



Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen - Methoden-Handbuch

Modul 07: Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost (Version: 08/2019)



Impressum

Für den Inhalt verantwortlich:

KELLERER-PIRKLBAUER, A., LIEB, G.K. / UNIVERSITÄT GRAZ

Nationalpark Hohe Tauern, Kirchplatz 2, 9971 Matrei i.O.

Projektleitung: LIEB, G.K.

Fotos: © Gerhard Karl Lieb, Andreas Kellerer-Pirklbauer

Titelbild: Einrichtung eines Felstemperaturmonitoringstandortes als Teilelement des Permafrost - Monitoringmessnetzes am Inneren Knorrkogel, Tirol, im August 2018

Zitiervorschlag: Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K. (2019): Kellerer-Pirklbauer A, Lieb GK (2019) 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

Weblink:

<https://verlag.oeaw.ac.at> und http://www.parks.at/npht/mmd_fullentry.php?docu_id=38065

Graz, 12.08.2019

Inhaltsverzeichnis

Zielsetzung	1
Hintergrund und Arbeitsablauf Bereich Witterung und Klima	1
Hintergrund und Arbeitsablauf Bereich Abfluss	6
Hintergrund und Arbeitsablauf Bereich Gletscher	8
a. Monitoring Längenänderung von Gletschern	9
b. Monitoring Massenbilanz von Gletschern	11
Hintergrund und Arbeitsablauf Bereich Permafrost	12
a. Monitoring von Permafrost und der Bodentemperatur im Nationalpark Hohe Tauern im Rahmen des gegenständlichen Projektes	13
b. Monitoring von Permafrost und Bodentemperatur im Nationalpark Hohe Tauern im Rahmen anderer Projekte	18
Aussagewert und Einbettung Modul 07	21
a. Aussagewert für das gesamte Schutzgebiet	21
b. Einbettung in Forschungsnetzwerke	21
Interpretation der wichtigsten Erhebungsparameter	22
a. Bereich Witterung und Klima	22
b. Bereich Abfluss	22
c. Bereich Gletscher	22
d. Bereich Permafrost	23
Abbildungsverzeichnis	25
Tabellenverzeichnis	27
Literaturverzeichnis	28

Zielsetzung

Ziel des gegenständlichen Dokuments ist es einen ausführlichen methodischen Textbeitrag über das Monitoring im Modul 07 „Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost“, einem Teilbereich des Projektes „Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen“, zu präsentieren. Dieser Textbeitrag soll auch für die Ausschreibung des Teilprojektes Modul 07 nach Abschluss der Pilotphase geeignet sein. Schließlich soll auch der Aussagewert für das Testgebiet sowie für das gesamte Schutzgebiet in Verbindung mit einer langfristigen Fortführung festgehalten werden.

Im Modul 07 „Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost“ im Rahmen des interdisziplinären, integrativen Monitoring- und Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern gilt es hierzu Folgendes vorab zu bedenken. Unsere Arbeitsgruppe arbeitete in diesem Modul, so wie das von Anfang an für das Modul vorgesehen war, mit Daten, die außerhalb des gegenständlichen Pilotprojekts generiert werden. Die einzige Ausnahme sind jene Monitoringdaten, die seit August 2018 am Monitoring-Site Innerer Knorrkogel (Osttirol) aufgezeichnet werden. Dies impliziert, dass wir in Bezug auf die Übergabe der Daten und das Methodenhandbuch nur die Messstellen am Inneren Knorrkogel in aller Detailliertheit und die anderen Parameter bzw. die hinter diesen stehenden methodischen Schritte entsprechend weniger detailliert abhandeln können. Es macht in diesem Zusammenhang selbstverständlich wenig Sinn, den z. B. Aufbau einer Wetterstation vom TAWES-Typ der ZAMG zu beschreiben, da solche Stationen ja ohnehin nur die ZAMG betreiben und aufstellen kann. Ähnliches gilt für die Abflussmessstellen der Hydrographischen Landesdienste, für die Gletscherdaten vom Österreichischen Alpenverein, für die betreibenden Institutionen von Massenbilanz-Messungen sowie auch für die Permafrost-Messungen des „Grazer Permafrost-Monitoring-Netzwerkes“ im Kärntner Anteil des Nationalparks bzw. für ähnliche Messungen durch die Firma GEORESEARCH im Salzburger Anteil des Nationalparks Hohe Tauern. Hierfür können wir im Wesentlichen Hintergrundinformationen und Metadaten kompilieren, verbunden mit dem Verweis darauf, dass die Institutionen, von denen die Daten zu beziehen sind, für das Zustandekommen ihrer Daten verantwortlich und dass diese mit statistischen Standardmethoden auszuwerten sind.

Aufgrund der geschilderten Tatsache ergeben sich in den Hauptkapiteln immer die Hinweise zu Hintergrund und Arbeitsablauf; im konkreten Fall zu Witterung und Klima, Abfluss, Gletscher und schließlich Permafrost. Die beiden zuletzt genannten Themenbereiche untergliedern sich zum einen in „Monitoring Längenänderung von Gletschern“ und „Monitoring Massenbilanz von Gletschern“, zum anderen in „Monitoring von Permafrost und der Bodentemperatur im Nationalpark Hohe Tauern im Rahmen des gegenständlichen Projektes“ und „Monitoring von Permafrost und Bodentemperatur im Nationalpark Hohe Tauern im Rahmen anderer Projekte“.

Hintergrund und Arbeitsablauf Bereich Witterung und Klima

Die Begriffe „Witterung“ und „Klima“ unterscheiden sich von ihrer zeitlichen Abgrenzung her. Während die Witterung den Charakter des Wetterablaufes eines Ortes innerhalb relativ kurzer Zeiträume (Tage, Wochen) beschreibt, umfasst der Begriff „Klima“ einen viel längeren Zeitraum. Schönwiese (2013) etwa schreibt: „Das terrestrische Klima ist die für einen Standort, eine definierbare Region oder ggf. auch globale statistische Beschreibung der relevanten Klimaelemente (a), die für eine nicht zu kleine zeitliche Größenordnung (b) die Gegebenheiten und Variationen der Erdatmosphäre (c) hinreichend ausführlich charakterisiert“. In Bezug auf Klima bezieht sich die zeitliche Größenordnung, welche zur ausführlichen Charakterisierung notwendig ist, laut der Weltorganisation für Meteorologie (WMO 2014) auf einen 30-jährigen Bezugszeitraum der Klimabeobachtung, der als „Normalperiode“ oder „Klimanormalperiode“ bezeichnet wird. Die aktuell gültige Klimanormalperiode umfasst den Zeitraum 1. Jänner 1981 bis 31. Dezember 2010. Das Wort „Klima“ selbst entstammt ursprünglich der griechischen Sprache und wurde bereits vor ca. 2500 Jahren von griechischen Gelehrten (Parmenides von Elea, Hippokrates) verwendet. Klima bedeutet „Neigung“ und bezieht sich auf die Neigung des Sonnenstandes. Schon damals wurde erkannt, dass je steiler der mittlere Neigungswinkel ist, desto wärmer sind Erdoberfläche und bodennahe Atmosphäre (siehe hierzu Schönwiese 2013 für weitere Details).

Die Vorgabe, dass das Klima eines Ortes durch einen zumindest 30-jährigen, durchgehenden Beobachtungszeitraum definiert ist, wirkt für Gebiete in peripheren Lagen mit allgemein wenig Infrastruktur sehr einschränkend. Innerhalb des Nationalparks Hohe Tauern selbst, sowie in dessen Nahbereich werden von verschiedenen Betreibern Klimastationen betrieben. Die diesbezüglich wichtigsten Organisationen sind dabei die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), die verschiedenen hydrographischen Landesdienste sowie die Lawinenwarndienste in Tirol, Salzburg und Kärnten. Tabelle 1 und Abbildung 1 geben einen Überblick über diese in Summe 85 Stationen. Abbildung 1 zeigt auch die Lage der drei im gegenständlichen Projekt weiter verwendeten TAWES-Klimastationen der ZAMG, der sechs verwendeten Klimastationen der hydrographischen Landesdienste sowie auch die Lage anderer Monitoringstandorte, deren Datenreihen in diesem Projekt verwendet wurden.

Tabelle 1: Liste von Klimastationen mit Angaben zu den Betreibern innerhalb und im Nahbereich des Nationalparks Hohe Tauern. Lage siehe Abbildung 1.

Betreiber	Stationen	Betreiber	Stationen
Asfinag	1	Tirol Wasserkraft	1
Gasteiner Bergbahnen [mit Boku]	1 [0,5]	Universität Graz	3
Großglockner Hochalpenstraße AG (GROHAG)	2	Universität für Bodenkultur (Boku) [eine davon mit den Gast. Bergb.]	2 [1,5]
Hydrographischer Dienst (HD)	20	Verbund Austrian Hydro Power (AHP)	7
Lawinenwarndienst	33	Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV)	1
OEBB	6	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)	8
Salzburg AG	1	Summe	85

Für ein langfristiges Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern ist es wichtig, Datenreihen bzw. Langzeitanalysen auf eine solide und nachhaltige Basis zu stellen, wobei auch der problemlose Zugang zu den Messdaten ein wichtiges Kriterium ist. Diese Überlegungen münden in unsere Empfehlung Klimastationsdaten von öffentlichen Stellen, wie eben die ZAMG oder die Hydrographischen Landesdienste, zu verwenden. Klimastationen von Universitäten, Kraftwerksbetreibern etc. können – bei Veränderung des Forschungs- oder Monitoringinteresses bzw. Wegfall der Finanzierung – nach spätestens wenigen Jahren wieder demontiert werden und entsprechende Datenreihen so ihr abruptes Ende finden; kein anzustrebendes Ziel bei Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf das Ökosystem.

Klimaelemente sind laut Schönwiese (2013) primär meteorologische Größen, die der Messung (z. B. Temperatur, Niederschlag), Schätzung (z. B. Sichtweite, sofern nicht gemessen) oder Phänomenbeobachtung (z. B. Gewitter, ohne nähere quantitative Kennzeichnung) in der Atmosphäre der Erde zugänglich sind. Mess- und Schätzgrößen bestehen aus einem Zahlenwert und einer Maßeinheit wie z. B. 5°C oder 50 mm Niederschlag. Für die meisten Klimaklassifikationen bilden Lufttemperatur und Niederschlag die Basis. Für das Leben auf der Erde ist außerhalb der polaren und subpolaren Zone bzw. der nivalen und alpinen Höhenstufe meist der Niederschlag sogar das ausschlaggebende Klimaelement, was sich beispielsweise in der Vegetationsverteilung widerspiegelt (Schönwiese 2013).

Die Temperatur der atmosphärischen Luft wird meist als primäres Klimaelement bezeichnet, da sie beispielsweise auch bei der Klimaklassifikation im Vordergrund steht. Die Lufttemperatur soll laut der World Meteorological Organization (WMO) in 2 m Höhe über Grund gemessen werden. Diese Temperaturmessung erfolgt in einer strahlungs- und witterungsgeschützten Hütte bzw. unter einem Strahlungsschutz. Optimalerweise soll der Messstandort auf natürlichem Untergrund, möglichst auf einer Rasenfläche, stehen und der Luftströmung ungehindert ausgesetzt sein. Am besten eignet sich als Standort ein freier Platz oder ein locker mit Sträuchern bewachsener Bereich in möglichst ebenem Gelände. Wichtig ist auch, dass der Luftraum, in dem gemessen wird, nicht durch Mauern, Bretterzäune, Hecken, dicht stehendes Strauchwerk oder dicht wachsende höhere Pflanzenkulturen abgeschlossen ist (siehe hierzu WMO 2014 für weitere Details).

Bilden sich aus Wolken auf die Erdoberfläche fallende sogenannte „Hydrometeore“, so handelt es sich um Niederschlag. Im Einzelnen unterscheidet beispielsweise Schönwiese (2013) zwischen flüssigen und festen Hydrometeoren, die folgende Erscheinungsformen aufweisen können: (a) Nieseln = Nieselregen: flüssig, Tropfenradius < ca. 0,25 mm; (b) Regen, flüssig: Tropfenradius > ca. 0,25 mm; (c) Eiskristalle, Eisnadeln: fest, vereinzelt; (d) Schnee: fest, flockenartig (auch vereinzelt als



Schneesterne); (e) Griesel: fest, feine weißliche Körner, raue Oberfläche; (f) Graupel: fest, etwas größere Körner, raue Oberfläche; (g) Hagel: fest, große bis sehr große Körner, glatte Oberfläche; und (h) am Erdboden gefrierende Regentropfen, die Glatteis bildend wirken. Die Messung des Niederschlags beschränkt sich jedoch meist auf den fallenden Niederschlag, der normaler Weise als Niederschlagsmenge (Niederschlagsvolumen pro Fläche) angegeben wird. Die dabei üblicherweise verwendete Maßeinheit ist Liter pro Quadratmeter, was einer Niederschlagshöhe in mm entspricht.

Zu betonen ist, dass die Messung von Niederschlag nicht ganz einfach ist. Ein übliches Messgerät ist ein an einem Rohr bzw. Stange geschraubtes zylinderförmiges Gefäß, das oben eine Öffnung von z. B. 200 cm² aufweist (Regenmesser, Totalisator). Im Inneren des Regenmessers befindet sich ein Trichter, der das Wasser in das eigentliche Messgefäß leitet. Dieses Gefäß kann bei der täglichen Messung manuell entnommen und abgelesen werden oder es ist mit einer schreibenden Registriereinrichtung versehen. Ein technisch anderes Messsystem, das zwar optisch ähnlich aussieht, basiert messtechnisch auf der Zunahme des Gewichts des Messbehälters inklusive dem darin befindlichen Niederschlagswasser über die Zeit. Dabei befindet sich der Messbehälter auf einer Art Waage. Solche Messgeräte werden als „Pluviometer“ bezeichnet. Gemessen wird stets die flüssige Form des Niederschlags. Der feste Niederschlag ist somit ggf. zu schmelzen (z. B. durch Forstschutzmittel oder Heizsystem), was aber im Hochgebirge nicht unbedingt ein leichtes Unterfangen ist. Die Messfehler beim Niederschlag sind sehr ausgeprägt, wobei Wind Niederschlagsmessfehler von -50% oder sogar mehr bewirken kann. Als weitere Erschwernis der „korrekten“ Erfassung des Niederschlags kommt auch – gegenüber der Temperatur – die größere räumliche und zeitliche Variabilität des gefallenen Niederschlags hinzu (siehe hierzu Schönwiese 2013 und WMO 2014 für weitere Details). Somit lässt ein Messwert in einem hydrologischen Einzugsgebiet nur bedingt eine Aussage über die räumliche Niederschlagsverteilung und folglich über den Gesamtniederschlag in einem Gebiet zu.

Von unserer Seite wird empfohlen, dass für die Charakterisierung des Witterungsgeschehens im Nationalpark Hohe Tauern auf Daten von drei sogenannten teilautomatischen Wetterstationen (TAWES) der ZAMG sowie sechs Stationen der hydrographischen Landesdienste – zwei je Bundesland – zurückgegriffen wird. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die für das gegenständliche Projekt empfohlenen TAWES-Stationen. Die Station am Hohen Sonnblick weist die längste Datenreihe im alpinen Bereich in den Hohen Tauern auf. Bedingt durch die Seehöhe (3109 m; zweithöchste TAWES-Station von ganz Österreich), die lange Datenreihe (seit 1891) und die direkte Lage am Alpenhauptkamm an der Grenze zwischen Salzburg und Kärnten, kann diese Station als die wichtigste Station im Bereich des Nationalparks Hohe Tauern angesehen werden. Die Stationen Rudolfshütte und Kolm-Saigurn liegen jeweils nördlich des Alpenhauptkamms, wobei erstere in einem breiten Karbereich, zweitere in einem Talschluss liegt.

Tabelle 2: TAWES-Stationen der ZAMG, die für das gegenständliche Projekt verwendet wurden und weiterverwendet werden sollen, mit Angabe des Beginns der verfügbaren Datenreihe. Synnr. ist die ZAMG-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). Weitere Erläuterungen im Text.

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

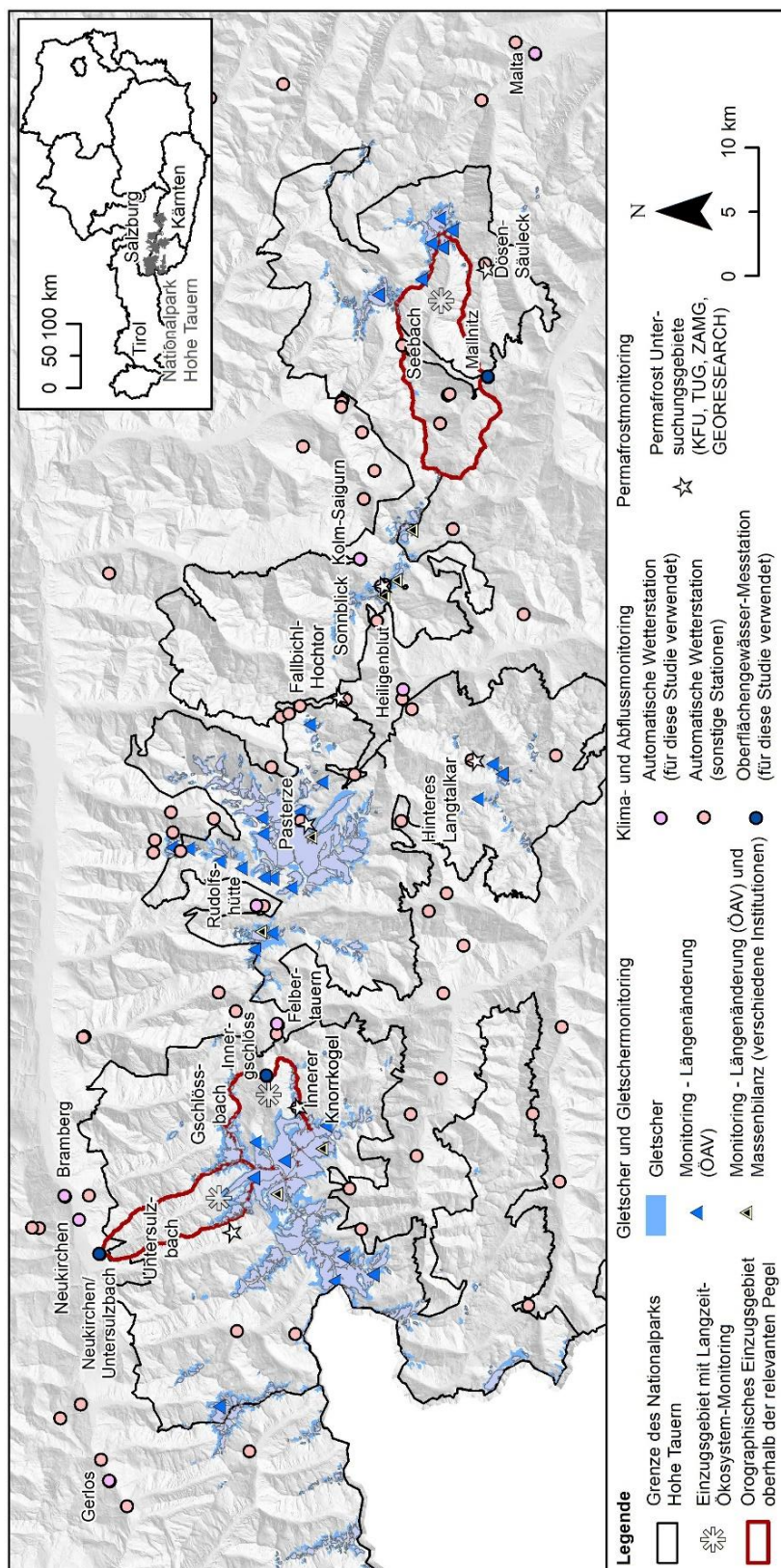


Abbildung 1: Lage der drei Untersuchungsgebiete für das Langzeit-Ökosystemmonitoring sowie die Lage der in dieser Studie verwendeten Klima- und Abflussmessstationen (ZAMG- oder HZB-Stationen), der durch Monitoring erfassten Gletscher und der Permafrost-Untersuchungsgebiete. Ergänzend sind auch alle automatischen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

Die Klimadaten der drei genannten TAWES-Stationen wurden von der ZAMG, Regionalstelle Steiermark (Kontaktperson: Dr. Alexander Podesser, alexander.podesser@zamg.ac.at), für die Pilotphase des gegenständlichen Projektes in

dankenswerter Weise kostenfrei zur Verfügung gestellt. Es wurde jedoch im Zuge des Datentransfers darauf hingewiesen, dass bei einer Weiterführung des Projekts für die Bereitstellung dieser Daten Kosten in der Größenordnung von 450 €/Jahr (für die Tageswerte der drei in Tabelle 2 gelisteten Stationen über einen 365-tägigen Zeitraum) verrechnet werden müssen. Für die anzustrebende jährliche Berichtslegung müssen Tageswerte der drei Stationen – Lufttemperatur und Niederschlag – über einen 365-tägigen Zeitraum (glaziologisches Hautshaltsjahr 1.10. bis 30.09. des Folgejahres) bestellt werden.

Tabelle 3 listet die sechs Klimastationen der hydrographischen Landesdienste auf, die für die Pilotphase in diesem Projekt verwendet wurden. Die Stationsdaten stammen für Heiligenblut und Malta vom Amt der Kärntner Landesregierung, Abteilung 12: Wasserwirtschaft, Hydrographie (Kontaktperson: Helge Vithanage, helge.vithanage@ktn.gv.at), für Neukirchen und Bramberg vom Amt der Salzburger Landesregierung, Abteilung 7: Wasser, Hydrographischer Dienst (Kontaktperson: Stefan Schrofner, stefan.schrofner@salzburg.gv.at) und für Gerlos und Felbertauern-tunnel-Süd vom Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Wasserwirtschaft, Hydrographie und Hydrologie (Kontaktperson: Martin Neuner, martin.neuner@tirol.gv.at). Anzumerken ist, dass die Daten der jüngeren Vergangenheit stets Rohdaten sind und weder auf Vollständigkeit noch auf Plausibilität geprüft wurden. Auf diesen Sachverhalt wurde bei allen drei Landesdienststellen immer wieder verwiesen. Weiters wurde wiederholt angemerkt, dass eine Weitergabe der Daten an Dritte nicht gestattet ist. Die hydrographischen Landesdienste haben u. a. die Aufgabe Niederschlagsmengen zu erfassen, um daraus Informationen über das Abflussverhalten – gemessen an Pegeln (siehe unten) an Flüssen und Bächen zu erhalten. Neben dieser Hauptaufgabe werden mancherorts auch Schneeöhe und Neuschneesummen sowie die Lufttemperatur erfasst. An den Messstationen Neukirchen und Bramberg gibt es beispielsweise keine Lufttemperaturaufzeichnungen, sondern lediglich Niederschlagswerte. Für die Projektweiterführung ist auch die seit 1. November 2018 durch den hydrographischen Landesdienst Tirol betriebene Wetterstation nahe der Alten Prager Hütte von Relevanz (http://www.parcs.at/nphht/mmd_fullentry.php?docu_id=37172).

Tabelle 3: Klimastationen der hydrographischen Landesdienste, die für die gegenständliche Studie verwendet wurden, mit HZB-Code (Hydrographischer Dienst Österreichs) und Beginn der verfügbaren Datenreihe. HZB-Nr. ist die interne Stationsnummer, Lon die geographische Länge und Lat die geographische Breite: RW/Rechtswert und HW/Hochwert sind die Koordinatenangaben auf Basis der Projektion BMN-M31 (ESPG 31258). Weitere Erläuterungen im Text.

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	113399	13,506944	46,954722	463268,6	201748,5	830	Ktn	1860
Neukirchen (1)	104059	12,297222	47,252222	371623,0	235332,2	857	Sbg	1973
Bramberg (1)	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

(1) An diesen Messstationen werden laut Auskunft von Herrn Schrofner, Hydrographischer Dienst, Amt der Salzburger Landesregierung, keine Temperaturdaten erhoben.

Die neun in Tabellen 2 und 3 gelisteten Standorte können prinzipiell als repräsentativ für größere Gebiete angesehen werden, da die Aufstellung der Stationen durch die sie betreibenden Institutionen genau unter diesem Anspruch erfolgt. Die Stationen Neukirchen, Bramberg und Gerlos repräsentieren die Tallagen an der Nord- sowie Heiligenblut und Malta an der Südseite des Tauernhauptkammes, Kolm-Saigurn ist repräsentativ für eine Talschlusslage an dessen Nord- und Felbertauern für eine Talschlusslage an dessen Südseite, während die Station Rudolfshütte (breiter Karbereich) und Sonnblick (Gipfelage) für die Hochlagen stehen.

Beispielhaft für die Variabilität der Lufttemperatur sei hier die Abweichung der Monatsmittelwerte der Lufttemperatur, gemessen an der Station Sonnblick in den beiden glaziologischen Haushaltsjahren 2016/17 und 2017/18, von den entsprechenden Werten der Klimanormalperiode 1981-2010 dargestellt (Abb. 2). Aufgrund der langen Datenreihe, der rigorosen Datenqualitätsprüfung durch die ZAMG, der hochalpinen Lage, sowie der zentralen Lage am Alpenhauptkamm ist diese Station für ein Kryosphären-Monitoring wie im Modul 07 prädestiniert. Wie der Abbildung 2 zu entnehmen ist, waren in beiden Messjahren die Jahresmittelwerte über dem der Klimanormalperiode (2016/17: 0,9°C, 2017/18: 0,8°C). Im Jahresverlauf unterscheiden sich die beiden Messjahre jedoch sehr stark voneinander, wobei Monate mit ähnlichen Abweichungen von der Normalperiode (November, Juli, August) und Monate mit starken Unterschieden zwischen den beiden Monatswerten (Dezember bis April) variieren. Deutlich zu kalt im Vergleich zum langjährigen Mittel waren Jänner 2017, Dezember 2017 und vor allem der Februar 2018 (-3,2°C). Deutlich zu warm gegenüber dem langjährigen Mittel waren

Dezember 2016, Februar, März, Juni und August 2017 und v. a. der April 2018 (+4,3°C). Diese Art der Darstellung lässt somit sehr gut die Messwerte eines Einzeljahres in einen langfristigen, klimarelevanten zeitlichen Kontext bringen.

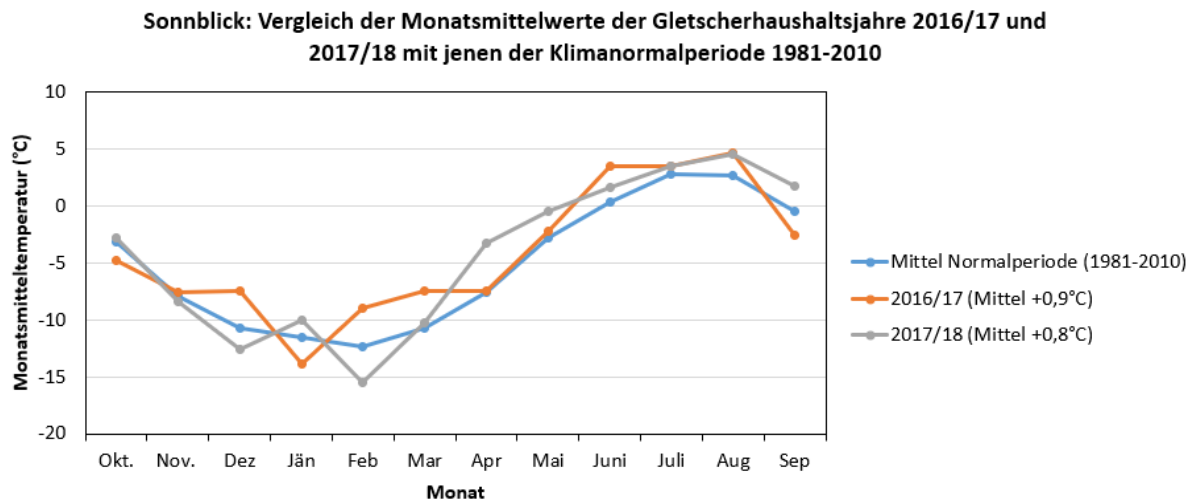


Abbildung 2: Vergleich der Monatsmittelwerte der Gletscherhaushaltsjahre 2016/17 (im Jahresmittel um 0,9°C zu warm) und 2017/18 (0,8°C zu warm) mit jenen der Klimanormalperiode 1981-2010 an der TAWES-Station Hoher Sonnblick (3109 m).

Im Rahmen des interdisziplinären, integrativen Monitoring- und Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern werden auch im Modul 01 (Standortklima, Bodenphysik, Bodenchemie und pflanzliche Produktivität) auf der Betrachtungsebene der Transekte Temperatur- und Feuchtemessungen durchgeführt (Newesely et al. 2019). Diese zielen nicht wie im Modul 07 auf die Charakterisierung der regionalen Klimabedingungen ab, sondern dienen der Erfassung der mikroklimatischen Bedingungen an den im Modul 01 untersuchten Standorten.

Für den Themenbereich „Witterung und Klima“ kann abschließend festgehalten werden, dass die klare Zielsetzung die Charakterisierung der Witterungsbedingungen in einem bestimmten Beobachtungszeitraum (z. B. einem Gletscherhaushaltsjahr) sowie längerfristig gesehen des Klimas auf Basis von Lufttemperatur und Tagessummen des Niederschlags ausgewählter Klimastationen der ZAMG sowie der hydrographischen Landesdienste in Kärnten, Salzburg und Tirol (Hydrographisches Zentralbüro) ist, jeweils auf der regionalen Maßstabsebene des gesamten Nationalparks. Als Vorbereitungsarbeiten im Langzeitmonitoring-Projektablauf gilt es, entsprechende Daten von den genannten Institutionen zu akquirieren und entsprechend zu prüfen (Hinweis auf ungeprüfte Rohdaten von Seiten der hydrographischen Landesdienste), auszuwerten, graphisch darzustellen, zu interpretieren und sie zusammen mit anderen Messergebnissen in diesem Modul integrativ zu diskutieren. Bezüglich Qualitätssicherung muss primär auf die ordentliche Prüfung der Daten durch die Datenbereinsteller vertraut werden. Die Auswertung aller Daten in diesem Bereich sollte mit statistischen Standardmethoden erfolgen und der Schwerpunkt dabei auf der Darstellung von Zeitreihen sowie der Berechnung von Mittelwerten, linearen Trends, Verhältnissen oder Abweichungen zu Mittelwerten liegen.

Hintergrund und Arbeitsablauf Bereich Abfluss

Der Abfluss (wissenschaftliche Abkürzung Q) ist in der Hydrologie das Wasservolumen, das in einem Fließgewässer in einer bestimmten Zeit eine vollständige Querschnittsfläche passiert. Seine Einheit ist in der Regel m^3/s bzw. bei kleineren Gerinnen oder Quellen l/s . Wenn die Wasserführung eines Fließgewässers betrachtet wird, spricht man von Durchfluss. Wird der an einem Gerinnequerschnitt beobachtete Abfluss auf die Einzugsgebietsfläche bezogen, so wird er entweder als Abflussspende q in $\text{l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ (Liter pro Sekunde und Quadratkilometer) oder als Abflusshöhe h_A bzw. R für Englisch „runoff“ in $\text{mm}/\text{Zeiteinheit}$ (Tag, Monat, Jahr) angegeben (Baumgartner & Liebscher 1996). Unter Abflussspende versteht man somit den Quotienten aus dem Abfluss und der Einzugsgebietsfläche eines Fließgewässers. Die Abflussspende ermöglicht einen Vergleich der Rahmenbedingungen verschiedener Einzugsgebiete und wird u. a. von der geologischen Beschaffenheit, der Vegetation und den Niederschlägen beeinflusst. Die Abflusshöhe gibt den gesamten Wasserabfluss eines regionalen

Einzugsgebietes innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls an. Schließlich sei noch der Begriff „Abflussganglinie“ angesprochen. Eine Abflussganglinie, auch als Hydrograph bezeichnet, ist die Darstellung von beobachteten oder berechneten Abflüssen an einem Pegel über die Zeit, z. B. während eines Hochwasserereignisses oder über ein ganzes hydrologisches Jahr betrachtet (Baumgartner & Liebscher 1996).

Mit Hilfe von Abflussganglinien lassen sich recht gut auch Unterschiede zwischen zwei gleich langen Zeitperioden – wie eben einem hydrologischen Jahr – darstellen und vergleichen. Abbildung 3 zeigt für zwei hydrologische Haushaltsjahre (2016/17 und 2017/18) die entsprechenden Abflussganglinien an der Messtation Mallnitz. Bei dieser Darstellungsart ist es augenscheinlich, dass der Beginn der abflusswirksamen Schneeschmelze im Jahr 2017/18 um rund einen Monat früher einsetzte als im Jahr zuvor. Der winterliche Basisabfluss verhielt sich hingegen in den beiden Jahren recht ähnlich. Die sommerlichen Spitzen variieren sehr stark und sind naturgemäß vom jeweiligen Witterungsgeschehen beeinflusst. Auffällig für 2017/18 ist, dass der höchste Tagesmittelwert bereits Anfang Mai – unter Beteiligung der zu dieser Zeit (als Folge der ab April 2018 deutlich übernormalen Temperaturen) bereits außerordentlich intensiven Schneeschmelze – verzeichnet wurde. Im Jahr zuvor wurde das Maximum, ausgelöst durch ein abflusswirksames Niederschlagsereignis, erst im August erreicht.

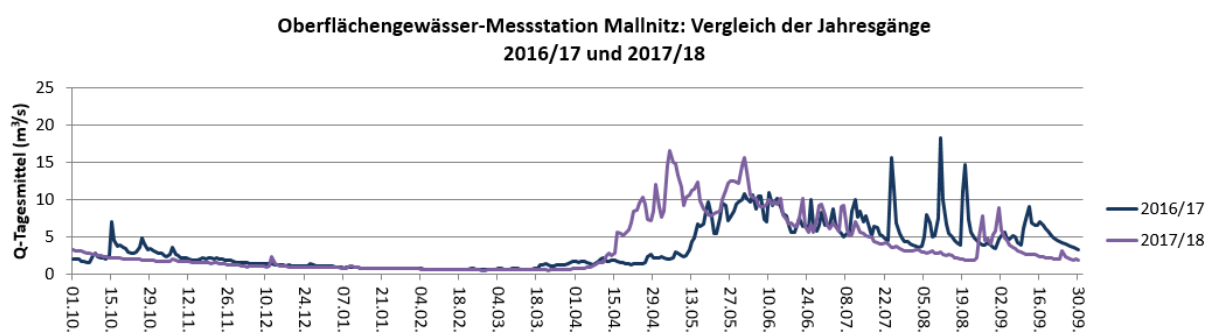


Abbildung 3: Vergleich der Jahresgänge des Abflusses in den beiden hydrologischen Haushaltsjahren 2016/17 und 2017/18 an der HZB-Station Mallnitz (Kärnten).

Gewöhnlich weist eine Abflussganglinie bei einem Niederschlagsereignis eine bestimmte Form auf. Die Kurve steigt durch das Erreichen von hochwasserbedingten Spitzenabflusswerten (Niederschlagsereignis, Schneeschmelze) schnell an. Nachdem der maximale Abflusswert – man spricht hier vom „Abflussscheitel“ – erreicht worden ist, sinkt die Kurve schnell wieder ab. Nach einer gewissen Zeit stellt sich eine kontinuierliche Abnahme der Abflusswerte ein. Grundsätzlich kann man zwischen einem direkten und einem verzögerten Anteil des Abflusses sprechen, ersterer erzeugt Hochwässer, zweiterer den Niedrigwasserabfluss oder Basisabfluss (für weitere Details zum Abfluss siehe z. B. Baumgartner & Liebscher 1996 [Kapitel 14] oder Wilhelm 1993).

Der oberirdische Abfluss in Gerinnen wird normalerweise an Pegeln gemessen. Erfasst wird zumindest der Wasserstand. Ist die Gerinnegeometrie bekannt, so lässt sich aus dem Abflussquerschnitt und der mittleren Querschnittsgeschwindigkeit der Durchfluss durch den festgelegten Querschnitt ermitteln. Wichtig ist jedoch bei laufenden Beobachtungen, dass die Gerinnegeometrie im Laufe der Zeit nicht verändert wird (ansonsten sind „Berechnungskorrekturen“ notwendig). Der Wasserstand wird mit Pegeln erfasst, wobei eine einfache Form der Lattenpegel ist, der manuell abgelesen wird. Registrierende Pegel erfassen Änderungen der Wasserstände laufend, wobei Schwimmpegel oder Druckpegel die gebräuchteste Form darstellen. Um die Pegelstände in Abflussmengen umrechnen zu können, bedarf es der Quantifizierung zwischen Pegelstand und Abfluss, die in Form einer Abfluss- oder Schlüsselkurve dargestellt werden kann. Die Abflusskurve stellt eine Beziehung zwischen Abfluss und Wasserstand da. Um aus dem Wasserstand den Abfluss bestimmen zu können, muss aber mehrmals eine Abflussmessung vorgenommen werden, wobei darauf zu achten ist, dass diese Abflussmessungen bei unterschiedlichsten Wasserständen (und folglich Pegelwerten) durchgeführt werden. Jede Einzelmessung ergibt ein Koordinatenpaar mit Abflussmenge und Pegelstand. Die Abflussmessung selbst kann durch beispielsweise Messflügel oder durch die Salzverdünnungsmethode (abhängig vom Gerinne) geschehen (für weitere Details siehe z. B. Wilhelm 1993).

Anders als bei Klimastationen, ist die Messung des Abflusses an Flüssen und Gerinnen in Österreich sehr stark auf die hydrographischen Landesdienste – und somit auf den Hydrographischen Dienst – fokussiert. Hydrologische Daten, welche in Österreich durch die hydrographischen Landesdienste generiert werden, sind grundsätzlich im Internet über die WebGIS-Applikation eHYD (<https://ehyd.gv.at>) frei zugänglich. Diese Applikation ist verwaltungsmäßig dem

Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Sektion I – Umwelt und Wasserwirtschaft zugeteilt. Dieser Sachverhalt erleichtert generell die Verfügbarkeit von Abflussdaten für die drei Untersuchungsgebiete. Allgemein gilt aber für eHYD, dass die online verfügbaren Datenreihen meist nicht bis in den Zeitraum des aktuellsten Gletscherhaushaltsjahres (für 2017/18 wäre dies bis 30. September 2018) reichen, sondern viele Monate oder sogar wenige Jahre zuvor enden. Beispielsweise konnte man am 30. 3. 2019 für die Messstelle Mallnitz die Abflusswerte (Q-Tagesmittel) nur bis 31. 12. 2015 abrufen. Diese mangelnde Aktualität der Datenreihen hängt in der Regel – wie weiter unten beispielhaft ausgeführt – damit zusammen, dass die Rohdaten einen längeren Prüf- und eHYD-Einspielungsprozess durchlaufen und noch vom Hydrographischen Zentralbüro in Wien bestätigt werden müssen.

Für das gegenständliche Projekt wurden zu Beginn des Projektes mögliche relevante Oberflächengewässer-Messstellen gesichtet, von denen in weiterer Folge drei Messstellen in Kärnten (Mallnitz/HZB-Nummer 212381, Ochsenhütte-Hochalm/212456 und Heiligenblut-OWF/213926), drei in Salzburg (Sulzau/203034, Neukirchen/203042 und Kees/203893) und zwei in Tirol (Innerschlöss/212068 und Matreier Tauernhaus/212076) näher betrachtet wurden. Wie die Erstanalyse (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2018a) ergeben hat, reicht eine Station pro Einzugsgebiet aus, um dessen hydrographische Charakterisierung durchführen zu können. Aus diesem Grund wurden die Stationen Mallnitz (für den Seebach), Neukirchen (für den Untersulzbach) und Innerschlöss (für den Gschlössbach) näher untersucht. Tabelle 4 beinhaltet Metadaten zu den drei verwendeten Messstellen.

Tabelle 4: HZB-Oberflächengewässer-Messstellen der Hydrographischen Landesdienste, die für die gegenständliche Studie verwendet wurden und weiter verwendet werden sollten. Koordinaten sind in geographischen Koordinaten sowie in BMN – M31 (EPSG 31258) angegeben. Höhe = Höhe des Pegelnullpunktes in m ü. A.; o. Ezg. = orographisches Einzugsgebiet

Stationsname	Synnr.	Lon [°]	Lat [°]	RW [m]	HW [m]	Höhe [m]	o. Ezg.	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
Innerschlöss	212068	12,451944	47,124444	383174,2	220982,2	1686	39,3	Tirol

Die Messdaten für die drei in Tabelle 4 gelisteten Messstellen stammen vom Amt der Kärntner Landesregierung, Abteilung 12: Wasserwirtschaft, Hydrographie (Kontaktperson: Elisabeth Gutschi, elisabeth.gutschi@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, jedoch nur vorläufig gültige Daten. Die Daten der jüngeren Vergangenheit müssen immer vom Hydrographischen Zentralbüro in Wien bestätigt werden. Allgemein gilt auch für die Messdaten, dass eine Weitergabe an Dritte nicht gestattet ist, wobei laut den Landesstellen Projektbeteiligte ausgenommen sind.

Für den Themenbereich „Abfluss“ kann abschließend festgehalten werden, dass die klare Zielsetzung zum einen die Charakterisierung des Abflussgeschehens in einem hydrologischen bzw. glaziologischen Haushaltsjahr für bestimmte Pegel ist, zum anderen aber auch die langfristige Entwicklung des Abflusses bzw. der Ablussspende untersucht werden soll. Im gegenständlichen Fall gibt es für alle drei relevanten Untersuchungsgebiete Messstellen, die von den drei hydrographischen Landesdienststellen in Kärnten, Salzburg und Tirol betrieben werden. Diese gut gewarteten und instrumentierten Messstellen sind zwischen 89 und 103 Jahren (Mallnitz seit 1930, Neukirchen/Untersulzbach seit 1916, Innerschlöss seit 1930) in Betrieb. Dies würde beispielsweise auch eine erweiterte Langzeitanalyse ermöglichen. Als Vorbereitungsarbeiten im Langzeitmonitoring-Projektablauf gilt es Abflussmengendaten in zeitlicher Tagesauflösung von den drei Landesdienststellen (Kontakte siehe Absatz oben) zu akquirieren und zu prüfen, auszuwerten, graphisch darzustellen, zu interpretieren und sie gemeinsam mit anderen Messergebnissen in diesem Modul integrativ zu diskutieren. Bezüglich Qualitätssicherung muss auch hier primär auf die ordentliche Prüfung der Daten durch die Datenbereinsteller vertraut werden. Die Auswertung aller Daten im Themenbereich Abfluss soll mit statistischen Standardmethoden erfolgen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Darstellung von Zeitreihen sowie der Berechnung von Mittelwerten oder ggf. Trends.

Hintergrund und Arbeitsablauf Bereich Gletscher

Gletscher sind wohl die bekannteste Landschaftselemente, welche zur Illustration der Auswirkungen des Klimawandels in alpinen Gebieten immer wieder als Beispiel herangezogen werden. In diesem Zusammenhang wird aber oftmals – zumeist unwissentlich – darauf vergessen, dass die aktuell beobachteten Veränderungen eines Gletschers, vor allem was



Längenänderungen betrifft, die träge und abgeschwächte Reaktion auf die Massenbilanz der vorangegangenen Jahre bis Jahrzehnte sind. Größere alpine Talgletscher – wie beispielsweise die Pasterze – reagieren in Bezug auf Ihre Massenbilanz und Längenänderung träger als kleine Kargletscher. Für die Pasterze zeigten zuletzt Lieb & Kellerer-Pirklbauer (2018b) – auf Basis eigener Messungen sowie Messungen ihrer Vorgänger (siehe zitierte Literatur darin) – die Veränderung der Gletscherstirn seit ihrem neuzeitlichen Hochstand um 1852–1856. Seit dieser Zeit erfolgte nie ein nennenswerter Vorstoß. Allein zwischen 1910 und 1935 gab es einige Jahre mit schwach positiven Längenänderungen (Maximum 1927/28: +3,1 m), worin sich die gletschergünstigen Bedingungen der Jahre um 1920 widerspiegeln. Damals erreichte die Pasterze zumindest einen Gleichgewichtszustand. Alpenweit verbreitet gab es einen „Vorstoß von 1920“, bei der großen Pasterze war dies eben nur marginal zu beobachten. Noch dramatischer gilt dies für den alpenweiten „Vorstoß von 1980“, der sich nicht einmal in einer merkbaren Reduktion der Rückzugsbeträge der Pasterze niedergeschlagen hat.

Global betrachtet beschäftigt sich das World Glacier Monitoring Service (WGMS) mit der Verbreitung und Dynamik von Gletschern. Das WGMS sammelt u. a. standardisierte Beobachtungsdaten über Veränderungen in Masse, Volumen, Fläche und Länge von Gletschern. Diese Daten sind wichtige Grundlagen für das Verständnis von Gletschern und ihrem Verhalten, besonders unter den Bedingungen der globalen Erwärmung. Auch Österreich ist mit glaziologischen Daten beim WGMS vertreten, wobei aktuell als sogenannte „National Correspondent“ Frau PD. Dr. Andrea Fischer, ÖAW Innsbruck, fungiert. Von österreichischer Seite werden alljährlich Daten zur Längenänderungen (auf Basis des koordinierten Gletschermonitoring-Programms des Österreichischen Alpenvereins) sowie zur Massenbilanz (auf Basis der Initiative einzelner Institutionen) in diese globale Datenbank eingespeist.

a. Monitoring Längenänderung von Gletschern

Lieb & Kellerer-Pirklbauer (2018b) berichten, dass an der Pasterze bereit im Jahr 1879 von F. Seeland Messmarken angelegt und diese im Folgejahr nachgemessen wurden. Seit damals erfolgte die Nachmessung der Messmarken oder eine adäquate Lokalisierung des Eisrandes im Stirnbereich der Pasterze in fast allen Jahren bis auf 1922, 1923 und 1945. Nach den Daten des WGMS, die von F. Danklmaier im Rahmen einer Seminararbeit unter Betreuung der Autoren ausgewertet wurden, verfügt die Pasterze damit über die längste auf tatsächlich erfolgten Messungen beruhende, geschlossene Datenreihe aller Gletscher im Alpenraum. Dies ist insofern interessant, als erst ein knappes Jahrzehnt danach der sogenannte „Aufruf“ zur regelmäßigen Beobachtung der alpinen Gletscher durch den Deutschen und Österreichischen Alpenverein erfolgte (Fischer et al. 2018), womit üblicherweise der Anfang des Gletschermessdienstes in Österreich angesetzt wird. Dieser Gletschermessdienst wird auch heute noch vom Österreichischen Alpenverein (ÖAV) organisiert und finanziell unterstützt, seine derzeitige Leitung liegt in den Händen der beiden Autoren dieses Manual-Beitrages.

Im Bereich des Nationalparks Hohe Tauern sind aktuell 36 Gletscher im Monitoring-Programm des Gletschermessdienstes des ÖAV enthalten (Abbildung 1, Tabelle 5). Die meisten dieser beobachteten Gletscher liegen in der Glocknergruppe (12), gefolgt von der Venedigergruppe (9) und Ankogelgruppe (6). Jeweils drei Gletscher werden jährlich in der Granatspitzgruppe, der Schobergruppe sowie der Goldberggruppe vermessen. Auf der Ebene der drei Flusseinzugsgebiete, die für das Langzeitmonitoring von primärem Interesse sind, bietet das aktuelle Beobachtungsnetz des ÖAV-Gletschermessdienstes den Vorteil, dass der jeweils größte Gletscher darin jährlich vermessen wird. Diese sind das Winkelkees für das Seebachtal, das Untersulzbachkees für das Untersulzbachtal sowie das Schlattenkees (und darüberhinaus auch das Viltragenkees) für das Innergschlöss.

Wie viele Gletscher in den einzelnen Gletscherhaushaltsjahren tatsächlich vermessen werden, hängt stark von unterschiedlichen Faktoren wie beispielsweise Zugänglichkeit in den Einzeljahren, Witterungsverlauf oder Bedeckung der Gletscherstirn durch Schnee aus dem Vorwinter ab. Beispielsweise konnten im Sommer und Herbst 2018 an 34 der 36 Gletscher erfolgreich die Vermessungen der Längenänderung durchgeführt werden (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2019). Da jedoch im Jahr zuvor zwei dieser Gletscher (Winkelkees, Obersulzbachkees) nicht messbar waren, konnte nur für 32 Gletscher ein Jahreswert der Längenänderung von 2017 auf 2018 angegeben werden. Ein Gletscher lag zum Zeitpunkt der spätsommerlichen Messkampagne im Jahr 2018 im Stirnbereich unter Schnee (Winkelkees), ein weiterer konnte gar nicht vermessen werden (Obersulzbachkees). Details zu den beiden, für die Pilotphase dieses Projektes relevanten Gletscherhaushaltsjahren (2016/17 und 2017/18) finden sich in den zwei nationalen Berichten, welche in der Zeitschrift des ÖAV „Bergauf“ alljährlich im April veröffentlicht werden (zuletzt Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2019).

Tabelle 5: Auflistung der im Bereich des Nationalparks Hohe Tauern durch den Österreichischen Alpenverein jährlich vermessenen Gletscher. Lage siehe Abbildung 1. Anmerkung: Die in den drei untersuchten Einzugsgebieten gelegenen Gletscher sind mit * markiert.

Gruppe	Gletscher	Gruppe	Gletscher
Glocknergruppe (n=12)	Pasterze	Venedigergruppe (n=9)	Untersulzbachkees*
	Wasserfallwinkelkees		Obersulzbachkees
	Freiwandkees		Krimmlerkees I
	Brennkogelkees		Umbalkees
	Bärenkopfkees		Simonykees
	Karlingerkees		Zettalunitzkees
	Schmiedlingerkees		Frosnitzkees
	Maurerkees		Schlatenkees*
	Schwarzkarlkees		Viltragenkees*
	Unteres Riffelkees	Granatspitzgruppe (n=3)	Sonnblickkees
	Totenkopfkees		Landeckkees
	Ödenwinkelkees		Kalser Bärenkopfkees
Ankogel Hochalm- spitzgruppe (n=6)	Winkelkees*	Schobergruppe (n=3)	Hornkees
	Westl Trippkees		Gössnitzkees
	Hochalmkees		Roter Knopf-Kees
	Großelendkees	Goldberggruppe (n=3)	Kleinfleißkees
	Kälberspitzkees		Östl. Wurtenkees
	Schwarzkarlkees		Goldbergkees

Die Längenänderung eines Gletschers kann mit unterschiedlichen Methoden erfasst werden. Wichtig ist dabei – wie bei jedem seriösen Monitoring – auf jeden Fall, dass die bei einem Gletscher verwendete Methode von Jahr zu Jahr vergleichbare Ergebnisse liefert. Üblich ist bei alpinen Gletschern von klar definierten, mit Farbe markierten Messpunkten an Felsflächen im Gletschervorfeld in einer über die Jahre hinweg konstanten, der Fließrichtung des Gletschers angenäherten Richtung (fixes Azimut) die jeweilige Distanz zum Gletscherrand zu messen (Abbildung 4) und daraus die „echte“ Längenänderung durch Differenzbildung der Werte zweier Jahre und Mittelbildung mehrerer Punkte (optimal 5–10) zu errechnen (siehe hierzu auch Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2018b oder Cogley et al. 2011).



Abbildung 4: Zwei Möglichkeiten der Messung des Gletscherrückzuges: Links: Messung der Längenänderung des Wasserfallwinkelkeeses, eines Nachbargletschers der Pasterze, mittels Maßbandes, wobei die Distanz zwischen einem Fixpunkt und dem Gletscherrand entlang eines genau definierten Azimuts gemessen wird. Rechts: Messung der Längenänderung der Pasterze mittels Differential GPS. Der Rand des Gletschers wird – wo mit geringer Gefahr zugänglich – direkt mit dieser Methode vermessen. (Fotos: G.K. Lieb und A. Kellerer-Pirklbauer)

Alternativ kann statt einem Maßband auch ein Laserdistanzmessgerät zur Bestimmung der Distanz zwischen Fixpunkt und Gletscherrand verwendet werden. Dies ist relevant bei langen Distanzen zwischen Fixpunkt und Gletscherrand oder wenn beispielsweise dazwischen ein See oder Gerinne die Maßbandmessung technisch unmöglich macht. Ein anderes Problem kann der proglaziale Bereich selbst darstellen, wenn keine Messmarken mehr angelegt werden können, beispielsweise durch fehlende Felsen, an denen die notwendigen Messmarken angebracht werden können.

Eine alternative, jedoch technisch aufwändigere Methode ist die Messungen der Längenänderung mit Hilfe von GPS (Nachteil der Lageungenauigkeit im Meterbereich) oder Differential-GPS/DGPS (Lagegenauigkeit zumindest im



Zentimeterbereich), wobei im Gelände zuerst die Daten erfasst (Abbildung 4, rechts) und später in einem geographischen Informationssystem (GIS) aufbereitet und ausgewertet werden. Den ersten Schritt bildet dabei die Vermessung des Eisrandes (soweit dieser zugänglich ist) mittels GPS/DGPS. Somit kann die zwischen zwei Messzeitpunkten (idealerweise jeweils im September; das glaziologische Haushaltsjahr in den Alpen beginnt am 1. Oktober und endet am 30. September des Folgejahres) entgletscherte Fläche zwischen den beiden DGPS-Tracks in einem GIS räumlich ausgewiesen werden. Im zweiten Schritt werden – wie an der Pasterze angewendet (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2018c) alle 10 m (konstanter Versatz um jeweils 10 m) der Rückzug des Gletschers entlang von Strecken, welche beim Beispiel der Pasterze aktuell ein Azimut von 305° aufweisen, bestimmt. Dieses Azimut ergibt sich an der Pasterze aus der Rückzugstendenz der Pasterze der Vorjahre. Aus den jeweiligen Streckenlängen werden dann die Längenänderungen für die gesamte Gletscherzunge bestimmt, wobei an der Pasterze noch zwischen dem schuttbedeckten Teil und dem schuttarmen Teil unterschieden wird. Details und die jüngsten Ergebnisse hierzu finden sich in Lieb & Kellerer-Pirklbauer (2018c, 2019).

Für den Themenbereich „Längenänderung von Gletschern“ kann abschließend festgehalten werden, dass sämtliche relevante Daten für die Gletscher im Nationalpark Hohe Tauern durch die Gletschermonitoring-Aktivitäten des ÖAV abgedeckt werden. Zuständig für die gesamtösterreichische Koordination, Gesamtdatenkontrolle, Gesamtdatenanalyse sowie Berichtslegung sind die beiden Autoren dieses Manual-Teiles. Zu betonen ist dabei, dass die Ergebnisse der glaziologischen Messungen immer erst Mitte April des Folgejahres – im Rahmen einer Pressekonferenz in Innsbruck sowie einer Veröffentlichung im Heft 2 des ÖAV-Magazins „Bergauf“ (zuletzt Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2019) – frei verfügbar werden, wodurch auch die Abgabe eines jährlichen, gesammelten Kryosphären-Jahresberichts entsprechend verzögert wird. Als Vorbereitungsarbeiten im Langzeitmonitoring-Projektablauf gilt es die entsprechenden Längenänderungsdaten von den 36 Gletschern (vgl. Tabelle 5) vom ÖAV zu akquirieren, was – wie oben erwähnt – offiziell erst Mitte April möglich ist. Aufgrund der Tatsache, dass die beiden Autoren dieses Manual-Teiles auch die Verantwortlichen für den österreichischen Gletscherbericht sind, entfällt derzeit der erwähnte Akquisitionsschritt an den ÖAV. Die Gletscherlängenänderungsdaten müssen in weiterer Folge jedoch gebietsspezifisch ausgewertet, graphisch dargestellt, interpretiert und gemeinsam mit anderen Messergebnissen in diesem Modul integrativ diskutiert werden. Die Auswertung aller Daten im Themenbereich „Längenänderung von Gletschern“ soll mit statistischen Standardmethoden erfolgen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Darstellung von Zeitreihen sowie der Berechnung von Mittelwerten.

b. Monitoring Massenbilanz von Gletschern

Die Massenbilanz von Gletschern wird laut Cogley et al. (2011) wie folgt definiert: „The change in the mass of a glacier, or part of the glacier, over a stated span of time“ und weiter „The span of time is often a year or a season. A seasonal mass balance is nearly always either a winter balance or a summer balance, although other kinds of season are appropriate in some climates, such as those of the tropics“. In den mittleren Breiten – wie eben auch in den Alpen – ergeben sich die jährlichen Minima der Massenbilanz im Herbst am Ende der Ablationsperiode und vor dem Beginn des winterlichen Einschneiens. Die Maxima der Massenbilanz werden im Spätwinter vor Beginn der Frühjahrsschmelze erreicht. Das glaziologische Haushaltsjahr wird – wie schon erwähnt – normalerweise in Österreich über ein genau fixiertes Datum definiert (1. Oktober bis 30. September des Folgejahres). Dieser Ansatz wird in der Glaziologie als „fixed-date system“ (z. B. Benn & Evans 2010, Cogley et al. 2011) bezeichnet. Massenbilanzen von Gletschern können direkt im Gelände (mit Ablationspegeln und Schneeschächten) oder indirekt über geodätische, gravimetrische oder hydrologische Methoden bestimmt werden. Wie aus obiger Definition hervorgeht, kann die Massenbilanz entweder für ein ganzes Jahr oder separat für die Winter- bzw. Sommerbilanz bestimmt werden. Im letzteren Fall sind Geländemessungen am Gletscher im Herbst sowie im Spätwinter notwendig, im ersten Fall reichen die Geländemessungen im Herbst aus (für weitere Details zur Massenbilanz von Gletschern siehe z. B. Benn & Evans 2010 [Kapitel 2.5] oder Cogley et al. 2011).

Messungen von Gletschermassenbilanzen gehören nicht zu den Aktivitäten des ÖAV-Gletschermessdienstes, sondern werden an sieben Gletschern im Nationalparkgebiet von verschiedenen wissenschaftlichen Institutionen durchgeführt. Die Forscherteams bzw. Ansprechpersonen sowie die zuständigen Institutionen sind der Tabelle 6 zu entnehmen. Massenbilanzdaten der letzten Jahre für das Pilotprojekt wurden direkt bei den zuständigen Institutionen angefragt, welche diese dankenswerter Weise kostenfrei für diese Initiative zur Verfügung gestellt haben (siehe hierzu z. B. Seiser & Fischer 2018, Stocker-Waldhuber & Fischer 2018 oder Zägel 2019). Für ältere Daten wurde auch auf die Datenbank des World Glacier Monitoring Service (WGMS) zurückgegriffen (Kontakt: Michael Zemp, WGMS-Direktor, Universität Zürich, michael.zemp@geo.uzh.ch).

Tabelle 6: Gletscher in den Hohen Tauern, an denen Massenbilanzen durch verschiedene Institutionen bestimmt werden (Quelle: WGMS 2018, ergänzt). ZAMG=Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik; ÖAW=Österreichische Akademie der Wissenschaft; HD-Sbg=Hydrographischer Dienst des Landes Salzburg. Das Wurtenkees liegt nicht innerhalb des Nationalparkgebietes.

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

Für den Themenbereich „Massenbilanzen von Gletschern“ kann festgehalten werden, dass Massenbilanzmessungen an Gletschern im Nationalpark Hohe Tauern sowie knapp außerhalb davon (Wurtenkees) durch Institutionen durchgeführt werden (Kontakte siehe Tabelle 6), die für das gegenständliche Projekt ihre Daten zur spezifischen Massenbilanz problemlos zur Verfügung gestellt haben. Die „Hauptakteure“ sind dabei die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), die Österreichische Akademie der Wissenschaft (ÖAW) – als Auftragnehmer – sowie der Hydrographischer Dienst des Landes Salzburg. Die zur Verfügung gestellten Massenbilanzdaten müssen in weiterer Folge gebietsspezifisch ausgewertet, graphisch dargestellt, interpretiert und gemeinsam mit anderen Messergebnissen in diesem Modul integrativ diskutiert werden. Bezüglich Qualitätssicherung muss wiederum primär auf die ordentliche Prüfung der Daten durch die Datenbereitsteller vertraut werden. Die Auswertung aller gesammelten Daten im Themenbereich „Massenbilanzen von Gletschern“ fokussiert auf den Vergleich der Einzelgletscher zueinander sowie deren Veränderung über die Zeit. Die Berücksichtigung aller in Tabelle 6 gelisteten Gletscher für die Massenbilanzeinschätzung in den Hohen Tauern ist topographisch wie geographisch zu empfehlen.

Hintergrund und Arbeitsablauf Bereich Permafrost

Permafrost ist thermisch definiert: Die Temperatur von Bodenmaterial, Sedimenten und/oder anstehendem Fels muss für zumindest zwei aufeinanderfolgende Jahre unter 0°C bleiben, wobei der Wassergehalt im Material unabhängig davon ist (NRC-Permafrost-Subcommittee 1988). Diese Definition fällt oft nicht mit dem tatsächlichen Gefrierpunkt zusammen, da verschiedene Einflussfaktoren wie Gesteinsdruck, gelöste Ionen im Porenwasser oder die Krümmung von kleinen Porenräumen den Gefrierpunkt verändern (Krautblatter et al. 2018). Permafrost kann bei entsprechendem Wasserdargebot im Gegensatz zu Gletschern eine versteckte Vereisung im Inneren der Berge verursachen, die dadurch in Erscheinung tritt, dass sich das thermische, hydraulische, mechanische und biotische Verhalten des gefrorenen Untergrundes abrupt ändert. Permafrost ist dadurch charakterisiert, dass im Sommer eine oberflächennahe Schicht, die sogenannten saisonale Auftauschicht oder „active layer“ auftaut. Die Mächtigkeit dieser Auftauschicht beträgt im alpinen Raum Österreichs einige Meter und ist stark von den Standorten (Exposition, Schneeeinfluss ...) und dem Material abhängig (Fels, Feinmaterial, grobe Blöcke ...). Das Vorhandensein einer saisonal ungefrorenen Schicht impliziert, dass Permafrosttemperaturen selbst nur in Bohrlöchern, instrumentiert mit Temperatursensoren gemessen werden können. Die Bohrlochtiefe sollte dabei die Tiefe der saisonalen Auftauschicht übertreffen. Bedingt durch diese klimatische Steuerung werden zwei Permafrost-bezogene Parameter als „Essential Climate Variables“ (ECVs) vom globalen Beobachtungsnetz „Global Climate Observing System“ (GCOS) geführt. Diese sind die Temperatur von Permafrost sowie Mächtigkeit der saisonalen Auftauschicht. Die Beobachtung dieser Permafrost-bezogenen ECVs wird durch das „Global Terrestrial Network for Permafrost“ (GTN-P) koordiniert, welches 1999 durch die International Permafrost Association (IPA) gegründet wurde (Biskaborn et al. 2015). Österreich ist Mitglied der IPA, wobei die beiden Autoren dieses Dokuments zur IPA gute Beziehungen pflegen (G.K. Lieb führte Österreich in die IPA, A. Kellerer-Pirklbauer ist aktuell der österreichische Vertreter bei der IPA).

Permafrostforschung in Österreich hat eine relativ lange Forschungsgeschichte. Studien zu alpinen Permafrostformen – im konkreten Fall Blockgletscher, also gefrorene Eis- und Schuttmassen, die lavastromartig langsam bergab kriechen –



begannen in Österreich in den 1920er Jahren. Bis in die 1980er Jahre fokussierten Permafroststudien in Österreich auf Blockgletscher. Besonders seit den 1990er Jahren haben Permafrost-bezogene Forschungen im Land stark zugenommen, was u. a. auch mit entsprechenden Aktivitäten im Nationalpark Hohe Tauern zusammenhängt. Einen detaillierten Überblick über die Permafrost-bezogene Forschung in Österreich geben Krainer et al. (2012). Aktuell gibt es in Österreich nur drei Standorte mit Bohrlöchern, in denen die Temperatur von Permafrost mit Hilfe von Temperatursensoren in unterschiedlichen Tiefen und direkt gemessen wird. Diese sind im Bereich des Hohen Sonnblicks (3 Bohrlöcher), am Kitzsteinhorn (5 Bohrlöcher) sowie am Dachstein (1 Bohrloch) (siehe <http://gtnpdatabase.org/boreholes>).

Permafrost-Monitoring in Österreich wird jedoch nicht standardisiert von Institutionen durchgeführt, sondern beruht auf einzelnen, wissenschaftlich motivierten Initiativen (siehe Übersicht dazu in Kellerer-Pirklbauer et al. 2015 und Adler & Fürst 2017). Permafrost-Monitoring wird kontinuierlich seit den 1990er Jahren (Blockgletscherbewegung) bzw. seit den 2000er Jahren (Temperaturen im Permafrost) im Nationalparkgebiet betrieben, 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; Schöner et al. 2012) sowie jene im Bereich mehrerer Kare im Obersulzbachtal (seit 2015; Keuschnig 2018) im Gebiet des Nationalparks Hohe Tauern zu nennen sind (siehe Abb. 1).

Wie im Zielsetzungskapitel bereits erwähnt, ist Permafrost der einzige der untersuchten abiotischen Faktoren, für den im Rahmen des Moduls 07 auch die Neueinrichtung von Messstellen und eine methodische Weiterentwicklung vorgesehen war. Auf diese Thematik wird im folgenden Unterkapitel näher eingegangen. Allgemein gilt zu den Permafrostdaten, dass die Auswertung mit statistischen Standardmethoden zu erfolgen hat, wobei der Schwerpunkt auf der Darstellung von Zeitreihen sowie der Berechnung von Mittelwerten, linearen Trends, Verhältnissen und Abweichungen zu Mittelwerten liegt.

a. Monitoring von Permafrost und der Bodentemperatur im Nationalpark Hohe Tauern im Rahmen des gegenständlichen Projektes

Innerhalb des Moduls Kryosphäre im gegenständlichen Pilotprojekt war es ein definiertes Ziel ein neues Permafrost-Messnetz in der Venedigergruppe einzurichten. Hierfür wurde im Zuge des Projektes eine „optimale“ Gipfelpyramide gesucht, die eine in alle Expositionen relativ ähnliche Geometrie, Morphologie aber auch geologische Verhältnisse aufweist. Unter diesen, dann ähnlichen Bedingungen in allen Himmelsrichtungen, können Temperaturmesssensoren in gleicher Höhe auch eine Aussage über die Auswirkungen der Himmelsrichtung und somit der Ausrichtung zur Sonne auf das thermale Regime im Untergrund – und folglich im Permafrost bei geeigneter Höhe – zulassen. Abbildung 5 beinhaltet zwei graphische Darstellungen des ursprünglich angestrebten Monitoring-Setups, welches durch örtliche Gegebenheiten (z. B. Fels verfügbar für Felsbohrloch oder nicht) in wenigen Fällen dann später am gewählten Standort Innerer Knorrkogel (siehe unten) adaptiert wurde.

Die gesuchte und schließlich gefundene Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels wurde mit 17 Bodentemperatur-Messsensoren in Hangbereichen, auf Graten und am Gipfel sowie zusätzlich mit einem Lufttemperatursensor mit Strahlungsschutz ausgestattet. Der Fokus der Instrumentierung waren Bodentemperatursensoren, die weitgehend ohne Eingriff in die Natur eingerichtet wurden (n=14). Als Strahlungsschutz wurde an solchen Standorten eine dünne Gesteinsplatte verwendet, wobei jedoch die Durchlüftung der Hohlräume bei den Sensoren immer gewährleistet sein muss. In drei Fällen wurden mit Hilfe einer Akkubohrmaschine Bohrlöcher in Felswände bzw. große Blöcke eingebohrt. An diesen drei Stellen kamen Mehrkanal-Felsdatenlogger zum Einsatz, die in drei verschiedenen Tiefen (3, 10 und 40 cm) – entsprechend den „klassischen“ Vorgaben aus der Literatur (Matsuoka 1994) und ähnlichen Monitoringstandorten in den Hohen und Niederen Tauern (Kellerer-Pirklbauer 2017) – Felstemperaturen messen sollen.

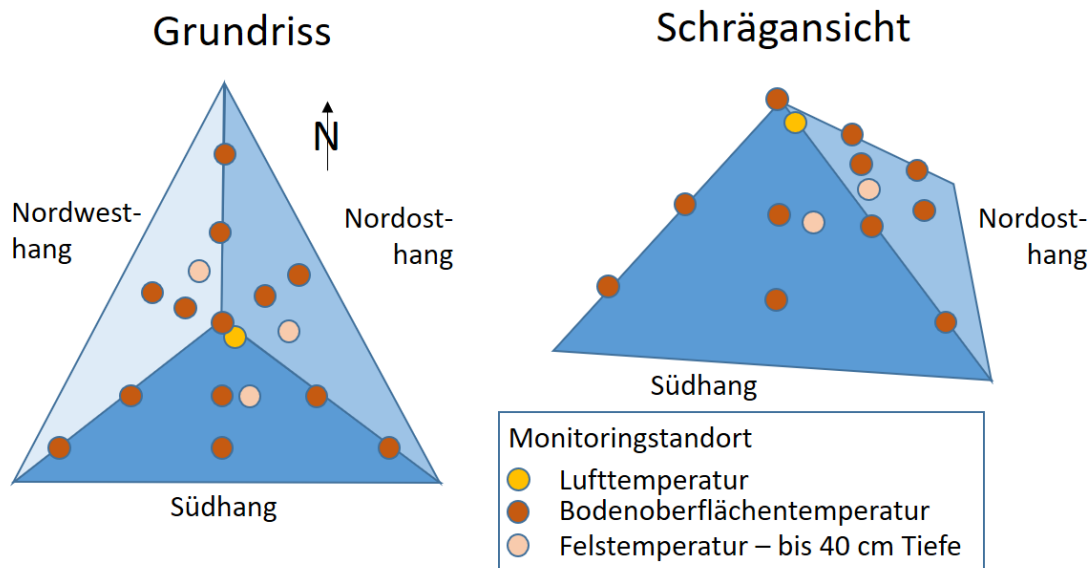


Abbildung 5: Schematisches Modell der Monitoring-Instrumentierung am Inneren Knorrkogel, Venedigergruppe, wie es in der Planungsphase zur Instrumentierung überlegt worden war. Dieses Konzept konnte im Jahr 2018 nahezu 1:1 umgesetzt (weiterer Bodenoberflächentemperaturmessstandort im Bereich der Klimastation; folglich 18 Datenlogger) werden. Unterschieden wird zwischen dem Monitoring der Lufttemperatur im gipfelnahen Bereich, dem Monitoring der Bodentemperatur an der Oberfläche an Graten (hier Südwestgrat, Südostgrat und Nordgrat) und an Hängen (hier Südhang, Nordwesthang und Nordosthang) in zwei unterschiedlichen Höhengniveaus. Zum Monitoring der Felstemperatur wurden schließlich an drei Standorten Temperatursensoren bis in eine Tiefe von 40 cm eingebaut. Grafik © Autoren.

Abbildung 6 zeigt die Lage des Inneren Knorrkogels und der dort eingerichteten 18 Messstellen. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die neuen Messstandorte mit technischen und geographischen Angaben. Bei allen installierten Datenloggern handelt es sich um Produkte der Firma Geoprecision, wobei 15 Stück Einkanallogger der Produktbezeichnung M-Log5W-SIMPLE (Auflösung 0,01°C) und 3 Stück Mehrkanallogger des Typs M-Log5W-DALLAS (Auflösung 0,065°C) mit jeweils drei Temperatursensoren eingebaut wurden. Alle drei Datenlogger des Typs M-Log5W-DALLAS wurden für das Monitoring der Felstemperatur bis in eine Tiefe von 40 cm eingebaut, wobei alle drei Hangexpositionen der Gipfelpyramide, Nordost (Standort Flanke-Felslogger-NE), West (Flanke-Felslogger-W) sowie Süd (Flanke-Felslogger-S) berücksichtigt wurden. Abbildung 7 gibt visuelle Eindrücke von den Bohraktivitäten an den drei Felsloggerstandorten wieder. Für diese Bohraktivitäten wurde ein Makita-Schlagbohrer verwendet, wobei pro Standort neben dem 40 cm tiefen Bohrloch (Durchmesser 12 mm) noch weitere seichte und dünnere (8 mm) Bohrlöcher in den Fels gebohrt wurden, welche zur Fixierung der Datenlogger dienten. Zu betonen ist dabei, dass bedingt durch die Klüftigkeit des Gesteins (und den weit verbreiteten autochthonen Blockschutt) es nicht unproblematisch war, geeignete Standorte für die Felssensoren zu finden. So wurde beispielsweise am Standort Flanke-Felslogger-NE länger – zum Teil mit Probebohrungen – nach einem geeigneten Standort gesucht.

Die 15 Einkanallogger werden bis auf eine Ausnahme für das Monitoring der Bodenoberfläche verwendet. Die eine Ausnahme ist der Logger A52194, welcher für das Monitoring der Lufttemperatur nahe dem Gipfel des Inneren Knorrkogels eingesetzt wurde. Der Messstandort liegt wenige Meter unterhalb und ca. 50 m östlich des Gipfels. Dieser Standort wurde gewählt, um die mögliche Störung des Messsystems in Gipfelnähe (Bergsteiger, Gipfelkreuz selbst – Biltzeinschlag) etwas zu reduzieren. Der Logger A52194 wurde in einen Strahlungsschutz (einfache Wetterhütte der Firma Young) eingebaut. Der Strahlungsschutz selbst wurde an einem 2,5 m langen Alurohr befestigt, welches in eine Kluft und beschwert mit einer Steinschichtung eingebaut wurde. Abbildung 8 zeigt die Situation vor Ort. Im Bereich des geschichteten Steinhaufens wurde ebenso ein Bodentemperaturdatenlogger (A52194) eingebaut.

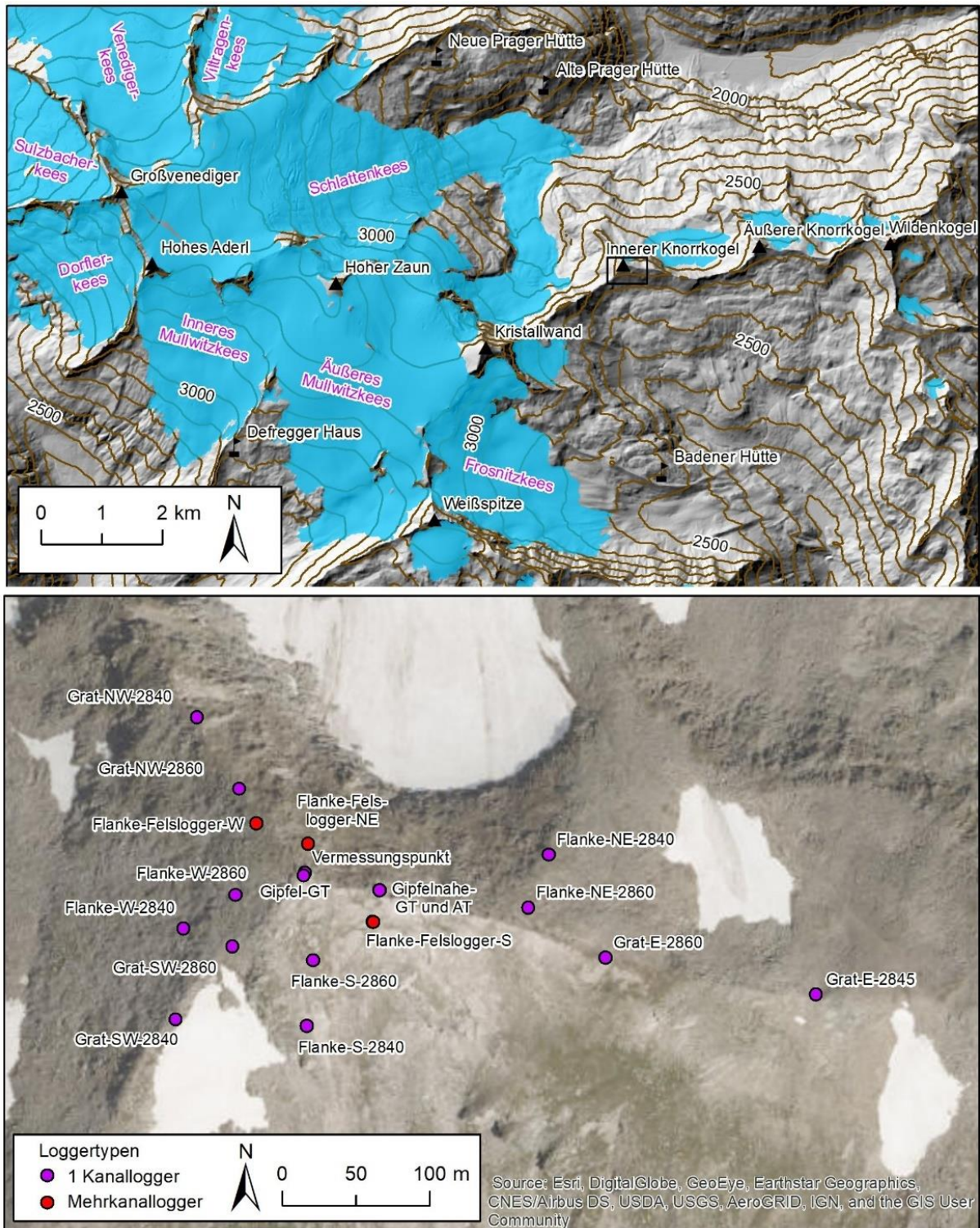


Abbildung 6: Übersichtskarte (oben) des neuen Permafrost-Monitoringstandorts Innerer Knorrkogel (mit Gletschern, markanten Gipfeln und Hütten zur Orientierung) und Detailkarte (unten) mit allen 18 neu eingerichteten Standorten (siehe hierzu Tabelle 7). (Datenquellen Abbildung oben: Geländemodell <https://www.data.gv.at>; Gletscherflächen Buckel et al. (2018); unten: Satellitenbild DigitalGlobe)

Tabelle 7: Übersicht über die 18 Monitoring-Standorte in der Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels mit Angaben zu Code, Koordinaten, Höhe, Bezeichnung, Art des installierten Datenloggers (1K=Einkanaldatenlogger, 3K=Dreikanaldatenlogger für Messungen im Fels bis in eine Tiefe von 40 cm) und Loggernummer. Das entsprechende ArcGis Shapefile im Koordinatensystem EPSG 31258 hat die Bezeichnung inn_knorr_mon_sites_EPSG31258.shp.

Code	Koord. BMN-M31 (EPSG 31258)		Höhe (m)	Bezeichnung	Logger Typ	Log.Nr.
	RW (m)	HW (m)				
F-3K-NE-2871	380713,44	218530,76	2870,97	Flanke-Felslogger-NE	3K	A538AC
F-3K-W-2869	380689,57	218540,51	2869,11	Flanke-Felslogger-W	3K	A538B7
G-1K-NW-2840	380662,83	218589,58	2840,52	Grat-NW-2840	1K	A52223
G-1K-NW-2860	380682,02	218556,54	2860,53	Grat-NW-2860	1K	A52227
S-AT-2878	380746,00	218509,06	2878,21	Gipfelbereich - AT	1K	A5223E
S-GT-2878	380746,00	218509,06	2878,21	Gipfelbereich - GT	1K	A52194
F-3K-S-2871	380742,77	218494,48	2871,94	Flanke-Felslogger-S	3K	A538B1
F-1K-S-2860	380715,00	218476,97	2860,71	Flanke-S-2860	1K	A5222A
F-1K-S-2840	380711,68	218447,03	2839,63	Flanke-S-2840	1K	A52230
G-1K-SW-2840	380651,36	218450,45	2840,96	Grat-SW-2840	1K	A5223B
G-1K-SW-2860	380677,96	218483,84	2860,55	Grat-SW-2860	1K	A5223F
F-1K-W-286	380679,63	218507,51	2861,03	Flanke-W-2860	1K	A52244
F-1K-W-2840	380655,36	218492,44	2840,19	Flanke-W-2840	1K	A52220
S-GT-288	380711,24	218516,05	2885,80	Gipfel selbst - GT	1K	A521B7
G-1K-E-2860	380849,95	218476,70	2861,09	Grat-E-2860	1K	A521CB
F-1K-NE-2860	380814,63	218500,22	2860,53	Flanke-NE-2860	1K	A5226E
F-1K-NE-2840	380824,41	218524,41	2840,68	Flanke-NE-2840	1K	A521A0
G-1K-E-2845	380947,08	218458,69	2845,60	Grat-E-2845	1K	A5222E

Anmerkungen: GT=Bodentemperatur, AT=Lufttemperatur, RW=Rechtswert, HW=Hochwert. Die Koordinatenangaben beziehen sich auf die im Gelände direkt mit Differential-GPS gemessenen Daten.



Abbildung 7: Bohraktivitäten an den drei Felslogger-Standorten am Inneren Knorrkogel. Oben links – Standort Flanke-Felslogger-NE; oben rechts – Standort Flanke-Felslogger-W; unten links – Standort Flanke-Felslogger-S; unten rechts – fertig installierter 3-Kanaldatenlogger am Standort Flanke-Felslogger-NE mit Messsensoren in 3, 10 und 40 cm Tiefe. (Fotos: A. Kellerer-Pirklbauer)



Abbildung 8: Der Lufttemperatur-Monitoringstandort (mit einer Strahlungsschutz der Firma Young; siehe hierzu für Details <http://www.youngusa.com/products/2/11.html>) nahe dem Gipfel des Inneren Knorrkogels mit Blick nach Westen. Erläuterungen im Text. (Fotos: A. Kellerer-Pirklbauer)

Die restlichen 13 Standorte mit Einkanaldatenloggern dienen dem Bodentemperatur-Monitoring in den drei Flanken (West-, Nordost-, Südflanke) und an den drei Graten (Nordwest-, Südwest-, Ostgrat) oder im Gipfelbereich selbst. Im Bereich der Grate und Flanken wurden jeweils in ca. 2840 m sowie in ca. 2860 m die Logger ausgelegt, um bei jeweils gleicher Exposition und morphologischer Form (Flanke/Grat) zusätzlich Information über Temperaturveränderungen in Bezug zur Höhe zu untersuchen (siehe schematisches Model in Abbildung 5). An all diesen Standorten wurden die Sensoren, wie erwähnt, unter dünne Steinplatten gelegt, um sie vor direkter Sonneneinstrahlung zu schützen. Wichtig war im Zuge der Geländearbeit auch die präzise Einmessung der Monitoringstandorte. Alle relevanten Standorte wurden mit Differential-GPS vermessen und teilweise mit Spraymarkierungen versehen, um die spätere Wiederauffindung besser zu gewährleisten. Die Abbildungen 9 und 10 zeigen exemplarische Eindrücke von den Standorten. Verwendet wurde für die DGPS-Einmessung ein HiPer V-Messsystem von Topcon (<https://www.topconpositioning.com/de/support/products/hiper-v>).



Abbildung 9: Geländesituation im Bereich von Bodentemperatur-Monitoringstandorten an Graten: Links – Standort Grat-NW-2840 (Code G-1K-NW-2840); rechts – Standort Grat-SW-2840 (G-1K-SW-2840). (Fotos: A. Kellerer-Pirklbauer)



Abbildung 10: Geländesituation im Bereich von Bodentemperatur-Monitoringstandorten in Flanken: Links – Standort Flanke-W-2840 (Code F-1K-W-2840); rechts – Standort Flanke-NE-2860 (F-1K-NE-2860). (Fotos: A. Kellerer-Pirklbauer)



Das Monitoringnetz am Inneren Knorrkogel konnte somit erfolgreich im August 2018 eingerichtet werden. Zumindest einmal im Jahr (August-September) sollten aber alle Standorte besucht und gewartet werden (eventuell Batterietausch; im schlimmsten Fall Loggertausch – defekte Logger beispielsweise durch Blitzschlag). Wichtig ist in diesem Zusammenhang natürlich auch das Auslesen und Sichern der Daten. Der Auslesevorgang wird dabei über eine Funk-Schnittstelle (433 MHz) durchgeführt, wobei hierzu ein entsprechendes Auslesegerät der Firma Geoprecision (USB Dongle ohne Produktbezeichnung; siehe <http://www.geoprecision.com/produkte-d/funk-datenlogger-433mhz>) verwendet werden muss.

Anzustreben wären im Zuge des weiteren Permafrostmonitorings am Inneren Knorrkogel ergänzende Permafrost-bezogene Untersuchungen wie beispielsweise geophysikalische Messungen. Insbesondere geoelektrische Tomographie-Messungen sind hier zu empfehlen. Eine solche Kombination von Bodentemperaturdaten und geophysikalischen Profilmessungen zur Interpretation von Permafrostverbreitung im Nationalpark Hohe Tauern wurde beispielsweise in der Schobergruppe erfolgreich angewandt (Kellerer-Pirklbauer & Kaufmann 2017).

b. Monitoring von Permafrost und Bodentemperatur im Nationalpark Hohe Tauern im Rahmen anderer Projekte

Permafrostmonitoring innerhalb des Nationalparks Hohe Tauern wird von drei weiteren Institutionen bzw. Gruppen getragen. Diese sind verschiedene Mitarbeiter des „Grazer Permafrost-Monitoring-Netzwerkes“, welche an der Universität Graz, der Technischen Universität Graz sowie seit kurzem an der ZAMG beheimatet sind. Diese Gruppe führt an vier Standorten im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten Permafrost-relevante Messungen durch. Der zweite Monitoringbereich ist der Hohe Sonnblick, wo die ZAMG – Regionalstelle Salzburg und die Zentrale in Wien – entsprechendes Monitoring durchführt. Schließlich seien noch die Monitoring-Aktivitäten im Obersulzbachtal genannt, die wissenschaftlich von der Firma GEORESEARCH seit 2015 betreut werden.

Monitoring Projekt Nationalpark Hohe Tauern Kärnten:

Für die Darstellung der Bodentemperaturverhältnisse im Nationalpark Hohe Tauern im Pilotprojekt wurde primär auf den von den Autoren dieses Berichts gemeinsam mit weiteren Mitarbeitern des „Grazer Permafrost-Monitoring-Netzwerkes“ (Lieb et al. 2016) erstellten Endbericht zu diesem Thema im Auftrag des Nationalparks Hohe Tauern Kärnten zurückgegriffen (Kellerer-Pirklbauer et al. 2019). Die Ergebnisse sind aufgrund der hohen Anzahl an Messstellen, die unterschiedliche Expositionen, Höhenlagen, Geländekonfigurationen und Substrate abdecken, in der Grundaussage der thermischen Reaktion des Permafrostes auf die großräumigen Witterungsverhältnisse der betreffenden Haushaltsjahre auch auf den gesamten Nationalpark übertragbar. Die den Ausführungen zugrundeliegenden Messungen finden in den folgenden Untersuchungsgebieten statt (Lage siehe Abb. 1): Dösen-Säuleck (Ankogelgruppe), Fallbichl-Hochtor (Goldberggruppe/Glocknergruppe), Hinteres Langtalkar-Kögelekar (Schobergruppe) und Pasterze-Burgstall (Glocknergruppe).

Die Abbildung 11 gibt 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 die Originalberichte an den Nationalpark Hohe Tauern Kärnten (zuletzt Kellerer-Pirklbauer et al. 2018, 2019) verwiesen.

Die Darstellung der Bewegungsraten in kriechendem Permafrost (Blockgletscher) wurde ebenso auf Basis dieser Berichte erstellt. Die ermittelten relativen Änderungsraten von einem Jahr auf das nächste hängen – ebenso wie die Regeneration von Permafrost – von den großräumigen Witterungsbedingungen, namentlich Lufttemperatur und Schneefall, ab und sind daher in ihrer Tendenz (nicht jedoch im Betrag) auf den gesamten Nationalpark übertragbar. Die den entsprechenden Ausführungen zugrundeliegenden Messungen finden in den beiden Untersuchungsgebieten Dösen-Säuleck (Döser Blockgletscher) und Hinteres Langtalkar-Kögelekar (Hinteres Langtalkar Blockgletscher) statt (Abb. 1 und 11).

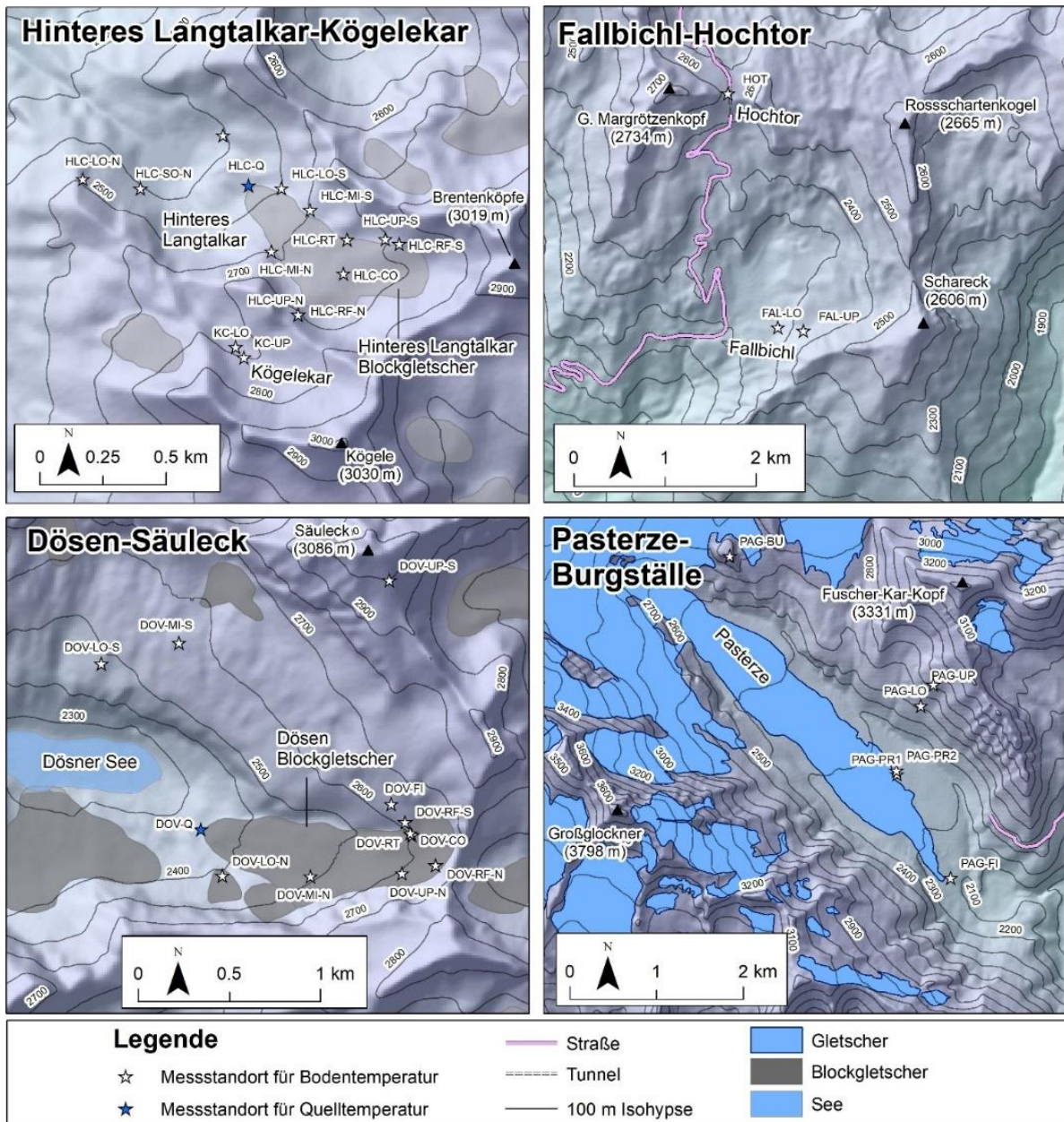


Abbildung 11: Detailkarten der vier Untersuchungsgebiete zum Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten mit Lage aller Messstandorte, welche mit Miniatur-Temperaturdatenlogger ausgestattet sind. Zu beachten ist, dass auch Quelltemperatur-Messstandorte im Bereich zweier Blockgletscherstirnen eingerichtet wurden (HLC-Q und DOV-Q). (Gletschermaske Pasterze nach Buckel et al. 2018).

Permafrost-Bohrlochtemperaturen am Hohen Sonnblick:

Neben dem Grazer Permafrost-Monitoring-Netzwerk gibt es weitere Aktivitäten zum Permafrost-Monitoring auf dem und im Umfeld des Hohen Sonnblicks (ZAMG). In diesem Zusammenhang soll auch erwähnt werden, dass – wenngleich etwas außerhalb des Nationalparkgebiets – auch ein Permafrostmonitoring-Messnetz am Kitzsteinhorn (Kooperation verschiedener Institutionen und des Seilbahnunternehmens unter der wissenschaftlichen Leitung der Firma GEORESEARCH) eingerichtet ist. In beiden genannten Monitoringgebieten sind u. a. auch Bohrlöcher (Sonnblick 3 x 20 m; Kitzsteinhorn 3 x 30 m, 2 x 20 m) mit Temperatursensoren eingerichtet worden, die die langfristige Entwicklung des thermischen Verhaltens von Permafrost in großen Tiefen erkennbar machen und somit bessere Informationen als die sonst ausgeführten oberflächennahen Temperaturmessungen liefern sollen. Von all diesen genannten Bohrlöchern besitzt das Bohrloch 3 am Hohen Sonnblick die geschlossenste Datenreihe, weshalb die Messergebnisse von diesem Bohrloch für das gegenständliche Projekt akquiriert wurden. Die Kontaktperson hierfür war Frau Mag. Claudia Riedl, ZAMG Kundenservice Salzburg und Oberösterreich (claudia.riedl@zamg.ac.at). Die Bodentemperaturdaten vom Bohrloch 3 wurden für das gegenständliche Projekt dankenswerter Weise kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Permafrost-Monitoring Obersulzbachtal

Seit Sommer 2015 werden im Bereich des Sattelkar, Obersulzbachtal (Venedigergruppe, Salzburg), Bodentemperaturen in hochalpinen Lagen kontinuierlich gemessen, wobei diese Aktivitäten gemeinsam vom Nationalpark Hohe Tauern Salzburg, dem Hydrographischen Dienst des Landes Salzburg sowie der Firma GEORESEARCH Forschungsgesellschaft durchgeführt werden. Seit Sommer 2018 existieren weitere Standorte in den südlich an das Sattelkar anschließenden Karen – namentlich Ofenkar, Mitterkar und Steinkar – wo ebenfalls kontinuierlich Bodentemperaturen aufgezeichnet werden. In Summe liegen somit 30 Datenlogger in den vier genannten Karen, wobei alle Datenlogger in rund 10 cm Tiefe im Lockermaterial platziert sind (Keuschnig 2018). Die Positionen aller Datenloggerstandorte in den vier Karen sind in Abbildung 12 dargestellt. Die bisher existierenden Daten von den 13 Standorten im Sattelkar wurden für das Pilotprojekt von der Firma GEORESEARCH (Herrn Ingo Hartmeyer sei an dieser Stelle für die Übermittlung herzlichst gedankt) dankenswerter Weise kostenfrei zur Verfügung gestellt.

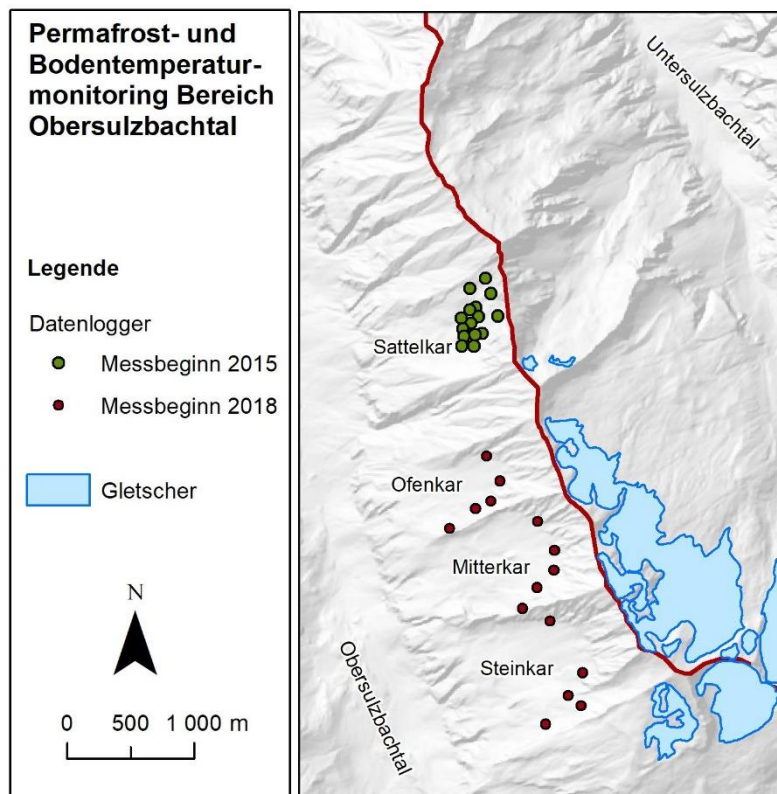


Abbildung 12: Übersichtskarte der Verteilung von Messstandorten in den vier benachbarten Karen Sattelkar, Ofenkar, Mitterkar und Steinkar im Obersulzbachtal, welche mit Miniatur-Temperaturdatenlogger ausgestattet sind. (Lage-information GEORESEARCH, Kartographie Uni. Graz, Gletschermaske nach Buckel et al. 2018).

Für den räumlich sehr komplexen Themenbereich „Permafrost“ kann in Summe festgehalten werden, dass viele relevante Daten für die Permafrost-bezogenen Charakterisierung eines hydrologischen Jahres bzw. Gletscherhaushaltsjahres durch Aktivitäten außerhalb dieses Projektes generiert werden. Hierzu muss aber angemerkt werden, dass sowohl das Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten (Grazer Gruppe) als auch jenes im Nationalpark Hohe Tauern Salzburg (GEORESEARCH) sehr eng mit dem Nationalpark Hohe Tauern verbunden sind. Die Permafrostmonitoring-Aktivitäten im Bereich des Sonnblicks sind eine weitere wichtige Ergänzung für das Verständnis der Veränderungen des Permafrosts im gesamten Nationalpark, da dort auch Bodentemperaturdaten aus Tiefen von bis zu 20 m vorliegen. Die neuen Messungen am Inneren Knorrkogel stellen eine weitere wichtige Ergänzung zum Permafrost-Verständnis im gesamten Nationalpark Hohe Tauern dar.

Die von verschiedenen Institutionen zur Verfügung gestellten sowie im Projekt selbst generierten Daten müssen in weiterer Folge gebietspezifisch ausgewertet, graphisch dargestellt, interpretiert und gemeinsam mit anderen Messergebnissen in diesem Modul integrativ diskutiert werden. Bezüglich Qualitätssicherung muss auch hier wiederum auf die ordentliche Prüfung der Daten durch die Datenbereiter vertraut werden. Einzige Ausnahme sind die Messwerte aus dem



Arbeitsgebiet Innerer Knorrkogel, wo Plausibilitätskontrollen der Daten (z. B. automatische oder graphische Erkennung von Ausreißern bzw. Messfehlern) durchgeführt werden müssen.

Auf Basis von kontinuierlichen Permafrost- bzw. Bodentemperaturmessungen im Hochgebirge lassen sich auch eine große Zahl von unterschiedlichen umweltrelevanten Parametern errechnen. Kellerer-Pirklbauer (2017) hat beispielsweise zur Abschätzung der Verwitterung an alpinen Felswänden in der Tauern-Region die Parameter Jahresmittel der Bodentemperatur, Länge der saisonalen Schneedeckendauer, Anzahl der Tage mit Frostwechsel, Anzahl der Tage mit effektivem Frostwechsel für die Verwitterung (d. h. $<-2^{\circ}\text{C}$ und $>2^{\circ}\text{C}$), Dauer und Intensität von Frostereignissen und schließlich die Zeit innerhalb des sogenannten „frost-cracking windows“, einem weiteren Parameter für die Verwitterung von Festgestein, verwendet. In einer Studie zur Solifluktion in den Hohen Tauern wurden zusätzlich noch die Parameter positive und negative Gradtage (als Maß des Gefrierens bzw. des Abtauens), die Frost- bzw. Auftaueindringtiefe, die Länge der sogenannten „zero-curtain-period“ (einem Maß der Abschätzung der Andauer der durchtränkten Schneedecke), der Beginn der winterlichen Schneedecke sowie die Mitteltemperaturen für unterschiedliche Monate und Jahreszeiten ermittelt (Kellerer-Pirklbauer 2018). Welche Parameter für das gegenständliche Projekt relevant sind, hängt auch von den Bedürfnissen in den anderen Modulen ab.

Die Auswertung aller Daten in diesem Themenbereich soll mit statistischen Standardmethoden erfolgen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Darstellung von Zeitreihen, Berechnung von Mittelwerten, linearen Trends, Verhältnissen oder Abweichungen zu Mittelwerten, aber auch auf ausgewählten, im Absatz zuvor gelisteten umweltrelevanten Parametern.

Aussagewert und Einbettung Modul 07

a. Aussagewert für das gesamte Schutzgebiet

Die im Modul 07 untersuchten Prozesse sind vor dem Hintergrund der Forschungs- und Bildungsaufgabe des Nationalparks von Bedeutung. Die Ergebnisse für den Bereich Witterung und Klima repräsentieren unmittelbar den gesellschaftlich so hoch bewerteten Klimawandel, das Abflussgeschehen eine bedeutende Klimawandel-Folgewirkung, ebenso wie die Veränderungen der Gletscher, bei denen der Klimawandel auch visuell wahrnehmbar ist. Eine Klimawandel-Folge sind auch die Veränderungen im Permafrost, dessen thermische Dynamik bedeutende geomorphologische Wirkungen zeitigen kann. Dabei sind nicht nur die Einzelergebnisse für diese abiotischen Bereiche relevant, sondern deren synthetisch-vernetzende Zusammenschau, in den vorangegangenen Kapiteln ausgedrückt durch die formulierte Aufforderung, die Ergebnisse „integrativ“ zu interpretieren. Damit ist gemeint, dass die untersuchten Faktoren Witterung, Abfluss, Gletscher und Permafrost textlich aufeinander bezogen in einem gemeinsamen Bericht dargestellt werden sollen. Dies stellt einen bedeutenden Mehrwert für Forschende ebenso wie für interessierte Gäste des Nationalparks und die regionale Bevölkerung dar.

Zu betonen ist, dass die Folgen der Veränderungen der untersuchten abiotischen Faktoren auch hydrologische und geomorphodynamische Prozesse in Gang setzen können, die sich im Steilrelief des Hochgebirges massiv auf tiefere Höhenstufen auswirken können. Von sich verändernden Temperatur- und Niederschlagsmustern ausgehende Veränderungen des Abflussgeschehens, des Massenhaushalts und der Geometrie der Gletscher sowie des thermischen Regimes im Permafrost können sich Gebieten in tieferen Lagen in Form etwa von Stürzen (Steinschlag, Felssturz) oder Muren mitteilen. Damit kommt den Ergebnissen des Moduls 07 auch eine Bedeutung im Verständnis bzw. der Früherkennung von Prozessen zu, die unter Naturgefahrenaspekten relevant sind.

b. Einbettung in Forschungsnetzwerke

Das Modul 07 verwendet – mit Ausnahme der Erfassung der Veränderungen im Permafrost – von „offiziellen“ Stellen standardisiert erhobene Daten, welche meist von den Organisationen selbst in internationale Netzwerke eingebracht werden. Z. B. fließen die Messergebnisse des Gletschermessdienstes des Österreichischen Alpenvereins (Längenänderung von Gletschern) in die Datenbank des World Glacier Monitoring Service (WGMS) ein. Für die Übermittlung der Massenbilanzdaten österreichischer Gletscher ist hingegen ein „national correspondent“ verantwortlich, dessen Aufgabe es ist die nationalen Daten zu sammeln und weiterzuleiten. Ein weiteres Beispiel ist das Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P), wofür ebenfalls ein nationaler Korrespondent (in diesem Fall Mag. Claudia Riedl, ZAMG, Salzburg) verantwortlich ist.



Die im Nationalpark Hohe Tauern erfassten Daten zur Kryospäre (Gletscher, Permafrost) finden auch Eingang in das „Global Climate Observing System“ (GCOS), welches eine Gemeinschaftsinitiative der World Meteorological Organization (WMO), der Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO (IOC-UNESCO), des United Nations Environment Programme (UN Environment) und des International Science Council (ISC) ist. Der jüngste GCOS-Österreich Bericht (Adler & Fürst 2017) stellt eine Übersicht der klimarelevanten Messnetze in Österreich dar und beschreibt im Kapitel „Terrestrial Observations – Cryosphere“ auch die für Österreich relevanten „Essential Climate Variables“ (ECVs), deren Ermittlung in Österreich auch wesentlich durch entsprechende Aktivitäten im Nationalpark Hohe Tauern unterstützt wird.

Die Berichte zum Modul 07 beschreiben zwar abiotische Rahmenbedingungen für die anderen Module des Langzeit-Ökosystem-Monitorings im Nationalpark Hohe Tauern, generieren aber keine von diesen direkt nutzbaren Daten. Die im Modul 07 analysierten Prozesse können jedoch Rückwirkungen auf Ökosysteme haben und in langfristiger Perspektive zum Verständnis ökosystemarer Prozesse beitragen. So etwa repräsentieren die Daten zum Gletscherschwund letztlich die Entstehung neuer eisfreier Gebiete (Gletschervorfelder) und somit potenzieller Lebensräume für Pflanzen und Tiere. Eine andere mögliche Wirkung sind von Permafrost-Degradation oder Gletscherschwund ausgelöste Sedimentflüsse, die im hochalpinen Steilrelief tiefer gelegene Ökosysteme beeinflussen können.

Interpretation der wichtigsten Erhebungsparameter

a. Bereich Witterung und Klima

Im Bereich Witterung und Klima werden die Parameter Temperatur und Niederschlag von ausgewählten Messstationen statistisch ausgewertet. Ihre Interpretation erfolgt einerseits im Sinne des Witterungsverlaufs (Variation innerhalb eines Jahres, definiert als Kalenderjahr oder – im Kontext des Moduls 07 günstiger – als glaziologisches Jahr) und andererseits im Sinne langfristiger Klimaänderung (bei Vorhandensein entsprechend langer Datenreihen). Typische Aussagen zum Witterungsverlauf wären etwa die Feststellung eines besonders schneereichen Winters oder einer früh einsetzenden Schneeschmelze, die aus dem Vergleich der Einzeljahresergebnisse mit den langjährigen Mitteln entstehen. Aussagen zur langfristigen Klimaänderung sind im Regelfall nicht Inhalt der für das Modul 07 zu verfassenden jährlichen Berichte. Die Aussagen werden für das Gesamtgebiet des Nationalparks Hohe Tauern getroffen.

b. Bereich Abfluss

Mit dem Bereich Abfluss wird ein bedeutender hydrologischer Parameter erfasst. Sein Zustandekommen ist in der Einzeljahres-Perspektive eng an den Witterungscharakter des betreffenden Einzeljahres geknüpft und daher in engem Konnex damit zu interpretieren. Eine typische Aussage hierzu könnte lauten, dass für die Abflussspitzen an einem Pegel sommerliche Gewitterniederschläge verantwortlich waren. In längerfristiger Perspektive können die mittleren Jahresgänge des Abflusses sogenannten Abflussregimen zugeordnet werden. Derzeit handelt es sich in den meisten Einzugsgebieten in den Hohen Tauern um glaziale Regime mit einem einfachen sommerlichen Abfluss-Maximum. Mit der fortschreitenden Entgletscherung werden sich die Abflussgänge zunehmend nivalen Regimen annähern, d. h. die Maxima werden sich vom Hoch- in den Frühsommer verschieben. Der Mallnitzbach, dessen Einzugsgebiet schon weithin entgletschert ist, befindet sich gerade in dieser Übergangsphase. Damit sind auch schon beispielhaft jene Interaktionen zwischen den einzelnen Bereichen des Moduls 07 angesprochen, denen besonderes Interesse zukommt. Die generierten Aussagen gelten für die Maßstabsebene der drei Einzugsgebiete, an deren unterem Ende die Pegel liegen, von denen die Daten verwendet werden. Von lokalen Niederschlagsereignissen abgesehen, können die Aussagen jedoch auch auf das Gesamtgebiet des Nationalparks übertragen werden.

c. Bereich Gletscher

Die Veränderungen im Bereich Gletscher gelten als die visuell am leichtesten erfassbaren und somit spektakulärsten Klimawandelfolgen im Hochgebirge. Wie bereits im entsprechenden Kapitel „Hintergrund und Arbeitsablauf“ dargelegt, repräsentiert nur die Massenbilanz eine unmittelbare Reaktion der Gletscher auf die Witterungsverhältnisse des einzelnen glaziologischen Jahres. Demgegenüber spiegeln die von einer größeren Zahl an Gletschern verfügbaren Werte der Längenänderung eine mehrjährige Entwicklung, bei den wenigen ganz großen Gletschern allenfalls auch eine solche über

Jahrzehnte, wider. Auch hierbei ist es daher wichtig, die verschiedenen im Modul erfassten Parameter zusammenzuführen und umsichtig zu interpretieren. Da für die meisten Gletscher langjährige Beobachtungsdaten zur Verfügung stehen, können die Einzeljahresergebnisse gut in längerfristige Entwicklungen eingebettet werden, die selbstverständlich an allen Gletschern von starkem Gletscherschwund gekennzeichnet sind. Die Daten gelten zwar nur für die einzelnen Gletscher, an denen sie erhoben wurden, wegen deren relativ großer Anzahl sind jedoch auch für das Gesamtgebiet des Nationalparks gültige Aussagen über die herrschenden Tendenzen ableitbar.

d. Bereich Permafrost

Im Bereich Permafrost ist in Bezug auf die Dateninterpretation zwischen den einzelnen Datenebenen zu unterscheiden. Am einfachsten zu interpretieren sind unzweifelhaft die (wenigen) verfügbaren Bohrlochtemperaturen. Sie zeigen unmittelbar die im jeweiligen Permafrost-Milieu herrschende Temperatur an, die mit zunehmender Tiefe wegen der in diese Richtung zunehmenden Entkoppelung von den atmosphärischen Bedingungen immer weniger mit der Witterung des Einzeljahres zusammenhängen. Eine langfristige Erhöhung der Temperatur in tiefen Bohrlöchern, wie sie an beinahe allen Bohrlöchern im Permafrost der Alpen beobachtet werden kann, ist als zwar verzögerte, aber doch direkte Folge der sich erhöhenden Temperaturen in der Atmosphäre zu deuten.

Demgegenüber wird durch die an der Bodenoberfläche oder in geringer Tiefe angebrachten Temperatursensoren – wie sie aus Kosten- und Wartungsgründen an den meisten der dem Modul 07 zugrundeliegenden Messstandorten (auch auf dem Inneren Knorrkogel) verwendet werden – die Bodenoberflächentemperatur (mean ground surface temperature, MGST) an, welche eine enge Bindung an das thermischen Geschehen der Atmosphäre aufweist. Phasen, in denen dies nicht der Fall ist – in der Regel leicht erkennbar an den geringen bis fehlenden täglichen Schwankungen – deuten am betreffenden Standort auf hohe Schneelage (und können daher auch indirekt an Anzeiger der Schneebedeckung verwendet werden). Abbildung 13 zeigt einen beispielhaften Temperaturverlauf der MGST an einem Schweizer Permafrost-Standort; darin eingetragen sind jene typischen Phasen, in die man einen Jahresgang der MGST einteilen kann:

- Sommer: Hohe Temperaturschwankungen mit Temperaturen über 0°C (thawed period).
- Herbst: Hohe Temperaturschwankungen um den Gefrierpunkt (freezing period).
- Winter: Geringe Temperaturschwankungen durch dämpfende Wirkung der Schneedecke; über Permafrost mit wochen- bis monatelanger Temperaturkonstanz um oder unter -3°C (frozen period).
- Frühjahr: Nach vollständigem Abschmelzen der Schneedecke (dem eine lange Phase mit konstant 0°C in der durchtränkten Schneedecke und an der Bodenoberfläche [zero curtain] vorausgeht) wieder hohe Temperaturschwankungen (thawing period).

Für Details zur Interpretation wird auf Hoelzle et al. (2003) verwiesen.

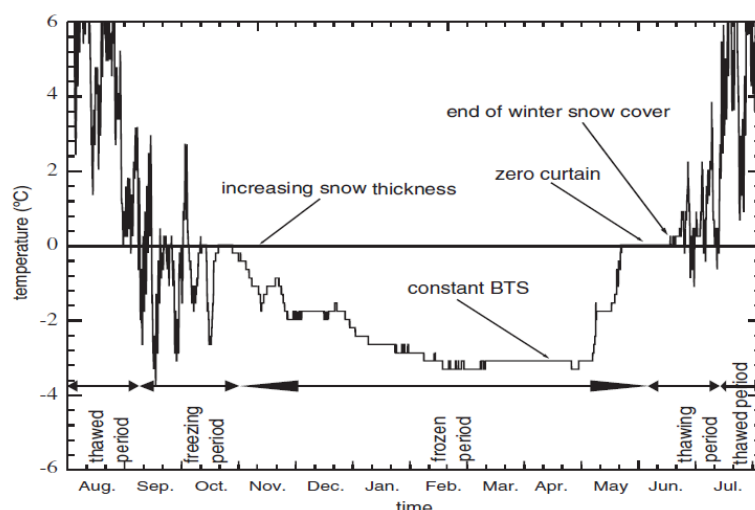


Abbildung 13: Typischer Verlauf der Bodentemperatur an einem Permafrost-Standort der Schweizer Alpen über ein Jahr und dessen Gliederung in charakteristische Phasen (Erläuterungen im Text; aus Hoelzle et al. 2003).

Das zu errechnende Jahresmittel der Bodenoberflächentemperatur (MGST) ist ein wichtiger Indikator einerseits für die Existenz von Permafrost (bei MGST von 0°C oder darunter) und andererseits jener Parameter, der in seiner langjährigen Entwicklung die zu erwartende, vom Klimawandel gesteuerte Erwärmung des Untergrundes anzeigt. Die hierfür aktuell



verfügbaren Längen der Datenreihen in den Hohen Tauern sind für valide Aussagen noch zu kurz, lassen aber die erwartete Tendenz durchaus erkennen. Wegen der großen Zahl an Messstellen im Permafrost können die gewonnenen Aussagen mit etwas Vorsicht jedoch sehr wohl als für den gesamten Nationalpark repräsentativ aufgefasst werden.

Das im Kärntner Teil des Nationalparks Hohe Tauern schon länger durchgeführte Permafrost-Monitoring hat gezeigt, dass für das thermische Regime im Permafrost und somit für die Frage, ob Permafrost erhalten bleibt oder sich zurückbildet (Permafrost-Degradation), einerseits der Herbst und andererseits der Frühsommer entscheidend sind. Als für die Erhaltung des Permafrostes günstig können schneearme Herbstwochen mit großer Frosteindringtiefe gelten, während hohe Schneelagen im Frühsommer die Erwärmung des Untergrundes verhindern bzw. verzögern.

In Bezug auf die Bewegungsraten in kriechendem Permafrost gilt, dass günstige thermische Bedingungen für Permafrost (mit niederen MGST-Jahresmittelwerten) eine Verringerung der Oberflächenbewegung von Blockgletschern bewirken. Da die meisten der letzten Jahre für den Permafrost eher ungünstige Rahmenbedingungen boten, sind die Bewegungsraten des kriechenden Permafrostes aktuell auf hohem Niveau. Für die Zukunft ist zu erwarten, dass durch das Monitoring nach den gegenwärtig hohen Bewegungsraten eine Phase des Bewegungsrückganges und längerfristig ein vollständiges Erlahmen der Bewegung durch vollständige Degradation des Permafrostes nachgewiesen werden kann. Dies ist aktuell jedoch noch an keinem der untersuchten Blockgletscher erkennbar. Erneut gelten die absoluten Werte der Bewegung nur für die untersuchten Blockgletscher, die dabei beobachteten Tendenzen sind jedoch auf den gesamten Nationalpark übertragbar.

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Lage der drei Untersuchungsgebiete für das Langzeit-Ökosystemmonitoring sowie die Lage der in dieser Studie verwendeten Klima- und Abflussmessstationen (ZAMG- 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, verortet (Aufstellung siehe Tabelle 1). KFU=Karl-Franzens-Universität Graz, TUG=Technische Universität Graz, ZAMG=Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ÖAV=Österreichischer Alpenverein, HZB=Hydrographisches Zentralbüro, ZAMG=Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. 4
- Abbildung 2: Vergleich der Monatsmittelwerte der Gletscherhaushaltsjahre 2016/17 (im Jahresmittel um 0,9°C zu warm) und 2017/18 (0,8°C zu warm) mit jenen der Klimanormalperiode 1981-2010 an der TAWES-Station Hoher Sonnblick (3109 m). 6
- Abbildung 3: Vergleich der Jahresgänge des Abflusses in den beiden hydrologischen Haushaltsjahren 2016/17 und 2017/18 an der HZB-Station Mallnitz (Kärnten). 7
- Abbildung 4: Zwei Möglichkeiten der Messung des Gletscherrückzuges: Links: Messung der Längenänderung des Wasserfallwinkelkeeses, eines Nachbargletschers der Pasterze, mittels Maßbandes, wobei die Distanz zwischen einem Fixpunkt und dem Gletscherrand entlang eines genau definierten Azimuts gemessen wird. Rechts: Messung der Längenänderung der Pasterze mittels Differential GPS. Der Rand des Gletschers wird – wo mit geringer Gefahr zugänglich – direkt mit dieser Methode vermessen. (Fotos: G.K. Lieb und A. Kellerer-Pirklbauer) 10
- Abbildung 5: Schematisches Modell der Monitoring-Instrumentierung am Inneren Knorrkogel, Venedigergruppe, wie es in der Planungsphase zur Instrumentierung überlegt worden war. Dieses Konzept konnte im Jahr 2018 nahezu 1:1 umgesetzt (weiterer Bodenoberflächentemperaturmessstandort im Bereich der Klimastation; folglich 18 Datenlogger) werden. Unterschieden wird zwischen dem Monitoring der Lufttemperatur im gipfelnahen Bereich, dem Monitoring der Bodentemperatur an der Oberfläche an Graten (hier Südwestgrat, Südostgrat und Nordgrat) und an Hängen (hier Südhang, Nordwesthang und Nordosthang) in zwei unterschiedlichen Höhengniveaus. Zum Monitoring der Felstemperatur wurden schließlich an drei Standorten Temperatursensoren bis in eine Tiefe von 40 cm eingebaut. Grafik © Autoren. 14
- Abbildung 6: Übersichtskarte (oben) des neuen Permafrost-Monitoringstandorts Innerer Knorrkogel (mit Gletschern, markanten Gipfeln und Hütten zur Orientierung) und Detailkarte (unten) mit allen 18 neu eingerichteten Standorten (siehe hierzu Tabelle 7). (Datenquellen Abbildung oben: Geländemodell <https://www.data.gv.at>; Gletscherflächen Buckel et al. (2018); unten: Satellitenbild DigitalGlobe) 15
- Abbildung 7: Bohraktivitäten an den drei Felslogger-Standorten am Inneren Knorrkogel. Oben links – Standort Flanke-Felslogger-NE; oben rechts – Standort Flanke-Felslogger-W; unten links – Standort Flanke-Felslogger-S; unten rechts – fertig installierter 3-Kanaldatenlogger am Standort Flanke-Felslogger-NE mit Messsensoren in 3, 10 und 40 cm Tiefe. (Fotos: A. Kellerer-Pirklbauer) 16
- Abbildung 8: Der Lufttemperatur-Monitoringstandort (mit Strahlungsschutz der Firma Young; siehe <http://www.youngusa.com/products/2/11.html>) nahe dem Gipfel des Inneren Knorrkogels mit Blick nach Westen. Erläuterungen im Text. (Fotos: A. Kellerer-Pirklbauer) 17

Abbildung 9: Geländesituation im Bereich von Bodentemperatur-Monitoringstandorten an Graten: Links – Standort Grat-NW-2840 (Code G-1K-NW-2840); rechts – Standort Grat-SW-2840 (G-1K-SW-2840). (Fotos: A. Kellerer-Pirklbauer)	17
Abbildung 10: Geländesituation im Bereich von Bodentemperatur-Monitoringstandorten in Flanken: Links – Standort Flanke-W-2840 (Code F-1K-W-2840); rechts – Standort Flanke-NE-2860 (F-1K-NE-2860). (Fotos: A. Kellerer-Pirklbauer)	17
Abbildung 11: Detailkarten der vier Untersuchungsgebiete zum Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten mit Lage aller Messstandorte, welche mit Miniatur-Temperaturdatenlogger ausgestattet sind. Zu beachten ist, dass auch Quelltemperatur-Messstandorte im Bereich zweier Blockgletscherstirnen eingerichtet wurden (HLC-Q und DOV-Q). (Gletschermaske Pasterze nach Buckel et al. 2018).....	19
Abbildung 12: Übersichtskarte der Verteilung von Messstandorten in den vier benachbarten Karen Sattelkar, Ofenkar, Mitterkar und Steinkar im Obersulzbachtal, welche mit Miniatur-Temperaturdatenlogger ausgestattet sind. (Lage-information GEORESEARCH, Kartographie Uni. Graz, Gletschermaske nach Buckel et al. 2018).....	20
Abbildung 13: Typischer Verlauf der Bodentemperatur an einem Permafrost-Standort der Schweizer Alpen über ein Jahr und dessen Gliederung in charakteristische Phasen (Erläuterungen im Text; aus Hoelzle et al. 2003).....	23

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Liste von Klimastationen mit Angaben zu den Betreibern innerhalb und im Nahbereich des Nationalparks Hohe Tauern. Lage siehe Abbildung 1.	2
Tabelle 2: TAWES-Stationen der ZAMG, die für das gegenständliche Projekt verwendet wurden und weiter verwendet werden sollen, mit Angabe des Beginns der verfügbaren Datenreihe. Synnr. ist die ZAMG-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 (EPSG 31258). Weitere Erläuterungen im Text.	3
Tabelle 3: Klimastationen der hydrographischen Landesdienste, die für die gegenständliche Studie verwendet wurden, mit HZB-Code (Hydrographischer Dienst Österreichs) und Beginn der verfügbaren Datenreihe. HZB-Nr. ist die interne Stationsnummer, Lon die geographische Länge und Lat die geographische Breite; RW/Rechtswert und HW/Hochwert sind die Koordinatenangaben auf Basis der Projektion BMN-M31 (EPSG 31258). Weitere Erläuterungen im Text.	5
Tabelle 4: HZB-Oberflächengewässer-Messstellen der Hydrographischen Landesdienste, die für die gegenständliche Studie verwendet wurden und weiter verwendet werden sollten. Koordinaten sind in geographischen Koordinaten sowie in BMN – M31 (EPSG 31258) angegeben. Höhe = Höhe des Pegelnulpunktes in m ü. A.; o. Ezg. = orographisches Einzugsgebiet.....	8
Tabelle 5: Auflistung der im Bereich des Nationalparks Hohe Tauern durch den Österreichischen Alpenverein jährlich vermessenen Gletscher. Lage siehe Abbildung 1. Anmerkung: Die in den drei untersuchten Einzugsgebieten gelegenen Gletscher sind mit * markiert.....	10
Tabelle 6: Gletscher in den Hohen Tauern, an denen Massenbilanzen durch verschiedene Institutionen bestimmt werden (Quelle: WGMS 2018, ergänzt). ZAMG=Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik; ÖAW=Österreichische Akademie der Wissenschaft; HD-Sbg=Hydrographischer Dienst des Landes Salzburg. Das Wurtenkees liegt nicht innerhalb des Nationalparkgebietes.	12
Tabelle 7: Übersicht über die 18 Monitoring-Standorte in der Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels mit Angaben zu Code, Koordinaten, Höhe, Bezeichnung, Art des installierten Datenloggers (1K=Einkanaldatenlogger, 3K=Dreikanaldatenlogger für Messungen im Fels bis in eine Tiefe von 40 cm) und Loggernummer. Das entsprechende ArcGis Shapefile im Koordinatensystem EPSG 31258 hat die Bezeichnung inn_knorr_mon_sites_EPSG31258.shp.	16



Literaturverzeichnis

- Adler S. & Fürst H. (eds.) (2017) Global Climate Observing System – Austrian Inventory Report. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, 113 Seiten.
- Baumgartner A. & Liebscher H.-J. (1996): Lehrbuch der Hydrologie – Band 1: Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie, Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 694 Seiten.
- Benn D. I. & Evans D. J. A. (2010): Glaciers & Glaciation. 2. Edition. Taylor & Francis, London, 816 Seiten.
- Biskaborn B. K., Lanckman J. P., Lantuit H., Elger K., Streletskiy D. A., Cable W. L. & Romanovsky V. E. (2015): The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). *Earth Syst. Sci. Data* 7, 245–259.
- Buckel J., Otto J. C., Prasicsek G. & Keuschnig M. (2018): Glacial lakes in Austria – Distribution and formation since the Little Ice Age. *Global and Planetary Change*, 164, 39–51.
- Cogley J. G., Hock R., Rasmussen L.A., Arendt A. A., Bauder A., Braithwaite R. J., Jansson P., Kaser G., Möller M., Nicholson L. & Zemp M. (2011): Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms, IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, UNESCO-IHP, Paris, 114 Seiten.
- Fischer A., Patzelt G., AchRAINER M., Groß G., Lieb G. K., Kellerer-Pirklbauer A. & Bendler G. (2018): Gletscher im Wandel: 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins. Springer Spektrum, 140 S. doi:10.1007/978-3-662-55540-8.
- Hoelzle M., Haeberli W. & Stocker-Mittaz C. (2003): Miniature ground temperature data logger measurements 2000-2002 in the Murtèl-Corvatsch area, Eastern Swiss Alps. *Proceedings of the 8th International Permafrost Conference*, Zürich, 419–424.
- 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. (2017): Deglaciation and its impact on permafrost and rock glacier evolution: New insight from two adjacent cirques in Austria. *Science of the Total Environment*, 621:1397-1414.
- 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, BMWWF, 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.
- Keuschnig M. (2018). Klimasensitive, hochalpine Kare: Projekt Sattelkar – Zwischenbericht 1: 2018, Nationalpark Hohe Tauern, 13 Seiten.
- Krainer K., Kellerer-Pirklbauer A., Kaufmann V., Lieb G. K., Schrott L., & Hausmann H. (2012): Permafrost research in Austria: history and recent advances. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105/2, 2-11.
- Krautblatter M., Kellerer-Pirklbauer A. & Gartner-Roer I. (2018): Permafrost in den Alpen – Erscheinungsformen, Verbreitung und zukünftige Entwicklung. *Geographische Rundschau*, Heft 11/2018, 22-29.
- Lieb G. K. & Kellerer-Pirklbauer A. (2018a): Langzeit-Monitoring abiotischer Prozesse im Nationalpark Hohe Tauern – Zweiter Zwischenbericht zum Modul 07 „Kryosphäre: Gletscher, Hydroklima, Permafrost, Geomorphodynamik“ im Rahmen des interdisziplinären, integrativen Monitoring- und Forschungsprogramms zur langfristigen, systematischen



Ökosystembeobachtung im Nationalpark Hohe Tauern. Unveröffentlichter Bericht, Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz, 32 Seiten.

Lieb G. K. & Kellerer-Pirklbauer A. (2018b): Die Pasterze, Österreichs größter Gletscher, und seine lange Messreihe in einer Ära massiven Gletscherschwundes: 31-51. In: Fischer et al. (Eds.) (2018): 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins. Springer Spektrum, Heidelberg, 140.

Lieb G. K. & Kellerer-Pirklbauer A. (2018c): Gletschermessungen an der Pasterze und in deren Umgebung (Glocknergruppe) im Jahr 2018. Unveröffentlichter Bericht, Institut für Geographie und Raumforschung Graz, 20 Seiten

Lieb G. K. & Kellerer-Pirklbauer A. (2019): Gletscherbericht 2017/2018 – Sammelbericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins im Jahr 2018. Bergauf 02 (2019): 20–29.

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.

Matsuoka N. (1994): Diurnal freeze-thaw depth in rockwalls: fieldmeasurements and theoretical considerations. *Earth Surf. Process. Landf.* 19, 423–435.

Newesely C, Tappeiner U, Körner C (2019) Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen im Nationalpark Hohe Tauern. Modul 01: Standortklima, Bodenphysik, Bodenchemie und pflanzliche Produktivität. Methoden-Handbuch. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien. ISBN-Online: 978-3-7001-8749-3, doi: 10.1553/GCP_LZM_NPHT_Modul01

NRC-Permafrost-Subcommittee (1988): Glossary of Permafrost and related ground-ice terms. NRC Technical Memorandum 142, 156 Seiten.

Schöner W., Boeckli L., Hausmann H, Otto J. C., Reisenhofer S., Riedl C. & Seren S. (2012): Spatial Patterns of Permafrost at Hoher Sonnblick (Austrian Alps) – Extensive Field-measurements and Modelling Approaches. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105/2, 154-168.

Schönwiese, C. D. (2013): *Klimatologie*. 4. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Stuttgart: Ulmer, 489 Seiten.

Seiser B. & Fischer A. (2018): Venedigerkees – Massenhaushalt 2017/2018. Jahresbericht des Instituts für Interdisziplinäre Gebirgsforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Innsbruck.

Stocker-Waldhuber M. & Fischer A. (2018): Äußeres Mullwitzkees – Massenhaushalt 2017/2018. Jahresbericht des Instituts für Interdisziplinäre Gebirgsforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

Wilhelm R. (1993): *Hydrogeographie*. 2. verbesserte Auflage. Das Geographische Seminar, Westermann, Braunschweig.

WMO (2014): *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Published by WMO (2014 edition updated in 2017). URL https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=12407#.XOPafkxuKUI (zuletzt geprüft 10.05. 2019)

Zagel B. (2019): Glaziologisches Monitoring Stubachtal | Sonnblickkees, 2015-2019. Beiträge zur Glazialhydrologie eines hochalpinen Einzugsgebietes im Oberen Stubachtal, Hohe Tauern, Land Salzburg. Berichtsjahr 2018. Auftraggeber: Land Salzburg, Hydrographischer Dienst.



Medieninhaber und Herausgeber, Verleger:

Nationalparkrat Hohe Tauern

Kirchplatz 2, 9971 Matri

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

