

Hallstätter Gletscher

Massenhaushalt und Klima 2020/2021

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



Hallstätter Gletscher

Massenhaushalt und Klima
2020/2021

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

Das Massenhaushaltsjahr 2020/21 reiht sich in der 15-jährigen Messreihe an der **fünften Stelle der am negativsten Massenbilanzen** ein. Am Ende des Winterzeitraumes war am Hallstätter Gletscher eine durchschnittliche Mächtigkeit der Schneedecke zu finden. Die Tiefen der Schneeschächte lagen zwischen 4,5 bis knapp 6 Meter. Die gemessenen Schneedichten waren aufgrund des relativ trockenen Schnees für diese Jahreszeit gering, womit sich eine **unterdurchschnittliche Akkumulation** ergab. Weitere **Schneefälle im Mai** führten zu einem Anwachsen der Schneedecke, bevor vor allem im **Juni hohe Temperaturen** und folgend hohe Schmelzraten zu verzeichnen waren. Mit Ende Juni kam es zum ersten Ausapern des Eises. Im **Juli und August führte wechselhafte Witterung** mit häufigen Niederschlägen zum raschen Abbau der noch vorhandenen Schneedecke und erhöhten Schmelzraten am Eis. Ende August war die maximale Ausaperung erreicht. **Im September** bedeckten **wiederholt Schneefälle** den Gletscher, so dass zunächst der Schnee und wenig Eis geschmolzen wurde. Die Ausaperung Ende September entsprach ziemlich genau der einem Monat zuvor. Die **spezifische Massenbilanz des Massenhaushaltsjahres 2020/21 beträgt -1228 mm** Wasseräquivalent. Dies entspricht einem Wasservolumen von $3221 \cdot 10^3 m^3$ Wasser bzw. einem **mittleren Eisdickenverlust von rund 1,4 m** gemittelt über die gesamte Gletscherfläche.

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.

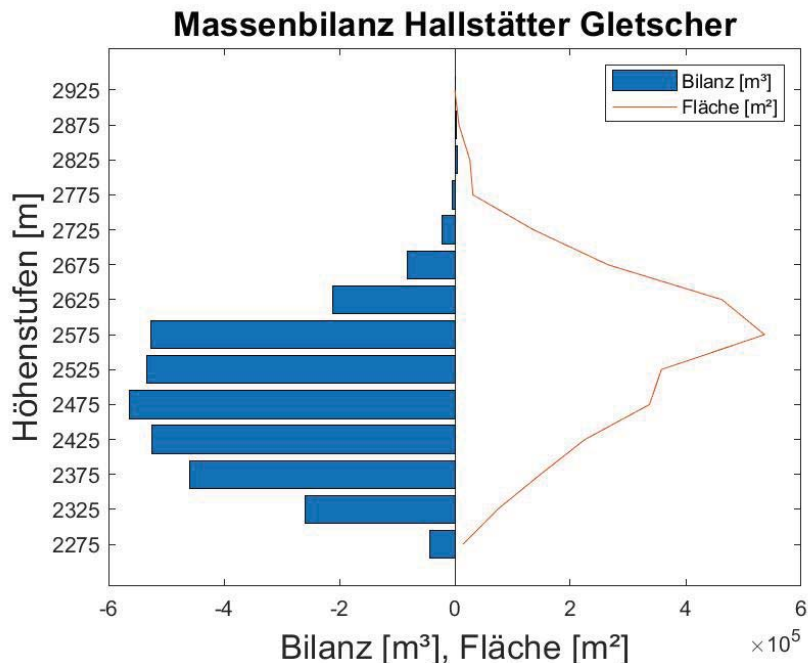


Abbildung 1: Massenbilanz sowie Verteilung der Fläche des Hallstätter Gletschers nach Höhenstufen 2020/21.

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel der Massenbilanzmessungen	1
2	Das Untersuchungsgebiet	2
3	Klima und Witterungsverlauf	3
4	Massenbilanz	6
4.1	Methode	6
4.2	Durchgeführte Arbeiten	6
4.2.1	Pegelablesungen	6
4.2.2	Frühjahrsbegehung	6
4.2.3	Herbstbegehung	6
4.2.4	Ausaperungsflächen	8
4.2.5	Niederschlag	9
4.2.6	Aktuelle Geländedaten	10
4.3	Auswertung	11
4.3.1	Winterbilanz	11
4.3.2	Jahresbilanz	12
4.3.3	Sommerbilanz	15
4.4	Online Massenbilanz	15
4.5	Weiterführende Arbeiten 2021	15
4.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	16
A	Anhang	18
A.1	MitarbeiterInnen	18
A.2	Definitionen	18
A.3	Fotos	19
	Literaturverzeichnis	27

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.

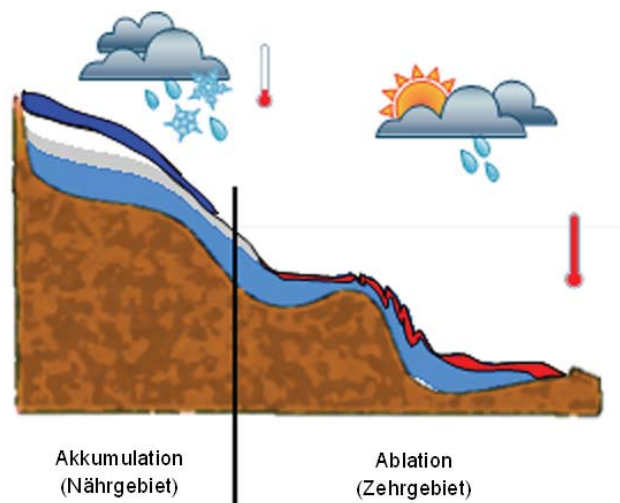


Abbildung 1.1: Schematischer Schnitt entlang der zentralen Fließlinie eines Gletschers. Farblich dargestellt sind die Eismasse des Gletschers (hellblau), im Bereich der Akkumulation Schnee (dunkelblau) und Firn (weiß/grau) sowie der Massenverlust (rot) im Ablationsgebiet. Die Thermometer geben die relativen 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 2019/20 dargestellt.

2

Das Untersuchungsgebiet

Der Hallstätter Gletscher ist mit $2,6 \text{ km}^2$ 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 2020 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 2240 m. Mit einer Fläche von $2,623 \text{ km}^2$ (Gletschergrenze 2020) verlor der Gletscher die Hälfte seiner Ausdehnung gegenüber dem Gletscherhochstand 1856 [3]. Allein in den vergangenen 10 Jahren hat sich die Fläche des Hallstätter Gletschers um rund 13% verkleinert.

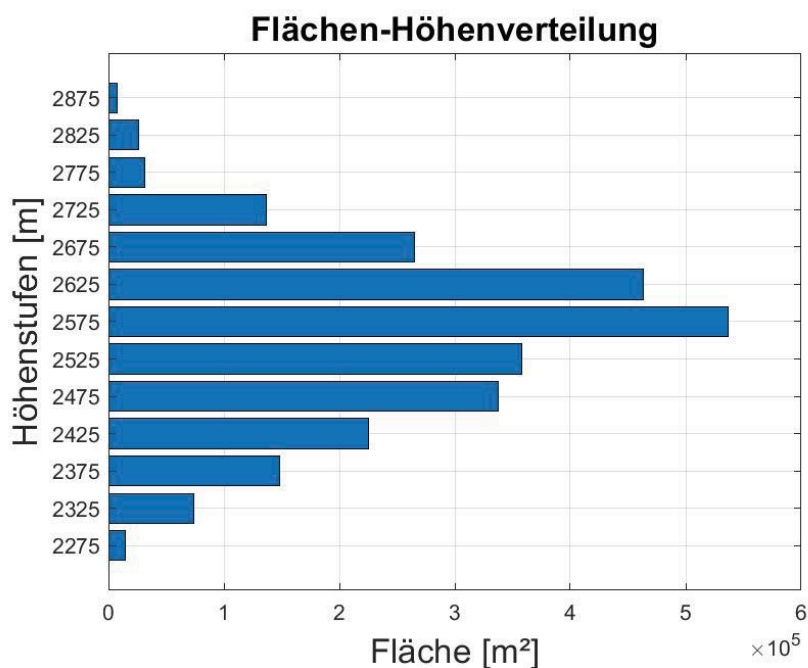


Abbildung 2.1: Flächen-Höhenverteilung des Hallstätter Gletschers auf Grundlage des Höhenmodells von 2018 und der adaptierten Gletschergrenze von 2020.

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 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.

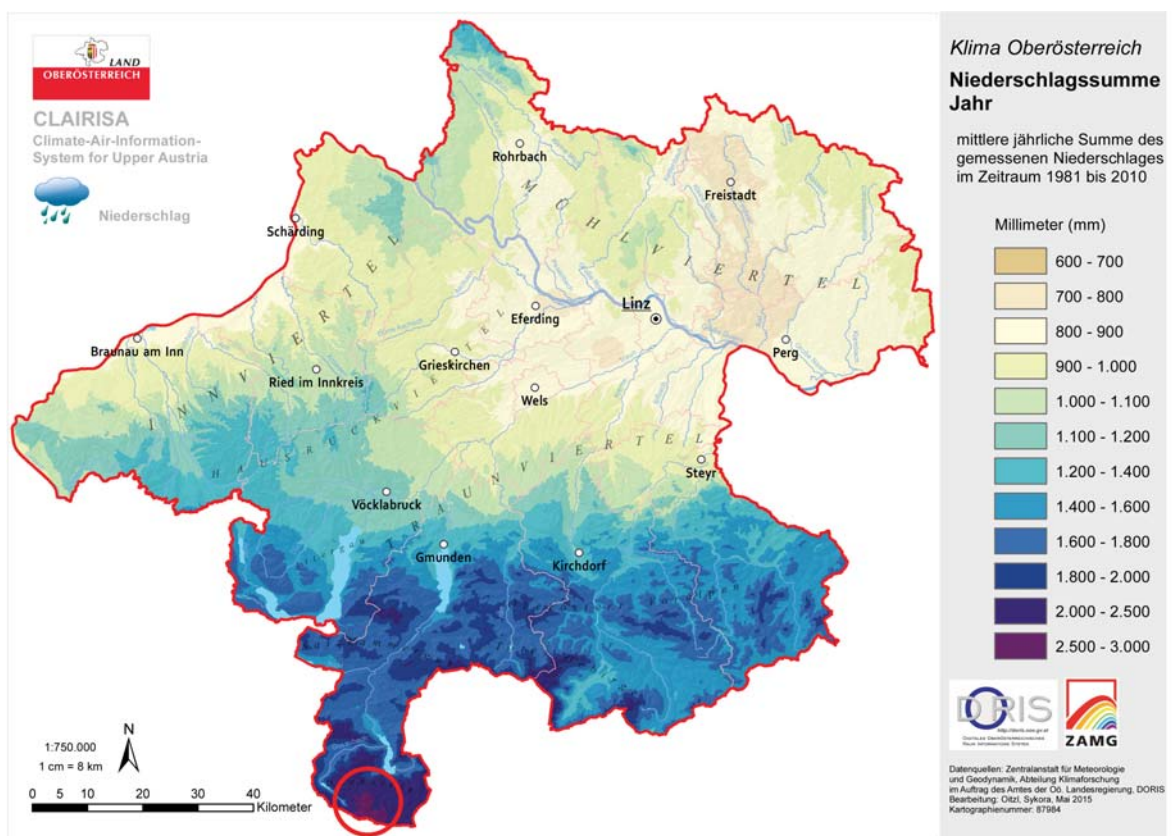


Abbildung 3.1: Mittlere Jahresniederschlagsmenge in mm (Datenquellen: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Klimaforschung im Auftrag des Amtes der Oö. Landesregierung, DORIS). Im Ausschnitt rot markiert die Lage des Hallstätter Gletschers.

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 1.10.2020 bis zum 30.09.2021 begann mit recht durchschnittlichen Niederschlag und Temperaturen im Oktober. Ab November verlief der Winter eher trocken (Abb. 3.2). Ab März folgte kühle Witterung mit deutlichen Zuwachs der Schneedecke Mitte März und weiteren Schneefällen im April. Bei der Frühjahrsbegehung am 28. und 29. Mai wurden Schachttiefen von 4,75, 5,49 und 5,89 Metern gegraben (Abb. A.12, A.11). Da es ist zum Ende des hydrologischen Winterzeitraumes zu keiner deutlichen Schmelzperiode kam, waren die gemessenen Schneedichten und damit das Wasseräquivalent der Akkumulation unter den für die Jahreszeit üblichen Werten. Im Mai kam es bei fortwährend kühler Witterung zu einem weiteren Anwachsen der Schneedecke aufgrund erhöhter Niederschlagswerte (Abb. 4.2). Darauf folgte ein sehr warmen und trockener Juni. In dieser Zeit kam es zu einem raschen Abbau der Schneedecke, so dass erste Ausaperungen des Eises Ende Juni sichtbar wurden (Abb. A.1). Der Juli wie auch der August verliefen mit wechselhaften Witterung mit durchschnittlichen Temperaturen und leicht erhöhten Niederschlagswerten. Dies führte zu einem raschen Abbau der Schneebedeckung bei der Jahreszeit entsprechenden Schmelzraten des Eises. (Abb. A.2 und A.3). Der Maximalstand der Ausaperung wurde bereits Ende August erreicht (Abb. A.4). Mit dem Monatswechsel August/September kam es zum ersten Schneefall mit der Ausbildung einer Schneedecke über den gesamten Gletscher. Ein Großteil der frischen Schneebedeckung wurde in den folgenden Wochen wieder geschmolzen, bevor wiederholte Schneefälle in der zweiten Septemberhälfte die Eisschmelze deutlich reduzierten (Abb. A.5). Die Herbstbegehung fand am 14.09.2021 sowie 02.10.2021 statt, wobei bei erstem Termin alle Pegel abgelesen wurden. Zu diesem Zeitpunkt war auf der noch 0,47 km² großen Akkumulationsfläche nur mehr eine sehr geringe Schneeaufgabe zu verzeichnen. Anfang Oktober folgte der Herbstschacht sowie die Ablesung zweier Pegel zur Abschätzung der geringen Eisablation über die vergangenen zwei Wochen.

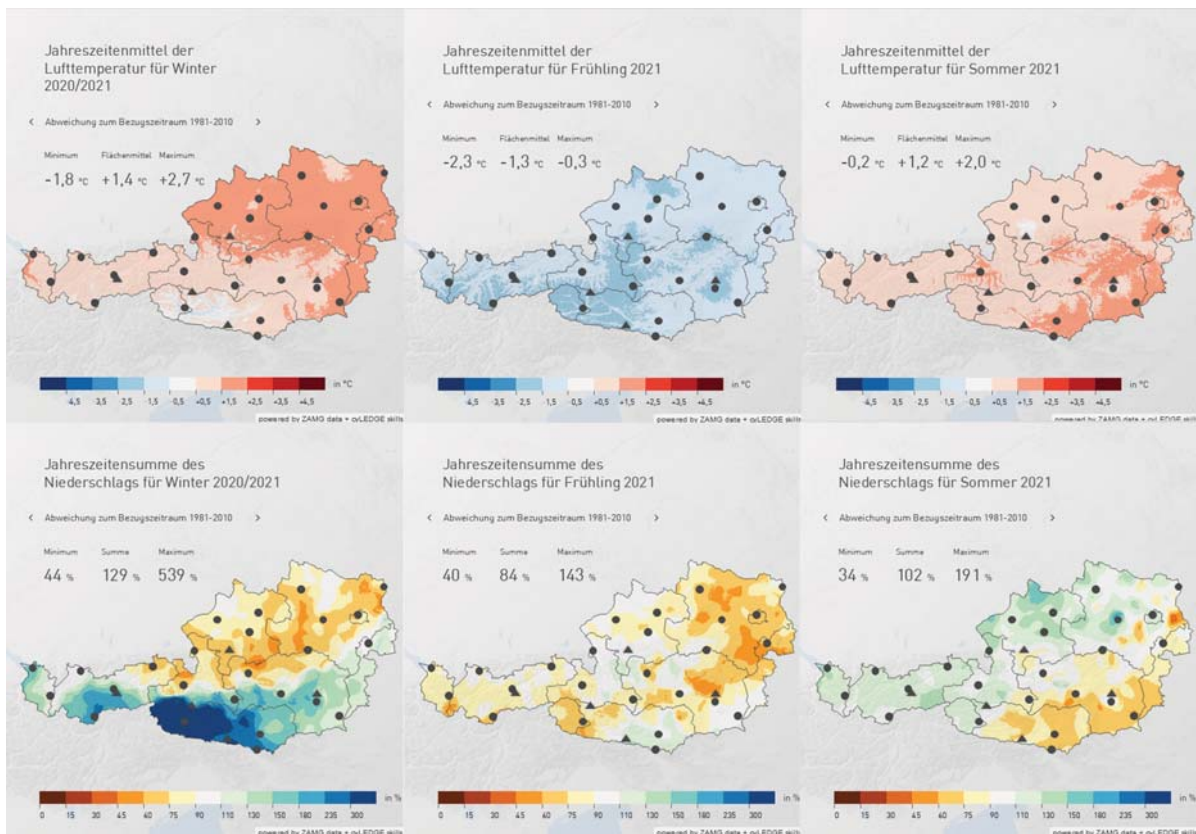


Abbildung 3.2: Übersicht der Abweichungen vom langjährigen Mittel der Temperatur (oben) und des Niederschlags (unten) für die Jahreszeiträume Winter (DJF), Frühling (MAM) und Sommer (JJA) 2021. Die Abbildungen werden von der ZAMG unter www.zamg.ac.at zur Verfügung gestellt.

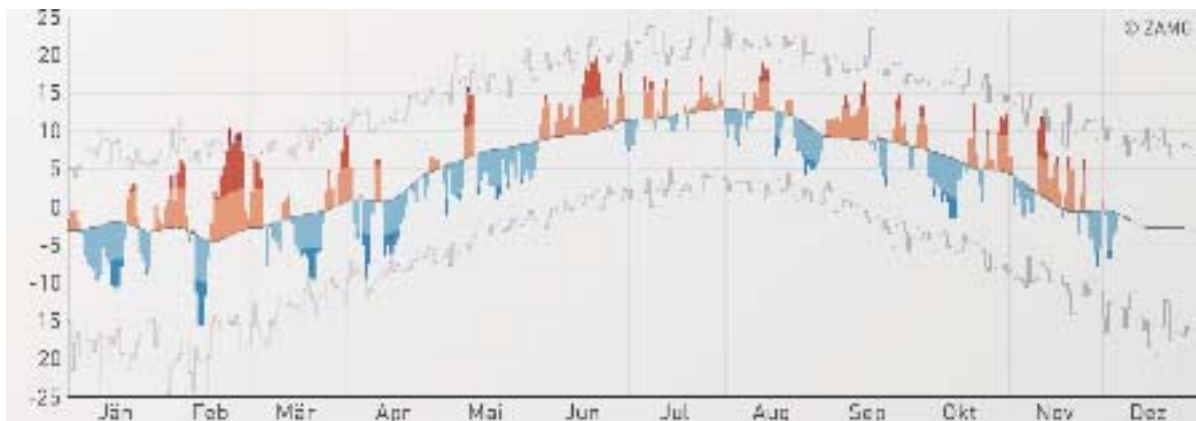


Abbildung 3.3: Temperaturverlauf des Jahres 2021 an der Station Feuerkogel (Mittel bezogen auf die Periode 1981 bis 2010). Die Abbildung wird von der ZAMG unter www.zamg.ac.at zur Verfügung gestellt.

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 2020/21 wurden die Pegel im Rahmen der Herbstbegehung am 24.09.2020 abgelesen, sowie im Jahr 2021 am 19.7., 17.8., 14.9. und zu der Herbstbegehung am 02.10.2021 (Abb. A.14). Die Positionen der Pegel sind der Abbildung 4.1 zu entnehmen. am 17.8. wurden die Pegel 20, 23, 24, 37 und 38 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 2021 fand am 28. und 29. April statt. Als Ausgangspunkt diente die Dachsteinbahn am Hunerkogel. Im Rahmen der Begehung wurden die Frühjahrsschächte 2 und 3 mit einer Höhe von 4,75 m und 5,89 m (Abb. A.12, A.11) sowie der Frühjahrsschacht 4 mit 5,49 m gegrabe. Zusätzlich wurde über die Gletscherzungen die Schneehöhe sondiert. Die Positionen der Schächte sowie die Sondierungspunkte 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. 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 14. September sowie am 02. Oktober 2020 statt. Zur Feststellung der Ablation wurden die im September an allen Pegeln abgelesenen Werte noch um den an vier Pegeln im Oktober bestimmten Eisverlust ergänzt. Es wurden nur mehr im Bereich des Herbstschacht 3 die Rücklage gemessen (Abb. 4.1, ??). An diesem war eine Altschneehöhe von 34 cm feststellbar. Darauf war eine 17 cm mächtige Neuschneesicht abgelagert. Für die Berechnung der Rücklage muss die Akkumulation an Neuschnee von 60 mm ww, welche zum 1.10.2020 bereits am Gletscher vorhanden war, berücksichtigt werden. Dies führt zu einer Rücklage am Punkt der Aufnahme von rund 100 mm ww.

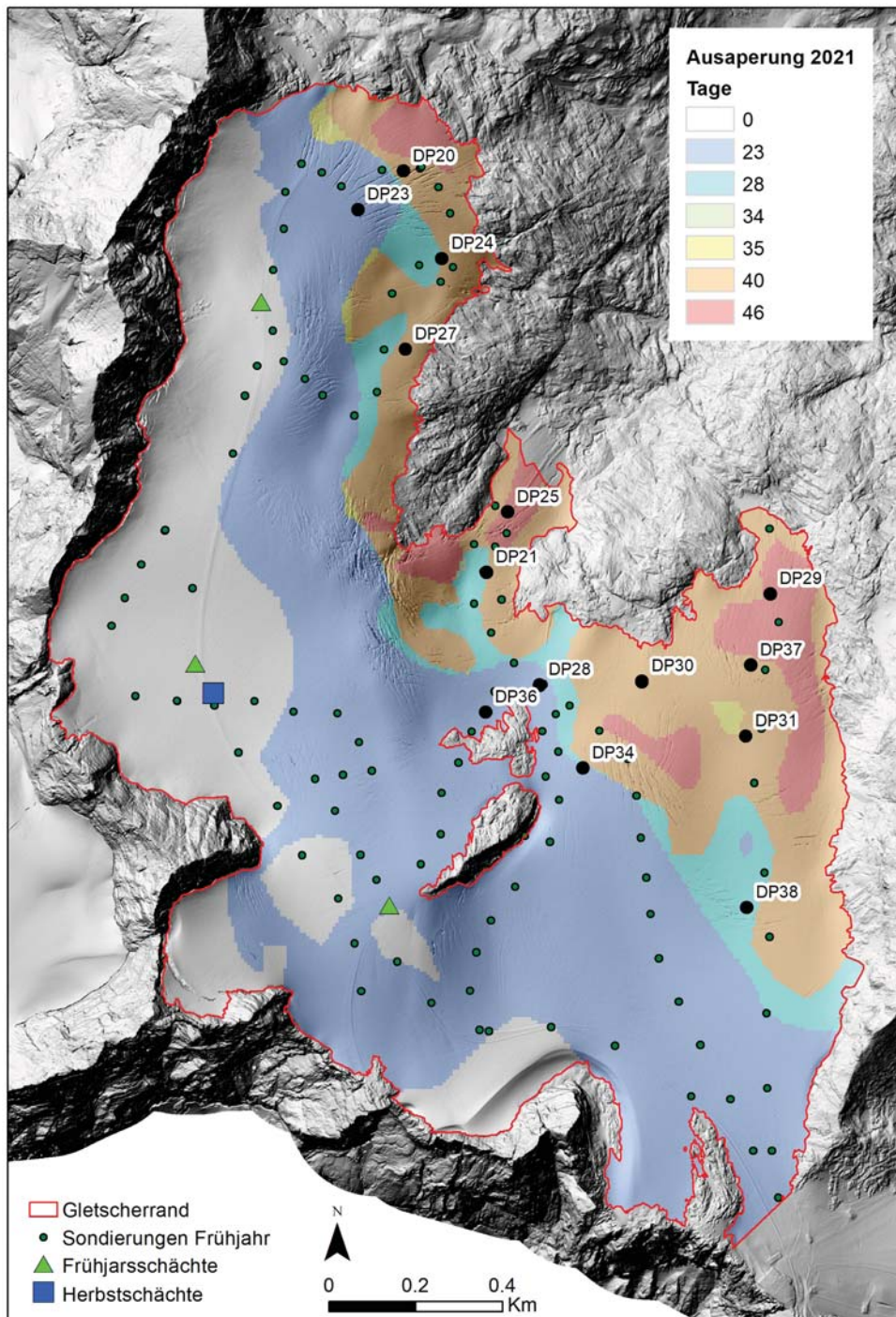


Abbildung 4.1: Positionen der Pegel (DP mit Bezeichnung des Jahres der Bohrung) und Lage der Frühjahrsschächte sowie des Herbstschachtes 2020/21. Weiter sind die Sondierungspunkte der Frühjahrsbegehung sowie 50 m Höhenschichtlinien und die Gletschergrenze 2020 (rot) dargestellt. Die Dauer der Ausaperung 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 ausgeaperten Gletscherflächen sehr gut unterscheiden. Für die Berechnung der Massenbilanz 2020/21

wurden die Ausaperungsmuster der Aufnahmen am 12.7., 24.7., 29.7. sowie am 21.8. kartiert und die Anzahl der schneefreien Tage bis Ende August ausgewertet. Für September waren keine auswertbaren Aufnahmen vorhanden. Die farblich gekennzeichneten Flächen wurden zur Auswertung der Bilanz einbezogen (Abb. 4.1).

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 zwei 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 1641 mm lag das Haushaltsjahr deutlich unter dem Mittelwert der Jahre 2006/07 bis 2019/20 (2255 mm) und stellt das Bilanzjahr mit dem geringsten gemessenen Niederschlag dar. Vor allem der geringe Winterniederschlag in den Monaten November, Dezember und Februar ist auffällig (Abb. 4.2). Auch der Juni war sehr trocken. Eine gegenüber dem mehrjährigen Mittel leicht erhöhte Niederschlagssumme ist für den August zu verzeichnen. Die Niederschlagssummen der einzelnen Monate sind der Tabelle 4.1 zu entnehmen.

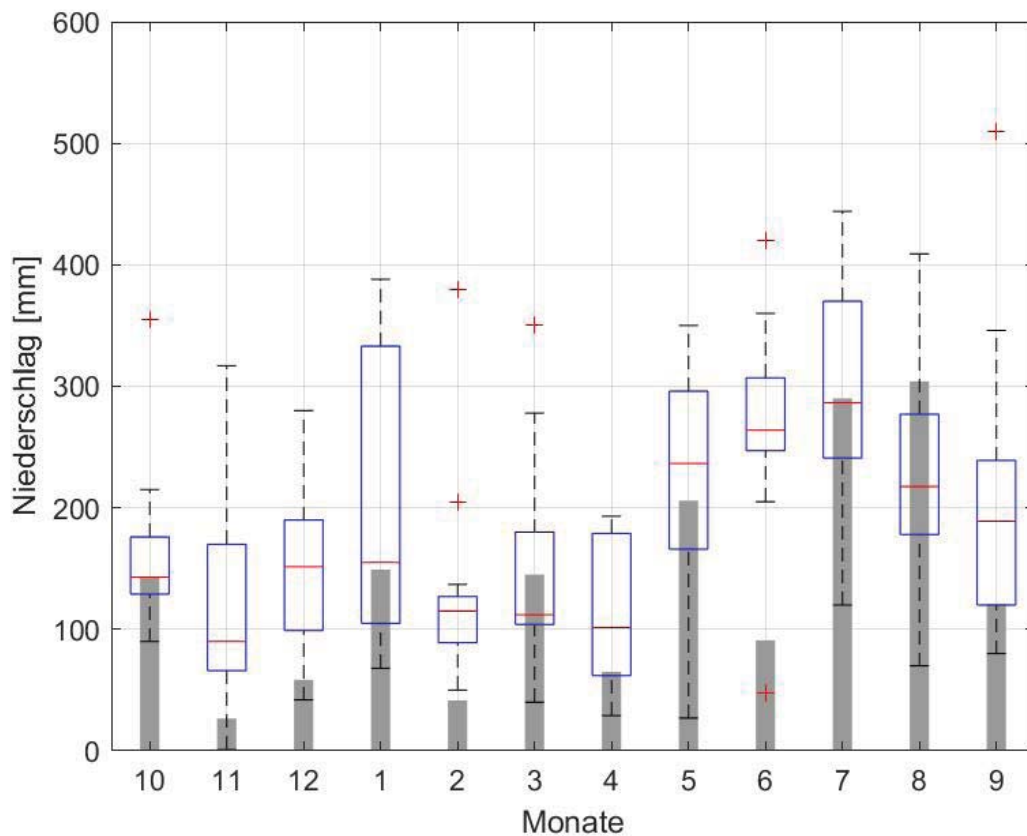


Abbildung 4.2: Vergleich der monatlichen Niederschlagssummen des Haushaltsjahres 2020/21 (graue Balken) gegenüber der statistischen Verteilung der Monatsniederschläge von 2006 bis 2020. Die rote Linie kennzeichnet den Median, die blauen Boxen zeigen alle Werte innerhalb der 25% und der 75% Perzentile. Rote Kreuze zeigen davon deutlich abweichende Minimal- oder Maximalwerte.

Datum	Niederschlag [mm]
31.10.2020	143
30.11.2020	27
31.12.2020	58
31.01.2021	149
28.02.2021	42
31.03.2021	145
30.04.2021	65
31.05.2021	206
30.06.2021	91
31.07.2021	290
31.08.2021	304
30.09.2021	121
Gesamt	1641

Tabelle 4.1: Monatsniederschlag 2020/21.

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
Mittelwert	2214

Tabelle 4.2: Jahresniederschlag 2006/07-2020/21.

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. Die Gesamtfläche beträgt $2,623 \text{ km}^2$ mit Stand September 2020.

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 Schneeschnitten 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 01.10.2020 bis 30.04.2021. Die Winterbilanz B_{wi} wird durch Integration über die jeweiligen Flächen der Höhenstufen berechnet. Die mittlere spezifische Winterbilanz b_{wi} erhält man durch Division von B_{wi} durch die Gesamtfläche.

$$B_{wi} = 5167 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b_{wi} = 1970 \text{ mm}$$

Schachtnummer	Tiefe [m]	Dichte [kg/m^3]	Wasserwert [mm]
2	4,75	418	1924
3	5,89	414	2377
4	5,49	413	2209

Tabelle 4.3: Frühjahrsschächte 2021. Die angegebenen Schachttiefen sind die Gesamttiefen inklusive des im Herbst 2020 gefallenen Neuschnees. Dieser ist im Wasserwert bereits abgezogen.

Höhenstufe [m]	Fläche [km^2]	Bilanz [10^3 m^3]	Wasserwert [mm]
2850 – 2900	0,007	19,4	2700
2800 – 2850	0,026	67,4	2700
2750 – 2800	0,031	73,6	2589
2700 – 2750	0,136	292,2	2341
2650 – 2700	0,265	578,0	2179
2600 – 2650	0,463	1003,1	2167
2550 – 2600	0,537	1053,2	1963
2500 – 2550	0,358	669,7	1872
2450 – 2500	0,337	635,4	1884
2400 – 2450	0,225	394,7	1751
2350 – 2400	0,148	232,9	1571
2300 – 2350	0,074	118,8	1602
2250 – 2300	0,014	28,8	2015
Gesamt	2,623	5167,4	1970

Tabelle 4.4: Flächen- und Höhenverteilung der Winterbilanz 2020/21 (Gletscherfläche Stand 2020).

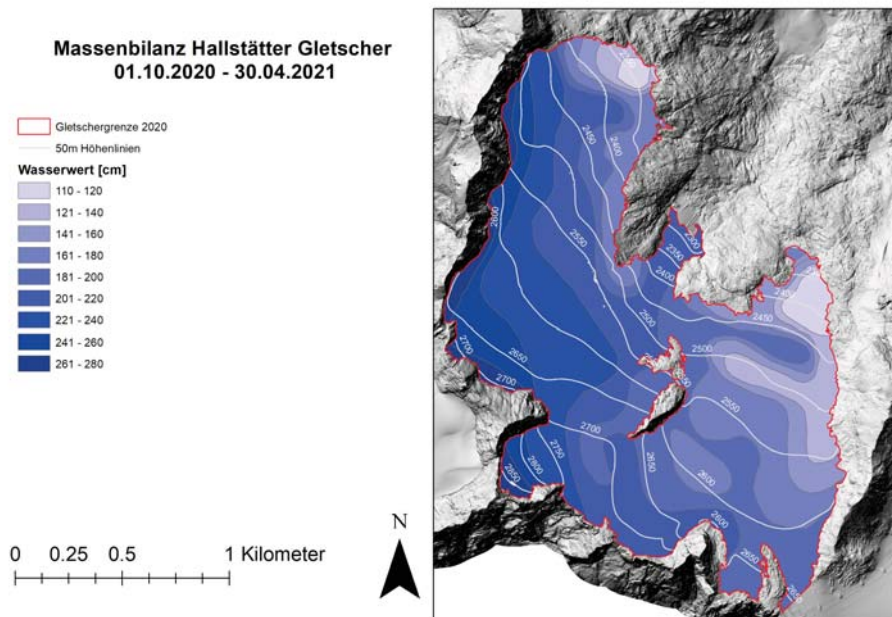


Abbildung 4.3: Flächen gleichen Wasserwertes der Winterbilanz 2020/21.

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 .

$$B = -3220,7 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b = -1228 \text{ mm}$$

Pegelnummer	Wasserwert [mm]	Pegelnummer	Wasserwert[mm]
DP 20	-3789	DP 30	-1913
DP 21	-3389	DP 31	-1418
DP 22	aufgelassen	DP 32	aufgelassen
DP 23	-2048	DP 33	aufgelassen
DP 24	-3447	DP 34	-1715
DP 25	-3285	DP 36	-1328
DP 27	-2457	DP 37	-3240
DP 28	-1463	DP 38	-2622
DP 29	-2720		

Tabelle 4.5: Wasserwerte der Eisablation an den Pegeln (01.10.2020-30.09.2021)

Schachtnummer	Tiefe [m]	Dichte [kg/m^3]	Wasserwert [mm]
Schacht 3	0,51	316	101

Tabelle 4.6: Herbstschacht 2021. Die angegebenen Schachttiefen sind die Gesamttiefen inklusive des im Herbst 2020 gefallenen Neuschnees und des Neuschnees der letzten Septemberwoche 2021. Beide sind im Wasserwert bereits berücksichtigt.

Höhenstufe [m]	Fläche [km^2]	Bilanz [$10^3 m^3$]	Wasserwert [mm]
2850 – 2900	0,007	2,7	375
2800 – 2850	0,026	5,1	196
2750 – 2800	0,031	-5,1	-162
2700 – 2750	0,136	-22,8	-167
2650 – 2700	0,265	-82,1	-310
2600 – 2650	0,463	-211,0	-456
2550 – 2600	0,537	-526,3	-981
2500 – 2550	0,358	-533,0	-1490
2450 – 2500	0,337	-564,0	-1672
2400 – 2450	0,225	-524,0	-2324
2350 – 2400	0,148	-458,6	-3092
2300 – 2350	0,074	-258,7	-3489
2250 – 2300	0,014	-42,9	-3008
Gesamt	2,623	-3220,7	-1228

Tabelle 4.7: Flächen- und Höhenverteilung der Jahresbilanz 2020/21.

Die Massenbilanz 2020/210 war in der 15-jährigen Messreihe an fünfter Stelle der am negativsten Massenbilanzen. Die Höhe der Gleichgewichtslinie (ELA - equilibrium line altitude) lag mit 2798 m wiederholt sehr hoch. Somit waren große Teile der Verebnungsfläche oberhalb 2600 m am Ende der Ablationssaison schneefrei. Im Haushaltsjahr 2020/2021 ist vor allem der Stand der maximalen Ausaperung bereits mit Ende August erreicht wurden (Vgl. Abb. A.4 und Abb. A.8). Nach einer durchschnittlichen Akkumulation im Winter (Abb. 4.3) sahe es mit erneuten Schneefällen im Mai zunächst recht günstig für den Hallstätter Gletscher aus. Die Schneedecke schwand mit der langen Wärmeperiode im Juni aber rasch. Bei wechselhafter Witterung im Juli und August kam es zu einer großflächigen Ausaperung des Eises. Die Ablationswerte an der Zunge fielen vergleichsweise moderat aus, allerdings war mit Ende der Ablationsperiode auch von der Schneedecke wenig erhalten (Tab. 4.5, Abb. 4.5). Nur mehr 18% des Gletschers waren mit Schnee des vergangenen Winters bedeckt. Im Mittel über die gesamte Messzeitreihe (Saison 2006/07-2020/21) beträgt die Massenbilanz -1062 mm. Die vergangene Saison war also um etwa 16% negativer als das Mittel der gesamten Zeitreihe über 15 Jahre (Abb. 4.7).

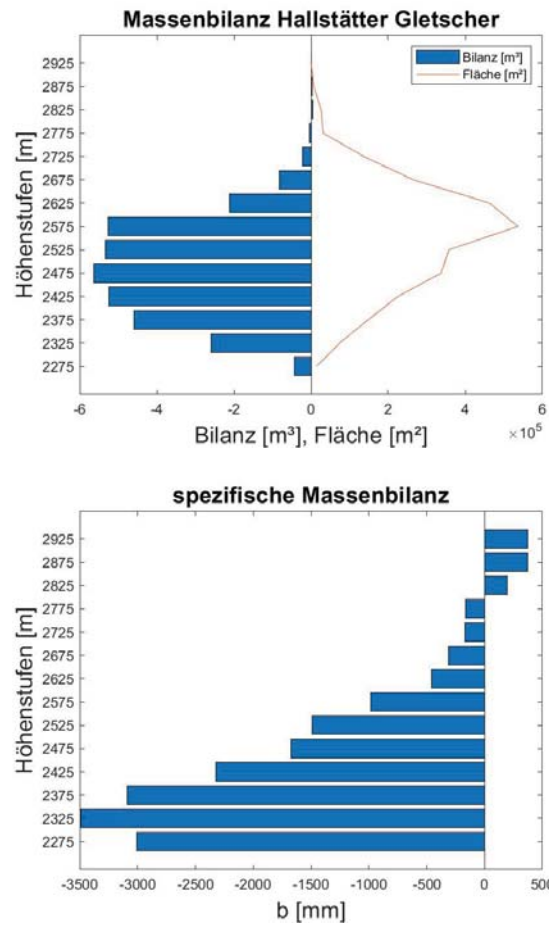


Abbildung 4.4: Nettobilanz (B) und Flächenverteilung nach Digitalem Geländemodell 2018 mit Gletschergrenze 2020 sowie die mittlere spezifische Bilanz (b) der Höhenstufen.

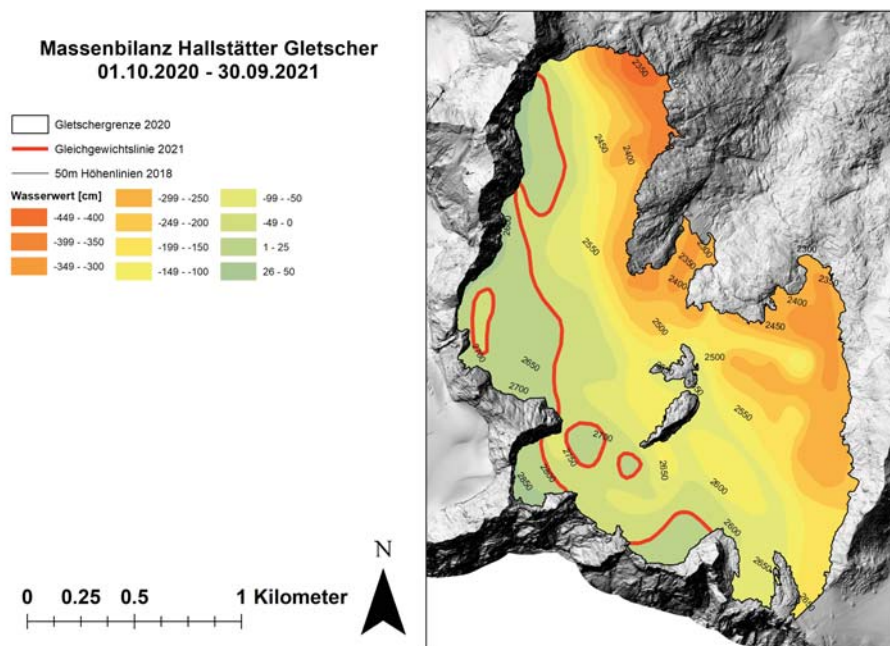


Abbildung 4.5: Flächen gleichen Wasserwertes der Jahresbilanz 2020/21.

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:

$$B_{so} = -8388,4 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b_{so} = -3198 \text{ mm}$$

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 2020/2021 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 zu sehen sind die ausgleichende Wirkung der Schneefälle im Mai hinsichtlich der Akkumulation hin zu einem mittleren Wert sowie die folgende hohe Ablation im Juni. Die modellierte Bilanz ist negativer als die auf Grundlage der Messdaten berechnete. Den Einfluss der Daten des Temperatursensors an der Simonyhütte auf das Modellergebnis gilt es zu untersuchen. Die Messdaten 2020/2021 werden in eine weitere Verbesserung des Modells eingehen.

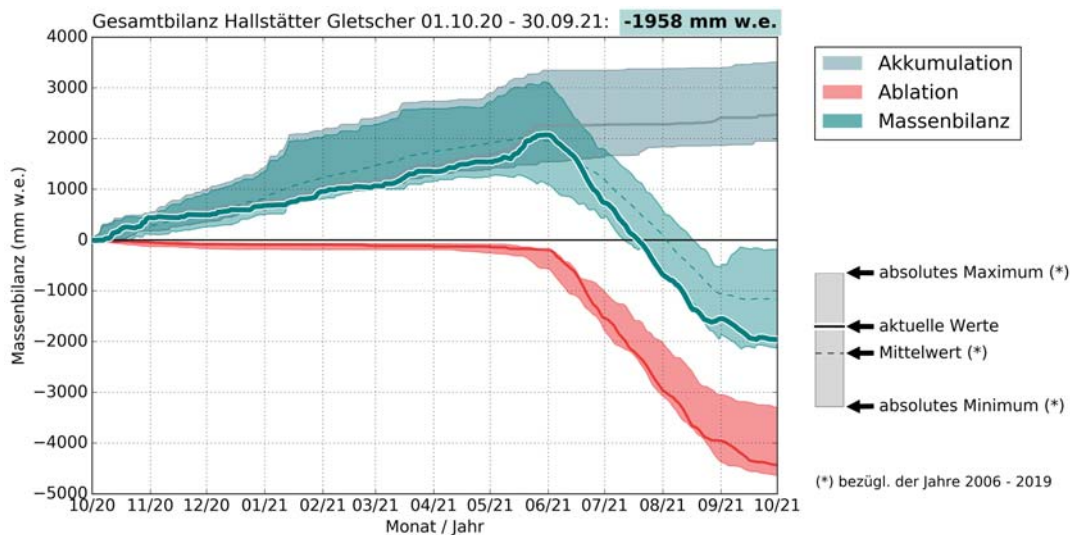


Abbildung 4.6: Zeitliche Verlauf der Akkumulation (blau), Ablation (rot) und daraus berechneten Massenbilanz (grün) des Hallstätter Gletschers im Haushaltsjahr 2020/21.

4.5. Weiterführende Arbeiten 2021

Am 30.04.2021 erfolgte die erste Aufnahme der neu installierten Webcam an der Simonyhütte. Diese hoch aufgelösten Aufnahmen sind mit einer Aktualisierung aller 10 Minuten abrufbar und werden von foto-webcam.eu auf zur Verfügung gestellt:

www.foto-webcam.eu/webcam/simonyhuette/

In Zusammenarbeit von BlueSky Wetteranalysen, dem Institut für Gebirgsforschung der ÖAW sowie der SMESH OG gefördert von der Landesregierung OÖ entstand die Visualisierung APP [TAUEN] des Rückgangs des Hallstätter Gletschers. Neben den beobachteten Änderungen des Gletschers im Zusammenspiel mit dem Anstieg der Temperatur über die vergangenen Jahrzehnte wird der unter einem realistischen Klimaszenario anzunehmende Eisverlust und die damit einhergehenden Änderungen im Dachsteingebiet thematisiert.

www.apptauen.at

4.6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle 4.8 zeigt die Beziehung zwischen Jahres-, Winter- und Sommerbilanz auf. Das Massenhaushaltsjahr 2020/21 reihte sich mit -1228 mm unter den stark negativen Massenbilanzen seit Beginn der Messung ein. Die Massenverluste lagen höher als im Durchschnitt (Mittelwert spezifische Bilanz über die gesamte Messreihe: -1062 mm).

Der Vergleich der Ergebnisse mit den vorangegangenen Massenhaushaltsjahren zeigt, dass sich ähnliche Werte der Jahresbilanz auch in ähnlichen Werten der mittleren Höhe der Gleichgewichtslinie *ELA* und dem Akkumulationsflächenverhältnis S_c/S widerspiegeln (Tab. 4.9).

In der Abbildung 4.7 ist ersichtlich, dass bei annähernd gleichen Winterbilanzen in den vergangenen Jahre die Sommerbilanz über die Ausprägung der Jahresbilanz entscheidend war. Dabei gleicht die Bilanz sehr den für 2015/16 sowie 2016/17 ermittelten Werten.

	Jahresbilanz	Winterbilanz	Sommerbilanz	Einheit
S_c	0,471			km^2
B_c	70,8			$10^3 m^3$
b_c	150			mm
S_a	2,15			km^2
B_a	-3291,5			$10^3 m^3$
b_a	-1530			mm
S	2,623	2,623	2,623	km^2
B	-3220,5	5167	-8388,4	$10^3 m^3$
b	-1228	1970	-3198	mm
S_c/S	0,18			m
<i>ELA</i>	2798			m

Tabelle 4.8: Kennzahlen der Jahres-, Winter- und Sommerbilanz 2020/21.

	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.	<i>ELA</i> 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

Tabelle 4.9: Vergleich der 15 gemessenen Jahresbilanzen des Hallstätter Gletschers.

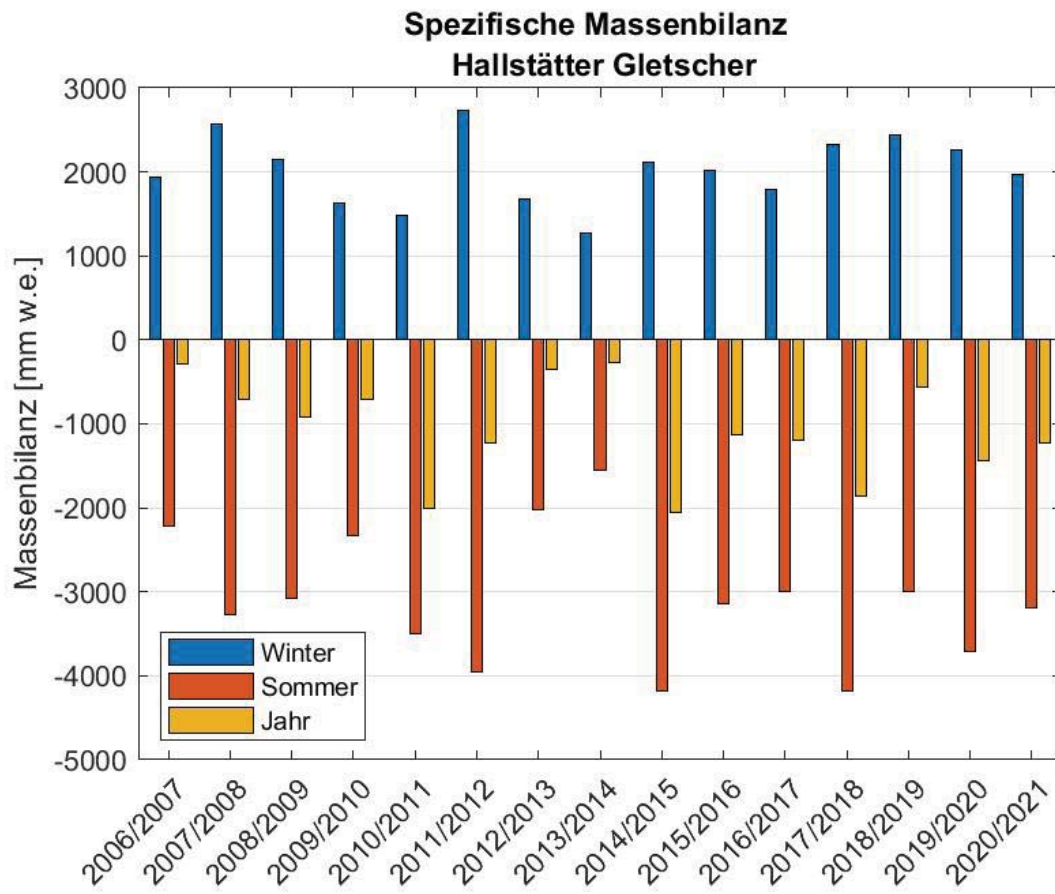


Abbildung 4.7: Die mittlere spezifische Massenbilanz (b) für den Winterzeitraum (1.10.-31.4., blau) für den Sommerzeitraum (1.5.-30.9., rot) und für das gesamte hydrologische Jahr (1.10.-30.9., orange) seit Beginn der Messungen am Hallstätter Gletscher.

A

Anhang

A.1. MitarbeiterInnen

Die Feldarbeiten wurden von K. Reingruber, K. Helfricht, E. Lemmerer, M. Stocker-Waldhuber, A. Gschwendtner, 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 01.05.2021. Foto von automatischer Kamera am Gjaidstein.



Abbildung A.2: Erste Ausaperungen am Hallstätter Gletscher am 28.06.2021. Foto von automatischer Kamera am Gjaidstein.



Abbildung A.3: Ausaperung am 30.07.2021. Foto von automatischer Kamera am Gjaidstein.



Abbildung A.4: Nahezu maximale Ausaperung am 26.08.2021 Foto von automatischer Kamera am Gjaidstein.



Abbildung A.5: Schneebedeckung nach Niederschlag am 02.09.2021. Foto von automatischer Kamera am Gjaidstein.



Abbildung A.6: Erneute Ausaperung am 19.09.2021. Foto von automatischer Kamera am Gjaidstein.



Abbildung A.7: Schneebedeckung nach Niederschlag am 21.09.2021. Foto von automatischer Kamera am Gjaidstein.



Abbildung A.8: Stand der maximalen Ausaperung am 28.09.2021. Foto von automatischer Kamera am Gjaidstein.



Abbildung A.9: Stand der maximalen Ausaperung am 28.09.2021. Foto von der Webcam an der Simonyhütte (foto-webcam.eu).



Abbildung A.10: Flugaufnahme der Gletscherzunge am 23.09.2021. Foto von Gerald Lehner.



Abbildung A.11: Arbeiten am Frühjahrsschacht FS3. Foto: Andreas Gschwendtner



Abbildung A.12: Der Frühjahrsschacht FS2. Foto: Andreas Gschwendtner



Abbildung A.13: Das Team der Frühjahrsbegehung im April 2021.



Abbildung A.14: Pegel Nr. 28 zur Ablesung am 17.08.2021. 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, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. In: *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- [6] Cuffey K.M. und W.S.B. Paterson, 2010: *The physics of glaciers*. (4rd ed.). Amsterdam, etc., Academic Press. 704pp.