



HALLSTÄTTER GLETSCHER

MASSENHAUSHALT UND KLIMA 2011/2012



K. Helfricht (04.09.2012)

Jahresbericht des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck und des Instituts für Interdisziplinäre Gebirgsforschung, der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

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

23.11.2012



im Auftrag von:

Energie AG Oberösterreich	Land Oberösterreich
Böhmerwaldstrasse 3	Umwelt, Energie, Wasser und KonsumentInnenchutz
Postfach 298	Promenade 37
A-4021 Linz, Austria	A-4021 Linz, Austria
service@energieag.at	LR.Anschober@ooe.gv.at
Tel.: +4305/9000 – 0	Tel.: +43(0)732/7720 – 12081
Fax.: +430800/818001	Fax.: +43(0)732/7720 – 12099

Durchführung der Arbeit

www.dachsteingletscher.info

Mag. Martin Stocker-Waldhuber ^{1/3}	martin.stocker-waldhuber@uibk.ac.at
	Tel.: +43(0)512 507 5492
	Fax.: +43(0)512 507 2924
Mag. Klaus Reingruber ⁴	office@blueskywetter.at
	Tel.: +43(0)7674 20660
	Fax.: +43(0)7674 2066
Dr. Andrea Fischer ^{1/2}	andrea.fischer@uibk.ac.at
	Tel.: +43(0)512 507 4950
	Fax.: +43(0)512 507 4960

- 1 Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften
Technikerstraße 21a, Otto Hittmair-Platz 1, A-6020 Innsbruck, Österreich
www.mountainresearch.at
- 2 Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck
Innrain 52, A-6020 Innsbruck, Österreich, www.imgi.uibk.ac.at
- 3 Institut für Geowissenschaften und Geographie, Physische Geographie, Martin-Luther-Universität,
Halle-Wittenberg, Von-Seckendorff-Platz 4, D-06120 Halle, Deutschland
<http://www.geo.uni-halle.de>
- 4 BLUESKY Wetteranalysen, Traunmüller und Reingruber OEG, Technisches Büro für Meteorologie
Steinhüblstrasse 1, A-4800 Attnang-Puchheim, Österreich, office@blueskywetter.at

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 Interdisziplinäre Gebirgsforschung der ÖAW und 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. 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. Das Jahr 2010/11 war mit -201 cm das Negativste seit Beginn der Messungen. Der Massenhaushalt im Jahr 2011/12 wurde von den großen Schneemenge im Winter und der starken Abschmelzung im Sommer geprägt. Gemittelt über die gesamte Gletscherfläche betrug der Höhenverlust 123 cm was einem Gesamtverlust von ca. 3,7 Millionen m^3 Wasser entspricht.

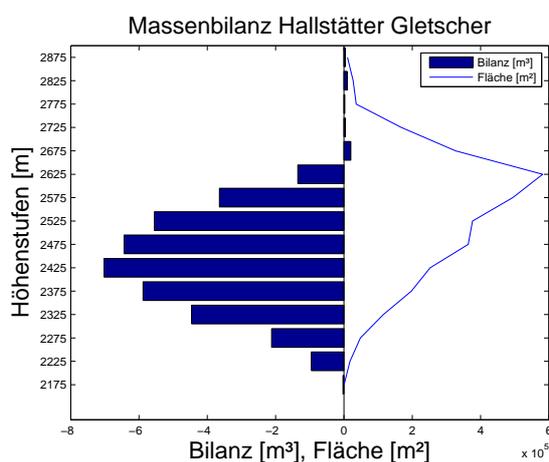


Abbildung 0.1: Der Schneeschacht 3a am 04.10.2012 (links); Massenbilanz und Verteilung der Fläche des Hallstätter Gletschers nach Höhenstufen 2011/12 (rechts).

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	8
4.2.4. Totalisator	9
4.3. Auswertung	10
4.3.1. Winterbilanz	10
4.3.2. Jahresbilanz	12
4.3.3. Sommerbilanz	16
4.4. Zusammenfassung der Ergebnisse	16
A. Anhang	18
A.1. Mitarbeiter	18
A.2. Definitionen	18

1. Ziel der Massenbilanzmessungen

Gletscher sind empfindliche Indikatoren für Klimaänderungen. Dennoch gibt es weltweit nur wenige Gletscher an denen langjährige Reihen des Massenhaushaltes gemessen werden (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 Massengewinns, der Akkumulationszone, und der Bereich des Massenverlustes, der Ablationszone. Abbildung 1.1 zeigt einen schematischen Schnitt entlang der zentralen Fließlinie eines Gletschers.

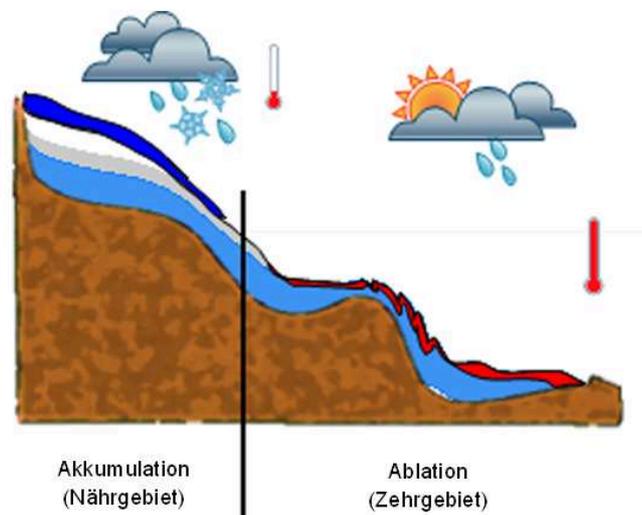


Abbildung 1.1: Schematischer Schnitt entlang der zentralen Fließlinie eines Gletschers. Farblich dargestellt sind die Eismasse des Gletschers (hellblau), im Bereich der Akkumulation Schnee (dunkelblau) und Firn (weiß/grau) sowie der Massenverlust (rot) im Ablationsgebiet. Die Thermometer geben die relativen 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 2011/12 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 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 2600 m und 2650 m. Mit einer Fläche von 3,016 km² (Gletschergrenze 2009) verlor der Gletscher rund 43% seiner Ausdehnung gegenüber dem Gletscherhochstand 1856 (Helfricht, 2009).

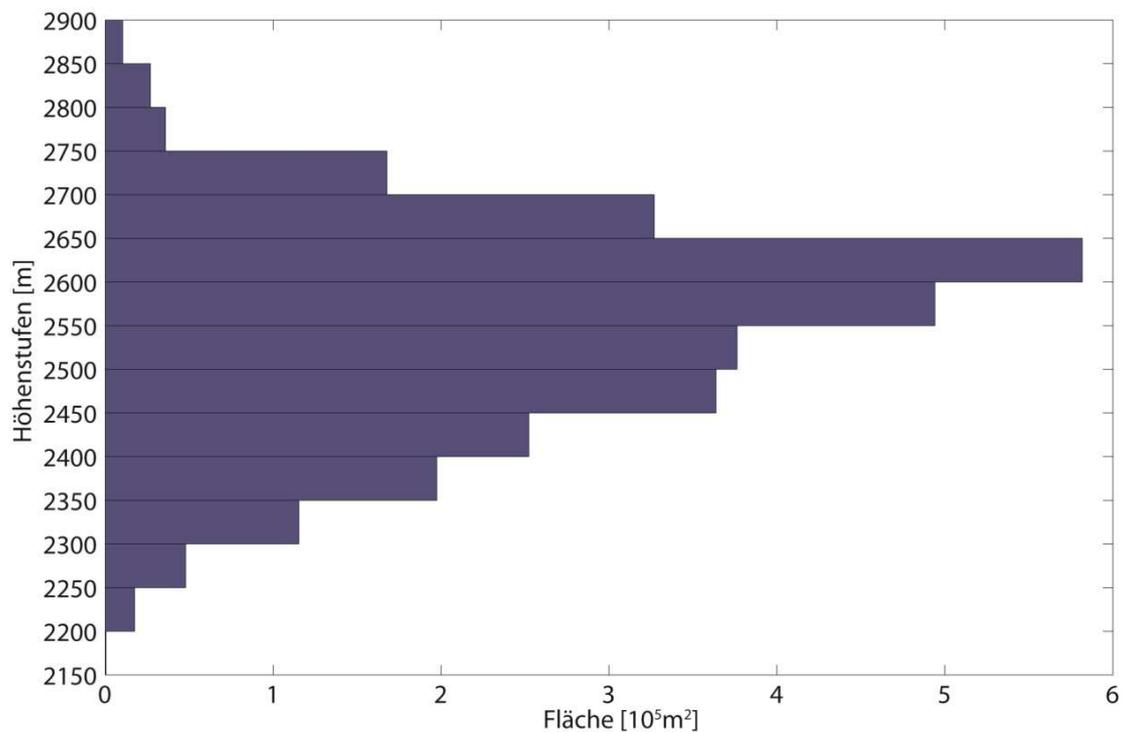


Abbildung 2.1: Flächen-Höhenverteilung des Hallstätter Gletschers 2009.

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 1.10.2011 bis zum 30.09.2012 startete mit leicht überdurchschnittlichen Niederschlagswerten im Oktober. Extrem trocken verlief der November mit weniger als 25% des Niederschlagsnormalwertes der Periode 1971 bis 2000. Die Größten Niederschlagsmengen ereigneten sich mit mehr als 275% des Normalwertes im Jänner. In den Monaten März bis Juni fielen die Niederschlagsmengen etwas zu gering aus (Abb. 3.2).

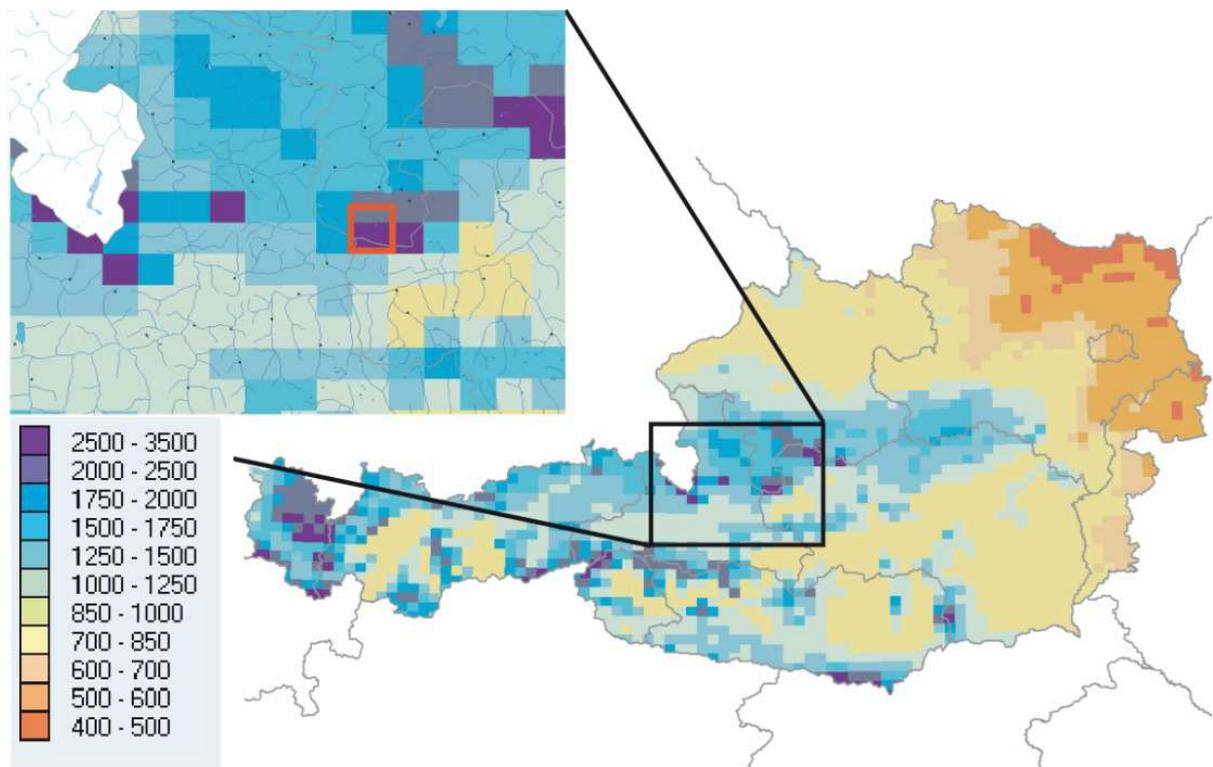


Abbildung 3.1: Mittlere Jahresniederschlagsmenge in mm (Hydrologischer Atlas 2003). Im Ausschnitt rot markiert die Lage des Hallstätter Gletschers.

Die Monate von April bis September waren deutlich zu warm. Speziell im Juni lag die Temperaturabweichung bei $2,5^{\circ}\text{C}$ über dem langjährigen Mittelwert von 1971 bis 2000. Durch den Mangel an Neuschneefällen im Sommer ergab sich eine stark negative Sommerbilanz.

Das Hydrologische Jahr vom 1.10.2011 bis zum 30.09.2012 zeichnete sich im Dachsteingebiet im Allgemeinen durch die großen Neuschneemengen im Jänner und zu hohe Temperaturen im Sommer aus (Abb. 3.2).

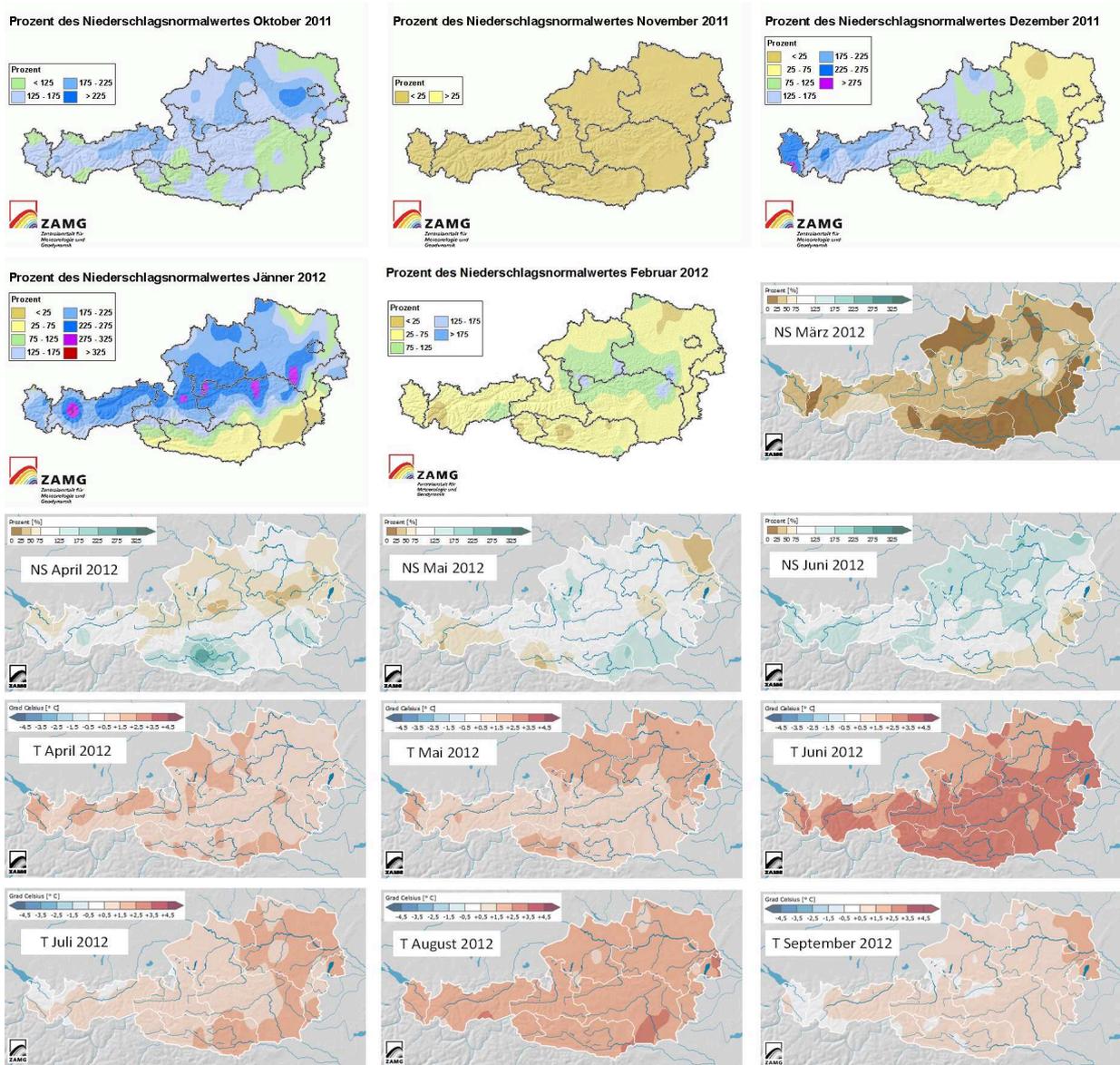


Abbildung 3.2: Übersicht der Abweichungen vom langjährigen Mittel des Niederschlags und der Temperatur (Mittel bezogen auf die Periode 1971 bis 2000). Die Abbildungen werden von der ZAMG unter www.zamg.ac.at zur Verfügung gestellt.

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 Gletschergrenze nach oben versetzt. 2010, 2011 und 2012 wurden erneut mehrere Pegel neu gebohrt und regelmäßig abgelesen. Die Ablesungen der Pegel fanden am 04.10.2011, 18.07.2012, 14.08.2012, 04.09.2012 sowie zur Herbstbegehung am 04.10.2012 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 2012 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 2 Schächte gegraben (Abb. 4.1). Aufgrund der großen

Schneemengen wurden am 09. Mai die Schneehöhen entlang mehrerer Profile mit Radar gemessen sowie über die Gletscherzungen sondiert.

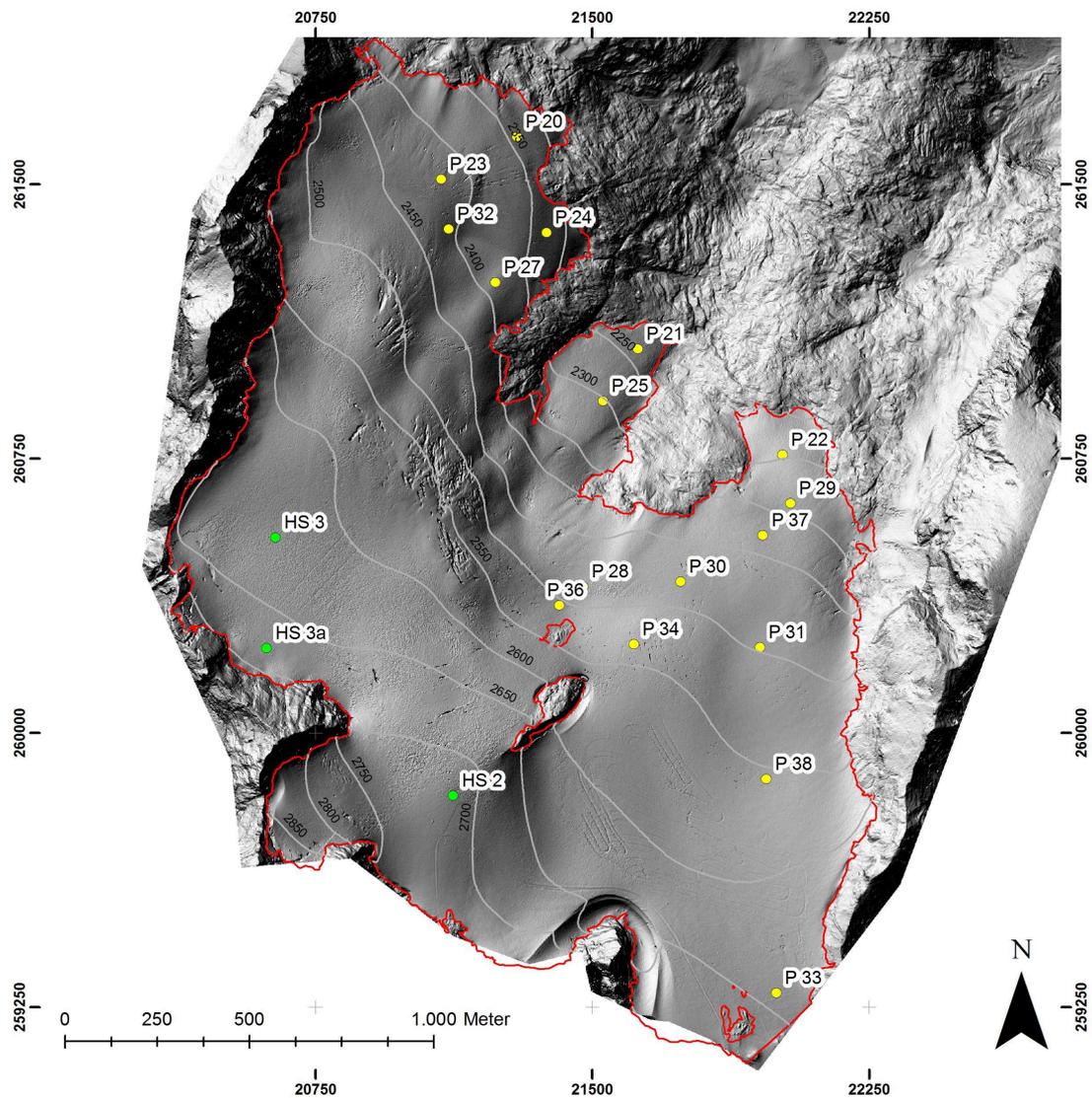


Abbildung 4.1: Positionen der Pegel und Schächte 2011/12 mit 50 m Höhengichtlinien und Gletschergrenze 2009 (rot). Kartengrundlage beleuchtetes Höhenmodell aus Laserscandaten (2007) in Gauß Krüger Koordinaten A31.

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 04. Oktober 2012 statt. Ausgangspunkt war die Dachsteinbahn am Hunerkogel. Übernachtet wurde auf der Seethaler Hütte (Dachsteinwarte). Aufgrund der starken Ablation im Sommer lag an der üblichen Schachtposition 3 zur Herbstbegehung kein Schnee, daher wurde der Schacht 3a gegraben (Abb. 4.1).

4.2.4. Totalisator

Der Totalisator dient der Erfassung des Gebietsniederschlags und befindet sich im Bereich der tiefsten Zunge des Hallstätter Gletschers. 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 (Die Korrekturdaten wurden vom Land Oberösterreich zur Verfügung gestellt). Somit handelt es sich bei der Monatsrechnung in Abbildung 4.2 nicht um Messwerte sondern um korrigierte Niederschlagsdaten.

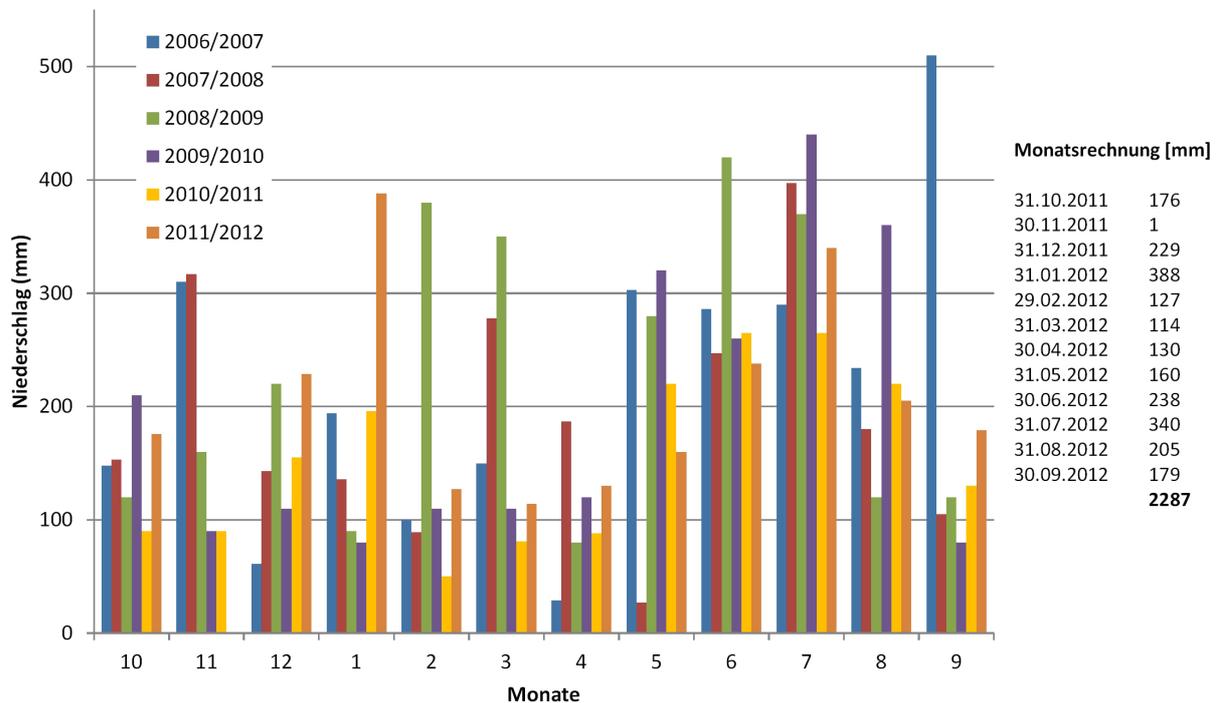


Abbildung 4.2: Vergleich der monatlichen Niederschlagssummen der Haushaltsjahre 2006/07 bis 2011/12 sowie die Messwerte des Totalisators 2011/12 in mm.

Mit einem Jahresniederschlag von 2287 mm lag das Haushaltsjahr 2011/12 etwa im Durchschnitt der Jahre 2006/07 bis 2009/10 mit 2615 mm im Jahr 2007/07, 2007/08 mit 2259 mm, 2008/09 mit 2710 mm und mit 2290 mm im Jahr 2009/10. Nur im Jahr 2010/11 lag der Jahresniederschlag mit 1850 mm deutlich darunter. Besonders hohe Niederschlagssummen im Winter gab es vor allem im Dezember und Jänner. Für den Zeitraum der Winterbilanz summierten sich 1165 mm Niederschlag.

4.3. Auswertung

4.3.1. Winterbilanz

Die Winterbilanz bezieht sich auf den Zeitraum vom 01.10. eines Jahres bis zum 30.04. des darauffolgenden Jahres. Für die Winterbilanz wird zunächst der Wasserwert der Schneedecke an den Schachtpositionen aus dem Dichteprofil ermittelt. Anhand von Sondierungen wird die Höhe der Schneedecke gemessen. Unter Verwendung der mittleren Dichte aus den Schneeschächten wird der Wasserwert an den Sondierungspositionen berechnet. Wurde vor dem 01.10. bereits eine Schneedecke akkumuliert, so muss diese von den Bilanzwerten abgezogen werden. Zwischen

den Punktmessungen wird der erhaltene Wasserwert der Winterschneedecke über die Fläche des Gletschers interpoliert. Die Verteilung der Winterbilanz ist in Abbildung 4.3 ersichtlich. Aus Tabelle 4.1 gehen Dichte und Wasserwert der Schächte hervor. Tabelle 4.2 zeigt die Werte der Winterbilanz nach Höhenstufen, gültig von 01.10.2011 bis 30.04.2012. 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.

$$B_{wi} = 8219,2 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b_{wi} = 2725 \text{ mm}$$

Schachtnummer	Tiefe [m]	Dichte [kg/m ³]	Wasserwert [mm]
2	7,82	504	3940
3	7,75	490	3798

Tabelle 4.1: Frühjahrsschächte 2012.

Höhenstufe [m]	Fläche [km ²]	Bilanz [10 ³ m ³]	Wasserwert [mm]
2850 – 2900	0,010	36,5	3504
2800 – 2850	0,027	90,7	3368
2750 – 2800	0,036	115,7	3221
2700 – 2750	0,168	562,6	3352
2650 – 2700	0,327	1013,5	3099
2600 – 2650	0,582	1708,6	2935
2550 – 2600	0,494	1342,1	2715
2500 – 2550	0,376	1058,3	2812
2450 – 2500	0,364	946,4	2601
2400 – 2450	0,252	589,3	2335
2350 – 2400	0,198	432,8	2191
2300 – 2350	0,115	218	1890
2250 – 2300	0,048	80,2	1673
2200 – 2250	0,018	23,9	1362
2150 – 2200	0,000	0,6	1300
Gesamt	3,016	8219,2	2725

Tabelle 4.2: Flächen- und Höhenverteilung der Winterbilanz 2011/12.

Winterbilanz Hallstätter Gletscher

01.10.2011 - 30.04.2012

Legende

— 50 m Höhenlinien

□ Gletschergrenze 2009

Wasserwert Isoflächen

(cm)

130

150

170

190

210

230

250

270

290

310

330

350

370

390

0 250 500 1.000 Meter

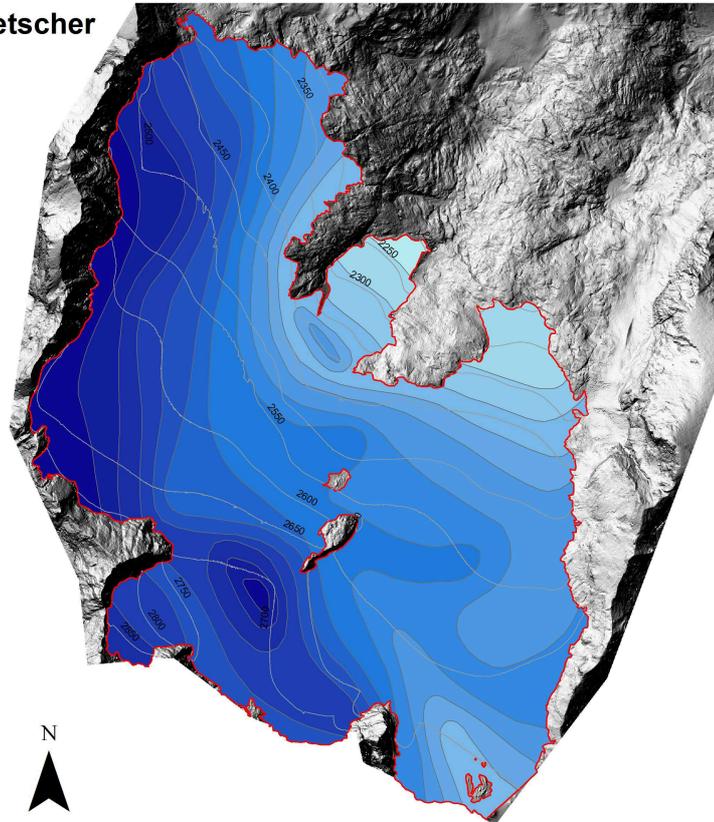


Abbildung 4.3: Flächen gleichen Wasserwertes der Winterbilanz 2011/12.

4.3.2. Jahresbilanz

Für die Massenbilanz des hydrologischen Jahres vom 01.10. bis 30.09. werden zusätzlich zu den ermittelten Rücklagen an den Schneeschnitten 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 Schichtpositionen 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 .

$$B = -3704,7 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

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

Pegelnummer	Wasserwert [mm]	Pegelnummer	Wasserwert[mm]
DP 20	-3843	DP 30	-2331
DP 21	-5544	DP 31	-2457
DP 22	-3402	DP 32	-2835
DP 23	-2070	DP 33	-1799
DP 24	-4536	DP 34	-3456
DP 25	-4293	DP 36	-1422
DP 27	-2538	DP 37	-4005
DP 28	-864	DP 38	-2466
DP 29	-2151		

Tabelle 4.3: Wasserwerte der Ablation an den Pegeln (01.10.2011-30.09.2012).

Schachtnummer	Tiefe [m]	Dichte [kg/m ³]	Wasserwert [mm]
Schacht 2	0,85	584	496
Schacht 3a	0,97	591	573

Tabelle 4.4: Herbstschächte 2012.

Höhenstufe [m]	Fläche [km ²]	Bilanz [10 ³ m ³]	Wasserwert [mm]
2850 – 2900	0,010	3,9	378
2800 – 2850	0,027	9,1	338
2750 – 2800	0,036	2,6	71
2700 – 2750	0,168	4,2	25
2650 – 2700	0,327	20,1	61
2600 – 2650	0,582	-135,1	-232
2550 – 2600	0,494	-364,5	-737
2500 – 2550	0,376	-554,9	-1474
2450 – 2500	0,364	-643,7	-1769
2400 – 2450	0,252	-702,3	-2782
2350 – 2400	0,198	-588,2	-2978
2300 – 2350	0,115	-445,8	-3865
2250 – 2300	0,048	-212	-4423
2200 – 2250	0,018	-95,4	-5431
2150 – 2200	0,000	-2,7	-5750
Gesamt	3,016	-3704,7	-1228

Tabelle 4.5: Flächen- und Höhenverteilung der Jahresbilanz 2011/12.

Aufgrund der großen Neuschneemengen im Winter und der starken Ablation im Sommer bildete sich ein starker Massenbilanzgradient aus. Während auf der mittleren Gletscherzunge Ablationsbeträge von über 5 m Wasseräquivalent gemessen wurde, lagen am Plateau noch bis zu einem Meter Schnee. Die Gleichgewichtslinie (equilibrium line altitude – ELA) lag im Vergleich zu den Vorjahren mit einer mittleren Höhe von 2664 m etwa im Durchschnitt (Abb. 4.5).

Massenbilanz Hallstätter Gletscher

01.10.2011 - 30.09.2012

Legende

- 50 m Höhenlinien
- Gletschergrenze 2009
- Gleichgewichtslinie

Wasserwert Isoflächen (cm)

- -575
- -525
- -475
- -425
- -375
- -325
- -275
- -225
- -175
- -125
- -75
- -25
- 12,5
- 37,5
- 62,5

0 250 500 1.000 Meter

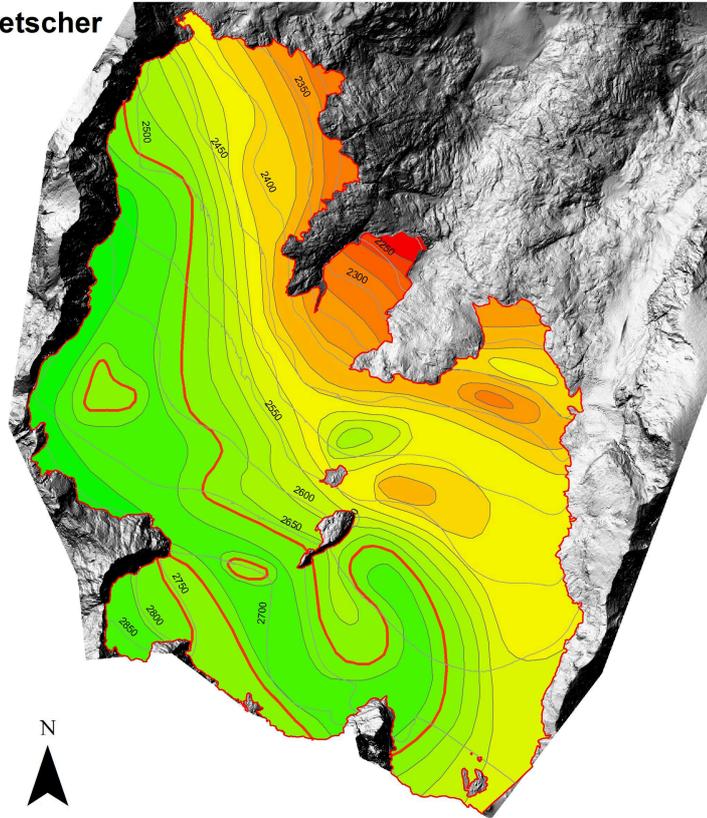


Abbildung 4.4: Flächen gleichen Wasserwertes der Jahresbilanz 2011/12.

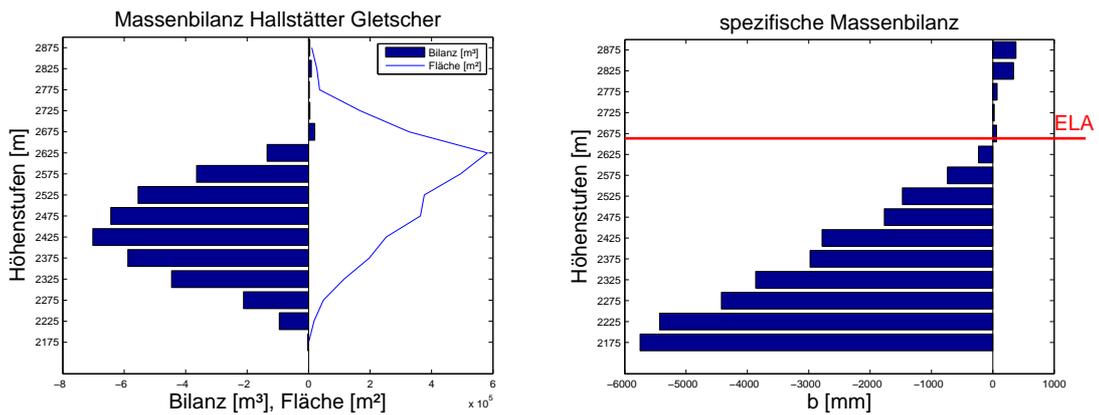


Abbildung 4.5: Nettobilanz (B) und Flächenverteilung nach Digitalem Geländemodell 2007 mit Gletschergrenze 2009 sowie die mittlere spezifische Bilanz (b) der Höhenstufen und die mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie (ELA).

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:

$$B_{so} = -11923,9 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$b_{so} = -3953 \text{ mm}$$

4.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle 4.6 zeigt die Beziehung zwischen Jahres-, Winter- und Sommerbilanz auf. Im Massenhaushaltsjahr 2011/12 folgte nach dem Jahr 2010/11 die zweit-negativste Massenbilanz seit Beginn der Messungen. 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).

	Jahresbilanz	Winterbilanz	Sommerbilanz	Einheit
S_c	0,958			km^2
B_c	294,8			10^3 m^3
b_c	308			mm
S_a	2,058			km^2
B_a	-3999,6			10^3 m^3
b_a	-1944			mm
S	3,016	3,016	3,016	km^2
B	-3704,7	8219,2	-11923,9	10^3 m^3
b	-1228	2725	-3953	mm
S_c/S	0,318			
ELA	2664			m

Tabelle 4.6: Kennzahlen der Jahres-, Winter- und Sommerbilanz 2011/12.

	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	Einheit
S_c	1,496	1,490	1,029	1,456	0,138	0,958	km^2
B_c	1682,9	595,7	586,7	802,1	17,2	294,8	$10^3 m^3$
b_c	1125	400	570	551	125	308	mm
S_a	1,645	1,551	1,986	1,56	2,879	2,058	km^2
B_a	-2864,6	-2723,7	-3373,5	-2913,1	-6083,7	-3999,6	$10^3 m^3$
b_a	-1741	-1756	-1699	-1867	-2113	-1944	mm
S	3,141	3,041	3,014	3,016	3,016	3,016	km^2
B	-1181,7	-2128,1	-2786,8	-2111,0	-6066,5	-3704,7	$10^3 m^3$
b	-376	-700	-924	-700	-2011	-1228	mm
S_c/S	0,476	0,490	0,341	0,483	0,046	0,318	
ELA	2583	2592	2616	2588	2822	2664	m

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

A. Anhang

A.1. Mitarbeiter

Die Feldarbeiten bzw. Totalisatorablesungen wurden von K. Reingruber, E. Lemmerer, W. Schipflinger, B. Seiser, S. Gruber, L. Hartl, M. Backmann, E. Dreiseitl und M. Stocker-Waldhuber durchgeführt. Das Team wurde regelmäßig durch die Gletscherbahnen Dachstein, Planai&Hochwurzen unterstützt. Die Auswertung und der Bericht stammen von M. Stocker-Waldhuber.

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.8: Notationen die in dieser Arbeit verwendet werden.

$$S = S_c + S_a \quad (\text{A.1}) \qquad B = B_c + B_a \quad (\text{A.2})$$

Für die spezifischen Bilanzen gelten folgende Beziehungen:

$$b = b_{wi} + b_{so} \quad (\text{A.3}) \qquad b_{so} = b - b_{wi} \quad (\text{A.4})$$

$$b_{wi} = B_{wi}/S \quad (\text{A.5}) \qquad b_{so} = B_{so}/S \quad (\text{A.6})$$

$$b_c = B_c/S_c \quad (\text{A.7}) \qquad b_a = B_a/S_a \quad (\text{A.8})$$

Tabelle A.9: 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.