




ENDBERICHT 31. Jänner 2024

GZ: BMNT-UW.1.3.2/0037-IV

## GCW – Permafrost-Monitoring-Sonnblick



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

## Impressum

Titelbild:

UAV-Aufnahme der Nordwand des Hohen Sonnblicks am 23. August 2023 erstellt von Gernot Weyss.

Auftraggeber:

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

Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Projektleitung Abteilung VI/1.

Herausgeber & Autoren:



**GeoSphere**  
**Austria**

Hohe Warte 38  
1190 Wien

Departement Klimamonitoring und Kryosphäre

Mag. Stefan Reisenhofer  
[stefan.reisenhofer@geosphere.at](mailto:stefan.reisenhofer@geosphere.at)

Projektmitarbeiter:  
Melina Frießenbichler  
Mag. Anton Neureiter  
Gernot Weyss

## Inhalt

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Einleitung und Hintergrund.....</b>	<b>5</b>
1.1 Übersicht.....	5
1.2 Ziele des Monitorings .....	5
<b>2. Wetter und Klima.....</b>	<b>7</b>
2.1 Hintergrund.....	7
2.2 Klimatologische Einordnung .....	7
2.3 Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum von 2019 bis 2023 .....	9
<b>3. Permafrost-Monitoring-Netzwerk Hoher Sonnblick .....</b>	<b>17</b>
3.1 Global Cryosphere Watch .....	18
3.2 Datenmanagement.....	20
<b>4. Ergebnisse .....</b>	<b>21</b>
4.1 Permafrostrelevante Messgrößen BTS, GST und NST.....	21
4.2 Überwachung der Steinschlag- und Felssturzaktivitäten .....	32
4.2.1 Drohnenbasierte Photogrammetrie.....	33
4.2.2 Kontinuierliche Kluftmessungen – Crackmetermessungen.....	48
4.2.3 Seismisches Monitoring SeisRockHT .....	51
Literatur .....	55
Appendix A: Öffentlichkeitswirksame Tätigkeiten.....	56
Appendix B: GST-Messreihen 2018-2023 .....	57
Appendix C: GST-Standorte im Untersuchungsgebiet .....	60

## Zusammenfassung

Der vorliegende Endbericht des Projektes GCW- Permafrost Hoher Sonnblick dokumentiert die Messungen des Permafrosts im Gebiet des Hohen Sonnblicks für die hydrologischen Jahre 2018/19 bis 2022/23. Das Ziel des GCW- Permafrost Hoher Sonnblick 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, Temperaturmessungen an der Oberfläche oder oberflächennah Messungen der Basistemperatur der Schneedecke sowie Messungen der Schneedeckenausdehnung durchgeführt. Für die Überwachung der Steinschlag- und Felssturzaktivitäten in der Nordwand des Hohen Sonnblicks und Umgebung werden zum kontinuierlichen seismischen Monitoring in Ergänzung mit der drohenbasierten Photogrammetrie durchgeführt.

Der Untersuchungszeitraum umfasst die wärmsten Jahre seit Beginn der Messungen am Sonnblick Observatorim im Jahr 1886 . Die mittlere monatliche Temperatur am Hohen Sonnblick lag in Summe in 48 Monaten über dem Temperaturmittel von 1981-2010 und lediglich in 12 Monaten darunter. Die vielen überdurchschnittlichen warmen Monate führten in weiterer Folge auch zu einer Abnahme von Frost- und Eistagen. Die markanteste Abnahme war im hydrologischen Jahr 2022/23 zu finden und betrug in Summe 34 Eistage (-15%) und 29 Frosttage (-10%) weniger als im langjährigen Mittel. Zudem waren in den letzten 5 Jahren sehr gegensätzliche Winterhalbjahre mit weit über dem Mittel liegenden Schneehöhen, so in den Winterhalbjahren 2018/19 und 2020/21, und weit unter dem Mittel liegenden Schneehöhen wie es in den letzten beiden Winterhalbjahren 2021/22 und 2022/23, zu beobachten war.

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 GCW-Permafrost 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

## 1.1 Übersicht

In der österreichischen Klima- und Energiestrategie #mission2030, herausgegeben von den Bundesministerien *Nachhaltigkeit und Tourismus* und *Verkehr, Innovation und Technologie* im Mai 2018, wurde unter dem Kapitel Klimawandelanpassung das Auftauen der Permafrostböden als Konsequenz der Klimawandelauswirkungen genannt. Das globale Auftauen der Permafrostböden hat neben den zu erwartenden rückgekoppelten Auswirkungen auf das Klima auch zahlreiche Auswirkungen auf ökologische und wirtschaftliche Systeme. Für Österreich bedeutet das Tauen des Permafrostes im Gebirge konkret eine Vertiefung aktiver Felsschichten und damit ein steigendes Gefahrenpotential durch Hanginstabilitäten und Steinstürzen.

Die Veränderungen der alpinen Kryosphäre (Schnee, Gletscher, Permafrost) sind im Zusammenhang mit dem Verständnis des Klimawandels von ganz besonderer Bedeutung und gelten deshalb seitens der WMO (engl. World Meteorological Organization) als „Climate Essential Variables (CEVs)“. Insbesondere für Gebirgsländer wie Österreich, wo die Klimaerwärmung deutlich stärker ist als im globalen Mittel, ist deren Langzeitmonitoring von größter Wichtigkeit. Gerade am Sonnblick besteht die einzigartige Chance Kryosphärenänderungen im Zusammenhang mit dem sehr umfangreichen und qualitativ hochwertigen atmosphärischen Beobachtungsprogramm über einen langen Zeitraum zu untersuchen.

Das Projekt „[Global Cryosphere Watch – Permafrost-Monitoring-Sonnblick](#)“ sichert das Permafrost-Monitoring im Gebiet rund um den Hohen Sonnblick. Durch dieses Monitoring-Vorhaben wird das im Rahmen der Projekte PERSON1, PERSON2 und PERSON-GCW begonnene Permafrost-Monitoring fortgeführt, ausgebaut und gemäß internationalen Messstandards etabliert. Das Monitoring bildet eine wichtige Grundlage für die zukünftige Abschätzung von Naturgefahren im Zusammenhang mit der Permafrostdegradation.

## 1.2 Ziele des Monitorings

- a) Sonnblick als Supersite im Global Cryosphere Watch Netzwerk der Weltmeteorologisch Organisation (WMO) für den Bereich Permafrost stärken und ausbauen.

- b) Bestehende Zeitreihen permafrostwirksamer Messgrößen (BTS<sup>1</sup>, GST<sup>2</sup> und NST<sup>3</sup>) im Sonnblickgebiet, die im Jahr 2006 begonnen wurden, fortzuführen.
- c) Überwachung der Steinschlag- und Felssturzaktivitäten im Bereich der Nordwand am Hohen Sonnblick mittels passiver Seismik (zeitliche Komponente) und drohnenbasierter Photogrammetrie (räumliche Komponente), im Hinblick auf die Standortsicherheit des Gebäudekomplexes sowie zur Verknüpfung des Gefährdungspotentials für Mensch und Tier in dieser und vergleichbaren Zonen Österreichs.
- d) Integrative Darstellung der Einzelergebnisse aller angewandten Messsysteme des Permafrost-Monitorings am Sonnblick (Bohrlochmessungen, Steinschlag- und Felssturzaktivitäten in Zusammenhang mit atmosphärischen Bedingungen, Einfluss der räumlichen Schneedeckenverteilung).
- e) Bei allen angewandten Messsystemen sind (1) eine hohe Datenquantität bei gleichzeitiger (2) hoher Datenqualität zu erreichen.

---

<sup>1</sup> BTS: Bottom Temperature of Snow cover (Messung der Basistemperatur der Schneedecke)

<sup>2</sup> GST: Ground Surface Temperature (Messung der Bodenoberflächentemperatur)

<sup>333</sup> NST: Near Surface Temperature (Messung der bodennahen Temperaturen)

## 2. Wetter und Klima

### 2.1 Hintergrund

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 2018 bis September 2023 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 dem langjährigen Mittel von 1961-1990 bzw. 1981-2010 verglichen, um gewisse Anomalien bzw. Singularitäten im Messjahr zu identifizieren und besser interpretieren zu können.

### 2.2 Klimatologische Einordnung

Die in Österreich um 1890 einsetzende, zunächst schwache Erwärmung verstärkte sich um 1980 und hält seither ungebrochen an. Bereits um 1990 verließ das Temperaturniveau den bis dahin aus Messungen bekannten Bereich. Österreichweit traten die wärmsten Jahren der 256-jährigen Messgeschichte fast nur Jahre der jüngeren Vergangenheit ein, so zeigt sich das Ranking der 10 wärmsten Jahre wie folgt: 2023, 2018, 2014, 2022, 2019, 2015, 2020, 1994, 2007 und 2016 (siehe *Abbildung 1*).

Beim über Österreich gemittelten Jahresniederschlag sind weder langfristige Änderungen erkennbar, noch liegen in den letzten Jahrzehnten extreme Ausreißer vor. Die auffälligsten Phasen finden sich im 19. Jahrhundert. Allerdings löst das Österreichmittel der Jahressumme regionale und jahreszeitliche Unterschiede nicht auf und folglich kleinräumige und kurzfristige Ereignisse sind daraus nicht abzulesen.

Ebenfalls um 1980 nahm eine Erhöhung der Sonnenscheindauer ihren Ausgang. Seit rund 20 Jahren verharrt die Jahressumme der Sonnenscheindauer in einem hohen Bereich, wie er nur aus Messungen des späten 19. Jahrhunderts bekannt ist.

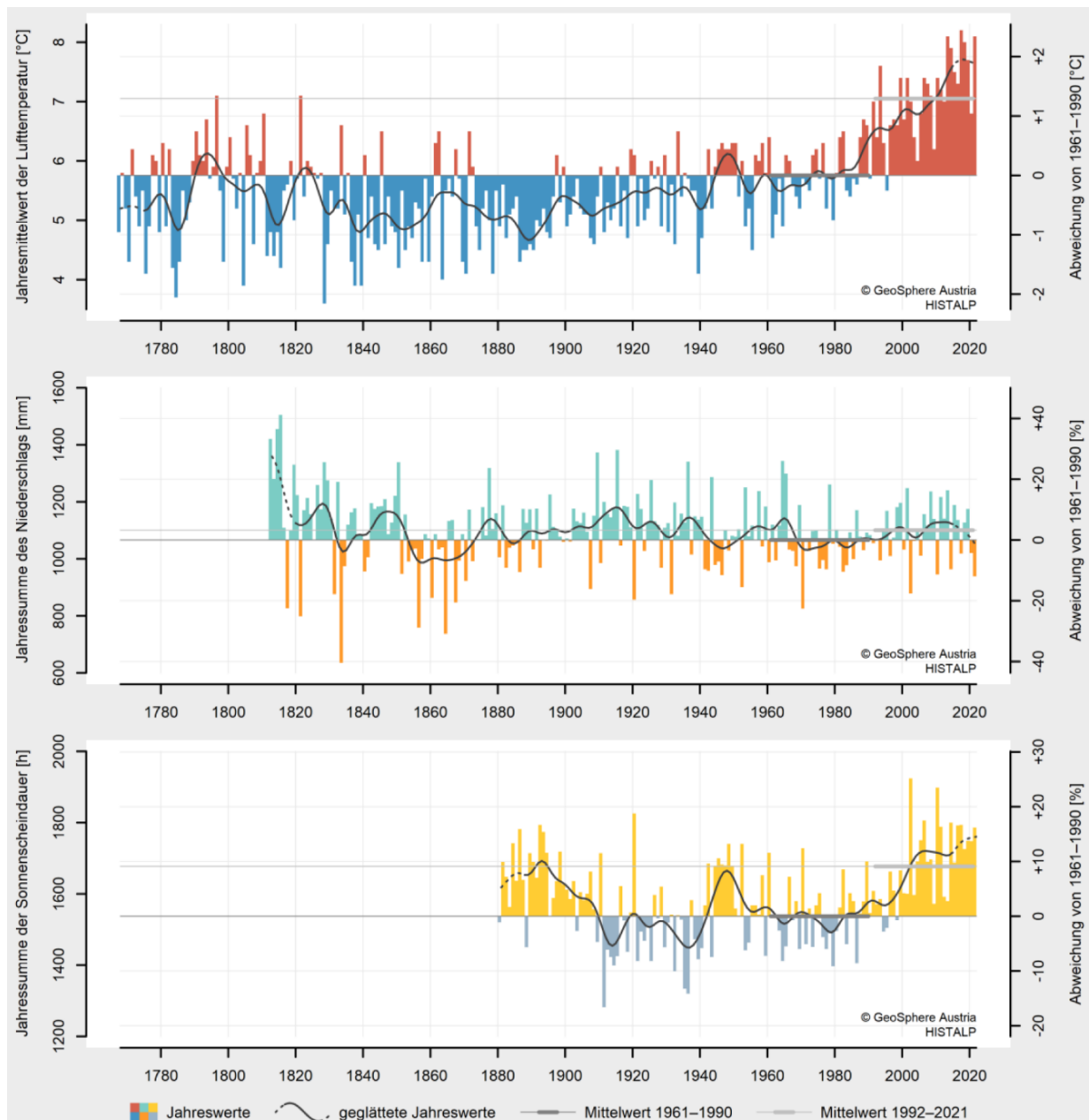


Abbildung 1: Jahresmittelwerte der Temperatur, Jahressumme des Niederschlags und mittlere Jahressumme der Sonnenscheindauer für ganz Österreich: Dargestellt sind die überdurchschnittlich warmen (rot) und kalten (blau) Jahre von 1768 bis 2023 im Vergleich zur Klimareferenzperiode 1961-1990, die überdurchschnittlich feuchteren (türkis) und trockeneren (orange) Jahre von 1816 bis 2023 im Vergleich zum langjährigen Mittel von 1961-1990 und die überdurchschnittlichen sonnenreicheren (gelb) und sonnenärmeren (grau) Jahre im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961-1990. (Quelle: basierend auf dem Datensatz HISTALP)

Die aus der Temperatur abgeleitete 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) dienen gewissermaßen dazu, die „Kälte“ im Hochgebirge eines ganzen Jahres zu ermitteln. Am Sonnblick werden im langjährigen Mittel 1981-2010 230 Eistage und 301 Frosttage gezählt, und an 71 Tagen wird ein Frostwechsel verzeichnet. Seit dem hydrologischen Jahr 2000/01 ist nahezu in allen Jahren eine Abnahme der



Eis- und Frosttage zu beobachten. Ausnahmen sind hier lediglich die hydrologischen Jahre 2000/01 und 2003/04.

Eine Zunahme der Frostwechseltage geht mit einer Abnahme der Eistage einher, wie es in den hydrologischen Jahren 2001/02, 2004/05, 2006/07, 2010/11, 2013/14, 2015/16, 2019/20 und 2022/23 zu beobachten ist. Eine Abnahme an Frostwechseltagen ist durch die generell höheren Lufttemperaturen am Hohen Sonnblick zurückzuführen, außer im hydrologischen Jahr 2003/04 in dem zugleich eine Zunahme an Eis- und Frosttagen sich zeigt.

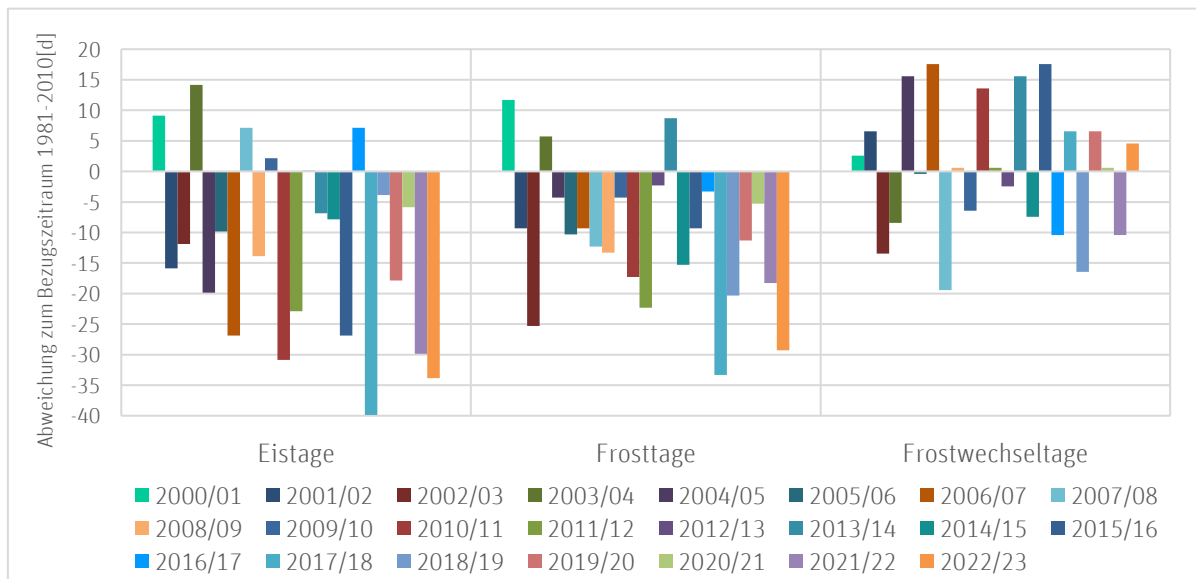


Abbildung 2: Abweichung der Eis-, Frost- und Frostwechseltage seit dem hydrologischen Jahr 2000/01 zum langjährigen Mittel 1981-2010.

### 2.3 Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum von 2019 bis 2023

Das Jahr 2019 verlief außergewöhnlich warm. Das Jahr nimmt Platz fünf der wärmsten Jahre zumindest seit Beginn der Aufzeichnungen im Spätbarock ein. Die Lufttemperatur am Hohen Sonnblick (3109 m) lag im Mittel um fast 2 °C über dem 30-jährigen Mittel von 1961-1990. Bei Betrachtung der mittleren monatlichen Temperaturen zeigen sich vor allem die Sommermonate Juni bis August mit einem Mittelwert von 4,8 °C überdurchschnittlich warm. Die höchsten Abweichungen wurden im Juni und August mit Werten von 5,3 °C bzw 3,3 °C registriert. Unter dem langjährigen Mittel 1961-1990 lag am Sonnblick lediglich der Monat Mai mit einer Abweichung von 1,4 °C. Betrachtet man die Abweichungen der Frost- und Eistage des Messjahres 2018/19 vom langjährigen Mittel, fällt der weit überdurchschnittliche warme Sommer mit einer markanten Abnahme der Temperaturkennstage auf, vor allem im Juni werden lediglich acht Frost- und auch Frostwechseltage registriert, das eine Abweichung von 16 Frost- bzw. zehn Frostwechseltagen im Juni zur Folge hat. Die einzige markante Ausnahme im Jahr

2019 bildet der sehr kühle Monat Mai, in dem sich eine Zunahme von 12 Eistagen gegenüber dem langjährigen Mittel zeigt.

Der Jänner 2019 brachte außerordentlich viel Schnee alpennordseitig und starke Kälte auf den Bergen. So wuchsen die unter dem langjährigen Mittel liegenden Schneehöhen am Hohen Sonnblick markant an und erreichten Ende Jänner Werte die dem langjährigen Durchschnitt von 1981-2010 entsprechen. Schnee Ende April bis in viele Täler hinunter bildete den Auftakt für den Österreichweit kältesten Mai seit 1991 mit viel Regen und Schnee. Am Sonnblick führten die Neuschneezuwächse zu einer Gesamtschneehöhe von 5,5 m und lag somit 1 m über dem langjährigen Mittel 1981-2010. Zu Junibeginn änderte sich die Wetterlage nachhaltig. Es folgte ein extrem warmer und zugleich einer der trockensten Sommer in ganz Österreich. Dies führte zu einem raschen Abschmelzen der großen Schneemengen aus dem Frühjahr, so dass ein früheres Ausapern der hochalpinen Flächen eintratt, als es im langjährigen Mittel zu beobachten war. September und Oktober verzeichneten durchschnittliche Niederschlagsmengen und waren ebenfalls in den Bergregionen zu warm. Von Mittelmeertiefs geprägt, folgte einer der nassesten November seit Messbeginn. Am Hohen Sonnblick führten die intensiven Schneefälle zu einem sprunghaften Anstieg der Schneehöhen zu Beginn des Winterhalbjahres 2019/2020.

Auch 2020 verlief außergewöhnlich warm. Österreichweit nimmt das Jahr Platz sieben der wärmsten Jahre zumindest seit Beginn der Aufzeichnungen im 18. Jahrhundert ein. Am Sonnblick-Observatorium in 3109 m Seehöhe wurde sogar der Stationsrekord der jährlichen Mitteltemperatur von  $-3,3\text{ °C}$  gebrochen und liegt mit einem Wert  $2,3\text{ °C}$  über dem langjährigen Mittel von 1961-1990. Die ersten vier Monate des Jahres verliefen extrem warm, trocken und sonnig. Besonders im Jänner und April blieben ergiebige Niederschläge aus, so dass die Gesamtschneehöhe Ende April über 1 m unter dem langjährigen Mittel bei 3 m lag. Der Mai beendete die Trockenheit und führte im Sonnblickgebiet zu ergiebigen Neuschneezuwächsen und einer Gesamtschneehöhe, die dem langjährigen Mittel von 1981-2010 entsprechen. Es folgten wechselhafte Sommermonate, die zu warm ausfielen. In Bezug auf den Niederschlag war der Sommer 2020 in Summe leicht überdurchschnittlich. Über dem langjährigen Mittel lag vor allem der August mit 54 % mehr Niederschlag. Es folgte dem langjährigen Mittel entsprechender leicht unterdurchschnittlicher Herbst. Der zunächst sommerlich warme September endete nass-kalt mit einem ungewöhnlich frühen Wintereinbruch bis in einige Täler. Einem mitunter kühlen, sehr feuchten und trüben Oktober folgte ein gegensätzlicher, nämlich äußerst warmer, trockener und sonniger, November mit einem Niederschlagsdefizit von über 70% im Vergleich zum Mittel von 1981-2010. Im kühlen Oktober wurden leicht

überdurchschnittliche Frost- und Eistage mit einem Plus von 2 bzw. 6 Tagen im Vergleich zum langjährigen Mittel beobachtet. Im November zeigt sich die größte Abnahme an Eistagen im zugrundeliegenden hydrologischen Jahr mit 8 Tagen und widerspiegelt die warmen Bedingungen in diesem Monat. Der klimatologische Winterbeginn brachte Anfang Dezember die ersten sehr ergiebigen Neuschneezuwächse im Winterhalbjahr 2020/21 und ließ die Gesamtschneehöhe bis Ende des Monats auf über 3 m anwachsen und lag fast einen halben Meter über dem langjährigen Mittelwert. In den Folgemonaten führten immer wiederkehrender Neuschneefälle, vor allem im Laufe des Jänners 2021 mit einem Niederschlagsplus von 55% über dem langjährigen Mittel liegende Schneehöhe. Im März und April wechselten rasch sehr warme und kalte Episoden ab und ließen die Schneehöhe stetig dem langjährigen Mittel entsprechend anwachsen und der sehr feuchte Mai führte dann zu einer weit über dem Mittel liegende Gesamtschneehöhe von 5,5 m.

Österreichweit folgte der drittwärmste und –sonnigste Juni seit Messbeginn und brachte am Sonnblick Observatorium eine um 4 °C über dem langjährigen Mittel von 1961-1990 und eine um 2,9 °C über dem Mittel von 1981-2010 liegende monatliche Mitteltemperatur von 3,4 °C. Es folgte ein etwas zu warmer und sehr trockener Herbst mit 63 % weniger Niederschlag im September und 50 % weniger im Oktober als es im langjährigen Mittel von 1981-2010 zu beobachten war. Die Folgemonate November, Dezember und Jänner blieben mit einer Niederschlagssumme von 407 mm beträchtlich unter dem langjährigen Mittel von 1981-2010 und führten bis Ende Dezember lediglich zu einer Gesamtschneehöhe von knapp 1,25 m und lag zu dieser Jahreszeit über 1 m unter dem langjährigen Mittel. Lediglich der Februar brachte überdurchschnittliche Niederschlagsmengen mit einem Plus von 20 % und die Monate März April und Mai blieben weit unter dem langjährigen Mittel, so dass der schneeärmste Winter im Untersuchungszeitraum resultiert.-

Mit der Fülle an warmen bis sehr warmen Monaten war das Jahr 2022 in Österreich insgesamt deutlich wärmer als die meisten Jahre der vergangenen 255 Jahre. Die Temperaturabweichung betrug am Hohen Sonnblick +2,3 °C zum langjährigen Mittel von 1961-1990 und war mit einer Jahresmitteltemperatur von -3,3 °C gleich warm wie das Jahr 2020. Alle Monate im Jahr 2022 wie auch im Jahr 2023 mit Ausnahme des Septembers 2022 und des Aprils 2023 liegen über dem langjährigen Mittel von 1981-2010. Die höchsten positiven Abweichungen zeigen sich im September 2023 und im Juni 2022 mit Werten von 4,4 °C bzw. 3,5 °C.

Neuer Wärmerekord am Sonnblick: Seit dem Messbeginn am Sonnblick Observatorium im Jahr 1886 war es am 11. Juli 2023 mit 15,7 Grad erst das fünfte Mal, dass die 15-Grad-Marke erreicht wurde. Alle Werte von mindestens 15 Grad gab es am Sonnblick in der jüngeren Vergangenheit. Der

bisherige Wärmerekord am Sonnblick stammte mit 15,3 Grad vom 30. Juni 2012. Im Juni 2023 wurden 15,1 Grad gemessen und im August 1992 sowie im Juli 1983 waren es 15,0 Grad.

In Österreich gab es im Jahr 2022 kaum ein Monat oder eine Region, in dem bzw. in der die Niederschlagsmengen das klimatologische Mittel erreichten oder dieses sogar übertrafen. So resultieren auch am Sonnblick die mittleren Niederschlagssummen weit unterm langjährigen Mittel von 1981-2010. Beide aufeinanderfolgenden Winterhalbjahre verliefen sehr trocken und führten zu sehr schneearmen Wintern was auch ein sehr frühes Ausapern der hochalpinen Lagen zur Folge hatte.

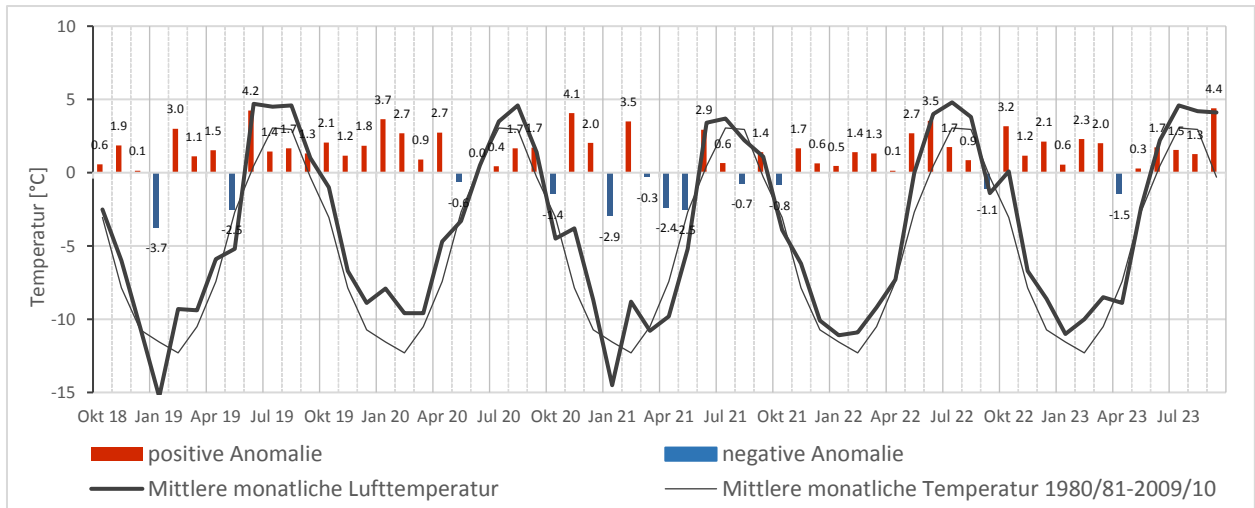


Abbildung 3: Mittlere monatliche Lufttemperatur am Hohen Sonnblick (3109 m) im Untersuchungszeitraum 2014-2018 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1980/81-2009/10 sowie die monatlichen Abweichungen.

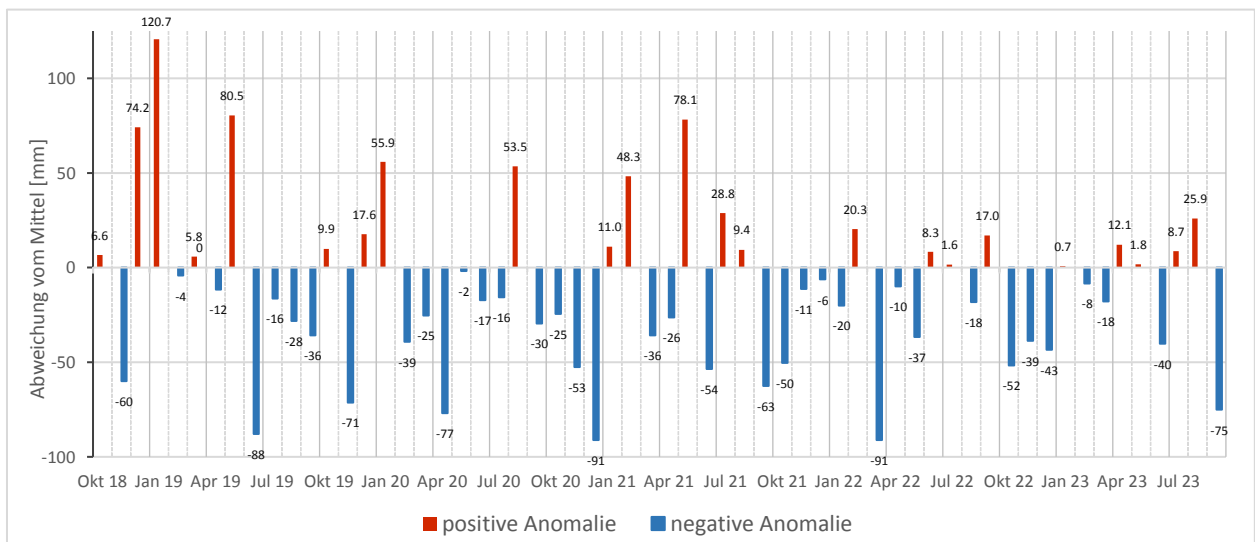


Abbildung 4: Monatliche Abweichungen in Prozent der Niederschlagssummen im Untersuchungszeitraum 2014-2018 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1980/81-2009/10.

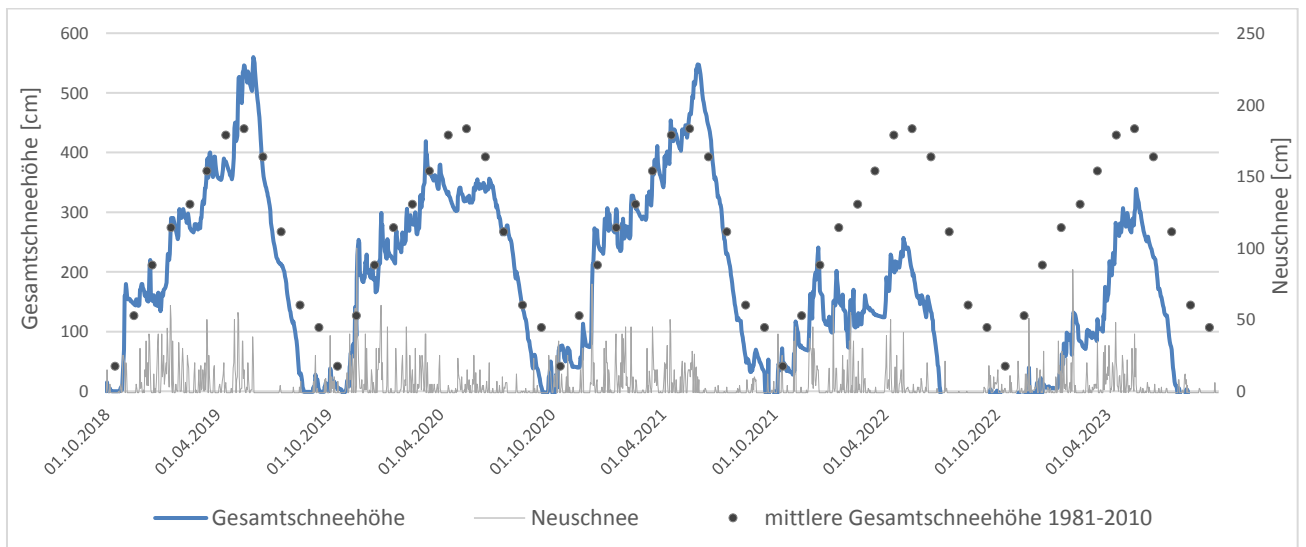


Abbildung 6: Verlauf der Gesamtschneehöhe im Zeitraum Okt. 2018 bis Sept. 2023 im Vergleich zum langjährigen monatlichen Mittel 1981-2010.

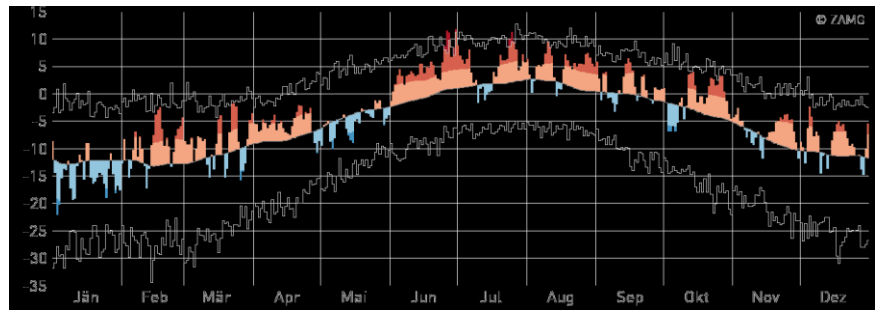


Abbildung 7: Jahresverlauf der Anzahl der monatlichen Frost-, Eis- und Frostwechsellage sowie deren monatliche Abweichung zum Mittel.

Station Sonnblick

Tagesmittelwerte der Lufttemperatur für das **JAHR 2019**

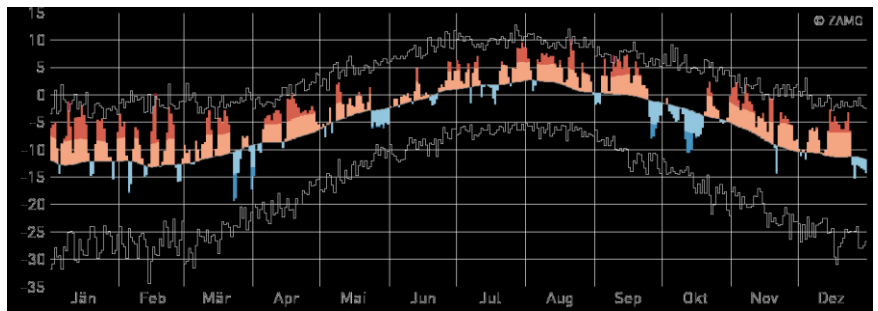
Mittelwert	Mittelwert
Jahr 2019	Jahre 1961-1990
<b>-3,7 °C</b>	<b>-5,6 °C</b>
	Jahre 1991-2020
	<b>-4,5 °C</b>



Station Sonnblick

Tagesmittelwerte der Lufttemperatur für das **JAHR 2020**

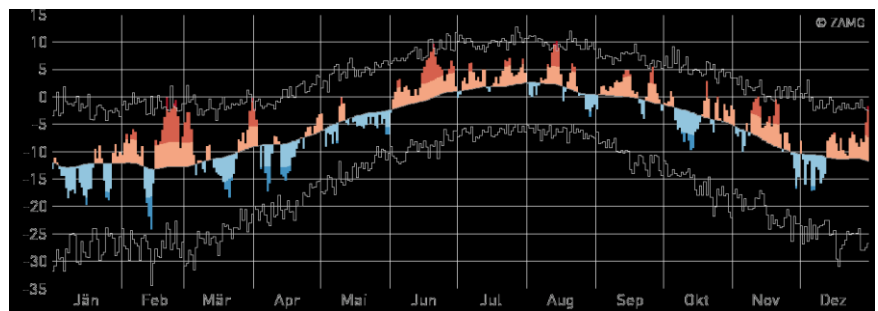
Mittelwert	Mittelwert
Jahr 2020	Jahre 1961-1990
<b>-3,3 °C</b>	<b>-5,6 °C</b>
	Jahre 1991-2020
	<b>-4,5 °C</b>



Station Sonnblick

Tagesmittelwerte der Lufttemperatur für das **JAHR 2021**

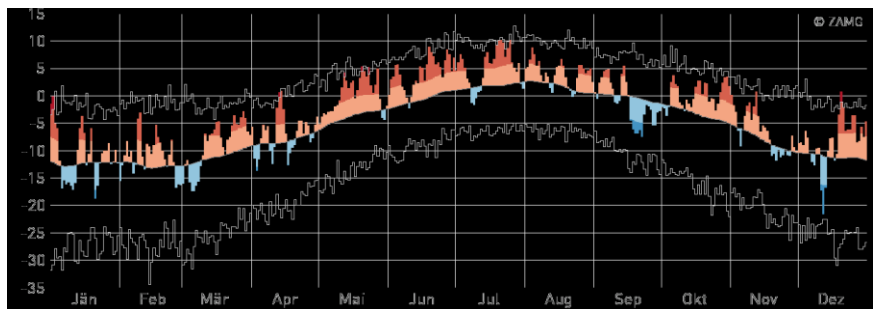
Mittelwert	Mittelwert
Jahr 2021	Jahre 1961-1990
<b>-4,7 °C</b>	<b>-5,6 °C</b>
	Jahre 1991-2020
	<b>-4,5 °C</b>



Station Sonnblick

Tagesmittelwerte der Lufttemperatur für das **JAHR 2022**

Mittelwert	Mittelwert
Jahr 2022	Jahre 1961-1990
<b>-3,3 °C</b>	<b>-5,6 °C</b>
	Jahre 1991-2020
	<b>-4,5 °C</b>



Station Sonnblick

Tagesmittelwerte der Lufttemperatur für das **JAHR 2023**

Mittelwert	Mittelwert
Jahr 2023	Jahre 1961-1990
<b>-3,4 °C</b>	<b>-5,6 °C</b>
	Jahre 1991-2020
	<b>-4,5 °C</b>

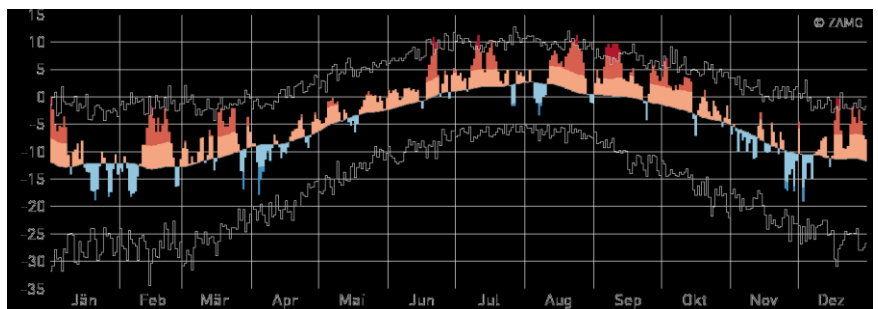


Abbildung 5: Verlauf der Tagesmittelwerte der Lufttemperatur für die Jahre 2019 bis 2023 für die Station Sonnblick. Quelle: GeoSphere Austria KLIMAMONITORING Weblink: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimamonitoring/>

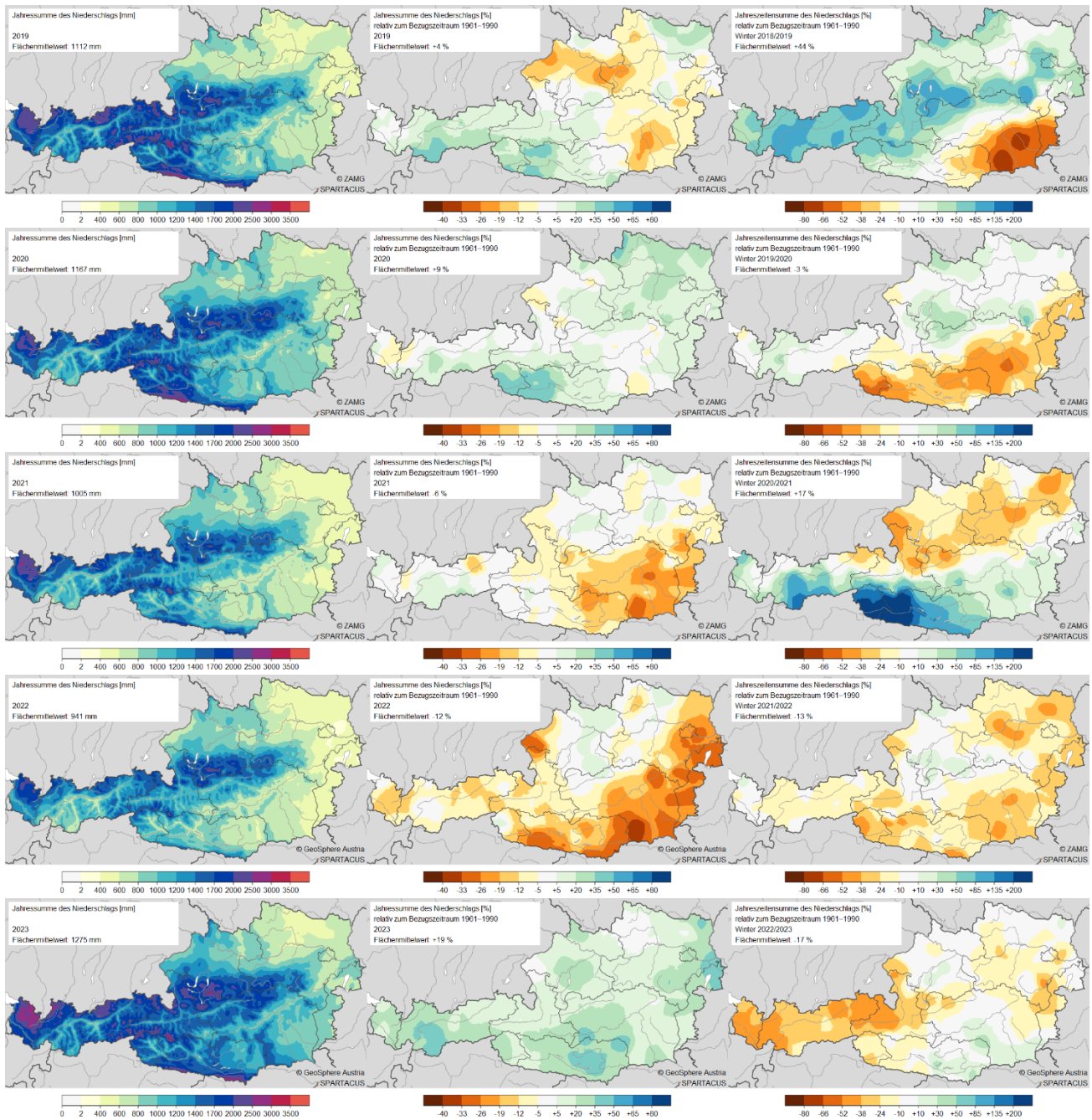


Abbildung 6: Jahressumme des Niederschlags für die Jahre 2019 bis 2023, die jährliche Abweichung sowie der Abweichung in den Wintermonaten zum langjährigen Mittel von 1961-1990. Quelle: GeoSphere Austria KLIMAMONITORING  
 Weblink: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimamonitoring/>



### 3. Permafrost-Monitoring-Netzwerk Hoher Sonnblick und GCW

Das bestehende Permafrost-Monitoring-Netzwerk im Sonnblickgebiet ist in Abbildung 7 dargestellt.

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) sind Temperatursensoren an der Südflanke des Hohen Sonnblicks (siehe Abbildung 8) sowie in der Nord- bis Nordwest exponierten Wintergasse installiert. Des Weiteren finden Messungen der Basistemperatur der Schneedecke (BTS – Bottom Temperature of Snow cover) statt, bei der auch die Schneetiefe festgehalten wird.

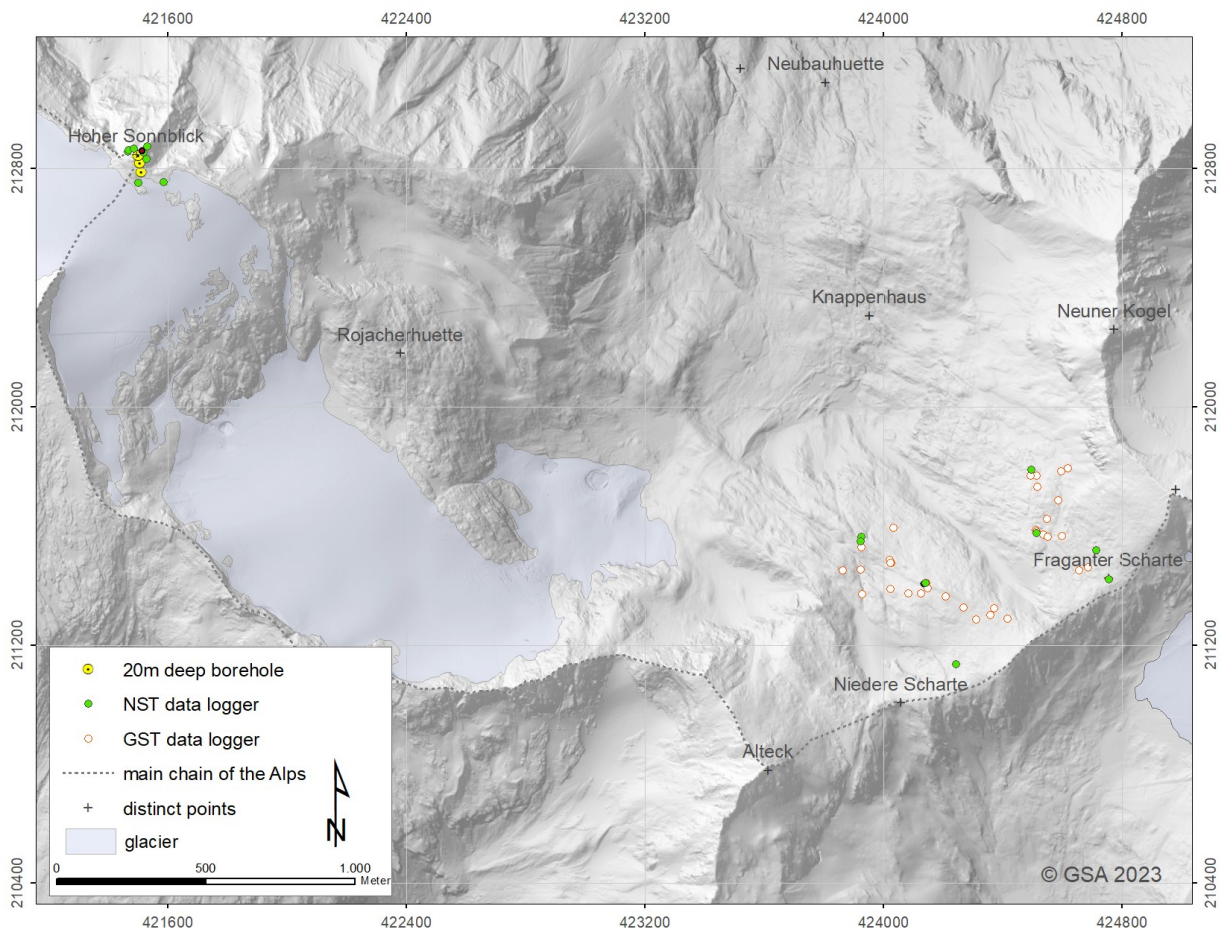


Abbildung 7: Permafrost-Monitoring-Netzwerk im Gebiet des Hohen Sonnblicks.

Für die Überwachung der Steinschlag- und Felssturzaktivitäten in der Nordwand des Hohen Sonnblicks und Umgebung werden zum kontinuierlichen seismischen Monitoring (zeitliche

Komponente) in Ergänzung mit der drohenbasierten Photogrammetrie (räumliche Komponente) durchgeführt. Zusätzlich wurden im Jahr 2021 in Anlehnung an das geotechnische Gutachten zur Beurteilung der Standsicherheit der Materialseilbahn und des Observatoriums vier Standorte mit sogenannten Crackmetern ausgestattet. Ziel dieser Crackmeter ist es, die Öffnungsweite der Klüfte zu beobachten und den Zeitpunkt des Öffnens festzustellen. Ein Überblick des Permafrost-Monitoring-Netzwerkes im Bereich des Sonnblickgipfels ist der Abbildung 8 zu entnehmen.

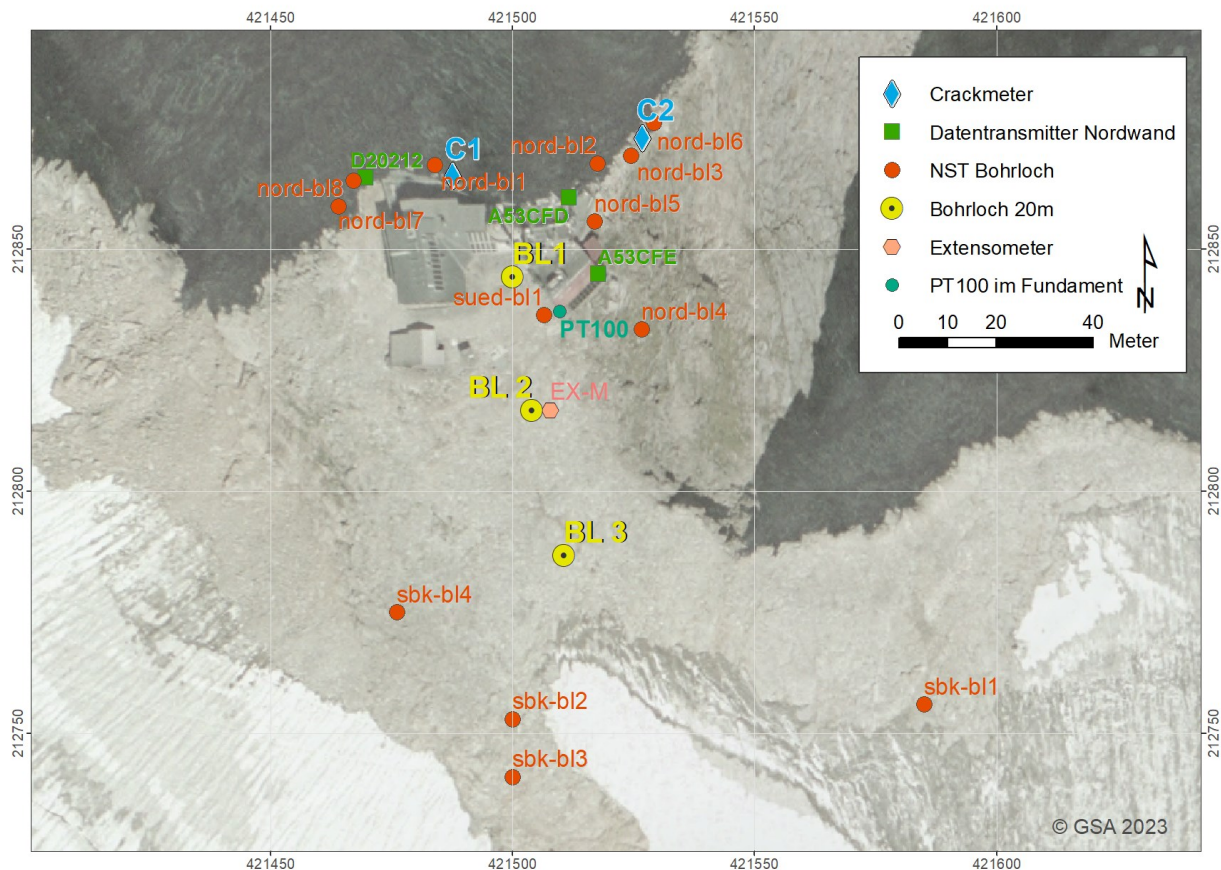


Abbildung 8: Lage der Temperaturmessstandorte im Gipfelbereich des Hohen Sonnblicks.

### 3.1 Global Cryosphere Watch

Im Jahr 2015 rief der 17. Weltmeteorologische Kongress das WMO-Programm Global Cryosphere Watch (GCW) ins Leben und stimmte zu, dass es unmittelbare Priorität für die Erfassung der Kryosphäre und somit die Etablierung von CryoNet, eines der vier WIGOS (WMO Integrated Global Observing System) Komponentenbeobachtungssystemen gibt.

Das Sonnblick-Observatorium zählt zu einer der weltweit ersten „integrated sites“ in der CryoNet-Stationenliste im Rahmen des GCW Netzwerkes. Der Status „integrated site“ bedeutet, dass an einem Standort mehrere Sphären einem Monitoring unterliegen. Die CryoNet-Stationen bilden dabei das Kernelement innerhalb des GCW-Netzwerkes und verfolgt das Ziel alle Komponenten

der Kryosphäre – Schnee, Gletscher, Permafrost und ggf. Meereis – global koordiniert und standardisiert erfasst werden. Den Status „CryoNet“ gilt es zu halten, um zukünftig Forschungsergebnisse im Bereich der österreichischen Alpen zu erhalten, sowie Mitsprache im internationalen Monitoring einzubringen.

Um den Status „CryoNet“ zu erhalten, müssen eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein, wie u.a. die Einhaltung bestimmter Messstandards, die nachweisliche Qualitätskontrolle der Messdaten und den freien Zugang zu den Daten über die entsprechenden Portale.

Diese Voraussetzungen garantieren ein gewisses Mindestmaß an Datenqualität und sind für die weitere Verwendung, wie der Gegenüberstellung bzw. Analyse von Messdaten unterschiedlicher Stationen oder der Verwendung dieser in Vorhersagemodellen für Wetter und Klima, unabdingbar. Das vorrangige Ziel bei allen angewandten Messsystemen ist die Erreichung (i) einer hohen Datenquantität bei gleichzeitiger (ii) hoher Datenqualität.

Ad (i) Datenquantität: Hierfür sind Messsysteme erforderlich, welche die über WLAN, Richtfunk bzw. GSM die Messdaten in naher Echtzeit übermitteln, damit Probleme etwaiger Art schnell erkannt und zeitnah behoben werden können.

Ad (ii) Datenqualität: Aus automatisierten near-realtime-Prüfungen, begleitet von täglich bzw. monatlich durchgeführten Validierungen, sollen homogene Datensätze resultieren, die neben der Veröffentlichung in Jahresberichten und auf der Webseite des Sonnblicks auch an internationale Datenzentren, wie der GTN-P Datenbank, pünktlich geliefert werden. Gleichzeitig müssen veraltete Messsysteme Schritt für Schritt ausgetauscht werden, um die Qualität der Messreihen zu gewährleisten

## 3.2 Datenmanagement

Für die Logger am Messstandort Nordwand wurde in den letzten Jahren aktiv an einer Datenmanagementstrategie und einer Umsetzung gearbeitet und ist nachstehend grob skizziert. Wichtig zu beachten ist, dass in den jeweiligen Datenbanken lediglich Rohdaten eingespielt werden. Weiterführende Überlegungen und Umsetzungen hinsichtlich der Einbindung von Metadaten sowie einer Datenqualitätskontrolle laufen. Die Logger am Messstandort Wintergasse werden jährlich manuell ausgelesen und auf einem internen ZAMG-Server gespeichert.

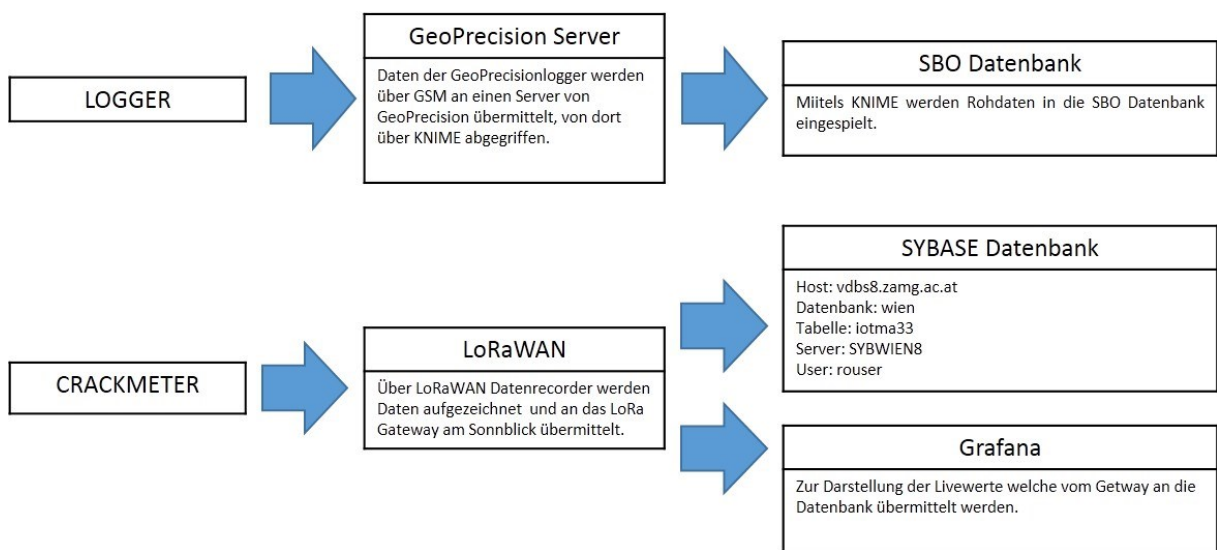


Abbildung 9: Status Quo der aktuellen Datenmanagementstruktur.

## 4. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die im Rahmen des Projektes GCW - Permafrost-Monitoring-Sonnblick durchgeführten Messungen präsentiert, näher erläutert und die Ergebnisse der gewonnenen Daten seit dem Messjahr 2018/19 präsentiert.

### 4.1 Permafrostrelevante Messgrößen BTS, GST und NST

Die Bodenoberflächentemperatur (Ground Surface Temperatur – GST) ist definiert als die Oberflächen- bzw. oberflächennahe Temperatur des Untergrundes, gemessen in den obersten Zentimeter des Bodens. Die GST ist abhängig von der Energiebilanz der Oberfläche wie auch 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. 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 lange 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  $-3^{\circ}\text{C}$  verbirgt sich im Untergrund wahrscheinlich Permafrost. Zwischen  $-3^{\circ}\text{C}$  und  $-2^{\circ}\text{C}$  liegt der Unsicherheitsbereich in dem möglicherweise Permafrost auftritt. Bei Temperaturen größer  $-2^{\circ}\text{C}$  ist der Boden wahrscheinlich nicht das ganze Jahr über gefroren (siehe Abbildung 8).

Eine Erläuterung zu den BTS-Messungen findet sich im Anschluss:

- Die BTS-Messungen zeigen, dass die Höhenabhängigkeit der Bodentemperatur von orografischen Einflüssen überlagert wird. Dies zeigt sich vor allem im Höhenbereich zwischen 2600 und 2650 Meter, wo viele nordexponierte Hangbereiche in der Wintergasse zu finden sind und die Bodentemperaturen oftmals kühler ausfallen, als in den Höhenbereichen darüber. Des Weiteren zeigen die Messungen in der obersten Höhenstufe im Untersuchungsgebiet Wintergasse mit dem

relativ ebenen Gelände und leicht westexponierten Hängen zumeist höhere Bodentemperaturen auf, als in den darunterliegenden Höhenstufen.

- Der Höhenbereich zwischen 3040 und 3100 Meter zeigen die Messungen an der Südflanke des Hohen Sonnblicks und weisen der Höhenlage entsprechend auch über alle Messjahre die niedrigsten Bodentemperaturen mit Werten um die -4 bis -5° C.
- Ausnahmejahr 2020: In diesem Jahr konnten die Feldarbeiten aufgrund der Covid-19 Beschränkungen und der damit zusammenhängenden Lockdown-Maßnahmen nicht wie geplant Anfang März stattfinden, sondern wurden erst zwei Monate später vom 6. – 7. Mai durchgeführt. Die überdurchschnittliche Sonnenscheindauer sowie die überdurchschnittlichen Lufttemperaturen, vor allem in der zweiten Märzhälfte und im Laufe des Aprils, führten dazu, dass Anfang Mai zum Zeitpunkt der Messarbeiten die Schneedecke bereits isotherm war. D.h. die Bodentemperatur lag an allen Messstandorten der unterschiedlichen Höhenbereiche nahe der Nullgradgrenze.

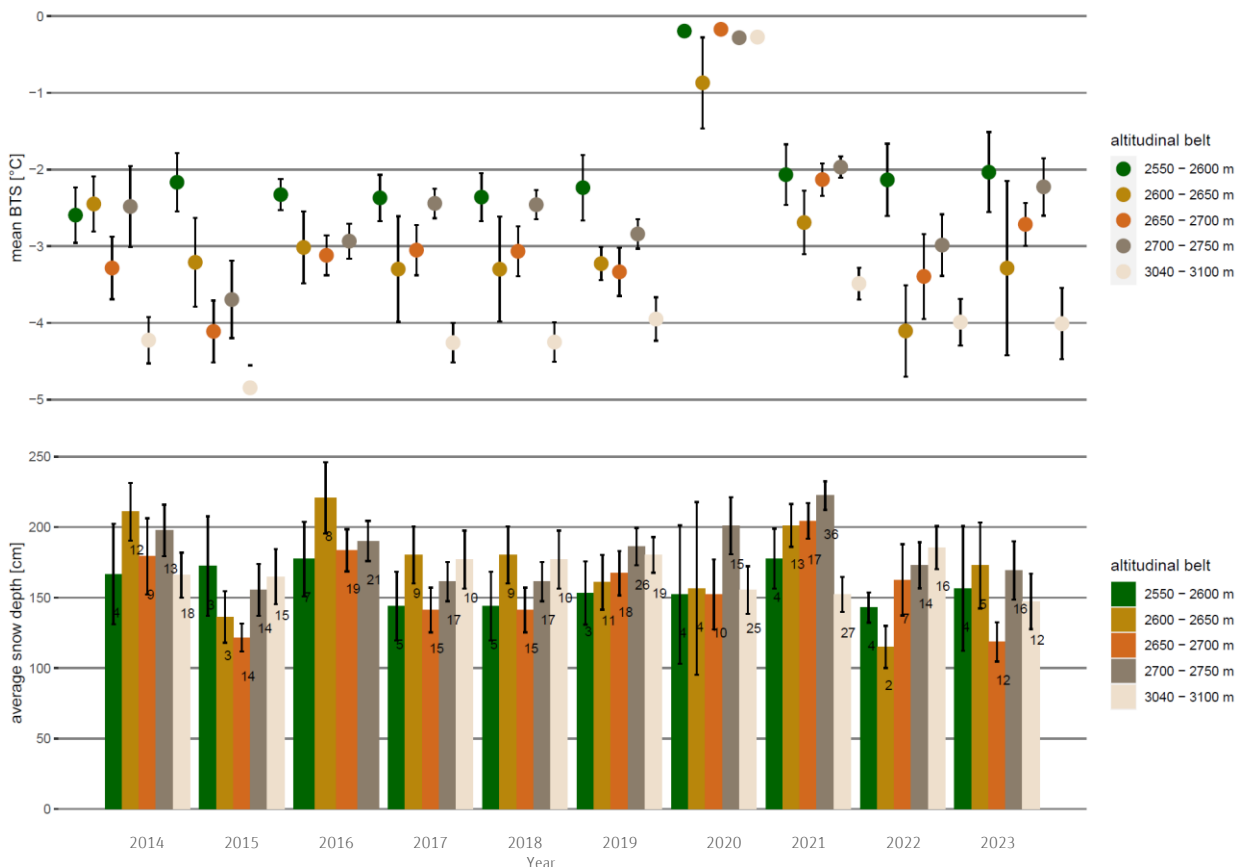


Abbildung 10: Mittlere BTS und mittlere Schneetiefe nach Höhenstufen (numerischer Wert im Balken steht für die Anzahl an Messungen, die für jede Höhenstufe zur Verfügung standen).

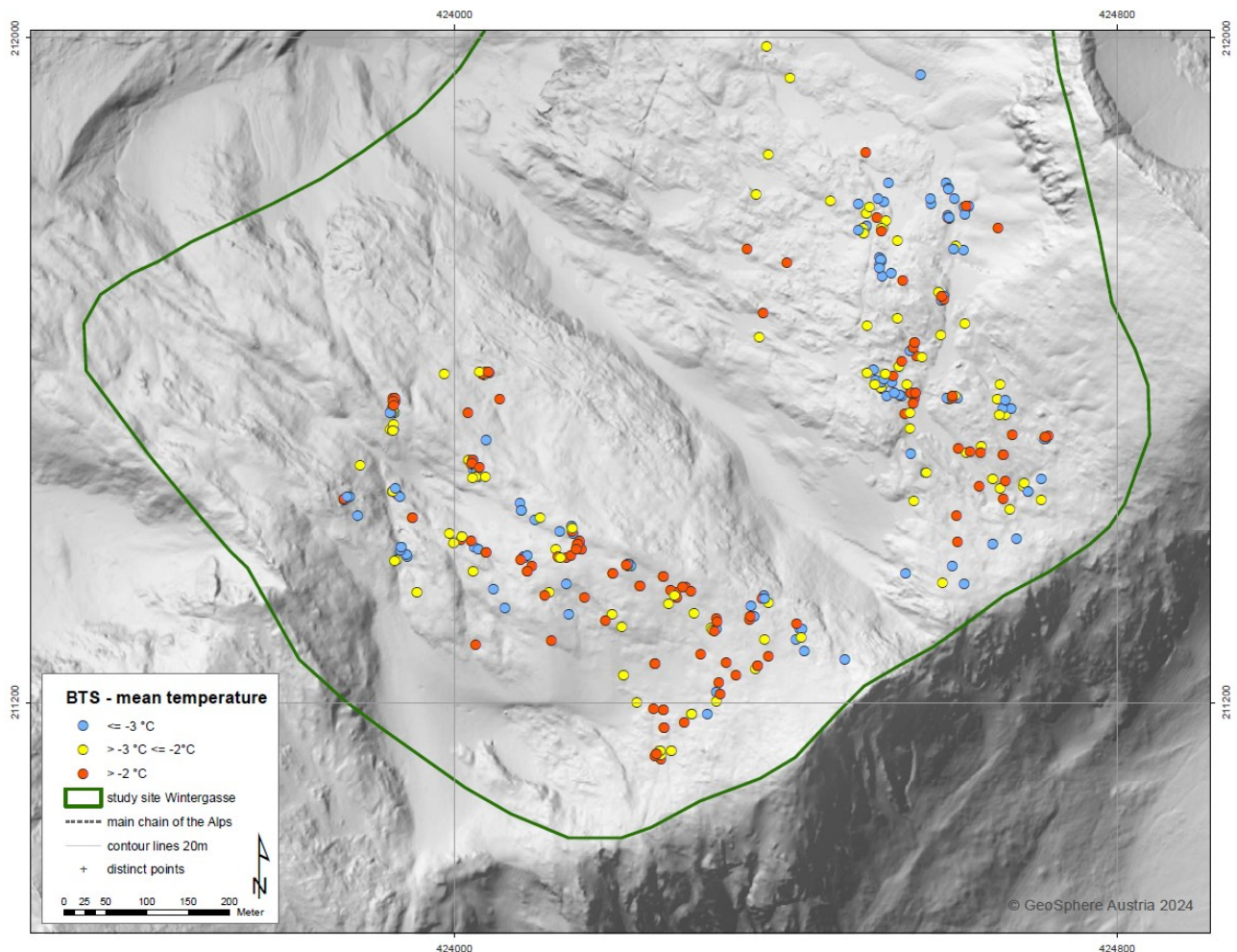


Abbildung 11: Basistemperatur der Schneedecke in der *Wintergasse* in den Jahren 2014-2018.

Auf Basis der GST-Messungen werden neben der mittleren jährlichen Bodentemperatur (MAGST – mean annual ground surface temperatur) und der winterlichen Gleichgewichtstemperatur (WEqt – winter equilibrium temperatur) auch der Bodengefrierindex (GFI – ground freezing index) sowie der Schmelzgradindex (THI – thawing index) berechnet. Diese Werte drücken zum einen das Auskühlen und zum anderen den Wärmeeintrag in den Boden aus. Auf Basis der jährlichen GFI und THI-Werte lassen sich die einzelnen Haushaltsjahre untereinander vergleichen (siehe Abbildung 9) und lassen wichtige Erkenntnisse im Hinblick auf lokalspezifische Wärmeeinträge zu.

Die GST-Messungen in feinem bis grobblockigem Oberflächenmaterial wurden im zugrundeliegenden Beobachtungszeitraum im Untersuchungsgebiet Wintergasse an 29 Standorten weitergeführt. Aufgrund von technischen Defekten bei den Temperaturloggern standen für die Auswertung der MAGST, WEqt und GFI sowie THI 20 Datenlogger zur Verfügung. Die Defekte sind auf Wassereintritte ins Loggergehäuse, defekte Batterien oder auch die bereits in die Jahre gekommenen Logger verantwortlich.

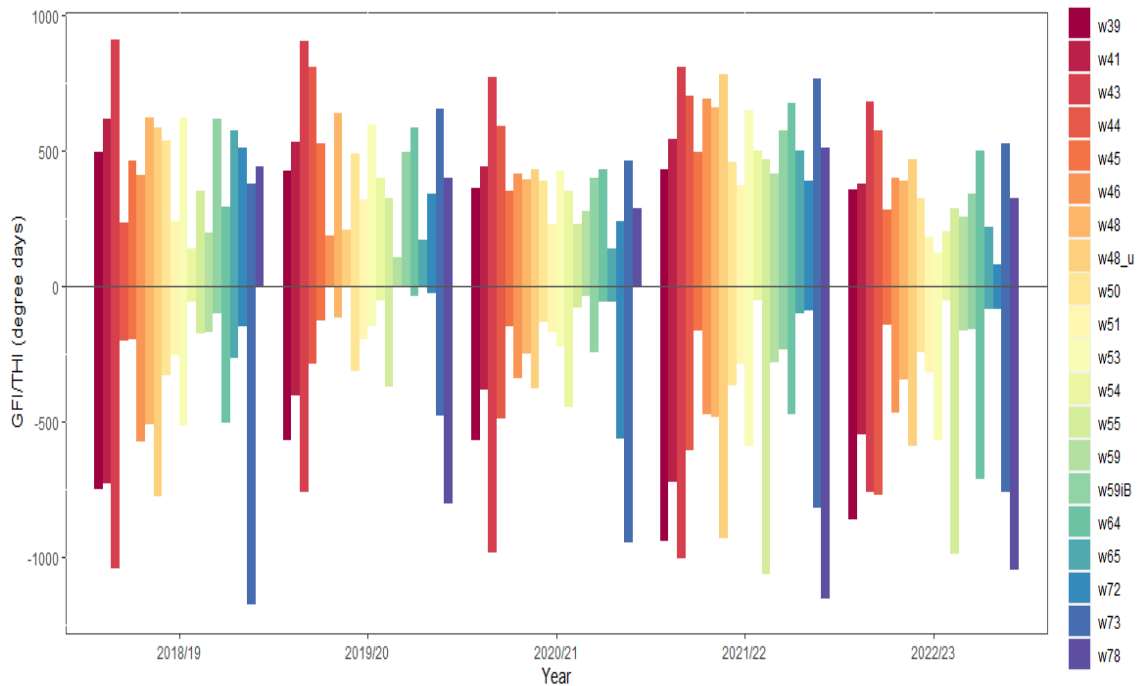


Abbildung 12: Bodengefrierindex (GFI) und Schmelzgradindex (THI) – tägliche negative Gradtagssumme und tägliche positive Gradtagssummen- der GST-Standorte im Untersuchungsgebiet Wintergasse.

In **Tabelle 1** 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  $0^{\circ}\text{C}$  und lässt somit auf Permafrostbedingungen schließen (siehe die blau markierten Werte in **Tabelle 1**:). Betrachtet man bei diesen Standorten die Werte der mittleren WEqT zeigt sich ein sehr heterogenes Bild. Nur teilweise tritt eine WEqT von  $< -3^{\circ}\text{C}$  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  $\geq 3$  Jahre) und bleiben bei der Interpretation unberücksichtigt. Bei drei Standorten liegen die Werte der MAGST  $> 0^{\circ}\text{C}$  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 zeigt sich ein sehr gegensätzliches Bild. Die schneearmen Winter in den zwei Messjahren 2021/22 und 2022/23, wie es auch schon in den Jahren 2014/15, 2016/17 und 2017/18 zu beobachten war (siehe Endbericht 2014-2018), zeigen wesentlich höhere Kälteeinträge in den Boden als in den Haushaltsjahren 2018/19 und 2020/21 zu



beobachten war. Das frühe Ausapern wird vor allem im Jahre 2021/22 durch die hohen positiven Indexwerte angezeigt und führte jeweils zu den höchsten Wärmeeinträgen im gesamten Untersuchungszeitraum. Die hohen Wärmeeinträge des Jahres 2022 ist auf weit unterdurchschnittlichen Winter mit geringen Schneehöhen zurückzuführen. Im Vergleich dazu weisen die Jahre 2018/19, 2019/20 und 2021/22 mit Schneehöhen, die dem Mittel entsprechen wesentlich niedrigere Werte auf.

Die räumliche Verteilung der GST-Messungen im Untersuchungsgebiet Wintergasse ist in **Abbildung 13** 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.

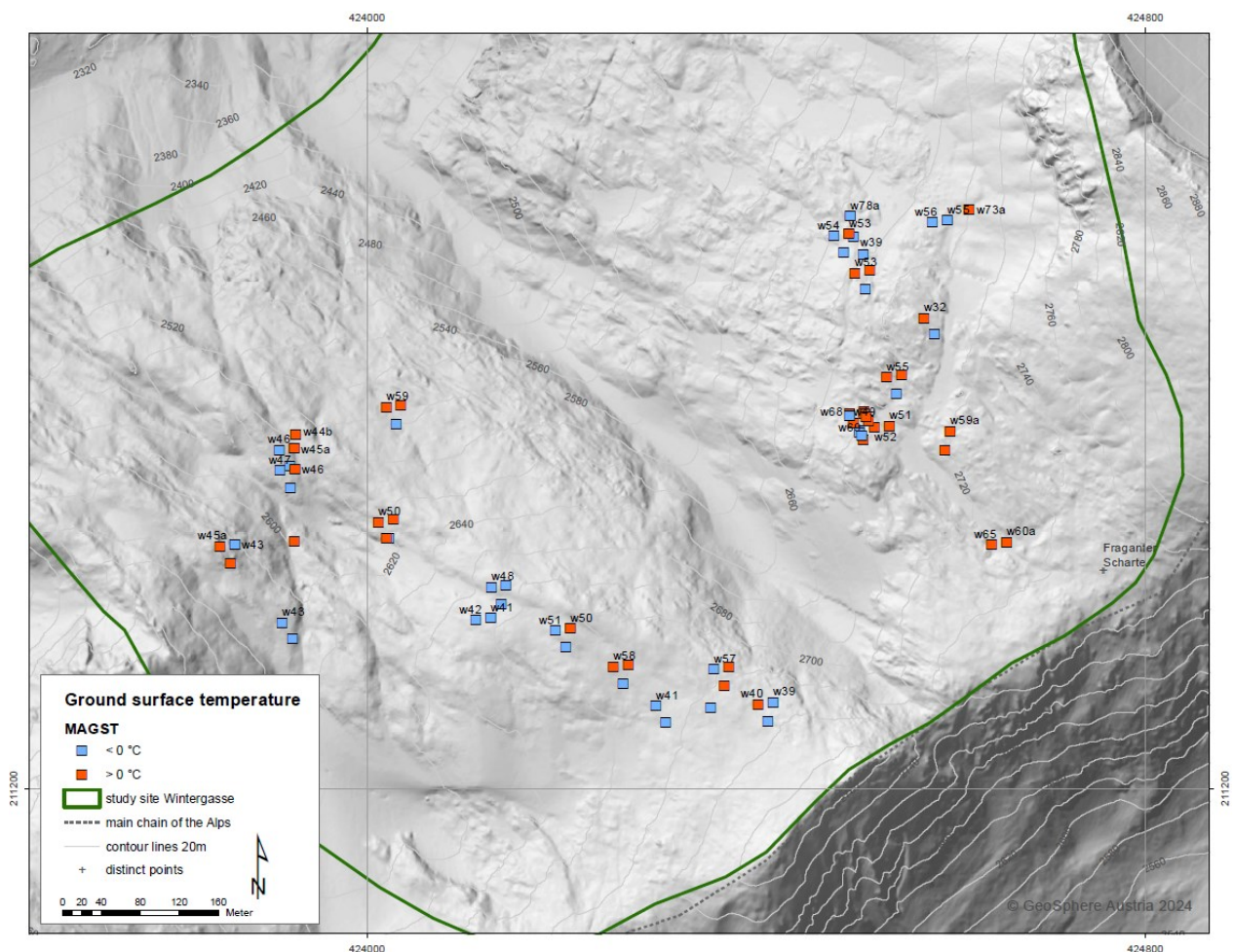


Abbildung 13: Mittlere jährliche Bodentemperatur (MAGST) im Untersuchungszeitraum an den Messstandorten im Untersuchungsgebiet Wintergasse.



Foto oben: Stefan Reisenhofer beim Auslesen der Temperaturlogger auf dem Nordostgrat am Hohen Sonnblick. Aufnahme von Wolfgang Rohrmoser am 26.08.2022.

Foto links: Bergführer Wolfgang Rohrmoser unterstützt tatkräftig die Arbeiten für die Installation des Temperaturstrings am Standort sbk-nord. Aufnahme am 23.08.2021.

Foto rechts: Stefan Reisenhofer und Daniel Binder nach Abschluss der Installation des Loggers sbk-bl 5 unweit der Seilbahn-Bergstation. Aufnahme von Stefan Reisenhofer im Mai 2019.

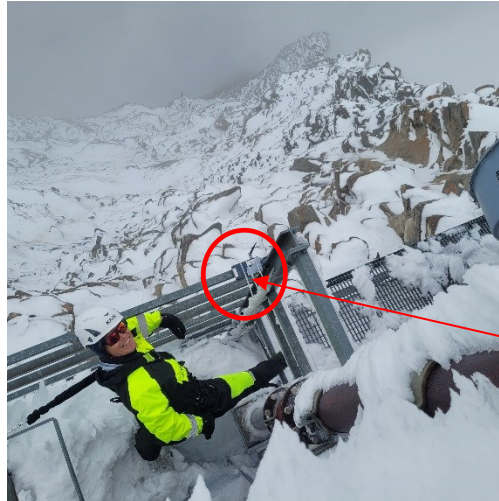
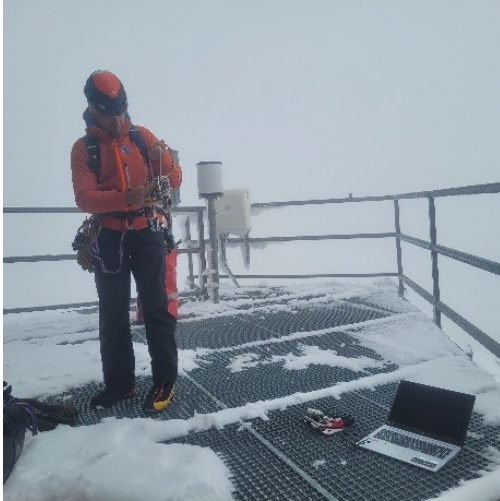


Foto links:  
winterlicher  
Geländeinsatz Anfang Juli  
2022: Bergführer Wolfgang  
Rohrmoser bereitet sich  
zum Batteriewechsel der  
Logger in der Nordwand  
vor.  
Fotos rechts:  
Techniker Simon Feigl beim  
Anbringen eines  
Datentransmitters.



Foto links:  
Anton Neureiter wird im  
Untersuchungsgebiet  
Wintergasse von einer  
Schafsherde  
überrascht.  
Foto rechts:  
Anton Neureiter bei  
beim Einmessen der  
Messstandorte mittels  
DGPS.

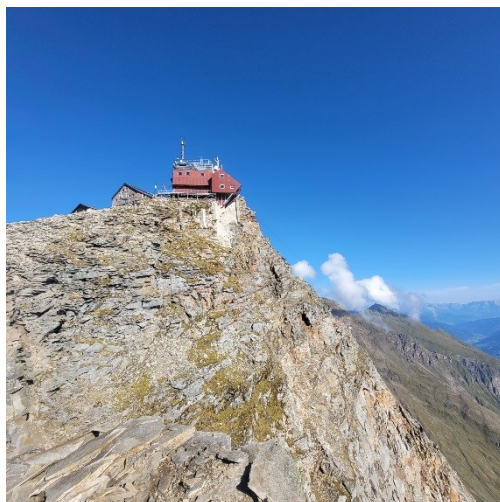


Foto links:  
Blickrichtung für die  
Laserscanneraufnahme  
des Hohen Sonnblicks.  
Foto rechts:  
Geodät Matthias Rathofer  
mit seinem Team beim  
Aufbau des  
Laserscanners.

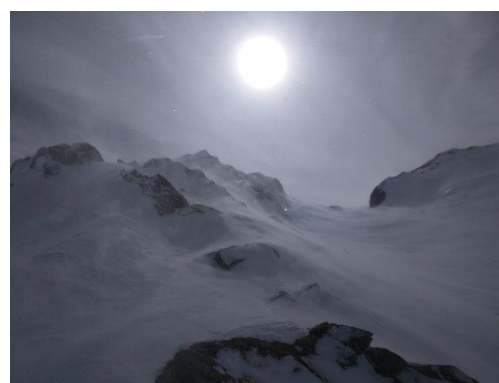


Foto links: Feldmessungen  
im Untersuchungsgebiet  
Wintergasse am 4. März  
2019 - Kollege Anton  
Neureiter während  
Messarbeiten.  
Foto rechts: Intensives  
Schneetreiben durch  
immer sehr lebhaftes Böen  
während der  
Feldmessungen.

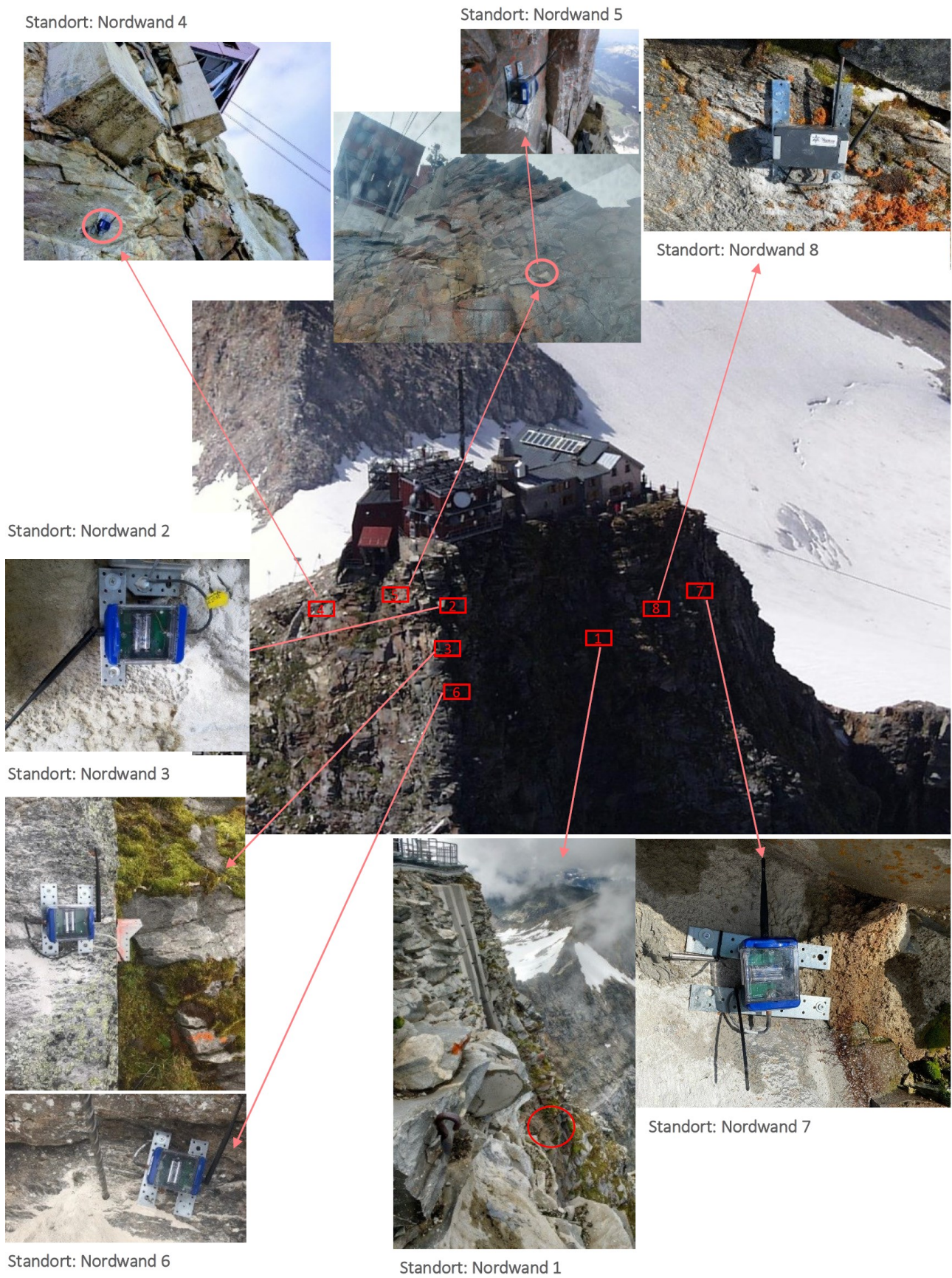


Abbildung 14 Lage der Temperaturmessstanorte an der Nordwand des Hohen Sonnblicks.

Tabelle 1: Zusammenfassung der GST-Standorte im Untersuchungsgebiet Wintergasse (blaue Markierung: Permafrost wahrscheinlich; gelbe Markierung: Permafrost möglich; rote Markierung: Permafrost unwahrscheinlich).

Location	ELE [m]	Slope [°]	Aspect	Sensor	Substrate	MAGST	MAGST	MAGST	MAGST	WEqT	WEqT	WEqT	WEqT	GFI	GFI	GFI	GFI	THI	THI	THI	THI
						2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22
w32	2675	30	northwest	Onset	very coarse debris	0.22	0.5	-0.05	1.04	-2.71	-1.45	-2.04	-1.97	-411	-153	-387	-174	492	336	369	515
w39	2739	19	northwest	UTL	bedrock	-0.7	-0.4	-0.57	-1.57	ND	ND	-2.19	ND	-753	-573	-571	-943	498	426	362	430
w40	2719	15	northwest	UTL	coarse debris	0.53	0.59	NA	NA	-1.44	-0.53	NA	NA	-210	-60	NA	NA	403	255	NA	NA
w41	2685	33	northwest	UTL	debris	-0.31	0.36	0.15	-0.56	ND	-3.37	-2.06	ND	-730	-403	-386	-726	616	535	440	544
w42	2629	26	East	Onset	coarse debris	-0.32	NA	NA	NA	-2.85	NA	NA	NA	-401	NA	NA	NA	296	NA	NA	NA
w43	2637	42	north	Onset	bedrock	-0.37	0.4	-0.58	-0.6	ND	ND	ND	ND	-1044	-761	-987	-1005	909	906	774	810
w45a	2591	24	northeast	UTL	bedrock	0.73	1.08	0.56	1.01	-0.77	-0.53	-0.53	-0.73	-196	-129	-148	-168	462	525	354	497
w46	2598	12	northeast	i-button	bedrock	-0.5	5.13	0.19	0.67	ND	NA	-1.74	-4.04	-574	NA	-342	-472	410	185	413	690
w47	2680	18	west	UTL	organic/debris	-1.37	-0.66	-1.15	-1.73	ND	ND	ND	ND	-1263	-933	-970	-1263	764	691	551	697
w48	2699	22	southwest	i-button	fine-grained material	-0.82	NA	NA	NA	ND	NA	NA	NA	-762	NA	NA	NA	490	NA	NA	NA
w49	2619	27	west	UTL	coarse debris	0.47	0.02	NA	NA	-1.38	-0.65	NA	NA	-279	-92	NA	NA	450	99	NA	NA
w50	2701	21	northwest	UTL	weathered bedrock	0.58	0.48	0.7	0.29	-2.48	-3.4	-1.03	-3.19	-327	-317	-134	-366	538	491	391	460
w51	2704	28	northwest	UTL	coarse debris	-0.04	0.34	0.15	0.26	-1.87	-2.17	-1.09	-2.09	-257	-195	-173	-289	242	320	227	375
w52	2687	35	north	Onset	coarse debris	0.33	0.34	NA	NA	-2.61	-1.03	NA	NA	-399	-137	NA	NA	519	250	NA	NA
w53	2670	23	west	Onset	coarse debris	0.3	1.23	0.55	0.18	-3.39	-1.46	-1.06	ND	-516	-147	-226	-590	625	597	428	650
w54	2706	15	northwest	UTL	coarse debris	-0.03	NA	NA	NA	-3.33	NA	NA	NA	-499	NA	NA	NA	489	NA	NA	NA
w55	2701	23	northwest	UTL	very coarse debris	0.79	-0.13	-0.55	-1.83	-0.4	-2.45	-2.14	ND	-60	-374	-428	-1065	349	327	227	468
w56	2719	14	norht	Onset	debris	-1.66	-0.12	NA	NA	ND	ND	NA	NA	-1103	-591	NA	NA	498	552	NA	NA
w57	2708	6	northwest	Onset	debris/soil	-0.21	-0.03	NA	NA	ND	-0.44	NA	NA	-869	-55	NA	NA	793	46	NA	0
w58	2581	19	northwest	UTL	debris	0.58	NA	NA	NA	-0.47	NA	NA	NA	-94	NA	NA	NA	287	NA	NA	NA
w59	2725	22	northwest	UTL	debris	0.07	2.9	0.55	0.41	-0.76	NA	-0.31	-2.36	-175	NA	-80	-281	197	104	279	413
w60	2730	13	west	UTL	debris/bedrock	NA	NA	2.98	1.01	NA	NA	NA	-0.73	NA	NA	-1	-168	NA	NA	129	496
w65	2614	14	northwest	i-button	bedrock 2cm depth	0.27	NA	NA	NA	-0.75	NA	NA	NA	-150	NA	-60	-103	578	172	137	501
w68	2691	68	west	i-button	debris	1.25	NA	NA	NA	-0.93	NA	NA	NA	-106	NA	NA	NA	521	NA	NA	NA
w69	2690	19	northwest	i-button	debris	-0.79	NA	NA	NA	ND	NA	NA	NA	-826	NA	NA	NA	563	NA	NA	NA
w70	2689	13	west	i-button	debris	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
w74	2622	25	west	i-button	debris	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
w75	2676	17	northwest	i-button	debris	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
w76	2717	19	northwest	i-button	debris	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

\*Auslesung erfolgte

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. am 25. August – 365 Tage weniger 34 Tage = 330 Tage

Im Zuge der Erweiterung der Messstandorte im Bereich der Nordwand am Hohen Sonnblick wurden seit 2016 in Summe acht ein Meter tiefe Bohrlöcher mit jeweils sechs Temperatursensoren in einer Tiefe von 0 cm, -20 cm, -40 cm, -60 cm, -80 cm und -100 cm installiert (siehe Beilage DOKU\_NST\_Südflanke\_&\_Nordwand). Zwei dieser Messstandorte wurden im August 2021 im nordwestexponierten Bereich der Gipfelpyramide eingerichtet. Beide Standorte befinden sich etwa 20 bis 25 Meter unterhalb der Zittelhausterrasse. Standort „nord-bl8“ umfasst einen Datentransmitter (D20212) mit direkter Anbindung des Temperaturstrings und am Standort „nord-bl7“ ist ein MLog5W in einem modifizierten Kunststoffgehäuse, wie bereits die im Jahr angeschafften Logger, angebracht. Dieses Gehäuse besitzt den Vorteil einer Außenantenne mit größerer Überreichweite und stabilerer Übertragung, und macht eine Wartung (Batterienwechsel) vor Ort möglich, was den Arbeitsaufwand erheblich mindert.

Tabelle 2: Zusammenfassung der aktuell vorhandenen Bohrlöcher im Bereich des Gipfels Hoher Sonnblick.

Name	LON [°]	LAT [°]	E [m]	Slope [°]	Aspect	Borehole depth [cm]	Sensor depth [cm]	Sensor	Substrate	Measuring start
sbk-nord 1 A53AF0	12.957967	47.054713	180	80	north	100	100, 80, 60, 40, 20, 1	M-Log5W	bedrock	Aug. 2016
sbk-nord 2 A53AEE	12.958411	47.054717	185	75	north	100	100, 80, 60, 40, 20, 1	M-Log5W	bedrock	Aug. 2018
sbk-nord 3 A53AEF	12.958501	47.054732	180	75	northeast	100	100, 80, 60, 40, 20, 1	M-Log5W	bedrock	Aug. 2018
sbk-nord 4 A53ADD	12.958533	47.054409	185	85	east	100	100, 80, 60, 40, 20, 1	M-Log5W	bedrock	Aug. 2019
sbk-nord 5 A53ADE	12.958405	47.05461	195	90	northeast	100	100, 80, 60, 40, 20, 1	M-Log5W	bedrock	Aug. 2019
sbk-nord6 A53ADC	12.958564	47.054793	165	75	northeast	100	100, 80, 60, 40, 20, 1	M-Log5W	bedrock	Aug. 2019
sbk-nord7 D10212	12.957706	47.054635	176	85	west	100	100, 80, 60, 40, 20, 0	M-Log5W	bedrock	Aug. 2021
sbk-nord8 A53D85	12.957748	47.054635	171	85	west	100	100, 80, 60, 40, 20, 0	M-Log5W	bedrock	Aug. 2021
sbk-bl1	12.9593	47.0537	155	17	southeast	80	20, 40, 60, 80	obbo 4 Kanal	debri	Sept. 2014
sbk-bl2	12.9581	47.0536	158	29	southwest	40	20, 40	obbo 4 Kanal	debris	Sept. 2014
sbk-bl3	12.9581	47.0535	168	20	southwest	76	76, 56, 36, 16, surface	MLog 5	bedrock	Aug. 2015
sbk-bl4	12.9578	47.0538	168	39	southwest	80	80, 60, 40, 20, 1	MLog 5	bedrock	Aug. 2015

Die Datentransmitter sorgen für die automatische Übertragung der stündlich aufgezeichneten Temperaturdaten. Dieser scannt jede Stunde die aktuellen Daten des Loggers und überträgt diese alle sechs Stunden per GSM an einen Internetserver. Die limitierte Reichweite bei der Datenübermittlung zwischen Temperaturlogger und Datentransmitter bedingt eine gleichmäßige räumliche Verteilung der Transmitter um die Gipfelpyramide des Hohen Sonnblicks, um eine stabile Funkverbindung zu allen Messstandorten zu garantieren. Leider liegt seit September 2021 beim Datentransmitter A53CFD ein technisches Problem vor, sodass derzeit nur sechs der acht Logger aktuelle Messwerte übermitteln.

Aktuelle Messwerte von vier dieser Standorte sind unter <https://www.sonnblick.net/de/daten/aktuelle-messdaten/permafrost/> abrufbar (siehe nachstehende Abbildungen).

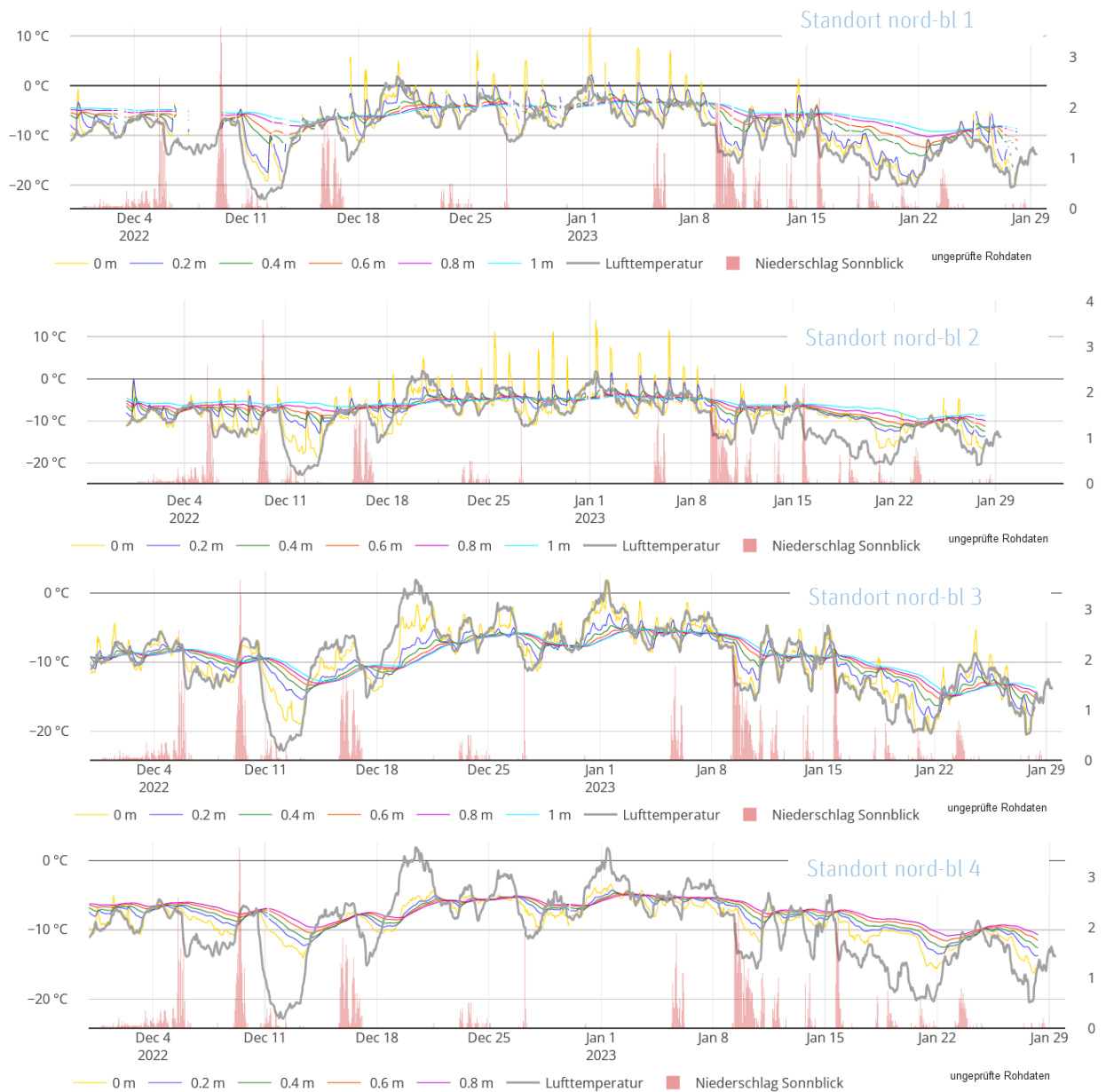


Abbildung 15: Webdarstellung des Temperaturverlaufs von vier Messstandorten in der Nordwand und Sonnblick Lufttemperatur und Niederschlagsummen der letzten drei Monate.

## 4.2 Überwachung der Steinschlag- und Felssturzaktivitäten

Eine weitere Form des alpinen Permafrostes ist der Spaltenfrost in Festgesteinen, der vor allem im Hinblick auf Steinschlag- und Felssturzaktivitäten eine der größten Herausforderungen im Hinblick auf die rezente Klimaerwärmung mit sich bringt. Dringt Wasser in die Klüfte und Spalten des Festgesteines ein und gefriert, dann entsteht Spaltenfrost. Solange das Eis in den Klüften und Spalten erhalten bleibt, kommt dem Eis eine stabilisierende Wirkung zu teil. 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, und das vor allem aus steilen Felsflanken. Dies stellt auch ein noch nicht abschätzbares Risiko für Wanderwege, Kletterrouten und hochalpine Infrastrukturen, sowie für alle Akteure in diesen Gebieten dar. Ziel ist die Identifikation von Steinschlag- und Felssturzablösebereichen in der Nordwand des Hohen Sonnblicks. Inhaltlich knüpft das Arbeitspaket somit direkt an das Projekt „SeisRockHT“, welches durch die ÖAW (Österreichische Akademie der Wissenschaft) im Zeitraum von 2015 bis 2018 finanziert war, an. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Sonnblick-Nordwand auf Basis von jährlich durchgeführten terrestrischen Laserscans überwacht. Übergeordnetes Ziel der von der Firma GEORESEARCH durchgeführten Laserscanmessungen war dabei die Kombination der detektierten Ablösebereiche mit den Ergebnissen des parallel laufenden, passiven seismischen Monitorings für ein verbessertes Verständnis der hochalpinen Steinschlag- bzw. Felssturzdynamik. Das kontinuierliche seismische Monitoring ist eine bewährte Untersuchungsmethode für selten auftretende Ereignisse, wie zum Beispiel Steinschlag und Felsstürze. Das seismische Beobachtungsnetzwerk wurde nach Projektabschluss im Sommer 2018 in das österreichische seismische Netz integriert und auch weiterhin von der Abteilung Seismologie der GeoSphere Austria betreut. Im Zuge einer Kooperation mit der Firma GEORESEARCH (Kontakt: Mag. Ingo Hartmeyer) und dem Departement Seismologie (Kontakt: Mag. Daniel Binder) der GeoSphere Austria wird das Felswand-Monitoring fortgesetzt, wobei in methodisch-technologischer Hinsicht jedoch auf eine wesentliche Neuerung gesetzt wird. An Stelle von terrestrischem Laserscanning wird für die Datenerfassung die drohnenbasierte Photogrammetrie eingesetzt, welche gegenüber dem Laserscanning eine Reihe entscheidender Vorteile bietet. Drohnenbefliegungen können in unmittelbarer Wandnähe durchgeführt werden und ermöglichen damit die Einhaltung einer gleichmäßigen, kurzen Objektdistanz (= Distanz zwischen Ort der Datenerfassung und untersuchtem Objekt). Im Gegensatz dazu sind die am Sonnblick durchgeführten



Laserscanmessungen an drei festgelegte Standorte (Scanpositionen) im Bereich des Pilatuskees gebunden. Speziell für den oberen Wandbereich und damit für das unmittelbare Umfeld des Sonnblick-Observatoriums ergeben sich daraus erhebliche Datenqualitätsprobleme, da hier die hohe Objektdistanz von mehr als 1 km zu einer geringen Punktdichte, sowie zu vergleichsweise hohen Positionsungenauigkeiten führte. Drohnenbefliegungen hingegen garantieren durch den frei wählbaren Befliegungsabstand zur Felswand eine gleichbleibend hohe Datenqualität für den gesamten Wandbereich.

Schönwetterphasen und gleichmäßigen Lichtverhältnissen. Die von der Firma GEORESEARCH entwickelte Methodik umfasst darüber hinaus den Einsatz modernster photogrammetrischer Analysetechniken und gewährleistet, je nach gewählten Erfassungsparametern, Auflösungen im 1cm- bzw. 10cm-Bereich.

Die durch den Drohneneinsatz signifikant verbesserte Datenqualität ermöglicht eine exakte, flächendeckende Beurteilung der Steinschlagaktivität in der gesamten Nordwand des Hohen Sonnblicks, wobei der Fokus des Arbeitspakets auf dem direkten Umfeld des Observatoriums liegt. Das resultierende, hochpräzise Steinschlaginventar bildet in weiterer Hinsicht eine entscheidende Grundlage für die Beurteilung der lokalen Entwicklung der Felsstabilität, welche gerade im Kontext von rezemem Klimawandel und hochalpiner Permafrostdegradation von besonders hohem Wert ist.

Nachstehender Abschnitt wurde von Dr. Ingo Hartmeyer, Robert Delleske MSc., Dr. Markus Keuschnig von Georesearch im Rahmen der Werkvertragsvereinbarung zur Überwachung der Steinschlag- und Felssturzaktivitäten in der Sonnblick-Nordwand erstellt.

## **4.2.1 Drohnenbasierte Photogrammetrie**

### *4.2.1.1 Datenerfassung*

Die Photogrammetrie-Befliegungen der Nordwand des Rauriser Sonnblicks mittels UAV (Unmanned Aerial Vehicle) werden seit dem Jahr 2019 einmal jährlich immer am Ende der Ablationsperiode durchgeführt. Auf Grund der schneefreien Bedingungen und der maximalen glazialen Ausaperung herrschen zu diesem Zeitpunkt optimale Bedingungen hinsichtlich der Detektion von Felssturz-Ablösebereichen vor. Die erstmalige Befliegung erfolgte am 26.08.2019. Folgebefliegungen wurden am 05.09.2020, 19.08.2021 und 25.08.2022 und 23.8.2023 durchgeführt. Zur exakten Referenzierung der Drohnenaufnahmen wurden vor der ersten UAV-Befliegung insgesamt zehn Bodenkontrollpunkte (GCPs) am Wandfuß bzw. im Gratbereich installiert (Abbildung 16). Die Eckdaten der durchgeführten UAV-Befliegung werden im Anschluss beschrieben. Die Befliegung wurde seit dem Beginn mit einem UAV des Typs DJI Phantom 4 Pro mit PPK-GPS-Erweiterung

durchgeführt. Dem Aktionsradius der Drohne sowie den flugrechtlichen Rahmenbedingungen entsprechend wurden in allen Jahren zwei unterschiedliche Drohnenstartpunkte gewählt: der Gratbereich östlich des Observatoriums und der Fußbereich der Sonnblick-Nordwand (siehe Abbildung 16). Der Gesamtmission lagen jeweils sechs Flugpläne mit einer Gesamtstrecke von ca. 30 km zu Grunde. Zur Vermeidung von Abschattungen und zur Gewährleistung eines lückenlosen Modells der gesamten untersuchten Flanke, erfolgten die Aufnahmen sowohl im Nadir als auch im rechten Winkel zur (mittleren) Geländeneigung. Die Zielauflösung betrug dabei 5 cm. In den einzelnen Jahren deckt das beflogene Gebiet jeweils eine Wandfläche von rund 1,2 km<sup>2</sup> in Höhenlagen zwischen 2 200 und 3 100 m üNN ab. Während der Mission wurden über 700 Bilder im Rohdatenformat aufgenommen. Gleichmäßige Lichtverhältnisse während der Dauer der Befliegung ermöglichten eine sehr hohe Datenqualität.

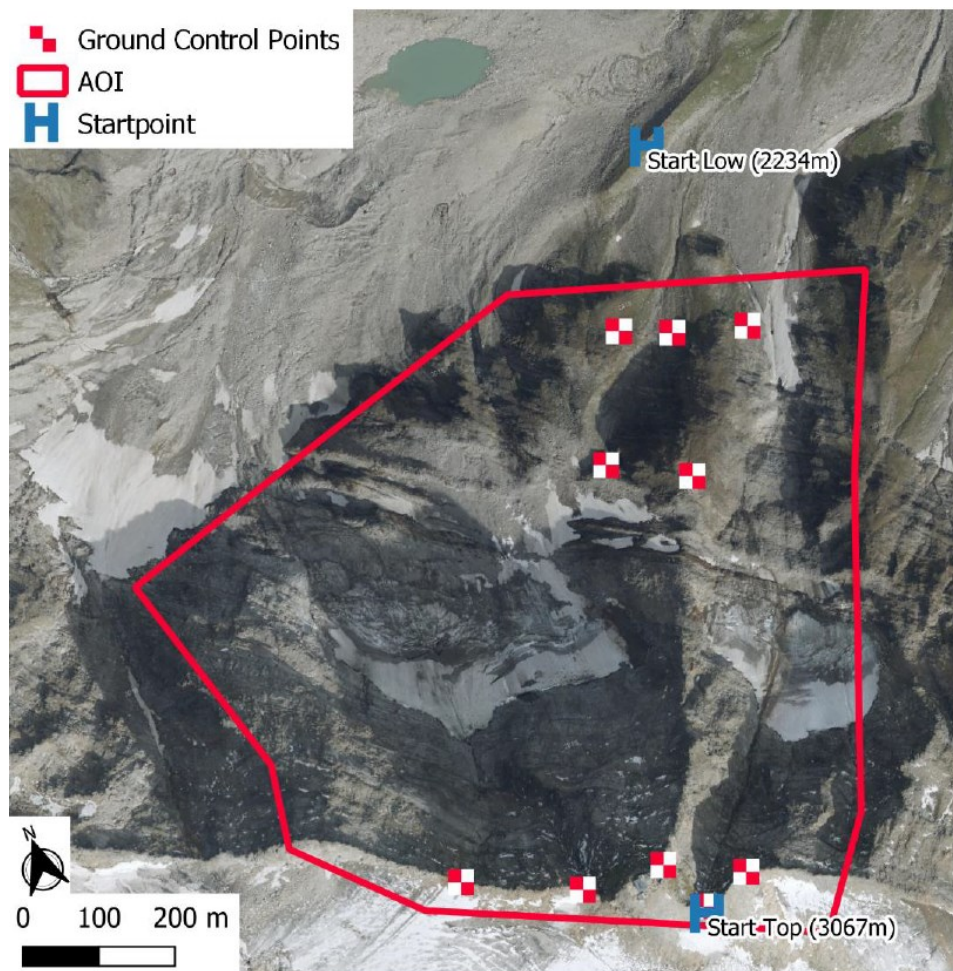


Abbildung 16: Lage der insgesamt zehn Bodenkontrollpunkte im Untersuchungsgebiet (Installation im Sommer 2019). Das photogrammetrisch beflogene Untersuchungsgebiet (AOI) ist rot umrahmt. Die Startpunkte der Befliegungen befinden sich im Wandfußbereich („Start Low“) und am Observatorium („Start Top“).

#### 4.2.1.2 Auswertung der Photogrammetriedaten

Im Rahmen der Auswertung wurden die erfassten RAW-Dateien mit Hilfe eines RAW-Konverters optimiert und als JPG ausgespielt. Dadurch werden sowohl in hellen als auch in dunklen Bereichen die erforderlichen Kontraste erzielt, um ein homogenes, flächendeckendes Modell zu generieren. Die Prozessierung erfolgte wie in den Vorjahren mittels der Software Pix4d. Im Gegensatz zur Vorjahresbefliegung, die durch wechselnde Lichtverhältnisse negativ beeinflusst wurde, herrschte bei der diesjährigen Befliegung wieder eine weitgehend einheitlich Beleuchtung vor. Die resultierende Punktwolke weist dementsprechend eine hohe Datendichte (rund 80 Millionen Punkte) und präzise repräsentierte Oberflächen auf.

#### 3.2.1.3. Identifizierung von Steinschlagablösebereichen (Multitemporale Differenzanalyse)

Die Identifizierung der Steinschlag-/Felssturzaablösebereiche folgte in allen Jahren seit 2019 dem gleichen methodischen Ablauf und ermöglicht daher eine direkte Vergleichbarkeit. Der Analyseablauf wird im Anschluss in Grundzügen beschrieben, für weitere Details wird auf die Publikationen von Hartmeyer et al. 2020a und 2020b verwiesen. Voraussetzung für die Differenzanalyse (Volumenanalyse) ist der exakte räumliche Abgleich der Punktwolken, welcher im Rahmen der vorliegenden Untersuchung mit Hilfe eines ICP-Algorithmus durchgeführt wurde, in dessen Rahmen die Abstände zwischen den Punktwolken schrittweise minimiert wurden (Chen & Medioni 1992, Besl & McKay 1992). Veränderte Oberflächen (z.B. Gletscherflächen, Steinschlagablösebereiche) werden durch die Ausschlusskriterien des ICP-Algorithmus nicht berücksichtigt und verringern somit nicht die Qualität des Oberflächenabgleichs. Die an den Oberflächenabgleich anschließende multitemporale Differenzanalyse wurde mit der frei verfügbaren Software CloudCompare durchgeführt. Das Plugin M3C2 erlaubt dabei orthogonale Differenzberechnungen in komplexem Terrain und ist somit für die Bestimmung von Oberflächenveränderungen in geometrisch heterogenen, stark reliefierten Felswänden gut geeignet (Lague et al. 2013). Im Rahmen der Analyse werden in Abhängigkeit von der lokalen Oberflächenrauigkeit Normalvektoren bestimmt, entlang derer im Anschluss Distanzmessungen durchgeführt werden. Der M3C2-Algorithmus operiert direkt auf den verglichenen Punktwolken (ohne Meshing/Gridding), erlaubt die Berechnung lokaler Konfidenzintervalle (Unsicherheiten) und ist besonders gut für den Vergleich von Punktwolken mit variierender Datenqualität (Punktdichte). Im Anschluss an die Identifizierung der Ablösebereiche wurden deren Volumina berechnet. Hierbei wurden für jeden Ablösebereich lokale Grids erstellt, deren Einzelzellen nachfolgend aggregiert wurden. Zusätzlich zu den Volumina wurden für jeden identifizierten Ablösebereich die mittlere

Neigung, der mittlere Azimuthwinkel (Exposition) sowie die maximale Versagenstiefe berechnet. geeignet.

#### 4.2.1.4 Ergebnisse

Im Rahmen der multitemporalen Differenzanalyse zwischen den 2019 drohnenbasiert erhobenen Photogrammetriedaten und den terrestrischen Laserscans aus dem Jahr 2018 (ermittelt von drei Scanpositionen im Vorfeld des Pilatuskees) wurden insgesamt 15 Steinschlag- bzw. Felssturzablösebereiche identifiziert (Tabelle 3, Abbildung 17). Die Größe der ermittelten Kubaturen reichte von 0,9 bis 389,1 m<sup>3</sup>. Das Gesamtvolumen der 15 identifizierten Ablösebereiche lag bei 474,2 m<sup>3</sup>. Der größte Ablösebereich (389,1 m<sup>3</sup>) befindet sich auf einer Seehöhe von etwa 3030 m, in rund 120 m Entfernung (Luftlinie) des Observatoriums.

Tabelle 3: Ergebnisse der multitemporalen Differenzanalyse 2018-2019.

Ablösebereich ID	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Versagenstiefe [m]	Azimuth [°]	Gradient [°]	Oberkante [m üNN]	Unterkante [m üNN]
2018-2019_01	389,1	4,6	14	69	3033,5	3013,9
2018-2019_02	22,8	1,8	12	54	2930,9	2924,5
2018-2019_03	3,8	1,4	38	73	2991,0	2987,2
2018-2019_04	10,8	1,4	358	68	2891,8	2888,5
2018-2019_05	11,4	0,8	12	75	2843,4	2835,0
2018-2019_06	9,6	1,2	23	65	2756,1	2752,2
2018-2019_07	5,9	1,0	355	54	2777,6	2774,0
2018-2019_08	2,9	0,7	23	64	2844,2	2841,4
2018-2019_09	3,2	1,2	31	77	2984,6	2982,3
2018-2019_10	1,8	0,9	20	52	2948,5	2947,0
2018-2019_11	6,2	0,9	29	75	2926,7	2919,0
2018-2019_12	1,2	0,8	14	71	2878,5	2875,7
2018-2019_13	3,2	0,5	17	72	2833,8	2830,9
2018-2019_14	0,9	0,5	342	69	2672,8	2670,3
2018-2019_15	1,5	0,7	19	51	2599,5	2597,6

Die Differenzanalyse zwischen den am 26.08.2019 und am 05.09.2020 mittels UAV erhobenen Photogrammetriedaten wurden insgesamt 18 Steinschlag- bzw. Felssturzablösebereiche mit Versagenstiefen >1 m identifiziert. Die Versagenstiefe beschreibt die maximale (euklidische) Distanz zwischen der Prä-Ereignis-Oberfläche und der Post-Ereignis-Oberfläche eines Ablösebereichs. Die Größe der Volumina der Differenzanalyse 2019/2020 reichte von 2,3 bis 15.565,5 m<sup>3</sup>. Das Gesamtvolumen der 18 identifizierten Ablösebereiche lag bei 16.016 m<sup>3</sup>. Der größte Ablösebereich (>15.000 m<sup>3</sup>) befindet sich auf einer Seehöhe von etwa 2700 m (Unterkante), im westlichen Wandbereich.

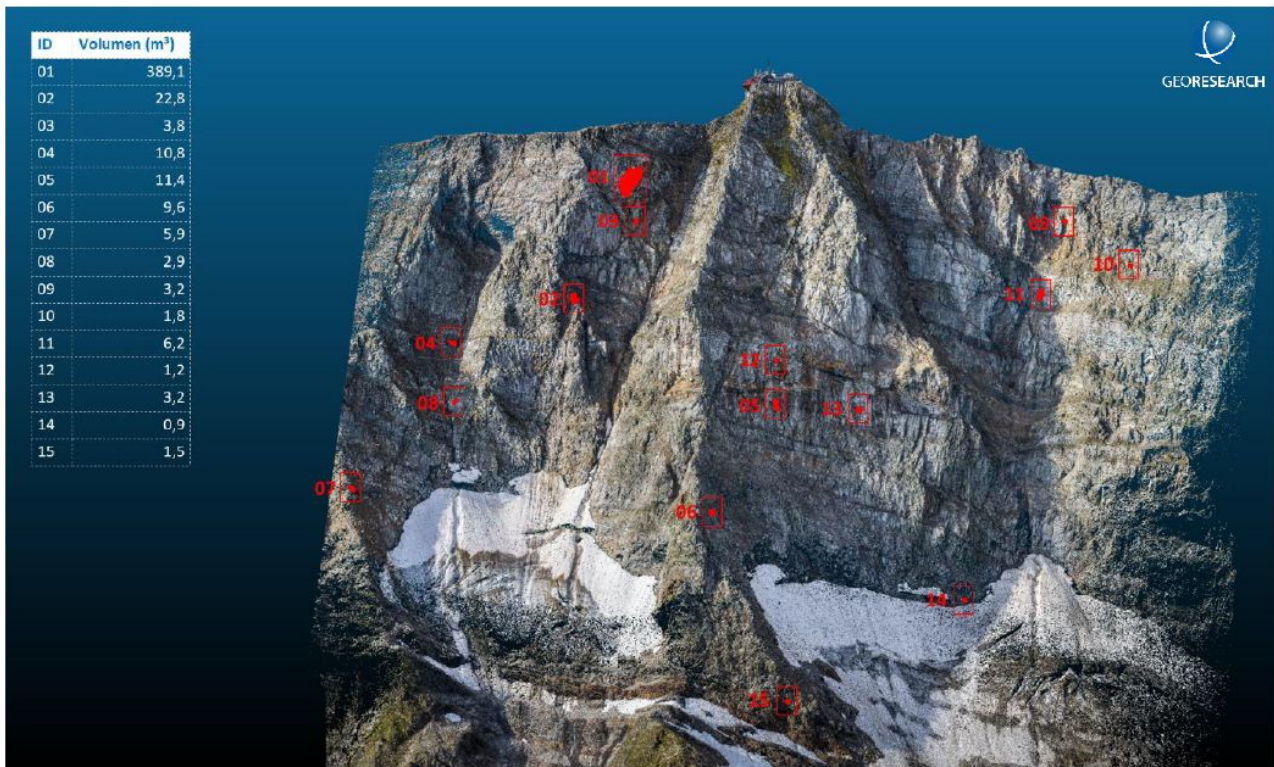


Abbildung 17: Ergebnisse der multitemporalen Differenzanalyse 2018-2019.

Tabelle 4: Ergebnisse der multitemporalen Differenzanalyse 2019-2020.

Ablösebereich ID	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Versagenstiefe [m]	Azimuth [°]	Gradient [°]	Oberkante [m üNN]	Unterkante [m üNN]
2019-2020_02	97,9	1,8	28	75	2963,0	2947,8
2019-2020_03*	75,1	2,7	28	72	2669,9	2662,7
2019-2020_04	65,6	2,7	2	59	2992,4	2983,4
2019-2020_05	37,2	2,3	64	54	2561,9	2554,2
2019-2020_06	29,7	1,5	354	70	2933,0	2923,8
2019-2020_07	29,4	1,8	44	58	2991,2	2987,2
2019-2020_08	26,0	1,7	27	57	2916,0	2909,9
2019-2020_09	22,4	1,9	26	68	2846,0	2840,5
2019-2020_10	15,7	1,4	34	55	3011,1	3005,3
2019-2020_11	11,0	1,2	56	66	2839,5	2836,0
2019-2020_12	10,8	1,3	90	50	3005,5	3001,9
2019-2020_13	8,3	1,2	41	69	2845,4	2838,8
2019-2020_14	6,1	1,6	348	42	2779,9	2777,5
2019-2020_15	4,9	1,1	91	68	2968,7	2963,7
2019-2020_16	4,8	1,0	39	65	2890,1	2886,9
2019-2020_17	3,0	1,0	102	60	2830,2	2827,5
2019-2020_18	2,3	1,0	15	52	2809,2	2806,8

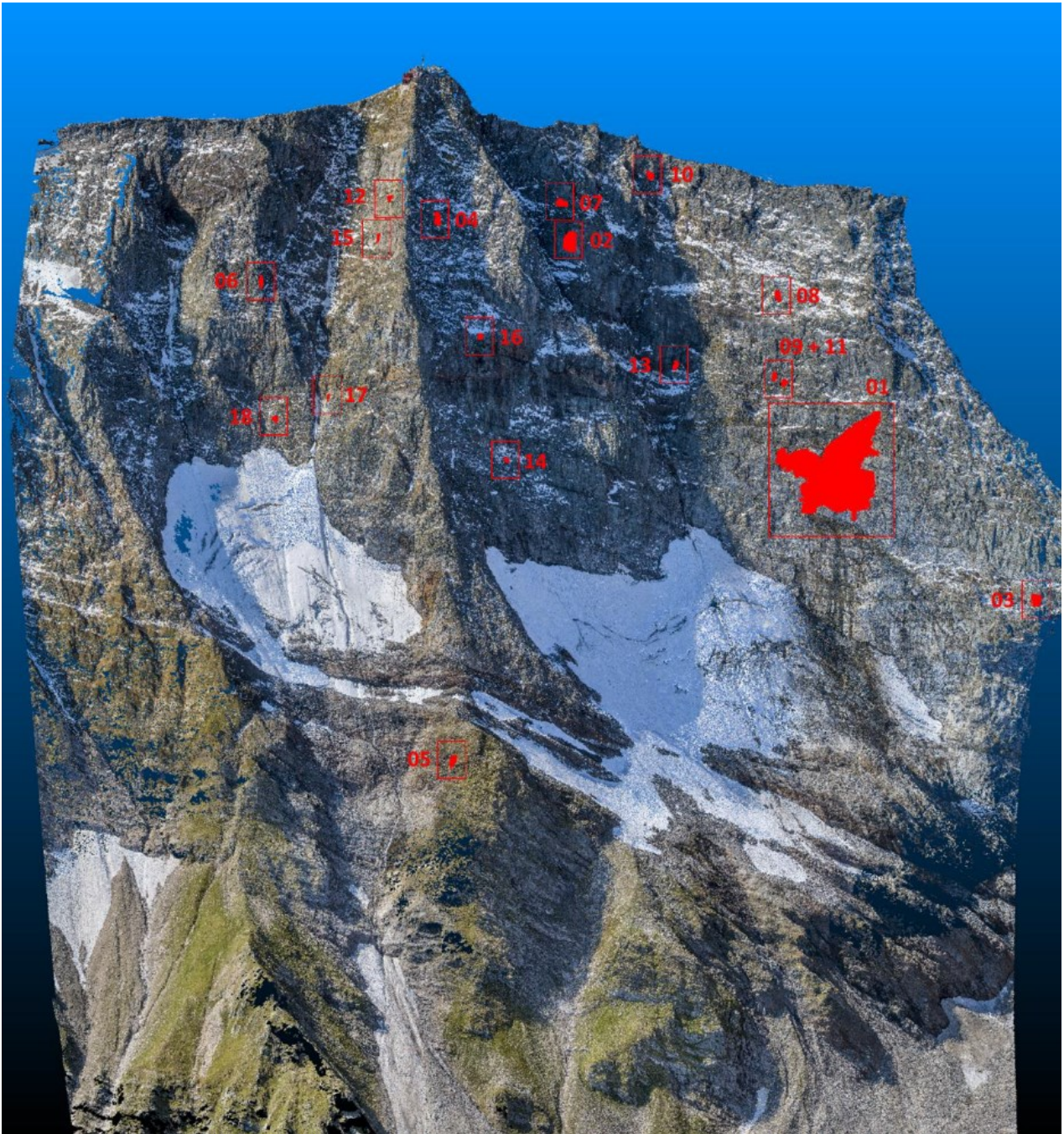


Abbildung 18: Zwischen 26.08.2019 und 05.09.2020 identifizierte Ablösebereiche (Für Zuordnung der Ereignisse siehe Tabelle 4)

Im Rahmen der Differenzanalyse zwischen den am 05.09.2020 und am 19.08.2021 mittels UAV erhobenen Photogrammetriedaten wurden insgesamt 21 Steinschlag- bzw. Felssturzablösebereiche mit Versagenstiefen  $> 1$  m identifiziert (Tabelle 5, Abbildung 20). Die Versagenstiefe beschreibt dabei die maximale (euklidische) Distanz zwischen den Oberflächen vor und nach dem Ereignis. Die Volumina der Differenzanalyse 2020/2021 reichten von 5,0 bis 390,5 m<sup>3</sup>. Das Gesamtvolumen der 21 identifizierten Ablösebereiche lag bei 972,5 m<sup>3</sup>. Im Gegensatz zur Vorjahresanalyse (2019/20) löste sich im aktuellen Vergleichszeitraum in der Nordwand des

Rauriser Sonnblicks kein großer Felssturz (vgl. Vorjahresbericht, Ereignis 2019-20\_10: 15 565,5m<sup>3</sup>). Bemerkenswert ist jedoch, dass sich im aktuellen Vergleichszeitraum zahlreiche Nachstürze aus dem Bereich des genannten Großereignisses lösten. Insgesamt wurden acht Ereignisse mit einem Gesamtvolumen von 765,0m<sup>3</sup> registriert deren Ursprung innerhalb des Ablösebereichs des großen Vorjahresereignisses lag.



Abbildung 19: Die Ablösebereiche der Felsstürze vom 30.08.2020 und 05.10.2021 (rot markiert) heben sich auf Grund ihrer Helligkeit deutlich von der umgebenden Felswand ab (Foto: UAV-Befliegung vom 25.08.2022).

Tabelle 5: Ergebnisse der Differenzanalyse 2020-2021.

Ablösebereich ID	Volumen [m³]	Versagenstiefe [m]	Azimuth [°]	Gradient [°]	Oberkante [m üNN]	Unterkante [m üNN]
2020-2021_01	34,6	1,5	56	58	2830,7	2823,6
2020-2021_02	9,6	1,2	96	65	2808,0	2804,3
2020-2021_03	12,3	1,3	18	48	2804,9	2802,6
2020-2021_04	390,5	3,7	56	65	2815,5	2786,6
2020-2021_05	49,1	1,8	61	70	2785,5	2774,7
2020-2021_06	113,4	2	59	73	2774,5	2758,6
2020-2021_07	57,7	1,7	69	78	2746,7	2737,5
2020-2021_08	97,8	1,4	49	37	2706,4	2701,7
2020-2021_09	13,9	1	37	58	2676,1	2672,7
2020-2021_10	33,7	1,9	343	86	3020,4	3012,9
2020-2021_11	10,9	1,9	4	58	3024,5	3021,5
2020-2021_12	10,2	1	50	64	3009,4	3005,4
2020-2021_13	7	1,1	90	78	3066,8	3064,1
2020-2021_14	12,6	1,6	350	53	2778,1	2774,4
2020-2021_15	12,3	1,3	26	58	2758,4	2755,9
2020-2021_16	5	1	360	82	3060,5	3057
2020-2021_17	11,4	1,2	20	84	2856,6	2851,1
2020-2021_18	12,5	1,1	322	44	2847,9	2844,4
2020-2021_19	12,1	1,1	47	58	2768,7	2763,4
2020-2021_20	26,7	1,2	13	48	2619,7	2614,9

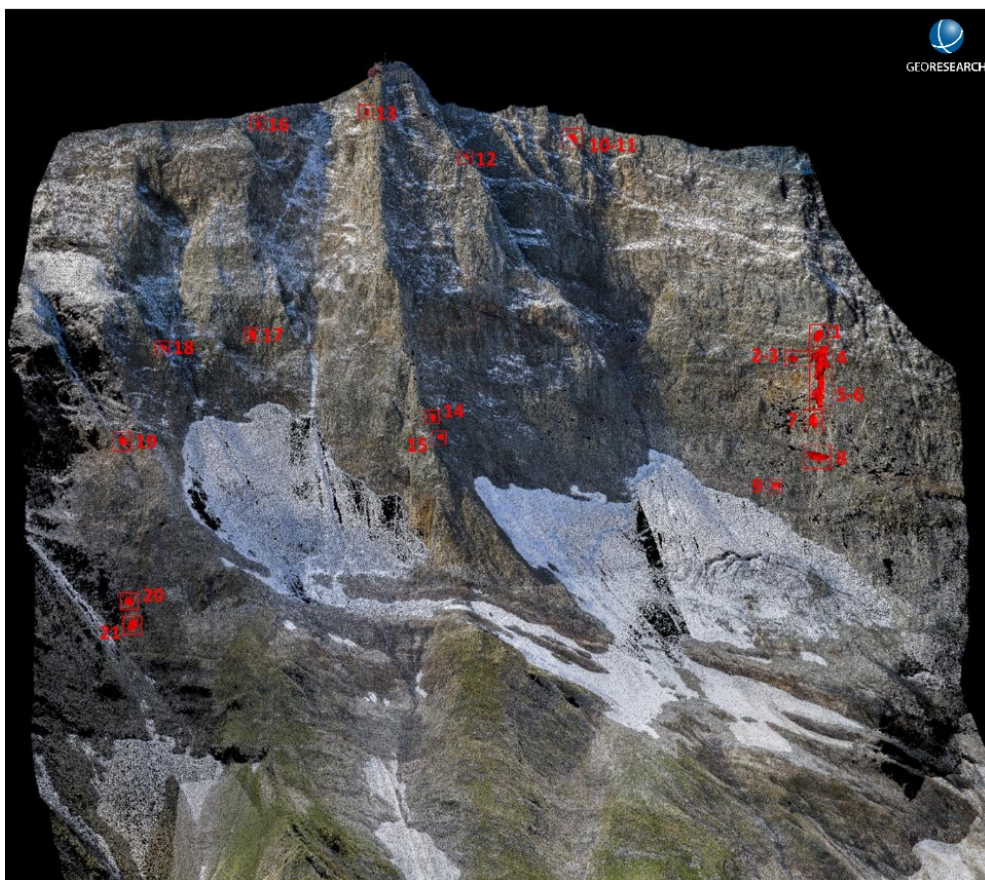


Abbildung 20: Im Vergleichszeitraum (05.09.2020-19.08.2021) identifizierte Steinschlag-/Felssturz-Ablösebereiche (für Zuordnung der Ereignisse siehe Tabelle 1). Geländedarstellung/Hintergrund: Bereinigte Punktwolke der UAV-Befliegung vom 19.08.2021.



Die Differenzanalyse zwischen den am 19.08.2021 und am 25.08.2022 erhobenen Photogrammetriedaten wurden (erneut) 21 Ablösebereiche mit Versagenstiefen  $\geq 1$  m identifiziert (Tabelle 6, Abbildung 21). Die Versagenstiefe beschreibt dabei die maximale (euklidische) Distanz zwischen der Geländeoberfläche vor und nach dem Ereignis. Aus der Differenzanalyse sticht eine signifikante Felsablösung im westlichen Wandbereich hervor (ID 2021-2022\_01 in Tabelle 6). Augen- bzw. Ohrenzeugenberichte belegen ein großes Einzelereignis am 05.10.2021 (18:30), welches sowohl am Sonnblick-Observatorium als auch am Ammererhof (Kolm-Saigurn) hör-, spür- bzw. sichtbar war. Die identifizierte Fläche repräsentiert somit aller Voraussicht nach einen als Einzelereignis abgegangenen Felssturz. Das große Volumen und die erhebliche Sturzhöhe begünstigten die Ausbildung einer langen Transportbahn, die bis in die unmittelbare Nähe des Pilatussees reichte. Die horizontale Auslaufweite des Ereignisses vom 05.10.2021 beträgt somit 600-700 m (Abbildung 23). Der Ablösebereich vom 05.10.2021 liegt unmittelbar neben dem Ablösebereich des Felssturzes vom 30.08.2020 (15.570 m<sup>3</sup>; ID 2019-2020\_01, siehe Differenzanalyse 2019/20) bzw. zeigt eine geringfügige räumliche Überlappung mit diesem (Abbildung 24). Hinsichtlich seines Volumens übertrifft der Felssturz vom 05.10.2021 das Ereignis vom 30.08.2020 um rund 8.000 m<sup>3</sup> und repräsentiert damit das mit Abstand größte Ereignis seit Beginn der Befliegungen im Jahr 2019 bzw. seit den ersten terrestrischen Laserscan-Messungen im Jahr 2015. Ein markantes, leicht nach Nordwesten abfallendes Felsband auf einer Seehöhe von rund 2700 m üNN bildete (wie schon beim Ereignis vom 30.08.2020) die Unterkante des Ablösebereichs vom 05.10.2021. Die Ablösung der 23.510 m<sup>3</sup> großen Kubatur erfolgte zum größten Teil entlang der selben ausgeprägten, in etwa vertikal stehenden Kluftschar wie beim Felssturz vom 30.08.2020 und erklärt damit die fast identischen maximalen Versagenstiefen der beiden Ereignisse (7,9 m am 30.08.2020 bzw. 8,3 m am 05.10.2021).

Die im vorliegenden Bericht als Einzelereignisse ausgewiesenen Ablösebereiche #2-8 (siehe Tabelle 6, Abbildung 21) befinden sich in der Sturzbahn des Felssturzes vom 05.10.2021 und haben sich daher aller Voraussicht nach durch die direkte mechanische Einwirkung der herabstürzenden Felsmassen gelöst. Ablösebereich #20 (ID 2021-2022\_20) stellt mit einem Volumen von 233 m<sup>3</sup> das größte Ereignis außerhalb des direkten Einflussbereichs des großen 23.510 m<sup>3</sup>-Ereignisses dar. Der Felssturz löste sich in unmittelbarer Nachbarschaft der Wandvereisung aus einem Felsbereich, der erst in den letzten Jahren durch den Gletscherrückgang freigelegt wurde und unterstreicht die hohe Massenbewegungsaktivität in kürzlich ausgeapertem Terrain. In der Umgebung des Observatoriums wurden keine größeren Ereignisse registriert.

Tabelle 6: Ergebnisse der Differenzanalyse 2021-2022.

Ablösebereich-ID	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Versagenstiefe [m]	Azimuth [°]	Gradient [°]	Oberkante [m üNN]	Unterkante [m üNN]
2021-2022_01	23 509,9	8,3	54	71	2815,5	2699,0
2021-2022_02	40,8	2,0	62	75	2748,8	2743,9
2021-2022_03	1 041,8	6,1	60	67	2703,4	2673,6
2021-2022_04	114,9	1,9	54	63	2689,8	2682,4
2021-2022_05	127,5	3,0	64	62	2664,7	2653,6
2021-2022_06	33,0	1,8	51	83	2644,5	2639,9
2021-2022_07	18,4	1,8	60	79	2632,6	2628,4
2021-2022_08	133,3	2,1	42	66	2623,1	2609,9
2021-2022_09	7,6	1,1	335	76	3010,9	3007,6
2021-2022_10	10,9	2,2	16	83	3025,1	3018,2
2021-2022_11	16,0	1,1	16	78	2939,8	2933,8
2021-2022_12	9,5	1,3	10	66	2941,3	2937,6
2021-2022_13	6,6	1,1	30	90	3013,9	3010,9
2021-2022_14	2,7	1,0	0	53	2877,1	2875,0
2021-2022_15	5,6	1,2	51	98	3028,4	3026,1
2021-2022_16	10,2	1,2	13	75	2831,7	2827,7
2021-2022_17	5,4	1,2	36	84	3000,8	2995,9
2021-2022_18	3,1	1,1	64	66	2913,1	2910,6
2021-2022_19	4,4	1,1	329	74	2715,9	2713,0
2021-2022_20	233,3	3,3	316	54	2710,5	2695,5
2021-2022_21	7,7	1,0	19	59	2690,0	2686,0

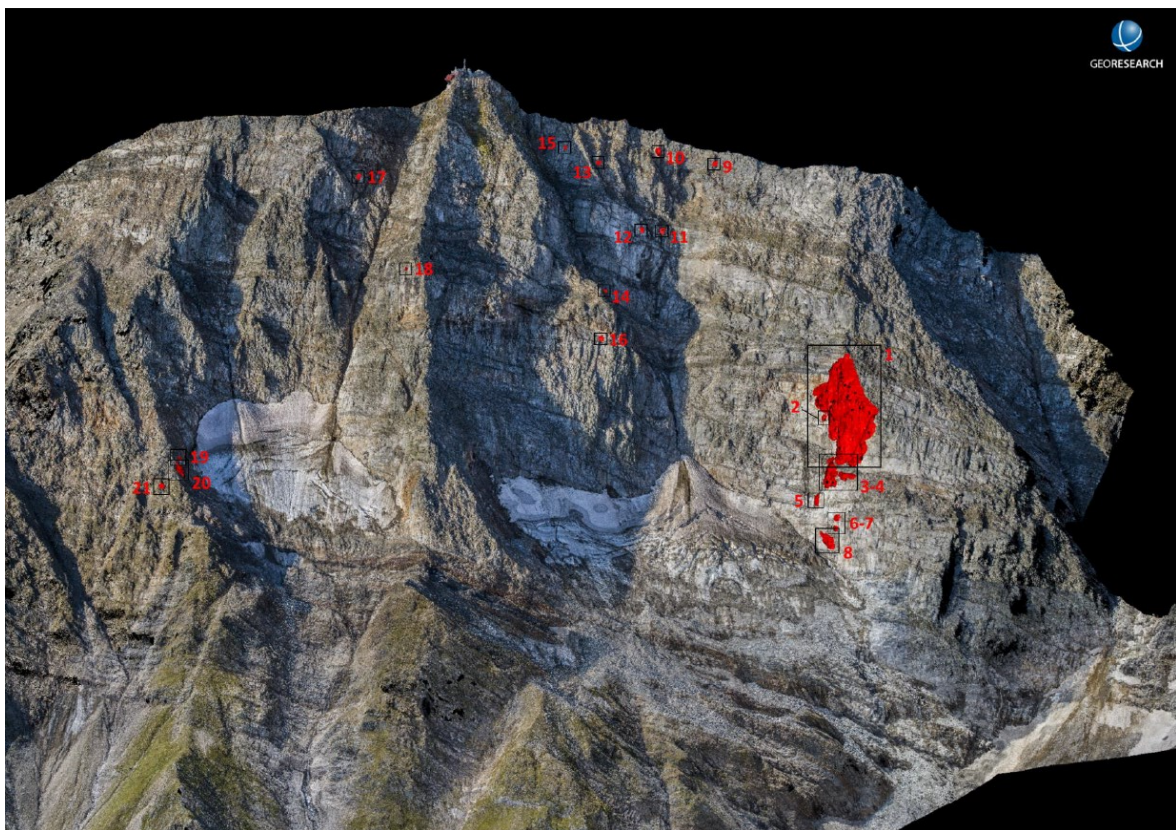


Abbildung 21: Im aktuellen Vergleichszeitraum (19.08.2021 bis 25.08.2022) wurden insgesamt 21 Steinschlag- bzw. Felssturz-Ablösebereiche detektiert (für Zuordnung und Volumina der Ereignisse siehe Tabelle 6). Geländedarstellung: Punktwolke der UAV-Befliegung vom 25.08.2022

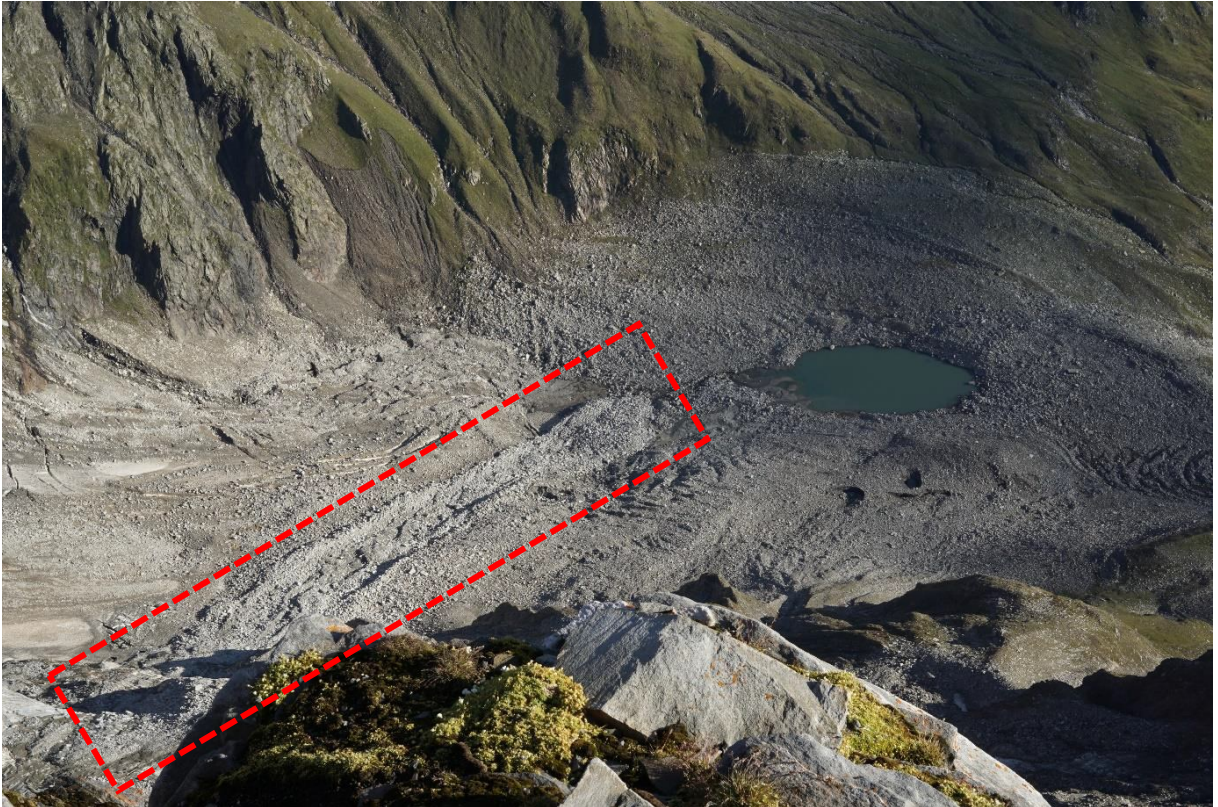


Abbildung 22: Die Ablagerungen des 23 510 m<sup>3</sup> großen Felssturzes vom 05.10.2021 kamen erst in unmittelbarer Nähe des Pilatussees zum Stillstand (Horizontale Auslaufweite: 600-700 m). Transportbahn und Felssturzaflagerungen sind rot markiert (Foto: Daniel Binder, 25.08.2022).

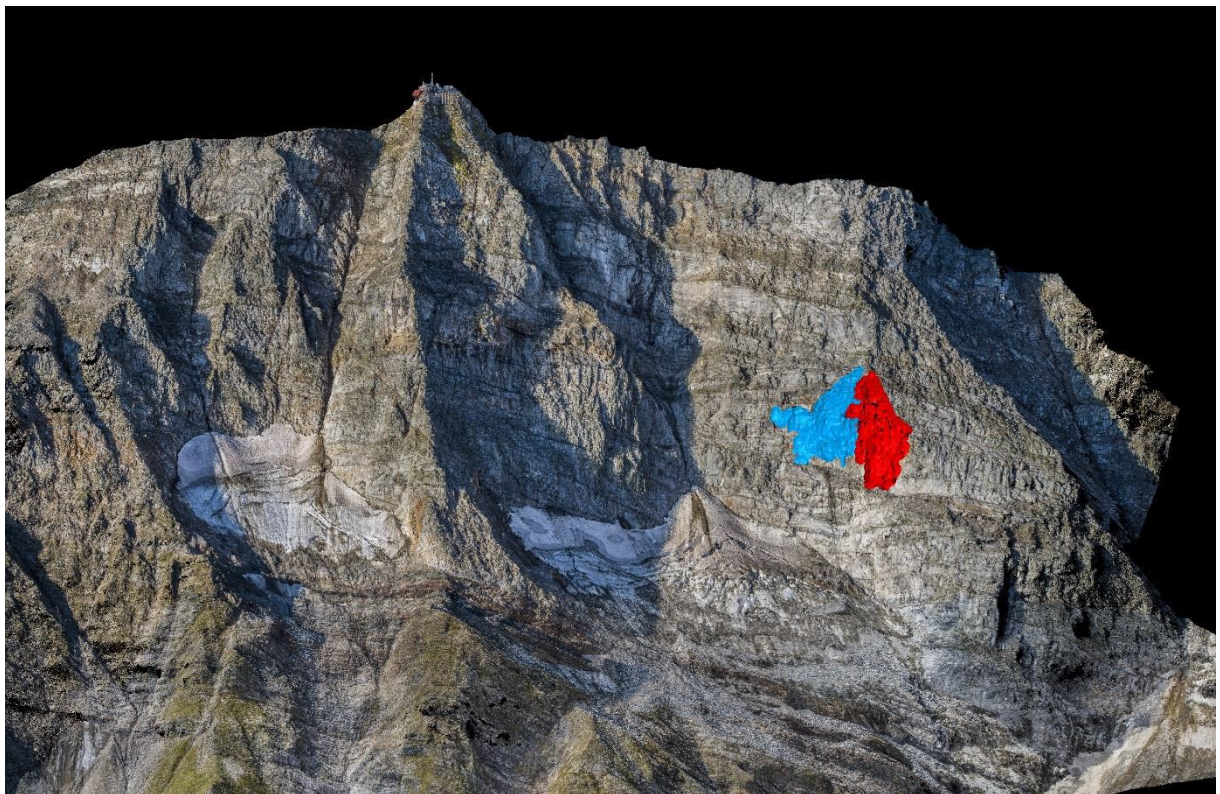


Abbildung 23: Der Felssturz vom 05.10.2021 (rot, 23 510 m<sup>3</sup>) löste sich in unmittelbarer Nachbarschaft des Felssturzes vom 30.08.2020 (blau, 15.570 m<sup>3</sup>) aus dem westlichen Bereich der Nordwand des Rauriser Sonnblicks (Geländedarstellung: Punktwolke der UAV-Befliegung vom 25.08.2022).

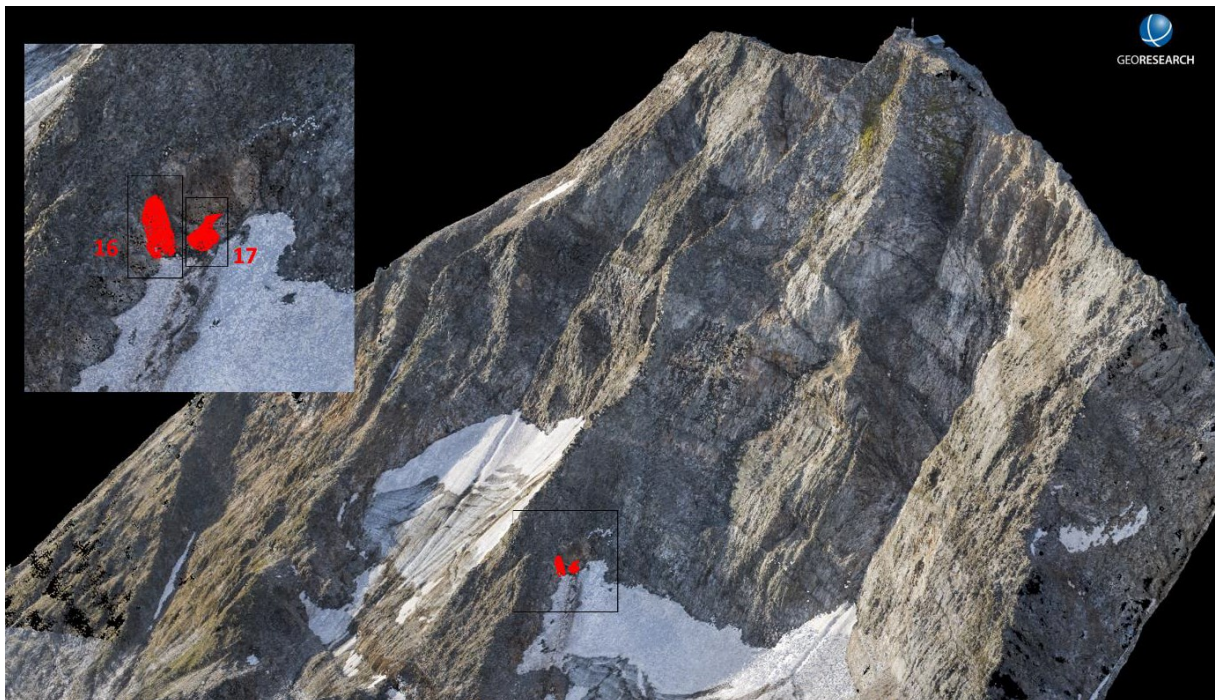


Abbildung 24: Auch in der aktuellen Analyseperiode zeigte sich eine verstärkte Felssturz-Aktivität in unmittelbarer Gletschernähe. Das dritt- und viertgrößte Ereignis (ID 16: 106 m<sup>3</sup>, ID 17: 70 m<sup>3</sup>) löste sich aus Flankenbereichen, die in den letzten zwei Jahren durch den Eisrückgang freigelegt wurden. Darüber hinaus wurden drei weitere Ablösebereiche (ID 13, ID 14, ID 18 – nicht abgebildet) in kürzlich ausgeaperten Wandbereichen registriert. Geländedarstellung: Punktwolke der UAV-Befliegung vom 23.08.2023.

Die Differenzanalyse zwischen den am 25.08.2022 und am 23.08.2023 erhobenen Photogrammetriedaten wurden 20 Ablösebereiche mit Versagenstiefen  $\geq 1$  m identifiziert (Tabelle 7, Abbildung 25). Die Versagenstiefe beschreibt dabei die maximale (euklidische) Distanz zwischen der Geländeoberfläche vor und nach dem Ereignis. Die Volumina der Differenzanalyse 2022/2023 reichten von 2,4 bis 225,3 m<sup>3</sup>. Das Gesamtvolumen der 20 identifizierten Ablösebereiche lag bei 767,6 m<sup>3</sup>. Im Gegensatz zur Vorjahresanalyse (2021/22) löste sich im aktuellen Vergleichszeitraum in der Nordwand des Rauriser Sonnblöcks kein auffällig großer Felssturz. Aus der Differenzanalyse lassen sich insgesamt drei große Ablösebereiche identifizieren (ID2022-2023\_06, ID2022-2023\_11, ID2022-2023\_16), die ein Volumen von über 100 m<sup>3</sup> aufweisen. Das größte Ereignis dieser Periode (rund 225 m<sup>3</sup>, ID2022-2023\_06) löste sich nur rund 90 Höhenmeter unterhalb des Sonnblick-Observatoriums (Abbildung 26) im nordöstlich exponierten Felswand-Bereich der linken Nordwandrinne. Zwei weitere, unmittelbar darunterliegende Ablösebereiche (ID\_2022-2023\_08 und ID\_2022-2023\_09) repräsentieren mit hoher Wahrscheinlichkeit sekundäre Ereignisse, die in Folge der direkten mechanischen Einwirkung von Sturzblöcken des 225 m<sup>3</sup>-Felssturzes (ID2022-2023\_06) ausgelöst wurden. Der dem Observatorium am nächsten liegende Ablösebereich wurde rund 80 Höhenmeter unterhalb des Gipfels identifiziert (ID\_2022-2023\_07, 20 m<sup>3</sup>). Der zweitgrößte

Ablösebereich (116 m<sup>3</sup>, ID2022-2023\_11) der aktuellen Analyseperiode sowie die Ablösebereiche ID2022-2023\_12 (67 m<sup>3</sup>) und ID2022-2023\_19 (8 m<sup>3</sup>) befinden sich innerhalb des großen Ablösebereichs vom 30.08.2020 (15.570 m<sup>3</sup>; ID 2019-2020\_01, siehe Differenzanalyse 2019/20). Aus dem Ablösebereich des großen, unmittelbar angrenzenden Felssturzes vom 05.10.2021 (23.510 m<sup>3</sup>; ID 2021-2022\_01) wurden in der aktuellen Analyseperiode hingegen keine Nachstürze registriert. Der Trend zur erhöhten Felssturz-Aktivität in gletschernahen Bereichen bestätigte sich auch in der aktuellen Analyseperiode. In einem Bereich, der erst durch den Gletscherrückgang der letzten zwei Jahre freigelegt wurde, wurden in der aktuellen Analyseperiode das drittgrößte Ereignis (ID\_2022-2023\_16, 106 m<sup>3</sup>) und das viertgrößte Ereignis ID\_2022-2023\_17, 70 m<sup>3</sup>) registriert. Die beiden genannten Ablösebereiche, sowie die ebenfalls in unmittelbarer Gletschnähe gelegenen Ereignisse ID\_2022-2023\_13 (25 m<sup>3</sup>), ID\_2022\_14 (6 m<sup>3</sup>), und ID\_2022-2023\_18 (21 m<sup>3</sup>) unterstreichen somit einmal mehr den Trend in Richtung einer erhöhten Felssturz-Aktivität in kürzlich ausgeaperten Felswand-Bereichen.

Tabelle 7: Ergebnisse der Differenzanalyse 2022-2023.

<b>Ablösebereich ID</b>	<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Versagenstiefe [m]</b>	<b>Azimuth [°]</b>	<b>Gradient [°]</b>	<b>Oberkante [m üNN]</b>	<b>Unterkante [m üNN]</b>
2022-2023_01	8,0	1,1	20	71	2835,5	2830,3
2022-2023_02	11,0	1,2	39	63	2826,9	2822,0
2022-2023_03	3,5	1,2	55	51	2820,6	2817,6
2022-2023_04	7,7	1,5	46	49	2813,1	2808,5
2022-2023_05	24,1	1,6	17	73	3069,7	3062,2
2022-2023_06	225,3	3,9	117	58	3008,3	2991,8
2022-2023_07	19,7	1,0	85	64	3019,3	3009,9
2022-2023_08	2,4	1,1	104	75	2969,4	2966,4
2022-2023_09	6,4	0,8	60	65	2961,7	2955,6
2022-2023_10	27,9	2,2	27	80	3016,5	3009,1
2022-2023_11	115,8	3,1	37	58	2805,1	2794,9
2022-2023_12	66,9	2,7	41	77	2771,9	2761,0
2022-2023_13	25,0	2,3	318	61	2704,5	2697,6
2022-2023_14	5,9	1,5	55	49	2695,2	2691,3
2022-2023_15	5,4	0,9	52	57	2699,7	2696,3
2022-2023_16	106,2	2,3	295	69	2709,0	2693,8
2022-2023_17	70,1	2,4	327	52	2705,5	2696,4
2022-2023_18	21,2	1,0	16	66	2683,1	2672,8
2022-2023_19	7,5	1	47	73	2776,2	2772,7
2022-2023_20	7,5	1,3	41	74	2814,2	2810,1

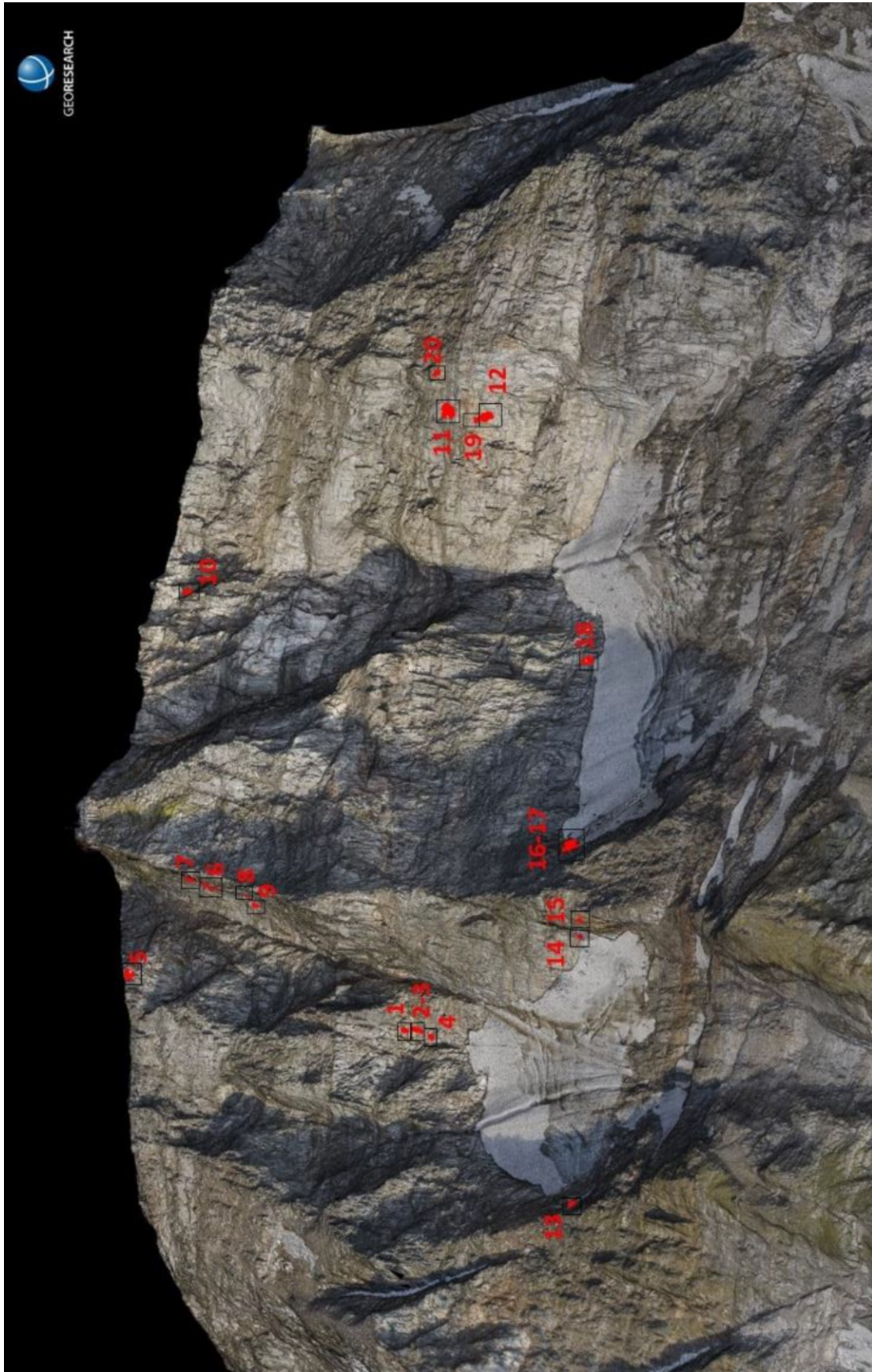


Abbildung 25: Im aktuellen Vergleichszeitraum (25.08.2022 bis 23.8.2023) wurden insgesamt 20 Steinschlag- bzw. Felssturz-Ablösebereiche detektiert (für Zuordnung und Volumina der Ereignisse siehe Tabelle 7). Geländedarstellung: Punktwolke der UAV-Befliegung vom 23.08.2023.

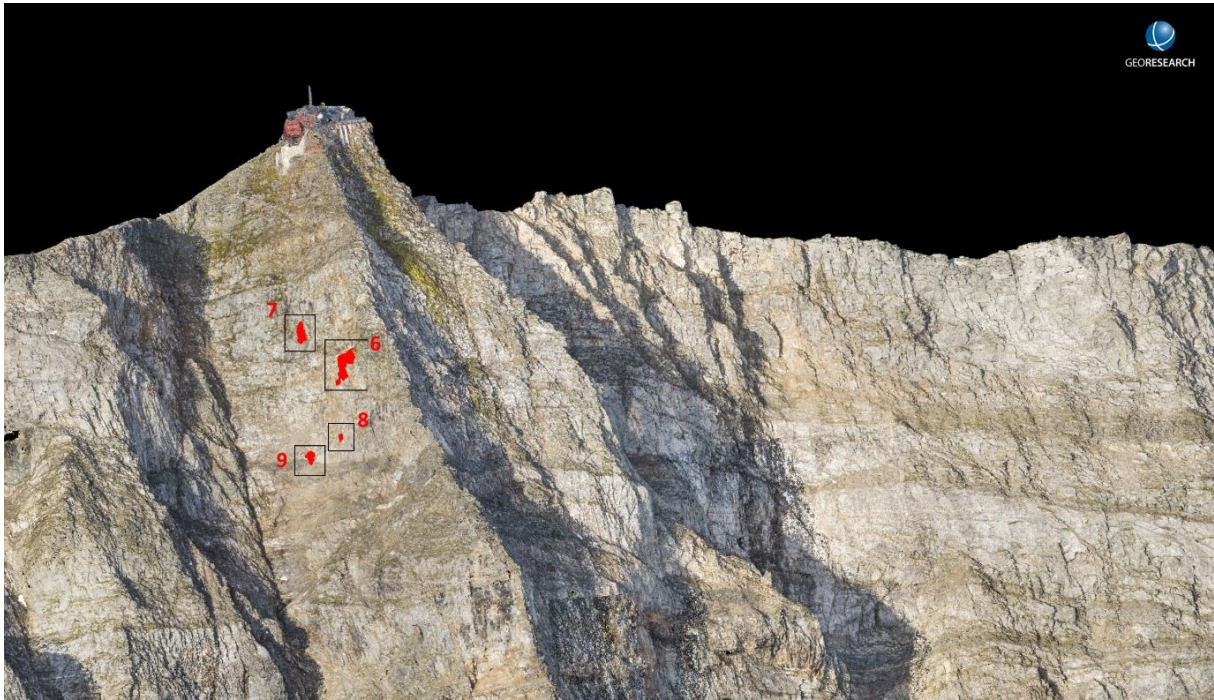


Abbildung 26: In der aktuellen Analyseperiode (2022-23) wurde eine verstärkte Felssturz-Aktivität im nordöstlich exponierten Felswand-Bereich (linke Nordwandrinne) unterhalb des Observatoriums registriert (ID 6: 225 m<sup>3</sup>, ID 7: 20 m<sup>3</sup>, ID 8: 2 m<sup>3</sup>, ID 9: 6 m<sup>3</sup>). Ablösebereich ID 7 befindet sich rund 80 Höhenmeter unter dem Observatorium. Geländedarstellung: Punktwolke der UAV-Befliegung vom 23.08.2023

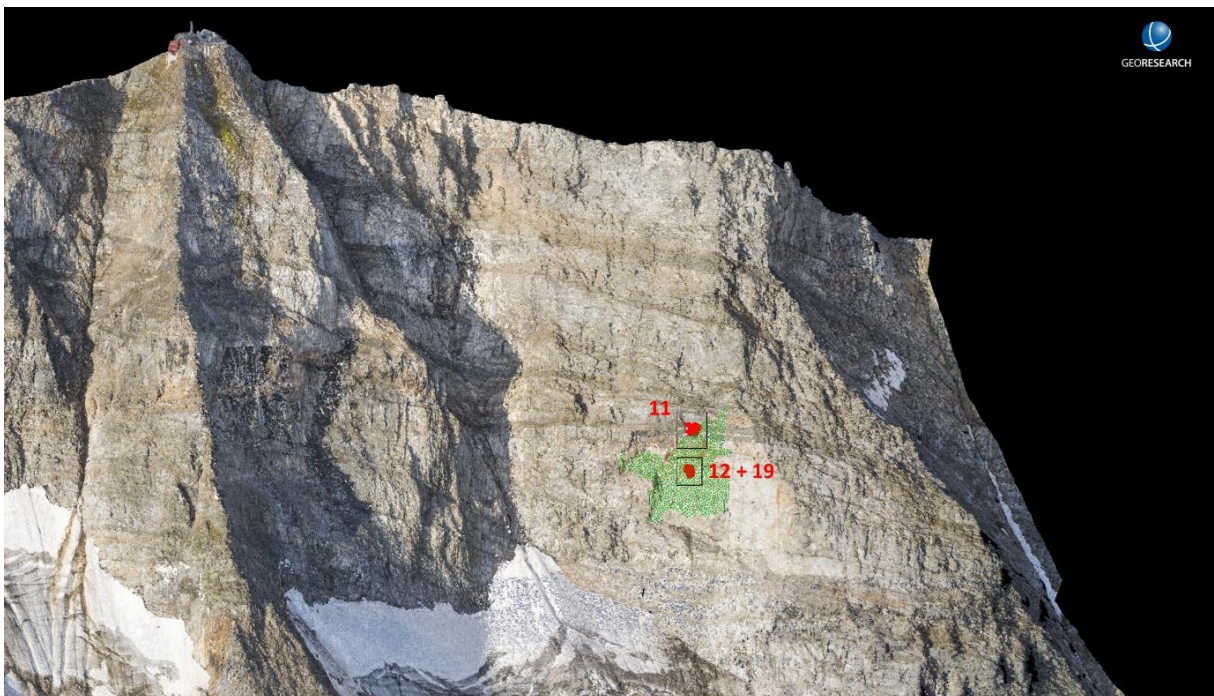


Abbildung 27: Aus dem Ablösebereich des großen Felssturzes vom 30.08.2020 (15 570 m<sup>3</sup>) lösten sich im Rahmen der diesjährigen Analyseperiode drei Nachstürze: ID 11 (116 m<sup>3</sup>), ID 12 (67 m<sup>3</sup>) und ID 19 (8 m<sup>3</sup>). Grün: Felssturz vom 30.8.2020. Rot: Ablösebereiche in der Analyseperiode 2022-2023. Geländedarstellung: Punktwolke der UAV-Befliegung vom 23.08.2023.

#### 4.2.2 Kontinuierliche Kluftmessungen – Crackmetermessungen

Im Rahmen der geologisch-geotechnischen Beurteilung des Hohen Sonnblicks im Hinblick auf die Standortsicherheit des Gebäudekomplexes von Dr. Gert Furthmüller entlang von 5 Abseilstrecken (A-E) Klüfte nummeriert und Messungen der Kluftöffnungsweiten durchgeführt. Hierdurch wird eine quantitative Erfassung der Kluftweiten und bei Wiederholung deren Veränderung bestimmt, und folglich eine Beurteilung der Standsicherheit der Seilbahn und des Observatoriums ermöglicht. Für die geologisch-geotechnische Befundaufnahme wurde im Zuge der Überprüfung das Areal des Sonnblick Observatoriums bis zur Grundgrenze der Schutzhütte des Österreichischen Alpenvereins (ÖAV), dem Zittelhaus, beurteilt und auf Basis der in Abbildung 28 dargestellten Wandabschnitte unterteilt.

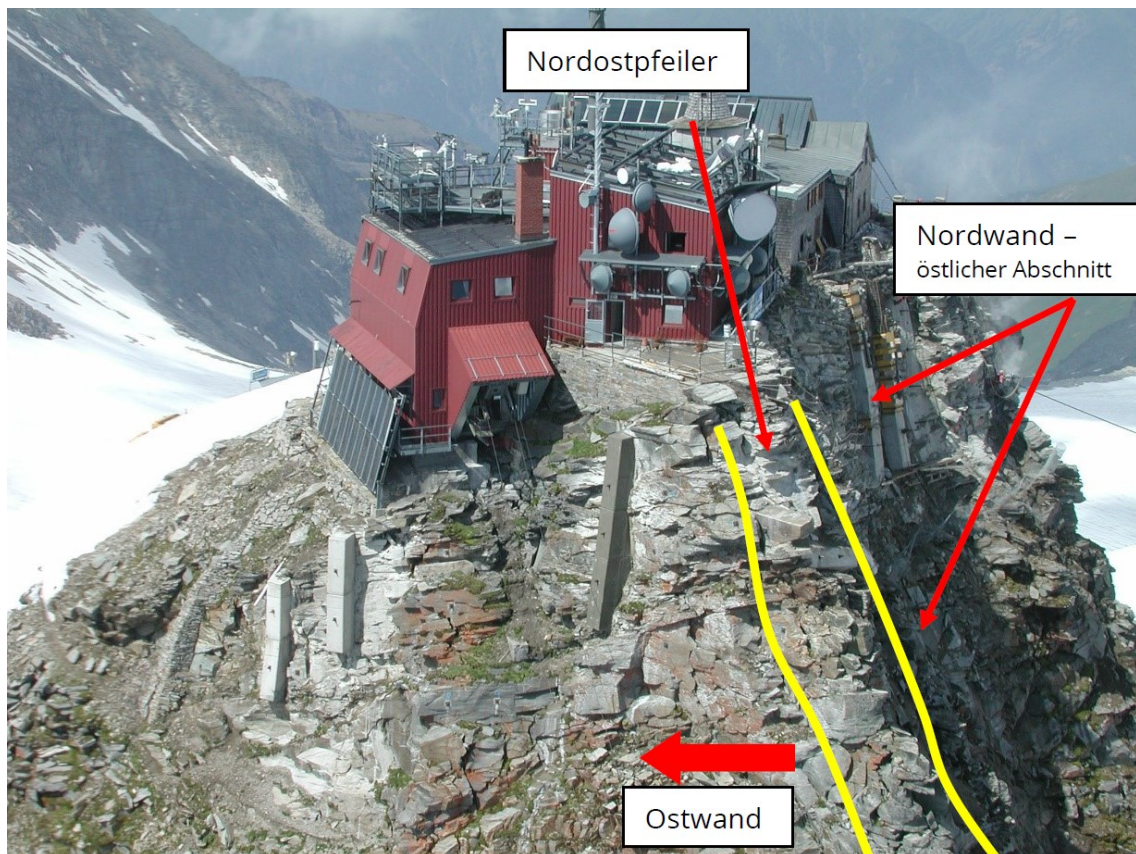


Abbildung 28: Hoher Sonnblick – Sonnblick Observatorium – Bereichsabgrenzung Ostwand – Nordwand und Nordostpfeiler

Basierend auf der Geländebegehung und der daraus resultierenden Dokumentation wurden im September 2021 in Kooperation mit Herrn Dr. Furthmüller erstmalig vier Kluftweitenmessgeber, sogenannte Crackmeter oder Rissdistanzgeber, entlang der Abseilstrecke A (Kluft 7) und E (Kluft 8) installiert. Das Ziel dieser Crackmeter ist es, kontinuierliche Messungen der Öffnungsweiten der Klüfte zu beobachten und den exakten Zeitpunkt des Öffnens festzustellen.



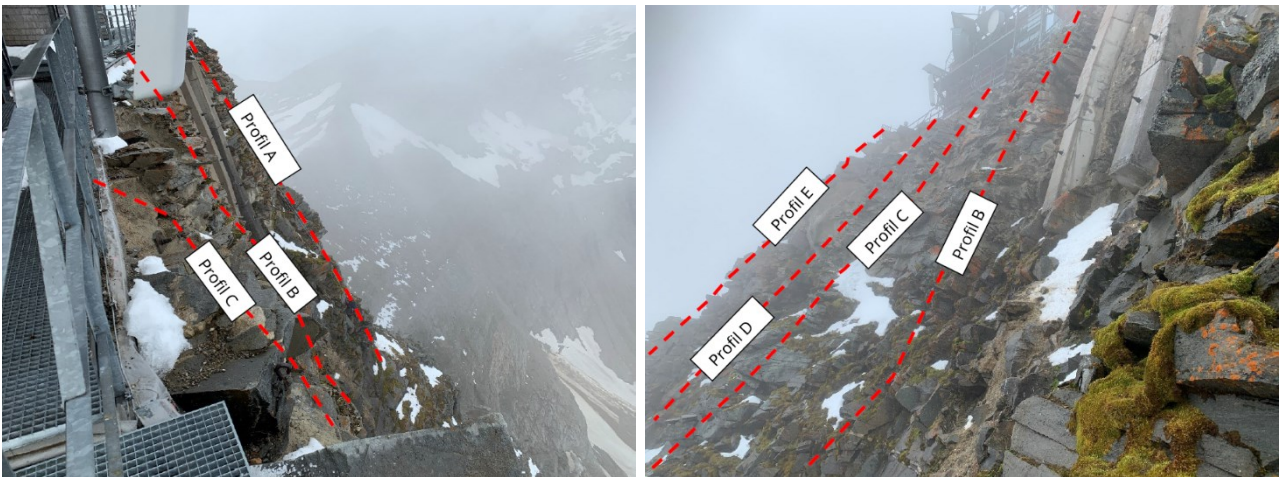


Abbildung 29 & Abbildung 30: Lage der Abseilstrecken A – E Hoher Sonnblick – Sonnblick Observatorium – Bereichsabgrenzung Ostwand – Nordwand und Nordostpfleile



Im September 2021 erstmalige Installation von vier Kluftweitenmessgeber, sogenannte Crackmeter in der Nordwand des Hohen Sonnblicks.

Abbildung 31 Lage der Crackmetermessstellen C1 und C2 sowie die Position des LoRa Datentransmitters auf der Messterrasse des Observatoriums.

Für die Datenspeicherung und Datenübermittlung wurde in Kooperation mit Mertl Research GmbH ein energieeffizienter Logger-Prototyp entwickelt. Dieser Crackmeter-Logger verfügt neben einer lokalen Datenspeicherung über einen LoRaWAN-Sender, der die Messwerte in naher Echtzeit über das LoRaWAN-Gateway auf der Messterrasse des Observatoriums an den Server in Wien übermittelt. Spannungsprobleme bei der Energieversorgung der Crackmeterlogger führten Anfang Dezember zu einem weiteren außerplanmäßigen Geländeeinsatz bei dem zu Testzwecken unterschiedliche Batterien in den Crackmeterloggern eingesetzt wurden. Im Jahr 2023 wurde in Kooperation mit Mertl Research GmbH die Software für die über LoRaWAN Datenübermittlung upgedatet. Aufgrund eines Defekten Gateway kam es im Jahr 2023 zu einem längeren Datenausfall, der Anfang Oktober 2023 behoben werden konnte. Für eine ausfallsichere Datenübertragung werden für das Jahr 2024 zwei weitere LoRaWAN-Gateways installiert, um zukünftig weitere Messungen, u.a. der Abflussstation und der Wetterstation am Gletscher des Goldbergkees zu übertragen. Erste Ergebnisse der Deformationsmessungen sind in Abbildung 6 dargestellt. Hier zeigt sich vor allem beim Standort NORD-C2 ein Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Öffnen und Schließen der Klüfte, und lässt wasser- bzw. eishaltige Klüfte im oberflächennahen Felsbereich vermuten.

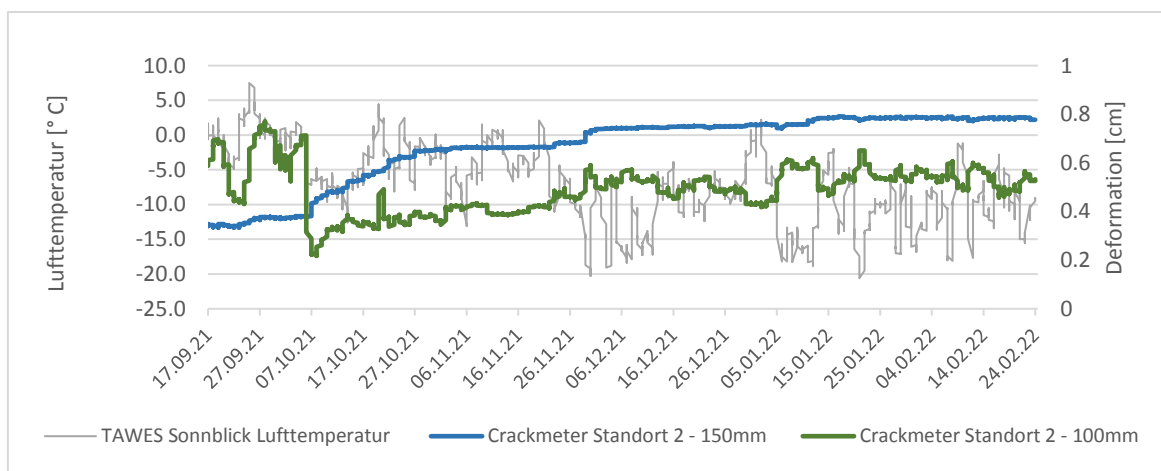


Abbildung 32.: Deformationsmessungen am Crackmeter-Standort C2 und Verlauf der mittleren stündlichen Lufttemperatur.

### 4.2.3 Seismisches Monitoring SeisRockHT

Das Projekt SeisRockHT war eine Kollaboration der ehemaligen ZAMG, Mertl Research GmbH und Georesearch Forschungsgesellschaft mbH und wurde im Jahr 2020 abgeschlossen. Das Projekt wurde von den ZAMG Fachabteilungen Geophysik und Klimaforschung initiiert und geleitet. Die Fortführung der SeisRockHT Projektinitiative wird aktuell von den längerfristig laufenden Projekten GCW-Permafrost und dem internen Projekt ASBO sichergestellt.

Ziel ist die Identifikation von Steinschlag- und Felssturzablösebereichen in der Nordwand des Hohen Sonnblicks. Die SeisRockHT Projektinitiative ist als Startschuss für ein längerfristiges kontinuierliches Monitoring zu verstehen, dass vor allem auf die Erfassung von plötzlich auftretenden gravitativen Massenbewegungen wie Steinschläge, Muren und Lawinen abzielt. Die im Rahmen von SeisRockHT etablierte Monitoringstrategie bildet somit die Basis für die umfassende Beobachtung und Erforschung von Naturgefahren im alpinen Hochgebirge.

Im Rahmen des Projektes „SeisRockHT“ wurde das seismische Stationsnetz (siehe Abbildung 34) gewartet und die Energieversorgung der ‚off-grid‘ Stationen MIT, MOR und PIL verbessert. Das Ziel der laufenden energietechnischen Optimierung ist die aktuell noch vorhandenen Datenlücken im Winter zu schließen, und somit ein kontinuierliches seismisches Monitoring zu bewerkstelligen. Neben einem kontinuierlichen Steinschlagmonitoring, eröffnet eine ganzjährige Beobachtungsstrategie auch neue Forschungsfelder (z.B. Detektion von Lawinen). Bereits in den Feldsaisonen 2017 und 2018 wurde die Energieversorgung der MOR, sowie der MIT Station um Windgeneratoren erweitert. Aufgrund dieser Maßnahme konnten die vorhandenen Datenlücken bereits um 1-2 Monate reduziert werden. Im Sommer 2019 wurden die Stationen MIT, MOR und PIL weiters mit höheren Batteriekapazitäten (~300 Ah) ausgestattet, und ein neuer PIL Sonnenkollektor installiert. Auf Basis der über die letzten Jahre gewonnenen Erkenntnisse der lokalen Herausforderungen des PIL Standorts (hohe Schneelast, Lawinen), wurde dabei ein neues Konzept der Sonnenkollektor-Aufhängung erarbeitet und umgesetzt (siehe Abbildung 33). Im August 2019 wurde vom ZAMG Erdbebendienst ein Seismometer im Gipfelbereich des Hohen Sonnblicks installiert. Das neue Seismometer stellt eine wertvolle Ergänzung für das lokale seismische Monitoring im gesamten Sonnblickgebiet dar. Die Auswertung der seismischen Daten in Kombination mit den Photogrammetriedaten ermöglicht die Erstellung eines Steinschlag- bzw. Felssturzinventars. Eine umfassende Aufarbeitung der bereits gesammelten Daten wird im Folgeprojekt des Permafrost-Monitoring-Programms umgesetzt.



Abbildung 33: Der neue Sonnenkollektor der PIL Station. Aufgrund der lokalen Herausforderungen fiel die Ausführung massiv aus.

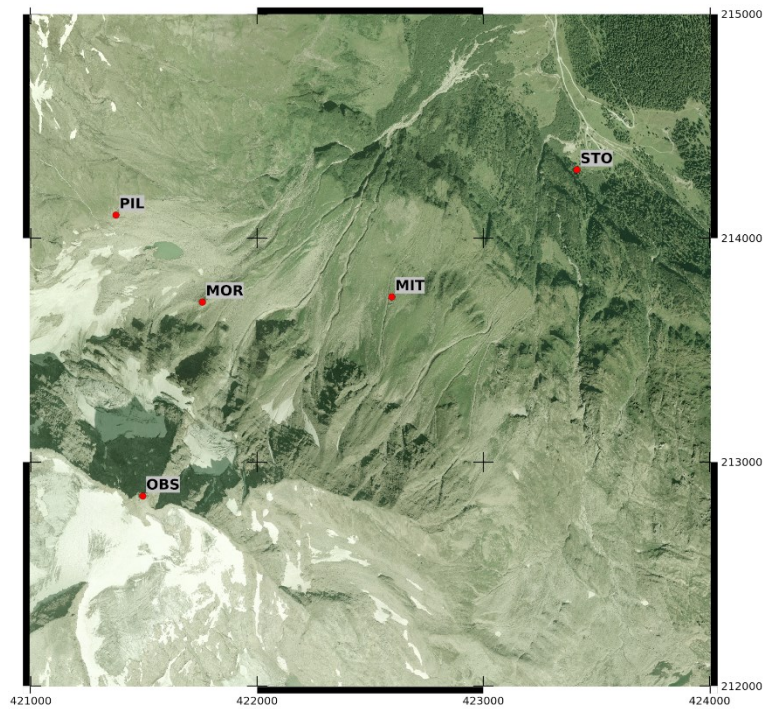


Abbildung 34: Das seismische Beobachtungsnetz im Bereich der Sonnblick Nordwand.

SeisRockHT installierte lokale seismologische Netzwerke um die Steinschlagaktivität der Nordwände am Hohen Sonnblick und am Kitzsteinhorn kontinuierlich zu erfassen. Dabei verfolgte SeisRockHT einen Open-Design Ansatz, im Rahmen dessen der Open-Hardware Datenlogger ‚Ruwai‘ zum ersten Mal in einem hochalpinen Gelände eingesetzt wurde. Regelmäßige Geländeaufnahmen mittels terrestrischem Laserscanning bzw. Drohnenbefliegungen liefern aktive Steinschlagzonen und

quantifizierten deren akkumulierten Gesamtvolumina. Beide Untersuchungsgebiete bieten eine umfangreiche Palette an Komplementärdaten, die es ermöglichen, Steinschlag-Prozessketten umfassend zu beschreiben. Weitere Analysen und längere Zeitreihen sind allerdings noch notwendig um konkrete Zusammenhänge zwischen z.B. Steinschlagaktivität und der Degradation des Permafrosts im Rahmen der Klimaerwärmung herzustellen.

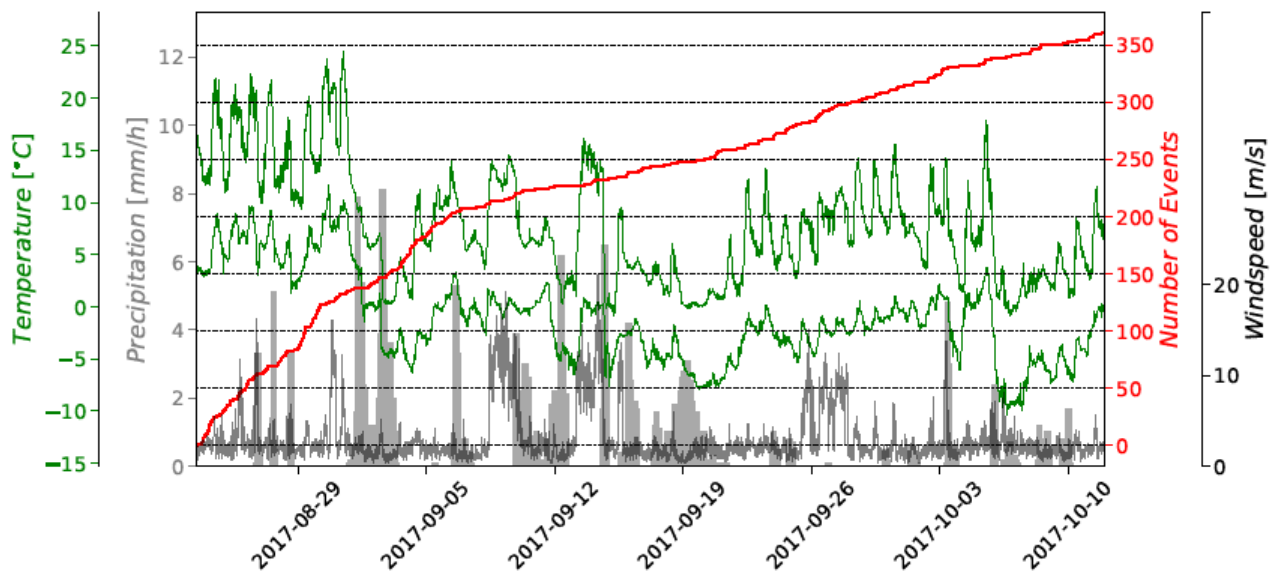


Abbildung 35: Kumulierte Anzahl detektierter Steinschlagereignis-Kandidaten (rote Linie) mit meteorologischen Komplementärdaten im Herbst 2017. Die grünen Linienverläufe zeigen die Lufttemperatur der Stationen Kolm-Saigurn (oben) und Sonnblick (unten). Eine eindeutige Abnahme der Steinschlagaktivität ist nach einem Temperaturrückgang in der Woche 29. August bis 05. September zu erkennen.

Auf Basis der unterschiedlichen Laufzeiten der seismischen Wellen zu den einzelnen Standorten Netzwerkes ist eine Abschätzung der räumlichen Lage der Aufprallzone möglich. Unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten eines Steinschlagevents aufzeichnet an zwei Messstandorten sind in nachstehenden Abbildungen dargestellt.

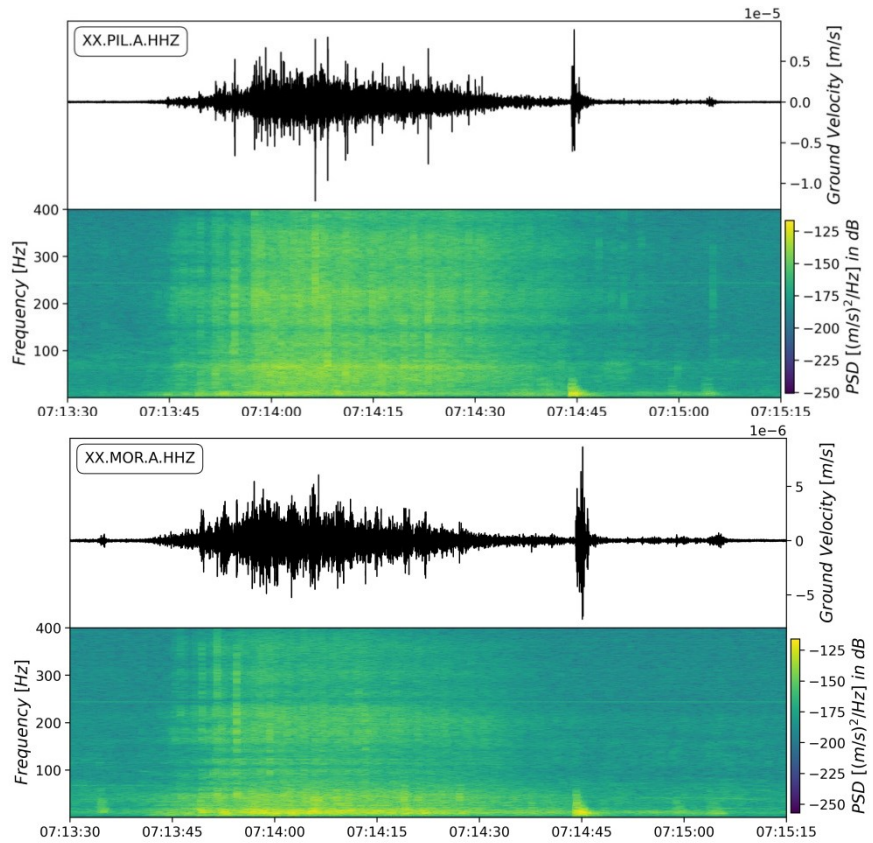


Abbildung 36 & 37:  
Seismikdaten vom Standort PIL (oben) und MOR (unten) eines Steinschlagereignisses vom 13. September, 2019.

Neben einem kontinuierlichen Steinschlagmonitoring, eröffnet eine ganzjährige Beobachtungsstrategie auch neue Forschungsfelder bei der Detektion von Muren bzw. Lawinen oder aber auch bei extremen Abflussmengen in Folge lokaler Starkregenereignisse wie die folgende Abbildung zeigt.

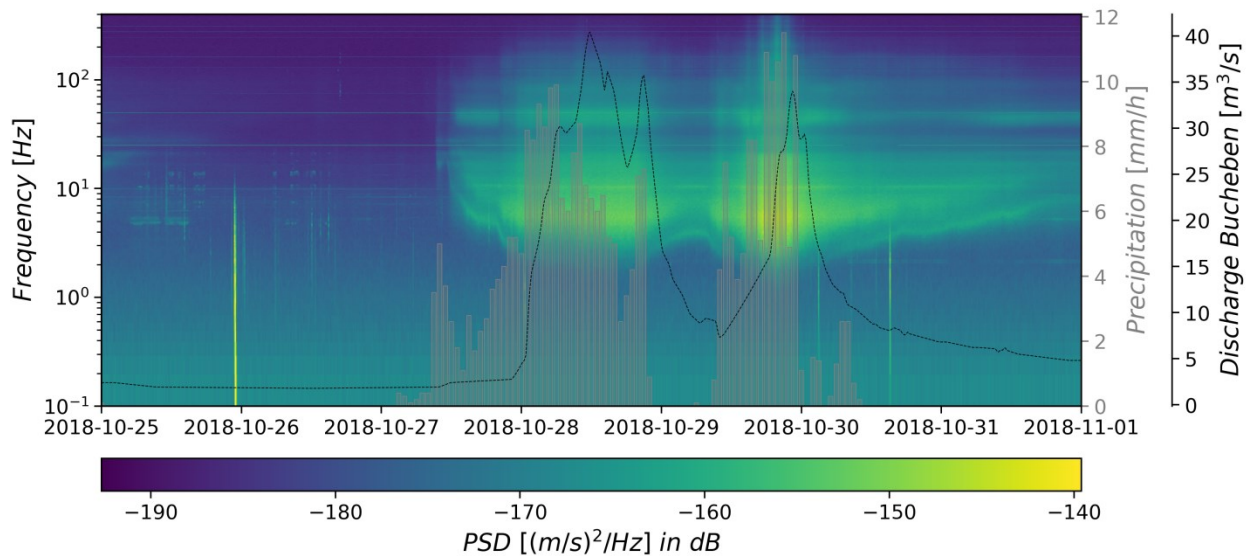


Abbildung 38: Die Abbildung zeigt die gemessene Hintergrund seismizität in Form eines Spektrogramms. Die schwarze Linie zeigt den gemessenen Abfluss der Hüttwinklache, und die grauen Balkendiagramme die stündlichen Niederschlagsraten. Die Hintergrundseismizität korreliert sehr gut mit dem gemessenen Abfluss.

## Literatur

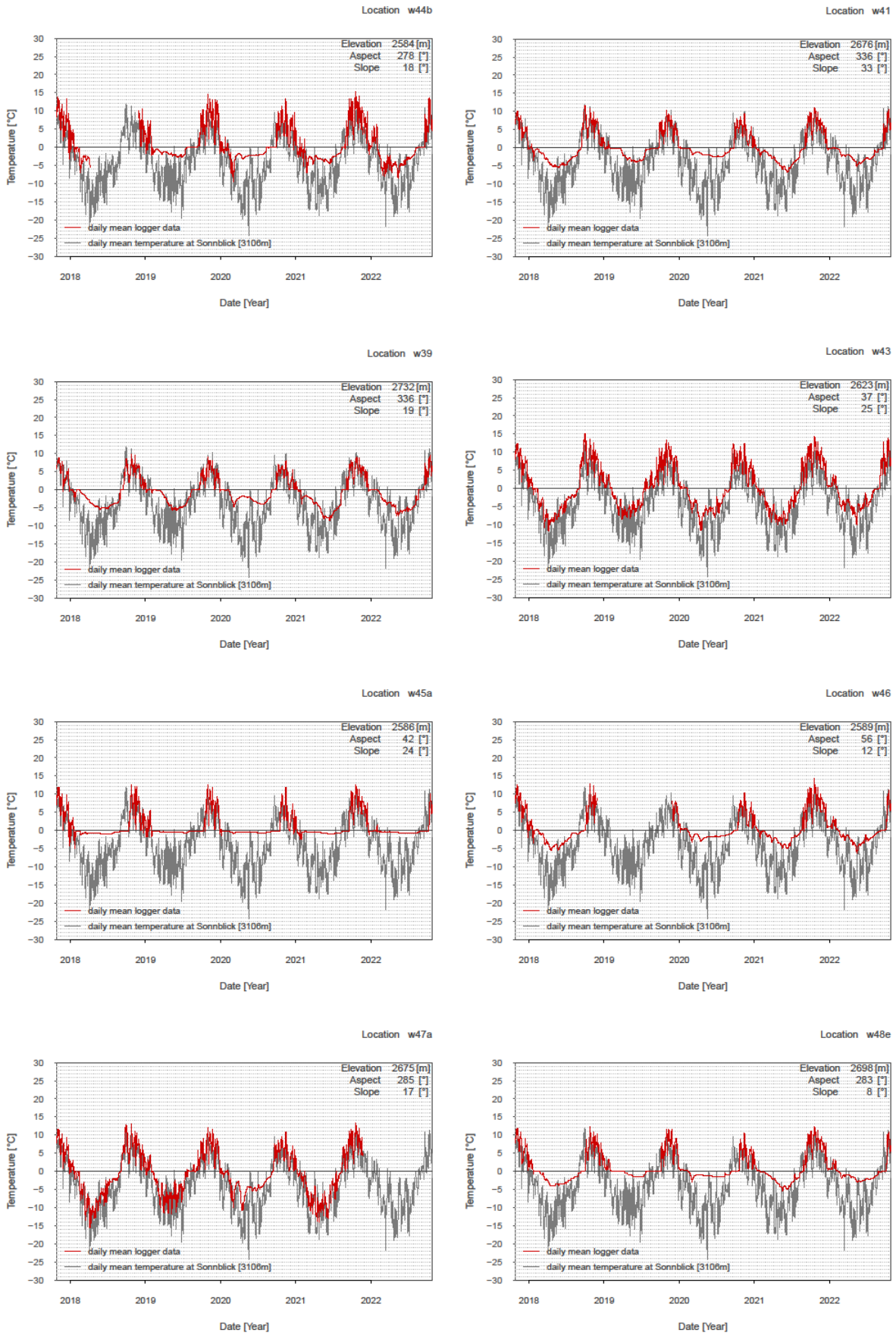
- Besl, P. and McKay, N. (1992): A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), pp.239-256.
- Boeckli L., Brenning A., Gruber S. & Noetzli J. (2012): Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics, *The Cryosphere*, 6, 807-820.
- Chen, Y. and Medioni, G. (1992): Object modelling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing*, 10(3), pp.145-155. Lague, D., Brodu, N., and Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, pp.10-26.
- 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.
- Hartmeyer I., Keuschnig M., Delleske R., Krautblatter M., Lang A., Schrott L., and Otto J.-C. (2020a): Current glacier recession causes significant rockfall increase: the immediate paraglacial response of deglaciating cirque walls. *Earth Surface Dynamics*, 8, 729-751.
- Hartmeyer I., Delleske R., Keuschnig M., Krautblatter M., Lang A., Schrott L., and Otto J.-C. (2020b): A 6-year lidar survey reveals enhanced rockwall retreat and modified rockfall magnitudes/frequencies in deglaciating cirques. *Earth Surface Dynamics*, 8, 753-768.
- 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.
- PERMOS 2019. Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2017/2018. Noetzli, J., Pellet, C., and Staub, B. (eds.), *Glaciological Report (Permafrost) No. 16-19 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences*, 104 pp, doi:10.13093/permos-rep-2019-16-19.
- Schöner W., Boeckli L., 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 Approaches. *Austrian Journal of Earth Science* 105

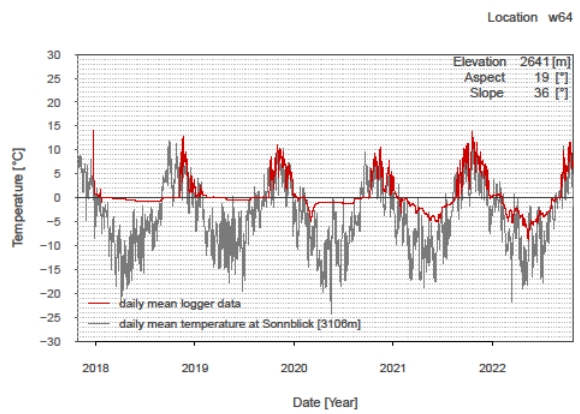
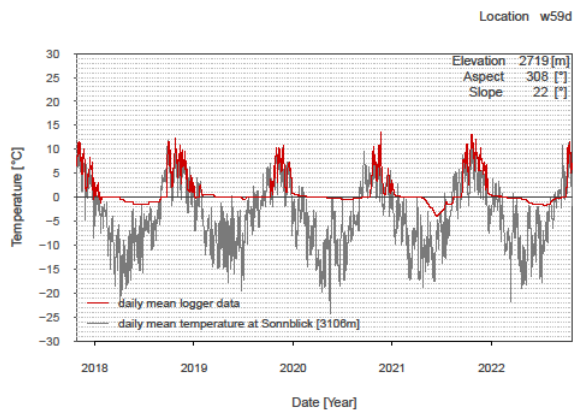
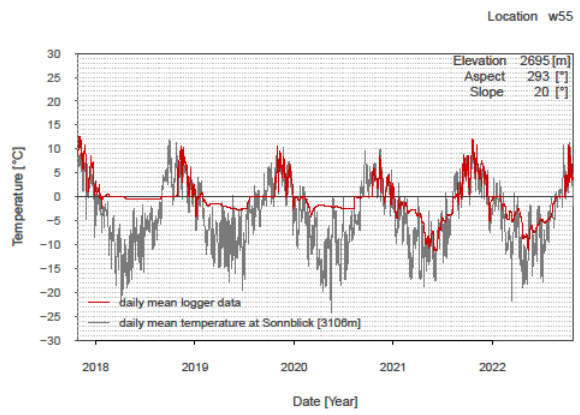
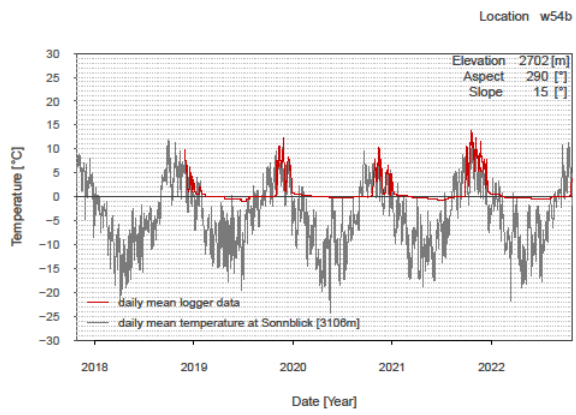
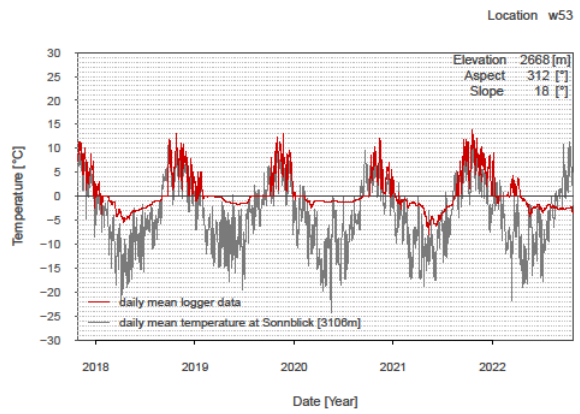
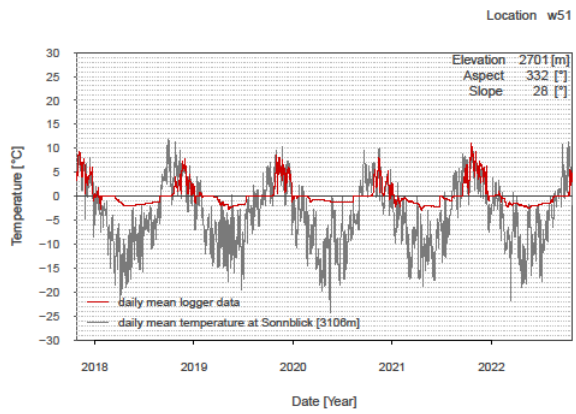
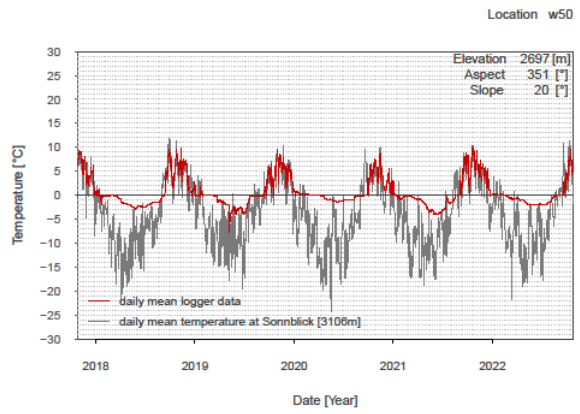
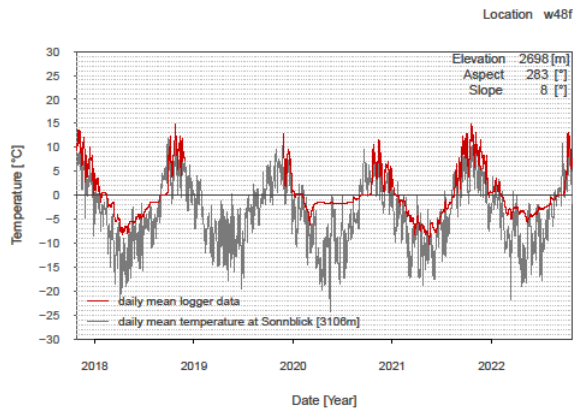
## Appendix A: Öffentlichkeitswirksame Tätigkeiten

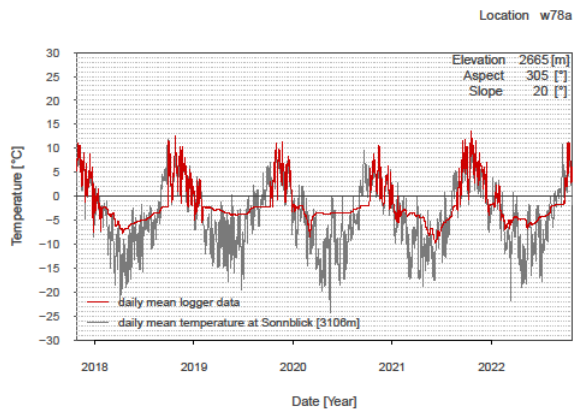
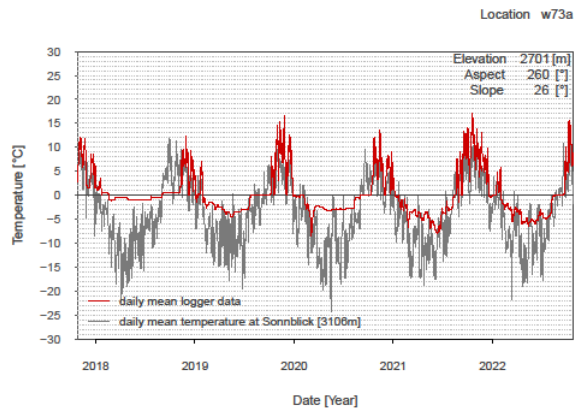
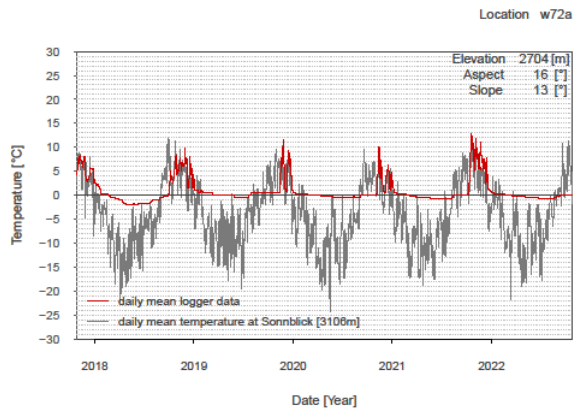
- Reisenhofer, S. (2019): PERSON – GCW Permafrostmonitoring Sonnblick: Etablierung des Sonnblicks (Hohe Tauern) als Global Cryosphere Watch Supersite. Endbericht. Auftraggeber Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus Abteilung I/4. Weblink: <https://www.sonnblick.net/ic-orig/Ru8jDWhtlOYgQ/Benutzerdaten/2014-2018 PERSON-GCW-ENDBERICHT.pdf>
- Reisenhofer, S. und Riedl, C. (2019): Permafrost Monitoring am Hohen Sonnblick Sonnblickgebiet. Sonnblick Observatorium - Wissenschaftliche Aktivitäten 2019, Seite 44. Weblink: <https://www.sonnblick.net/ic-orig/OA4zcRDgUZ1F/InhalteBroschueren/SBO Broschuere-Brochure 2019 FINAL.pdf>
- Reisenhofer, S. und Riedl, C. (2020): Permafrost Monitoring am Hohen Sonnblick. Sonnblick Observatorium - Wissenschaftliche Aktivitäten 2020, Seite 52. Weblink: <https://www.sonnblick.net/ic-orig/6XPTdbdEvnIPD/InhalteBroschueren/SBO Brosch-re-brochure FINAL www.pdf>
- Reisenhofer, S. (2022): Permafrost Monitoring Sonnblick Nordwand - Wissenschaftliche Aktivitäten 2022, Seite 58-59. Weblink: <https://www.sonnblick.net/ic-orig/Gr7FES7Fy7uWl/InhalteBroschueren/SBO-Broschuere 2022.pdf>
- Reisenhofer, S. (2023): Permafrost Monitoring Sonnblick Nordwand – Wissenschaftliche Aktivitäten, Seite 62-63. Weblink: <https://www.sonnblick.net/ic-orig/708awNWm/Benutzerdaten/SBO Broschuere-Brochure 2023 FINAL2www 202306.pdf>
- Reisenhofer, S. (21. August 2023): Permafrost-Beitrag beim Dokumentationsfilm: „Wenn die Alpen glühen“. Terra Mater. Hoher Sonnblick.
- Reisenhofer, S. (28. Sept. 2023): GCW-Permafrost-Monitoring Sonnblick. 25 Jahre International Permafrost Association, Mallnitz.
-



## Appendix B: GST-Messreihen 2018-2023







## Appendix C: GST-Standorte im Untersuchungsgebiet

Tabelle 8: 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	MAGST	MAGST	MAGST	MAGST	WEqT	WEqT	WEqT	WEqT	WEqT	GFI	THI	GFI	THI	GFI	THI	GFI	THI	GFI	THI
										2013/1 4	2014/1 5	2015/1 6	2016/1 7	2016/1 7	2013/1 4	2014/1 5	2015/1 6	2016/1 7	2016/1 7	2013/1 4	2013/1 4	2014/1 5	2014/1 5	2015/1 6	2015/1 6	2016/1 7	2016/1 7	2017/1 8	2017/1 8
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	northwest	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	debirs	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

\*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.

