



Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen

Modul 07 – Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost
Endbericht 2019-2022

IMPRESSUM

forschungsraum

Endbericht 2019-2022 zu Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen: Modul 07 – Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost

Projektleitung:

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

Für den Inhalt verantwortlich:

Andreas KELLERER-PIRKLBAUER, Gerhard Karl LIEB und Julia EULENSTEIN

Titelbild:

© Andreas KELLERER-PIRKLBAUER: Der Lufttemperaturmessstandort S-AT-2878 im Nahbereich des Gipfels des Inneren Knorrkogels. Im Bildhintergrund der eigentliche Gipfel sowie das Schlatenkees.

Zitiervorschlag:

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Eulenstein J. (2023): 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.

[Weblink: http://www.parcs.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=52647](http://www.parcs.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=52647)

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

Graz, im April 2023



Inhalt

1. Einleitung	1
2. Methodik und Datengrundlagen	2
2.1. Methoden Bereich Witterung und Klima	2
2.2. Methoden Bereich Abfluss.....	3
2.3. Methoden Bereich Gletscherverhalten	4
2.4. Methoden Bereich Permafrost.....	5
3. Ergebnisse.....	13
3.1. Ergebnisse zum Bereich Witterung und Klima 2019-2022	13
3.2. Ergebnis Bereich Abfluss 2019-2022	20
3.3. Ergebnis Bereich Gletscherverhalten 2019-2022.....	23
3.4. Ergebnis Bereich Permafrost 2019-2022	28
4. Diskussion.....	47
5. Fazit mit Ausblick	49
Literaturverzeichnis.....	51
Abbildungsverzeichnis	54
Tabellenverzeichnis.....	58



1. Einleitung

In diesem wissenschaftlichen Endbericht zum Modul 07 des Langzeit-Ökosystem-Monitorings im Nationalpark Hohe Tauern werden die im ersten Bericht (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2017) festgelegten abiotischen Faktoren bzw. Prozesse (Witterung/Klima, Abfluss, Gletscherverhalten und Permafrost) für die drei glaziologischen Haushaltsjahre 2019/20, 2020/21 und 2021/22 (jeweils 01.10. bis zum 30.09. des Folgejahres) ausgewertet und interpretiert. Dieser Bericht komplettiert somit den Zwischenbericht von 2020 (Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2020), der auf die Permafrost- und Bodentemperatur-Bedingungen an der Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels in der Venedigergruppe (Osttirol) im Gletscherhaushaltsjahr 2019/20 fokussierte, sowie jenen von 2021 (Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2021) und 2022 (Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2022), die sämtliche im Modul 07 behandelten abiotischen Faktoren bzw. Prozesse in den beiden Gletscherhaushaltsjahre 2019/20 und 2020/21 zum Inhalt hatten. An ausgewählten Stellen werden in diesem Bericht Ergebnisse der Auswertungen für die Periode 2019-2022 auch mit den entsprechenden Daten der Vorjahre (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2017, 2018, Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2019a) verglichen.

Die im ersten Bericht zum Modul 07 (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2017) konstatierte gute Verfügbarkeit der Daten zu Witterung/Klima, Abfluss, Gletscherverhalten und Permafrost musste nach den erfolgten Auswertungen im zweiten Teilbericht (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2018) teilweise relativiert werden. Im Endbericht der Pilotprojektphase (Lieb et al. 2019) wurde dies entsprechend erläutert. So etwa ergaben sich u.a. Probleme mit den von den verantwortlichen Organisationen übermittelten Datenformaten oder mit der Geschlossenheit sowie mit dem Vorhandensein langer Datenreihen, die erst sinnvolle Aussagen über den Charakter eines Einzeljahres ermöglichen. Ferner stehen typischerweise häufig für die letzten Jahre nur ungeprüfte Rohdaten zur Verfügung, was die Ergebnisse im Detail relativieren, nicht jedoch die Grundaussagen in Frage stellen kann. Auch mit diesen kleineren Einschränkungen waren die definierten Ziele zufriedenstellend zu erreichen, sodass auf der Maßstabsebene des gesamten Nationalparks und auf der der drei Flusseinzugsgebiete (Seebach, Untersulzbach, Gschlössbach) valide Aussagen zu den Veränderungen der abiotischen Faktoren Witterung, Abfluss, Gletscher und Permafrost für das jeweilige Gletscherhaushaltsjahr gegeben werden können.

Konkret liegen für die drei untersuchten Einzugsgebiete Seebachtal, Untersulzbachtal und Innergschlöss Daten für den Abfluss (Pegel am unteren Ende der dadurch definierten hydrographischen Einzugsgebiete) und für die Gletscher-Längenänderungen vor. Für den Permafrost gibt es kontinuierliche Boden- bzw. Felstemperaturreihen seit Sommer 2018 im Einzugsgebiet Innergschlöss (Messstandort Innerer Knorrkogel). Weitere Daten zum Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern wurden durch andere Monitoringprogramme erhoben, die zu einem großen Teil auch von den Zwischenberichtslegern bzw. ihren Kooperationspartnern – wie z.B. der TU Graz oder der GeoSphere Austria (bis 31.12.2022 als Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik/ZAMG bezeichnet) 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), 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

Betreffend allgemeine Hinweise zur Methodik in diesem Modul siehe Kellerer-Pirklbauer & Lieb (2019b).

2.1. Methoden Bereich Witterung und Klima

Die Witterungsbeschreibung für die Messperiode 2019-2022, die in diesem Bericht im Ergebnisteil präsentiert wird, beruht auf eigenen Beobachtungen sowie auf der Interpretation der von der ZAMG bzw. GeoSphere Austria verfügbar gemachten Daten und Analysen. Eine solche Beschreibung des Witterungsgeschehens ist für das Verständnis klimatisch gesteuerter Phänomene wie Permafrost und Gletscher äußerst wichtig und fließt z. B. auch in die Beurteilung der österreichweiten Gletscherveränderungen in den einzelnen Gletscherhaushaltsjahren mit ein (wie zuletzt in Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2023).

Witterungs- bzw. klimarelevante Daten aus dem Bereich des Nationalparks Hohe Tauern für den Zeitraum 01.10.2019–30.09.2022 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 bedingt durch eine Kooperationsvereinbarung zwischen der Universität Graz und der GeoSphere Austria kostenfrei verwendet werden.

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

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

Von Seiten der Hydrographischen Landesdienste wurden für diesen Bericht Daten von sechs Klimastationen verwendet, die Tabelle 2 auflistet. Hierzu folgende Anmerkungen: HZB-Nr. ist die interne Stationsnummer, Lon, Lat, RW und HW bedeuten dasselbe wie in Tabelle 1. Die Stationsdaten stammen vom Amt der Kärntner Landesregierung, Abteilung 12: Wasserwirtschaft, Unterabteilung Hydrographie (Kontaktperson: Helge Vithanage, helge.vithanage@ktn.gv.at), vom Amt der Salzburger Landesregierung, Abteilung 7: Wasser, Hydrographischer Dienst (Kontaktperson: Stefan Schrofner, stefan.schrofner@salzburg.gv.at) und vom Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Wasserwirtschaft, Hydrographie und Hydrologie (Kontaktperson: Martin Neuner, martin.neuner@tirol.gv.at). Angemerkt wurde von den Ämtern, dass die Daten der jüngeren Vergangenheit zwar vorgeprüfte Rohdaten sind, die aber weder auf Vollständigkeit noch auf Plausibilität geprüft worden seien. Nur von Seiten des Amtes der Kärntner Landesregierung wurde darauf hingewiesen, dass die übermittelten Daten zwar vorkorrigiert wurden, aber sich bis zur Endkorrektur noch geringfügig ändern könnten. Weiters wurde von allen Dienststellen angemerkt, dass eine Weitergabe der Daten an Dritte nicht gestattet sei. Zuletzt gilt es auch zu beachten, dass es an den Messstationen Neukirchen und Bramberg keine Lufttemperaturaufzeichnungen gibt.

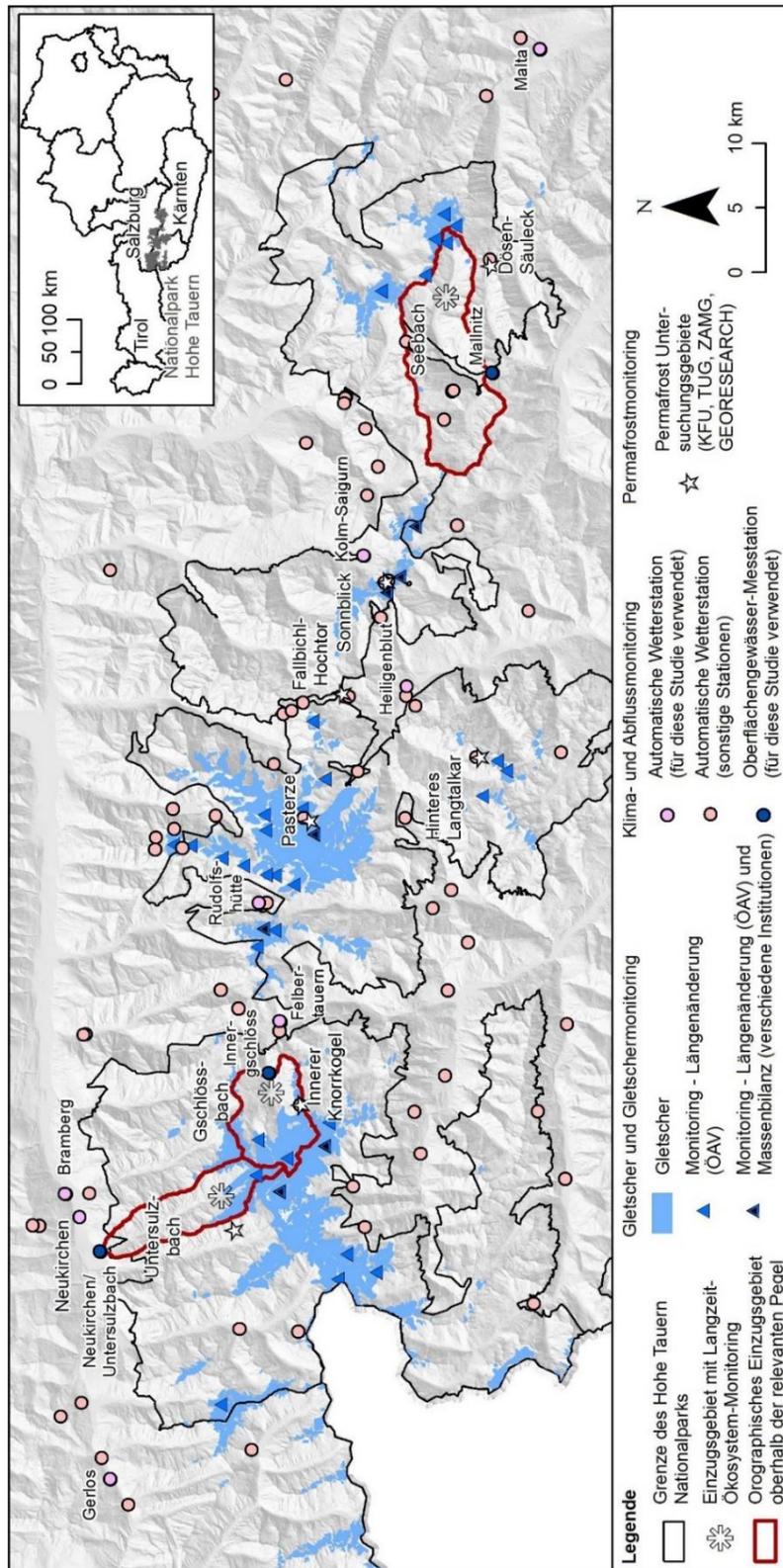


Abbildung 1: Lage der drei Untersuchungsgebiete für das Langzeit-Ökosystemmonitoring sowie die Lage der in dieser Studie verwendeten Klima- und Abflussmessstationen (GeoSphere Austria- oder HZB-Stationen), der durch Monitoring erfassten Gletscher und der Permafrost-Untersuchungsgebiete. Ergänzend sind auch alle automatischen Wetterstationen (n=85), die innerhalb des Nationalparks sowie in der näheren Umgebung installiert sind (siehe hierzu Lieb et al. 2019), verortet. HZB=Hydrographisches Zentralbüro, KFU=Karl-Franzens-Universität Graz, ÖAV=Österreichischer Alpenverein, TUG=Technische Universität Graz, ZAMG=Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ab 01.01.2023 als GeoSphere Austria geführt).

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).

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 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 2021/22: Ende September 2022) reichen, sondern viele Monate oder sogar wenige Jahre zuvor enden. Beispielsweise konnte man am 29.3.2023 auf eHYD für die Messstelle Mallnitz die Abflusswerte (Q-Tagesmittel) nur für die Periode 01.01.1961 bis einschließlich 31.12.2018 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 dreijährigen Zeitraum 01.10.2019 bis 30.09.2022 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: Helmut Spiss, helmut.spiss@tirol.gv.at). Laut Information der drei Hydrographischen Landesdienste handelt es sich bei den Abflussdaten der jüngeren Vergangenheit um geprüfte, also nur vorläufig gültige Daten (d.h. vom Hydrographischen Zentralbüro in Wien noch nicht bestätigt). Von Seiten von Frau Gutsch sowie Herrn Werner wurde in beiden Fällen der konkrete Hinweis auf „Rohdaten/nicht bilanziert“ mitgeteilt. Allgemein gilt auch für die hydrologischen Daten, dass eine Weitergabe an Dritte nicht gestattet ist, wobei Projektbeteiligte ausgenommen sind.

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

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

2.3. Methoden Bereich Gletscherverhalten

(a) Längenänderung

Im Bereich des Nationalparks Hohe Tauern sind aktuell 36 Gletscher im Monitoring-Programm des Gletschermessdienstes des Österreichischen Alpenvereins (ÖAV) enthalten (Abb. 1). Die meisten beobachteten Gletscher liegen in der Glockner- (12), gefolgt von der Venediger- (9) und der Ankogelgruppe (6). Jeweils drei Gletscher werden jährlich in der Granatspitz-, der Schober- und der Goldberggruppe vermessen. Wesentliche Änderungen im Projektzeitraum 2019-2022 betrafen die Herausnahme des schwer zugänglichen Viltragenkeeses aus dem Messprogramm im Sommer 2021 sowie im Gegenzug die Aufnahme des Venedigerkeeses (mit Neuanlage von Endmarken und ersten Ergebnissen für 2021/22) in dieses Messprogramm, sodass in der Venedigergruppe die Anzahl der beobachteten Gletscher über die drei Jahre gleich blieb. Auf der Ebene der drei Flusseinzugsgebiete bietet das aktuelle Beobachtungsnetz des ÖAV-Gletschermessdienstes den Vorteil, dass der jeweils größte Gletscher darin jährlich prinzipiell vermessen wird. Diese sind das Winkelkees für das Seebachtal, das Untersulzbachkees für das Untersulzbachtal sowie das Schlatenkees für das Innergschlöss. Einschränkend muss hierbei jedoch festgehalten 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 Andreas Knittel und Jörg Färber gegenüber alpinen Naturgefahren bis 2022 ausgesetzt war. Im Sommer 2022 konnte zumindest ein neuer Fotostandpunkt auf der Schneewinkelspitze (3016 m) eingerichtet werden, sodass das Winkelkees in Form einer Fotodokumentation des Gletschers wieder in das Messprogramm aufgenommen wurde.

Wie in Lieb et al. (2019) ausführlich dargelegt, hängt es von unterschiedlichen Faktoren ab, wie viele Gletscher in den einzelnen Gletscherhaushaltsjahren tatsächlich vermessen werden können. Beispielsweise sind einschränkende Faktoren die Zugänglichkeit in den Einzeljahren (z. B. Witterungseinfluss; Bildung von Wasserflächen am Gletscherende) oder die Bedeckung der Gletscherstirn durch Schnee aus dem Vorwinter. So lag etwa an vier der fünf stationären Gletscher im Nationalpark Hohe Tauern im Jahr 2020/21 das Gletscherende entweder komplett (Roter-Knopf-Kees, Schobergruppe) oder teilweise (Freiwandkees, Glocknergruppe; Goldberg- und Kleinfleißkees, beide Goldberggruppe) unter Altschnee aus dem vorangegangenen Winter. Der fünfte stationäre Gletscher im Nationalpark Hohe Tauern war offenbar erst knapp vor dem Messtermin ausgeapert (Bärenkopfkkees, Glocknergruppe), sodass noch kein Zurückschmelzen des Eisrandes bis zum Messtermin an diesem Gletscher (21.09.2021) erfolgen konnte. Im Jahr 2021/22 waren hingegen alle Gletscherenden frei von Altschnee und konnten daher auch vermessen werden. An keinem der drei für diesen Endbericht relevanten Sommer (2020, 2021, 2022) waren die Wiederholungsmessung der Gletscherlänge am Obersulzbachkees (Venedigergruppe) möglich, weil weiterhin ein davor liegender See den Gletscher mit vertretbarem Aufwand unerreichbar macht. Für das letzte Haushaltsjahr 2021/22 lagen von 32 Gletschern Längenänderungswerte vor, für zwei Gletscher konnten zumindest Mehrjahreswert ermittelt werden (Roter-Knopf-Kees, Schobergruppe; Landeckkees, Granatspitzgruppe). Für einen weiteren Gletscher (Obersulzbachkees) konnte die Veränderung der Gletscherstirn immerhin auf Basis von Fotovergleichen festgestellt werden. Zum Vergleich lagen für 2020/21 von 30 Gletschern Längenänderungswerte vor und für einen Gletscher konnte zumindest ein Zweijahreswert ermittelt werden (Maurerkees, Glocknergruppe). Für die beiden Jahre zuvor betrug die Anzahl von Gletschern mit Längenänderungswerten 33 (2018/19) bzw. 32 (2019/20). Details zu den drei, für diesen Bericht insbesondere relevanten Gletscherhaushaltsjahren 2019/20, 2020/21 und 2021/22 finden sich in Lieb & Kellerer-Pirklbauer (2021, 2022, 2023).

(b) Massenbilanz

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



Hydrographischen Diensten), dem Nationalpark Hohe Tauern, der Österreichischen Akademie der Wissenschaften sowie der GeoSphere Austria gefördert.

Daten der drei letzten hier relevanten Massenbilanzjahre wurden entweder von der Datenbank des World Glacier Monitoring Service (WGMS 2023) 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 wie beispielsweise für Daten von 2020/21 – Stubacher Sonnblickkees (Zagel et al. 2022), Venedigerkees (Seiser & Fischer 2022) und Zettalunitz/Mullwitzkees (Stocker-Waldhuber & Fischer 2022) – oder 2021/22 (Zagel et al. 2023). Die Massenbilanz des Wurtenkeeses wird im Zweijahresrhythmus berechnet und lag nun auch für die beiden Jahre 2019/20 sowie 2020/21 zum Zeitpunkt der Berichtslegung vor (vgl. Vorjahresbericht), wobei für die Bereitstellung dieser Daten Stefan Reisenhofer von der GeoSphere Austria sehr herzlichst gedankt ist.

Tabelle 4: Gletscher in den Hohen Tauern, an denen Massenbilanzen durch verschiedene Institutionen bestimmt werden (Quelle: WGMS 2023, ergänzt). GeoSphere Austria (bis 31.12.2022 ZAMG); ÖAW=Österreichische Akademie der Wissenschaft; HD-Sbg=Hydrographischer Dienst des Landes Salzburg; Z_GIS= Fachbereich Geoinformatik, Universität Salzburg.

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

2.4. Methoden Bereich Permafrost

Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern sowie in Österreich allgemein wird nicht standardisiert von Institutionen durchgeführt, sondern beruht auf einzelne wissenschaftlich motivierte Initiativen (Kellerer-Pirklbauer et al. 2015). Die darin integrierten Forscher*innen betreiben Permafrost-Monitoring kontinuierlich seit den 1990er Jahren (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- und Permafrost-Messstellen am Inneren Knorrkogel (Venedigergruppe).

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

Für die Darstellung der Bodentemperaturverhältnisse im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten wird primär auf die im Auftrag des Nationalparks Hohe Tauern Kärnten erstellten Berichte für 2019/20 (Kellerer-Pirklbauer et al. 2021a), 2020/21 (Kellerer-Pirklbauer et al. 2022) sowie 2021/22 (Kellerer-Pirklbauer et al. 2023) zurückgegriffen. Die Ergebnisse sind aufgrund der hohen Anzahl an Messstellen auch auf den gesamten Nationalpark übertragbar. So werden durch diese Messstellen unterschiedliche Expositionen, Höhenlagen, Geländekonfigurationen und Substrate abgedeckt. Die Grundaussage der thermischen Reaktion des Permafrostes auf die großräumigen Witterungsverhältnisse der betreffenden Haushaltsjahre kann so nachvollzogen werden. Die den Ausführungen zugrundeliegenden Messungen fanden in den in Abbildung 1 ersichtlichen Untersuchungsgebieten statt.



Tabelle 5: Auflistung der vier lokalen Untersuchungsgebiete im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten und ihrer Instrumentierung mit Miniatur-Temperaturdatenloggern. Lage der Einzelstationen siehe Abbildung 2. Abbildungen 17 und 19 zeigen Auswertungen der jeweils grau hinterlegten Sensoren. HLC=Hinteres Langtalkar-Kögelekar, FAL=Fallbichl, HOT=Hochtor, DOV=Dösen-Säuleck, PAG=Pasterze-Burgstall. GOE-PR ist ein Standort im Gößnitzkar, 2,6 km SW vom Kögelekar. Der Code für jeden Standort besteht (bis auf eine Ausnahme: GOE-PR) aus diesen Bezeichnungen in Kombination mit weiteren, internen Kürzeln; z. B. N=Nord, S=Süd.

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 (b)	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 (d)	407394	205247	330616	5205898	2636	348	8	0
KC-RID (d)	407827	205118	331046	5205759	2769	177	11	0
GOE-PR*	406099	202925	329272	5203604	2598	90	4	0, 30
FAL-LO	413089	214329	336502	5214856	2250	293	16	0, 10, 75
FAL-UP	413279	214303	336692	5214826	2345	332	26	0, 10, 75
HOT	412726	216082	336177	5216616	2580	72	18	0, 10, 60
DOV-LO-S	445487	205927	368710	5205768	2489	220	20	0
DOV-MI-S	445803	206025	369028	5205860	2586	213	19	0
DOV-UP-S (e)	446659	206316	369889	5206132	3002	166	33	0
DOV-LO-N	446018	205072	369222	5204903	2407	342	22	0
DOV-MI-N**	446381	205084	369585	5204907	2501	239	16	0
DOV-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 (e)	0	0
PAG-PR2	404710	215824	328158	5216528	2080	0 (e)	0	0, 10, 40
PAG-FIR (c)	403015	219187	326535	5219927	3049	256	7	0

Anmerkungen zu Tabelle 5: (a) Daten vom Sensor in 100 cm Tiefe; (b) 2020 reaktiver Standort HLC-SO-S; (c) 2020 neu eingerichteter Standort PAG-FIR; (d) 2022 neu eingerichtete Standorte KC-LIA und KC-RID; (e) ebene Lage, deshalb 0°; * Der Standort GOE-PR wurde 2015 eingerichtet und misst in 0 und 30 cm Tiefe. ** für 2021/22 kein geschlossener Datensatz (HLC-RT, DOV-MI-N).

Abbildung 2 und Tabelle 5 geben eine detaillierte Übersicht über die Lage und Instrumentierung der in den vier Permafrost-Untersuchungsgebieten in Kärnten gelegenen Messstandorte. In zwei der Gebiete (Dösen-Säuleck, Hinteres Langtalkar-Kögelekar) werden neben den sonst verwendeten Bodentemperatur-Loggern auch je eine automatische Klimastation und eine automatische optische Kamera betrieben, die bei der Interpretation der Ergebnisse hilfreich sind. Für Einzelheiten zu den Standorten und deren Instrumentierung wird auf Kellerer-Pirklbauer et al. (2018, 2019, 2020, 2021a, 2022, 2023) verwiesen.

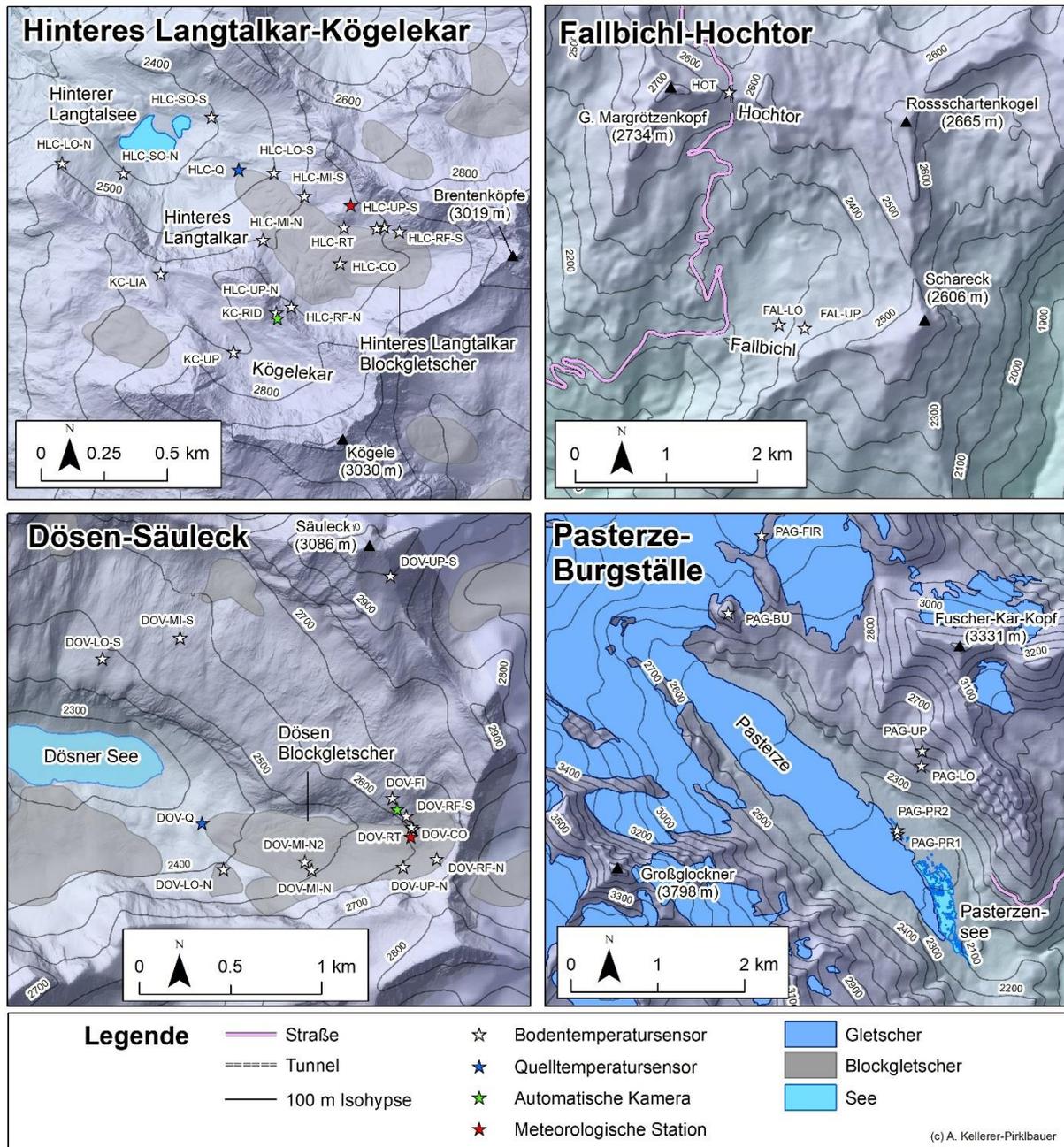


Abbildung 2: Detailkarten der vier Untersuchungsgebiete zum Permafrost-Monitoring im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten mit Lage aller Messstandorte, welche mit Miniatur-Temperaturdatenlogger ausgestattet sind (vgl. Tabelle 5). Standort HLC-SO-S wurde nach 7 Jahren im Jahr 2020 wieder reaktiviert. Logger KC-LIA und KC-RID wurden 2022 neu eingerichtet. Der Standort GOE-PR liegt außerhalb der Kartenausschnitte (Gletschermaske für Pasterze und benachbarte Gletscher nach Buckel et al. 2018).



(b) Permafrost-Bohrlochtemperaturen am Hohen Sonnblick

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

Anzumerken sind folgende Aspekte zum Bohrloch 3 am Hohen Sonnblick für den Zeitraum Sommer 2020 bis 30.9.2022 (pers. Mitteilung Claudia Riedl): Im Sommer 2020 kam es durch einen Blitzeinschlag zur Zerstörung der Temperatursensoren-Messkette der Firma Geoprecision, weshalb für den Zeitraum 8.7.2020 bis 11.10.2020 keine Permafrost-Temperaturdaten vorliegen. Ab 12.10.2020 ging eine neue Temperatursensoren-Messkette in Betrieb, die einwandfrei bis zum 30.06.2021 Temperaturwerte in mehreren Tiefen (bis max. 20 m) erfasste. Ab 01.07.2021 bis einschließlich 21.09.2022 konnten – bedingt durch ein technisches Gebrechen – keine Daten mehr vom untersten Sensor in 20 m Tiefe erfasst werden. Zusätzlich kam es auch noch im Zeitraum 20.7.2021 bis 3.8.2021 (15 Tage) zu einem kompletten Datenausfall, welcher mit den Auswirkungen von Gewittern in Zusammenhang zu bringen ist. Zum Zeitpunkt der Berichtslegung lagen die Datenreihen bis einschließlich 21.09.2022 vor. Schließlich wurde noch von Seiten der GeoSphere Austria 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. 2023). Die den Ausführungen zugrundeliegenden Messungen fanden in den beiden Untersuchungsgebieten Dösen-Säuleck (Döser Blockgletscher) und Hinteres Langtalkar-Kögelekar (Hinteres Langtalkar Blockgletscher) statt (siehe hierzu Abbildung 2).

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

Die Geländearbeiten im Untersuchungsgebiet Innerer Knorrkogel, Venedigergruppe, wurden in den letzten Jahren immer im Zeitraum Ende August bis Anfang September durchgeführt, für 2021 war dies beispielsweise der Zeitraum 04.09.2021 bis 06.09.2021. Die letztjährigen Geländearbeiten wurden zwischen 03.09.2022 und 05.09.2022 durchgeführt. Die Anreise ins Innerschlöss erfolgte am Samstag 03.09.2022. Die eigentliche Geländearbeit am Hochgebirgsstandort Innerer Knorrkogel folgte am Sonntag 04.09.2022, wobei bedingt durch die nahezu schneefreien Bedingungen im gesamten Untersuchungsgebiet die Geländearbeit selbst problemlos verlief. Die Abreise aus dem Innerschlöss erfolgte am Montag 05.09.2022.

Grundsätzlich waren die Schneeverhältnisse im Bereich der Gipfelpyramide Anfang September 2021 und Anfang September 2020 vergleichbar, im Jahr 2022 hingegen deutlich geringer mit nur mehr wenigen, teilweise oberflächlich recht sedimentreichen Restschneeflecken (Abb. 3, 4). Der im Jahr 2021 nicht besuchte Standort F-3K-NE-2871 konnte nach einem Jahr Pause Anfang September wieder problemlos gewartet werden. Die Daten von diesem Standort konnten somit für die beiden letzten Beobachtungsjahre ausgewertet und die älteren Auswertungen damit ergänzt werden. Der Auf- und Abstieg zum bzw. vom Arbeitsgebiet erfolgte wie in den Vorjahren vom Innerschlöss über das Löbbentörl. Die Geländearbeit selbst konnte bei optimalen Witterungsverhältnissen gut durchgeführt werden, wodurch auch zeiteffizient an einem langen Arbeitstag alle 18 Standorte aufgesucht und gewartet werden konnten.



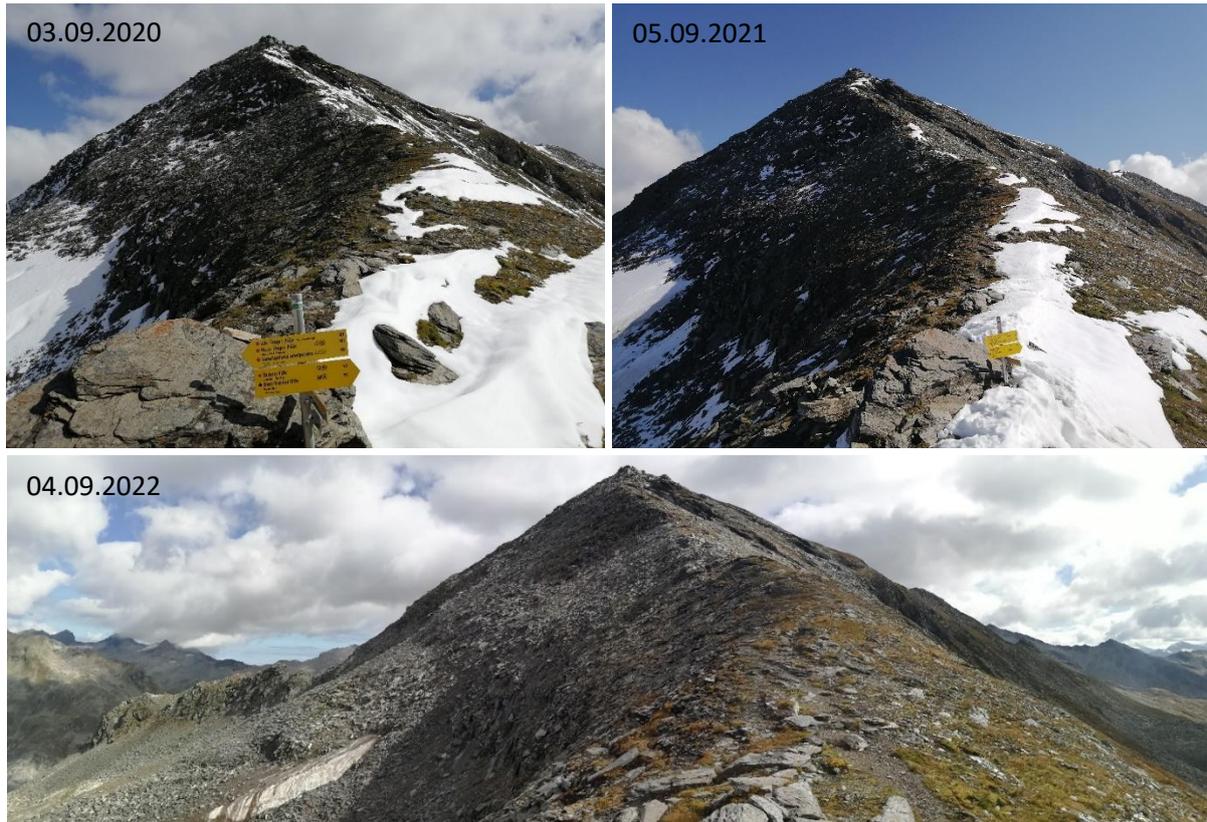


Abbildung 3: Vergleich der Schneebedingungen im Zuge der Geländearbeit am 03.09.2020, 05.09.2021 und 04.09.2022 im Bereich der Gipfelpyramide (hier zu sehen die Süd- und Westflanken) vom Löbbentörl aus betrachtet. Neuschnee war in den höheren Lagen in den Jahren 2020 und 2021 vielerorts anzutreffen und behinderte v.a. im Jahr 2021 an manchen Standorten auch die Geländearbeiten. 2022 verursachte Schnee keine Beeinträchtigung der Arbeit. Fotos: Andreas Kellerer-Pirklbauer.

Die einzelnen Messtandorte wurden im Jahr 2022 in der in Tabelle 6 aufgelisteten Abfolge aufgesucht. Diese Abfolge ähnelt jener der Vorjahre und ergibt sich aus einer möglichst zeiteffizienten Durchführung der Geländearbeit entlang dieser Route. An allen bis auf einem Standort wurden via Funkverbindung die Temperaturdaten von den jeweiligen Datenloggern auf den Computer übertragen und als csv-Datei abgespeichert (siehe Tabelle 6). Ebenso wurde an diesen Standorten die Batterien der Datenlogger getestet.

Aufgrund leerer Batterien kam es zu folgenden Datenausfällen in den Geländesommern 2020 bis 2022: Im Zuge der Geländekampagne 2020 gab es keine leeren Batterien zu beklagen (Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2020). Bei der Kampagne 2021 stellte sich am Standort F-1K-S-2860 heraus, dass mit 15.10.2020 die interne Batterie leer war und für diesen Standort dadurch ein Datenloch für den Zeitraum 15.10.2020 bis 05.09.2021 entstand. An diesem Standort wurde 2021 eine neue Lithiumbatterie eingebaut. Bei der Kampagne 2022 trat auch nur ein kurzes Datenloch auf. Am Standort S-GT-2878 endete die Aufzeichnung bedingt durch Stromversorgungsprobleme am 18.08.2022 und verursachte folglich einen Datenausfall für die Periode 18.08.2022 bis 04.09.2022. Bedingt durch das relativ kurze Datenloch von nur zwei Wochen kann der Ausfall als sehr moderat und für die Auswertung als lediglich wenig relevant im Sinne fehlender Daten eingestuft werden.



Abbildung 4: Blick vom Inneren Knorrkogel auf das Karleskees und den Äußeren Knorrkogel (2920 m) am 04.09.2022. Zu beachten ist das weitgehende Fehlen von Schneefeldern (auch auf dem Gletscher) in der Hochgebirgslandschaft der Hohen Tauern. Foto: Andreas Kellerer-Pirklbauer.

Im Zuge der Wartungsarbeiten 2022 zeigte es sich in Summe, dass an fast allen Standorten problemlos Daten von September 2021 bis Anfang September 2022 aufgezeichnet wurden und nur an zwei Standorten ein Datenausfall zu beklagen war. Neben dem bereits erwähnten Standort mit der leeren Batterie (S-GT-2878) gab es auch wieder Probleme beim Lufttemperaturmessstandort S-AT-2878. Wie sich in der Datenanalyse offenbarte, zeichnete der Datenlogger an diesem Standort (A53A9E) seit September 2020 nur in der Periode 03.09.2020 bis 04.12.2020 problemlos Lufttemperaturdaten auf. Mehrmalige automatische „Resets“ des Datenloggers veränderten die Einstellung der internen Uhr mehrmals, weshalb keine seriös auswertbaren Langzeitdaten von diesem Standort für den Zeitraum 05.12.2020 bis 04.09.2022 vorliegen. Im Zuge der Geländekampagne 2021 wurde der alte Logger A53A9E ausgebaut und der zuvor am Standort S-GT-2878 verwendete Logger (A52194) dort eingebaut. Am Standort S-GT-2878 erfolgte der Einbau eines neuen Loggers mit der Code-Bezeichnung A504F4. Der defekte Logger A53A9E wurde neben diesem neuen Logger am Standort S-GT-2878 für Vergleichszwecke eingebaut (siehe hierzu auch Tabelle 6).

Tabelle 6: Übersicht über die 18 Monitoring-Standorte in der Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels mit Angaben zu Code, interner Loggernummer, Tiefe des Sensors bzw. der Sensoren (bei Dreikanallogger 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_20230412.csv“ und „bearb_daten_metadaten_20230412.csv“.

Code	Log. Nr.	Sensortiefe (cm)	Dateibezeichnung Rohdaten	Dateibezeichnung bearbeitete Daten und ggf. Anmerkung
G-1K-SW-2840	A5223B	0	1-R-1K-SW-2840-A5223B_21-22	01-G-1K-SW-2840-A5223B_18-22
F-1K-W-2840	A52220	0	2-F-1K-W-2840-A52220_21-22	02-F-1K-W-2840-A52220_18-22
G-1K-SW-2860	A5223F	0	3-R-1K-SW-2860-A5223F_21-22	03-G-1K-SW-2860-A5223F_18-22
F-1K-W-2860	A52244	0	4-F-1K-W-2860-A52244_21-22	04-F-1K-W-2860-A52244_18-22
F-3K-W-2869	A538B7	3	5-F-3K-W-2869-A538B7_21-22	07-F-3K-W-2869-A538B7_18-22-3cm
	A538B7	10	5-F-3K-W-2869-A538B7_21-22	07-F-3K-W-2869-A538B7_18-22-10cm
	A538B7	40	5-F-3K-W-2869-A538B7_21-22	07-F-3K-W-2869-A538B7_18-22-40cm
G-1K-NW-2860	A52227	0	6-R-1K-NW-2860-A52227_21-22	06-G-1K-NW-2860-A52227_18-22
G-1K-NW-2840	A52223	0	7-R-1K-NW-2840-A52223_21-22	05-G-1K-NW-2840-A52223_18-22
F-3K-NE-2871	A538AC	3	8-F-3K-NE-2871-A538AC_18-22	08-F-3K-NE-2871-A538AC_18-22-3cm
	A538AC	10	8-F-3K-NE-2871-A538AC_18-22	08-F-3K-NE-2871-A538AC_18-22-10cm
	A538AC	40	8-F-3K-NE-2871-A538AC_18-22	08-F-3K-NE-2871-A538AC_18-22-40cm
S-GT-2886	A521B7	0	9-S-1K-2886-A521B7_21-22	09-S-GT-2886-A521B7_18-22
S-AT-2878	A53A9E (bis 2022) A52194 (ab 2022)	0	10-S-1K-AT-2878-A53A9E_19-22	11-S-1K-AT-2878-A53A9E_19-22; Logger A53A9E war von 2019 bis 2022 im Einsatz, jedoch gab es bedingt durch Loggerprobleme (automatische Reset) wesentliche Datenausfälle, die keine sinnvolle Auswertung der Daten zulassen. Ab 4.9.2022 Logger A52194 dort.
F-3K-S-2871	A538B1	3	11-F-3k-S-A538B1_21-22	12-F-3K-S-2871-A538B1_18-22-3cm
	A538B1	10	11-F-3k-S-A538B1_21-22	12-F-3K-S-2871-A538B1_18-22-10cm
	A538B1	40	11-F-3k-S-A538B1_21-22	12-F-3K-S-2871-A538B1_18-22-40cm
S-GT-2878	A52194 (bis 2022) A504F4 (ab 2022)**	0	12-S-1K-GT-2878-A52194_18-21*	10-S-GT-2878-A52194_18-22. Logger A52194 wurde 2022 zu AT-Logger; ab 4.9.2022 Logger A504F4 dort. Für Vergleichszwecke auch der problematische Logger A53A9E
G-1K-E-2860	A521CB	0	13-R-1K-E-2860-A521CB_21-22	13-G-1K-E-2860-A521CB_18-22
G-1K-E-2845	A5222E	0	14-R-1K-E-2845-A5222E_21-22	14-G-1K-E-2845-A5222E_18-22
F-1K-NE-2840	A521A0	0	15-F-1K-NE-2840-A521A0_21-22	15-F-1K-NE-2840-A521A0_18-22
F-1K-NE-2860	A5226E	0	16-F-1K-NE-2860-A5226E_18-22	16-F-1K-NE-2860-A5226E_18-22
F-1K-S-2860	A5222A	0	17-F-1K-S-2860-A5222A_21-22	17-F-1K-S-2860-A5222A_18-22
F-1K-S-2840	A52230	0	18-F-1K-S-2840-A52230_21-22	18-F-1K-S-2840-A52230_18-22

Anmerkungen: GT=Bodentemperatur, AT=Lufttemperatur, *-neue Batterie 2022, **- an diesem Standort wurde ebenfalls der Resetproblem-behaftete Logger A53A9E zu Vergleichszwecken mit dem dort primären Logger A504F4 eingerichtet.



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 die Software Excel verwendet wurde.

Die Bezeichnung der Dateien in Bezug auf bearbeitete Daten für alle Standorte sowie für jeden Sensor bei 3-Kanaldatenloggern ist der Tabelle 6 zu entnehmen. In der Auswertung in Excel wurde auf die Stundenwerte, Monatsmittelwerte und – für diesen Bericht – insbesondere Jahresmittelwerte fokussiert, um hier ein übersichtliches Bild über die Zustände sowie Unterschiede der Bodentemperatur in den vier Messjahren 2018/19, 2019/20, 2020/21 sowie 2021/22 (in diesem Fall jeweils 01.09. bis 31.08. des Folgejahres) zu erhalten.

(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 liegen in den vier genannten Karen 30 Datenlogger, die alle in rund 10 cm Tiefe im Lockermaterial platziert sind (Details siehe hierzu Keuschnig 2018 sowie Lieb et al. 2019). Die Daten von 13 Standorten im Sattelkar für den Gesamtzeitraum 22.10.2015 bis einschließlich 25.07.2022 wurden uns freundlicherweise von der Firma GEORESEARCH (Ingo Hartmeyer sei an dieser Stelle für die Übermittlung herzlichst gedankt) zur Verfügung gestellt und für den Ergebnisteil ausgewertet. Wie im Kapitel 3.4. detailliert ausgeführt wird, gab es jedoch bis zum 25.07.2022 wesentliche Datenausfälle im Sattelkar bedingt durch Stromversorgungsprobleme einiger Datenlogger.

3. Ergebnisse

3.1. Ergebnisse zum Bereich Witterung und Klima 2019-2022

In der Tabelle 7 sind die Jahreswerte der Lufttemperatur und des Niederschlags für das Projekt- bzw. Gletscherhaushaltsjahr 2021/22 sowie zu Vergleichszwecken für die sieben vorangegangenen Jahre für neun ausgewählte Klimastationen in der Nationalparkregion wiedergegeben. Die drei für diesen Bericht primär relevanten Jahre sind grau hinterlegt. Diese neun Standorte können, wie in Lieb et al. (2019) dargelegt, als repräsentativ für größere Gebiete angesehen werden.

Die Unterschiede der Werte zwischen den Stationen sind bedingt durch die verschiedenen Seehöhen sowie der unterschiedlichen Lagen zum Hauptkamm groß. Die Veränderlichkeit von einem Jahr auf das andere verläuft jedoch relativ gleichsinnig – so ist etwa das relativ niederschlagsreiche Jahr 2019/20 an fünf der neun Stationen (Kolm-Saigurn, Heiligenblut, Malta, Neukirchen, Bramberg) das niederschlagsreichste und an den restlichen vier Stationen (Rudolfshütte, Sonnblick, Gerlos, Felbertauern) das zweitniederschlagsreichste der acht Jahre (wobei die Niederschlagswerte für Felbertauern für die letzten beiden Jahre nahezu identisch waren). Der generelle Witterungscharakter der Jahre wird also mit hinreichender Genauigkeit durch diese Stationen abgebildet.

Tabelle 7: Jahreswerte der Lufttemperatur (T, in °C) und Jahressummen des Niederschlags (P, in mm) in den acht Haushaltsjahren 2014/15 bis 2021/22 (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 für diesen Endbericht relevante Projektzeitraum (* Datenlücke 01.03.2019–31.03.2019). Fettstellung markiert den jeweils höchsten Wert der 3-jährigen Periode. n.d.=fehlende Daten.

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

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



In den Werten der Tabelle 7 ist auch auffallend, dass das Jahresmittel der Temperatur an allen neun Standorten im Jahr 2020/21 im Vergleich zu den sechs Jahren zuvor und dem einen Jahr danach deutlich niedriger war und überall ein Minimum erzielt wurde, was deutlich zum äußerst warmen Jahr 2019/20 kontrastiert. Die beiden Jahre 2019/20 sowie 2021/22 sind hingegen thermisch relativ ähnlich mit Unterschieden von lediglich 0,1°C (Rudolfshütte) bis 0,5°C (Sonnblick) in der Jahresmitteltemperatur. Die Niederschläge waren – von der Jahressumme her betrachtet – im 3-jährigen Zeitraum im Jahr 2019/20 in den meisten Fällen am höchsten und im Jahr 2021/22 an allen Stationen mit entsprechenden Daten am niedrigsten.

Diese Sachverhalte werden sehr gut in den Abbildungen 5 und 6 sichtbar, worin die Werte der drei letzten Beobachtungsjahre für Temperatur und Niederschlag einander gegenübergestellt sind. Bei der Gegenüberstellung der Temperaturwerte dieser drei Jahre fällt ferner auf, dass an allen sieben Stationen mit entsprechenden Daten der Jahresmittelwert im Jahr 2020/21 um rund 1°C niedriger war als im Jahr 2019/20, wobei die negativen Abweichungen zu 2019/20 zwischen 0,7°C (Heiligenblut) und 1,4°C (Malta) betragen. 2021/22 war hingegen relativ ähnlich temperiert wie 2019/20.

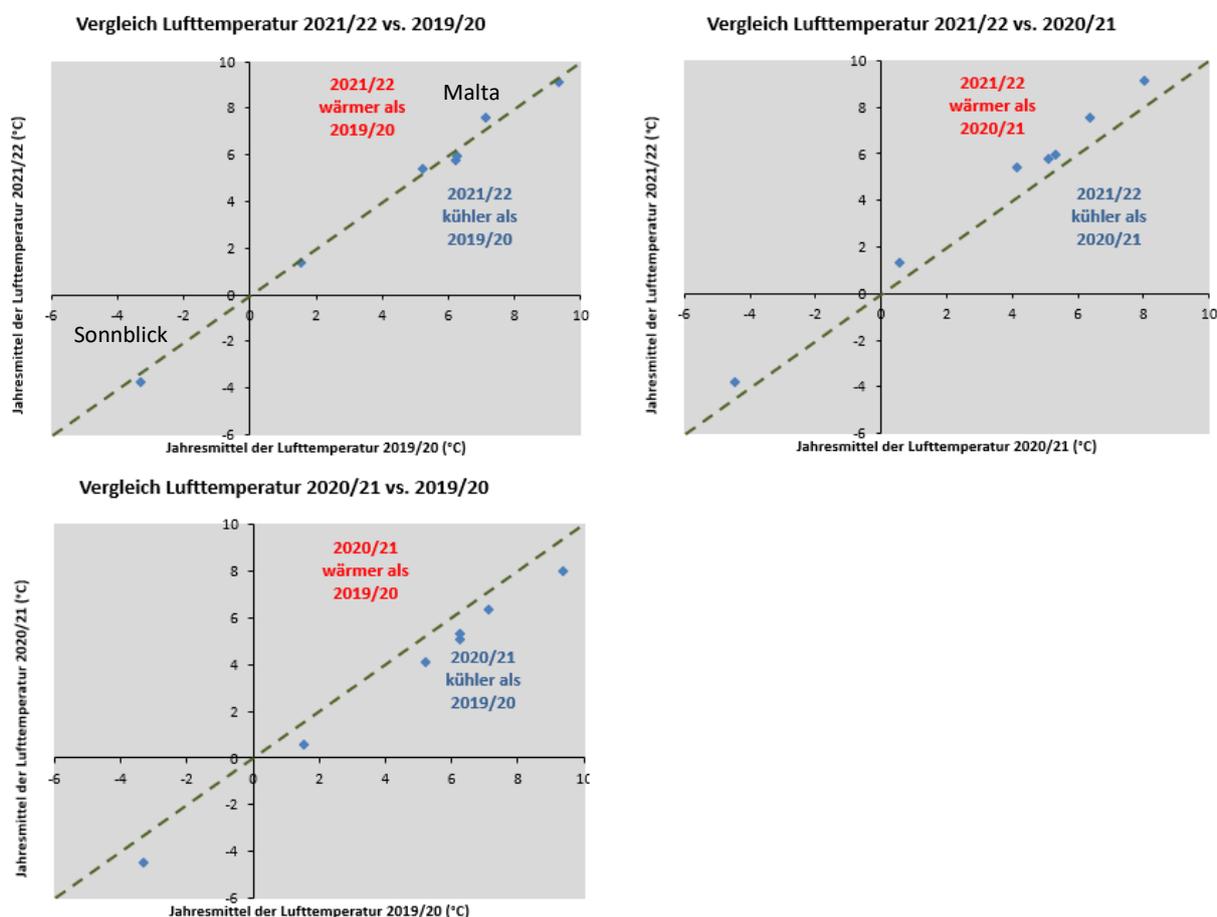


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Jahresmitteltemperaturen von 2021/22 mit 2019/20, 2021/22 mit 2020/21 sowie 2020/21 mit 2019/20 von sieben Klimastationen, deren Daten den Inhalt der Tabelle 7 bilden. Der wärmste Standort ist jeweils die Station Malta, der kälteste in allen drei Jahren die Station Sonnblick.



Beim Vergleich der Niederschlagssummen von 2019/20, 2020/21 und 2021/22 ist – wie schon angedeutet – auffällig, dass an allen neun Stationen das Jahr 2021/22 niederschlagsärmer war als die beiden Vorjahre und somit das trockenste der aktuellen 3-jährigen Projektperiode. An drei Standorten (Rudolfshütte, Kolm-Saigurn, Felbertauern) war 2021/22 sogar das trockenste der gesamten hier dargestellten 8-jährigen Periode von 2014/15 bis 2021/22. Im Gegensatz dazu war 2019/20 an nahezu allen Standorten (nur Felbertauern knapp nicht) im Wesentlichen das niederschlagsreichste von allen drei Jahren. Für Einzeljahre betrachtet wurde das Minimum von den neun Stationen entweder in Heiligenblut (2019/20 und 2021/22) oder Malta (2020/21) gemessen, wobei beide relativ trockene inneralpine Standorte darstellen. Das Maximum der Niederschlagssumme wurde hingegen für alle drei Jahre immer für die Station Rudolfshütte ermittelt.

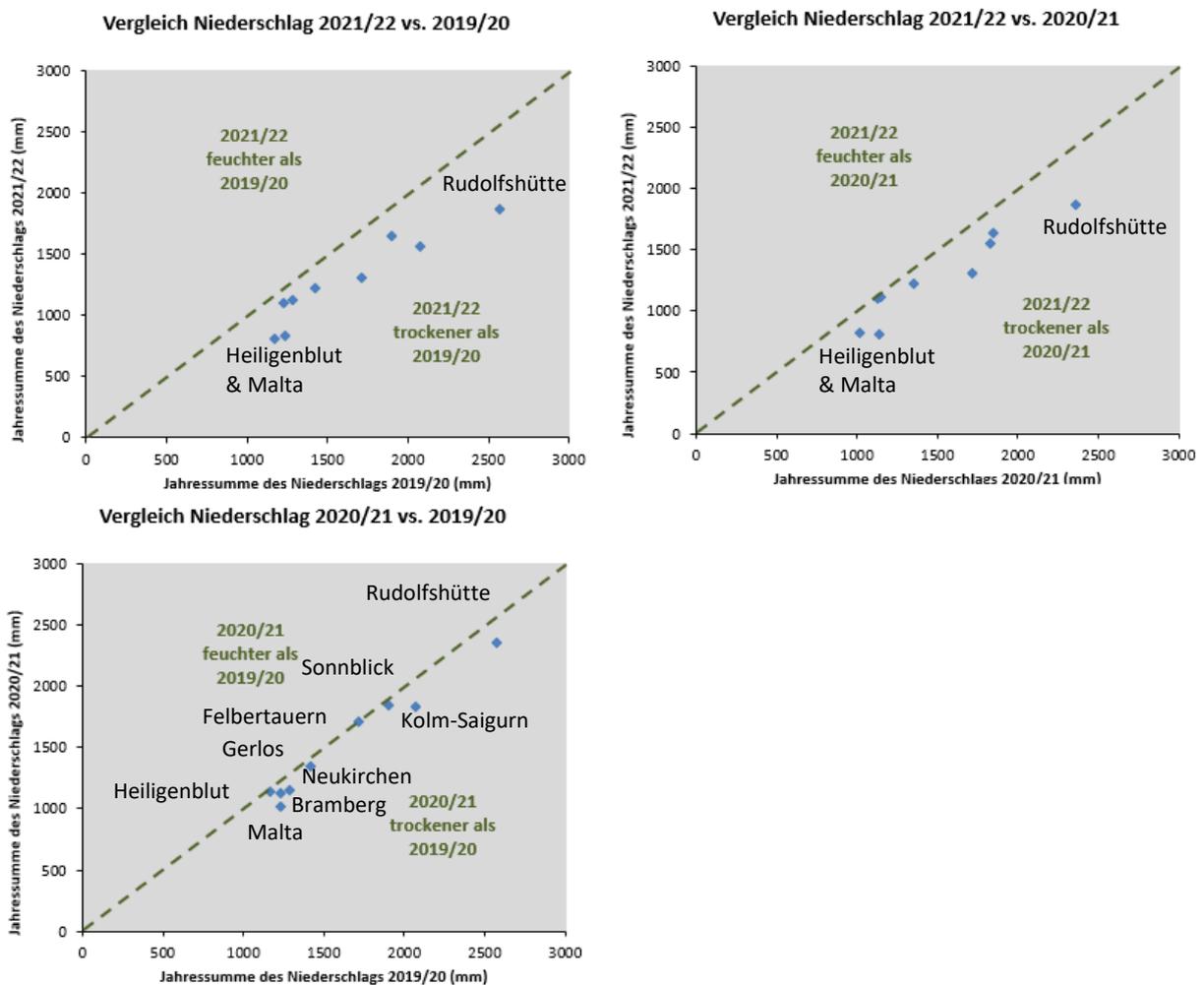


Abbildung 6: Gegenüberstellung der Jahressumme des Niederschlags von 2021/22 mit 2019/20, 2021/22 mit 2020/21 sowie 2020/21 mit 2019/20 von neun Klimastationen, deren Daten den Inhalt der Tabelle 7 bilden.

Die Witterungscharakter der drei Projektjahre 2019/20 bis 2021/22 lässt sich wie folgt charakterisieren:

Projektjahr 2019/20: Der Oktober 2019 war antizyklonal und warm, während der November bezüglich der Temperaturen regional unterschiedlich verlief und im Süden des Tauernhauptkamms ergiebige Schneefälle brachte. In den übrigen Teilen der Hohen Tauern erfolgte der Aufbau der hochwinterlichen Schneedecke langsamer. Insgesamt lagen die Niederschlagsmengen in den Hohen Tauern jedoch deutlich über dem langjährigen Mittel, vor allem aber südlich des Hauptkammes als Folge der langandauernden, intensiven Niederschläge im November 2019. Im Norden des Hauptkammes waren die Schneefälle etwas gleichmäßiger über den Winter verteilt, regional mit Schwerpunkt im Spätwinter. Im Spätwinter stach der sehr milde und sehr



niederschlagsarme April 2020 hervor, jedoch wurde die Ausaperung der Hochregionen in der Folge durch die zyklonale Witterung des Zeitraums zwischen Mai und Juli entscheidend verzögert, sodass für die Gletscher der glaziologische Sommer mit einer für sie günstigen Schneebedeckung begann. So blieben höher liegende Gletscherbereiche vielfach bis in die erste Augustdekade hinein zu mehr als der Hälfte der sichtbaren Fläche schneebedeckt. Im Hochsommer gab es mehrere Schneefallereignisse mit kurzlebigen, die Gletscher einige Tage lang vor Ablation schützenden Schneedecken in den Hochlagen (über 2500–2800 m) Nach dem in den gesamten österreichischen Alpen wirksamen Schneefallereignis vom 31.08./01.09.2020 folgten regional noch zwei weitere im September, ohne den ausgesprochen spätsommerlichen Charakter dieses Monats zu ändern. Als Ende des Gletscherhaushaltsjahres – und somit auch der Ungunstpériode für den Permafrost – kann in den Hohen Tauern der 25.09.2020 festgelegt werden, obwohl tief gelegene Gletscherteile wie etwa des Schlatenkeeses in der ersten Oktoberdekade noch einmal ausaperten.

Projektjahr 2020/21: Der von einem bedeutenden Schneefallereignis verursachte Beginn der winterlichen Akkumulationsperiode war an den meisten Gletschern der 25.09.2020. Es folgte ein wechselhafter, unterdurchschnittlich temperierter Oktober und ein außergewöhnlich milder, niederschlagsarmer November. Im Dezember und über den Jahreswechsel gab es südlich des Alpenhauptkammes reichlich Schneefälle, was noch am Ende des Projektjahres 2020/21 an der weitreichenden Altschneebedeckung so mancher Gletscher in den Hohen Tauern (z.B. Roter-Knopf-Kees, Schobergruppe) zu erkennen war (und somit stationäres Gletscherverhalten bewirkte). An der Alpennordseite setzten hingegen erst im Lauf des Jänners intensive Schneefälle ein, die aber so ergiebig waren, dass sie auch hier die Niederschlagswerte noch weit überdurchschnittlich werden ließen. Der Februar war deutlich zu mild und niederschlagsarm, der März hingegen entsprach annähernd den Erwartungen. Wichtig für Permafrost und die Gletscher waren der April und vor allem der Mai, die beide deutlich zu kühl und letzterer auch sehr schneereich waren: Im Niveau der Gletscher-Nährgebiete in den Hohen Tauern nahmen die Schneehöhen bis Ende Mai zu. Dies war mit ein Grund dafür, dass die Schneedecken der starken sommerlichen Abschmelzung lange trotzen. Im Gegensatz dazu war der Juni viel zu warm und mit unternormalen Niederschlägen in seinem Witterungscharakter ausgesprochen hochsommerlich, sodass es zu einer raschen Reduktion der Schneereserven kam. Der Juli 2021 war geringfügig zu warm, der darauffolgende August etwas zu kühl, der Hochsommer somit insgesamt annähernd normal temperiert. Daher waren die Bedingungen für die Kryosphäre in den Hohen Tauern zwar etwas weniger ungünstig als in den Vorjahren, aber es ist anzumerken, dass auch eine annähernd dem 30jährigen Mittel entsprechende Sommertemperatur so hoch ist, dass sie die Fortsetzung des herrschenden Gletscherschwundes sowie der Degradation von Permafrost bewirkt. Nachdem ein Wettersturz Ende August 2021 die Hochlagen in den Hohen Tauern mit Schnee bedeckt hatte, kam es im deutlich zu warmen und niederschlagsarmen September zum Abbau dieser Neuschneedecke und noch zu bedeutender Eisschmelze, bis mit dem Kaltfrontdurchgang vom 05./06.10.2021 das Gletscherhaushaltsjahr in den Hohen Tauern endete.

Projektjahr 2021/22: Der Oktober 2021 war der niederschlagsärmste seit 2005 (nur rund die Hälfte des langjährigen Mittels). Auch im November fiel in weiten Teilen Österreichs nur wenig Niederschlag, der größte Teil zu Beginn und durch ein Adriatief mit polarem Kaltluftvorstoß am Ende des Monats. In den höheren Lagen waren die Schneemengen im Dezember 2021 im Bereich des langjährigen Mittels oder etwas darüber. Im Jänner und Februar 2022 fiel im Norden des Alpenhauptkammes über- und südlich davon unterdurchschnittlich viel Schnee, wobei der Februar als außergewöhnlich niederschlagsreicher Wintermonat gesehen werden kann. Im März 2022 hingegen verhinderten nur die Niederschläge in den letzten beiden Tagen des Monats, dass es der trockenste März der Messgeschichte wurde. Wichtig für das sommerliche Abschmelzgeschehen auf den Gletschern sowie Schneefeldern war der Mitte März durch Strömungen aus südlicher Richtung erfolgte Eintrag von Sahara-Staub. Dieser blieb in der Schneedecke im Hochgebirge eingelagert und verdunkelte nach Abschmelzen der darüberliegenden Schneeschichten im Sommer die Schneedecke, was deren Abbau durch stärkere Absorption der Strahlung beschleunigte. Der April 2022 war in Bezug auf Niederschläge (etwas zu trocken) und Temperaturen (etwas zu warm) unauffällig, der Mai hingegen der erste von vier Monaten in Folge mit weit überdurchschnittlichen Temperaturen, wodurch die Ausaperung der Gletscher bereits in diesem Monat einsetzte. Insgesamt starteten die Gletscher mit einem Mangel an Winterschnee in die Abschmelzperiode, sodass durch weit überdurchschnittliche Sommertemperaturen der Altschnee rasch dezimiert und schon früh auch Gletschereis

abgeschmolzen wurde. Die höchsten positiven Abweichungen von der Klimanormalperiode 1981-2010 in dieser Zeit waren beispielweise am Sonnblick der Juni mit +3,9°C; Mai +3,0°C und Juli +2,4°C – gefolgt noch von einem immer noch um 1,4°C zu warmem August.

Abbildung 7 zeigt in einer Zusammenschau die Kurven der Monatsmitteltemperaturen aller in Tabelle 7 enthaltenen Stationen mit entsprechenden Daten über den dreijährigen Zeitraum 1.10.2019 bis 30.9.2022. Gut erkennbar ist hierbei, dass (a) die Kurven der Monatsmittelwerte der einzelnen Stationen einen gleichsinnigen Verlauf besitzen, (b) die Station am Sonnblick die – wie zu erwarten ist – bei weitem tiefsten Temperaturen aufweist (im Mittel über die drei Jahre -3,8°C), (c) die Station Rudolfshütte am zweitkühlsten ist (1,2°C), (d) die Stationen Kolm-Saigurn (5,7°C), Gerlos (5,8°C) und Felbertauern (4,9°C) relativ ähnlich sind und (e) die Stationen Heiligenblut (Mittel 7,0°C) und Malta (8,8°C) die höchsten Jahresmittelwerte für diesen Zeitraum aufweisen, was im Wesentlichen der regelhaften Temperaturabnahme mit der Höhe entspricht. Hervorzuheben sind die auffallend tiefen Monatsmittel im Jänner 2021. An sechs der sieben Standorte, war dies der kälteste der hier gezeigten 36 Monate (die Ausnahme hier ist Heiligenblut, bei welcher der Dezember 2020 um 0,2°C kälter war).

Demgegenüber stehen der außergewöhnlich warme Winter 2019/20, der auch als der zweitwärmste Winter der 254-jährigen Messgeschichte der ZAMG bzw. GeoSphere Austria (nach jenem von 2006/07) gilt. Ähnlich warm war der Winter 2021/22. Die höchsten Monatsmittelwerte in dem 3-jährigen Beobachtungszeitraum wurden an allen sieben hier relevanten Stationen im Juli 2022 ermittelt. Der absolut höchste Monatsmittelwert in dem 3-jährigen Beobachtungszeitraum wurde für die Station Malta im Juli 2022 mit 19,9°C errechnet.

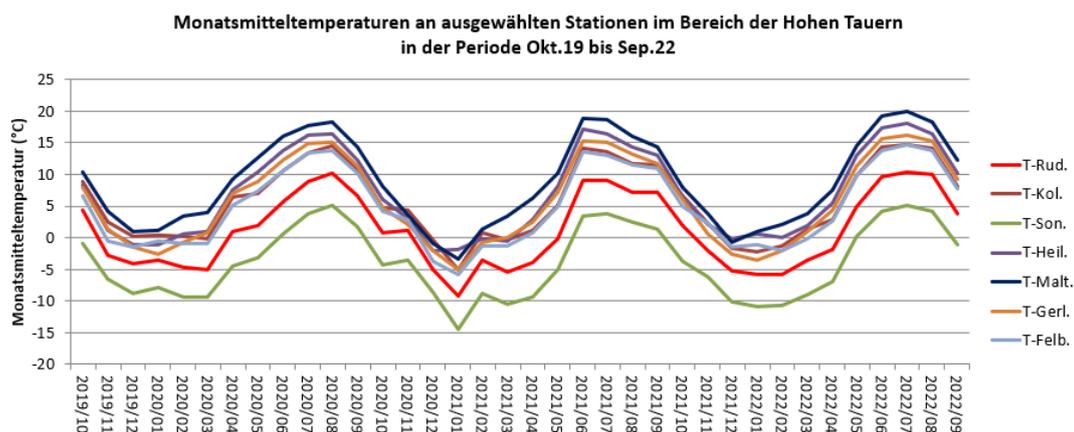
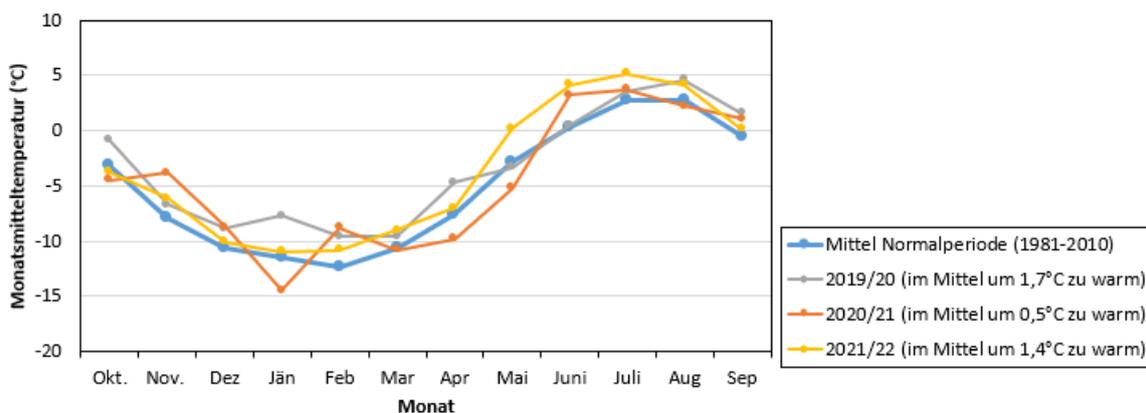


Abbildung 7: Monatswerte der Lufttemperatur im Zeitraum Oktober 2019 bis September 2022 an den sieben Klimastationen Rudolfshütte, Kolm-Saigurn, Sonnblick, Heiligenblut, Malta, Gerlos und Felbertauern.

Die Monatswerte der Temperatur an der Station Sonnblick in den Projektjahren 2019/20, 2020/21 und 2021/22 werden in Abbildung 8 und Tabelle 8 den entsprechenden Werten der Klimanormalperiode 1981-2010 gegenübergestellt. Die Abweichungen der Jahresmitteltemperatur für die drei Jahre zur Klimanormalperiode 1981-2010 sind ebenfalls angeführt. Klar ersichtlich wird dabei, dass alle drei Jahre im Mittel gering bis deutlich übertemperiert waren. Ganz besonders fallen hierbei das erste und das letzte der drei Beobachtungsjahre auf, wobei im Messjahr 2019/20 insbesondere der warme Oktober 2019, Jänner 2020, Februar 2020 und April 2020 in Erscheinung treten. Im zweiten hier relevanten Beobachtungsjahr waren einige Monate deutlich über- und einige deutlich untertemperiert. Demgegenüber waren es im letzten Jahr vor allem die bereits erwähnten hohen Sommertemperaturen, die auch das Jahresmittel für 2021/22 deutlich nach oben verschoben haben. Bemerkenswert ist auch, dass im Jahr 2021/22 einzig der Oktober 2021 unterdurchschnittlich temperiert war – 11 Monate dieses letzten Jahres waren gering (0,5°C Jänner) bis extrem (3,9°C Juni) über dem langjährigen Mittel. Die drei Beobachtungsjahre 2019/20 bis 2021/22 können somit aus thermischer Sicht als leicht (2020/21) bis äußerst (die beiden anderen Jahre) abträglich für Schnee, Gletscher und Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern angesehen werden.

Sonnblick: Vergleich der Monatsmittelwerte der Gletscherhaushaltsjahre 2019/20, 2020/21 und 2021/22 mit jenen der Klimanormalperiode 1981-2010



Sonnblick: Temperaturanomalien in den Gletscherhaushaltsjahren 2019/20, 2020/21 und 2021/22 bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010

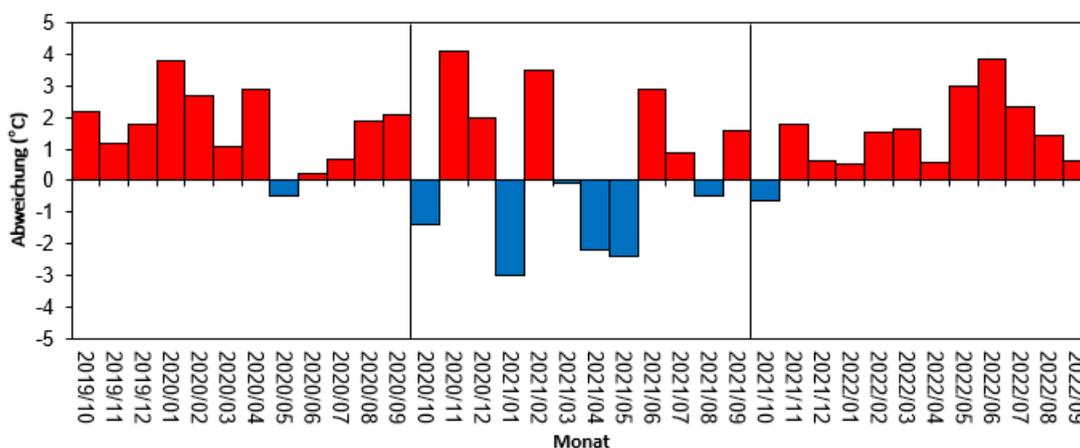


Abbildung 8: Vergleich der Monatsmittelwerte der Lufttemperatur (in °C) der Gletscherhaushaltsjahre 2019/20, 2020/21 und 2021/22 mit jenen der Klimanormalperiode 1981–2010 an der Station Sonnblick (3109 m). Oben: dargestellt als Mittelwerte in °C; Unten: dargestellt als Abweichung zur Klimanormalperiode 1981-2010.

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

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 (Kalenderjahre) des Niederschlags für den Zeitraum 1973–2022 sowie ein entsprechender linearer Trend dargestellt. Wie die Grafik gut zeigt, ist an dieser Station weder ein Trend noch eine signifikante Änderung der Jahressummen des Niederschlags zu erkennen, jedoch weisen diese eine starke Variabilität auf: Der Mittelwert im 50-jährigen Beobachtungszeitraum liegt bei 1068 mm, das Maximum wurde im Jahr 1979 mit 1440 mm gemessen, während das Minimum (2002) mit 731 mm nur knapp die Hälfte des Maximalwertes betrug.

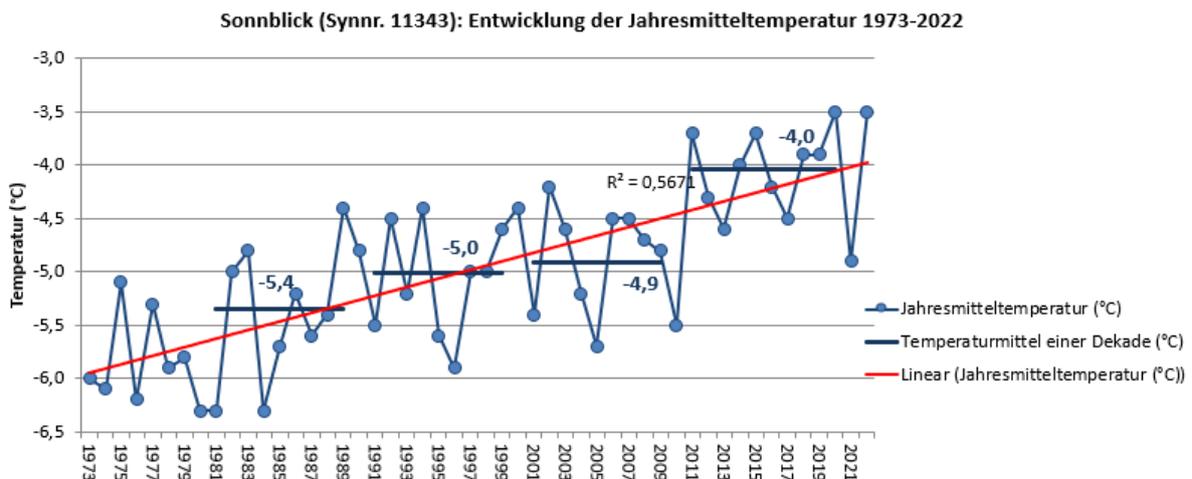
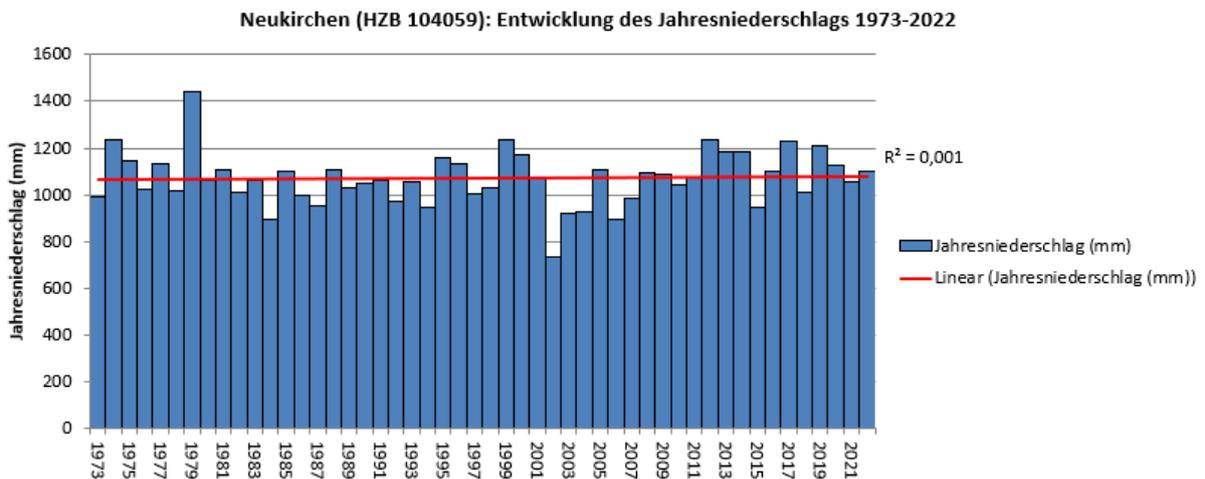


Abbildung 9: Langzeitentwicklung von Niederschlag (Station Neukirchen) und Temperatur (Station Sonnblick). Entwicklung der Jahreswerte (Kalenderjahre) im Zeitraum 1973–2022 und entsprechende Trends. Niederschlag: Keine signifikanten Veränderungen erkennbar. Temperatur: Klarer Erwärmungstrend. Für die Temperatur sind zusätzlich auch Dekadenmittelwerte (1981–1990, 1991–2000, 2001–2010 und 2011–2020) angegeben.

Zusätzlich ist in der Abbildung 9 unten auch die Entwicklung der Jahresmittel der Lufttemperatur an der Station Sonnblick über denselben 50-jährigen Zeitraum dargestellt. Ganz deutlich ist unabhängig von großen Schwankungen von Jahr zu Jahr ein klarer Erwärmungstrend zu erkennen. In sechs der letzten zehn Jahren betrug die Jahresmitteltemperatur $\geq -4^\circ\text{C}$, wobei die beiden Kalenderjahre 2020 und 2022 als die absolut wärmsten hervorstechen: Mit jeweils $-3,5^\circ\text{C}$ stellen sie auch einen neuen Stationsrekord in der gesamten Messreihe seit 1887 dar. Das bisher wärmste Jahr war am Sonnblick das Jahr 2011 mit einem Jahresmittel von $-3,7^\circ\text{C}$. Das Jahr 2021 war hingegen wieder besonders kalt mit einer Jahresmitteltemperatur, die den Mittelwert der Dekade 2001–2011 ($-4,9^\circ\text{C}$) entspricht. Abbildung 9 gibt auch die Veränderung der Dekadenwerte der Temperatur an der Station Sonnblick wieder: Lag der 10-Jahresmittelwert im Zeitraum 1981–1990 noch bei $-5,4^\circ\text{C}$, so liegt dieser Wert in der jüngsten Dekade bei nur mehr $-4,0^\circ\text{C}$.

3.2. Ergebnis Bereich Abfluss 2019-2022

Die Abflusswerte der drei Pegel Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) wurden für den Zeitraum 1.10.2014–30.9.2022 ausgewertet. Abbildung 10 zeigt die Tagesmittel der gemessenen Abflüsse an den drei Stationen für den achtjährigen Zeitraum. Die schon bei Lieb et al. (2019) beschriebenen Merkmale des Abflussgeschehens kommen besonders gut auch in Tabelle 9 mit Minima im Februar oder März (in Ausnahmen Jänner) und Maxima in den Monaten Juni oder Juli (in Ausnahmen Mai oder August) zur Geltung. Insgesamt verliefen die hier dargestellten Beobachtungsjahre in Bezug auf die Abflüsse zumindest bis Mitte Juli 2021 recht unauffällig, sieht man von einzelnen Hochwasserspitzen (am Pegel Innerschlöss mit Abflusswerten von $> 25 \text{ m}^3/\text{s}$ im Sommer 2019 bzw. sogar $> 30 \text{ m}^3/\text{s}$ im Sommer 2020) ab.

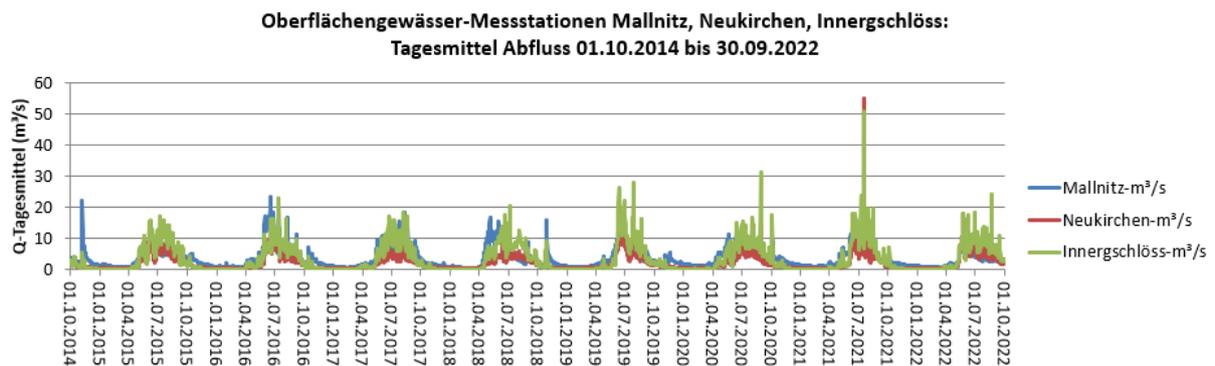


Abbildung 10: Vergleich der gemessenen mittleren täglichen Abflüsse (Q in m^3/s) der drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im achtjährigen Zeitraum 01.10.2014–30.09.2022.

Extrem hohe Werte des mittleren täglichen Abflusses wurden am 18.7.2021 an den benachbarten Messstellen Neukirchen und Innerschlöss gemessen, wobei an beiden – zumindest für die Periode 01.10.2014 bis 30.09.2022 – jeweils neue Maximalwerte erzielt wurden (Pegel Neukirchen: $55,02 \text{ m}^3/\text{s}$; Pegel Innerschlöss: $50,94 \text{ m}^3/\text{s}$). Die allgemein schweren Hochwässer im Juli 2021 in Österreich wurden durch das Tiefdruckgebiet „Bernd“ verursacht, welches im Zeitraum vom 12. bis 19.07.2021 über Mitteleuropa wirksam war und großen Schaden in mehreren Ländern Mitteleuropas verursachte (Junghänel et al. 2021). Am Pegel Mallnitz wirkte sich dieses Tiefdruckgebiet weniger stark aus, wobei dort am 18.07.2021 immerhin $17,14 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen wurden (Rekord an diesem Pegel im oben genannten Zeitraum ist $23,49 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen am 17.06.2016). Das letzte Beobachtungsjahr 2021/22 erscheint auf den ersten Blick wenig auffällig, wenn man von den gedämpften Maxima in der Abbildung 10 absieht.

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

Interessant ist auch der Vergleich der Abflussmengen in den Einzeljahren. Im Einzugsgebiet Innergschlöss variierte die Summe des Jahresabflusses in den sieben Messjahren um 16,4%, während der relative Unterschied zwischen dem maximalen und minimalen Jahreswert an den Pegeln Neukirchen zumindest 27,5% und Mallnitz sogar 43,5% beträgt. Im Falle des Pegels Mallnitz wird dieser große Schwankungswert stark durch den negativen „Ausreißer“ im trockenen Jahr 2021/22 beeinflusst. Relativ schwach ausgeprägte Monatsmaxima gab es an allen drei Pegeln im letzten Beobachtungsjahr. Für den Pegel Innergschlöss wurde sogar ein neuer Negativrekord des monatlichen Abflusses für die Periode 2014-2022 ermittelt.

Tabelle 9: Jahresmenge des Abflusses (Q) an den Abflussmessstationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innergschlöss (Tirol) im Zeitraum 01.10.2014–30.09.2022; Gesamtabfluss in den einzelnen Gletscherhaushaltsjahren sowie Monatsminima und Monatsmaxima. Grau hinterlegt ist der für diesen Endbericht relevante Projektzeitraum.

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)

Abbildung 11 stellt die Jahresgänge der drei Beobachtungsjahre für die drei Standorte dar. Die untere Grafik in dieser Abbildung zeigt zur besseren Veranschaulichung die Verhältnisse bei niedrigen Abflüssen von 0 bis 6 m³/s. Auffällig sind die nahezu gleichförmigen, relativ ruhigen Verläufe (Auslauf des Basisspeichers) in den Winter- und Frühjahrsmonaten bis etwa Anfang April und darauffolgende markante Schwankungen verbunden mit Niederschlagsereignissen oder Schneeschmelze an allen drei Stationen. Am Pegel Innergschlöss kam es im dreitägigen Zeitraum 17. bis 19.07.2021 zu mittleren Abflusswerten von 36,8, 50,9 und 21,6 m³/s. Dieser Pegel ist generell durch die großflächige Vergletscherung im Einzugsgebiet in sehr hohem Ausmaß von der Gletscherschmelze beeinflusst (wenn auch das Schlatenkees in den letzten Jahren immer wieder als negativer österreichischer Rekordgletscher bei den Gletscherrückgängen in Erscheinung trat; Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2022, 2023).

Ähnlich hohe Abflusswerte wurden an der Station Neukirchen im selben dreitägigen Zeitraum mit 22,7, 55,0 und 34,7 m³/s ermittelt. An der Station Mallnitz spiegelte sich im Wesentlichen dieses Muster von sehr hohen Werten an diesen drei Tagen mit 12,5, 17,1 und 13,8 m³/s wider. An allen drei Stationen wurde für die aktuelle Berichtsperiode am 18.7.2021 der deutlich höchste Wert gemessen. Stimmig dazu wurden sehr hohe Tagesniederschlagssummen am 17.7.2021 an den Stationen Rudolfshütte (96,9 mm), Gerlos (94,0 mm), Felbertauern (82,4 mm), Kolm-Saigurn (51,0 mm), Bramberg (53,0 mm), Neukirchen (42,6 mm) und Heiligenblut (38,2 mm) gemessen. An den Stationen Malta und Sonnblick hingegen zeigten die Niederschlagsmesser für den 17.7.2021 nur 4,7 mm bzw. 17,0 mm Niederschlag an. Nach den sehr hohen Abflusswerten im Juli 2021 ebte das Abschlussgeschehen wieder langsam ab. Ab ca. Mitte August 2021 nahm der Abfluss stetig ab, was gut den ausgeprägten Auslaufkurven in diesem Zeitraum entspricht.

In Bezug auf die geringsten mittleren täglichen Abflussmengen in der gesamten Periode von 2014/15 bis 2021/22 fällt auf, dass an zwei der drei Pegel das Minimum auf das hydrologische Jahr 2021/22 fällt. Am 06.04.2022 war dies am Pegel Neukirchen (0,11 m³/s) und in der Periode 03. bis 08.03.2022 am Pegel Innerschlöss der Fall. Am Pegel Mallnitz wurde das Tagesminimum für den 26.02.2018 mit 0,56 m³/s bestimmt. In den letzten drei Messjahren betrug am letztgenannten Pegel das Minimum zumindest 0,7 m³/s, welches im Zeitraum 09. bis 13.03. (und somit nahezu zeitgleich wie am Pegel Innerschlöss) erreicht wurde. Dies zeigt einmal mehr die außerordentlich niederschlagsarmen Bedingungen im letzten Haushaltsjahr.

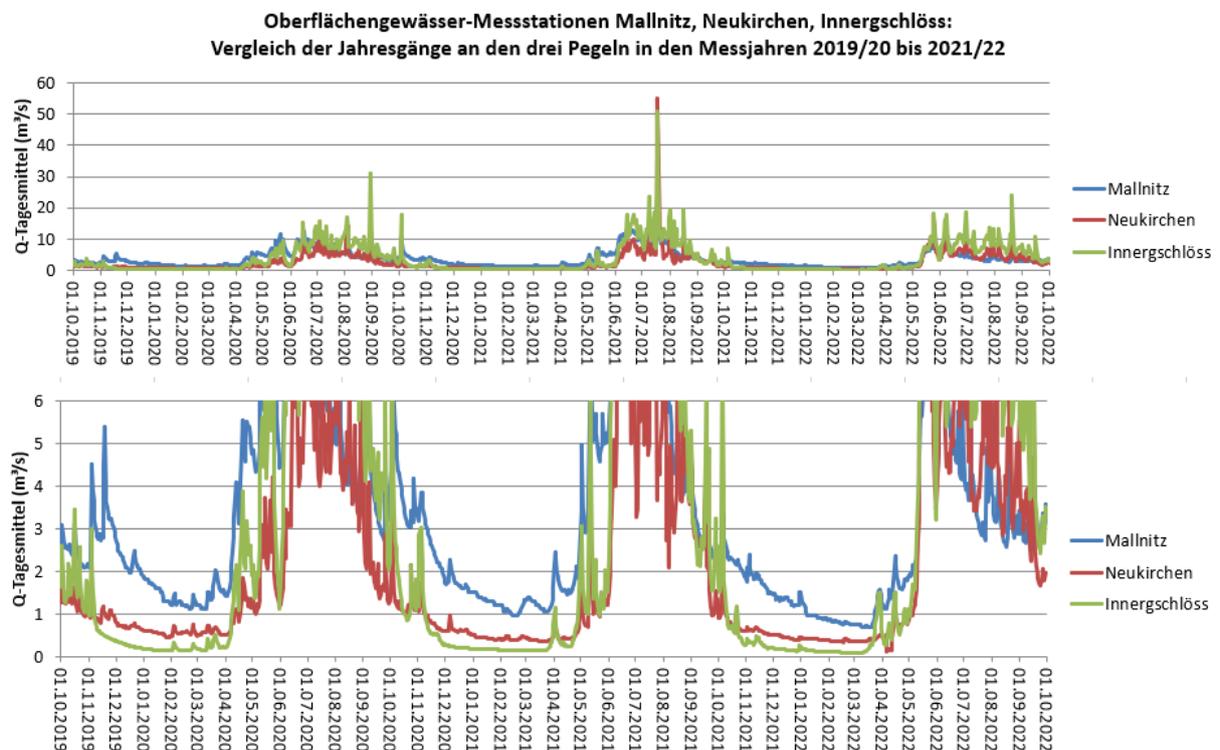


Abbildung 11: Vergleich des gemessenen mittleren täglichen Abflusses (Q im m³/s) an den drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im Zeitraum 01.10.2019–30.09.2022. Die untere Kurve ist ein Ausschnitt aus der oberen mit veränderter Skalierung der Ordinate und fokussiert auf den Bereich bis zu 6 m³/s.

Abbildung 12 zeigt die mittleren monatlichen Abflüsse – wiederum für die drei relevanten Beobachtungsjahre und für alle drei Stationen – im Zeitraum Okt. 2019 bis Sept. 2022. Klar erkennbar sind hier zum einen die alljährlich ähnlichen Bedingungen in den Wintermonaten (vor allem Dez.–Apr.). Zum anderen ist auffällig, dass die Monatssummen in den übrigen Monaten stark von Jahr zu Jahr, aber auch von Standort zu Standort variieren, was wiederum auf lokale Effekte – Niederschlag bzw. Schnee-/Eisschmelze – zurückzuführen ist. Auffallend ist der hohe Wert für Innerschlöss im Monat Juli 2021, der ein Maximum auch für den Zeitraum ab 2014/15 darstellt. Im letzten der drei Jahre ist für denselben Pegel auffällig, dass die Monatssummen für Juni bis September sich deutlich von jenen der anderen beiden Pegel abheben, was in diesem Fall mit der – relativ – verstärkten Wasserzufuhr durch Gletscherschmelze, bedingt durch die sehr gletscher-abträglichen sommerlichen Temperaturen zu erklären ist.

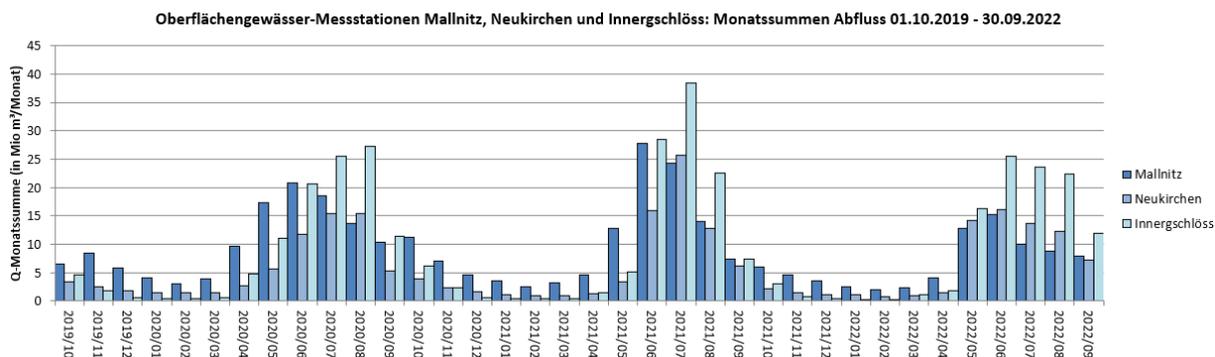


Abbildung 12: Monatssummen des Abflusses (Q) der drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im Zeitraum 01.10.2019 – 30.09.2022.

Tabelle 10 beinhaltet die auf mm Wassersäule umgerechneten Abflussmengen pro Jahr, die unmittelbar mit den Niederschlagswerten in den drei Untersuchungsgebieten verglichen werden können, wobei jedoch zu beachten ist, dass nur Stationsdaten der Niederschlagssummen (und somit nur an den Stationen gültig) und nicht gemittelte Gebietsniederschläge (repräsentativ für die drei Einzugsgebiete oberhalb der jeweiligen Pegel) vorliegen. Besonders die Werte an den Stationen Neukirchen und Innerschlöss sind stark von einer von den ungünstigen Bedingungen für Gletscher verursachten Gletscherspende (siehe Kapitel 3.3) beeinflusst. In allen Jahren wurde für den Pegel Innerschlöss die bei Weitem höchste Abflusshöhe ermittelt. Auffallend ist für das vorletzte Beobachtungsjahr auch der – zumindest in den hier gezeigten acht Jahren – neue Rekord der Abflusshöhe an dieser Station mit erstmals über 2900 mm, was ziemlich genau dem Doppelten des Wertes von Mallnitz entspricht. Schließlich sticht die Abflusshöhe für die Station Mallnitz für 2021/22 hervor. Erstmals wurde an diesem Pegel eine Abflusshöhe von unter 1000 mm ermittelt, rund 260 mm weniger als 2018/19.

Tabelle 10: Abflusshöhe (Quotient aus Durchflussvolumen pro Beobachtungsperiode und Einzugsgebietsfläche) in mm für die sechs glaziologischen Haushaltsjahre 2014/15–2019/20 in den drei Einzugsgebieten oberhalb der Stationen Mallnitz (Einzugsgebiet 85,3 km²), Neukirchen (40,5 km²) und Innerschlöss (39,3 km²). Grau hinterlegt die drei Jahre des aktuellen Projektzeitraumes.

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	941	1805	2739

3.3. Ergebnis Bereich Gletscherverhalten 2019-2022

(a) Längenänderung

Tabelle 11 listet die Ergebnisse der Längenänderungsmessungen an den 36 vom Gletschermessdienst des Alpenvereins erfassten Gletschern im Nationalpark Hohe Tauern nicht nur für die aktuelle Berichtsperiode 2019/20 bis 2021/22, sondern auch für die vier glaziologischen Haushaltsjahre zuvor auf, um die Ergebnisse der letzten drei Haushaltjahre in einen etwas längeren zeitlichen Kontext einzubetten. Die Ergebnisse, geordnet nach Gebirgsgruppen, zeigen zum einen deutliche Schwankungen von Jahr zu Jahr – was zu erwarten ist –, aber zum anderen auch von Gebirgsgruppe zu Gebirgsgruppe. So waren beispielsweise die Werte der Längenänderung in der Ankogelgruppe in den drei Messjahren 2017/18–2019/20 auffallend niedrig, wohingegen die Werte in den anderen fünf Gebirgsgruppen im Wesentlichen als normal einzustufen sind. Die in dieser Tabelle unten angegebenen Mittelwerte basieren auf einer unterschiedlichen



Anzahl von Gletschern von Jahr zu Jahr und sind somit nur bedingt miteinander vergleichbar. Nichtsdestotrotz wird hiermit klar gezeigt, dass das letzte Beobachtungsjahr mit einem Mittelwert von -28,7 m (was zufälliger Weise genau dem Mittelwert aller 78 in Österreich im Jahr 2021/22 vermessenen Gletscher entspricht) das bei weitem schlechteste der drei Berichtsjahre war. Relativ dicht dahinter liegt das Jahr 2016/17. Das zumindest in diesem siebenjährigen Zeitraum günstigste – aber immer noch deutlich gletscherabträgliche – Jahr war 2020/21 mit im Mittel „nur“ -11,3 m.

Tabelle 11: Auflistung der im Nationalpark Hohe Tauern durch den Österreichischen Alpenverein jährlich vermessenen Gletscher mit Angaben zur Längenänderung in den Gletscherhaushaltsjahren 2015/16 bis 2021/22. Lage siehe Abbildung 1. Grau hinterlegt sind die für diesen Endbericht relevanten drei Gletscherhaushaltsjahre.

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

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

Allgemein kann für die drei Gletscherhaushaltsjahre 2019/20 bis 2021/22 gesagt werden, dass erwartungsgemäß in allen drei Haushaltsjahren Gletscherrückzüge bei Weitem dominierten und nur vereinzelt stationäres Verhalten vorkam. Die einzige positive Längenveränderung im Sinne eines (suggerierten) Vorstoßes gab es seit 2015 im Messjahr 2018/19: An der Stubachtaler Seite der Glocknergruppe lag mit dem Maurerkees der einzige Gletscher Österreichs, der im Beobachtungszeitraum 2018/19 einen Vorstoß (+2,2 m) zu verzeichnen hatte. Dieser vermeintliche Vorstoß begründete sich jedoch nicht aus einem aktiven Vorrücken, sondern aus dem Nach-Vorne-Kippen eines Teils der Gletscherstirn (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2020). Die in Tabelle 11 zusammengefassten Daten spiegeln einen dynamisch voranschreitenden Gletscherschwund wider, wobei die einzelnen Maxima (wie etwa 2016/17 am Winkelkees) meist durch Eiszerfallserscheinungen an den Gletscherstirnen verursacht werden. Auffällig ist auch, dass die großen Gletscher im Nationalpark Hohe Tauern, wie das Schlatenkees oder die Pasterze, in den letzten Jahren immer zu den „Spitzenreitern“ bei den Längenverlusten im Nationalpark selbst aber auch österreichweit gehörten.

Für das Messjahr 2020/21 kann zusammengefasst werden, dass von den 33 Gletschern mit Daten oder zumindest Hinweisen zur Längenänderung (entweder Zweijahreswerte oder Fotovergleich) immerhin fünf Gletscher auf Basis von Messungen oder Beobachtungen (Stirn zum Zeitpunkt der Messung teilweise oder komplett unter Altschnee) als „stationär“ eingestuft wurden, d. h. eine Längenänderung innerhalb von +/- 1 m aufwiesen. Diese fünf Gletscher sind: Freiwandkees und Bärenkopfkees, beide Glocknergruppe, Roter-Knopf-Kees, Schobergruppe, sowie Kleinfleißkees und Goldbergkees, beide Goldberggruppe. Ein Gletscher lag mit -1,3 m nur knapp über diesem Wert (Totenkopfkees, Glocknergruppe). Im letzten Beobachtungsjahr war dies nicht der Fall, alle 34 Gletscher mit Jahres- (n=32) oder Mehrjahresdaten (n=2) verloren an Länge. Die vier Spitzenreiter im aktuell letzten Messjahr waren dabei das Schlatenkees (-89,5 m), die Pasterze (-87,4 m), das Schmiedingerkees (-62,6 m) sowie das Untersulzbachkees (-50,2 m). Rückzüge von weniger als 10 m gab es im letzten Jahr zumindest für das Gößnitzkees (-1,9 m), das Hornkees (-2,3 m), das Untere Riffelkees (-5,4 m) sowie das Hochalmkees (-7,2 m).

Zur besseren Vergleichbarkeit der fünf Messjahre zeigt Abbildung 13 die mittlere Längenänderung von jenen 20 Gletschern im Gebiet des Nationalparks Hohe Tauern, von denen für alle sieben hier gezeigten Gletscherhaushaltsjahre lückenlos Daten vorliegen. Im Gegensatz zum ersten Zwischenbericht (Kellerer-Pirklbauer & Lieb 2021) reduzierte sich somit die Anzahl der hier berücksichtigten Gletscher um zwei, da einerseits das Viltragenkees im Jahr 2021 aus dem Gletschermessprogramm genommen werden musste, da dort keine sinnvolle Längenänderungsmessung mehr möglich war und andererseits das Rote-Knopf-Kees in der jüngeren Vergangenheit nur mit einem Mehrjahresrückzugswert erfasst ist.

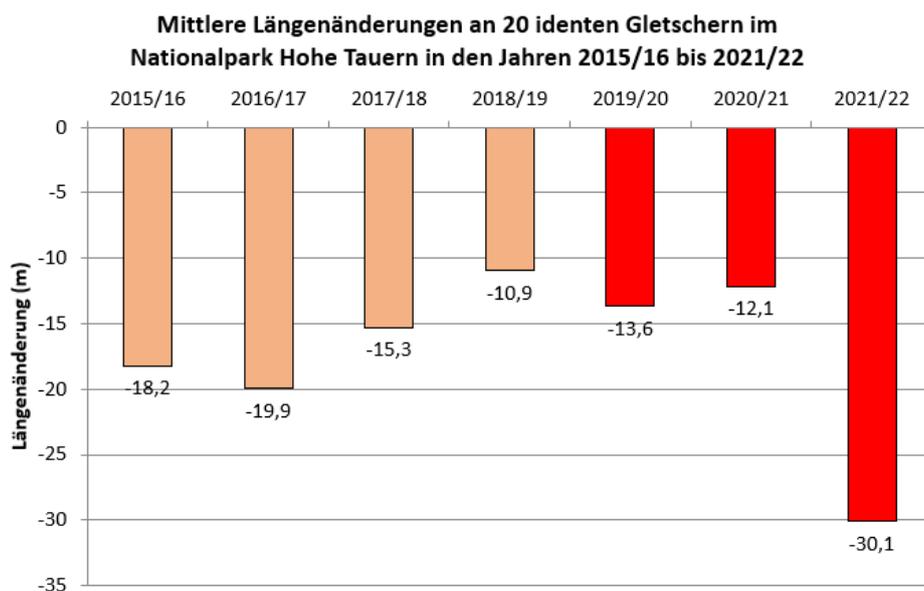


Abbildung 13: Mittlere Längenänderungen an 20 Gletschern im Nationalpark Hohe Tauern, von denen für die siebenjährigen Periode 2015/16 bis 2021/22 Längenänderungsdaten lückenlos vorliegen (siehe Tabelle 11). In Rot gehalten die drei für diesen Bericht relevanten Jahre. Weitere Erläuterung siehe Text.

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

Auf der räumlichen Ebene der drei Flusseinzugsgebiete zeigt die Abbildung 14 die Längenänderungen der drei Gletscher Winkelkees (Seebachtal), Untersulzbachkees (Untersulzbachtal) und Schlatenkees (Innergshlöss). Im Vergleich dazu ist auch die Pasterze in der Glocknergruppe, immer noch der größte Gletscher Österreichs, für die – in diesem Fall – elf Gletscherhaushaltsjahre 2011/12–2021/22 dargestellt. Diese längere Zeitreihe wurde an dieser Stelle gewählt, da es beim Winkelkees in den letzten mittlerweile schon fünf Gletscherhaushaltsjahren zu messtechnischen Einschränkungen kam, die eine erfolgreiche Durchführung der Messungen dort nicht erlaubten und somit ein längerfristiges Bild der Entwicklung bei diesem Gletscher nicht gezeigt werden kann. Dies offenbart aber auch die Problematik der Gebietsverantwortlichen, die alljährlich hier versuchen, „ihre“ wertvollen langjährigen Messreihen fortzuführen. Das Winkelkees wird ab 2022 zumindest wieder durch Fotovergleiche beobachtet, sodass zukünftig Angaben zumindest über die Tendenz der Längenänderung zur Verfügung stehen werden, während am Viltragenkees die Messungen im Sommer 2021 komplett eingestellt werden mussten.

Diese Grafik zeigt das zum Teil sehr unterschiedliche Verhalten der vier Gletscher in den einzelnen Jahren. Besonders stechen die extremen Rückzugswerte der Pasterze im Jahr 2011/12 (mit fast -100 m) und der Extremwert vom Winkelkees im Jahr 2016/17 mit -118,1 m hervor. Demgegenüber wurden am Schlatenkees 2021/22 mit -89,5 m und am Untersulzbachkees 2017/18 mit -53,0 m die maximalen Rückzugsbeträge der letzten elf Messjahre gemessen. Am wenigsten zog sich im Mittel über die elf Jahre das Winkelkees (-27,8 m) zurück, wobei jedoch die letzten fünf Messjahre nicht berücksichtigt werden können und insofern dieser Wert nur wenig aussagekräftig ist. Knapp dahinter liegt das Untersulzbachkees mit -36,1 m im Mittel (ein Jahr ohne Daten), gefolgt vom Schlatenkees mit -46,7 m (ohne Datenlücke). Der höchste Mittelwert für die 11-Jahres-Periode wurde für die Pasterze mit -56,9 m ermittelt (ebenfalls keine Datenlücke). Allgemein kann somit festgehalten werden, dass die Gletscher im Nationalpark Hohe Tauern – so wie auch in anderen Teilen Österreichs und der Alpen – sich stetig in höhere Lagen zurückziehen, dieser Rückzug jedoch starken jährlichen Schwankungen unterworfen ist und nicht nur klimatisch, sondern auch von lokalen Gegebenheiten wie z. B. Seebildung (Kellerer-Pirkbauer et al. 2021b) oder Abreißen von Gletscherteilen bestimmt ist.

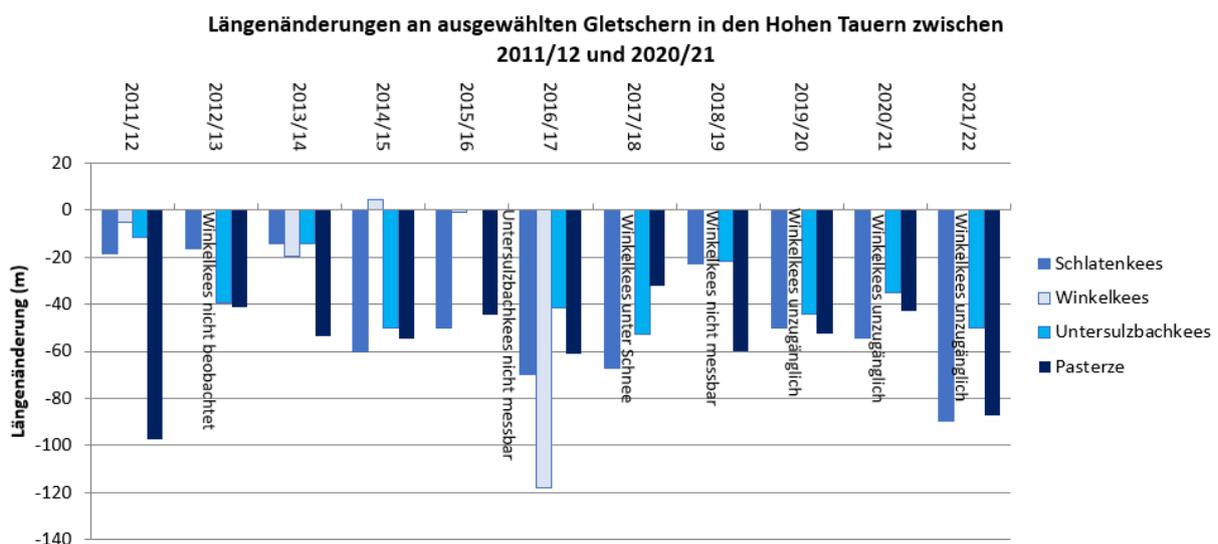


Abbildung 14: Längenänderungen an den vier Gletschern Schlatenkees (Venedigergruppe), Winkelkees (Ankogel-Hochalmspitzgruppe), Untersulzbachkees (Venedigergruppe) und Pasterze (Glocknergruppe) im Zeitraum 2011/12–2021/22. Erläuterungen im Text.

(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 im Abschnitt über die Längenänderungen dokumentierten langfristig vorherrschenden gletscherungünstigen Bedingungen. Mit keiner einzigen Ausnahme im hier gezeigten siebenjährigen Beobachtungszeitraum 2015/16 bis 2021/22 konnten für alle hier betrachteten Gletscher ausschließlich negative bis hochnegative Massenbilanzen festgestellt werden. Nichtsdestotrotz kann das vorletzte Beobachtungsjahr mit einer spezifischen Massenbilanz von -505 mm im Mittel der sieben Gletscher als relativ gletschergünstigstes Jahr gesehen werden. In den Jahren zuvor betrug dieser Mittelwert -797 mm (2019/20), -816 mm (2018/19), -1463 mm (2017/18), -1535 mm (2016/17) sowie -837 mm (2015/16). Außerordentlich sticht aus dieser Reihe das letzte Gletscherhaushaltsjahr hervor, in dem alle hier behandelten Gletscher neue Rekorde an spezifischen Massenverlusten aufwiesen – im Mittel betrug die mittlere spezifische Massenbilanz der sieben Gletscher für dieses Jahr -2783 mm, was 1,8-mal so viel ist wie der Höchstwert der hier gezeigten Jahre davor. Die höchsten Negativwerte wiesen dabei das Wurtenkees sowie das Stubacher Sonnblickkees auf. Somit kann festgehalten werden, dass auf Basis der Massenbilanzdaten an den sieben hier berücksichtigten Gletschern und in Bezug auf die letzten sieben Jahre das vorletzte Beobachtungsjahr das bei Weitem günstigste von allen in diesem Zeitabschnitt war, wohingegen das letzte Beobachtungsjahr als „dramatisch“ in Bezug auf Eismassenverlust – somit gleich den Längenänderungen – eingestuft werden muss.

Tabelle 12: Spezifische Massenbilanzen an sieben Gletschern im Bereich des Nationalparks Hohe Tauern für die sieben Gletscherhaushaltsjahre 2015/16–2021/22 in mm Wasseräquivalent. Grau hinterlegt sind die für diesen Endbericht relevanten drei Gletscherhaushaltsjahre.

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

In Abbildung 14 wird – ähnlich wie in Abbildung 13 für Längenänderungen – wiederum deutlich, dass die Unterschiede in den Einzeljahren zwischen den Gletschern sehr hoch sein können. Auffallend ist aber in den Werten von Tabelle 12, dass an fünf der sieben Gletscher die zweitgrößte negative spezifische Massenbilanz im Gletscherhaushaltsjahr 2016/17 erzielt wurde (Goldbergkees, Kleinfleißkees, Pasterze, Stubacher Sonnblickkees und Zettalunitz/Mullwitzkees) – die größte war an allen 2021/22. An zwei Gletschern wurde 2017/18 der zweitgrößte Massenverlust ermittelt (Venedigerkees und Wurtenkees). Dem stehen die – relativ gesehen – günstigeren Jahre für die Gletscher in den Hohen Tauern gegenüber. An fünf Gletschern wurden die relativ niedrigsten spezifischen Massenbilanzen im Jahr 2020/21 ermittelt (Goldbergkees, Kleinfleißkees, Pasterze, Venedigerkees und Wurtenkees), an den beiden anderen Gletschern war dies im Berichtsjahr 2019/20 (Stubacher Sonnblickkees, und Zettalunitz/Mullwitzkees) der Fall.

Im Mittel der sieben Jahre weisen die drei Gletscher Goldbergkees (-1372 mm), Stubacher Sonnblickkees (-1374 mm) und Pasterze (-1355 mm) ähnlich hohe Werte auf. Darüber liegt im Mittel nur das Wurtenkees, mit einem Mittelwert von -1648 mm. Zu den im Mittel relativ gut abschneidenden Gletschern gehört hingegen das Kleinfleißkees mit -1150 mm, das Zettalunitz/Mullwitzkees mit -1048 mm und schließlich das Venedigerkees mit „nur“ -789 mm. Der siebenjährige Mittelwert über alle sieben Gletscher beträgt -1248 mm, was einer aufsummierten gemittelten spezifischen Massenbilanz von -8736 mm Wassersäule entspricht. Diese mehrjährigen Ergebnisse zeigen, dass regionale Gegebenheiten die Extremwerte, aber auch die Variabilität des Massenverlustes stark beeinflussen, die Gesamttendenz einer in höchstem Maße gletscherungünstigen Witterungs- und Klimaentwicklung davon aber unberührt bleibt. Abbildung 15 zeigt die Jahresmassenbilanzen seit 2015/16, exemplarisch für vier Gletscher in den Hohen Tauern. Aus dieser Grafik wird visuell noch deutlicher, dass für die Gletscher 2021/22 geradezu als „Katastrophenjahr“ einzustufen ist.

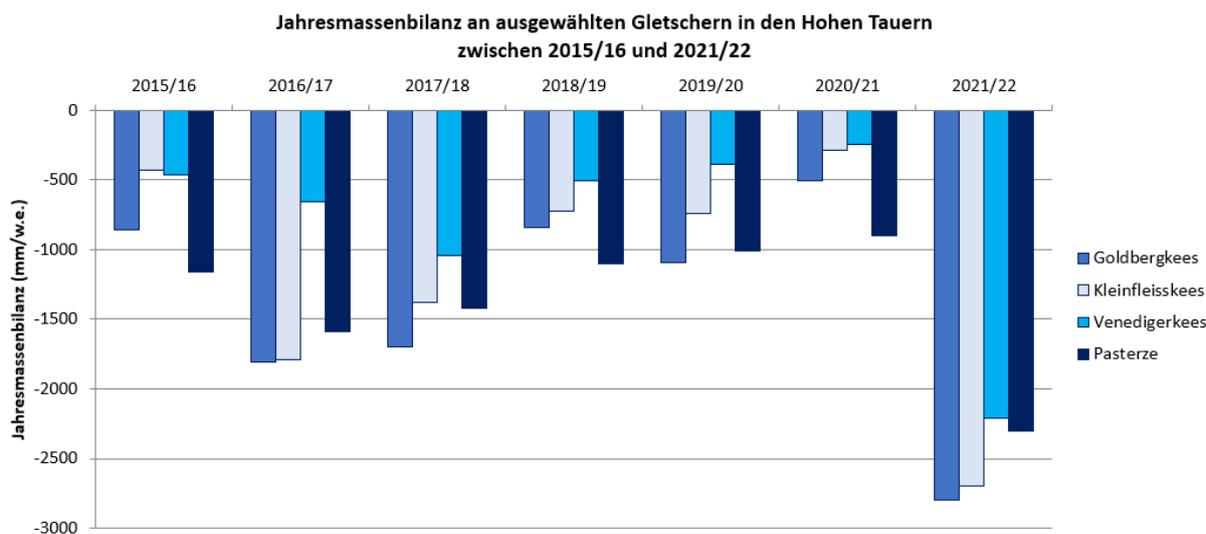


Abbildung 15: Spezifische Jahresmassenbilanz an vier ausgewählten Gletschern in den Hohen Tauern zwischen 2015/16 und 2021/22. Die Jahreswerte sind in mm Wasseräquivalent (mm w.e.) angegeben.

3.4. Ergebnis Bereich Permafrost 2019-2022

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

Dieses Messnetz wird durch die Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, betreut. Die an den Standorten ermittelten Jahresmitteltemperaturen für die drei Messjahre 2019/20 bis 2021/22 sind in Abbildung 16, aufgeteilt auf die vier Teilgebiete, dargestellt. Hierbei ist anzumerken, dass als „Messjahr“ in diesem spezifischen Monitoringprogramm die Periode 01.08. bis 31.07. des Folgejahres definiert ist, was damit zu begründen ist, dass entweder im August oder im September die einzelnen Messstandorte aufgesucht und gewartet werden und folglich die aktuellen Jahresdatenreihen häufig Ende Juli enden. Der Standort, der mit ND (= no data) gekennzeichnet ist, weist in allen drei Jahren Datenlücken auf, die keine Ermittlung von entsprechenden Jahresmittelwerten zuließen. Alle vier Teildiagramme sind auf der Ordinate gleich skaliert und damit direkt vergleichbar. Der Großteil der in diesem Kapitel präsentierten Ergebnisse sind den Berichten von Kellerer-Pirklbauer et al. (2021a, 2022, 2023) entnommen.

Im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar (inklusive dem Vergleichsstandort im benachbarten Gößnitzkar; GOE-PRO) standen im Projektzeitraum 16 Standorte unter Beobachtung, wobei einer der Standorte (KC-LO) keine für diese Analyse brauchbare Daten lieferte. Für die meisten der 15 verbleibenden Standorte wurden in den drei Messjahren positive Jahresmittelwerte auf Basis der gemessenen Stundenwerte berechnet. Negative Jahresmitteltemperaturen wurden teilweise für zwei Standorte (HLC-MI-N, HLC-CO) und für alle drei Jahre für einen Standort (KC-UP) ermittelt. Das kälteste der drei Jahre war an 11 Standorten das Jahr 2020/21, an zwei Standorten 2021/22 und an einem Standort 2019/20. Das wärmste der drei Jahre war hingegen in 10 Fällen 2019/20 und an 5 Standorten 2021/22. Der Mittelwert der Jahresmitteltemperatur an den bis zu 15 Standorten mit entsprechenden Werten ist mit 1,3°C für 2019/20 sowie mit 1,5°C für 2021/22 recht ähnlich. Im Jahr 2020/21 lag dieser Mittelwert bei nur 1,0°C. Das zweite Beobachtungsjahr war im Arbeitsgebiet Hinteres Langtalkar-Kögelekar somit für den Permafrost das günstigste von den dreien hier behandelten.



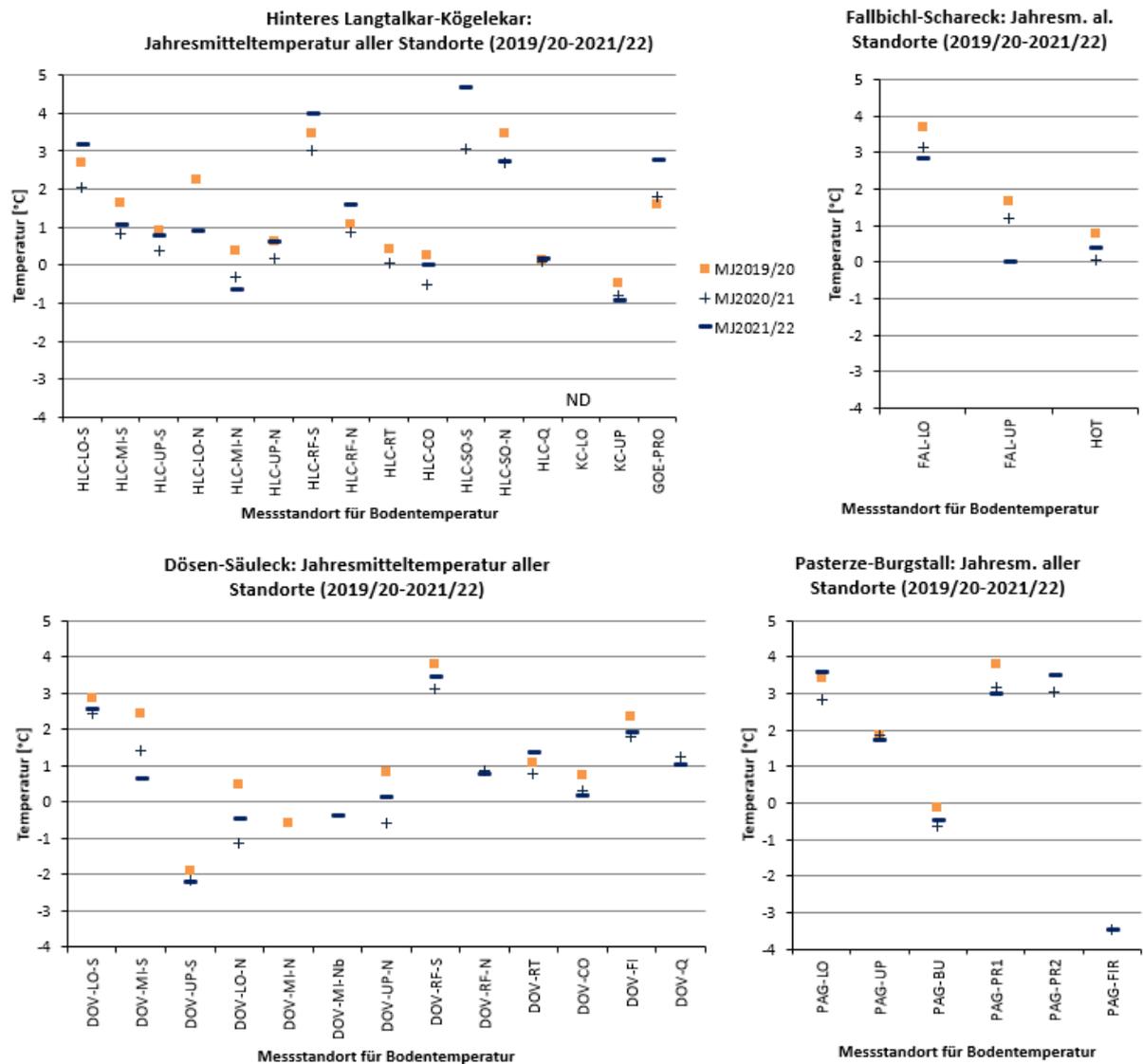


Abbildung 16: Jahresmitteltemperatur an/nah der Bodenoberfläche aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten für die drei Beobachtungsjahre 2019/20 bis 2021/22 (jeweils 01.08. bis 31.07. des Folgejahres). Standort KC-LO (ND/no data) hat aufgrund von Schneebedeckung und einem technischen Gebrechen keinen einzigen Jahresdatensatz.

Im Arbeitsgebiet Fallbichl-Schareck stehen drei Standorte unter Beobachtung. Es wurden dort zweimal Jahresmittelwerte im Bereich von 0°C oder knapp darunter ermittelt, zumeist dominieren positive Jahresmittelwerte. Das wärmste Jahr war in allen drei Fällen 2019/20, das kälteste hingegen entweder 2020/21 (einmal) oder 2021/22 (zweimal). Der Mittelwert der Jahresmitteltemperatur an den 3 Standorten mit entsprechenden Werten war 2021/22 am niedrigsten (1,1°C), 2019/20 am höchsten (2,1°C) und lag im Jahr dazwischen in der Mitte (1,5°C). Im Falle des zweiten Arbeitsgebietes war das letzte Jahr das für den Permafrost thermisch günstigste.

Im dritten Arbeitsgebiet – Dösen-Säuleck – standen in den letzten drei Jahren 13 Standorte unter Beobachtung. Im Falle dieses Arbeitsgebietes wurden für fünf dieser Standorte auch negative Jahresmitteltemperaturen ermittelt, ansonsten lagen die Jahresmittelwerte immer gering bis deutlich unter 4°C. Das wärmste Jahr im Sinne des Jahresmittelwertes war in 8 von 11 Fällen 2019/20, an zwei Standorten 2020/21 und an einem Standort das Jahr 2021/22. Da kälteste Jahr war entweder 2020/21 (sechsmal) oder 2021/22 (fünfmal). Zwei Standorte mit jeweils nur einem Jahreswert ließen keine Einschätzung zu. Im Mittel für das Arbeitsgebiet Dösen-Säuleck waren 2020/21 und 2021/22 gleich temperiert (je 0,7°C), das erste Jahr war hingegen im Mittel deutlich wärmer (0,5°C).



Schließlich konnten noch im vierten und letzten Arbeitsgebiet – Pasterze-Burgstall – für sechs Standorte Jahresmittelwerte errechnet werden, wobei zumindest ein Standort jeweils leicht negative Mittelwert der Jahresbodentemperatur (PAG-BU) und ein zweiter (der 2020 eingerichtete Standort PAG-FIR) 2020/21 und 2021/22 mit $-3,46^{\circ}\text{C}$ bzw. $-3,48^{\circ}\text{C}$ die für beide Jahre tiefsten Jahresmittelwerte der Temperatur des gesamten Messnetzes aufwies. An drei der vier Standorte mit Dreijahresdaten war 2019/20 das wärmste Jahr (einmal war dies 2021/22), wohingegen jeweils an zwei der vier Standorte 2020/21 bzw. 2021/22 die tiefsten Temperaturen ermittelt wurden. Im Mittel verhält sich das letzte Arbeitsgebiet auch recht ähnlich zu den anderen dreien: 2020/21 und 2021/22 waren in etwa gleich temperiert ($1,1^{\circ}\text{C}$ bzw. $1,3^{\circ}\text{C}$), während im ersten Jahr das Mittel mit $2,2^{\circ}\text{C}$ deutlich darüber lag.

Im Mittel über alle vier Arbeitsgebiete gesehen war 2019/20 am wärmsten (Mittel aller Standorte mit entsprechenden Jahresdaten $1,48^{\circ}\text{C}$), gefolgt von 2021/22 ($1,15^{\circ}\text{C}$) und 2020/21 ($0,97^{\circ}\text{C}$). Ungeachtet wesentlicher Unterschiede bedingt durch lokale topographische Gegebenheiten (Abb. 16) kann somit festgehalten werden, dass im hier behandelten dreijährigen Zeitraum eine allgemeine Permafrostungunst im Kärntner Teil des Nationalparks vorherrschte, wobei das erste der drei Jahre als relativ Permafrost-ungünstig und das mittlere Jahr als relativ günstig eingestuft werden können.

Abbildung 17 zeigt die Tagesmitteltemperaturen der vier in Tabelle 5 grau hinterlegten Standorte (einer pro Untersuchungsgebiet) in den drei Messjahren 2020/21. Zur besseren Unterscheidung der Perioden innerhalb des Messjahres mit (d. h. relativ geringe Schwankungen der Bodentemperatur) und ohne (d. h. starke Schwankungen) thermischer Schneepufferwirkung wurde jeweils auch die Lufttemperaturkurve der Klimastation im Hinteren Langtalkar für denselben Zeitraum hinterlegt. Zu den einzelnen Graphiken sind folgende wesentliche Punkte anzumerken:

(1) Im Jahresgang am Standort HLC-UP-N ist deutlich zu erkennen, dass sich eine winterliche Schneedecke in allen drei Wintern dämpfend auf Schwankungen der Bodentemperatur auswirkte, wobei diese dämpfende Wirkung 2021/22 etwas geringer ausfiel als in den beiden Vorjahren und daher tiefere Temperaturen bei gleichzeitig höheren Schwankungen registriert wurden. Das letzte Beobachtungsjahr 2021/22 ist durch geringe bis keine Schwankungen von Anfang November 2021 bis Ende Mai 2022 charakterisiert. Der Standort HLC-UP-N wird somit auch in schneearmen Wintern wie dem letzten von einer saisonalen Schneedecke beeinflusst.

(2) Im Jahresgang am Standort FAL-UP sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Messjahren sehr markant ausgeprägt, wobei v. a. die beiden Messjahre 2019/20 und 2020/21 deutlich anders ausgeprägt sind als das letzte Jahr. Diese beiden Messjahre zeigen im Gegensatz zu 2021/22 eine wirksame Dämpfung der Bodentemperatur von 6 bis 7 Monaten; im Messjahr 2020/21 sogar bis zum 10.06.2021. Der Winter 2021/22 war deutlich schneeärmer. Dies äußert sich in einem zur Lufttemperatur weitgehend parallelen Verlauf der Bodentemperaturkurve. Die tiefsten Tagesmitteltemperaturen in der gezeigten dreijährigen Periode wurden somit mit Werten von bis zu $-12,2^{\circ}\text{C}$ im Winter 2021/22 erreicht.

(3) Am Standort DOV-UP-S ist an keinen der drei Messjahre eine wesentliche Dämpfung der Lufttemperatur durch eine Schneedecke zu erkennen. Die Bodenoberflächentemperatur zeigt deutliche Schwankungen über den gesamten Messzeitraum mit einem Minimum von $-14,6^{\circ}\text{C}$ im Winter 2021/22 und einem Maximum von $14,1^{\circ}\text{C}$ im Sommer 2022.

(4) Ganz ähnlich liegen die Verhältnisse am Standort PAG-UP. Hier kam es in keinem der drei Jahre zur Ausbildung einer langandauernden Schneedecke, welche eine vollständige Entkoppelung der Luft- von der Bodentemperatur hätte bewirken können. Die Folge sind auch hier hohe Temperaturschwankungen über den gesamten Messzeitraum, worin die Minima jeweils zwischen -10 und -12°C lagen (im Winter 21/22 bei $-11,7^{\circ}\text{C}$). Der höchste Tagesmittelwert im dreijährigen Zeitraum wurde an diesem Standort am 21.07.2022 mit $14,2^{\circ}\text{C}$ gemessen.

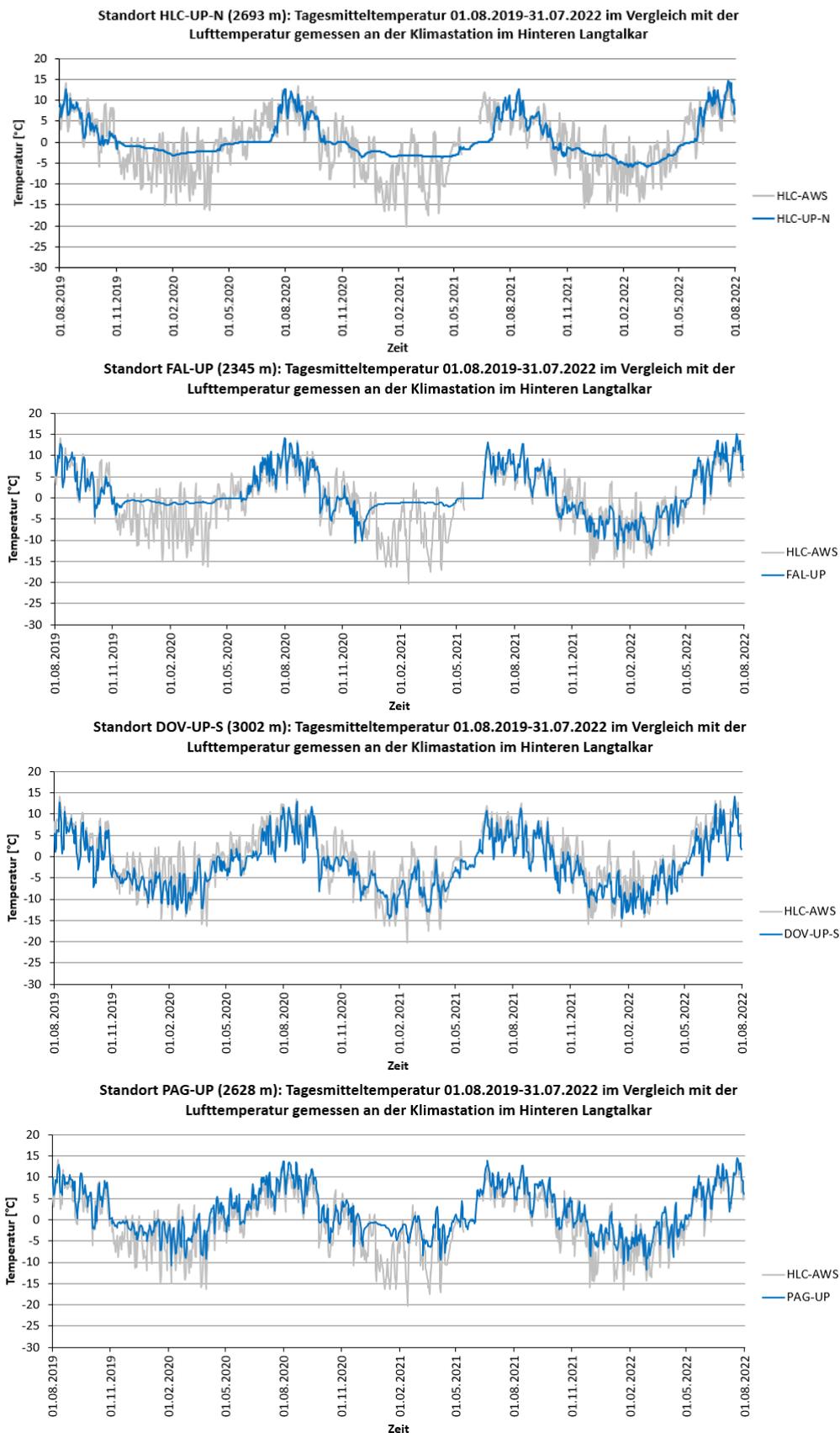


Abbildung 17: Tagesmitteltemperaturen der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten im (bzw. FAL-UP im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten für die drei Messjahre 2019/20 bis 2021/22. Messbereiche im Winterhalbjahr mit geringer Schwankung deuten auf Dämpfungseffekte durch eine mächtige Schneedecke (>80 cm) hin. In Grau sind die Tagesmittelwerte der automatischen Klimastation im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS) dargestellt. Bedingt durch Probleme mit der Stromversorgung an der Klimastation im Hinteren Langtalkar liegen von dort keine Lufttemperaturdaten für den Zeitraum 14.05.2021 bis 12.06.2021 vor.



Insgesamt repräsentieren die in Abbildung 17 dargestellten Temperaturkurven gut das breite Spektrum an Bodentemperatur-Messstandorten im Nationalpark Hohe Tauern. Dieses reicht von solchen mit dämpfender winterlicher Schneedecke in allen (auch in schneearmen) Jahren bis zu solchen, an denen selbst in schneereichen Wintern eine länger anhaltende Schneedecke fehlt. Für das letzte Messjahr ist jedoch auffällig, dass man nur an einem der vier Standorte von einer dämpfenden winterlichen Schneedecke sprechen kann, die jedoch auch etwas geringmächtiger als normal ausgefallen sein dürfte, wie man aus dem unruhigen Temperaturverlauf im Hochwinter 2021/22 bei HLC-UP-N schließen kann.

In der Abbildung 18 werden die drei Jahresmittelwerte aller Standorte der dreijährigen Periode 2019/20 bis 2021/2022 miteinander verglichen und gegenübergestellt. Die Darstellungsweise ist so gewählt, dass Datenpunkte, die oberhalb der strichlierten Linie liegen, Standorte zeigen, an denen die Jahresmitteltemperatur im jeweiligen Messjahr, welches an der Y-Achse ausgewiesen ist, höher als im jeweiligen Vergleichsjahr (X-Achse) war. Der Vergleich der Werte von 2021/22 mit jenen von 2019/20 zeigt, dass an den meisten Standorten das Monitoringjahr 2019/20 deutlich (an manchen um mehr als 1,4°C) bis leicht wärmer war als 2021/22. Nur an sieben Standorten war dies umgekehrt, jedoch weniger stark ausgeprägt (bis zu ca. 1°C).

Der Vergleich der Werte von 2020/21 mit jenen von 2021/22 zeigt ein etwas differenzierteres Bild. Von den 28 Standorten mit ermittelten Mittelwerten für beide Jahre waren im letzten Beobachtungsjahr 2020/21 rund die Hälfte wärmer und die andere Hälfte kühler als im Folgejahr. Tendenziell waren die Standorte in 2021/22 aber eher wärmer als im Vorjahr, was ja bereits die Abbildung 16 gut gezeigt hat. Der dritte Vergleich in dieser Abbildung zwischen den ersten beiden Monitoringjahren in der aktuellen Projektperiode zeigt klar, dass das Jahr 2020/21 gering bis deutlich (bis zu 1,6°C) kälter war als das Vorjahr. Nur an einem einzigen Standort war dies nicht der Fall; am Standort GOE-PRO war das vorletzte Messjahr um jeweils 0,2°C wärmer als die beiden Vorjahre.

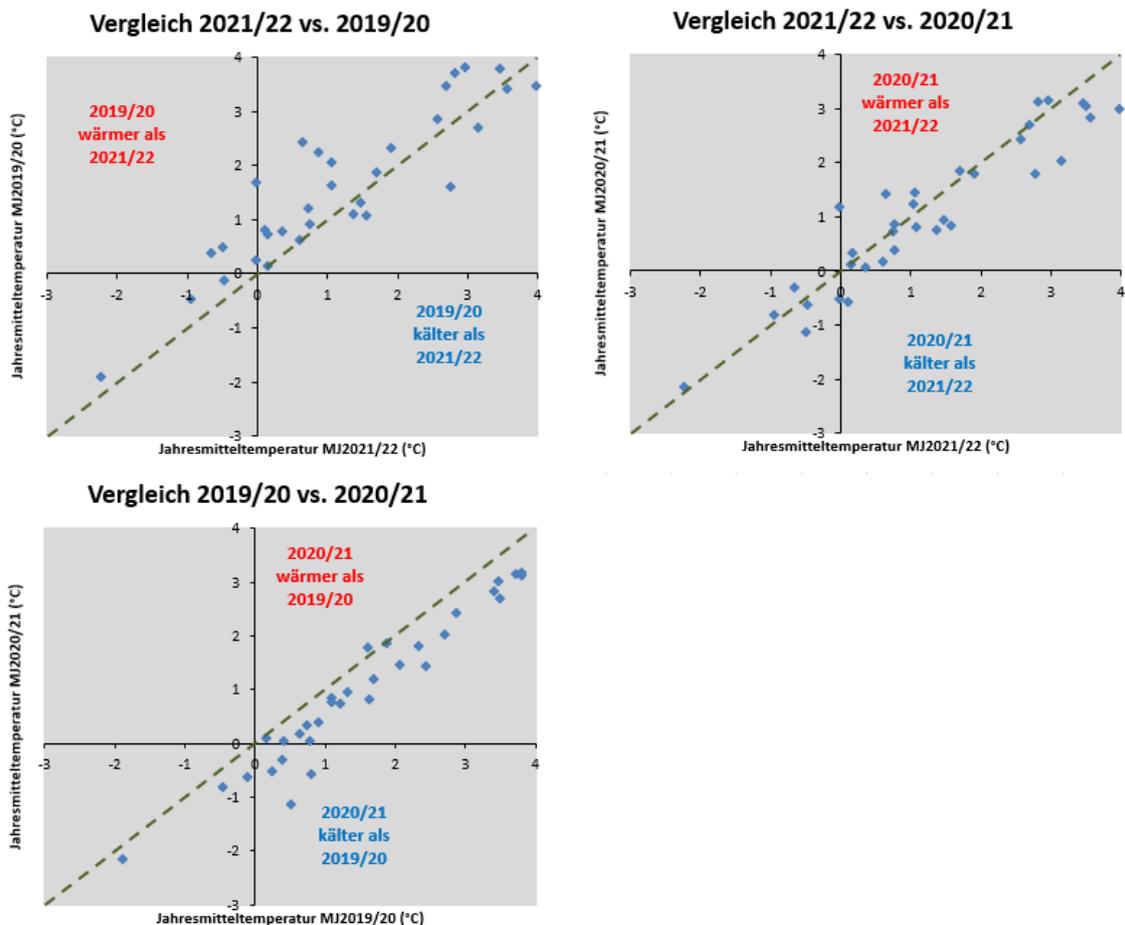


Abbildung 18: Gegenüberstellung der Jahresmittelwerte der drei Projektjahre von 2019/20 bis 2021/22 an allen Bodentemperaturmessstationen mit entsprechenden Daten (2021/22 vs. 2019/20; 2021/22 vs. 2020/21; 2019/20 vs. 2020/21).

Die Abbildung 19 veranschaulicht die langjährige Entwicklung der Temperatur an denselben vier Standorten wie in der Abbildung 17. Zu diesem Zweck sind die Jahresmittel der Bodentemperaturen aller einzelnen Jahre seit Installierung des jeweiligen Messstandortes eingetragen. Da die Einrichtung des Messnetzes erst im August bzw. September 2006 erfolgte, gibt es für keinen Standort Jahresmitteltemperaturen für das erste Messjahr 2006/07 (da ja in dieser Studie 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. Detaillierte Erläuterungen zu den Trends der vier hier gezeigten Standorte finden sich in Kellerer-Pirklbauer et al. (2023).

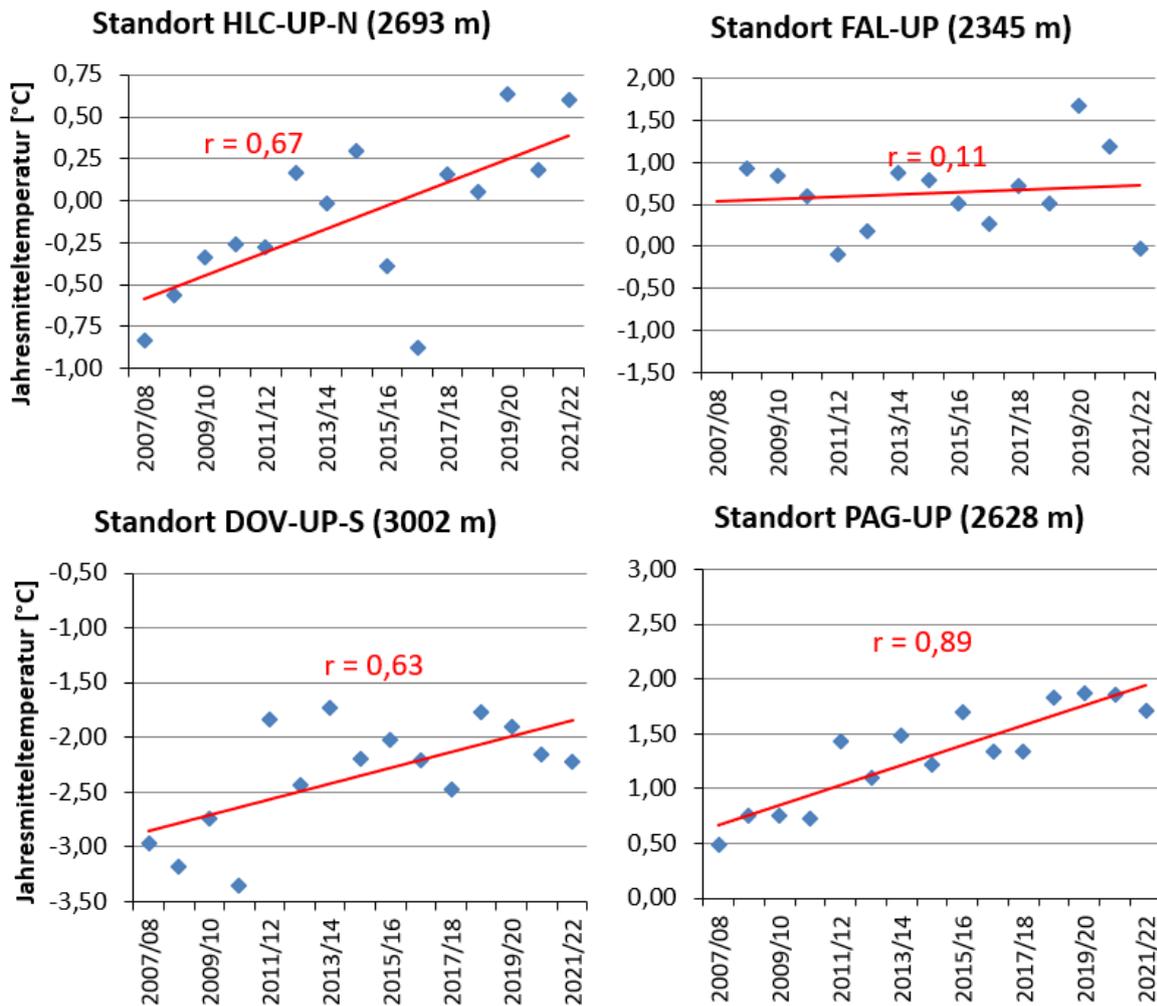


Abbildung 19: Jahresmitteltemperatur der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten für den Zeitraum 01.08.–31.07. des Folgejahres für die Messjahre von 2007/08 bis 2021/22. Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten sind dargestellt. Jene für DOV-UP-S, HLC-UP-N und PAG-UP sind statistisch signifikant (alle drei $p < 0,05$ – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 5%; die beiden letztgenannten sogar $p < 0,01$ – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1%).

(b) Permafrost-Bohrlochtemperaturen am Hohen Sonnblick

Abbildung 20 zeigt die Messergebnisse von Bohrloch 3 auf dem Sonnblick für die Projektperiode 01.10.2019 bis 30.09.2021. Zum Vergleich mit den atmosphärischen Bedingungen wurden auch die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, gemessen am Sonnblick, im Diagramm dargestellt. Deutlich erkennbar ist die weitgehende Koppelung der Luft- und Bodentemperatur nahe der Oberfläche in den Sommermonaten bei Bedingungen ohne Schneedecke (z.B.

für 2021: 20.07.2021 bis 03.08.2021 kompletter Datenausfall; danach Koppelung in der Datenreihe klar ersichtlich. Die Tatsache, dass auch in den Wintermonaten der Sensor in 0 cm gewisse Schwankungen aufweist, zeigt an, dass die Schneedecke am Standort des Bohrlochs auch im Winter generell eher geringmächtig ist, wenngleich die Zeit des Schneedeckenabbaus inklusive Schneedeckendurchtränkung (*zero-curtain*-Effekt) in jedem der drei hier gezeigten Jahre rund 1 Monat dauerte. Im letzten Jahr währte der Prozess des Abbaus der komplett wasserdurchtränkten Schneedecke von ca. 16.05.2022 bis 20.06.2022.

Der Herbst 2020 und der Hochwinter 2020/21 waren gekennzeichnet von einer gedämpften Reaktion der Boden- auf die Lufttemperatur, was auf die bereits angesprochene generell eher dünne saisonale Schneedecke hinweist. Erst gegen Ende Februar 2021 war die Luft- von der Bodentemperatur endgültig entkoppelt, wobei dieser Effekt zumindest bis zum Ausfall der Sensoren am 20.07.2021 anhielt. Im letzten Messjahr 2021/22 kam es erfreulicherweise zu keinem Komplettdatenausfall, nur der Sensor in 20 m Tiefe liefert seit dem 1.7.2021 keine Daten mehr. Der letztgenannte Ausfall, die in Abbildung 20 ersichtlichen Datenlöcher sowie die Beschreibungen hierzu im Methodenkapitel zeigt, dass das Monitoring von Permafrost an exponierten Standorten und mit Hilfe aufwändiger tiefer Bohrlöcher ein kostspieliges und fehleranfälliges Unterfangen ist, welches umfangreichen Personal- und Materialeinsatz erfordert.

In Bezug auf die Messdaten für Permafrost im Jahr 2021/22 können auch für die Sommermonate erfreulicher Weise geschlossene Datenreihen präsentiert werden. Zeigen die Sensoren in 0 und 1,2 m Tiefe noch eine starke Beeinflussung des Temperaturverlaufs durch die Lufttemperatur, so ist dieses Signal in 4 m schon stark gedämpft (höchste Temperatur im Oktober 2021, tiefste im April 2022). In 12 m Tiefe lässt sich kein wirklicher Jahresgang mehr erkennen. Die Messwerte in 12 m Tiefe schwankten im Messjahr 2021/22 nur zwischen $-1,42^{\circ}\text{C}$ und $-1,71^{\circ}\text{C}$, somit um $0,29^{\circ}\text{C}$. Zum Vergleich war diese Schwankungsbreite bei den anderen Sensoren immerhin $2,62^{\circ}\text{C}$ in 4 m Tiefe, $9,56^{\circ}\text{C}$ in 1,2 m Tiefe sowie $20,04^{\circ}\text{C}$ in 0 m.

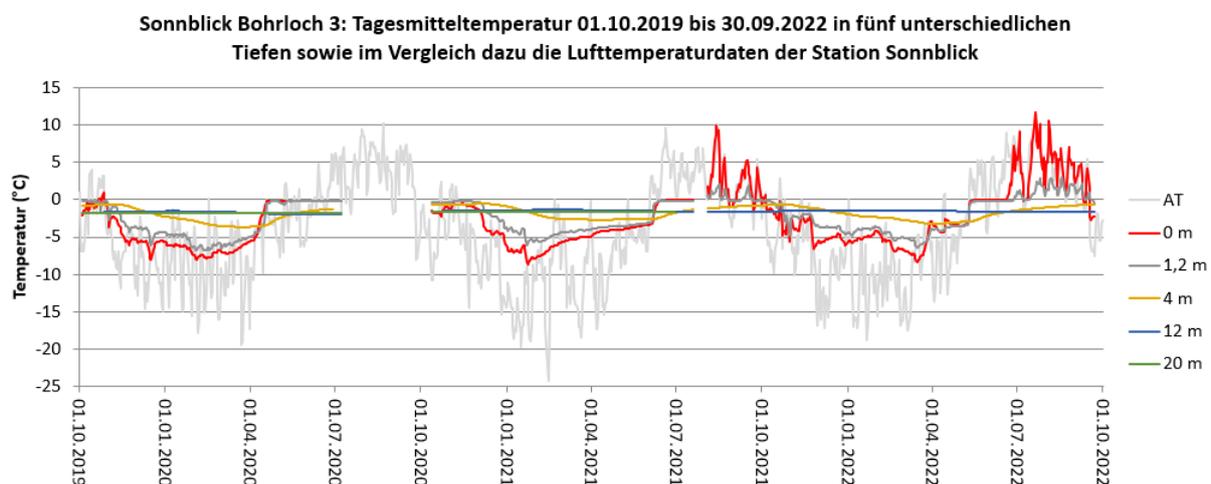


Abbildung 20: Tagesmitteltemperaturen im Bohrloch 3 am Sonnblick im Zeitraum 01.10.2019–30.09.2022 in fünf unterschiedlichen Tiefen sowie im Vergleich dazu die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (AT) an der TAWES-Station Sonnblick. Die Lücken in den Kurven zeigen Zeiträume, in denen bedingt durch technische Probleme oder Wartungstätigkeiten keine Daten aufgezeichnet wurden (Daten: GeoSphere Austria).

Der auf acht Jahre zeitlich verlängerte Vergleich der Bodentemperatur in den unterschiedlichen Tiefen in der Periode 01.10.2014 bis 30.09.2022 ist in Abbildung 21 dargestellt und zeigt folgendes Bild: Zu beachten ist, dass im Beobachtungszeitraum 2016/17 – neben der zuvor schon aufgezeigten regelhaften Abnahme der Temperaturschwankungen mit der Tiefe – gegenüber dem Vor- und dem Folgejahr deutlich tiefere Temperaturniveaus in den Wintermonaten (bis -10°C) herrschten. Deutlich erkennbar ist, dass dies eine Folge der ab Ende Oktober dynamischen Auskühlung des Untergrundes aufgrund geringer Schneelage war. In den vier Folgewintern wurden – trotz sehr tiefer Lufttemperaturen von nahezu -30°C (am 27.02.2018) – so niedere Bodentemperaturen nicht mehr erreicht, wobei im vorletzten Beobachtungsjahr zumindest noch $-8,7^{\circ}\text{C}$ und im letzten Beobachtungsjahr noch $-8,3^{\circ}\text{C}$ erreicht

wurden. Die Minima der drei Winter nach 2016/17 lagen bei -5,9°C in 2017/18, -7,4°C im Winter 2018/19 und -8,0°C im Winter 2019/20. Auffallend sind die sehr hohen Sommertemperaturen am Sensor in 0 m mit 9,9°C am 13.08.2021 und sogar 11,7°C am 20.07.2022. Der letztgenannte Wert ist auch der höchste in der vorliegenden Datenreihe seit 2014.

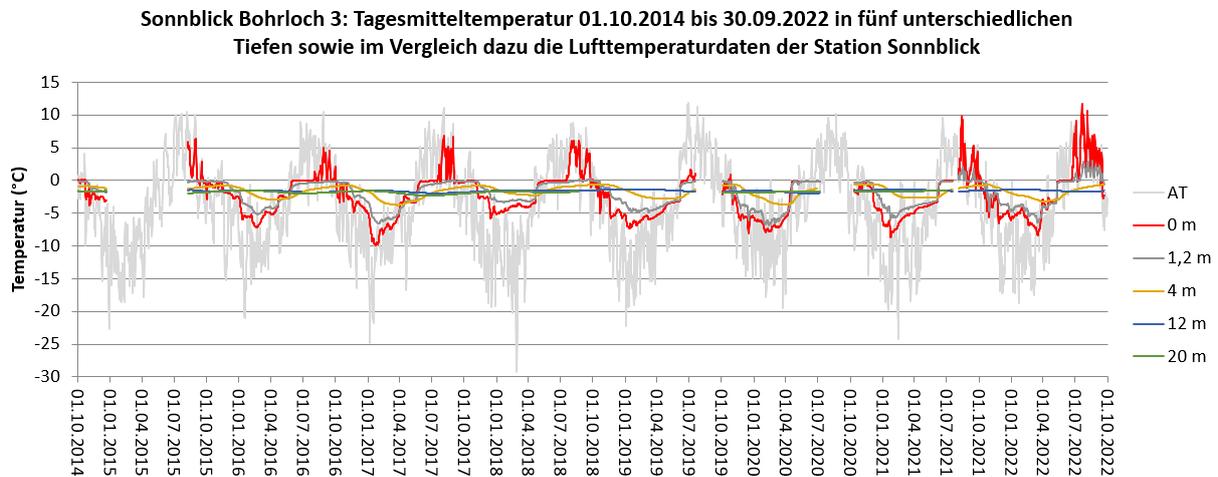


Abbildung 21: Tagesmitteltemperaturen im Bohrloch 3 am Sonnblick im Zeitraum 1.10.2014–30.9.2022 in fünf unterschiedlichen Tiefen sowie im Vergleich dazu die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (AT) an der TAWES-Station Sonnblick. Hinweise zu Datenlücken und Quelle siehe Abbildung 19.

Auffällig für die Sommer 2021 und 2022 ist im Vergleich zur langjährigen Messreihe somit, dass in keinem der Sommer davor bis einschließlich 2015 so hohe Temperaturen in beispielsweise 0 m Tiefe gemessen wurden, wobei jedoch einschränkend gesagt werden muss, dass es zu mehrmaligen sommerlichen Datenausfällen – bedingt durch rege Gewittertätigkeit im Bereich des Sonnblickgipfels – kam (2015, 2019, 2020 und 2021).

Der Vergleich der Bodentemperatur an der Oberfläche und in den unterschiedlichen Tiefen sowie der Lufttemperatur an der nahen Klimastation am Hohen Sonnblick für die drei Kalenderjahre 2016, 2017 und 2018 (nur jene Jahre ohne Datenlücken seit 2014) in Abbildung 22 zeigt, dass sowohl die Luft- als auch die Bodentemperatur in unterschiedlichen Tiefen nahezu überall im Jahr 2017 tiefer war als im Jahr 2016 und 2018. Einzige Ausnahme war der Sensor in 0,4 m Tiefe, wo das erste der beiden Kalenderjahre um 0,3°C kühler war als 2017. Das Kalenderjahr 2018 wies in allen Tiefen höhere Temperaturen auf als in den beiden Vorjahren. Die ist im Wesentlichen stimmig zu den Lufttemperaturdaten. Datenausfälle verhindern aber leider die Darstellung von geschlossenen Jahresmittelwerten für 2019, 2020, 2021 und 2022.

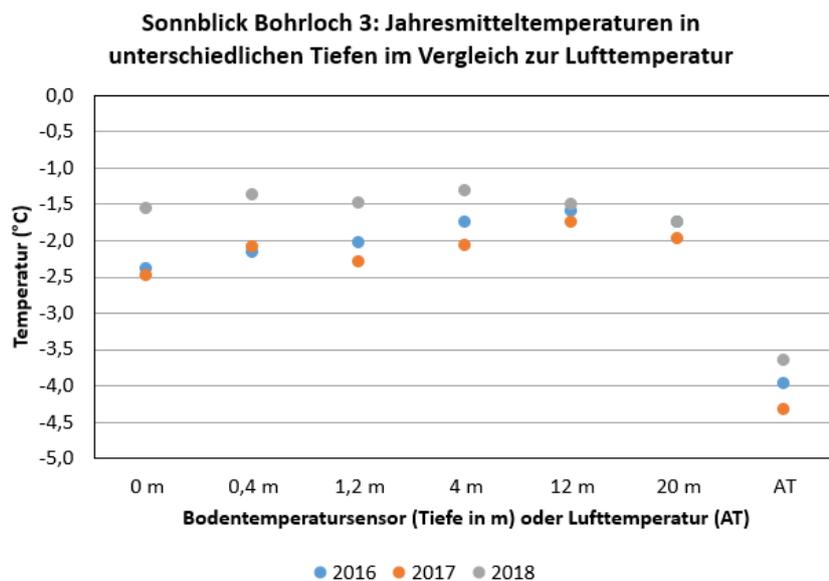


Abbildung 22: Jahresmitteltemperaturen für drei Kalenderjahre mit geschlossenen Datenreihen in der jüngeren Vergangenheit im Bohrloch 3 am Sonnblick. Datenbasis hierzu siehe Abbildung 21.

Um für einen längeren Zeitraum einen Vergleich der Bodentemperaturdaten geben zu können, zeigt Abbildung 23 die Monatsmitteltemperatur für den Jänner für die sieben Jahre zwischen 2016 bis 2022. Auf Basis dieser Werte erkennt man, dass der Jänner 2017 die tiefsten Werte im oberflächennahen Untergrund mit sich brachte, wohingegen der Jänner 2018 am wärmsten war. Der Unterschied dieser beiden Jänner-Werte betrug 3,6°C. Diese Unterschiede zwischen dem wärmsten und kältesten Jänner schwächen sich nach unten hin stark ab (in 0,4 m bei 3,1°C; in 1,2 m bei 2,1°C; in 4 m bei 1,1°C) und in Tiefen von 12 und 20 m verringern sich diese Unterschiede zu Größenordnungen von nur mehr 0,2°C, was auf noch relativ thermisch stabile Verhältnisse in größeren Tiefen im Bereich des Sonnblicks hinweist. Demgegenüber stehen die Monatsmittel der Lufttemperatur, die in den Jännermonaten zwischen 2016 und 2022 um 7,3°C schwankten und in allen Jahren deutlich unter den Temperaturen im Bohrloch lagen. Letzteres ist mit der erwähnten thermischen Isolierung durch die Schneedecke erklärbar.

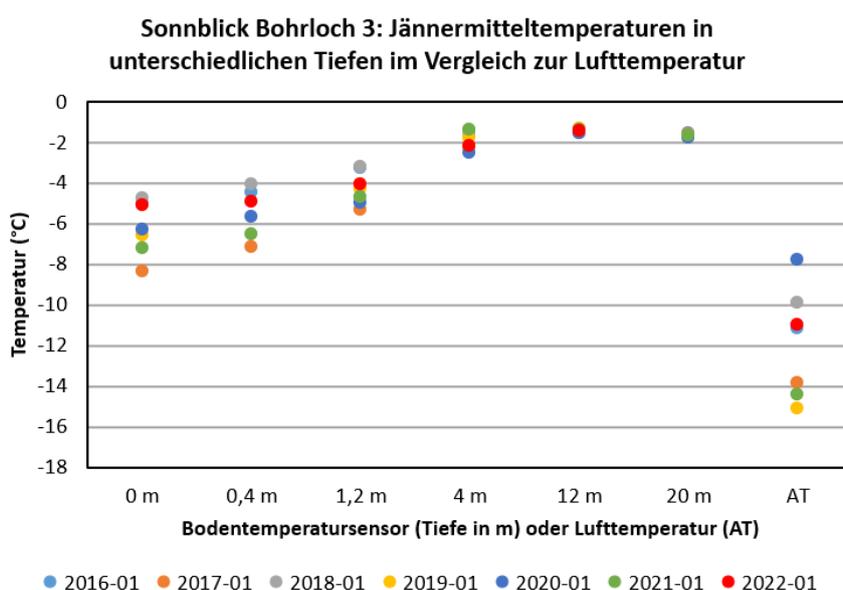


Abbildung 23: Jännermitteltemperaturen für die sieben Jahre von 2016 bis einschließlich 2022 im Bohrloch 3 am Sonnblick. Datenbasis hierzu siehe Abbildung 21.





(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 (zuletzt Kellerer-Pirklbauer et al. 2023) zurückgegriffen.

Dösener Blockgletscher

Die Bewegungsmessungen am Dösener Blockgletscher beziehen sich auf ein geodätisches Datum, das durch 12 markierte, stabile Punkte im Nahbereich des Blockgletschers definiert ist. Im Rahmen der alljährlichen Vermessung werden seit 2014, dem Jahr der Umstellung auf RTK-GNSS-Technologie, nur mehr die Bewegungsraten der 34 am Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte bestimmt. Die Bewegungsraten für den hier primär relevanten dreijährigen Beobachtungszeitraum 2019/20 bis 2021/22 wurden durch Epochenvergleich (12.08.2019, 18.08.2020, 17.08.2021, 16.08.2022) ermittelt.

Die horizontalen Bewegungsvektoren der 34 Beobachtungspunkte sind in Abbildungen 24 bis 26 für die drei letzten Messjahre graphisch dargestellt. Als Basisstation (= Referenzpunkt) für die differentielle GNSS-Messung im Echtzeitmodus (Real-Time Kinematic/RTK) wurde der Triangulationspunkt (interne Bezeichnung „AVS“) in der Nähe des Arthur-von-Schmidhauses gewählt. Tabelle 13 fasst die zeitliche Änderung des Bewegungsverhaltens des Blockgletschers durch Angabe von Mittel- und Maximalwerten der Bewegungsraten (Fließgeschwindigkeit) für den Zeitraum 2015-2022 zusammen.

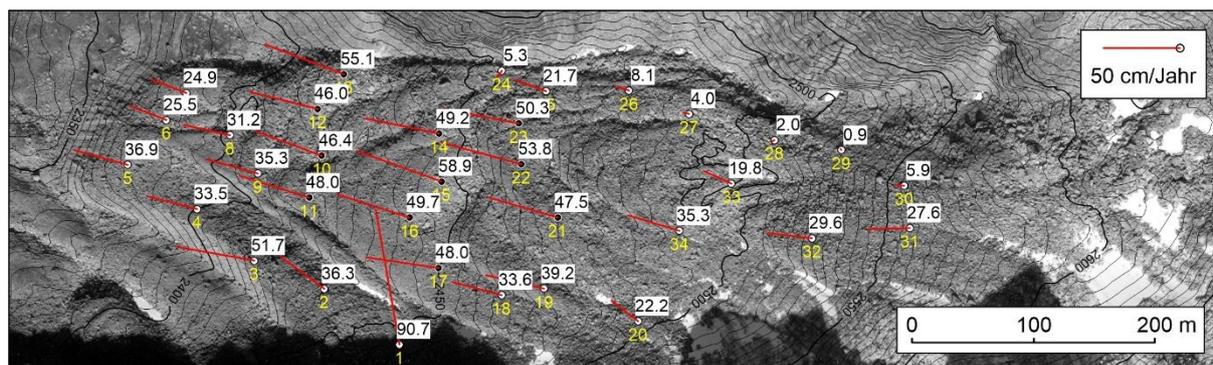


Abbildung 24: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Dösener Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2019/20. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (cm/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2-3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Eine maximale Fließgeschwindigkeit von 58,9 cm/Jahr wurde am Punkt 15 gemessen. Ein betragsmäßig größerer Wert von 90,7 cm/Jahr, gemessen im Punkt 1, ist jedoch nicht repräsentativ, da er von einer lokalen Rutschung herrührt. Orthofoto 20.09.2010 © Land Kärnten.

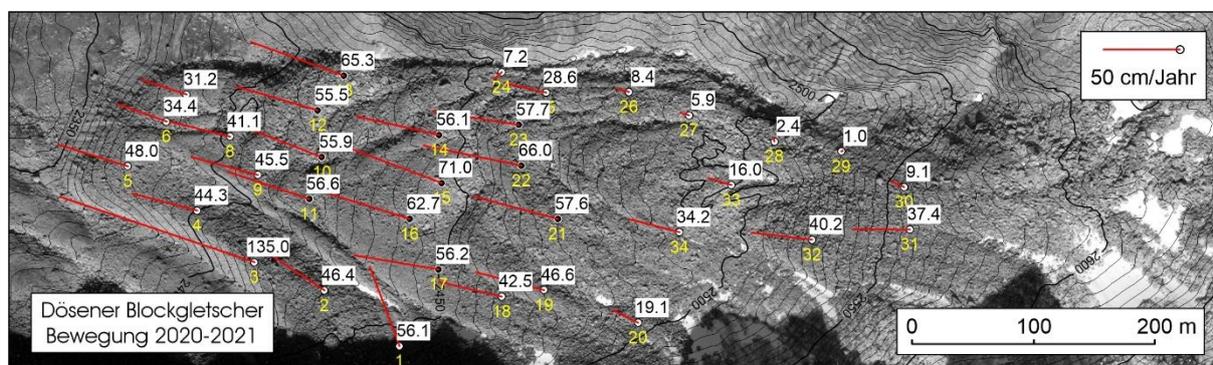


Abbildung 25: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Dösener Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2020/21. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (cm/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2-3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Eine maximale Fließgeschwindigkeit von 71,0 cm/Jahr wurde im Punkt 15 gemessen. Ein betragsmäßig größerer Wert von 135,0 cm/Jahr, gemessen im Punkt 3, ist nicht repräsentativ, da er von einer lokalen Rutschung rührt. Orthofoto 20.09.2010 © Land Kärnten.



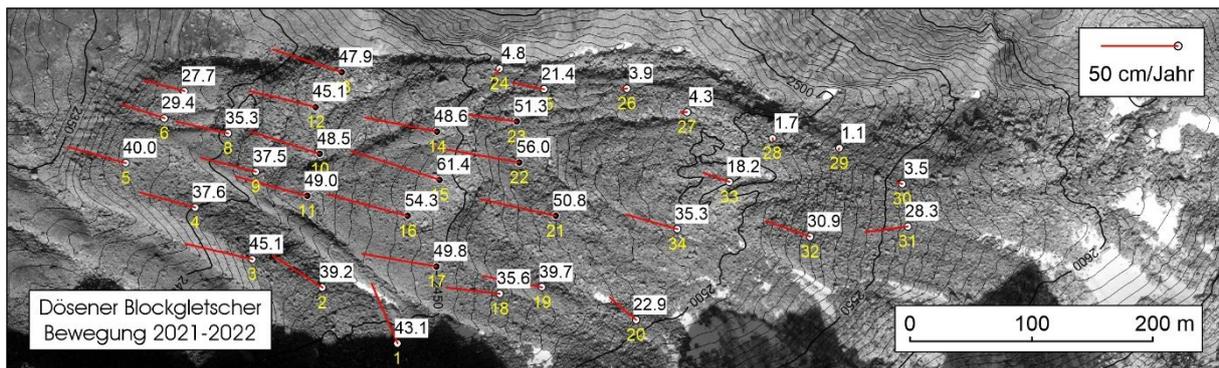


Abbildung 26: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Dösener Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2021/22. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (cm/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2\text{-}3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Eine maximale Fließgeschwindigkeit von 61,4 cm/Jahr wurde im Punkt 15 gemessen. Orthofoto 20.09.2010 © Land Kärnten.

Tabelle 13: Bewegungsraten am Dösener Blockgletscher für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2015/16 bis 2021/22. Die Mittelwerte wurden aus den Bewegungsraten der zentralen Punkte 10–17 und 21–23 gerechnet. Die Maximalwerte wurden jeweils im Punkt 15 festgestellt. Grau hinterlegt ist der für diesen Endbericht relevante Projektzeitraum.

Werte (in cm/Jahr)	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22
Mittelwert	52,0	43,2	38,0	42,9	50,3	60,0	51,1
Maximalwert (Punkt)	64,7 (15)	53,1 (15)	46,4 (15)	51,1 (15)	58,9 (15)	71,0 (15)	61,4 (15)

Die Oberflächenbewegung am Dösener Blockgletscher war im Jahr 2020/21 die höchste im gesamten hier gezeigten Messzeitraum und hatte sich im Vergleich zum Jahr zuvor signifikant um weitere 19,3 % (im zentralen Bereich) vergrößert. Die Bewegungsraten von 2020/21 waren somit auch die höchsten seit Messbeginn im Jahr 1995. Im letzten Messjahr hat sich die Bewegung wieder etwas verlangsamt, was sowohl mit den kühleren thermischen Bedingungen im Untergrund als auch mit trockeneren Bodenverhältnissen in Verbindung zu bringen ist (Kellerer-Pirklbauer et al. 2023)

Blockgletscher Hinteres Langtalkar

Das geodätische Datum an diesem Blockgletscher ist durch insgesamt 15 Festpunkte definiert. Die Bewegungsraten für den Beobachtungszeitraum 2019/20 bis 2021/22 wurden durch Epochenvergleich (16.08.2019, 21.08.2020, 21.08.2021, 20.08.2022) ermittelt. Im Zeitraum 2020/21 sind bereits zwei Punkte, nämlich 25 und 31, im Stirnbereich des Blockgletschers durch anhaltend starke Rutschprozesse verloren gegangen. Im Messjahr 2021/22 setzten sich diese Punktverluste leider fort. Aufgrund der fortschreitend hohen Dynamik des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar gab es weitere Veränderungen in den Messpunkten: Punkte 21, 24, 25 und 25A gingen verloren, ebenso der Ersatzpunkt von Punkt 31, nämlich 31A. Punkt 45 ist verkippt und kann nicht mehr direkt eingemessen werden, daher musste ein Ersatzpunkt eingerichtet werden. Dieser Ersatzpunkt 45A ist – wie in der Abbildung 27a ersichtlich – der höchste Punkt am Felsblock. Punkt 27A ist ein neu angelegter Messpunkt (oberste Felsspitze, rote Punktmarkierung) rund 6,4 m südöstlich des Punktes 27, der möglicherweise in naher Zukunft eventuell auch durch die anhaltend schnelle Bewegung verloren gehen könnte (Abb. 27).

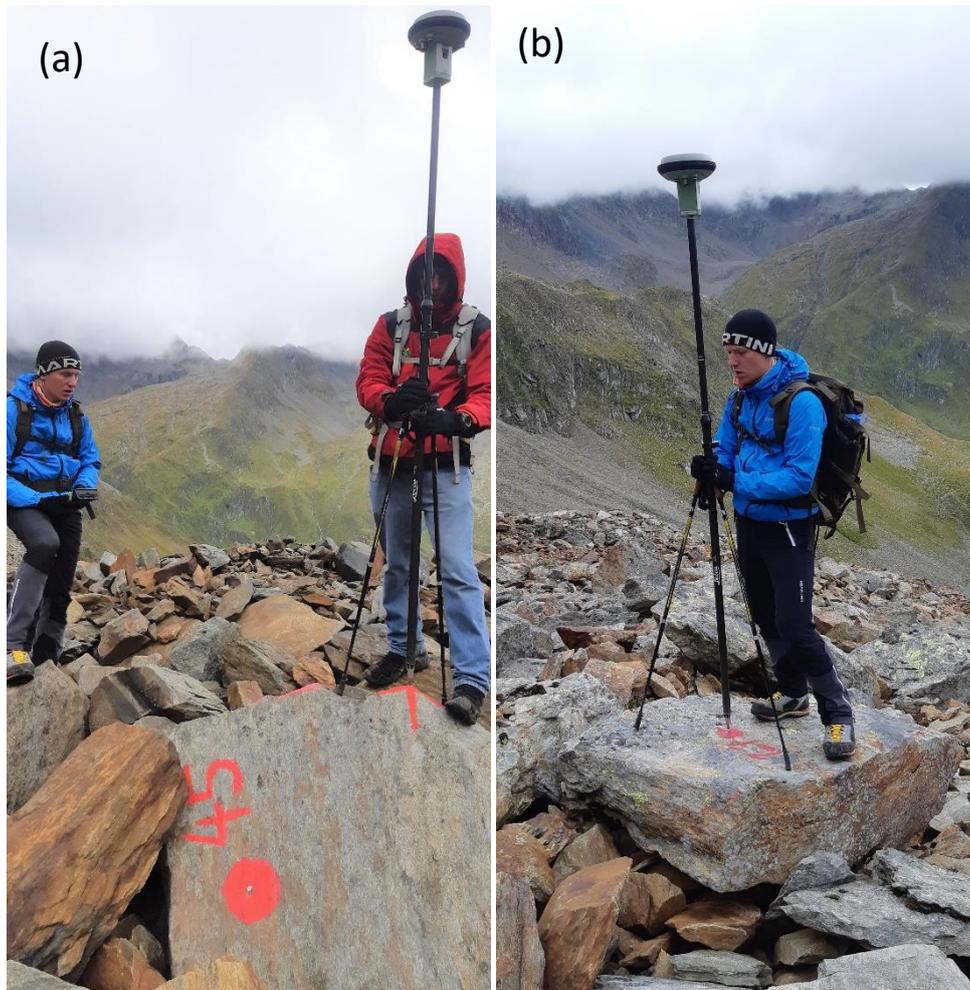


Abbildung 27: Herausforderungen bei der Durchführung der terrestrischen geodätischen Messungen am Blockgletscher Hinteres Langtalar im Jahr 2022. (a) Der Block mit dem Messpunkt 45 ist verkippt und es kann nur mehr der Ersatzpunkt 45A an der Oberkante des Blockes eingemessen werden; (b) Einmessung des absturzgefährdeten Punktes 27 – 6,44 m weiter talaufwärts wurde der neue Ersatzpunkt 27A eingerichtet. Fotos W. Krämer, 20.08.2022.

Die horizontalen Bewegungsvektoren der im Jahr 2021 verbliebenen 34 Beobachtungspunkte sind in der Abbildung 28 graphisch dargestellt. Für die Charakterisierung der zeitlichen Änderung des Bewegungsverhaltens des Blockgletschers Hinteres Langtalar wurden für zwei ausgewählte Punktgruppen A (oberer Bereich) und B (unterer Bereich) die Mittel- und Maximalwerte der Bewegungsraten (Fließgeschwindigkeit) in Tabelle 14 für den Zeitraum 2015/16 bis 2021/22 zusammengestellt. Mit den hohen Bewegungsraten geht weiterhin eine morphologisch gut beobachtbare Destabilisierung der Blockgletscheroberfläche einher. Die Messung der Punkte im Einflussbereich der unteren Rutschzone ist weiterhin nur unter erheblichen Gefahren möglich.

Die im letzten Jahr 2021/22 festgestellten Bewegungsraten haben sich im Vergleich zum vorjährigen Beobachtungszeitraum signifikant (Punktgruppe A mit -5,4%) verringert. Die diesbezügliche Einschätzung für die Punktgruppe B ist etwas unsicher, da dieser Bereich bereits stark von lokalen Rutschungsprozessen beeinflusst ist und die jährliche Einmessung sowie Auffindung der Messpunkte dadurch erschwert wird. Unter Berücksichtigung der noch messbaren Punkte (23, 27 und 28) ergibt sich hier ebenfalls eine Abnahme der mittleren Bewegungsrate, die jedoch mit -17,6% deutlich höher ausfällt als im oberen Bereich (Punktgruppe A). Größere Massenumlagerungen/Rutschungen können im unteren hoch aktiven Teil des Blockgletschers für die nächsten Jahre weiterhin nicht ausgeschlossen werden, sondern sind ganz im Gegenteil zu erwarten und werden weitere Erschwernisse des Monitorings bewirken.

Tabelle 14: Bewegungsraten am Blockgletscher Hinteres Langtalkar für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2015/16 bis 2021/22 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 für diesen Endbericht relevante Projektzeitraum.

Obere Punktgruppe A (Punkte 10-17, 37)

Werte (in cm/Jahr)	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22
Mittelwert	27,3	19,4	16,3	19,1	27,7	37,3	35,3
Maximalwert (Punkt)	32,6 (11)	22,3 (11)	20,6 (11)	21,9 (17)	31,8 (10)	42,8 (11)	40,5 (11)

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

Werte (in m/Jahr)	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22
Mittelwert	6,00	4,60	4,77	5,20	5,48	5,74	4,73
Maximalwert (Punkt)	9,83 (31)	5,66 (24)	6,64 (24)	7,45 (24)	8,07 (25)	3,94 (23)	3,25 (23)

Anmerkung: Bei den Mittelwertberechnungen ab 2015/16 wurden nur die messbaren Punkte berücksichtigt. Die ermittelte Relativänderung wurde quantitativ auf einen sinnvollen Tabellenwert umgerechnet (im Sinne von Ergänzung von Fehlwerten). Eine ähnliche Vorgangsweise wurde auch für die Auswertung 2020/21 (ohne die Punkte 24, 25 und 31) sowie 2021/22 (ohne die Punkte 21, 24, 25 und 31) angewandt. Die angegebenen Maximalwerte sind die tatsächlich gemessenen Größen.

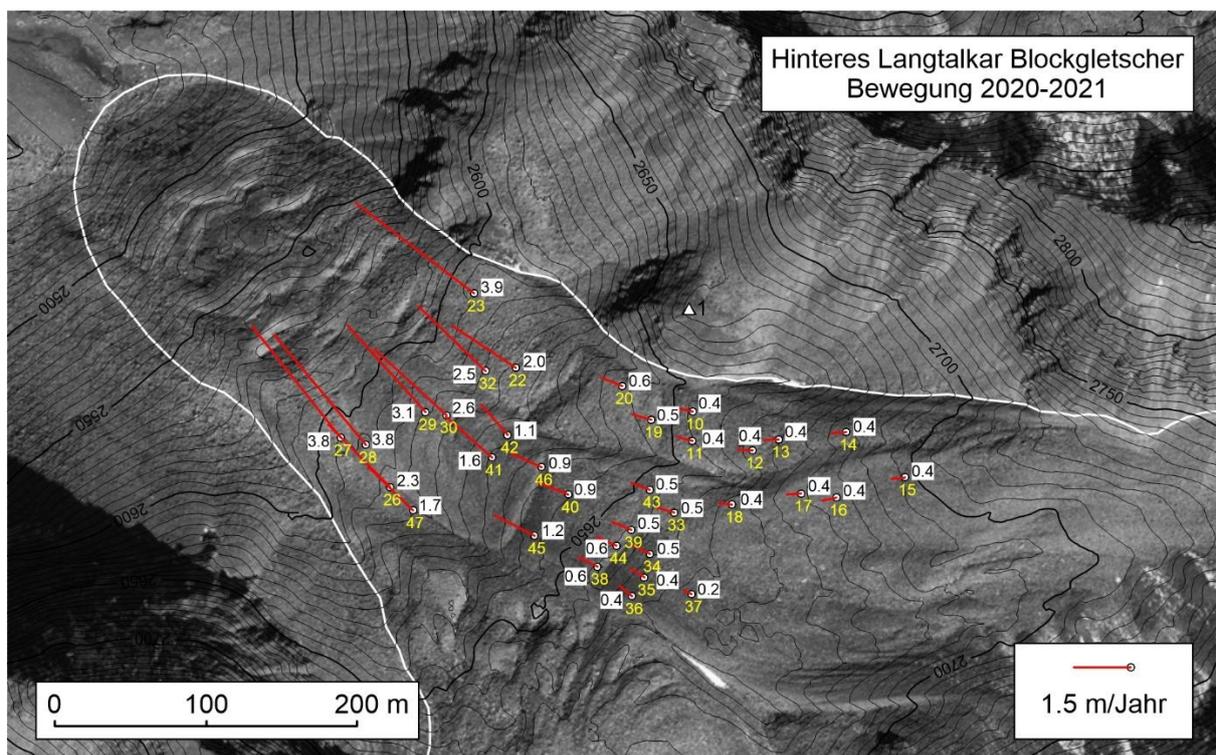


Abbildung 28: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Blockgletscher Hinteres Langtalkar mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2020/21, dem Messjahr mit den bisher höchsten dort je gemessenen Beträgen (seit 1995). Bereiche mit hohen bzw. geringen Bewegungsbeträgen verhielten sich in den Jahren zuvor und dem danach prinzipiell ähnlich. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (m/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. ± 2 -3 cm/Jahr (1σ -Schranke). Eine maximale Fließgeschwindigkeit von 3,94 m/Jahr wurde im Punkt 23 gemessen. Orthofoto 28.08.2012 © Land Kärnten.



Oberflächenbewegung im Vergleich

Die vergleichende Darstellung der zeitlichen Änderung der Oberflächenbewegung der beiden untersuchten Blockgletscher ist Inhalt der Abbildung 29. Aus dem Bild der Geschwindigkeitsgraphen ist gut zu erkennen, dass (1) die Bewegungsraten der Blockgletscher gut miteinander korrelieren, (2) die Bewegungsraten im Messjahr 2020/21 die größten der gesamten Messreihe sind, (3) noch zwei zeitlich zurückliegende Bewegungsmaxima (2003/04 bzw. 2014/15) erkennbar sind und (4) die mittlere Geschwindigkeit gering (Bereich A Hinteres Langtalkar) bis massiv (die beiden anderen Kurven) gegenüber dem Vorjahr abgenommen hat.

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden in der Abbildung 29a nur die beiden langsameren Kurven (Dösen und Hinteres Langtalkar oberer Bereich) dargestellt, wobei deren gleichsinniger Verlauf gut zum Ausdruck kommt. In Abbildung 29b sind alle drei Bewegungskurven zu sehen, wobei aber auch hier die gleichsinnigen Maxima gut zum Ausdruck kommen. Ergänzend sei erwähnt, dass im Jahr 2003, bedingt durch fehlende Finanzierung, keine Messung am Dösener Blockgletscher durchgeführt wurde und insofern für die Periode 2002-2004 in der Abbildung 29 der Jahresmittelwert beider Jahre dargestellt ist.

Die hier dargestellte gute Korrelation der Blockgletscherbewegung lässt sich räumlich auch auf den gesamten Alpenraum erweitern. So flossen mittlerweile bereits dreimal die hier gezeigten Blockgletscher-Bewegungsdaten sowie Informationen zur Entwicklung der Boden- und Lufttemperatur sowohl aus dem Hinteren Langtalkar als auch aus dem Dösental in Beiträge für die renommierte Zeitschrift „Bulletin of the American Meteorological Society“ (BAMS) ein (Pellet et al. 2021, 2022, 2023) – ein weiterer Hinweis für die große Bedeutung langfristigen Monitorings für wissenschaftlich fundierte Aussagen.

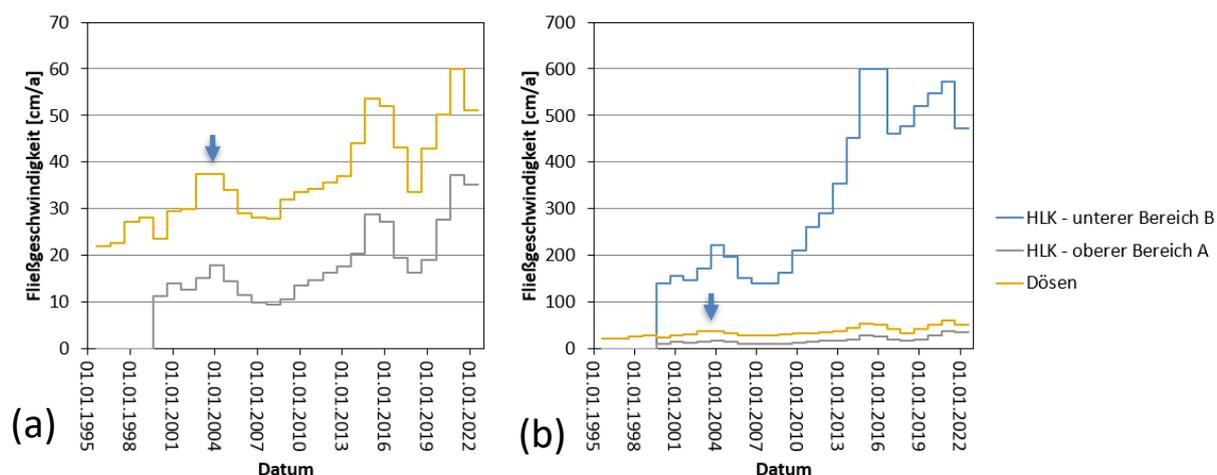


Abbildung 29: Direkter Vergleich der mittleren jährlichen horizontalen Oberflächenbewegung der beiden Blockgletscher Dösen – zentraler Bereich, Hinteres Langtalkar (HLK) – oberer Bereich A und Hinteres Langtalkar – unterer Bereich B für den Zeitraum 1995–2022. Mittelbildung über 11 Punkte (10–17, 21–23) am Dösener Blockgletscher, 9 Punkte (10–17, 37) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar (oberer Bereich A) und 8 Punkte oder reduzierte Punkteanzahl (23–25, 27–31) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar (unterer Bereich B). Im Jahr 2003 fand keine Messung am Blockgletscher Dösen (Pfeil) statt.

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

Das Messnetz am Inneren Knorrkogel wurde zuletzt am 4.9.2022 gewartet. Nahezu alle Standorte lieferten geschlossene Datenreihen für den gesamten bisherigen Monitoringzeitraum seit 2018. Auf Basis der vorliegenden Datenreihen war es möglich als Bezugszeitraum für diesen Bericht – unter Berücksichtigung ganzer Monate für die Mittelbildung – die vier Beobachtungsjahre 2018/19, 2019/20, 2020/21 und 2021/22 (jeweils 01.09. bis 31.08. des Folgejahres) zu analysieren und zu vergleichen. Tabelle 15 gibt einen Überblick über die gemessenen



Jahresmittelwerte für alle vier Messjahre und für jeden Standort sowie Sensor (bei den Felsdatenloggern drei pro Standort). Ebenso sind in dieser Tabelle die Mittelwerte der zumeist vier, in manchen Fällen nur drei Messjahre dargestellt. Zum Vergleich sind im unteren Teil der Tabelle Mittelwerte, Minimum, Maximum und Amplitude der Jahresmittelwerte an den 18 Standorten für jedes Messjahr und für den Mittelwert über die 3 oder 4 Jahre angegeben.

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 2021/22 sowie deren Mittelwert über die 4 Jahre (in Ausnahmen 3 Jahre*). ND = no data (siehe hierzu Methodenkapitel). Grau hinterlegt ist der für diesen Endbericht relevante Projektzeitraum.

Code	Log. Nr.	Sensortiefe (cm)	Jahresmitteltemperatur 2018/19 (°C)	Jahresmitteltemperatur 2019/20 (°C)	Jahresmitteltemperatur 2020/21 (°C)	Jahresmitteltemperatur 2021/22 (°C)	Mittelwert 2018/19 - 2021/22 (°C)
G-1K-SW-2840	A5223B	0	-1,52	0,25	-0,68	-0,06	-0,50
F-1K-W-2840	A52220	0	-1,56	-0,67	-1,63	-1,60	-1,37
G-1K-SW-2860	A5223F	0	0,41	0,63	-0,24	0,12	0,23
F-1K-W-2860	A52244	0	-1,17	-1,27	-2,24	-1,79	-1,57
S-GT-2886	A521B7	0	-1,77	-1,42	-2,70	-1,63	-1,88
G-1K-NW-2860	A52227	0	-1,25	-0,95	-1,96	-2,02	-1,55
G-1K-NW-2840	A52223	0	-1,27	-0,66	-1,84	-1,71	-1,37
F-3K-W-2869	A538B7	3	-0,10	0,26	-0,85	-0,55	-0,31
	A538B7	10	-0,16	0,13	-0,94	-0,71	-0,42
	A538B7	40	-0,65	-0,45	-1,33	-1,37	-0,95
F-3K-NE-2871	A538AC	3	-0,87	0,01	-0,64	-1,33	-0,71
	A538AC	10	-0,98	-0,12	-0,77	-1,53	-0,85
	A538AC	40	-1,03	-0,22	-0,85	-1,82	-0,98
S-GT-2878	A52194	0	-1,09	-0,98	-2,29	0,31	-1,01
S-AT-2878	A5223E	0	ND	ND	ND	ND	ND
F-3K-S-2871	A538B1	3	1,04	1,73	0,63	1,67	1,27
	A538B1	10	0,74	1,37	0,31	1,33	0,94
	A538B1	40	0,71	1,22	0,18	1,11	0,81
G-1K-E-2860	A521CB	0	0,25	1,23	-0,61	-1,50	-0,16
G-1K-E-2845	A5222E	0	0,40	0,82	0,02	-1,85	-0,15
F-1K-NE-2860	A5226E	0	-0,72	0,30	-0,94	-1,72	-0,77
F-1K-NE-2840	A521A0	0	-1,78	-1,54	-2,47	-2,35	-2,03
F-1K-S-2860*	A5222A	0	1,19	0,54	ND	0,43	0,72
F-1K-S-2840	A52230	0	1,96	1,68	0,53	1,83	1,50
<i>Mittelwert</i>			-0,40	0,08	-0,96	-0,73	-0,48
<i>Minimum</i>			-1,78	-1,54	-2,70	-2,35	-2,03
<i>Maximum</i>			1,96	1,73	0,63	1,83	1,50
<i>Amplitude</i>			3,74	3,26	3,33	4,18	3,53

Im Messjahr 2018/19 lag der Jahresmittelwert aller Standorte bzw. Sensoren (n=23) bei -0,40 °C. Die tiefste Jahresmitteltemperatur wurde mit -1,78 °C am Nordost-ausgerichteten Flankenstandort F-1K-NE-2840 gemessen, der höchste Wert hingegen mit 1,96 °C am Süd-exponierten Flankenstandort F-1K-S-2840, was einen Unterschied in den Jahresmittelwerten für 2018/19 von 3,74 °C bedeutet.



Im folgenden Messjahr 2019/20 wurden an nahezu allen Standorten – bis auf drei (F-1K-W-2860, F-1K-S-2860 und F-1K-S-2840) – höhere Jahresmittelwerte als im Vorjahr gemessen. Der Jahresmittelwert aller Standorte bzw. Sensoren (n=23) im Jahr 2019/20 lag bei 0,08 °C und somit um 0,48 °C über dem Mittelwert des Vorjahres. Die tiefste Jahresmitteltemperatur wurde mit -1,54 °C wiederum am Nordost-ausgerichteten Flankenstandort F-1K-NE-2840 gemessen. Der höchste Wert hingegen wurde mit 1,73 °C im zweiten Messjahr am Süd-exponierten Felsstandort F-3K-S-2871 ermittelt. Dies ergibt für dieses Messjahr einen Unterschied in den Jahresmittelwerten von 3,26 °C, also ca. 0,5 °C weniger als im Jahr zuvor.

Im dritten Messjahr – 2020/21 – konnte für 18 der in Summe 19 Sensoren der bis dahin tiefste Jahresmittelwert ermittelt werden. Nur an einem einzigen Standort (G-1K-SW-2840) war es 2018/19 kühler als im letzten Berichtsjahr und dies um immerhin 0,8°C. Als Zwischenfazit bis 2020/21 kann somit festgehalten werden, dass es nahezu in allen topographischen Gegebenheiten im Bereich der Gipfelpyramide – also am Gipfel selbst, an den Graten und Flanken mit Blockschutt sowie in nahezu vertikalen Felsbereichen – im Berichtsjahr 2020/21 am kältesten war.

Im nunmehr letzten Messjahr 2021/22 wurden – bedingt durch die geringe saisonale Schneeisolierung – teilweise neue Minimumrekorde erzielt. An neun der 23 Sensoren mit entsprechenden Jahresdaten war 2021/22 das bisher kälteste von allen vier Jahren, wobei die neuen Rekorde zumeist nur gering unter den Temperaturen des Jahres 2020/21 lagen.

Vergleicht man den Jahresmittelwert aller Standorte bzw. Sensoren über die vier Jahre, war das bisher kälteste Jahr 2020/21 mit -0,96°C, gefolgt von 2021/22 mit -0,73°C. Deutlich wärmer im Mittel waren 2018/19 mit -0,40°C und 2019/20 mit einem sogar positiven Mittelwert von 0,08°C. Für nahezu alle Sensoren (20 von 23) wurde im Jahr 2019/20 die höchste Jahresmitteltemperatur ermittelt. Die Mittelwerte über die vier Jahre ergeben für 17 der 23 Sensoren negative Werte, was – zumindest über einen Zeitraum von 4 Jahren – deutlich zeigt, dass der Großteil der Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels unter Permafrost-Bedingungen steht.

Abbildung 30 verdeutlicht die Ergebnisse der Jahresmitteltemperaturen der letzten vier Messjahre in Diagrammform, wobei für jene des letzten Messjahres auch Unterschiede in der topographischen Lage ausgewiesen sind. Dabei wird in dieser Grafik zwischen Standorten im Gipfelbereich, an Felsen, an Flanken sowie an Graten unterschieden. Wie dieser Grafik zu entnehmen ist, weisen die beiden Gipfelstandorte relativ tiefe Temperaturen auf. An allen drei Felsstandorten werden tendenziell die höchsten Temperaturen nahe der Oberfläche (3 cm Tiefe) und die tiefsten Temperaturen in 40 cm Tiefe gemessen, wobei die Gradienten im Detail voneinander abweichen, was u. a. auch von der Exposition der Standorte abhängig ist. Der südexponierte Standort weist beispielsweise einen viel größeren Gradienten auf als der nordostexponierte. Bei den Felsstandorten kommt deutlich die Strahlungsungunst des NE-exponierten Standortes mit Jahresmitteltemperaturen im Bereich von -1,0°C gegenüber dem südexponierten mit leicht positiven Mitteltemperaturen (0,7 bis 1,0 °C) zum Vorschein. In Bezug auf die Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels lässt sich somit die Permafrostgunst der NE-Flanke deutlich von der Permafrostungunst der S-Flanke unterscheiden. Die nach Westen exponierte Flanke liegt thermisch gesehen (im Mittel) zwischen den beiden Extremen.



Jahresmitteltemperaturen Innerer Knorrkogel: 2021/22 im Vergleich mit den Vorjahren

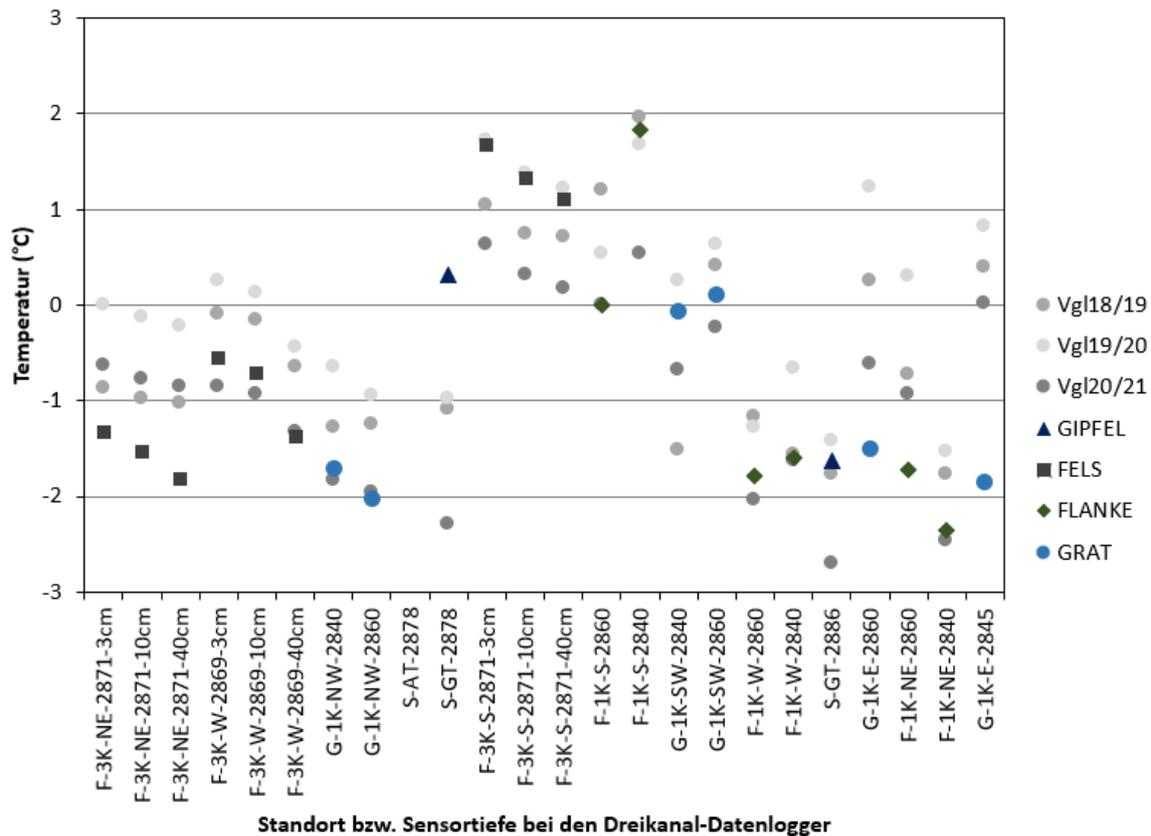


Abbildung 30: Jahresmitteltemperatur aller Messstandorte mit geschlossenen Datenreihen an/nah der Bodenoberfläche im Zeitraum 01.09.2021 bis 31.08.2022 (siehe hierzu Text) am Inneren Knorrkogel (Messjahr 2021/22). Bei den Dreikanal-Datenloggern sind die Messsensoren in 3, 10 und 40 cm Tiefe installiert und entsprechend in der Grafik ausgewiesen. Zum Vergleich sind die Mittelwerte der drei Vorjahre (siehe Tabelle 15) dargestellt.

Die größten Unterschiede finden sich in den Ergebnissen der Flankenstandorte, wobei an beiden südexponierten Flankenstandorten (F-1K-S-2860 und F-1K-S-2840) ähnlich hohe Werte gemessen wurden wie am südexponierten Felsstandort. Ähnliche Mittelwerte wurden für die Flankenstandorte in W- und NE-Exposition ermittelt. Gratstandorte weisen ähnliche Werte in gleichen Expositionen auf. Zusammenfassend kann auf Basis der Jahresmittelwerte festgehalten werden, dass eine starke und durchaus erwartete thermale Heterogenität im Gipfelbereich des Inneren Knorrkogels nachgewiesen wurde, welche durch Expositions-, Substrat- sowie Schneedeckenunterschiede bedingt ist. Der Nachweis dieser Heterogenität spiegelt auch die große Bedeutung von relativ engmaschigen Messnetzten wie am Inneren Knorrkogel wider.

Die in diesem Messgebiet ermittelten Werte von bisher vier Messjahren können wiederum als klarerer Hinweis auf die Existenz von Permafrost im Untersuchungsgebiet gelten, zeigen jedoch auch die Notwendigkeit von längeren Messreihen zur besseren Charakterisierung von thermischen Verhältnissen im Hochgebirge, die für Permafrost (Kellerer-Pirklbauer et al. 2019), Solifluktuationsprozesse (Kellerer-Pirklbauer 2018), potentielle Verwitterung (Kellerer-Pirklbauer 2017) oder Blockgletscherdynamik (Pellet et al. 2023) relevant sind.

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

Bodentemperaturmessdaten aus dem Sattelkar lagen für insgesamt 13 Standorte für den Zeitraum 22.10.2015 bis 25.07.2022 vor, wobei zu Beginn des Beobachtungsjahrs 2020/21 am 1.10.2020 jedoch nur mehr sieben der 2015 installierten Temperaturdatenlogger funktionierten. Ab dem 12.8.2021 reduzierte sich diese Zahl noch weiter auf lediglich einen Logger (Logger_07), der kontinuierlich für das gesamte Beobachtungsjahr 2020/21 bzw. bis zum letzten Auslesen der Datenlogger durch GEORESEARCH (25.07.2022) Daten lieferte. Die zeigt einmal mehr auch die Schwierigkeit von langfristigen Monitoringprogrammen auf, wobei es im Falle des Sattelkars v. a. bedingt durch Stromversorgungsprobleme zu diesen Ausfällen gekommen ist (pers. Mitteilung Ingo Hartmeyer).

Die Tageswerte aller sieben Standorte, die am 1.10.2020 noch funktionierten, sind zusammengefasst für die hier relevante Projektperiode 2019/20 bis 2021/22 in Abbildung 31 dargestellt. Auffallend in dieser Darstellung ist die Tatsache, dass einzig der Logger_13 im Laufe des Winters tiefere Temperaturen von unter $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufwies – mit zwei Negativpeaks am 11.01.2021 und 15.02.2021 von jeweils unter $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die meisten Standorte zeigen recht hohe Temperaturen nahe $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ für die Wintermonate, wobei alle Standorte im Winter 2020/21 im Zeitraum zwischen 06.06.2021 und 07.07.2021 – und somit innerhalb eines Monats – schneefrei wurden. Auf Basis dieser Daten könnte man nur für den Standort des Loggers_13 Permafrost erwarten. Da für das letzte Messjahr nur mehr die Daten vom Logger_07 erfolgreich aufgezeichnet wurden, ist die Aussagemöglichkeit für das letzte hier gezeigte Jahr nur gering. Zumindest kann aber gesagt werden, dass der Logger_07 in allen drei Jahren keine Anzeichen für Permafrost im Untergrund anzeigt (Temperatur um $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Winter) und auch in schneearmen Wintern wie 2021/22 eine langanhaltende Schneedecke (Mitte November 2021 bis Anfang Juni 2022) ausbildet, die eine effektive Bodenauskühlung verhindert.

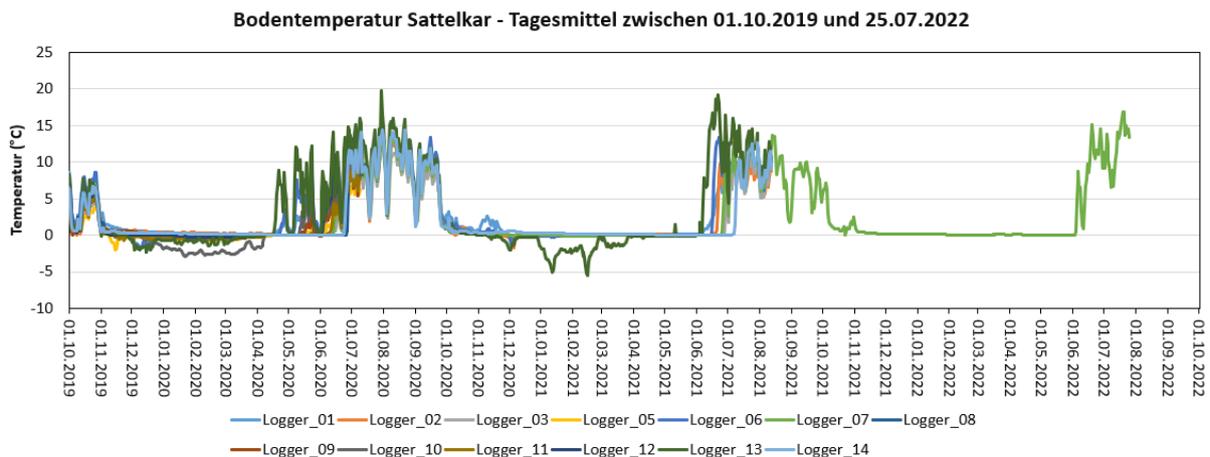


Abbildung 31: Tagesmitteltemperaturen der Bodentempersensoren im Sattelkar im Zeitraum 01.10.2019 bis 25.07.2022. Datenausfall im Laufe der Beobachtungsperiode war bedingt v. a. durch Stromversorgungsprobleme der Datenlogger – siehe Text. Zur Vergleichbarkeit mit der folgenden Abbildung 32 wurde in dieser Grafik die idente Legende inklusive Farbcodierung verwendet (Daten: GEORESEARCH; Kontaktperson: Ingo Hartmeyer, ingo.hartmeyer@georesearch.at).

Die Tageswerte aller 13 Standorte (der Logger_04 scheint in der Grafik nicht auf) für die gesamte Periode 2015 bis 2022 sind in Abbildung 31 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 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) oder Bereichen mit geringmächtiger winterlicher Schneedecke (und möglichem Permafrost) – zusammenhängt. Klar erkennbar ist auch, dass der Sommer 2016 deutlich höhere Werte aufwies als der Sommer 2017. Prinzipiell kann hier wiederum festgehalten werden, dass – wie auch in den Untersuchungsgebieten im Kärntener Anteil des Nationalparks Hohe Tauern – die winterliche Schneedecke und ihre Ausprägung und Variabilität eine wichtige Rolle in der Permafrostverbreitung sowie für ihrer thermische Veränderung innehat. Die Temperaturkurven des vorletzten

Beobachtungsjahres zeigen, dass die meisten zu jener Zeit noch aktiv gemessenen Standorte wahrscheinlich im saisonalen Frost liegen und nur ein Standort deutlich tiefere Temperaturen aufgezeichnet hat, die auf Permafrost hinweisen. Da im Sommer 2022 durch GEORESEARCH neue Datenlogger im Arbeitsgebiet Sattelkar eingerichtet wurden, bleibt zu hoffen, dass der intern als „der letzte Mohikaner“ bezeichnete Logger_07 für das weitere Monitoring nicht alleine bleibt.

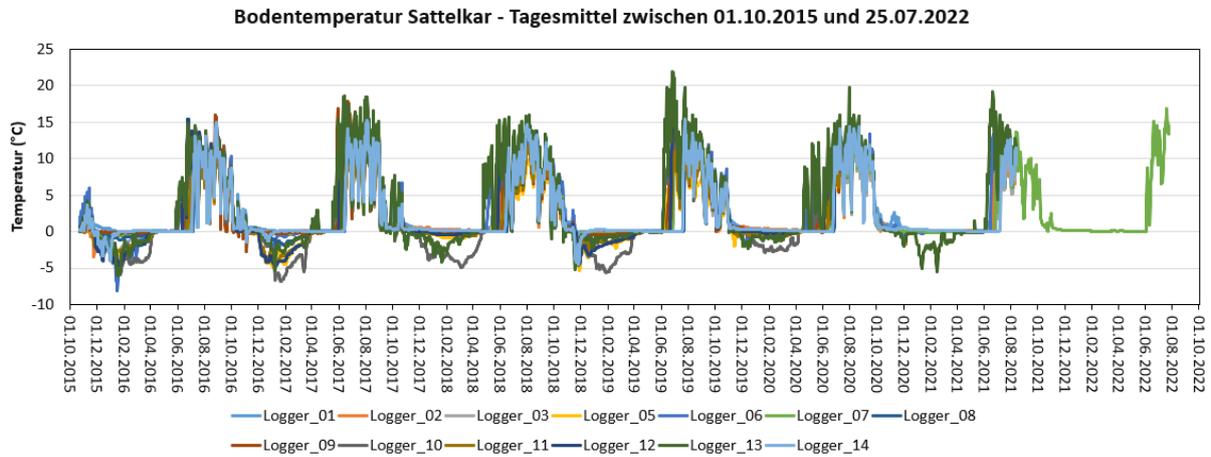


Abbildung 32: Tagesmitteltemperaturen von 13 Bodentempersensoren im Sattelkar im Zeitraum 01.10.2015 bis 30.09.2022. Datenbasis hierzu siehe Abbildung 31.

Auf Jahresbasis verglichen (Abb. 33) – in diesem Fall die Kalenderjahre 2018, 2019 und 2020 (aufgrund der Datenlage danach keine Werte) – kann gesagt werden, dass das Jahr 2020 an vier der sieben Standorte im Mittel nahezu gleich temperiert war wie 2019. An zwei Standorten war das Kalenderjahr 2020 um bis zu 0,5°C wärmer (Logger_06, Logger_14) und an einem Standort war das letzte Jahr um 0,2°C kühler. Der Vergleich der beiden Kalenderjahre 2020 und 2018 an denselben sieben Standorten zeigt, dass nahezu überall das Jahr 2020 etwas kühler war als 2018. Einzig am Standort Logger_13 lag der Jahresmittelwert für 2020 um 0,02°C über jenem von 2018. Diese Ergebnisse stimmen im Wesentlichen mit denen des „Grazer Permafrost-Monitoring-Netzwerkes“ im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten, die methodisch im Wesentlichen gleichartig gewonnen wurden, überein.

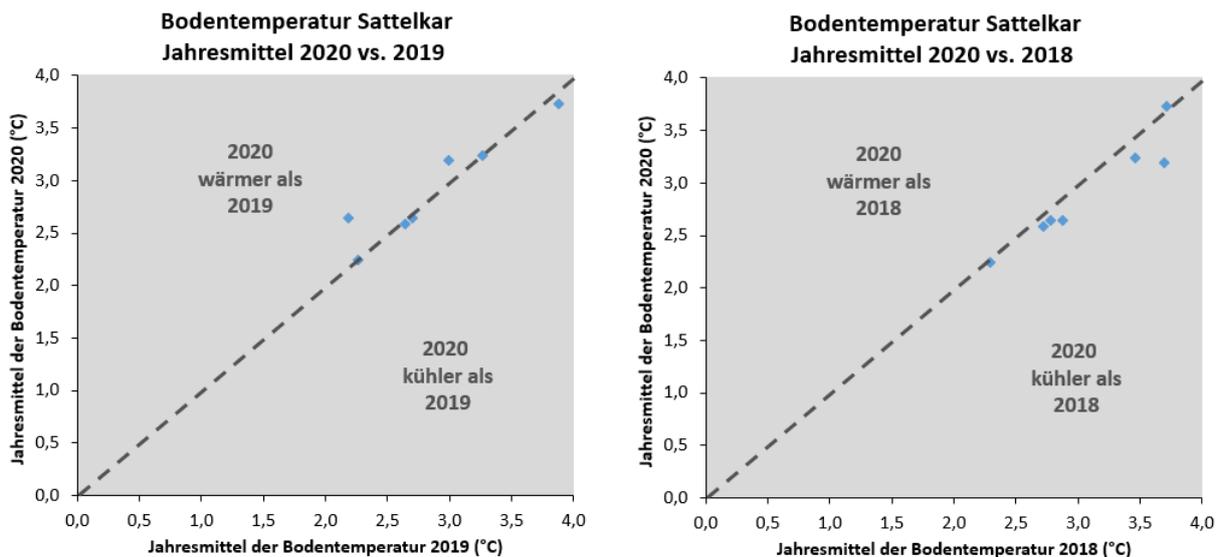


Abbildung 33: Vergleich der Jahresmittelwerte von sieben der 13 Bodentemperatur-Messstandorten im Sattelkar mit geschlossener Datenreihe für die drei Kalenderjahre 2018, 2019 und 2020. Linke Darstellung Vergleich 2020 mit 2019, rechte Darstellung Vergleich 2020 mit 2018. Datenbasis hierzu siehe Abbildung 32.

4. Diskussion

Die drei Projektjahre 2019/20 bis 2021/22 wiesen recht unterschiedliche meteorologische Bedingungen auf. In Bezug auf das Temperaturniveau in den drei Projektjahren war an den meisten der behandelten meteorologischen Stationen das erste Jahr auch das wärmste, das zweite das deutlich kühlfte und das dritte und letzte Jahr in der Mitte. Das erste und das letzte der drei Beobachtungsjahre waren insofern besonders, als dass nahezu alle Monate positive Abweichungen zur Klimanormalperiode 1981-2010 aufwiesen (wobei die Monate Jänner, Februar und April 2020 sowie Mai bis Juli 2022 sogar extrem zu warm waren). Im Jahr 2020/21 waren hingegen bloß Einzelmonate teilweise deutlich übertemperiert (z.B. November 2020 und Februar 2021), andere hingegen deutlich untertemperiert (Jänner, April und Mai 2021). Das generell deutlich tiefere Temperaturniveau im Jahr 2020/21 im Vergleich zu 2019/20 (und weiteren Vorjahren) sowie 2021/22 ändert nichts am Gesamtbild des aktuell herrschenden Erwärmungstrends in den Hohen Tauern bzw. in den Alpen allgemein.

Das Niederschlagsgeschehen in den drei Beobachtungsjahren war geprägt von Maxima der Jahresniederschlagssumme an den meisten bearbeiteten meteorologischen Stationen in 2019/20 und Minima im letzten Haushaltjahr, wobei v. a. inneralpine Messtationen in 2021/22 extrem geringe Niederschlagsmengen aufzeichneten. Die Niederschlagsmengen in 2020/21 lagen an den meisten Stationen unter denen des Vorjahres, jedoch waren die Abweichungen von den langjährigen Mitteln mäßig, sodass man dieses Jahr in Bezug auf das Niederschlagsgeschehen als eher unauffällig einstufen kann. Wie schon in den bisherigen Berichten ist besonders darauf hinzuweisen, dass die Jahressummen des Niederschlags langfristig keinen klaren Trend erkennen lassen – ganz im Gegensatz zu den Jahrestemperaturen (Abb. 9).

Im Abflussgeschehen sind die wohl auffallendsten Besonderheiten in der Projektperiode 2019/20 bis 2021/22 die hohen Abflussspitzen des Jahres 2020/21, die dadurch zustande kamen, dass ein hochsommerliches Starkniederschlagsereignis den ohnehin durch die sommerliche Eisablation erhöhten Abfluss steigerte, sodass an den Pegeln Innerschlöss und Neukirchen neue Maxima des mittleren Tagesabflusses seit 2014/15 registriert wurden. Solche Abflussspitzen können bis zu einem gewissen Grad auch dem dynamisch voranschreitenden Gletscherschwund zugeschrieben werden, da die Gletscher als hochwirksamer Rückhalt für Niederschläge immer mehr an Bedeutung verlieren. Hinzu kommt, dass die sommerlichen Niederschläge auch im Sommer 2021 in den meisten Fällen bis ins 3000 m-Niveau hinauf in Form von Regen fielen. Im letzten Berichtsjahr 2021/22 war auffällig, dass sich das Abflussgeschehen am Pegel Innerschlöss in den Monaten Juni bis September besonders deutlich (und klarer als in den Vorjahren) von jenen an den Pegeln Mallnitz und Neukirchen unterschied. Am Pegel Innerschlöss wird deutlich, dass die sehr gletscherabträglichen sommerlichen Temperaturen insbesondere im Sommer 2022 eine verstärkte Wasserzufuhr durch Gletscherschmelze bedingten. Dies ist insofern auch gut erklärbar, als der Anteil der vergletscherten Fläche des 39,5 km² großen Einzugsgebietes oberhalb des Pegels Innerschlöss 27,3 % beträgt, wohingegen das 78,6 km² große Einzugsgebiet oberhalb des Pegels Mallnitz nur mit 0,6 % und das Einzugsgebiet des Pegels Neukirchen (40,2 km²) mit 11,8 % vergletschert (Lieb et al. 2019; Stand der Vergletscherung 2015) sind. Eine weitere zu erwartende Abnahme der vergletscherten Fläche in den drei Einzugsgebieten wird sich hydrologisch insofern auswirken, als dass Abflussspitzen (in m³/s), monatliche Abflusssummen (m³/Monat) und Abflusshöhen (mm/a) sich wesentlich verändern werden. Hierbei wird es interessant sein zu beobachten, wie die insgesamt geringer werdenden Eismassen (Verringerung verfügbarer Wasservolumina) mit weiterhin hoher sommerlicher Abschmelzung zusammenwirken werden. Langfristig wird sich die Gletscherspende jedoch sicher verringern und aus den aktuell glazialen Flussregimen werden nivale werden.

Die Längenänderungen und Massenbilanzen der im Nationalpark Hohe Tauern beobachteten Gletscher waren in allen drei Gletscherhaushaltsjahren fast ausschließlich negativ bis hochnegativ. Insbesondere das letzte Jahr 2021/22 erwies sich als außerordentlich gletscherabträglich mit einem neuen Negativrekord der mittleren Längenänderung für ganz Österreich mit -28,7 m (Beginn der Messreihe 1891(!)). Ursache hierfür waren die geringen Schneerücklagen im Winter 2021/22 und die außerordentlich hohen Temperaturen über mehrere Monate im Sommerhalbjahr, die die spärlichen winterlichen Schneereserven rasch aufzehrten und folglich die



strahlungsreiche, warme Witterung die Eisvolumina der Gletscher nicht nur wie in Normaljahren üblich über Wochen, sondern über Monate reduzierte. Das Haushaltsjahr 2020/21 brachte insofern nur eine kurze, leichte Abschwächung des drastischen Gletscherrückzuges mit sich. Der relativ gesehen geringere Eisverlust im Jahr 2020/21 ist vor allem zwei Faktoren geschuldet: Einerseits – und dies ist klar der Hauptfaktor – brachte das kühle und niederschlagsreiche Frühjahr im Gletscherniveau noch Zuwächse der Schneehöhen bis Ende Mai 2021, weshalb die Gletscher noch lange in den Hochsommer hinein von diesen Rücklagen zehrten. Andererseits war der Hochsommer selbst nur leicht überdurchschnittlich temperiert, was ebenfalls die Eisablation reduzierte. Dennoch fügt sich auch das Gletscherhaushaltsjahr 2020/21 nahtlos in die herrschende Periode dramatischen Gletscherschwundes ein, worin das letzte Haushaltsjahr einen vorläufigen Höhepunkt darstellt. Besonders deutlich zeigen dies die neuen Negativrekorde der Massenbilanzen.

Die meisten zu den Bodentemperaturverhältnissen verfügbaren Daten für die Jahre 2020/21 und 2021/22 signalisieren zwar gegenüber dem Jahr 2019/20 etwas günstigere Bedingungen für den Permafrost, der übergeordnete Trend der kontinuierlichen Bodenerwärmung (und folglich Permafrost-Degradation) bleibt davon aber unberührt. Die relative Permafrostgunst im Jahr 2020/21 hatte – ähnlich wie die leicht abgemilderte Gletscherungunst – mit der langen Andauer der Winterschneedecke bis in den Hochsommer hinein zu tun, wie man insbesondere an den Längen der Zero-Curtain-Perioden erkennen kann. Da aber zuvor im Herbst 2020 die Auskühlung des Untergrundes durch frühes Einschneien vieler Lagen behindert wurde, wirkte sich dieser Effekt nur geringfügig aus, sodass das Projektjahr 2020/21 insgesamt immer noch als permafrostungünstig bewertet werden muss. Dies beweist am deutlichsten der morphodynamische Aspekt der Blockgletscherbewegung, die an den beiden Referenz-Blockgletschern (und auch anderen) nicht nur höher als im Vorjahr war, sondern auch neue Maximalwerte in den langjährigen (am Dösender Blockgletscher bis 1995 zurückgehenden Datenreihen hervorbrachten). Dies ist ein untrügliches Zeichen für langfristig zunehmende Temperaturen im Untergrund, die den kriechenden Permafrost aktuell noch mobiler machen, bevor in noch fernerer Zukunft Permafrost-Degradation noch großflächiger um sich greifen wird. Die im Beobachtungsjahr 2021/22 festgestellte Abnahme der Blockgletscherbewegung in beiden Untersuchungsgebieten ist mit den tiefen Bodentemperaturen bedingt durch die Schneearmut im Winter 2021/22 (effiziente Auskühlung des Untergrundes), wohl aber auch durch die reduzierte Wasserverfügbarkeit in den Blockgletschersedimenten in den trockenen Sommermonaten zu begründen. Dies zeigt exemplarisch das komplexe Wirkungsgefüge von Temperatur, Schnee und Wasserverfügbarkeit auf die Dynamik von Blockgletschern.

5. Fazit mit Ausblick

Die in diesem Bericht primär untersuchte dreijährige Periode 2019/20 bis 2021/22 (1.10.2019–30.9.2022) fügt sich nach allen hier untersuchten Parametern im Wesentlichen uneingeschränkt in die bekannte aktuelle Klimaentwicklung mit den bekannten Klimawandelfolgen ein:

- Auch wenn die Lufttemperaturen im Jahr 2020/21 deutlich tiefer waren als im Jahr davor und danach, liegen diese insgesamt immer noch auf langfristig gesehen hohem Niveau und bedeuten darin nur einen geringfügigen Ausschlag nach unten, der sich dem übergeordneten Trend steigender Temperaturen unterordnet. Dieser Trend der Lufttemperaturveränderung ist ganz klar in den langjährigen Datenreihen ersichtlich. Demgegenüber bleibt das Niveau der Niederschlagsmengen über die Jahre hinweg annähernd konstant und zeigt keinen signifikanten Trend.
- Bei den Abflussverhältnissen im untersuchten dreijährigen Zeitraum fielen einerseits hohe Abflussspitzen durch ein hochsommerliches Hochwasserereignis im Juli 2021 auf, andererseits machte sich die Trockenperiode in den Sommermonaten 2022 insofern stark bemerkbar, als dass Monatssummen des Abflusses in wenig vergletscherten Gebieten neue Negativrekorde erreichten, während der massive Eisschwund in stärker vergletscherten Einzugsgebieten erhöhte Abflussmengen bewirkte.
- Auch der Gletscherschwund als wohl markanteste Klimawandelfolge im Hochgebirge hat sich in den drei hier behandelten Jahren fortgesetzt. Im Gletscherhaushaltsjahr 2020/21 war er ein klein wenig abgemildert – primär als Folge eines schneereichen Mais, der die Eisabschmelzung erst relativ spät im Sommer einsetzen ließ. Auch die zufällig etwas höhere Zahl an Gletschern mit stationärem Verhalten im Jahr 2020/21 darf nicht als Gletschergunst gedeutet werden. Das Jahr 2021/22 ging als das bisher schlechteste Gletscherhaushaltsjahr sowohl in Bezug auf die Längenänderungen als auch auf die Massenverluste in die (wissenschaftlichen) Geschichtsbücher ein: Mit einem Mittelwert von 28,7m (zufälligerweise für alle vom ÖAV vermessenen Gletscher in Österreich derselbe wie für die 29 im Nationalpark Hohe Tauern) wurde ein neuer Rekord in der Gletschermessgeschichte des ÖAV (Messreihe seit 1891) erzielt, ein untrügliches Zeichen der Auswirkungen des gegenwärtigen Klimawandels.
- In ähnlicher Weise sind die gegenüber dem Vorjahr etwas tieferen Bodentemperaturen im Jahr 2020/21 keineswegs als günstige Bedingungen für den Permafrost zu werten. Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern zeigt vielmehr durch langfristig unverkennbare (an den meisten Standorten längst statistisch signifikante) Temperaturzunahmen und vor allem die hohen Bewegungsbeträge der Blockgletscher – mit neuen Maxima im Projektjahr 2020/21 und nur leichter Abnahme der Geschwindigkeit im Jahr 2021/22 – an, dass auf großen Flächen im Nationalparkgebiet massive Permafrost-Degradation im Untergrund vorstattengeht.

Insgesamt sind die Veränderungen der im gegenständlichen Modul beobachteten Geofaktoren im Zeitraum 2019 bis 2022 als sehr schwerwiegend zu bewerten: Es ist eine massive Umgestaltung der Hochgebirgsnatur, soweit diese mit den hier untersuchten Faktoren interagiert, zu konstatieren. Insbesondere die Prozesse Gletscherschwund und Permafrost-Degradation sind von besonderer Bedeutung, da sie auf bedeutenden Flächen die Disposition für andere Naturprozesse verändern. Unter diesen sind neben Hochwässern – wie sie auch 2021/22 auftraten – vor allem gravitative Massenbewegungen, speziell in Form von Felsstürzen und Muren, zu beachten, bei denen eine weitere Zunahme von Häufigkeit und Größe unter diesen veränderten Gegebenheiten wahrscheinlich ist.

Zu warme – und trockene – Sommermonate wie im Jahr 2022 setzen den Gletschern und dem Permafrost im Hochgebirge zu und wirken sich indirekt auf hydrologische (z. B. Abfluss) oder morphodynamische Prozesse (z. B. Blockgletscherbewegung, Steinschlag) aus. Der gegenständliche Endbericht belegt klar außerordentlich starke Veränderungen in der alpinen Kryosphäre, die in ihrem Ausmaß innerhalb vergleichsweise kurzer Zeit weit jenseits



dessen liegen, was bisher wissenschaftlich beobachtet wurde. Eine Fortführung dieses Monitorings erscheint daher nicht nur aus wissenschaftlichen Überlegungen heraus angeraten, sondern ist auch von hohem gesellschaftlichem Interesse. Denn Veränderungen der abiotischen Natur im Hochgebirge verändern nicht nur das Erscheinungsbild des Nationalparks (und die Rahmenbedingungen für die belebte Natur), sondern teilen sich über die in diesem Bericht nur angedeuteten Prozessgefüge auch den tiefer gelegenen Gebieten mit.



Literaturverzeichnis

Buckel J., Otto J.C., Prasicek G. & Keuschnig M. (2018): Glacial lakes in Austria - Distribution and formation since the Little Ice Age. *Global and Planetary Change* 164, 39–51.

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

Kellerer-Pirklbauer A. (2017): Potential weathering by freeze-thaw action in alpine rocks in the European Alps during a nine-year monitoring period. *Geomorphology*, 296 (2017), 113–131.

Kellerer-Pirklbauer A. (2018): Solifluction rates and environmental controls at local and regional scales in central Austria, *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography*, 72:1, 37-56.

Kellerer-Pirklbauer A. & Kaufmann V. (2012): About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105/2, 94-112.

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

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

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

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

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

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

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V. & Avian M. (2018): Permafrost im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2016/17. Unveröffentlichter Bericht, Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz, 33 Seiten.

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G. K., Kaufmann V. & Avian M. (2019): Permafrost-Monitoring Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2016-2018 – Projektendbericht. Unveröffentlichter Bericht, Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz, 41 Seiten. http://www.parc.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=42111



Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M. (2020): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2018/19. Zwischenbericht (unpubliziert), 41 Seiten.
http://www.parc.at/nphtk/mmd_fullentry.php?docu_id=39747

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., Kaufmann V., Avian M., Frießenbichler M., Eulenstein J. (2023): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2022-2024. 1. Zwischenbericht für 2021/22, 48 Seiten.

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.

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.

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.

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.parc.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=38030.

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

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



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

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.) (2023): Latest glacier mass balance data: 1 Summary of the balance years 2019/20, 2020/21 and 2021/22. <http://wgms.ch/latest-glacier-mass-balance-data> (zuletzt geprüft am 10.4.2023)

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

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



Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Lage der drei Untersuchungsgebiete für das Langzeit-Ökosystemmonitoring sowie die Lage der in dieser Studie verwendeten Klima- und Abflussmessstationen (GeoSphere Austria- oder HZB-Stationen), der durch Monitoring erfassten Gletscher und der Permafrost-Untersuchungsgebiete. Ergänzend sind auch alle automatischen Wetterstationen (n=85), die innerhalb des Nationalparks sowie in der näheren Umgebung installiert sind (siehe hierzu Lieb et al. 2019), verortet. HZB=Hydrographisches Zentralbüro, KFU=Karl-Franzens-Universität Graz, ÖAV=Österreichischer Alpenverein, TUG=Technische Universität Graz, ZAMG=Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ab 01.01.2023 als GeoSphere Austria geführt). 2
- Abbildung 2: Detailkarten der vier Untersuchungsgebiete zum Permafrost-Monitoring im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten mit Lage aller Messstandorte, welche mit Miniatur-Temperaturdatenlogger ausgestattet sind (vgl. Tabelle 5). Standort HLC-SO-S wurde nach 7 Jahren im Jahr 2020 wieder reaktiviert. Logger KC-LIA und KC-RID wurden 2022 neu eingerichtet. Der Standort GOE-PR liegt außerhalb der Kartenausschnitte (Gletschermaske für Pasterze und benachbarte Gletscher nach Buckel et al. 2018). 7
- Abbildung 3: Vergleich der Schneebedingungen im Zuge der Geländearbeit am 03.09.2020, 05.09.2021 und 04.09.2022 im Bereich der Gipfelpyramide (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. Fotos: Andreas Kellerer-Pirklbauer. 9
- Abbildung 4: Blick vom Inneren Knorrkogel auf das Karleskees und den Äußeren Knorrkogel (2920 m) am 04.09.2022. Zu beachten ist das weitgehende Fehlen von Schneefeldern (auch auf dem Gletscher) in der Hochgebirgslandschaft der Hohen Tauern. Foto: Andreas Kellerer-Pirklbauer. 10
- Abbildung 5: Gegenüberstellung der Jahresmitteltemperaturen von 2021/22 mit 2019/20, 2021/22 mit 2020/21 sowie 2020/21 mit 2019/20 von sieben Klimastationen, deren Daten den Inhalt der Tabelle 7 bilden. Der wärmste Standort ist jeweils die Station Malta, der kälteste in allen drei Jahren die Station Sonnblick. 14
- Abbildung 6: Gegenüberstellung der Jahressumme des Niederschlags von 2021/22 mit 2019/20, 2021/22 mit 2020/21 sowie 2020/21 mit 2019/20 von neun Klimastationen, deren Daten den Inhalt der Tabelle 6 bilden. 15
- Abbildung 7: Monatswerte der Lufttemperatur im Zeitraum Oktober 2019 bis September 2022 an den sieben Klimastationen Rudolfshütte, Kolm-Saigurn, Sonnblick, Heiligenblut, Malta, Gerlos und Felbertauern. 17
- Abbildung 8: Vergleich der Monatsmittelwerte der Lufttemperatur (in °C) der Gletscherhaushaltsjahre 2019/20, 2020/21 und 2021/22 mit jenen der Klimanormalperiode 1981–2010 an der Station Sonnblick (3109 m). Oben: dargestellt als Mittelwerte in °C; Unten: dargestellt als Abweichung zur Klimanormalperiode 1981-2010. 18
- Abbildung 9: Langzeitentwicklung von Niederschlag (Station Neukirchen) und Temperatur (Station Sonnblick). Entwicklung der Jahreswerte (Kalenderjahre) im Zeitraum 1973–2022 und entsprechende Trends. Niederschlag: Keine signifikanten Veränderungen erkennbar. Temperatur: Klarer



Erwärmungstrend. Für die Temperatur sind zusätzlich auch Dekadenmittelwerte (1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 und 2011-2020) angegeben.	19
Abbildung 10: Vergleich der gemessenen mittleren täglichen Abflüsse (Q in m ³ /s) der drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im achtjährigen Zeitraum 01.10.2014–30.09.2022.....	20
Abbildung 11: Vergleich des gemessenen mittleren täglichen Abflusses (Q im m ³ /s) an den drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im Zeitraum 01.10.2019–30.09.2022. Die untere Kurve ist ein Ausschnitt aus der oberen mit veränderter Skalierung der Ordinate und fokussiert auf den Bereich bis zu 6 m ³ /s.....	22
Abbildung 12: Monatssummen des Abflusses (Q) der drei HZB-Stationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im Zeitraum 01.10.2019 – 30.09.2022.....	23
Abbildung 13: Mittlere Längenänderungen an 20 Gletschern im Nationalpark Hohe Tauern, von denen für die siebenjährigen Periode 2015/16 bis 2021/22 Längenänderungsdaten lückenlos vorliegen (siehe Tabelle 11). In Rot gehalten die drei für diesen Bericht relevanten Jahre. Weitere Erläuterung siehe Text.....	25
Abbildung 14: Längenänderungen an den vier Gletschern Schlatenkees (Venedigergruppe), Winkelkees (Ankogel-Hochalmspitzgruppe), Untersulzbachkees (Venedigergruppe) und Pasterze (Glocknergruppe) im Zeitraum 2011/12–2021/22. Erläuterungen im Text.....	26
Abbildung 15: Spezifische Jahresmassenbilanz an vier ausgewählten Gletschern in den Hohen Tauern zwischen 2015/16 und 2021/22. Die Jahreswerte sind in mm Wasseräquivalent (mm w.e.) angegeben.	28
Abbildung 16: Jahresmitteltemperatur an/nah der Bodenoberfläche aller Messstandorte in den vier Untersuchungsgebieten für die drei Beobachtungsjahre 2019/20 bis 2021/22 (jeweils 01.08. bis 31.07. des Folgejahres). Standort KC-LO (ND/no data) hat aufgrund von Schneebedeckung und einem technischen Gebrechen keinen einzigen Jahresdatensatz.	29
Abbildung 17: Tagesmitteltemperaturen der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten im (bzw. FAL-UP im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten für die drei Messjahre 2019/20 bis 2021/22. Messbereiche im Winterhalbjahr mit geringer Schwankung deuten auf Dämpfungseffekte durch eine mächtige Schneedecke (>80 cm) hin. In Grau sind die Tagesmittelwerte der automatischen Klimastation im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS) dargestellt. Bedingt durch Probleme mit der Stromversorgung an der Klimastation im Hinteren Langtalkar liegen von dort keine Lufttemperaturdaten für den Zeitraum 14.05.2021 bis 12.06.2021 vor.	31
Abbildung 18: Gegenüberstellung der Jahresmittelwerte der drei Projektjahre von 2019/20 bis 2021/22 an allen Bodentemperaturmessstationen mit entsprechenden Daten (2021/22 vs. 2019/20; 2021/22 vs. 2020/21; 2019/20 vs. 2020/21).....	32
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 2021/22. Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten sind dargestellt. Jene für DOV-UP-S, HLC-UP-N und PAG-UP sind statistisch signifikant (alle drei p<0,05 – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 5%; die beiden letztgenannten sogar p<0,01 – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1%).	33





Abbildung 20: Tagesmitteltemperaturen im Bohrloch 3 am Sonnblick im Zeitraum 01.10.2019–30.09.2022 in fünf unterschiedlichen Tiefen sowie im Vergleich dazu die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (AT) an der TAWES-Station Sonnblick. Die Lücken in den Kurven zeigen Zeiträume, in denen bedingt durch technische Probleme oder Wartungstätigkeiten keine Daten aufgezeichnet wurden (Daten: GeoSphere Austria).	34
Abbildung 21: Tagesmitteltemperaturen im Bohrloch 3 am Sonnblick im Zeitraum 1.10.2014–30.9.2022 in fünf unterschiedlichen Tiefen sowie im Vergleich dazu die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (AT) an der TAWES-Station Sonnblick. Hinweise zu Datenlücken und Quelle siehe Abbildung 19.	35
Abbildung 22: Jahresmitteltemperaturen für drei Kalenderjahre mit geschlossenen Datenreihen in der jüngeren Vergangenheit im Bohrloch 3 am Sonnblick. Datenbasis hierzu siehe Abbildung 21.	36
Abbildung 23: Jännermitteltemperaturen für die sieben Jahre von 2016 bis einschließlich 2022 im Bohrloch 3 am Sonnblick. Datenbasis hierzu siehe Abbildung 21.	36
Abbildung 24: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Döener Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2019/20. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (cm/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2-3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Eine maximale Fließgeschwindigkeit von 58,9 cm/Jahr wurde am Punkt 15 gemessen. Ein betragsmäßig größerer Wert von 90,7 cm/Jahr, gemessen im Punkt 1, ist jedoch nicht repräsentativ, da er von einer lokalen Rutschung herrührt. Orthofoto 20.09.2010 © Land Kärnten.	37
Abbildung 25: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Döener Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2020/21. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (cm/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2-3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Eine maximale Fließgeschwindigkeit von 71,0 cm/Jahr wurde im Punkt 15 gemessen. Ein betragsmäßig größerer Wert von 135,0 cm/Jahr, gemessen im Punkt 3, ist nicht repräsentativ, da er von einer lokalen Rutschung rührt. Orthofoto 20.09.2010 © Land Kärnten.	37
Abbildung 26: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Döener Blockgletscher mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2021/22. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (cm/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2-3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Eine maximale Fließgeschwindigkeit von 61,4 cm/Jahr wurde im Punkt 15 gemessen. Orthofoto 20.09.2010 © Land Kärnten.	38
Abbildung 27: Herausforderungen bei der Durchführung der terrestrischen geodätischen Messungen am Blockgletscher Hinteres Langtalar im Jahr 2022. (a) Der Block mit dem Messpunkt 45 ist verkippt und es kann nur mehr der Ersatzpunkt 45A an der Oberkante des Blockes eingemessen werden; (b) Einmessung des absturzgefährdeten Punktes 27 – 6,44 m weiter talaufwärts wurde der neue Ersatzpunkt 27A eingerichtet. Fotos W. Krämer, 20.08.2022.	39
Abbildung 28: 2D-Bewegungsvektoren (rot) der 34 am Blockgletscher Hinteres Langtalar mit Messingbolzen stabilisierten Messpunkte für den Zeitraum 2020/21, dem Messjahr mit den bisher höchsten dort je gemessenen Beträgen (seit 1995). Bereiche mit hohen bzw. geringen Bewegungsbeträgen verhielten sich in den Jahren zuvor und dem danach prinzipiell ähnlich. Punktnummern in Gelb, Fließgeschwindigkeiten (m/Jahr) in Schwarz auf weißem Grund. Das Signifikanzniveau liegt bei ca. $\pm 2-3$ cm/Jahr (1σ -Schranke). Eine maximale Fließgeschwindigkeit von 3,94 m/Jahr wurde im Punkt 23 gemessen. Orthofoto 28.08.2012 © Land Kärnten.	40





Abbildung 29: Direkter Vergleich der mittleren jährlichen horizontalen Oberflächenbewegung der beiden Blockgletscher Dösen – zentraler Bereich, Hinteres Langtalkar (HLK) – oberer Bereich A und Hinteres Langtalkar – unterer Bereich B für den Zeitraum 1995–2022. Mittelbildung über 11 Punkte (10–17, 21–23) am Dösender Blockgletscher, 9 Punkte (10–17, 37) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar (oberer Bereich A) und 8 Punkte oder reduzierte Punkteanzahl (23–25, 27–31) am Blockgletscher Hinteres Langtalkar (unterer Bereich B). Im Jahr 2003 fand keine Messung am Blockgletscher Dösen (Pfeil) statt.	41
Abbildung 30: Jahresmitteltemperatur aller Messstandorte mit geschlossenen Datenreihen an/nahe der Bodenoberfläche im Zeitraum 01.09.2021 bis 31.08.2022 (siehe hierzu Text) am Inneren Knorrkogel (Messjahr 2021/22). Bei den Dreikanal-Datenloggern sind die Messsensoren in 3, 10 und 40 cm Tiefe installiert und entsprechend in der Grafik ausgewiesen. Zum Vergleich sind die Mittelwerte der drei Vorjahre (siehe Tabelle 15) dargestellt.....	44
Abbildung 31: Tagesmitteltemperaturen der Bodentemperatursensoren im Sattelkar im Zeitraum 01.10.2019 bis 25.07.2022. Datenausfall im Laufe der Beobachtungsperiode war bedingt v. a. durch Stromversorgungsprobleme der Datenlogger – siehe Text. Zur Vergleichbarkeit mit der folgenden Abbildung 32 wurde in dieser Grafik die idente Legende inklusive Farbcodierung verwendet (Daten: GEORESEARCH; Kontaktperson: Ingo Hartmeyer, ingo.hartmeyer@georesearch.at).	45
Abbildung 32: Tagesmitteltemperaturen von 13 Bodentemperatursensoren im Sattelkar im Zeitraum 01.10.2015 bis 30.09.2022. Datenbasis hierzu siehe Abbildung 31.....	46
Abbildung 33: Vergleich der Jahresmittelwerte von sieben der 13 Bodentemperatur-Messstandorten im Sattelkar mit geschlossener Datenreihe für die drei Kalenderjahre 2018, 2019 und 2020. Linke Darstellung Vergleich 2020 mit 2019, rechte Darstellung Vergleich 2020 mit 2018. Datenbasis hierzu siehe Abbildung 32.	46



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: TAWES-Stationen der GeoSphere Austria, die für die gegenständliche Studie verwendet wurden, mit Angabe des jeweiligen Beginns der verfügbaren Datenreihe. Erläuterungen siehe Text. Lage der Stationen siehe Abbildung 1.....	2
Tabelle 2: Klimastationen der hydrographischen Landesdienste, die für die gegenständliche Studie verwendet wurden, mit HZB-Code (Hydrographischer Dienst Österreichs) und Beginn der verfügbaren Datenreihe. Erläuterungen siehe Text. Lage siehe Abbildung 1. (1) Datenlücke von 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) angegeben. Erläuterungen siehe Text. Lage siehe Abbildung 1.....	3
Tabelle 4: Gletscher in den Hohen Tauern, an denen Massenbilanzen durch verschiedene Institutionen bestimmt werden (Quelle: WGMS 2023, ergänzt). GeoSphere Austria (bis 31.12.2022 ZAMG); ÖAW=Österreichische Akademie der Wissenschaft; HD-Sbg=Hydrographischer Dienst des Landes Salzburg; Z_GIS= Fachbereich Geoinformatik, Universität Salzburg.....	5
Tabelle 5: Auflistung der vier lokalen Untersuchungsgebiete im (bzw. Fallbichl-Hochtor im Nahbereich vom) Nationalpark Hohe Tauern Kärnten und ihrer Instrumentierung mit Miniatur-Temperaturdatenloggern. Lage der Einzelstationen siehe Abbildung 2. Abbildungen 17 und 19 zeigen Auswertungen der jeweils grau hinterlegten Sensoren. HLC=Hinteres Langtalkar-Kögelekar, FAL=Fallbichl, HOT=Hochtor, DOV=Dösen-Säuleck, PAG=Pasterze-Burgstall. GOE-PR ist ein Standort im Gößnitzkar, 2,6 km SW vom Kögelekar. Der Code für jeden Standort besteht (bis auf eine Ausnahme: GOE-PR) aus diesen Bezeichnungen in Kombination mit weiteren, internen Kürzeln; z. B. N=Nord, S=Süd.....	6
Tabelle 6: Übersicht über die 18 Monitoring-Standorte in 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_20230412.csv“ und „bearb_daten_metadaten_20230412.csv“.....	11
Tabelle 7: Jahreswerte der Lufttemperatur (T, in °C) und Jahressummen des Niederschlags (P, in mm) in den acht Haushaltsjahren 2014/15 bis 2021/22 (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 für diesen Endbericht relevante Projektzeitraum (* Datenlücke 01.03.2019–31.03.2019). Fettstellung markiert den jeweils höchsten Wert der 3-jährigen Periode. n.d.=fehlende Daten.....	13
Tabelle 8: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur (in °C) und Abweichungen der Monatsmittelwerte der drei Gletscherhaushaltsjahre 2019/20 bis 2021/22 von jenen der Klimanormalperiode 1981–2010 (in °C) an der Station Sonnblick (3109 m).....	18
Tabelle 9: Jahresmenge des Abflusses (Q) an den Abflussmessstationen Mallnitz (Kärnten), Neukirchen (Salzburg) und Innerschlöss (Tirol) im Zeitraum 01.10.2014–30.09.2022; Gesamtabfluss in den	



einzelnen Gletscherhaushaltsjahren sowie Monatsminima und Monatsmaxima. Grau hinterlegt ist der für diesen Endbericht relevante Projektzeitraum.....	21
Tabelle 10: Abflusshöhe (Quotient aus Durchflussvolumen pro Beobachtungsperiode und Einzugsgebietsfläche) in mm für die sechs glaziologischen Haushaltsjahre 2014/15–2019/20 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 die drei Jahre des aktuellen Projektzeitraumes.	23
Tabelle 11: Auflistung der im Nationalpark Hohe Tauern durch den Österreichischen Alpenverein jährlich vermessenen Gletscher mit Angaben zur Längenänderung in den Gletscherhaushaltsjahren 2015/16 bis 2021/22. Lage siehe Abbildung 1. Grau hinterlegt sind die für diesen Endbericht relevanten drei Gletscherhaushaltsjahre.	24
Tabelle 12: Spezifische Massenbilanzen an sieben Gletschern im Bereich des Nationalparks Hohe Tauern für die sieben Gletscherhaushaltsjahre 2015/16–2021/22 in mm Wasseräquivalent. Grau hinterlegt sind die für diesen Endbericht relevanten drei Gletscherhaushaltsjahre.....	27
Tabelle 13: Bewegungsraten am Dösener Blockgletscher für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2015/16 bis 2021/22. Die Mittelwerte wurden aus den Bewegungsraten der zentralen Punkte 10–17 und 21–23 gerechnet. Die Maximalwerte wurden jeweils im Punkt 15 festgestellt. Grau hinterlegt ist der für diesen Endbericht relevante Projektzeitraum.....	38
Tabelle 14: Bewegungsraten am Blockgletscher Hinteres Langtalkar für die Einzeljahre des Beobachtungszeitraumes 2015/16 bis 2021/22 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 für diesen Endbericht relevante Projektzeitraum.	40
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 2021/22 sowie deren Mittelwert über die 4 Jahre (in Ausnahmen 3 Jahre*). ND = no data (siehe hierzu Methodenkapitel). Grau hinterlegt ist der für diesen Endbericht relevante Projektzeitraum.	42





Herausgeber:

Nationalparkrat Hohe Tauern

Kirchplatz 2, 9971 Matri

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

www.hohetauern.at