

# Hallstätter Gletscher

## Massenhaushalt und Klima 2022/2023

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



ÖAW

ÖSTERREICHISCHE  
AKADEMIE DER  
WISSENSCHAFTEN



Blue Sky  
Wetteranalysen

ENERGIE AG  
Oberösterreich



LAND  
OBERÖSTERREICH

# Hallstätter Gletscher

Massenhaushalt und Klima  
2022/2023

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](http://www.dachsteingletscher.info).

# Kurzfassung

Im Massenhaushaltsjahr 2022/23 wurde der **fünftgrößte jährliche Massenverlust** in der 17-jährigen Messreihe festgestellt. Bis weit in den Winter hinein war die Akkumulation der Winterschneedecke geringer als im langjährigen Durchschnitt. Starke Niederschläge ab April konnten dies bis zum Ende des Winterzeitraumes ausgleichen. Am Frühjahrsschacht unterhalb der Steinerscharte fiel die Schneedecke mit knapp über 6 Meter leicht überdurchschnittlich aus. Auf der östlichen Zunge waren wiederum sehr geringe Schneehöhen zu messen. In Summe ergab sich für das Winterhalbjahr eine **leicht unterdurchschnittliche Akkumulation**. **Wechselhaftes Wetter** im Mai und Juni brachte zwar kaum zusätzliche Schneeablagerungen, **verzögerte** aber die **Schmelze** der Schneedecke. Ende Juni kam es zu ersten Ausaperungen des Eises auf der östlichen Gletscherzunge. Sommerliche Schneefälle Ende Juli und Anfang August konnten die Dauer der Eisschmelze um wenige Tage verringern. Zum Zeitpunkt der Herbstbilanz Ende September war nur mehr ein **sehr geringer** Teil der Gletscherfläche mit **Rücklagen** aus dem vorangegangenen Winter bedeckt. Das Maximum der Ausaperung wurde zu diesem Zeitpunkt für das Haushaltsjahr 2022/23 festgehalten, war aber für die Ablations-saison 2023 noch nicht erreicht, da es bis Mitte Oktober zu weiterem Massenverlust am Gletscher kam. Die **spezifische Massenbilanz des Massenhaushaltsjahres 2022/23 beträgt -1797 mm** Wasseräquivalent. Dies entspricht einem Wasservolumen von  $4250 \cdot 10^3 m^3$  Wasser bzw. einem **mittleren Eisdickenverlust von rund 2 Meter** gemittelt über die gesamte Gletscherfläche. Damit war die Bilanz zwar deutlich weniger negativ als im Massenhaushaltsjahr 2021/22, dennoch verlor der Hallstätter Gletscher rund 5% 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.

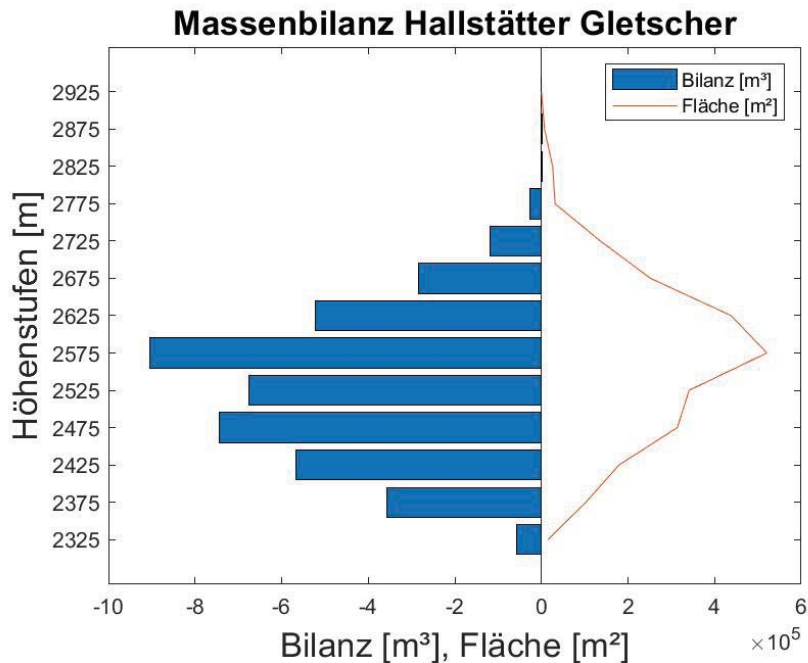


Abbildung 1: Massenbilanz sowie Verteilung der Fläche des Hallstätter Gletschers nach Höhenstufen 2022/23.

# Inhaltsverzeichnis

1	Ziel der Massenbilanzmessungen	1
2	Das Untersuchungsgebiet	2
3	Klima und Witterungsverlauf	3
4	Massenbilanz	8
4.1	Methode	8
4.2	Durchgeführte Arbeiten	8
4.2.1	Pegelablesungen	8
4.2.2	Frühjahrsbegehung	8
4.2.3	Herbstbegehung	8
4.2.4	Ausaperungsflächen	10
4.2.5	Niederschlag	11
4.2.6	Aktuelle Geländedaten	12
4.3	Auswertung	13
4.3.1	Winterbilanz	13
4.3.2	Jahresbilanz	14
4.3.3	Sommerbilanz	17
4.4	Online Massenbilanz	18
4.5	Besonderheiten 2023	18
4.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	20
A	Anhang	22
A.1	MitarbeiterInnen und Danksagung	22
A.2	Definitionen	22
A.3	Fotos	23
	Literaturverzeichnis	35

## Ziel der Massenbilanzmessungen

Gletscher sind empfindliche Indikatoren für Klimaänderungen. Dennoch gibt es weltweit nur wenige Gletscher an denen langjährige Reihen des Massenhaushaltes gemessen werden [1]. 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.

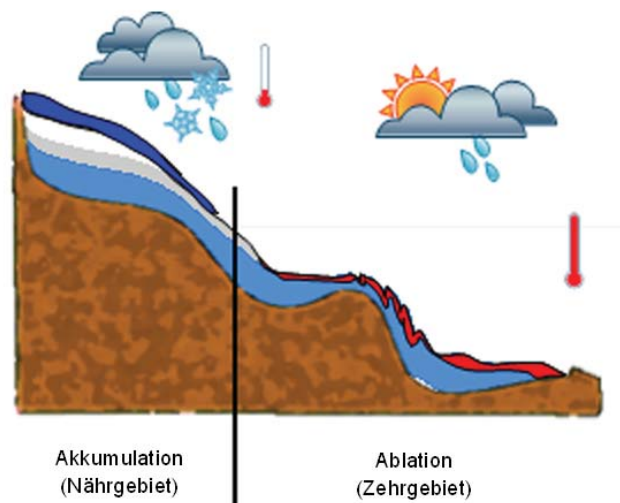


Abbildung 1.1: Schematischer Schnitt entlang der zentralen Fließlinie eines Gletschers. Farblich dargestellt sind die Eismasse des Gletschers (hellblau), im Bereich der Akkumulation Schnee (dunkelblau) und Firn (weiß/grau) sowie der Massenverlust (rot) im Ablationsgebiet. Die Thermometer geben die relativen 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 2022/23 dargelegt.

# 2

## Das Untersuchungsgebiet

Der Hallstätter Gletscher ist 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 Flächenverluste an der mittleren Zunge sowie das weitere Ausapern der Felsinsel unterhalb des Eissteins wurde die Gletschergrenze für 2023 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  $2,37 \text{ km}^2$  (Gletschergrenze 2023). Dies ist weniger als die Hälfte seiner Ausdehnung gegenüber dem Gletscherhochstand 1856 [5]. Allein in den vergangenen 10 Jahren hat sich die Fläche des Hallstätter Gletschers um mehr als 20% verkleinert. Ebenso ging das Volumen des Gletschers stark zurück ([3])

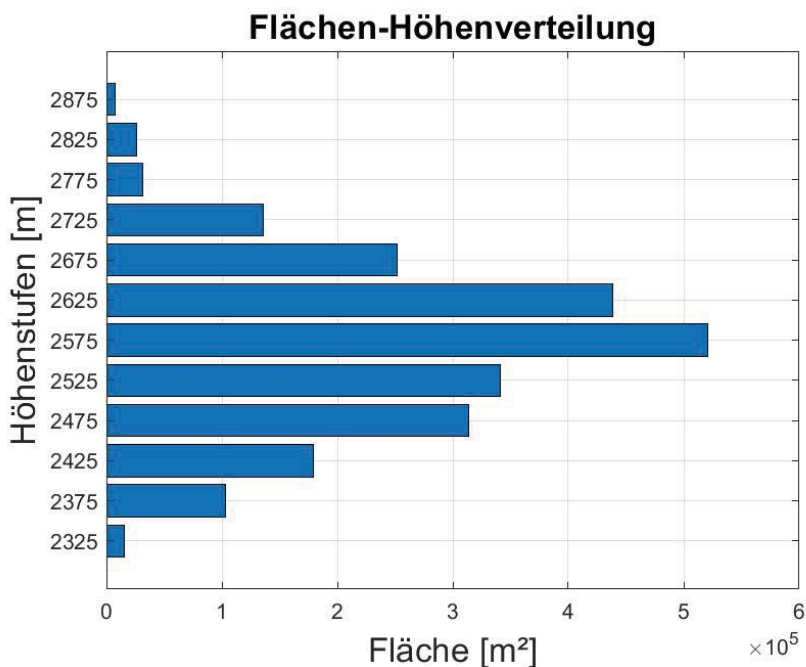


Abbildung 2.1: Flächen-Höhenverteilung des Hallstätter Gletschers auf Grundlage des Höhenmodells von 2018 und der adaptierten Gletschergrenze von 2023.

# 3

## Klima und Witterungsverlauf

Die klimatischen Randbedingungen für den Hallstätter Gletscher unterscheiden sich von denen anderer österreichischer Gletscher mit Massenhaushaltsmessungen, welche am Alpenhauptkamm liegen [4]. Aufgrund seiner Exposition und Lage am Alpennordrand treten gegenüber dem österr. 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.

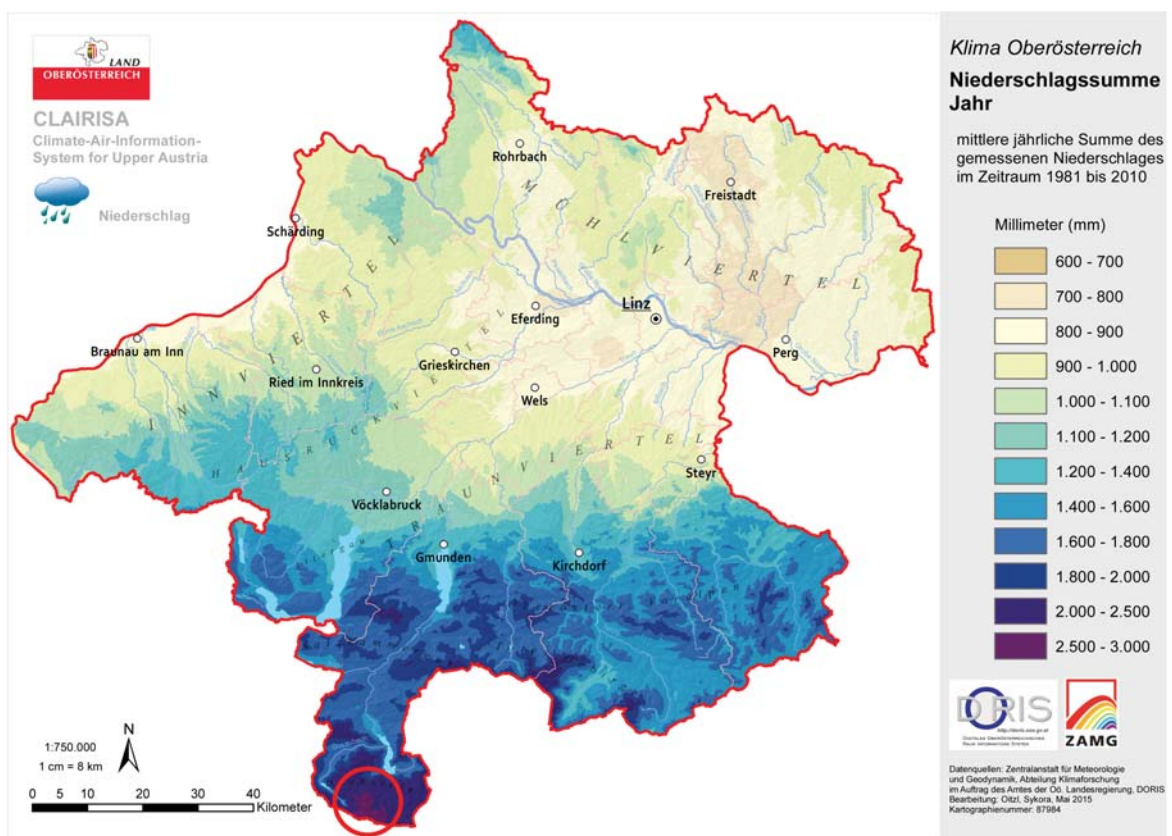


Abbildung 3.1: Mittlere Jahresniederschlagsmenge in mm (Datenquellen: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Klimaforschung im Auftrag des Amtes der Oö. Landesregierung, DORIS). Im Ausschnitt rot markiert die Lage des Hallstätter Gletschers.

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 1.10.2022 bis zum 30.09.2023 begann mit einem warmen Spätherbst, in dem ein Teil der Anfang Oktober akkumulierten Schneedecke bereits wieder geschmolzen wurde, so dass blankes Eis zum Vorschein kam. Erst wiederholte Schneefälle im November legten den gesamten Gletscher unter eine Schneedecke. Die Schneefälle im Dezember und Januar fielen gering aus. Zu einer größeren Akkumulation kam es Anfang Februar (Abb. 3.3). Ende März fiel bei für diese Jahreszeit ungewöhnlich hohen Temperaturen (Abb. 3.4) bereits flüssiger Niederschlag. Zu dieser Zeit wurde auch Saharastaub am Gletscher abgelagert, der als gut sichtbare Schicht im Frühjahrsschacht erkennbar war (Abb. A.12). Ein weiteres Anwachsen der Schneedecke war bei wechselhaften Bedingungen mit stets durchschnittlichen Temperaturen aber erhöhten Niederschlagsmengen im April zu verzeichnen (Abb. 3.2, 3.3 und 3.4). Zum Zeitpunkt der Frühjahrsbegehung wurde mit 6,16 Meter eine leicht überdurchschnittliche Schneemächtigkeit im Bereich des Schachtes festgestellt (Abb. A.1, A.13). Auf der östlichen Zunge des Hallstätter Gletschers wurden jedoch nur geringe Schneemächtigkeiten von 2,5 bis 3 Meter sondiert, was in weiterer Folge hier auch zum ersten Ausapern der Eisoberfläche Ende Juni führte (Abb. A.4). Der Monat Mai und die ersten Hälfte des Juni verliefen wechselhaft, bevor sich in der zweiten Junihälfte und im Juli längere Perioden mit hohen Temperaturen und raschem Schneedeckenverlust einstellten (Abb. 3.4, 3.5 und A.6). Über die Sommermonate kam es zu keinen großen Abweichungen der Niederschlagsmengen im Vergleich mit den seit 2006 gemessenen, mittleren Werten (Abb. 4.2). Am 26.7. sowie am 7.8. fiel der Niederschlag als Schnee, so dass in Summe die Eisschmelze um zumindest 6 Tage verzögert wurde (Abb. A.7 und A.8). Danach stellte sich eine überdurchschnittlich warme Wetterlage ein, die hohe Schmelzraten und eine rasche Ausaperung der Eisoberfläche als Folge hatte (Abb. 3.2, 3.4 und A.9). Zum Zeitpunkt der Herbstbegehung am 29.09.2023 war bis auf sehr wenige verbleibende Akkumulationsflächen der gesamte Gletscher schneefrei (Abb. A.10).

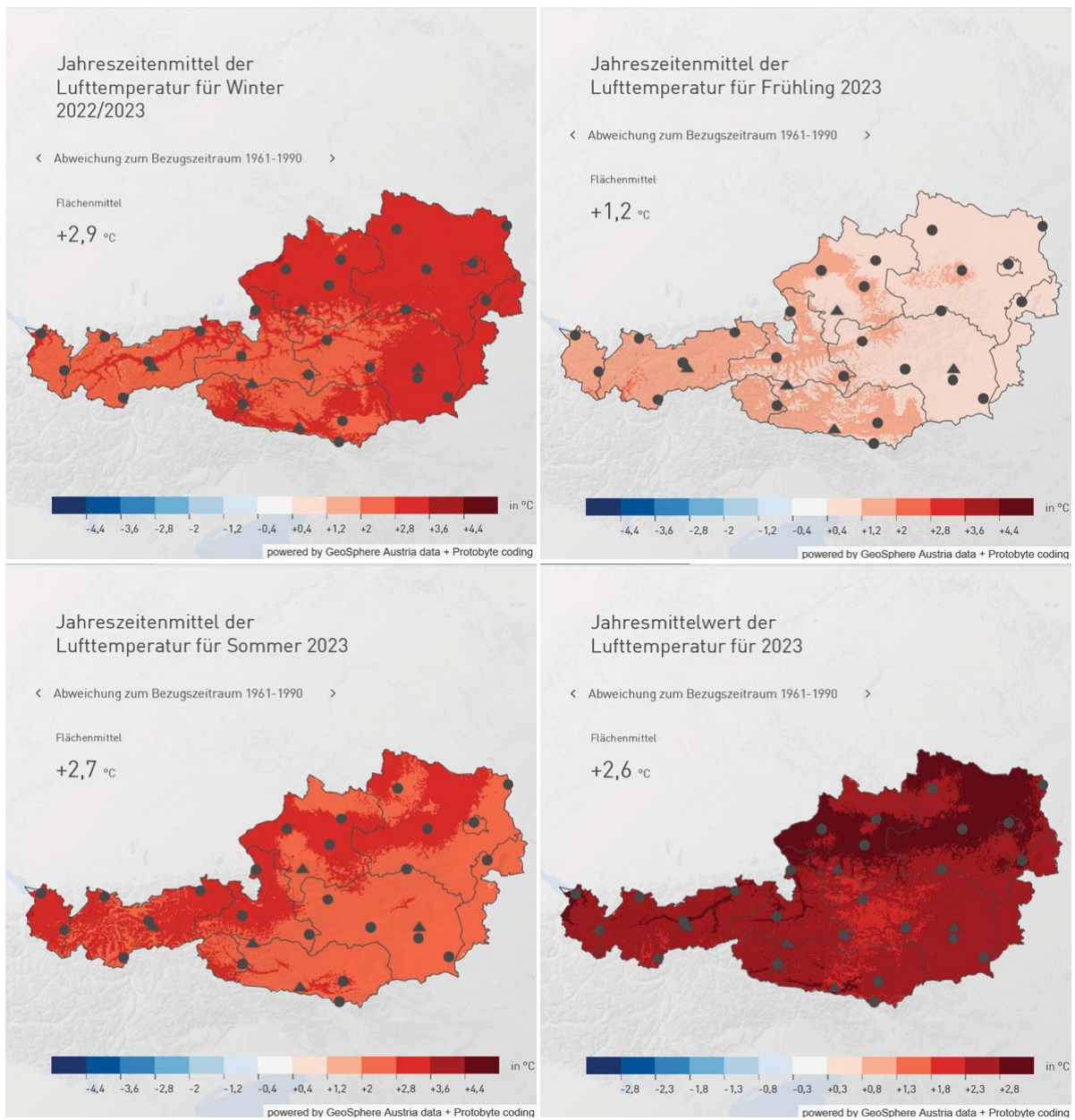


Abbildung 3.2: Übersicht der Abweichungen vom langjährigen Mittel der Temperatur für die Jahreszeiträume Winter (DJF), Frühling (MAM) und Sommer (JJA) sowie für das gesamte Jahr 2023. Die Abbildungen werden von der ZAMG unter [www.zamg.ac.at](http://www.zamg.ac.at) zur Verfügung gestellt.

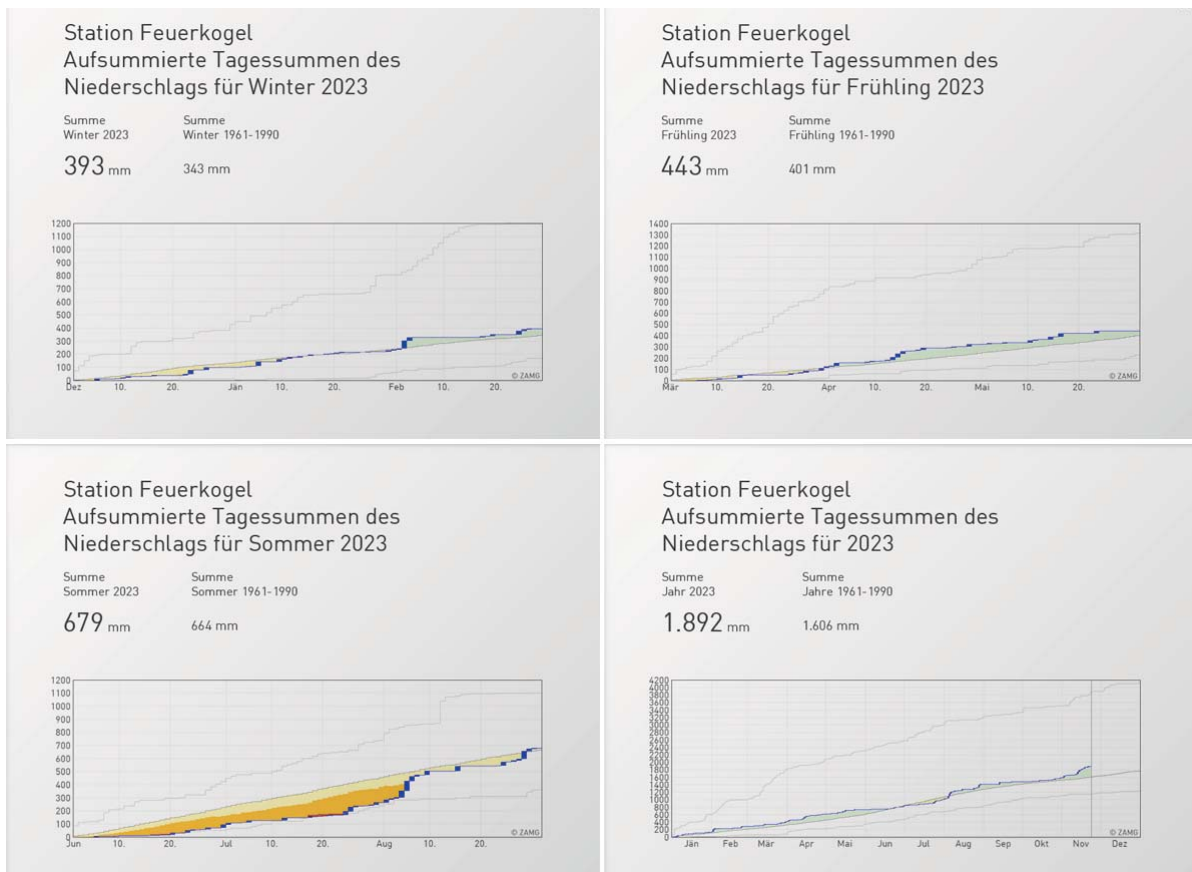


Abbildung 3.3: Übersicht der Abweichungen vom langjährigen Mittel des Niederschlags (unten) für die Jahreszeiträume Winter (DJF), Frühling (MAM) und Sommer (JJA) sowie für das gesamte Jahr 2023. Die Abbildungen werden von der ZAMG unter [www.zamg.ac.at](http://www.zamg.ac.at) zur Verfügung gestellt.

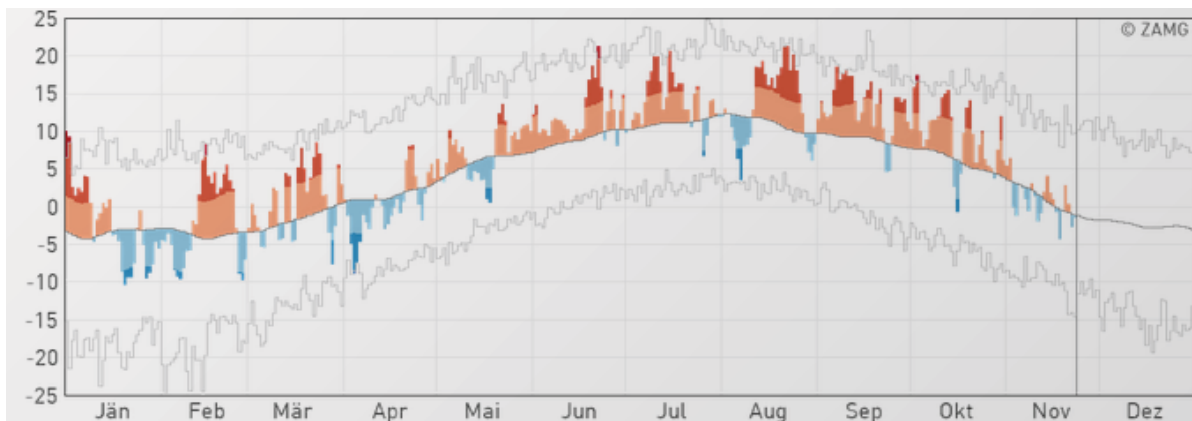


Abbildung 3.4: Temperaturverlauf des Jahres 2023 an der Station Feuerkogel (Mittel bezogen auf die Periode 1961 bis 1990). Die Abbildung wird von der ZAMG unter [www.zamg.ac.at](http://www.zamg.ac.at) zur Verfügung gestellt.



Abbildung 3.5: Temperaturverlauf von Oktober 2022 bis September 2023 an der Station Simonyhütte.

# 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 [6]. 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 [7].

### 4.2. Durchgeführte Arbeiten

#### 4.2.1. Pegelablesungen

Im Massenhaushaltsjahr 2022/23 wurden die Pegel im Rahmen der Herbstbegehung am 01.10.2022 abgelesen, sowie im Jahr 2023 am 24.7., 18.8., 13.9. und zu der Herbstbegehung am 29.09.2023. Die Positionen der Pegel sind der Abbildung 4.1 zu entnehmen. Am 26.6. wurden die Pegel 20 und 24 sowie am 18.8. die Pegel 21, 23, 27 und 29 neu gebohrt.

#### 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 2023 fand an zwei getrennten Tagen statt. Am 03. Mai wurde eine erste Runde im Bereich der östlichen und der mittleren Zunge sondiert sowie unterhalb des Eissteins ein Schneeschacht gegraben und ein Dichteprofil bestimmt (Abb. A.14). Weitere Arbeiten wurden aufgrund der schlechten Sicht auf einen späteren Termin verschoben (Abb. A.2).

Der zweite Teil der Frühjahrsbegehung erfolgte am 13. Mai. Es wurden die Schneehöhen im oberen Teil sowie auf der westliche Zunge des Hallstätter Gletschers sondiert und der Frühjahrsschächte 3 unterhalb der Steinerscharte mit einer Gesamttiefe von 6,65 Metern gegraben (Abb. A.12, A.13). 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 überdauern 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 29. September 2023 statt (Abb. A.10). Es wurden alle Pegel abgelesen. Nennenswerte Rücklagen aus dem Winter mit bis zu 1,5 Metern Mächtigkeit konnten nurmehr unterhalb der Kreuzwand auf dem westlichen Teil des Gletschers vorgefunden werden. Die Akkumulation im Bereich des Herbsschachtes und unterhalb des Dachsteingipfels waren nur wenige Dezimeter dünn. Im Bereich des Herbstschacht 3 (Abb. 4.1) wurde eine Rücklage von 58 cm gemessen (Abb. A.19). Im weiteren Verlauf der ersten zwei Oktoberwochen ist anzunehmen, dass es auch hier zu einer weiteren Ablation gekommen ist.

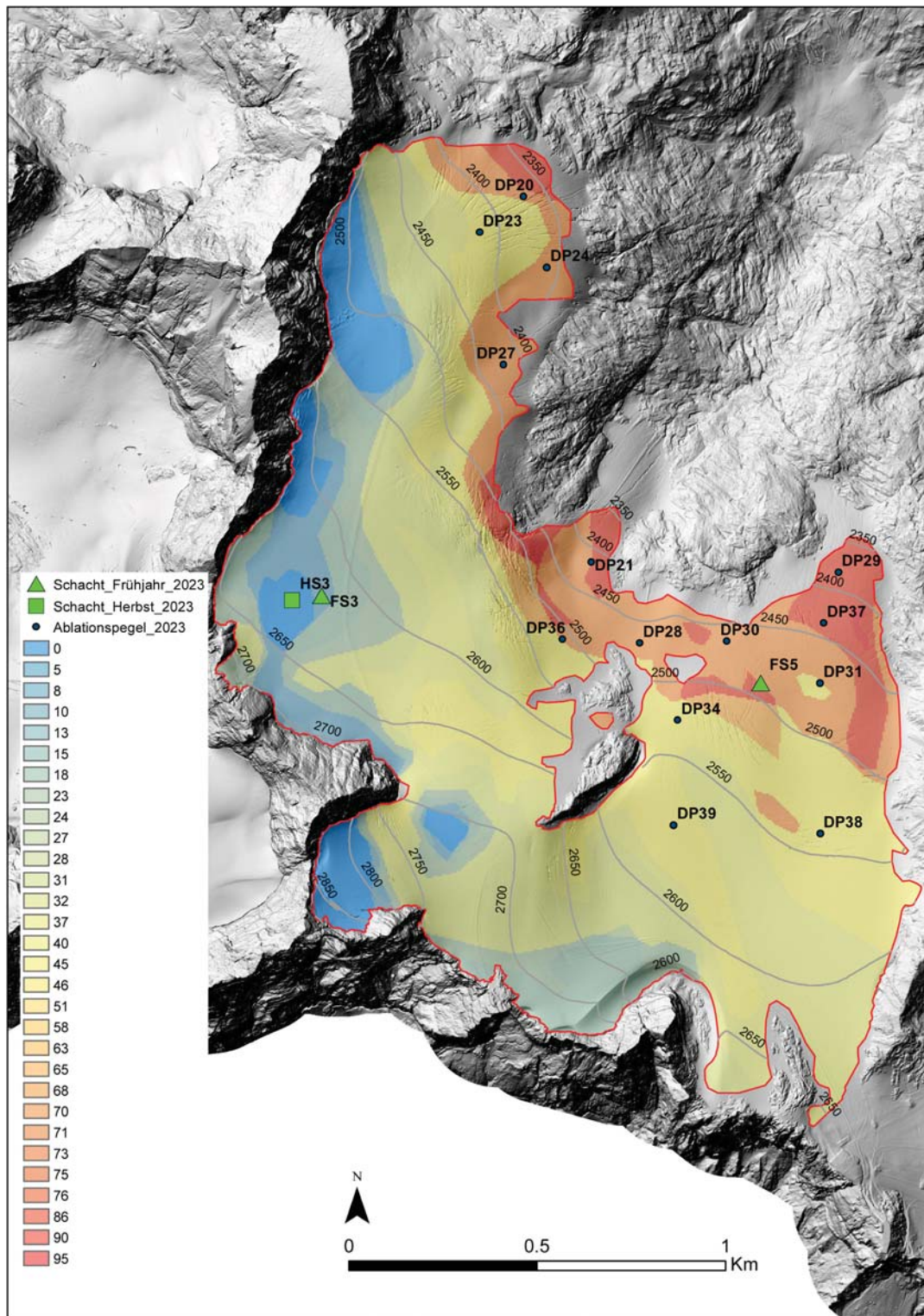


Abbildung 4.1: Positionen der Pegel (DP mit Bezeichnung des Jahres der Bohrung) und Lage der Frühjahrs- sowie Herbstschächte 2022/23. Die Dauer der Ausaperung in Tagen aus Sentinel-2 optischen Bildinformationen ist farblich hinterlegt. Kartengrundlage: beleuchtetes Höhenmodell 2018 (Land Oberösterreich).

#### 4.2.4. Ausaperungsflächen

Unter Verwendung von optischen Satellitendaten des Sentinel-2 Satelliten lassen sich schneebedeckte von bereits ausgeaperten Gletscherflächen gut unterscheiden. Für die Berechnung der Massenbilanz 2022/23 konnten die Ausaperungsmuster für 11 Aufnahmezeitpunkte zwischen dem 22.6. und dem 02.10.2023 kar-

tiert und die Anzahl der schneefreien Tage bis Ende September ausgewertet. Die farblich gekennzeichneten Flächen wurden zur Auswertung der Bilanz einbezogen (Abb. 4.1). Die letzte auswertbare Aufnahme stammt vom 02.10.2023 (Abb. A.11). Aus den Aufnahmen ergibt sich eine maximale Dauer der Auserperung von 95 Tagen im Bereich der östlichen Zunge.

#### 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. Die automatische Niederschlagsmessung im Bereich der Simonyhütte ist nunmehr seit vier 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 Niederschlagssummen der einzelnen Monate sind der Tabelle 4.1 zu entnehmen. Die Tabelle 4.2 zeigt die jährlichen Niederschlagssummen der Haushaltsjahre seit 2006/07, dem ersten Jahr der Messungen. Mit einem Jahresniederschlag von 1934 mm lag das Haushaltsjahr etwa 10% unter dem Mittelwert der Jahre 2006/07 bis 2021/22 (2197 mm). Vor allem der geringe Winterniederschlag der Monate Dezember und Januar ist auffällig (Abb. 4.2). Ebenfalls trocken fielen der Juni und der September aus. Während auch der Juli leicht unterdurchschnittlich war, kam es im August zu überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen.

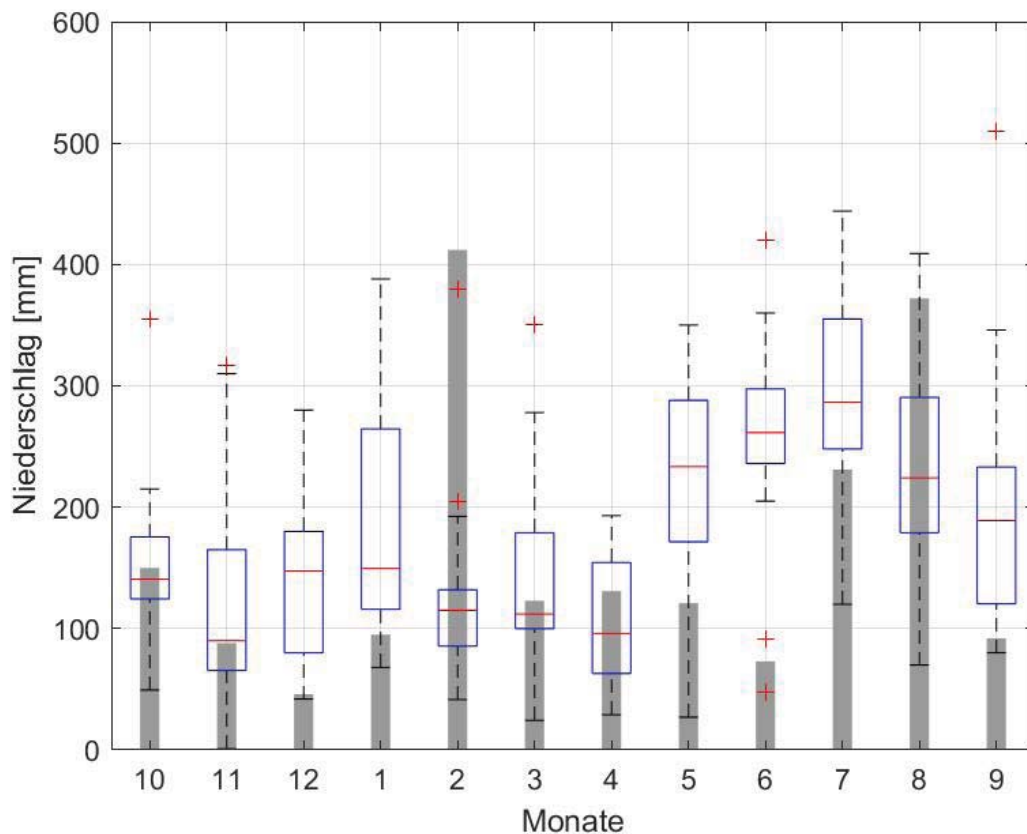


Abbildung 4.2: Vergleich der monatlichen Niederschlagssummen des Haushaltsjahres 2022/23 (graue Balken) gegenüber der statistischen Verteilung der Monatsniederschläge von 2006 bis 2022. Die rote Linie kennzeichnet den Median, die blauen Boxen zeigen alle Werte innerhalb der 25% und der 75% Percentile. Rote Kreuze zeigen davon deutlich abweichende Minimal- oder Maximalwerte.

Datum	Niederschlag [mm]
31.10.2022	150
30.11.2022	88
31.12.2022	46
31.01.2023	95
28.02.2023	412
31.03.2023	123
30.04.2023	131
31.05.2023	121
30.06.2023	73
31.07.2023	231
31.08.2023	372
30.09.2023	92
Gesamt	1934

Tabelle 4.1: Monatsniederschlag 2022/23.

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
2022/23	1934
Mittelwert	2181

Tabelle 4.2: Jahresniederschlag 2006/07-2022/23.

#### 4.2.6. Aktuelle Geländedaten

Mit Hilfe der vom Land Oberösterreich zur Verfügung gestellten 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 der Gletschergrenze erfolgte 2023 aufgrund der großflächigen Ausaperungen an der westlichen Zunge und unterhalb des Eissteins sowie weiteren Verlusten an den Gletscherzungen. Die Gesamtfläche beträgt  $2,365 \text{ km}^2$  mit Stand 30. September 2023.

## 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 Schneeschnächten 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 01.10.2022 bis 30.04.2023. Die Winterbilanz  $B_{wi}$  wird durch Integration der spezifischen Bilanzen über die jeweiligen Flächen der Höhenstufen berechnet. Die mittlere spezifischen Winterbilanz  $b_{wi}$  erhält man durch Division von  $B_{wi}$  durch die Gesamtfläche.

$$B_{wi} = 4280 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b_{wi} = 1810 \text{ mm}$$

Schachtnummer	Tiefe [m]	Dichte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Wasserwert [mm]
3	6,65	472	2944
unter Eisstein	3,34	391	1301

Tabelle 4.3: Frühjahrsschächte 2023. Die angegebenen Schachttiefen sind die Gesamttiefen inklusive des im Herbst 2022 sowie zwischen 1. Mai 2023 und dem Messdatum gefallenen Neuschnees. Dieser ist im Wasserwert bereits berücksichtigt.

Höhenstufe [m]	Fläche [ $\text{km}^2$ ]	Bilanz [ $10^3 \text{ m}^3$ ]	Wasserwert [mm]
2850 – 2900	0,007	17,9	2500
2800 – 2850	0,026	64,6	2481
2750 – 2800	0,031	66,4	2114
2700 – 2750	0,136	265,4	1948
2650 – 2700	0,252	499,3	1980
2600 – 2650	0,438	896,7	2046
2550 – 2600	0,521	982,3	1887
2500 – 2550	0,341	595,8	1746
2450 – 2500	0,314	489,1	1558
2400 – 2450	0,179	249,7	1391
2350 – 2400	0,103	134,6	1311
2300 – 2350	0,015	17,8	1164
Gesamt	2,365	4280,0	1810

Tabelle 4.4: Flächen- und Höhenverteilung der Winterbilanz 2022/23 (Gletscherfläche Stand 2023).

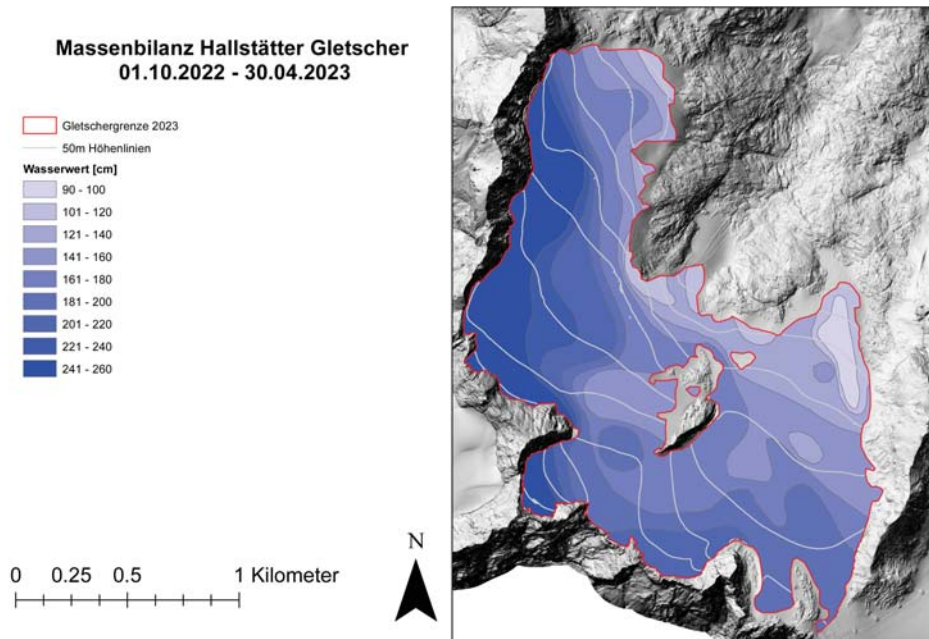


Abbildung 4.3: Flächen gleichen Wasserwertes der Winterbilanz 2022/23.

### 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  $b$ .

$$B = -4249,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b = -1797 \text{ mm}$$

Pegelnummer	Wasserwert [mm]	Pegelnummer	Wasserwert[mm]
DP 20	-2937	DP 30	-2719
DP 21	-4163	DP 31	-1781
DP 23	-3454	DP 34	-2612
DP 24	-3797	DP 36	-2975
DP 27	-3649	DP 37	-3719
DP 28	-2459	DP 38	-2288
DP 29	-3296	DP 39	-1995

Tabelle 4.5: Wasserwerte der Massenbilanz an den Pegeln (01.10.2022-30.09.2023)

Schachtnummer	Tiefe [m]	Dichte [ $\text{kg/m}^3$ ]	Wasserwert [mm]
Schacht 3	0,58	555	307

Tabelle 4.6: Herbstschacht 2023. Die angegebenen Schachttiefe besteht ausschließlich aus Rücklage. Der im Herbst 2022 bereits gefallene Neuschnee ist im Wasserwert bereits berücksichtigt

Höhenstufe [m]	Fläche [ $km^2$ ]	Bilanz [ $10^3 m^3$ ]	Wasserwert [mm]
2850 – 2900	0,007	0,9	125
2800 – 2850	0,026	2,5	95
2750 – 2800	0,031	-26,3	-835
2700 – 2750	0,136	-118,0	-866
2650 – 2700	0,252	-282,8	-1121
2600 – 2650	0,438	-522,8	-1192
2550 – 2600	0,521	-904,7	-1738
2500 – 2550	0,341	-675,9	-1981
2450 – 2500	0,314	-742,9	-2367
2400 – 2450	0,179	-566,7	-3159
2350 – 2400	0,103	-356,1	-3476
2300 – 2350	0,015	-56,9	-3712
Gesamt	2,365	-4249,5	-1797

Tabelle 4.7: Flächen- und Höhenverteilung der Jahresbilanz 2022/23.

Die Massenbilanz 2022/23 reiht sich als die fünft-negativste gemessene Bilanz in der 17-jährigen Messreihe ein. Die Höhe der Gleichgewichtslinie (ELA - equilibrium line altitude) lag mit 2820 Meter in den obersten Höhenstufen des Gletschers. Zum Maximum der Ausaperung war der Hallstätter Gletscher zu 7% mit Rücklagen aus dem vergangenen Winter bedeckt. Dieser Zustand ist im Haushaltsjahr 2022/2023 in der letzten Septemberwoche erreicht wurden (Vgl. Abb. A.10 und Abb. A.11). Nach einer leicht unterdurchschnittlichen Akkumulation im Winter von rund 90% des langjährigen Mittelwertes kam es im Mai noch zu Schneefällen. Wechselhafte Bedingungen bis Mitte Juni verlangsamten die Schmelze der Schneedecke. Mit ersten Ausaperungen Ende Juni wurde die Schneedecke dann im Juli aber zügig abgebaut. Schneefälle Ende Juli und Anfang August reduzierten kurzzeitig die Eisschmelze, die im August und September weiter fortschritt und nur mehr sehr kleinräumige Rücklagen am Gletscher erhalten blieben. Die Ablation erreichte über die gesamte Gletscherfläche verteilt hohe Werte (Tab. 4.5, Abb. 4.5).

Im Mittel über die gesamte Messzeitreihe (2006/07-2022/23) beträgt die Massenbilanz -1171 mm. Die vergangene Saison war damit um rund 50% negativer als das Mittel der gesamten Zeitreihe über 17 Jahre (Abb. 4.7), wobei die Winterbilanz 10% unter dem Mittel lag, und die Sommerbilanz knapp 20% negativer als das Mittel aller Sommerbilanzen bis 2022 ausfiel. Aus der Kombination von gering unterdurchschnittlicher Akkumulation und überdurchschnittlich negativer Sommerbilanz ergab sich die fünft-negativste Massenbilanz in der gesamten Zeitreihe. Als Folge der bereits im Vorjahr festgestellten, erhöhten Gefahr von Stein- der Eisschlag an der mittleren Zunge wurde der Pegel 25 aufgelassen.

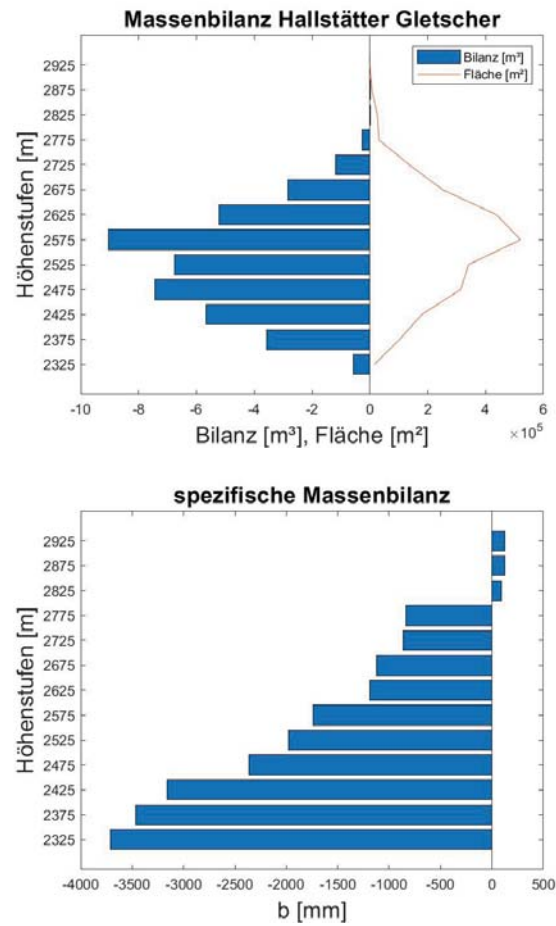


Abbildung 4.4: Nettobilanz (B) und Flächenverteilung nach Digitalem Geländemodell 2018 mit Gletschergrenze 2023 sowie die mittlere spezifische Bilanz (b) der Höhenstufen.

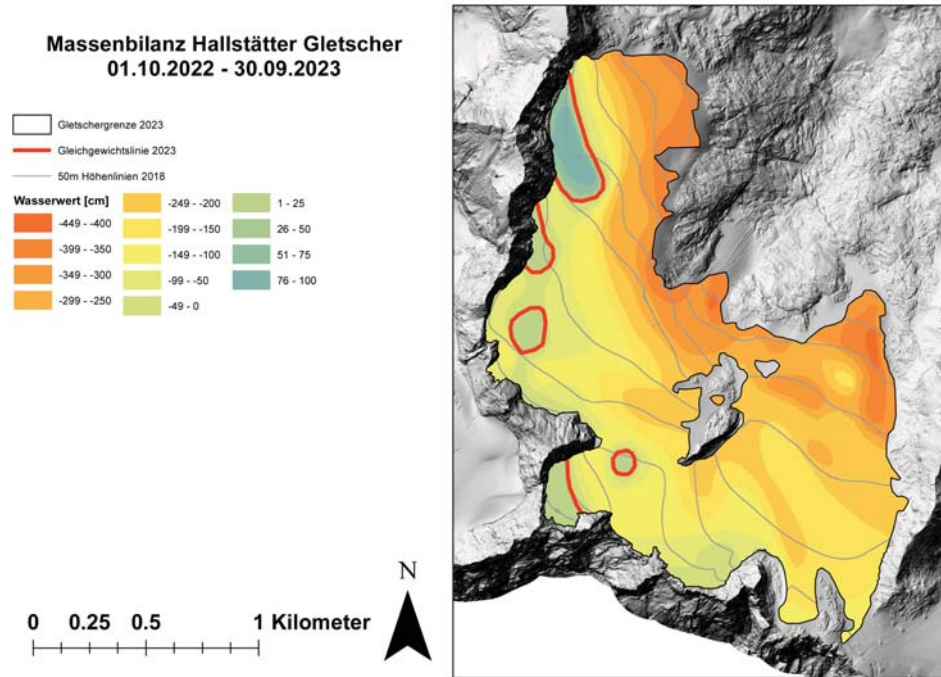


Abbildung 4.5: Flächen gleichen Wasserwertes der Jahresbilanz 2022/23.

### 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:

$$B_{so} = -8529.5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b_{so} = -3607 \text{ mm}$$

## 4.4. Online Massenbilanz

Seit Frühjahr 2020 ist auf der Seite [www.dachsteingletscher.info](http://www.dachsteingletscher.info) für jeden Tag im Jahr der aktuelle Stand der Massenbilanz am Hallstätter Gletscher 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 modellierte Verlauf des Massenhaushaltes 2022/2023 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. Im Haushaltsjahr 2022/23 stellten die Eingangsdaten des Niederschlages eine Herausforderung dar. So liegen zwischen dem Modellwert für Ende Oktober und der gemessenen Massenbilanz rund 1200 mm Differenz. Offensichtlich wird im Modell die Akkumulation der Winterniederschläge gegenüber der Messung deutlich überschätzt. Dies hat im Modell ein späteres Einsetzen der Eisschmelze und damit eine positivere Massenbilanz zur Folge. Berücksichtigt man eine Überschätzung der Winterakkumulation von 700 mm am Tag der Winterbilanz (Abb. 4.6; Stern), so sind es noch immer 500 mm Niederschlag Differenz in den Frühsommer- und Sommermonaten. Auffallend ist die starke Ablation im August bis in den September. Die Messdaten 2022/2023 werden in eine weitere Verbesserung des Modells eingehen.

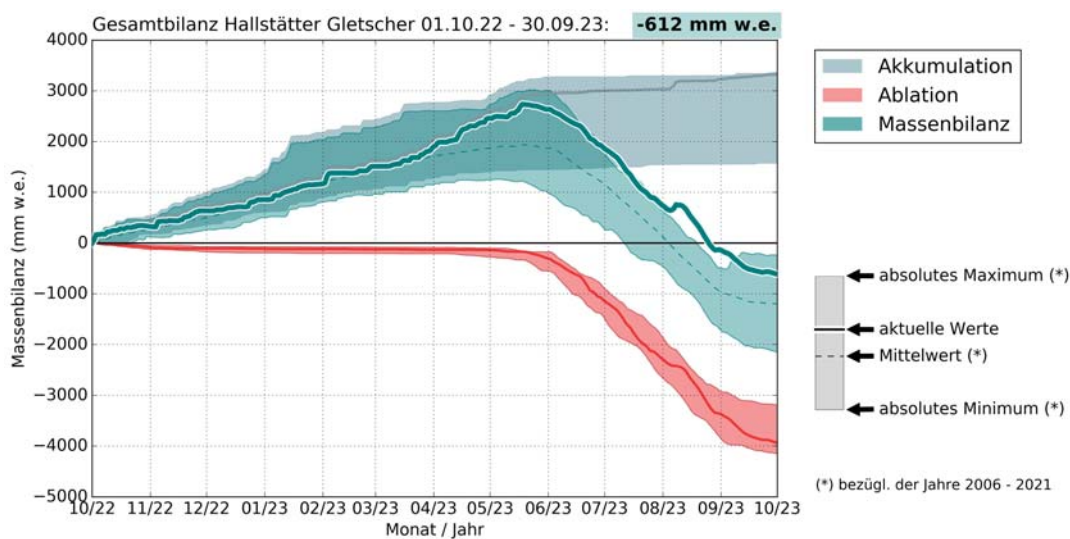


Abbildung 4.6: Zeitliche Verlauf der Akkumulation (grau), Ablation (rot) und daraus berechneten Massenbilanz (grün) des Hallstätter Gletschers im Haushaltsjahr 2022/23.

## 4.5. Besonderheiten 2023

Am 26. und 27. Juni 2023 erfolgte eine Exkursion vom Krippenstein zur Simonyhütte und weiter in Richtung des Hallstätter Gletschers gemeinsam mit Schüler\*innen des XXX, dem Landesrat Stefan Kaineder und der Presse. Dabei entstanden eine Vielzahl an sehr guten Beiträgen seitens der Teilnehmenden zum Projekt und den Gletscherschwund am Hallstätter Gletscher.

<https://www.meinbezirk.at/salzkammergut/c-lokales/oberoesterreichs-klima-fieberthermometer-kommt-im-a6132641>

Am 17. und 18. August wurden die Feldarbeiten am Hallstätter Gletscher von Chris Cummins (FM4) begleitet, aufmerksam dokumentiert und medial für die Wissenskommunikation aufbereitet. Entsprechende Beiträge sind unter anderen hier zu finden:

<https://fm4.orf.at/stories/3035591/>

Wie auch in den Vorjahren sind die Aufnahmen der 2021 neu installierten Webcam an der Simonyhütte mit einer Aktualisierung aller 10 Minuten abrufbar und werden von [foto-webcam.eu](http://foto-webcam.eu) zur Verfügung gestellt:

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

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. Eine weiterführende Installation zur Visualisierung des Gletscherschwundes am Dachstein im Bereich der Bergstation der Dachsteinbahn am Hunerkogel ist derzeit in Ausarbeitung.

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

## 4.6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle 4.8 zeigt die Beziehung zwischen Jahres-, Winter- und Sommerbilanz am Hallstätter Gletscher auf. Das Massenhaushaltsjahr 2022/23 reiht sich mit  $-1797$  mm als das fünft-negativste Massenbilanz seit Beginn der Messung ein. Die Massenverluste lagen rund beim 1,5-fachen des bisherigen Durchschnitts.

Die Bilanz des Massenhaushaltsjahres 2022/23 haben folgende Prozesse maßgeblich bestimmt: (1) starke Schneeakkumulation Ende März und im April; (2) kühle und wechselhafte Witterung im Frühjahr; (3) hohe Temperaturen und Schmelzraten im Juli; (4) kurze Unterbrechung der Eisablation Anfang August gefolgt von (5) einer Phase mit hohen Schmelzraten andauernd bis Ende September. Der Vergleich der Ergebnisse mit den vorangegangenen Massenhaushaltsjahren zeigt, dass es die stark negative Sommerbilanz 2022/23 gepaart mit einer nicht ganz durchschnittlichen Winterakkumulation zu einer der Top5 der negativen Bilanzen geführt hat (Abb. 4.7). Die Jahre 2011/12, und 2019/20 hatten bei ähnlich negativer Sommerbilanz mehr Wasseräquivalent in der Winterschneedecke gespeichert. Setzt man den Massenverlust 2022/23 ins Verhältnis zur mittleren Eisdicke, so hat der Hallstätter Gletscher in diesem Jahr rund 5% seines Volumens verloren.

	Jahresbilanz	Winterbilanz	Sommerbilanz	Einheit
$S_c$	0,157			$km^2$
$B_c$	58,10			$10^3 m^3$
$b_c$	370			$mm$
$S_a$	2,208			$km^2$
$B_a$	-4307,6			$10^3 m^3$
$b_a$	-1951			$mm$
$S$	2,365	2,365	2,365	$km^2$
$B$	-4249,5	4280,7	-8529,5	$10^3 m^3$
$b$	-1797	1810	-3607	$mm$
$S_c/S$	0,07			
$ELA$	2820			$m$

Tabelle 4.8: Kennzahlen der Jahres-, Winter- und Sommerbilanz 2022/23.

	$S_c$ $km^2$	$B_c$ $10^6 m^3$	$b_c$ $mmw.e.$	$S_a$ $km^2$	$B_a$ $10^6 m^3$	$b_a$ $mmw.e.$	$S$ $km^2$	$B$ $10^6 m^3$	$b$ $mmw.e.$	$ELA$ $m$	$S_c/S$
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
2022/2023	0.16	0.06	370	2.21	-4.31	-1951	2.37	-4.25	-1797	2820	0.066

Tabelle 4.9: Vergleich der 17 gemessenen Jahresbilanzen des Hallstätter Gletschers.

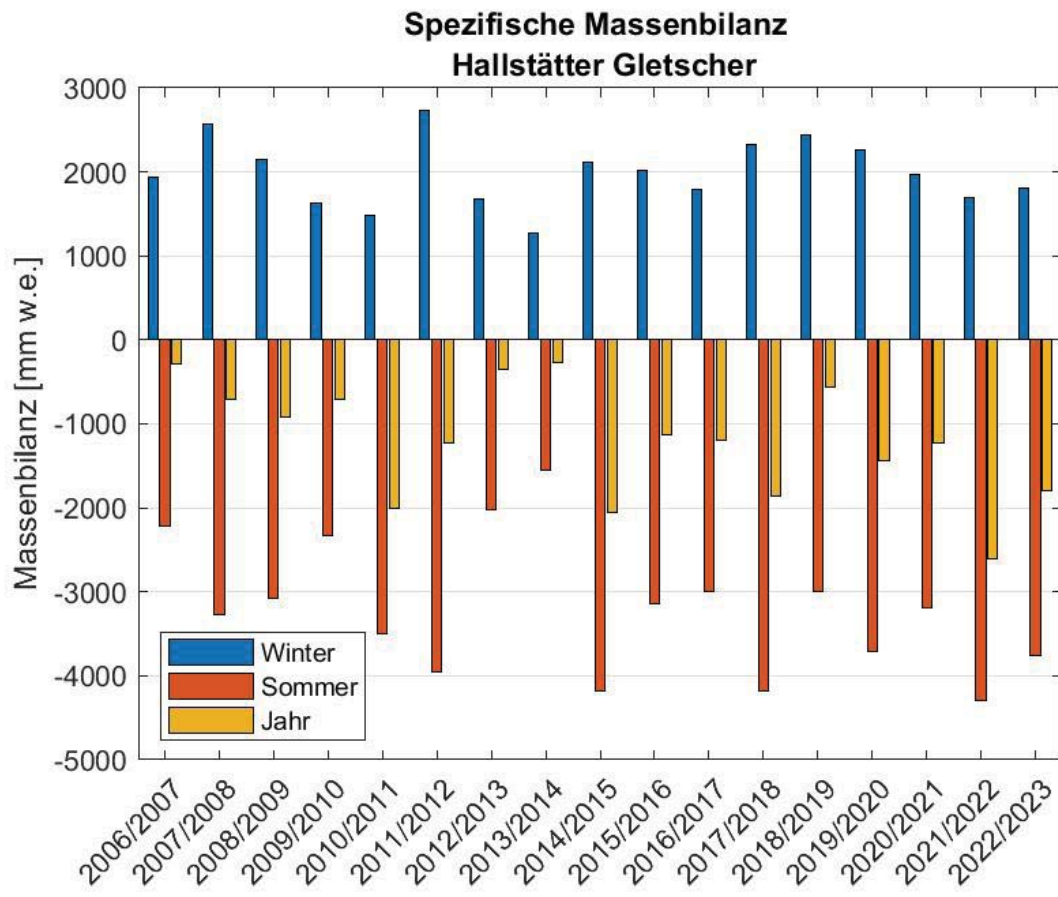


Abbildung 4.7: Die mittlere spezifische Massenbilanz (b) für den Winterzeitraum (1.10.-30.4., blau) für den Sommerzeitraum (1.5.-30.9., rot) und für das gesamte hydrologische Jahr (1.10.-30.9., orange) seit Beginn der Messungen am Hallstätter Gletscher.

# A

## Anhang

### A.1. MitarbeiterInnen und Danksagung

Die Feldarbeiten wurden von Klaus Reingruber, Kay Helfricht, Elke Lemmerer, Andrea Bruckmeier, Fabian Igelsböck, Johannes Schwaderlapp, Michael Backmann und Chris Cummins 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 hydrologischen Winterbilanz am 30.04.2023. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.2: Der Hallstätter Gletscher zum Zeitpunkt des ersten Teils der Frühjahrsbegehung am 03.05.2023. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.3: Der Hallstätter Gletscher zum Zeitpunkt des zweiten Teils der Frühjahrsbegehung am 13.05.2023. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.4: Erste Ausaperung der Eisoberfläche im Bereich des Eisbrucks und an der östlichen Zunge am 22.06.2023. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.5: Der Hallstätter Gletscher am 15.07.2023. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.6: Ausaperung des Hallstätter Gletschers zum Zeitpunkt der Pegelablesung am 24.07.2023. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.7: Schneedecke am Hallstätter Gletscher am 27.07.2023 als Folge des Niederschlages am Tag zuvor. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.8: Schneedecke am Hallstätter Gletscher am 08.08.2023 als Folge des Niederschlages am Tag zuvor. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.9: Ausaperung des Hallstätter Gletscher zum Zeitpunkt der Feldarbeiten am 18.08.2023. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.10: Der Hallstätter Gletscher zum Zeitpunkt der Herbstbegehung am 29.09.2023. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.11: Sentinel-2 Aufnahme des Hallstätter Gletscher nahe der maximalen Ausaperung am 02.10.2022 ().



Abbildung A.12: Arbeiten am Frühjahrsschacht FS3. Gut zu erkennen die dunklere Schneeschicht, welche die Oberfläche aus dem März markiert. Der darüber liegende Schnee wurde ab Mitte April abgelagert. Foto: Kay Helfricht.



Abbildung A.13: Arbeiten am Frühjahrsschacht FS3. Foto: Michael Backmann.



Abbildung A.14: Frühjahrsschacht FS4 unterhalb des Eisstein am 03.05.2023. Foto: Klaus Reingruber.



Abbildung A.15: Beim Pegelbohren auf der westlichen Zunge am 26.06.2023. Foto: Kay Helfricht.



Abbildung A.16: Klaus Reingruber beim Ablesen eines Ablationspegels am 24.07.2023. Foto: Kay Helfricht.



Abbildung A.17: Unterwegs am Hallstätter Gletscher mit Chris Cummins (FM4) am 17.08.2023. Foto: Kay Helfricht.



Abbildung A.18: Pegelablesen bei der Herbstbegehung am 29.09.2023. Foto: Johannes Schwaderlapp.



Abbildung A.19: Der Herbstschacht HS3. Foto: Kay Helfricht.



Abbildung A.20: Jausen bei der Herbstbegehung am 29.09.2023. Foto: Johannes Schwaderlapp.



Abbildung A.21: Titelbild: Der Hallstätter Gletscher gesehen von Gipfel des Hohen Dachsteins zur Herbstbegehung am 29.09.2023. Foto: Kay Helfricht.

# Literaturverzeichnis

- [1] 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.
- [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., M. Huss, A. Fischer and J.C. Otto, 2019: Calibrated Ice Thickness Estimate for All Glaciers in Austria. *Frontiers in Earth Science*, **7**, , doi:10.3389/feart.2019.00068. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2019.00068>.
- [4] 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.
- [5] Helfricht, K., 2009: Veränderungen des Massenhaushaltes am Hallstätter Gletscher seit 1856. Master's thesis, Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck.
- [6] Hoinkes, H., 1970: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **6**, 37–90.
- [7] Cuffey K.M. und W.S.B. Paterson, 2010: *The physics of glaciers*. (4rd ed.). Amsterdam, etc., Academic Press. 704pp.