

HALLSTÄTTER GLETSCHER

MASSENHAUSHALT UND KLIMA 2009/2010



Jahresbericht der Untersuchung des Instituts für Meteorologie und Geophysik
der Universität Innsbruck

MAG. M. STOCKER-WALDHUBER, MAG. K. REINGRUBER
DR. A. FISCHER, MAG. K. HELFRICHT

20.02.2011





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

Umwelt, Energie, Wasser und KonsumentInnenschutz

Promenade 37

A-4021 Linz, Austria

LR.Anschober@ooe.gv.at

Tel.: +43(0)732/7720 – 12081

Fax.: +43(0)732/7720 – 12099

Durchführung der Arbeit

Mag. Martin Stocker-Waldhuber

Dr. Andrea Fischer, Mag. Kay Helfricht

Institut für Meteorologie und Geophysik

Universität Innsbruck

Innrain 52

A-6020 Innsbruck/Austria

martin.stocker-waldhuber@uibk.ac.at

andrea.fischer@uibk.ac.at

www.imgi.uibk.ac.at

Tel.: +43(0)5125075492

Fax.: +43(0)5125072924

Mag. Klaus Reingruber

www.dachsteingletscher.info

BLUESKY Wetteranalysen

Traunmüller und Reingruber OEG

Technisches Büro für Meteorologie

Steinhüblstrasse 1

A-4800 Attnang-Puchheim

office@blueskywetter.at

www.blueskywetter.com

Tel.: +43(0)767420660

Fax.: +43(0)76742066

Kurzfassung

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 sowie die Energie AG ermöglichen die Forschungsarbeiten unter der Leitung des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck in Zusammenarbeit mit BLUE SKY Wetteranalysen.

Das hydrologische Jahr 2007 zeigte eine leicht negative Bilanz mit einem mittleren Eisdickenverlust von 42 cm. Die Messungen der Massenbilanz 2008 ergaben einen mittleren Höhenverlust des Hallstätter Gletscher von 78 cm (Helfricht, 2009). 2008/09 reduzierte sich die Eisdicke gemittelt über die Gesamtfläche um 103 cm, also rund einen Meter. Dies entspricht dem Verlust von 2787 Millionen Liter Wasser. Im hydrologischen Jahr 2009/10 ergab die Berechnung des Massenhaushalts einen mittleren Verlust von 70 cm Wasseräquivalent über die Gesamtfläche, was einem Gesamtverlust von rund 2 Millionen m^3 Wasser entspricht. Die 2010 am Hallstätter Gletscher gemessene Bilanz liegt damit im Mittelfeld der vergangenen vier Haushaltsjahre.

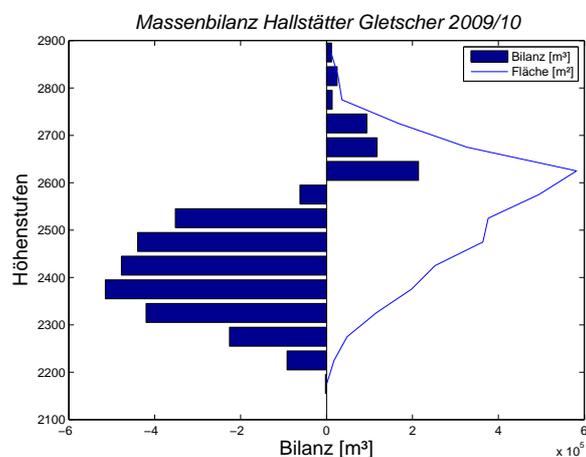


Abbildung 0.1: Arbeiten in einem Schneeschacht am 03.05.2010 (links); Massenbilanz und Verteilung der Fläche des Hallstätter Gletschers nach Höhenstufen 2009/10 (rechts).

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Inhalt	1
1. Ziel der Massenbilanzmessungen	2
2. Das Untersuchungsgebiet	3
3. Klima und Witterungsverlauf	4
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	9
4.2.4. Totalisator	9
4.3. Auswertung	10
4.3.1. Winterbilanz	10
4.3.2. Jahresbilanz	13
4.3.3. Sommerbilanz	17
4.4. Zusammenfassung der Ergebnisse	17
4.4.1. Vergleich mit anderen Gletschern	18
5. Ausblick	19
A. Anhang	20
A.1. Mitarbeiter	20
A.2. Definitionen	20

1. Ziel der Massenbilanzmessungen

Gletscher sind empfindliche Indikatoren für Klimaänderungen. Dennoch gibt es weltweit nur wenige Gletscher an denen langjähriger Reihen des Massenhaushaltes gemessen werden (IPCC, 2007). Massenbilanzmessungen dienen dabei zur Untersuchung des direkten Zusammenhanges zwischen Gletschern und dem Klima. Diese Verbindung drückt sich langfristig in Flächen- und Volumsänderungen aus. Entscheidend für die Entwicklung eines Gletschers sind Veränderungen im Bereich des Massengewinnes, der Akkumulationszone, und der Bereich des Massenverlustes, der Ablationszone. Abbildung 1.1 zeigt einen schematischen Schnitt entlang der zentralen Fließlinie eines Gletschers.

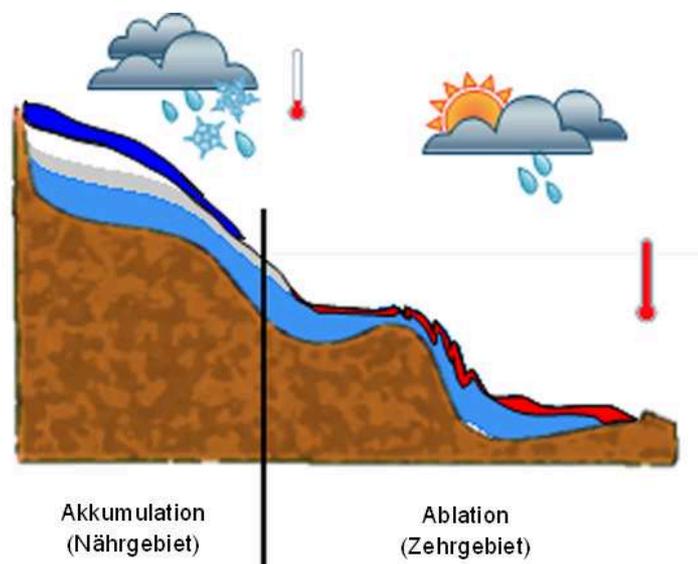


Abbildung 1.1: Schematischer Schnitt entlang der zentralen Fließlinie eines Gletschers. Farblich dargestellt sind die Eismasse des Gletschers (hellblau), im Bereich der Akkumulation Schnee (dunkelblau) und Firn (weiß/grau) sowie der Massenverlust (rot) im Ablationsgebiet. Die Thermometer geben die relativen 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 2009/10

dargelegt.

2. Das Untersuchungsgebiet

Der Hallstätter Gletscher ist mit über 3 km² der größte Gletscher der nördlichen Kalkalpen (Lambrecht und Kuhn, 2007). Im Jahre 2009 wies er die in Tabelle 2.1 angeführten topographischen Daten auf. Er besitzt eine nordostseitige Ausrichtung. Dies sowie die gebietsweise Abschattung durch umrandende Felswände verhindern einen stärkeren Einfluss der direkten Strahlung. Der Hallstätter Gletscher weist oberhalb 2550 Meter Höhe ein größeres Plateau auf, dem sich drei kurze Zungen anschließen. Wie aus Abbildung 2.1 ersichtlich, befindet sich der flächenmäßig größte Teil zwischen 2600 m und 2650 m Höhe. Mit einer Fläche von 3,014 km² (Gletschergrenze 2009) verlor der Gletscher rund 43% seiner Ausdehnung gegenüber dem Gletscherhochstand 1856 (Helfricht, 2009).

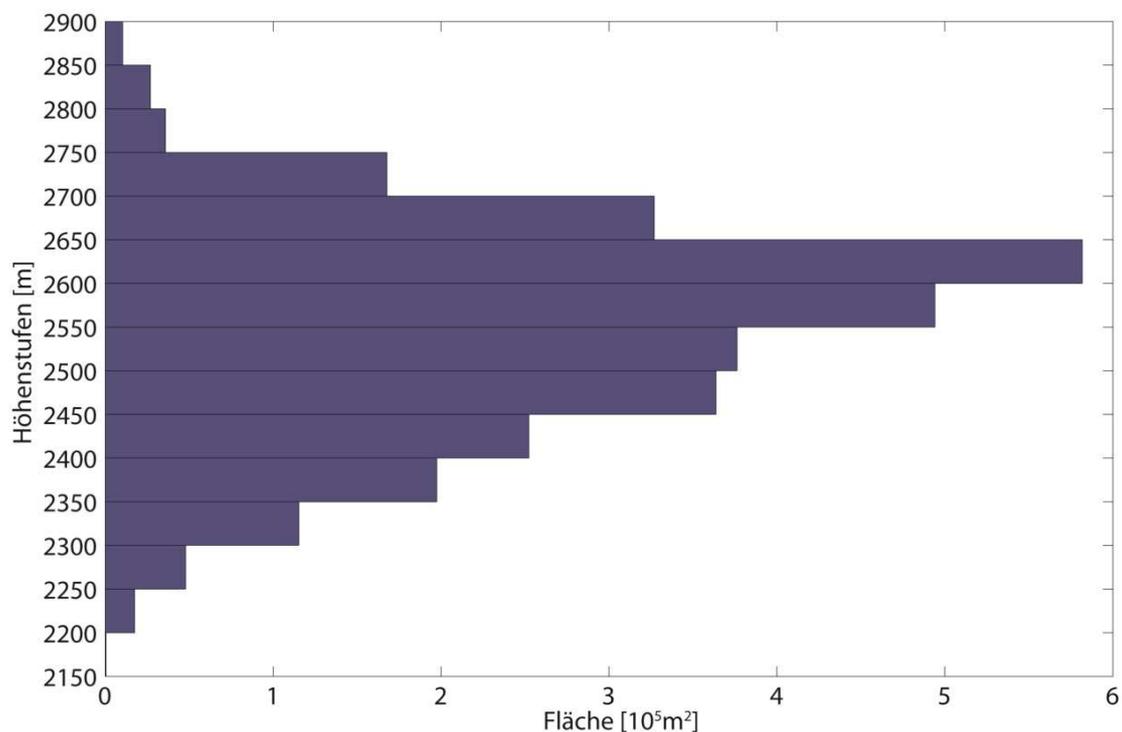


Abbildung 2.1: Flächen-Höhenverteilung des Hallstätter Gletschers 2009.

Hallstätter Gletscher 2009		
Fläche	3,016	<i>km²</i>
Höchster Punkt	2900	<i>m</i>
Tiefster Punkt	2191	<i>m</i>
Exposition	NO	

Tabelle 2.1: Topographie Hallstätter Gletscher (Stand 2009).

3. Klima und Witterungsverlauf

Die klimatischen Randbedingungen für den Hallstätter Gletscher unterscheiden sich von denen anderer österreichischer Gletscher mit Massenhaushaltsmessungen, welche am Alpenhauptkamm liegen (Fischer et al., 2009). Aufgrund seiner Exposition und Lage am Alpennordrand treten gegenüber dem österreichischen Mittel erhöhte Niederschlagsmengen auf (Abb. 3.1). Dies begründet sich durch luvseitige Staueffekte bei nordwest- bis nordöstlicher Anströmung.

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 1.10.2009 bis zum 30.09.2010 startete mit überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen im Oktober (Abb. 3.2). Die Monate November bis April waren deutlich zu trocken, während mit einziger Ausnahme im Februar durchschnittliche Niederschlagswerte erreicht wurden. Januar folgten positive Abweichungen des Niederschlages im Februar und März. Der April fiel zu trocken und deutlich zu warm aus. Aufgrund der überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen bei leicht unterdurchschnittlichen Temperaturen im Mai, gewann die Schneedecke an Mächtigkeit wodurch der relativ trockene Winter 2009/10 etwas ausgeglichen wurde.

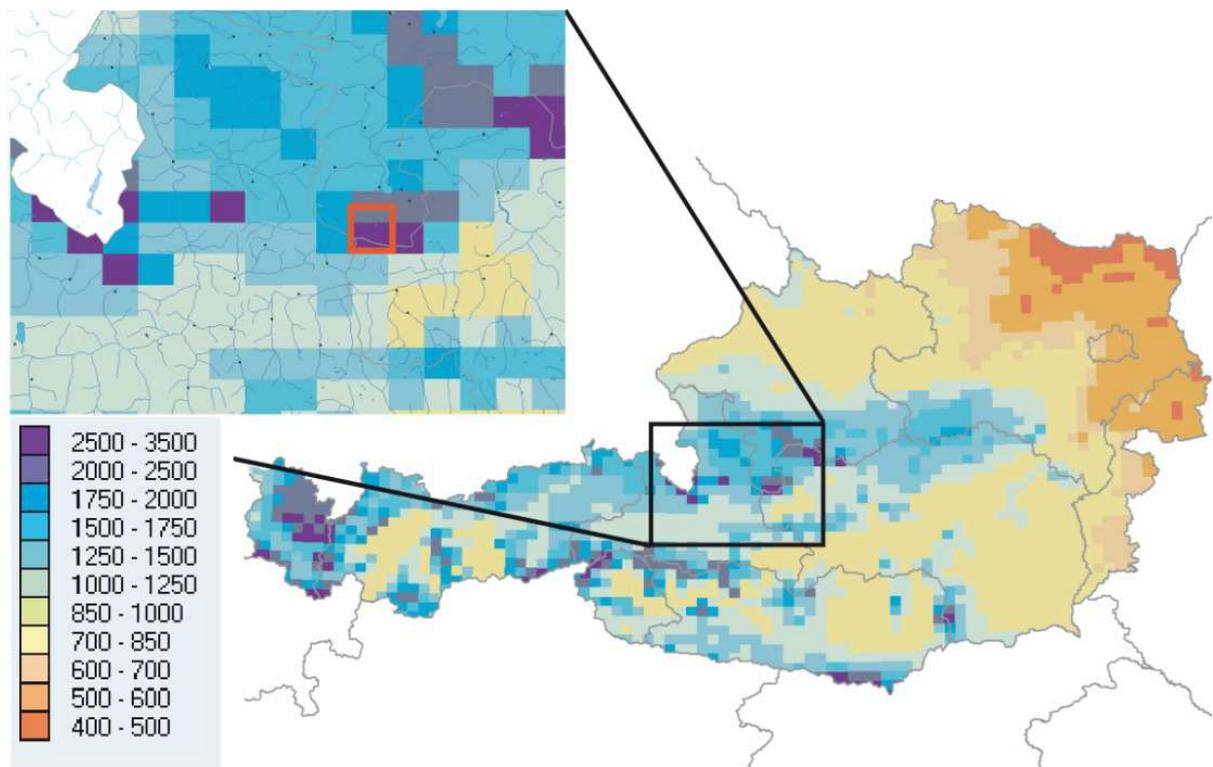


Abbildung 3.1: Mittlere Jahresniederschlagsmenge in mm (Hydrologischer Atlas 2003). Im Ausschnitt rot markiert die Lage des Hallstätter Gletschers.

Die Ablationssaison 2010 startete mit erhöhten Temperaturen im Juni und deutlich zu hohen Temperaturen im Juli. Im August lagen die Temperaturen im Durchschnitt während der September deutlich zu kalt war. Kleinere Neuschneefälle im August und September verringerten die Ablation etwas.

Das hydrologische Jahr 1.10.2009 bis 30.09.2010 zeichnete sich am Hallstätter Gletscher durch einen zu trockenen Winter gefolgt von zu warmen Sommermonaten und dem relativ frühen Ende der Ablationsperiode im September aus.

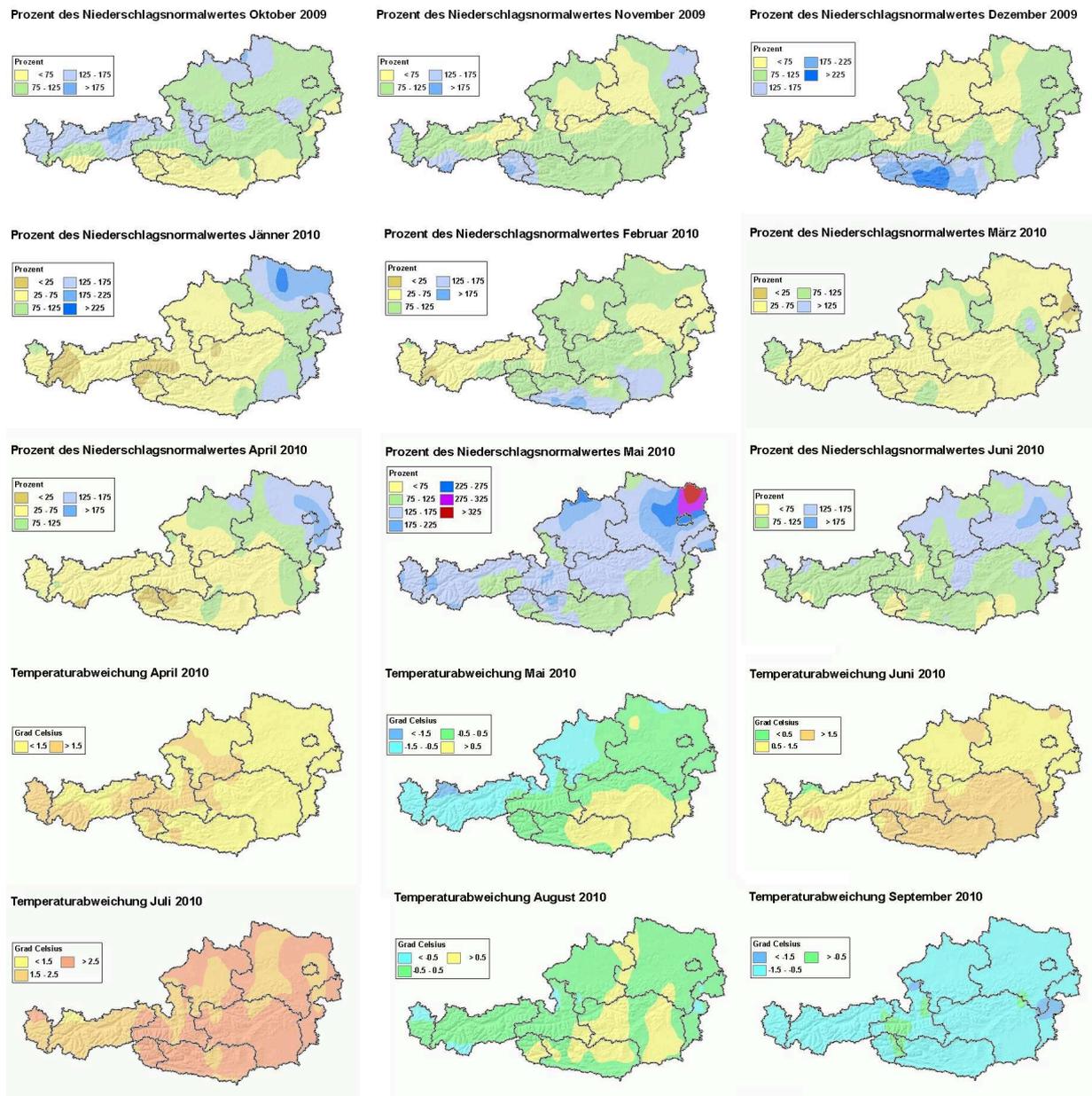


Abbildung 3.2: Übersicht der Abweichungen vom langjährigen Mittel des Niederschlags und der Temperatur (Mittel bezogen auf die Periode 1971 bis 2000). Die Abbildungen werden von der ZAMG unter www.zamg.ac.at zur Verfügung gestellt.

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 (Hoinkes, 1970). 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 Schmelzaison erhält man die Massenbilanz eines Jahres (Paterson, 1994).

4.2. Durchgeführte Arbeiten

4.2.1. Pegelablesungen

Das Pegelnetz am Hallstätter Gletscher wurde am 07.09.2006 installiert. 2007 folgte eine Erweiterung des Pegelnetzes. Auch 2008 wurden neben dem Erneuern der alten Pegel weitere hinzugefügt. 2009 wurden die bislang im Firn verbliebenen Pegel DP23, DP28 sowie der alte Pegel 32 (DP32A) wiedergefunden. Der Pegel DP21 auf der mittleren Zunge wurde aufgrund seiner Nähe zur Gletscherzunge nach oben versetzt. 2010 wurden erneut mehrere Pegel neu gebohrt und regelmäßig abgelesen. Die Ablesungen der Pegel fanden am 12/13.07.2010, 08.08.2010, 02/03. und 16.09.2010 sowie zur Herbstbegehung am 02/03.10.2010 statt. Die Positionen der Pegel sind der Abbildung 4.1 zu entnehmen.

4.2.2. Frühjahrsbegehung

Zur Erstellung der Winterbilanz eines Gletschers wird um den 01. 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 2010 fand am 03. und 04. Mai statt. Als Ausgangspunkt diente die Dachsteinbahn am Hunerkogel. Übernachtet wurde auf der Seethaler Hütte (Dachsteinwarte). Im Rahmen der Begehung wurden 4 Schächte gegraben (Abb. 4.1) sowie über die Gletscherzungen sondiert.

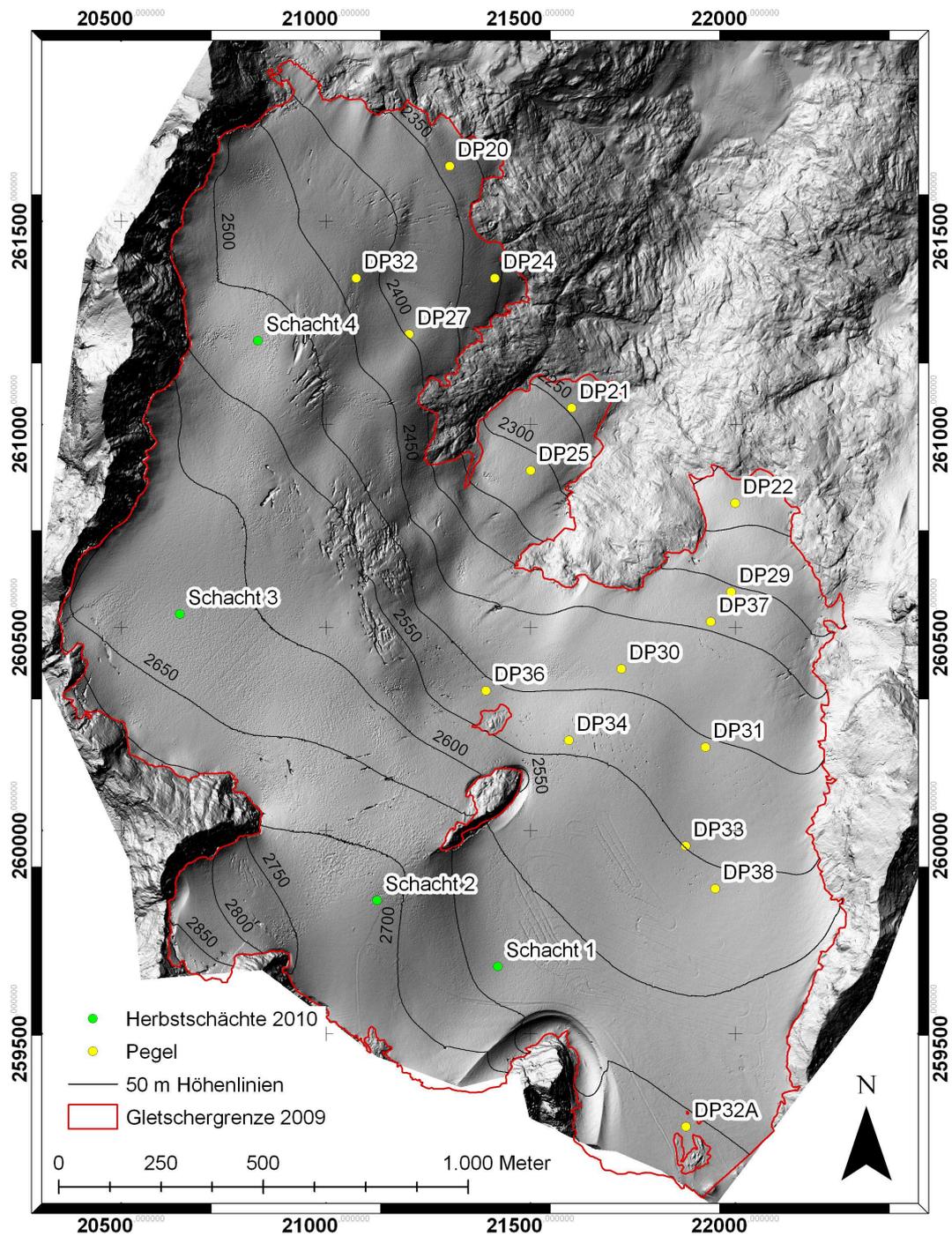


Abbildung 4.1: Positionen der Pegel und Schächte 2009/10 mit 50 m Höhenschichtlinien und Gletschergrenze 2009 (rot). Kartengrundlage beleuchtetes Höhenmodell aus Laserscandaten (2007) in Gauß Krüger Koordinaten A31.

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. 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 02. und 03. Oktober 2010 statt. Ausgangspunkt war die Dachsteinbahn am Hunerkogel. Übernachtet wurde auf der Seethaler Hütte (Dachsteinwarte). Es wurden 4 Herbstschächte gegraben (Abb. 4.1) und Sondierungen der Altschneedecke durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Herbstbegehung war der Gletscher bereits schneebedeckt.

4.2.4. Totalisator

Ein weiteres wichtiges Instrument zur Erstellung von Massenbilanzen ist der Totalisator. Er dient zur Erfassung des Gebietsniederschlags. Der Totalisator befindet sich im Bereich der tiefsten Zunge des Hallstätter Gletschers auf einem sandigen Schutthügel. Im Verlauf des Jahres wird er regelmäßig abgelesen. Die Ablesung wird anschließend mit Korrekturen auf den Ersten des Monats gerechnet (Tab. in Abb. 4.2), um so die Werte mit anderen Niederschlagsmessungen in den Alpen zu vergleichen.

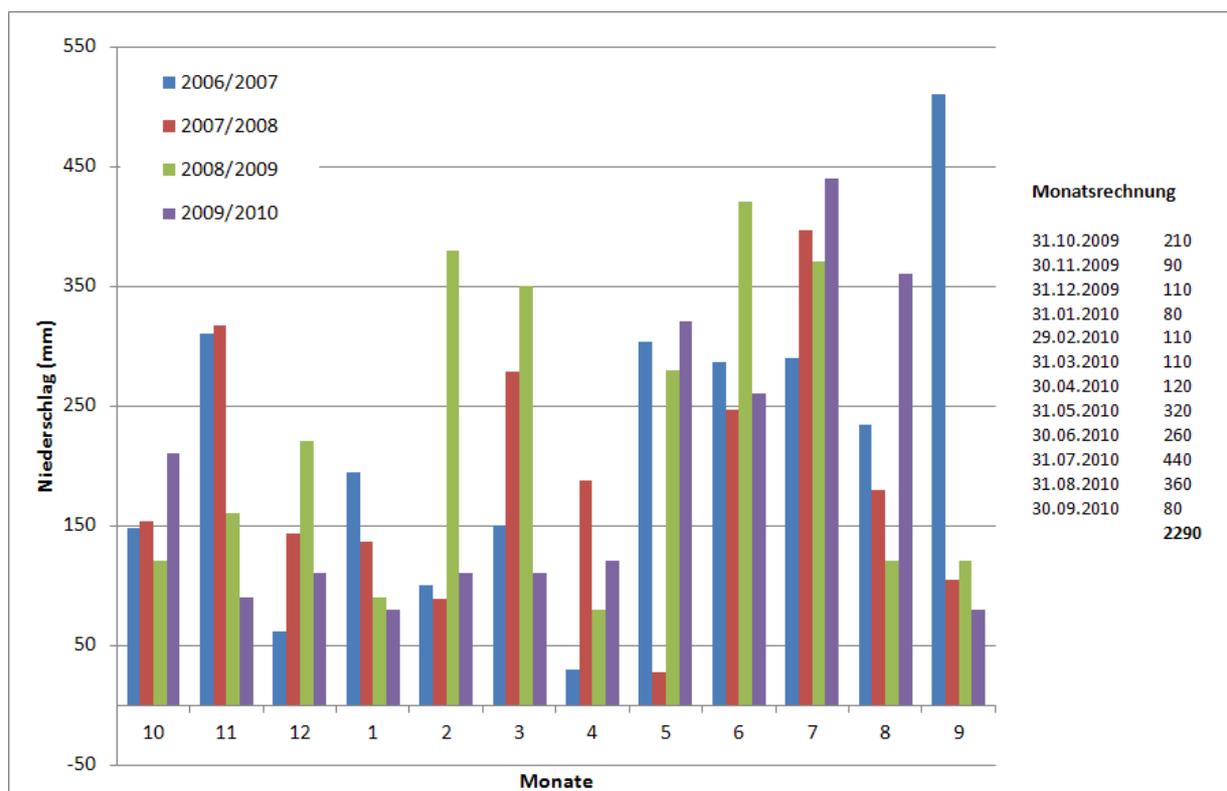


Abbildung 4.2: Vergleich der monatlichen Niederschlagssummen der Haushaltsjahre 2006/07, 2007/08 und 2008/09, sowie die Messwerte des Totalisators 2009/10 in mm.

Mit einem Jahresniederschlag von 2290 mm zeigte sich das Haushaltsjahr 2009/10 gegenüber 2006/07 (2615 mm), 2007/08 (2259 mm) und 2008/09 (2710 mm) niederschlagsärmer (Abb. 4.2). Hohe Niederschlagssummen gab es im Oktober. Die starken Niederschläge im Juli und August fielen fast ausschließlich flüssig und brachten kaum eine zusätzliche Akkumulation. Für den Zeitraum der Winterbilanz summierten sich 830 mm Niederschlag.

4.3. Auswertung

4.3.1. Winterbilanz

Die Winterbilanz bezieht sich auf den Zeitraum vom 1.10. eines bis zum 30.4. 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 1.10. 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 4.1 gehen Dichte und Wasserwert der Schächte hervor. Tabelle 4.2 zeigt die Werte der Winterbilanz nach Höhenstufen, gültig von 01.10.2009 bis 30.04.2010. 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.

$$B_{wi} = 4927 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b_{wi} = 1634 \text{ mm}$$

Schachtnummer	Tiefe [m]	Dichte [kg/m ³]	Wasserwert [mm]
1	3,80	498	1894
2	2,92	473	1382
3	4,26	510	2171
4	4,12	460	2897

Tabelle 4.1: Frühjahrsschächte.

Höhenstufe [m]	Fläche [km ²]	Bilanz [10 ³ m ³]	Wasserwert [mm]
2150 – 2200	0,000	0,7	1500
2200 – 2250	0,018	25,8	1468
2250 – 2300	0,048	59,6	1244
2300 – 2350	0,115	131,5	1140
2350 – 2400	0,198	247	1251
2400 – 2450	0,252	354,7	1405
2450 – 2500	0,364	548	1506
2500 – 2550	0,376	631,4	1677
2550 – 2600	0,494	829,2	1677
2600 – 2650	0,582	1072,4	1843
2650 – 2700	0,327	585,2	1789
2700 – 2750	0,168	288,8	1721
2750 – 2800	0,036	68,7	1912
2800 – 2850	0,027	59,5	2207
2850 – 2900	0,010	24,7	2373
Gesamt	3,016	4927,3	1634

Tabelle 4.2: Flächen- und Höhenverteilung der Winterbilanz.

Winterbilanz Hallstätter Gletscher

01.10.2009 - 30.04.2010

erstellt von
Martin Stocker-Waldhuber
Institut für Meteorologie und Geophysik
Universität Innsbruck
25.01.2011

Legende

- 50 m Höhenlinien
- Gletschergrenze 2009

Wasserwert Isoflächen

Wasserwert (cm)

- 90
- 110
- 130
- 150
- 170
- 190
- 210
- 230
- 250

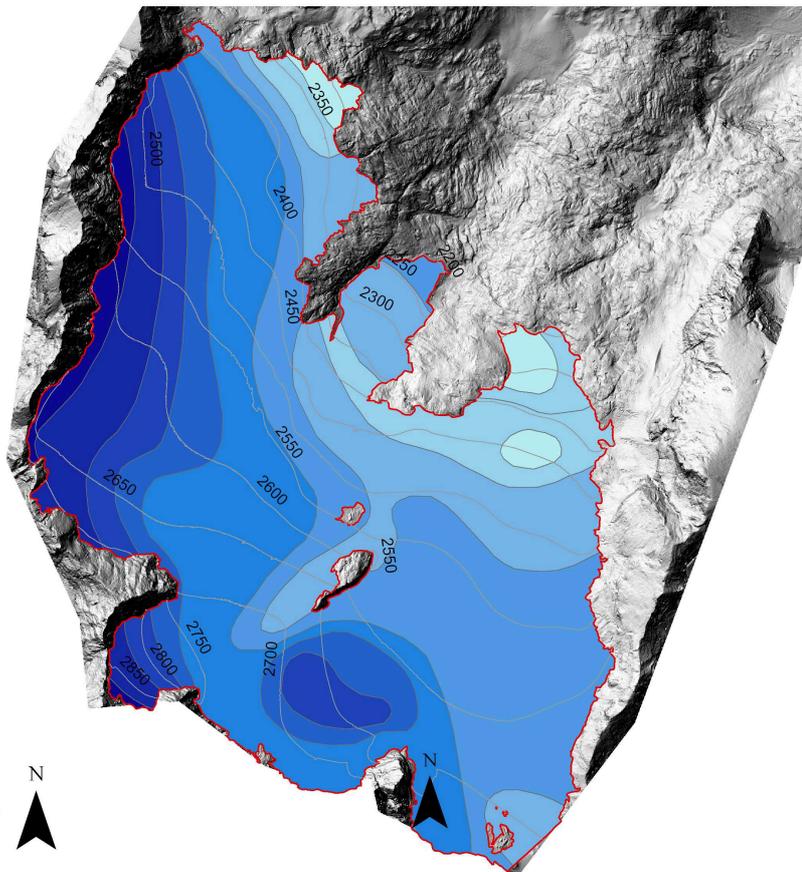
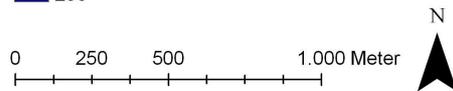


Abbildung 4.3: Flächen gleichen Wasserwertes der Winterbilanz 2009/10.

4.3.2. Jahresbilanz

Für die Massenbilanz des hydrologischen Jahres vom 1.10. bis 30.9. werden zusätzlich zu den ermittelten Rücklagen an den Schneeschächten die Messwerte der Ablation an den Pegeln hinzugezogen (Tab. 4.3). 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. 4.4). 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. 4.4). Über die Flächen- Höhenverteilung der spezifischen Bilanz wird die mittlere spezifische Bilanz der einzelnen Höhenstufen berechnet (Tab. 4.5, Abb. 4.5). 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 .

$$B = -2111 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b = -700 \text{ mm}$$

Pegelnummer	Wasserwert [mm]	Pegelnummer	Wasserwert[mm]
DP 20	-3280	DP 31	-1770
DP 21	-5340	DP 32	-2130
DP 22	-2920	DP 32A	-1010
DP 23	-1270	DP 33	-1340
DP 24	-4250	DP 34	-2190
DP 25	-5340	DP 36	-900
DP 27	-2110	DP 37	-2880
DP 29	-1880	DP 38	-1350
DP 30	-1940		

Tabelle 4.3: Wasserwerte der Pegel.

Schachtnummer	Tiefe [m]	Dichte [kg/m^3]	Wasserwert [mm]
1	1,68	530	890
2	1,31	477	625
3	1,57	462	726
4	1,65	483	797

Tabelle 4.4: Herbstschächte.

Höhenstufe [m]	Fläche [km ²]	Bilanz [10 ³ m ³]	Wasserwert [mm]
2150 – 2200	0,000	-2,5	-5250
2200 – 2250	0,018	-91,8	-5223
2250 – 2300	0,048	-226	-4716
2300 – 2350	0,115	-420,1	-3642
2350 – 2400	0,198	-515	-2607
2400 – 2450	0,252	-477,4	-1891
2450 – 2500	0,364	-439,6	-1208
2500 – 2550	0,376	-351,9	-935
2550 – 2600	0,494	-62,1	-126
2600 – 2650	0,582	214,1	368
2650 – 2700	0,327	117,6	360
2700 – 2750	0,168	93,8	559
2750 – 2800	0,036	13,1	366
2800 – 2850	0,027	24,8	921
2850 – 2900	0,010	11,7	1125
Gesamt	3,016	-2111,0	-700

Tabelle 4.5: Flächen- und Höhenverteilung der Jahresbilanz 2009/10.

Das Akkumulationsgebiet des Hallstätter Gletschers zeigt sich im Massenhaushaltsjahr 2010 wie im Vorjahr zerrissener als in den Jahren zuvor. Besonders der südöstliche Teil am Übergang zum Schladminger Gletscher war neuerlich großflächig schneefrei. Im Bereich der Felsen ging etwa ein Meter Eis verloren. Ablationsbeträge von über 5 m Wasseräquivalent wurden nur an den untersten Ausläufern der mittleren Zunge erreicht. Die Gleichgewichtslinie hatte einen ähnlichen Verlauf wie in den Jahren zuvor mit einer mittleren Höhe (equilibrium line altitude - ELA) von 2588 m (Abb. 4.5).

Massenbilanz Hallstätter Gletscher

01.10.2009 - 30.09.2010

erstellt von
Martin Stocker-Waldhuber
Institut für Meteorologie und Geophysik
Universität Innsbruck
25.01.2011

Legende

- Gleichgewichtslinie
 - 50 m Höhenlinien
 - Gletschergrenze 2009
- Massenbilanz Isoflächen**
- | | | |
|-----------------|--------|---------|
| Wasserwert (cm) | — | — |
| ■ -525 | ■ -225 | ■ -175 |
| ■ -475 | ■ -125 | ■ -75 |
| ■ -425 | ■ -25 | ■ 12,5 |
| ■ -375 | ■ 37,5 | ■ 62,5 |
| ■ -325 | ■ 87,5 | ■ 112,5 |
| ■ -275 | | |

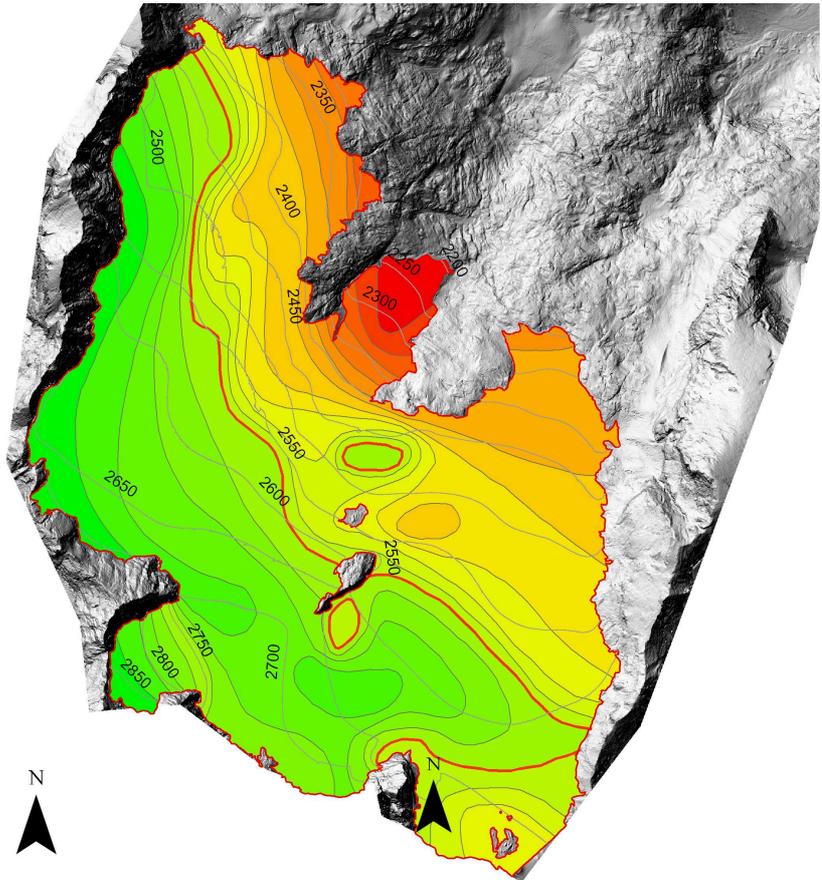
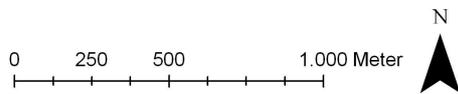


Abbildung 4.4: Flächen gleichen Wasserwertes der Jahresbilanz 2009/10.

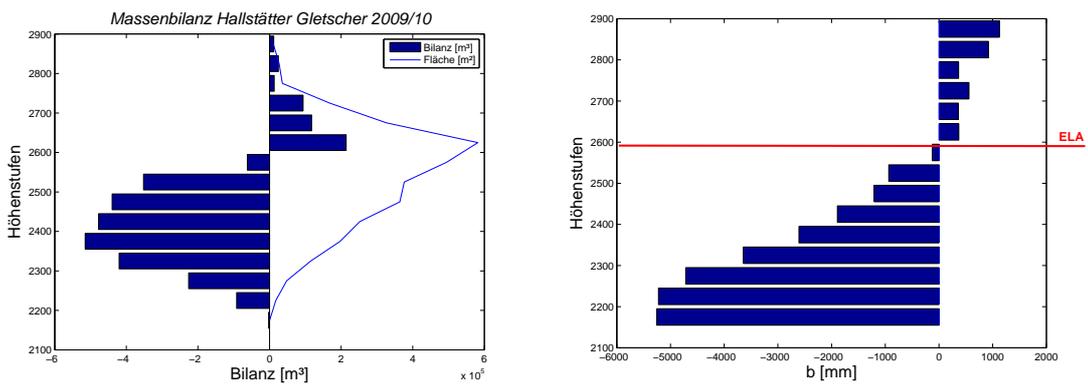


Abbildung 4.5: Nettobilanz (B) und Flächenverteilung nach Digitalem Geländemodell 2007 mit Gletschergrenze 2009 sowie die mittlere spezifische Bilanz (b) der Höhenstufen und die mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie (ELA).

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:

$$B_{so} = -7038,3 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b_{so} = -2334 \text{ mm}$$

4.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle 4.6 zeigt die Beziehung zwischen Jahres-, Winter- und Sommerbilanz auf. Im Massenhaushaltsjahr 2009/10 folgte der seit Beginn der Messungen 2006 geringsten positiven Winterbilanz die am geringsten negative Sommerbilanz wodurch für die Jahresbilanz ein ähnliches Ergebnis erzielt wurde wie 2007/08. 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. 4.7 vergl. 2007/08 und 2009/10).

	Jahresbilanz	Winterbilanz	Sommerbilanz	Einheit
S_c	1,456			km^2
B_c	802,1			10^3 m^3
b_c	551			mm
S_a	1,56			km^2
B_a	-2913,1			10^3 m^3
b_a	-1867			mm
S	3,016	3,016	3,016	km^2
B	-2111	4927,3	-7038,3	10^3 m^3
b	-700	1634	-2334	mm
S_c/S	0,483			
ELA	2588			m

Tabelle 4.6: Kennzahlen der Jahres-, Winter- und Sommerbilanz 2009/10.

	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	Einheit
S_c	1,496	1,490	1,029	1,456	km^2
B_c	1682,9	595,7	586,7	802,1	$10^3 m^3$
b_c	1125	400	570	551	mm
S_a	1,645	1,551	1,986	1,56	km^2
B_a	-2864,6	-2723,7	-3373,5	-2913,1	$10^3 m^3$
b_a	-1741	-1756	-1699	-1867	mm
S	3,141	3,041	3,014	3,016	km^2
B	-1181,7	-2128,1	-2786,8	-2111	$10^3 m^3$
b	-376	-700	-924	-700	mm
S_c/S	0,476	0,49	0,341	0,483	
ELA	2583	2592	2616	2588	m

Tabelle 4.7: Vergleich der vier gemessenen Jahresbilanzen des Hallstätter Gletschers.

4.4.1. Vergleich mit anderen Gletschern

Der Vergleich der Massenbilanzdaten vom Hallstätter Gletscher mit den vom Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck gemessenen Massenhaushalten der am Alpenhauptkamm gelegenen Gletschern Mullwitzkees (Venedigergruppe), Hintereis- und Kesselwandferner (Ötztal) sowie des in der Silvretta gelegenen Jamtalfernens zeigt, dass sich die mittlere spezifische Bilanz b des Hallstätter Gletschers des Haushaltsjahres 2009/10 in etwa im Mittelfeld liegt (Tab. 4.8) Am Hallstätter Gletscher wird die vergleichsweise hohe Ablation (b_a) durch besseres Verhältnis von Akkumulationsgebiet zu Gesamtfläche (S_c/S) und der damit verbundenen größeren Akkumulation (B_c, b_c) ausgeglichen. Deutlich zu sehen ist die für den Hallstätter Gletscher typisch niedrigere mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie ELA gegenüber den am Alpenhauptkamm gelegenen Gletschern. Die ELA befindet sich gegenüber dem Durchschnitt der anderen Gletscher um ca. 550 m tiefer.

	HG	HEF	KWF	JF	MW	Einheit
S_c	1,456	2,535	2,366	0,051	1,003	km^2
B_c	802,1	1013,5	794,8	6,4	424,2	$10^3 m^3$
b_c	551	400	336	125	423	mm
S_a	1,560	4,429	1,293	3,120	2,023	km^2
B_a	-2913,1	-6720,8	-1157,4	-3222,1	-1905,7	$10^3 m^3$
b_a	-1867	-1517	-895	-1033	-942	mm
S	3,016	6,964	3,660	3,171	3,026	km^2
B	-2111,0	-5707,2	-362,6	-3215,7	-1481,4	$10^3 m^3$
b	-700	-820	-99	-1014	-490	mm
S_c/S	0,483	0,364	0,647	0,016	0,332	
ELA	2588	3116	3158	>3200	3105	m

Tabelle 4.8: Vergleich der Massenbilanzgrößen des Hallstätter Gletschers (HG) mit Werten von Hintereis-, Kesselwand- und Jamtalferner (HEF, KWF, JF) und Mullwitzkees (MW) für das Haushaltsjahr 2009/10.

5. Ausblick

Das Projekt zur Untersuchung des Massenhaushaltes am Hallstätter Gletscher ist auf 5 Jahre ausgelegt. Im vierten Jahr der Messungen zeigt sich eine ähnlich negative Massenbilanz wie im Jahr 2007/08. Damit sind aufgrund unterschiedlicher Witterung drei verschiedene Massenbilanzgrößen und zwei ähnliche Ergebnisse am Hallstätter Gletscher ermittelt worden. Mit der Fortführung der gleichzeitigen Messungen von Massenhaushalt und Klima sind noch weitere interessante Erkenntnisse zur Sonderstellung der Gletscher am Alpennordrand im Gegensatz zu denen der Zentralalpen zu erwarten.

A. Anhang

A.1. Mitarbeiter

Die Feldarbeiten bzw. Totalisatorablesungen wurden von Dr. Mag. A. Fischer, Mag. K. Reingruber, Mag. W. Traunmüller, Mag. K. Helfricht, Mag. M. Stocker-Waldhuber, A. Haberkorn, F. Hofmann, S. Hölzl, und E. Lemmerer durchgeführt. Die Auswertung und der Bericht stammen von Mag. M. Stocker-Waldhuber und Mag. 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	w_i	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.

Literatur

- 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.
- Helfricht, K., 2009: Veränderungen des Massenhaushaltes am Hallstätter Gletscher seit 1856. Master's thesis, Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck.
- Hoinkes, H., 1970: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **6**, 37–90.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In: *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, und H. Miller (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Lambrecht, A., und M. Kuhn, 2007: Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory. *Annals of Glaciology*, **46**, 177–184.
- Paterson, W., 1994: *The physics of Glaciers*. (3rd ed.). Pergamon Press.