

Hallstätter Gletscher

Massenhaushalt und Klima 2021/2022

Dr. Kay Helfricht, Mag. Klaus Reingruber, Dr. Andrea Fischer

Jahresbericht
des Instituts für Interdisziplinäre Gebirgsforschung
der Österreichischen Akademie der Wissenschaften
und der BLUE SKY Wetteranalysen
Traummüller und Reingruber OG



ENERGIE AG
Oberösterreich

ÖAW

ÖSTERREICHISCHE
AKADEMIE DER
WISSENSCHAFTEN



Blue Sky
Wetteranalysen



**LAND
OBERÖSTERREICH**

Hallstätter Gletscher

Massenhaushalt und Klima
2021/2022

Im Auftrag von

Energie AG Oberösterreich
Böhmerwaldstrasse 3
Postfach 298
A-4021 Linz, Austria
service@energieag.at
Tel.: +4305/9000 – 0
Fax.: +430800/818001

Land Oberösterreich
Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft
Promenade 37
A-4021 Linz, Austria
uwd.post@ooe.gv.at
Tel.: +43(0)732/7720 – 14550
Fax.: +43(0)732/7720 – 214549

Durchführung der Arbeiten

Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung
Österreichische Akademie der Wissenschaften
Innrain 25
A-6020 Innsbruck, Austria
www.mountainresearch.at

BLUE SKY Wetteranalysen, Traunmüller und Reingruber OG
Ingenieurbüro für Meteorologie
Steinhüblstrasse 1
A-4800 Attnang-Puchheim, Austria
<http://www.blueskywetter.com>

Dr. Kay Helfricht

kay.helfricht@oeaw.ac.at
Tel.: +43(0)512 507 49457

Mag. Klaus Reingruber

office@blueskywetter.at
Tel.: +43(0)7674 20660

Dr. Andrea Fischer

andrea.fischer@oeaw.ac.at
Tel.: +43(0)512 507 49451

Die Ergebnisse aller Messungen sowie der aktuelle Stand sind abrufbar unter
www.dachsteingletscher.info.

Kurzfassung

Im Massenhaushaltsjahr 2021/22 wurde der **größte jährliche Massenverlust** und somit die negativste Massenbilanz in der 16-jährigen Messreihe festgestellt. Am Ende des Winterzeitraumes war am Hallstätter Gletscher vor allem im Bereich der Zungen eine Schneemächtigkeit unter dem langjährigen Durchschnitt zu finden, wobei die Schneedecke an den Positionen der Schneeschächte mit über 6 Meter sogar leicht überdurchschnittlich ausfiel. Die gemessenen Schneedichten waren aufgrund des relativ trockenen Schnees für diese Jahreszeit gering. In Summe ergab sich für das Winterhalbjahr eine **unterdurchschnittliche Akkumulation**. Markante Ablagerungen von **Saharastaub** im März sowie das **Ausbleiben von Schneefälle** im Frühjahr in Kombination mit durchwegs überdurchschnittlichen Temperaturen im Mai führten zu einem raschen Schmelzen der Schneedecke. Bereits Anfang Juni, und damit im Vergleich zum Vorjahr um 4 Wochen eher, kam es zum ersten Ausapern des Eises. Niederschläge im Juni fielen bei für die Jahreszeit **hohen Temperaturen** als Regen und die **rasche Ausaperung** setzte sich über die Sommermonate fort. Trotz wechselhafter Witterung im August kam es zu keinem Neuschneefall. Das Maximum der Ausaperung wurde in der ersten Septemberwoche erreicht. Zu diesem Zeitpunkt war auf der gesamten Fläche des Hallstätter Gletschers **keine Rücklagen** aus dem vorangegangenen Winter mehr anzutreffen. Vielmehr wurde der Firm aus früheren Jahren aufgezehrt. In der zweiten Hälfte des Septembers kam es zwar wiederholt zu Schneefällen. Diese konnten aber den großen Eisverlust und damit das Ergebnis der Bilanz nicht mehr nennenswert beeinflussen. Die **spezifische Massenbilanz des Massenhaushaltsjahres 2020/21 beträgt -2602 mm** Wasseräquivalent. Dies entspricht einem Wasservolumen von $6367 \cdot 10^3 m^3$ Wasser bzw. einem **mittleren Eisdickenverlust von rund 3 m** gemittelt über die gesamte Gletscherfläche. Damit war die Bilanz um das 2,5-fache negativer als das langjährige Mittel und um 27% negativer als die bisherig negativste Bilanz. Allein im Massenhaushaltsjahr 2021/22 verlor der Hallstätter Gletscher rund 7% seiner noch existierenden Masse.

Seit Herbst 2006 werden am Hallstätter Gletscher Massenbilanzmessungen durchgeführt. Dabei wird mit Schneeschächten und Schmelzpegeln festgestellt, welche Menge an Schnee und Eis am Hallstätter Gletscher pro Jahr dazukommt oder abschmilzt. Wie hoch die Massenumsätze sind, hängt von der Witterung während des Jahres ab. Deshalb werden parallel zu den Messungen am Gletscher auch die Wetterdaten gemessen und aufgezeichnet. Das Land Oberösterreich und die Energie AG ermöglichen die Forschungsarbeiten unter der wissenschaftlichen Leitung des Institutes für Interdisziplinäre Gebirgsforschung der ÖAW in Zusammenarbeit mit BLUE SKY Wetteranalysen als Projektpartner vor Ort.

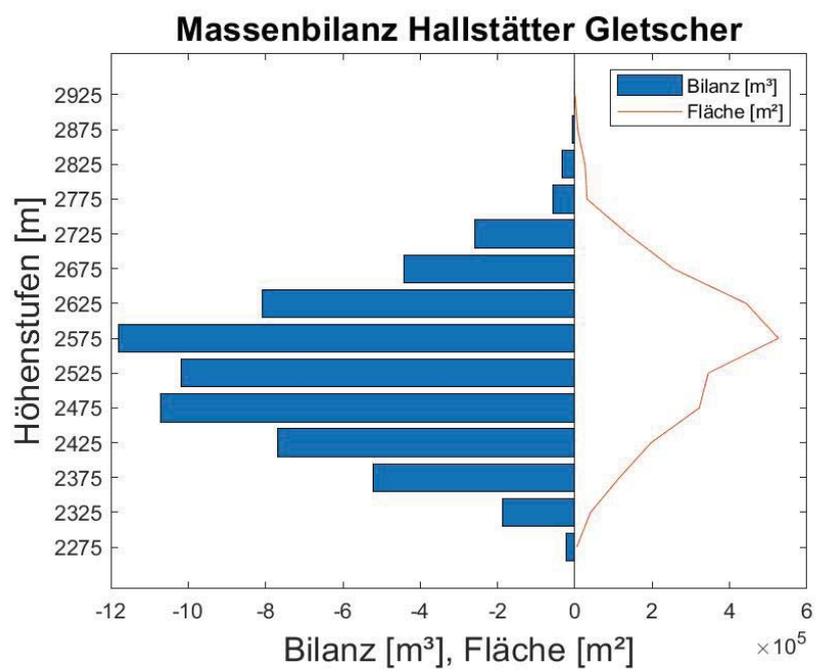


Abbildung 1: Massenbilanz sowie Verteilung der Fläche des Hallstätter Gletschers nach Höhenstufen 2021/22.

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel der Massenbilanzmessungen	1
2	Das Untersuchungsgebiet	2
3	Klima und Witterungsverlauf	3
4	Massenbilanz	7
4.1	Methode	7
4.2	Durchgeführte Arbeiten	7
4.2.1	Pegelablesungen	7
4.2.2	Frühjahrsbegehung	7
4.2.3	Herbstbegehung	7
4.2.4	Ausaperungsflächen	9
4.2.5	Niederschlag	10
4.2.6	Aktuelle Geländedaten	11
4.3	Auswertung	12
4.3.1	Winterbilanz	12
4.3.2	Jahresbilanz	13
4.3.3	Sommerbilanz	16
4.4	Online Massenbilanz	17
4.5	Weiterführende Arbeiten 2022	17
4.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	18
A	Anhang	20
A.1	MitarbeiterInnen und Danksagung	20
A.2	Definitionen	20
A.3	Fotos	21
	Literaturverzeichnis	29

1

Ziel der Massenbilanzmessungen

Gletscher sind empfindliche Indikatoren für Klimaänderungen. Dennoch gibt es weltweit nur wenige Gletscher an denen langjährige Reihen des Massenhaushaltes gemessen werden [5]. Massenbilanzmessungen dienen dabei zur Untersuchung des direkten Zusammenhanges zwischen Gletschern und dem Klima. Diese Verbindung drückt sich langfristig in Flächen- und Volumensänderungen aus. Entscheidend für die Entwicklung eines Gletschers sind Veränderungen im Bereich des Massengewinns, der Akkumulationszone, und der Bereich des Massenverlustes, der Ablationszone. Abbildung 1.1 zeigt einen schematischen Schnitt entlang der zentralen Fließlinie eines Gletschers.

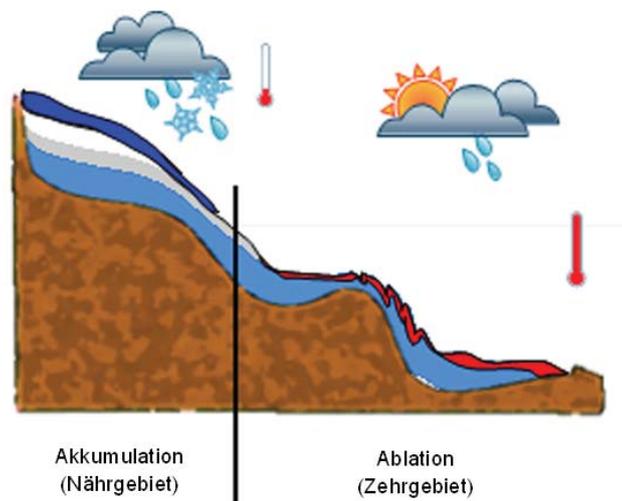


Abbildung 1.1: Schematischer Schnitt entlang der zentralen Fließlinie eines Gletschers. Farblich dargestellt sind die Eismasse des Gletschers (hellblau), im Bereich der Akkumulation Schnee (dunkelblau) und Firn (weiß/grau) sowie der Massenverlust (rot) im Ablationsgebiet. Die Thermometer geben die relativen Temperaturverhältnisse wieder.

Gelegen im Dachsteingebiet, gehört der Hallstätter Gletscher zu den nördlichen Kalkalpen und wird von den klimatischen Bedingungen des Alpennordrandes beeinflusst. Speziell in dieser Region treten erhöhte Niederschlagsmengen gegenüber dem Alpenhauptkamm auf. In Folge dessen kann sich der Gletscher in niedrigeren Höhenstufen halten. In Verbindung mit meteorologischen Daten und Massenbilanzmessungen über mehrere Jahre können solche Beziehungen näher untersucht werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse für das Massenhaushaltsjahr 2021/22 dargelegt.

2

Das Untersuchungsgebiet

Der Hallstätter Gletscher der größte Gletscher der nördlichen Kalkalpen [2]. Im Sommer 2018 fand eine neue Aufnahme der Gletscheroberfläche des Hallstätter Gletschers mittels luftgestütztem Laserscanning statt. Die topographischen Daten konnten auf Grundlage des digitalen Geländemodells und des Orthofotos (Land Oberösterreich) aktualisiert werden. Aufgrund größerer Verluste an der mittleren Zunge wurde deren Gletschergrenze für 2022 angepasst. Der Hallstätter Gletscher ist nordostseitig ausgerichtet und durch Felswände umrandet. An das große Plateau oberhalb von 2550 Meter Höhe schließen drei kurze Zungen an. Wie aus Abbildung 2.1 ersichtlich, befindet sich die flächenmäßig größte Höhenzone zwischen 2550 m und 2600 m. Der höchste Punkt des Gletschers liegt auf 2905 m, der niedrigstgelegene Punkt befindet sich auf 2280 m. Der Hallstätter Gletscher besitzt eine Fläche von $2,45 \text{ km}^2$ (Gletschergrenze 2022) und verlor somit mehr als die Hälfte seiner Ausdehnung gegenüber dem Gletscherhochstand 1856 [3]. Allein in den vergangenen 10 Jahren hat sich die Fläche des Hallstätter Gletschers um rund 20% verkleinert.

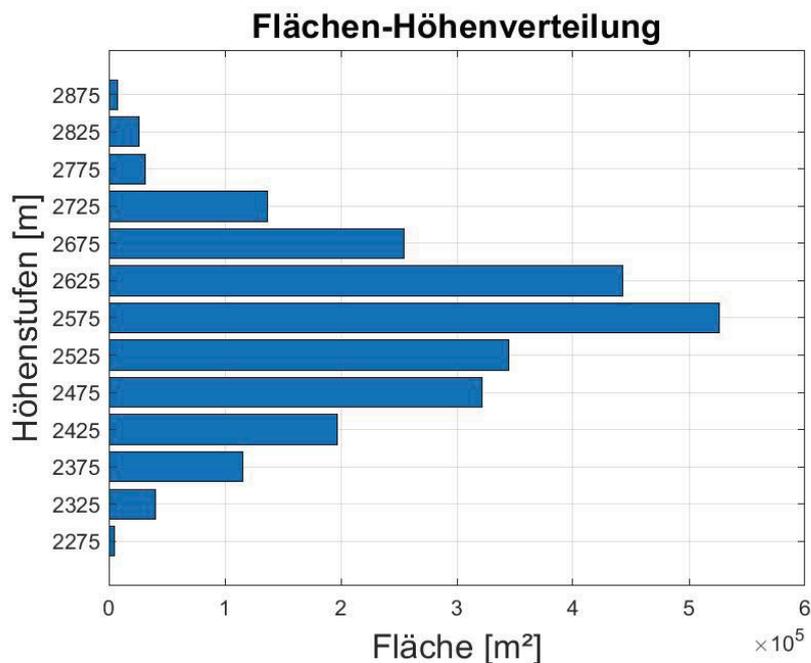


Abbildung 2.1: Flächen-Höhenverteilung des Hallstätter Gletschers auf Grundlage des Höhenmodells von 2018 und der adaptierten Gletschergrenze von 2022.

3

Klima und Witterungsverlauf

Die klimatischen Randbedingungen für den Hallstätter Gletscher unterscheiden sich von denen anderer österreichischer Gletscher mit Massenhaushaltsmessungen, welche am Alpenhauptkamm liegen [1]. Aufgrund seiner Exposition und Lage am Alpennordrand treten gegenüber dem österreicherischen Mittel erhöhte Niederschlagsmengen auf. Auch ist innerhalb des Landes Oberösterreich ein deutlicher Niederschlagszuwachs vom Mühlviertel bis zum Dachstein zu verzeichnen (Abb. 3.1). Dies begründet sich durch luvseitige Staueffekte bei nordwest- bis nordöstlicher Anströmung.

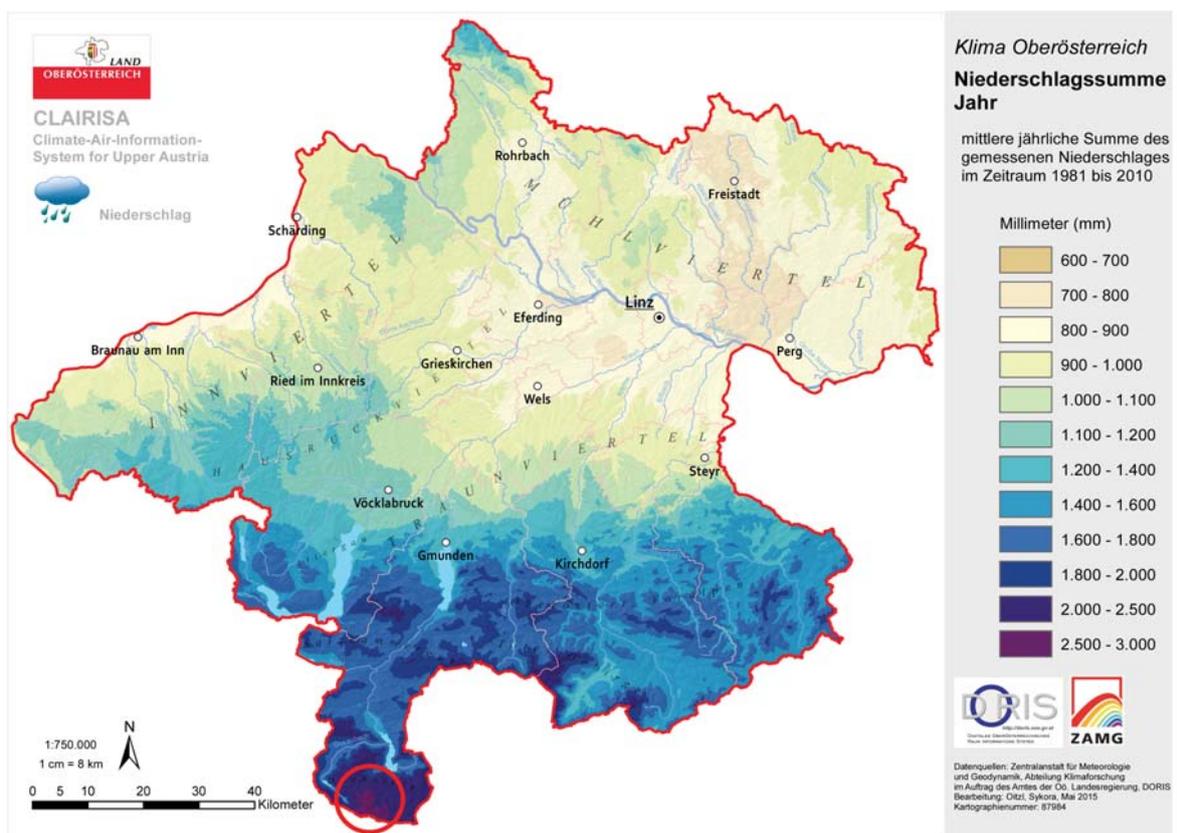


Abbildung 3.1: Mittlere Jahresniederschlagsmenge in mm (Datenquellen: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Klimaforschung im Auftrag des Amtes der Oö. Landesregierung, DORIS). Im Ausschnitt rot markiert die Lage des Hallstätter Gletschers.

Für den Massenhaushalt eines Gletschers in unserer Alpenregion sind drei meteorologische Parameter von besonderer Bedeutung:

1. der Niederschlag während des Winters,
2. die Sommertemperatur und
3. die Anzahl und Menge der Neuschneefälle während des Sommers.

Das hydrologische Jahr vom 1.10.2021 bis zum 30.09.2022 begann mit einem warmen und relativ trockenem Spätherbst. Der Kernwinter von Dezember bis Februar fiel bei den Temperaturen wie dem Niederschlag leicht überdurchschnittlich aus (Abb. 3.2 und 3.3). Dem folgte eine durchwegs trockenere und wärmere März, in dem es aber zur Akkumulation einer ausgeprägten Schicht an Saharstaub kam (Abb. 3.4 und 4.2). Diese Schicht wurde zunächst im April nochmals von Neuschnee überdeckt und ist in den Schächten Ende April gut erkennbar. Im Mai trug sie jedoch maßgeblich zur schnellen Schmelze bei. Bei der Frühjahrsbegehung am 28. und 29. April wurden Schachttiefen von 6,2 Meter sowie 6,8 Metern gegraben (Abb. A.9, A.10, A.1). Diese Schneehöhen an den Schachtpositionen sind zwar leicht überdurchschnittlich, jedoch zeigte sich die Schneedichte als für diese Jahreszeit verhältnismäßig gering, so dass die Akkumulation in etwa dem langjährigen Mittelwert entsprach. Sondierungen auf dem Gletscher zeigten, dass die Schneeverteilung am Hallstätter Gletscher Ende April aber sehr heterogen war, und nur eine geringmächtige Schneeauflage auf den Zungen des Gletschers vorgefunden wurde. In Summe reiht sich die Schneeakkumulation des Winters 2021/22 an der fünften Stelle der geringsten Winterbilanzen ein.

Im Mai kam es bei anhaltend für diese Jahreszeit warmer Witterung zu einer starken Schneeschmelze, die durch freilegen der Saharastaubschicht nochmals beschleunigt wurde. Die Niederschläge zu dieser Zeit fielen fast ausnahmslos als Regen. Bereits Anfang Juni wurden erste ausgeaperte Eisbereiche sichtbar (Abb. A.2). Dies ist im Vergleich zum Vorjahr etwa 4 Wochen eher. Auch über die Sommermonate waren die Niederschlagsmengen nahe den Mittelwerten (Abb. 4.2). Dabei kam es bis in den September hinein zu keinem Schneefallereignis. Die Temperaturen im Juni und Juli lagen über lange Perioden über dem Klimamittel und rascher Abbau der Schneedecke und hohen Eisschmelzraten konnten beobachtet werden (Abb. A.3 und A.4). Der Maximalstand der Ausaperung wurde in der ersten Septemberwoche erreicht (Abb. A.5 und A.8). Am 10. und 11. September kam es zum ersten Schneefall mit der Ausbildung einer sehr dünnen Schneedecke über den gesamten Gletscher, welche bis zum 15. September wieder nahezu geschmolzen war. Wiederholte Schneefälle in der zweiten Septemberhälfte legten den gesamten Gletscher unter eine Schneedecke (Abb. A.6). Die Herbstbegehung fand am 01.10.2022 statt. Zu diesem Zeitpunkt war die Schneeauflage am Hallstätter Gletscher zwischen 25 cm an der Zunge bis zu 110 cm an den Schachtpositionen mächtig (Abb. A.7).

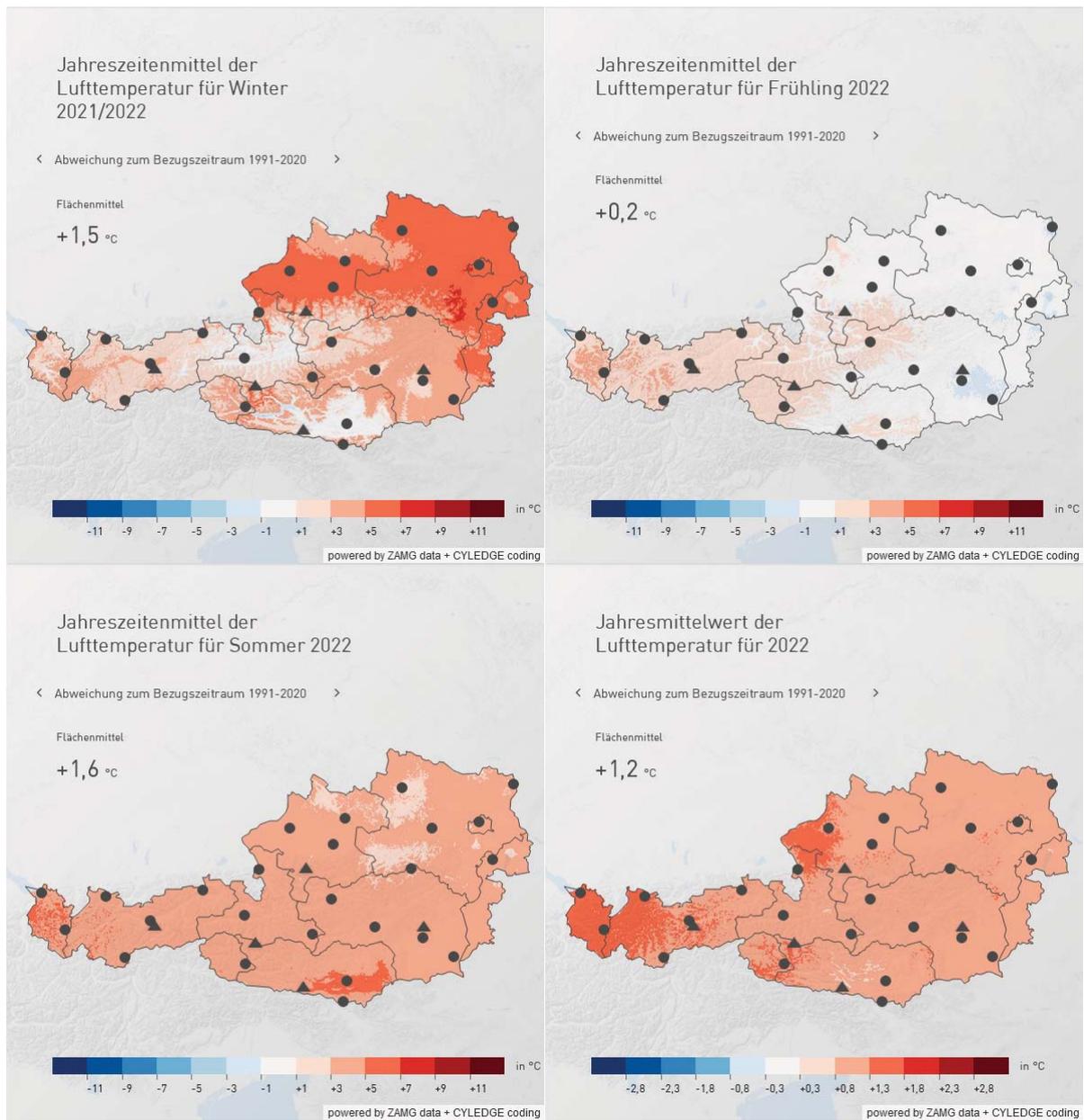


Abbildung 3.2: Übersicht der Abweichungen vom langjährigen Mittel der Temperatur für die Jahreszeiträume Winter (DJF), Frühling (MAM) und Sommer (JJA) sowie für das gesamte Jahr 2022. Die Abbildungen werden von der ZAMG unter www.zamg.ac.at zur Verfügung gestellt.

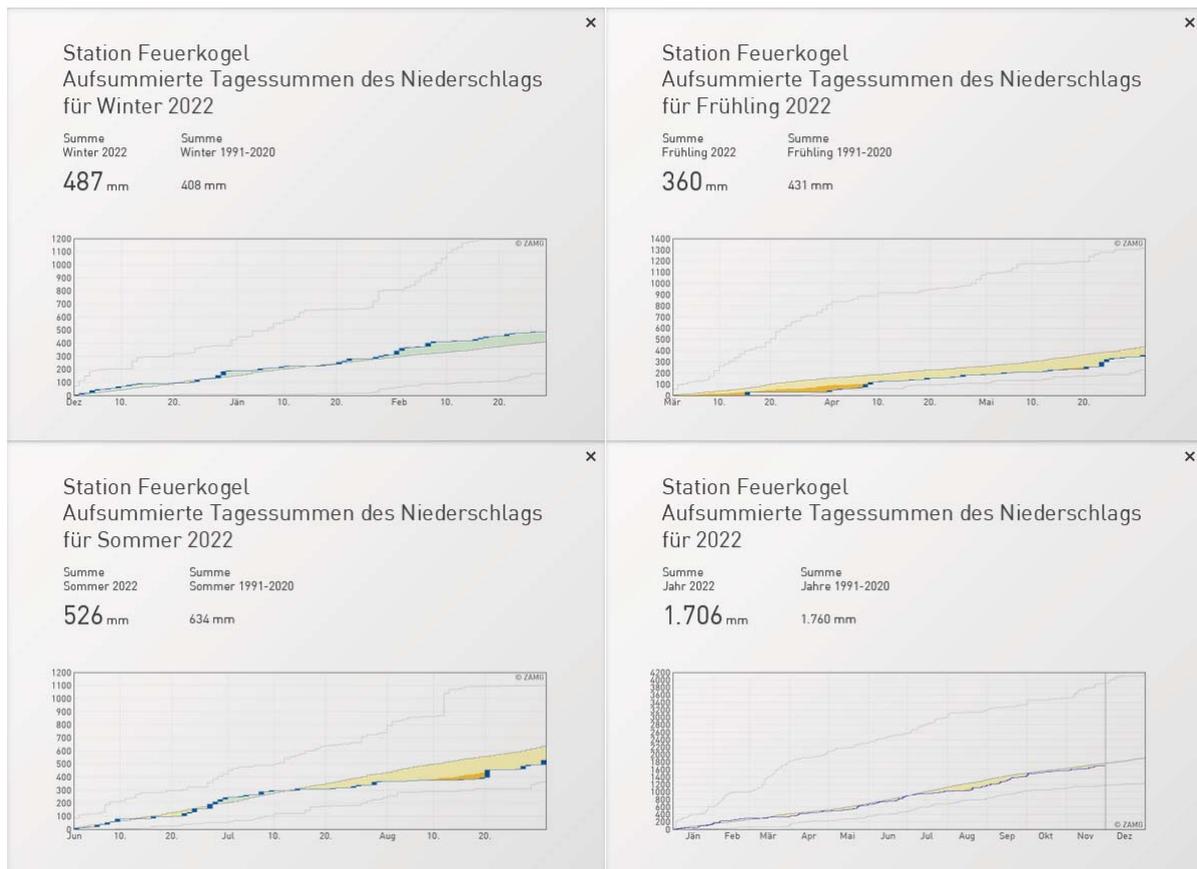


Abbildung 3.3: Übersicht der Abweichungen vom langjährigen Mittel des Niederschlags (unten) für die Jahreszeiträume Winter (DJF), Frühling (MAM) und Sommer (JJA) sowie für das gesamte Jahr 2022. Die Abbildungen werden von der ZAMG unter www.zamg.ac.at zur Verfügung gestellt.

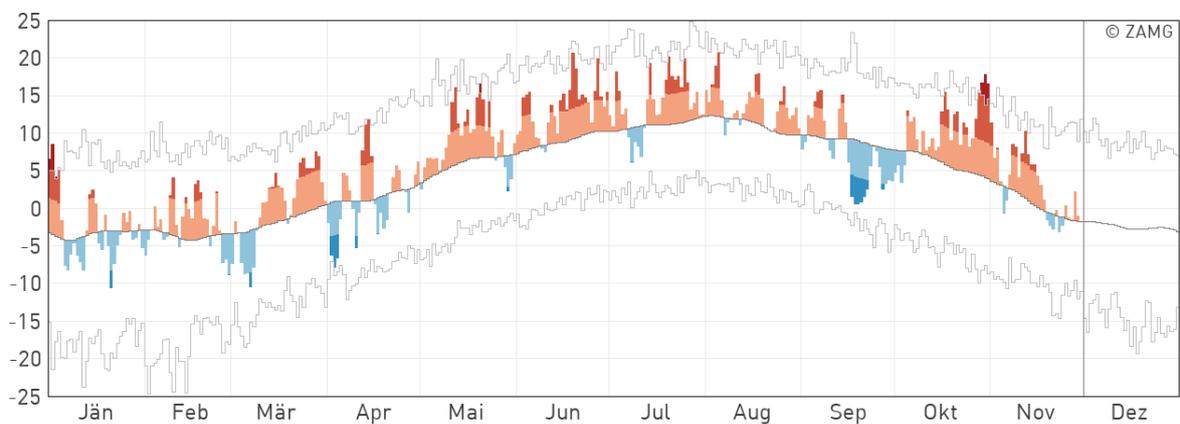


Abbildung 3.4: Temperaturverlauf des Jahres 2022 an der Station Feuerkogel (Mittel bezogen auf die Periode 1961 bis 1990). Die Abbildung wird von der ZAMG unter www.zamg.ac.at zur Verfügung gestellt.

4

Massenbilanz

4.1. Methode

Der Massenhaushalt eines Gletschers beschreibt, wie viel Schnee oder Eis in einem Haushaltsjahr dazugekommen oder abgeschmolzen ist. Zur Erstellung der Massenbilanz mit der direkten glaziologischen Methode werden Messungen an mehreren Stellen eines Gletschers vorgenommen [4]. Im Ablationsgebiet (Zehrgebiet) dienen Holzpegel dazu, anhand Ablesens des freien Endes die Schmelze zu ermitteln. Im Akkumulationsgebiet (Nährgebiet) werden Schächte bis zur Gletscheroberfläche des Vorjahres gegraben. Aus deren Dichteprofil wird das Wasseräquivalent des akkumulierten Schnees errechnet. Der Massenhaushalt wird für den Zeitraum des hydrologischen Jahres vom 1.10. bis 30.09. des darauffolgenden Jahres bestimmt. Aus der Aufsummierung der Akkumulation des Winterhalbjahres mit der Ablation der Schmelzsaison erhält man die Massenbilanz eines Jahres [6].

4.2. Durchgeführte Arbeiten

4.2.1. Pegelablesungen

Im Massenhaushaltsjahr 2021/22 wurden die Pegel im Rahmen der Herbstbegehung am 14.09.2021 abgelesen, sowie im Jahr 2022 am 28.6., 19.7., 23.8. und zu der Herbstbegehung am 01.10.2022. Die Positionen der Pegel sind der Abbildung 4.1 zu entnehmen. Am 28.6. wurden die Pegel 21, 25, 27, 28, 29, 30, 34 und 36 neu gebohrt. Im oberen teil des östlichen Gletscherteils wurde im Bereich der Langlaufloipe ein zusätzlicher Pegel (P39) installiert.

4.2.2. Frühjahrsbegehung

Zur Erstellung der Winterbilanz eines Gletschers wird um den 1. Mai des Jahres die Frühjahrsbegehung durchgeführt. Das Graben von Schächten und die Erstellung des Dichteprofiles sowie die Sondierungen der Schneedecke dienen hierbei zur Ermittlung der Verteilung der Schneeakkumulation und der Berechnung des entsprechenden Wasseräquivalents.

Die Frühjahrsbegehung des Hallstätter Gletschers 2022 fand am 28. und 29. April statt (Abb. A.1). Als Ausgangspunkt diente die Dachsteinbahn am Hunerkogel. Im Rahmen der Begehung wurden die Frühjahrschächte 3 und 4 mit einer Höhe von 6,2 m und 6,8 m (Abb. A.9, A.10, A.11) egraben. Zusätzlich wurden Schneehöhen sondiert. Die Positionen der Schächte sind der Abb. 4.1 zu entnehmen.

4.2.3. Herbstbegehung

Die Herbstbegehung dient zur Bestimmung der Schneerücklagen, welche die Ablationssaison bis zum 30. September des Jahres überdauert haben. Auch hier wird die räumliche Verteilung durch Sondierungen aufgenommen wenn noch entsprechende Rücklagen zu finden sind oder bereits eine Neuschneedecke existiert. Mit der anhand von Schneeschächten berechneten mittleren Dichte des Schnees wird das Wasseräquivalent der verbliebenen Schneedecke ermittelt. Zusätzlich werden Pegelablesungen durchgeführt, um die maximale Eisablation an den Pegelpositionen zu bestimmen. Anhand der Ergebnisse dieser Messungen wird die Jahresbilanz des hydrologischen Jahres erstellt.

Die Herbstbegehung fand am 01. Oktober 2022 statt (Abb. A.7). Aufgrund der bestehenden Schneedecke wurde mit Skiern abgefahren und aufgestiegen. Trotz des Schnees konnten fast alle Ablationspegel aufgefunden und abgelesen werden. Aufgrund der fehlenden Rücklagen und der geringen Schneebdeckung wurde die Dichte im Bereich des Pegels 28 und am Herbstschacht 3 gemessen (Abb. 4.1). An diesem war eine Neuschneehöhe von 107 cm feststellbar. Unter dem Neuschnee war keine Altschneedecke aus dem vergangenen Winter übrig geblieben.

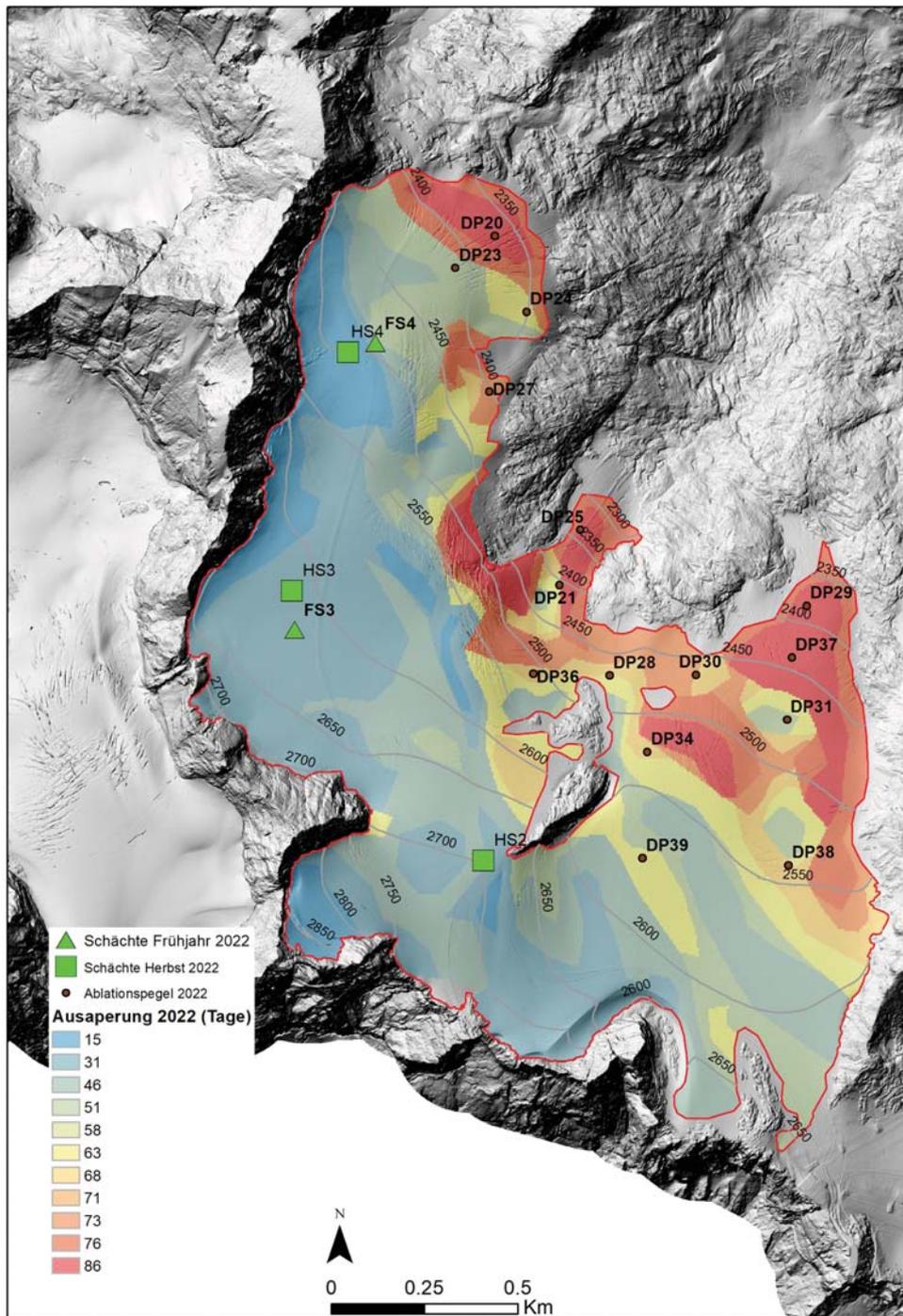


Abbildung 4.1: Positionen der Pegel (DP mit Bezeichnung des Jahres der Bohrung) und Lage der Frühjahrs sowie Herbstschächte 2021/22. Die Dauer der Ausaperung in Tagen aus Sentinel-2 optischen Bildinformationen ist farblich hinterlegt. Kartengrundlage: Orthofoto 2018 (Land Oberösterreich).

4.2.4. Ausaperungsflächen

Unter Verwendung von optischen Satellitendaten des Sentinel-2 Satelliten lassen sich schneebedeckte von bereits ausgeparten Gletscherflächen sehr gut unterscheiden. Für die Berechnung der Massenbilanz 2021/22 konnten die Ausaperungsmuster für 9 Aufnahmezeitpunkte zwischen dem 19.6. und dem 02.09. kartiert und

die Anzahl der schneefreien Tage bis Ende August ausgewertet. Die farblich gekennzeichneten Flächen wurden zur Auswertung der Bilanz einbezogen (Abb. 4.1). Die letzte auswertbare Aufnahme stammt vom 02.09.2022 (Abb. A.8). Geht man von einem Einschneien des Gletschers am 17.9.2022 aus, so ergibt sich eine maximale Dauer der Auserperung von 100 Tagen für jene Flächen, die Anfang Juni bereits schneefrei waren.

4.2.5. Niederschlag

Der bisher zur Niederschlagsmessung verwendete Totalisator im Bereich des Gletschervorfeldes der mittleren Zunge des Hallstätter Gletschers wurde im Sommer 2020 endgültig abgebaut (Abb. ??). Die automatische Niederschlagsmessung im Bereich der Simonyhütte ist nunmehr seit drei Jahren in Betrieb. Auch wenn die Daten von Totalisator und neuer Niederschlagsmessung zunächst nicht direkt übertragbar sind, so bieten die zeitlich besser aufgelösten Daten des Niederschlagsmessers an der Simonyhütte bereits jetzt einen detaillierteren Einblick in das Niederschlagsgeschehen am Hallstätter Gletscher.

Die Tabelle 4.2 zeigt die jährlichen Niederschlagssummen der Haushaltsjahre seit 2006/07, dem ersten Jahr der Messungen. Mit einem Jahresniederschlag von 1942 mm lag das Haushaltsjahr etwa 10% unter dem Mittelwert der Jahre 2006/07 bis 2020/21 (2197 mm). Vor allem der geringe Winterniederschlag der Monate Oktober und März treten ist auffällig (Abb. 4.2). Die Sommermonate verliefen aus Sicht der Niederschlagsmengen im Mittel, wobei es wie bereits besprochen, aber fast ausnahmslos zu flüssigen Niederschlag kam. Die Niederschlagssummen der einzelnen Monate sind der Tabelle 4.1 zu entnehmen.

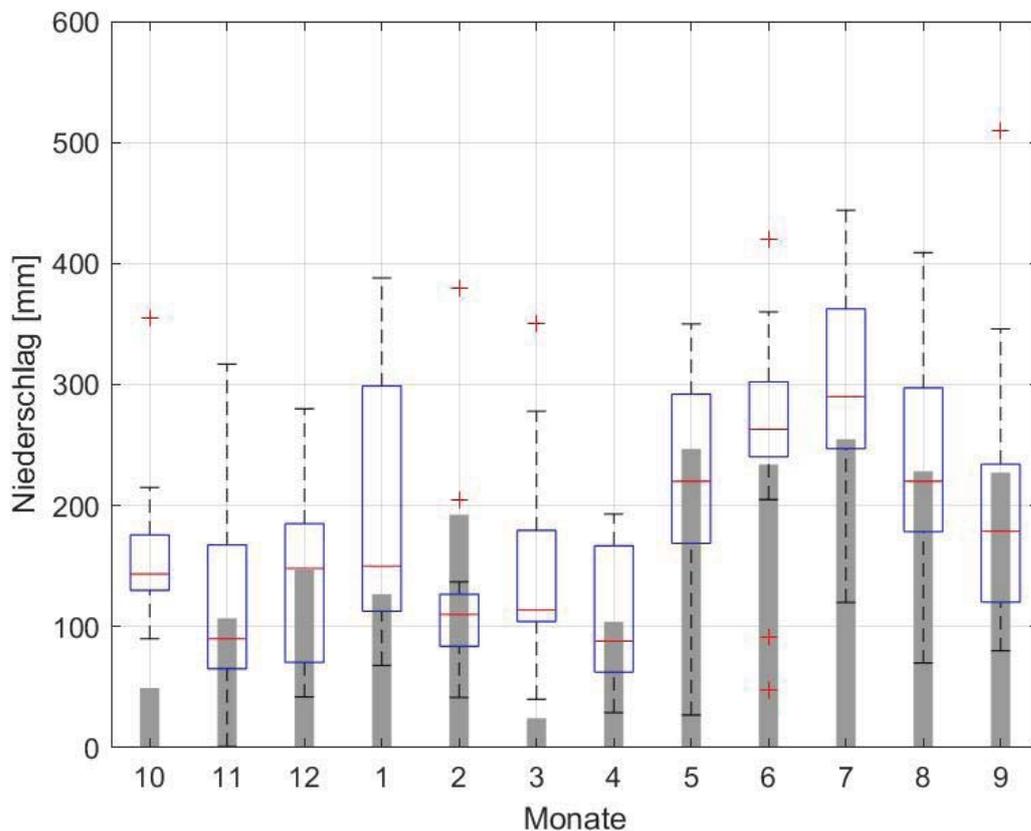


Abbildung 4.2: Vergleich der monatlichen Niederschlagssummen des Haushaltsjahres 2021/22 (graue Balken) gegenüber der statistischen Verteilung der Monatsniederschläge von 2006 bis 2021. Die rote Linie kennzeichnet den Median, die blauen Boxen zeigen alle Werte innerhalb der 25% und der 75% Perzentile. Rote Kreuze zeigen davon deutlich abweichende Minimal- oder Maximalwerte.

Datum	Niederschlag [mm]
31.10.2021	49
30.11.2021	107
31.12.2021	147
31.01.2022	127
28.02.2022	193
31.03.2022	24
30.04.2022	104
31.05.2022	247
30.06.2022	234
31.07.2022	255
31.08.2022	228
30.09.2022	227
Gesamt	1942

Tabelle 4.1: Monatsniederschlag 2021/22.

Haushaltsjahr	Jahresniederschlag [mm]
2006/07	2615
2007/08	2259
2008/09	2710
2009/10	2290
2010/11	1850
2011/12	2287
2012/13	2381
2013/14	2474
2014/15	2383
2015/16	1968
2016/17	2251
2017/18	2020
2018/19	2045
2019/20	2029
2020/21	1641
2021/22	1942
Mittelwert	2197

Tabelle 4.2: Jahresniederschlag 2006/07-2021/22.

4.2.6. Aktuelle Geländedaten

Mit Hilfe der vom Land Oberösterreich zur Verfügung gestellten neuen Höhenmodelle auf Grundlage der Luftgestützten Laserscanningaufnahmen 2018, sowie dem Orthofoto, konnte die Gletschergrenze neu aufgenommen und die aktuelle Höhe der Gletscherfläche bestimmt werden. Diese wurde aufgrund der raschen Zerfallsserscheinungen an der mittleren Zunge für 2020 angepasst. Eine weitere Anpassung erfolgte 2022 aufgrund der großflächigen Ausaperungen an der westlichen Zunge und unterhalb des Eissteins sowie weiteren Verlusten an den Gletscherzungen. Die Gesamtfläche beträgt $2,45 \text{ km}^2$ mit Stand September 2022.

4.3. Auswertung

4.3.1. Winterbilanz

Die Winterbilanz bezieht sich auf den Zeitraum vom 01.10. eines Jahres bis zum 30.04. des darauffolgenden Jahres. Für die Winterbilanz wird zunächst der Wasserwert der Schneedecke an den Schachtpositionen aus dem Dichteprofil ermittelt. Anhand von Sondierungen wird die Höhe der Schneedecke gemessen. Unter Verwendung der mittleren Dichte aus den Schneeschächten wird der Wasserwert an den Sondierungspositionen berechnet. Wurde vor dem 01.10. bereits eine Schneedecke akkumuliert, so muss diese von den Bilanzwerten abgezogen werden. Zwischen den Punktmessungen wird der erhaltene Wasserwert der Winterschneedecke über die Fläche des Gletschers interpoliert. Die Verteilung der Winterbilanz ist in Abbildung 4.3 ersichtlich. Aus Tabelle 4.3 gehen Dichte und Wasserwert der Schächte hervor. Tabelle 4.4 zeigt die Werte der Winterbilanz nach Höhenstufen, gültig von 01.10.2021 bis 30.04.2022. Die Winterbilanz B_{wi} wird durch Integration über die jeweiligen Flächen der Höhenstufen berechnet. Die mittlere spezifischen Winterbilanz b_{wi} erhält man durch Division von B_{wi} durch die Gesamtfläche.

$$B_{wi} = 4136,9 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b_{wi} = 1689 \text{ mm}$$

Schachtnummer	Tiefe [m]	Dichte [kg/m^3]	Wasserwert [mm]
3	6,20	425	2635
4	6,80	437	3027

Tabelle 4.3: Frühjahrsschächte 2022. Die angegebenen Schachttiefen sind die Gesamttiefen inklusive des im Herbst 2021 gefallenen Neuschnees. Dieser ist im Wasserwert bereits abgezogen.

Höhenstufe [m]	Fläche [km^2]	Bilanz [10^3 m^3]	Wasserwert [mm]
2850 – 2900	0,007	17,9	2500
2800 – 2850	0,026	64,8	2489
2750 – 2800	0,031	67,0	2131
2700 – 2750	0,136	254,7	1867
2650 – 2700	0,255	510,8	2007
2600 – 2650	0,443	884,1	1995
2550 – 2600	0,526	894,3	1700
2500 – 2550	0,345	539,5	1565
2450 – 2500	0,322	479,9	1492
2400 – 2450	0,197	247,7	1257
2350 – 2400	0,115	126,2	1093
2300 – 2350	0,004	44,5	1100
2250 – 2300	0,005	5,2	1100
Gesamt	2,449	4136,9	1689

Tabelle 4.4: Flächen- und Höhenverteilung der Winterbilanz 2021/22 (Gletscherfläche Stand 2022).

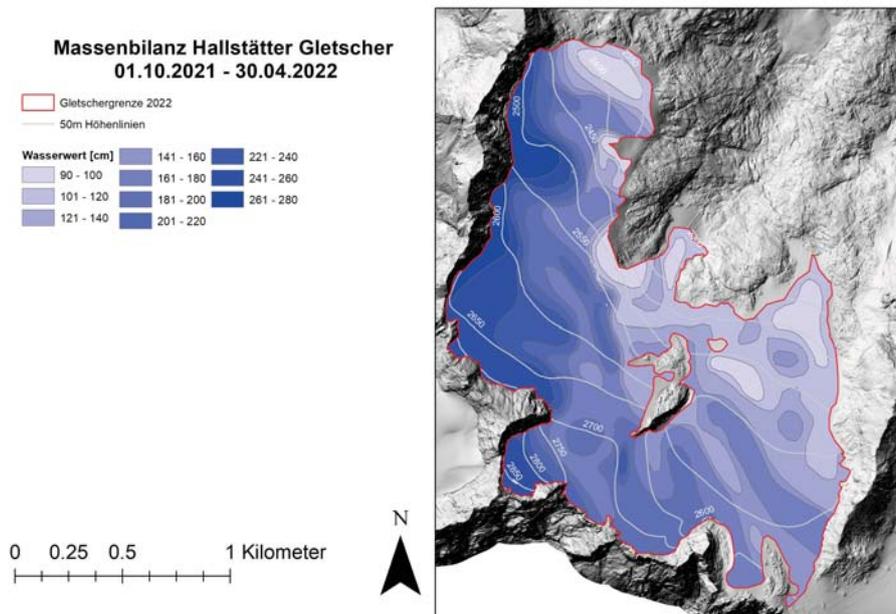


Abbildung 4.3: Flächen gleichen Wasserwertes der Winterbilanz 2021/22.

4.3.2. Jahresbilanz

Für die Massenbilanz des hydrologischen Jahres vom 01.10. bis 30.09. werden zusätzlich zu den ermittelten Rücklagen an den Schneeschächten die Messwerte der Ablation an den Pegeln hinzugezogen (Tab. 4.5). An den Pegeln wird anhand des über die Ablationssaison freigelegten Endes unter Verwendung der mittleren Dichte von Eis $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$ der Massenverlust an der Eisoberfläche ermittelt. Entsprechend der Winterbilanz wird der Wasserwert an den Schachtpositionen berechnet (Tab. 4.6). Aus den Sondierungen der Altschneedecke, Fotos, Webcam-Bildern und den Wasserwerten an Schächten und Pegeln wird eine Karte mit Isoflächen gleicher spezifischer Massenbilanz erstellt (Abb. 4.5). Über die Flächen- Höhenverteilung der spezifischen Bilanz wird die mittlere spezifische Bilanz der einzelnen Höhenstufen berechnet (Tab. 4.7, Abb. 4.4). Durch Integration der jeweiligen Flächen in den Höhenstufen mit ihren zugehörigen mittleren spezifischen Bilanzen wird die Nettojahresbilanz B berechnet. Nach Division dieser durch die Gesamtfläche des Gletschers erhält man die mittlere spezifische Jahresbilanz b .

$$B = -6372,1 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b = -2602 \text{ mm}$$

Pegelnummer	Wasserwert [mm]	Pegelnummer	Wasserwert[mm]
DP 20	-5133	DP 30	-3465
DP 21	-4298	DP 31	-1919
DP 23	-3729	DP 34	-3473
DP 24	-4354	DP 36	-3596
DP 25	-5493	DP 37	-4734
DP 27	-3926	DP 38	-2530
DP 28	-3239	DP 39	-2382
DP 29	-4430		

Tabelle 4.5: Wasserwerte der Massenbilanz an den Pegeln (01.10.2021-30.09.2022)

Schachtnummer	Tiefe [m]	Dichte [kg/m^3]	Wasserwert [mm]
Schacht 3	1,07	299	320

Tabelle 4.6: Herbstschacht 2022. Die angegebenen Schachttiefe im September 2022 besteht ausschließlich aus gefallenem Neuschnee.

Höhenstufe [m]	Fläche [km ²]	Bilanz [10 ³ m ³]	Wasserwert [mm]
2850 – 2900	0,007	-5,4	-759
2800 – 2850	0,026	-32,4	-1244
2750 – 2800	0,031	-57,7	-1836
2700 – 2750	0,136	-258,6	-1896
2650 – 2700	0,255	-440,9	-1732
2600 – 2650	0,443	-808,8	-1825
2550 – 2600	0,526	-1180,9	-2245
2500 – 2550	0,345	-1017,0	-2949
2450 – 2500	0,322	-1070,4	-3329
2400 – 2450	0,197	-769,0	-3901
2350 – 2400	0,115	-521,9	-4519
2300 – 2350	0,004	-186,5	-4611
2250 – 2300	0,005	-22,5	-4750
Gesamt	2,449	-6372,1	-2602

Tabelle 4.7: Flächen- und Höhenverteilung der Jahresbilanz 2021/22.

Die Massenbilanz 2021/22 zeigt den größten Eismassenverlust in der 16-jährigen Messreihe und ist damit die negativste, gemessene Bilanz. Die Höhe der Gleichgewichtslinie (ELA - equilibrium line altitude) lag über dem Niveau des Gletschers. Zum Maximum der Ausaperung war der Hallstätter Gletscher komplett aper. Es gab keine Gletscherbereiche mit Rücklagen aus dem vorangegangenen Winter. Dieser Zustand ist im Haushaltsjahr 2021/2022 in der ersten Septemberwoche erreicht wurden (Vgl. Abb. A.4 und Abb. ??). Nach einer leicht unterdurchschnittlichen Akkumulation im Winter von rund 85% des langjährigen Mittelwertes kam es zu einer raschen Abbau der Schneedecke und ersten Ausaperungen des Gletschereises bereits Anfang Juni. Bei stetig überdurchschnittlichen Temperaturen und Niederschlägen stets in Form von Regen im Juli und August kam es zu der kompletten Ausaperung des Gletschereises sowie älterer Firnkörper. Die Ablation erreichte über die gesamte Gletscherfläche verteilt neue Spitzenwerte (Tab. 4.5, Abb. 4.5). Im Mittel über die gesamte Messzeitreihe (Saison 2006/07-2020/21) beträgt die Massenbilanz -1754 mm. Die vergangene Saison war also um rund 150% negativer als das Mittel der gesamten Zeitreihe über 15 Jahre (Abb. 4.7), wobei die Winterbilanz in 16% unter dem Mittel lag (aber 15% über dem bisherigen Wert der geringsten Winterakkumulation), und die Sommerbilanz knapp 40% negativer als das Mittel aller Sommerbilanzen bis 2021 ausfiel (116 mm bzw. 3% negativer als bisheriger Rekord der Sommerbilanz von 2014/15 und 2017/18). Aus der Kombination von unterdurchschnittlicher Akkumulation und maximal negativer Massenbilanz ergab sich der neue Negativrekord, welcher den bestehenden Negativrekord aus dem Massenhaushaltsjahr 2010/2011 um 27% übertrifft. Große Veränderungen und eine Erhöhung der Gefahr von Stein- der Eisschlag konnte im Bereich der mittleren Zunge festgestellt werden. Aus der zunehmenden Schuttbedeckung oberhalb des Pegels 25 heraus kommt es immer wieder zu rollenden Steinen (Abb. A.13). Am 23.08.2022 konnte gar ein Eissturz aus stark spaltigen Bereich zwischen mittlerer und westlicher Zunge beobachtet werden (Abb. A.14).

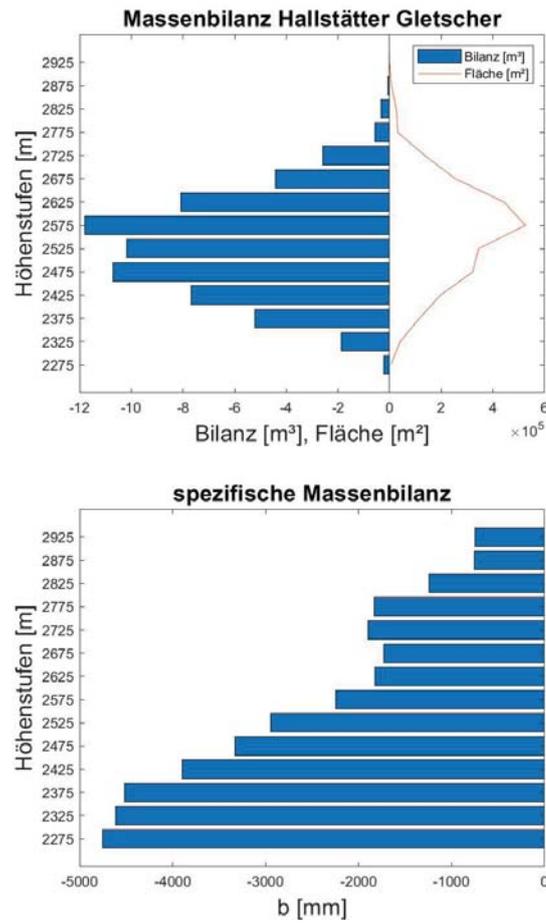


Abbildung 4.4: Nettobilanz (B) und Flächenverteilung nach Digitalem Geländemodell 2018 mit Gletschergrenze 2022 sowie die mittlere spezifische Bilanz (b) der Höhenstufen.

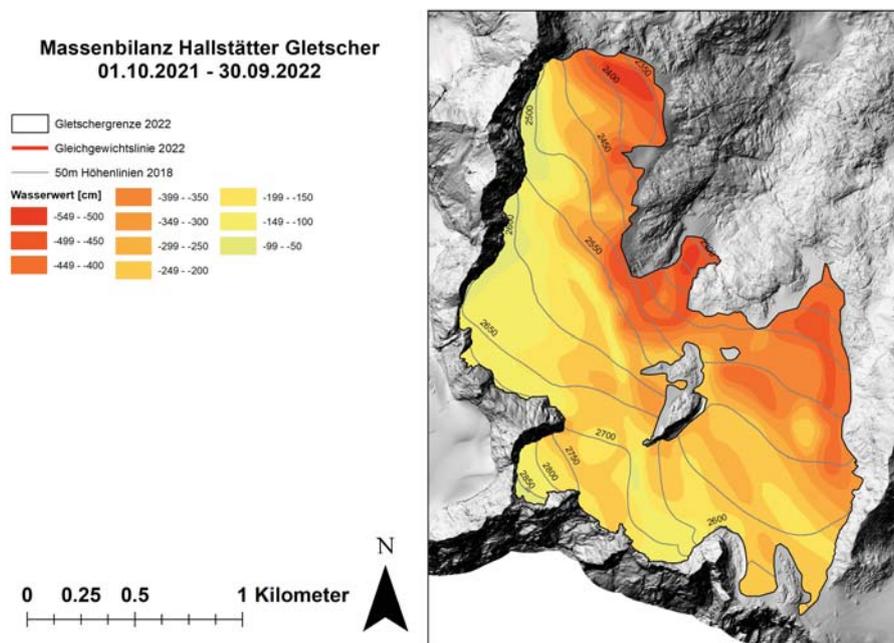


Abbildung 4.5: Flächen gleichen Wasserwertes der Jahresbilanz 2021/22.

4.3.3. Sommerbilanz

Die Sommerbilanz ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Massenhaushalt des hydrologischen Jahres und der Winterbilanz.

$$b_{so} = b - b_{wi}$$

Für die Sommerbilanz ergeben sich daher folgende Werte:

$$B_{so} = -10508,7 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b_{so} = -4291 \text{ mm}$$

4.4. Online Massenbilanz

Seit Frühjahr 2020 ist auf der Seite www.dachsteingletscher.info für jeden Tag im Jahr die aktuelle Massenbilanz einsehbar. Als Grundlage dient eine Modellierung, welche die meteorologischen Daten der umliegenden Stationen Simonyhütte, Feuerkogel, Krippenstein und Ramsau einbezieht. Diese Modellierung wurde an den gemessenen Massenbilanzdaten aller bisherigen Messungen kalibriert. In Abbildung 4.6 ist der Verlauf des Massenhaushaltes 2021/2022 zu sehen. Zusätzlich zu den Linien der Akkumulation, der Ablation sowie der daraus berechneten Massenbilanz ist die Bandbreite der einzelnen Massenbilanzjahre und der resultierende Mittelwert farblich hinterlegt. Deutlich ist in diesem Rekordjahr zu sehen, dass allein aufgrund der meteorologischen Messdaten die stark negative Massenbilanz mit dem gewählten Modell nicht beschrieben werden kann. Dies ist vor allem auf drei Gründe zurückzuführen: Zu einem ist der Niederschlag, gemessen an der Station Feuerkogel, für das Winterhalbjahr überdurchschnittlich. Dies spiegelt nicht zwingend die Gegebenheiten am Hallstätter Gletscher wider. Gegenüber der gemessenen Massenbilanz besteht zum Zeitpunkt der Frühjahrsbegehung Ende April eine Überschätzung von rund 300 mm oder 15%. In weiterer Folge werden aufgrund der Temperaturinformationen wiederholt Niederschläge auch als Schnee modelliert, die aber als Regen gefallen sind. Dies bewirkt neben der zusätzlichen Akkumulation auch eine Verzögerung der Schmelze im Modell gegenüber der Realität. Weiteren starken Einfluss auf die Schnee- und Eisschmelze hatten der Saharastaub, der die Schneeschmelze an der Oberfläche beschleunigt. Diese Effekte sind nur indirekt im Modell enthalten und führten zu einer Unterschätzung der Eisablation und damit zu einem deutlich geringer negativen Wert als Resultat der Modellierung gegenüber dem Ergebnis der Messungen. Die Messdaten 2021/2022 werden in eine weitere Verbesserung des Modells eingehen.

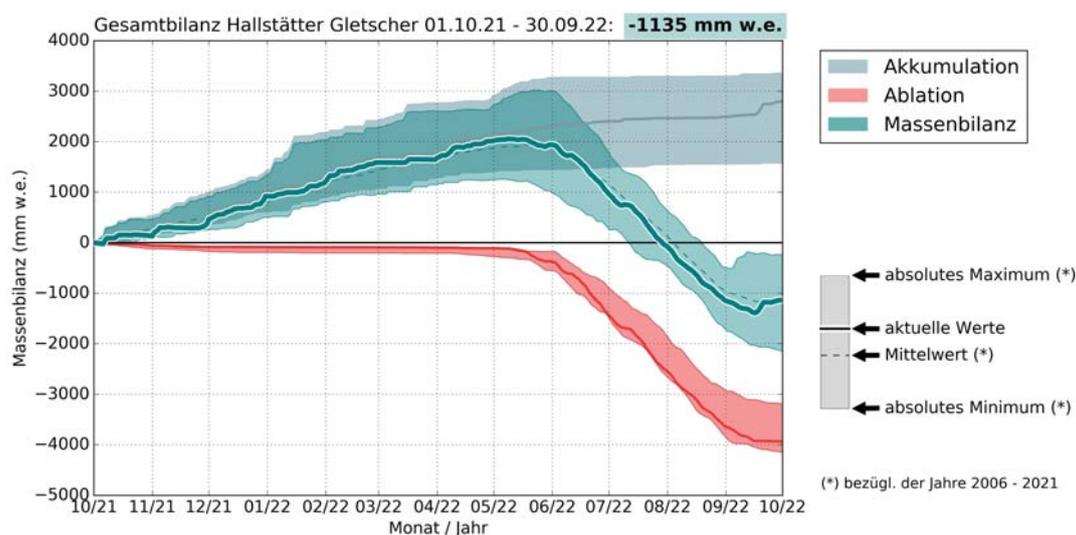


Abbildung 4.6: Zeitliche Verlauf der Akkumulation (blau), Ablation (rot) und daraus berechneten Massenbilanz (grün) des Hallstätter Gletschers im Haushaltsjahr 2021/22.

4.5. Weiterführende Arbeiten 2022

Wie auch im Vorjahr sind die Aufnahmen der 2021 neu installierten Webcam an der Simonyhütte mit einer Aktualisierung aller 10 Minuten abrufbar und werden von foto-webcam.eu zur Verfügung gestellt:

<https://www.foto-webcam.eu/webcam/simonyhuette/>

Die in Zusammenarbeit von BlueSky Wetteranalysen, dem Institut für interdisziplinäre Gebirgsforschung der ÖAW sowie der SMESH OG entstandene und von der Landesregierung Oberösterreich geförderte Visualisierung des Rückgangs des Hallstätter Gletschers **APP[TAUEN]** wurde mit dem **CAESAR** Werbepreis 2022 in der Kategorie **NACHHALTIGKEIT KOMMUNIZIEREN** ausgezeichnet. Vergleicht man die Visualisierung mit Webcam-Aufnahmen aus diesem Jahr, so zeigt sich die rasche Veränderung des verbleibenden Gletschers.

<https://www.apptauen.at/>

4.6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle 4.8 zeigt die Beziehung zwischen Jahres-, Winter- und Sommerbilanz auf. Das Massenhaushaltsjahr 2021/22 ist mit einer Massenbilanz von -2602 mm das Jahr mit der am stärksten negativen Massenbilanz seit Beginn der Messung. Die Massenverluste lagen bei dem 2,5-fachen des Durchschnitts seit Beginn der Messung (Mittelwert spezifische Bilanz über die gesamte Messreihe: -1050 mm).

Die Bilanz des Massenhaushaltsjahres 2021/22 ist aufgrund folgender Prozesse so negativ ausgefallen: (1) die geringe Schneeeauflage besonders auf den Gletscherzungen zum Ende des hydrologischen Winterhalbjahres; (2) den Saharastaub als Beschleuniger der Schneeschmelze; (3) Niederschlägen ab Mai nur als Regen gepaart mit hohen Temperaturen und (4) die vermehrte Umsetzung kurzwelliger Strahlung in aperen Gletscherbereichen aufgrund der zeitigen Ausaperung. Der Vergleich der Ergebnisse mit den vorangegangenen Massenhaushaltsjahren zeigt, dass es zwar Jahre mit ähnlich negativen Sommerbilanzen gab, diese aber auch aufgrund einer höheren Akkumulation von Schnee im Winter dann zum Ende der Schmelzperiode noch Rücklagen aufweisten (Tab. 4.9).

Dies ist in der Abbildung 4.7 ebenfalls ersichtlich. Die Jahre 2014/15, 2017/18 und vor allem 2011/12 hatten bei ähnlich negativer Sommerbilanz mehr Wasseräquivalent in der Winterschneedecke gespeichert. Setzt man den Massenverlust 2021/22 ins Verhältnis zur mittleren Eisdicke, so hat der Hallstätter Gletscher in nur einem Jahr 7% seines Volumens verloren.

	Jahresbilanz	Winterbilanz	Sommerbilanz	Einheit
S_c	0,00			km^2
B_c	0,80			$10^3 m^3$
b_c	0			mm
S_a	2,45			km^2
B_a	-6372,1			$10^3 m^3$
b_a	-2602			mm
S	2,45	2,45	2,45	km^2
B	-6372,1	4136,9	-10508,7	$10^3 m^3$
b	-2602	16890	-4291	mm
S_c/S	0,00			
ELA	****			m

Tabelle 4.8: Kennzahlen der Jahres-, Winter- und Sommerbilanz 2021/22.

	S_c km^2	B_c $10^6 m^3$	b_c $mmw.e.$	S_a km^2	B_a $10^6 m^3$	b_a $mmw.e.$	S km^2	B $10^6 m^3$	b $mmw.e.$	ELA m	S_c/S
2006/2007	1.49	1.68	1125	1.55	-2.55	-1646	3.04	-0.88	-289	2581	0.490
2007/2008	1.49	0.60	400	1.55	-2.72	-1756	3.04	-2.13	-700	2592	0.490
2008/2009	1.03	0.59	570	1.99	-3.37	-1699	3.01	-2.79	-924	2616	0.341
2009/2010	1.46	0.80	551	1.56	-2.91	-1867	3.02	-2.11	-700	2588	0.483
2010/2011	0.14	0.02	125	2.88	-6.08	-2113	3.02	-6.07	-2011	2822	0.046
2011/2012	0.96	0.29	308	2.06	-4.00	-1944	3.02	-3.70	-1228	2664	0.318
2012/2013	1.39	1.19	854	1.62	-2.25	-1383	3.02	-1.06	-351	2584	0.461
2013/2014	1.60	0.69	431	1.23	-1.47	-1192	2.84	-0.78	-274	2551	0.556
2014/2015	0.05	0.01	125	2.79	-5.83	-2093	2.83	-5.82	-2054	****	0.017
2015/2016	0.95	0.40	425	1.89	-3.61	-1910	2.83	-3.20	-1130	2646	0.334
2016/2017	0.68	0.36	527	2.16	-3.74	-1736	2.83	-3.38	-1194	2644	0.239
2017/2018	0.30	0.54	181	2.54	-5.31	-2091	2.84	-5.25	-1854	2808	0.105
2018/2019	1.23	0.87	710	1.41	-2.33	-1659	2.64	-1.46	-554	2580	0.466
2019/2020	0.36	0.05	125	2.26	-3.82	-1691	2.62	-3.78	-1440	2812	0.138
2020/2021	0.47	0.07	150	2.15	-3.29	-1530	2.62	-3.22	-1228	2798	0.180
2021/2022	0.00	0.00	0	2.45	-6.37	-2602	2.45	-6.37	-2602	****	0.000

Tabelle 4.9: Vergleich der 16 gemessenen Jahresbilanzen des Hallstätter Gletschers.

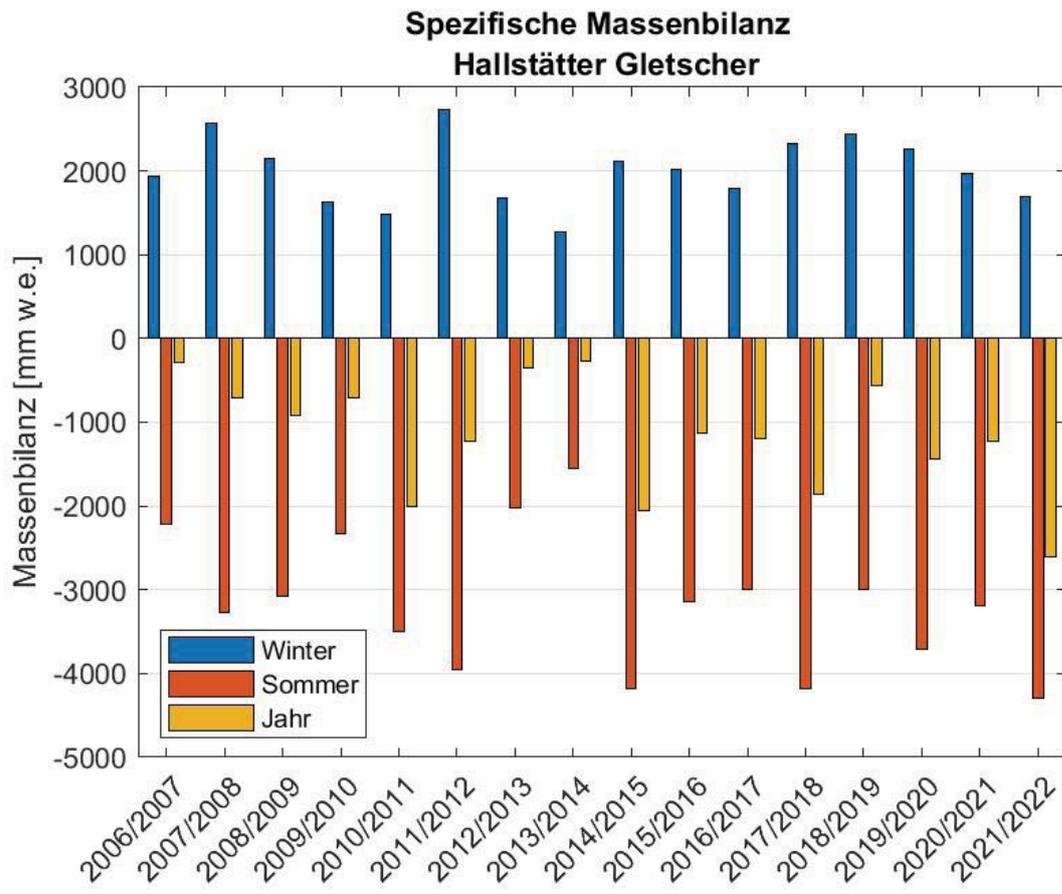


Abbildung 4.7: Die mittlere spezifische Massenbilanz (b) für den Winterzeitraum (1.10.-31.4., blau) für den Sommerzeitraum (1.5.-30.9., rot) und für das gesamte hydrologische Jahr (1.10.-30.9., orange) seit Beginn der Messungen am Hallstätter Gletscher.

A

Anhang

A.1. MitarbeiterInnen und Danksagung

Die Feldarbeiten wurden von K. Reingruber, K. Helfricht, E. Lemmerer, M. Stocker-Waldhuber, L. Hartl und weiteren Helfern durchgeführt. Das Team wurde regelmäßig durch die Gletscherbahnen Dachstein, Planai&Hochwurzen unterstützt. Wir danken für die Bereitstellung der jeweils aktuellsten Geodaten (Höhenmodell und Orthofoto) sowie weitere Unterstützung seitens des Land Oberösterreich. Die Auswertung und der Bericht stammen von K. Helfricht.

A.2. Definitionen

S	gesamte Gletscherfläche	B	Gesamtjahresbilanz
b	spezifische Massenbilanz	S_a	Fläche des Ablationsgebietes
B_a	Gesamtbilanz Ablationsgebiet	b_a	spezifische Bilanz Ablationsgebiet
S_c	Fläche des Akkumulationsgebietes	B_c	Gesamtbilanz Akkumulationsgebiet
b_c	spezifische Bilanz Akkumulationsgebiet	wi	als Index bedeutet Winter
so	als Index bedeutet Sommer	ELA	Höhe der Gleichgewichtslinie
S_c/S	Verhältnis Akkumulations- Gesamtfläche	WW	Wasserwert

Tabelle A.1: Notationen die in dieser Arbeit verwendet werden.

$$S = S_c + S_a \quad (\text{A.1})$$

$$B = B_c + B_a \quad (\text{A.2})$$

Für die spezifischen Bilanzen gelten folgende Beziehungen:

$$b = b_{wi} + b_{so} \quad (\text{A.3})$$

$$b_{so} = b - b_{wi} \quad (\text{A.4})$$

$$b_{wi} = B_{wi}/S \quad (\text{A.5})$$

$$b_{so} = B_{so}/S \quad (\text{A.6})$$

$$b_c = B_c/S_c \quad (\text{A.7})$$

$$b_a = B_a/S_a \quad (\text{A.8})$$

Tabelle A.2: Zur Massenhaushaltsbestimmung gültige Beziehungen.

A.3. Fotos



Abbildung A.1: Der Hallstätter Gletscher zum Zeitpunkt der Winterbilanz am 29.04.2022. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.2: Erste Ausaperungen am Hallstätter Gletscher am 03.06.2022. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.3: Ausaperung am 27.06.2022. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.4: Fortgeschrittene Ausaperung am 03.08.2022. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.5: Maximale Ausaperung am 06.09.2022. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).

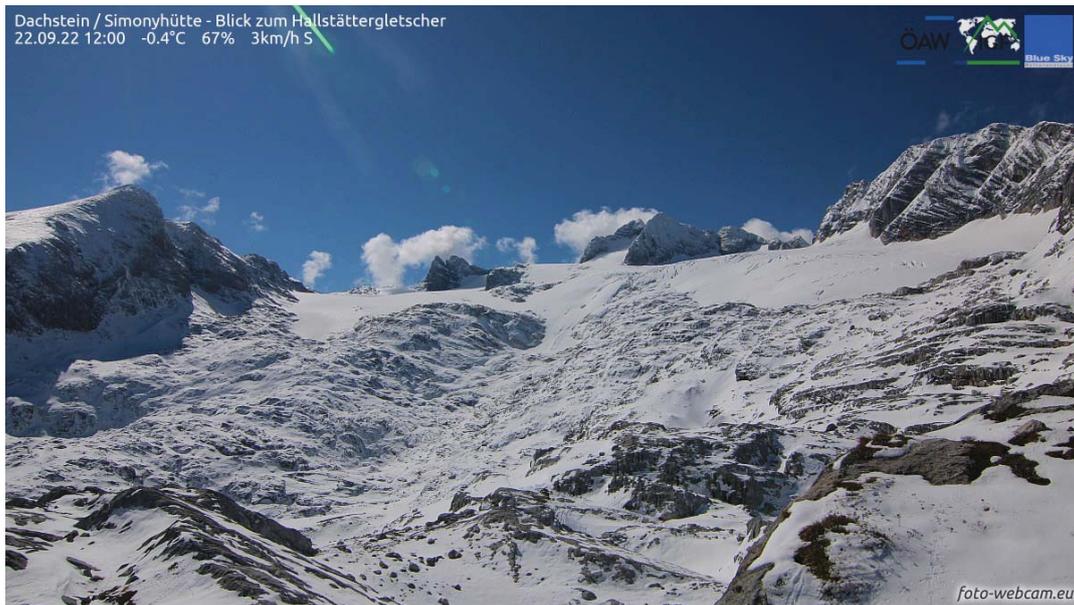


Abbildung A.6: Geschlossene Schneedecke am 23.09.2022. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.7: Hallstätter Gletscher am Tag der Messungen zur Herbstbilanz am 01.10.2022. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.8: Sentinel-2 Aufnahme des Hallstätter Gletscher nahe der maximalen Ausaperung am 02.09.2022 (Sentinel Playground).



Abbildung A.9: Arbeiten am Frühjahrsschacht FS3. Deutlich die Schicht mit dem Saharstaub vom März 2022. Foto: Andrea Bruckmeier.



Abbildung A.10: Der Frühjahrsschacht FS4. Foto: Michael Backmann.



Abbildung A.11: Arbeiten am Frühjahrsschacht FS4. Foto: Michael Backmann.



Abbildung A.12: Beim Pegelbohren oberhalb der mittleren Zunge am 28.06.2022. Foto: Michael Backmann.



Abbildung A.13: Der Pegel 25 im Schuttbereich der mittleren Zunge am 23.08.2022. Foto: Klaus Reingruber.



Abbildung A.14: Beim Pegelbohren oberhalb der mittleren Zunge am 28.06.2022. Foto: Michael Backmann.



Abbildung A.15: Eissturz beobachtet am 23.08.2022 zwischen der mittleren und westlichen Zunge. Foto: Kay Helfricht.

Literaturverzeichnis

- [1] Fischer, A., K. Helfricht, und K. Reingruber, 2009: Gletscher, Klima und nachhaltige Entwicklung am Beispiel des Hallstätter Gletschers. *Landschaften und nachhaltige Entwicklung*, **2**, 1–16.
- [2] Fischer, A., B. Seiser, M. Stocker Waldhuber, C. Mitterer, und J. Abermann, 2015: Tracing glacier changes in Austria from the Little Ice Age to the present using a lidar-based high-resolution glacier inventory in Austria. *The Cryosphere*, **9**, 753–766, doi:10.5194/tc-9-753-2015. <http://www.the-cryosphere.net/9/753/2015/>.
- [3] Helfricht, K., 2009: Veränderungen des Massenhaushaltes am Hallstätter Gletscher seit 1856. Master's thesis, Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck.
- [4] Hoinkes, H., 1970: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **6**, 37–90.
- [5] IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. In: *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, in press.
- [6] Cuffey K.M. und W.S.B. Paterson, 2010: *The physics of glaciers*. (4rd ed.). Amsterdam, etc., Academic Press. 704pp.