



Hallstätter Gletscher

Massenhaushalt und Klima 2008/2009



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

Mag. Kay Helfricht¹, Mag. Klaus Reingruber², Dr. Mag. Andrea Fischer¹

¹Institut für Meteorologie and Geophysik
Universität Innsbruck
Innrain 52
A-6020 Innsbruck/Austria
Mail: andrea.fischer@uibk.ac.at
kay.helfricht@student.uibk.ac.at
Internet: www.imgi.uibk.ac.at
Phone: 0043-512-507-5467
Fax: 0043-512-507-2924

²BLUESKY Wetteranalysen
Traunmüller u. Reingruber OEG
Technisches Büro für Meteorologie
Steinhüblstrasse 1
4800 Attnang- Puchheim
Mail: office@blueskywetter.at
Internet: www.blueskywetter.com
Phone: 0043-7674-20660
Fax: 0043-7674-2066

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). Im dritten Jahr der Messung der Massenbilanz vom 1.10.2008 bis 30.09.2009 wurde die Eisdicke gemittelt über die Gesamtfläche 103 cm, also rund einen Meter, reduziert. Dies entspricht dem Verlust von 2787 Millionen Liter Wasser.

Die 2009 am Hallstätter Gletscher gemessene Bilanz ist damit die negativste der vergangenen drei Haushaltsjahre. Dies ist auf die lange Ablationsperiode, welche bis Mitte Oktober 2009 andauerte, und fehlenden Neuschneefällen in den Sommermonaten zurückzuführen.

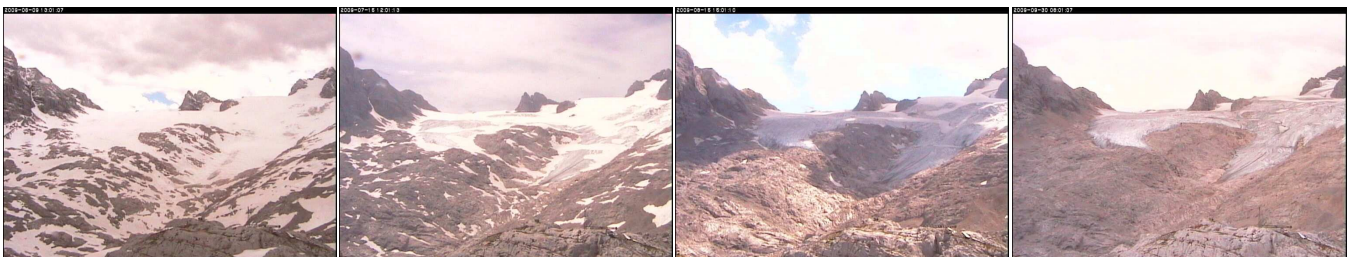


Abbildung 1.1. Webcamaufnahmen des Hallstätter Gletschers von der ersten Ausaperung bis zum Ende des hydrologischen Jahres. v.l.n.r. am 09.06., 15.07., 15.08. und 30.09.2009.



Abbildung 1.2. Messarbeiten in einem Schneeschacht am 07.05.2009

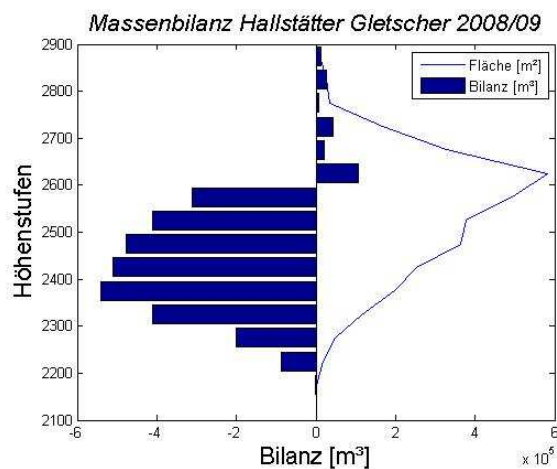


Abbildung 1.3. Massenbilanz und Verteilung der Fläche des Hallstätter Gletschers nach Höhenstufen 2008/2009

Inhaltsverzeichnis



1. *Ziel der Massenbilanzmessungen*
2. *Das Untersuchungsgebiet*
3. *Klima und Witterungsverlauf*
4. *Massenbilanz*
 - 4.1. *Methode*
 - 4.2. *Durchgeführte Feldarbeiten 2008/2009*
 - 4.3. *Auswertung*
 - 4.4. *Zusammenfassung der Ergebnisse*
5. *Ausblick*
6. *Literatur*
7. *Anhang*
 - 7.1. *Definitionen*
 - 7.2. *Mitarbeiter*

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 1.4 zeigt einen schematischen Schnitt entlang der zentralen Fliesslinie eines Gletschers.

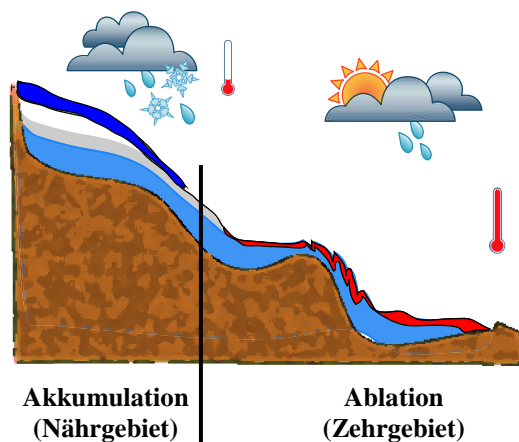


Abbildung 1.4. Schematischer Schnitt entlang der zentralen Fliesslinie eines Gletschers. Farblich dargestellt sind die Eismasse des Gletschers (hellblau), im Bereich der Akkumulation Schnee (dunkelblau) und Firn (weiß/grau) sowie der Massenverlust (rot) im Ablationsgebiet. Die Thermometer geben die relativen 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 2008/2009 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 2.2 ersichtlich, befindet sich der flächenmäßig größte Teil zwischen 2600 m und 2650 m Höhe.

Mit einer Fläche von 3,014 km² (Gletschergrenze 2009, Kap. 4.2) verlor der Gletscher rund 43% seiner Ausdehnung gegenüber dem Gletscherhochstand 1856 (Helfricht, 2009).

Hallstätter Gletscher 2009	
Fläche	3,014 km ²
Höchster Punkt	2900 m
Tiefster Punkt	2191 m
Exposition:	Nordost

Tabelle 2.1. Topographie Hallstätter Gletscher (Stand 2009).

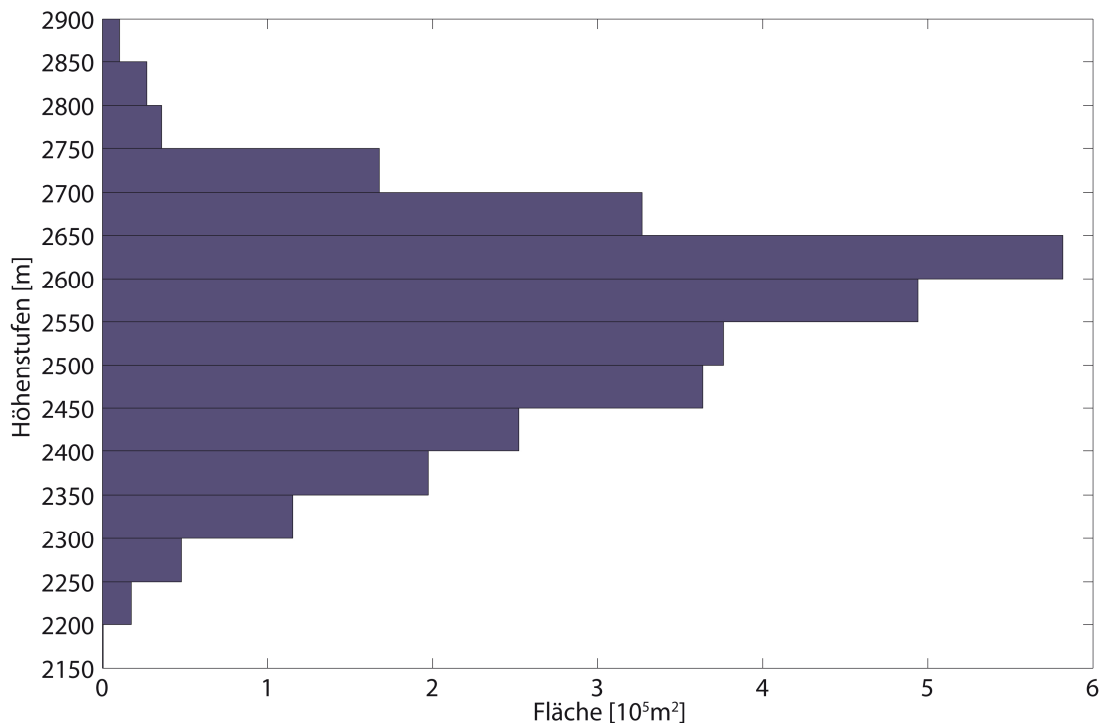


Abbildung 2.1. Flächen-Höhenverteilung des Hallstätter Gletschers 2009.

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, 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

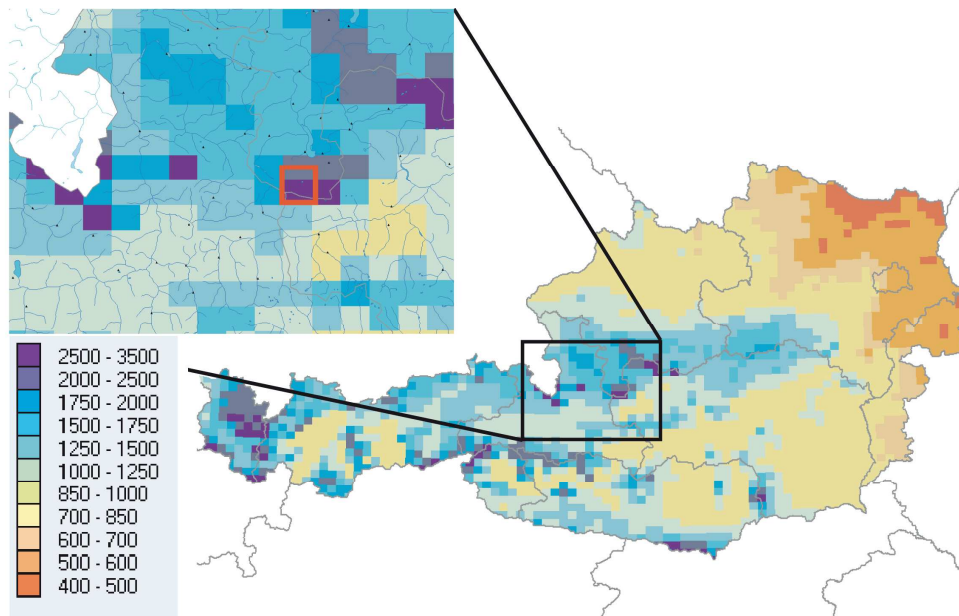


Abbildung 3.1. Mittlere Jahresniederschlagsmenge in mm (Hydrologischer Atlas 2003). Im Ausschnitt rot markiert die Lage des Hallstätter Gletschers.

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 1.10.2008 bis zum 30.09.2009 startete in den Monaten Oktober bis November mit durchschnittlichen Niederschlagsmengen (Abb. 3.2). Nach einem deutlich zu trockenem Januar folgten positive Abweichungen des Niederschlages im Februar und März. Der April fiel zu trocken und deutlich zu warm aus.

Die Ablationssaison 2009 startete mit erhöhten Niederschlagsmengen. Dabei zeigte sich der Mai zu warm. Die erhöhten Niederschlagsmengen des Monats Juni fielen aufgrund der fortgeschrittenen Erwärmung nur mehr zum Teil als Schnee. Im weiteren Verlauf des Sommers dauerte die Ablation bei gegenüber dem Mittel leicht erhöhten Temperaturen ohne Nennenswerte Neuschneefälle an. Die Ablationssaison setzte sich über den September, welcher ebenfalls zu warm war, fort.

Das hydrologische Jahr 1.10.2008 bis 30.09.2009 wurde am Hallstätter Gletscher nach einem durchschnittlichen Winter durch die lang andauernde Ablationsperiode geprägt.

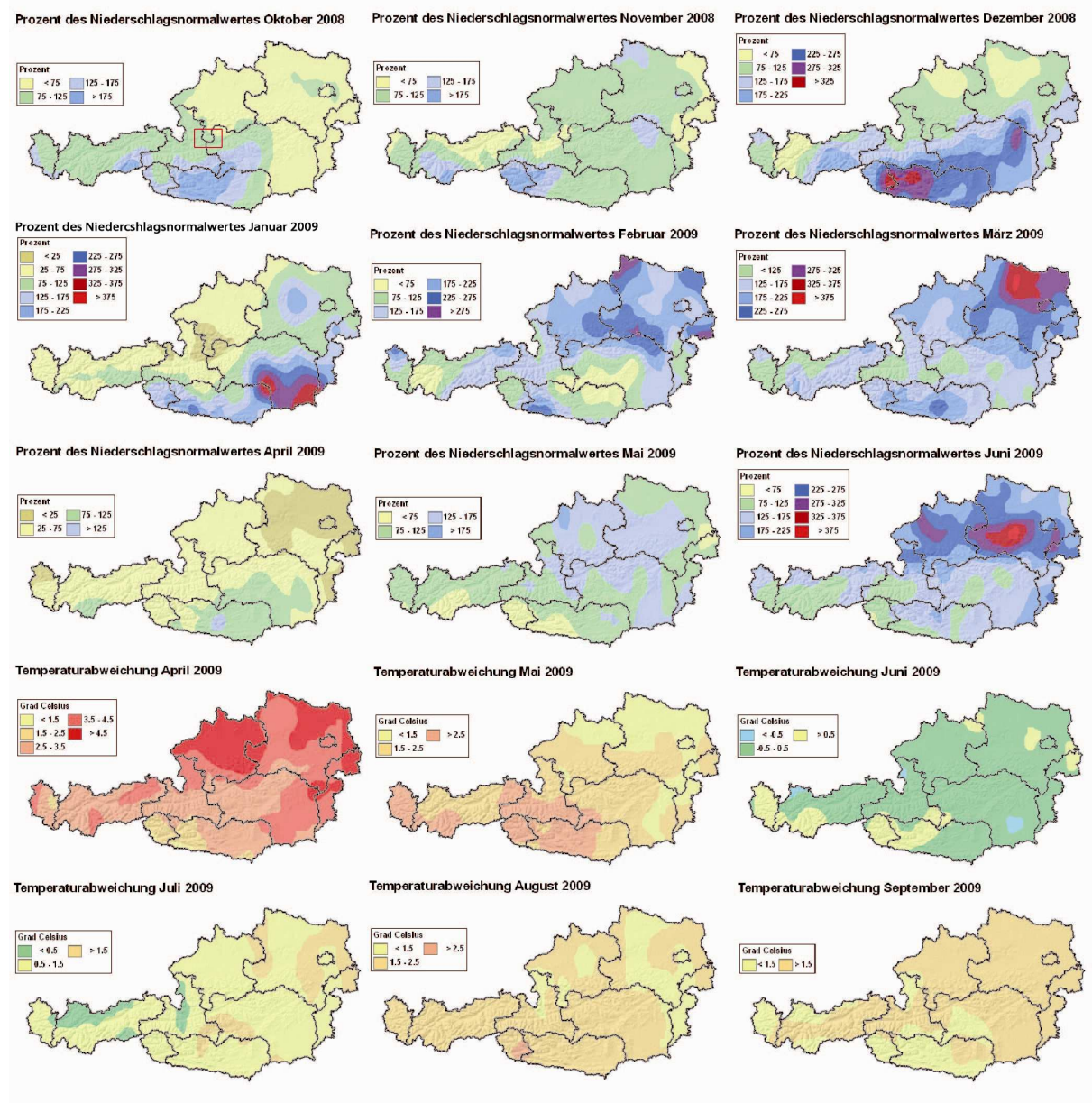


Abbildung 3.2. Übersicht der Abweichungen vom langjährigen Mittel des Niederschlags und der Temperatur (Mittel bezogen auf die Periode 1971 bis 2000). Die Abbildungen werden von der ZAMG unter www.zamg.ac.at zur Verfügung gestellt. Oben links rot markiert die Dachsteinregion.

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 Schmelzperiode erhält man die Massenbilanz eines Jahres (Paterson, 1994).

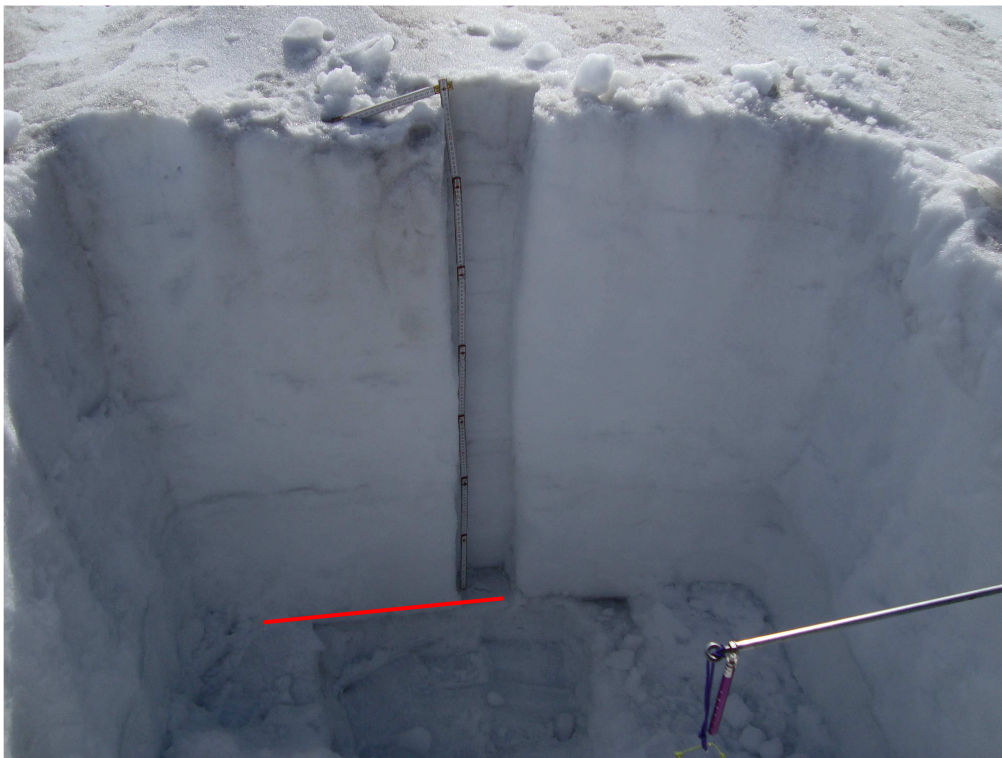


Abbildung 4.1. Herbstschacht am 06.10.2009. Zu erkennen ist der Schmutzhorizont an der Oberfläche des Firns der vorjährigen Ablationsperiode (rote Linie).

4.2. Durchgeführte Feldarbeiten

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. Ablesungen der Pegel fanden am 13.07.2009, 05.08.2009, 02.09.2009 sowie zur Herbstbegehung am 06.10.2009 statt. Die Positionen der Pegel sind der Abbildung 4.3 zu entnehmen.

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 Dichteprofils sowie die Sondierungen der Schneedecke dienen hierbei zur Ermittlung der Verteilung der Schneeakkumulation und der Berechnung des entsprechenden Wasseräquivalents.

Die Frühjahrsbegehung des Hallstätter Gletschers 2009 fand am 07. und 08. Mai statt. Als Ausgangspunkt diente die Dachsteinbahn am Hunerkogel. Übernachtet wurde auf der Seethaler Hütte (Dachsteinwarte). Im Rahmen der Begehung wurden die Schächte 1, 3 und 4 gegraben (Abb. 4.3) sowie über die Gletscherzungen sondiert.

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 06. und 07. Oktober 2009 statt. Ausgangspunkt war die Dachsteinbahn am Hunerkogel. Übernachtet wurde auf der Seethaler Hütte (Dachsteinwarte). Es wurden 4 Herbstschächte gegraben (Abb. 4.3) und Sondierungen der Altschneedecke durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Herbstbegehung waren große Eisflächen noch schneefrei, so dass die Schneegrenze der Rücklage genau mit GPS aufgenommen werden konnte (Abb. 4.2).

Einmessung der Gletschergrenze

Am 02. und 03.09.2009 wurde mittels differentiellen GPS die Gletschergrenze neu eingemessen. Es erfolgte eine genaue Kartierung der Felsinseln am Übergang zum Schladminger Gletscher sowie der sich vergrößernden Felsinsel unterhalb des Eissteins. An der mittleren Zunge konnten so weitere Flächenverluste festgehalten werden.



Abbildung 4.2. Ausaperungsmuster des Hallstätter Gletschers am 03.09.2009. Am Übergang zwischen Rücklage und Gletschereis sind als graue Schichten die Firnlagen der vergangenen Jahre zu erkennen. Bis zum Ende des hydrologischen Jahres am 30.09.2009 schritt die Ablation fort und weitere Flächen wurden schneefrei.

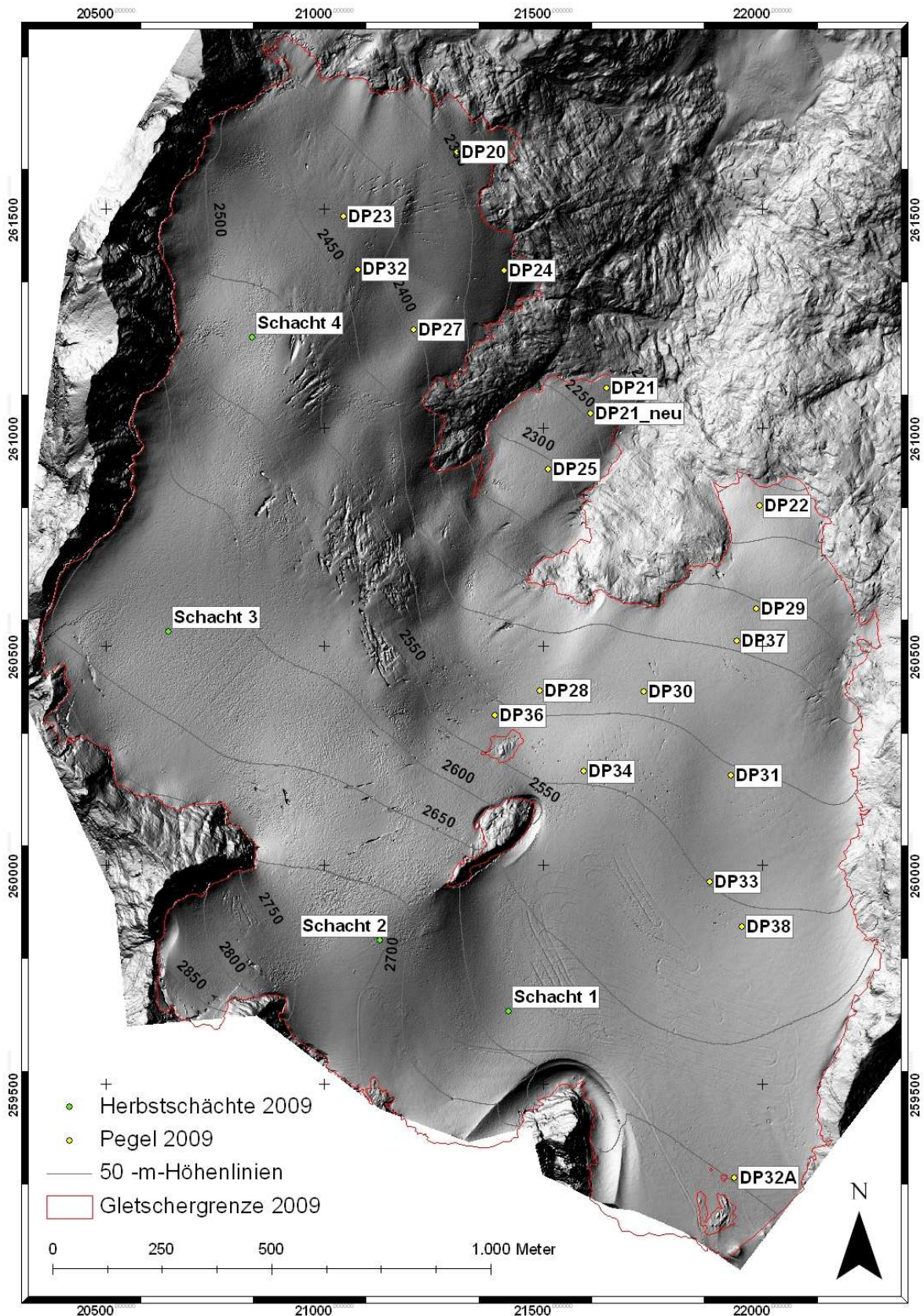


Abbildung 4.3. Positionen der Pegel und Schächte 2008/2009 mit 50-m-Höhenschichtlinien und Gletschergrenze 2009 (rot). Kartengrundlage shaded Relief des Digitalen Höhenmodells aus Laserscandaten (2007) in Gauß Krüger Koordinaten A31.

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. 4.1), um so die Werte mit anderen Niederschlagsmessungen in den Alpen zu vergleichen.

Monatsrechnung	
31.10.2008	120
30.11.2008	160
31.12.2008	220
31.01.2009	90
29.02.2009	380
31.03.2009	350
30.04.2009	80
31.05.2009	280
30.06.2009	420
31.07.2009	370
31.08.2009	120
30.09.2009	120
2710	

Tabelle 4.1. Messwerte des Totalisators am Hallstätter Gletscher 2008/2009. Die Niederschlagswerte verstehen sich in mm.

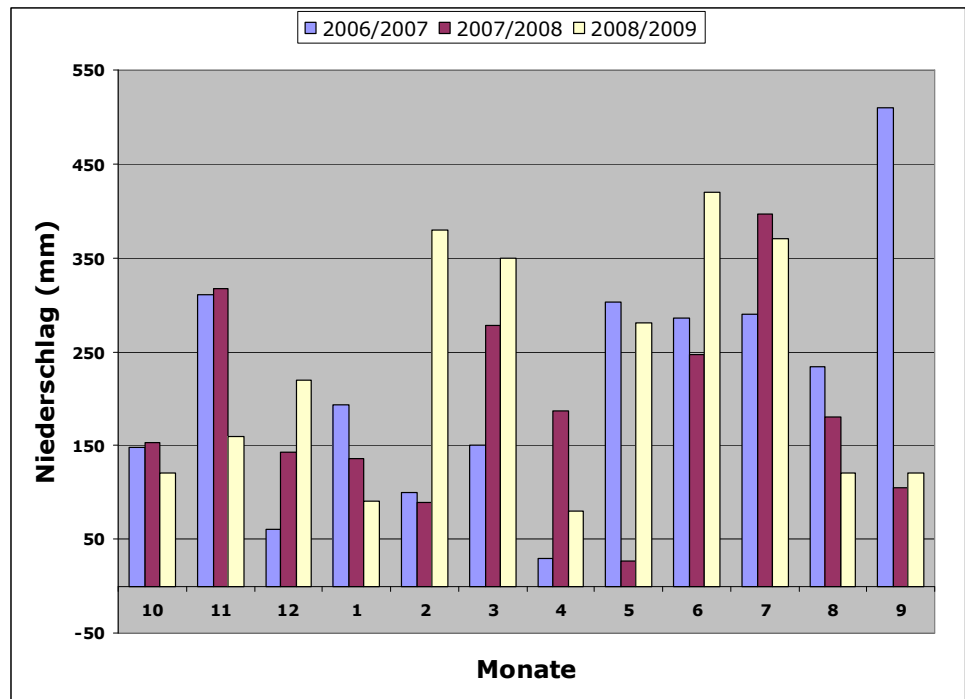


Abbildung 4.4. Vergleich der monatlichen Niederschlagssummen der Haushaltsjahre 2006/2007, 2007/2008 und 2008/2009

Mit einem Jahresniederschlag von 2710 mm zeigte sich das Haushaltsjahr 2008/2009 gegenüber 2006/2007 (2615 mm) und 2007/2008 (2259 mm) niederschlagsreicher (Abb. 4.4). Hohe Niederschlagssummen gab es in den Monaten Februar und März. Die starken Niederschläge im Juni und Juli fielen fast ausschließlich flüssig und brachten kaum eine zusätzliche Akkumulation. Für den Zeitraum der Winterbilanz summierten sich 1400 mm Niederschlag.

4.3. Auswertung

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 4.5 ersichtlich. Aus Tabelle 4.2 gehen Dichte und Wasserwert der Schächte hervor. Tabelle 4.3 zeigt die Werte der Winterbilanz nach Höhenstufen, gültig von 01.10.2008 bis 30.04.2009. 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.

$$B_{wi} = 6468 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b_{wi} = 2145 \text{ mm}$$

Schachtnummer	Seehöhe [m]	Tiefe [m]	Dichte [kg/m ³]	Wasserwert [mm]
1	2622	6,46	463	2988
3	2619	6,68	435	2908
4	2514	6,64	460	3057

Tabelle 4.2. Frühjahrsschächte.

Höhenstufe m	Fläche km ²	Bilanz 10 ³ m ³	Wasserwert mm
2150 - 2200	0,000	0,6	1250
2200 - 2250	0,018	24,9	1417
2250 - 2300	0,048	77,8	1624
2300 - 2350	0,115	194,7	1688
2350 - 2400	0,198	305,6	1547
2400 - 2450	0,252	423,6	1678
2450 - 2500	0,364	672,2	1847
2500 - 2550	0,376	745,0	1979
2550 - 2600	0,494	1060,4	2145
2600 - 2650	0,582	1477,0	2538
2650 - 2700	0,327	831,4	2542
2700 - 2750	0,168	437,1	2605
2750 - 2800	0,036	96,7	2692
2800 - 2850	0,027	87,5	3248
2850 - 2900	0,01	33,8	3250
gesamt	3,014	6468,2	2145

Tabelle 4.3. Flächen- und Höhenverteilung der Winterbilanz.

Winterbilanz Hallstätter Gletscher

01.10.2008 - 30.04.2009

erstellt von
Kay Helfricht
Institut für Meteorologie und Geophysik
Universität Innsbruck
den 25.11.2009

Legende

- 50-m-Höhenschichtlinien
- Gletschergrenze 2009

Winterbilanz Isoflächen

Wasserwert (cm)

75
125
175
225
275
325



Abbildung 4.5. Flächen gleichen Wasserwertes der Winterbilanz 2008/2009

Jahresbilanz

Für die Massenbilanz des hydrologischen Jahres vom 1.10. bis 30.9. werden zusätzlich zu den ermittelten Rücklagen an den Schneeschnitten die Messwerte der Ablation an den Pegeln hinzugezogen (Tab. 4.4). 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. 4.5). 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. 4.6). Über die Flächen-Höhenverteilung der spezifischen Bilanz wird die mittlere spezifische Bilanz der einzelnen Höhenstufen berechnet (Tab 4.6, Abb. 4.7, Abb. 4.8). 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 .

$$B = -2786,8 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b = -924 \text{ mm}$$

Pegelnummer	Wasserwert [mm]	Pegelnummer	Wasserwert [mm]
DP 20	-3510	DP 31	-1850
DP 21	-5380	DP 32	-2220
DP 22	-2950	DP 32A	-2690
DP 23	-1370	DP 33	-1790
DP 24	-4520	DP 34	-2330
DP 25	-4100	DP 36	-1530
DP 27	-1980	DP 37	-3580
DP 29	-2140	DP 38	-2160
DP 30	-1620		

Tabelle 4.4. Wasserwerte der Pegel

Schachtnummer	Seehöhe [m]	Tiefe [m]	Dichte [kg/m³]	Wasserwert [mm]
1	2631	0,87	587	511
2	2712	0,75	575	431
3	2619	1,28	594	760
4	2514	1,39	582	810

Tabelle 4.5. Herbstschächte

Höhenstufe	Fläche	Bilanz	Wasserwert
m	km ²	10 ³ m ³	mm
2150 - 2200	0,000	-2,5	-5250
2200 - 2250	0,018	-86,0	-4893
2250 - 2300	0,048	-199,3	-4162
2300 - 2350	0,115	-409,8	-3555
2350 - 2400	0,197	-539,7	-2734
2400 - 2450	0,252	-511,4	-2027
2450 - 2500	0,364	-479,8	-1319
2500 - 2550	0,376	-411,4	-1094
2550 - 2600	0,494	-315,1	-638
2600 - 2650	0,582	84,6	145
2650 - 2700	0,327	12,6	39
2700 - 2750	0,168	25,4	152
2750 - 2800	0,036	7,6	212
2800 - 2850	0,027	26,1	970
2850 - 2900	0,010	11,7	1125
gesamt	3,014	-2786,8	-924

Tabelle 4.6. Flächen- und Höhenverteilung der Jahresbilanz

Das Akkumulationsgebiet des Hallstätter Gletscher zeigt sich im Massenhaushaltsjahr 2009 deutlich zerrissener als die zwei Jahre zuvor. Besonders der südöstliche Teil am Übergang zum Schladminger Gletscher war großflächig schneefrei. Im Bereich der Felsen gingen bis zu 2,5 m Eis verloren. Weitere apere Stellen zeigten sich unterhalb des Dachsteingipfels und im Bereich der Dachsteinwarte. Nur im Schutz der Felswände von Dachstein und Kreuzkamm im westlichen Teil des Gletschers konnten größere Mengen Winterschnee den Sommer

überdauern. Ablationsbeträge von über 5 m Wasseräquivalent zeigten sich nur an den untersten Ausläufern der mittleren Zunge. Die mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie (*equilibrium line altitude – ELA*) lag bei 2616 m (Abb. 4.8).

Massenbilanz Hallstätter Gletscher

01.10.2008 - 30.09.2009

erstellt von
 Kay Helfricht
 Institut für Meteorologie und Geophysik
 Universität Innsbruck
 den 25.11.2009

Legende

- Gleichgewichtslinie
- 50-m-Höhenschichtlinien
- Gletschergrenze 2009

Massenbilanz Isoflächen

Wasserwert (cm)	Farbe
-525	Rot
-475	Orange
-425	Orange
-375	Orange
-325	Orange
-275	Orange
-225	Orange
-175	Orange
-125	Gelb
-75	Gelb
-25	Gelb
12,5	Grün
37,5	Grün
62,5	Grün
87,5	Grün
112,5	Grün

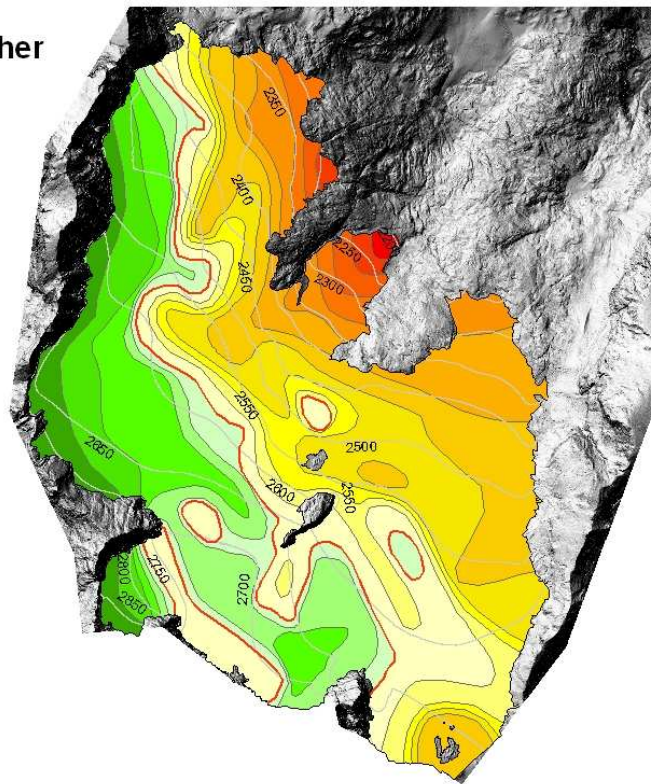


Abbildung 4.6. Flächen gleichen Wasserwertes der Jahresbilanz 2008/2009.

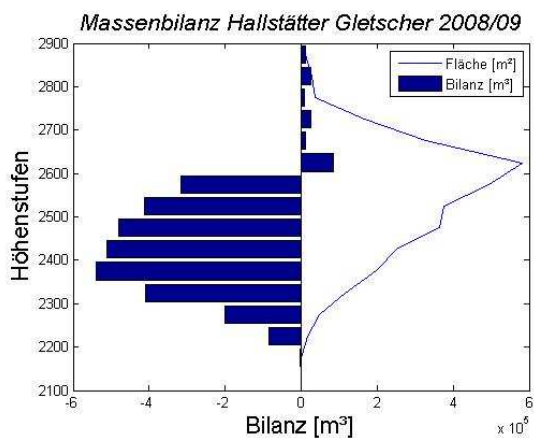


Abbildung 4.7. Nettobilanz *B* der Höhenstufen und Flächenverteilung nach Digitalem Geländemodell 2007 mit Gletschergrenze 2009.

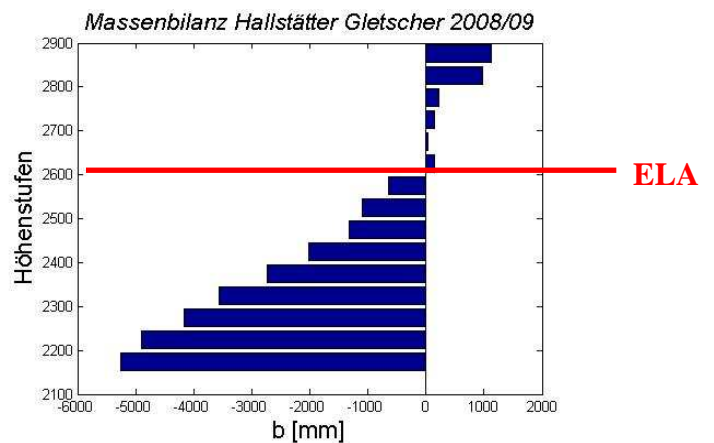


Abbildung 4.8. Mittlere spezifische Bilanz *b* der Höhenstufen.

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:

$$B_{so} = -9255 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b_{so} = -3069 \text{ mm}$$

4.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle 4.7 zeigt die Beziehung zwischen Jahres-, Winter- und Sommerbilanz auf. Im Massenhaushaltsjahr 2008/09 folgte einer durchschnittlichen Winterbilanz eine lange Ablationssaison mit der daraus resultierenden stark negativen Sommerbilanz. Im Vergleich zu den zwei vorangegangenen Massenhaushaltsjahren ist ein Anstieg der mittleren Höhe der Gleichgewichtslinie *ELA* zu verzeichnen (Tab.4.8). Das Gebiet der Akkumulation fällt deutlich kleiner aus als in den zwei Vorjahren. Damit ist auch das Verhältnis von Akkumulations- zu Gesamtfläche S_c/S mit 34% geringer. Der in der Nettobilanz des Sommers B_a ersichtliche große Massenverlust führte zu einer deutlich negativen Jahresbilanz des hydrologischen Jahres 2008/2009.

	Jahresbilanz		Winterbilanz		Sommerbilanz	
S_c=	1,029	km ²	3.014	km ²	0	km ²
B_c=	586,7	10 ³ m ³	6468,2	10 ³ m ³	0	10 ³ m ³
b_c=	570	mm	2145	mm	0	mm
S_a=	1,986	km ²	0	km ²	3.014	km ²
B_a=	-3373,5	10 ³ m ³	0	10 ³ m ³	-9255	10 ³ m ³
b_a=	-1699	mm	0	mm	-3069	mm
S=	3.014	km ²	3.014	km ²	3.014	km ²
B=	-2786,8	10 ³ m ³	6468,2	10 ³ m ³	-9255	10 ³ m ³
b=	-924	mm	2145	mm	-3069	mm
S_c/S=	0,341		1		0	
ELA=	2616	m				

Tabelle 4.7. Kennzahlen der Jahres-, Winter- und Sommerbilanz 2008/2009

	2006/2007		2007/2008		2008/2009	
S_c=	1.496	km ²	1,490	km ²	1,029	km ²
B_c=	1682,9	10 ³ m ³	595,7	10 ³ m ³	586,7	10 ³ m ³
b_c=	1125	mm	400	mm	570	mm
S_a=	1.645	km ²	1,551	km ²	1,986	km ²
B_a=	-2864,6	10 ³ m ³	-2723,7	10 ³ m ³	-3373,5	10 ³ m ³
b_a=	-1741	mm	-1756	mm	-1699	mm
S=	3.141	km ²	3.041	km ²	3.014	km ²
B=	-1181,7	10 ³ m ³	-2128,1	10 ³ m ³	-2786,8	10 ³ m ³
b=	-376	mm	-700	mm	-924	mm
S_c/S=	0,476		0,49		0,341	
ELA=	2583	m	2592	m	2616	m

Tabelle 4.8. Vergleich der drei gemessenen Jahresbilanzen des Hallstätter Gletschers.

Vergleich mit anderen Gletschern

	Hallstätter Gletscher	Hintereis-ferner	Kesselwand-ferner	Jamtalferner	
S_c=	1,029	1,72	1,02	0,32	km ²
B_c=	0,59	0,44	0,15	0,04	10 ⁶ m ³
b_c=	570	257	148	125	mm
S_a=	1,986	5,24	2,69	2,93	km ²
B_a=	-3,37	-8,67	-3,11	-3,14	10 ⁶ m ³
b_a=	-1699	-1654	-1153	-1070	mm
S=	3,014	6,96	3,72	3,25	km ²
B=	-2,79	-8,23	-2,95	-3,10	10 ⁶ m ³
b=	-924	-1182	-795	-953	mm
S_c/S=	0,341	0,25	0,28	0,098	
ELA=	2616	3257	3252	3113	m

Tabelle 4.9. Vergleich der Massenbilanzgrößen des Hallstätter Gletschers mit Werten von Hintereis-, Kesselwand- und Jamtalferner für das Haushaltsjahr 2008/2009.

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 Hintereis- und Kesselwandferner sowie des in der Silvretta gelegenen Jamtalferners zeigt, dass sich die mittlere spezifische Bilanz b des Hallstätter Gletschers des Haushaltsjahres 2008/2009 in etwa mit den anderen Gletschern deckt (Tab. 4.9). 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 um über 600 m niedrigere mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie ELA am Hallstätter Gletscher

gegenüber den am Alpenhauptkamm gelegenen Gletschern. Auch befindet sich die ELA gegenüber dem Jamtalferner rund 500 m niedriger.

5. Ausblick

Das Projekt zur Untersuchung des Massenhaushaltes am Hallstätter Gletscher ist auf 5 Jahre ausgelegt. Im dritten Jahr der Messungen zeigt sich eine negativere Massenbilanz als in den Jahren 2007 und 2008. Damit sind aufgrund unterschiedlicher Witterung drei verschiedene Massenbilanzgrößen am Hallstätter Gletscher ermittelt worden. Mit fortführender Auswertung der registrierten Wetterdaten zusätzlich zu denen des Massenhaushaltes wird es die Aufgabe sein, das Verhalten und die Reaktion des Gletschers sowie dessen Bilanz auf das Klima zu verstehen.

6. 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. *Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck*. 153 S.

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. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. 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, WSB., 1994: The Physics of Glaciers, 3. Auflage, by Pergamon Press, Elsevier Science Ltd, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK

7. Anhang

7.1. Mitarbeiter

Die Feldarbeiten bzw. Totalisatorablesungen wurden von Dr. Mag. A. Fischer, Mag. K. Reingruber, Mag. W. Traunmüller, Mag. M. Olefs; Mag. M. Burgstaller, Mag. K. Helfricht, M. Stocker-Waldhuber, A. Haberkorn, M. Presser, M. Juen und Elke Lemmerer durchgeführt. Die Auswertung und der Bericht stammen von Mag. K. Helfricht.

7.2. Definitionen

Es wurden folgende Notationen verwendet:

S	gesamte Gletscherfläche
B	Gesamtjahresbilanz
b	spezifische Massenbilanz
S_a	Fläche des Ablationsgebietes
B_a	Gesamtbilanz der Ablation
b_a	spezifische Bilanz der Ablation
S_c	Fläche des Akkumulationsgebietes
B_c	Gesamtbilanz der Akkumulation
b_c	spezifische Bilanz der Akkumulation
w_i	als Index bedeutet Winter
s_o	als Index bedeutet Sommer
ELA	Höhe der Gleichgewichtslinie

Für die spezifische Bilanz gilt:

$$b = b_{w_i} + b_{s_o} \qquad b = B / S$$

$$b_{w_i} = B_{w_i} / S$$

$$b_{s_o} = b - b_{w_i} \qquad b_{s_o} = B_{s_o} / S$$

$$b_c = B_c / S_c \qquad b_a = B_a / S_a$$

Für die Fläche und die Gesamtbilanz gilt:

$$S = S_c + S_a \qquad \text{bzw.} \qquad B = B_c + B_a$$