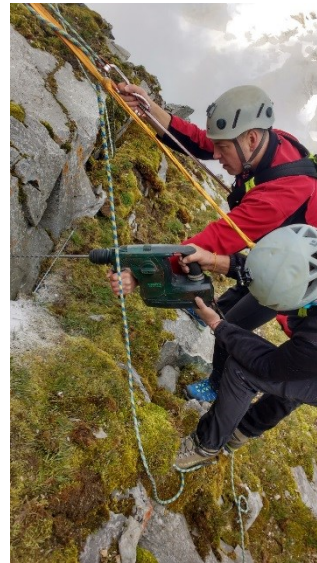


ENDBERICHT 2014-2018



ZAMG

Zentralanstalt für
Meteorologie und
Geodynamik

PERSON- GCW

PERMAFROSTMONITORING SONNBLICK -

Etablierung des Sonnblicks (Hohe Tauern) als
Global Cryosphere Watch Supersite

GZ: BMLFUW-UW.1.3.2/0127-V/4/2014/4/2014

 **Bundesministerium
Nachhaltigkeit und
Tourismus**

Titelbild 1 (links oben): Feldarbeiten am 14. Juli 2015 im Bereich des Sonnblickgipfels – drei Mitarbeiter der Geologischen Bundesanstalt bei der Installation des Geoelektrikprofils. Im Vordergrund des Bildes ist eine Zarges Box, in der sich die autarke Energieversorgung (Brennstoffzelle) für die Messungen der Geoelektrik befindet, zu sehen

Titelbild (rechts oben): Feldarbeiten am 3. August 2016 inmitten der Sonnblick Nordwand – im Bild zu sehen sind die Sonnblickbeobachter Lug Rasser und Hias Daxbacher während der Bohrarbeiten für die neue Thermistorenkette in der Nordwand.

Titelbild 3 (links unten): Feldarbeiten am 22. August 2014 in der Wintergasse - Iris Hansche positioniert gerade einen Oberflächenlogger. Im Vordergrund des Bildes sind die Farbmarkierungen eines Messstandortes zu sehen (Foto: Stefan Reisenhofer)

Titelbild 4 (rechts unten): Feldarbeiten am 2. August 2017– im Bild zu sehen ist der Sonnblickbeobachter Lug Rasser beim Einstieg in die Sonnblick Nordwand für die Bohrarbeiten der neuen Thermistorenketten.

Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus, Abteilung IV/1, Abteilung Koordination Klimapolitik.



Abteilung Klimaforschung:
Mag. Stefan Reisenhofer

Hohe Warte 38
1190 Wien
stefan.reisenhofer@zamg.ac.at

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis.....	6
Zusammenfassung	7
1. Einleitung und Hintergrund	8
2. Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum 2014-2018	9
3. Permafrost-Monitoring im Sonnblickgebiet	19
4. Angewandte Messsysteme.....	23
4.1. Tiefe Bohrlöcher	23
Ziel und Motivation	23
Standort	23
Analyse.....	24
4.2. Seichte Bohrlöcher (NST – Near Surface Temperature)	25
Ziel und Motivation	25
Entstehungschronologie und Standorte der seichten Bohrlöcher	25
Analyse.....	28
4.3. Oberflächenlogger (GST – Ground Surface Temperature)	33
Ziel und Motivation	33
Standort	33
Analyse.....	33
4.4. Temperatursonden (BTS – Bottom Temperature of Snow cover)	40
Ziel und Motivation	40
Standorte	40
Analyse.....	40
4.5. Geoelektrik.....	45
Ziel und Motivation	45
Standort	45
Analyse.....	50
4.6. Elektromagnetik	52
Ziel und Motivation	52
Standort	52
Analyse.....	52
Appendix	53
Zusammenfassung der Tagungsbeiträge und sonstigen Beiträge.....	53
Literatur.....	55
Weblinks.....	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mittlere monatliche Lufttemperatur am Hohen Sonnblick (3109 m) im Untersuchungszeitraum 2014-2018 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1980/81-2009/10 sowie die monatlichen Abweichungen.	10
Abbildung 2: Monatliche Abweichungen in Prozent der Niederschlagssummen im Untersuchungszeitraum 2014-2018 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1980/81-2009/10.....	10
Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Gesamtschneehöhe im Untersuchungszeitraum 2014-2018 im Vergleich zum langjährigen monatlichen Mittel 1981-2010. Zusätzlich sind die täglichen Neuschneesummen dargestellt.....	10
Abbildung 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 und 13: Jahresverlauf der Anzahl der monatlichen Frost-, Eis- und Frostwechselftage sowie deren monatliche Abweichungen.....	11
Abbildung 14 und 15: Anzahl der Frost-, Eis- und Frostwechselftage im Untersuchungszeitraum 2014-2018 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1981-2018 (links) und deren Abweichungen zum Mittel (rechts).	12
Abbildung 16: Die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, die Tagessummen der Sonnenscheindauer, die täglichen Neuschneesummen und kumulierten Neuschneemengen sowie die Gesamtschneehöhe für das hydrologische Jahr 2013/14 für die Station Sonnblick.....	12
Abbildung 17: Die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, die Tagessummen der Sonnenscheindauer, die täglichen Neuschneesummen und kumulierten Neuschneemengen sowie die Gesamtschneehöhe für das hydrologische Jahr 2014/15 für die Station Sonnblick.....	14
Abbildung 18: Die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, die Tagessummen der Sonnenscheindauer, die täglichen Neuschneesummen und kumulierten Neuschneemengen sowie die Gesamtschneehöhe für das hydrologische Jahr 2015/16 für die Station Sonnblick.....	15
Abbildung 19: Die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, die Tagessummen der Sonnenscheindauer, die täglichen Neuschneesummen und kumulierten Neuschneemengen sowie die Gesamtschneehöhe für das hydrologische Jahr 2016/17 für die Station Sonnblick.....	16
Abbildung 20: Die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, die Tagessummen der Sonnenscheindauer, die täglichen Neuschneesummen und kumulierten Neuschneemengen sowie die Gesamtschneehöhe für das hydrologische Jahr 2017/18 für die Station Sonnblick.....	18
Abbildung 21: Permafrost-Untersuchungsgebiete im Sonnblickgebiet.	19
Abbildung 22: Permafrost-Messstandorte am Gipfel des Hohen Sonnblicks.	20
Abbildung. 23: Bohrarbeiten am Hohen Sonnblick im Jahr 2005.	23
Abbildung 24: Lage der vier Bohrlöcher am Sonnblickgipfel.	23
Abbildung 25: Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf in fünf ausgewählten Tiefen im Bohrloch 3 (erstellt von Claudia Riedl).	24
Abbildung 26: Lage der seichten Bohrlöcher im Untersuchungsgebiet Wintergasse.....	25
Abbildung 27: Temperaturverlauf in sechs unterschiedlichen Tiefen am Standort Nordwand 01.....	29
Abbildung 28: Temperaturverlauf in sechs unterschiedlichen Tiefen am Standort Nordwand 01.....	29
Abbildung 29, 30, 31 und 32: Temperaturverlauf in den seichten Bohrlöchern an der Südflanke des Hohen Sonnblicks.	31
Abbildung 33 und 34: Temperaturverlauf am Standort w44 (links) und am Standort w45 (rechts).	32
Abbildung 35: Temperaturverlauf am Standort w48 im Untersuchungsgebiet Wintergasse.....	32
Abbildung 36: Bodengefrierindex (GFI) und Schmelzgradindex (THI) – tägliche negative Gradtagssummen und tägliche positive Gradtagssummen – der GST-Standorte im Untersuchungsgebiet Wintergasse.....	37
Abbildung 37: Mittlere jährliche Bodentemperatur (MAGST) im Untersuchungszeitraum an den Messstandorten im Untersuchungsgebiet Wintergasse.....	37

Abbildung 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46 und 47: Box-Plot der Temperatur von Okt. - Apr. (links) und von Okt. - Aug. (rechts) im Untersuchungsgebiet Wintergasse.	38
Abbildung 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56 und 57: Mittlere Bodentemperatur in Abhängigkeit von der Seehöhe und der Hangneigung (links) sowie der Seehöhe und der Hangausrichtung (rechts).	39
Abbildung 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64 und 65: Mittlere winterliche Bodentemperatur (Februar) in Abhängigkeit der Hangneigung (links) und der Exposition (rechts).	39
Abbildung 66: Mittlere BTS und mittlere Schneetiefe nach Höhenstufen (numerischer Wert im Balken steht für die Anzahl an Messungen, die für jede Höhenstufe zur Verfügung standen).	41
Abbildung 67: Basistemperatur der Schneedecke in der Wintergasse in den Jahren 2014-2018.	41
Abbildung 68: Basistemperatur der Schneedecke an der Südflanke des Hohen Sonnblicks in den Jahren 2014-2018.	42
Abbildung 69: Unterhalb des Sonnblickgipfels wurden am 13. März 2015 an 48 Standorten BTS-Messungen durchgeführt.	42
Abbildung 70: Messequipment für die BTS-Messungen – modifizierte Lawinsonde mit eingebautem Temperatursensor und Anzeigegerät sowie ein GPS-Handgerät für die Erfassung der Standortkoordinaten.-...	43
Abbildung 71: Lage des ERT-Profils im Jahr 2006 sowie der geplanten Neuinstallation im Jahr 2015 (Foto: M. Staudinger; bearbeitet von R. Supper, A. Römer und S. Reisenhofer).	45
Abbildung 72: Lage des ERT-Profils im Jahr 2006 sowie des geplante ERT-Profils im Jahr 2015 (Foto: S. Reisenhofer).	46
Abbildung 73: ERT-Testmessungen am 7. Juli 2015 (Foto: S. Reisenhofer).	46
Abbildung 74: Installation des Geoelektrikprofils am 14. und 15. Juli 2015 (Foto: S. Reisenhofer).	47
Abbildung 75: Lage des ERT-Profils.	48
Abbildung 76 und 77: Modell des berechneten spezifischen elektrischen Widerstandes im Winter (links) und im Sommer (rechts).	50
Abbildung 78: Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes während der Einfrierphase im Zeitraum vom 9. Okt. - 1. Dez. 2015.	51
Abbildung 79: Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes während der Auftauphase im Zeitraum vom 1. März - 28. Mai 2016.	51
Abbildung 80: Auswertungen der Elektromagnetik-Messungen.	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der monatlichen Niederschlagssummen [mm] am Hohen Sonnblick im Untersuchungszeitraum Okt. 2013 - Sept. 2018 sowie deren Abweichung in Prozent vom langjährigen Mittel 1980/81-2009/10.	13
Tabelle 2: Zusammenfassung permafrostrelevanter Messmethoden im Sonnblickgebiet.	22
Tabelle 3: Maximale Auftauschicht im Bohrloch 1 und 3 (active layer thickness – ALT) sowie dessen Zeitpunkt des Erreichens (erstellt von Claudia Riedl).....	24
Tabelle 4: Zusammenfassung der aktuell vorhandenen Bohrlöcher im Untersuchungsgebiet Wintergasse.	26
Tabelle 5: Zusammenfassung der GST-Standorte im Untersuchungsgebiet Wintergasse (blaue Markierung: Permafrost wahrscheinlich; gelbe Markierung: Permafrost möglich; rote Markierung: Permafrost unwahrscheinlich).	36
Tabelle 6: Chronologische Übersicht der Geländeeinsätze bzgl. des ERT-Profiles.....	49

Zusammenfassung

Der vorliegende Endbericht des Projektes PERSON-GCW dokumentiert die Messungen des Permafrosts im Gebiet des Hohen Sonnblicks für die hydrologischen Jahre 2013/14 bis 2017/18. Das Ziel des PERSON-GCW-Projektes bestand darin, grundlegende Informationen über den aktuellen Zustand und die Veränderung des Permafrosts zu dokumentieren. Für die Erfassung des Permafrosts und seiner Veränderungen werden im Sonnblickgebiet Temperaturmessungen sowie geophysikalische Messungen in Bohrlöchern, Temperaturmessungen an der Oberfläche oder oberflächennah, geophysikalische Messungen an der Oberfläche, Messungen der Basistemperatur der Schneedecke sowie Messungen der Schneedeckenausdehnung durchgeführt.

Seit Anfang des Jahres 2015 zählt das Sonnblickobservatorium zu einer der ersten „integrated sites“ im Global Cryosphere Watch (GCW) Programm, einer jungen Initiative der World Meteorological Organisation (WMO) mit dem Ziel, dass alle Komponenten der Kryosphäre – Schnee, Gletscher, Permafrost und ggf. Meereis – global koordiniert erfasst werden.

Die Witterungsbedingungen in den einzelnen Monaten des Untersuchungszeitraums waren oft überdurchschnittlich warm. Die mittlere monatliche Temperatur am Hohen Sonnblick lag in Summe in 45 Monaten über dem Temperaturmittel von 1981-2010 und lediglich in 15 Monaten darunter. Die höchste Abweichung mit einem Wert von 6,6° C zum langjährigen Mittel 1981-2010 wurde im Dezember 2015 registriert. Viele aufeinanderfolgende Monate mit 2° C über dem Mittel waren zu beobachten. Die vielen überdurchschnittlichen warmen Monate führten in weiterer Folge auch zu einer Abnahme von Frost- und Eistagen. Die markanteste Abnahme war im hydrologischen Jahr 2017/18 zu finden und betrug in Summe 40 Eistage (-17%) und 33 Frosttage (-11%) weniger als im langjährigen Mittel. Bei der gegenwärtigen Klimaerwärmung kommt es durch das verstärkte Abschmelzen des Permafrosteises zu einer zunehmenden Instabilität des anstehenden Gesteins. Durch die immer häufigeren Tau- und Gefrierprozesse wird das Gestein durch die Volumszunahme des Eises beim Gefrieren zunehmend gelockert. Die Folge sind verstärkte Steinschlag- und Felssturzereignisse aus vorwiegend steilen Felsflanken. Dies stellt auch ein noch nicht abschätzbares Risiko für Wanderwege, Kletterrouten, hochalpine Infrastrukturen sowie für alle Akteure in diesen Gebieten dar.

Prinzipiell ist als Ergebnis festzuhalten, dass die räumlichen und zeitlichen Schwankungen der Temperatur des Untergrundes im Untersuchungsgebiet Wintergasse sehr groß sind. Dabei spielt der Schnee mit seiner isolierenden Wirkung eine zentrale Rolle. In einem schneereichen Winter wird der Boden durch die Schneedecke vor eindringender kalter Luft geschützt (wärmender Effekt). Im Frühjahr und Sommer wird der Boden, der noch immer unter Schnee liegt vor warmer Luft und Strahlung abgeschirmt (kühlender Effekt). Beginnt ein Winter kalt und schneearm, sind das die besten Bedingungen für Permafrost, da der Boden stark auskühlen kann. Bildet sich im Verlauf des Winters eine dicke und sich lange in das Frühjahr haltende Schneedecke, sind die perfekten Bedingungen für Permafrost gegeben.

Die bisher vorliegenden Messungen aus den PERSON-GCW-Untersuchungen zeigen, dass im Sonnblickgebiet Permafrost für Nordexpositionen ab Seehöhen über 2650 m wahrscheinlich ist, für Südexpositionen ab Seehöhen über 2850 m. Aussagen über zeitliche Veränderungen des Permafrosts bedürfen jedoch noch einer längeren Messreihe.

1. Einleitung und Hintergrund

Rund 2,5 % der Gesamtfläche Österreichs weist einen ganzjährig gefrorenen Untergrund mit einer saisonalen Auftauschicht (eng.: active layer) auf, und weitere etwa 1,5 % der Fläche unterliegen tiefgründigem saisonalem Bodenfrost mit vergleichbarer Verwitterungswirkung. Das bedeutet, dass etwa 3150 km² der Österreichischen Alpen von Permafrost beeinflusst sind (Boeckli et al., 2012). Im Vergleich dazu beträgt die vergletscherte Fläche in Österreich rund 468 km² (Kellerer-Pirklbauer et al., 2014).

Generell ist Permafrost dort zu erwarten, wo die Jahresmitteltemperatur unter 0° Celsius liegt. Per Definition spricht man dann von Permafrost, wenn ein Boden im Untergrund mindestens über zwei Jahre gefroren bleibt. Bei Jahresmitteltemperaturen von 0° C bis -1° C tritt diskontinuierlicher, also fleckiger Permafrost auf und bei einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von unter -6° C ist kontinuierlicher Permafrost zu erwarten. Demnach ist in den österreichischen Alpen ab einer Seehöhe von etwa 2000 m bis 2500 m mit diskontinuierlichem und ab 3000 m Seehöhe mit kontinuierlichem Permafrost zu rechnen. Während des Sommerhalbjahres führen die positiven Lufttemperaturen zu einem Auftauen der oberen Bodenschicht, der sogenannten Auftauschicht (engl.: active layer). Bei uns in den Alpen variiert diese von wenigen Zentimetern bis Metern, wobei die vertikale Mächtigkeit des Permafrostes in den österreichischen Alpen nicht bekannt ist, aber mit einer Tiefe von mehreren Zehnermetern angenommen wird. Die lokalen Bodentemperaturen werden durch den Energieeintrag der kurzwelligen Strahlung, der von Hangausrichtung und Hangneigung abhängig ist, gesteuert. Zusätzlich hat die Art des Untergrundes, ob Vegetation, Geröll oder Fels, erheblichen Einfluss auf den Bodenwärmestrom und damit auf die Bodentemperatur. Hinzu kommt, dass die Bodentemperatur in erheblichem Maß von der räumlichen Verteilung der winterlichen Schneedecke, ihrer Dauer und deren Mächtigkeit beeinflusst ist.

Im Gebiet des Hohen Sonnblicks beginnt die Permafrostforschung im Jahr 2005. Mit der in Österreich erstmalig durchgeführten Installation von 20 m tiefen Bohrlöchern an der Südflanke des Sonnblickgipfels erfolgte der Startschuss für kontinuierliche Standortmessungen in Österreich. In den darauf folgenden Jahren entstanden mehrere Projekte, die mit unterschiedlichen Messmethoden das Vorkommen und die Verbreitung des Permafrostkörpers untersuchten, sowie die Auswirkungen der Permafrostdegradation auf die Felsstabilität in ihren Forschungsfokus setzten. Im Rahmen des aktuell laufenden Projektes PERSON-GCW (Permafrost-Monitoring Sonnblick – Etablierung des Sonnblicks (Hohe Tauern) als Global Cryosphere Watch Supersite) wird der Permafrost im Auftrag des Lebensministeriums von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik untersucht. Das Ziel von PERSON-GCW besteht darin, grundlegende Informationen über den gegenwärtigen Zustand und die Veränderungen des Permafrostkörpers zu dokumentieren.

2. Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum 2014-2018

Für die Bildung und die Erhaltung von Permafrost spielt neben der Lufttemperatur vor allem die Mächtigkeit und Dauer der Schneedecke eine zentrale Rolle. Um einen Überblick über die betreffenden Parameter im Untersuchungszeitraum von Oktober 2013 bis September 2018 zu erhalten, werden in diesem Kapitel die meteorologischen Parameter Temperatur, Sonnenscheindauer, Neuschneemenge und die Gesamtschneehöhe erläutert und graphisch dargestellt. Des Weiteren werden die aus der Temperatur abgeleiteten Kenngrößen Eistage (Tage mit einer Höchsttemperatur von unter 0 °C), Frosttage (Tage mit einer Tiefsttemperatur von unter 0 °C) und Frostwechseltage (Tage mit einer Tiefsttemperatur unter und einer Höchsttemperatur über 0° C) dargestellt. Wie die Eistage dienen die Frosttage dazu, die Kälte eines Winters bzw. im Hochgebirge die Kälte eines ganzen Jahres zu ermitteln. Je mehr Frost- und Eistage vorkommen, desto strenger ist der Winter bzw. das zugrundeliegende Haushaltsjahr. Die Parameter werden dabei jeweils mit der Klimaperiode von 1981-2010 verglichen, um gewisse Anomalien bzw. Singularitäten im Messjahr zu identifizieren und besser interpretieren zu können.

Witterungsverlauf im Haushaltsjahr 2013/14

Die Lufttemperatur am Hohen Sonnblick (3109 m) lag im Mittel des Haushaltsjahres 2013/2014 um 1 °C über dem 30-jährigen Mittel von 1981-2010 (vgl. Abb. 4). Bei Betrachtung der mittleren monatlichen Temperatur und deren Abweichung vom langjährigen Mittel 1981-2010 zeigen sich vor allem im Winterhalbjahr die Monate Dezember bis April überdurchschnittlich warm. Diese fünf Monate fielen am Sonnblick um mindestens 2° C höher aus als der langjährige Durchschnitt siehe (siehe Abbildung 16). Die höchsten Abweichungen wurden am Sonnblick im März und im Februar mit Werten von 2,9° C bzw. 2,7° C registriert. Unter dem langjährigen Mittel lagen am Sonnblick die Monate November, Mai, Juli und August, wobei im Mai mit -1,3° C und im August mit -1,1° C die höchsten negativen Abweichungen zu finden sind.

Betrachtet man die Abweichungen der Frostwechsel- und Eistage des Messjahres 2013/2014 vom langjährigen Mittel, fällt eine Abnahme der Eistage zu Gunsten der Frostwechseltage auf. Die einzige Ausnahme im Jahr 2014 bildet der kühle Monat Mai, in dem sich eine Zunahme von fünf Eistagen gegenüber dem langjährigen Mittel zeigt (siehe Abbildung 4).

In Bezug auf den Niederschlag war das Haushaltsjahr 2013/2014 im Gebiet des Hohen Sonnblicks in Summe ein leicht unterdurchschnittliches Jahr. Unter dem langjährigen Durchschnitt lag vor allem die zweite Dezemberhälfte wie auch der Beginn des Jänners. Die größten Niederschlagssummen im Haushaltsjahr 2013/2014 finden sich im November bzw. Ende Jänner bis Ende Februar. Immer wiederkehrende Schneefälle im Zeitraum von März bis Mai führten zu einem stetigen Verschwinden der Schneepelstangen, sodass Ende Mai eine Gesamtschneehöhe von 4,5 m am Sonnblickgipfel gemessen wurde, die dem langjährigen Mittel entspricht.

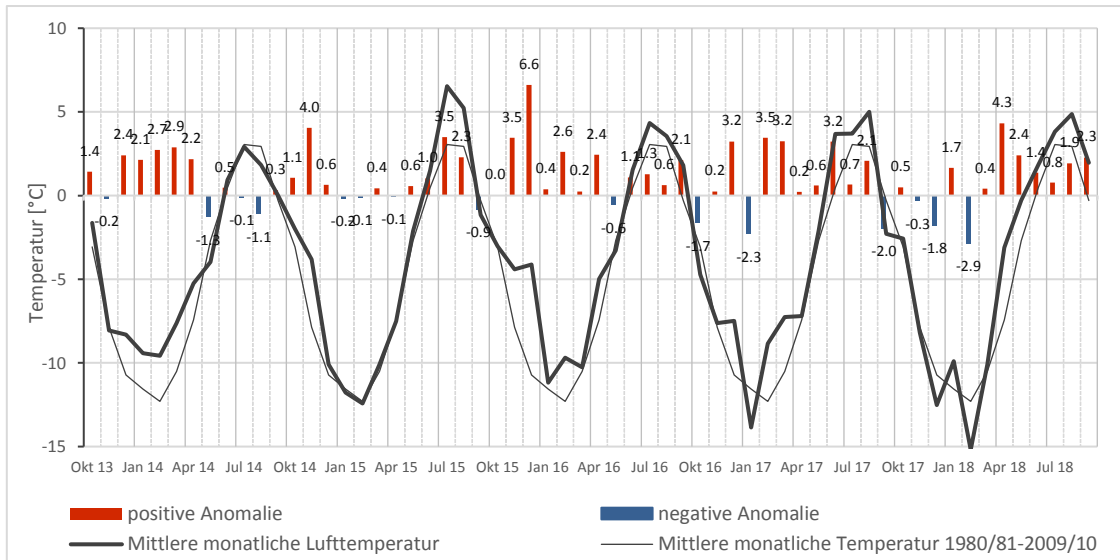


Abbildung 1: Mittlere monatliche Lufttemperatur am Hohen Sonnblick (3109 m) im Untersuchungszeitraum 2014-2018 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1980/81-2009/10 sowie die monatlichen Abweichungen.

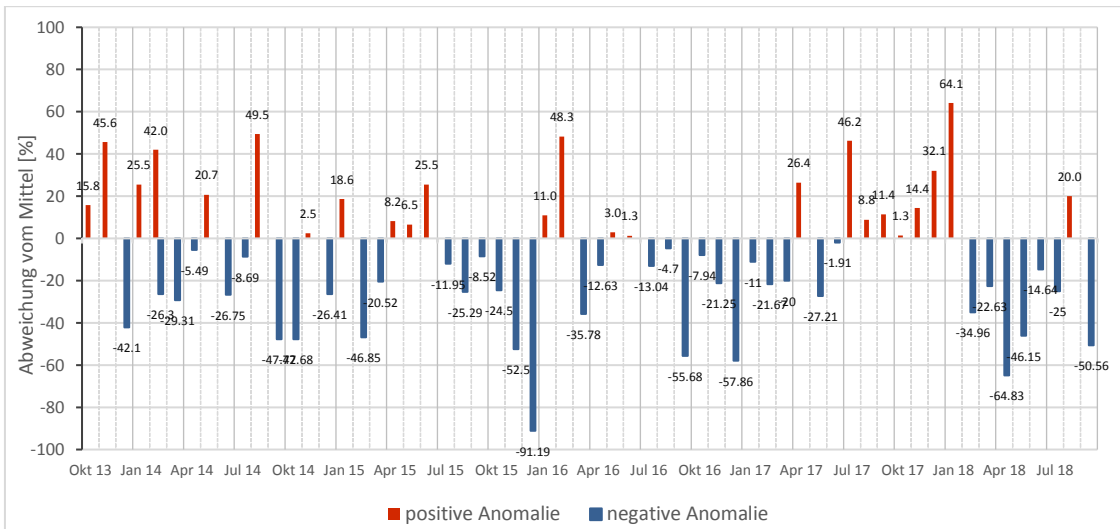


Abbildung 2: Monatliche Abweichungen in Prozent der Niederschlagssummen im Untersuchungszeitraum 2014-2018 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1980/81-2009/10.

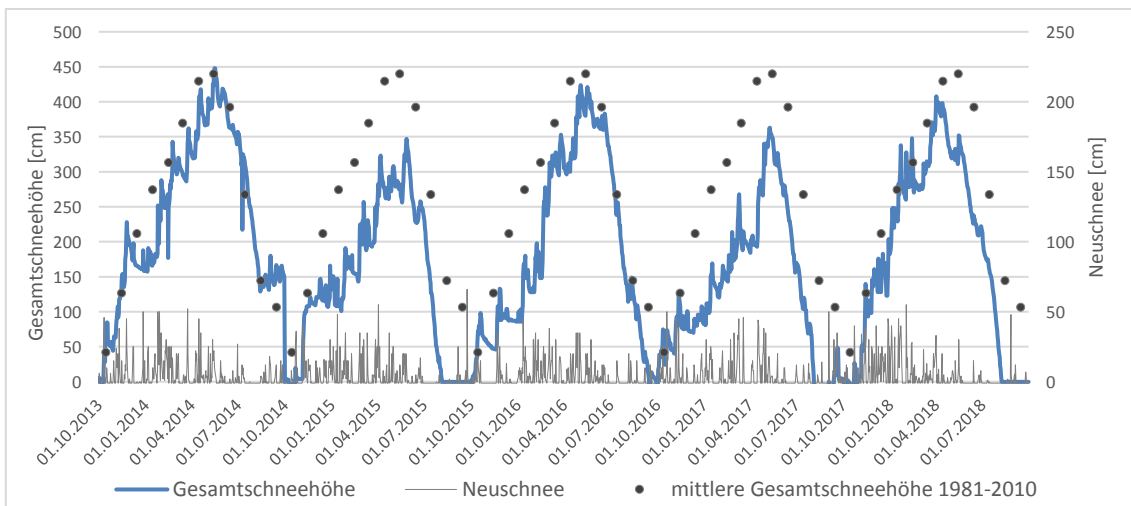


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Gesamtschneehöhe im Untersuchungszeitraum 2014-2018 im Vergleich zum langjährigen monatlichen Mittel 1981-2010. Zusätzlich sind die täglichen Neuschneesummen dargestellt.



Abbildung 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 und 13: Jahresverlauf der Anzahl der monatlichen Frost-, Eis- und Frostwechsellage sowie deren monatliche Abweichungen.

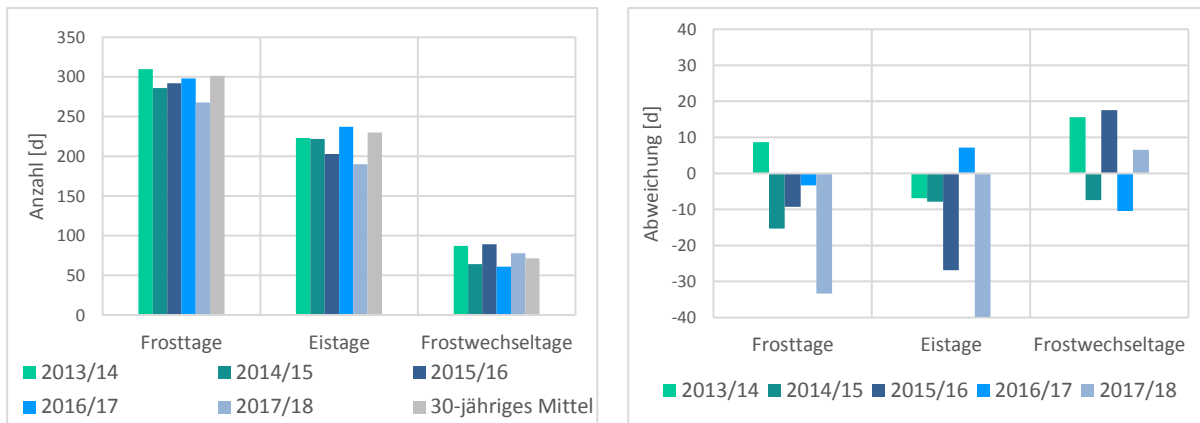


Abbildung 14 und 15: Anzahl der Frost-, Eis- und Frostwechsellage im Untersuchungszeitraum 2014-2018 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1981-2018 (links) und deren Abweichungen zum Mittel (rechts).

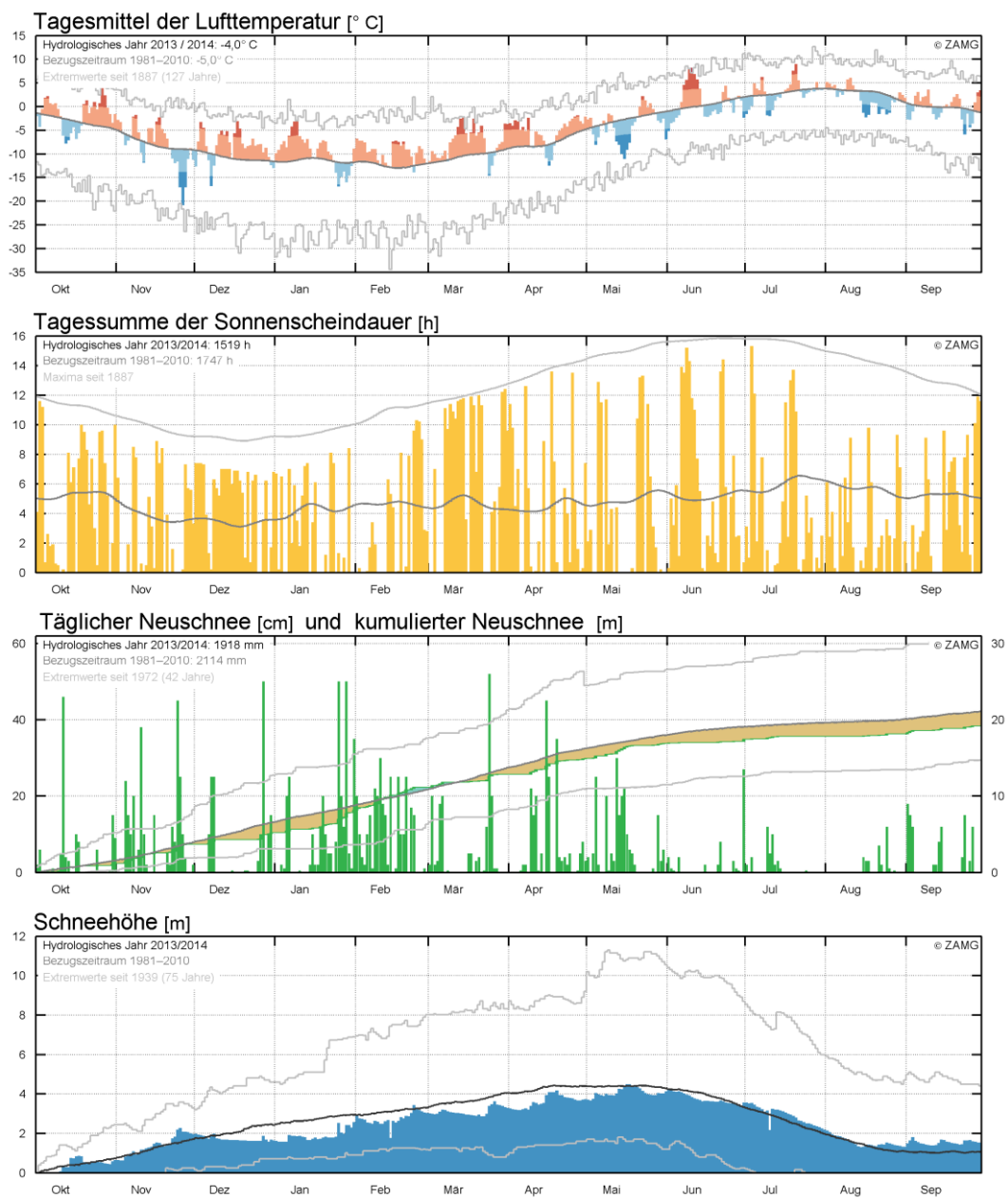


Abbildung 16: Die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, die Tagessummen der Sonnenscheindauer, die täglichen Neuschneesummen und kumulierten Neuschneemengen sowie die Gesamtschneehöhe für das hydrologische Jahr 2013/14 für die Station Sonnblick.

Tabelle 1: Zusammenfassung der monatlichen Niederschlagssummen [mm] am Hohen Sonnblick im Untersuchungszeitraum Okt. 2013 - Sept. 2018 sowie deren Abweichung in Prozent vom langjährigen Mittel 1980/81-2009/10.

Monat	2013/14	Abweichung [%]	2014/15	Abweichung [%]	2015/16	Abweichung [%]	2016/17	Abweichung [%]	2017/18	Abweichung [%]
Okt	175	15,9	79	-47,7	114	-24,5	139	-7,9	153	1,3
Nov	233	45,6	164	2,5	76	-52,5	126	-21,3	183	14,4
Dez	92	-42,1	117	-26,4	14	-91,2	67	-57,9	210	32,1
Jan	182	25,5	172	18,6	161	11,0	129	-11,0	238	64,1
Feb	203	42,0	76	-46,9	212	48,3	112	-21,7	93	-35,0
Mrz	140	-26,3	151	-20,5	122	-35,8	152	-20,0	147	-22,6
Apr	172	-5,5	197	8,2	159	-12,6	230	26,4	64	-64,8
Mai	204	20,7	180	6,5	174	3,0	123	-27,2	91	-46,2
Jun	115	-26,8	197	25,5	159	1,3	154	-1,9	134	-14,6
Jul	168	-8,7	162	-12,0	160	-13,0	269	46,2	138	-25,0
Aug	249	46,5	127	-25,3	162	-4,7	185	8,8	205	20,6
Sep	92	-47,7	161	-8,5	78	-55,7	196	11,4	87	-50,6
Jahr	2025	2,0	1783	-10,2	1591	-19,9	1882	-5,2	1743	-12,2

Witterungsverlauf im Haushaltsjahr 2014/15

Das Haushaltsjahr 2014/15 liegt mit einem Wert von 1,1° C über dem vieljährigen Mittel. Außergewöhnlich warm verliefen der November und der Juli mit Temperaturabweichungen von 4,0° C bzw. 3,5° C zur Vergleichsperiode von 1981-2010 (siehe Abbildung 17). Das Winterhalbjahr war etwas wärmer als im Mittel und brachte keine nennenswerten Änderungen bei den Frost- bzw. Eistagen.

Das Sommerhalbjahr verlief am Sonnblick überdurchschnittlich warm, wobei im Juli mit 3,5° C und im August mit 2,3° C die höchsten positiven Abweichungen zu finden sind. In beiden Monaten wurde jeweils nur an fünf Tagen eine Minimumtemperatur unter 0° C registriert. Dies hatte eine markante Reduktion an Frost- und Frostwechseltagen zur Folge. So gab es im Juli acht Frost- und sechs Frostwechseltage und im August sechs Frost- und vier Frostwechseltage weniger.

Nach einem recht niederschlagsreichen November beginnt mit dem Advent eine sehr ungewöhnliche niederschlagsfreie und somit schneearme Zeit. Zum Jahreswechsel beträgt die Gesamtschneehöhe 131 cm, rund 40 % weniger als im langjährigen Mittel mit einem Wert von 212 cm. Auf einen überdurchschnittlich feuchten Jänner folgt ein sehr trockener Februar mit rund 50 % weniger Niederschlag als im Mittel. Auch im März erhält der Sonnblick rund 25 % weniger Niederschlag. Zwar lassen der April und Mai die Gesamtschneehöhe wieder anwachsen, der Schneepegel zeigt Ende Mai aber trotzdem nur ein Maximum von lediglich 3,5 m an und liegt somit einen Meter unter dem langjährigen Mittel.

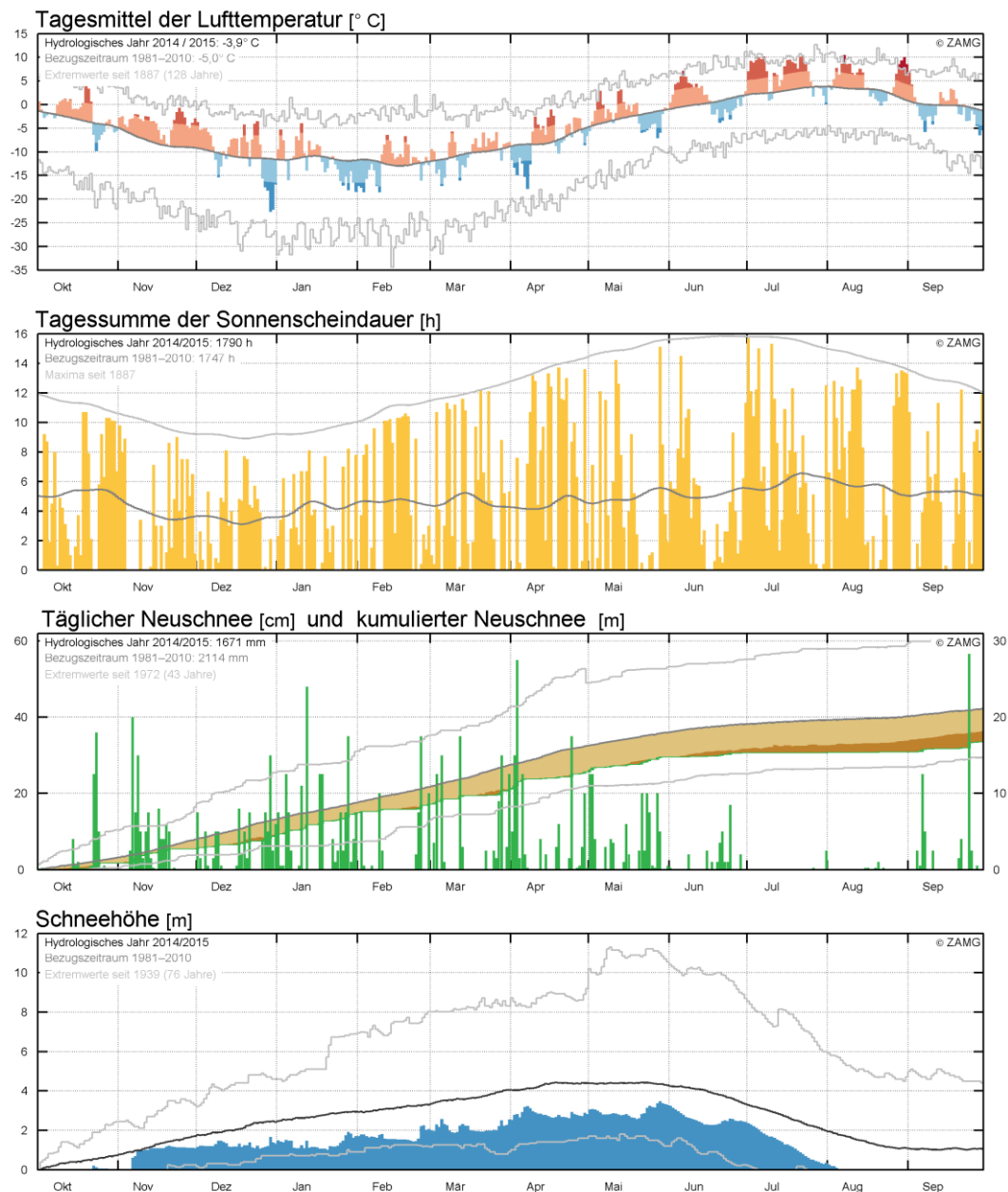


Abbildung 17: Die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, die Tagessummen der Sonnenscheindauer, die täglichen Neuschneesummen und kumulierten Neuschneemengen sowie die Gesamtschneehöhe für das hydrologische Jahr 2014/15 für die Station Sonnblick.

Witterungsverlauf im Haushaltsjahr 2015/16

Mit einer mittleren Temperatur von $-3,3^{\circ}\text{C}$ war das hydrologische Jahr 2015/16 um $1,7^{\circ}\text{C}$ wärmer als im langjährigen Mittel. Bei Betrachtung der mittleren monatlichen Temperatur und deren Abweichung vom langjährigen Mittel 1981-2010 zeigen sich vor allem die Monate November bis April überdurchschnittlich warm (siehe Abbildung 18). In diesem Halbjahr wurden am Sonnblick die höchsten Abweichungen im November und im Dezember mit Werten von $3,5^{\circ}\text{C}$ bzw. $6,6^{\circ}\text{C}$ registriert.

Betrachtet man die Abweichungen der Frostwechsel- und Eistage in diesen beiden Monaten vom langjährigen Mittel, fällt eine markante Abnahme der Eistage zu Gunsten der Frostwechseltage auf. Im November werden zwölf Eistage weniger und zehn Frostwechseltage mehr und im Dezember sechs Eistage weniger und sechs

Frostwechseltage mehr registriert. Das Sommerhalbjahr verlief am Hohen Sonnblick mit Ausnahme des Mai, in welchem die mittlere monatliche Temperaturanomalie $-0,6^{\circ}\text{C}$ gegenüber dem langjährigen Mittel liegt, überdurchschnittlich warm. Die höchsten positiven Abweichungen finden sich im Juli und September mit Werten von $1,3^{\circ}\text{C}$ bzw. mit $2,1^{\circ}\text{C}$. In Summe wurden in diesen drei Sommermonaten rund 15 Frosttage und sieben Eistage weniger als im langjährigen Mittel registriert.

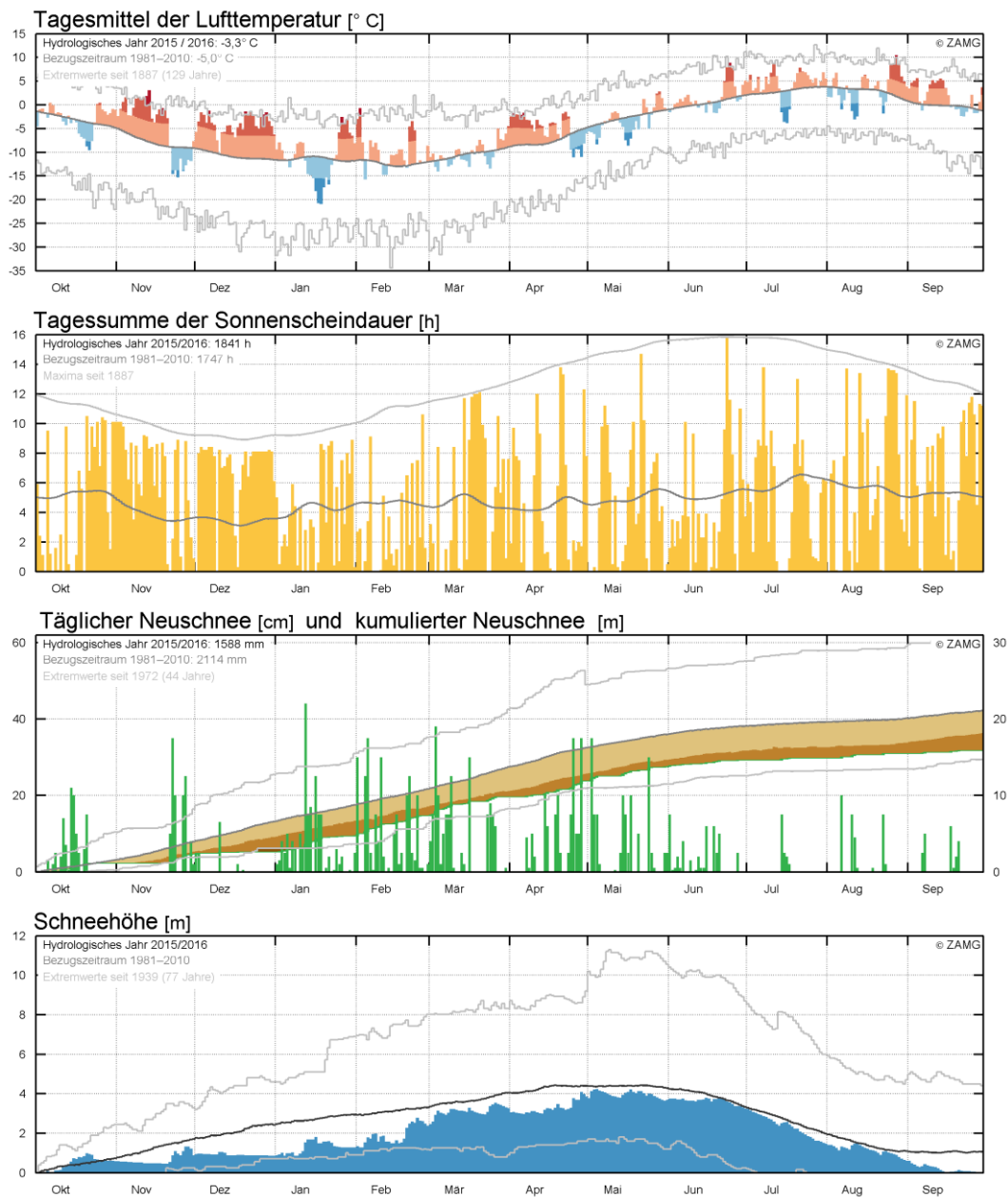


Abbildung 18: Die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, die Tagessummen der Sonnenscheindauer, die täglichen Neuschneesummen und kumulierten Neuschneemengen sowie die Gesamtschneehöhe für das hydrologische Jahr 2015/16 für die Station Sonnblick.

In den ersten drei Monaten des hydrologischen Jahres 2015/16 beträgt das Niederschlagsdefizit am Hohen Sonnblick 57 % des langjährigen Mittels von 1981-2010. Das Defizit beträgt im Oktober 25 %, im November 52 % und im Dezember sogar 91 % des langjährigen Mittels (siehe Tabelle 1). Im Dezember erreicht die monatliche

Niederschlagssumme nur lediglich 14 mm. Folglich wurde am 31. Dezember eine Gesamtschneehöhe von nur 86 cm gemessen. Die niederschlagsreichen Monate Jänner mit 161 mm (+11 %) und Februar mit 212 mm (+48 %) sorgten für ein sprunghaftes Ansteigen der Gesamtschneehöhe. Das Maximum der Gesamtschneehöhe wurde bereits am 4. Mai mit einem Wert von 424 cm registriert und liegt 30 cm unter dem langjährige Mittel 1981-2010.

Witterungsverlauf im Haushaltsjahr 2016/17

Im Haushaltsjahr 2016/17 lag die Lufttemperatur am Hohen Sonnblick (3109 m) im Mittel um 0,9° C über dem 30-jährigen Mittel von 1981-2010.

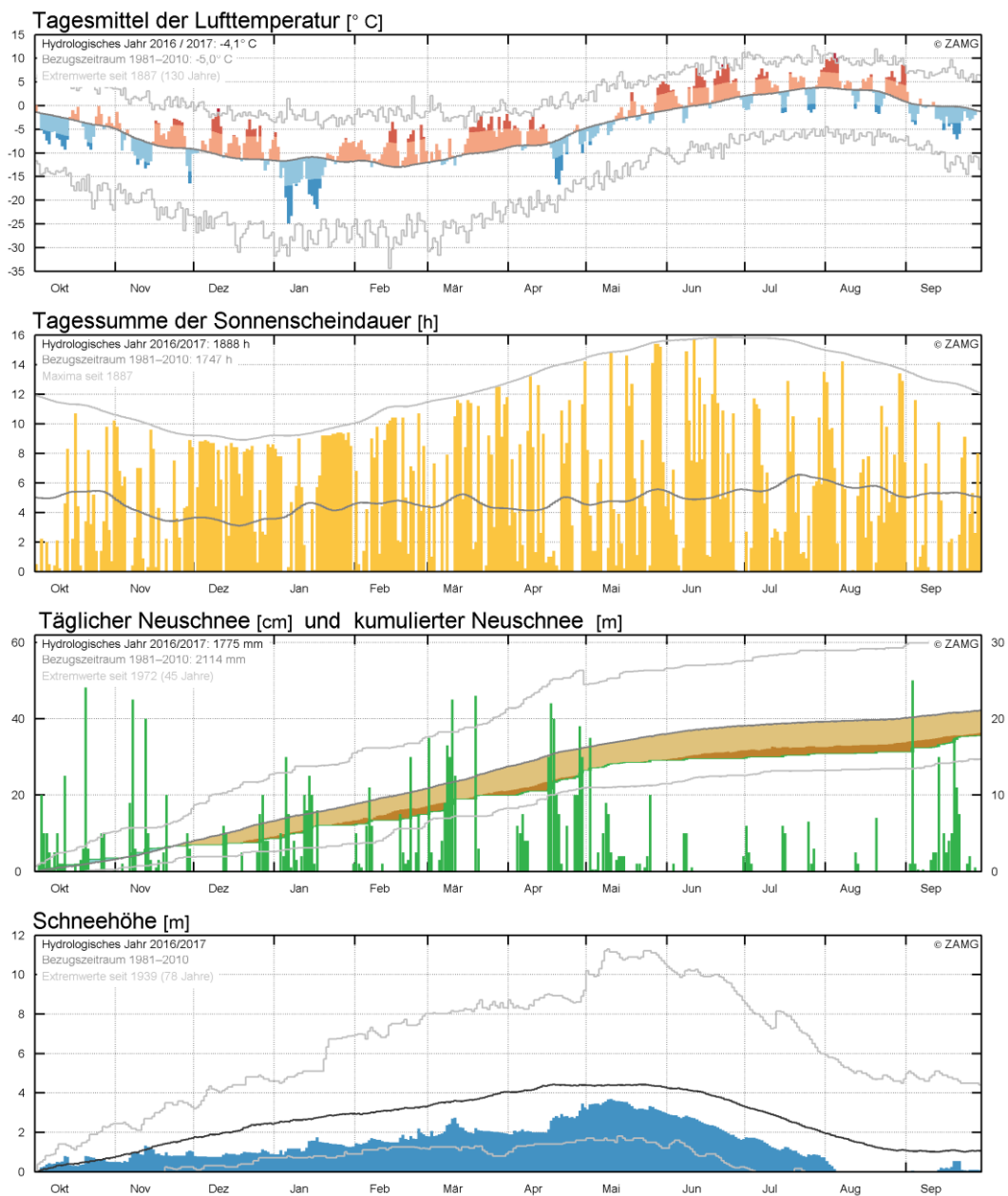


Abbildung 19: Die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, die Tagessummen der Sonnenscheindauer, die täglichen Neuschneesummen und kumulierten Neuschneemengen sowie die Gesamtschneehöhe für das hydrologische Jahr 2016/17 für die Station Sonnblick.

Alle vier Monate fielen um mindestens 3,2° C höher aus als der langjährige Durchschnitt. Die höchste Abweichung wurde am Sonnblick im Februar mit einem Wert von 3,5° C registriert. Unter dem langjährigen Mittel lagen die Monate Oktober, Jänner und September, wobei im Jänner mit -2,3° C und im September mit -2,0° C die höchsten negativen Abweichungen zu finden sind.

Betrachtet man die Abweichungen der Frost- und Eistage des Messjahres 2016/17 vom langjährigen Mittel, fällt zu Beginn und am Ende des hydrologischen Jahres eine Zunahme an Frost- und Eistagen auf. Eine markante Abnahme gab es im Juni, in dem etwa zehn Frosttage und sechs Eistage weniger als in der Vergleichsperiode auftraten. Über das gesamte Jahr betrachtet werden in diesem Haushaltjahr in Summe 237 Eistage gezählt, um sieben Tage mehr als im langjährigen Mittel (siehe Abbildung 14 und 15: Anzahl der Frost-, Eis- und Frostwechseltage im Untersuchungszeitraum 2014-2018 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1981-2018 (links) und deren Abweichungen zum Mittel (rechts).

Beim Niederschlag weist das Winterhalbjahr ein Defizit von 24 % auf und das Sommerhalbjahr bilanziert zum vieljährigen Mittel 1981-2010 mit einem Plus von 11 % positiv. Die höchsten negativen Abweichungen sind im Jänner mit -58 % und im Februar mit -22 % zu finden. Ende März betrug die Gesamtschneehöhe am Sonnblick 185 cm, dies entspricht einem Defizit von 50 % zum langjährigen Mittel. Mit 26 % mehr Niederschlag im April wuchsen auch die weit unterdurchschnittlichen Gesamtschneehöhen beträchtlich an. Das Maximum der Gesamtschneehöhe wurde am 10. Mai mit 363 cm gemessen und liegt knapp einen Meter unter dem Mittel von 1981-2010.

Witterungsverlauf im Haushaltsjahr 2017/18

Im hydrologischen Jahr 2017/18 lagen die Temperaturen mit einem Wert von 1° C über dem langjährigen Mittel. Bei Betrachtung der mittleren monatlichen Temperatur und deren Abweichung vom langjährigen Mittel sind der kälteste Dezember sowie auch der kälteste Februar im gesamten Untersuchungszeitraum von 2013/14 bis 2017/18 zu finden. Im Dezember lag der Wert mit -1,8° C unter dem Mittel. Und im Februar machte ein massiver Kaltlufteinbruch in den letzten Tagen aus einem bis dahin durchschnittlichen Februar noch einen sehr kalten Monat. Am Sonnblick war es im Mittel um -2,9° C zu kalt. Mit -31,9° C wurde am 27. Februar ein Wert gemessen, den es zuletzt vor 31 Jahren im Jahr 1987 gab. Die höchsten positiven Abweichungen wurden im Winterhalbjahr im Jänner mit 1,7° C erreicht. Im Sommerhalbjahr verliefen alle Monate überdurchschnittlich warm. Die höchsten Abweichungen wurden am Sonnblick im April und im Mai mit Werten von 4,3° C bzw. 2,4° C registriert. Vor allem im April wirkte sich dies markant auf die Eistage aus. So werden am Sonnblick in einem durchschnittlichen April 28 Eistage registriert. Dieser April brachte nur 18 Eistage (Minus 35 %) und im Gegenzug einen Zuwachs von neun Frostwechseltagen auf insgesamt elf Frostwechseltage (2,2 Frostwechseltage im Mittel 1981-2010). Auch im Mai setzt sich dieser Verlauf fort, so dass neun Eistage weniger und vier Frostwechseltage mehr registriert wurden. Über das gesamte hydrologische Jahr betrachtet (siehe Abbildung 14 und 15) werden in Summe 40 Eistage (-17%) und 33 Frosttage (-11%) weniger als im langjährigen Mittel gezählt.

Im Haushaltsjahr 2017/18 zeigt sich das Niederschlagsregime im Vergleich zum Vorjahr genau gegensätzlich. Einem überdurchschnittlichen Winterhalbjahr (+8 %) steht ein sehr trockenes Sommerhalbjahr (-30 %) gegenüber.

Im Winter sind der Jänner mit einem Plus von 64 % (Niederschlagssumme von 238 mm auf 145 mm im Mittel) und der Dezember mit einem Plus von 32 % (Niederschlagssumme von 210 mm auf 159 mm im Mittel) die niederschlagsreichsten Monate im zugrundeliegenden hydrologischen Jahr 2017/18. Somit lag Ende Jänner die Gesamtschneehöhe leicht über dem Mittel 1980/81-2009/2010. Im Sommerhalbjahr werden nur im August die langjährigen Niederschlagssummen mit einem Plus von 20 % übertroffen, ansonsten verliefen alle Monate im Vergleich zum Mittel zu trocken. Mit einer monatlichen Niederschlagssumme von 64 mm liegt der April mit einem Minus von 65 % unter dem langjährigen Mittelwert. Im September und Mai wird nur die Hälfte der durchschnittlichen Summen von 1981-2010 erreicht. Das Maximum der Gesamtschneehöhe wurde bereits am 2. April mit einem Wert von 408 cm erreicht und liegt nur 20 cm unter dem langjährigen Mittel. Im Mittel wird die Gesamtschneehöhe im Laufe des Mais mit einem Wert von 440 cm erreicht, wobei in diesem Haushaltsjahr der maximale Schneepegelwert am 17. Mai mit einem Wert von 352 cm registriert wurde.

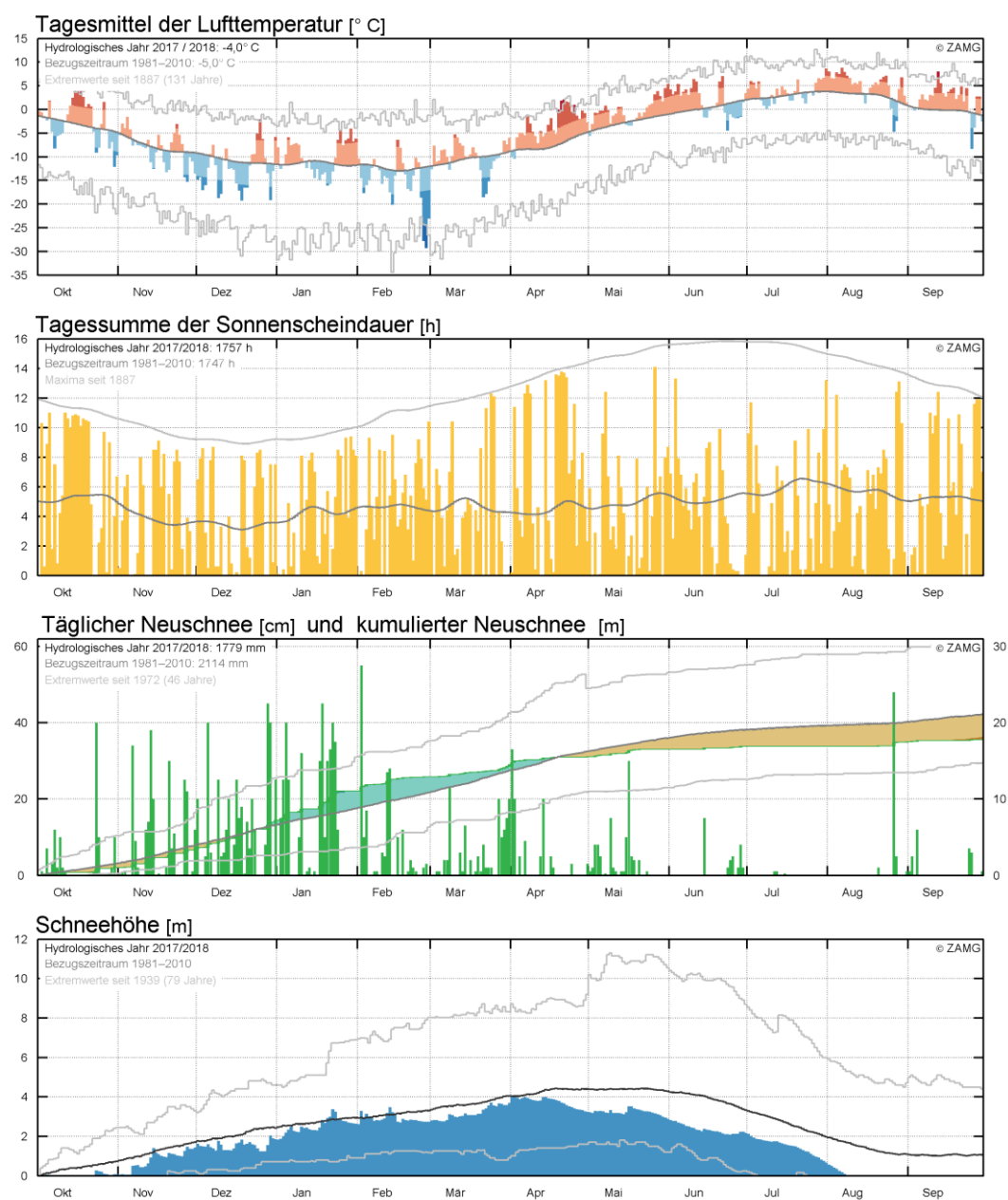


Abbildung 20: Die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, die Tagessummen der Sonnenscheindauer, die täglichen Neuschneesummen und kumulierten Neuschneemengen sowie die Gesamtschneehöhe für das hydrologische Jahr 2017/18 für die Station Sonnblick.

3. Permafrost-Monitoring im Sonnblickgebiet

Das Gebiet um den Hohen Sonnblick (3106 m) ist, bedingt durch das meteorologische Observatorium auf dem Gipfel, ein Zentrum für umweltwissenschaftliche Untersuchungen. Das bestehende Permafrost-Monitoring im Sonnblickgebiet ist in Abbildung 21 dargestellt.

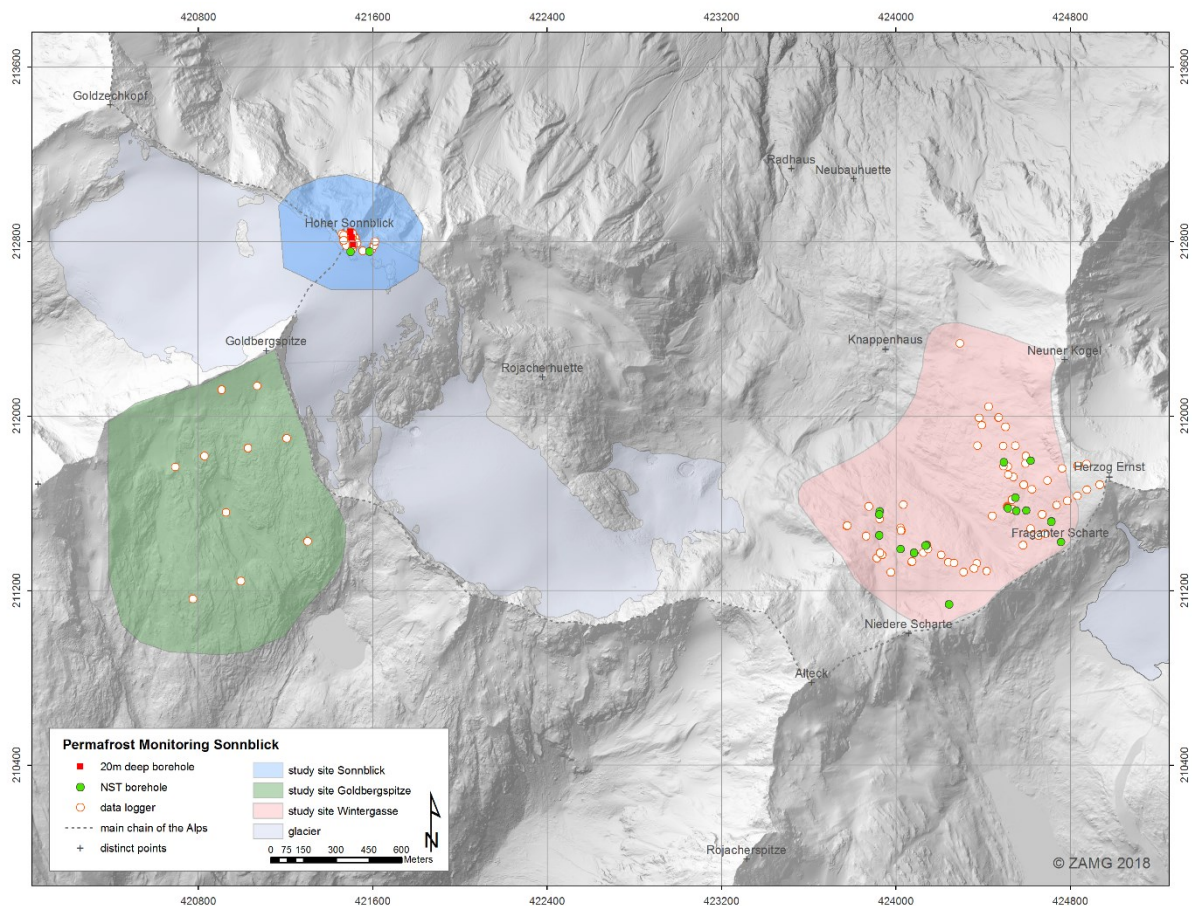


Abbildung 21: Permafrost-Untersuchungsgebiete im Sonnblickgebiet.

Den Kern des Permafrost-Monitoring-Netzwerkes bilden die drei 20 m tiefen Bohrlöcher an der Südflanke des Hohen Sonnblicks. Zur Erfassung der Bodenoberflächentemperatur (GST – Ground Surface Temperature) beziehungsweise der Temperatur im oberflächennahen Bereich (NST – Near Surface Temperature) wurden Temperatursensoren an der Südflanke des Hohen Sonnblicks (siehe Abbildung 22), an der südexponierten Flanke der Goldbergspitze sowie in der nord- bis nordwestexponierten Wintergasse installiert. Das Untersuchungsgebiet Goldbergspitze wurde auf Grund der sehr heterogenen Strukturen, verursacht durch die Südexposition, nach der ersten Phase von PERSON im Jahr 2010 aufgegeben. Gleichzeitig wurde das Monitoring im Bereich des Untersuchungsgebietes Wintergasse (Nordexposition) intensiviert. Des Weiteren werden Messungen der Basistemperatur der Schneedecke (BTS – Bottom Temperature of Snow cover) durchgeführt, bei der auch die Schneetiefe festgehalten wird.

Permafrost Messstandorte am Sonnblick im Jahr 2018

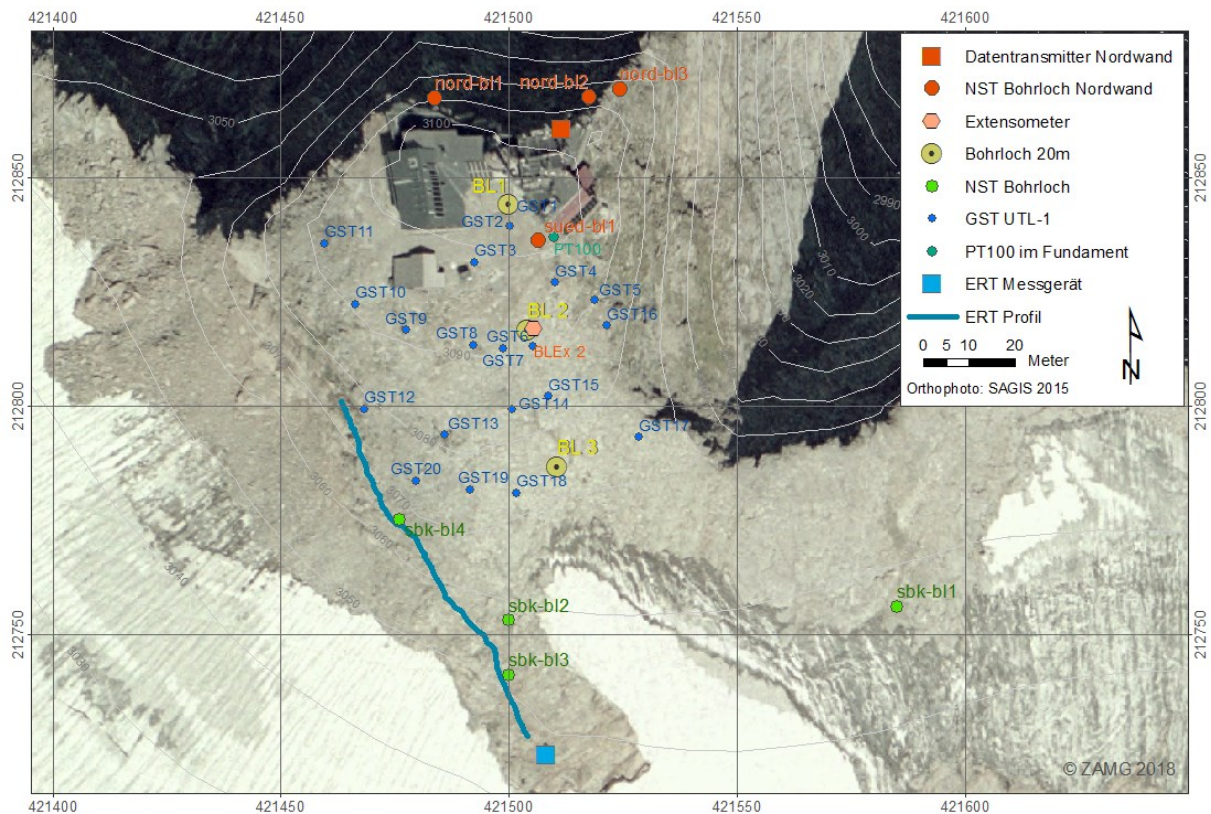


Abbildung 22: Permafrost-Messstandorte am Gipfel des Hohen Sonnblicks.

Im aktuellen Projekt „PERSON-GCW – Permafrost-Monitoring Sonnblick – Etablierung des Sonnblicks (Hohe Tauern) als Global Cryosphere Watch Supersite“ – wird das im Rahmen der Projekte PERSON1 und PERSON2 begonnene Permafrost-Monitoring fortgeführt, ausgebaut und gemäß internationalen Messstandards etabliert (Weblink zur ZAMG-Projektseite: <http://www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/klima/glaziologie/person>). Insbesondere soll der Sonnblick durch das Monitoringvorhaben auch in dem neu gegründeten internationalen Beobachtungsprogramm GCW (Global Cryosphere Watch) eine Führungsrolle übernehmen und damit die Rolle als internationales Umwelt- und Klimaforschungsobservatorium festigen.

Auf Grund der bisherigen Ergebnisse und internationalen Erkenntnisse sollen im Rahmen der neuen Projektphase des Permafrost-Monitorings am Sonnblick daher folgende Teilziele verfolgt werden:

- Sonnblick als Supersite für das Global Cryosphere Watch Program (GCW) für den Bereich Permafrost zu etablieren;
- bestehende Zeitreihen permafrostwirksamer Messgrößen (BTS, GST) im Sonnblickgebiet fortzuführen;
- kontinuierliche Messungen der Active-Layer-Mächtigkeit mittels ERT (Goelektrik) durchführen und mit meteorologischen Parametern vergleichen;
- Einzelergebnisse des Permafrost-Monitorings am Sonnblick (Bohrlochmessungen, Active-Layer-Mächtigkeit, BTS und GTS sowie zugrundeliegende atmosphärische Bedingungen) integrierend darstellen.

Die Global Cryosphere Watch (GCW), eine junge Initiative der World Meteorological Organisation (WMO), verfolgt das Ziel, dass alle Komponenten der Kryosphäre – Schnee, Gletscher, Permafrost und ggf. Meereis – global koordiniert erfasst werden. Seit Anfang des Jahres 2015 zählt das Sonnblickobservatorium zu einer der ersten „integrated sites“ in der CryoNet-Stationenliste. „Integrated site“ bedeutet, dass an einem Standort mehrere Sphären einem Monitoring unterliegen. Aktuell bietet die CryoNet-Webseite die Meta-Informationen zu den einzelnen Stationen – die Standortinformation für das Sonnblickobservatorium findet sich unter <http://globalcryospherewatch.org/cryonet/sitepage.php?surveyid=13> (Zugriff am 25. Jänner 2019).

Das Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P – <http://gtnp.arcticportal.org/>) ist das international führende Programm zur Erfassung von Permafrostparametern. GTN-P wurde in den 1990er Jahren durch die International Permafrost Association (IPA) als Teil des Global Climate Observing Systems (GCOS) und des Global Terrestrial Observing Networks (GTOS) entwickelt. Das langfristige Ziel bildet der umfassende Überblick der globalen räumlichen Struktur sowie die Variabilität der Veränderungen in der Mächtigkeit der Auftauschicht und der Permafrosttemperatur. Die Beobachtungsdaten des Permafrosts werden in der GTN-P Datenbank gesammelt und der Wissenschaftscommunity zur Verfügung gestellt. Die quantitativen Daten aus dem Gebiet des Hohen Sonnblicks werden nach abgeschlossener Prüfung und Korrektur (Plausibilitätsprüfung, Lückenfüllung und Offsetkorrektur) in die GTN-P Datenbank eingespielt.

Das Projekt PERSON-GCW wird in enger Abstimmung mit dem ZAMG internen Projekt „SSBO – Strukturprojekt Sonnblick Observatorium – Begleitende Maßnahmen zur Umsetzung der ENVISION Ziel“ bzw. mit dem Nachfolgeprojekt „ASBO – Aktives Sonnblick Observatorium“ durchgeführt. SSBO bzw. ASBO kann insbesondere durch die Erweiterung der gerätetechnischen Ausstattung einen wichtigen Beitrag leisten und auch die Arbeitszeit für die Betreuung der Bohrlochmessungen am Sonnblick liefern.

Im Gebiet des Sonnblickgipfels sind seit Beginn der Permafrost-Forschung im Jahr 2005 unterschiedliche Messsysteme zum Einsatz gekommen (siehe Tabelle 2). Die Ergebnisse dieser Studien sind zum größten Teil in Schöner et al. (2012) nachzulesen.

Tabelle 2: Zusammenfassung permafrostrelevanter Messmethoden im Sonnblickgebiet.

Messmethode	Projekt	Status
Bohrlöcher mit 20 m Tiefe	PermaNET (EU co-finanzierten Projektes)	2006 – 2011 abgeschlossen
	ZAMG internes Projekt	seit 2011 laufend
Seichte Bohrlöcher	PERSON-GCW (BMLFUW)	seit 2006 laufend
Oberflächenlogger	PERSON-GCW(BMLFUW)	seit 2006 laufend
Temperatursonden(BTS)	PERSON-GCW (BMLFUW)	seit 2006 laufend
Beobachtungskamera	PERSON 2 (BMLFUW)	2014 abgeschlossen
Geoelektrik	Alpchange (FWF)	2008 abgeschlossen
	PERSON-GCW (BMLFUW) & ATMOperm (ÖAW)	seit 08.2015 laufend
Refraktionsseismik	Permafrost in Austria	2008 und 2009 abgeschlossen
	PERSON-GCW (BMLFUW) & ATMOperm (ÖAW)	seit 08.2015 laufend
Elektromagnetik	PERSON-GCW (BMLFUW) & ATMOperm (ÖAW)	08.2015 – 08.2017
Passive Seismik	SeisrockHT (ÖAW)	seit 2015 laufend
Ground Penetrating Radar	ZAMG, LBI, Uni Wien Kooperation	09.2009 und 11.2010 abgeschlossen
	PERSON-GCW (BMLFUW) & ATMOperm (ÖAW)	08.2015 – 08.2017 abgeschlossen
Terrestrische Laserscans	Alpchange (FWF)	09.2008 und 09.2010 abgeschlossen
	SeisrockHT (ÖAW)	seit 2015 laufend
PT100 Widerstandssensor im Fundament	Permafrost Austria Part II	2006 – 2011 abgeschlossen
	ZAMG internes Projekt	seit 2006 laufend
Extensometer und Inclinometermessungen	ZAMG internes Projekt	seit 2006 laufend
Dokumentation von Steinschlägen	Routinebetrieb	seit 2013 laufend

Erläuterung der in der Tabelle verwendeten Abkürzungen:

BMLFUW – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

ÖAW – Österreichische Akademie der Wissenschaft

FWF – Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung

SeisrockHT und ATMOperm – Erläuterung findet sich im Text darüber

4. Angewandte Messsysteme

In diesem Kapitel werden die im Rahmen des Projektes PERSON-GCW und die im ZAMG-internen Projekt „ASBO – Aktives SonnBlick Observatorium“ durchgeführten Messungen näher erläutert und die Ergebnisse, die aus dem Untersuchungszeitraum 2014-2018 gewonnenen Daten präsentiert. Das Projekt ASBO kann insbesondere durch die Erweiterung der gerätetechnischen Ausstattung einen wichtigen Beitrag zum Permafrost-Monitoring leisten und auch die Arbeitszeit für die Betreuung der Bohrlochmessungen am Sonnblick bereitstellen.

4.1. Tiefe Bohrlöcher

Ziel und Motivation

Im Jahr 2005 wurden am Hohen Sonnblick (3106 m) drei 20 m tiefe Bohrlöcher und ein 10 m tiefes Bohrloch gebohrt und im darauffolgenden Jahr instrumentiert. Die drei 20 m tiefen Löcher wurden mit Temperatursensoren und Geophonen und das 10 m tiefe Bohrloch mit einem Sondenextensometer ausgestattet. Folgende Informationen lassen sich aus Bohrlochtemperaturdaten gewinnen:

- Kontinuierlicher Jahresverlauf der Temperatur in verschiedenen Tiefen
- Mächtigkeit der Auftauschicht im Sommer
- Lage der Jahresnullamplitude
- Wärmetransportmechanismen (Wärmeleitung und Konvektion)

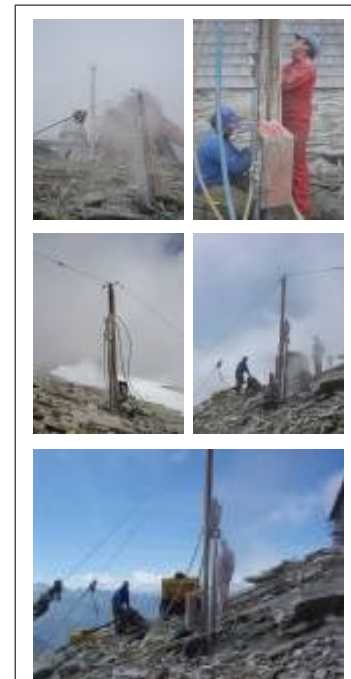


Abbildung. 23: Bohrarbeiten am Hohen Sonnblick im Jahr 2005.



Abbildung 24: Lage der vier Bohrlöcher am Sonnblickgipfel.

Standort

Die vier Bohrlöcher liegen in unmittelbarer Nähe zum Observatorium. Bohrloch 1 liegt direkt neben dem Eingang zum Zittelhaus. Bohrloch 2a liegt in südlicher Richtung etwa 30 m entfernt vom Observatorium. Unmittelbar neben Bohrloch 2a befindet sich Bohrloch 2b, indem ein Extensometer installiert ist. Bohrloch 3 liegt weitere 40 m hangabwärts in südlicher Richtung am Rande des Gletschers und eines dauerhaften Schneefelds.

Analyse

In Abbildung 25 ist der kontinuierliche Jahresverlauf der mittleren monatlichen Temperatur in vier verschiedenen Tiefen des 20 m tiefen Bohrlochs 3 am Sonnblickgipfel dargestellt. Im oberflächennahen Bereich zeigt sich der jahreszeitliche Wechsel der Temperaturen sehr ausgeprägt, sowie deren Abschwächung mit zunehmender Tiefe. Neben dieser Amplitudenverminderung ist eine Phasenverschiebung mit zunehmender Tiefe erkennbar. Dies bedeutet, dass die Minimum- bzw. Maximumtemperatur mit zunehmender Tiefe mit einer zeitlichen Verzögerung auftritt. So treten die Maxima in 4 m Tiefe erst im Herbst und die Minima im Frühling auf, wobei die Temperaturamplitude in dieser Tiefe etwa 5° C beträgt. Des Weiteren lassen sich aus den Bohrlochmessungen die maximalen sommerlichen Mächtigkeiten der Auftauschicht (engl.: active layer thickness – ALT) sowie deren Eintrittszeitpunkte bestimmen (siehe Tabelle 3). Über die letzten zehn Jahre betrachtet, schwankte die maximale Mächtigkeit der Auftauschicht zwischen 0,70 m im Jahr 2008 und 1,50 m im Jahr 2015 und wurde jeweils im Laufe des Augusts bzw. des Septembers erreicht.

Jahr	BL1		BL3	
	ALT (m)	Datum	ALT (m)	Datum
2008	1,00	12. Sept.	0,70	10. Sep.
2009	0,80	29. Aug.	-	-
2010	1,04	27. Aug.	-	-
2011	1,04	26. Aug.	1,10	11. Sep.
2012	-	-	1,35	25. Aug.
2013	-	-	1,07	19. Aug.
2014	1,13	13. Aug.	0,80	13. Aug.
2015	-	-	1,50	18. Sep.
2016	-	-	1,10	15. Sep.
2017	-	-	1,30	1. Sep.
2018	-	-	1,40	24. Aug.

Tabelle 3: Maximale Auftauschicht im Bohrloch 1 und 3 (active layer thickness – ALT) sowie dessen Zeitpunkt des Erreichens (erstellt von Claudia Riedl).

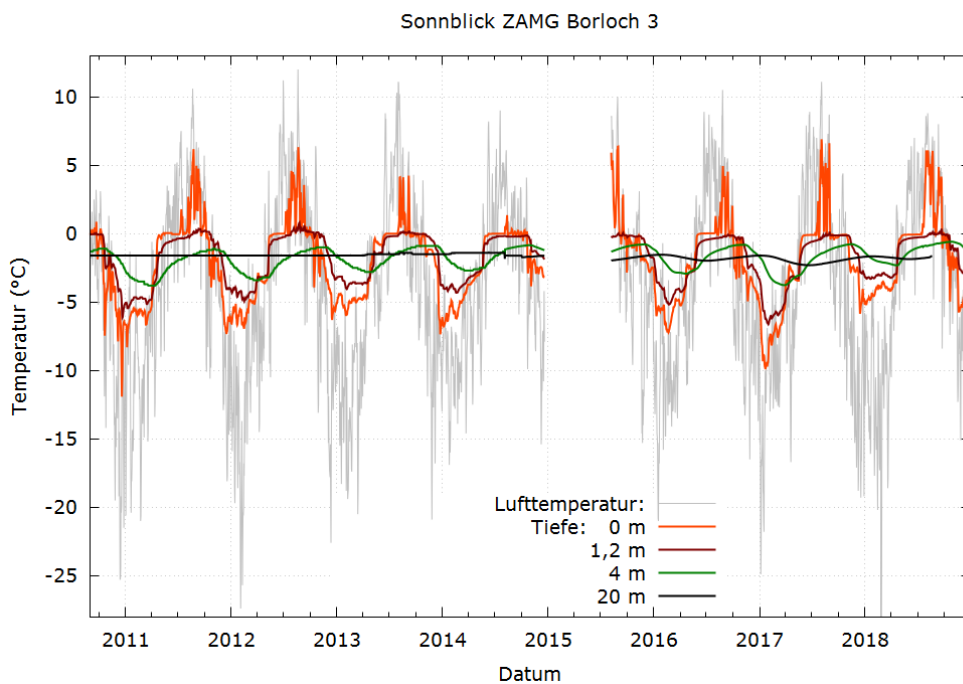


Abbildung 25: Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf in fünf ausgewählten Tiefen im Bohrloch 3 (erstellt von Claudia Riedl).

4.2. Seichte Bohrlöcher (NST – Near Surface Temperature)

Ziel und Motivation

Temperaturmessungen in unterschiedlichen Tiefen ermöglichen die Ermittlung des Temperaturgradienten zwischen Fels und Bodenoberfläche. Die kontinuierliche Messung in seichten Bohrlöchern, die eine Tiefe zwischen 10 cm bis 140 cm erreichen, erlaubt die Beobachtung dieses Temperaturgradienten über das gesamte Jahr hinweg und ermöglicht Rückschlüsse auf die Mächtigkeit der Auftauschicht bzw. den Wärmefluss in den Untergrund.

Entstehungschronologie und Standorte der seichten Bohrlöcher

Ein Überblick der Lage der seichten Bohrlöcher im Untersuchungsgebiet Wintergasse ist der nachstehenden Abbildung 26 zu entnehmen. Die Lage der seichten Bohrlöcher im Bereich des Hohen Sonnblicks ist in Abbildung 22 dargestellt. Eine Zusammenfassung der Bohrlochstandorte mit entsprechenden Metainformationen ist in Tabelle 4 zu finden.

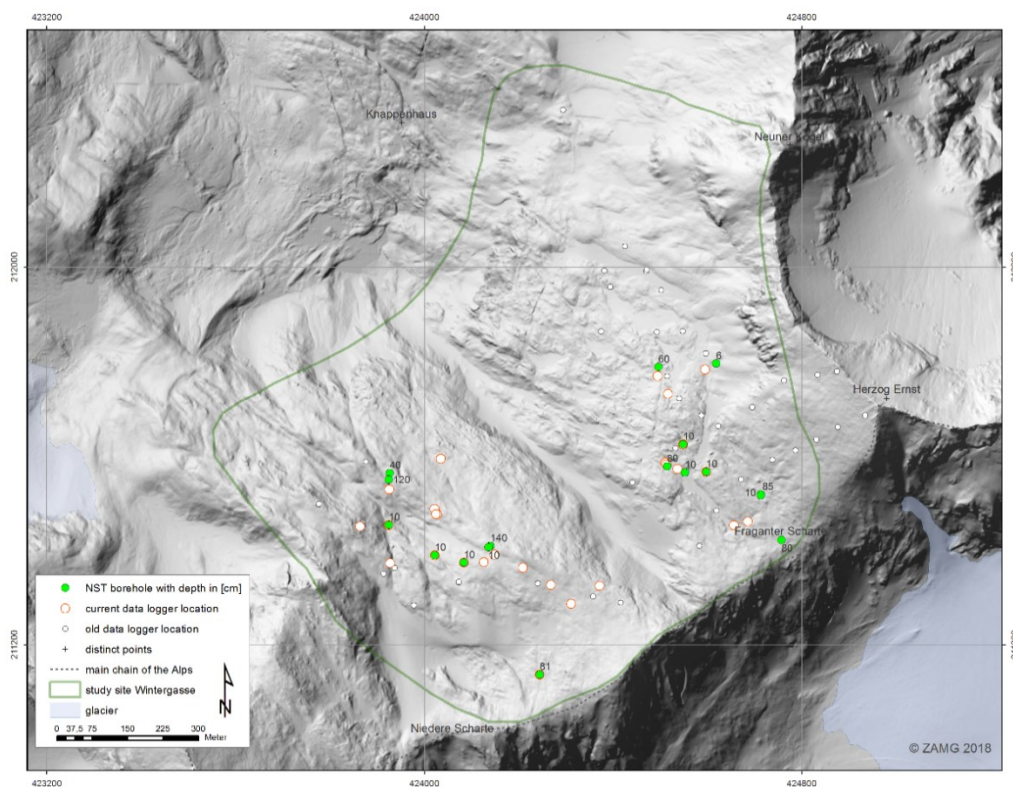


Abbildung 26: Lage der seichten Bohrlöcher im Untersuchungsgebiet Wintergasse.

Im September 2010 wurden die ersten seichten Bohrlöcher im Gebiet der Wintergasse mit einem Durchmesser von 36 mm und einer Tiefe zwischen 30 cm und 140 cm gebohrt. In diesen Bohrlöchern wurden zwei beziehungsweise vier Temperatursensoren in unterschiedlichen Tiefen installiert.

Tabelle 4: Zusammenfassung der aktuell vorhandenen Bohrlöcher im Untersuchungsgebiet *Wintergasse*.

Location	Lon [°]	Lat [°]	ELE [m]	Slope [°]	Aspect	Borehole depth [cm]	Sensor	Sensor depth [cm]	Substrate
w44	12,9902	47,0431	2584	18	west	40	Hobbo 4 Kanal	10, 20, 30, 40	bedrock
w45	12,9902	47,0430	2586	24	northeast	120	Hobbo 4 Kanal	60, 80, 100, 120	bedrock
w47	12,9930	47,0417	2589	18	west	140	Hobbo 4 Kanal	80, 100, 120, 140	bedrock
w48	12,9979	47,0432	2698	22	southwest	80	Hobbo 4 Kanal	10, 80	bedrock
w67	12,9944	47,0393	2707	14	west	81	Hobbo 4 Kanal	20, 40, 60, 80	bedrock
w71	13,0006	47,0427	2740	16	west	85	Hobbo 4 Kanal	20, 40, 60, 80	bedrock
w77	13,0011	47,0418	2750	13	southwest	35	Hobbo 4 Kanal	5, 15, 35	bedrock
w78	12,9976	47,04513	2665	20	west	60	Hobbo 4 Kanal	20, 40, 60	bedrock
sbk-bl1	12,9593	47,0537	3055	17	southeast	80	Hobbo 4 Kanal	20, 40, 60, 80	debr
sbk-bl2	12,9581	47,0536	3058	29	southwest	40	Hobbo 4 Kanal	20, 40	debris
sbk-bl3	12,9581	47,0535	3068	20	southwest	76	MLog 5	76, 56, 36, 16, surface	bedrock
sbk-bl4	12,9578	47,0538	3068	39	southwest	80	MLog 5	80, 60, 40, 20, 1	bedrock
sbk-nord1	12,9579	47,0547	3068	75	north	100	M-Log5W	100, 80, 60, 40, 20, 1	bedrock
sbk-nord2	12,9579	47,0547	3068	75	north	100	M-Log5W		bedrock
sbk-nord3	12,9579	47,0547	3068	75	north	100	M-Log5W		bedrock
w45b	12,99018	47,04296	2591	24	sortheast	10	iButton	10	bedrock gneiss
w45c	12,99018	47,04296	2591	24	northeast	10	iButton	10	bedrock quartz
w47b	12,99305	47,0417	2680	18	west	10	iButton	10	immature soil
w47c	12,99305	47,0417	2680	18	west	10	iButton	10	flagstone
w47d	12,99305	47,0417	2680	18	west	10	iButton	10	immature soil
w47e	12,99305	47,0417	2680	18	west	10	iButton	10	immature soil
w48c	12,99789	47,04326	2699	22	southwest	10	iButton	10	immature soil
w48d	12,99789	47,04326	2699	22	southwest	10	iButton	10	debris
w48e	12,99789	47,04326	2699	22	southwest	10	iButton	10	bedrock
w59b	12,99904	47,04314	2725	22	northwest	10	iButton	10	debris
w59c	12,99904	47,04314	2725	22	northwest	10	iButton	10	soil
w61	13,0002	47,04219	2732	11	west	10	iButton	10	bedrock
w62b	12,99906	47,04312	2718	22	north	10	iButton	10	organic ma- terial
w62c	12,99906	47,04312	2718	22	north	10	iButton	10	debris
w63	12,99228	47,04139	2654	27	northwest	10	iButton	10	bedrock
w64	12,99148	47,04153	2644	36	north	10	iButton	10	bedrock
w65a	12,99018	47,0421	2614	14	northwest	10	iButton	10	bedrock

Im Jahr 2013 folgten zwei weitere Bohrlöcher mit 81 bzw. 85 cm Tiefe. Zusätzlich wurde im Herbst 2013 mit Unterstützung der Lawinenkommission Salzburg ein weiteres Bohrloch mit 36 mm Durchmesser und einer Tiefe von 1 m unmittelbar neben der

Wetterstation auf der Fraganter Scharte (2754 m) gebohrt. Die für den Sommer 2014 geplante Installation der Sensorik konnte auf Grund von Eis im Bohrloch und dem Fehlen des passenden Werkzeuges nicht durchgeführt werden. Deshalb wurde dieses Vorhaben in das nächste Jahr verschoben. Ende September 2014 wurden trotz schlechter Witterung und einer geringmächtigen Neuschneeauflage drei weitere Bohrlöcher erfolgreich gebohrt und instrumentiert. Eines dieser Bohrlöcher liegt im Untersuchungsgebiet Wintergasse und die beiden anderen an der Südflanke des Sonnblickgipfels.

Im August 2015 wurde das Bohrloch auf der Fraganter Scharte instrumentiert, wobei vom ursprünglichen 1 m tiefen Bohrloch nur mehr eine Tiefe von 35 cm zur Verfügung stand, da sich während der letzten zwei Jahre Sedimente im Bohrloch ansammelten. Des Weiteren wurden Anfang August 2015 im unteren sowie im mittleren Bereich entlang des Geoelektrikprofils zwei Datenlogger mit fünf Temperatursensoren in seichten Bohrlöchern (82 cm bzw. 74 cm) installiert. Diese dienen u.a. der Kalibrierung der Geoelektrikdaten im oberflächennahen Bereich.

Die Überwachung der Felstemperaturen in unterschiedlichen Tiefen eröffnet neue Ansätze bei der Quantifizierung des Kälteeintrages in den Untergrund und ermöglicht in Kombination mit weiteren Methoden (terrestrische Laserscans, passive Seismik) Rückschlüsse auf das Ausmaß der physikalischen Verwitterung. Hier sind vor allem Standorte in Steilwänden zu nennen, da von diesen wichtige Erkenntnisse im Hinblick auf die Steinschlagaktivitäten abgeleitet werden können. So wurde zu Testzwecken bereits im Jahr 2016 erstmalig eine Thermistorenkette in der Nordwand, etwa 30 m unterhalb der nach nordwestexponierten Zittelhausterrasse, installiert. In einem horizontalen Bohrloch mit einer Gesamttiefe von einem Meter wurden sechs Temperatursensoren in einer Tiefe von 0 cm, -20 cm, -40 cm, -60 cm, -80 cm und -100 cm installiert. Für die automatische Übertragung der stündlich aufgezeichneten Temperaturdaten dient ein autarker Datentransmitter. Dieser scannt jede Stunde die aktuellen Daten des Loggers und überträgt diese alle sechs Stunden per GSM an einen Internetserver. Ebenso werden Metainformationen zur Batteriespannung sowie auch Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit im Gehäuse des Datentransmitters zu jedem Messzeitpunkt aufgezeichnet. Somit ist nicht nur ein redundantes Messsystem gegeben, welches die Messdaten in naher Echtzeit übermittelt, sondern auch eine wesentliche Verbesserung vergangener Messmethoden (z.B. TidbiT Datenlogger) durch die verfügbaren Metainformationen. Dies entspricht zur Gänze den definierten Zielsetzungen. Anfang August 2017 wurden unter Mithilfe der Sonnblickbeobachter Lug Rasser und Hias Daxbacher zwei weitere 1 m tiefe Bohrlöcher in der Nordwand, etwa 20-40 m unterhalb der nordwestorientierten Zittelhausterrasse, gebohrt (siehe Fotos auf Seite 32). Die Installation der hierfür vorgesehenen Thermistorenketten musste aufgrund der intensiven Schneefälle im Laufe des Septembers auf das nächste Jahr verschoben werden, da die Schneelage eine Installation unmöglich machte. Des Weiteren wurde der Testdatentransmitter der Firma geoprecision nach einjährigem, sehr erfolgreichem Einsatz abgebaut und an den Hersteller zurückgeschickt. Er wurde durch einen neuangeschafften Datentransmitter (iLOG-GPRS-3V), der bis zu 48 Sensoren auslesen und übertragen kann (acht Standorte mit jeweils sechs Sensoren), ausgetauscht. Im Juli 2018 erfolgte durch die Mithilfe des Sonnblickbeobachters Norbert Daxbacher die Installation der zwei weiteren Nordwandlogger. Derzeitige Probleme bei der Datenübertragung ermöglichen zurzeit keine Veröffentlichung der Bohrlochdaten. An der Behebung des Problems wird aktuell mit dem hierfür involvierten Sonnblicktechniker Leonhard Hettegger gearbeitet. Es wird ein Ausbau des WLAN-Netzes am Hohen Sonnblick

angedacht, so dass im oberen Bereich der Nordwand die Temperaturdaten über WLAN übertragen werden können. Die Umsetzung erfolgt im Sommer 2019.

Des Weiteren wurde im Mai 2018 im Zuge der Seilbahnerneuerung des Sonnblickobservatoriums zusätzlich in einem Winkel von 45° ein 12 m tiefes Ankerloch mit einer Thermistorkette mit sechs Sensoren (L12, L8, L4, L1,5, L1, L0,5) bestückt (Tiefe der Sensoren: L12=8,5m, L8=5,7m, L4=2,8, L1,5=1,1m, L1=0,7m, L0,5=0,4m). Das Bohrloch liegt unmittelbar neben dem Sonnblickobservatorium an der Südflanke, 15 m neben dem 20 m tiefen Bohrloch 1.

Die Veröffentlichung einer integrativen Darstellung der Messreihen dieser Standorte mit meteorologischen Parametern, wie der täglichen Lufttemperatur und täglichen Niederschlagssummen, erfolgt u.a. über die Website des Sonnblickobservatoriums (www.sonnblick.net) im Jahr 2019.

Außerdem wurden seit dem Jahr 2012 17 Bohrlochstandorte mit einer Tiefe von 10 cm eingerichtet. Diese sind jeweils mit einem münzgroßen Temperaturlogger (iButton) ausgestattet. Das Ziel dieser oberflächennahen Logger ist die Messung der Bodenoberflächentemperatur ohne atmosphärischen Einfluss. Dafür muss einerseits der Effekt verhindert werden, dass Strahlung auf den Temperatursensor trifft und andererseits, dass durch Luftzirkulation die Lufttemperatur anstelle der Bodentemperatur gemessen wird. Diese Sensoren sind in unterschiedliche Untergründe sowie in unterschiedlichen Expositionen angebracht.

Analyse

In Abbildung 27 sind die Temperaturverläufe der sechs Sensoren des seit August 2016 installierten Temperaturloggers in der Nordwand, sowie die mittlere tägliche Lufttemperatur und die täglichen Niederschlagssummen am Sonnblick dargestellt. Die Abbildung 28 zeigt einen zeitlich kürzeren Ausschnitt desselben Standortes, wo der unterschiedliche Temperaturverlauf der einzelnen Sensoren in Abhängigkeit der Neuschneefälle sehr gut abgebildet wird. Es zeigt sich, dass der Oberflächensensor im September 2016 einen relativ synchronen Verlauf mit den Lufttemperaturmessungen am Sonnblick aufweist. Mit zunehmender Tiefe kommt es zu einer Abschwächung der Tagesamplitude, so dass in einer Tiefe von 60 cm nur mehr ein sehr schwacher Tagesgang der Temperaturen zu erkennen ist. Mit einsetzenden Schneefällen und dem allmählichen Aufbau einer Schneedecke, wie es Ende September bis Ende Oktober zu sehen ist, kommt es zur thermischen Entkopplung der Bohrlochtemperaturen von der atmosphärischen Lufttemperatur am Hohen Sonnblick. Besonders interessant zeigen sich die zweite Oktoberhälfte und die zweite Novemberhälfte, wo aufgrund der thermischen Isolierung der Schneedecke die Temperaturunterschiede über zwei Wochen hinweg unter 1° C liegen. Bedingt durch Schneeverwehungen werden die Temperaturunterschiede im Bohrloch wieder größer wie es Anfang Dezember bzw. Anfang Jänner zu erkennen ist. Neuerliche Schneefälle Ende Jänner und Anfang Februar führen wiederum zu einer thermischen Entkopplung der Bohrlochtemperaturen, die erst mit ansteigenden Lufttemperaturen Ende März zu Ende geht.

Die Temperaturverläufe der seichten Bohrlöcher an der Südflanke des Hohen Sonnblicks sind in den Abbildungen 29-32 dargestellt. Zwei dieser Messstandorte (Sonnblick 1 und Sonnblick 2) weisen eine thermische Entkopplung

des Untergrundes von den atmosphärischen Lufttemperaturen auf. Im Winterhalbjahr werden maximale Tiefstwerte zwischen -5 und -7°C erreicht, was eindeutig auf das Vorhandensein von Permafrost in diesem Bereich schließen lässt. Die beiden anderen Standorte Sonnblick 3 und Sonnblick 4 lassen aufgrund des nur leicht gedämpften Temperaturverlaufs im Vergleich zur Lufttemperatur auf eine geringmächtige Schneedecke schließen, so dass die winterliche Kälte nahezu ungehindert in den Untergrund dringt und sich positiv auf den Permafrostkörper in diesem Bereich auswirkt. In den Sommermonaten zeigt sich wie groß die unterschiedlichen Wärmeeinträge beim Standort Sonnblick 1 und Sonnblick 2 im Vergleich zu den anderen beiden Standorten Sonnblick 3 und Sonnblick 4 ausfallen können. Eine länger anhaltende Schneedecke schützt den Boden vor dem sommerlichen Wärmeeintrag und begünstigt die Permafrostbedingungen.

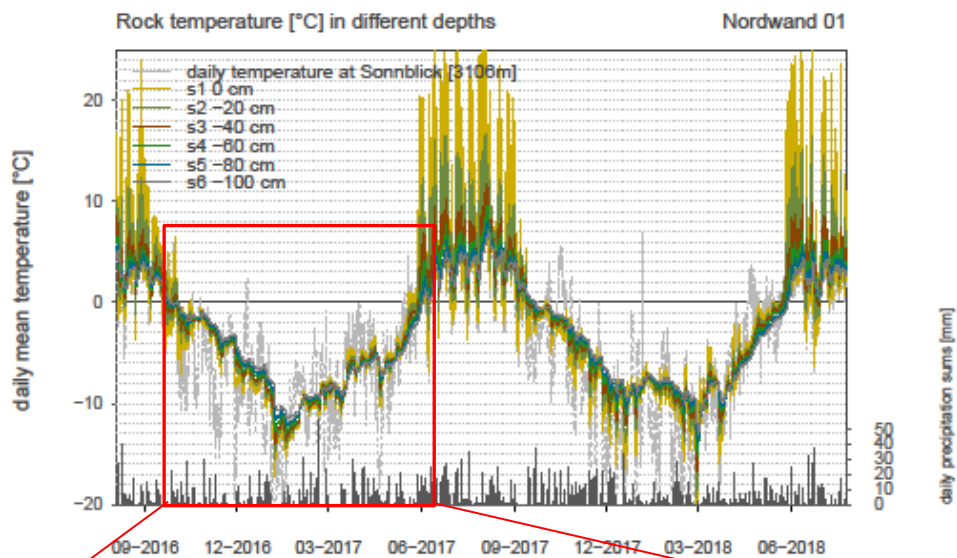


Abbildung 27: Temperaturverlauf in sechs unterschiedlichen Tiefen am Standort Nordwand 01.

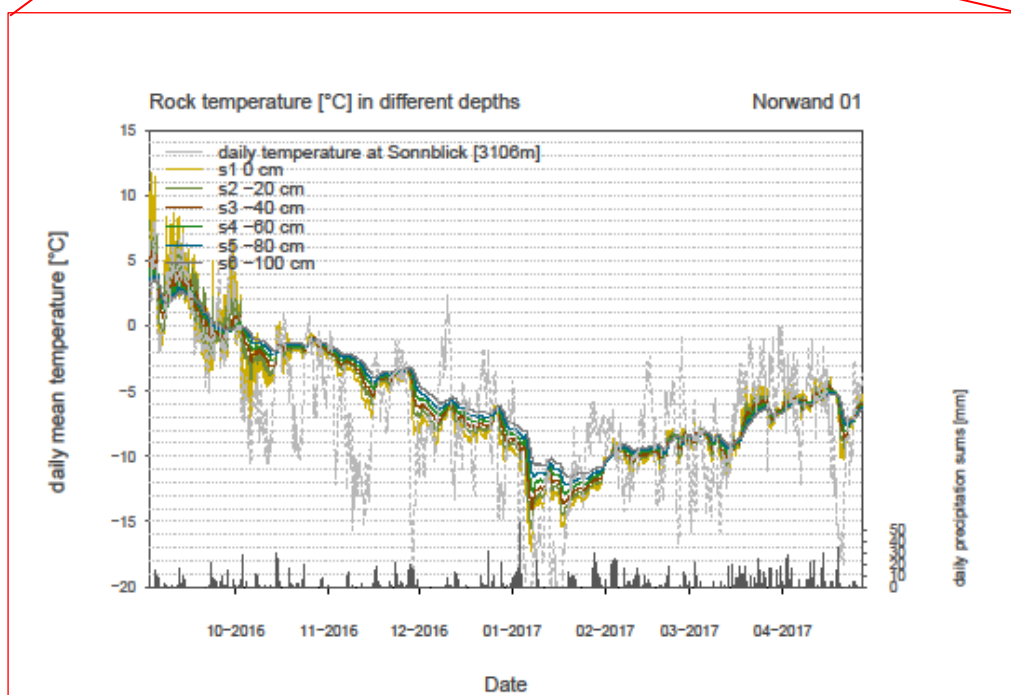


Abbildung 28: Temperaturverlauf in sechs unterschiedlichen Tiefen am Standort Nordwand 01.

Fotos: Installation des Nordwandlogger 01 im Jahr 2016.



Fotos: Vorbereitungen für die Installation der Temperaturstrings an den Standorten Nordwand 02 und 03:

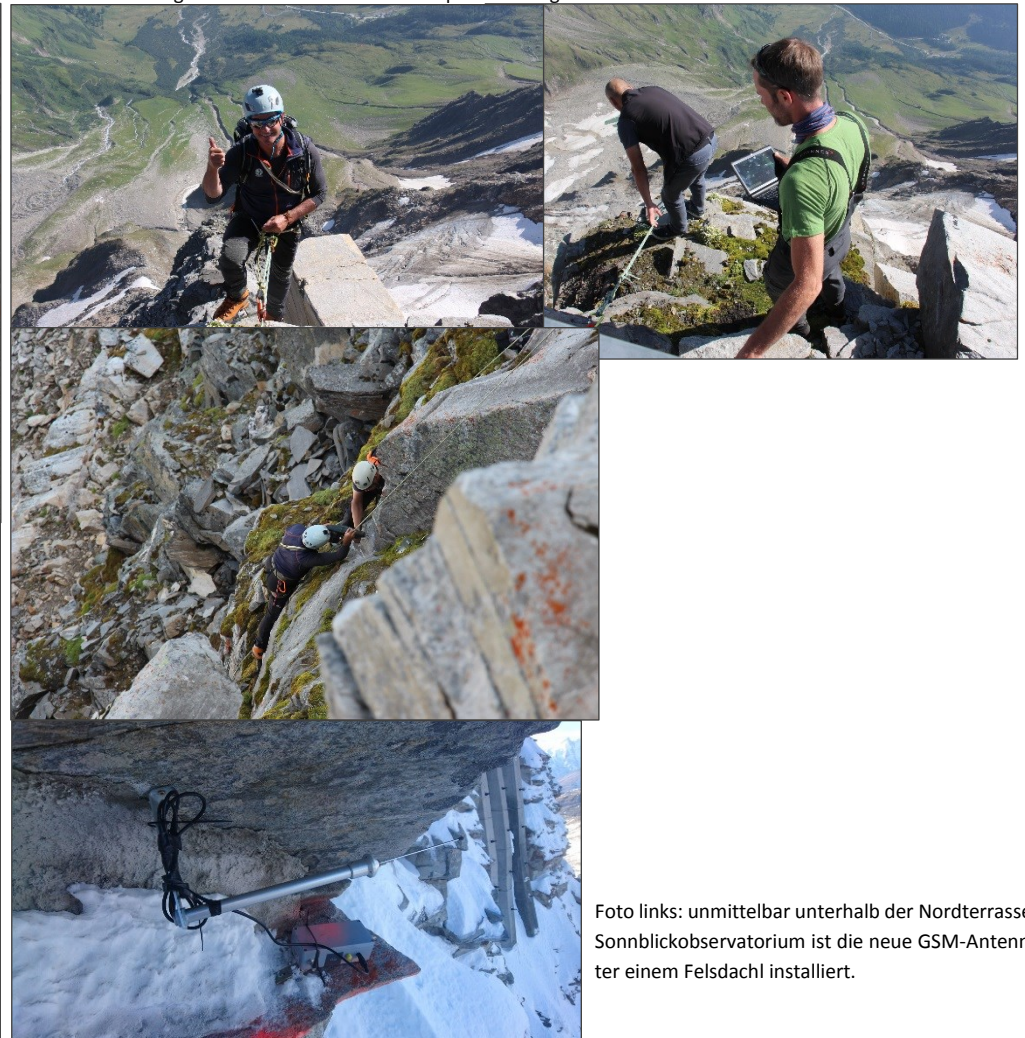


Foto links: unmittelbar unterhalb der Nordterrasse vom Sonnblickobservatorium ist die neue GSM-Antenne unter einem Felsdachl installiert.

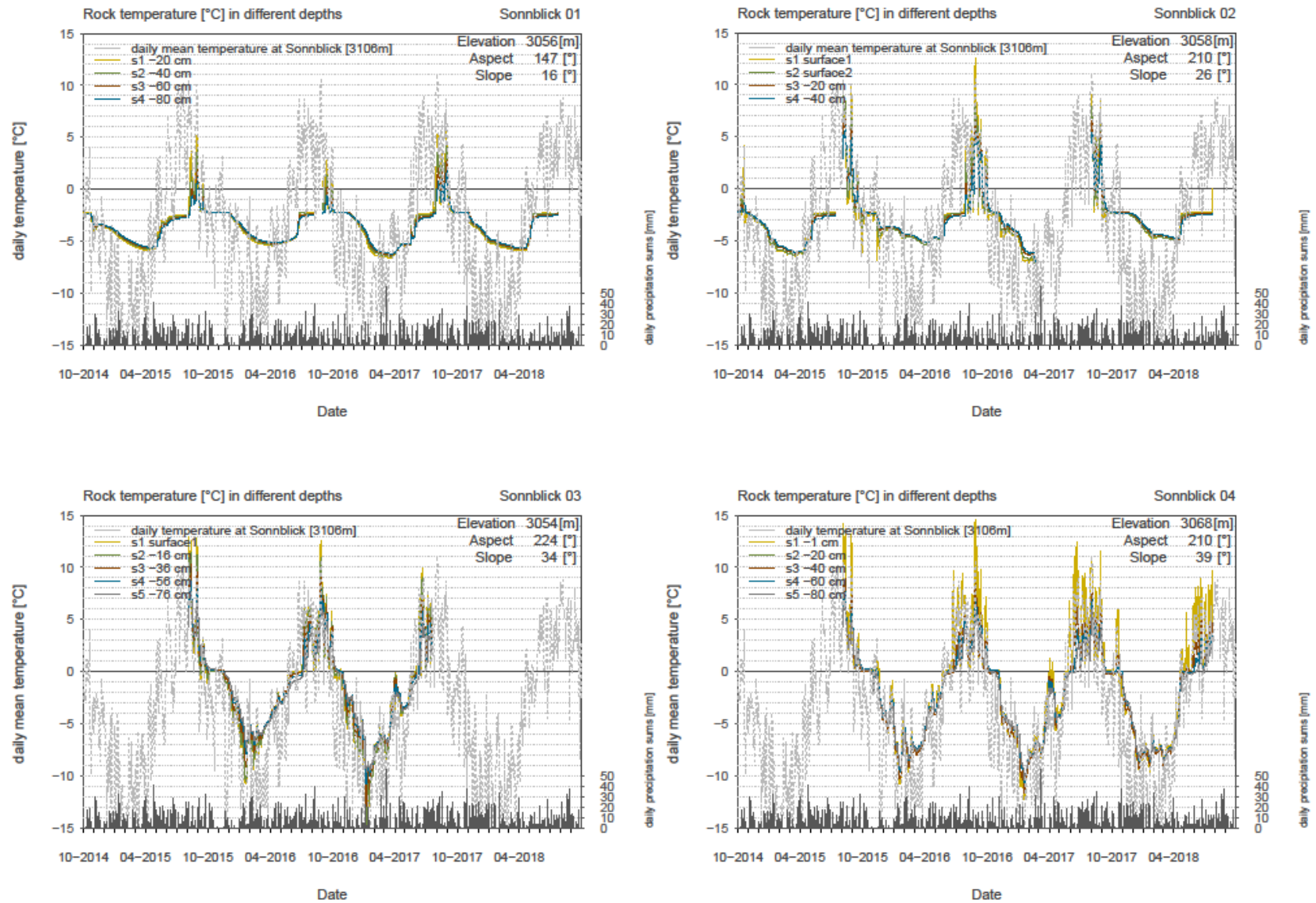


Abbildung 29, 30, 31 und 32: Temperaturverlauf in den seichten Bohrlöchern an der Südflanke des Hohen Sonnblicks.

Anhand der drei Standorte w44, w45 und w48 im Untersuchungsgebiet Wintergasse wird die Variabilität der oberflächennahen Bodentemperatur exemplarisch veranschaulicht, und ebenso aufgezeigt, welchen großen Einfluss die Lage der Messstandorte und die damit verbundene heterogene Schneedeckendmächtigkeit auf den Kälteeintrag in den Boden hat. Die Messstandorte w44 und w45 liegen etwa 30 m voneinander entfernt, wobei der Standort w44 auf einem kleinen Felsrücken und der Standort w45 in einer schwach ausgeprägten Rinne liegt. Der Standort w44 liegt somit im Vergleich windexponierter und weist im Winter deshalb auch eine geringere Schneemächtigkeit auf, worauf anhand der verzögerten thermischen Entkoppelung der Bodentemperaturen von den Lufttemperaturen geschlossen werden kann. Beim Standort w48, der auf einer windexponierten Felsplatte gelegen ist, dringt die winterliche Kälte nahezu ungehindert in den Boden ein. Dies wirkt sich einerseits positiv auf den Permafrostkörper aus, forciert aber andererseits die mechanische Verwitterung (Insolationsverwitterung).

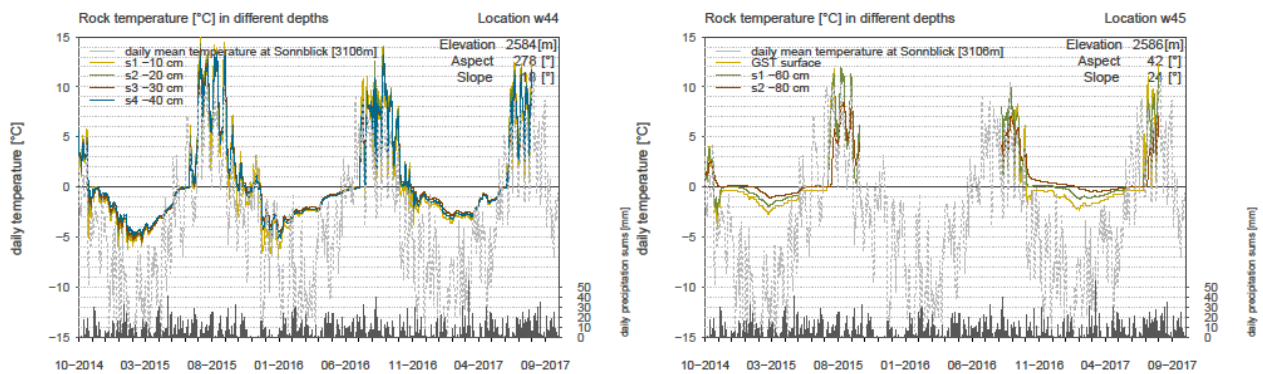
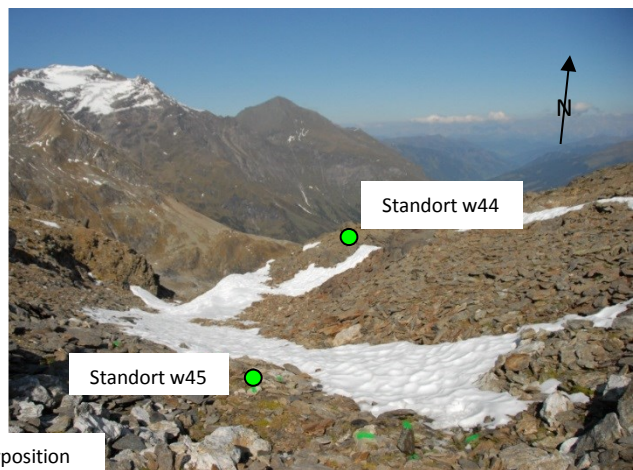


Abbildung 33 und 34: Temperaturverlauf am Standort w44 (links) und am Standort w45 (rechts).



Fotos: Messstandorte im Untersuchungsgebiet Wintergasse.

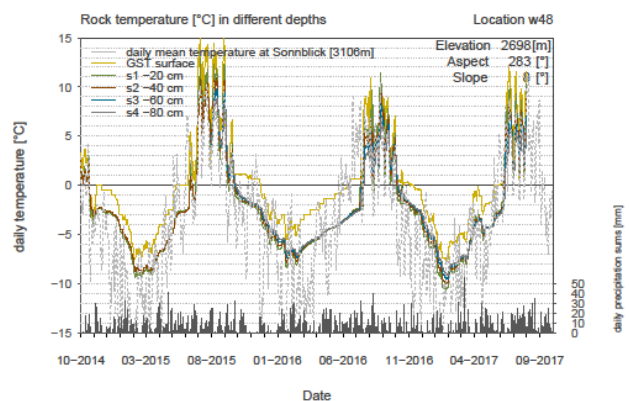


Abbildung 35: Temperaturverlauf am Standort w48 im Untersuchungsgebiet Wintergasse.

4.3. Oberflächenlogger (GST – Ground Surface Temperature)

Ziel und Motivation

Die Bodenoberflächentemperatur (Ground Surface Temperature – GST) ist definiert als die Oberflächen- bzw. oberflächennahe Temperatur des Untergrundes (Anstehendem bzw. Oberflächenablagerungen), gemessen in den obersten Zentimetern des Bodens. Die GST ist abhängig von der Energiebilanz der Oberfläche sowie von den standortspezifischen Charakteristika wie Vegetationsbedeckung, Oberflächenrauigkeit bzw. -farbe und Feuchtegehalt (Klene et al., 2001). Das GST-Monitoring trägt zum Verständnis der standortspezifischen Energie- und Wärmetransporte bei.

Standort

- Wintergasse: möglichst homogene Verteilung (Exposition, Höhenlage, Untergrund)

Analyse

Die GST-Messungen in feinem bis grobblockigem Oberflächenmaterial wurden im Untersuchungszeitraum 2014-2018 an 29 Standorten weitergeführt.

Auf Basis der GST-Messungen wurden folgende Parameter berechnet:

- Mittlere jährliche Bodentemperatur (MAGST – mean annual ground surface temperature)
Ein Wert $> 0^{\circ}\text{C}$ deutet auf Permafrost hin.
- Winterliche Gleichgewichtstemperatur (WEqT - winter equilibrium temperature): Die WEqT zeigt sich als guter Indikator, ob Permafrost vorhanden ist oder nicht. Bei Permafrostvorkommen zeigt die WEqT negative Temperaturen von $> -3^{\circ}\text{C}$, bei keinem Permafrostvorkommen liegen die WEqT nahe 0°C . Folgende Schwellwerttemperaturen der WEqT dienen als Indikator:
 - GST $> -2^{\circ}\text{C}$: Permafrost unwahrscheinlich
 - GST -2 bis -3°C : Permafrost möglich, Unsicherheitsbereich
 - GST $< -3^{\circ}\text{C}$: Permafrost wahrscheinlich

Beachtet werden muss, dass die WEqT eine starke Beeinflussung gegenüber der Schneehöhe und der zeitlichen Entwicklung der Schneedecke aufweist. Ist die Schneedecke mächtig genug (80 - 100 cm) um den Untergrund von atmosphärischen Einflüssen abzuschirmen, stellt sich eine konstante Temperatur an der Basis der Schneedecke ein und die WEqT darf ermittelt werden. So werden nicht jedes Jahr und nicht an jedem Messstandort die WEqT erreicht. Wenn eine zu geringe Schneebdeckung vorliegt, speziell in den Monaten November bis Jänner, kann die winterliche Kälte ungehindert in den Boden eindringen und die Werte der WEqT sind sehr stark negativ, auch dort wo keine Permafrostbedingungen vorherrschend sind. In diesem Fall wäre eine Missinterpretation der WEqT die Folge.

- Bodengefrierindex (GFI – ground freezing index): ist definiert als die Jahressumme der negativen täglichen Mitteltemperatur, ausgedrückt als kumulierte negative Grad-Tage. Dieser Wert drückt das Auskühlen des Bodens während der kalten Jahreszeit aus. Auf Basis der jährlichen GFI-Werte lassen sich die einzelnen Haushaltsjahre untereinander vergleichen.
- Schmelzgradindex (THI – thawing index): ist definiert als die Summe der positiven täglichen Mitteltemperaturen gemessen im Zeitraum zwischen der Schneeschmelze (Jahr zu Jahr Variabilität) und dem Ende des hydrologischen Haushaltsjahres (Ende September), ausgedrückt als kumulierte positive Gradtage.

In Tabelle 5 findet sich eine Zusammenfassung der Loggerstandorte mit Angabe der standortspezifischen Geländeparameter, der mittleren jährlichen Bodentemperatur (MAGST), der mittleren winterlichen Gleichgewichtstemperatur (WEqT) sowie der Bodengefrier- und Schmelzgradindex. Die mittlere jährliche Bodentemperatur liegt über den gesamten Untersuchungszeitraum bei zwölf Messstandorten unter 0° C und lässt somit auf Permafrostbedingungen schließen (siehe die blau markierten Werte in Tabelle 5:). Betrachtet man bei diesen Standorten die Werte der mittleren WEqT zeigt sich ein sehr heterogenes Bild. Nur teilweise tritt eine WEqT von < -3° C auf und bestätigt die Permafrostbedingungen basierend auf der MAGST. Prinzipiell sind den Werten, die auf den ganzjährigen kontinuierlichen Messungen beruhen eine höhere Validität zuzuschreiben. Bei sechs Standorten sind die verfügbaren Datenreihen zu kurz (Datenlücken ≥ 3 Jahre) und bleiben bei der Interpretation unberücksichtigt. Bei drei Standorten liegen die Werte der MAGST > 0° C und lassen somit auf keine Permafrostbedingungen schließen. Dies wird auch durch die Werte der winterlichen Gleichgewichtstemperatur bestätigt. Bei sechs Standorten liegen die Werte zumindest in zwei Messjahren im positiven Bereich und werden somit dem Unsicherheitsbereich zugeordnet.

Beim Vergleich des Schmelzgradindex in Abbildung 36 zeigt sich ein sehr gegensätzliches Bild. Die schneearmen Winter in den drei Messjahren 2014/15, 2016/17 und 2017/18 zeigen wesentlich höhere Kälteeinträge in den Boden als in den Haushaltsjahren 2013/14 und 2015/16 zu beobachten sind. Das frühe Ausapern wird in den Jahren 2014/15 und 2016/17 durch die hohen positiven Indexwerte angezeigt und führte jeweils zu den höchsten Wärmeeinträgen im gesamten Untersuchungszeitraum. Die hohen Wärmeeinträge der Jahre 2015 und 2016 sind auf weit unterdurchschnittliche Winter mit geringen Schneehöhen zurückzuführen. Im Vergleich dazu weisen die Jahre 2013/14 und 2015/16 mit Schneehöhen, die dem Mittel entsprechen wesentlich niedrigere Werte auf.

In den Abbildungen 39-48 sind die Box-Plots der einzelnen Haushaltsjahre jeweils von Oktober bis April bzw. Oktober bis August abgebildet. Mit Hilfe dieser Darstellung lassen sich Rückschlüsse ziehen, ob einerseits die Schneemächtigkeit zur thermischen Isolierung des Untergrundes ausreichend war und ob andererseits ein frühes bzw. spätes Ausapern vorherrschend war. Die geringe Streuung der Temperaturwerte in den Winterhalbjahren 2013/14, 2015/16 sowie 2017/18 weist auf eine ausreichend mächtige Schneedecke hin, die zu einer thermischen Isolierung des Untergrundes von den atmosphärischen Lufttemperaturen führt. Beim Vergleich der Box-Plots von Oktober bis August zeigen vor allem die Jahre 2014/15 und 2016/17 eine wesentlich höhere Streuung der Temperaturwerte. Dies ist auf das frühe Ausapern in diesen Jahren zurückzuführen.

In Abbildungen 49-58 sind die mittleren winterlichen Bodentemperaturen in Abhängigkeit von der Seehöhe und der Hangneigung, sowie deren Abhängigkeit von der Seehöhe und der Hangausrichtung dargestellt. Generell zeigt sich im Höhenbereich von 2650-2750 m eine große Variabilität der Bodentemperaturen mit Werten von 0°

C bis -5°C . Somit weist dieser Höhenbereich teilweise günstige Permafrostbedingungen auf und es ist mit sporadischem Permafrost zu rechnen. Unter einer Seehöhe von 2600 m deuten die Messungen im Untersuchungsgebiet Wintergasse auf keine Permafrostbedingungen hin. Grundsätzlich sind die Temperaturen bei steileren nord- und westexponiert gelegenen Standorten niedriger.

Die räumliche Verteilung der GST-Messungen im Untersuchungsgebiet Wintergasse ist in

Abbildung 37 dargestellt. Auf Basis der GST-Messungen lassen sich bislang folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- von Jahr zu Jahr wiederkehrende räumliche Temperaturverteilungen
- starke Abhängigkeit der Hangausrichtung sowie der Hangexposition auf die Bodentemperatur
- topografische Gegebenheiten (Hangausrichtung und -exposition) sowie die räumliche und zeitliche Schneedeckenverteilung überlagern die Abhängigkeit von der Seehöhe
- zeitliche und räumliche Schneedeckenverteilung als Hauptursache für von Jahr zu Jahr unterschiedliche Bodentemperaturen
- auf Grund der relativ kurzen Messreihen von etwa fünf Jahren lassen sich noch keine klimabedingten Veränderungen des Permafrostes feststellen.

Tabelle 5: Zusammenfassung der GST-Standorte im Untersuchungsgebiet Wintergasse (blaue Markierung: Permafrost wahrscheinlich; gelbe Markierung: Permafrost möglich; rote Markierung: Permafrost unwahrscheinlich).

Location	Lon [°]	Lat [°]	ELE [m]	Slope [°]	Aspect	Sensor	Substrate	Data gaps Oct-Aug [%] 312d* = 100%	Data gaps Oct-Apr [%] 212 d = 100%	MAGST 2013/14	MAGST 2014/15	MAGST 2015/16	MAGST 2016/17	MAGST 2016/17	WEqT 2013/14	WEqT 2014/15	WEqT 2015/16	WEqT 2016/17	WEqT 2016/17	GFI 2013/14	THI 2013/14	GFI 2014/15	THI 2014/15	GFI 2015/16	THI 2015/16	GFI 2016/17	THI 2016/17	GFI 2017/18	THI 2017/18
w32	12.9979	47.0452	2675	30	northwest	Onset	very coarse debris	0	0	-0.4	0.79	0.10	0.65	-0.19	-1.42	-2.81	-1.42	-2.28	-0.96	-220	75	-290	580	-166	202	-198	430	-116	59
w39	12.9967	47.0406	2739	19	northwest	UTL	bedrock	0	0	-2.34	-0.72	-1.29	-1.63	-2.58	ND	ND	ND	ND	ND	-591	41	-742	478	-842	371	-981	394	-951	184
w40	12.9946	47.0401	2719	15	northwest	UTL	coarse debris	0	0	0.09	0.48	0.25	0.42	-0.03	-1.38	-2.99	-1.2	-2.68	-0.78	-156	190	-304	479	-161	254	-96	171	-105	98
w41	12.9921	47.0409	2685	33	northwest	UTL	debris	0	0	-0.88	-1.09	NA	-0.84	-1.44	-2.86	ND	NA	ND	ND	-258	77	-664	335	NA	232	-371	188	-666	239
w42	12.9902	47.0413	2629	26	East	Onset	coarse debris	100	100	-0.19	0.63	-0.28	-1.46	NA	-0.68	-1.18	-2.76	ND	NA	-97	29	-190	419	-359	255	-692	247	NA	NA
w43	12.9894	47.0421	2637	42	north	Onset	bedrock	0	0	NA	NA	-0.47	-0.68	-1.61	NA	NA	ND	ND	ND	NA	NA	NA	364	-752	592	-1026	783	-966	488
w45a	12.9902	47.0430	2591	24	northeast	UTL	bedrock	0	0	0.25	-0.26	NA	0.42	0.12	-0.82	-2.21	NA	-1.83	-0.75	-156	246	-282	203	NA	126	-263	415	-158	193
w46	12.9902	47.0428	2598	12	northeast	i-button	bedrock	0	0	NA	0.4	-1.33	-0.46	-0.75	NA	ND	NA	ND	ND	NA	118	-573	721	-389	140	-849	683	-596	374
w47	12.9931	47.0417	2680	18	west	UTL	organic/debris	0	0	-1.09	-0.55	-2.10	3.77	-2.85	ND	ND	ND	NA	ND	-868	476	-972	770	-941	286	-1	209	-1248	402
w48	12.9979	47.0433	2699	22	southwest	i-button	fine-grained material	0	0	-0.68	0.46	-0.39	-0.16	-2.03	-3.07	ND	ND	ND	ND	-359	266	-690	856	-506	372	-661	604	-758	156
w49	12.9915	47.0423	2619	27	west	UTL	coarse debris	0	0	-0.43	NA	-0.17	0.16	0.08	-0.61	NA	-1.2	-0.97	-0.31	-123	4	NA	292	-191	144	-171	229	-54	77
w50	12.9939	47.0413	2701	21	northwest	UTL	weathered bedrock	0	0	-0.53	NA	-0.23	0.45	-0.57	-1.9	-3.24	NA	-2.63	-3.4	-188	81	-422	555	-149	101	-303	465	-389	221
w51	12.9982	47.0432	2704	28	norhtwest	UTL	coarse debris	0	0	-0.5	-0.22	-0.54	-0.28	-0.42	-2.21	-3.82	NA	-3.19	-0.96	-314	133	-448	367	-182	95	-390	289	-170	46
w52	12.9979	47.0446	2687	35	north	Onset	coarse debris	100	100	-0.22	NA	-1.25	NA	NA	-1.24	NA	NA	NA	NA	-193	123	-6	256	-139	4	NA	NA	NA	NA
w53	12.9976	47.0450	2670	23	west	Onset	coarse debris	0	0	-0.33	NA	-0.56	0.09	-0.11	-1.47	NA	-3.42	-4.4	-1.46	-241	135	NA	323	-519	206	-519	549	-235	201
w54	12.9984	47.0437	2706	15	northwest	UTL	coarse debris	0	0	-0.22	0.46	0.41	0.42	-0.1	-0.59	-0.75	NA	-1.03	-0.31	-122	43	-129	292	-40	118	-141	290	-71	41
w55	12.9990	47.0451	2701	23	northwest	UTL	very coarse debris	0	0	-2.25	NA	-2.99	-1.89	-2.66	ND	NA	ND	ND	ND	-810	84	NA	256	-866	97	-1097	416	-921	132
w56	12.9961	47.0410	2719	14	norht	Onset	debris	100	100	-0.61	NA	-0.95	NA	NA	ND	NA	ND	NA	NA	-696	498	NA	351	-673	378	NA	NA	NA	NA
w57	12.9947	47.0410	2708	6	northwest	Onset	debris/soil	0	0	-0.03	-0.13	NA	3.66	1.07	-0.26	-0.53	NA	NA	-0.08	-36	25	-79	39	NA	NA	NA	201	-14	395
w58	12.9916	47.0434	2581	19	northwest	UTL	debris	0	0	0.03	0.36	-0.22	0.38	-0.19	-0.51	-0.91	-1.19	-1.67	-0.36	-110	122	-127	444	-179	309	-229	364	-91	35
w59	12.9990	47.0431	2725	22	northwest	UTL	debris	0	0	0.01	0.94	0.15	0.23	-0.49	-0.29	-0.74	-1.02	-2.15	-1.43	-36	39	-132	475	-133	184	-252	335	-214	67
w60	12.9998	47.0421	2730	13	west	UTL	debris/bedrock	0	0	NA	NA	NA	3.28	0.55	NA	NA	NA	NA	-0.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	180	-40	235	
w65	12.9902	47.0421	2614	14	northwest	i-button	bedrock 2cm depth	100	100	NA	-0.05	0.22	NA	NA	ND	-0.5	-1.0	NA	NA	NA	NA	-227	386	NA	NA	NA	NA	NA	NA
w68	12.9972	47.0428	2691	68	west	i-button	debris	0	0	-0.65	0.35	-0.40	-0.15	-0.76	-2.91	ND	ND	ND	-2.73	-468	245	-668	797	-654	510	-731	677	-456	231
w69	12.9972	47.0428	2690	19	northwest	i-button	debris	0	0	-0.01	0.9	-0.60	4.3	-0.58	-2.12	ND	-3.1	NA	-2.38	-304	300	-494	824	-403	218	NA	236	-343	170
w70	12.9972	47.0427	2689	13	west	i-button	debris	0	0	0.42	1.41	-0.04	0.5	-0.49	-2	ND	-3.05	-4.1	-2.24	-256	408	-414	930	-395	380	-493	672	-354	207
w74	12.9908	47.0418	2622	25	west	i-button	debris	0	0	0.2	0.17	NA	3.94	1.35	-0.22	-0.59	NA	NA	0.04	-52	120	-100	153	NA	NA	NA	217	-8	487
w75	12.9924	47.0410	2676	17	northwest	i-button	debris	100	100	0.46	0.33	NA	0.98	NA	-0.2	-0.95	NA	-0.58	NA	-26	182	-127	226	0	226	-68	367	NA	NA
w76	12.9952	47.0402	2717	19	northwest	i-button	debris	0	0	-0.39	NA	NA	3.23	-0.09	-2.16	NA	NA	NA	-1.68	-212	94	NA	NA	NA	NA	0	177	-207	181

*Auslesung erfolgte am 2. August – 365 Tage weniger 60 Tage = 305 Tage

*NA – aufgrund von Datenlücken nicht berechnet *ND –winter equilibrium temperature (WEqT) wurde nicht berechnet, da am jeweiligen Standort für das Erreichen der Gleichgewichtstemperatur zu wenig Schnee lag.

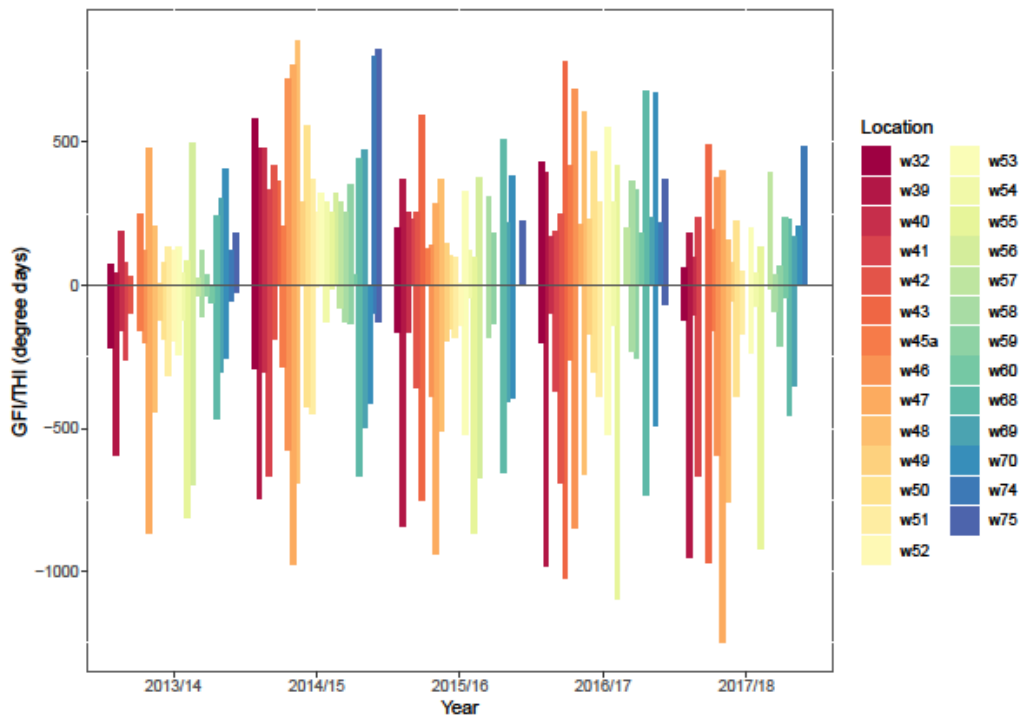


Abbildung 36: Bodengefrierindex (GFI) und Schmelzgradindex (THI) – tägliche negative Gradtagsummen und tägliche positive Gradtagsummen – der GST-Standorte im Untersuchungsgebiet Wintergasse.

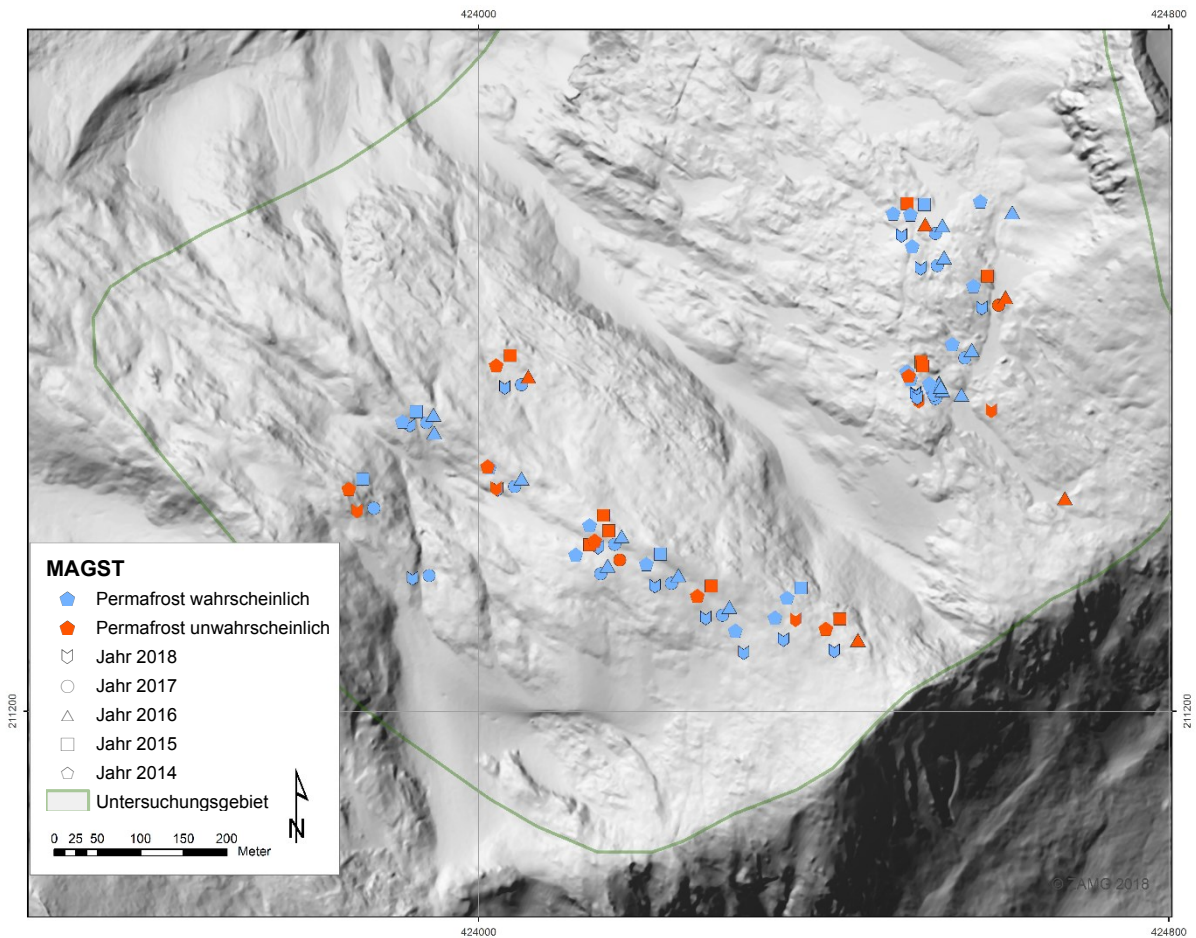


Abbildung 37: Mittlere jährliche Bodentemperatur (MAGST) im Untersuchungszeitraum an den Messtandorten im Untersuchungsgebiet Wintergasse

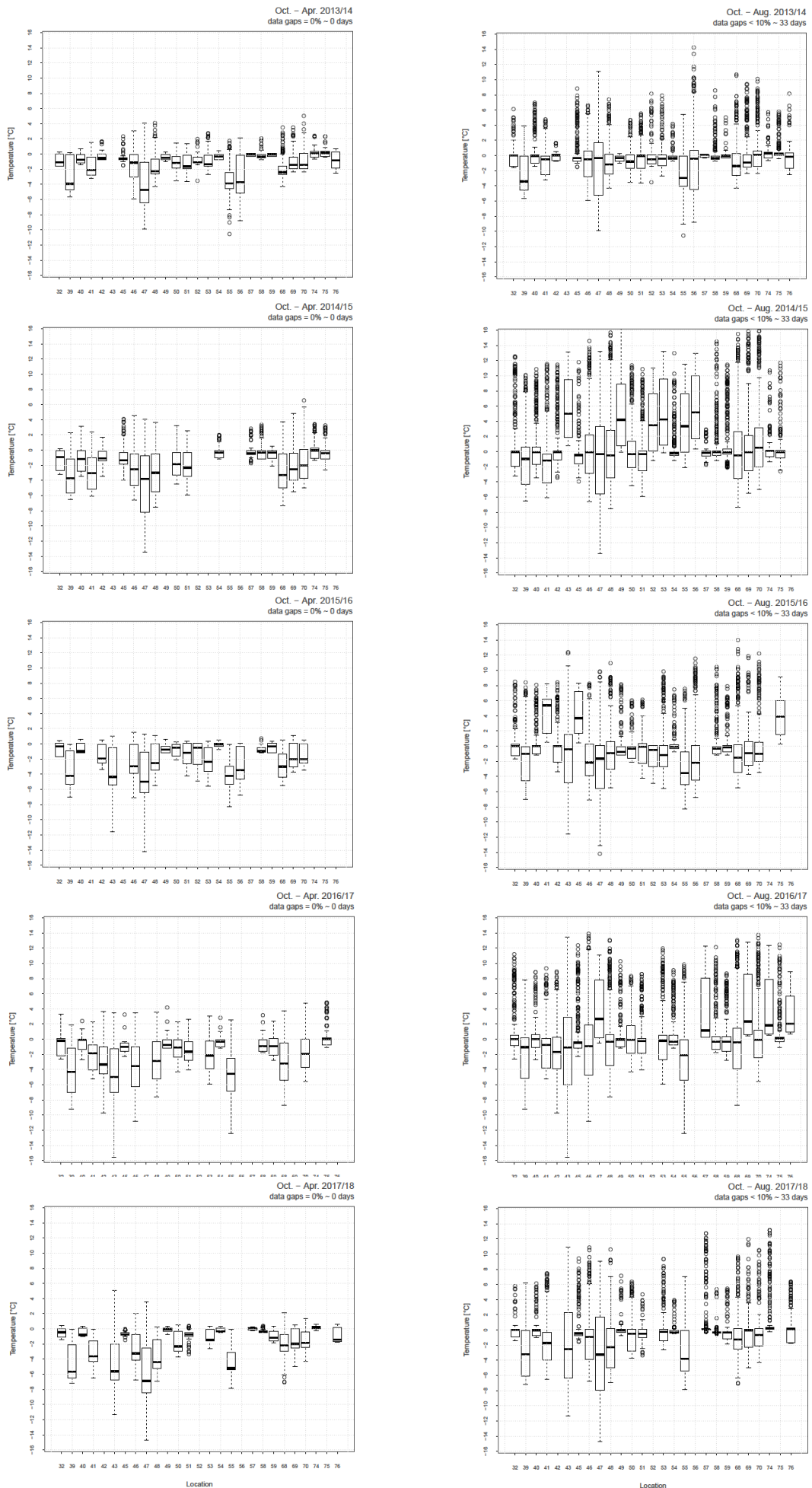


Abbildung 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46 und 47: Box-Plot der Temperatur von Okt. - Apr. (links) und von Okt. - Aug. (rechts) im Untersuchungsgebiet Wintergasse.

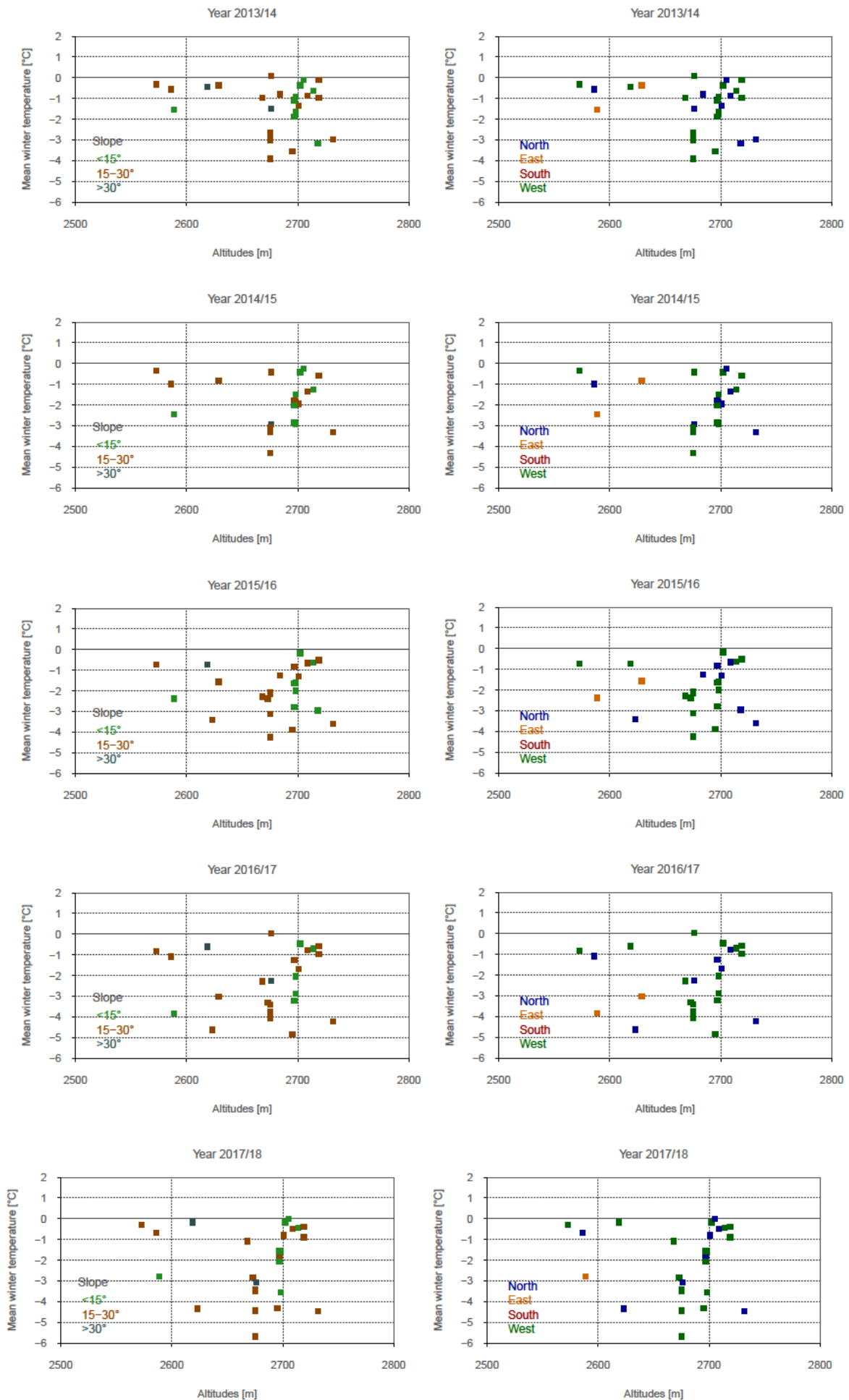


Abbildung 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56 und 57: Mittlere Bodentemperatur in Abhängigkeit von der Seehöhe und der Hangneigung (links) sowie der Seehöhe und der Hangausrichtung (rechts).

4.4. Temperatursonden (BTS – Bottom Temperature of Snow cover)

Ziel und Motivation

Für das Auftreten von Permafrost spielt die Schneedecke eine zentrale Rolle, da sie den Boden vom Einfluss der Atmosphäre isoliert und durch ihre hohe Albedo einen großen Teil der Sonnenenergie reflektiert. Diese Eigenschaften wirken sich zu unterschiedlichen Jahreszeiten anders aus. In einem schneereichen Winter wird der Boden durch die Schneedecke vor eindringender kalter Luft geschützt (wärmender Effekt). Im Frühjahr und Sommer wird der Boden, der noch immer unter Schnee liegt vor warmer Luft und Strahlung abgeschirmt (kühlender Effekt). Beginnt ein Winter kalt und schneearm, sind das die besten Bedingungen für Permafrost, da der Boden stark auskühlen kann. Bildet sich im Verlauf des Winters eine dicke und sich lang in das Frühjahr haltende Schneedecke, sind die perfekten Bedingungen für Permafrost gegeben.

Ist die Schneedecke mächtig genug (80-100 cm) um den Untergrund von atmosphärischen Einflüssen abzuschirmen, stellt sich eine konstante Temperatur an der Basis der Schneedecke ein. Haeberli (1975) hat eine empirische Faustregel für die Interpretation der Basistemperatur der Schneedecke (BTS) entwickelt. Liegt die BTS unter -3°C verbirgt sich im Untergrund wahrscheinlich Permafrost. Zwischen -3°C und -2°C liegt der Unsicherheitsbereich in dem möglicherweise Permafrost auftritt. Bei Temperaturen größer -2°C ist der Boden wahrscheinlich nicht das ganze Jahr über gefroren.

Standorte

- Wintergasse
- Südflanke des Sonnblickgipfels

Analyse

Die räumliche Verteilung der BTS-Messungen an der Südflanke am Hohen Sonnblick sowie im Untersuchungsgebiet Wintergasse ist den Abbildung 67 und 68 zu entnehmen. Im vergangenen Messjahr deuten alle Messpunkte auf der Südflanke des Hohen Sonnblicks auf Permafrostbedingungen hin, mit Ausnahme der Messpunkte direkt neben dem Zittelhaus und auf der Gletscherfläche, die knapp über dem Schwellwert von -3°C liegen.

Beim Vergleich der einzelnen Jahre in Abbildung 67 fallen die von Jahr zu Jahr wiederkehrenden räumlichen Temperaturmuster auf. Auf steileren nordexponierten Stellen sind die BTS-Werte stärker negativ als auf flachen ost- bzw. westorientierten Stellen. In Abbildung 66 ist die mittlere BTS sowie die mittlere Schneetiefe nach Höhenstufen für den Untersuchungszeitraum dargestellt. Auf Basis der BTS-Messungen im Untersuchungsgebiet Wintergasse lassen sich bislang folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- von Jahr zu Jahr wiederkehrende räumliche Temperaturverteilungen
- starke Abhängigkeit der Hangausrichtung sowie der Hangexposition auf die Bodentemperatur
- räumliche und zeitliche Schneedeckenverteilung überlagern die Abhängigkeit von der Seehöhe
- zeitliche und räumliche Schneedeckenverteilung als Hauptursache für von Jahr zu Jahr unterschiedliche Bodentemperaturen

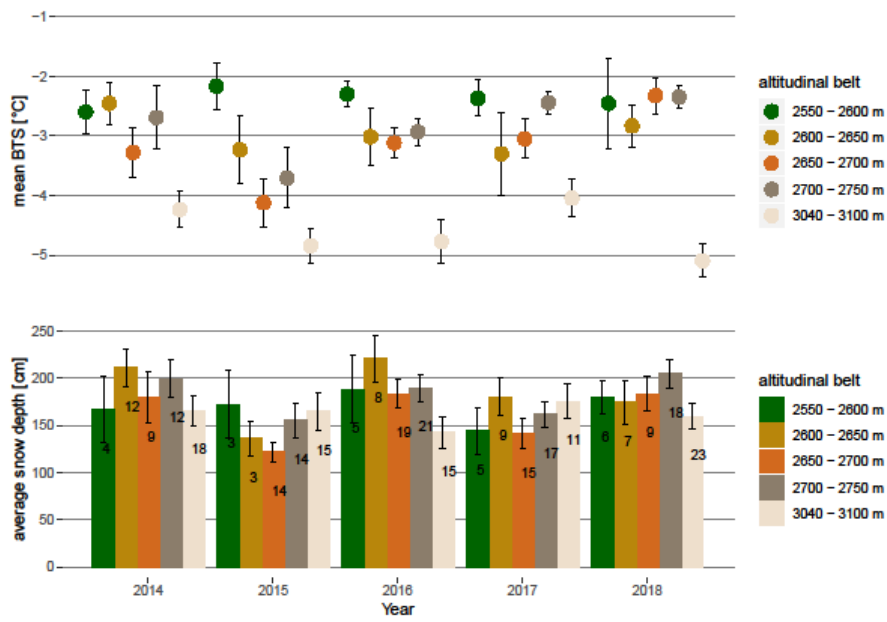


Abbildung 66: Mittlere BTS und mittlere Schneetiefe nach Höhenstufen (numerischer Wert im Balken steht für die Anzahl an Messungen, die für jede Höhenstufe zur Verfügung standen).

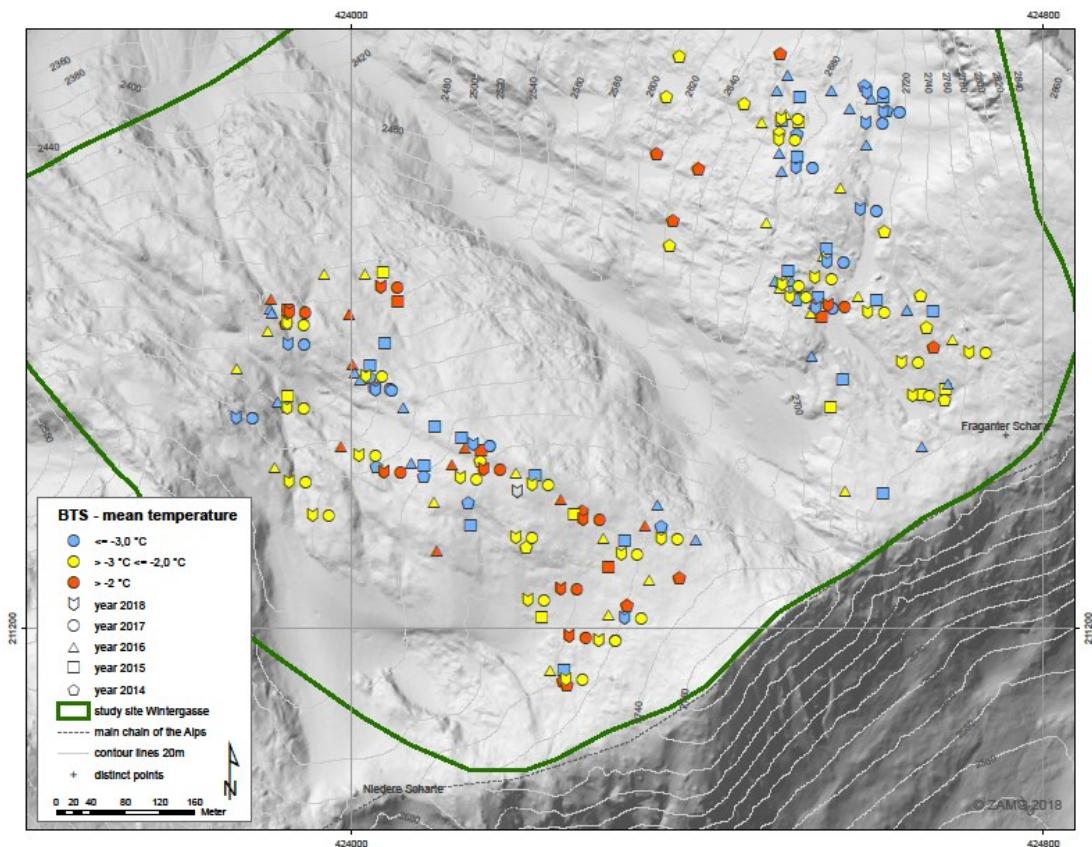


Abbildung 67: Basistemperatur der Schneedecke in der Wintergasse in den Jahren 2014-2018.

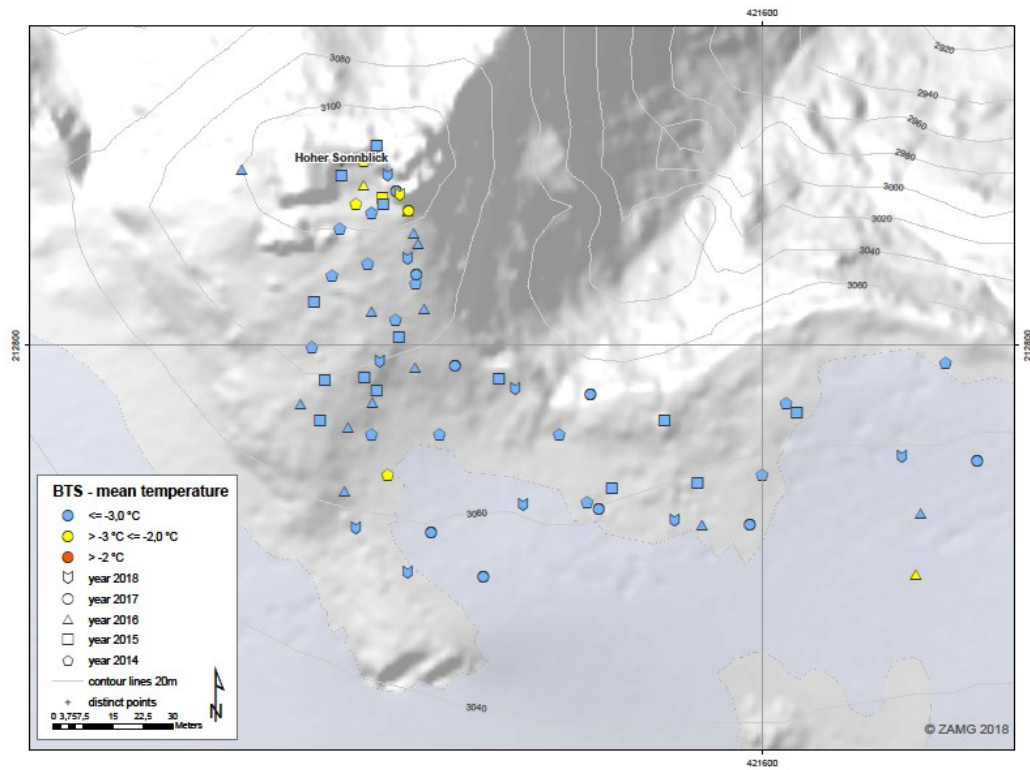


Abbildung 68: Basistemperatur der Schneedecke an der Südflanke des Hohen Sonnblicks in den Jahren 2014-2018.

Fotodokumentation während der BTS-Messungen am 12. und 13. März 2015:

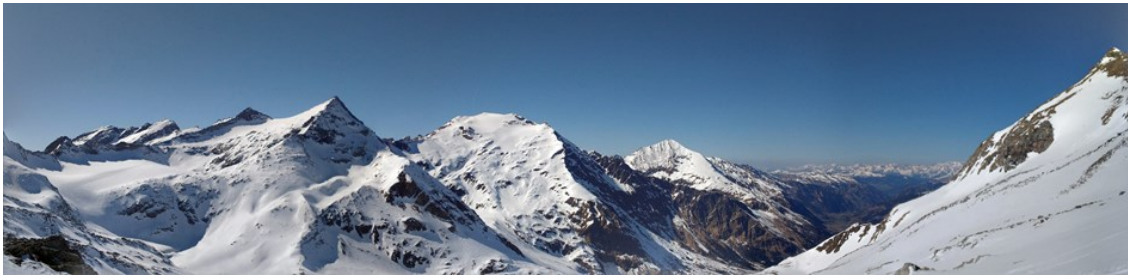


Abbildung 69: Unterhalb des Sonnblickgipfels wurden am 13. März 2015 an 48 Standorten BTS-Messungen durchgeführt.



Abbildung 70: Messequipment für die BTS-Messungen – modifizierte Lawinensonde mit eingebautem Temperatursensor und Anzeigegerät sowie ein GPS-Handgerät für die Erfassung der Standortkoordinaten.-

Fotodokumentation während der BTS-Messungen am 28. März 2017:



Fotodokumentation während der BTS-Messungen am 24. Februar 2016:



4.5. Geoelektrik

Ziel und Motivation

Bei geoelektrischen Messungen wird der Widerstandsaufbau des Untergrundes untersucht. Hierfür misst man die unterschiedlichen elektrischen Widerstände von gefrorenem bzw. ungefrorenem Felsgestein, Wasser und Eis. Bei der Einrichtung eines Monitorings lassen sich nun das dynamische Wechselspiel des Frierens und Auftauens sowie die Tiefenlage des Permafrosthorizontes kontinuierlich erfassen.



Abbildung 71: Lage des ERT-Profiles im Jahr 2006 sowie der geplanten Neuinstallation im Jahr 2015 (Foto: M. Staudinger; bearbeitet von R. Supper, A. Römer und S. Reisenhofer).

Standort

Im Rahmen der Projekte PERSON-GCW und ATMOperm wurde in Kooperation mit der Geologischen Bundesanstalt (GBA) ein Active Layer Monitoring mittels Geoelektrik etabliert. Dabei konnte auf das von der GBA eigens entwickelte Messgerät GEOMON^{4D} zurückgegriffen werden, das speziell für die extremen Anforderungen im Hochgebirge entwickelt wurde. Die Installation des Geoelektrik-Profiles war für den Sommer 2014 geplant, konnte aber aufgrund der schlechten Witterung nicht durchgeführt werden und musste auf das Jahr 2015 verschoben werden.

Anfang Juli 2015 fand in Kooperation mit der GBA eine Geländebegehung zur Auffindung eines geeigneten Standortes für das Geoelektrikprofil statt. Der Plan einer Installation des ERT-Profiles in der Nordrinne (Abbildung 71) wurde aufgrund der hohen Steinschlaggefahr und der schlechten Wartungsmöglichkeiten wieder verworfen. Der südwestlich exponierte Bereich unterhalb des Sonnblickgipfels erwies sich als sehr gut geeigneter Standort, da zum einen ein exponiertes und steiles Gelände gegeben ist bei dem eine große Prozessdynamik zu erwarten ist, und zum anderen die Sicherheit während der Installation bzw. während der Wartungsarbeiten gewährleistet ist. Die Installation des Geoelektrikprofils fand am 14. und 15. Juli 2015 statt. Es wurden auf einer gesamten Profillänge von 92 m mit jeweils 1 m Abstand 92 Elektroden installiert. Der gewählte Abstand der Elektroden ermöglicht eine vertikale Eindringtiefe von etwa 10 m, so dass eine entsprechend hohe Auflösung des Untergrundes erzielt wird und die dynamischen Prozesse des Tauens und Gefrierens sowie die Tiefenlage des Permafrosthorizontes in vollem Umfang erfasst werden können. Zur Kalibrierung der Elektrikdaten wurden im unteren sowie im mittleren Bereich des Profils jeweils ein Datenlogger mit fünf Temperatursensoren in 82 bzw. 74 cm tiefen Bohrlöchern installiert.



Abbildung 72: Lage des ERT-Profiles im Jahr 2006 sowie des geplanten ERT-Profiles im Jahr 2015 (Foto: S. Reisenhofer).

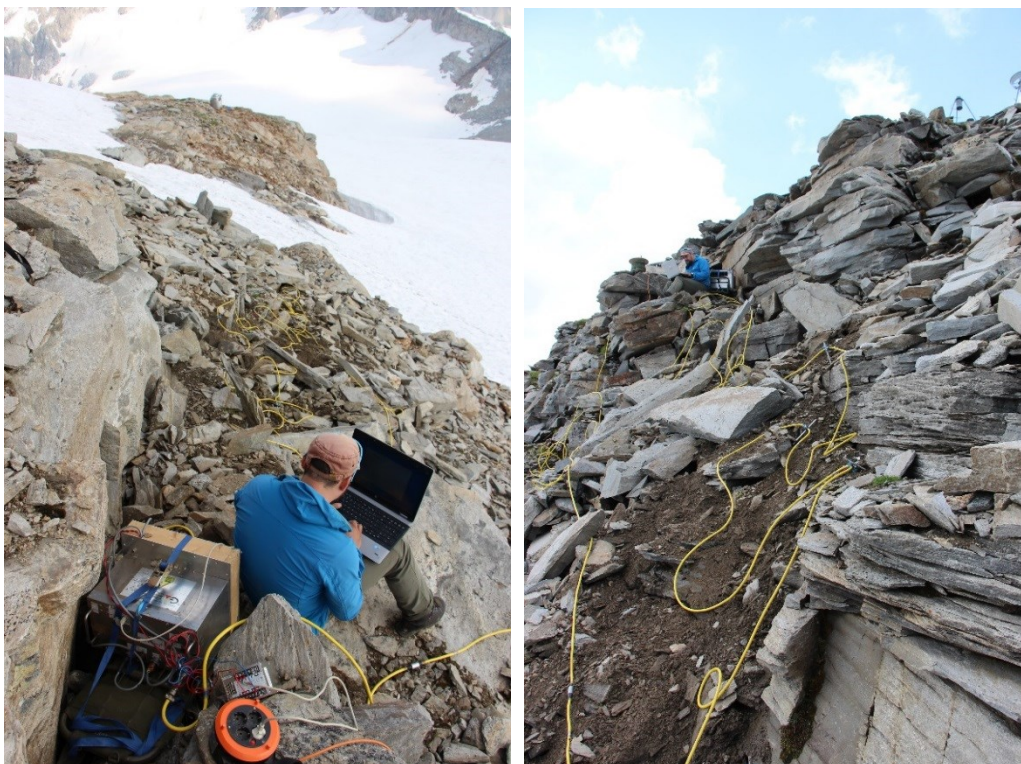


Abbildung 73: ERT-Testmessungen am 7. Juli 2015 (Foto: S. Reisenhofer).



Abbildung 74: Installation des Geoelektrikprofils am 14. und 15. Juli 2015 (Foto: S. Reisenhofer).



Abbildung 75: Lage des ERT-Profiles.

Durch die exponierte Lage des Monitoringsystems nahe des Gipfels des Hohen Sonnblicks sind die dort installierten Messgeräte einer großen Gefahr durch Blitzeinschläge und damit einhergehender Beschädigungen ausgesetzt. Daher waren vom 4.-6. August 2015 und vom 25.-28. August 2015 zwei Wartungseinsätze vor Ort notwendig, in deren Zuge nicht nur das Messgerät wieder Instand gesetzt wurde, sondern auch die Blitzschutzmaßnahmen verbessert wurden. Die Versorgung des Messsystems mit elektrischer Energie ist aufgrund der abgelegenen Lage im hochalpinen Gelände nur mit Brennstoffzellen möglich. Dies macht eine Wiederbefüllung der für den Betrieb der Brennstoffzellen verwendeten Methanoltanks im Abstand von einigen Monaten notwendig. Die Brennstoffzelle wurde Ende September 2015 beschädigt, dadurch wurde ein weiterer Wartungseinsatz vom 29.-30. September notwendig, bei dem die defekte Brennstoffzelle durch ein kostenloses Ersatzgerät getauscht wurde.

Die Arbeiten im Projektjahr 2016 waren gekennzeichnet durch die Weiterführung der geoelektrischen Messungen und Instandhaltungstätigkeiten des Messsystems am Hohen Sonnblick. Im Zuge eines Wartungseinsatzes vom 23.-25. Februar 2016 wurde abermals eine Verbesserung des Blitzschutzes durchgeführt, wobei insbesondere die Verbesserung der Erdung im Mittelpunkt stand. Nichts desto trotz kam es abermals zu einer Beschädigung des Messgerätes durch Blitzschlag, wodurch ein weiterer Wartungseinsatz vom 5.-7. Juni 2016 notwendig wurde. Im Zuge dessen wurde das defekte Messgerät nach Wien gebracht und repariert und in der Zeit vom 20.-21. Juni 2016 wieder am Sonnblick installiert.

Dabei wurde das Projektteam der GBA von Mitarbeitern der ZAMG unterstützt. Ein neuerlicher Defekt am Messsystem im August 2016 konnte direkt vor Ort behoben werden. Danach wurden kontinuierlich geoelektrische Messungen bis Anfang November durchgeführt, bis ein Defekt der Brennstoffzelle den weiteren Betrieb des

Messsystems stoppte. Ein Austausch der defekten Brennstoffzelle war aufgrund von Lieferverzögerungen eines Ersatzteiles sowie aufgrund der exponierten Lage und der winterlichen Bedingungen im hochalpinen Gelände erst im Mai des Folgejahres möglich. Aufgrund der zahlreichen Ausfälle durch Blitzschlag und der Spannungsversorgungsproblem konnten im Projektjahr 2016 näherungsweise nur sieben Monate an geoelektrischen Daten aufgezeichnet werden.

Die Tätigkeiten im Projektjahr 2017 waren von der Blitzschlagproblematik gekennzeichnet, wodurch mehrere Wartungseinsätze notwendig waren. Nach der Neuinstallation der Spannungsversorgung im Mai 2017 wurde am 6. Juli ein Totalschaden am geoelektrischen Messgerät festgestellt, bei dem nahezu alle elektronischen Komponenten in Mitleidenschaft gezogen wurden. Da Bauteile und Kabel teilweise verschmort waren, ist von einem direkten Blitzschlag in das Messkabel selbst auszugehen. Auch kam es in diesem Fall zu einem Verlust der seit Mai 2017 aufgezeichneten Daten. Ein Austausch des Messgerätes im Folgemonat brachte abermals keinen Erfolg, da auch dieses Gerät trotz eines Schutzes gegen Hochspannungen beschädigt wurde. Es ist anzumerken, dass im Jahr 2017 aufgrund der schwierigen Bedingungen und widrigen Umstände keine verwertbaren Daten, die Aufschluss über die Mächtigkeit der Auftauschicht am Hohen Sonnblick geben könnten, erfasst wurden. Da ein kontinuierlicher Betrieb des ERT-Messsystems trotz zeit- und kostenintensiver Instandhaltungsmaßnahmen nicht gewährleistet werden konnte, wurde das Messgerät am 27. September 2017 geborgen und die Messungen bis auf Weiteres eingestellt. Aufgrund der bereits Ende September vorherrschenden Schneehöhen und des hohen Gewichts war ein Abtransport der Brennstoffzelle nicht möglich, so dass diese im Standby-Betrieb vor Ort geblieben ist. Der hohe finanzielle Aufwand, der durch die ständige Erneuerung der Messeinrichtungen entsteht, rechtfertigt keine weitere kontinuierliche Fortführung der Messungen am Hohen Sonnblick.

Tabelle 6: Chronologische Übersicht der Geländeeinsätze bzgl. des ERT-Profiles.

Zeitraum	Tätigkeit	Anmerkung
Anfang Juli 2015	ZAMG und GBA - Geländebegehung	Auffindung eines geeigneten Standortes
14.-15. Juli 2015	ZAMG und GBA - Installation	Installation des Geoelektrikprofils
4.-6. Aug. 2015	GBA Wartungseinsatz	Beschädigung durch Blitzschlag; Reparatur vor Ort
25.-28. Aug. 2015	GBA Wartungseinsatz	Beschädigung durch Blitzschlag; Reparatur vor Ort
29.-30. Sept. 2015	GBA Wartungseinsatz	Defekte Brennstoffzelle
23.-25. Feb. 2016	GBA Wartungseinsatz	Verbesserung des Blitzschutzes
5.-7. Juni 2016	GBA Wartungseinsatz	Beschädigung durch Blitzschlag – defektes Messgerät wurde abgebaut und in Wien repariert
20.-21. Juni 2016	GBA Wartungseinsatz	Messgerät wurde wieder installiert
Aug. 2016	GBA Wartungseinsatz	Beschädigung durch Blitzschlag; Reparatur vor Ort
Anfang Nov. 2016		Defekt der Brennstoffzelle
Mai 2017	GBA Wartungseinsatz	Austausch der Brennstoffzelle
6. Juli		Totalschaden am geoelektrischen Messgerät aufgrund von direktem Blitzeinschlag
Aug. 2018	GBA Wartungseinsatz	Austausch des Messgerätes inkl. Hochspannungsschutz
27. Sept. 2017	GBA Geländeeinsatz	Bergung des Messgerätes

Es wird nun der Versuch unternommen, dass über eine zusätzliche Förderung temporäre geophysikalische Messungen durchgeführt werden. Dies soll über eine Kooperation mit der Abteilung Geophysik der TU Wien (Kontakt: Dr. Adrian Flores-Orozco) und der Abteilung Angewandte Geophysik (Kontakt: Dr. Irene Schlögel) der ZAMG ermöglicht werden, so dass während zwei bis drei Mal im Jahr stattfindender Feldkampagnen folgende geophysikalische Messungen am Hohen Sonnblick durchgeführt werden:

- Geoelektrik am bestehenden Profil (durchgeführt von TU Wien)
- Elektromagnetik (durchgeführt von TU Wien)
- Georadar (durchgeführt von ZAMG)
- Aktive Seismik (durchgeführt von ZAMG)
- Passive Seismik (durchgeführt von ZAMG)

Dadurch wäre u.a. eine Fortführung der ERT-Messungen sowie die Betreuung und Auswertung durch Experten gesichert und die Auswertungen würden im Rahmen von Masterarbeiten, die von Dr. Irene Schlögel und Dr. Arian Flores-Orozco betreut werden, durchgeführt.

Analyse

Die nachfolgenden Auswertungen der ERT-Daten wurden von Seiten der Geologischen Bundesanstalt erstellt und für diesen Endbericht zur Verfügung gestellt:

Modell des berechneten spezifischen elektrischen Widerstandes

In Abbildung 76 und 77 sind die berechneten spezifischen elektrischen Widerstände im Winter und im Sommer dargestellt.

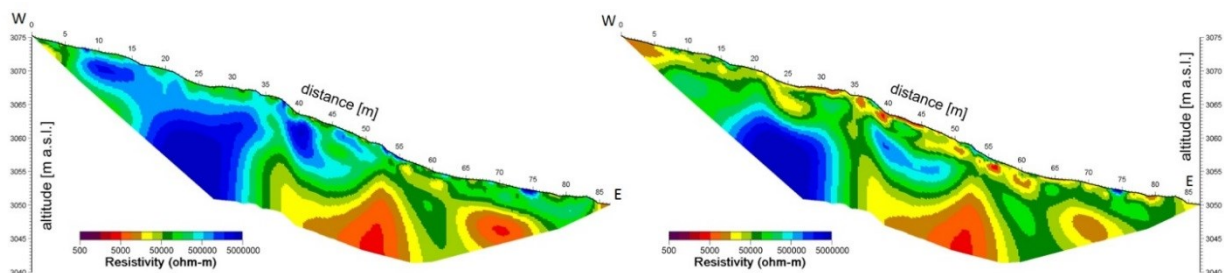


Abbildung 76 und 77: Modell des berechneten spezifischen elektrischen Widerstandes im Winter (links) und im Sommer (rechts).

Beide Widerstandsmodelle zeichnen sich vor allem im westlichen Bereich durch sehr hohe Widerstandswerte sowohl auf der Oberfläche als auch in größerer Tiefe aus. Diese kommen einerseits durch das blockige Material auf der Oberfläche und andererseits durch massiven Fels im tieferen Bereich zustande. Der untere in Richtung Osten verlaufende Bereich des Profils zeigt auf der Oberfläche vor allem aber in größerer Tiefe deutlich geringere Widerstandswerte. Auf der Oberfläche könnte dies auf das weniger aufgelockerte Material zurückzuführen sein bzw. könnte auch der Einfluss der verstärkten Schneebedeckung in diesem Bereich eine Rolle spielen (Einfluss

auf die Bodentemperatur bzw. Einfluss durch Niederschlags- und Schmelzwasser in den Sommermonaten). Dieser Einfluss setzt sich auch in die Tiefe fort, wodurch der deutlich geringere spezifische elektrische Widerstand in diesem Bereich zu erklären ist. Im westlichen Teil (große blaue Anomalie) liegt in der Tiefe Permafrost vor und im östlichen Teil nicht. Der Grund hierfür ist auf die unterschiedliche Schneedeckenverteilung zurückzuführen, die im östlichen Teil im Prinzip bis auf ein paar Wochen im Hochsommer (höchste Temperaturen) immer geschlossen ist. Dadurch ist der Bereich klar gegen die niedrigen Temperaturen des restlichen Jahres „geschützt“. Des Weiteren war der Bereich vor ca. 20 Jahren noch teilweise vom Gletscher bedeckt, wo generell mit keinem Permafrost zu rechnen ist.

Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes

Die Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes (hier als Widerstandsverhältnis dargestellt) beschränken sich auf den oberflächennahen Bereich, der dem Einfluss der Jahreszeiten am stärksten ausgesetzt ist. In diesem Zusammenhang ist auch die Verteilung der Änderung zu sehen, die sowohl während der Temperaturabnahme (siehe Abbildung 78) als auch während der Temperaturzunahme (siehe Abbildung 79) im Bereich mit kaum oder geringerer Schneebedeckung deutlich stärker ausgeprägt ist.

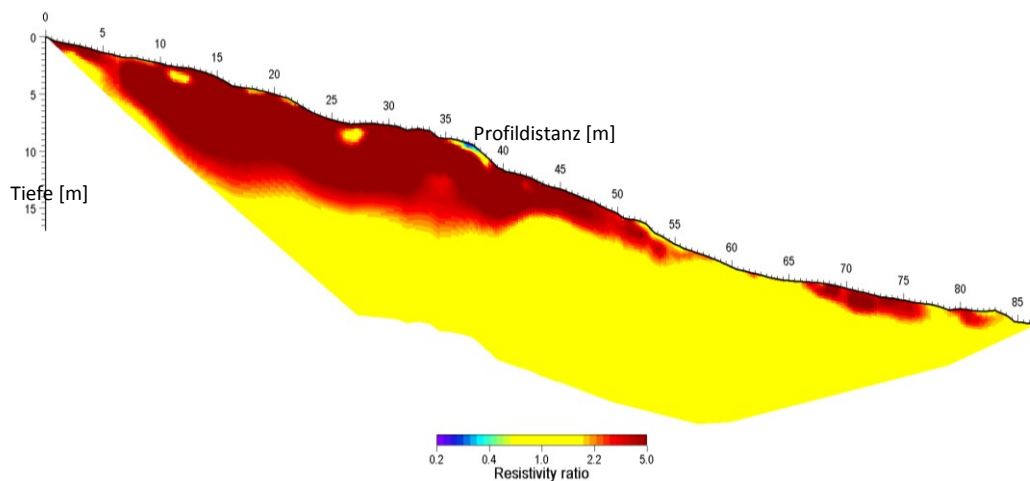


Abbildung 78: Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes während der Einfrierphase im Zeitraum vom 9. Okt. - 1. Dez. 2015.

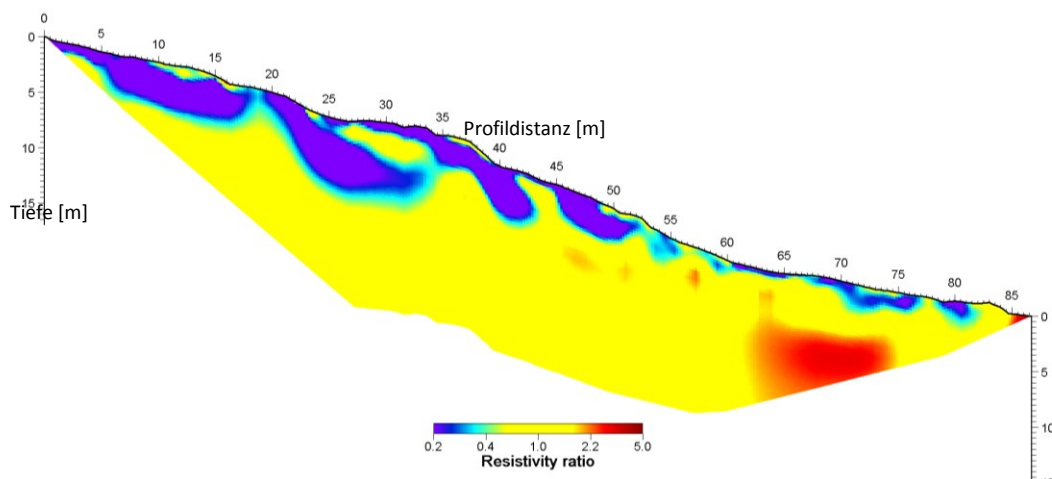


Abbildung 79: Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes während der Auftauphase im Zeitraum vom 1. März - 28. Mai 2016.

4.6. Elektromagnetik

Ziel und Motivation

Bei der Elektromagnetik wird wie bei der Geoelektrik die Leitfähigkeit des Untergrundes ermittelt. Für die Messung wird jedoch dem Boden kein Strom zugeführt, sondern es wird durch Induktion ein Spannungsfeld im Untergrund erzeugt (berührungslos). Falls in der Geoelektrik kein guter Kontakt zwischen Sonden und Boden herstellbar ist (Schuttfächer, Steinpflaster, Kies usw.), bietet sich die elektromagnetische Methode als Ersatz an. Mittels dieses Verfahrens wird der Versuch unternommen aufgrund der Leitfähigkeitskontraste oberflächennaher Schichten Hohlräume bzw. Klüfte im Festgestein zu detektieren.

Standort

Im Rahmen der Kooperation im Projekt PERSON-GCW und ATMOperm mit der TU Wien wurde mit dem Hintergrund einer Erweiterung des Nordwandmonitorings mittels Elektromagnetik, Testmessungen am Fuße des Hocharns durchgeführt.

Analyse

Nachstehende Auswertungen wurden durch Prof. Dr. Arian Flores-Orozco von der TU Wien durchgeführt und für diesen Bericht zur Verfügung gestellt. Das gewählte Elektromagnetik-Messsetup ermöglicht Messungen in drei definierten Tiefen (0,5 m, 1 m und 2 m unter der Oberfläche). Die roten Punkte in Abbildung 80 weisen auf eine höhere elektrische Konnektivität hin und sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Hohlräume im Untergrund zurückzuführen. So zum Beispiel beim Standort „GOLD“, „HOCH“ und „NORD“, wo in einer Tiefe von 0,5 m bzw. 1 m vermutlich ein Hohlraum liegen dürfte. Eine Evaluierung erfolgte im Sommer 2018 mittels Sondierungsbohrungen, wobei bei den genannten Standorten keine Hohlräume aufgefunden wurden. Eine Fortführung der Testmessungen ist zurzeit nicht geplant, da hierfür eine entsprechende Projektfinanzierung fehlt.

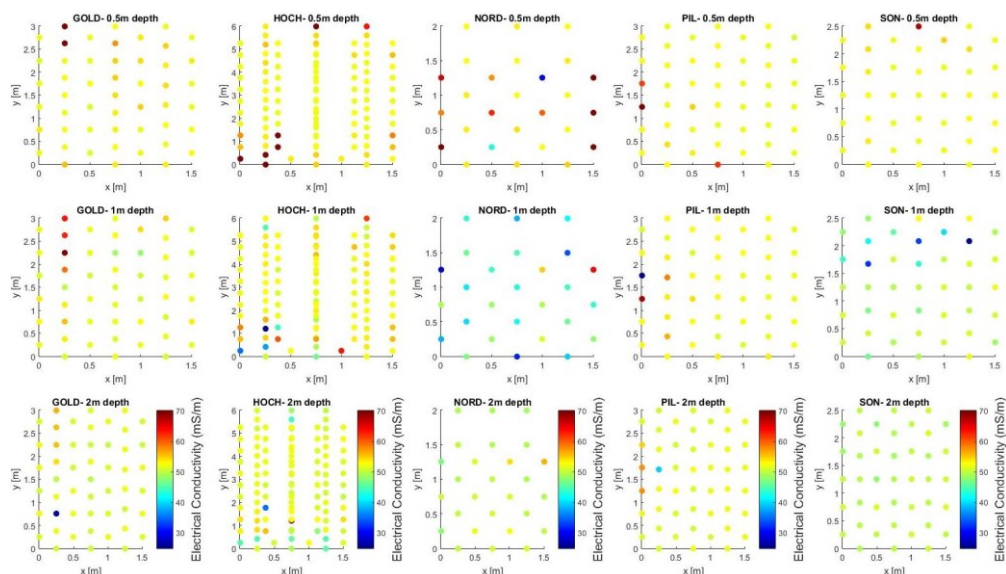


Abbildung 80: Auswertungen der Elektromagnetik-Messungen.

Appendix

Zusammenfassung der Tagungsbeiträge und sonstigen Beiträge

Reisenhofer S., Riedl C., Hausmann H., Seren S., Schöner W.: Permafrost Monitoring Sonnblick. In: *Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-10461, 2014, EGU General Assembly 2014*. Wien, Österreich, 27.04–02.05.2014.

Reisenhofer S., Riedl C., Binder D., Flores-Orozco A., Schöner W., Pfeiler S.: Permafrost Monitoring am Hohen Sonnblick im Sommer 2015, 2. Permafrost Austria Workshop, 14.-16. Oktober 2015, Steiermark.

Reisenhofer S., Riedl C., Binder D.: Permafrost Monitoring Sonnblick, Abschluss-symposium des TEMPS Projekts „Die Entwicklung des Gebirgspermafrost“, 4.-5. Februar 2015 Sion, Schweiz.

Reisenhofer S., Riedl C., Binder D., Flores-Orozco A., Schöner W., Pfeiler S.: Permafrost Monitoring am Hohen Sonnblick im Sommer 2015, 2. Permafrost Austria Workshop, 14.-16. Oktober 2015, Steiermark.

Riedl C., Reisenhofer S., Binder D., Flores-Orozco A., Schöner W., Pfeiler S.: Permafrost Monitoring am Hohen Sonnblick im Sommer 2015, Virtual Alpine Observatory Symposium 2015, 27.-30. Oktober 2015, Salzburg.

Kellerer-Pirklbauer, A., Bartsch, A., Gitschthaler, C., Reisenhofer, S., Weyss, G., Riedl, C. and Avian, M. (2016). A national strategy for a long-term monitoring of permafrost and periglacial processes and their relationship to natural hazard prevention in Austria. In: *Geophysical Research Abstracts, Vol. 18, EGU2016-15245, EGU General Assembly 2016*. Wien, Österreich, 17.04-22.04.2016.

Pfeiler, S., Schöner, W., Reisenhofer, S., Ottowitz, D., Jochum, B., Kim, J.H., Hoyer, S., Supper, R. and Heinrich, G. (2016). Analysis of ERT data of geoelectrical permafrost monitoring on Hoher Sonnblick (Austria Central Alps). EGU2016-12721-2, EGU General Assembly, Wien, Österreich, 17.04-22.04.2016.

Riedl, C., Reisenhofer, S., Binder, D., Bartsch, A., Flores-Orozco, A., Heinrich, G., Schöner, W., Pfeiler, S., Supper, R. and Hartmeyer, I. (2016). Hoher Sonnblick: A super site for monitoring the cryosphere. In: *International Conference on Permafrost, ICOP2016*, Potsdam, Deutschland, 20.06-24.06.2016.

Reisenhofer S., Bartsch A., Ottowitz D., Schöner W., Flores-Orozco A.: Permafrost Monitoring am Hohen Sonnblick: Monitoring der Bodenoberflächentemperatur & Temperatur im oberflächennahen Bereich. 4. Sonnblick-Workshop, Wien, Österreich, 18.-19.10.2016.

Reisenhofer S., Bartsch A., Ottowitz D., Schöner W., Flores-Orozco A.: Permafrost Monitoring am Hohen Sonnblick: Geoelektrisches Monitoring. 4. Sonnblick-Workshop, Wien, Österreich, 18.-19.10.2016.

Reisenhofer, S., Riedl, C., Binder, D., Flores-Orozco, A., Schöner, W. and Pfeiler, S.: Permafrost Monitoring in the Sonnblick Region, Austria. Arbeitskreis Permafrost 2017, 9.-11. Februar 2017, Einsiedeln.

Riedl, C., Reisenhofer, S., and Ludewig, E.: Monitoring Permafrost at Hoher Sonnblick, Hohe Tauern, Austria. 6th International Symposium for Research in Protected Areas 2017, 2.-4.Nov.2017, Salzburg.

Sonstige Beiträge

Reisenhofer S., Riedl C., (2014): Permafrost-Monitoring-Netzwerk im Sonnblickgebiet. Wissenschaftliche Aktivitäten 2014.

Reisenhofer S., Riedl C., (2015): Permafrost-Monitoring-Netzwerk im Sonnblickgebiet 110.-112. Jahresbericht des Sonnblickvereins für die Jahre 2012-2014, 16-19.

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, BMWFW, ÖBF, Land Oberösterreich

Beitrag zum nationalen IPA (International Permafrost Association) Country Report 2015

Reisenhofer S., Riedl C., (2016): Update: Permafrost-Monitoring-Netzwerk im Sonnblickgebiet. Wissenschaftliche Aktivitäten 2016, Seite 32. (siehe Appendix B)

Beitrag zum nationalen IPA (International Permafrost Association) Country Report 2016.

Reisenhofer S. (2017): Permafrost-Monitoring im Sonnblickgebiet. Wissenschaftliche Aktivitäten 2017, Seite 49.

Reisenhofer, S. and Riedl, C.: Monitoring Permafrost at Hoher Sonnblick, Hohe Tauern, Austria. 6th International Symposium for Research in Protected Areas 2017 Conference Volumes online.

Reisenhofer S. (2018): Permafrost-Monitoring im Sonnblickgebiet. Wissenschaftliche Aktivitäten 2018, Seite 49.

Beitrag zum nationalen IPA (International Permafrost Association) Country Report 2018.

Literatur

- Boeckli L., Brenning A., Gruber S. & Noetzli J. (2012): Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics, *The Cryosphere*, 6, 807-820.
- Haeberli, W. (1975): Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Gri-aletsch (Graubünden). *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, Zürich, 221pp.
- 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: BML-FUW, BMWFW, ÖBF, Land Oberösterreich
- Klene, A.E., Nelson, F.E. and N. I. Shiklomanov (2001): The n-factor as a tool in geocryological mapping: seasonal thaw in the Kuparuk River Basin, Alaska. *Physical Geography* 22: 449–466.
- KRAINER, K. (2007): Permafrost und Naturgefahren in Österreich. – *Ländlicher Raum* (Online-Fachzeitung des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft). Jahrgang 2007:1-18.
- PERMOS 2016. Permafrost in Switzerland 2010/2011 to 2013/2014. Noetzli, J. , Luethi, R., and Staub, B. (eds.), *Glaciological Report Permafrost No. 12–15 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences*, 85 pp.
- Schöner W., Boeckli I., Hausmann H., Otto J., Reisenhofer S., Riedl C. and S. Seren (2012): Spatial Patterns of Permafrost at Hoher Sonnblick (Austrian Alps) - Extensive Field-measurements and Modelling Ap-proaches. *Austrian Journal of Earth Science* 105

Weblinks

- <http://globalcryospherewatch.org/cryonet/sitepage.php?surveyid=13>
- <http://www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/klima/glaziologie/person>
- <http://www.sonnblick.net/portal/content/view/118/277/lang,de/>
- <http://gtnp.arcticportal.org/>
- <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-15245.pdf>
- <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-12721-2.pdf>
- <https://team.sonnblick.net/egroup/share.php/4MiUTAIZAbT47hB0HFKbdCpgDDQM6eJm/>