückzug unterliegt allerdings teils erheblichen jährlichen Schwankungen und wird nicht ausschließlich durch klimatische Faktoren, sondern auch durch lokale Gegebenheiten wie Seebildung (Kellerer-Pirklbauer et al. 2021 b) oder durch den Zerfall von Gletscherzungen beeinflusst.

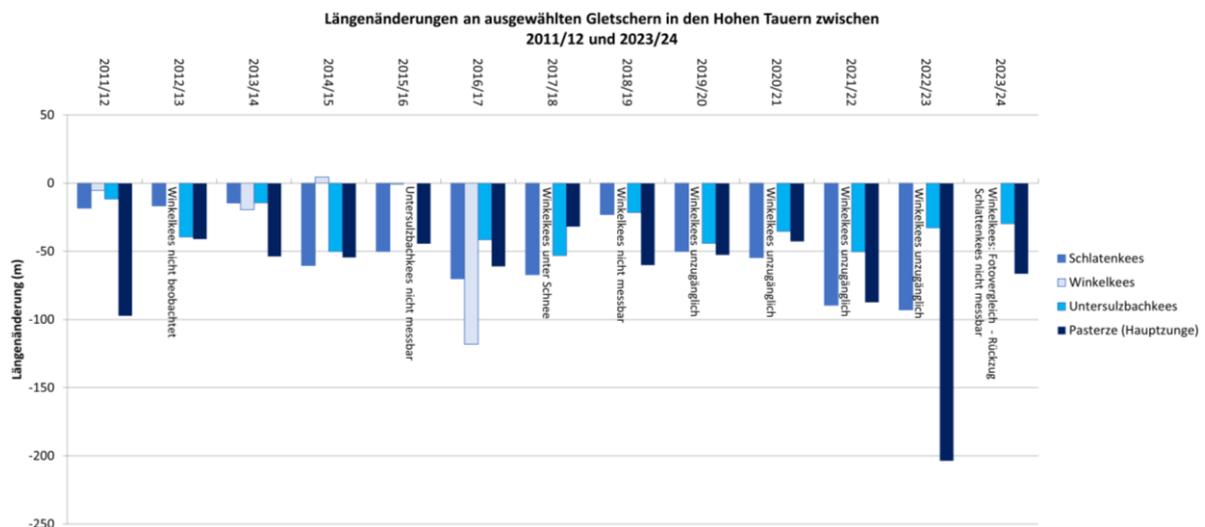


Abbildung 14: Längenänderungen an den vier Gletschern Schlattenkees (Venedigergruppe), Winkelkees (Ankogelgruppe), Untersulzbachkees (Venedigergruppe) und Pasterze (Glocknergruppe) im Zeitraum 2011/12–2023/24. Erläuterungen im Text.

(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 bei den Längenänderungen dokumentierten langfristig vorherrschenden gletschergünstigen Bedingungen. Mit keiner einzigen Ausnahme im hier gezeigten neunjährigen Beobachtungszeitraum 2015/16–2023/24 konnten für alle 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). Aus dieser Reihe sticht das Gletscherhaushaltsjahr 2021/22 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 Gletscherhaushaltsjahr 2022/23 verringerte sich der Massenverlust aller Gletscher im Nationalpark Hohe Tauern deutlich. Im Durchschnitt lag er 30 % unter dem Wert von 2021/22 (Werte für Einzelgletscher: Venedigerkees -40,1 %, Wurtenkees -19,0 %, Pasterze/-28,3 % und Zettalunitz/Mullwitzkees -28,6 %).

Die aktuellen Ergebnisse für das Gletscherhaushaltsjahr 2023/24 zeigen teilweise erneut eine Zunahme der Massenverluste, Ausnahmen bilden das Venedigerkees, das Wurtenkees sowie das Stubacher Sonnblickkees, deren spezifische Massenverluste im Vergleich zum Vorjahr zwischen 2,5 % und 37,7 % zurückgingen. Der scheinbar günstige Wert am Stubacher Sonnblickkees ist vor dem Hintergrund der außergewöhnlich hohen Massenverluste in den Jahren 2021/22 (-3417 mm) und 2022/23 (-2294 mm) zu interpretieren. Der aktuelle Wert



von -1430 mm stellt somit eine relative Verbesserung dar, bleibt jedoch im absoluten Vergleich weiterhin hoch negativ.

Der mittlere spezifische Massenverlust aller sieben betrachteten Gletscher betrug im Jahr 2023/24 -1893 mm und lag damit 3 % unter dem Vorjahreswert. Diese geringen Unterschiede ergeben sich aus der Mittelung heraus bei Gletschern, die es 2023/24 etwas besser ging als im Vorjahr sowie umgekehrt. Das Kleinfleißkees verzeichnete mit einer Zunahme der Verluste um 15,4 % gegenüber dem Vorjahr den höchsten Anstieg.

Auf Grundlage der Massenbilanzdaten der sieben berücksichtigten Gletscher war das Beobachtungsjahr 2020/21 mit Abstand das günstigste der letzten neun Jahre, während das Jahr 2021/22 durch besonders hohe Eismassenverluste als extrem eingestuft werden muss. Die hohen Massenverluste setzten sich auch im aktuellen Beobachtungsjahr fort. Insgesamt zeigt die Entwicklung der Massenbilanzen eine deutliche Parallele zu den Längenänderungen der Gletscher.

Tabelle 12: Spezifische Massenbilanzen an sieben Gletschern im Bereich des Nationalparks Hohe Tauern für die neun Gletscherhaushaltsjahre 2015/16–2023/24 in mm Wasseräquivalent. Grau hinterlegt ist das aktuelle Gletscherhaushaltsjahr. Die Daten von 2022/23 für das Wurtenkees (*) lagen, wie in Kapitel 2.3 erläutert, erst 2024 vor.

Gletscher	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23	2023/24
Goldbergkees	-860	-1806	-1697	-845	-1093	-504	-2800	-1942	-2200
Kleinfleißkees	-432	-1791	-1377	-723	-738	-291	-2700	-1777	-2050
Pasterze	-1163	-1593	-1420	-1100	-1011	-900	-2300	-1650	-1800
Stubacher Sonnblickkees	-828	-1850	-1507	-699	-627	-688	-3417	-2294	-1430
Venedigerkees	-467	-659	-1045	-505	-392	-248	-2208	-1323	-1290
Wurtenkees	-1250	-1706	-1957	-1232	-1326	-458	-3604	-2920*	-2698
Zettalunitz Mullwitzkees	-858	-1340	-1239	-611	-393	-447	-2449	-1749	-1783

Im neunjährigen Mittel weisen die Gletscher Goldbergkees (-1527 mm), Stubacher Sonnblickkees (-1482 mm) und Pasterze (-1437 mm) vergleichbar hohe spezifische Massenverluste auf. Oberhalb dieser Werte liegt lediglich das Wurtenkees mit einem durchschnittlichen Verlust von -1906 mm. Im Vergleich dazu schneiden das Kleinfleißkees (-1320 mm), das Zettalunitz/Mullwitzkees (-1208 mm) und insbesondere das Venedigerkees mit -904 mm im Mittel etwas günstiger ab. Über alle sieben Gletscher hinweg beträgt der mittlere spezifische Massenverlust der letzten neun Jahre -1398 mm. Im Vorjahr lag dieser Wert für die siebenjährige Messperiode noch bei -1336 mm. Die langfristigen Ergebnisse verdeutlichen, dass lokale Bedingungen sowohl Extremwerte als auch die Variabilität der Massenverluste beeinflussen. Dies ändert jedoch nichts an der übergeordneten, anhaltend gletscherungünstigen Witterungs- und Klimadynamik. Insbesondere die vergangenen drei Messjahre waren für die Eismassen der Gletscher in den Hohen Tauern und in Österreich außergewöhnlich ungünstig.



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 die darauffolgenden beiden Berichtsjahre nur wenig gletschergünstiger waren.

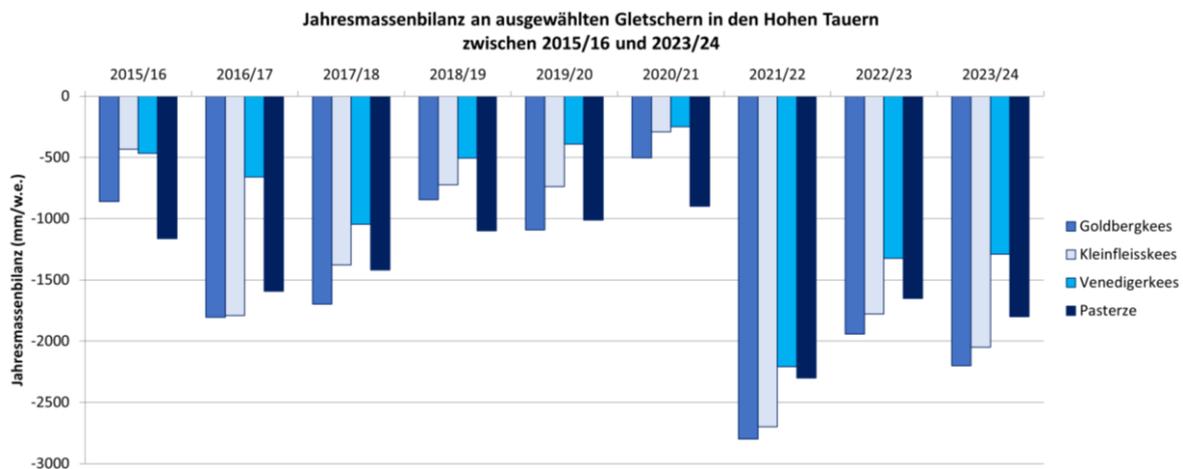


Abbildung 15: Spezifische Jahresmassenbilanz an vier ausgewählten Gletschern in den Hohen Tauern zwischen 2015/16 und 2023/24. Die Jahreswerte sind in mm Wasseräquivalent (mm w.e.) angegeben.

3.4. Ergebnis Bereich Permafrost 2023-2024

(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 Kellerer-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 2023/24 sind in Abbildung 16 – aufgeteilt auf die vier Teilgebiete – dargestellt. Alle vier Teildiagramme sind auf der Ordinate gleich skaliert und somit 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 Kellerer-Pirklbauer et al. 2025a) verwiesen.

Im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar (inklusive dem benachbarten Vergleichsstandort GOE-PRO) konnten für 16 Standorte Jahresmitteltemperaturen für das Messjahr 2023/24 ermittelt werden. An einem Standort in diesem Untersuchungsgebiet gab es bedingt durch anhaltende Stromversorgungsprobleme einen Ausfall (KC-RID; Datenlogger wurde deshalb erneuert). Der Standort KC-LO musste steinschlagbedingt bereits 2021 aufgegeben werden. Um jedoch spätere Vergleichsdarstellungen in der Langzeitbetrachtung konsistent zu halten, erscheint dieser zumindest aktuell nicht mehr aktive Standort jedoch noch in der Abbildung 16. Nur an einem einzigen Standort, dem Standort KC-UP, lag die Jahresmitteltemperatur mit $-0,6\text{ °C}$ merklich unter 0 °C . Im Vorjahr hatten zumindest noch vier Standorte eine negative Jahresmitteltemperatur (HLC-MI-N, KC-UP, HLC-CO und HLC-UP-S). Die höchsten Jahresmittelwerte wurden mit $4,2\text{ °C}$ am südexponierten Soliflukionsstandort (HLC-SO-S) gemessen, gefolgt vom südexponierten Felsmessstandort (HLC-RF-S) mit $3,7\text{ °C}$. Der Standort HLC-SO-S war auch der zweitwärmste im gesamten Messnetz (in den Jahren 2021/22 und 2022/23 jeweils sogar der wärmste). Im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar war somit in den letzten drei Beobachtungsjahren zwar der wärmste Standort immer identisch (HLC-SO-S), der kälteste jedoch nicht (entweder KC-UP oder HLC-MI-N). Der Mittelwert der Jahresmitteltemperatur an den 16 Standorten in diesem Arbeitsgebiet mit entsprechenden Werten liegt bei $1,9\text{ °C}$ (im Vergleich zu $1,0\text{ °C}$ in 2022/23 und 2020/21 sowie $1,5\text{ °C}$ in 2021/22. Dadurch erscheinen die



Bedingungen im Hinteren Langtalkar-Kögelekar und im hintersten Gößnitztal im letzten Beobachtungsjahr mit Unterschieden von 0,4 bis 0,9 °C zu den Vorjahren als äußerst permafrostungünstig. Dies zeigt sich auch darin, dass an 11 der 16 Standorte neue höchste Jahresmittelwerte ermittelt wurden.

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

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

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

In Summe konnte im Messjahr 2023/24 an 39 Standorten ein Jahresmittelwert der Bodentemperatur ermittelt werden (2022/23 waren es nur 37, 2021/22 sogar nur 34 Standorte). Der Unterschied erklärt sich aus den gültigen Daten für 2023/24 für FAL-LO (nach einem Jahr mit Datenloch) und HOT-SN (erstmalig Daten). Der Standort KC-RID lieferte in keinem der beiden letzten Jahre geschlossene Datenreihen. Von den 39 Standorten mit Jahresdaten in 2023/24 wiesen nur 5 Standorte (12,8 %) einen negativen, 34 Standorte (87,2 %) hingegen einen positiven Mittelwert auf. Im Vorjahr gab es noch 35 % negative und 65% positive Mittelwerte. Der Mittelwert der Temperatur für 2023/24 lag an den 39 Standorten bei 1,8 °C (zum Vergleich: 0,7 °C für 2022/23, 1,2 °C für 2021/22 sowie 1,1 °C für 2020/21), wobei die Werte der einzelnen Standorte im Jahr 2023/24 zwischen 4,7 °C und -1,9 °C lagen. An 32 Standorten lagen für die letzten vier Messjahre Mittelwerte vor, sodass diese direkt miteinander verglichen

werden können. Für 2020/21 lag das Mittel dieser 32 Standorte bei 0,92 °C, für 2021/22 bei 1,16 °C, für 2022/23 bei 0,84 °C und für 2023/24 bei 1,83 °C. An 31 der 39 Standorte mit Jahresdaten in 2023/24 wurde ein neues Temperaturmaximum ermittelt. Das letzte Beobachtungsjahr war nicht nur bloß deutlich wärmer als die drei vorangegangenen, sondern zeichnete sich durch eine bislang beispiellose Permafrostungunst aus.

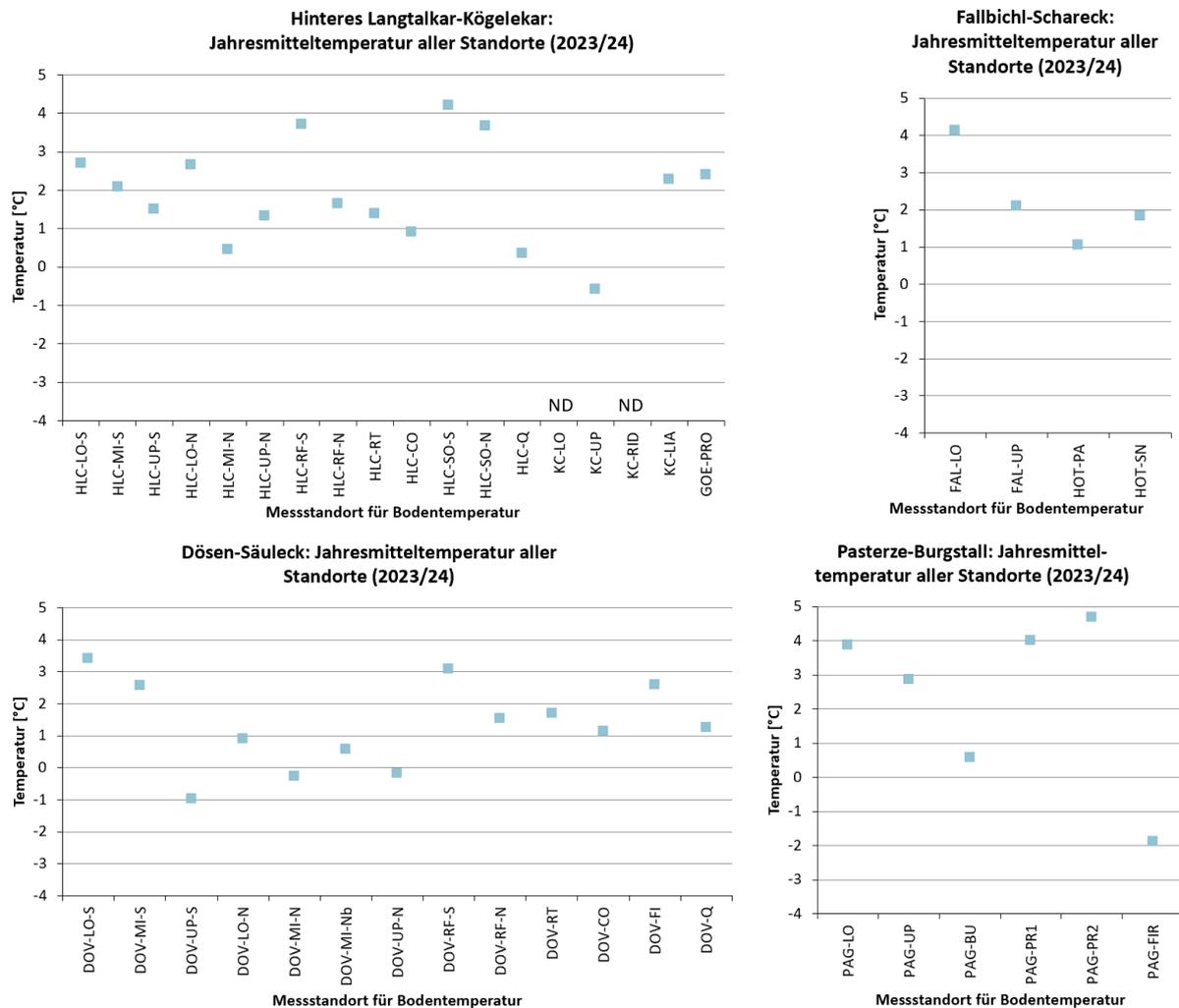


Abbildung 16: Jahresmitteltemperatur an/nah der Bodenoberfläche aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten für das Beobachtungsjahr 2023/24 (01.08.2023 bis 31.07.2024). Für HOT-SN liegen mit 2023/24 erstmals Daten vor. Standorte, die mit ND (no data) markiert sind, verfügen aufgrund technischer Probleme über keine geschlossene Datenreihe für das letzte Berichtsjahr (KC-RID) oder sind aktuell steinschlagbedingt nicht instrumentiert (KC-LO). 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 2023/24. Zur besseren Unterscheidung der Perioden innerhalb des Messjahres mit (d. h. relativ geringe Schwankungen der Bodentemperatur) und ohne (d. h. starke Schwankungen) thermischer Schneepufferwirkung wurde jeweils auch die Lufttemperaturkurve der meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS) für denselben Zeitraum hinterlegt.

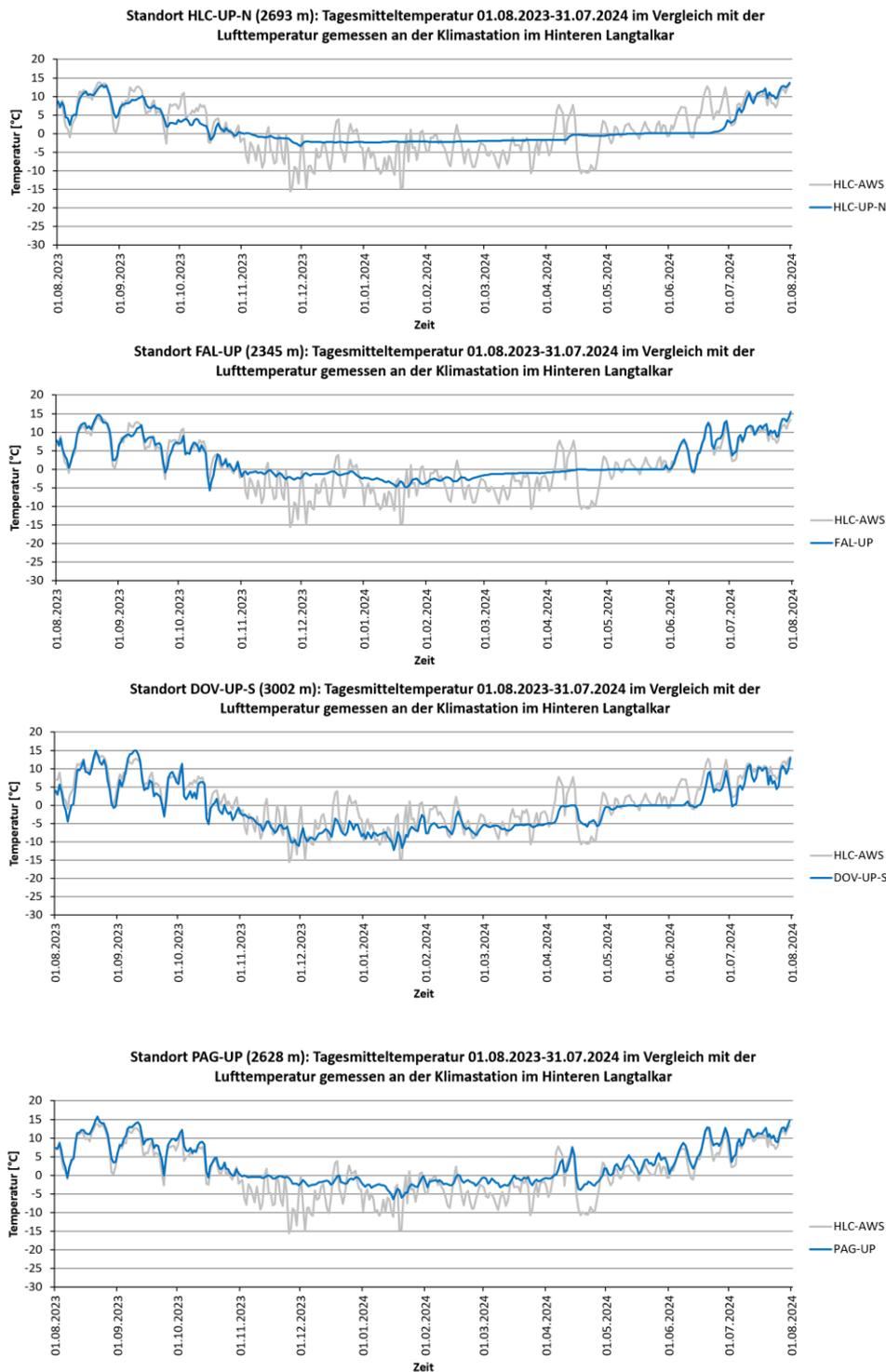


Abbildung 17: Tagesmitteltemperaturen der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten – HLC-UP-N, FAL-UP, DOV-UP-S und PAG-UP – im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten bzw. dessen Nahbereich (Standort FAL-UP) für das Messjahr 2023/24 (01.08.2023 bis 31.07.2024). Messbereiche im Winterhalbjahr mit geringer Schwankung deuten auf Dämpfungseffekte durch eine mächtige Schneedecke (> 80 cm) hin (Erläuterungen im Text). In Grau sind die Tagesmittelwerte der automatischen meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS) dargestellt.

(1) Im Jahresgang für 2023/24 am Standort HLC-UP-N ist deutlich zu erkennen, dass wiederum eine winterliche Schneedecke sich dämpfend auf Schwankungen der Bodentemperatur ab Anfang November 2023 und bis Anfang Juli 2024 auswirkte. Einerseits verhinderte diese rund achtmonatige Schneedecke im Herbst und Winter eine effektive Ausstrahlung und somit Abkühlung des Bodens (permafrostungünstig). Andererseits wurde der



Untergrund durch die Schneedecke bis Ende Juni vor der solaren Einstrahlung effizient geschützt (somit erst ab Anfang Juli permafrostungünstig). Insgesamt lag die Jahresmitteltemperatur an diesem Standort mit 1,3 °C deutlich über dem Gefrierpunkt und war um 1,2 °C höher als im Vorjahr und um 0,7 °C höher als 2021/22.

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

(3) Die ermittelten Tagesmittelwerte für DOV-UP-S zeigen gegenüber den beiden Standorten zuvor eine wesentlich stärkere Koppelung der Boden- mit der Lufttemperatur, zumindest bis Ende Februar 2024. Ab Ende Februar bis Mitte Juni ist auch hier klar eine thermisch dämpfende Wirkung einer saisonalen Schneedecke erkennbar. Ab spätestens Mitte Juni ist diese aber abgeschmolzen und die Bodentemperatur folgt weitgehend der Lufttemperatur. Auffällig sind die sonst durchgehend tieferen Temperaturen bei DOV-UP-S aufgrund der größeren Seehöhe. Dabei wurde in diesem Messjahr am 16.1.2024 die tiefste Temperatur mit -12,3 °C erzielt. Während die Mittelwerte in den drei Messjahren vor 2023/24 mit -2,15 °C für 2020/21, -2,23 °C für 2021/22 und -2,17 °C für 2022/23 nahezu gleich waren, lag dieser Wert diesmal bei nur -0,98 °C und somit um 1,19 °C über jenem des Vorjahres.

(4) Am vierten und letzten hier vorgestellten Standort PAG-UP zeigt sich ein ähnliches Bild wie am Standort zuvor mit gering ausgeprägtem Dämpfungseffekt der Schneedecke. Eine dünne, nur wenig isolierende winterliche Schneedecke dürfte an diesem Standort – wie in den Jahren zuvor – immer wieder vorhanden gewesen sein, v. a. wenn man die gedämpften Bodentemperaturminima von Anfang November bis Mitte April im Vergleich zur Lufttemperatur betrachtet. Auffallend ist dabei v. a. der November, in dem sich eine Schneedecke aufbaute (siehe Kapitel 3), die die Luft- von der Bodentemperatur nahezu komplett entkoppelte. Da der Untergrund dabei noch nicht ausgekühlt war, lag die Bodentemperatur den nahezu gesamten November über bei ca. 0 °C. Im Jahresmittel lag die Temperatur am Standort PAG-UP 2023/24 mit 2,87 °C um 1,44 °C über jener des Vorjahres und um immer noch mehr als ein Grad über jenem von 2021/22. Das Messjahr 2023/24 war auch hier im Mittel das wärmste der letzten Jahre.

Insgesamt repräsentieren die in Abbildung 17 dargestellten Temperaturkurven wiederum 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 zwei der vier Standorten von einer wirklich dämpfenden winterlichen Schneedecke sprechen kann.

In der Abbildung 18 werden die Jahresmittelwerte aller Standorte der Periode 2023/24 jenen von 2022/23 gegenübergestellt. Die Darstellungsweise ist so gewählt, dass Datenpunkte, die oberhalb der strichlierten Linie liegen, Standorte zeigen, an denen die Jahresmitteltemperatur im Messjahr, welches an der Y-Achse ausgewiesen ist, höher als im Vergleichsjahr (X-Achse) war. Der Vergleich der Werte von 2023/24 mit jenen von 2022/23 zeigt, dass fast an allen Standorten (n=38) 2023/24 deutlich (im Extremfall um bis zu 4,1 °C) bis leicht (0,18 °C) wärmer war als 2022/23. Nur an einem Standort war 2022/23 wärmer als das Jahr danach (um 0,21 °C). Im Mittel war das Messjahr 2022/23 an den hier gezeigten Standorten um 1,1 °C kälter als 2023/24.



Vergleich 2022/23 vs. 2023/24

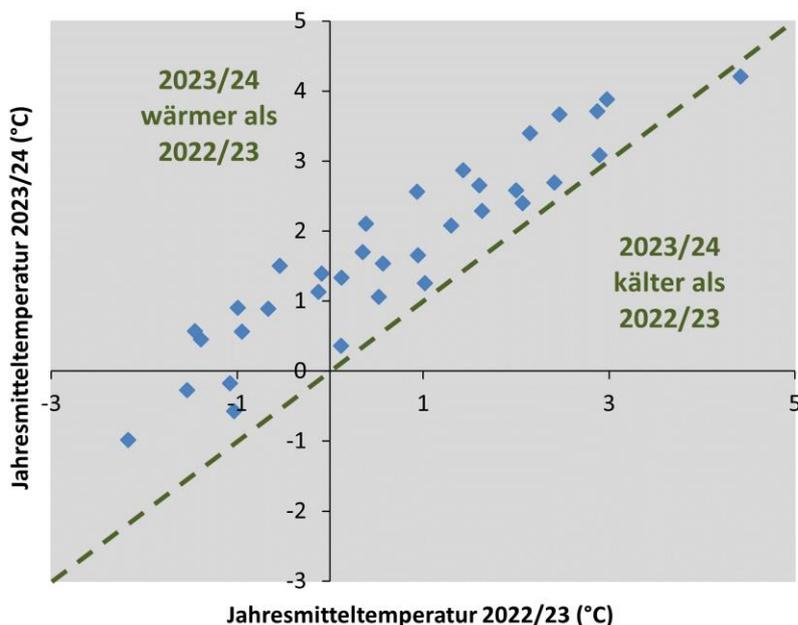


Abbildung 18: Gegenüberstellung der Jahresmittelwerte des gegenständlichen Projektjahres 2023/24 mit jenen des Vorjahres an allen Bodentemperaturmessstationen mit entsprechenden Daten. Nur ein Standort war 2023/24 kälter als im Vorjahr (HLC-SO-S).

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 oder September 2006 erfolgte, gibt es für keinen Standort Jahresmitteltemperaturen für das erste Messjahr 2006/07 (da ja in dieser Studie das Messjahr mit 01.08.–31.07. des Folgejahres definiert ist). Die nachfolgend als „Trends“ geschilderten Entwicklungen sind statistisch z. T. signifikant ($p < 0,01$: HLC-UP-N, PAG-UP; $p < 0,05$: DOV-UP-S), z. T. aber auch nicht ($p > 0,05$: FAL-UP), was den großen Wert der langjährigen Fortführung dieser Zeitreihen unterstreicht. Zu den vier Graphiken ist Folgendes anzumerken:

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

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

(3) Am Standort DOV-UP-S bleibt die Temperatur in allen Jahren deutlich unter 0 °C. Die bei Weitem höchste Jahresmitteltemperatur betrug -0,98 °C im Jahr 2023/24, gefolgt von -1,7 °C in 2013/14. Die tiefste Temperatur



wurde 2010/11 mit $-3,4\text{ °C}$ ermittelt. Somit liegen die Werte in allen Jahren im permafrosttypischen Bereich. Die Schwankungsbreite von $2,4\text{ °C}$ in 17 Jahren ist den anderen drei Standorten ähnlich (je $2,2\text{ °C}$ für HLC-UP und FAL-UP; $2,4\text{ °C}$ für PAG-UP). Der allgemeine Erwärmungstrend am Standort DOV-UP-S ist ähnlich ausgeprägt wie am Standort HLC-UP-N, jedoch mit einer Konstanz des Temperaturniveaus in den drei Jahren 2020/21 bis 2022/23. Auffällig an diesem Standort ist jedoch die Beobachtung, dass die ersten vier „kalten“ Jahre mit den darauffolgenden 12 wärmeren Jahren deutlich kontrastieren und das letzte Beobachtungsjahr bei Weitem das wärmste war. Der Temperaturanstieg an diesem Standort ist im Beobachtungszeitraum statistisch signifikant, die mittlere Erwärmungsrate von $0,0791\text{ °C/Jahr}$ jenem vom Standort HLC-UP-N sehr ähnlich.

(4) Ähnlich verhält es sich am allgemein schneearmen Standort PAG-UP. Die Jahresmitteltemperatur blieb dort jedoch immer deutlich über 0 °C und weist, wie erwähnt, Schwankungen von $2,4\text{ °C}$ auf, wobei der Trend der Jahresmitteltemperatur von allen hier gezeigten am deutlichsten nach oben zeigt. Auffallend ist auch hier, dass das Messjahr 2023/24 mit $2,87\text{ °C}$ einen neuen Rekord mit sich brachte, der das bisherige Maximum ($1,88\text{ °C}$ in 2019/20) um ca. 1 °C übertraf. Der Temperaturanstieg an diesem Standort ist statistisch signifikant und ergibt eine mittlere Erwärmungsrate von $0,0956\text{ °C/Jahr}$.

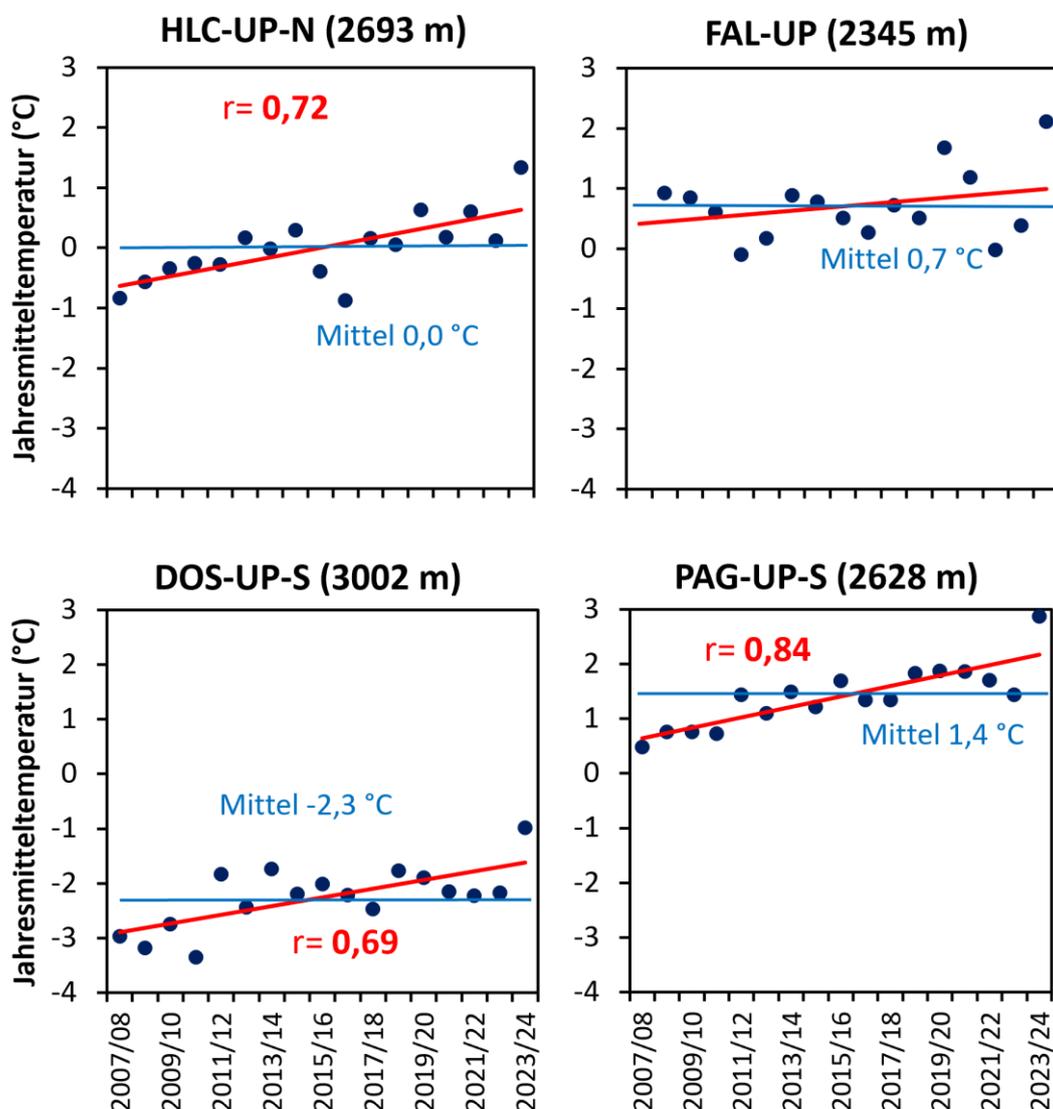


Abbildung 19: Jahresmitteltemperatur der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten für den Zeitraum 01.08.–31.07. des Folgejahres für die Messjahre von 2007/08 bis 2023/24. Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten sind dargestellt. Jene für DOV-UP-S, HLC-UP-N und PAG-UP sind statistisch signifikant (alle drei $p < 0,01$ – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1 %). Zu beachten die gleiche Skalierung der Ordinaten.

(b) Permafrost-Bohrlochtemperaturen am Hohen Sonnblick

Abbildung 20 zeigt die Messergebnisse von Bohrloch 3 am Sonnblick für den Zeitraum vom 01.10.2023 bis zum 30.09.2024, ergänzt durch die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur am Sonnblick für denselben Zeitraum. Deutlich erkennbar ist die enge Kopplung von Luft- und Bodentemperatur in oberflächennahen Tiefen während des schneefreien Herbstmonates Oktober 2023 sowie während der Sommermonate ab Mitte Juli 2024. Im Gegensatz zum Vorjahr traten im Messjahr 2023/24 keine Datenausfälle auf. Dies bestätigt die erfolgreiche Re-Instrumentierung des Bohrlochs im Herbst 2023 und unterstreicht, dass das Permafrostmonitoring an exponierten hochalpinen Standorten trotz der logistischen und technischen Herausforderungen kontinuierlich und zuverlässig durchgeführt werden kann.

Die leichten Temperaturschwankungen der Sensoren in 0 cm und 1,2 m Tiefe während der Wintermonate deuten darauf hin, dass die Schneedecke am Standort des Bohrlochs generell nur eine geringe Mächtigkeit aufweist. Auffällig ist zudem die vergleichsweise lange Phase des Schneedeckenabbaus einschließlich der vollständigen Durchfeuchtung der Schneedecke (Zero-Curtain-Effekt), die – wie bereits im Vorjahr – über einen Zeitraum von mehr als zwei Monaten andauerte, nämlich etwa von Mitte Mai bis Mitte Juli 2024.

Der Herbst 2023 und der Hochwinter 2023/24 waren durch eine zunächst enge Kopplung der Boden- an die Lufttemperatur in oberflächennahen Tiefen gekennzeichnet, was auf eine zu Beginn des Winters nur dünne oder instabile Schneedecke hinweist. Erst ab etwa Mitte Jänner 2024 setzte eine deutliche thermische Entkopplung ein, die bis in den späten Frühling hinein anhielt. Besonders in 0 cm und 1,2 m Tiefe ist eine relativ ausgeprägte Stabilisierung der Bodentemperaturen zu erkennen, was auf eine durchgehend vorhandene, wenn auch geringmächtige Schneebedeckung schließen lässt.

Während die Sensoren in 0 m und 1,2 m Tiefe ab Anfang August noch eine deutliche Beeinflussung durch die atmosphärischen Temperaturverhältnisse zeigen, ist dieses Signal in 4 m Tiefe bereits deutlich abgeschwächt. In 12 m Tiefe lässt sich hingegen kein ausgeprägter Jahresgang mehr erkennen. Die Temperaturen in dieser Tiefe schwankten im Messjahr 2023/24 zwischen $-1,2\text{ °C}$ und $-1,5\text{ °C}$, was einer geringen Amplitude von lediglich $0,3\text{ °C}$ entspricht. Zum Vergleich lagen die jahreszeitlich bedingten Schwankungen bei den Sensoren in 4 m Tiefe bei $1,54\text{ °C}$, in 1,2 m Tiefe bei $8,75\text{ °C}$, in 0,4 m Tiefe bei $14,38\text{ °C}$ sowie an der Oberfläche bei $17,96\text{ °C}$. Diese Unterschiede verdeutlichen die zunehmende thermische Stabilität mit zunehmender Tiefe und die Funktion des Untergrunds als thermischer Puffer im alpinen Permafrost.

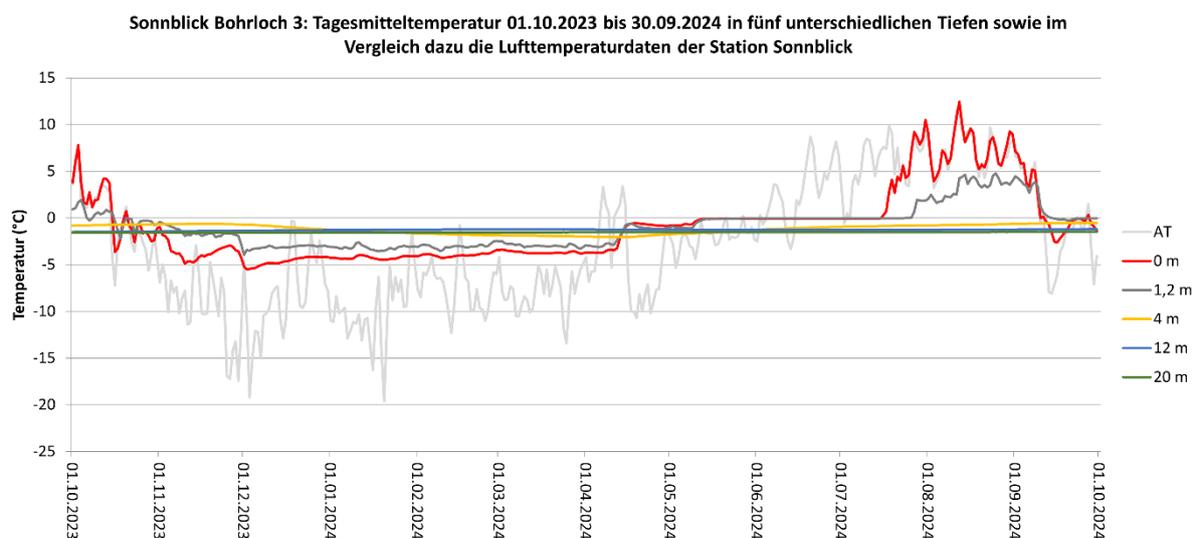


Abbildung 20: Tagesmitteltemperaturen im Bohrloch 3 am Sonnblick im Zeitraum 01.10.2023–30.09.2024 in fünf unterschiedlichen Tiefen bis einschließlich 20 m sowie die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (AT) an der TAWES-Station Sonnblick (Daten: GeoSphere Austria).

Der Verlauf der Bodentemperatur in den unterschiedlichen Tiefen im Zeitraum vom 01.10.2014 bis 30.09.2024 ist in Abbildung 21 dargestellt und zeigt folgendes Bild: Neben der deutlich erkennbaren, regelhaften Abnahme der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen mit zunehmender Tiefe stechen insbesondere die Winterperioden 2016/17 und 2022/23 durch besonders niedrige Bodentemperaturen (bis $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) hervor. In beiden Fällen kam es ab Ende Oktober zu einer ausgeprägten Auskühlung des Untergrundes infolge einer nur geringmächtigen oder spät einsetzenden Schneedecke. In den fünf dazwischenliegenden Wintern (2017/18–2021/22) wurden – trotz vereinzelt sehr tiefer Lufttemperaturen bis etwa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – vergleichbar niedrige Bodentemperaturen nicht mehr erreicht. Im Gletscherhaushaltsjahr 2023/24 setzte sich dieser Trend fort: Die tiefste gemessene Bodentemperatur in 0 cm Tiefe lag im Winter 2023/24 bei $-5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und damit über den Minimalwerten der Winter 2016/17 ($-9,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), 2017/18 ($-5,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), 2018/19 ($-7,4\text{ }^{\circ}\text{C}$), 2019/20 ($-8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$), 2021/22 ($-8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) und 2022/23 ($-9,6\text{ }^{\circ}\text{C}$). Auffällig sind erneut die sehr hohen Sommertemperaturen im Boden: Am 12.8.2024 wurde mit $12,45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ein neuer Maximalwert innerhalb der gesamten seit 2014 vorliegenden Messreihe erreicht. Damit wurde nicht nur der Wert vom 20.7.2023 ($11,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), sondern auch der bisherige Spitzenwert vom 20.7.2022 ($11,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) deutlich überschritten. Der untere Teil der Abbildung 21 fokussiert auf die Sensoren in 4, 12 und 20 m Tiefe. Während man in 4 m noch eine deutliche jährliche Schwankung (Amplitude von maximal $3\text{ }^{\circ}\text{C}$) erkennen kann, ist diese bei 12 m und 20 m nur mehr gering (ca. $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; was sich in 20 m wegen der Datenlöcher jedoch nur undeutlich zeigt). Legt man eine einfache lineare Trendlinie in die Daten (schwarze Linien), so erkennt man sowohl für 4 als auch für 12 m eine deutliche Erwärmung des Untergrundes seit 2014, wobei diese Trends bedingt durch die Datenlöcher jedoch unsicher sind. Ähnliche Trends wurden auch in den Bohrlochdatenanalysen im Rahmen eines europäischen Vergleichs (Noetzli et al. 2024) sowie am benachbarten Kitzsteinhorn (Hartmeyer & Otto 2024) ermittelt.

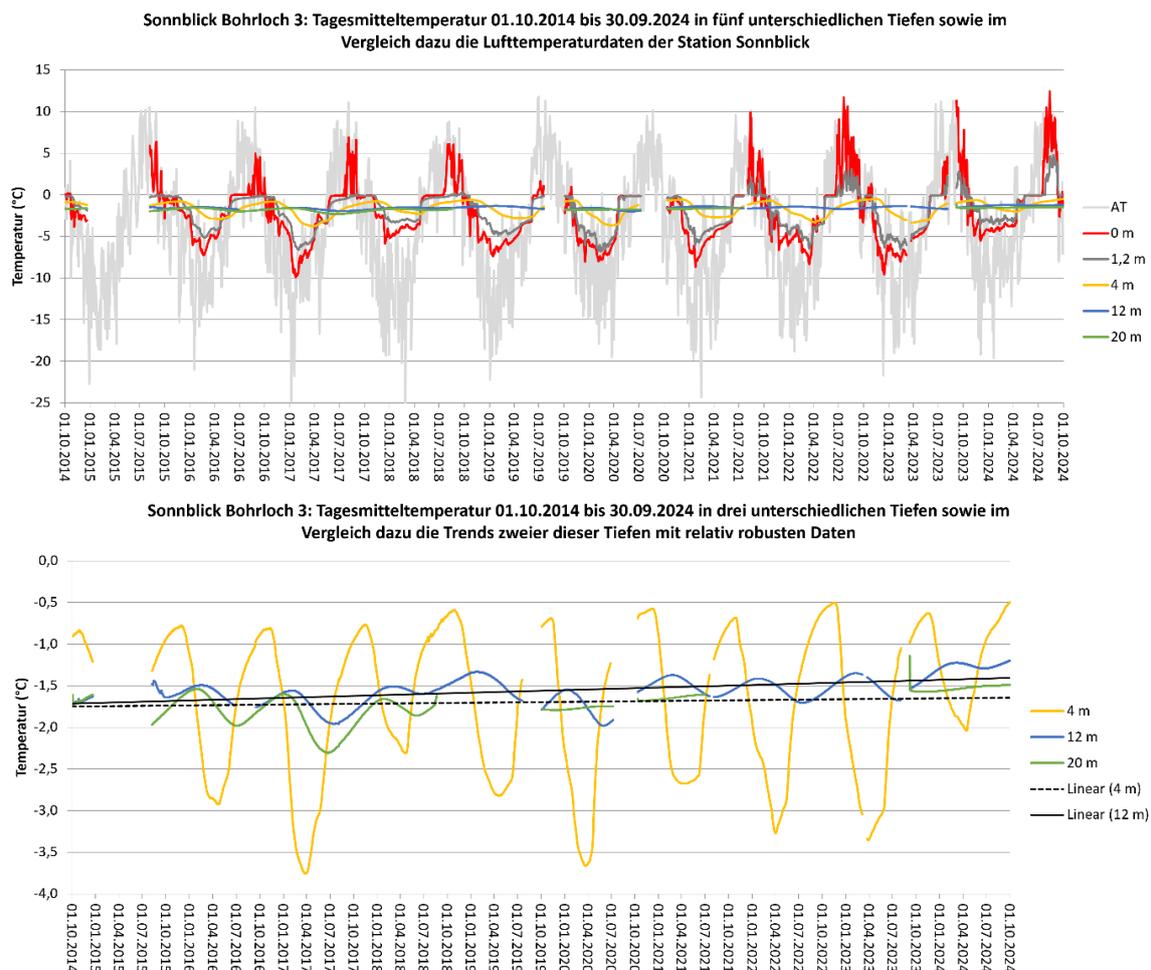


Abbildung 21: Tagesmitteltemperaturen im Bohrloch 3 am Sonnblick im Zeitraum 01.10.2014 bis 30.09.2024 in fünf unterschiedlichen Tiefen bis einschließlich 20 m sowie die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (AT) an der TAWES-Station Sonnblick. Die untere Darstellung fokussiert – mit einer anderen Abszissenskalierung – auf die drei unteren Sensoren und zeigt auch die linearen Erwärmungstrends der Sensoren in Tiefen von 4 und 12 m (Daten: GeoSphere Austria).



Abbildung 22 zeigt die Jahresmitteltemperaturen im Bohrloch 3 am Sonnblick für sechs ausgewählte glaziologische Jahre zwischen 2015/16 und 2023/24 mit robusten Daten. Die Auswahl der Jahre basiert auf einer nahezu vollständigen und vergleichbaren Datenverfügbarkeit in diesen. Der Vergleich der Temperaturverläufe in unterschiedlichen Bodentiefen sowie der Lufttemperatur an der nahegelegenen Klimastation am Hohen Sonnblick offenbart ein konsistentes Muster: Das Jahr 2019/20 wies – mit Ausnahme der tiefsten Bodenschicht (20 m) und der Lufttemperatur – in nahezu allen Tiefenlagen die niedrigsten Jahresmittelwerte auf. Demgegenüber zeigen die Jahre 2017/18 und insbesondere 2023/24 deutlich erhöhte Temperaturen. 2023/24 brachte in allen Bodentiefen sowie bei der Lufttemperatur den höchsten Mittelwert innerhalb der betrachteten Vergleichsjahre. Besonders ausgeprägt ist diese Erwärmung in den oberflächennahen Tiefen von 0 m, 0,4 m und 1,2 m, was die hohe Sensitivität des oberflächennahen Permafrostes gegenüber klimatischen Extremjahren eindrucksvoll belegt. Das Jahr 2023/24 markiert damit ein neues Temperaturniveau im alpinen Permafrostkontext und unterstreicht die zunehmende thermische Belastung des Untergrundsystems am Sonnblick.

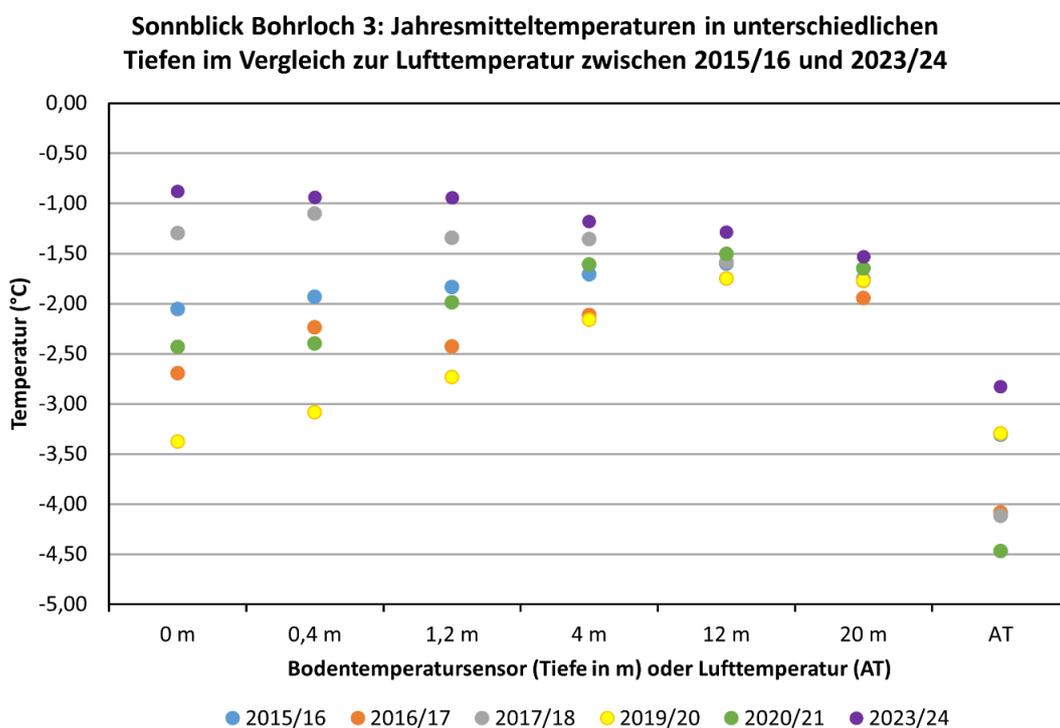


Abbildung 22: Jahresmitteltemperaturen für sechs Kalenderjahre mit geschlossenen Datenreihen zwischen 2016 und 2022 im Bohrloch 3 am Sonnblick (Daten: GeoSphere Austria).

Um einen längerfristigen Vergleich der Bodentemperaturentwicklung zu ermöglichen, zeigt Abbildung 23 die Monatsmitteltemperaturen für den Jänner der Jahre 2016–2024. Die Auswertung macht deutlich, dass der Jänner 2017 die tiefsten Temperaturen im oberflächennahen Untergrund aufwies, während der Jänner 2024 in nahezu allen Tiefenlagen – mit Ausnahme der Lufttemperatur – die höchsten Werte innerhalb des Beobachtungszeitraums verzeichnete. Der Unterschied zwischen dem kältesten (2017) und dem wärmsten Jänner (2024) betrug in 0 cm Tiefe 4,1 °C, in 0,4 m 3,3 °C, in 1,2 m 2,1°C sowie in 4 m Tiefe 1,1 °C. In größeren Tiefen nahm diese Differenz weiter ab und betrug in 12 m lediglich 0,3 °C sowie in 20 m Tiefe nurmehr 0,2°C, was auf die weitgehend thermisch stabilen Verhältnisse in tieferen Untergrundschichten hinweist. Die Jännermittel der Lufttemperatur schwankten im betrachteten Zeitraum um 7,3°C, wobei der Jänner 2024 mit –9,9°C deutlich milder war als jener von 2019 mit –15,1 °C. In allen Jahren lagen die Lufttemperaturen im Jänner markant unter den Temperaturen im Bohrloch, unabhängig von der Tiefe. Dieses Phänomen ist auf die isolierende Wirkung der winterlichen Schneedecke zurückzuführen, welche den Wärmeverlust aus dem Untergrund deutlich reduziert.



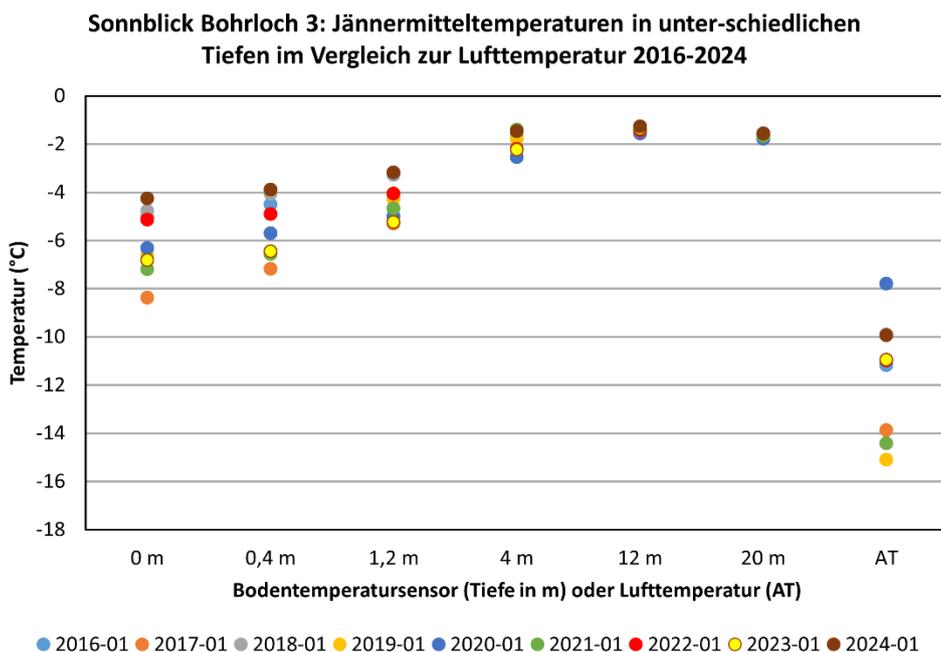


Abbildung 23: Mitteltemperatur der Jänner für die neun Jahre von 2016 bis einschließlich 2024 im Bohrloch 3 am Sonnblick (Daten: GeoSphere Austria).

(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. 2025a) 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 2023/24 wurden durch Epochenvergleich (19.08.2023 mit 27.08.2024) ermittelt.

Die horizontalen Bewegungsvektoren der 34 Beobachtungspunkte 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. Auffällig sind die geringen Bewegungsraten am orographisch rechten Rand und die graduelle Abnahme der Geschwindigkeit vom zentralen Bereich zur Stirn bzw. zum linken Blockgletscherrand. Tabelle 13 fasst die zeitliche Änderung des Bewegungsverhaltens des Blockgletschers durch Angabe von Mittel- und Maximalwerten der Bewegungsraten für den Zeitraum 2016/17–2023/24 zusammen.

Die aktuelle mittlere Bewegungsgeschwindigkeit von 48,4 cm/Jahr im zentralen Bereich des Dösener Blockgletschers (11 Messpunkte: 21-23 bzw. 10-17) hat sich im Vergleich zum Vorjahr signifikant um 4,8 % erhöht. Der berechnete Mittelwert ist der sechshöchste seit Messbeginn 1995. Die größte Bewegungsrate (66,4 cm/Jahr) wurde heuer zum ersten Mal nicht im Punkt 15 gemessen, sondern im Punkt 3. Dies ist einem offensichtlichen, seitlichen Rutschprozess, dem der Punkt 3 unterliegt, geschuldet. Die 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 Messjahren 2021/22 und 2022/23 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). Im letzten Messjahr nahm die Bewegung wiederum leicht zu.

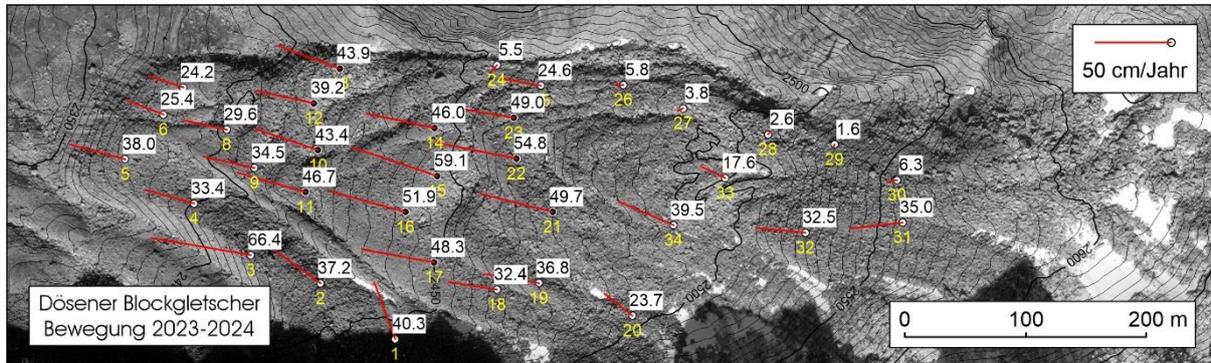


Abbildung 24: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Dösener Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2023/24. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (cm/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2\text{-}3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Orthofoto 20.9.2010 © Land Kärnten.

Tabelle 13: Bewegungsraten am Dösener Blockgletscher für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2016/17–2023/24. Die Mittelwerte wurden aus den Bewegungsraten der zentralen Punkte 10–17 und 21–23 gerechnet. Die Maximalwerte wurden zumeist im Punkt 15 festgestellt. Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum. Für die Punkte 28 und 29 konnte wiederholt keine signifikante Bewegung festgestellt werden.

Werte (in cm/Jahr)	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23	2023/24
Mittelwert	43,2	38,0	42,9	50,3	60,0	51,1	46,8	48,4
Maximalwert (Punkt)	53,1 (15)	46,4 (15)	51,1 (15)	58,9 (15)	71,0 (15)	61,4 (15)	56,5 (15)	66,4 (3)

Blockgletscher Hinteres Langtalkar

Am Blockgletscher im Hinteren Langtalkar erfolgt die Messung nach derselben Methode wie am Dösener Blockgletscher. Das geodätische Datum an diesem Blockgletscher ist durch insgesamt 15 Festpunkte definiert. Die Bewegungsraten für den Beobachtungszeitraum 2023/24 wurden durch Epochenvergleich (22.08.2023 mit 31.08.2024) ermittelt.

Im Stirnbereich (untere Punkte) des Blockgletschers stehen nur mehr die Punkte 23, 27 und 28 für eine aktuelle Messung zur Verfügung. Die nicht mehr vorhandenen Punkte 24, 25 und 31 in diesem Bereich sind in den Vorjahren durch Rutschprozesse verloren gegangen. Ebenfalls nicht mehr auffindbar ist der Punkt 21, welcher in eine zerrspaltenartigen Struktur im oberen Bereich des sich stark bewegenden Teils des Blockgletschers abgerutscht ist. Die aktuelle Bewegungsrate des Punktes 22 konnte für das Beobachtungsjahr 2023/24 nicht ermittelt werden, da dieser im Vorjahr nicht gemessen wurde. Als Basisstation für die GNSS-RTK-Messung diente der Festpunkt 7 im Blockgletscher-Nahbereich. Die horizontalen Bewegungsvektoren der auswertbaren 33 Beobachtungspunkte sind in der Abbildung 25 graphisch dargestellt. Für die Charakterisierung der zeitlichen Änderung des Bewegungsverhaltens des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar wurden für zwei ausgewählte Punktgruppen, oberer Bereich (A) und unterer Bereich (B), die Mittel- und Maximalwerte der Bewegungsraten tabellarisch (Tabelle 14) für den Zeitraum 2018–2024 zusammengestellt.

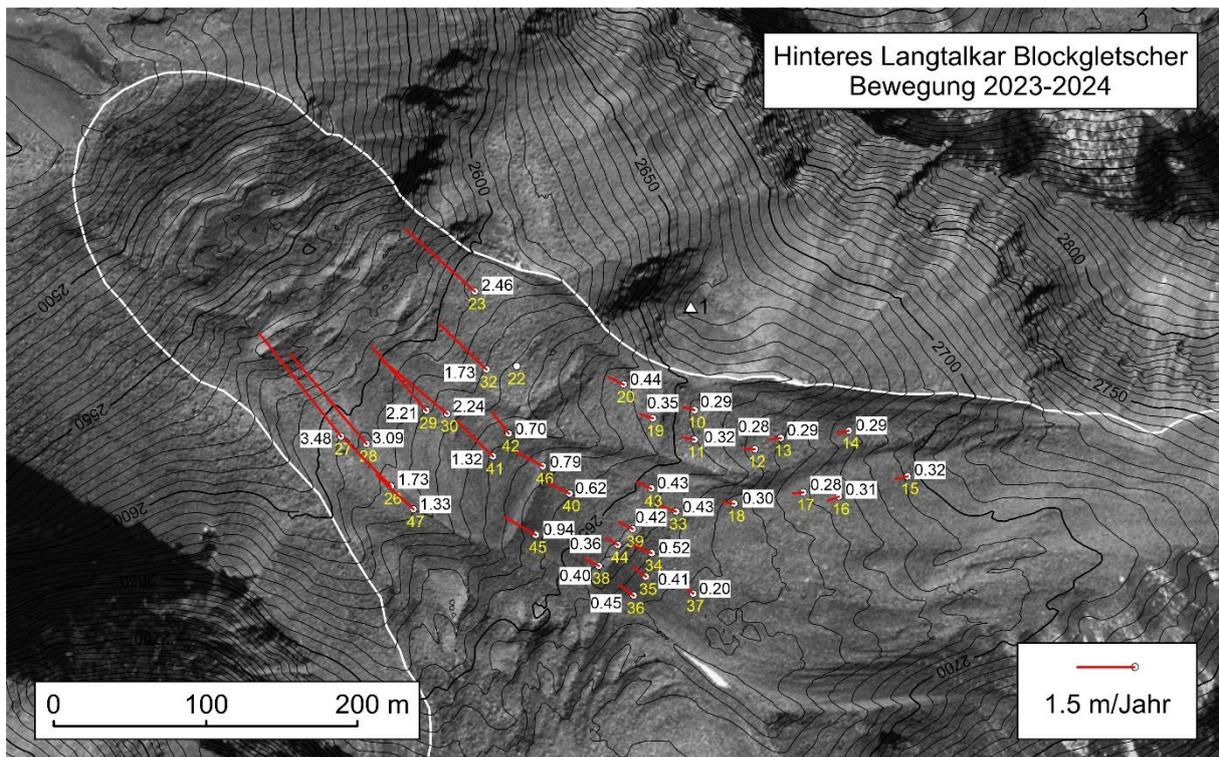


Abbildung 25: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 33 am Blockgletscher Hinteres Langtalkar mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2023/24. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (m/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2\text{-}3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Eine maximale Bewegungsrate von 3,48 m/Jahr wurde am Punkt 27 gemessen. Die Punkte 21, 24, 25 und 31, in der Abbildung nicht mehr ersichtlich gemacht, sind nicht mehr im Gelände auffindbar. Der Punkt 22 wurde 2023 nicht gemessen. Orthofoto 28.8.2012 © Land Kärnten.

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	2023/24
Mittelwert	19,4	16,3	19,1	27,7	37,3	35,3	27,3	28,7
Maximalwert (Punkt)	22,3 (11)	20,6 (11)	21,9 (17)	31,8 (10)	42,8 (11)	40,5 (16)	31,3 (16)	32,4 (15)

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	2023/24
Mittelwert	4,60	4,77	5,20	5,48	5,74	4,73	3,81	4,50
Maximalwert (Punkt)	5,66 (24)	6,64 (24)	7,45 (24)	8,07 (25)	3,94 (23)	3,25 (27)	2,77 (27)	3,48 (27)

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

Mit den hohen Bewegungsraten im unteren Blockgletscherbereich geht weiterhin eine morphologisch gut beobachtbare Destabilisierung der Blockgletscheroberfläche einher. Die Messung der Punkte im Einflussbereich der unteren Rutschzone ist weiterhin nur mit einem erheblichen Gefahrenpotential möglich. Die aktuelle mittlere Bewegungsgeschwindigkeit von 28,7 cm/Jahr im oberen Bereich des Blockgletschers Hinteres Langtalkar (11

Messpunkte: 10–17, 21–23) hat sich im Vergleich zum Vorjahr signifikant um 5,1 % erhöht. Der berechnete Mittelwert ist der vierthöchste seit Messbeginn 1995. Dieser Wert steht auch im Einklang mit jenem vom Dösener Blockgletscher. Die diesbezügliche Einschätzung für den unteren Bereich des Blockgletschers ist eher unsicher, da dieser bereits stark von lokalen Rutschprozessen beeinflusst ist. Unter Berücksichtigung der noch messbaren Punkte 23, 27 und 28 ergibt sich hier ebenfalls eine Zunahme der mittleren Bewegungsrate, jedoch mit 18,2 % ist die ermittelte prozentuelle Geschwindigkeitszunahme größer als der vergleichbare Wert der oberen Punktgruppe. Größere Massenumlagerungen/Rutschungen können im unteren, hochaktiven Teil des Blockgletschers für die nächsten Jahre weiterhin nicht ausgeschlossen werden.

Oberflächenbewegung im Vergleich

Die vergleichende Darstellung der zeitlichen Änderung der geodätisch ermittelten Oberflächenbewegung der beiden untersuchten Blockgletscher ist Inhalt der Abbildung 26. Für Vergleichszwecke wurden die fehlenden mittleren jährlichen Bewegungsraten am Dösener Blockgletscher für die Zeiträume 2002/03 und 2003/04 aus dem gemessenen zweijährigen Mittelwert und aus entsprechenden Jahreswerten, welche am Blockgletscher Hinteres Langtalkar gemessen wurden, abgeleitet.

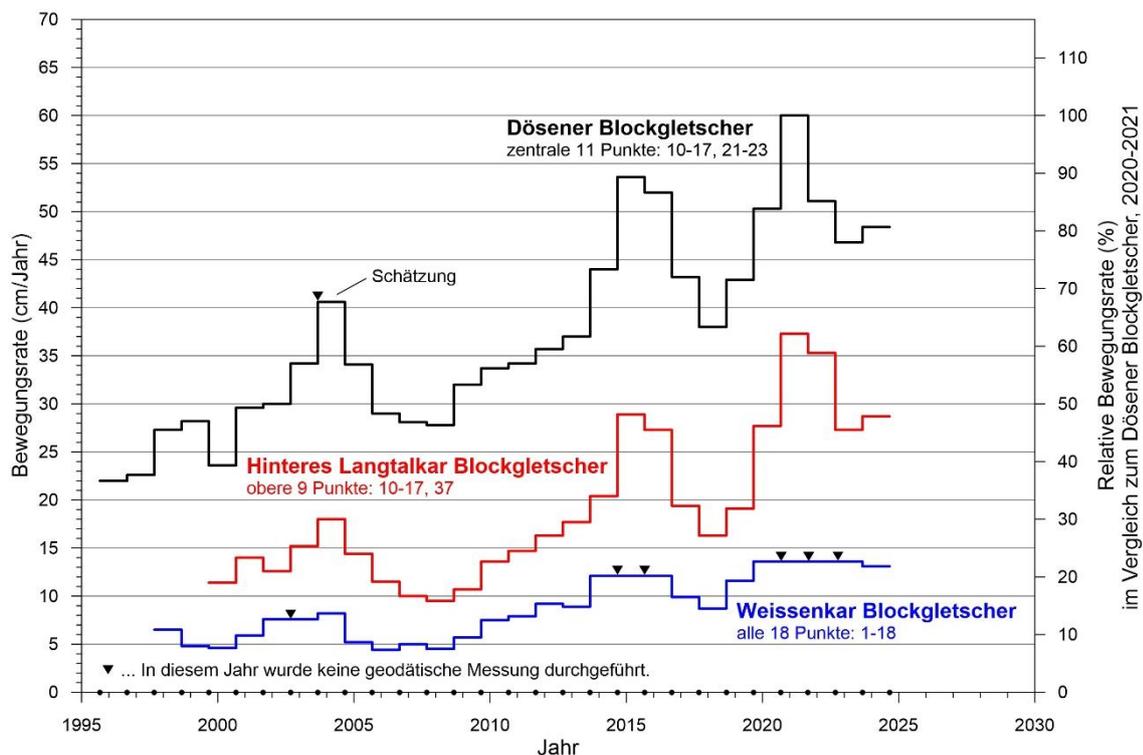


Abbildung 26: Vergleich der mittleren jährlichen horizontalen Oberflächenbewegung der beiden Blockgletscher Dösen (zentraler Bereich) und Hinteres Langtalkar (oberer Bereich) für den Zeitraum 1995–2024. Mittelbildung über 11 Punkte (10–17, 21–23) am Dösener Blockgletscher und 9 Punkte (10–17, 37) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar. Für Vergleichszwecke ist auch der zeitliche Verlauf der Bewegungsraten am Weissenkar-Blockgletscher (Schobergruppe, Osttirol) dargestellt. Datenquelle siehe Text.

Für Vergleichszwecke ist auch der zeitliche Verlauf der Bewegungsraten des ebenfalls im Nationalpark Hohe Tauern gelegenen Weissenkar-Blockgletschers (Schobergruppe, Osttirol) dargestellt, für den das geodätische Blockgletscher-Monitoring in Kaufmann et al. (2006) beschrieben wird. Die diesjährige Wiederholungsmessung am Weissenkar Blockgletscher erfolgte am 08.08.2024 durch Andreas Kellerer-Pirklbauer und Alexander Dorić in Fortsetzung der Messungen der beiden im Jahr 2019 (damals unter der Leitung von Viktor Kaufmann). Aus dem Bild der Geschwindigkeitsgraphen ist gut zu erkennen, dass (1) die Bewegungsraten der drei



Blockgletscher gut miteinander korrelieren, (2) die Bewegungsraten im Messjahr 2020/21 die größten der gesamten geodätischen Messreihe waren, (3) noch zwei zeitlich zurückliegende Bewegungsmaxima (2003/04 bzw. 2014/15) erkennbar sind und (4) die Bewegungsraten über den gesamten Messzeitraum hinweg tendenziell zunehmen.

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 bis 2025) – ein weiterer Hinweis für die große Bedeutung langfristigen Monitorings für wissenschaftlich fundierte Aussagen, was auch in Kellerer-Pirklbauer et al (2024d) bei einer vergleichenden Blockgletscherstudie für den ganzen Alpenraum zum Ausdruck kommt.

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

Das Messnetz am Inneren Knorrkogel wurde am 02.09.2024 gewartet, nahezu alle Standorte lieferten geschlossene Datenreihen für den gesamten bisherigen Monitoringzeitraum seit 2018. Die wenigen angesprochenen Datenausfälle im Jahr 2023/24 konnten wie im Kapitel 2.4. beschrieben, mit Daten von benachbarten Standorten sowie statistisch abgesicherten Korrekturwerten behoben werden. 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, 2022/23 und 2023/24 (jeweils 01.09. bis 31.08. des Folgejahres) zu analysieren und zu vergleichen. Tabelle 15 gibt einen Überblick über die gemessenen Jahresmittelwerte für alle fünf Messjahre und für jeden Standort sowie Sensor (bei den Felsdatenloggern drei pro Standort). Ebenso sind die Mittelwerte der zumeist sechs – in wenigen Fällen fünf – Messjahre sowie im unteren Teil der Tabelle Mittelwerte, Minimum, Maximum und Amplitude der Jahresmittelwerte an den 18 Standorten bzw. für jedes Messjahr angegeben.

Im Messjahr 2023/24 lag der Jahresmittelwert aller Standorte bzw. Sensoren (n=23) bei 0,55 °C. Dieser Wert stellt den bei weitem höchsten Mittelwert in der bisherigen 6-jährigen Messreihe dar. Das Messjahr 2020/21 hatte im Mittel einen Wert von -0,96 °C, dem tiefsten bisherigen Wert, womit sich eine Amplitude zwischen dem kältesten und wärmsten Jahr in den nur 6 Jahren von 1,51 °C ergibt. Die Jahre 2020/1 bis 2022/23 waren relativ ähnlich in ihren Gesamtmittelwerten, das Jahr 2023/24 ein deutlicher Ausreißer nach oben. Alle Standorte bzw. Sensoren bei den Felsdatenloggern lieferten für das Jahr 2023/24 deutlich überdurchschnittliche Werte. Deren Mittel lag für 2023/24 um 0,91 °C über dem Gesamtmittel von 2018/19 bis 2023/24.

Der Sensor mit der tiefsten Jahresmitteltemperatur war 2023/24 der Bodentemperaturstandort nahe dem Gipfel (S-GT-2878) mit -0,73 °C, knapp gefolgt vom Bodentemperaturstandort direkt am Gipfel (S-GT-2886; mit -0,70 °C). Der höchste Jahresmittelwert wurde hingegen am Süd-exponierten Bodentemperaturstandort auf 2840 m Höhe (F-1K-S-2840) mit 2,37 °C ermittelt, gefolgt vom Süd-exponierten Felstemperaturstandort (F-3K-S-2871) mit 2,11 °C. Dies ergibt eine gesamte Spannweite aller Jahresmitteltemperaturen in diesem Messjahr von 3,11 °C. Von den 17 Standorten bzw. 23 Sensoren mit Daten für das letzte Jahr ergaben sich bei der Analyse für nur 8 Sensoren ein negativer Jahresmittelwert (zwischen -0,73 und -0,03 °C), bei 15 Sensoren war dieser Wert positiv (zwischen 0,09 und 2,37 °C) und für einen Sensor bzw. Standort gab es wiederum gar keine Daten (S-AT-2878). Im Jahr zuvor wurde für 19 der 23 Sensoren 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 weiteren Jahren zuvor 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 2023/24 mit dem Mittelwert über den 6-jährigen Zeitraum 2018/19–2023/24, fällt auf, dass an keinem Standort der 6-Jahres-Mittelwert höher liegt als die Jahresmitteltemperatur von 2023/24. Somit fällt auch in dieser Statistik das letzte Beobachtungsjahr als extrem permafrostungünstig auf.

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 2023/24 sowie deren Mittelwert über die 6 Jahre (in Ausnahmen 5 Jahre*). ND = no data (siehe hierzu Kapitel 2.4). Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum.

Code	Log. Nr.	Sensortiefe (cm)	Jahresmitteltemperatur (°C)						Mittelwert 2018/19-2023/24 (°C)
			2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23	2023/24	
G-1K-SW-2840	A5223B	0	-1,52	0,25	-0,68	-0,06	-0,71	-0,03	-0,46
F-1K-W-2840	A52220	0	-1,56	-0,67	-1,63	-1,60	-1,79	-0,33	-1,26
G-1K-SW-2860	A5223F	0	0,41	0,63	-0,24	0,12	-0,59	1,46	0,30
F-1K-W-2860	A52244	0	-1,17	-1,27	-2,24	-1,79	-1,84	-0,40	-1,42
S-GT-2886	A521B7	0	-1,77	-1,42	-2,70	-1,63	-2,00	-0,70	-1,70
G-1K-NW-2860	A52227	0	-1,25	-0,95	-1,96	-2,02	-2,02	-0,47	-1,45
G-1K-NW-2840	A52223	0	-1,27	-0,66	-1,84	-1,71	-1,58	0,24	-1,14
F-3K-W-2869	A538B7	3	-0,10	0,26	-0,85	-0,55	-0,89	0,41	-0,29
	A538B7	10	-0,16	0,13	-0,94	-0,71	-0,99	0,33	-0,39
	A538B7	40	-0,65	-0,45	-1,33	-1,37	-1,50	-0,15	-0,91
F-3K-NE-2871	A538AC	3	-0,87	0,01	-0,64	-1,33	-1,12	0,27	-0,61
	A538AC	10	-0,98	-0,12	-0,77	-1,53	-1,23	0,14	-0,75
	A538AC	40	-1,03	-0,22	-0,85	-1,82	-1,25	0,09	-0,85
S-GT-2878	A52194	0	-1,09	-0,98	-2,29	0,31	-0,72	-0,73	-0,94
S-AT-2878	A5223E	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
F-3K-S-2871	A538B1	3	1,04	1,73	0,63	1,67	1,36	2,11	1,42
	A538B1	10	0,74	1,37	0,31	1,33	1,03	1,83	1,10
	A538B1	40	0,71	1,22	0,18	1,11	0,84	1,76	0,97
G-1K-E-2860	A521CB	0	0,25	1,23	-0,61	-1,50	-0,88	0,84	-0,11
G-1K-E-2845	A5222E	0	0,40	0,82	0,02	-1,85	-0,40	1,32	0,05
F-1K-NE-2860	A5226E	0	-0,72	0,30	-0,94	-1,72	0,12	1,14	-0,30
F-1K-NE-2840	A521A0	0	-1,78	-1,54	-2,47	-2,35	-1,80	-0,53	-1,74
F-1K-S-2860*	A5222A	0	1,19	0,54	ND	0,43	-0,48	1,73	0,68
F-1K-S-2840	A52230	0	1,96	1,68	0,53	1,83	0,50	2,37	1,48
<i>Mittelwert</i>			<i>-0,40</i>	<i>0,08</i>	<i>-0,96</i>	<i>-0,73</i>	<i>-0,78</i>	<i>0,55</i>	<i>-0,36</i>
<i>Minimum</i>			<i>-1,78</i>	<i>-1,54</i>	<i>-2,70</i>	<i>-2,35</i>	<i>-2,02</i>	<i>-0,73</i>	<i>-1,74</i>
<i>Maximum</i>			<i>1,96</i>	<i>1,73</i>	<i>0,63</i>	<i>1,83</i>	<i>1,36</i>	<i>2,37</i>	<i>1,48</i>
<i>Amplitude</i>			<i>3,74</i>	<i>3,26</i>	<i>3,33</i>	<i>4,18</i>	<i>3,38</i>	<i>3,10</i>	<i>3,22</i>

Abbildung 27 stellt die Ergebnisse der Jahresmitteltemperaturen des letzten Messjahres im Verhältnis zum Mittelwert der gesamten sechs Jahre 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 Graten) ausgewiesen sind. Die Gipfelstandorte, 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. 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 westexponierte Standort weist z. B. einen viel größeren Gradienten auf als der nordost- oder südexponierte. Bei den Felsstandorten kommt auch deutlich die

Strahlungsungunst des NE-exponierten Standortes mit Jahresmitteltemperaturen im Bereich von 0,41 bis -0,15 °C gegenüber dem südexponierten mit deutlich positiven Mitteltemperaturen (1,76 bis 2,11 °C) zum Ausdruck. Die Werte am W-exponierten Felsstandort sind wiederum recht ähnlich jenem am nordostexponierten 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 Permafrostgunst der S-Flanke unterscheidet und die W-Flanke – je nach jahresspezifischer saisonaler Schnee- und Temperaturentwicklung – thermisch dazwischen liegt.

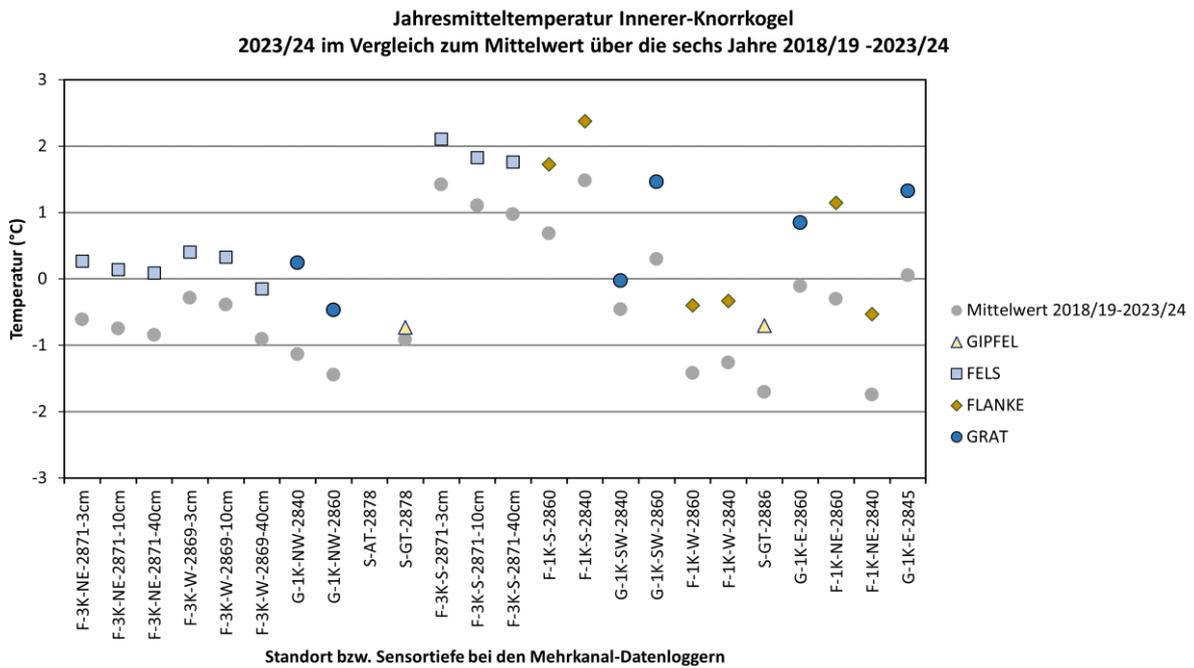


Abbildung 27: Jahresmitteltemperatur aller Messstandorte mit geschlossenen Datenreihen an/nah der Bodenoberfläche im Zeitraum 01.09.2023 bis 31.08.2024 am Inneren Knorrkogel (Messjahr 2023/24). Bei den Dreikanal-Datenloggern sind die Messsensoren in 3, 10 und 40 cm Tiefe im Felsen installiert und entsprechend in der Grafik ausgewiesen. Zum Vergleich sind die Mittelwerte der gesamten sechs Jahre (siehe Tabelle 15) bei der Grafik ebenfalls dargestellt.

In Abbildung 28 werden die Temperaturkurve (auf Basis von Tagesmittelwerten) des kältesten mit dem wärmsten Standort am Knorrkogel im Jahr 2023/24 gegenübergestellt. Beide Temperaturkurven verlaufen sehr ähnlich in der schneefreien Zeit bis Anfang November 2023 sowie ab Ende Juni 2024. In der Zeit dazwischen erkennt man die thermisch isolierende Wirkung einer Schneedecke am Standort F-1K-S-2840, welcher auf Basis dieser Daten permafrostfrei ist. Der Monitoringstandort am Gipfelbereich war im Winter nur gering von der isolierenden Wirkung einer Schneedecke beeinflusst und erreicht Tagesminimumtemperaturen von bis zu -13,4 °C. Im Mittel bewirkt diese Entkopplung der Boden- von der Lufttemperatur einen Temperaturunterschied von einigen Grad Celsius, in unserem Vergleich sogar 3,1 °C.

Vergleich der Tagesmittelwerte der beiden thermischen Extremstandorte (wärmster vs. kältester) im Messjahr 2023/24

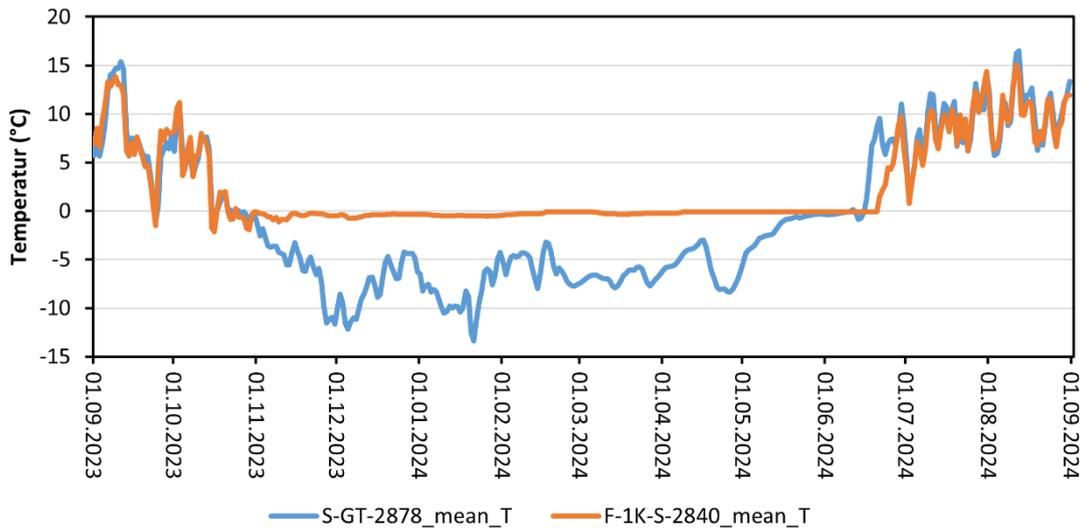


Abbildung 28: Verlauf der Tagesmitteltemperatur an den beiden thermischen Extremstandorten (wärmster vs. kältester) im Messjahr 2023/24. Beide Temperaturkurven verlaufen nur sehr ähnlich in der schneefreien Zeit bis Anfang November 2023 sowie ab Ende Juni 2024. Im Mittel bewirkt dies einen Temperaturunterschied von 3,1 °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, erneut bestätigt werden konnte. Diese Heterogenität lässt die große Bedeutung von relativ engmaschigen Messnetzen wie am Inneren Knorrkogel erkennen und spiegelt auch die Schwierigkeit der Erfassung von Permafrost im komplexen topoklimatischen Bereichen wie im Hochgebirge wider.

Die in diesem Messgebiet ermittelten Werte von bisher sechs Messjahren können nichtsdestotrotz wiederum als klarer Hinweis auf die Existenz von Permafrost im Untersuchungsgebiet gelten, zeigen jedoch auch, dass dieser an der südexponierten Flanke zumindest im Jahr 2023/24 stark inaktiviert wurde, bedingt durch das Fehlen der Auskühlung im Frühwinter. Die Daten zeigen 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.

Diese thermische Komplexität am Inneren Knorrkogel wird auch im Rahmen einer Tagung im September 2025 (International Association of Geomorphologists/IAG - Regional Conference on Geomorphology, 16.-18.09.2025, Timisoara, Romania) einem internationalen Fachpublikum vorgestellt und diskutiert. Der Abstract hierzu wurde bereits von der Tagungsorganisation angenommen (Kellerer-Pirklbauer et al. 2025b).

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

Bedingt durch das Fehlen des Auslesens der Datenlogger in diesem Arbeitsgebiet im Jahr 2024 liegen für 2023/24 keine Daten vom Obersulzbachtal vor. Das letzte Auslesen der Datenlogger durch GEORESEARCH erfolgte am 29.9.2023. Entsprechend dieser Datenlage wird in der folgenden Darstellung nur auf den Zeitraum bis Ende September 2023 eingegangen und wiederholt somit weitgehend das bereits im Vorjahr mitgeteilte (Kellerer-Pirklbauer et al. 2024a).

Die Tageswerte aller 10 Standorte im Sattelkar, die im Zeitraum 01.10.2021 bis 27.09.2023 Daten lieferten, 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 nahe 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 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 2023 am Logger_14 am 22.8.2023 mit 17,1 °C gemessen.

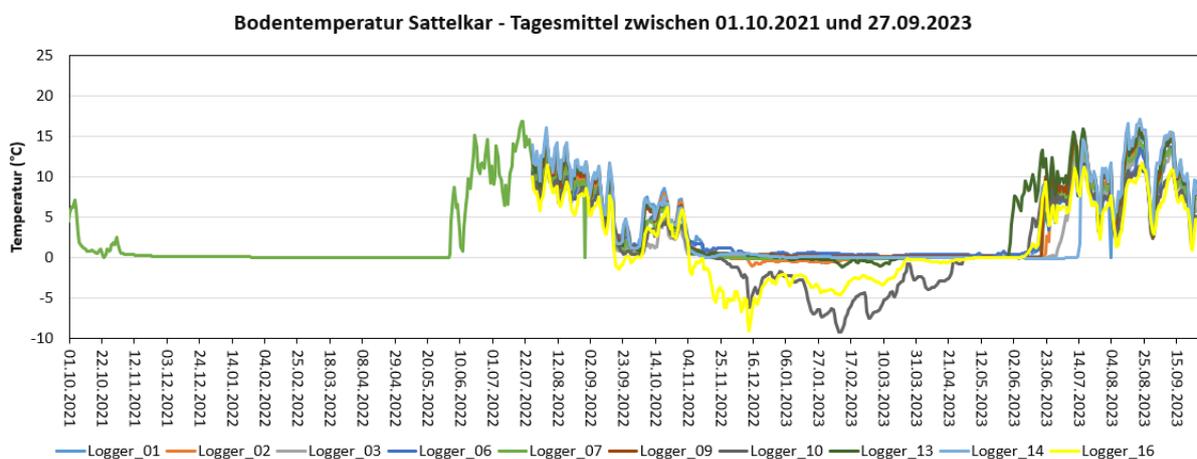


Abbildung 29: Tagesmitteltemperaturen der Bodentempersensoren im Sattelkar im Zeitraum 01.10.2021 bis 27.09.2023. Für den Zeitraum 01.10.2021–25.07.2022 lagen Daten von nur einem Standort (07) vor. Logger_16 wurde am 26.07.2022 neu eingerichtet. Keine Daten nach dem 27.09.2023. Weitere Details siehe 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 27.09.2023 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. Zuletzt war dies von 04.05.2023 bis 10.06.2023 der Fall.

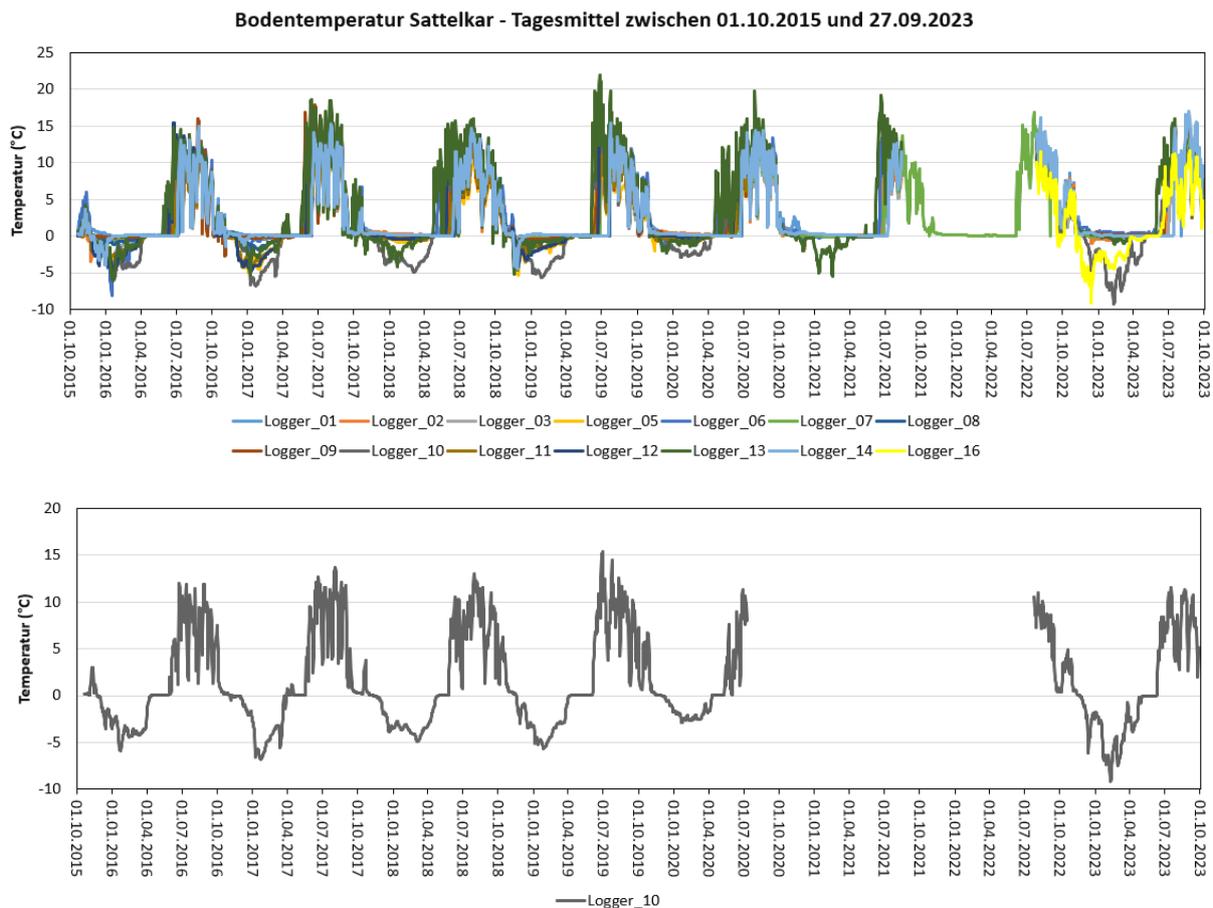


Abbildung 30: Tagesmitteltemperaturen von 14 Bodentemperatursensoren im Sattelkar im Zeitraum 01.10.2015 bis 27.09.2023. Die untere Grafik zeigt zur besseren Veranschaulichung nur die Daten vom Standort Logger_10. Datenbasis: GEORESEARCH.

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 für die Permafrostverbreitung sowie für die zeitlichen Veränderungen der Bodentemperaturen innehat. Die Temperaturkurven des Beobachtungsjahres 2022/23 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 ermittelt. 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. Es bleibt zu hoffen, dass die Zugänglichkeit dieses Arbeitsgebietes 2025 wieder gegeben sein wird und die im Jahr 2023 installierten Datenlogger bis zumindest Sommer 2025 weitere wertvollen Daten liefern werden.

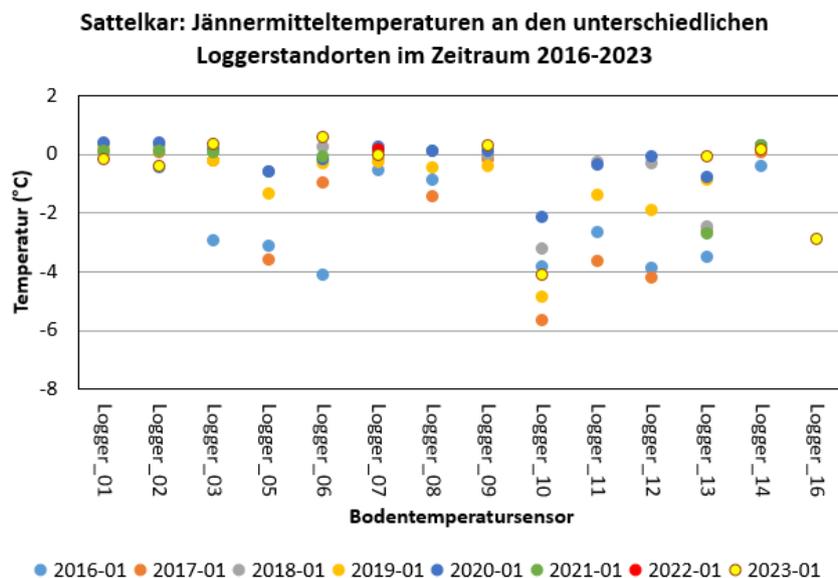


Abbildung 31: Vergleich der Jännermittelwerte von 14 Bodentemperatur-Messstandorten im Sattelkar mit entsprechenden Datenreihen für die acht Jänner zwischen 2016 und 2023. Datenbasis: GEORESEARCH.

4. Diskussion

Bei den Witterungs- und Klimaverhältnissen im Beobachtungsjahr 2023/24 setzte sich der langjährige Erwärmungstrend in den Hohen Tauern fort. An allen sieben Klimastationen mit Temperaturdaten wurden neue Höchstwerte innerhalb der letzten neun Jahre verzeichnet. Besonders stark fiel die Erwärmung an der Station Heiligenblut aus, wo die Jahresmitteltemperatur um nahezu 1,0 °C über dem bisherigen Rekordwert lag. Auch an den hoch gelegenen Stationen Rudolfshütte und Sonnblick setzte sich die Erwärmung fort, wenn auch mit etwas geringeren Abweichungen. Insgesamt lag die Temperatur im Mittel um 1,02 °C über dem Mittelwert der letzten neun Jahre, mit besonders hohen Abweichungen in den Sommermonaten Juni, Juli und August. Die monatlichen Temperaturabweichungen gegenüber der Klimanormalperiode 1981–2010 zeigen, dass fast alle Monate 2023/24 überdurchschnittlich warm waren. Besonders der Februar und August stachen mit Abweichungen von bis zu +3,8 °C hervor. Die Gletscher-Akkumulationsperiode von Oktober bis April war insgesamt im Mittel um +1,2 °C wärmer als das langjährige Mittel.

Die Jahresniederschlagssummen zeigten wie immer eine ausgeprägte räumliche Variabilität zwischen den untersuchten Stationen. Im hydrologischen Jahr 2023/24 wurde an sieben der neun Standorte der höchste Jahresniederschlag der vergangenen Dekade verzeichnet. Besonders markant fiel der Anstieg an den Stationen Rudolfshütte, Kolm-Saigurn und Malta aus, an denen die Jahresniederschlagsmengen deutlich über dem jeweiligen langjährigen Mittel lagen. Auch an den Stationen Felbertauern und Heiligenblut, an denen im Jahr 2023/24 kein neuer Rekordwert erreicht wurde, lagen die Niederschlagssummen um 123,72 mm (Felbertauern) bzw. 69,01 mm (Heiligenblut) dennoch über dem zehnjährigen Mittel. Trotz der regional hohen Niederschlagsmengen bleibt der langjährige Trend uneinheitlich: Einzelne Jahre waren durch extreme Niederschlagsereignisse geprägt, jedoch lässt sich weder ein konsistenter Anstieg noch ein Rückgang der Jahresniederschläge erkennen. Das Witterungsgeschehen im Messjahr war von erheblichen Schwankungen geprägt. So stellte der November einen der niederschlagsreichsten Monate der gesamten Messreihe dar, während der anschließende Winter durch häufige Warmluftphasen auffiel. Der späte Frühling und Sommer verliefen insgesamt zu warm und zu trocken, was eine ungebremschte Gletscherschmelze begünstigte. Erst um Mitte September 2024 führte ein markanter Kaltlufteinbruch zu intensiven Schneefällen in den Hochlagen.

Im Gegensatz zum vergleichsweise unauffälligen Vorjahr zeigte sich das Abflussgeschehen im hydrologischen Jahr 2023/24 deutlich dynamischer. Mehrere markante Abflussspitzen – insbesondere in den Monaten Juni, Juli sowie erneut im Frühherbst – prägten den Jahresverlauf. Diese Peaks, wie beispielsweise am 22. 06.2024, standen im engen Zusammenhang mit Phasen überdurchschnittlicher Temperaturen sowie moderaten bis hohen Niederschlägen. Dieses hydrologische Verhalten deutet auf die zunehmende Bedeutung von Extremereignissen für das sommerliche Abflussregime – sowohl hinsichtlich kurzzeitiger Spitzenabflüsse als auch im Hinblick auf die Jahresgesamtmengen – hin. So wurde etwa an den beiden Pegeln Mallnitz mit einer Abflusshöhe von fast 1750 bzw. Neukirchen mit 1940 mm/Jahr jeweils ein neuer Höchstwert im Dekadenvergleich erreicht. Auch im Einzugsgebiet Innerschlöss führten einzelne Ereignisse, wie etwa der Starkregen am 9. 09.2024 mit 28,5 mm Niederschlag, zu außergewöhnlich hohen Tagesmittelwerten und einer Jahresabflusshöhe, die nur wenig unter dem bisherigen Rekord in der aktuellen Dekade blieb (um 227 mm/Jahr). Gleichzeitig manifestieren sich die Auswirkungen des fortschreitenden Gletscherrückgangs zunehmend im winterlichen Abflussverhalten: Die Phase niedriger Abflüsse verkürzte sich im Vergleich zum Vorjahr in allen drei betrachteten Einzugsgebieten, was auf milde Witterungsbedingungen sowie veränderte Speicherprozesse hindeutet. Der Rückgang des glazio-nivalen Puffersystems scheint somit auch in den winterlichen Abflussmustern sichtbar zu sein. Insgesamt verdeutlicht das hydrologische Jahr 2023/24 sowohl die wachsende Relevanz kurzzeitiger meteorologischer Extremereignisse für das Abflussgeschehen als auch die tiefgreifende Transformation der Gletscher als hydrologisch wirksame Speicher in den Hohen Tauern.

Die Längenänderungen und Massenbilanzen der im Nationalpark Hohe Tauern beobachteten Gletscher fielen im Berichtsjahr 2023/24 erneut deutlich negativ aus. Der mittlere Längenrückzug aller Gletscher betrug –15,0 m und lag etwas unter jenem des Vorjahres, blieb aber weiterhin auf hohem Niveau. Besonders markant ist die



spezifische Massenbilanz, die sich gegenüber 2022/23 nochmals an manchen der sieben untersuchten Gletscher verschlechterte. Den höchsten Masseverlust im Jahr 2023/24 hatte das Wurtenkees mit -2700 mm Wasseräquivalent, den geringsten hingegen das Stubacher Sonnlickees mit „nur“ -1430 mm Wasseräquivalent. Verantwortlich dafür war insbesondere ein erneut sehr warmer Hochsommer ohne Unterbrechung der Abschmelzung durch Schneefallereignisse. Zwar brachte der Mai 2024 noch Schneefälle, doch konnte die Schneedecke die späteren hohen Energieeinträge nur kurzzeitig abpuffern und die Eisabschmelzung verzögern. Damit reiht sich das Gletscherjahr 2023/24 nahtlos in die Phase fortschreitenden Gletscherrückgangs ein, die mittlerweile seit mehreren Jahren das Bild im Hochgebirge prägt.

Die Daten zu den Bodentemperaturverhältnissen 2023/24 verweisen auf deutlich höheres Temperaturniveau im Untergrund als in den Jahren zuvor – mit neuen Rekorden in den verschiedenen Messnetzen in Tirol und Kärnten, aber auch in den Bohrlochdaten in Salzburg. Damit waren die Bedingungen für den Permafrost extrem ungünstig, was zur Inaktivierung oder weiteren Degradation von Permafrost an den meisten Standorten, wo noch Permafrost existiert, führte. Die deutliche Permafrostungunst im Berichtszeitraum hatte zum einen mit dem teilweise frühen Aufbau einer Schneedecke im Frühwinter zu tun und zum anderen mit den teilweise extrem hohen Sommertemperaturen mit rascher und starker Erwärmung des Untergrundes. Diese Feststellung geht in die Richtung, 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 indirekt in Übereinstimmung haben sich auch die Bewegungsraten der untersuchten Blockgletscher gegenüber dem Vorjahr erhöht und sind ebenfalls weiterhin auf hohem Niveau. Ein hier nicht quantifizierbarer Faktor der Blockgletscher-Dynamik ist auch die unterschiedliche Wasserverfügbarkeit in den Blockgletschersedimenten in den trockenen Sommermonaten.

5. Fazit mit Ausblick

Die Berichtszeitraum 2023/24 entspricht allen in dieser Studie untersuchten Parametern zu Folge dem aktuellen, durch langfristige Erwärmung und ihren Folgen geprägten Klimageschehen:

- Alle registrierten bzw. berechneten Werte der Lufttemperaturen, insbesondere die neue Rekordwerte, unterstreichen den weiterhin ungebrochenen Erwärmungstrend in der Region. Gleichzeitig wurden im Berichtsjahr an nahezu allen Standorten Höchstwerte bei den Niederschlagssummen verzeichnet, welche hauptsächlich auf extreme Niederschlagsereignisse zurückzuführen sind. Dennoch lässt sich langfristig kein eindeutiger Trend in der Niederschlagsentwicklung erkennen.
- Die Abflussverhältnisse wurden im Berichtsjahr 2023/24 einerseits erneut durch die Gletscherspende, insbesondere in den beiden stärker vergletscherten Einzugsgebieten geprägt, andererseits aber auch – im Gegensatz zum Vorjahr – von mehreren markanten sommerlichen Abflussspitzen, die hauptsächlich durch die Überlagerung von hohen Temperaturen mit intensiven Starkniederschlägen ausgelöst wurden. Darin kommt die zunehmende Bedeutung extremer meteorologischer Ereignisse für das Abflussgeschehen in den Hohen Tauern zum Ausdruck.
- Der Gletscherrückgang setzte sich auch im Jahr 2023/24 unvermindert fort, wenngleich die mittleren Längenverluste etwas geringer als im Vorjahr ausfielen. Besonders deutlich fällt jedoch die erneut stark negative spezifische Massenbilanz ins Gewicht, die das Berichtsjahr zum zweitungünstigsten der aktuellen Vergleichsperiode macht. Auch wenn die Abschmelzperiode (die schon Mitte September durch den beschriebenen massiven Wettersturz endete) kürzer als im Vorjahr war, war der Energieeintrag doch so groß, dass die Gletscher der Hohen Tauern – wie alle im übrigen Österreich und in den gesamten Alpen – massiv an Masse und Fläche verloren. Die Gletscher haben längst keine ihrer Größe entsprechenden Nährgebiete mehr, sodass mittelfristig eine Stabilisierung oder gar Regeneration der Eismassen ausgeschlossen ist.
- In ähnlicher Weise sind die gegenüber dem Vorjahr deutlich höheren Bodentemperaturen und leicht angestiegenen Bewegungsraten der Blockgletscher im Berichtsjahr als Ausdruck ungünstiger 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. Der Temperaturanstieg im Untergrund ist durch die Langzeitdaten in Kärnten (kontinuierliche Datenreihen seit der Instrumentierung 2006) statistisch signifikant mit Erwärmungsraten von um 0,08 bis 0,10 °C/Jahr belegt. Dies entspricht einer Dekadenerwärmung von 1°C, welche – sollte sie, was zu erwarten ist, andauern – zu einer weitgehenden Transformation der hochalpinen Kryosphäre mit weitreichenden Folgen führen wird.

Zusammengefasst können die Veränderungen der im gegenständlichen Modul beobachteten Geofaktoren im Berichtsjahr diesmal nicht wortident zu den letzten Berichten charakterisiert werden, sondern müssen noch wesentlich radikaler dargestellt werden: Die Hochgebirgsnatur unterlag 2023/24 einer massiven Umwandlung, bewirkt durch extrem hohe Temperaturen und deutlich überdurchschnittliche Niederschlagsmengen, wobei die Starkniederschläge überwiegend – und bis in hohe Lagen – als Regen fielen. Diesbezüglich sprechen alle ermittelten Messwerte der meteorologischen und hydrologischen Stationen sowie der Permafrost-Messnetze eine klare Sprache. Die durchaus dramatischen Veränderungen werden am deutlichsten durch den weiterhin drastischen Gletscherschwund sichtbar gemacht, während die Permafrost-Degradation unbemerkt und messtechnisch nur schwierig erfassbar abläuft, aber auf wesentlich größeren Flächen als der Gletscherschwund wirksam ist. Die damit verbundene Disposition für weitere Naturprozesse – allen voran gravitative Massenbewegungen (wie Felsstürze und Muren), aber auch Hochwässer (u.a. durch verringerte Retention in Schnee und Eis) – läuft insgesamt auf eine weitreichende Umgestaltung der Landschaft, wie wir sie bis jetzt kannten, hinaus. So gesehen war 2023/24 ein Vorgeschmack auf das, was uns in den nächsten Jahren vermehrt erwartet – nicht nur im Nationalpark Hohe Tauern. Die Fortführung dieses Monitoring ist demnach nicht nur aus wissenschaftlichem, sondern auch aus gesellschaftlichem Interesse heraus sinnvoll.

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.
- Hartmeyer I., Otto J.C. (2024): Rockfall, glacier recession, and permafrost degradation: long-term monitoring of climate change impacts at the Open-Air-Lab Kitzsteinhorn, Hohe Tauern. *DEUQUA Spec. Pub.*, 5, 3–12. <https://doi.org/10.5194/deuquasp-5-3-2024>
- Kaufmann V., Ladstädter R., Lieb G.K. (2006): Quantitative assessment of the creep process of Weissenkar rock glacier (Central Alps, Austria). 8th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, Band 41, Institute of Geography and Regional Science, University of Graz, 77-86. https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/Grazer_Schriften_Band41_HMRSC-VIII_Kaufmann.pdf
- Kellerer-Pirklbauer, A. (2025). Results from the permafrost monitoring network at Mt. Innerer Knorrkogel, Austria, in 2023-2024 (v1.0) [data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15280626>
- 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., Lieb G.K. (2025): Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen im Nationalpark Hohe Tauern. Modul 07: Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost. *Methoden-Handbuch* (Version 02/2025). Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien (in Begutachtung).
- Kellerer-Pirklbauer A., Bartsch A., Gitschthaler C., Reisenhofer S., Weys 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, BMWWF, 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.parc.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=52505

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

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., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M., Frießenbichler M., Eulenstein J. (2024c): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2022-2024. 2. Zwischenbericht für 2022/23, 53 Seiten.

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. (2024d): Acceleration and interannual variability of creep rates in mountain permafrost landforms (rock glacier velocities) in the European Alps in 1995–2022. Environ. Res. Lett. 19 034022 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad25a4>

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

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Eulenstein J. (2025b): The shape matters! Variability of ground temperature and permafrost at a symmetrical mountain summit in the Eastern Alps in the period 2018–2024. Abstract Volume – International Association of Geomorphologists (IAG) - Regional Conference on Geomorphology, 16.-18.09.2025, Timisoara, Romania (Druck in Vorbereitung)

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_ebo_ok.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. (2025): Gletscherbericht 2023/24. Sammelbericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins im Jahr 2024. Bergauf 1.2025, 13–25. https://www.alpenverein.at/bk/bergauf/bergauf2025/Bergauf_1_2025/html5/index.html?&locale=DEU

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/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=38030.

Noetzli J., Isaksen K., Barnett J., Christiansen H.H., Delaloye R., Etzelmüller B., Farinotti D., Galleman T., Guglielmin M., Hauck C., Hilbich C., Hoelzle M., Lambiel C., Magnin F., Oliva M., Paro L., Pogliotti P., Riedl C., Schoeneich P., Valt M., Vieli A., Phillips M. (2024): Enhanced warming of European mountain permafrost in the early 21st century. *Nat. Commun.* 15, 10508. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54831-9>

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., Käb 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., Käb 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.*, 104 (9), S41-S42. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0090.1>

Pellet C., Bodin X., Cusicanqui D., Delaloye R., Käb A., Kaufmann V., Thibert E., Vivero S., Kellerer-Pirklbauer A. (2024): Cryosphere - Rock glacier velocity. In: State of the Climate in 2023. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Boston. American Meteorological Society . 2024. S44–S46. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-24-0116.1>

Pellet C., Bodin X., Cusicanqui D., Delaloye R., Käb A., Kaufmann V., Thibert E., Vivero S., Kellerer-Pirklbauer A. (2025): 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.) (2025): Latest glacier mass balance data: 1 Summary of the balance years 2021/22, 2022/23 and 2023/24. <http://wgms.ch/latest-glacier-mass-balance-data> (zuletzt geprüft am 15.4.2025)

Zagel B., Ehartner 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.

Zagel B., Slupetzky H., Ehgartner G. (2025): Glaziologisches Monitoring Stubacher Sonnblickkees. Beiträge zur Glazialhydrologie eines hochalpinen Einzugsgebietes im Oberen Stubachtal, Hohe Tauern, Land Salzburg. Berichtsjahr 2024, 13 S. Universität Salzburg. <https://uni-salzburg.elsevierpure.com/de/publications/glaziologisches-monitoring-2024-lter-stubachtal-sonnblickkees-bei>



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/ZAMG)..... 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 2024 (vgl. Tabelle 5). Die Standorte KC-LIA und KC-RID wurden 2022 neu eingerichtet, der Standort HOT-S im Jahr 2023 und der Standort DOV-UP-S2 im Jahr 2024 (Gletschermaske für Pasterze und benachbarte Gletscher nach Buckel et al. 2018)..... 7
- Abbildung 3: Vergleich der Schneebedingungen im Zuge der Geländearbeiten am 05.09.2021, 04.09.2022, 11.08.2023 sowie am 02.09.2024 im Bereich der Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels (hier zu sehen die Süd- und Westflanken), vom Löbentörl 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. 2024 war das Gelände nahezu schneefrei. Fotos: Andreas Kellerer-Pirklbauer. 10
- Abbildung 4: Blick vom Inneren Knorrkogel nach Osten auf das Karleskees und den Äußeren Knorrkogel (2920 m) am 11.08.2023 und 02.09.2024. Zu beachten ist das weitgehende Fehlen von Schneefeldern (auch auf dem Karleskees) in der Hochgebirgslandschaft der Hohen Tauern in beiden Jahren. Fotos: Andreas Kellerer-Pirklbauer. 12
- Abbildung 5: Gegenüberstellung der Jahresmitteltemperaturen von 2023/24 mit dem Mittelwert für die zehn Jahre zwischen 2014/15 und 2023/24 von sieben Klimastationen in den Hohen Tauern, deren Daten den Inhalt der Tabelle 7 bilden. Primär bedingt durch deren Seehöhe, ist der wärmste Standort die Station Malta, der kälteste die Station Sonnblick..... 15
- Abbildung 6: Gegenüberstellung der Jahressummen des Niederschlags von 2023/24 mit dem Mittelwert für die zehn Jahre zwischen 2014/15 und 2023/24 von neun Klimastationen, deren Daten den Inhalt der Tabelle 7 bilden. Der niederschlagsärmste Standort ist Heiligenblut, der niederschlagsreichste die Rudolfshütte..... 16
- Abbildung 7: Monatswerte der Lufttemperatur (T) im Zeitraum Oktober 2023 bis September 2024 an den sieben Klimastationen Rudolfshütte, Kolm-Saigurn, Sonnblick, Heiligenblut, Malta, Gerlos und Felbertauern..... 17
- Abbildung 8: Vergleich der Monatsmittelwerte der Lufttemperatur (in °C) im Gletscherhaushaltsjahr 2023/24 mit jenen der Klimanormalperioden 1981–2010 sowie 1991–2020 (oben) und Abweichung der Monatsmitteltemperaturen zur Klimanormalperiode 1981–2010 in den vier Gletscherhaushaltsjahren 2020/21 bis 2023/24 (unten) an der Station Sonnblick (3109 m). 18



Abbildung 9: Langzeitentwicklung von Niederschlag (Station Neukirchen) und Temperatur (Station Sonnblick). Entwicklung der Jahreswerte (hier Kalenderjahre) im Zeitraum 1973–2024 und entsprechende lineare Trends (rote Linien). 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.....	20
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 zehnjährigen Zeitraum 01.10.2014 bis 30.09.2024.	21
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 01.10.2023–30.09.2024. Die untere Kurve ist ein Ausschnitt aus der oberen mit veränderter Skalierung der Ordinate und fokussiert auf den Bereich bis zu 5 m ³ /s.....	23
Abbildung 12: Monatssummen des Abflusses (Q) der drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innergschlöss (Tirol) im Zeitraum 01.10.2019 – 30.09.2024 in Mio. m ³	25
Abbildung 13: Mittlere Längenänderungen an 16 Gletschern im Nationalpark Hohe Tauern, von denen für die neunjährige Periode 2015/16 bis 2023/24 Längenänderungsdaten lückenlos vorliegen (siehe Tabelle 11). In kräftigem Rot gehalten das aktuelle Beobachtungsjahr. Weitere Erläuterung im Text..	29
Abbildung 14: Längenänderungen an den vier Gletschern Schlatenkees (Venedigergruppe), Winkelkees (Ankogelgruppe), Untersulzbachkees (Venedigergruppe) und Pasterze (Glocknergruppe) im Zeitraum 2011/12–2023/24. Erläuterungen im Text.....	30
Abbildung 15: Spezifische Jahresmassenbilanz an vier ausgewählten Gletschern in den Hohen Tauern zwischen 2015/16 und 2023/24. Die Jahreswerte sind in mm Wasseräquivalent (mm w.e.) angegeben.	32
Abbildung 16: Jahresmitteltemperatur an/nahe der Bodenoberfläche aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten für das Beobachtungsjahr 2023/24 (01.08.2023 bis 31.07.2024). Für HOT-SN liegen mit 2023/24 erstmals Daten vor. Standorte, die mit ND (no data) markiert sind, verfügen aufgrund technischer Probleme über keine geschlossene Datenreihe für das letzte Berichtsjahr (KC-RID) oder sind aktuell steinschlagbedingt nicht instrumentiert (KC-LO). Altschnee war im Jahr 2023 keine Einschränkung bei der Geländearbeit.	34
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. dessen Nahbereich (Standort FAL-UP) für das Messjahr 2023/24 (01.08.2023 bis 31.07.2024). Messbereiche im Winterhalbjahr mit geringer Schwankung deuten auf Dämpfungseffekte durch eine mächtige Schneedecke (> 80 cm) hin (Erläuterungen im Text). In Grau sind die Tagesmittelwerte der automatischen meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS) dargestellt.....	35
Abbildung 18: Gegenüberstellung der Jahresmittelwerte des gegenständlichen Projektjahres 2023/24 mit jenen des Vorjahres an allen Bodentemperaturmessstationen mit entsprechenden Daten. Nur ein Standort war 2023/24 kälter als im Vorjahr (HLC-SO-S).	37
Abbildung 19: Jahresmitteltemperatur der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten für den Zeitraum 01.08.–31.07. des Folgejahres für die Messjahre von 2007/08 bis 2023/24. Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten sind dargestellt. Jene für DOV-UP-S, HLC-UP-N und	





PAG-UP sind statistisch signifikant (alle drei $p < 0,01$ – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1 %). Zu beachten die gleiche Skalierung der Ordinaten.	38
Abbildung 20: Tagesmitteltemperaturen im Bohrloch 3 am Sonnblick im Zeitraum 01.10.2023–30.09.2024 in fünf unterschiedlichen Tiefen bis einschließlich 20 m sowie die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (AT) an der TAWES-Station Sonnblick (Daten: GeoSphere Austria).	39
Abbildung 21: Tagesmitteltemperaturen im Bohrloch 3 am Sonnblick im Zeitraum 01.10.2014 bis 30.09.2024 in fünf unterschiedlichen Tiefen bis einschließlich 20 m sowie die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (AT) an der TAWES-Station Sonnblick. Die untere Darstellung fokussiert – mit einer anderen Abszissenskalierung – auf die drei unteren Sensoren und zeigt auch die linearen Erwärmungstrends der Sensoren in Tiefen von 4 und 12 m (Daten: GeoSphere Austria).	40
Abbildung 22: Jahresmitteltemperaturen für sechs Kalenderjahre mit geschlossenen Datenreihen zwischen 2016 und 2022 im Bohrloch 3 am Sonnblick (Daten: GeoSphere Austria).	41
Abbildung 23: Mitteltemperatur der Jänner für die neun Jahre von 2016 bis einschließlich 2024 im Bohrloch 3 am Sonnblick (Daten: GeoSphere Austria).	42
Abbildung 24: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Dösener Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2023/24. 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.	43
Abbildung 25: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 33 am Blockgletscher Hinteres Langtalkar mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2023/24. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (m/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2\text{-}3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Eine maximale Bewegungsrate von 3,48 m/Jahr wurde am Punkt 27 gemessen. Die Punkte 21, 24, 25 und 31, in der Abbildung nicht mehr ersichtlich gemacht, sind nicht mehr im Gelände auffindbar. Der Punkt 22 wurde 2023 nicht gemessen. Orthofoto 28.8.2012 © Land Kärnten.	44
Abbildung 26: Vergleich der mittleren jährlichen horizontalen Oberflächenbewegung der beiden Blockgletscher Dösen (zentraler Bereich) und Hinteres Langtalkar (oberer Bereich) für den Zeitraum 1995–2024. Mittelbildung über 11 Punkte (10–17, 21–23) am Dösener Blockgletscher und 9 Punkte (10–17, 37) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar. Für Vergleichszwecke ist auch der zeitliche Verlauf der Bewegungsraten am Weißenkar-Blockgletscher (Schobergruppe, Osttirol) dargestellt. Datenquelle siehe Text.	45
Abbildung 27: Jahresmitteltemperatur aller Messstandorte mit geschlossenen Datenreihen an/nah der Bodenoberfläche im Zeitraum 01.09.2023 bis 31.08.2024 am Inneren Knorrkogel (Messjahr 2023/24). 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 gesamten sechs Jahre (siehe Tabelle 15) bei der Grafik ebenfalls dargestellt.	48
Abbildung 28: Verlauf der Tagesmitteltemperatur an den beiden thermischen Extremstandorten (wärmster vs. kältester) im Messjahr 2023/24. Beide Temperaturkurven verlaufen nur sehr ähnlich in der schneefreien Zeit bis Anfang November 2023 sowie ab Ende Juni 2024. Im Mittel bewirkt dies einen Temperaturunterschied von 3,1 °C.	49





Abbildung 29: Tagesmitteltemperaturen der Bodentemperatursensoren im Sattelkar im Zeitraum 01.10.2021 bis 27.09.2023. Für den Zeitraum 01.10.2021–25.07.2022 lagen Daten von nur einem Standort (07) vor. Logger_16 wurde am 26.07.2022 neu eingerichtet. Keine Daten nach dem 27.09.2023. Weitere Details siehe Text. Zur Vergleichbarkeit mit der folgenden Abbildung 30 wurde in dieser Grafik die idente Legende inklusive Farbcodierung verwendet. Datenbasis: GEORESEARCH.50

Abbildung 30: Tagesmitteltemperaturen von 14 Bodentemperatursensoren im Sattelkar im Zeitraum 01.10.2015 bis 27.09.2023. Die untere Grafik zeigt zur besseren Veranschaulichung nur die Daten vom Standort Logger_10. Datenbasis: GEORESEARCH.51

Abbildung 31: Vergleich der Jännermittelwerte von 14 Bodentemperatur-Messstandorten im Sattelkar mit entsprechenden Datenreihen für die acht Jänner zwischen 2016 und 2023. Datenbasis: GEORESEARCH.52



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 01.-31.03.2019. (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.....	4
Tabelle 4: Gletscher in den Hohen Tauern, an denen aktuell Massenbilanzen durch verschiedene Institutionen bestimmt werden (Quelle: WGMS 2025, ergänzt). GeoSphere Austria (bis 31.12.2022: ZAMG); ÖAW=Österreichische Akademie der Wissenschaft; HD-Sbg=Hydrographischer Dienst des Landes Salzburg; HD-Tirol= Hydrographischer Dienst des Landes Tirol; Z_GIS= Fachbereich Geoinformatik, Universität Salzburg. *= Daten lagen für diesen Bericht nun auch für 2022/23 vor.....	5
Tabelle 5: Auflistung der vier Untersuchungsgebiete im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten und deren Instrumentierung mit Miniatur-Temperaturdatenloggern. Lage siehe Abbildung 2. Abbildungen 14 sowie 27-29 zeigen Daten bzw. Auswertungen der jeweils grau hinterlegten Sensoren. HLC = Hinteres Langtalar-Kögelekar, FAL = Fallbichl, HOT = Hochtor, DOV = Dösen-Säuleck, PAG = Pasterze-Burgstall. Der Code für jeden Standort besteht im Wesentlichen aus diesen Bezeichnungen in Kombination mit weiteren, internen Kürzeln; z. B. N = Nord, S = Süd.....	8
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_20240425.csv“.....	11
Tabelle 7: Jahresmittelwerte der Lufttemperatur (T, in °C) und Jahressummen des Niederschlags (P, in mm) in den zehn hydrologischen Haushaltsjahren 2014/15 bis 2023/24 (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 10-jährigen Periode, kursiv hingegen den tiefsten Wert. n.d.=fehlende Daten. *Datenlücke 01.03.2019–31.03.2019.	14
Tabelle 8: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur (in °C) und Abweichungen der Monatsmittelwerte in den fünf Gletscherhaushaltsjahren 2019/20 bis 2023/24 von jenen der Klimanormalperiode 1981–2010 (in °C) an der Station Sonnblick (3109 m).....	19
Tabelle 9: Jahresmenge des Abflusses (Q) an den Abflussmessstationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im Zeitraum 01.10.2014–30.09.2024; Gesamtabfluss in den	



einzelnen Gletscherhaushaltsjahren sowie Monatsminima und Monatsmaxima. Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum.	22
Tabelle 10: Abflusshöhe (Quotient aus Durchflussvolumen pro Beobachtungsperiode und Einzugsgebietsfläche) in mm für die zehn glaziologischen Haushaltsjahre 2014/15–2023/24 in den drei Einzugsgebieten oberhalb der Stationen Mallnitz (Einzugsgebiet 85,3 km ²), Neukirchen (40,5 km ²) und Innergschlöss (39,3 km ²). Grau hinterlegt das aktuelle Projektjahr. Fettstellung markiert den jeweils höchsten Wert der 10-jährigen Periode, kursiv den tiefsten Wert.	25
Tabelle 11: Die im Nationalpark Hohe Tauern bzw. im Nahbereich davon (*) durch den Österreichischen Alpenverein jährlich vermessenen Gletscher mit Angaben zur Längenänderung in den Gletscherhaushaltsjahren 2015/16 bis 2023/24. Lage siehe Abbildung 1. Grau hinterlegt ist das gegenständliche Gletscherhaushaltsjahr 2022/23.	27
Tabelle 12: Spezifische Massenbilanzen an sieben Gletschern im Bereich des Nationalparks Hohe Tauern für die neun Gletscherhaushaltsjahre 2015/16–2023/24 in mm Wasseräquivalent. Grau hinterlegt ist das aktuelle Gletscherhaushaltsjahr. Die Daten von 2022/23 für das Wurtenkees (*) lagen, wie in Kapitel 2.3 erläutert, erst 2024 vor.	31
Tabelle 13: Bewegungsraten am Dösener Blockgletscher für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2016/17–2023/24. Die Mittelwerte wurden aus den Bewegungsraten der zentralen Punkte 10–17 und 21–23 gerechnet. Die Maximalwerte wurden zumeist im Punkt 15 festgestellt. Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum. Für die Punkte 28 und 29 konnte wiederholt keine signifikante Bewegung festgestellt werden.	43
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.	44
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 2023/24 sowie deren Mittelwert über die 6 Jahre (in Ausnahmen 5 Jahre*). ND = no data (siehe hierzu Kapitel 2.4). Grau hinterlegt ist der aktuelle Berichtszeitraum.	47





Herausgeber:

Nationalparkrat Hohe Tauern

Kirchplatz 2, 9971 Matri

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

www.hohetauern.at