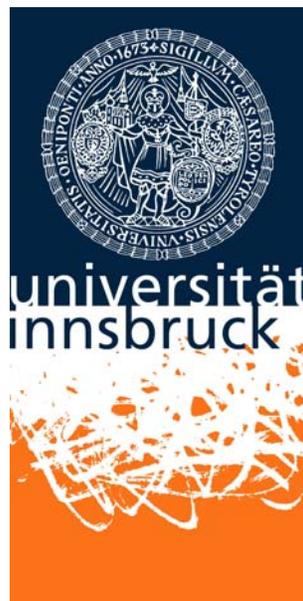


Veränderungen des Massenhaushaltes am Hallstätter Gletscher seit 1856

Diplomarbeit eingereicht am
INSTITUT FÜR METEOROLOGIE UND
GEOPHYSIK,
LEOPOLD-FRANZENS-UNIVERSITÄT INNSBRUCK



zur Erlangung des akademischen Grades
MAGISTER DER NATURWISSENSCHAFTEN

KAY HELFRICHT

NOVEMBER 2009

"...Es ist eine bekannte Thatsache, dass, wie fast alle Wissenschaften, so insbesondere die naturhistorischen Disciplinen und die mit ihnen vielfach verknüpfte Erdkunde während der letzten Decennien sich in einer Weise erweitert und vertieft haben, wie dies wohl kaum in einem zweiten gleich langem Zeitraume der vergangenen Jahrhunderte der Fall gewesen sein dürfte. Der Grund dieses beschleunigten Fortschrittes ist wohl zunächst darin zu suchen, dass die moderne Forschung sich immer mehr dem einzelnen, enger begrenzten zuwendet, dasselbe bis ins äußerste Detail verfolgt und erst aus den auf solchem Wege gewonnenen Erkenntnissen allgemeinere Schlüsse zieht."

(Friedrich Simony 1895)



Blick vom Schöberl auf den Hallstätter Gletscher am 13. Juli 2008.

Abstract

Hallstätter Glacier is the northernmost glacier of Austria. Appendant to the northern Limestone Alps, the glacier is located at 47°28'50" N, 13°36'50" E in the Dachstein-region. At the same time with its advance linked to the Little Ice Age (LIA), research on changes in size and mass of Hallstätter glacier was started in 1842 by Friedrich Simony. He observed and documented the glacier retreat related to its last maximum extension in 1856. In addition, Hallstätter Glacier is a subject to scientific research to date.

In this thesis methods and results of ongoing mass balance measurements are presented and compared to long term volume changes and meteorological observations. The current mass balance monitoring program using the direct glaciological method was started 2006. In this context, 2009 the ice thickness was measured with ground penetrating radar. The results are used with digital elevation models reconstructed from historical maps and recent digital elevation models to calculate changes in shape and volume of Hallstätter Glacier. Based on current meteorological measurements near the glacier and long-time homogenized climate data provided by HISTALP, time series of precipitation and temperature beginning at the LIA are produced. These monthly precipitation and monthly mean temperature data are used to compare results of a simple degree day model with the volume change calculated from the difference of the digital elevation models. The two years of direct mass balance measurements are used to calibrate the degree day model. A number of possible future scenarios are produced to indicate prospective changes.

Within the 150-year-period between 1856 and 2007 the Hallstätter Glacier lost 1940 meters of its length and 2,23 km² in area. 37% of the initial volume of 1856 remained. This retreat came along with a change in climate. The application of a running average of 30 years shows an increase in precipitation of 18,5% and a warming of 1.3°C near the glacier between 1866 and 1993. The mass loss was continued in the hydrological years 2006/2007 and 2007/2008 showing mean specific mass balance of -376 mm and -700 mm, respectively. Applying a temperature correction for the different minimum elevations of the glacier, the degree day approach based on the two measured mass balances can reproduce sign and order of magnitude of the volume change of Hallstätter Glacier since 1856. Nevertheless, the relative deviation is significant. Future scenarios show, that 30% of the entire glacier volume remains after subtracting the elevation changes between the digital elevation models of 2002 and 2007 ten times from the surface of 2007.

The past and present mass changes of Hallstätter Glacier are showing a retreating glacier as a consequence of rising temperatures. Due to high precipitation, increased with previous warming, the Hallstätter Glacier can and will exist in lower elevation compared to inner alpine glaciers.

Kurzfassung

Der Hallstätter Gletscher am Dachstein (47°28'50" N, 13°36'50" O) ist der größte Gletscher der nördlichen Kalkalpen. Seit über 150 Jahre ist er Gegenstand der Forschung. Mit dem Vorstoß der Gletscher zur kleinen Eiszeit begann Friedrich Simony 1842 Veränderungen und Verhalten des Gletschers zu beobachten. Er dokumentierte den Rückzug des Hallstätter Gletschers seit seinem Hochstand 1856. In weiterer Folge wurde der Gletscher oft wissenschaftlich erforscht und seine Ausdehnung kartiert.

In dieser Arbeit werden die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse aktueller Massenbilanzmessungen am Hallstätter Gletscher präsentiert und mit langjährigen Massenänderungen und meteorologischen Beobachtungen verglichen. Das derzeitige Programm zur Erstellung der Massenbilanz am Hallstätter Gletscher wurde 2006 gestartet. In diesem Zusammenhang erfolgte eine Radar-Eisdickenmessung im Januar 2009. Die erhaltene Eisdickenverteilung wird zusammen mit aus historischen Karten rekonstruierten und bestehenden digitalen Geländemodellen in Flächen- und Volumsänderungen seit 1856 umgesetzt. Auf Grundlage meteorologischer Messungen in Gletschnähe sowie langjährigen, homogenisierten Klimadaten des HISTALP-Projektes werden für den selben Zeitraum Datenreihen des Niederschlages und der Temperatur in monatlicher Auflösung erzeugt. Damit wird ein einfaches Gradtagmodell betrieben, um die vorher ermittelten Volumensunterschiede zu reproduzieren. Zur Kalibrierung werden die direkt gemessenen Massenbilanzen verwendet. Um einen Ausblick auf die mögliche weitere Entwicklung des Hallstätter Gletschers zu geben, werden Szenarien auf Grundlage aktueller Höhenmodelle erstellt.

Von 1856 bis 2007 verringerte sich die Länge des Hallstätter Gletschers um 1940 Meter, er verlor 2,23 km² an Fläche und ging bis auf 37% seines ursprünglichen Volumens zurück. Dieser Massenverlust wurde von einer Änderung im Klima begleitet. Das gleitende Mittel über 30 Jahre ergibt für den Zeitraum von 1866 bis 1993 in Gletschnähe eine Temperaturerhöhung um 1,3°C sowie eine Niederschlagszunahme um 18,5%. Der Massenverlust setzt sich in den zwei direkt gemessenen hydrologischen Jahren 2006/2007 und 2007/2008 mit einer mittleren spezifischen Bilanz von -376 mm bzw. -700 mm fort. Das mit diesen Ergebnissen kalibrierte Gradtagmodell ist unter Berücksichtigung der Veränderung der minimalen Gletscherhöhe in der Lage, Vorzeichen und Größenordnung der aus den Geländemodellen ermittelten Volumensverluste zu reproduzieren. Der Blick in die zukünftige Entwicklung liefert nach zehnfachem Abzug der Oberflächenänderung zwischen den Höhenmodellen von 2002 und 2007 von der Gletscheroberfläche 2007 ein Szenario, nach dem der Hallstätter Gletscher noch 30% des heutigen Volumens besitzt.

Bisherige und derzeitige Massenänderungen des Hallstätter Gletschers zeigen eine negative Bilanz in Verbindung mit einem Temperaturanstieg über die vergangenen 150 Jahre. Aufgrund hoher Niederschlagssummen, welche mit der vergangenen Erwärmung

angestiegen sind, kann und wird der Hallstätter Gletscher in Zukunft in niedrigeren Höhen als inneralpine Gletscher existieren.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	v
Kurzfassung	vii
Inhalt	ix
1 Vorbemerkungen	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Ziel und Struktur der Arbeit	2
1.3 Verwendete Software	3
2 Der Hallstätter Gletscher	5
2.1 Lage und Merkmale	5
2.2 Wissenschaftliche Erforschung	9
3 Massenbilanzmessungen 2006 - 2008	13
3.1 Definitionen	13
3.2 Die direkte glaziologische Methode	15
3.3 Feldmessungen	17
3.4 Die Bilanzen als Folge der Witterung	17
3.4.1 Witterungsverlauf 2006/2007	19
3.4.2 Witterungsverlauf 2007/2008	19
3.4.3 Webcam	19
3.5 Ergebnisse	21
3.5.1 Jahresbilanz 2006/2007	21
3.5.2 Jahresbilanz 2007/2008	26
3.6 Vergleich der Jahresbilanzen	31
4 Volums-, Flächen- und Längenänderungen 1856 - 2007	33
4.1 Datengrundlage	33
4.1.1 Historische Dokumente	34
4.1.2 Geomorphologische Landschaftsmerkmale	36

4.1.3	Karten	36
4.1.4	Digitale Geländemodelle	38
4.2	Längenänderung	40
4.2.1	Bestimmung der Längenänderung	40
4.2.2	Ergebnisse	40
4.3	Rekonstruktion der Fläche	41
4.3.1	Ermittlung von Flächenwerten	42
4.3.2	Ergebnisse	43
4.4	Eisdicke	47
4.4.1	Messung der Eisdicke	47
4.4.2	Gletscheruntergrund	52
4.4.3	Eisdicken früherer Gletscherstände	53
4.4.4	Eisdickenänderung in den einzelnen Perioden	62
4.5	Volumina und Volumsänderungen	67
4.5.1	Bestimmung der Volumina	67
4.5.2	Ergebnisse	67
4.5.3	Unsicherheiten	68
5	Veränderungen des Gletschers im Zusammenhang mit dem Klima	71
5.1	Aufzeichnung des Wetters am Hallstätter Gletscher	72
5.1.1	Wetterstation Simonyhütte	72
5.1.2	Niederschlagsmessung	73
5.2	Klimarekonstruktion	76
5.2.1	Datengrundlage	76
5.2.2	Temperatur Simonyhütte 1851 - 2008	79
5.2.3	Niederschlag Simonyhütte 1858 - 2008	82
5.2.4	Einordnung der Witterung der Massenhaushaltsjahre 2006/2007 und 2007/2008	84
5.3	Beschreibung einzelner Klimaperioden und Auswirkung auf die Volums- änderungen des Gletschers	86
6	Numerische Simulation der Volumsverluste 1859 - 2007	91
6.1	Die Gradtagmethode nach Hoinkes und Steinacker	91
6.2	Ergebnisse	92
7	Szenario	95
7.1	Erstellung der Szenarien	95
7.2	Ergebnisse	95
8	Zusammenfassung und Ausblick	99

Literatur	102
Abbildungsverzeichnis	114
Tabellenverzeichnis	117
A Anhang	119
Danksagung	137
Curriculum Vitae	138

Kapitel 1

Vorbemerkungen

1.1 Einleitung

Gletscher sind sensitive Klimaindikatoren. Ändert sich das Klima, reagiert der Gletscher mit Änderungen des Gesamtvolumens und der Fläche. Dabei sind Temperatur, Niederschlag und Strahlung die wichtigsten Klimaparameter. Sie beeinflussen Schmelze und Akkumulation sowie das Verhältnis zwischen Zehr- und Nährgebiet eines Gletschers. Gletscher haben wiederum Einfluss auf das Klima. Neben der Beeinflussung lokaler Windsysteme sind sie in ihrer Gesamtheit Bestandteil des Strahlungshaushaltes der Erde. Durch das Verschwinden von reflektierenden Eisflächen sinkt die Albedo. Damit verstärkt sich die Strahlungsabsorption der Erdoberfläche und es folgt eine Erwärmung der unteren Luftschichten. Den Gletschern kommt auch eine Speicherfunktion im Wasserhaushalt zu. Sie haben Einfluss auf die Menge und Saisonalität von Gebietsabflüssen. Erhöhte Schmelze und der damit verbundene Massenverlust der Gletscher tragen weiter zum Meeresspiegelanstieg bei (Lemke et al., 2007). Die Unsicherheiten bezüglich der weiteren Entwicklung von Gletschern sind noch sehr groß, da der komplexe Zusammenhang zwischen Gletscher und Klima schwer zu erfassen ist. Eine Möglichkeit den Zusammenhang zwischen Gletscheränderungen und Klima herzustellen, ist Massenbilanzmessungen an Gletschern in Verbindung mit meteorologischen Beobachtungen durchzuführen. Weltweit gibt es aber nur wenige Gletscher, deren Massenbilanz direkt gemessen wird. Lange Zeitreihen der Massenbilanzen an Gletschern sind rar. Die meisten von Ihnen existieren in den Alpen. In Österreich werden dennoch an weniger als 1% der Gletscher Massenbilanzmessungen durchgeführt. Die Extrapolation von gemessenen Massenbilanzen auf andere Gletscher erweist sich dabei als schwierig, da die Reaktionszeit und die folgende Massenänderung eines Gletschers von einer Reihe Faktoren wie Form, Exposition und Steilheit abhängig sind. Ein nahezu an allen Gletschern der Alpen sichtbares Klimasignal ist der Hochstand der Gletscher um 1850. Seit dieser Zeit befinden sich die Alpengletscher bis heute in einem flächenhaften Rückgang und verlieren an Mas-

se. In rund 150 Jahren wurde die Gletscherfläche der Alpen rund 50% kleiner (Gross, 1987; Zemp et al., 2006; Lambrecht und Kuhn, 2007). In diesem Zeitraum waren längere Perioden mit für Gletscher ungünstigen Jahresverläufen der Witterung nur von wenigen kühlen und schneereichen Vorstoßperioden, welche wie um 1910, 1920 und 1980 zu Vorstößen führten, unterbrochen. In den letzten zwei Jahrzehnten waren die Massenbilanzen der Alpengletscher überwiegend negativ. So auch die des in den nördlichen Kalkalpen gelegenen Hallstätter Gletschers. Der Hallstätter Gletscher am Dachstein wurde aufgrund seiner langen Forschungsgeschichte sowie seiner besonderen klimatischen Lage am Alpennordrand für den Beginn einer neuen Massenbilanzreihe ausgewählt. Im Gegensatz zu inneralpinen Gletschern erfährt der Hallstätter Gletscher ein Klima mit mehr Niederschlag und ist in geringerer Höhe gelegen. Zudem ist der größte Gletscher am Alpennordrand. Mit den Daten der direkten Massenbilanzmessung am Hallstätter Gletscher in Verbindung mit den meteorologischen Beobachtungen in Gletschernähe wird die Beziehung zwischen Massenänderungen des Gletschers und den dafür verantwortlichen Klimaparametern erforscht, um schlussendlich das Verständnis dieser Beziehungen in eine Modellierung von Massenänderungen des Hallstätter Gletschers umzusetzen.

1.2 Ziel und Struktur der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, Informationen über die Veränderungen des Hallstätter Gletschers seit seinem letzten Hochstand zusammenzutragen, den Rückzug in Zahlen darzulegen und anhand aktueller Messungen und einer Klimarekonstruktion die Reaktion des Massenhaushaltes auf die Klimaänderungen der vergangenen 150 Jahre zu modellieren.

Einführend werden die geographische sowie klimatische Lage des Hallstätter Gletschers beschrieben. Seine Charakteristik sowie die wissenschaftliche Erforschung ist Thema von Kapitel 2. In Kapitel 3 werden Vorgehensweise und Ergebnisse zu Untersuchungen bezüglich der jährlichen Massenbilanz des Hallstätter Gletschers behandelt. Eine Auswertung von geodätischen Informationen beschreibt den in Kapitel 4 dargelegten Rückzug des Gletschers seit seinem Hochstand 1856. Auf Grundlage der in Kapitel 5 rekonstruierten Temperatur- und Niederschlagsreihe für den Hallstätter Gletscher werden in Kapitel 6 Massenbilanzen und Volumensunterschiede der vergangenen 150 Jahre modelliert. Kapitel 7 gibt einen Einblick auf mögliche Szenarien der Gestalt des Gletschers bei fortschreitenden gletscherungünstigen Verhältnissen. Eine Zusammenfassungen sowie ein Ausblick auf weiterführende Forschungen folgen in Kapitel 8.

1.3 Verwendete Software

Zur Gewinnung sowie Auswertung der in dieser Diplomarbeit erhobenen Daten wurde folgende Software verwendet:

ArcGis 9.1 Für die Generierung, Verwaltung und Analyse raumbezogener Daten wurde die GIS (Geographisches Informations System) Software ArcGis 9.1 der Firma *ESRI* genutzt. Mit ArcMap können verschiedene Features und Datensätze in einem Koordinatensystem dargestellt und verarbeitet werden. Neben der Darstellung der mit dem GPS gemessenen Positionen der erhobenen Daten ermöglicht ArcMap die Rektifizierung von nicht georeferenzierten Daten, die Erstellung benutzerdefinierter Features sowie die Verschneidung verschiedener Informationen. Diese Funktionen stehen ebenfalls in ArcCatalog zur Verfügung. Zur Visualisierung der Daten wurde neben dem ArcMap Layout auch die Möglichkeit der 3D-Darstellung mit ArcScene 9.1. genutzt.

GPS Pathfinder Office 4.0 GPS Pathfinder Office der Firma *Trimble* wurde zur Nachprozessierung der mittels differentiellen GPS aufgenommen Positionsdaten verwendet.

Touratech QV 3.0.135 Die GPS-Software Touratech QV wurde zum Einlesen der mit einem Garmin Hand-GPS-Gerät aufgenommenen Positionsdaten eingesetzt.

Matlab 7.1 Matlab ist eine Software zum Lösen und Visualisieren mathematischer Rechnungen der Firma *The MathWorks*, dessen Stärke in der Verarbeitung von Matrizen liegt. Einer Programmiersprache gleich können neben vorprogrammierten Tools auch benutzerdefinierte Programme geschrieben und ausgeführt werden.

Microsoft Excel 2003 Die Software MS Excel der Firma Microsoft bietet eine einfache und weit verbreitete Möglichkeit der Tabellenkalkulation. Sie wurde zur Digitalisierung, Auswertung und teilweisen Visualisierung der Felddaten gewählt.

Kapitel 2

Der Hallstätter Gletscher

2.1 Lage und Merkmale

Der Hallstätter Gletscher ist im österreichischen Dachsteingebirge gelegen (47°28'50" N, 13°36'50" O). Geographisch ist das Dachsteingebirge isoliert von den Bergen des Alpenhauptkammes und bildet den nordöstlichsten vergletscherten Gebirgszug der Alpen (Abb. 2.1). Mit einer Fläche von 3,04 km² (Stand 2007) ist der Hallstätter Gletscher der größte Gletscher der nördlichen Kalkalpen. Neben dem Hallstätter Gletscher befinden sich im zentralen Teil der Dachsteingruppe noch sechs weitere Gletscher, deren summierte Fläche geringer ist als die des Hallstätters (Krobath und Lieb, 2004). Begünstigend für die Existenz von Gletschern wirken sich im zentralen Teil des Dachsteinstockes die absolute Höhe sowie das Vorhandensein von größeren flachen Karmulden in einer Höhe von über 2500 Metern aus, welche als Firnsammelgebiete dienen. Entlang der zentralen Fließlinie beträgt die Länge des Hallstätter Gletschers etwa 1900 m. Nordöstlich ausgerichtet erstreckt sich der Gletscher in einem Höhenbereich von 2178 m bis 2900 m. Der höchste Punkt des Hallstätter Gletschers liegt unterhalb des Gipfels des Hohen Dachsteins. In Fließrichtung schließt sich ein größeres Plateau an. In der Höhenstufe von 2550 m bis 2650 m befindet sich mit 1,076 km² mehr als ein Drittel der Gesamtfläche (Abb. 2.1). Nach einer steileren Stufe teilt sich der Gletscher in drei Zungen. Die östliche wird dabei aus einem Becken nördlich des Dirndl genährt. Das Einzugsgebiet der mittleren Zunge befindet sich westlich des im Gletscher gelegenen Eissteins (2654 m). Das unter den Wänden des Kreuzkammes gebildete Eis nährt die westliche Zunge.

Die Teilung des Gletschers in die drei Zungen ist eine Folge der Karstfläche, auf der der Gletscher gelegen ist. Diese Verwitterungsform des Kalkes ist gekennzeichnet durch becken- und dolinenartige Vertiefungen sowie felsige Steilstufen zwischen ihnen. So wird die am tiefsten reichende, in einer Mulde liegende mittlere Zunge von Felsen flankiert. Diese freiliegenden Felspartien erhöhen durch ihre Wärmeleitung und langwellige Abstrahlung die Ablation. Der unterirdische Abfluss des Schmelzwassers ist eine weitere

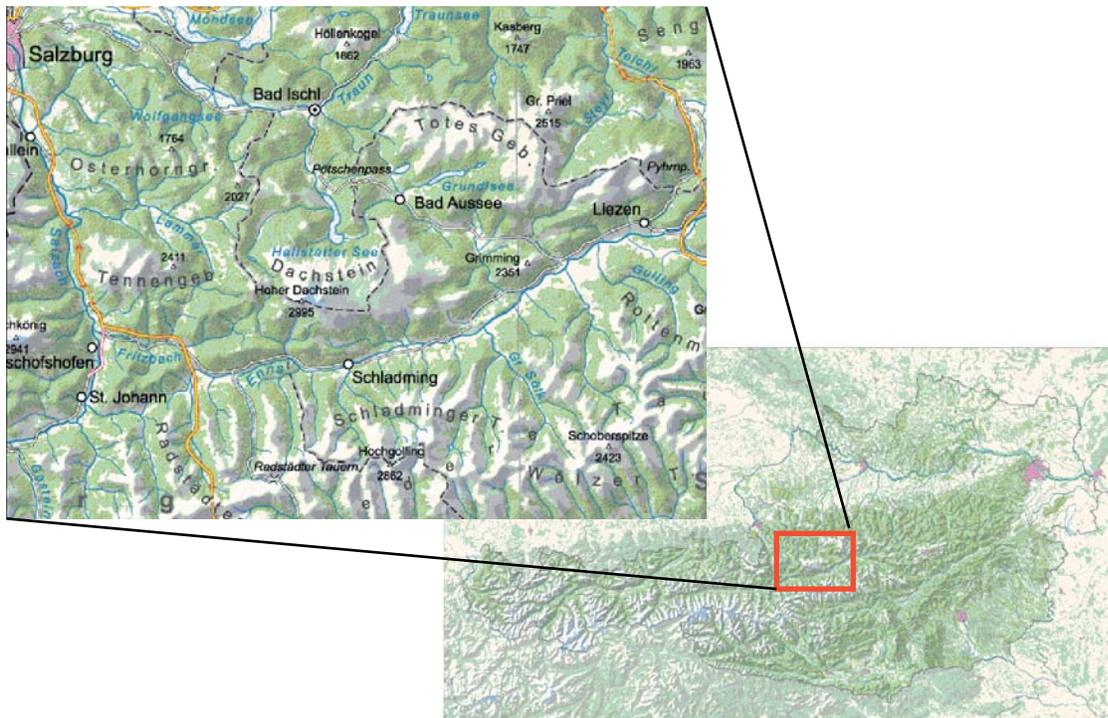


Abbildung 2.1: Topographische Übersicht Österreichs (Hydrologischer Atlas, 2003). Der Ausschnitt zeigt das Dachsteinmassiv mit umliegender Topographie, Fließgewässern und Ortsnamen.

Eigenschaft des Karstgebirges. So tritt das Schmelzwasser des Hallstätter Gletschers wie bereits von Simony (1895) beschrieben am Waldbachursprung zu Tage. Tägliche Schwankungen der Wasserführung verzögert zum Abschmelzverhalten des Gletschers, die geringe Wassertemperatur des austretenden Schmelzwassers sowie das deutliche Maximum zur Ablationssaison lieferten eindeutige Hinweise. Endgültig wurde dies von Mayr (1956) unter Verwendung einer Pollenanalyse nachgewiesen. Demnach findet sich auch ein Abfluss am Fuße der Dachsteinsüdwand in der Quelle des Marbaches.

Wie in Abbildung 2.1 ersichtlich umgeben mehrere Gipfel sowie bis zu über 200 m hohe Wände den Gletscher. Im Südosten ist der Hallstätter mit dem Schladminger Gletscher verbunden. Im Süden wird er von Dirndl (2818 m), dem Hohen (2996 m) sowie dem Niederen Dachstein (2934 m) begrenzt. Im Westen schließt sich nach der Simonyscharte der Kamm des Hohen (2837 m) sowie des Niederen Kreuzes (2651 m) an. Die begrenzenden Wände östlich des Gletschers bilden den Kamm des Hohen Gjaidsteines (2794 m).

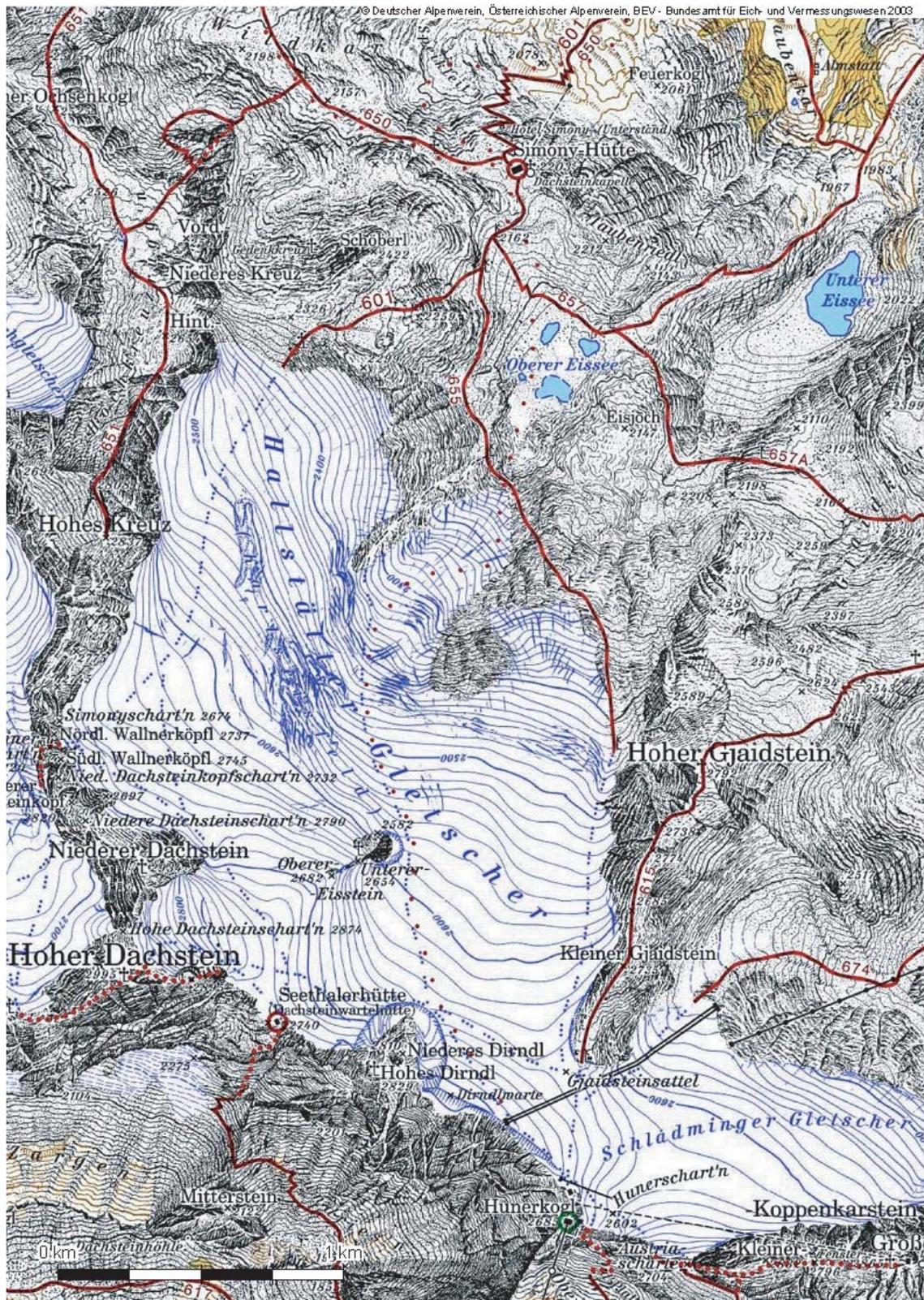


Abbildung 2.2: Darstellung des Hallstätter Gletschers aus der Karte des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen 2003 mit Gletscherstand 1991.

Erreichbar ist der Hallstätter Gletscher zu einem von südlicher Seite durch Übergang vom mit einer Seilbahn erschlossenen Schladminger Gletscher. Weiter kann man über die nahe der Simonyscharte gelegenen Steinerscharte vom Gosauer auf den Hallstätter Gletscher gelangen. Vom nördlich gelegenen Hallstatt sowie dem Koppenkarstein ist der Gletscher ebenfalls über markierte Wege durch die vom Karst geprägte Landschaft zu erreichen. Auf dem Sattel zwischen Dirndl und Hohen Dachstein befindet sich die bewirtschaftete Seethaler Hütte (Dachsteinwarte). Nördlich des Gletschers ist die Simonyhütte gelegen.

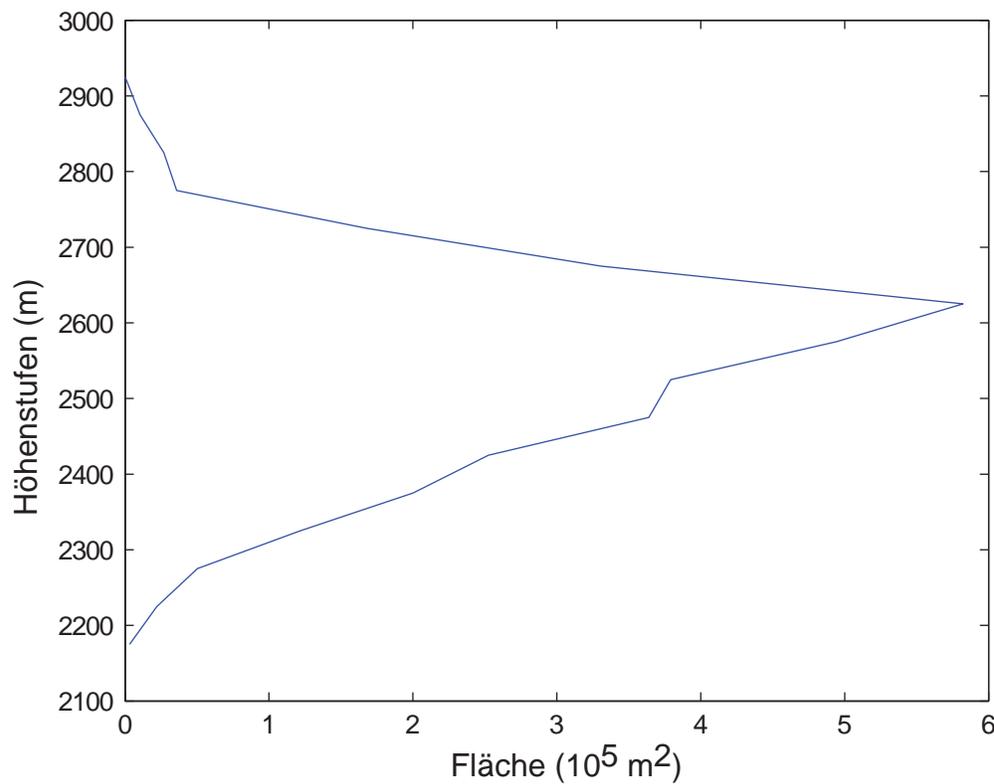


Abbildung 2.3: Flächen-Höhenverteilung des Hallstätter Gletschers nach Digitalem Geländemodell 2007 (Land Oberösterreich).

Aus klimatologischer Sicht liegt der Hallstätter Gletscher in einer die Entwicklung eines Gletschers begünstigenden Lage. Die von West über Nord bis Ost advehierten Niederschläge und feuchten Luftmassen liefern aufgrund von Stauwirkungen am Alpennordrand deutlich höhere Niederschlagssummen als diese in inneralpinen Regionen vorzufinden sind (Abb. 2.1). Damit kann der Gletscher in geringerer Höhe existieren.

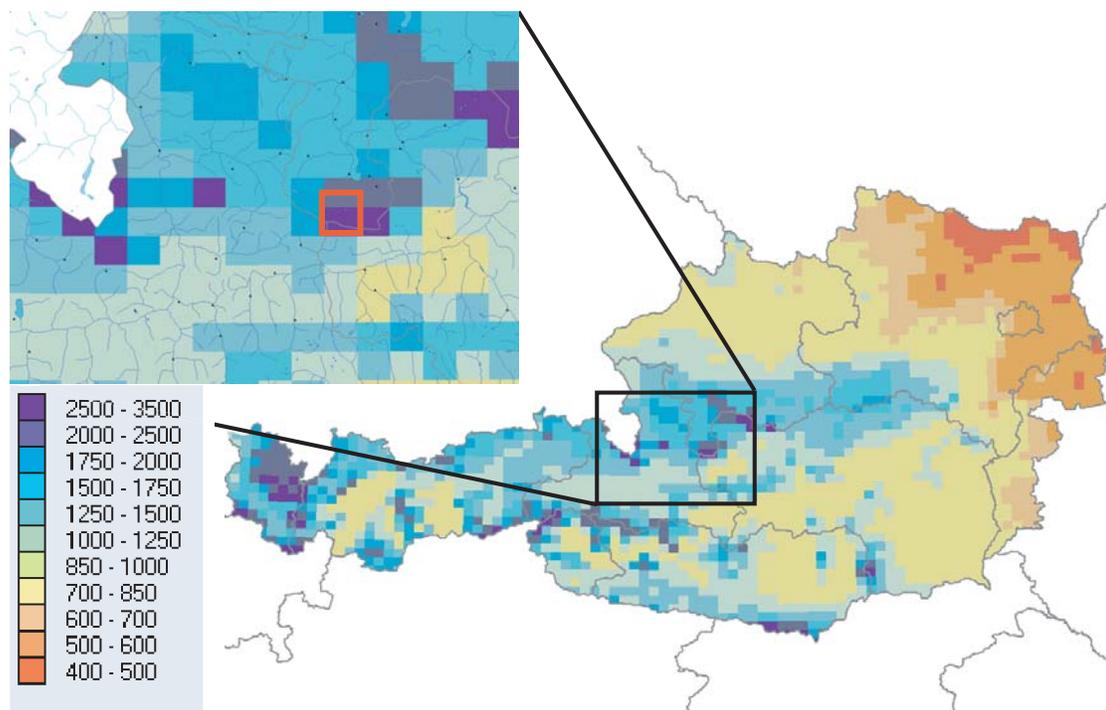


Abbildung 2.4: Mittlere Jahresniederschlagsmenge in mm (Hydrologischer Atlas 2003). Im Ausschnitt rot markiert die Lage des Hallstätter Gletschers.

2.2 Wissenschaftliche Erforschung

Ursprünglich wurde der Gletscher nach Erzherzog Karl (5.9.1771 - 30.4.1847), welcher ihn 1812 betrat, Karls-Eisfeld benannt. Im Oktober 1840 besuchte erstmalig Friedrich Simony den Gletscher. Fortan widmete er einen Großteil seiner Forschung dem im Jahre 1890 in Hallstätter Gletscher umbenannten Gletscher. Über 50 Jahre beobachtete er die Veränderungen des Eiskörpers und dokumentierte sie schriftlich sowie in Form von Zeichnungen und Photographien (Simony 1871; 1883; 1884a; 1884b; 1885; 1886; 1891; 1895). Dabei beschrieb er den Vorstoß des Gletschers bis zum Gletscherhochstand 1856 wie auch den folgenden Zerfall. Nach den ungenauen kartographischen Darstellungen der Ersten und Zweiten Landesaufnahme der Jahre 1769/1772 und 1821 lieferte die 1872/73 erfasste III. österreichische Landesaufnahme („Schladming und das Dachsteingebiet“, Maßstab 1 : 25000) eine erste auswertbare Darstellung des Eisfeldes. Die daraus entnommenen Flächenwerte veröffentlichte Richter (1888) in Verbindung mit Versuchen zur Schneegrenzbestimmung am Hallstätter Gletscher. Diese Flächenwerte wurden ebenfalls von Kurowski (1889) aufgegriffen. Im Jahre 1896 erstellte M. Groller von Mildensee eine erste Karte des Karlseisfeldes im Maßstab 1 : 12500. Die auf einer Mess-tischaufnahme beruhende topographische Darstellung konnte den Ordinarius für Geographie der Universität Wien aber nicht überzeugen. Wenig später erfolgte in den Sommern

der Jahre 1899 und 1900 durch A. Hübl eine photogrammetrische Aufnahme des Dachsteingletschers. Die daraus resultierende Karte im Maßstab 1 : 10000 erzielte eine sehr hohe Genauigkeit. Im Jahre 1903 veröffentlichte Böhm eine Gesamtdarstellung der bis dahin erworbenen Forschungsergebnisse sowie Zahlen bezüglich des Eismassenverlustes seit 1856 planimetrisch ausgemessen aus der Karte von Hübl. Penck und Brückner (1909) beschrieben spätglaziale Gletscherstände im Dachsteingebiet. Eine weitere, gletscherkundlich sehr gut auswertbare Karte wurde 1915 vom Deutschen und Österreichischen Alpenverein im Maßstab 1 : 25000 herausgegeben. Die von L. Aegerter geleiteten topographischen Aufnahmen wurden dabei von der kartographischen Anstalt G. Freytag und Berndt (Wien) umgesetzt. Anhand dieser Karte führte (Krebs, 1915) neue Flächenwerte an und gab eine zusammenfassende geographische Darstellung des Dachsteingruppe. Auch 1918 schreibt Krebs über die Vergletscherung der Dachsteingruppe. Brückner (1917) begann mit eingehenden glaziologischen Untersuchungen zur Zeit des Vorrückens der Dachsteingletscher zu Beginn des 20. Jahrhunderts. L. Lichtenecker 1928; 1931 beobachtete in Folge den Rückzug des Eises. Kinzl schrieb 1929 über Gletscherschwankungen in den Ostalpen und untersuchte um Zuge dessen Moränen im Vorfeld des Hallstätter und des Gosauer Gletschers. Ab 1930 wurden fortlaufende Beobachtungen durch den Deutschen und Österreichischen Alpenverein zuerst unregelmäßig, anschließend jährlich durchgeführt (Wannenmacher, 1986). Gletscherschwankungen in der Zeit von 1911 bis 1941 wurden von Klebelsberg (1943) dokumentiert. Im Jahre 1954 erschien die geologische Karte der Dachsteingruppe im Maßstab 1 : 25000. Auf Grundlage der Aegerter'schen Karte von 1915 wurde diese Darstellung von O. Ganns, F. Kümel und G. Neumann aufgenommen und der Gletscherstand von 1938 eingezeichnet. Radio-Radiis veröffentlichte 1932 den "Führer durch das Dachsteingebirge". 1951 und 1952 widmeten sich E. Arnberger und Wilthum; Arnberger und Wilthum den Gletschern des Dachsteinstockes. Neben Beschreibungen von Gletscherschwankungen, Moränenkartierungen und graphisch dargestellten Mittelungen der Temperatur und des Niederschlages berechneten sie Flächen- und Rückzugsbeträge der Gletscher. Die von Moser (1954) veröffentlichte Dissertation behandelt die Vergletscherung des Dachsteinstockes und deren Spuren im Laufe der Zeit. Eine weitere Karte des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins im Maßstab 1:25000 mit einem gut auswertbaren Gletscherstand wurde 1958 herausgegeben. Im Rahmen der Internationalen Hydrologischen Dekade wurden 1967 und 1968 seismische Messungen zur Ermittlung der Verteilung der Eisdicke durchgeführt (Brückl et al., 1969). Flächenwerte für den Hallstätter Gletscher auf Grundlage eines aus Orthophotos erstellten digitalen Geländemodells (DGM) für 1969 lieferte das erste Österreichische Gletscherinventar (Gross, 1987). 1992 belegt die neue Dachsteinkarte des Österreichischen Alpenvereins den Gletscherstand von 1991. Eine Zusammenfassung der Geschichte und Forschungsergebnissen rund um den Hallstätter Gletscher präsentiert Moser (1997). Eine Neuaufnahme des DGM erfolgte unter Verwendung von Photogrammetrie im Jah-

re 2002 (Lambrecht und Kuhn, 2007). 2004 wird eine Ausgabe der Wissenschaftlichen Alpenvereinshefte dem Hallstätter Gletscher gewidmet, wobei näher auf die Karte von Hübl, die Person Friedrich Simony sowie die Veränderung des Gletschers im 20. Jahrhundert eingegangen wird (Brunner, 2004).

Kapitel 3

Massenbilanzmessungen 2006 - 2008

Massenbilanzmessungen geben Aufschluss darüber, ob ein Gletscher innerhalb eines Zeitraumes an Masse gewinnt oder verliert. Der Massenhaushalt eines Gletschers ist dabei eng mit dem Klima verbunden. Änderungen des Klimas rufen Änderungen in Ausdehnung und Masse eines Gletschers hervor. Einen Massengewinn stellt der feste Niederschlag in der kalten Jahreszeit dar. In den wärmeren Monaten bauen Schmelze und Verdunstung die im Winter akkumulierte Schneedecke ab bis Eis ausapert. In Folge führt die Eisablation zu Massenverlust bis neuerlich ausreichend feste Niederschläge eine geschlossene Schneedecke bilden. Bleibt am Ende eines Beobachtungszeitraumes mehr Wasser in Form von Schnee und Eis auf dem Gletscher liegen, als durch Schmelze und Verdunstung verloren geht, ist die Massenbilanz positiv. Überwiegt der Massenverlust gegenüber den Rücklagen, so zeichnet sich eine negative Bilanz ab.

3.1 Definitionen

Im Folgenden werden die Definitionen für Größen der Massenbilanz und deren Beziehungen nach Anonymous (1969) und Paterson (1994) beschrieben. Zum Akkumulation genannten Massengewinn eines Gletschers trägt hauptsächlich der feste Niederschlag über der Gletscheroberfläche bei. Schneedrift und Lawinen von den umliegenden Erhebungen, Aufeis oder Reif sind weitere Prozesse der Akkumulation. Der als Ablation bezeichnete Massenverlust eines Gletschers wird bei alpinen Gletschern vor Allem durch die oberflächliche Schmelze bestimmt. Zusätzlich können Verdunstung, Winddrift sowie Lawinen vom Gletscher zum Massenverlust beitragen. Der im Verhältnis zur Ablation an der Gletscheroberfläche sehr geringe Betrag der basalen Schmelze an der Gletscherunterseite kann vernachlässigt werden. Um den Massengewinn in Form von Schnee und den Verlust des Eises vergleichen zu können, werden diese Werte in Volumen Wasseräquivalent (w_e) pro Einheitsfläche ausgedrückt ($\frac{m^3 w_e}{m^2}$). Üblich ist die Einheit der Länge mm . Das Massenhaushaltsjahr beschreibt die Massenänderung zwischen zwei Minima der Gesamt-

masse eines Gletschers (t_1, t_2). Im alpinen Klima unterteilt man diesen Zeitraum in eine Akkumulations- und eine Ablationsperiode, welche durch den Zeitpunkt des maximalen Wasseräquivalents der Winterschneedecke (t_m) getrennt werden. Die Akkumulationsrate \dot{c} stellt den Massenzuwachs in einer gegebenen Zeit an einem Punkt dar. Negative Werte werden durch die Ablationsrate \dot{a} beschrieben. Die Integration dieser Raten über ein Zeitintervall liefert die Akkumulation c und Ablation a (Gl. 3.1).

$$b = c + a = \int_{t_1}^t (\dot{c} + \dot{a}) dt \quad (3.1)$$

Begrenzt man das Intervall auf den Zeitraum der Bilanz (t_1 bis t_2) erhält man die gesamte Akkumulation c_t und die gesamte Ablation a_t . Aus deren Summe ergibt sich die spezifische Bilanz (Nettobilanz) b_n . Weiter lässt sich diese spezifische Bilanz in eine Winter- und in eine Sommerbilanz (b_w und b_s) aufteilen, welche wiederum aus Winterakkumulation c_w , Winterablation a_w , sowie Sommerakkumulation c_s und Sommerablation a_s gebildet werden (Gl. 3.2, Abb. 3.1).

$$b_n = b_w + b_s = c_w + a_w + c_s + a_s = \int_{t_1}^{t_m} (\dot{c} + \dot{a}) dt + \int_{t_m}^{t_2} (\dot{c} + \dot{a}) dt \quad (3.2)$$

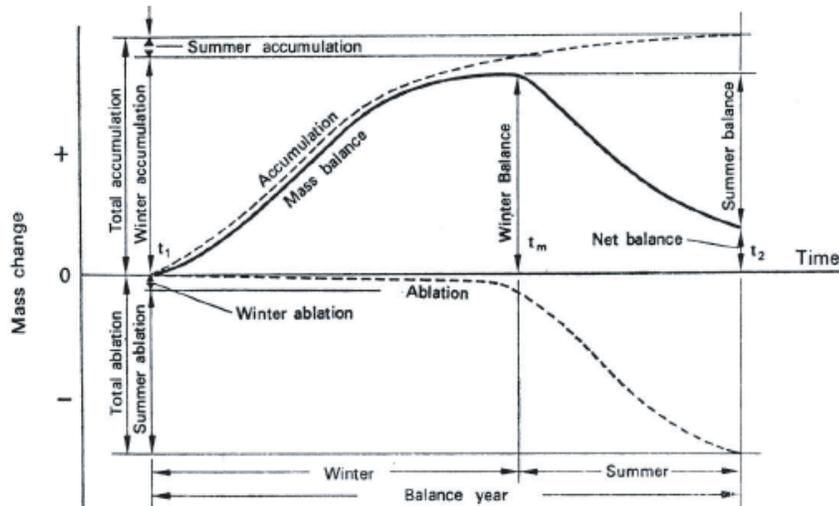


Abbildung 3.1: Darstellung der Massenbilanzgrößen nach Paterson (1994).

Massenbilanzgrößen eines Gletschers können neben den punktuellen Aussagen auch auf eine Fläche bezogen werden. Die Terme der Bilanz werden dann mit Großbuchstaben gekennzeichnet und besitzen die Einheiten des Volumens. Dabei wird die mittlere spezifische Bilanz (mittlere Nettobilanz) \bar{b}_n durch Division der Nettobilanz der Fläche B_n mit der Fläche S des Gletschers gegeben (Gl. 3.3). In dieser Form wird üblicherweise die Massenbilanz eines Gletschers beschrieben.

$$b_n = c + a = \frac{B_n}{S} \quad (3.3)$$

Bei der Bilanzierung des Massenhaushaltes eines Gletschers tritt allerdings das Problem auf, dass die Zeitpunkte der minimalen Masse und der maximalen Schneedecke und damit des Bilanzzeitraumes sowohl für die spezifische Bilanz als auch für die Winterbilanz nicht an allen Stellen des Gletschers die gleichen sind. Aus diesem Grund werden die Massenbilanzen eines Gletschers üblicherweise in Jahresbilanzen zwischen fixen Daten erhoben. Hier orientiert man sich an dem hydrologischen Jahr vom 1.10. bis 30.9. des darauffolgenden Jahres. Dies trägt auch dazu bei, die Bilanzmessungen verschiedener Gletscher vergleichen zu können. Dabei wird diese Zeitspanne nochmals in eine Akkumulationsperiode (1.10.-30.04.) und eine Ablationsperiode unterteilt (1.5.-30.9.). Damit ergeben sich:

$$t_1 = 1.10. \quad (3.4)$$

$$t_2 = 30.09. \quad (3.5)$$

$$t_m = 1.05. \quad (3.6)$$

3.2 Die direkte glaziologische Methode

Bei der direkten glaziologischen Methode wird die spezifische Bilanz an für größere Flächen möglichst repräsentativen Punkten gemessen (Hoinkes, 1970; Paterson, 1994). Dabei gilt es zu einem die Akkumulation in dem Bereich des Gletschers zu erfassen, in dem er durch Schnee- und Eisrücklage am Ende eines Bilanzzeitraumes an Masse gewinnt (Akkumulationsfläche S_c). Zum Anderen muss der Massenverlust der Ablationfläche (S_a) erhoben werden. Aus der Addition der Bilanzen beider Teilflächen des Gletschers ergibt sich die Nettobilanz (Gl. 3.7).

$$B_n = B_c + B_a = \int_{S_c} b_n dS + \int_{S_a} b_n dS \quad (3.7)$$

Wie zuvor erwähnt (Kapitel 3.1) kann die Jahresbilanz des hydrologischen Jahres zusätzlich in eine Winter- und eine Sommerbilanz unterteilt werden. Während die Winterbilanz nach Gleichung 3.7 ermittelt wird, wird die Sommerbilanz aus der Differenz von Jahres- und Winterbilanz erhoben.

Zur Feststellung der Akkumulation wird unter Ermittlung der räumlichen Verteilung der Höhe und der Dichte der vorhandenen Schneedecke das entsprechende Wasseräquivalent errechnet. Um die Mächtigkeit sowie die Dichte der Schneedecke und die Lage des Horizontes zu ermitteln, werden im Firngebiet Schneeschächte gegraben. Der Sommerhorizont des Vorjahres ist meist deutlich durch eine Schmutzschicht und einer Tiefenreifschicht gekennzeichnet. Dieser Horizont kann auch die im Vorjahr ausgeaperte Eisoberfläche sein. Das Wasseraquivalent des darüber befindlichen Schnees ist die Akkumulation.

Mit einem Dichteabstich wird ein Dichte-Höhen-Profil des Schachtes (Anhang Abb. A.1 bis A.13) erstellt und eine mittlere Schneedichte errechnet. Die Höhe der Schneedecke im Bereich der Gletscherzunge wird mit Lawinsonden gemessen. Bei ungünstigen Bedingungen wie erhöhter Akkumulation, starken Eislinsen oder bei Fehlen eines ausgeprägten Horizontes im Firngebiet, ist diese Art der Bestimmung sehr ungenau. Dann kann unter Verwendung eines 200MHz-Georadars (GPR - ground penetrating radar) interne Grenzschichten sowie die Grenzschicht zwischen Schnee und Eis erfasst werden. Extrapoliert man die mittlere Dichte der Schneeschächte auf die sondierten Schneehöhen erhält man das Wasseräquivalent der Schneedecke an den Messpunkten.

Die Ablation an den im Sommer ausapernden Gletscherflächen wird mit Ablationspegeln gemessen. Zwei Meter lange Stangen werden miteinander verbunden und sechs beziehungsweise acht Meter ins Eis gebohrt. Anfangs bündig mit der Gletscheroberfläche, kommen sie aufgrund der Ablation langsam zum Vorschein. Anhand der Änderung des freien Endes kann dann an diesem Punkt die Höhe der Eisablation abgelesen werden. Die Ablesung erfolgt mehrmals in der Ablationssaison, um durch einen optischen Vergleich des Verlaufes des einzelnen Pegels zu den umliegenden Messpunkten (Anhang Abb. A, A) die Plausibilität der Messung zu kontrollieren und etwaiges Aufschwimmen des Pegels zu erkennen. Das Wasseräquivalent der Eisablation wird aus dem Dickenverlust an der Eisoberfläche mit einer angenommenen Dichte von $900 \frac{kg}{m^3}$ bestimmt.

Die mittels GPS georeferenzierten Daten des Wasseräquivalents (*we*) der Akkumulation sowie der Ablation wurden in ArcGIS visualisiert und über die Fläche des Gletschers händisch interpoliert. Diese Art der Interpolation erweist sich als praktikabel, da persönliche Aufzeichnungen sowie weitere Hilfsmittel wie Fotos oder Webcamaufnahmen zur Erstellung des Ablationsmusters einbezogen werden können. Im Bereich der Ablation wird dabei ein Isolinienintervall von 500 mm *we* gewählt. Die Akkumulationsswerte werden in 250 mm *we* Intervallen dargestellt (Abb. 3.7). Die zwischen den Bereichen der Akkumulation und der Ablation befindliche Isolinie mit dem Wert 0 mm *we* wird als Null- oder Gleichgewichtslinie bezeichnet. Die so erhaltenen Isolinien der spezifischen Bilanz werden anschließend mit Konturlinien der Höhe in 50-m-Stufen unterteilt. Die daraus resultierenden Polygone besitzen nun die Informationen der Fläche, der Höhenstufe und der mittleren spezifischen Bilanz. Summiert man die Produkte der Teilflächen einer Höhenstufe mit den dazugehörigen spezifischen Bilanzen erhält man die Nettobilanz einer Höhenstufe. Teilt man diese durch die Gesamtfläche der Höhenstufe erhält man die mittlere spezifische Bilanz der Höhenstufe. Die Nettobilanz des Gletschers ergibt sich aus der Summe der Produkte der mittleren spezifischen Bilanz einer Höhenstufe und deren Fläche. Teilt man diese wiederum durch die Gesamtfläche, so erhält man die mittlere spezifische (Jahres-)Bilanz des Gletschers.

Messungen mit der direkten glaziologischen Methode sind zwar sehr aufwendig, bieten aber räumlich und zeitlich gut aufgelöste Ergebnisse. Mit steigender Dichte der Messun-

gen kann eine höhere Genauigkeit erzielt werden. Zu Fehlern kann es kommen, wenn die ausgewählten Messpunkte nicht repräsentativ für die umliegenden Flächen sind. In größeren Spaltengebieten können zudem keine Messungen vorgenommen werden. Weitere Fehler stellen die sich jährlich verändernde Gletscherfläche sowie nicht berücksichtigte zusätzliche Akkumulation durch Lawinen in Randbereichen dar. Ablesefehler im Bereich von wenigen Zentimetern können ebenso auftreten wie systematische Fehler bei der Schneedichtebestimmung. Der kumulierte Fehler der mittleren spezifischen Jahresbilanz befindet sich in einem Bereich von ± 100 mm we (Kuhn et al., 1999). Zudem ist es hervorzuheben, dass diese Art der Messung nur eine Information der Bilanz an der Gletscheroberfläche bietet. Einsinken des Gletscherkörpers durch Dynamik oder basale Schmelzvorgänge werden durch die direkte glaziologische Methode nicht erfasst.

3.3 Feldmessungen

Das Messnetz zur Messung der Massenbilanz am Hallstätter Gletscher wurde im September 2006 installiert. Am 10. und 11. Mai 2007 wurde die erste Frühjahrsbegehung zur Ermittlung der Winterbilanz durchgeführt. Darauf folgten Begehungen zur Kontrolle und Nachbohren der Ablationspegel am 17.07., 07.08. sowie 23.09.2007. Zu letzteren Termin fand die Herbstbegehung zur Ermittlung der Jahresbilanz statt. Ebenso wurden neben der Frühjahrsbegehung 2008 am 6. und 7. Mai Begehungen zur Kontrolle des Pegelnetzes am 10.07., 11.08. und 27.08.2008 durchgeführt. Die Herbstbegehung erfolgte darauf am 29.09.2008. Abbildung 3.2 zeigt den Stand des Messnetzes im September 2008 mit den Pegeln (DP) und den Schachtpositionen (DS).

3.4 Die Bilanzen als Folge der Witterung

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.

Die klimatischen Randbedingungen für den Hallstätter Gletscher werden durch seine Lage am Alpennordrand bestimmt. Bei Anströmung aus dem nördlichen Sektor treten gegenüber dem österreischen Mittel erhöhte Niederschlagsmengen auf. Dies ist eine Folge luvseitiger Staueffekte an dem für die feuchten Luftmassen zu überwindenden Dachsteingebirge. Während sich im Winter in den oberen Gletscherbereichen eine mehrere Meter mächtige Schneedecke ausbildet, können im Sommer aus Norden eintreffende

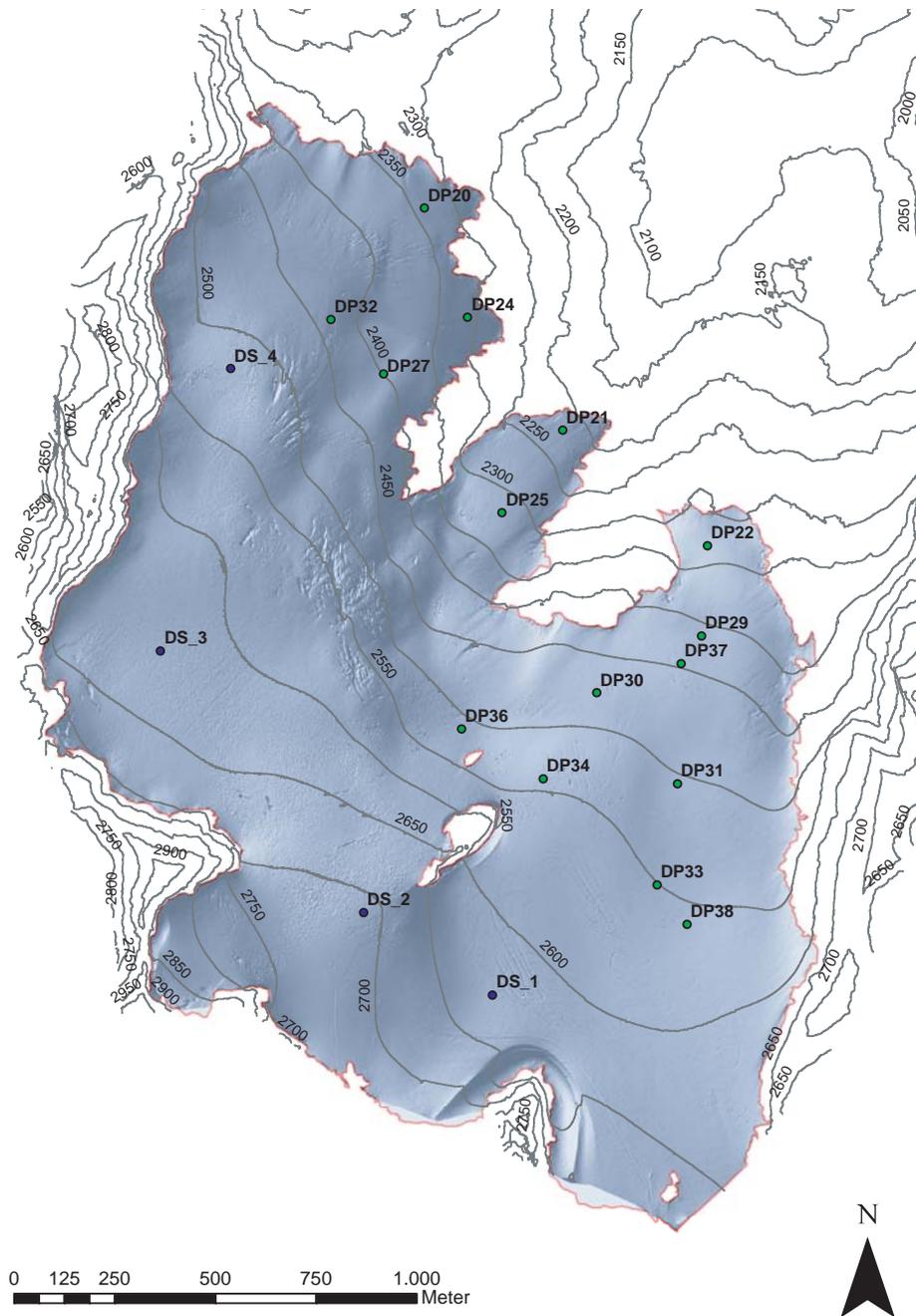


Abbildung 3.2: Darstellung des Messnetzes am Hallstätter Gletscher im September 2008 mit den Pegelpositionen DP und den Schachtpositionen DS auf der Gletscherausdehnung von 2007

kalte Luftmassen zu Akkumulation festen Niederschlages führen. Im Rahmen der Ausarbeitung der Massenbilanzen wird folgend eine qualitative Aussage über Verlauf und Auffälligkeiten der Witterung gegeben. Absolutwerte sowie Anomalien der Temperatur und des Niederschlags direkt am Gletscher finden sich in Kapitel 5.1.1.

3.4.1 Witterungsverlauf 2006/2007

Der Zeitraum der Winterbilanz von Oktober 2006 bis einschließlich April 2007 verlief am Hallstätter Gletscher gegenüber dem Mittel der WMO-Periode von 1961 bis 1990 relativ mild. Die Niederschlagssumme der Wintermonate fiel nur geringfügig negativer aus. Auffällig waren die erhöhten Niederschlagsmengen im Mai, welche überwiegend noch als Schnee fielen und damit den Ablationsbeginn hinauszögerten. Eine Verzögerung der Eisschmelze wurde auch durch feste Niederschläge Anfang Juli bewirkt. Hohe Niederschlagsmengen im September fielen bei kühlen Temperaturen auf dem Gletscher als Schnee und beendeten die Ablationssaison früh. Im Bilanzjahr 2006/2007 folgte also einem durchschnittlichen Winter eine kurze Ablationsperiode mit einer Akkumulation von 0,7 m bis zu 1,5 m Schnee noch vor Ablauf des hydrologischen Jahres.

3.4.2 Witterungsverlauf 2007/2008

Ein kühler Start in die Winterbilanz mit erneut erhöhten Niederschlagsmengen im November bescherten dem Hallstätter Gletscher weiter einen deutlichen Schneedeckenzuwachs. Während die Monate Januar und Februar mild ausfielen, brachte der Monat März erneut hohe, als Schnee akkumulierte Niederschlagsmengen. Der Frühsommer im Mai und Juni zeigte sich warm und trocken. Ab Juli verlief der Sommer ohne feste Niederschläge im Bereich des Hallstätter Gletschers. Der Winter 2007/2008 brachte eine erhöhte Schneeakkumulation. Damit verzögerte sich der Beginn der Ausaperung des Eises um circa 20 Tage gegenüber dem Vorjahr. Über den Sommer traten keine ergiebigen Niederschläge in Form von Schnee auf, welche die Ablation hätten verringern können. Die Ablationssaison dauerte bis zum 13. September an.

3.4.3 Webcam

Als Hilfsmittel zur Bestimmung aperer Flächen und zur Beobachtung des Ablationsverlaufes am Hallstätter Gletscher wurde auf dem Dach der Simonyhütte eine Webcam installiert. Sie liefert stündlich aktuelle Aufnahmen des Gletschers. Dabei sind Zeitpunkte wie die erste Ausaperung von Eis im Bereich der Zunge und der Tag der größten Ausaperung und damit die Dauer der Eisablation gut feststellbar. Auch Niederschlagsereignisse mit Akkumulation einer Schneedecke im Sommer lassen sich erkennen. Abbildungen 3.3 und 3.4 zeigen Zeitreihen von Webcamaufnahmen mit den entsprechenden Daten der

Haushaltsjahre.



Abbildung 3.3: Webcamaufnahmen des Hallstätter Gletschers v.l.n.r. am 27.03., 28.05. und 16.08.2007.



Abbildung 3.4: Webcamaufnahmen des Hallstätter Gletschers von der ersten Ausaperung bis zum Datum der maximalen Ablation. v.l.n.r. am 10.06., 01.07., 01.08. und 12.09.2008.

Zur Feststellung der Schneegrenze ist der Einfallswinkel der Webcam in den oberen Breichen des Gletschers allerdings zu flach. Luftaufnahmen (Abb. 3.5) liefern hierbei zusätzliche Informationen.



Abbildung 3.5: Aufnahme der Ausaperung der Dachsteingletscher aus einem Flugzeug am 11. September 2008.

3.5 Ergebnisse

3.5.1 Jahresbilanz 2006/2007

Die mittlere spezifische Bilanz \bar{b}_n des Hallstätter Gletschers betrug -376 mm we. Dies entspricht einem mittleren Eisdickenverlust der gesamten Gletscherfläche von 42 cm und einem Massenverlust von 1182 Millionen Litern Wasser. Das Verhältniss der Akkumulationsfläche zur Gesamtfläche, auch Accumulation-Area-Ratio (AAR) genannt, lag bei 0,476. Weitere Kennzahlen der Akkumulation sowie der Ablation in den Zeiträumen der Jahres-, Winter- und Sommerbilanz sind der Tabelle 3.3 zu entnehmen. Die Verteilung der spezifischen Jahresbilanz ist in Abbildung 3.7 grafisch dargestellt. Die eingezeichnete Nulllinie trennt die Fläche mit Akkumulation von der Fläche mit Ablation. Abbildung 3.6 zeigt die Verteilung der spezifischen Winterbilanz. Die Verteilung der Nettobilanz in 50 m-Höhenstufen sowie die jeweiligen Flächenanteile zeigt die Abbildung 3.8. Die entsprechenden Werte sind der Tabelle 3.2 zu entnehmen. Auf gleiche Weise ist die Verteilung der Winterbilanz auf die Höhenstufen in Tabelle 3.1 ersichtlich. Aus der in Abbildung 3.9 gezeigten mittleren spezifischen Bilanz der Höhenstufen ist die Höhe der Gleichgewichtslinie (engl.: equilibrium line altitude - ELA) als Schnittpunkt zwischen Bilanzkurve und dem Wert $\bar{b} = 0$ ablesbar. Sie befand sich am Hallstätter Gletscher im Haushaltsjahr 2006/2007 auf einer Höhe von 2583 m. Einen Vergleich zu den Jahresbilanzen der Gletscher Hintereisferner, Kesselwandferner (Ötztal) und Jamtalferner (Silvretta) bietet die Tabelle 3.4.

Höhenstufe	Fläche	B	\bar{b}
m	km^2	$10^3 m^3$	mm
2150 - 2200	0,015	4	250
2200 - 2250	0,028	7	250
2250 - 2300	0,057	24	425
2300 - 2350	0,126	76	606
2350 - 2400	0,212	171	805
2400 - 2450	0,259	291	1124
2450 - 2500	0,366	668	1825
2500 - 2550	0,385	808	2099
2550 - 2600	0,486	916	1883
2600 - 2650	0,607	1397	2301
2650 - 2700	0,346	887	2561
2700 - 2750	0,177	468	2646
2750 - 2800	0,036	118	3230
2800 - 2850	0,030	96	3250
2850 - 2900	0,011	36	3250
	3,141	5966	1899

Tabelle 3.1: Flächen- und Höhenverteilung der Winterbilanz 2006/2007.

Höhenstufe	Fläche	B	\bar{b}
m	km^2	$10^3 m^3$	mm
2150 - 2200	0,015	-84	-5528
2200 - 2250	0,028	-136,1	-4805
2250 - 2300	0,057	-197	-3477
2300 - 2350	0,126	-411,7	-3271
2350 - 2400	0,212	-569,6	-2691
2400 - 2450	0,259	-464,4	-1793
2450 - 2500	0,366	-362,2	-990
2500 - 2550	0,385	-259,8	-675
2550 - 2600	0,486	-114,9	-236
2600 - 2650	0,607	532,4	877
2650 - 2700	0,346	476,2	1375
2700 - 2750	0,177	284,2	1608
2750 - 2800	0,036	59,2	1625
2800 - 2850	0,03	48,1	1625
2850 - 2900	0,011	17,9	1625
	3,141	-1181,7	-376

Tabelle 3.2: Flächen- und Höhenverteilung der Jahresbilanz 2006/2007.

	Jahresbilanz	Winterbilanz	Sommerbilanz	
S_c	1,496	3,141	0	km^2
B_c	1683	5966	0	10^3m^3
\bar{b}_c	1125	1899	0	mm
S_a	1,645	0	3,141	km^2
B_a	-2865	0	-7147	10^3m^3
\bar{b}_a	-1741	0	-2275	mm
S	3,141	3,141	3,141	km^2
B	-1182	5966	-7147	10^3m^3
\bar{b}	-376	1899	-2275	mm
AAR	0,476	1	0	
ELA	2583 m			

Tabelle 3.3: Kennzahlen der Massenbilanz 2006/2007.

	Hallstätter Gletscher	Hintereisferner	Kesselwandferner	Jamtalferner	
S_c	1,496	0,03	0,82	0,193	km^2
B_c	1683	4,0	210	20	10^3m^3
\bar{b}_c	1125	133	256	125	mm
S_a	1,645	7,18	3,00	3,238	km^2
B_a	-28656	-12960	-3403	-4960	10^3m^3
\bar{b}_a	-1741	-1805	-1134	-1530	mm
S	3,141	7,21	3,82	3,431	km^2
B	-1182	-12956	-3193	-4940	10^3m^3
\bar{b}	-376	-1798	-836	-1440	mm
AAR	0,476	0,00	0,22	0,06	
ELA	2583	>3750	3280	>3100	m

Tabelle 3.4: Vergleich der Massenbilanzgrößen von Hallstätter Gletscher, Hintereisferner, Kesselwandferner und Jamtalferner für das Haushaltsjahr 2006/2007.

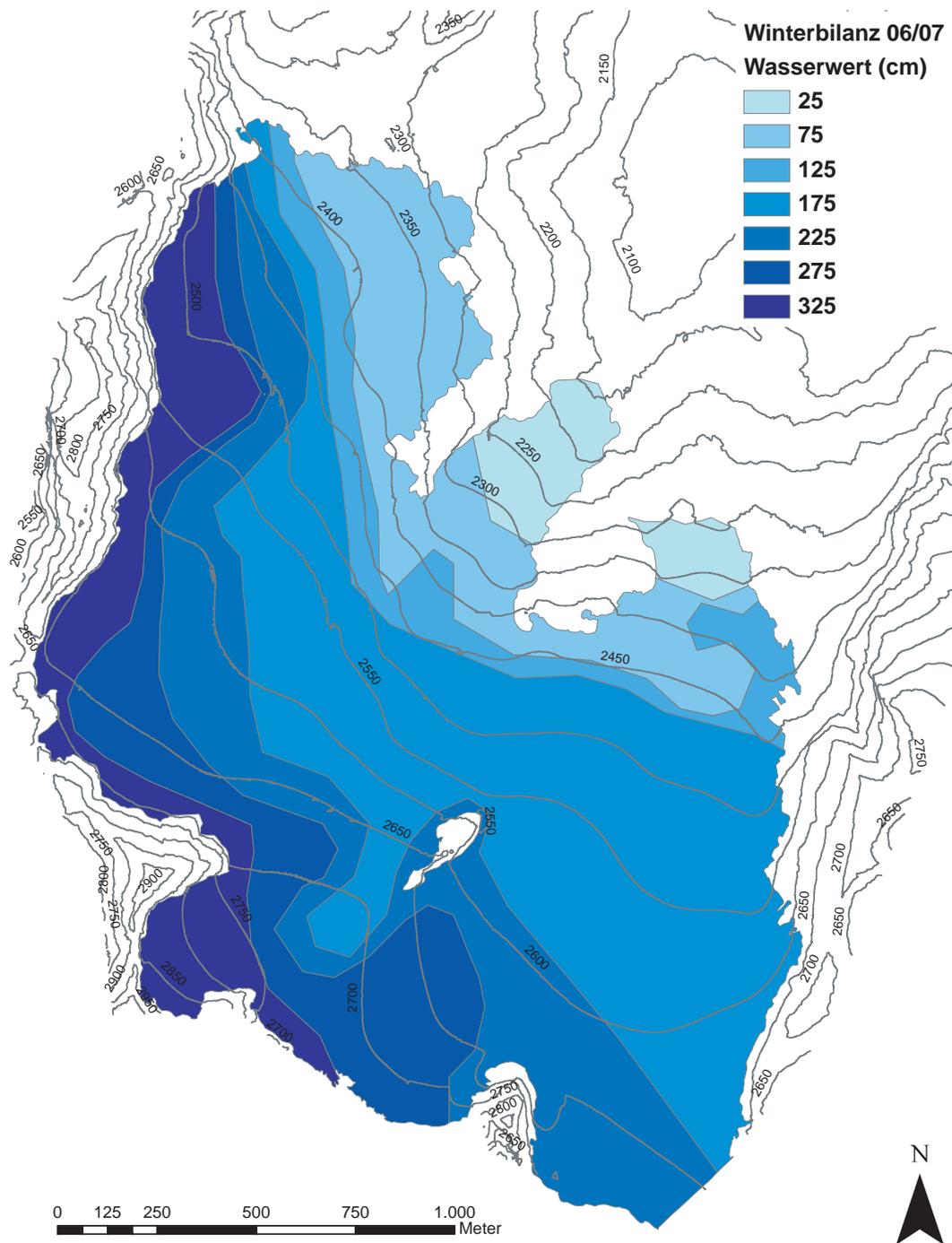


Abbildung 3.6: Winterbilanz des Hallstätter Gletschers für die Akkumulationsperiode 1.10.2006 - 30.04.2007. Farblich abgestuft sind die Isoflächen des Wasserwertes in 50-cm-Intervallen. Die Höhenschichtlinien nach dem digitalen Geländemodell 2007 sind im 50-m-Intervall dargestellt.

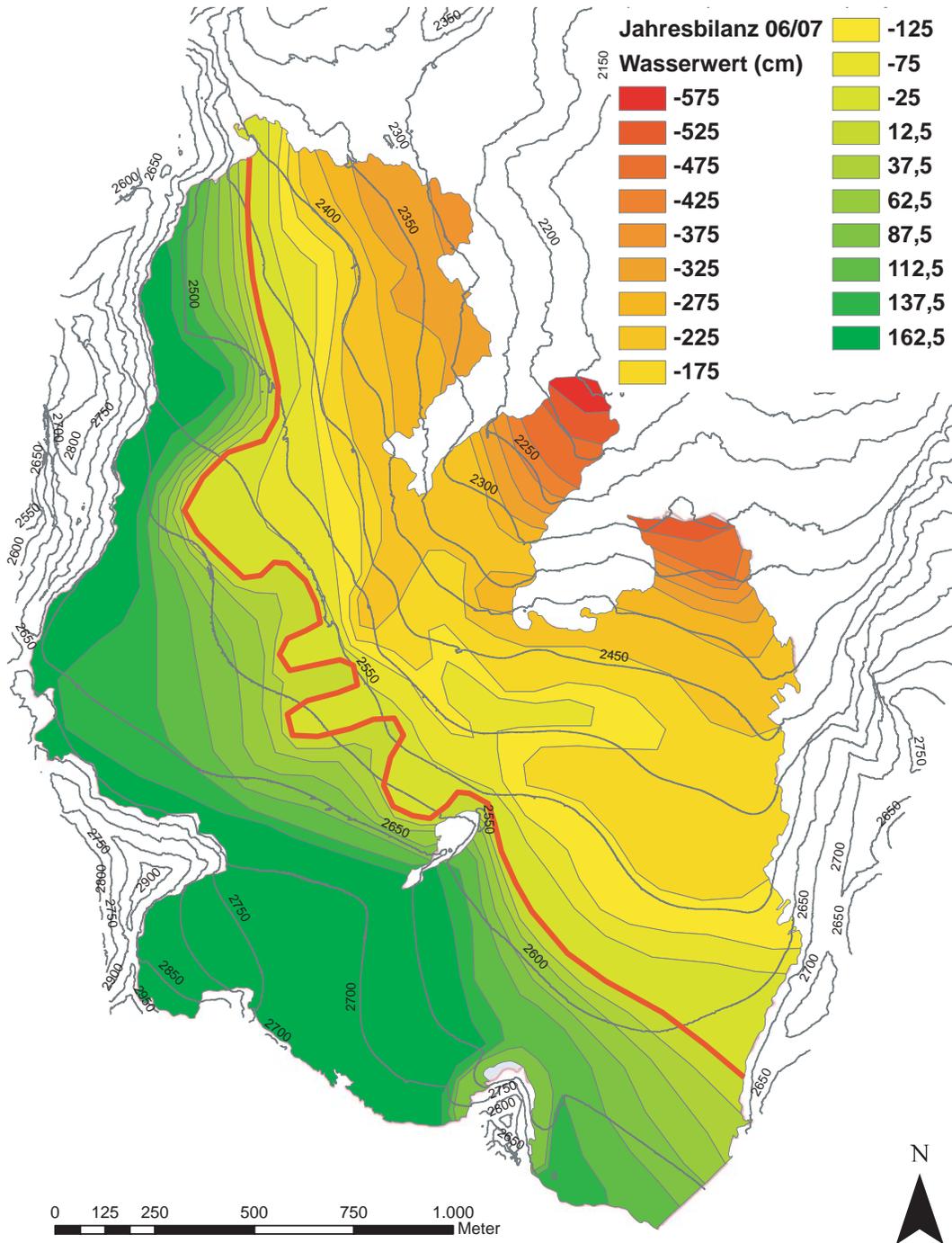


Abbildung 3.7: Jahresbilanz des Hallstätter Gletschers für das hydrologische Jahr 1.10.2006 - 30.09.2007. Farblich abgestuft sind die Isoflächen des Wasserwertes in 50-cm-Intervallen im Ablationsgebiet und 25cm-Intervallen im Akkumulationsgebiet. Die Nulllinie ist rot gekennzeichnet. Die Höhenschichtlinien nach dem digitalen Geländemodell 2007 sind im 50-m-Intervall dargestellt.

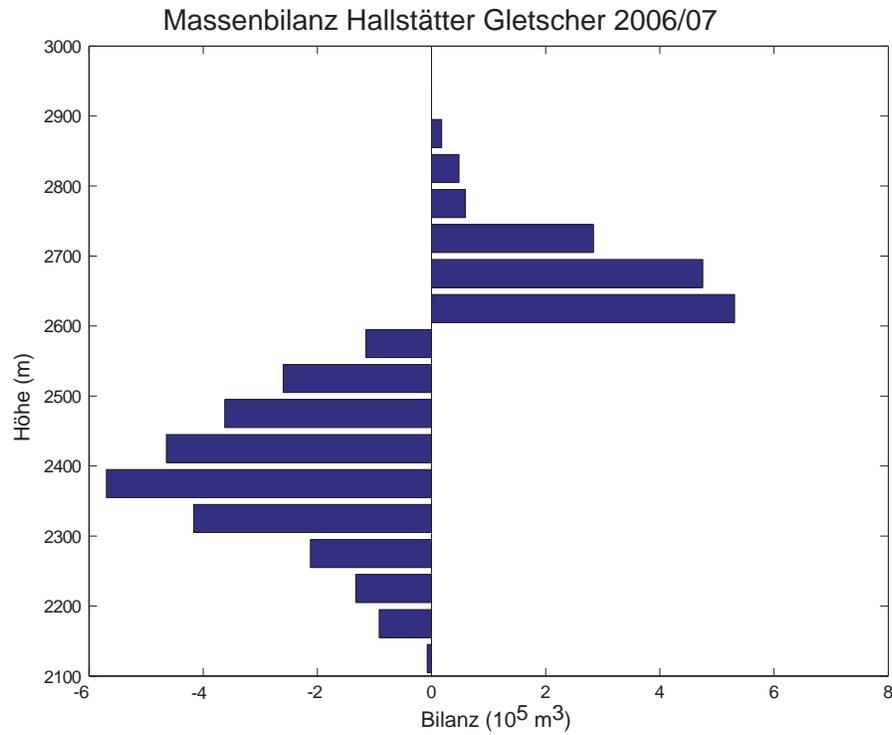


Abbildung 3.8: Nettobilanz und Fläche der Höhenstufen für das hydrologische Jahr 1.10.2006 - 30.09.2007.

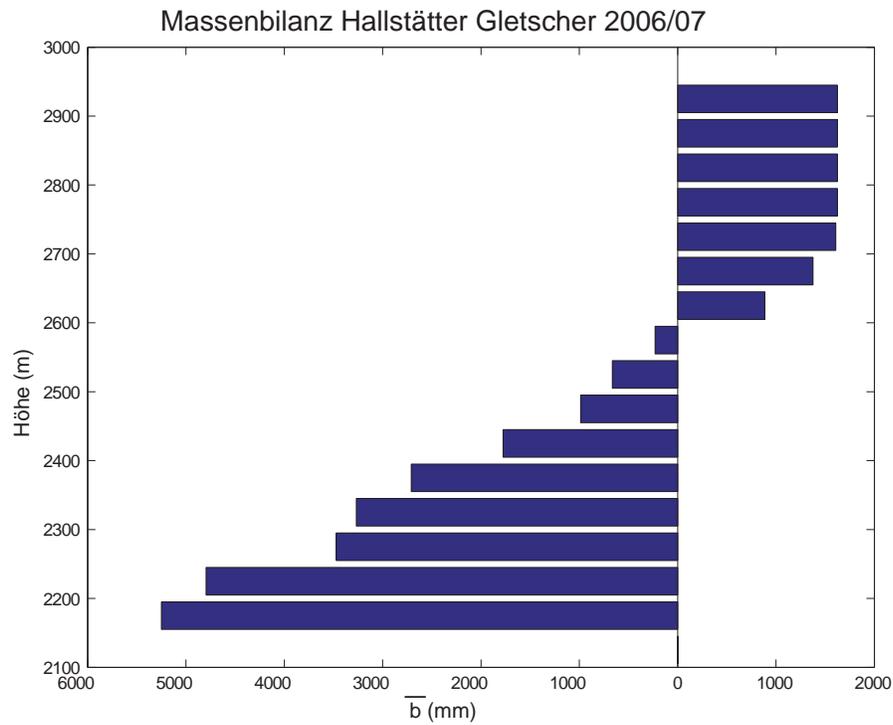


Abbildung 3.9: Mittlere spezifische Bilanz der Höhenstufen für das hydrologische Jahr 1.10.2006 - 30.09.2007.

3.5.2 Jahresbilanz 2007/2008

Die Jahresbilanz 2007/2008 liefert ein Minus von 700 mm we (Tab. 3.7). Dies entspricht einem mittleren Eisdickenverlust von rund 78 cm und einem Massenverlust von 2128 Millionen Liter Wasser. Mit einer AAR von 0,49 nimmt die Akkumulationszone rund die Hälfte der Gesamtfläche des Gletschers ein. Die ELA lag bei 2592 m. Wie im vorhergehenden Abschnitt sind in den Tabellen 3.5 und 3.6 sowie den Abbildungen 3.10, 3.11, 3.12 und 3.13 die Kenngrößen der Jahres- und Winterbilanz dargestellt. Tabelle 3.8 zeigt den Vergleich der Kennzahlen der Massenbilanz gegenüber weiteren Gletschern.

Höhenstufe	Fläche	B	\bar{b}
m	km^2	$10^3 m^3$	mm
2150 - 2200	0,003	5,5	1750
2200 - 2250	0,022	38,5	1750
2250 - 2300	0,05	94,1	1869
2300 - 2350	0,122	238,8	1961
2350 - 2400	0,2	407,9	2038
2400 - 2450	0,253	521,9	2067
2450 - 2500	0,364	830,7	2283
2500 - 2550	0,379	875,5	2309
2550 - 2600	0,494	1300,3	2630
2600 - 2650	0,582	1861	3196
2650 - 2700	0,33	972,6	2943
2700 - 2750	0,168	468,6	2792
2750 - 2800	0,036	98,8	2751
2800 - 2850	0,027	74,1	2750
2850 - 2900	0,01	28,3	2750
	3,041	7816,7	2570

Tabelle 3.5: Flächen- und Höhenverteilung der Winterbilanz 2007/2008.

Höhenstufe	Fläche	B	\bar{b}
m	km^2	$10^3 m^3$	mm
2150 - 2200	0,003	-14,7	-4670
2200 - 2250	0,022	-92,6	-4207
2250 - 2300	0,050	-185,1	-3675
2300 - 2350	0,122	-398,3	-3270
2350 - 2400	0,200	-518,3	-2589
2400 - 2450	0,253	-519,4	-2057
2450 - 2500	0,364	-412,1	-1133
2500 - 2550	0,79	-368,9	-973
2550 - 2600	0,494	-84,1	-170
2600 - 2650	0,582	197,4	339
2650 - 2700	0,330	126,9	384
2700 - 2750	0,168	95,5	569
2750 - 2800	0,036	22,4	625
2800 - 2850	0,027	16,8	625
2850 - 2900	0,010	6,4	625
	3,041	-2128,1	-700

Tabelle 3.6: Flächen- und Höhenverteilung der Jahresbilanz 2007/2008.

	Jahresbilanz	Winterbilanz	Sommerbilanz	
S_c	1,490	3,141	0	km^2
B_c	595,7	7816,7	0	10^3m^3
\bar{b}_c	400	2570	0	mm
S_a	1,551	0	3,041	km^2
B_a	-2723,7	0	-9944,8	10^3m^3
\bar{b}_a	-1756	0	-3270	mm
S	3,041	3,041	3,041	km^2
B	-2128,1	7816,7	-9944,8	10^3m^3
\bar{b}	-700	2570	-3270	mm
AAR	0,49	1	0	
ELA	2592 m			

Tabelle 3.7: Kennzahlen der Massenbilanz 2007/2008.

	Hallstätter Gletscher	Hintereisferner	Kesselwandferner	Jamtalferner	
S_c	1,490	1,55	1,57	0,281	km^2
B_c	596	350	300	60	10^3m^3
\bar{b}_c	400	229	190	226	mm
S_a	1,551	5,55	2,21	3,032	km^2
B_a	-2724	-9130	-1980	-3310	10^3m^3
\bar{b}_a	-1756	-1644	-896	-1093	mm
S	3,041	7,10	3,78	3,314	km^2
B	-2128	-8770	-1680	-3250	10^3m^3
\bar{b}	-700	-1235	-444	-981	mm
AAR	0,49	0,22	0,42	0,085	
ELA	2592	3276	3224	>3100	m

Tabelle 3.8: Vergleich der Massenbilanzgrößen von Hallstätter Gletscher, Hintereisferner, Kesselwandferner und Jamtalferner für das Haushaltsjahr 2007/2008.

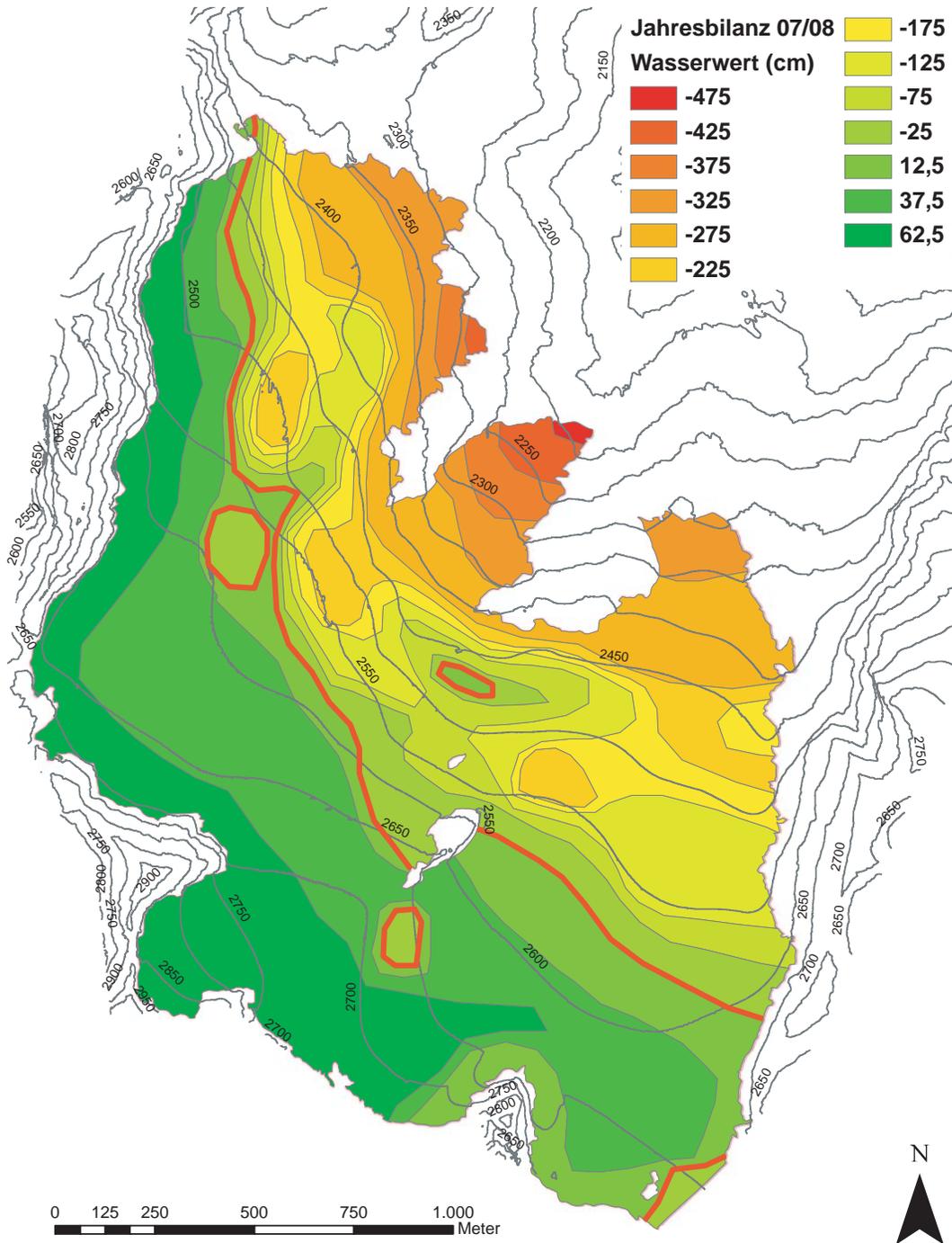


Abbildung 3.10: Jahresbilanz des Hallstätter Gletschers für das hydrologische Jahr 1.10.2007 - 30.09.2008. Farblich abgestuft sind die Isoflächen des Wasserwertes in 50-cm-Intervallen im Ablationsgebiet und 25cm-Intervallen im Akkumulationsgebiet. Die Nulllinie ist rot gekennzeichnet. Die Höhenschichtlinien nach dem digitalen Geländemodell 2007 sind im 50-m-Intervall dargestellt.

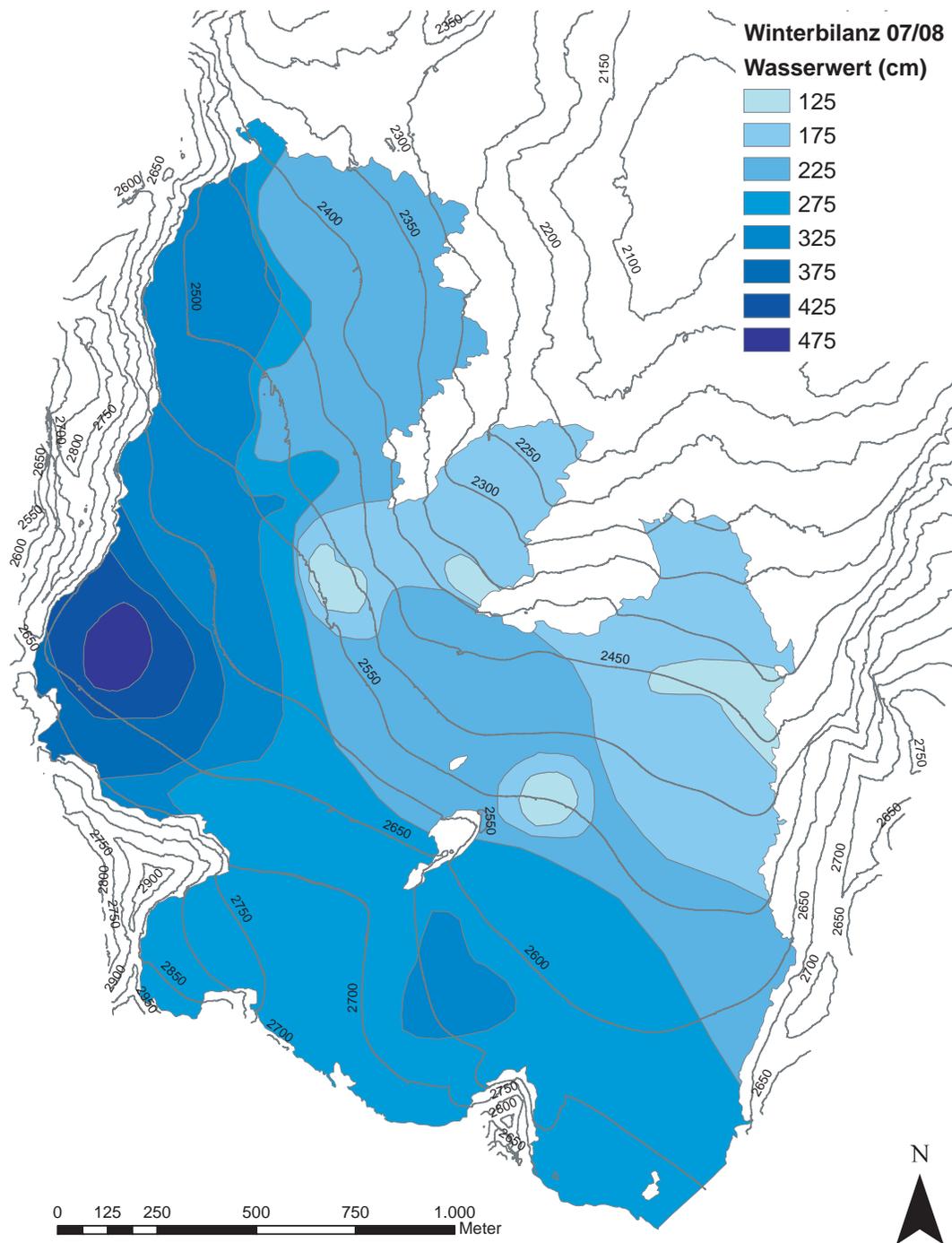


Abbildung 3.11: Winterbilanz des Hallstätter Gletschers für die Akkumulationsperiode 1.10.2007 - 30.04.2008. Farblich abgestuft sind die Isoflächen des Wasserwertes in 50-cm-Intervallen. Die Höhenschichtlinien nach dem digitalen Geländemodell 2007 sind im 50-m-Intervall dargestellt.

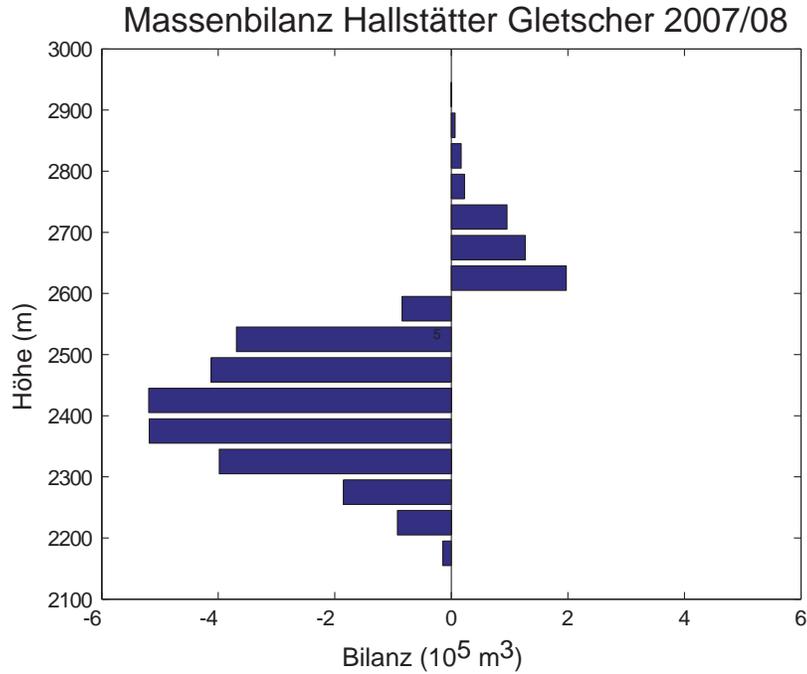


Abbildung 3.12: Nettobilanz und Fläche der Höhenstufen für das hydrologische Jahr 1.10.2006 - 30.09.2007.

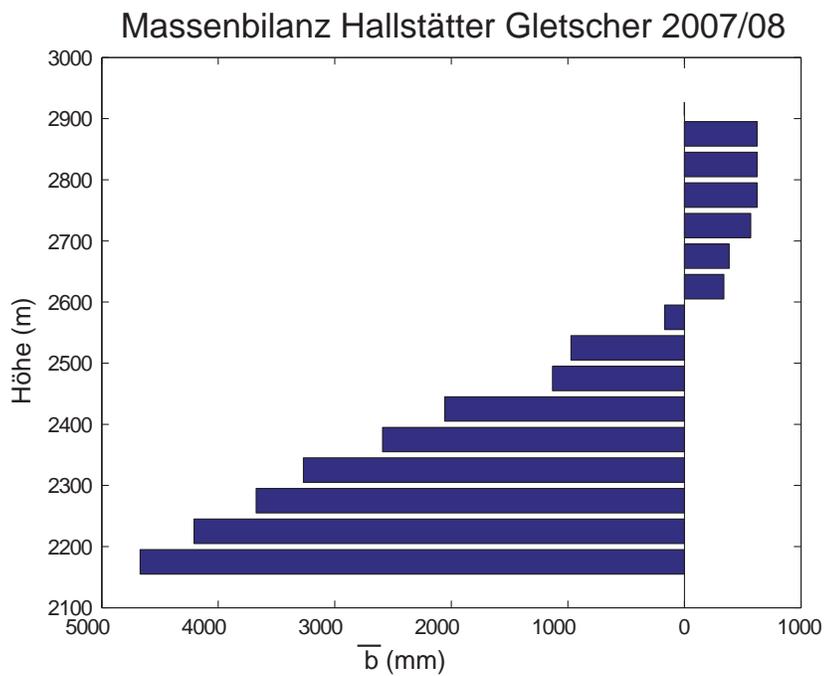


Abbildung 3.13: Mittlere spezifische Bilanz der Höhenstufen für das hydrologische Jahr 1.10.2006 - 30.09.2007.

3.6 Vergleich der Jahresbilanzen

Mit -700 mm we betrug der Verlust im Haushaltsjahr 2007/2008 gegenüber dem Haushaltsjahr 2006/2007 etwa das Doppelte. Eine Hauptursache dafür sind die erhöhten Niederschlagssummen im September 2007. In diesem Monat wurden am Totalisator unterhalb der Gletscherzunge rund 500 mm Niederschlag gemessen und die Auswertungen der Herbstschächte lieferten eine Neuschneesicht von bis zu 750 mm we. Dieser Zeitraum gehört bei der hier verwendeten Auswertung mit fixem Datum vom 1.10.-30.09. noch zum Haushaltsjahr 2006/2007. Die zusätzliche Akkumulation im September 2007 wurde der Massenbilanz 2006/2007 hinzugerechnet. Von der gemessenen Gesamtakkumulation des Haushaltsjahres 2007/2008 musste dieser Betrag wiederum abgezogen werden, womit sie negativer ausfiel. Dies lässt sich auch gut in den Massenbilanzkarten Abb. 3.7 und Abb. 3.10 anhand den erhöhten Akkumulationswerten der Jahresbilanz 2006/2007 ablesen. In Abbildung 3.6 ist beim direkten Vergleich der mittleren spezifischen Bilanzen der Höhenstufen die erhöhte Akkumulation oberhalb der Gleichgewichtslinie deutlich sichtbar. Vergleicht man die Tabellen 3.3 und 3.7 ist eine deutlich weniger negative Sommerbilanz 2007 gegenüber 2008 festzustellen. Dazu trugen zu einem die sommerlichen Neuschneefälle sowie die eben angesprochene Schneedecke zum Ende der Ablationssaison 2007 bei. Trotz höherer Akkumulation im Winter 2007/2008 gegenüber dem Vorjahr, glich die deutlich längere Ablationsperiode im Sommer 2008 den Eisverlust annähernd wieder aus. Die Verschiebung der Bilanzen aufgrund der erheblichen Schneedecke im September 2007 am Hallstätter Gletscher zeigt auch ein Vergleich der Bilanzwerte mit den Gletscher in den Tabellen 3.4 und 3.8. Während die Massenbilanz des Hallstätter Gletschers 2006/2007 deutlich weniger negativ ausfällt, zeigt die des Haushaltsjahres 2007/2008 gegenüber den anderen Gletschern eine gegenläufige Tendenz.

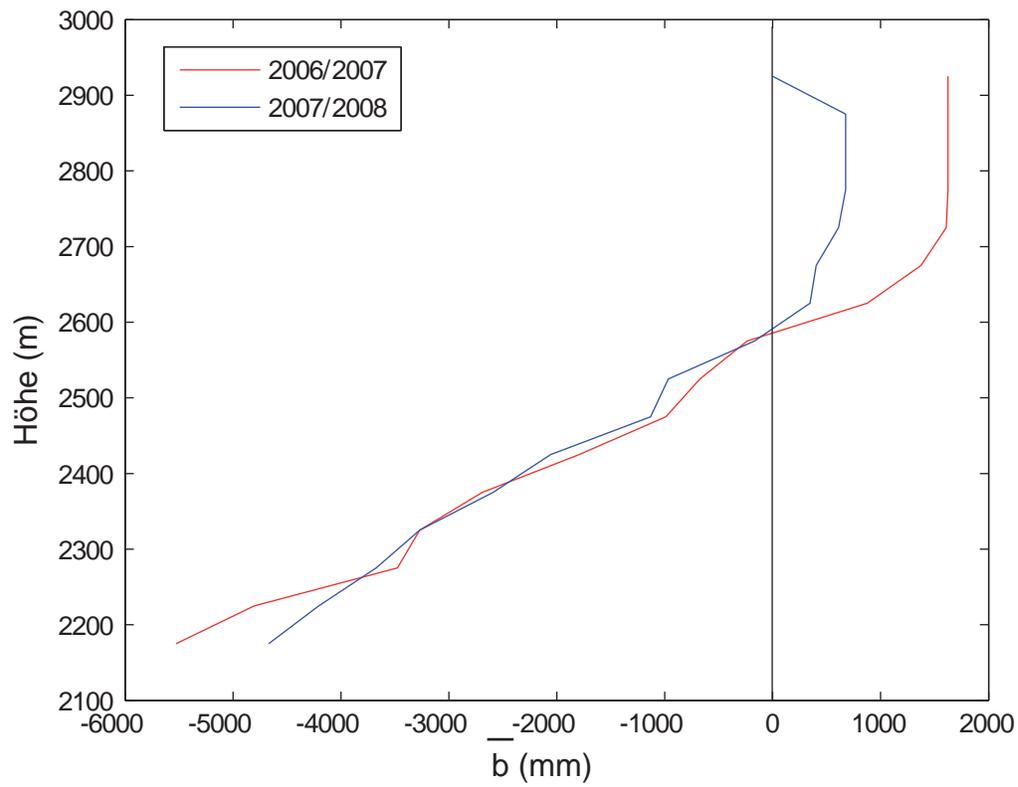


Abbildung 3.14: Vergleich der mittleren spezifischen Bilanzen der Höhenstufen für die Haushaltsjahre 2006/2007 und 2007/2008.

Kapitel 4

Volums-, Flächen- und Längenänderungen 1856 - 2007

Der Beginn der Erforschung des Hallstätter Gletschers und die Dokumentation dessen Veränderungen in den folgenden Jahren fiel mit dem Erreichen des Gletscherhochstandes um 1850 zusammen. Seit 1856 ist der Hallstätter Gletscher gut dokumentiert, nur durch kürzere Vorstossperioden unterbrochen, zurückgewichen. Dabei ist der Rückzug am Hallstätter Gletscher bedingt durch die von Eis gefüllten und durchflossenen Karstmulden eher einem Zerfall gleich. Ausapernde Steilstufen und sich bildende Gletscherseen im Zungenbereich ließen die Gletscherfläche auf sehr ungleichmäßige Weise schwinden. Einem anfänglich überwiegend vertikalen Einsinken der nach dem Hochstand im oberen Taubenkar liegenden Gletscherzunge folgte ein Ausapern der Steilstufe des Eisjoches 1878, worauf 1890 der sich im Taubenkar befindliche Teil der Zunge komplett vom eigentlichen Gletscher trennte. Die nun im Kar südöstlich der Simonyhütte gelegene Zunge wurde folgend in den 1940er Jahren von den flankierenden Seitenlappen des Gletschers getrennt und wich ebenfalls unter Bildung eines Sees und Zerfall an Steilstufen zurück. Der heutige Zustand zeigt noch immer eine an Länge verlierende mittlere Zunge. Östlich und westlich davon liegen zwei in der Ausdehnung eher stagnierende Seitenlappen des Gletschers. In diesem Kapitel werden Zahlen bezüglich des längen-, flächen- und massenhaften Verlustes des Hallstätter Gletschers erhoben und tabellarisch wie graphisch dargestellt.

4.1 Datengrundlage

Es gibt eine Vielzahl an Informationsquellen bezüglich Ausdehnung und Veränderung des Hallstätter Gletschers. Neben den noch immer gut sichtbaren geologischen, durch Vorstoß und Schwund entstandenen Geländemerkmale gibt es ausreichend Angaben in der Literatur mit beiliegenden Bilddokumenten. Wertvoll sind vor Allem die glet-

scherkundlich gut auswertbaren Karten seit 1900, welche Vergleichsmöglichkeiten längerer Zeiträume bieten. 1969, 2002 und 2007 entstanden digitale Geländemodelle (DGM), welche Fläche und Oberflächenhöhe des Gletschers mit einer hohen Genauigkeit wiedergeben. Die Verbindung all dieser Datensätze beschreibt die Entwicklung des Hallstätter Gletschers präzise.

4.1.1 Historische Dokumente

Gut dokumentiert ist der Gletscherhochstand von 1856. Unter Vergleich der Bild-dokumente und Angaben über Höhen- sowie Längenänderungen kann ein Bild des Hallstätter Gletschers zur Zeit seiner größten Ausdehnung Mitte des 19. Jahrhunderts gewonnen werden. Unumgänglich sind dabei die Angaben Friedrich Simonys (Simony 1871; 1883; 1884a; 1884b; 1885; 1886; 1891; 1895), welcher den Hallstätter Gletscher seit 1840 regelmäßig aufsuchte und Messungen durchführte. Neben genauerer Beschreibung des Vorstoßes bis 1856 und des folgenden Zerfalls der Zunge hinterließ er auch zahlreiche Zeichnungen (Abb. 4.1.1), Photographien sowie eine Skizze des Hochstandes von 1856 (Abb. 4.1.1).

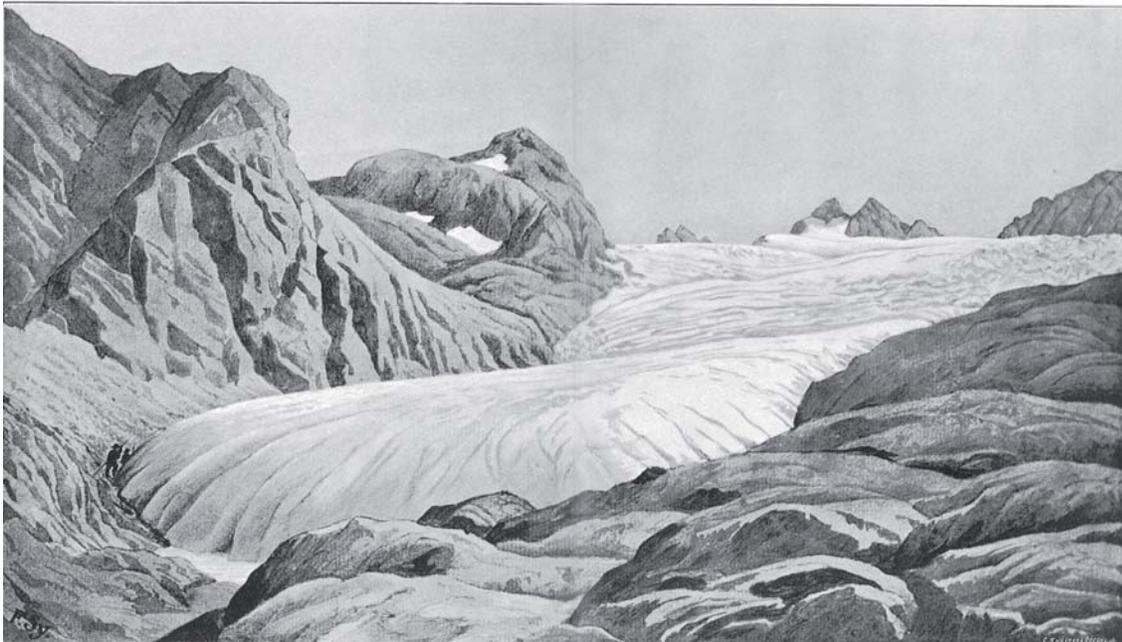


Abbildung 4.1: Das Karlseisfeld im Oktober 1840 von Simony nach der Natur gezeichnet. Aus: Simony (1895).

Die weitere Entwicklung wird in der Literatur von Richter (1888) und Krebs (1915) wiedergegeben. Wichtige Bilddokumente stellen eine Vielzahl an Photographien dar, welche deutlich den Verlauf des Rückzuges sowie die optischen Unterschiede (Abb. 4.3) zeigen.

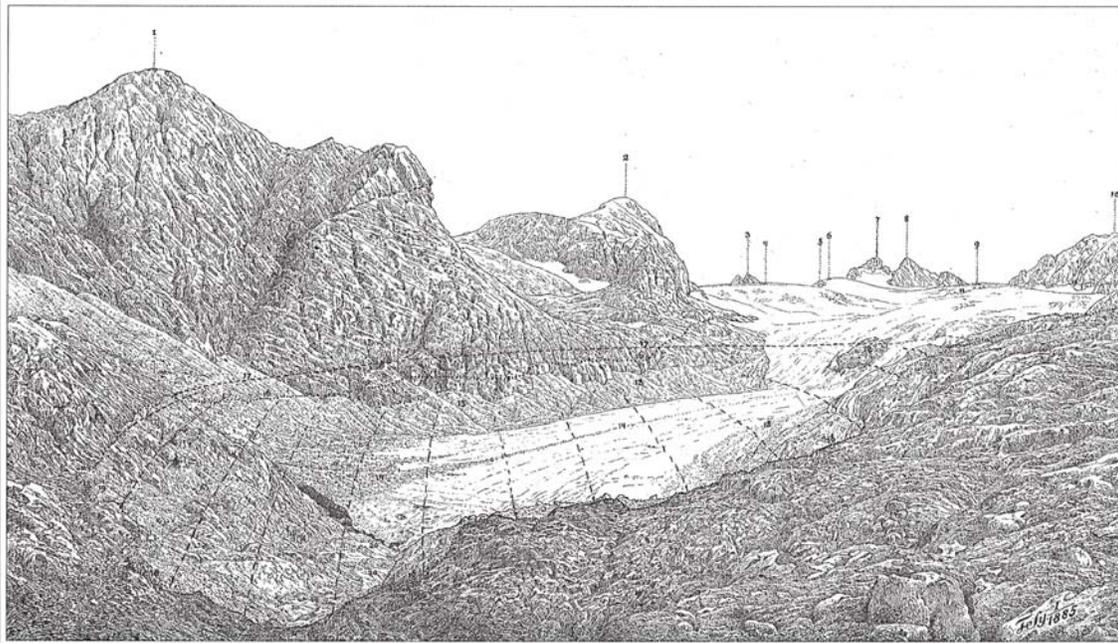


Abbildung 4.2: Das Karlseisfeld im September 1884 mit Skizze des Hochstandes 1856. Aus: Simony (1885).



(a) 1867



(b) 1900

Abbildung 4.3: Zwei Photographien des Karlseisfeldes vom gleichem Standpunkt. 1867 aufgenommen von A. Eissenwenger; 1900 von F. Pichler. Deutlich ist der Verlust der Eismassen im oberen Taubenkar innerhalb dieser 33 Jahre erkennbar. Aus: Böhm (1903).

Die Genauigkeit von Angaben aus der Literatur kann schwer nachvollzogen werden. Dennoch wird der mittlere Fehler von Längen- und Höhenmessungen nicht über einem Meter liegen. Aufgrund von Bildvergleichen entstandene Aussagen über die Änderung der Eisdicke sind jedoch mit einer größeren Unsicherheit behaftet.

4.1.2 Geomorphologische Landschaftsmerkmale

Vor Allem die durch Gletscherbewegung aufgeschobenen und durch in und auf dem Gletscher mitgeführten Gesteinsmaterial aufgeschichteten Stirn- sowie Seitenmoränen zeugen von Ausdehnung und Mächtigkeit der Eismassen. Der Gletscherhochstand von 1856 ist durch eine Vielzahl Moränen im Vorfeld des Hallstätter Gletschers gut dokumentiert (Abb. 4.1.2) und wurde bereits früh in Karten dargestellt. Sichtbar sind die Moränen auch in Orthophotos sowie in den 1-m-Höhenschichtlinien des DGM von 2007.



Abbildung 4.4: Die im Kar südöstlich der Simonyhütte gelegene Moräne des Gletscherhochstands 1856 (schwarze Linie) aufgenommen am 14.01.2009. Obwohl die mächtigste Eisdicke hier bereits um 1843 erreicht wurde, blieb die Fläche in den darauffolgenden Jahren annähernd gleich und die Moräne wurde entsprechend hoch aufgeschüttet.

4.1.3 Karten

Eine erste kartographische Darstellung des Hallstätter Gletschers ist in der Ersten (Josephinischen) Landesaufnahme auf den Sektionen 59 und 64 zu finden. Diese wurde in den Jahren 1769 bis 1772 topographisch erfasst. 1821 wurde das Dachsteinplateau im Rahmen der Zweiten (Franziseischen) Landesaufnahme aufgenommen und in Sektion Nr. 50, Colonne X der Aufnahme des „Erzherzogthum Oesterreich Ob der Enns“ abgebildet. Eine erste geographisch aussagekräftige Karte entstand 1872/73 unter Leitung von k.k. Hauptmann und Generalstabsoffizier Max Groller von Mildensee im Maßstab 1 : 25000. Simony wie Richter entnahmen daraus erste Flächenwerte. Diese Karten lassen jedoch keinen gletscherkundlichen Vergleich zu, da die Darstellung der Höhenlinien

aufgrund der geringen Anzahl an Messpunkten noch sehr ungenau war. Im Folgenden werden die Karten angeführt, welche aufgrund ihrer hohen Genauigkeit gut auswertbar sind und im Weiteren Verwendung finden.

Karte „Das Karlseisfeld“ 1901

In den Sommern der Jahre 1899 und 1900 wurde von Arthur von Hübl 1901 das Karlseisfeld hauptsächlich mittels Messtischphotogrammetrie aufgenommen. Im Frühjahr 1899 durch die Österreichische Geographische Gesellschaft in Wien beauftragt begann Arthur von Hübl bereits im August 1899 mit den Messungen. Auf geodätischer Grundlage zweier Punkte aus der Katastertriangulation von 1875 erfolgten die Aufnahmen von zwölf Standpunkten aus. Auf dem weniger kontrastreichen südwestlichen Teil des Gletschers wurde 1900 mittels Tachymetrie weitere 65 Punkte erfasst. Die Karte wurde basierend auf 375 eingemessenen Punkten konstruiert (Hübl, 1901) und von Friedrich Pichler am Militärgeographischen Institut in Wien graphisch umgesetzt. 1901 wurde die südorientierte Karte im Maßstab 1 : 10000 veröffentlicht.

Karte des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins 1915

Im Jahre 1913 wurde mit den Aufnahmen zur Alpenvereinskarte „Karte des Dachsteingebietes“ im Maßstab 1 : 25000 begonnen. Unter Verwendung terrestrisch-stereophotogrammetrischen Aufnahme- und Auswertungsverfahren wurde eine gletscherkundlich gut auswertbare Kartengrundlage mit 10-m-Höhenschichtlinien unter Leitung von L. Aegerter geschaffen. Bereits Krebs (1915) ermittelte daraus Flächenänderungen gegenüber früheren Aufnahmen.

Geologische Karte der Dachsteingruppe 1954

Auf Basis der Aegerter'schen Karte wird diese Darstellung der Geologie des Dachsteingebirges vom Deutschen und Österreichischen Alpenverein herausgegeben (Ganss 1954). Die eingezeichneten Höhenlinien entsprechen denen von 1915 und liefern somit keine Aussage. Eingezeichnet ist der Gletscherstand von 1938.

Karte des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins 1958

Die neue, mittels photogrammetrischen Verfahren aufgenommene Dachsteinkarte im Maßstab 1 : 25000 mit 10-m-Höhenschichtlinien liefert einen gut auswertbaren Gletscherstand.

Karte des Österreichischen Alpenvereins 1992

Die neue Dachsteinkarte des Alpenvereins zeigt im Maßstab 1 : 25000 mit 10-m-Höhenschichtlinien den Gletscherstand von 1991. Die Überarbeitung der Gletschergrenze ist gut auswertbar. Für die Verlegung der Höhenlinien erfolgte jedoch keine neue Aufnahme. Daher wird von einer Weiterverarbeitung der Höheninformation abgesehen.

Aufarbeitung der Karten

Die Bilddaten der digitalisierten Karten wurden in ArcMap mit dem Tool *Georeferencing* anhand fixer Punkte wie Berggipfel und Höhenkoten auf die Gauß-Krügerabbildung M31 georeferenziert. Dabei wurden vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen zur Verfügung gestellte Koordinaten von Lagefestpunkten an der Kapelle der Simonyhütte, dem Hohen Gjaidstein, Eisstein und am Hohen Dachstein einbezogen. Bei der Rektifizierung wurde ein mittlerer Lagefehler von 3,5 m produziert. Dieser beruht auf Verzerrungen aufgrund Faltung der kartographischen Darstellungen und möglichen Ungenauigkeiten bei der graphischen Umsetzung der Karten.

4.1.4 Digitale Geländemodelle

Digitale Geländemodelle (DGM) liefern gerasterte Information über die Höhe der Oberfläche. Für den Hallstätter Gletscher wurden DGM in den Jahren 1969, 2002 und 2007 erzeugt. Das DGM 1969 beruht auf der Digitalisierung des auf Grundlage 1969 durchgeführter Luftaufnahmen photogrammetrisch erstellten Schichtlinienplans im Maßstab 1:10.000 (Würländer und Eder, 1998; Lambrecht und Kuhn, 2007). Aus den Höhenschichtlinien im 20-m-Intervall wurde in mehreren Verdichtungsschritten unter Einbeziehung von geomorphologischen Zusatzinformationen wie Geripp- oder Zwischenhöhenlinien ein Höhenraster mit 5 m Auflösung erzeugt. Ebenfalls photogrammetrisch wurde das DGM 2002 erstellt (Eder et al., 2000). Nach einer automatischen Höhenmodellableitung mit 20-m-Rasterung folgte die Berechnung des DGM mit 10-m-Rasterung unter zusätzlicher Verwendung von Geländekanten. Anschließend wurde dies auf ein 5-m-Raster interpoliert. Auf gleicher Grundlage wurden für 2002 Orthophotos mit 2,5 m und 0,5 m Auflösung erstellt (Abb.4.1.4). Bei photogrammetrischen Auswerteverfahren wird auf einen Standardfehler der Höhe eines Gitterpunktes von ± 75 cm gezielt (Kuhn et al., 2008). Bei Nachmessungen einzelner Punkte in einer Pilotstudie von Würländer und Eder (1998) zeigte sich eine vertikale Genauigkeit von 1 m. Die Datenerfassung für das DGM von 2007 erfolgte mittels Airborne-Laser-Scan Messungen (Wehr und Lohr, 1999). Das resultierende Höhenmodell mit einer höheren Punktdichte und Genauigkeit gegenüber den photogrammetrischen Verfahren wurde in einem 1-m-Raster umgesetzt.

DGM 1969 • Basis: Luftaufnahmen 1969

- Auswertung: photogrammetrisch; Gletscherplan 1:10.000 mit 20-m-Höhenschichtlinien
- Digitalisierung: Vermessungsbüro ARGE Digitalplan, Graz, 2002/2003; Nachbearbeitung durch Dipl.-Ing R. Würländer
- Rasterung: 25 m / 5 m
- Koordinatensystem: Gauss-Krüger Österreich, M31

DGM 2002 • Basis: Luftaufnahmen vom 17. und 18.09.2002.

- Auswertung: photogrammetrisch
- Digitalisierung: Vermessungsbüro Dipl.-Ing. K. Wenger-Oehn, 2004
- Rasterung: 10 m / 5 m
- Koordinatensystem: Gauss-Krüger Österreich, M31

DGM 2007 • Basis: Airborne-Laser-Scan (ALS) Messungen Oktober 2006 und September 2007.

- Datenquelle: ALS Projekt 2006 "WLV-Salzkammergut"; Amt der OÖ Landesregierung
- Punktdichte: mindestens ein Punkt pro m²
- Genauigkeit: ±30 cm in der Lage; ±15 cm in der Höhe
- Rasterung: 1 m
- Koordinatensystem: Gauss-Krüger Österreich, M31



Abbildung 4.5: Orthophoto auf Höhenmodell des Dachsteinmassivs aus Luftbildaufnahmen 2002. In Bildmitte der Hallstätter Gletscher. Blick von Nord nach Süd.

4.2 Längenänderung

Längenänderungen sind aufgrund der jährlich nur einmaligen Messung an der Gletscherzunge leichter zu dokumentieren als die Massenbilanz des Gletschers. Dabei geben sie zwar eine qualitative Aussage darüber, ob ein Gletscher vorgestoßen ist oder sich zurückgezogen hat, liefern aber aufgrund ihrer punktuellen Messung keine Gesamtaussage über den Massenhaushalt und den Zustand des Gletschers. Zudem treten sie zeitlich verzögert zu Massengewinn oder Verlust auf. Diese Reaktionszeit ist gletschertypisch und von Form, Größe und Gefälle des Gletschers abhängig. Auch können Vorstöße aufgrund Veränderungen der Reibung am Gletscheruntergrund hervorgerufen werden. Schwer zu erfassen sind Vorgänge an der Gletscherzunge, bei welchen Eiskörper durch Trennung vom eigentlichen Gletscher losgelöst werden.

4.2.1 Bestimmung der Längenänderung

Die Messung der Längenänderung erfolgt jährlich durch den Gletschermessdienst des Österreichischen Alpenvereins (ÖAV) von markierten Positionen im Vorfeld der Zunge aus. Von diesen Messmarken wird mit einem Maßband der Abstand a von Messmarke zum nächstliegenden Punkt am Gletscherrand gemessen. Die Differenz zwischen den Messungen gibt die Längenänderung Δl über den Zeitraum (Gl. 4.1).

$$\Delta l = a_1 - a_2 \quad (4.1)$$

Dabei ist zu beachten, dass der Wert der Längenänderung eines Gletschers aus Messungen an mehreren Punkten gemittelt wird und nicht zwingend den maximalen Wert der Längenänderung wiedergibt. Eine weitere Möglichkeit die Länge des Gletschers und deren absolute Änderung zu bestimmen ist die Messung des direkten Weges zwischen dem höchsten und dem niedrigstgelegenen Punkt des Gletschers. Diese Variante bietet sich am Hallstätter Gletscher an, da aufgrund seiner Topographie eine zentrale Fließlinie schwer feststellbar ist.

4.2.2 Ergebnisse

Erste Längenmessung führte bereits Simony mit dem Vorstoß der Gletscherzunge von 1840 bis 1856 um 60 m an. Ausgehend von einer Länge von 3700 m verlor nach Messung Simonys die Zunge bis 1884 105 m an Länge. Nach dem Abreißen der im Taubenkar gelegenen Eismassen wurde fortan der südöstlich der Simonyhütte gelegene Zungenlappen des Gletschers eingemessen. Für diesen ist für die Zeit von 1883 bis 1933 ein Verlust von weiteren 127,5 m belegt (Klebelsberg, 1935). Bis 1945 fanden weiter vereinzelt Messungen statt. Ab 1946 wurde durchgängig unter Leitung der ehrenamtlichen Vermesser Roland Wannemacher (1945-1985), Roman Moser (1966)

und Michael Weichinger (1986 bis heute) im Rahmen der jährlichen Gletschermessung des ÖAV die Längenänderung dokumentiert.

Die kumulierte durchschnittliche Längenänderung des Hallstätter Gletschers von 1896 bis 2008 beträgt -725 m (Abb. 4.2.2). Bis auf eine positive Längenänderung 1928/1930 und einer Stagnation mit nur leichten Vorstößen zwischen 1979 und 1991 hat der Hallstätter Gletscher stets an Länge verloren. Der starke Rückzug um 1978 ist mit dem Loslösen eines Zungenstückes vom Gletscher zu erklären.

Die Änderungen der absoluten Gletscherlänge bestimmt aus den Änderungen der Gletschergrenzen sind nicht direkt mit denen der Zungeneinmessungen vergleichbar. Der Zerfall der Zunge von 1850 im oberen Taubenkar in Verbindung mit einem sich bildenden Eissee ist als Längenmessung ebensowenig festzuhalten wie die endgültige Loslösung dieses Eiskörpers um 1890. Daher erfolgt auch der in Tabelle 4.1 ersichtliche große Sprung zwischen den Längenangaben von 1856 und 1899. Bezieht man sich auf die Längenänderungen der Gletscherstände, so war der Hallstätter Gletscher mit 1825 m Länge 2007 nur mehr halb so lang wie 1856.

Jahr	1856	1899	1915	1938	1958	1969	1991	2002	2007	
Länge	3765	2840	2795	2705	2475	2285	2090	1975	1825	m
% von 1850		75,4	74,2	71,8	65,7	60,7	55,5	52,5	48,5	%
Δl		-925	-45	-90	-230	-190	-195	-115	-150	m
$\frac{\Delta l}{a}$		-21,5	-2,8	-3,9	-11,5	-17,3	-8,9	-10,5	-30	$\frac{m}{a}$
$\sum \Delta l$		-925	-970	-1060	-1290	-1480	-1675	-1790	-1940	m

Tabelle 4.1: Länge und deren Änderung des Hallstätter Gletschers ermittelt aus direkter Distanz vom höchsten zum niedrigsten Punkt.

4.3 Rekonstruktion der Fläche

Die Auswertung von Gletscherflächen besitzt mehr Informationsgehalt als die reine Längenänderung. Die Veränderung an den Gletscherrändern sowie die Ausdehnung der Gletscherzungen werden mit einbezogen. Letztendlich kann aber hier kein direkter Zu-

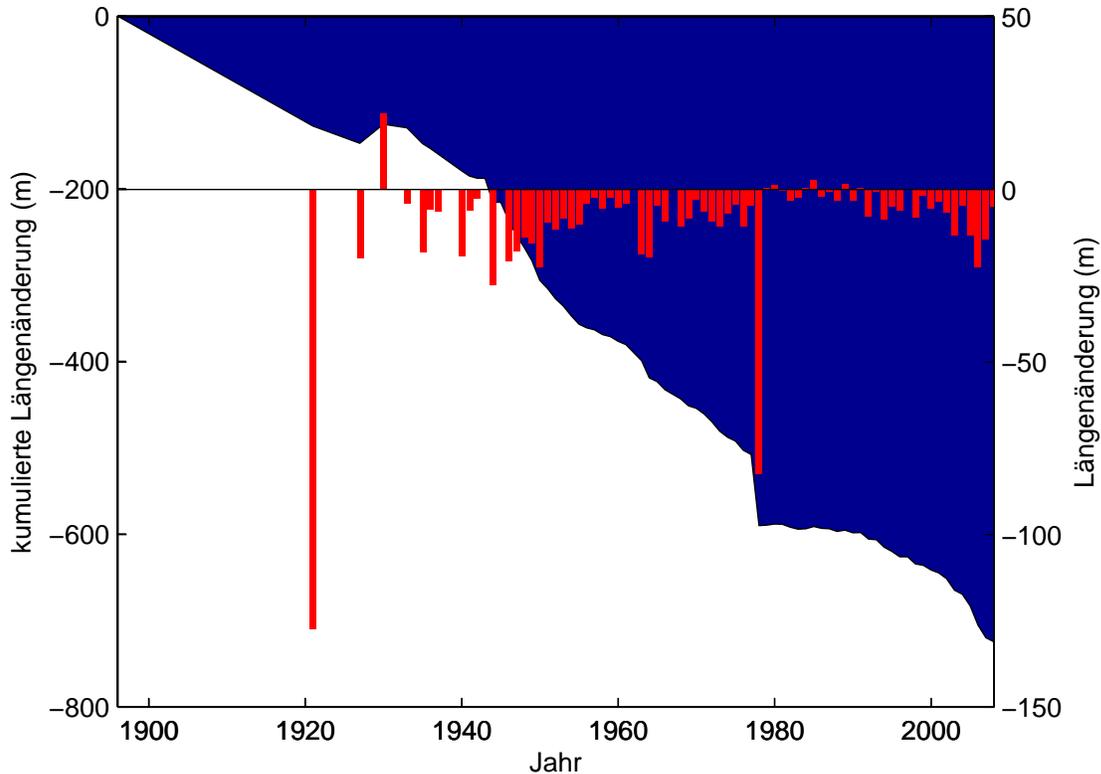


Abbildung 4.6: Gemessene (rote Balken) und kumulierte Längenänderung (blaue Fläche) des Hallstätter Gletschers auf Grundlage der Längenänderungsmessungen an der Zunge.

sammenhang zum Massenhaushalt hergestellt werden, da ein großflächiges Ausdünnen des Eiskörpers mit im Verhältnis kleinen Änderungen der Fläche nur an den Gletscherrändern sichtbar ist. Anhand einer Flächen-Höhenverteilung läßt sich erkennen, in welcher Höhe Flächenänderungen auftreten.

4.3.1 Ermittlung von Flächenwerten

Anhand der Punktnetzkarte von Hübl mit eingezeichneten Gletscherrand (Hübl, 1901), Moränenkartierung mittels GPS und unter Zuhilfenahme der 1-m-Höhenschichtlinien aus dem DGM von 2007 wurde die Gletscherausdehnung des Hochstandes 1856 reproduziert. Weitere Gletscherflächen wurden aus den in ArcMap nachgezeichneten Gletschergrenzen der georeferenzierten Karten mit den Gletscherständen von 1899, 1915, 1938, 1958 und 1991 sowie den Gletschergrenzen aus den digitalen Geländemodellen von 1969, 2002 und 2007 ermittelt. Die angeführten Flächenwerte wurden in ArcGis berechnet.

4.3.2 Ergebnisse

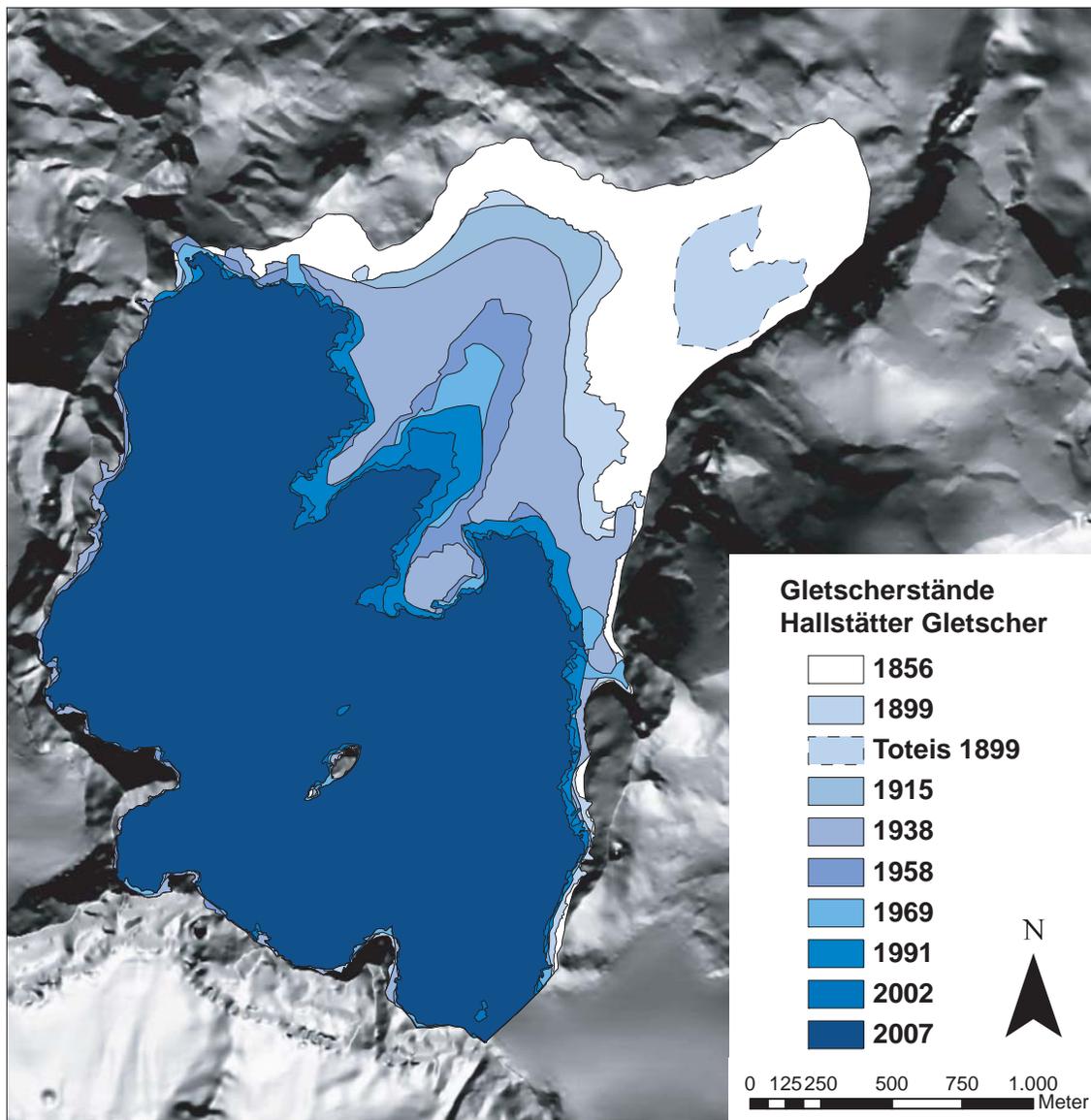


Abbildung 4.7: Die Gletscherstände des Hallstätter Gletschers von 1856 bis 2007 dargestellt auf dem beleuchteten Relief des DGM 2002.

Die Fläche hat seit 1856 abgenommen (Tab. 4.2, Abb. 4.8). Aufgrund der Mittelung über die Zeiträume zwischen den Kartierungen werden kleinere Vorstöße, welche von Moser (1954) für 1876-80, 1869-99 und 1919/20 anhand von Moränen am Taubenriedl und später in den Längenänderungen dokumentiert sind (Kap. 4.2), nicht sichtbar. Es zeigen sich aber Zeiträume mit starker und mit geringer Flächenänderung. Große Flächenverluste mit durchschnittlich über $20.000 \frac{m^2}{a}$ traten zwischen 1856 bis 1899, 1938

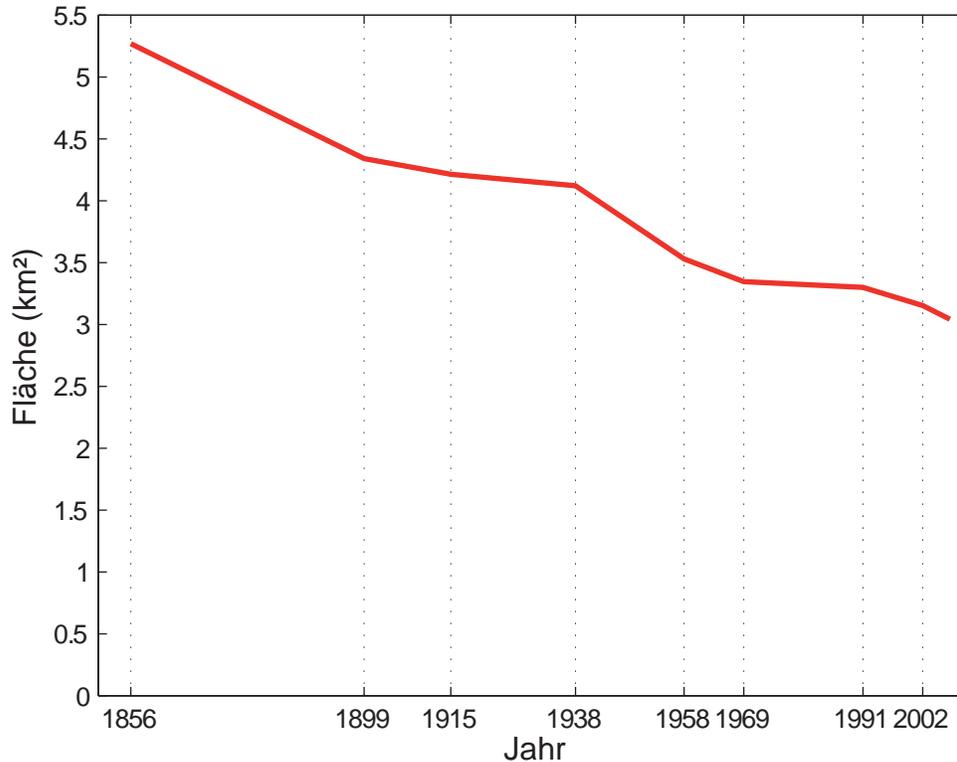


Abbildung 4.8: Zeitlicher Verlauf der Fläche des Hallstätter Gletschers.

Jahr	1856	1899	1915	1938	1958	1969	1991	2002	2007	
A	5,27	4,34	4,21	4,11	3,53	3,35	3,30	3,15	3,04	km ²
% von 1856		82,4	80,0	78,2	67,0	63,5	62,6	59,8	57,7	%
ΔA		-0,93	-0,13	-0,09	-0,59	-0,18	-0,05	-0,15	-0,11	km ²
$\frac{\Delta A}{a}$		-0,022	-0,008	-0,004	-0,03	-0,017	-0,002	-0,013	-0,022	$\frac{km^2}{a}$
$\sum \Delta A$		-0,93	-1,06	-1,15	-1,74	-1,93	-1,97	-2,12	-2,23	km ²

Tabelle 4.2: Fläche und deren Änderung des Hallstätter Gletschers. Von oben nach unten die Gesamtfläche A , die Flächenänderung zum vorhergehenden Gletscherstand ΔA , die mittlere jährliche Flächenänderung in diesem Zeitraum $\frac{\Delta A}{a}$ sowie die aufsummierte Flächenänderung seit 1856 $\sum \Delta A$.

bis 1958 und seit 2002 auf. In den dazwischenliegenden Zeiträumen war der Flächenverlust deutlich geringer. Im Zeitraum von 1969 bis 1991 macht sich die bereits in den Längenänderungen sichtbare Stagnation bemerkbar, so dass in diesem Zeitraum nur wenig Fläche verloren ging. Mit insgesamt rund 43% Flächenrückgang seit dem Hochstand 1856 ist der Hallstätter Gletscher weniger geschwunden als die österreichischen Gletscher im Schnitt, deren Gesamtfläche bis 1998 um rund die Hälfte abnahm (Gross, 1987; Lambrecht und Kuhn, 2007). Abbildung 4.7 zeigt den schnellen Verlust der Zunge im

Taubenkar zwischen 1856 und 1899 aufgrund des Abreißens über der Steilstufe des Eisjochs, wobei der Hallstätter Gletscher schon fast ein Fünftel seiner ursprünglichen Fläche verlor. Jedoch blieben größere, schuttbedeckte Toteismassen im Kar zurück. Nach einem geringen Flächenverlust bis 1915 folgte eine Periode größeren Flächenrückgangs in der sich die drei eigenständige Zungenlappen des Gletschers ausbildeten. In Folge zeigt die mittlere Zunge den größten Flächenverlust.

Betrachtet man die Flächen-Höhenverteilung der einzelnen Gletscherstände (Abb. 4.9, Tab. 4.3), so zeigt sich, dass die Flächenverluste des Hallstätter Gletschers hauptsächlich unterhalb von 2600 m Höhe auftraten. In der Verteilung von 1856 ist deutlich die Fläche des mit Eis gefüllten Taubenkars unterhalb 2100 m Höhe zu sehen. Darauf schließt sich die Steilstufe des heutigen Eisjochs mit geringer Fläche an. Erst im flachen Bereich des zu diesem Zeitpunkt gänzlich mit Eis gefüllten Kares südöstlich der Simonyhütte wurden größere Flächenwerte erzielt. In weiterer Folge zog sich der Gletscher in dieses zurück, wobei die Minimum-Höhe der Gletscherzunge annähernd gleich blieb. Bis 1958 erfuhr der Gletscher jedoch darüber einen großen Flächenverlust durch die Separation der drei Zungen. Erst mit dem Rückzug der mittleren Zunge bis in die Senke, worin sie sich derzeit befindet, stieg auch die Minimum-Höhe.

Höhenstufe	1856	1899	1915	1958	1969	2002	2007
1975	21355	0	0	0	0	0	0
2025	160765	0	0	0	0	0	0
2075	253378	3626	6894	16457	9343	0	0
2125	103574	112230	125852	50395	24535	1585	0
2175	346940	254763	211590	54845	37332	19322	3158
2225	361408	215168	174568	68016	49745	28334	22008
2275	250627	206387	189562	100928	67867	59929	50374
2325	274706	258540	280933	159139	151160	127876	121801
2375	316059	299905	294284	227076	215883	211706	200161
2425	373968	329615	320933	308609	280820	259058	252503
2475	384193	377173	352423	416127	362245	365730	363903
2525	455950	420815	444255	341810	413419	384859	379148
2575	491585	490126	512047	495852	469300	486457	494411
2625	700793	650829	629565	571916	635718	607184	582242
2675	444741	413123	381416	410734	374838	346365	330422
2725	236668	215978	198538	206449	175190	176785	167824
2775	44480	46947	47623	49245	40196	36452	35914
2825	28323	28064	29327	26991	26227	29574	26946
2875	16455	14665	12288	12534	10417	10999	10302
2925	2728	2583	610	108	979	20	0

Tabelle 4.3: Fläche der 50-m-Höhenstufen um den angegebenen Zentralwert in m^2 zu den jeweiligen Gletscherständen.

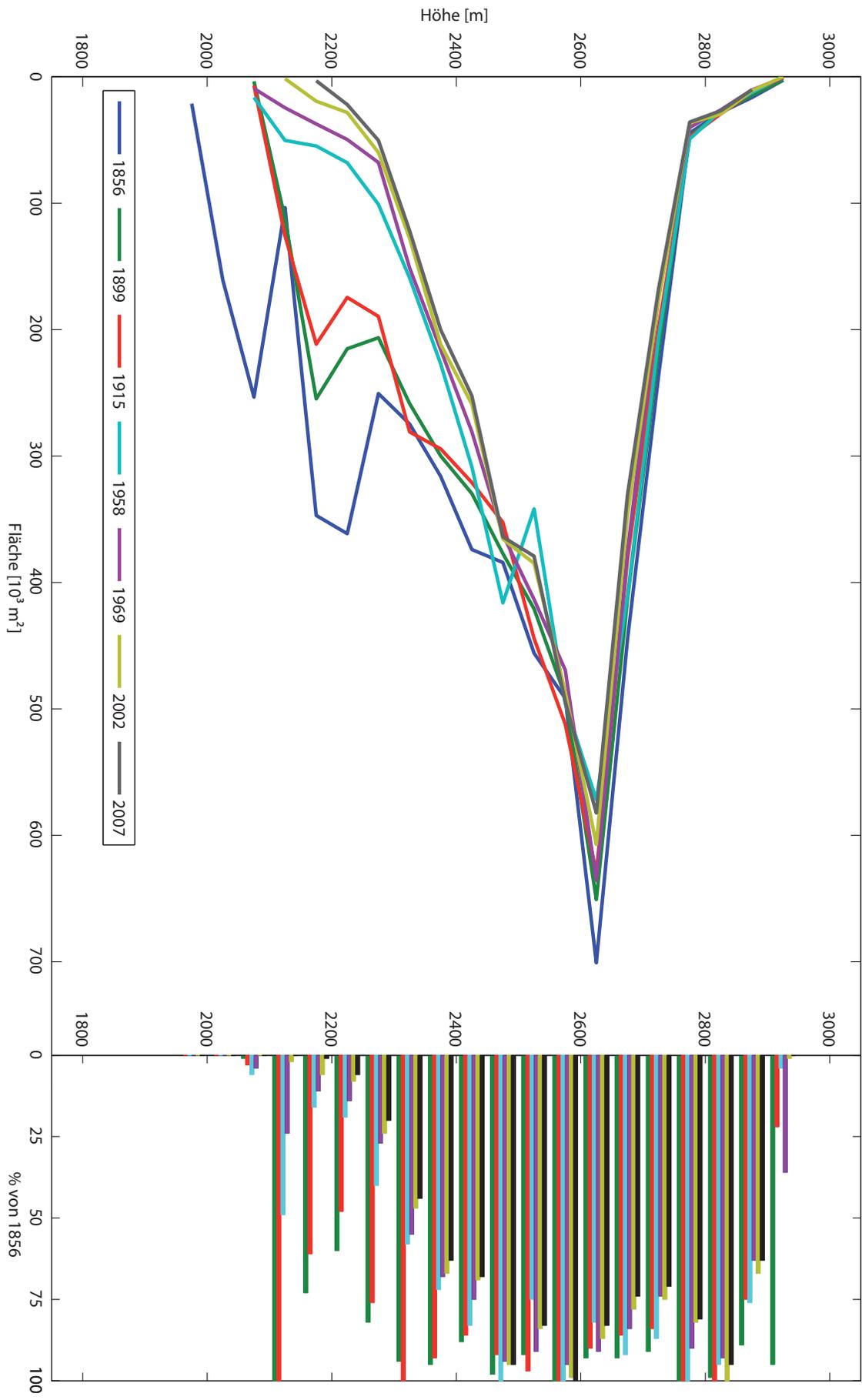


Abbildung 4.9: Flächen-Höhen-Verteilung des Hallstätter Gletschers in den Jahren der Kartierung. Links die Absolutwerte der Flächen in den Höhenstufen. Rechts der prozentuale Anteil gegenüber der Fläche von 1856.

4.4 Eisdicke

Die Messung der Eisdicke ist neben der Fläche des Gletschers nötig, um das Volumen der Eismasse zu bestimmen und den Gletscheruntergrund zu rekonstruieren. Die Verbindung zwischen Verteilung der Eisdicke und Höhenverlust der Eisoberfläche liefert wichtige Informationen über die zukünftige Entwicklung des Gletschers und lässt Volumenunterschiede im Verhältnis zur Gesamtmasse einordnen.

4.4.1 Messung der Eisdicke

Bis auf die seismischen Messung der Eisdicke 1967/68 durch Brückl et al. (1969) wurden bezüglich der Mächtigkeit des Hallstätter Gletschers bis 2009 keine Untersuchungen durchgeführt. Am 14. und 15. Januar 2009 wurden mit einem Radarecholot (Ground-Penetrating-Radar - GPR) Eisdicken gemessen. Die Verwendung eines GPR ist die auf Gebirgsgletschern am häufigsten angewandte Methode. Der geringere logistische Aufwand sowie die Möglichkeit, quasikontinuierliche Profile zu messen sind hierfür die Gründe. Bei der Radarecholotung sendet das GPR über Antennen ein gepulstes elektromagnetisches Signal aus. Zu einem dringt dieses in den Gletscher ein, wird am Untergrund reflektiert und gelangt zum Empfänger. Ein zweiter Weg des Signals ist der direkte durch die Luft zum Empfänger. Für die Eisdickenmessung zählt der Laufzeitunterschied zwischen den zwei Signalen am Empfänger.

Die Laufzeit des Signals wird von den elektromagnetischen Eigenschaften des Eises, welche durch die komplexe relative Permittivität ε (Gl.4.2) beschrieben werden, beeinflusst.

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (4.2)$$

ε' ist von der Temperatur des Mediums sowie Frequenz des Signals abhängig (Mätzler, 1987). Bei Verwendung einer Frequenz im Mikrowellenbereich ist der Realteil der komplexen relativen Permittivität von Eis $\varepsilon'_{Eis} \approx 3,15$ annähernd unabhängig von der Temperatur. Wasser besitzt bei 0°C eine hohe relative Permittivität $\varepsilon'_{W(0)} \approx 80$. Dies führt zur Dämpfung hoher Frequenzen. Auf temperierten Gletschern werden aufgrund des hohen Flüssigwasseranteiles Frequenzen bis 10 MHz verwendet um die nötige Eindringtiefe zu erreichen. Für Schnee, welches ein Gemisch aus Eis, Luft und flüssigem Wasser ist, wird die Permittivität durch Mischungsformeln beschrieben (Denoth, 1989). Damit die elektromagnetische Welle reflektiert wird und eine Phasenumkehr erfolgt, muss sie von einem Medium mit kleiner auf eines mit größerer relativer Permittivität treffen. Dies ist an der Grenzschicht Eis-Fels gegeben. Das Signal wird aber entsprechend den Unterschieden der Permittivität auch an Inhomogenitäten im Eis gestreut und reflektiert. Diese werden im Eis durch Eisbewegung, Spalten, Luft-, Wasser sowie Gesteinseinschlüssen

produziert. Im Firn des Nährgebietes sind Schichten mit unterschiedlicher Dichte, Wassergehalt und Korngröße zu finden. Aufgrund verschiedener Entstehungszyklen treten auch in reinem Eis interne Grenzschichten auf.

Die elektromagnetische Welle des ausgesandten Signals durchdringt das Medium mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c . Diese ist kleiner als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 und von den elektromagnetischen Eigenschaften abhängig (Gl. 4.3).

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon'}} \quad (4.3)$$

Für Gletschereis findet man in der Literatur verschiedene Werte. z.B. $167,7 \frac{m}{\mu s}$ [$\epsilon' = 3,195$, Glen (1975)], $168,5 \frac{m}{\mu s}$ [$\epsilon' = 3,170$, Robin (1975)] und $169,0 \frac{m}{\mu s}$ [$\epsilon' = 3,150$, Kovacs (1995)]. Für die Auswertungen der Laufzeiten am Hallstätter Gletscher wurde das Gletschereis als homogen angenommen und eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von $c_E = 168 \frac{m}{\mu s}$ verwendet (Bauder, 2001) (Narod und Clarke, 1994). Die Firnschicht sowie der Winterschnee wurden vernachlässigt und für Luft eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von $c_L = 300 \frac{m}{\mu s}$ eingesetzt.

Unter Verwendung des aus der Laufzeit des direkten Signals t_D und des reflektierten Signals t_R gemessenen Laufzeitunterschiedes $\Delta t = t_R - t_D$, des Abstandes zwischen Sender und Empfänger a und den Geschwindigkeiten in Eis c_E und Luft c_L lässt sich die Eisdicke im Falle eines homogenen, planparallelen Eiskörpers h nach Gleichung 4.4 bestimmen.

$$h = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\Delta t + \frac{a}{c_L}\right)^2 \cdot c_E^2 - a^2} \quad (4.4)$$

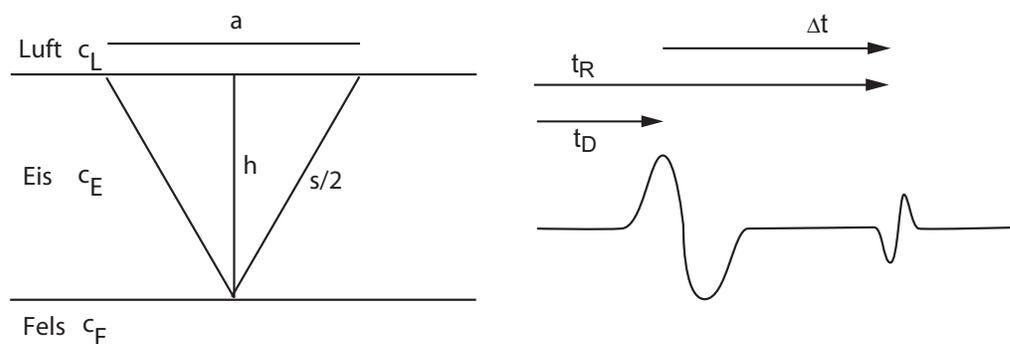


Abbildung 4.10: Laufzeitunterschied des direkten und des reflektierten Signals.

Im Falle eines nicht planparallelen Eiskörpers wird die Lage des Reflexionspunktes durch Migration (Abbildung 4.11) ermittelt (Yilmaz, 1987). Dabei werden an den berechneten Reflexionspunkten Ellipsoide erzeugt, in deren Brennpunkte Sender und Empfänger liegen. Durch Berechnung der Umhüllenden der Ellipsoide der möglichen Reflexionspunkte wird die Untergrundsform konstruiert.

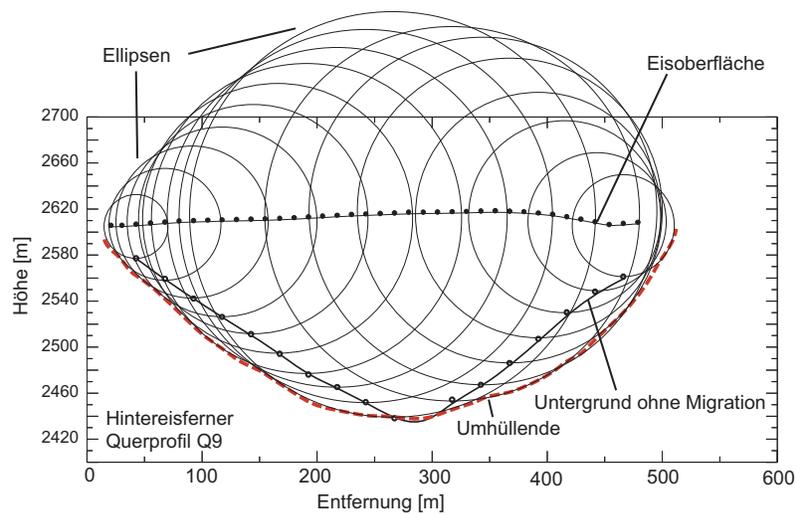


Abbildung 4.11: Korrektur des Reflexionspunktes und somit der Eistiefe durch Migration am Beispiel des Profils Q9 am Hintereisferner. Aus: Span et al. (2005).

Messung

Am 14. und 15. Januar 2009 wurden die Eisdickenmessungen durch Mitarbeiter des Instituts für Meteorologie und Geophysik mit einem Narod Radargerät durchgeführt.



Abbildung 4.12: Bei GPR-Messungen auf dem Hallstätter Gletscher am 14.01.2009.

Der verwendete Hochleistungs-Impulssender von Narod und Clarke (1994) sendet bipolare 550 V Pulse mit einer Anstiegszeit von unter 2 ns und einer Pulswiederholungsra-

te von 512 Hz. Die Aufzeichnung des Signals am Empfänger erfolgte mit einem digitalen Scopemeter des Typs Fluke 105B. Dieses ermöglicht Abtastgeschwindigkeiten von bis zu 5 GS/s und es können Störimpulse bis 40 ns aufgezeichnet werden. Es wurden am Institut für Meteorologie und Geophysik hergestellte, widerstandsbelastete Dipol-Antennen verwendet (Wu und King, 1965). Von innen nach außen sind darauf jeweils Widerstände mit 68, 82, 120, 220 und 680 Ohm angeordnet um eine Reflexion des Signals am Antennennende zu verhindern. Die Antennen besaßen eine Länge von 30 m. Die zur Berechnung der zentralen Frequenz (Gl. 4.5 nach pers. Mitteilung Narod) benötigte halbe Länge ist daher $l = 15\text{m}$. Daraus ergibt sich eine zentrale Frequenz von 6,5 MHz.

$$f_c = \frac{96}{l} \text{MHz} \quad (4.5)$$

Die Eisdicke wurde an 104 Punkten gemessen. Dies entspricht einer Punktdichte von 34 Messpunkten pro km^2 (Abb. 4.13).

Aus der gewonnen Eisdicke wurde anhand der Punktmessungen Isolinien gleicher Eisdicke händisch gezeichnet. Bei dieser Methode haben gletscherkundliche Erfahrungen sowie Kenntnis der umliegenden Topographie Einfluß. Interpolationsverfahren auf Grundlage einzelner Punkte liefern hier schlechtere Ergebnisse (Fischer, 2009). Die Isolinien wurden anschließend in ArcGis mit dem Tool *TopoToRaster* zu einem 3D-Modell der Eisdicke interpoliert, wobei als äußere Grenze der Gletscherrand von 2007 mit 0 m Eisdicke diente.

Fehlerabschätzung

Eine Fehlerquelle bei der Eisdickenmessung mit GPR ist die Ablesegenauigkeit bei der Bestimmung der Laufzeit. Dieser kann etwa 30 ns betragen. Der Abstand zwischen Sender und Empfänger kann bei dem verwendeten Gerät ebenfalls um 2 m variieren. Bei einer Laufzeit von $1 \mu\text{s}$ und einem Antennenabstand von 15 m ist somit ein Fehler von etwa 3 m Eisdicke möglich.

Weiter tragen systematische Fehler zu Unsicherheiten bei. Diese sind stark von den Gegebenheiten vor Ort zum Zeitpunkt der Messung abhängig. Systematische Fehler entstehen aus internen Reflexionen, ungünstiger Untergrundgeometrie, falschen Annahmen über die Geschwindigkeiten sowie der Vernachlässigung von Firn- und Schneeschichten am Gletscher. Im folgenden werden mögliche Fehlerquellen genauer beschrieben.

Fehler durch interne Reflexion Durch Reflexion und Streuung des Signals an internen Schichten mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften wird die Interpretation der reflektierten Signale erschwert. Dabei kann es zu einer Vervielfältigung der Signale oder einem durch Absorption und Streuung an internen Schichten so großen Verlust kommen, dass das reflektierte Signal am Empfänger nicht mehr messbar ist. Auch an der Grenzschicht Eis/Luft von Gletscherspalten wird das Signal schwer interpretierbar reflektiert.

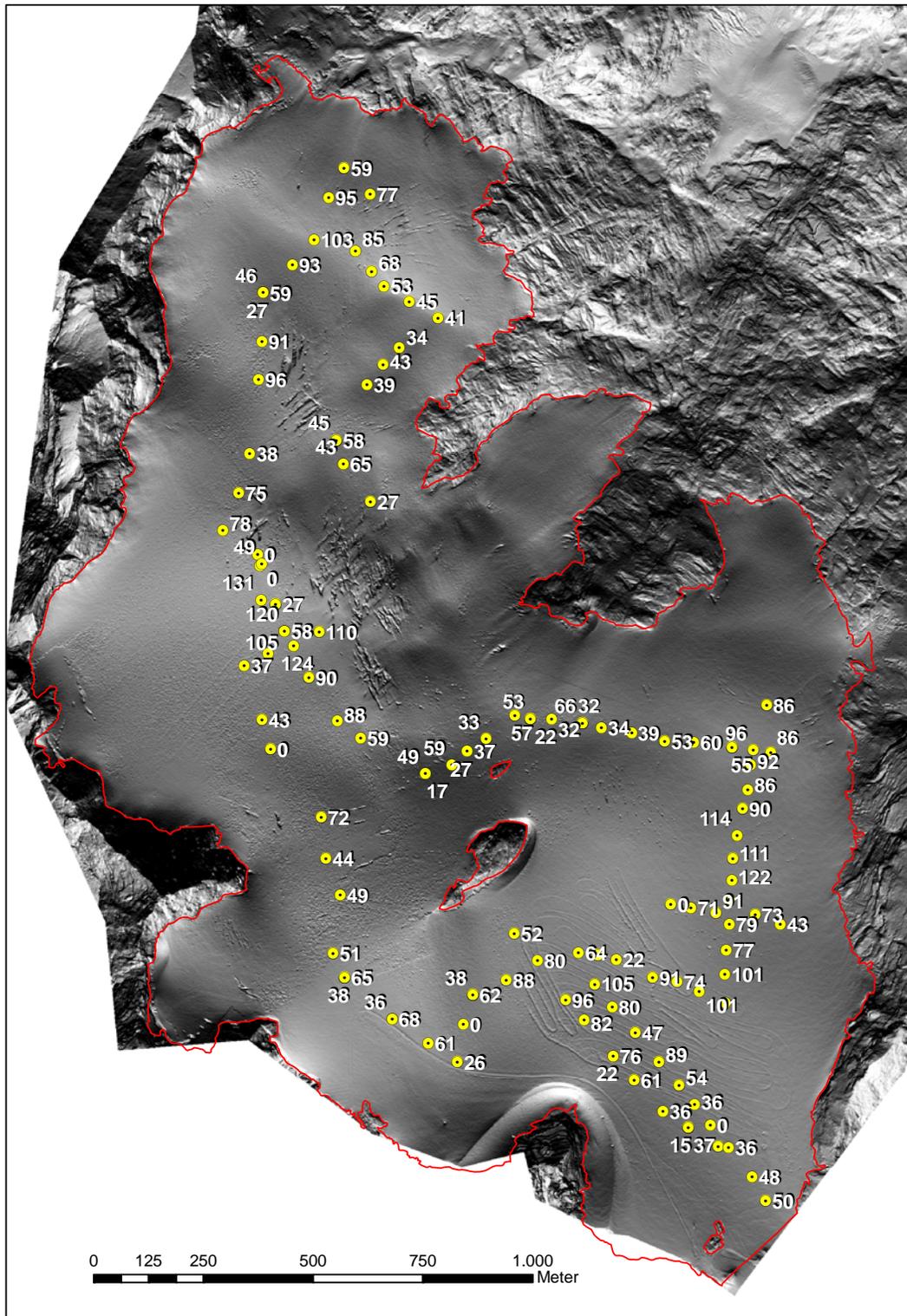


Abbildung 4.13: GPR-Messungspunkte (gelb) mit Eisdicke in Meter am Hallstätter Gletscher, 14.01.2009. Rot eingezeichnet der Gletscherrand von 2007.

Fehler durch ungünstige Untergrundgeometrie Große Rauigkeit des Untergrundes erschwert die Zuordnung des nicht zwingend unter dem Messprofil liegenden Reflexionspunktes. Solche Probleme können nur durch sehr dichte Messungen und dreidimensionale Migrationsverfahren mit großem Zeitaufwand vermieden werden. Hier wird die Eisdicke eher unterschätzt, da das Signal von außerhalb des Profils gelegenen Erhebungen im Gletscherbett reflektiert wird.

Fehler durch unbekannte Dicke der Firn/Schneesicht Der maximale Fehler durch Vernachlässigung der Firnschicht beträgt 5 % Haerberli et al. (1982). Nimmt man eine mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit in Firn von $200 \frac{m}{\mu s}$ und in trockenem Winterschnee von $290 \frac{m}{\mu s}$ an, unterschätzt man bei einer Winterschneedecke von 4 m, einer Firnschicht von 20 m und einer Eisschicht von 100 m die Gesamtdicke des Firn/Eiskörpers bei Vernachlässigung der Winterschneesicht um einen Meter. Die genaue Dicke sowie Dichte und Wassergehalt der Firnschicht des Hallstätter Gletschers zum Zeitpunkt der Messung sind nicht bekannt. Die Winterschneedecke zum Zeitpunkt der Messungen hatte eine geringe Mächtigkeit von 0,2 bis 1,5 m.

Fehler durch Vernachlässigung der Hangneigung Bei steilen Gletschern liegt der Reflexionspunkt nicht unterhalb des Profils. Da die Messpunkte am Hallstätter Gletscher alle in relativ flachen, spaltenarmen Gebieten durchgeführt wurden, kann dieser Fehler vernachlässigt werden.

Fehler durch interne Reflexion, unbekannte Signalwege und ungünstige Untergrundgeometrie werden im Normalfall bei der Datenkontrolle durch Vergleich mit den Nachbarpunkten erkannt. Der Gesamtfehler aus Ablesefehler und Vernachlässigung der Firn/Schneesicht kann etwa 5 m betragen.

Ergebnisse

Die Eisdicke des Hallstätter Gletschers betrug zum Zeitpunkt der Messung bis zu 131 m. Die größten Eismächtigkeiten werden zu einem nördlich der Steinerscharte sowie östlich des Eissteins erreicht. Eisdicken von rund 100 Metern lassen sich auch noch im Bereich des westlichen Zungenlappens finden. Die mittlere Eisdicke beträgt 49 Meter. Der Bereich der mittleren Zunge sowie nördlich des Eissteins weisen mit unter 40 m geringere Eisdicken auf. Die Eisschicht zum Schladminger Gletscher ist mit Eisdicken zwischen 20 bis 30 m recht dünn. Erste Felsausaperungen bestätigen dies.

4.4.2 Gletscheruntergrund

Aus der Verteilung der Eisdicke lässt sich der Gletscheruntergrund darstellen. Dieser zeigt, wie es ohne den Gletscher ausschauen würde. Weiter dient er zur Ermittlung von

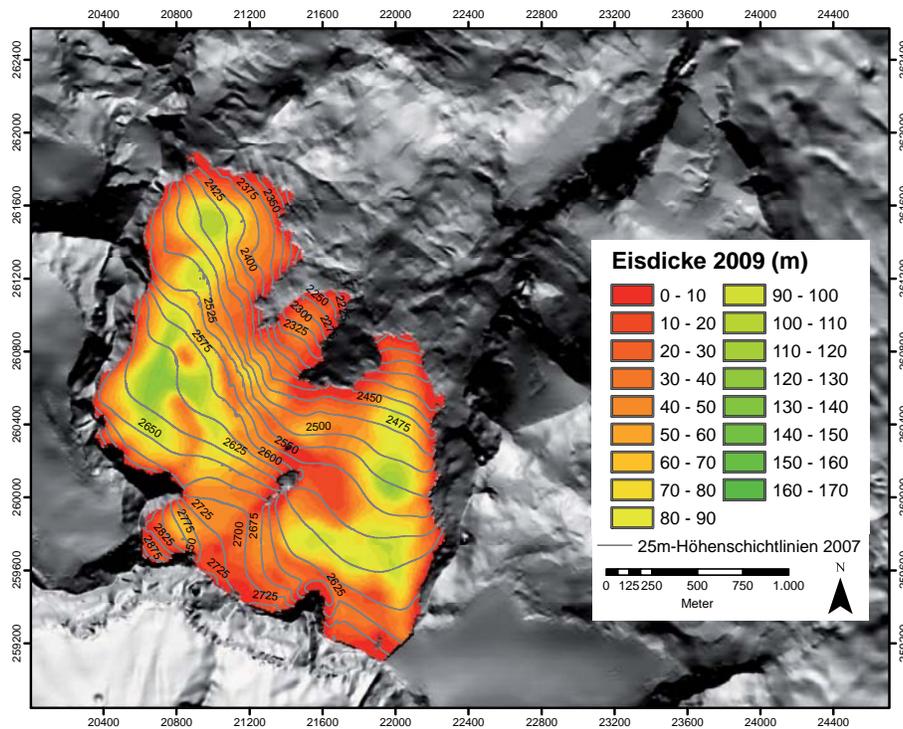


Abbildung 4.14: Eisdicke des Hallstätter Gletschers 2009.

Eisdicken früherer Gletscherstände. Zur Erstellung des Untergrundes des Hallstätter Gletschers wurde von der Oberflächenhöhe des DGM 2007 die gerasterte Eisdickeninformation in *ArcGis* mit dem Tool *Minus* abgezogen. Unter Verwendung des Befehles *mosaic* mit der Einstellung, das die jeweils niedrigere Höheninformation verwendet wird, wurden die zwei Höhenmodelle miteinander verbunden.

Abbildung 4.15 zeigt den aus den Eisdicken ermittelten Untergrund von 2007. Deutlich spiegeln sich hier die Vertiefungen der Becken östlich des Eissteins und nördlich der Steinerscharte wieder. Die Bereiche steilerer Untergrundgeometrie stimmen mit dem Auftreten heutiger Spaltengebiete überein.

4.4.3 Eisdicken früherer Gletscherstände

Verbindet man die Information des Untergrundes mit den Oberflächenhöhen früherer Gletscherstände, so kann man den Höhenunterschied zwischen ihnen, und damit die Eisdicke ermitteln.

Methode

Ausgehend von den georeferenzierten Kartendarstellungen 1899, 1915 und 1958 wurden die Höhenlinien der jeweiligen Gletscheroberflächen in *ArcGis* nachgezeich-

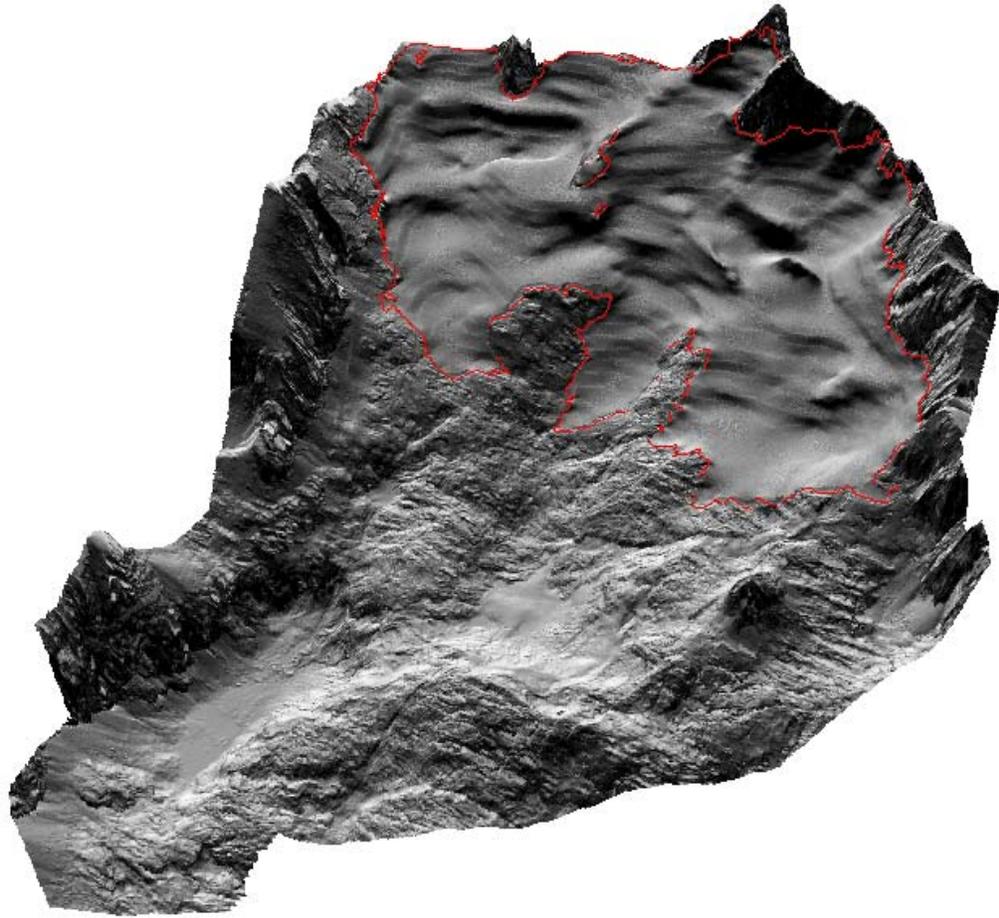


Abbildung 4.15: Untergrund des Hallstätter Gletschers aus digitalem Höhenmodell 2007 und Radarmessungen 2009. Die Gletschergrenze 2007 ist als rote Linie dargestellt.

net. Dabei wurden für 1899 25-m-Isolinien und für 1915 und 1958 10-m-Isolinien erzeugt. Die Höhenlinien von 1856 wurden unter Verwendung von Höhenänderungsangaben in der Literatur, Abbildungen des Gletschers und der Zugrundelegung der 25-m-Höhenschichtlinien der Karte von Hübl händisch erstellt. Mit der Höheninformation für die unvergletscherten Flächen aus dem DGM von 2002 wurde mit der ArcGis-Tool *TopoToRaster* ein DGM für den jeweiligen Gletscherstand erzeugt. Die Gletscheroberflächen von 1969 und 2002 wurden den entsprechenden DGM entnommen. Der Unterschied zwischen diesem Oberflächenmodell und dem ermittelten Gletscheruntergrund (Kap. 4.4.2)

im Bereich der Gletschergrenze ergibt die Eisdicke.

Ergebnisse

Die Abbildungen 4.16 bis 4.27 zeigen für die Gletscherstände 1856, 1899, 1915, 1958, 1969 und 2002 eine Ansicht der Gletscheroberfläche sowie die Eisdicke der entsprechenden Gletscherstände. Das Maximum der Eisdicke 1856 mit 171 m (Tab.4.4) befindet sich am südlichen Ende des Kares südöstlich der Simonyhütte. Zu diesem Zeitpunkt war das obere Taubenkar mit rund bis zu 150 m Eis gefüllt. 1899 zeigt sich das Maximum im Becken nördlich der Steinerscharte. Je nach Verlauf der Höhenschichtlinien bewegt es sich bis 1969 zwischen 140 und 150 m. Dies ist sicher auch auf die Schwierigkeiten photogrammetrischer Aufnahmen in diesem kontrastlosen Firnbecken zurückzuführen. Die Höhe der Firnschicht kann hier ebenfalls eine Rolle spielen. Eine weitere Reduzierung des Maximums erfolgt erst zum Gletscherstand von 2002, worauf das Maximum bis 2007 konstant blieb. Seit 1856 nahm die mittlere Eisdicke gemittelt über die einzelnen Perioden ab. Die hohe mittlere Eisdicke von 1856 ist ein Resultat der im Taubenkar und dem Kar südöstlich der Simonyhütte gelegenen Eismassen. Mit dem Abreißen des Gletschers über das Eisjoch blieben die mächtigen Eismassen im Bereich der heutigen oberen Eisseen. Mit dem Abschmelzen dieser verringerte sich die mittlere Eisdicke weiter.

Jahr	h_{MAX} (m)	h_{MEAN} (m)
1856	171	75,5
1899	147	59,6
1915	140	56,1
1958	151	55,3
1969	145	55
2002	131	51,3
2007	131	48,7

Tabelle 4.4: Maximale Eisdicke (h_{MAX}) und mittlere Eisdicke (h_{MEAN}) der jeweiligen Gletscherstände.



Abbildung 4.16: Beleuchtetes Höhenmodell der Gletscheroberfläche 1856 auf Orthophoto 2002.

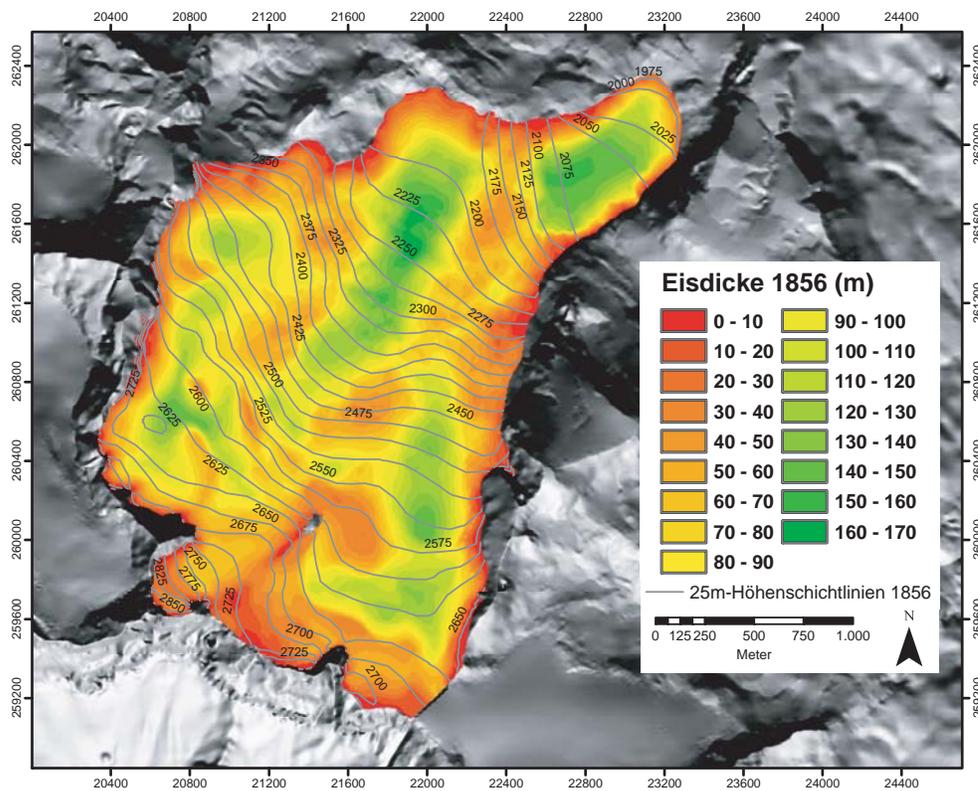


Abbildung 4.17: Eisdicke des Hallstätter Gletschers 1856.

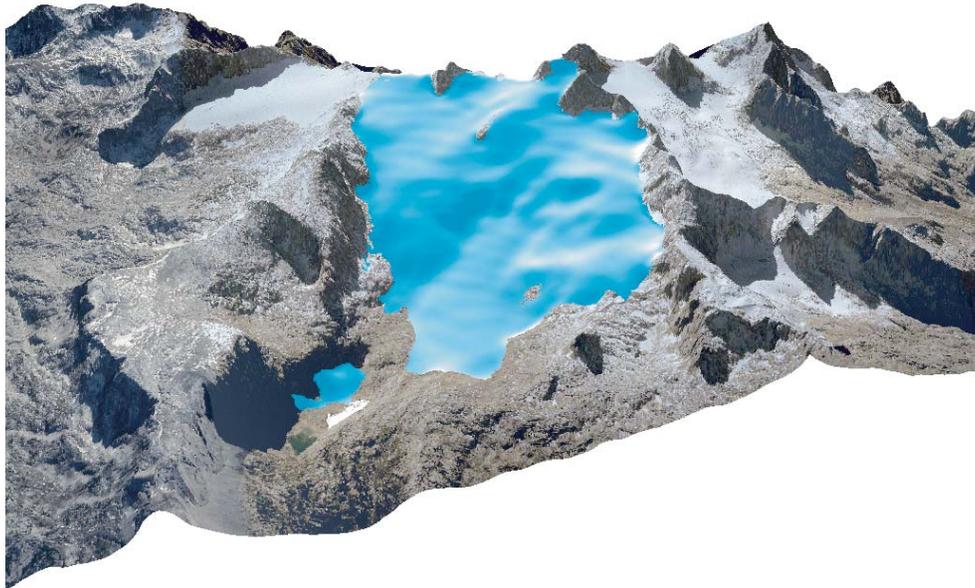


Abbildung 4.18: Beleuchtetes Höhenmodell der Gletscheroberfläche 1899 auf Orthophoto 2002.

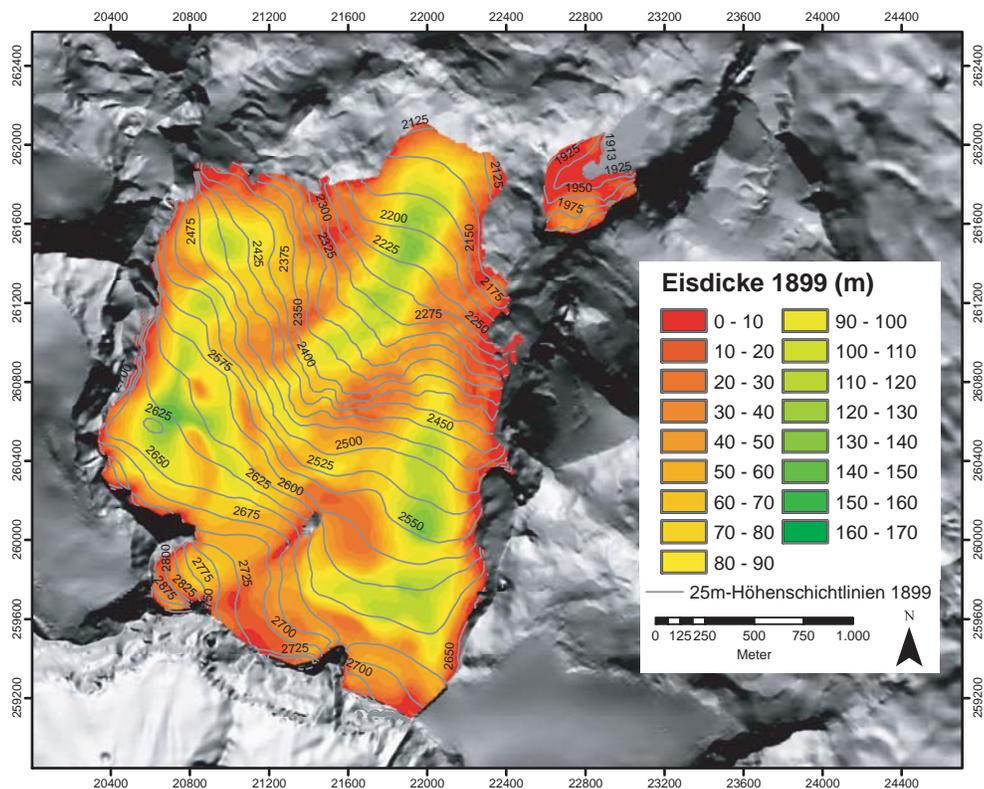


Abbildung 4.19: Eisdicke des Hallstätter Gletschers 1899.

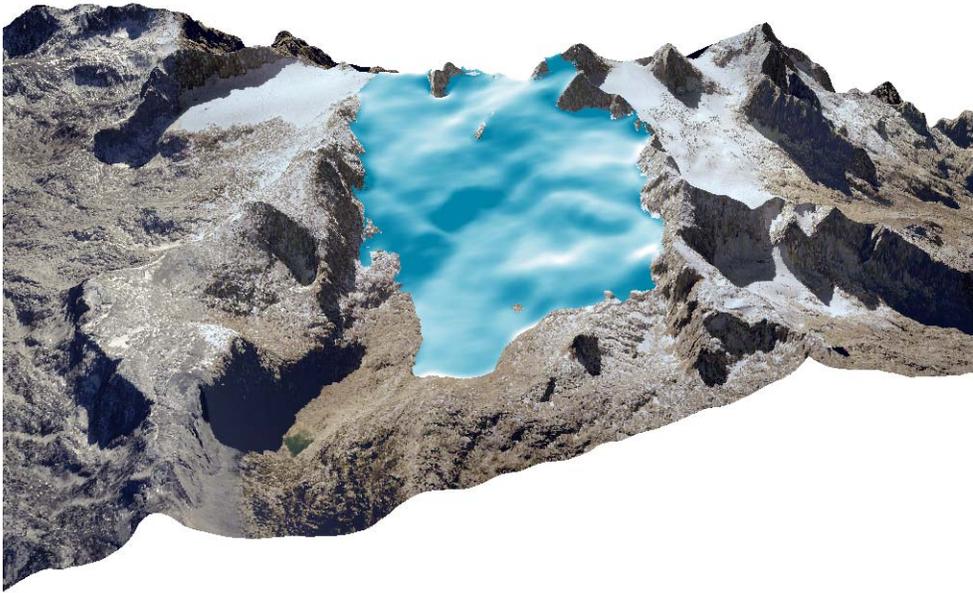


Abbildung 4.20: Beleuchtetes Höhenmodell der Gletscheroberfläche 1915 auf Orthophoto 2002.

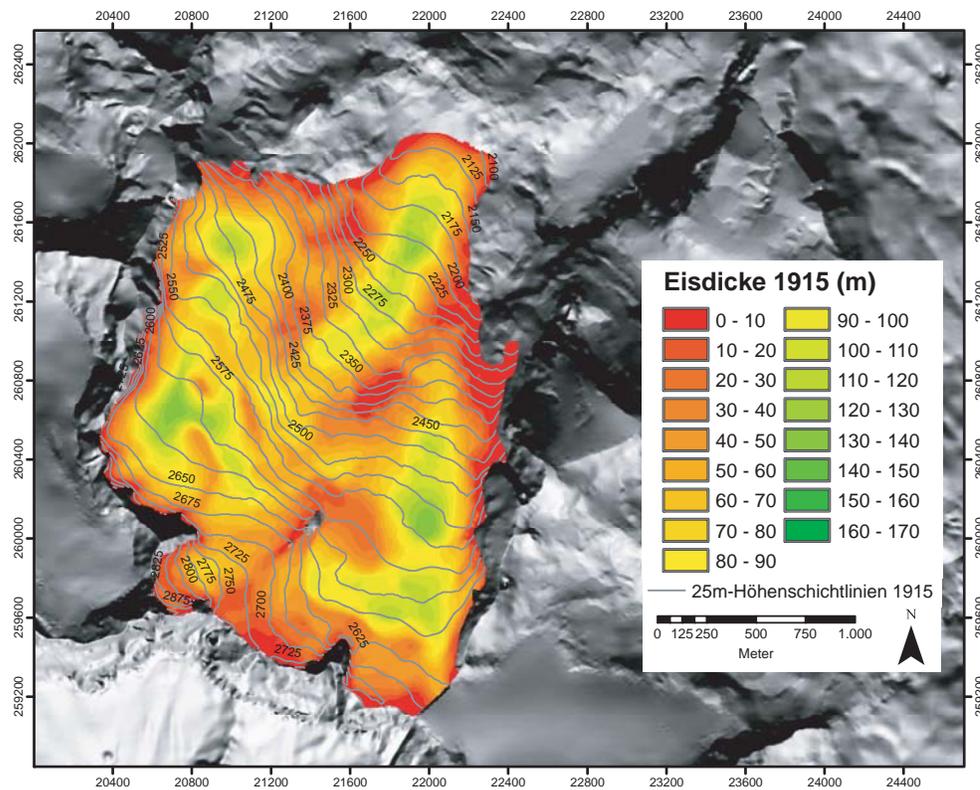


Abbildung 4.21: Eisdicke des Hallstätter Gletschers 1915.

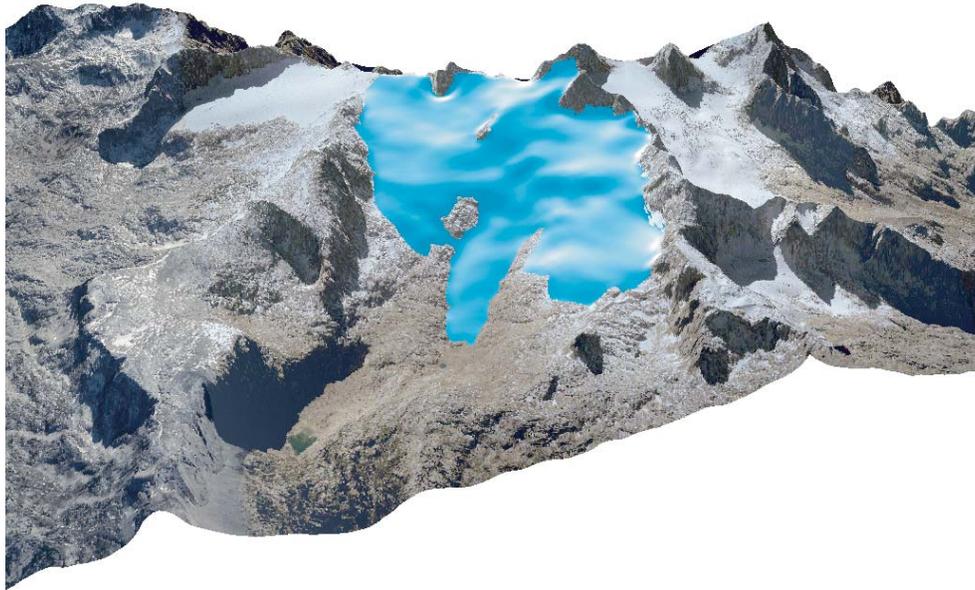


Abbildung 4.22: Beleuchtetes Höhenmodell der Gletscheroberfläche 1958 auf Orthophoto 2002.

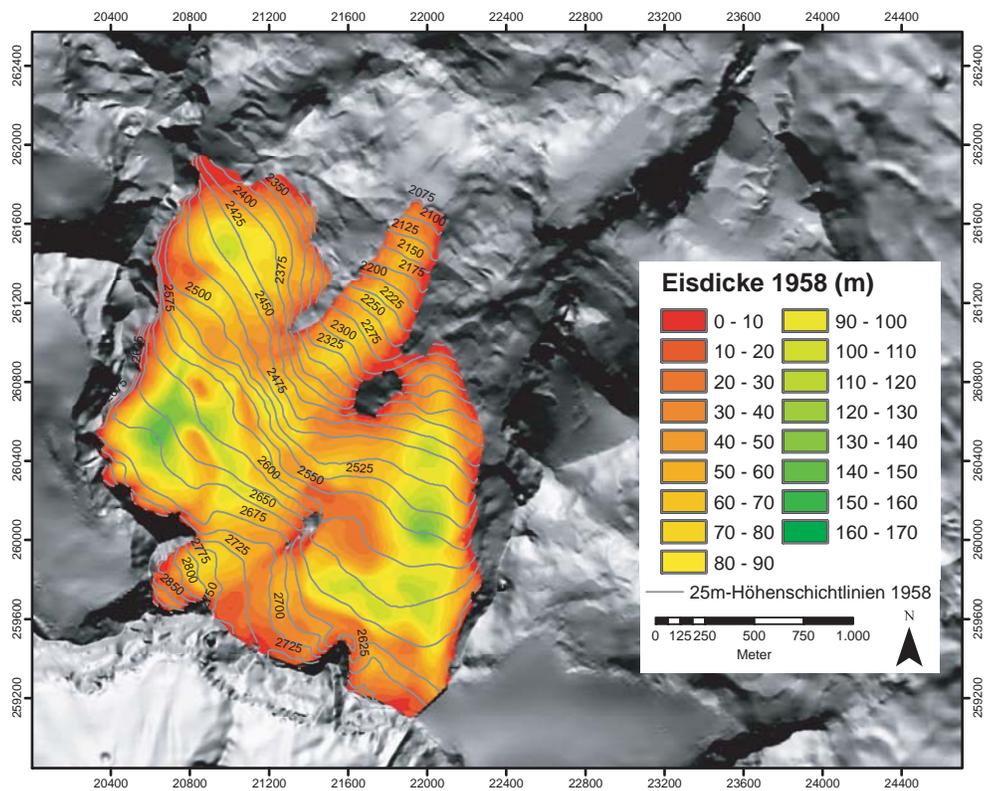


Abbildung 4.23: Eisdicke des Hallstätter Gletschers 1958.

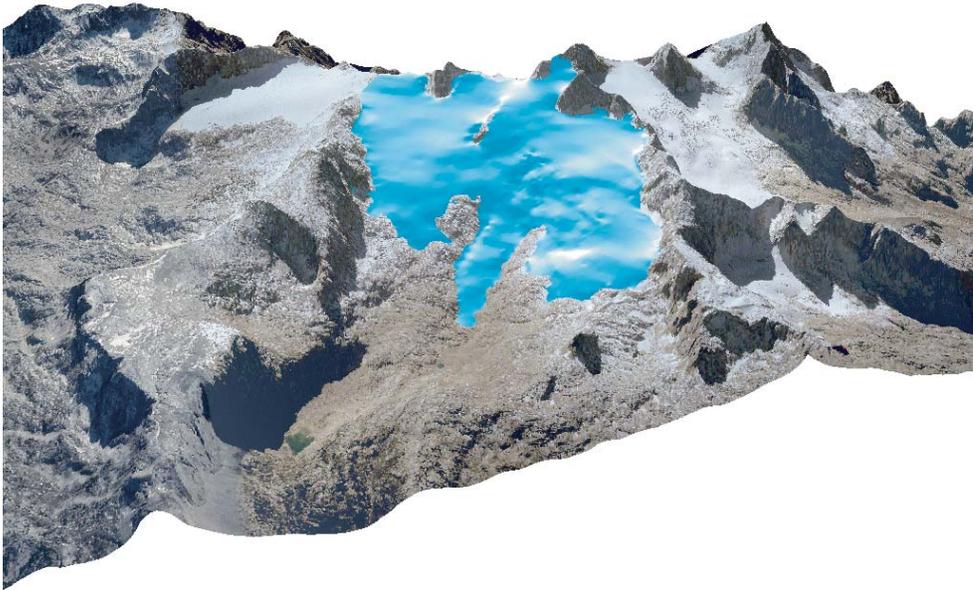


Abbildung 4.24: Beleuchtetes Höhenmodell der Gletscheroberfläche 1969 auf Orthophoto 2002.

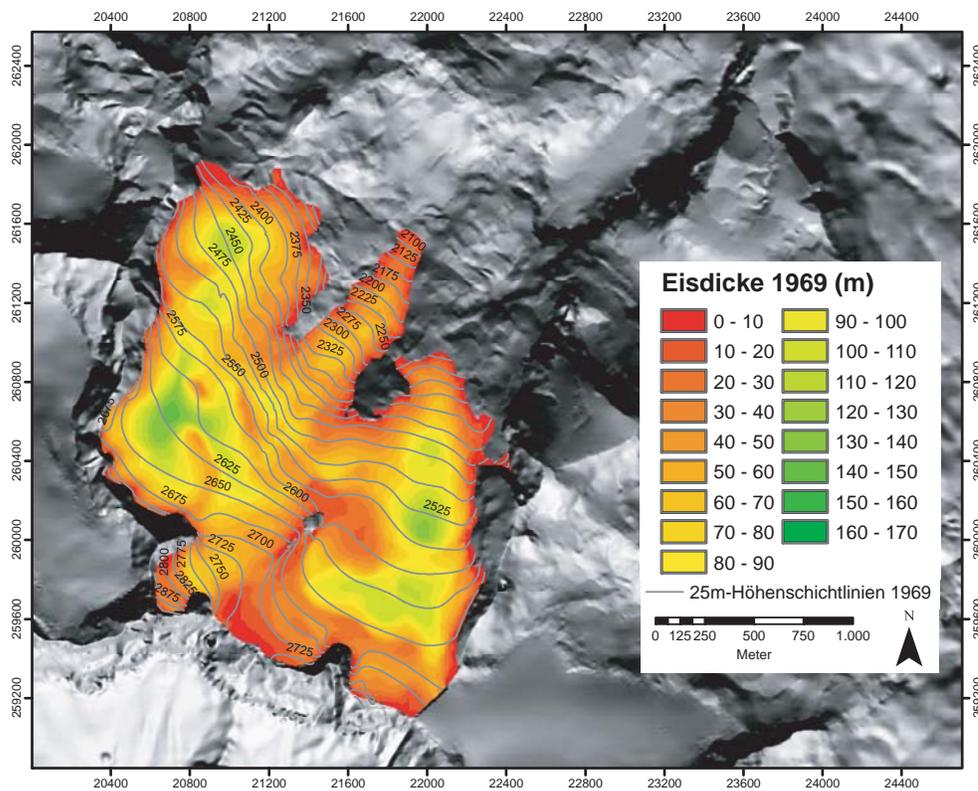


Abbildung 4.25: Eisdicke des Hallstätter Gletschers 1969.

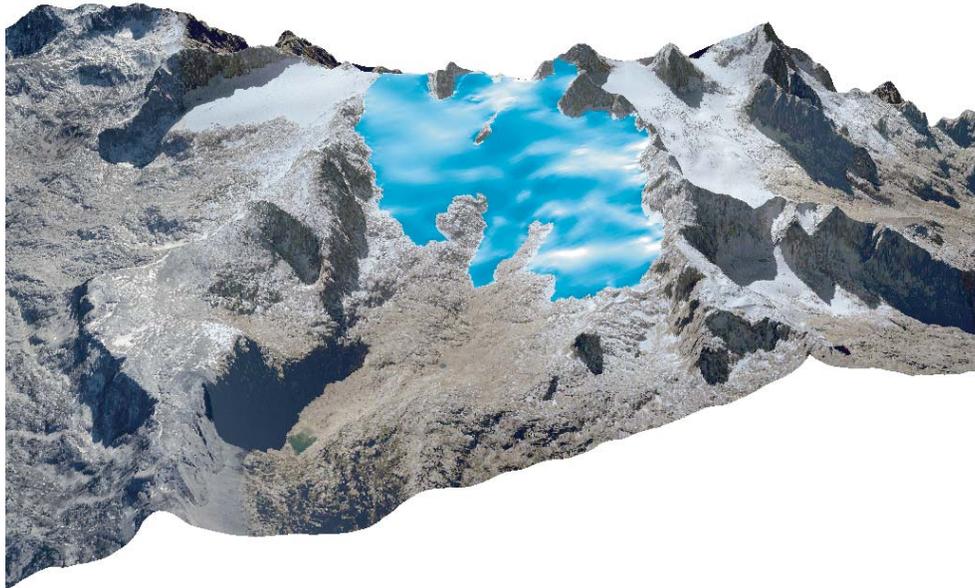


Abbildung 4.26: Beleuchtetes Höhenmodell der Gletscheroberfläche 2002 auf Orthophoto 2002.

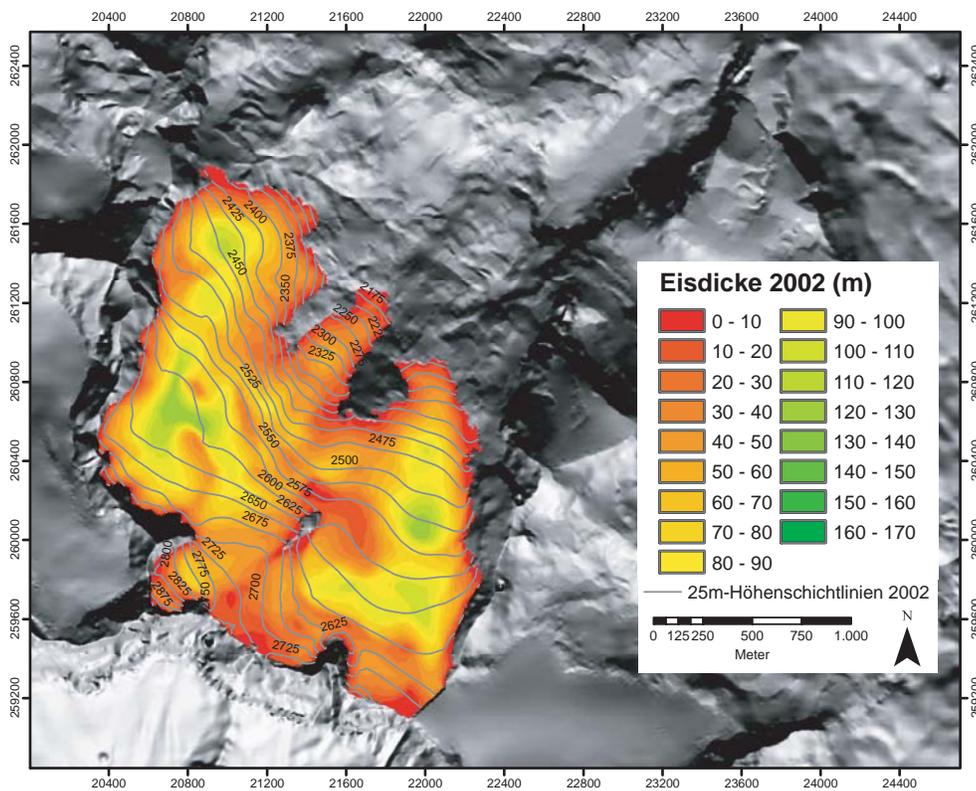


Abbildung 4.27: Eisdicke des Hallstätter Gletschers 2002.

4.4.4 Eisdickenänderung in den einzelnen Perioden

In die Eisdickenänderung der einzelnen Perioden fließt im Gegensatz zur mittleren Eisdicke des jeweiligen Gletscherstandes auch noch der Eisverlust an der Gletscherfront mit ein. Sie zeigen neben dem Wieviel vor Allem auch wo die Änderungen auftreten.

Methoden

Die Oberflächenmodelle der Gletscherstände wurden in ArcGis mit dem Tool *Minus* voneinander abgezogen. Das zeitlich frühere Höhenmodell wurde vom Ausgangsmodell subtrahiert. Somit ergibt sich im Falle einer Niveauabsenkung zwischen den Gletscherständen ein negativer Wert. Anschließend wurde das Ergebnis mit dem Befehl *ExtractByMask* mit der jeweils älteren Gletschergrenze ausgeschnitten.

Ergebnisse

Die Höhenänderungen der Eisdicke in den Perioden 1856 - 1899, 1899 - 1915, 1915 - 1958, 1958 - 1969, 1969 - 2002 und 2002 - 2007 sowie über den gesamten Zeitraum von 1856 bis 2007 werden in den Abbildungen 4.28 bis 4.34 veranschaulicht. Die Eisdickenänderungen aller Perioden sind in Tabelle A.3 zu finden. Zwischen 1856 und 1899 ist ein deutlicher Dickenverlust der im oberen Taubenkar gelegenen Eismassen ersichtlich. Desweiteren erfolgte eine Ausdünnung entlang der steileren Bereiche welche den Eisfluß in Richtung Taubenriedl flankieren. Bis 1915 erfolgte die Auflösung der letzten Toteisreste im Taubenkar. Stärkere Eisdickenverluste traten an der Gletscherfront auf. In der Periode bis 1958 schritt der Eisdickenverlust vor Allem südlich des Taubenriedl voran. Die starke Zunahme nördlich der Steinerscharte sowie die der Eisdickenverlust auf dem westlichen Zungenlappen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Interpretationsfehler der Höhe der konturlosen Firnschicht bei Erstellung der Karte von 1958. Diese werden mit dem DGM von 1969 wieder ausgeglichen. Auch in diesen 11 Jahren zeigt sich der stärkste Eisdickenverlust an der mittleren Zunge. Der starke Eisdickenverlust südlich des Eissteins beruht auch auf Verschiebung der Höhenlinien im DGM 1969. Dieser wird mit dem DGM 2002 ausgeglichen. In dieser Periode zeigt sich großflächig eine Eisdickenänderung von 0 bis -4 m. Nur am Ende der mittleren Zunge treten deutlich größere negative Änderungen auf. Die erneut sichtbaren negativen Änderungen im Firnbecken nördlich der Steinerscharte können auf eine Überblendung der photogrammetrischen Aufnahmen beruhen. Hier tritt im Zeitraum von 2002 bis 2007 wieder eine positive Eisdickenänderung auf, während über die restliche Gletscherfläche ein Eisdickenverlust zu verzeichnen ist. Betrachtet man die Eisdickenänderung im Gesamtzeitraum von 1856 bis 2007, so zeigen sich die starken Eismassenverluste im Taubenkar und nördlich des Taubenriedls mit bis zu 170 m. Das Firngebiet des Gletschers hat in diesen 150 Jahren größtenteils zwischen 10 m und 20 m an Höhe verloren.

Periode	Δh [m]	Δh_{Jahr} [ma^{-1}]
1856 - 1899	-25,4	-0,59
1899 - 1915	-5,8	-0,36
1915 - 1958	-9,6	-0,22
1958 - 1969	-3,0	-0,27
1969 - 2002	-6,6	-0,20
2002 - 2007	-4,3	-0,86
1856 - 2007	-47,4	-0,31

Tabelle 4.5: Mittlere Eisdickenänderung Δh und die mittlere Eisdickenänderung pro Jahr Δh_{Jahr} der Perioden zwischen den Gletscherständen.

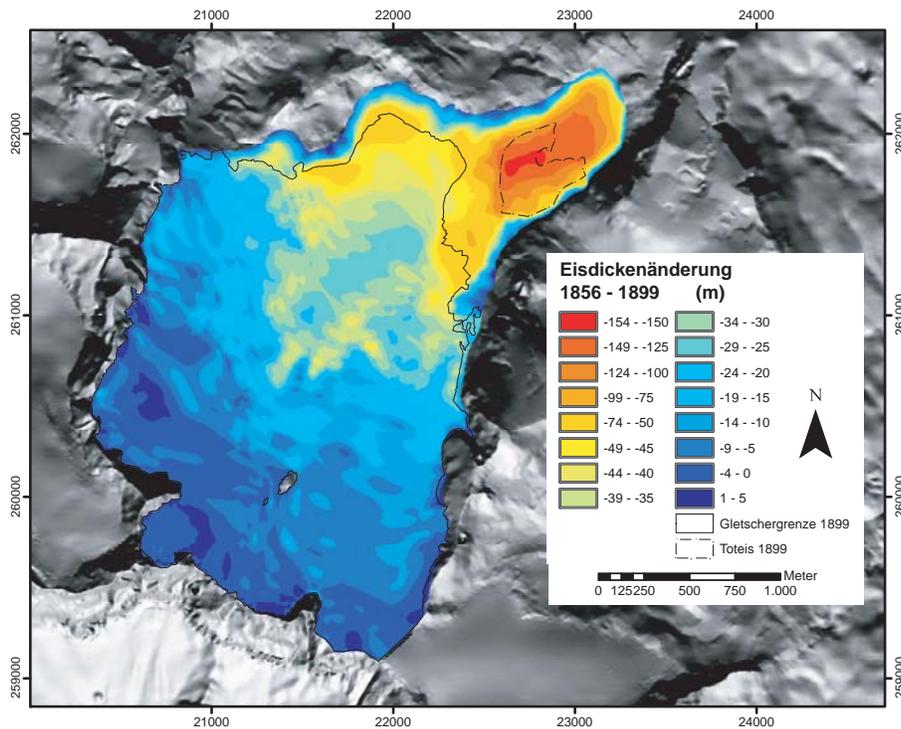


Abbildung 4.28: Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 1856 bis 1899 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 1856. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 1899.

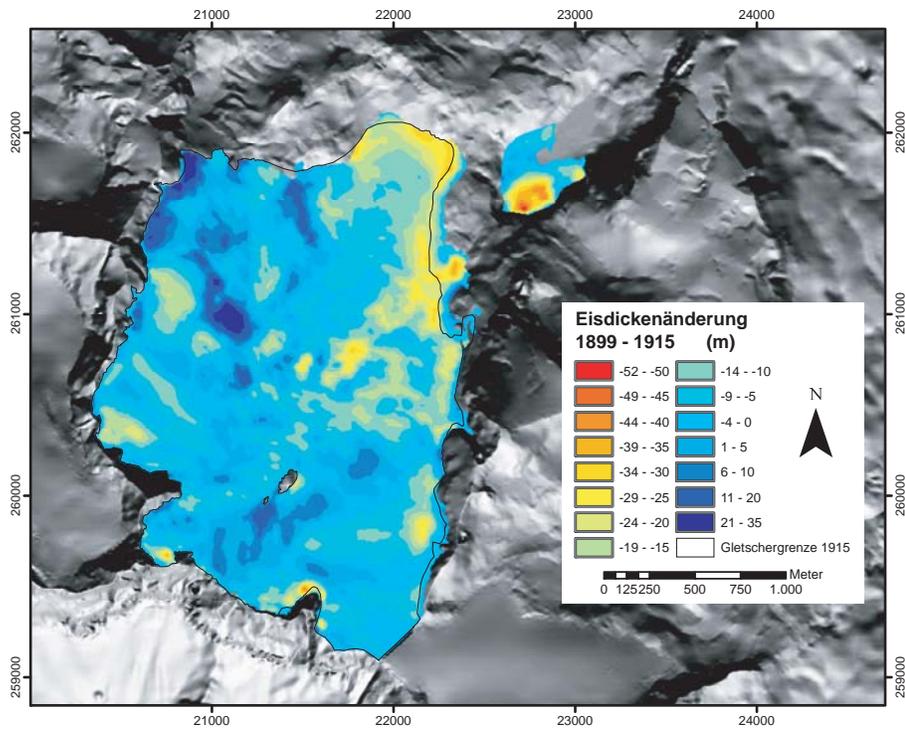


Abbildung 4.29: Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 1899 bis 1915 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 1899. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 1915.

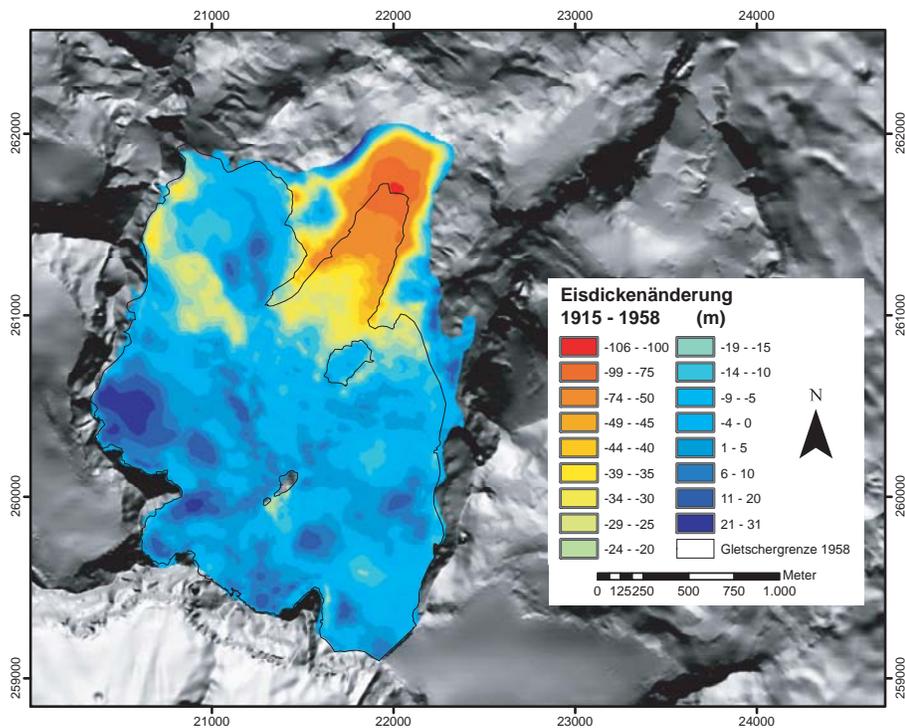


Abbildung 4.30: Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 1915 bis 1958 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 1915. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 1958.

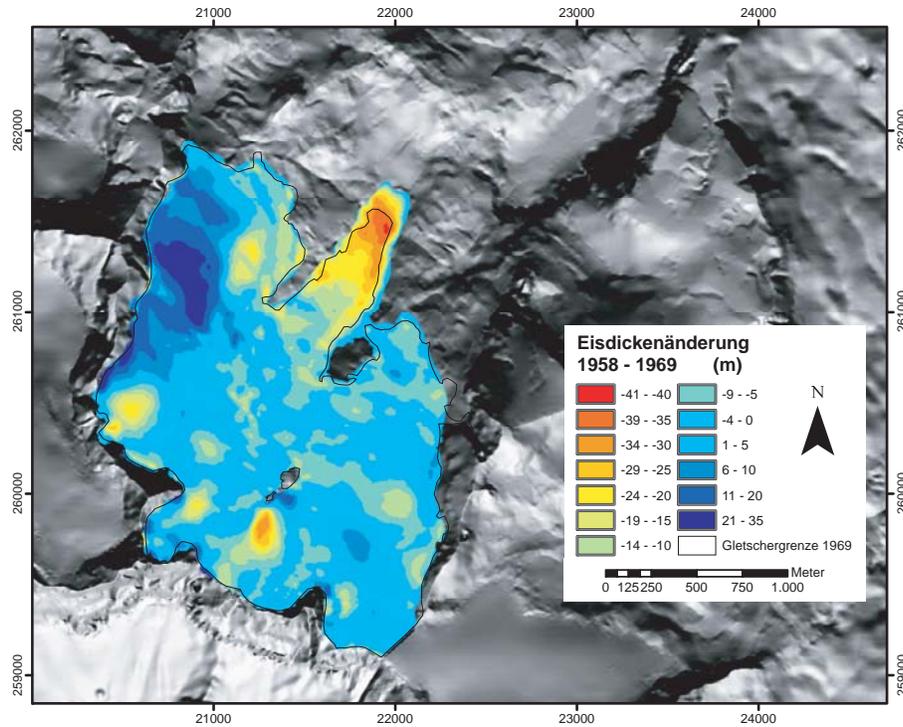


Abbildung 4.31: Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 1958 bis 1969 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 1958. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 1969.

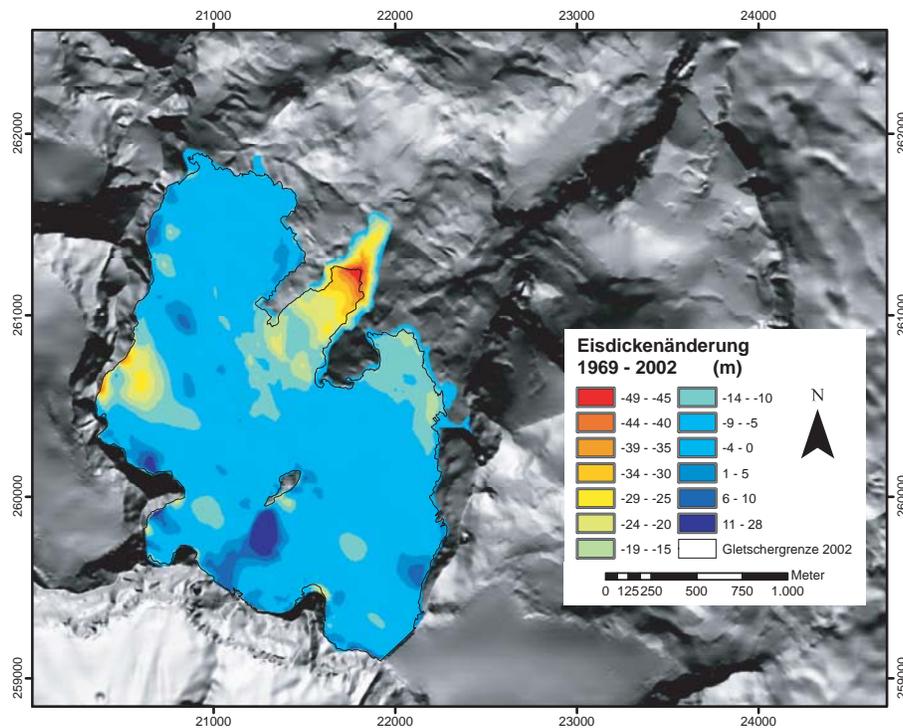


Abbildung 4.32: Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 1969 bis 2002 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 1969. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 2002.

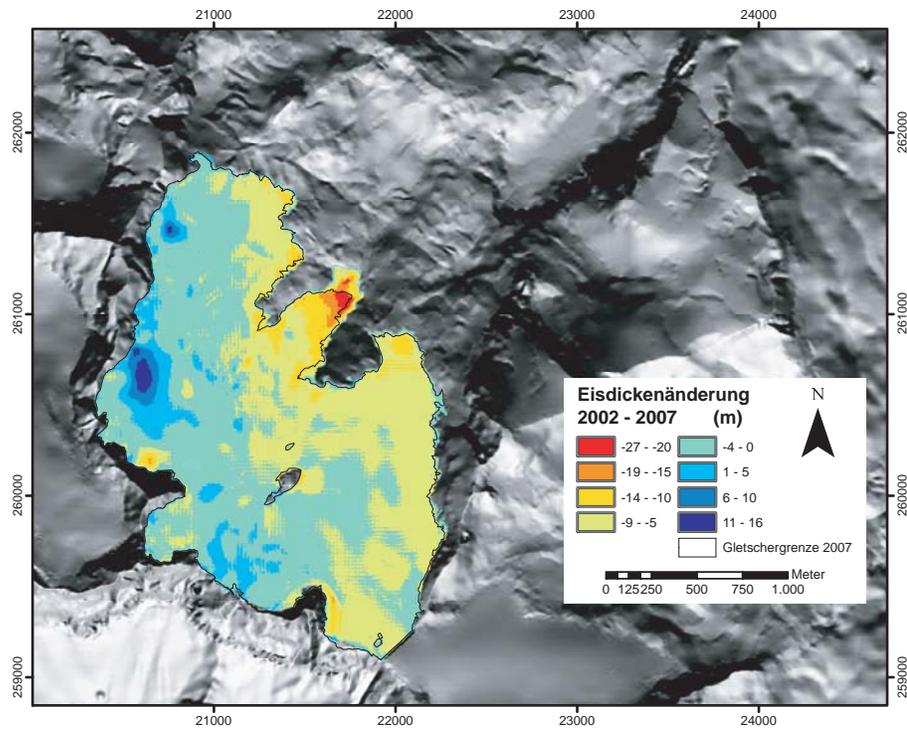


Abbildung 4.33: Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 2002 bis 2006 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 2002. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 2007.

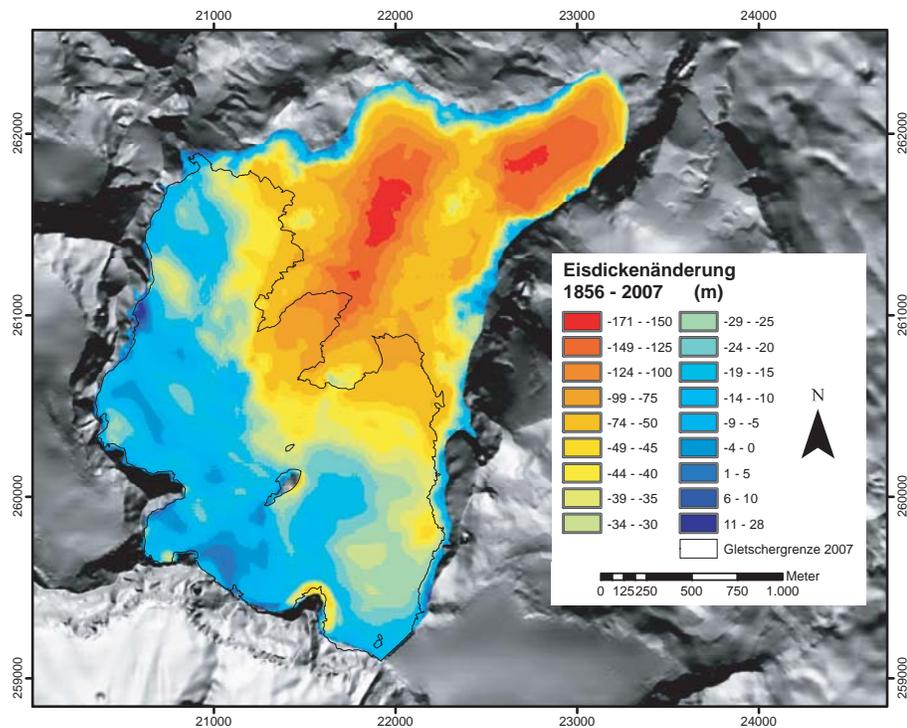


Abbildung 4.34: Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 1856 bis 2007 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 1856. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 2007.

4.5 Volumina und Volumsänderungen

Das Volumen beschreibt die räumliche Verteilung der Eisdicke. Da der Gletscher nicht nur aus Eis, sondern auch aus der Firnschicht mit unbekannter Ausdehnung, Höhe und Dichte besteht, werden die Volumen der Gletscherstände sowie die Volumsänderungen der Perioden dazwischen in Absolutwerten der Einheit m^3 präsentiert und nicht in Wasseräquivalent umgerechnet.

4.5.1 Bestimmung der Volumina

Der Volumensunterschied zwischen dem jeweiligen Jahr des Höhenmodells und 2007 wurde aus dem Produkt zwischen mittlerer Eisdickenänderung (Anhang Tab. A.3) in der Periode und der dem älteren Gletscherstand entsprechenden Gletscherfläche gebildet (Anhang Tab. A.4). Die Volumen zu den jeweiligen Gletscherständen ergaben sich nach Abzug des demnach negativen Volumensunterschiedes vom für 2007 aus mittlerer Eisdicke und Gletscherfläche gewonnen Volumen. Die Volumsänderungen der jeweiligen Perioden wurden aus der Differenz der Volumina der aufeinanderfolgenden Gletscherstände berechnet.

4.5.2 Ergebnisse

Der Hallstätter Gletschers hat seit der kleinen Eiszeit rund 63% seines Volumens verloren (Tab. 4.6). Dies ist mit dem Abschmelzen der Eismassen in den tiefen Karen zu erklären. Mit dem Verschwinden des Eises aus dem Taubenkar bis 1899 schmolzen rund 140 Mio m^3 Eis. Bis 1958 waren es weitere 59,3 Mio m^3 . Der Periode mit vergleichsweise geringeren mittleren jährlichen Volumsverlusten von 0,7 Mio $\frac{\text{m}^3}{\text{a}}$ zwischen 1969 und 2002 schließt sich ein starker Volumsverlust bis 2007 an (Abb. 4.35).

Jahr	1856	1899	1915	1958	1969	2002	2007	
V	397,7	259,4	236,3	195,3	184,0	161,6	148,0	10^6m^3
% V_{1856}		65,2	59,4	49,1	46,3	40,6	37,2	%
ΔV		-138,3	-23,1	-41,0	-11,3	-22,4	-13,6	10^6m^3
ΔV_{Jahr}		-3215,5	-1442,0	-954,5	-1029,7	-678,1	-2726,2	10^3m^3

Tabelle 4.6: Volumen V , der prozentuale Anteil vom Volumen 1856 % V_{1856} der Gletscherstände sowie die Volumsänderung ΔV und die jährliche Volumsänderung ΔV_{Jahr} der Perioden zwischen den Gletscherständen.

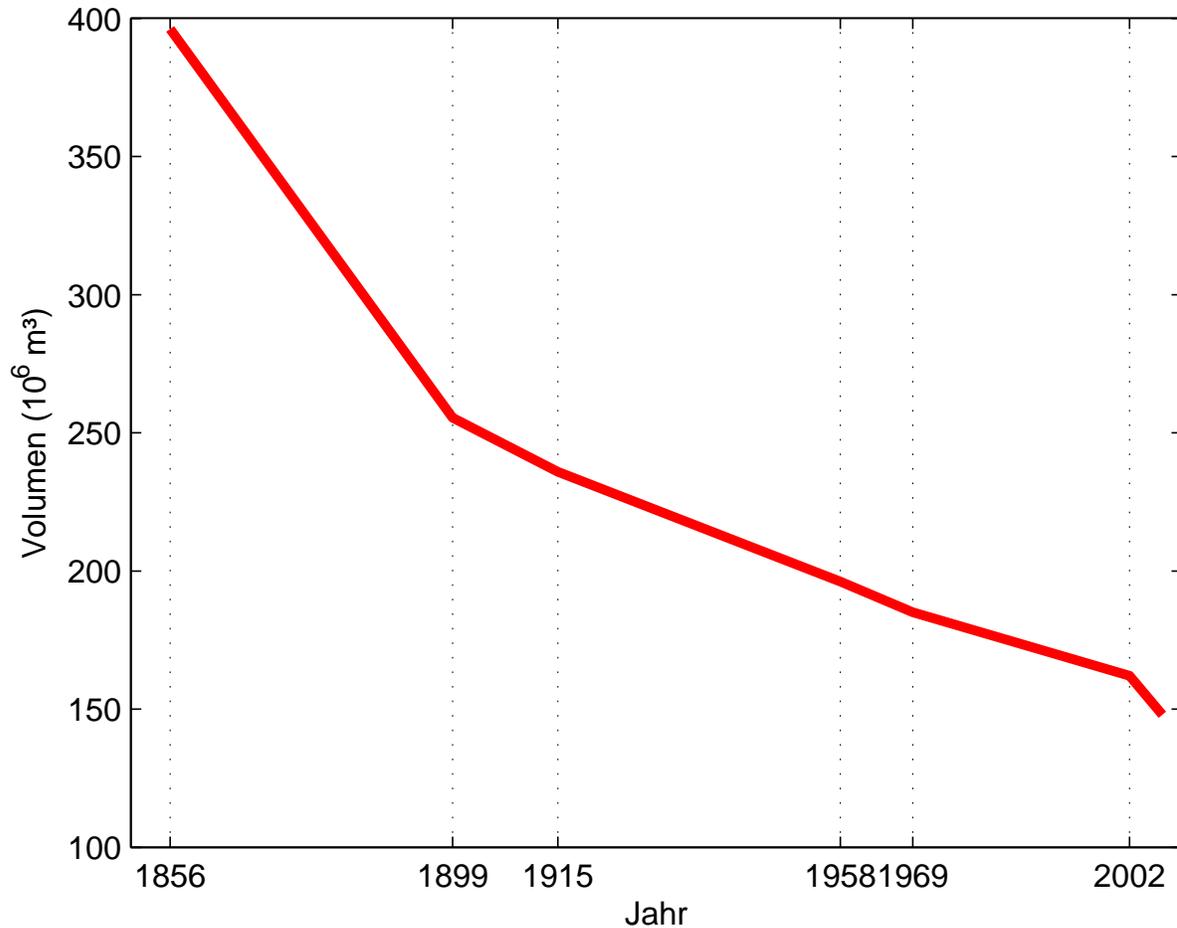


Abbildung 4.35: Zeitlicher Verlauf des Volumens des Hallstätter Gletschers.

4.5.3 Unsicherheiten

Aufgrund der in der Praxis schwer abschätzbaren Unsicherheiten der Ausgangsgrößen Eisdicke und Gletscherfläche findet sich in der Literatur in Bezug auf einen einzelnen Gletscher kaum eine Angabe bezüglich der Unsicherheit von Volumen und Volumsänderungen. Für die Abschätzung der Unsicherheit einer Größe y ist das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz (Gl. 4.6) der Unsicherheiten u_i zu verwenden, wobei x_i die voneinander unabhängigen Ausgangsgrößen sind.

$$u_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot u_2\right)^2 + \dots} \quad (4.6)$$

Für die Bestimmung der Unsicherheiten des Volumens und der Volumsänderungen des Hallstätter Gletschers müssen zunächst die Unsicherheiten der jeweiligen Fläche und die Genauigkeit des DGM abgeschätzt werden. Für die Unsicherheit der Fläche wurde eine Auslenkung in x- und y-Richtung $u_{x,y}$ angenommen (Tab. 4.7). Die Unsicherheit setzt

sich aus der Ungenauigkeit der Nachzeichnung der Gletschergrenze, möglichen schuttbedeckten Gletscherteilen sowie Toteis, einem Fehler aus den Kartendarstellungen sowie einem Verzerrungsfehler aus der Georeferenzierung der Karten zusammen. Die Unsicherheit der Oberflächenhöhe u_z ergibt sich aus der Genauigkeit der digitalisierten Geländemodelle. Grundlegend für eine Bestimmung der Unsicherheiten ist noch der Fehler der mittleren Eisdicke 2007, sowie die Unsicherheit des aus mittlerer Eisdicke und Fläche berechneten Volumens 2007, welche mit den berechneten Werten und den zugehörigen Unsicherheiten der jeweiligen Gletscherstände in Tab. 4.7 aufgeführt sind. Generell zeigt sich eine Vergrößerung der Unsicherheit in Verbindung mit älteren Gletscherständen. Es wird eine maximale relative Unsicherheit von 7,1% nicht überschritten.

Jahr	1856	1899	1915	1958	1969	2002	2007	
$u_{x,y}$	±5	±3	±3	±3	±2	±1	±1	<i>m</i>
u_z	±5	±4	±3	±2	±1	±±0,75	±0,15	<i>m</i>
<i>A</i>	5,269	4,353	4,213	3,529	3,345	3,152	3,041	<i>km</i> ²
u_A	±0,016	±0,009	±0,009	±0,008	±0,005	±0,003	±0,002	<i>km</i> ²
u_A	±0,3	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,1	±0,1	%
<i>h</i>	75,5	59,6	56,1	55,3	55,0	51,3	48,7	<i>m</i>
u_h	±5,4	±4,5	±3,6	±2,8	±2,2	±2,1	±2,0	<i>m</i>
u_h	±6,7	±6,2	±5,4	±4,6	±4,1	±4,1	±4,1	%
<i>V</i>	397,7	259,4	236,3	195,3	184,0	161,6	148,0	$10^6 m^3$
u_V	±27,1	±18,5	±14,0	±9,3	±7,0	±6,5	±6,1	$10^6 m^3$
u_V	±6,8	±7,1	±5,9	±4,8	±3,8	±4,0	±4,1	%

Tabelle 4.7: Angenommene Unsicherheiten der Ausdehnung $u_{x,y}$ und der Höhe u_z der jeweiligen Gletscheroberfläche sowie daraus berechnete Unsicherheiten der Fläche u_A , der Eisdicke u_h und des Volumens u_V .

Kapitel 5

Veränderungen des Gletschers im Zusammenhang mit dem Klima

Die Existenz von Gletschern ist an klimatische Bedingungen geknüpft. Damit sie im alpinen Raum entstehen, muss Winterschnee die folgende Ablationsperiode des Sommers überdauern. Der einjährige Schnee wird als Firn bezeichnet. Durch Überdeckung mit weiteren Firnlagen und Eindringen von Schmelzwasser wird der Firn in Eis umgewandelt. Das Eis verformt sich unter Einfluß seines eigenen Gewichtes und wird der Schwerkraft folgend in niedrigere Höhenbereiche transportiert. In dem unterhalb der Schneegrenze gelegenen Zehrgebiet schmilzt das Eis anschließend. Befindet sich ein Gletscher im Gleichgewicht, dann bleibt innerhalb eines Zyklus von Akkumulation und Ablation im Nährgebiet genau soviel Wasser in Form von Schnee liegen, wie im Zehrgebiet in Form von Eis schmilzt. Die Massenbilanz ist ausgeglichen. Gletscher befinden sich aber selten in diesem Gleichgewicht. Schwankungen des Klimas verursachen Schwankungen der Schneegrenze und damit des Verhältnisses von Akkumulations- zu Ablationsgebiet. Neben lokalen topographischen Gegebenheiten wie Exposition und Geländeneigung ist die Schneegrenze auf Gletschern überwiegend von den klimatischen Parametern Niederschlag, Temperatur und Strahlung beeinflusst. Verändern sich diese Parameter im Laufe der Zeit, so kommt es zu Massenänderungen von Gletschern. Dies macht sich in ihrem Volumen und damit in Längen-, Flächen- und Eisdickenänderungen bemerkbar. Gletschertypisch ist dabei die Reaktionszeit mit der einzelne Gletscher auf Klimaänderungen reagieren. In diesem Kapitel wird ausgehend von der Messung klimarelevanter Parameter im Gletschervorfeld das Klima am Hallstätter Gletscher seit dem letzten Hochstand reproduziert. Dieser Klimareihe werden die Veränderungen des Gletschers gegenübergestellt. Die Witterung der zwei Massenbilanzjahre 2006/2007 und 2007/2008 wird in diese Reihe eingeordnet.

5.1 Aufzeichnung des Wetters am Hallstätter Gletscher

Im Rahmen der Massenbilanzmessungen am Hallstätter Gletscher wurden eine Wetterstation im Bereich der Simonyhütte sowie eine Niederschlagsmessung im Gletschervorfeld eingerichtet (Abb. 5.1).

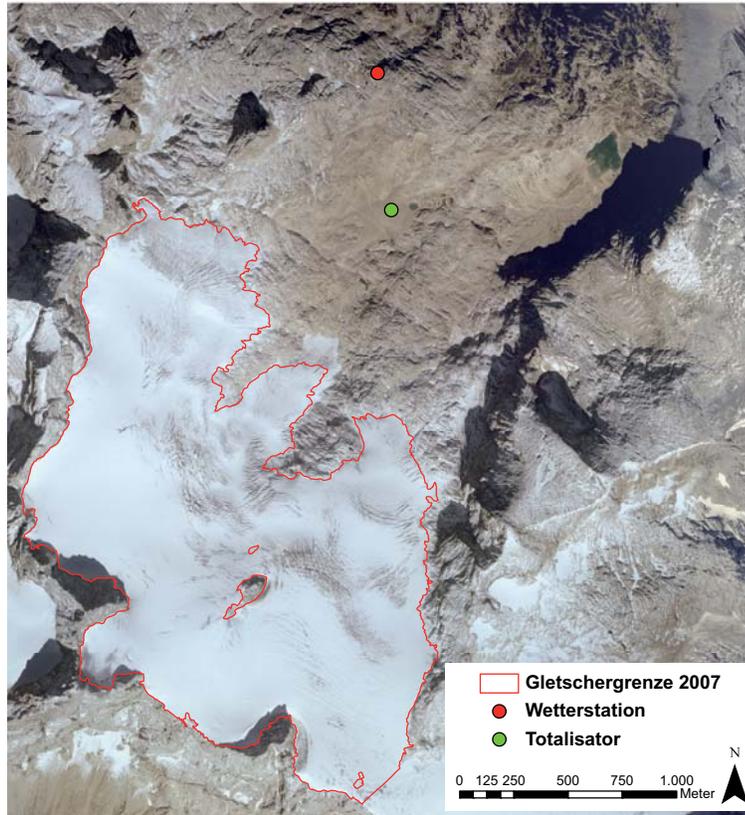


Abbildung 5.1: Lage von Wetterstation und Niederschlagsmessung im Vorfeld des Hallstätter Gletschers in Orthophoto 2002 mit Gletschergrenze 2007.

Die damit gewonnenen Daten liefern eine punktuelle Aussage über die Witterung unmittelbar in Gletschnähe. Sie sind auch Grundlage für die Ermittlung von Gradienten der Temperatur und des Niederschlags für eine anschließende Klimarekonstruktion ausgehend von langjährigen Aufzeichnungen an naheliegenden Wetterstationen.

5.1.1 Wetterstation Simonyhütte

Die Wetterstation in Nähe der Kapelle der Simonyhütte ($47^{\circ} 30'02.27''$ N, $13^{\circ} 37'27.83''$ O, Abb. 5.1) wurde am 24.09.2007 aufgestellt. Sie befindet sich auf 2210 m Seehöhe in einer Höhenlage knapp über dem Zungenende. Von diesem ist sie 1,45 km entfernt. Es werden Windrichtung, Windstärke, Luftfeuchte sowie Temperatur gemessen. Die Energieversorgung wird seit Herbst 2008 durch ein Solarmodul sichergestellt. Die

gemessenen Daten werden direkt über die Internetverbindung der Simonyhütte online abgerufen und auf einem Server abgespeichert. In dieser Arbeit werden die gemessenen Monatswerte der Lufttemperatur verwendet, um sie mit langjährigen Klimareihen zu vergleichen.

Die Temperaturmessung

Die Temperatur wird mit einer Kroneis Wetterhütte des Typs 340 gemessen. Die Wetterhütte besitzt einen Strahlungsschutz und ist zwangsbelüftet. Es wird ein *Negative Temperature Coefficient*-Sensor verwendet. Bei dieser Art der Widerstandsmessung erhöht sich der Widerstand mit fallender Temperatur. Der Sensor befindet sich umschlossen von drei konzentrischen Rohren, welchen ihn vor Strahlung schützen. Die innersten zwei sind mit einer Strömungsgeschwindigkeit von mehr als 2 m/s ventiliert. Die Genauigkeit der Messung liegt bei $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Für die Auswertung der Daten wird sich auf den Zeitraum vom 01.01.2008 bis 31.12.2008 bezogen. In diesem Zeitraum wurde eine Minimaltemperatur von $-19,5^\circ\text{C}$ und eine Maximaltemperatur von $19,5^\circ\text{C}$ gemessen. Die mittleren Monatstemperaturen sind der Tabelle 5.1 zu entnehmen. Die Jahresmitteltemperatur am Messpunkt Simonyhütte für das Jahr 2008 lag bei $0,015^\circ\text{C}$.

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	2008
T ($^\circ\text{C}$)	-4,4	-5	-7,3	-3,5	3,8	6,6	6,7	7,9	2,4	1,9	-2,8	-6,2	0,015

Tabelle 5.1: Monats- und Jahresmitteltemperatur an der Wetterstation Simonyhütte für das Jahr 2008.

5.1.2 Niederschlagsmessung

Im Bereich des Hallstätter Gletschers wird der Niederschlag mit einem Totalisator gemessen (Abb. 5.2). Dieser Niederschlagsmesser wurde am 29.09.2006 im Bereich des oberen Eiskares unterhalb der mittleren Zunge in einer Seehöhe von 2075 m aufgestellt ($47^\circ 29'42.64''$ N, $13^\circ 37'31.01''$ O, Abb. 5.1). Der Totalisator besteht aus einem großen Auffanggefäß mit einer im Querschnitt gegenüber dem Boden geringerer Auffangfläche. Salz und Öl in der darin befindlichen Lösung sollen Einfrieren und Verdunsten des aufgefangenen Niederschlags verhindern. Für eine verlässliche Niederschlagsregistrierung bei Wind bremst ein um die Öffnung angebrachter Windfang die Luftbewegung. Dennoch ist das Messen des Niederschlags in Hochgebirgsregionen von Fehlerquellen behaftet (Fliri, 1974). Besonders feste Niederschläge können am Niederschlagsmesser durch Windeinfluss leicht vorbei geführt werden und eine zu geringe Messung hervorrufen.

Im Verlauf des Jahres wird regelmäßig der Abstand der Flüssigkeitsoberfläche zum oberen Rand des Totalisators abgelesen. Die Umrechnung des im Zeitraum zwischen den Ablesungen aufgefangenen Niederschlags erfolgt mit einer vorherigen Eichung.



Abbildung 5.2: Ablesung des Niederschlagsmessers unterhalb der mittleren Gletscherzunge. Im Hintergrund der Hallstätter Gletscher mit dem Hohen Dachstein (2996 m).

Dabei wird die Höhenänderung der Flüssigkeitsoberfläche im Auffangbehälter pro Liter Niederschlag ermittelt. Über das Verhältniss der Grundfläche der Öffnung gegenüber einem Quadratmeter lässt sich die gemessene Höhenänderung in gefallenem Gebietsniederschlags in $\frac{l}{m^2}$ oder mm umrechnen. Im Falle des am Hallstätter verwendeten Auffangbehälters entspricht 1 cm Höhenunterschied 40,21 mm Gebietsniederschlag. Die zum Monatsbeginn durchgeführte Ablesungen wurden anschließend unter Benutzung von kontinuierlich aufgezeichneten Niederschlagsdaten an den Stationen Goisern, Gosau und Bad Aussee auf den Ersten des Monats gerechnet.

Mit einem Jahresniederschlag von 2259 mm zeigte sich das Massenhaushaltsjahr 2007/2008 gegenüber 2006/2007 (2615 mm) niederschlagsärmer. Der Unterschied von 356 mm beziehungsweise rund 14 Prozent des Jahresniederschlages wurde vor Allem durch die große Differenz der Niederschlagssummen im Monat September beider Jahre hervorgerufen (Abb. 5.3).

Datum	mm	Datum	mm
31.10.2006	148	31.10.2007	153
30.11.2006	310	30.11.2007	317
31.12.2006	61	31.12.2007	143
31.01.2007	194	31.01.2008	136
28.02.2007	100	29.02.2008	89
31.03.2007	150	31.03.2008	278
30.04.2007	29	30.04.2008	187
31.05.2007	303	31.05.2008	27
30.06.2007	286	30.06.2008	247
31.07.2007	290	31.07.2008	397
31.08.2007	234	31.08.2008	180
30.09.2007	510	30.09.2008	105
1.10.2006 - 30.09.2007	2615	1.10.2007 - 30.09.2008	2259

Tabelle 5.2: Monatliche Niederschlagssummen der hydrologischen Jahre 2007 und 2008 am Totalisator nahe dem Hallstätter Gletscher.

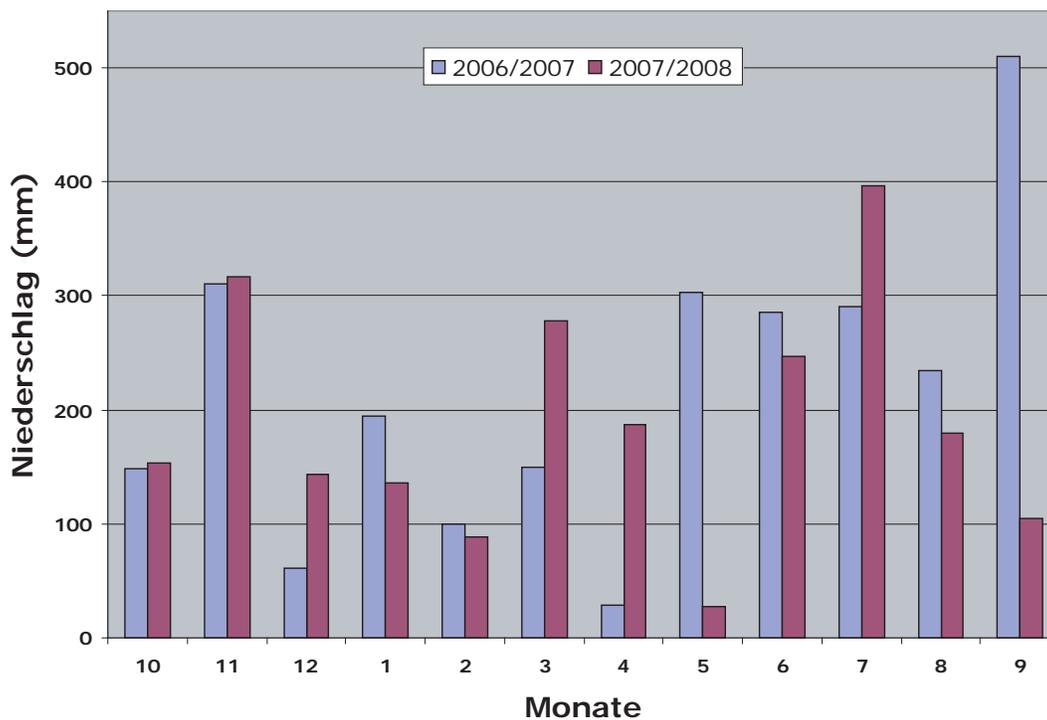


Abbildung 5.3: Monatliche Niederschlagssummen der hydrologischen Jahre 2007 und 2008 am Totalisator nahe dem Hallstätter Gletscher.

5.2 Klimarekonstruktion

Für die Rekonstruktion eines lokalen Klimas für ein Gebiet, in dem keine langjährigen Messungen zur Verfügung stehen, muss auf räumlich naheliegende Klimareihen zurückgegriffen werden. In den Alpen sind diese oftmals an Talstationen gemessen. Im Gegensatz zu hochalpinen Lagen treten in den Tälern jedoch Temperaturinversionen sowie größere tageszeitliche Erwärmung der Talatmosphäre auf. Auch der Niederschlag ist geringerer als in den naheliegenden Gipfelregionen (Fliri, 1974; Frei und Schär, 1998). Mit Hilfe von Höhengradienten, welche einer jahreszeitlichen Änderung unterliegen, ist es möglich langjährige Klimainformationen auf höhergelegene Gebiete zu übertragen. Ziel soll es hier sein, eine Klimareihe der Temperatur und des Niederschlags in monatlicher Auflösung für die Stelle der heutigen Messungen nahe dem Hallstätter Gletscher zu entwerfen, welche bis zu seinem Hochstand um 1856 zurückreicht.

5.2.1 Datengrundlage

Temperaturwerte Simonyhütte Die in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Monatsmittelwerte der im 10-Minuten-Intervall gemessenen Temperatur an der Wetterstation Simonyhütte stehen für den Zeitraum vom 01.01.-31.12.2008 zur Verfügung.

Niederschlagswerte Gletschervorfeld Als Niederschlagsreferenz finden im Folgenden die vom 1.10.2006 bis 30.09.2008 gemessenen und auf Monatswerte gerechnete Niederschläge im Gletschervorfeld des Hallstätter Gletschers Verwendung.

HISTALP-Datensatz Eine Arbeitsgruppe der Zentralanstalt für Meteorologie und Geophysik (ZAMG) in Wien beschäftigt sich im Rahmen des Projektes *HISTALP* (Historical Instrumental Climatological Surface Time Series of the Greater Alpine Region) mit der Homogenisierung von meteorologischen Datenreihen im Alpenraum (Auer et al., 2007; Böhm et al., 2009). Im Zuge dessen entstanden mehrjährige homogenisierte Reihen der Temperatur und des Niederschlags an Tal- sowie Bergstationen in monatlicher Auflösung (*station mode*). Im Falle des Hallstätter Gletschers finden sich zwei nicht weit entfernte Stationen. Die Station Bad Ischl (47.71°N, 13.65°O, 512 m) besitzt einen homogenisierten Temperaturdatensatz ab dem Jahr 1856 sowie einen Niederschlagsdatensatz seit 1858. An der Bergstation Feuerkogel (47.82°N, 13.72°O, 1618 m) gibt es ab 1930 Temperaturaufzeichnungen. Eine homogenisierte Niederschlagsreihe wurde hier nicht erstellt. Im Rahmen des Histalp-Projektes wurde ein Grid-Datensatz der Temperaturanomalien gegenüber dem Mittel von 1900 bis 2001 über den Alpenraum im Raster von 1° erstellt. Aufgrund der großen Gitterweite befinden sich die dem Hallstätter Gletscher am nächsten gelegenen Punkte im Alpenvorland und südlich des Alpenhauptkammes an folgenden Positionen (Geographische Breite, geographische Länge):

- 48°N, 13°O
- 48°N, 14°O
- 47°N, 13°O
- 47°N, 14°O

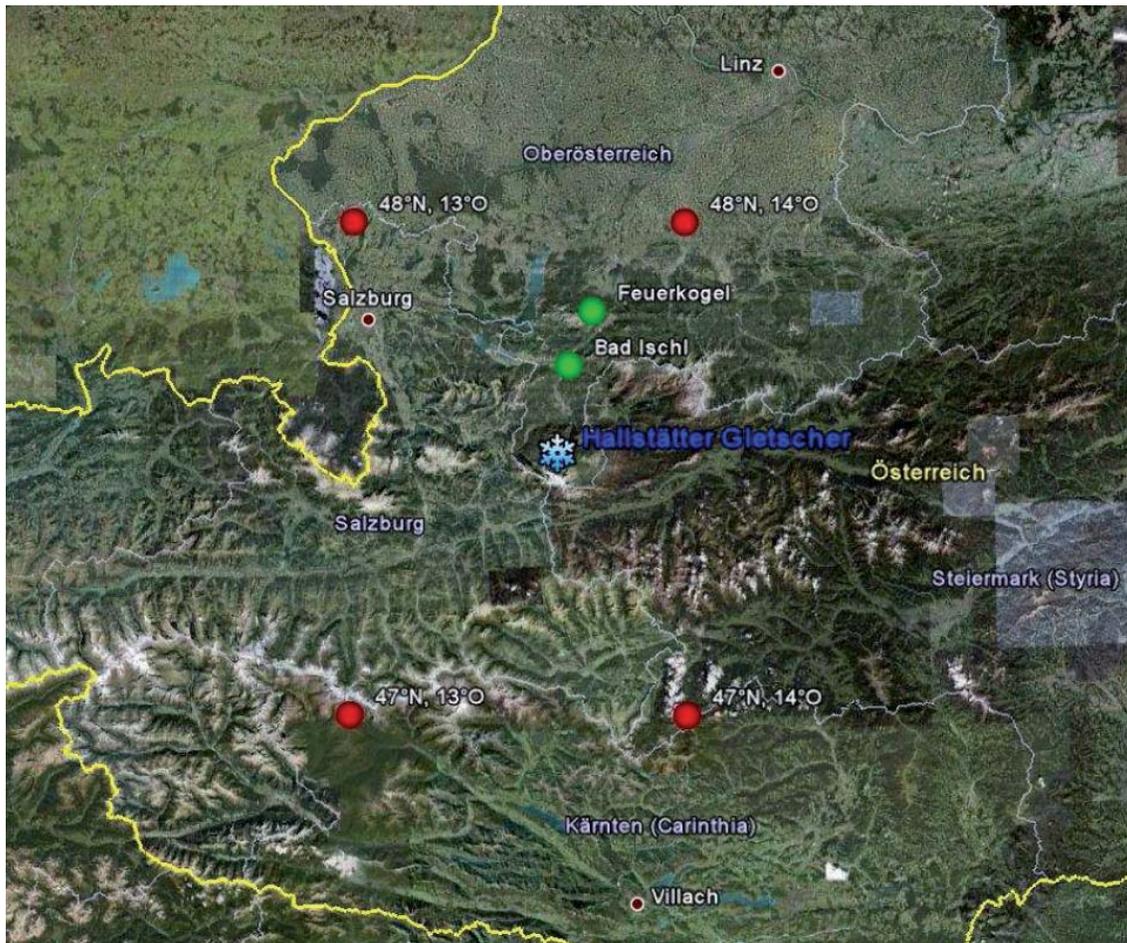


Abbildung 5.4: Lage der Datenpunkte des HISTALP-Datensatzes dargestellt in Google Earth. Die roten Punkte zeigen die 1°Gitternetzpunkte des Datensatzes der Temperaturanomalien. In grün die Positionen der verwendeten Stationsdaten. Gelb eingezeichnet die Grenze von Österreich.

Den Datensatz der Temperaturanomalien gibt es in einer „*high elevation*“- sowie einer „*low elevation*“-Ausführung. Für die Erstellung ersterer wurden Daten von höhergelegenen Wetterstationen sowie Gipfelstationen einbezogen. Diese ist nur für den alpinen Raum verfügbar. Der Datensatz „*low elevation*“ hingegen steht für den Bereich der Greater Alpine Region (GAR) zur Verfügung. Vergleicht man die beiden Datensätze der Anomalien an den genannten Gitterpunkten (Abb. 5.5) so lässt sich feststellen, dass die Anomalien des auf den Bergstationen beruhenden Datensatzes eine gleiche Tendenz wie die des „*low elevation*“ Datensatzes zeigen. Mit anderen Worten ist die Erwärmung gegenüber dem langjährigen Mittel von 1900 bis 2001 süd- und nordseitig des Alpenhauptkammes an den Talstationen wie an den Bergstationen gleichermaßen eingetreten.

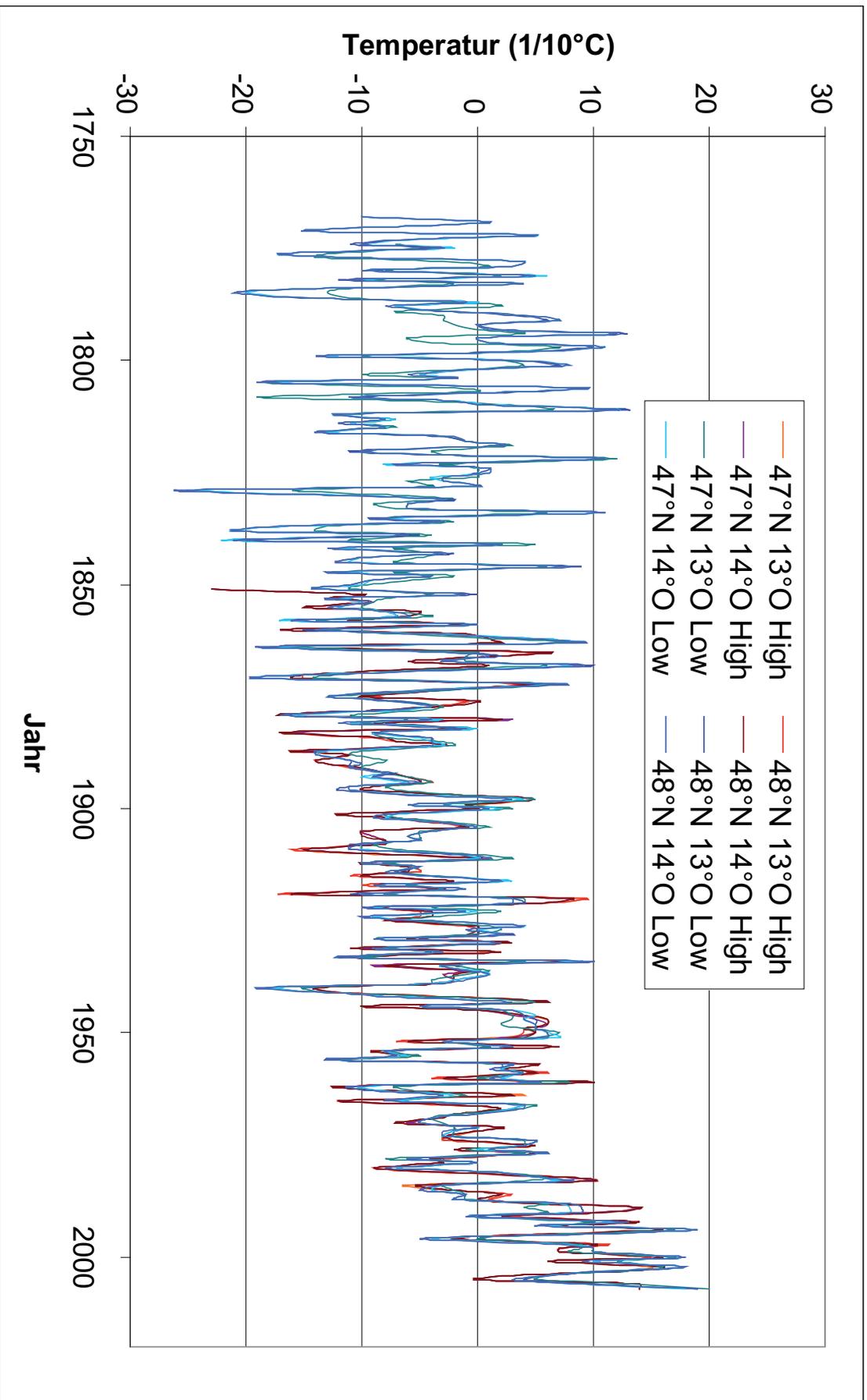


Abbildung 5.5: Vergleich der *high* und *low elevation* Anomalien der Jahresmitteltemperatur gegenüber dem Mittel von 1900 bis 2001 der dem Hallstätter Gletscher naheliegendsten Gitterpunkte des HISTALP-Datensatzes. In der Legende sind die Koordinaten der jeweiligen Punkte angeführt.

Niederschlagsdaten sind mit einer Gitterweite von $1/6^\circ$ basierend auf den HISTALP-Daten für die *Greater Alpine Region* (GAR; 4°E – 19°E , 43°N – 49°N) verfügbar (Efthymiadis et al., 2006). Den Datenpunkten liegen keine Höhenangaben zugrunde und sie bieten keine zeitliche Überdeckung mit den am Hallstätter Gletscher gemessenen Werten. Aus diesem Grund wird für die Rekonstruktion des Niederschlages die Stationsreihe von Bad Ischl verwendet.

5.2.2 Temperatur Simonyhütte 1851 - 2008

Zur Rekonstruktion einer langjährigen Temperaturreihe für die Wetterstation Simonyhütte wurden zunächst die gemessenen Monatsmittel der Temperatur mit denen der HISTALP-Datensätze der Stationen Bad Ischl und Feuerkogel für den Zeitraum 01.01.-31.12.2008 verglichen (Abb. 5.6). Dabei wurde eine höhere Korrelation der Temperaturen zwischen Station Simonyhütte und Station Feuerkogel (Korrelationskoeffizient $c=0,93$) gegenüber Station Simonyhütte und Bad Ischl ($c=0,66$) festgestellt. Auffällig sind die erhöhten Temperaturen der Station Bad Ischl in den Übergangsmonaten März und September. Im Januar ist aufgrund der Talinversion der Temperaturgegensatz zwischen Bad Ischl und Feuerkogel beziehungsweise Simonyhütte gering.

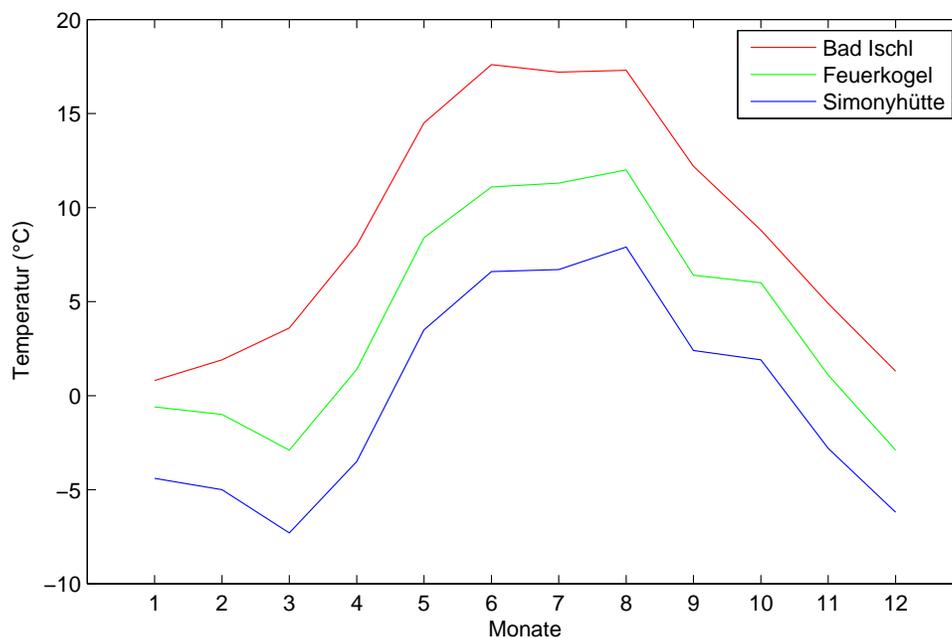


Abbildung 5.6: Monatsmitteltemperaturen der Stationen Bad Ischl (512 m), Feuerkogel (1618 m) und Simonyhütte (2210 m) für das Jahr 2008.

Für die Rekonstruktion der Monatsmittelwerte der Station Simonyhütte für die Jahre 1851 bis 2007 wurden zunächst die in Abbildung 5.7 dargestellten Differenzen der

Monatsmitteltemperaturen der Stationen Feuerkogel und Simonyhütte für das Jahr 2008 gerechnet. Es ergibt sich eine mittlere Temperaturdifferenz $\Delta T = 4,2^\circ\text{C}$, was bei einem Höhenunterschied von 592m einem Temperaturgradienten $\gamma = -0,71^\circ\text{C}/100\text{m}$ entspricht. Die Temperaturdifferenz variiert im Laufe des Jahres von geringeren Unterschieden im Winter zu größeren in den Frühsommermonaten und ist zusammen mit den entsprechenden Temperaturgradienten aus Tabelle 5.3 zu entnehmen.

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	2008
ΔT ($^\circ\text{C}$)	-3,8	-4,0	-4,4	-4,9	-4,6	-4,5	-4,6	-4,1	-4,0	-4,1	-3,9	-3,3	-4,2
γ ($\frac{^\circ\text{C}}{100\text{m}}$)	-0,64	-0,68	-0,74	-0,83	-0,78	-0,76	-0,78	-0,69	-0,68	-0,69	-0,66	-0,56	-0,71

Tabelle 5.3: Temperaturdifferenz ΔT und Temperaturgradient γ zwischen den Stationen Feuerkogel (1618m) und Simonyhütte (2210m) für das Jahr 2008.

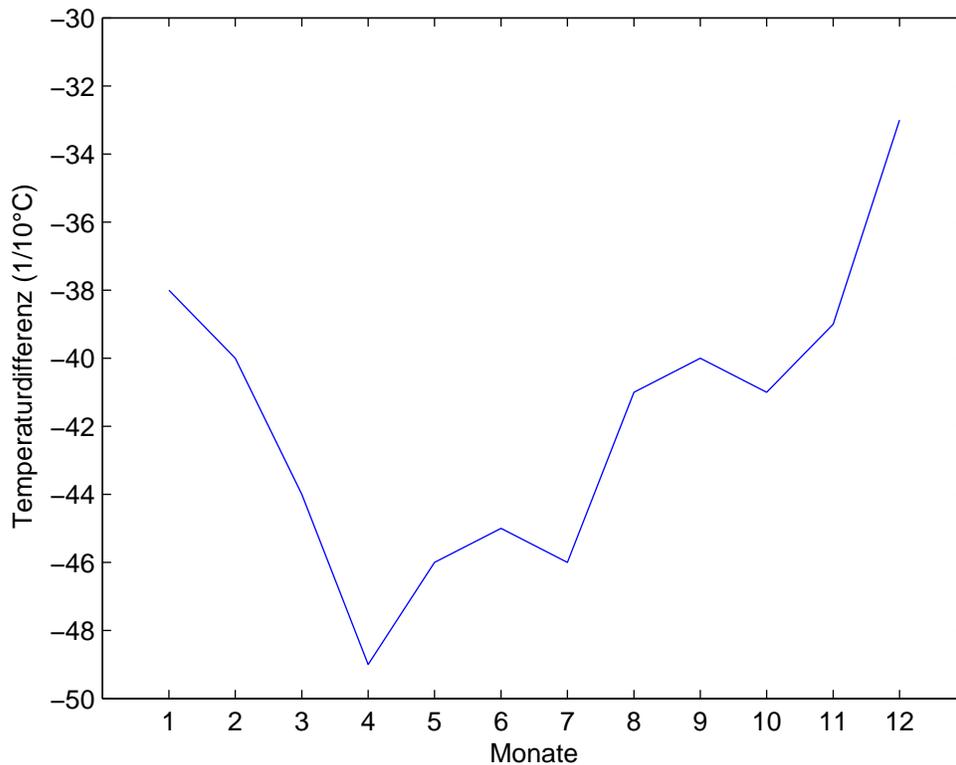


Abbildung 5.7: Monatliche Temperaturdifferenz von der Station Feuerkogel auf Höhe der Station Simonyhütte für das Jahr 2008.

In weiterer Folge wurde ausgehend von den Temperaturdaten der Bergstation Feuerkogel, deren Messreihe nur bis 1930 zurückreicht, auf Grundlage der Temperaturanomalien der „high elevation“ Daten aus Mittelung der vier bereits genannten Gitterpunkte eine Temperaturreihe am Feuerkogel von 1851 bis 1929 erstellt. Dazu wurde das Mittel der Temperaturmonatsmittel der Station Feuerkogel von 1930 bis 2007 gebildet (Tab. 5.4).

Von diesem ausgehend wurden die Temperaturanomalien des vorhandenen Datensatzes gegenüber den einzelnen Monatsmitteln errechnet. Diese Anomalien wurden anschließend mit denen des Histalp-Datensatzes verglichen (Tab. 5.5).

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
$T_{Feuerkogel1930-2007}$ (°C)	-3,9	-4,1	-1,9	1,1	5,9	9	10,9	11	8,4	5	0,2	-2,8	3,3

Tabelle 5.4: Mittlere Monats- sowie Jahresmitteltemperatur an der Station Feuerkogel für den Zeitraum von 1930 bis 2007 aus HISTALP-Daten.

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Max (°C)	1,1	1,6	1,5	1,3	1,5	1,2	0,7	1,1	1,3	0,5	1,2	1,4	0,4
Min (°C)	-0,9	-1,4	-0,7	-0,6	-0,5	-0,5	-0,6	-0,4	-1,1	-1,7	-1,3	-1	-0,2
σ (°C)	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,2
r^2	0,970	0,976	0,968	0,9678	0,970	0,972	0,980	0,964	0,956	0,955	0,945	0,959	0,968

Tabelle 5.5: Statistik der Differenz aus Temperaturanomalien des HISTALP-Datensatzes und den berechneten Anomalien des Feuerkogels. Zu sehen ist das Maximum Max , das Minimum Min , die Standardabweichung σ und das Bestimmtheitsmaß r^2 der einzelnen Monate sowie des Jahres für den Zeitraum von 1930 bis 2007.

Beim Vergleich fällt eine Nullpunktverschiebung des mittleren Unterschiedes der Temperaturanomalien auf, welche auf das Fehlen kühlerer Jahre des frühen 20. Jahrhunderts und den damit verstärkten Einfluss der letzten wärmeren Dekade bei der Berechnung der Anomalien an der Station Feuerkogel zurückzuführen sein könnte. Daher wurden monatsweise lineare Regressionen zwischen den monatlichen Anomaliewerten des HISTALP-Datensatzes $TA_{Histalp}$ und den am Feuerkogel ermittelten Temperaturanomalien $TA_{Feuerkogel}$ gebildet (Gl.5.1). Die resultierenden Regressionsparameter sind in Tabelle 5.6 aufgeführt. Die Monats- sowie Jahresmitteltemperatur am Feuerkogel für den Zeitraum von 1851 bis 1929 wurden anschließend unter Verwendung der Temperaturmittelwerte $T_{Feuerkogel1930-2007}$ sowie den Temperaturanomalien nach HISTALP von 1851 bis 1929 in Verbindung mit den Regressionsparametern p und q (Gl.5.1) mit der Gleichung 5.2 rekonstruiert.

$$TA_{Feuerkogel} = p \cdot TA_{Histalp} + q \quad (5.1)$$

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
p	1,038	1,067	1,064	1,113	1,121	1,074	1,1	1,062	1,052	1,106	1,104	1,038	1,057
q	-1,264	-1,088	-3,718	-3,13	-3,799	-4,779	-2,69	-2,715	1,477	5,366	-0,35	-0,582	-1,324

Tabelle 5.6: Parameter p und q der linearen Regression zwischen den Temperaturanomalien des HISTALP-Datensatzes und den berechneten des Feuerkogels in monatlicher Auflösung.

$$T_{Feuerkogel}|_{1929}^{1851} = T_{Feuerkogel1930-2007} + TA_{Feuerkogel}|_{1929}^{1851} \quad (5.2)$$

Um eine Temperraureihe an der Simonyhütte ab 1851 zu erhalten, wurden die monatlichen Temperaturabweichungen ΔT von 2008 (Tab.5.3) zu den Monatsmitteltemperaturen der Reihe am Feuerkogel addiert. Fügt man die Originaldaten von 2008 hinzu ergibt sich eine 158-jährige Reihe der Monats- sowie Jahresmitteltemperaturen (Abb.5.8) im Bereich Simonyhütte von 1851 bis 2008 .

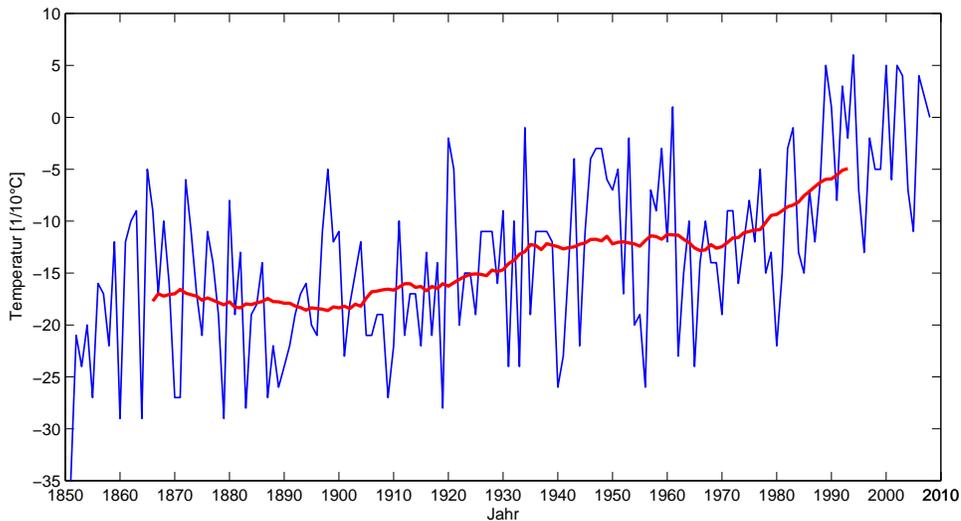


Abbildung 5.8: Rekonstruierte Jahresmitteltemperatur an der Station Simonyhütte von 1851 bis 2008 dargestellt als blaue Linie. Rot gezeichnet das gleitende Mittel über 30 Jahre.

Wendet man die Gleichung 6.2 ebenfalls auf den Zeitraum von 1930 bis 2007 an und berechnet die Unterschiede zwischen den Original- und den so erhaltenen Monatsmittelwerten, kann man den Fehler der rekonstruierten Temperaturen zwischen 1851 und 1929 der Station Feuerkogel abschätzen. Es ergibt sich eine Standardabweichung der Monatswerte von $0,2^{\circ}\text{C}$ bis $0,5^{\circ}\text{C}$ (Tab. 5.7). Die maximalen Abweichungen betragen $1,4^{\circ}\text{C}$. Das Bestimmtheitsmaß r^2 zeigt dennoch eine sehr gute Korrelation zwischen den Anomalien. Für die weitere Übertragung der Temperaturen auf die Station Simonyhütte muss eine Schwankung des Höhengradienten der Temperatur von $\pm 0,1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ berücksichtigt werden, da unterschiedliche Witterungen an den rund 37 Kilometern entfernten Stationen Feuerkogel und Simonyhütte Auswirkungen auf den monatlich gemittelten Temperaturunterschied haben können. Mit einer Höhendifferenz von 592 m liegt die Unsicherheit der berechneten Monatsmitteltemperaturen der Station Simonyhütte bei $\pm 0,6^{\circ}\text{C}$.

5.2.3 Niederschlag Simonyhütte 1858 - 2008

Für die Rekonstruktion des Niederschlages im Bereich des Totalisators in Gletschnähe (Kap. 5.1.2) wurden die homogenisierten Niederschlagsdaten der Station Bad Ischl aus dem HISTALP-Projekt sowie die am Totalisator gemessenen Niederschlagssum-

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
<i>Max</i> (°C)	1,0	1,4	1,0	0,9	0,9	0,8	0,5	0,7	1,4	0,9	1,1	1,4	0,3
<i>Min</i> (°C)	-0,9	-1,3	-1	-0,7	-0,7	-0,8	-0,5	-0,6	-1,0	-1,3	-1,0	-1,2	-0,3
σ (°C)	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4	0,1
r^2	0,970	0,976	0,968	0,9678	0,971	0,972	0,980	0,964	0,956	0,955	0,945	0,959	0,968

Tabelle 5.7: Statistik der Differenz aus berechneten Monatsmitteltemperaturen aus Histalp-Daten und der Station Feuerkogel. Zu sehen das Maximum *Max*, das Minimum *Min*, die Standardabweichung σ sowie das Bestimmtheitsmaß r^2 der einzelnen Monate sowie des Jahres für den Zeitraum von 1930 bis 2007.

men der Massenhaushaltsjahre 2006/2007 und 2007/2008 verwendet. Ausgehend von den Überdeckungszeitraum beider Datensätze vom 1.10.2006 bis zum 30.09.2008 wurde eine lineare Regression zwischen den monatlichen Niederschlagssummen N an der Station Bad Ischl und denen am Totalisator gebildet (Gl.5.3).

$$N_{Totalisator} = p \cdot N_{BadIschl} + q \quad (5.3)$$

Es ergaben sich die Parameter $p = 1,5785$ und $q = -15,869$. Nach der Gleichung 6.3 wurden anschließend sämtliche Monatsniederschlagssummen der Station Bad Ischl ab Januar 1858 auf die Höhe des Totalisators gerechnet. Das in der Grafik 5.9 rot dargestellte 30-jährige gleitende Mittel des Niederschlages zeigt einen positiven Trend. Nach den zentrierten Werten dieser Mittelung stieg im Zeitraum von 1873 bis 1993 die durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme um 399 mm von 2159 mm auf 2558 mm. Dies ist eine Erhöhung um 18,5% gegenüber dem Wert von 1873.

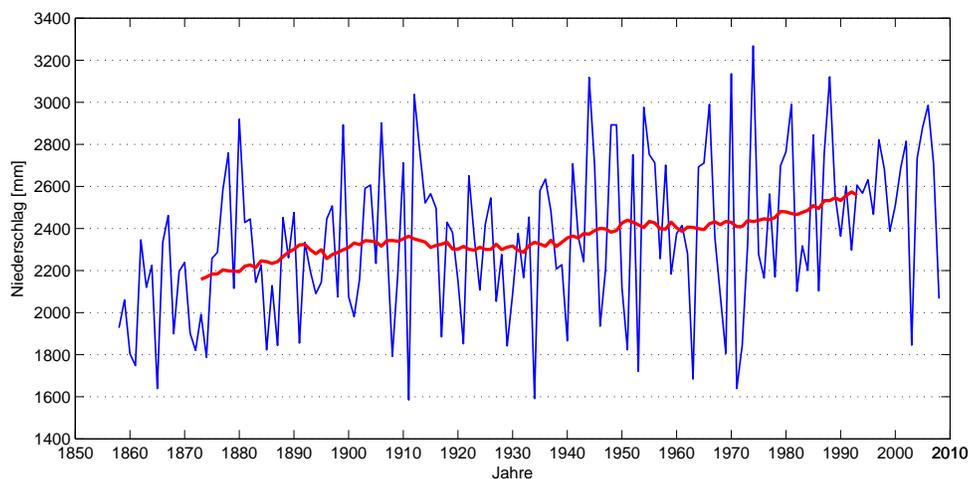


Abbildung 5.9: Rekonstruierte Jahresniederschläge im Bereich des Totalisators Hallstätter Gletscher für den Zeitraum 1858 bis 2008. Als rote Linie dargestellt das gleitende Mittel über 30 Jahre.

Um die Genauigkeit der Anwendung der Regression auf die einzelnen Monate festzustellen, wurden die berechneten Werte für den Zeitraum 1.10.2006 bis 30.09.2008 mit den

tatsächlich gemessenen verglichen (Tab.5.8). Dabei zeigen sich vereinzelt große Unterschiede, wie beispielsweise mit +107% im Februar 2007 und +80% im September 2008. Im Rahmen der Jahressumme mitteln sich diese Fehler jedoch wieder heraus.

	2006				2007				2008			
	berechnet	gemessen	Δ	$\Delta in\%$	berechnet	gemessen	Δ	$\Delta in\%$	berechnet	gemessen	Δ	$\Delta in\%$
Jan					177	194	17	9	109	136	27	20
Feb					207	100	-107	-107	49	89	40	45
Mär					178	150	-28	-19	238	278	40	14
Apr					20	29	9	31	199	187	-12	-6
Mai					328	303	-25	-8	36	27	-9	-33
Jun					211	286	75	26	221	247	26	11
Jul					294	290	-4	-1	327	397	70	18
Aug					254	234	-20	-9	235	180	-55	-31
Sep					503	510	7	1	189	105	-84	-80
Okt	112	148	36	24	183	153	-30	-20				
Nov	301	310	9	3	295	317	22	7				
Dez	68	61	-7	-11	139	143	4	3				
Summe	481	519	38	7	2789	2709	-80	-3	1603	1646	43	3

Tabelle 5.8: Vergleich der mit der Regression berechneten zu den am Totalisator gemessenen Niederschlagssummen. Die Werte verstehen sich in mm.

5.2.4 Einordnung der Witterung der Massenhaushaltsjahre 2006/2007 und 2007/2008

Ausgehend von den in den Tabellen 5.9 und 5.10 festgehaltenen und in den Grafiken 5.10 und 5.11 dargestellten Verläufen der Monatsmittelwerten der Temperatur und des Niederschlages im Vergleich zu dem von der *World Meteorological Organization (WMO)* benutzten klimaologischen Bezugszeitraum von 1961 bis 1990 wird folgend die Witterung in unmittelbarer Nähe des Hallstätter Gletschers der Massenhaushaltsjahre 2006/2007 sowie 2007/2008 beschrieben.

	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept	Summe	
WMO (1961 - 1990)	1,5	-3,9	-6,3	-7,8	-8,1	-6,7	-4,0	0,9	4,0	6,1	6,6	4,5	-1,1	°C
2006/2007	5,1	-0,9	-2,1	-4,8	-5,1	-4,9	1,4	3,7	7,0	7,4	7,3	2,1	1,4	°C
Δ zu WMO	3,6	3,0	4,2	3,0	3,0	1,8	5,4	2,8	3,0	1,3	0,7	-2,4	2,5	°C
2007/2008	-0,3	-5,8	-5,8	-4,4	-5,0	-7,3	-3,5	3,8	6,6	6,7	7,9	2,4	-0,4	°C
Δ zu WMO	-1,8	-1,9	0,5	3,4	3,1	-0,6	0,5	2,9	2,6	0,6	1,3	-2,1	0,7	°C

Tabelle 5.9: Vergleich der Monatsmittel- und Jahrestemperaturen der Station Simonyhütte mit den Mittelwerten von 1961 - 1990.

Das Massenhaushaltsjahr 2006/2007 startete gegenüber dem Mittel der WMO-Periode deutlich zu warm. Von Oktober bis Februar war die Temperatur stets über 3°C höher. In diesem Zeitraum fiel überdurchschnittlich viel Niederschlag im November, wohingegen der Dezember zu trocken ausfiel. Eine positive Abweichung um 5,4°C zeigte

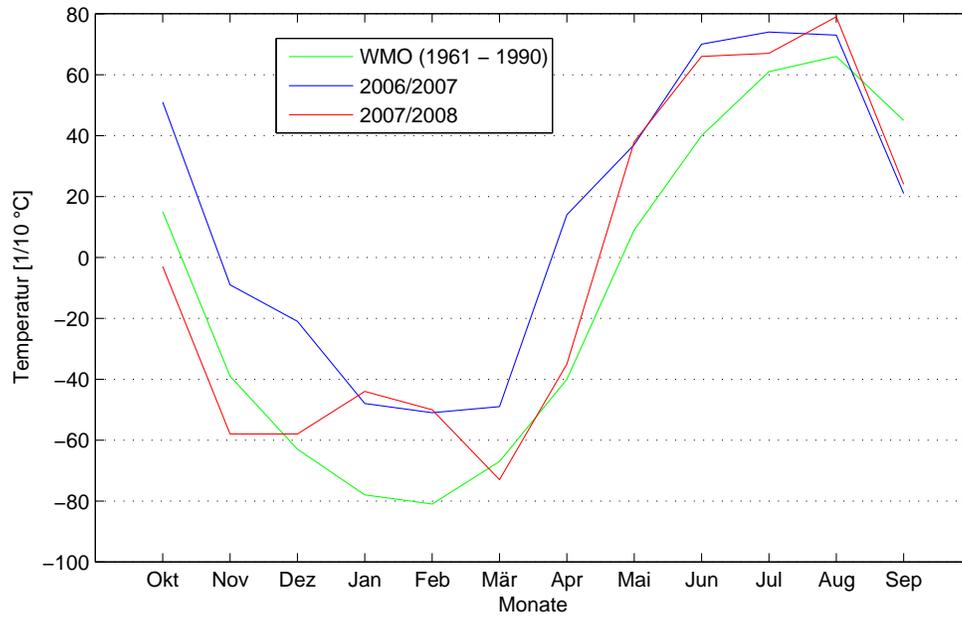


Abbildung 5.10: Monatsmitteltemperaturen der Massenhaushaltsjahre 2006/2007 und 2007/2008 und das Mittel der rekonstruierten Temperaturen über die WMO-Periode 1961 - 1990.

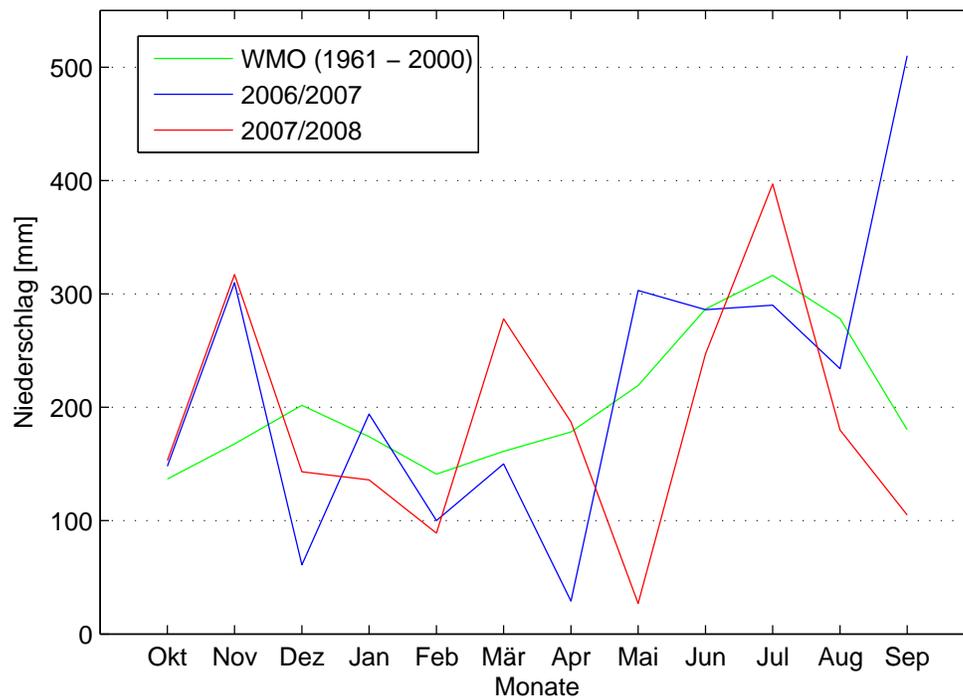


Abbildung 5.11: Gemessene Monatsniederschläge der Massenhaushaltsjahre 2006/2007 und 2007/2008 und das Mittel der rekonstruierten Niederschlagswerte über die WMO-Periode 1961 - 1990.

	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept	Summe	
WMO (1961 - 1990)	137	168	202	174	141	161	178	219	287	316	278	180	2353	mm
2006/2007	148	310	61	194	100	150	29	303	286	290	234	510	2615	mm
Δ zu WMO	11	142	-141	20	-41	-11	-149	84	-1	-26	-44	330	262	mm
Δ zu WMO %	8	85	-70	11	-29	-7	-84	38	0	-8	-16	183	11	%
2007/2008	153	317	143	136	89	278	187	27	247	397	180	105	2259	mm
Δ zu WMO	16	149	-59	-38	-52	117	9	-192	-40	81	-98	-75	-94	mm
Δ zu WMO %	12	89	-29	-22	-37	73	5	-88	-14	26	-35	-42	-4	%

Tabelle 5.10: Vergleich der am Totalisator gemessenen Niederschlagssummen mit den Mittelwerten von 1961 - 1990.

der April 2007. Er war zugleich extrem trocken. Während die Monate Mai bis August mit erhöhten Temperaturen und durchschnittlichen Niederschlag aufwarteten, zeigte der September fast eine Verdreifachung der durchschnittlichen Niederschlagsmenge bei einem um 2,4°C zu kühlem Monatsmittel der Temperatur. In Summe fiel im Massenhaushaltsjahr gegenüber dem Zeitraum 1961 - 1990 rund 11% mehr Niederschlag bei einer um 2,5°C erhöhten Jahresmitteltemperatur.

Der erhöhte Niederschlag sowie die kühleren Temperaturen setzten sich im Oktober sowie November des Massenhaushaltsjahres 2007/2008 fort. Januar und Februar 2008 zeigten sich allerdings wieder deutlich zu warm und zu trocken. Dem folgte ein niederschlagsreicher und gegenüber dem Mittel von 1961 bis 1990 etwas kühlerer April sowie ein wiederum zu warmer und trockener Mai. Ebenfalls zu warm fiel der Juni aus. Der September 2008 zeigten sich etwas zu kühl und zu trocken. Im Massenhaushaltsjahr 2007/2008 war die Temperatur im Schnitt um 0,7°C erhöht bei einem Niederschlagsdefizit von rund 4%.

5.3 Beschreibung einzelner Klimaperioden und Auswirkung auf die Volumsänderungen des Gletschers

Im Folgenden wird die Verbindung zwischen der Entwicklung der Temperatur und des Niederschlages in den Zeiträumen zwischen den einzelnen datierbaren Gletscherständen seit 1856 bis 2007 und die in Kapitel 4 dargelegten Veränderungen des Hallstätter Gletschers untersucht. Um die relativen Unterschiede besser zu dokumentieren wird auch hier auf das klimatologische Mittel nach WMO von 1961 bis 1990 Bezug genommen. Daher ist in den Abbildungen 5.12 und 5.13 jeweils die Abweichung von diesem Mittel dargestellt. Es werden zudem die für die Entwicklung eines Gletschers wichtigen Parameter Winterniederschlag und der Sommertemperatur (Abb. 5.13) gezeigt. Die Tabelle 5.11 enthält die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur und Sommertemperatur am Punkt Simonyhütte (2210 m) sowie Jahres- und Winterniederschlagsmenge im Bereich des Totalisators in den Zeiträumen zwischen den datierbaren Gletscherständen.

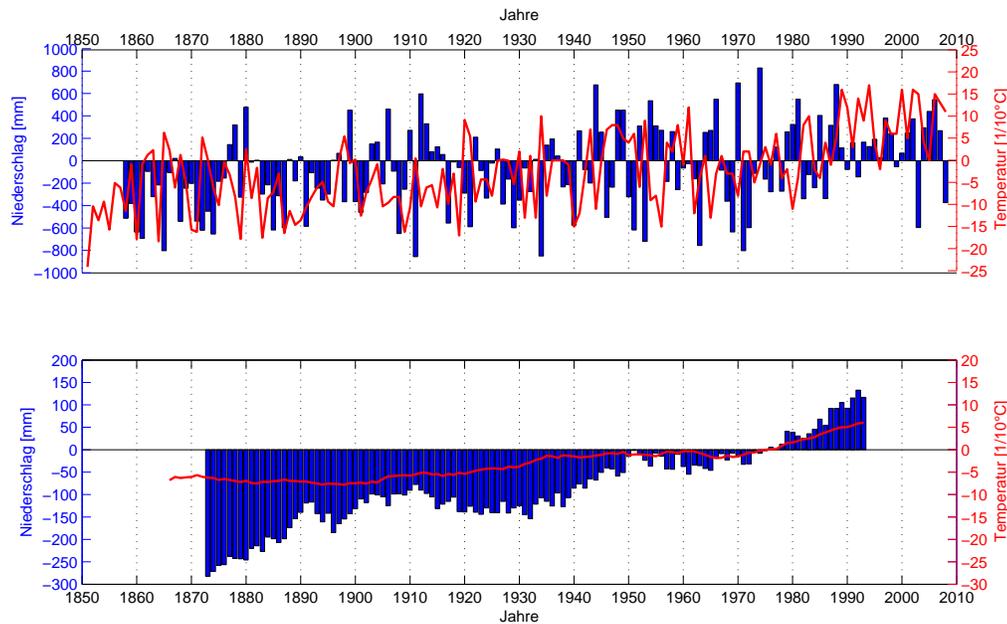


Abbildung 5.12: Abweichung der jährlichen Niederschlagssummen sowie Jahresdurchschnittstemperaturen im Bereich Hallstätter Gletscher vom Mittel 1961-1990. Oben Jahreswerte. Unten 30-jährige Glättung.

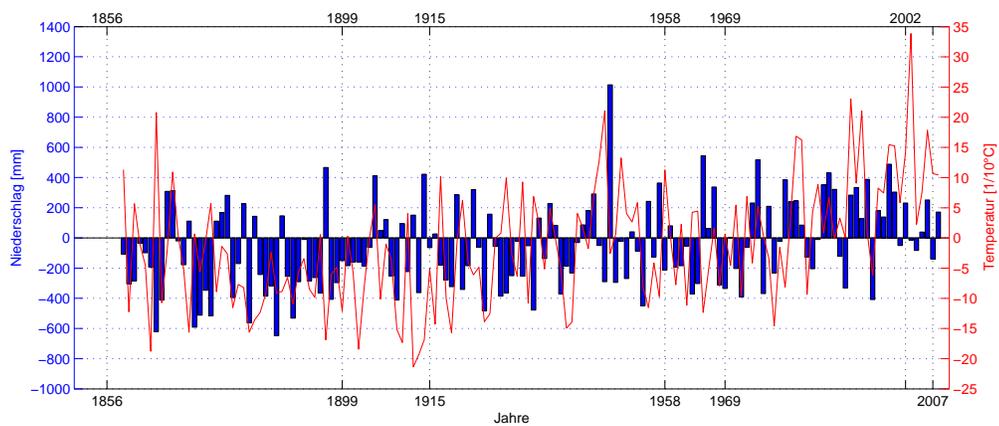


Abbildung 5.13: Abweichung des Niederschlags des Winterhalbjahres (ONDJFMA) und Durchschnittstemperatur des Sommerhalbjahres (MJJAS) vom Mittel 1961-1990 im Bereich Hallstätter Gletscher .

Periode 1856-1899 Während des starken Gletscherrückgangs 1856 bis 1899 war das Klima kühler und trockener als im Mittel von 1961 bis 1990. Dabei zeichnet sich eine Zweiteilung ab. Bis 1880 lag die Schwankungsbreite der Jahresmitteltemperaturen höher als danach. Zum Teil wurde das WMO-Mittel erreicht oder gar überschritten. Ab 1880 bis Ende des 19. Jahrhunderts traten durchwegs kühlere Temperaturen auf. Dies lässt sich auch in den Sommertemperaturen sehen. Der durchschnittliche Jah-

	$T_{Jahr}(^{\circ}C)$	$T_{Sommer}(^{\circ}C)$	$N_{Jahr}(mm)$	$N_{Winter}(mm)$
1856-1899	-1,7	3,9	2202	947
1899-1915	-1,8	3,6	2410	1085
1915-1958	-1,3	4,3	2354	1065
1958-1969	-1,2	4,3	2356	1072
1969-2002	-0,7	4,8	2503	1219
2002-2007	0	5,9	2662	1170
WMO 1961-1990	-1,1	4,4	2441	1132

Tabelle 5.11: Durchschnittliche Jahresmitteltemperatur T_{Jahr} , Sommertemperatur T_{Sommer} , Jahres- (N_{Jahr}) sowie Winterniederschlagsmenge N_{Winter} der einzelnen Perioden zwischen den jeweiligen Gletscherständen bezogen auf den Punkt Simonyhütte (2210m).

resniederschlag lag mit 2202 mm rund 240 mm unter dem Mittel von 1961-1990. Mit einer durchschnittlichen Abweichung des Niederschlags von -185 mm waren auch die Winter trockener.

Periode 1899-1915 Bei durchschnittlich $-1,6^{\circ}C$ Jahresmitteltemperatur verlief die Periode bis 1915 niederschlagsreicher. Mit mittlerer Niederschlagsabweichung von -47 mm im Winter und -31 mm der Jahressumme wurde annähernd das WMO-Mittel erreicht. In dieser Periode verzögerte sich der Rückzug und der Eismassenverlust (Kap. 4.5).

Periode 1915-1958 In der folgenden Periode bis 1958 verlor der Gletscher vermehrt an Masse. Dies ging mit einer Temperaturerhöhung einher. Bei einer durchschnittlichen Jahresmitteltemperatur von $-1,3^{\circ}C$ vollzog sich eine Erwärmung von $-1,6^{\circ}C$ 1915 auf $1,1^{\circ}C$ 1958 am Punkt Simonyhütte (Werte aus 30-jährigem gleitenden Mittel). Einem anfänglich gegenüber dem WMO-Mittel trockenerem Zeitraum bis in die 1930er Jahre folgte ein Anstieg der Niederschlagsmengen bis in die 1950er Jahre.

Periode 1958-1969 Im kurzen Zeitraum von 1958 bis 1969 lag der Jahres- sowie Winterniederschlag unter dem WMO-Mittel. Ebenso waren die durchschnittliche Jahres- ($-1,2^{\circ}C$) und Sommertemperatur ($4,3^{\circ}C$) geringfügig kühler. Bei annähernd gleichen Durchschnittswerten wie in der vorhergehenden Periode glichen sich die durchschnittlichen jährlichen Volumsverluste ebenfalls (Kap.4.5).

Periode 1969-2002 Die 33 jährige Periode zeigte erstmals gegenüber dem WMO-Mittel höhere Durchschnittstemperaturen. Diese Erwärmung setzte aber erst um 1980 ein. Die ersten 10 Jahre verliefen annähernd gleichbleibend kühl. Dies ist auch in der Sommertemperatur erkennbar. Ebenfalls einen positiven Trend zeigten die Jahres- sowie Winterniederschlagsmengen. Die in dieser Periode geringeren Massenverluste können eine Folge der kühlen Temperaturen und den erhöhten Niederschlag

sein.

Periode 2002-2007 Ab 2002 verlor der Hallstätter Gletscher deutlich an Masse. In diesem Zeitraum lagen durchschnittlich Jahres- sowie Sommermitteltemperatur um 0,5°C über dem Mittel der WMO-Periode. Auch in diesem Zeitraum ist ein weiterer Anstieg der Niederschlagssummen zu erkennen. Dabei zeigt der durchschnittliche Jahresniederschlag mit 2662 mm allerdings eine positivere Abweichung vom WMO-Mittel (+221 mm) gegenüber dem für die Bilanz eines Gletschers wichtigen Winterniederschlag (1170 mm), welcher eine positive Abweichung von 38 mm zum WMO-Mittel aufweist.

Kapitel 6

Numerische Simulation der Volumsverluste 1859 - 2007

Für die Modellierung der Massenbilanz eines Gletschers und damit seine Volumsänderung kann man eine statistische Beziehung zwischen gemessenen Massenbilanzen und Faktoren des Klimas und der Topographie herstellen (Ohmura, 2001; Schöner und Böhm, 2007). Diese Regressionen beruhen auf einer Auswertung langjähriger Messreihen und geben keine physikalische Beziehung wieder. Ausgehend von Temperatur und Niederschlag liefert die Gradtagmethode nach Hoinkes und Steinacker (1975) und Steinacker (1979), welche auf den Hintereisferner (Ötztal, Österreich) kalibriert wurde, eine Möglichkeit der Reproduzierung von Massenbilanzen. Das Konzept einer Aufsummierung von potentiellen Tagen mit Eisschmelze und der folgenden Regression zu gemessenen Massenbilanzen muß an die Topographie, Ausrichtung, Größe, Form sowie unterschiedlicher klimatischer Lage des jeweiligen Gletschers angepasst werden.

6.1 Die Gradtagmethode nach Hoinkes und Steinacker

Die Parametrisierung nach Hoinkes und Steinacker (1975) beruht auf einer linearen Regression zwischen den beobachteten Massenbilanzen am Hintereisferner der Massenhaushaltsjahre 1952/53 bis 1972/73 und einer Summe positiver Gradtagen $\sum TS$ an der Gletscherzunge. Diese Summe wird zu einem aus der Aufsummierung der positiven Tagesmitteltemperaturen der Monate Mai bis September gebildet, wobei die Gradtagsumme TS der ersten Mai- sowie der zweiten Septemberhälfte zu je $1/3$ und die zweite Mai- sowie die erste Septemberhälfte zu $2/3$ gewichtet wird. Davon werden Gradtage für feste Sommerniederschläge abgezogen. Für 5 mm Niederschlag gefallen bei 0°C an der Gletscherzunge, was einer Neuschneedecke von ungefähr 5 cm entspricht, werden zwei negative Gradtage berechnet. Bei einer Temperatur zwischen 0°C und 3°C an der Gletscherzunge wird nur 1 Tag pro 5 mm Niederschlag abgezogen. Zwischen 3°C und 6°C erfolgte ein

Abzug von 0,5 Gradtagen pro 5 mm Niederschlag. Als weiterer Teil der Gradtagssumme wird die Abweichung des Winterniederschlages, bestehend aus der Summe der Niederschläge der Monate Oktober, November, Dezember, Januar, Februar, März und April, vom langjährigen Mittelwert berechnet. Auch hier werden für 5 mm Niederschlagsdifferenz an der Gletscherzunge zwei negative Gradtage berechnet. Die so erhaltene Summe an Gradtagen TS ($9, Wi$) wird in der Regressionsgleichung 6.1 zur Berechnung der Massenbilanz b verwendet.

$$b = 2815 - 3,367 \cdot \sum TS \quad (6.1)$$

Auf Grundlage der Messergebnisse der Massenbilanz des Hintereisferners der Haushaltsjahre 1952/53 bis 1976/77 wurde die Gleichung über eine neue Regression angepasst (Steinacker, 1979) (Gl.6.2).

$$b = 3225 - 6,06 \cdot \sum TS \quad (6.2)$$

Das auf die Topographie des Hintereisferners geeichte Modell ist zwar für diesen Gletscher gut anwendbar, liefert aber bereits abweichende Ergebnisse beim räumlich nah gelegenen Kesselwandferner (Kuhn et al., 1985). Es wurde der Versuch unternommen, das Konzept des Modells mit einer Regression auf die zwei vorliegenden Massenhaushaltsjahre des Hallstätter Gletschers zu eichen. Da die für den Hallstätter Gletscher in Kapitel 5 erstellten Reihen der Temperatur und des Niederschlags nur in Monatswerten vorliegt, mußte das Modell angepasst werden. Die für die Monatsmitteltemperaturen berechneten positiven Gradtage wurden mit den Anzahl der Tage des jeweiligen Monats multipliziert. Dabei wurden die Gradtage der Monate Mai und September mit einem Faktor von 0,5 geringer gewichtet. Der langjährigen Mittelwert des Winterniederschlages wurde für den Zeitraum 1859 bis 2007 ermittelt. Davon abgeleitet wurden die Abweichungen der jährlichen Winterniederschlagssummen.

6.2 Ergebnisse

Der Winterniederschlag bestehend aus den Niederschlagsmengen der Monate Oktober bis April kann erst ab dem Winter 1858/1859 summiert werden. Daher wurden die mittleren jährlichen spezifischen Bilanzen b der Haushaltsjahre 1859 bis 2008 berechnet. Anschließend wurden die mittleren spezifischen Bilanzen b mit den Gesamtflächen des Gletschers in den jeweiligen Jahren multipliziert und mit einer mittleren Dichte von $900 \frac{kg}{m^3}$ die Nettobilanz B in m^3 Eis berechnet. Um die Ergebnisse mit den in Kapitel 4.5 ermittelten Volumsverlusten vergleichen zu können, folgte eine Aufsummierung der Jahre über die entsprechenden Zeiträume (Tab. 6.1). Eine Regression der für den Hallstätter Gletscher berechneten Gradtage der Haushaltsjahre 2006/2007 und 2007/2008 mit den

gemessenen Massenbilanzen (Kap. 3) liefert die Gleichung 6.3.

$$b = 477 - 1,447 \cdot \sum TS \quad (6.3)$$

Die Volumsverluste zwischen 2002 und 2007 werden bei Anwendung dieser Gleichung annähernd wiedergegeben (Tab. 6.1). Für den Zeitraum zwischen 1961 und 2001 wird eine deutlich zu positive Summe der Nettobilanzen modelliert. Zu positive Massenbilanzen werden hingegen für den Zeitraum vor 1969 berechnet. Die zu geringen Volumsverluste zwischen 1859 und 1958 könnte auf die zu diesem Zeitpunkt herrschende Flächenhöhenverteilung und dem deutlich tiefer gelegenen Zungenende zurückzuführen sein (Kap. 4.3). Per Definition des Gradtagmodelles nach Hoinkes und Steinacker (1975) wird zur Berechnung der Gradtage die Temperatur an der Zunge verwendet. Die Zungenpositionen und große Gletscherflächen lagen aber vor 1958 deutlich tiefer als 2007. Ausgehend von der Lage der ersten 50-m-Höhestufe mit mindestens 100000 m^2 wurden Korrektoren der Sommertemperatur um $0,35 \frac{\text{°C}}{50\text{m}}$ angewandt. Somit ergaben sich für den Zeitraum bis 1899 eine Korrektur um $+2,1\text{°C}$, bis 1915 um $+1,4\text{°C}$ sowie um $+0,35\text{°C}$ bis 1958. Die so erhaltenen Volumsverluste in den jeweiligen Perioden stimmen nach der Korrektur besser mit den geodätisch ermittelten überein. Der Volumsverlust zwischen 1859 und 1898 wird weiterhin unterschätzt. Zu einem wirkt sich hier die Bildung des riesigen Toteiskörpers im oberen Taubenkar aus, welcher größere Massenverluste gegenüber denen auf einem intakten Gletscher mit sich bringt. Der Volumsverlust im Zeitraum zwischen 1899 und 1958 wird durch das Modell gut wiedergegeben. Für die Jahre 1958 bis 1968 wird ein zu geringer Volumsverlust modelliert. Der deutlich überschätzte Volumsverlust zwischen 1969 und 2002 fällt auf eine Zeit mit dokumentierten Gletschervorstößen auch am Hallstätter Gletscher. Insgesamt fallen die relativen Fehler besonders der jüngeren Perioden gegenüber den geodätisch ermittelten Volumsverlusten zu groß aus.

ΔV	1859/1898	1899/1914	1915/1957	1958/1968	1969/2001	2002/2007		
GIS	-138,3	-23,1	-41,0	-11,3	-22,4	-13,6	-249,7	10^6 m^3
TS Hallstätter Gl.	-3,5	1,0	-26,7	-5,5	-41,1	-11,7	-87,4	10^6 m^3
Δ zu GIS	134,8	24,1	14,4	5,9	-18,7	2,0	162,3	10^6 m^3
Δ zu GIS in %	97,5	104,2	35,0	51,7	-83,4	14,4	65,0	%
TS Hallstätter Gl. + T.-Korrektur	-104,7	-24,3	-42,7	-5,5	-41,1	-11,7	-230,0	10^6 m^3
Δ zu GIS	33,6	-1,3	-1,7	5,9	-18,7	2,0	19,8	10^6 m^3
Δ zu GIS in %	24,3	-5,5	-4,2	51,7	-83,4	14,4	7,9	%

Tabelle 6.1: Über die Perioden kumulierte Volumsverluste berechnet nach den einzelnen Modellen gegenüber dem aus den Höhenmodellen hergeleiteten ΔV in m^3 Eis.

Die Reproduzierung des Massenhaushaltes nach der Gradtagmethode verlangt generell eine solide Basis an Ausgangsdaten. Nach zwei Jahren Messung ist diese allerdings am Hallstätter Gletscher noch nicht gegeben. Schon an den der Entwicklung der Gradtagparameter am Hintereisferner (Gl. 6.1 und 6.2) zeigt sich, das wenige Jahre zusätzlicher

Messung das statistische Modell deutlich beeinflussen. Mit der hier angeführten Methode kann die Entwicklung des Hallstätter Gletschers zwar reproduziert werden, trotzdem weichen die modellierten Volumsänderungen in den Perioden teilweise beträchtlich von den aus den Differenzen der digitalen Geländemodelle ermittelten ab. Demnach können die Volumsänderungen auf Grundlage der zwei vorliegenden Massenbilanzjahre nicht mit ausreichender Genauigkeit durch das TS-Modell nach Hoinkes und Steinacker (1975) berechnet werden.

Kapitel 7

Szenario

Bei nicht deterministischen chaotischen Systemen können aus physikalischen Gründen keine Zukunftsprognosen berechnet werden. Um sich trotzdem auf mögliche zukünftige Zustände vorbereiten zu können, berechnet man verschiedene denkbare Szenarios. Im Unterschied zu Prognosen kann man weder Zeitpunkt noch Wahrscheinlichkeit des Eintretens angeben. Die Entwicklung von Temperatur und Niederschlag sowie auch die Reaktion des Hallstätter Gletschers auf klimatische Veränderungen ist noch unbekannt. Daher wird bewusst auf eine zeitliche Einordnung verschiedener Szenarios verzichtet.

7.1 Erstellung der Szenarien

Als Grundlage für die Szenarien wurde die gemessene Eisdicke sowie die digitalen Geländemodelle (DGM) 2002 und 2007 verwendet. Der durch Subtraktion der DGM 2002 und 2007 ermittelten Höhenverlust der Gletscheroberfläche wurde mehrmals von der Gletscheroberfläche 2007 abgezogen. Ein Höhenverlust kann dabei nur bis zum durch die Eisdickenmessung ermittelte Gletscherbett (Kap. 4.4.2) erfolgen. Liegt dieses höher als die neue Oberfläche, so gilt dieser Bereich als eisfrei.

7.2 Ergebnisse

Die Verwendung der DGM 2002 und 2007 bedeutet die Entwicklung des Gletschers unter stetigem Rückzug mit negativen Massenbilanzen. Eine Fortsetzung dieser für Gletscher ungünstigen Witterungsverläufe ist denkbar. Dennoch können eine Aneinanderreihung von Jahren mit positiven Massenbilanzen den Gletscher wieder vorstoßen lassen. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich nur auf die qualitativen und quantitativen Veränderungen hervorgerufen durch den mehrfachen Abzug der Höhenänderung, nicht aber auf eine konkrete Zeitangabe.

- Stufe 1. Die Zungen des Hallstätter Gletscher gehen zurück. Die Felsinsel unterhalb

des Eissteins vergrößert sich. Am Übergang zwischen Schladminger und Hallstätter Gletscher treten Felspartien hervor.

- Stufe 2: Die gletscherfreie Fläche unterhalb des Eissteins wächst.
- Stufe 3: Eisreste der mittleren Zunge lösen sich vom Gletscher und werden als Toteis bald verschwinden. Der apere Bereich unterhalb des Eissteins vergrößert sich weiter. Oberhalb des Eissteins kommen in Verlängerung des Rückens Felsen zum Vorschein. Der Übergang zum Schladminger Gletscher besitzt nur mehr geringe Eisdicken.
- Stufe 4: Die unterhalb des Eissteins gelegene Verbindung zwischen östlichen und westlichen Teil des Gletschers dünnt zusehends aus. Der Gletscher verliert auch im Firngebiet an Höhe und Fläche.
- Stufe 5: Ober- und unterhalb des Eissteins wird der Hallstätter Gletscher sehr dünn. Eine Loslösung der östlichen Zunge ist denkbar.
- Stufe 10: Östlicher und westlicher Teil des Hallstätter Gletschers sind getrennt. Nur östlich des Bergkammes des Hohen Kreuzes können sich noch größere Eismassen halten. Im Bereich zwischen Dirndl und dem Schladminger Gletscher ist der Fels vollkommen ausgeapert.

	$h_{MAX}(m)$	$h_{MEAN}(m)$	$A(km^2)$	$A\%von2007$	$V(10^6m^3)$	$V\%von2007$
2007	131	48,7	3,04		148,0	
+1	128	47,3	2,79	91,8	132,0	89,2
+2	125	45,2	2,64	86,8	119,3	80,6
+3	122	43,2	2,49	81,8	107,4	72,6
+4	119	41,5	2,33	76,7	96,8	65,4
+5	116	39,5	2,20	72,2	86,8	58,7
+10	101	32,7	1,35	44,4	44,1	29,8

Tabelle 7.1: Maximale h_{MAX} und mittlere Eisdicke h_{MEAN} sowie Fläche A , Volumen V und deren prozentuale Relation für die Szenarien gegenüber dem Gletscherstand von 2007.

Die Entwicklung des Hallstätter Gletschers zeigt deutlich Gebiete, in die Verbindung von Eismächtigkeit und Oberflächenänderung eine Ausaperung großer Felsflächen hervorruft. Es stellt sich zusehends eine Trennung des östlichen und des westlichen Teils des Gletschers heraus. Die Felsen südlich wie nördlich des Eissteins werden eisfrei. Großflächig aper zeigt sich auch der südöstlichste Teil des Gletschers am Übergang zum Schladminger Gletscher. Andererseits gibt es Bereiche, in denen sich auch in weiterer Zukunft größere Eismassen halten können. Die in Tabelle 7.1 aufgeführten Kennzahlen der einzelnen Szenarien zeigen, dass der relative Volumsverlust aus der Verbindung von Flächen-

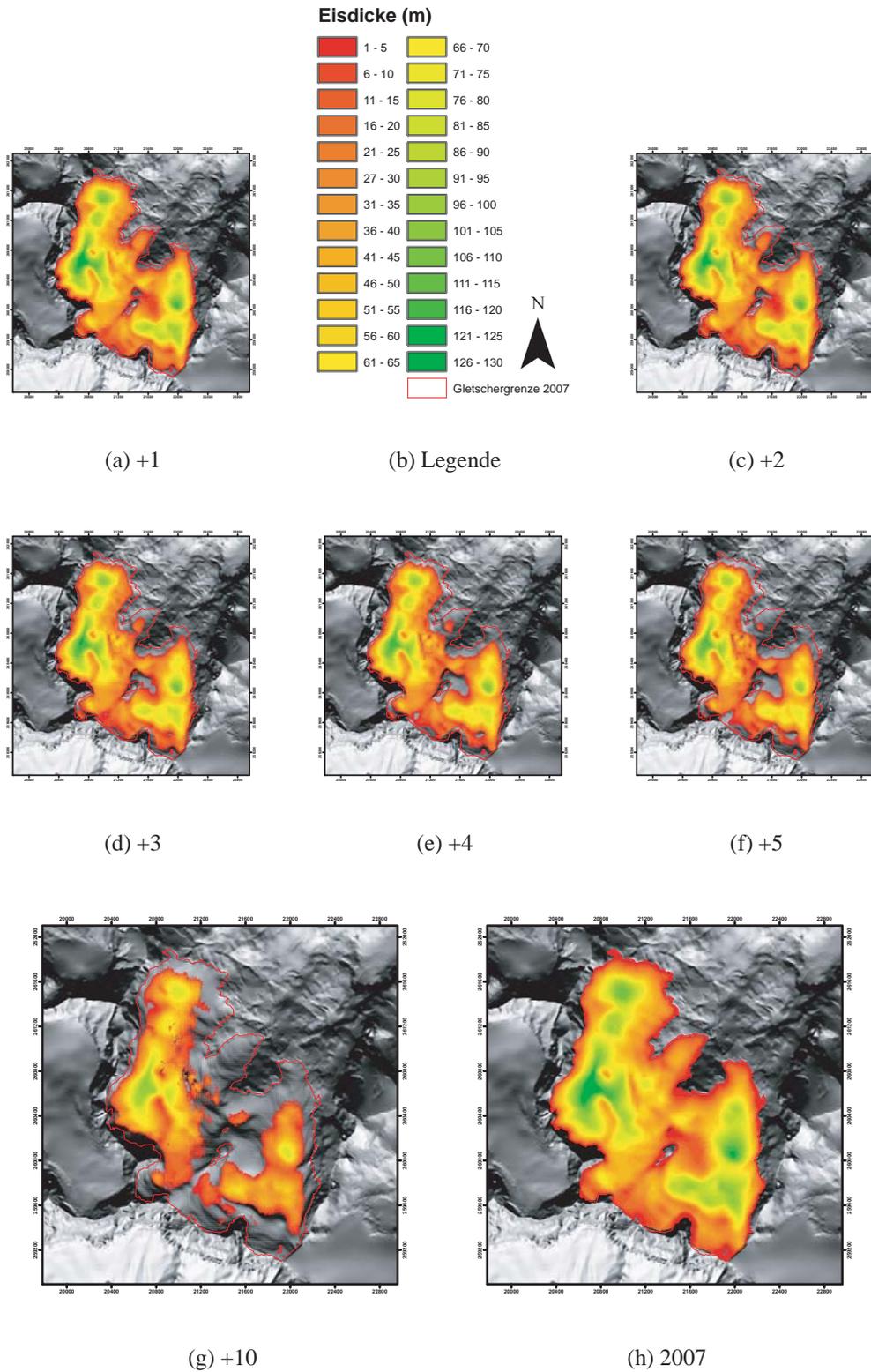


Abbildung 7.1: Eisdicken der nach Summierung der Höhenänderung noch bestehenden Gletscherflächen. Zum Vergleich die Eisdicke 2007. Als rote Linie der Gletscherrand 2007.

und Eisdickenverlust dem relativen Flächenverlust überwiegt. Ein komplettes Abschmelzen des Hallstätter Gletschers ist nach Abzug der zehnfachen Oberflächenänderung zwischen 2002 und 2007 vom Höhenmodell 2007 nicht erkennbar. Es bleiben rund die Hälfte der heutigen Fläche sowie ein Drittel des heutigen Volumens.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden die jährlichen Massenbilanzen sowie die daraus resultierenden langfristigen Volumsänderungen des Hallstätter Gletschers mit dem Klima in Gletschernähe in Zusammenhang gebracht. Seit 2006 werden Massenbilanzmessungen mit der direkten glaziologischen Methode am Hallstätter Gletscher durchgeführt. Die mittleren spezifischen Bilanzen von -376 mm für das Massenhaushaltsjahr 2007/2008 und -700 mm für das Bilanzjahr 2008/2009 fielen positiver als die an inneralpinen Gletschern gemessenen Bilanzen aus. Auf Grundlage von frühem, glaziologisch auswertbaren Kartenmaterial sowie sehr detailreichen Aufnahmen und Aufzeichnungen von Friedrich Simony wurde die Gletscheroberfläche des Hallstätter Gletschers zur Zeit seines Hochstandes um 1856 reproduziert. Daraus wurde wie auch aus den Karten von 1899, 1915 und 1958 ein digitales Höhenmodell durch Interpolation zwischen den Höhenschichtlinien erzeugt. Weitere Geländemodelle liegen aus den Jahren 1969, 2002 und 2007 vor. Der Vergleich der Flächen- und Höheninformationen der einzelnen Gletscherstände zeigt die Veränderungen der vergangenen 150 Jahre. In Verbindung der 2009 durchgeführten Messung der Eisdicke lassen sich Volumen und Volumsänderungen bestimmen. Wie der überwiegende Teil der Gletscher der Alpen hat auch der Hallstätter Gletscher seit seinem Hochstand Mitte des 19. Jahrhunderts an Masse verloren. Bis 2007 zog er sich um 1940 Meter zurück, verlor $2,36 \text{ km}^2$ an Fläche und schrumpfte auf 37% seines ursprünglichen Volumens. Um eine Verbindung zwischen der Entwicklung des Klimas und den ermittelten Massenänderungen herzustellen wurde auf der Basis von aktuellen Messungen in Gletschernähe und langjährigen, homogenisierten HISTALP Datenreihen die monatlichen Werte der Temperatur ab 1851 und des Niederschlages ab 1858 rekonstruiert. Im Gebiet des Hallstätter Gletschers zeigten sich bei 30jähriger Mittelung im Zeitraum von 1866 bis 1993 eine Temperaturerhöhung um $1,3^\circ\text{C}$ sowie eine Niederschlagszunahme um 18,5%. Der Versuch, den Rückgang des Hallstätter Gletschers aus der Verbindung von Temperatur und Niederschlag mit Hilfe des TS-Modells nach Hoinkes und Steinacker (1975) zu beschreiben zeigt zwar richtige Tendenzen, aber dennoch signifikante Abweichungen der kumulierten Bilanzen im Vergleich zu den aus den Höhenmodellen hergeleiteten Vo-

lumsverlusten. Um auch einen Blick in die mögliche Zukunft des Hallstätter Gletschers zu werfen wurde die Höhenänderung zwischen den Höhenmodellen von 2002 und 2007 mehrfach von der Oberfläche 2007 abgezogen. Demnach verbleiben dem Hallstätter Gletscher nach zehnfachem Abzug noch rund 44% seiner heutigen Fläche und 30% seines derzeitigen Volumens. Eine Fortführung der direkten Massenbilanzmessungen am Hallstätter Gletscher wird die weitere Entwicklung dieses besonderen Gletschers dokumentieren und eine bessere Basis für eine Kalibrierung eines Massenbilanzmodells liefern. Untersuchungen sowie Aufzeichnungen von Klima und Massenhaushalt am Hallstätter Gletscher tragen zum Verständnis der Reaktion von Gletschern auf Änderungen bei. Die räumliche Trennung sowie die gesonderte klimatischen Lage gegenüber den großen österreichischen Gletschern am Alpenhauptkamm macht einen Vergleich der zukünftigen Entwicklungen sehr interessant.

Literaturverzeichnis

- Anonymous, 1969: Mass balance terms. *Journal of Glaciology*, **8**, 3–7.
- Arnberger, E., und E. Wilthum, 1952: Die Gletscher des Dachsteinstockes in Vergangenheit und Gegenwart. *Jahrbuch des Oberösterreichischen Musealvereins*, **97**, 181–214. Linz.
- Arnberger, E., und E. Wilthum, 1953: Die Gletscher des Dachsteinstockes in Vergangenheit und Gegenwart. *Jahrbuch des Oberösterreichischen Musealvereins*, **98**, 187–217. Linz.
- Auer, I., R. Böhm, A. Jurkovic, W. Lipa, A. Orlik, R. Potzmann, W. Schöner, M. Ungersböck, C. Matulla, K. Briffa, P. Jones, D. Efthymiadis, M. Brunetti, T. Nanni, M. Mauge-ri, L. Mercalli, O. Mestre, J.M. Moisselin, M. Begert, G. Müller-Westermeier, V. Kveton, O. Bochnicek, P. Stastny, M. Lapin, S. Szalai, T. Szentimrey, T. Cegnar, M. Dolinar, M. Gajic-Capka, K. Zaninovic, Z. Majstorovic, E. Nieplova, und .H..H. instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology* 27: 17-46, 2007: HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology*, **27**, 17–46.
- Bauder, A., 2001: Bestimmung der Massenbilanz von Gletschern mit Fernerkundungsmethoden und Fliessmodellierungen. VAW Mitteilungen 169, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie , ETH Zürich.
- Böhm, A., 1903: Das Karlseisfeld einst und jetzt. In: *Vorträge d. Ver. z. Verbr. naturw. Kenntn.*, Wien.
- Böhm, R., I. Auer, W. Schöner, W. Ganekind, C. Gruber, A. Jurkovic, A. Orlik, und Ungersböck, 2009: Eine neue Webseite mit instrumentellen Qualitäts-Klimadaten für den Grossraum Alpen zurück bis 1760. *Wiener Mitteilungen*, **216**.
- Brückl, E., G. Gangl, und P. Steinhäuser, 1969: Die Ergebnisse der Seismischen Gletschermessungen am Dachstein im Jahre 1967. *Publ. der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien*, **190**, 1–24.

- Brückner, E., 1917: Vorrücken der Gletscher in den Ostalpen. *Mitt. d. D. u. Ö.A.V.*, **33 (43)**, 115–116.
- Brunner, K., 2004: Das Karls-Eisfeld. Forschungsarbeiten am Hallstätter Gletscher. *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte*, **38**, 103.
- Denoth, A., 1989: Snow Dielectric Measurements. *Advances in Space Research*, **9 (1)**, 233–243.
- Eder, K., R. Würfländer, und H. Rentsch, 2000: Digital photogrammetry for the new glacier inventory of Austria. *IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **1–15**, 1–15.
- Efthymiadis, D., P.D. Jones, K.R. Briffa, I. Auer, R. Böhm, W. Schöner, C. Frei, und J. Schmidli, 2006: Construction of a 10-min-gridded precipitation data set for the Greater Alpine Region for 1800-2003. *Journal of Geophysical Research*, **110**, D01105.
- Fischer, A., 2009: Calculation of glacier volume from sparse ice-thickness data, applied to Schaufelferner, Austria. *Journal of Glaciology*, **55 (191)**, 453–460.
- Fliri, F., 1974: Niederschlag und Lufttemperatur in den Alpen. *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte*, **24**, 110.
- Frei, C., und C. Schär, 1998: A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology*, **18**, 873–900.
- Glen, J.W., u.J.P., 1975: The electrical properties of snow and ice. *Journal of Glaciology*, **15**, 15–38.
- Gross, G., 1987: Der Flächenverlust der Gletscher Österreichs 1850–1920–1969. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **23(2)**, 131–141.
- Haeberli, W., H. Wächter, W. Schmid, und C. Sidler, 1982: Erste Erfahrungen mit dem US Geological Survey Monopuls Radioecholot im Firn. Eis und Permafrost der Schweizer Alpen. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH Zürich*, **Arbeitsheft 6**, 1–23.
- Hübl, A.v., 1901: *Karlseisfeld-Forschungen der k.k. Geographischen Gesellschaft. 1. Teil: Die topographische Aufnahme des Karlseisfeldes in den Jahren 1899 und 1900. Abhandlungen der k.k. Geographischen Gesellschaft*, Volume 3. Lechner, 23 S.
- Hoinkes, H., 1970: Methoden und Möglichkeiten zu Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **6(1-2)**, 37–90.

- Hoinkes, H., und R. Steinacker, 1975: Zur Parametrisierung der Beziehung Klima-Gletscher. *Riv. Ital. Geofis. Sci. Aff.*, **1**, 97–104.
- Kinzl, H., 1929: Beiträge zur Geschichte der Gletscherschwankungen in den Ostalpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **17**, 66–121.
- Klebensberg, R., 1943: Die Alpengletscher in den letzten 30 Jahren. – (1911-1941). *Pet. Mitt.*, **Jg. 89**, 68.
- Klebensberg, R.v., 1935: Ostalpengletscher 1933. Dachsteingruppe. Nach dem Bericht von Herbert Thalhammer. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **12**, 180–183.
- Kovacs, A., A.G.u.R.M., 1995: The in-situ dielectric constant of polar firn revisited. *Cold Regions Science and Technology*, **23**, 245–256.
- Krebs, N., 1915: Die Dachsteingruppe. *Zeitschrift des deutschen und österreichischen Alpenvereins*, **46**, 1–43.
- Krebs, N., 1918: Kartographische Charakterbilder. – II. Ein vergletscherter Kalkalpenstock. – Der Dachstein. *Kartogr. Ztschr.*, **VI.**, 1–7. Wien.
- Krobath, M., und G. Lieb, 2004: Die dachsteingletscher im 20. jahrhundert. *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte: Das Karls-Eisfeld. Forschungsarbeiten am Hallstätter Gletscher*, **38**, 76–102.
- Kuhn, M., E. Dreiseitl, S. Hofinger, G. Markl, N. Span, und G. Kaser, 1999: Measurements and Models of the Mass Balance of Hintereisferner. *Geograf. Ann.*, **81 A (4)**, 659–670.
- Kuhn, M., A. Lambrecht, J. Abermann, G. Patzelt, und G. Gross, 2008: *Projektbericht 10. Die österreichischen Gletscher 1998 und 1969, Flächen- und Volumenänderungen*. Kommission für die wissenschaftliche Zusammenarbeit mit Dienststellen des Bundesministeriums für Landesverteidigung, 125 S.
- Kuhn, M., G. Markl, G. Kaser, U. Nickus, und F. Obleitner, 1985: Fluctuations of climate and mass balance: different responses of two adjacent glaciers. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **21**, 406–416.
- Kurowski, L., 1889: Die Verteilung der Vergletscherung in den Ostalpen. *Jb. d. Ver. d. Geogr.*, **15**. Wien.
- 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.

- Lemke, P., J. Ren, R. Alley, I. Allison, J. Carrasco, G. Flato, Y. Fujii, G. Kaser, P. Mote, R. Thomas, und T. Zhang, 2007: Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground., Titel: Climate change 2007 : the physical science basis ; summary for policymakers, technical summary and frequently asked questions. Part of the Working Group I contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. by Susan Solomon. *publ. for the Intergovernmental Panel on Climate Change Nairobi*, **UNEP**, 337–383.
- Lichtenecker, N., 1928: Gletscherbeobachtungen am Karls-Eisfeld (Hallstätter Gletscher) in der Dachsteingruppe im Sommer 1927. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **16**, 147–148.
- Lichtenecker, N., 1931: Gletscherbeobachtungen am Karls-Eisfeld (Hallstätter Gletscher) in der Dachsteingruppe im Sommer 1930. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **19**, 128–129.
- Mayr, A., 1956: Das Hallstätter Trinkwasser. Hydrologische Studien im Dachsteingebiet. *Jahrbuch des Oberösterreichischen Musealvereins*, **101**, 319–333.
- Moser, R., 1954: Die Vergletscherung im Dachstein und ihre Spuren im Vorfeld. Master's thesis, Universität Innsbruck.
- Moser, R., 1997: *Dachsteingletscher und deren Spuren im Vorfeld*. Musealverein Hallstatt, 143 S.
- Mätzler, C., 1987: Applications of the Interaction of Microwaves with the Natural Snow Cover. *Remote Sensing Review*, **2**, 259–387.
- Narod, B., und G. Clarke, 1994: Miniature high-power impulse transmitter for radio-echo sounding. *Journal of Glaciology*, **40**, 190–194.
- Ohmura, A., 2001: Physical basis for the temperature-based meltindex method. *J. Appl. Meteorol.*, **40**, 753–761.
- Paterson, W., 1994: *The physics of Glaciers*. (3rd Ed. ed.). Pergamon Press, 480 S.
- Penck, A., und E. Brückner, 1909: *Die Alpen im Eiszeitalter*, Volume I. Verlag Chr. Herm Tauschnitz, 369 S.
- Radio-Radiis, A., 1932: *Führer durch das Dachsteingebirge*. Artaria, 592 S.
- Richter, E., 1888: *Die Gletscher der Ostalpen*. 288 S.
- Robin, G.d.Q., 1975: Velocity of radio waves in the ice by means of a bore-hole interferometric technique. *Journal of Glaciology*, **13**, 151–159.

- Schöner, W., und R. Böhm, 2007: A statistical mass-balance model for reconstruction of LIA ice mass of glaciers in the European Alps. *Annals of Glaciology*, **46**, 161–169.
- Simony, F., 1871: Die Gletscher des Dachsteingebirges. *Sitz. Ber. d. Math.-Naturw. Kl. d. Akad. d. Wiss.*, **63**, 501–537.
- Simony, F., 1883: Über die Gletscher des Dachsteingebirges. *Mitt. d. D. u. Ö.A.V.*, **9**, 138–139.
- Simony, F., 1884a: Anzeichen secularer klimatischer Schwankungen am Karls-Eisfeld. *Mitt. d. D. und Ö.A.V.*, **10**, 51–52.
- Simony, F., 1884b: Photographische Aufnahmen und Gletscheruntersuchungen im Dachsteingebirge. *Mitt. d. D. u. Ö.A.V.*, **10**, 314–317.
- Simony, F., 1885: Über die Schwankungen in der räumlichen Ausdehnung der Gletscher des Dachsteingebirges während der Periode 1840-1884. *Mitt. d. Geogr. Ges. Wien*, **28**, 113–135.
- Simony, F., 1886: Neuerlicher Rückgang der Dachstein-Gletscher. *Mitt. d. D. und Ö.A.V.*, **12**, 296–298.
- Simony, F., 1891: Das Schwinden des Karls-Eisfeldes nach fünfzigjährigen Beobachtungen und Aufnahmen. *Mitt. d. D. u. Ö.A.V.*, **7 (17)**, 43–48.
- Simony, F., 1895: *Das Dachsteingebiet*. Verlag Ed. Hölzl, 152 S.
- Span, N., A. Fischer, M. Kuhn, M. Massimo, und M. Butschek, 2005: *Radarmessungen der Eisdicke Österreichischer Gletscher. Band 1: Messungen 1995 bis 1998.*, Volume 33. Österreich. Beitr. Meteorol. Geophys., 145 S.
- Steinacker, R., 1979: Rückrechnung des Massenhaushaltes des Hintereisferners mit Hilfe von Klimadaten. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **15 (1)**, 101–104.
- Wannenmacher, R., 1948-1986: Die Gletscher der österreichischen Alpen 1947/48 – 1985/86. *Mitt. d. Ö.A.V.*
- Wehr, A., und U. Lohr, 1999: Airborne laser scanning - an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **54**, 68–82.
- Würländer, R., und K. Eder, 1998: Leistungsfähigkeit aktueller photogrammetrischer Auswertemethoden zum Aufbau eines digitalen Gletscherkatasters. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **34 (2)**, 167–185.
- Wu, T., und R. King, 1965: The cylindrical antenna with non-reflecting resistive loading. *IEEE Trans. Antennas Propag. AP-*.

Yilmaz, O., 1987: *Seismic Data Processing*. Society of Exploration Geophysicists, P.O. Box 702740, Tulsa.

Zemp, M., F. Paul, M. Hoelzle, und W. Haeberli, 2006: *Glacier Fluctuations in the European Alps 1850–2000, an overview and spatiotemporal analysis of available data.*, Volume Univ. Calif. Press of *The Darkening Peaks: Glacial Retreat in Scientific and Social Context*.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Topographische Übersicht Österreichs (Hydrologischer Atlas, 2003). Der Ausschnitt zeigt das Dachsteinmassiv mit umliegender Topographie, Fließgewässern und Ortsnamen.	6
2.2	Darstellung des Hallstätter Gletschers aus der Karte des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen 2003 mit Gletscherstand 1991.	7
2.3	Flächen-Höhenverteilung des Hallstätter Gletschers nach Digitalem Geländemodell 2007 (Land Oberösterreich).	8
2.4	Mittlere Jahresniederschlagsmenge in mm (Hydrologischer Atlas 2003). Im Ausschnitt rot markiert die Lage des Hallstätter Gletschers.	9
3.1	Darstellung der Massenbilanzgrößen nach Paterson (1994).	14
3.2	Darstellung des Messnetzes am Hallstätter Gletscher im September 2008 mit den Pegelpositionen DP und den Schachtpositionen DS auf der Gletscherausdehnung von 2007	18
3.3	Webcamaufnahmen des Hallstätter Gletschers v.l.n.r. am 27.03., 28.05. und 16.08.2007.	20
3.4	Webcamaufnahmen des Hallstätter Gletschers von der ersten Ausaperung bis zum Datum der maximalen Ablation. v.l.n.r. am 10.06., 01.07., 01.08. und 12.09.2008.	20
3.5	Aufnahme der Ausaperung der Dachsteingletscher aus einem Flugzeug am 11. September 2008.	20
3.6	Winterbilanz des Hallstätter Gletschers für die Akkumulationsperiode 1.10.2006 - 30.04.2007. Farblich abgestuft sind die Isoflächen des Wasserwertes in 50-cm-Intervallen. Die Höhenschichtlinien nach dem digitalen Geländemodell 2007 sind im 50-m-Intervall dargestellt.	23

3.7	Jahresbilanz des Hallstätter Gletschers für das hydrologische Jahr 1.10.2006 - 30.09.2007. Farblich abgestuft sind die Isoflächen des Wasserwertes in 50-cm-Intervallen im Ablationsgebiet und 25cm-Intervallen im Akkumulationsgebiet. Die Nulllinie ist rot gekennzeichnet. Die Höhengschichtlinien nach dem digitalen Geländemodell 2007 sind im 50-m-Intervall dargestellt.	24
3.8	Nettobilanz und Fläche der Höhenstufen für das hydrologische Jahr 1.10.2006 - 30.09.2007.	25
3.9	Mittlere spezifische Bilanz der Höhenstufen für das hydrologische Jahr 1.10.2006 - 30.09.2007.	25
3.10	Jahresbilanz des Hallstätter Gletschers für das hydrologische Jahr 1.10.2007 - 30.09.2008. Farblich abgestuft sind die Isoflächen des Wasserwertes in 50-cm-Intervallen im Ablationsgebiet und 25cm-Intervallen im Akkumulationsgebiet. Die Nulllinie ist rot gekennzeichnet. Die Höhengschichtlinien nach dem digitalen Geländemodell 2007 sind im 50-m-Intervall dargestellt.	28
3.11	Winterbilanz des Hallstätter Gletschers für die Akkumulationsperiode 1.10.2007 - 30.04.2008. Farblich abgestuft sind die Isoflächen des Wasserwertes in 50-cm-Intervallen. Die Höhengschichtlinien nach dem digitalen Geländemodell 2007 sind im 50-m-Intervall dargestellt.	29
3.12	Nettobilanz und Fläche der Höhenstufen für das hydrologische Jahr 1.10.2006 - 30.09.2007.	30
3.13	Mittlere spezifische Bilanz der Höhenstufen für das hydrologische Jahr 1.10.2006 - 30.09.2007.	30
3.14	Vergleich der mittleren spezifischen Bilanzen der Höhenstufen für die Haushaltsjahre 2006/2007 und 2007/2008.	32
4.1	Das Karlseisfeld im Oktober 1840 von Simony nach der Natur gezeichnet. Aus: Simony (1895).	34
4.2	Das Karlseisfeld im September 1884 mit Skizze des Hochstandes 1856. Aus: Simony (1885).	35
4.3	Zwei Photographien des Karlseisfeldes vom gleichem Standpunkt. 1867 aufgenommen von A. Eissenwenger; 1900 von F. Pichler. Deutlich ist der Verlust der Eismassen im oberen Taubenkar innerhalb dieser 33 Jahre erkennbar. Aus: Böhm (1903).	35

4.4	Die im Kar südöstlich der Simonyhütte gelegene Moräne des Gletscherhochstands 1856 (schwarze Linie) aufgenommen am 14.01.2009. Obwohl die mächtigste Eisdicke hier bereits um 1843 erreicht wurde, blieb die Fläche in den darauffolgenden Jahren annähernd gleich und die Moräne wurde entsprechend hoch aufgeschüttet.	36
4.5	Orthophoto auf Höhenmodell des Dachsteinmassivs aus Luftbildaufnahmen 2002. In Bildmitte der Hallstätter Gletscher. Blick von Nord nach Süd.	39
4.6	Gemessene (rote Balken) und kumulierte Längenänderung (blaue Fläche) des Hallstätter Gletschers auf Grundlage der Längenänderungsmessungen an der Zunge.	42
4.7	Die Gletscherstände des Hallstätter Gletschers von 1856 bis 2007 dargestellt auf dem beleuchteten Relief des DGM 2002.	43
4.8	Zeitlicher Verlauf der Fläche des Hallstätter Gletschers.	44
4.9	Flächen-Höhen-Verteilung des Hallstätter Gletschers in den Jahren der Kartierung. Links die Absolutwerte der Flächen in den Höhenstufen. Rechts der prozentuale Anteil gegenüber der Fläche von 1856.	46
4.10	Laufzeitunterschied des direkten und des reflektierten Signals.	48
4.11	Korrektur des Reflexionspunktes und somit der Eistiefe durch Migration am Beispiel des Profils Q9 am Hintereisferner. Aus: Span et al. (2005).	49
4.12	Bei GPR-Messungen auf dem Hallstätter Gletscher am 14.01.2009.	49
4.13	GPR-Messungspunkte (gelb) mit Eisdicke in Meter am Hallstätter Gletscher, 14.01.2009. Rot eingezeichnet der Gletscherrand von 2007.	51
4.14	Eisdicke des Hallstätter Gletschers 2009.	53
4.15	Untergrund des Hallstätter Gletschers aus digitalem Höhenmodell 2007 und Radarmessungen 2009. Die Gletschergrenze 2007 ist als rote Linie dargestellt.	54
4.16	Beleuchtetes Höhenmodell der Gletscheroberfläche 1856 auf Orthophoto 2002.	56
4.17	Eisdicke des Hallstätter Gletschers 1856.	56
4.18	Beleuchtetes Höhenmodell der Gletscheroberfläche 1899 auf Orthophoto 2002.	57
4.19	Eisdicke des Hallstätter Gletschers 1899.	57
4.20	Beleuchtetes Höhenmodell der Gletscheroberfläche 1915 auf Orthophoto 2002.	58
4.21	Eisdicke des Hallstätter Gletschers 1915.	58
4.22	Beleuchtetes Höhenmodell der Gletscheroberfläche 1958 auf Orthophoto 2002.	59
4.23	Eisdicke des Hallstätter Gletschers 1958.	59

4.24	Beleuchtetes Höhenmodell der Gletscheroberfläche 1969 auf Orthophoto 2002.	60
4.25	Eisdicke des Hallstätter Gletschers 1969.	60
4.26	Beleuchtetes Höhenmodell der Gletscheroberfläche 2002 auf Orthophoto 2002.	61
4.27	Eisdicke des Hallstätter Gletschers 2002.	61
4.28	Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 1856 bis 1899 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 1856. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 1899.	63
4.29	Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 1899 bis 1915 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 1899. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 1915.	64
4.30	Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 1915 bis 1958 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 1915. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 1958.	64
4.31	Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 1958 bis 1969 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 1958. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 1969.	65
4.32	Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 1969 bis 2002 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 1969. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 2002.	65
4.33	Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 2002 bis 2006 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 2002. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 2007.	66
4.34	Änderung der Eisdicke im Zeitraum von 1856 bis 2007 auf Grundlage der Gletscherausdehnung von 1856. Als schwarze Linie eingezeichnet der Gletscherstand 2007.	66
4.35	Zeitlicher Verlauf des Volumens des Hallstätter Gletschers.	68
5.1	Lage von Wetterstation und Niederschlagsmessung im Vorfeld des Hallstätter Gletschers in Orthophoto 2002 mit Gletschergrenze 2007.	72
5.2	Ablesung des Niederschlagsmessers unterhalb der mittleren Gletscherausdehnung. Im Hintergrund der Hallstätter Gletscher mit dem Hohen Dachstein (2996 m).	74
5.3	Monatliche Niederschlagssummen der hydrologischen Jahre 2007 und 2008 am Totalisator nahe dem Hallstätter Gletscher.	75

5.4	Lage der Datenpunkte des HISTALP-Datensatzes dargestellt in Google Earth. Die roten Punkte zeigen die 1°Gitternetzpunkte des Datensatzes der Temperaturanomalien. In grün die Positionen der verwendeten Stationsdaten. Gelb eingezeichnet die Grenze von Österreich.	77
5.5	Vergleich der <i>high</i> und <i>low elevation</i> Anomalien der Jahresmitteltemperatur gegenüber dem Mittel von 1900 bis 2001 der dem Hallstätter Gletscher naheliegendsten Gitterpunkte des HISTALP-Datensatzes. In der Legende sind die Koordinaten der jeweiligen Punkte angeführt.	78
5.6	Monatsmitteltemperaturen der Stationen Bad Ischl (512 m), Feuerkogel (1618 m) und Simonyhütte (2210 m) für das Jahr 2008.	79
5.7	Monatliche Temperaturdifferenz von der Station Feuerkogel auf Höhe der Station Simonyhütte für das Jahr 2008.	80
5.8	Rekonstruierte Jahresmitteltemperatur an der Station Simonyhütte von 1851 bis 2008 dargestellt als blaue Linie. Rot gezeichnet das gleitende Mittel über 30 Jahre.	82
5.9	Rekonstruierte Jahresniederschläge im Bereich des Totalisators Hallstätter Gletscher für den Zeitraum 1858 bis 2008. Als rote Linie dargestellt das gleitende Mittel über 30 Jahre.	83
5.10	Monatsmitteltemperaturen der Massenhaushaltsjahre 2006/2007 und 2007/2008 und das Mittel der rekonstruierten Temperaturen über die WMO-Periode 1961 - 1990.	85
5.11	Gemessene Monatsniederschläge der Massenhaushaltsjahre 2006/2007 und 2007/2008 und das Mittel der rekonstruierten Niederschlagswerte über die WMO-Periode 1961 - 1990.	85
5.12	Abweichung der jährlichen Niederschlagssummen sowie Jahresdurchschnittstemperaturen im Bereich Hallstätter Gletscher vom Mittel 1961-1990. Oben Jahreswerte. Unten 30-jährige Glättung.	87
5.13	Abweichung des Niederschlags des Winterhalbjahres (ONDJFMA) und Durchschnittstemperatur des Sommerhalbjahres (MJJAS) vom Mittel 1961-1990 im Bereich Hallstätter Gletscher	87
7.1	Eisdicken der nach Summierung der Höhenänderung noch bestehenden Gletscherflächen. Zum Vergleich die Eisdicke 2007. Als rote Linie der Gletscherrand 2007.	97
A.1	Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 1 korrigiert auf den 1.05.2007.	120
A.2	Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 2 korrigiert auf den 1.05.2007.	120

A.3	Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 3 korrigiert auf den 1.05.2007.	121
A.4	Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 4 korrigiert auf den 1.05.2007.	121
A.5	Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 1 korrigiert auf den 30.09.2007.	122
A.6	Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 2 korrigiert auf den 30.09.2007.	122
A.7	Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 3 korrigiert auf den 30.09.2007.	123
A.8	Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 4 korrigiert auf den 30.09.2007.	123
A.9	Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 2 korrigiert auf den 1.05.2008.	124
A.10	Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 1 korrigiert auf den 30.09.2008.	124
A.11	Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 2 korrigiert auf den 30.09.2008.	125
A.12	Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 3 korrigiert auf den 30.09.2008.	125
A.13	Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 4 korrigiert auf den 30.09.2008.	126
A.14	Verlauf der Eisablation 2007 an den Ablationspegeln auf dem Hallstätter Gletscher.	127
A.15	Verlauf der Eisablation 2008 an den Ablationspegeln auf dem Hallstätter Gletscher.	128

Tabellenverzeichnis

3.1	Flächen- und Höhenverteilung der Winterbilanz 2006/2007.	21
3.2	Flächen- und Höhenverteilung der Jahresbilanz 2006/2007.	21
3.3	Kennzahlen der Massenbilanz 2006/2007.	22
3.4	Vergleich der Massenbilanzgrößen von Hallstätter Gletscher, Hintereisferner, Kesselwandferner und Jamtalferner für das Haushaltsjahr 2006/2007.	22
3.5	Flächen- und Höhenverteilung der Winterbilanz 2007/2008.	26
3.6	Flächen- und Höhenverteilung der Jahresbilanz 2007/2008.	26
3.7	Kennzahlen der Massenbilanz 2007/2008.	27
3.8	Vergleich der Massenbilanzgrößen von Hallstätter Gletscher, Hintereisferner, Kesselwandferner und Jamtalferner für das Haushaltsjahr 2007/2008.	27
4.1	Länge und deren Änderung des Hallstätter Gletschers ermittelt aus direkter Distanz vom höchsten zum niedrigsten Punkt.	41
4.2	Fläche und deren Änderung des Hallstätter Gletschers. Von oben nach unten die Gesamtfläche A , die Flächenänderung zum vorhergehenden Gletscherstand ΔA , die mittlere jährliche Flächenänderung in diesem Zeitraum $\frac{\Delta A}{a}$ sowie die aufsummierte Flächenänderung seit 1856 $\sum \Delta A$. . .	44
4.3	Fläche der 50-m-Höhenstufen um den angegebenen Zentralwert in m^2 zu den jeweiligen Gletscherständen.	45
4.4	Maximale Eisdicke (h_{MAX}) und mittlere Eisdicke (h_{MEAN}) der jeweiligen Gletscherstände.	55
4.5	Mittlere Eisdickenänderung Δh und die mittlere Eisdickenänderung pro Jahr Δh_{Jahr} der Perioden zwischen den Gletscherständen.	63
4.6	Volumen V , der prozentuale Anteil vom Volumen 1856 % V_{1856} der Gletscherstände sowie die Volumsänderung ΔV und die jährliche Volumsänderung ΔV_{Jahr} der Perioden zwischen den Gletscherständen.	67
4.7	Angenommene Unsicherheiten der Ausdehnung $u_{x,y}$ und der Höhe u_z der jeweiligen Gletscheroberfläche sowie daraus berechnete Unsicherheiten der Fläche u_A , der Eisdicke u_h und des Volumens u_V	69

5.1	Monats- und Jahresmitteltemperatur an der Wetterstation Simonyhütte für das Jahr 2008.	73
5.2	Monatliche Niederschlagssummen der hydrologischen Jahre 2007 und 2008 am Totalisator nahe dem Hallstätter Gletscher.	75
5.3	Temperaturdifferenz ΔT und Temperaturgradient γ zwischen den Stationen Feuerkogel (1618m) und Simonyhütte (2210m) für das Jahr 2008. . .	80
5.4	Mittlere Monats- sowie Jahresmitteltemperatur an der Station Feuerkogel für den Zeitraum von 1930 bis 2007 aus HISTALP-Daten.	81
5.5	Statistik der Differenz aus Temperaturanomalien des HISTALP-Datensatzes und den berechneten Anomalien des Feuerkogels. Zu sehen ist das Maximum Max , das Minimum Min , die Standardabweichung σ und das Bestimmtheitsmaß r^2 der einzelnen Monate sowie des Jahres für den Zeitraum von 1930 bis 2007.	81
5.6	Parameter p und q der linearen Regression zwischen den Temperaturanomalien des HISTALP-Datensatzes und den berechneten des Feuerkogels in monatlicher Auflösung.	81
5.7	Statistik der Differenz aus berechneten Monatsmitteltemperaturen aus Histalp-Daten und der Station Feuerkogel. Zu sehen das Maximum Max , das Minimum Min , die Standardabweichung σ sowie das Bestimmtheitsmaß r^2 der einzelnen Monate sowie des Jahres für den Zeitraum von 1930 bis 2007.	83
5.8	Vergleich der mit der Regression berechneten zu den am Totalisator gemessenen Niederschlagssummen. Die Werte verstehen sich in mm.	84
5.9	Vergleich der Monatsmittel- und Jahrestemperaturen der Station Simonyhütte mit den Mittelwerten von 1961 - 1990.	84
5.10	Vergleich der am Totalisator gemessenen Niederschlagssummen mit den Mittelwerten von 1961 - 1990.	86
5.11	Durchschnittliche Jahresmitteltemperatur T_{Jahr} , Sommertemperatur T_{Sommer} , Jahres- (N_{Jahr}) sowie Winterniederschlagsmenge N_{Winter} der einzelnen Perioden zwischen den jeweiligen Gletscherständen bezogen auf den Punkt Simonyhütte (2210m).	88
6.1	Über die Perioden kumulierte Volumsverluste berechnet nach den einzelnen Modellen gegenüber dem aus den Höhenmodellen hergeleiteten ΔV in m^3 Eis.	93
7.1	Maximale h_{MAX} und mittlere Eisdicke h_{MEAN} sowie Fläche A , Volumen V und deren prozentuale Relation für die Szenarien gegenüber dem Gletscherstand von 2007.	96

A.1	Koordinaten (Gauß-Krüger-Abbildung M31) und Ablationswerte der Pegel am Hallstätter Gletscher 2006/2007 und 2007/2008.	119
A.2	Koordinaten (Gauß-Krüger-Abbildung M31) und Akkumulationswerte der Schachtpositionen am Hallstätter Gletscher (korrigierte Daten auf jeweils den 1.5. und 30.09.).	119
A.3	Mittlere Eisdickenverluste Δh in den Perioden.	129
A.4	Volumsverluste $\Delta V(m^3)$ in den Perioden.	129
A.5	Rekonstruierte Monats- und Jahresmitteltemperaturen an der Station Simonyhütte 1851 bis 1880 in °C.	130
A.6	Rekonstruierte Monats- und Jahresmitteltemperaturen an der Station Simonyhütte 1881 bis 1930 in °C.	131
A.7	Rekonstruierte Monats- und Jahresmitteltemperaturen an der Station Simonyhütte 1931 bis 1980 in °C.	132
A.8	Rekonstruierte Monats- und Jahresmitteltemperaturen der Station Simonyhütte 1981 bis 2008 in °C.	133
A.9	Rekonstruierte Monats- und Jahresniederschlagssummen im Bereich des Totalisators am Hallstätter Gletscher für den Zeitraum 1858 - 1908. . . .	134
A.10	Rekonstruierte Monats- und Jahresniederschlagssummen im Bereich des Totalisators am Hallstätter Gletscher für den Zeitraum 1909 - 1958. . . .	135
A.11	Rekonstruierte Monats- und Jahresniederschlagssummen im Bereich des Totalisators am Hallstätter Gletscher für den Zeitraum 1959 - 2008. . . .	136

Anhang A

Anhang

Pegel	Koordinaten (GK M31)			Ablation (cm we)	
	Hochwert	Rechtswert	Höhe	2006/2007	2007/2008
DP20	5261632	21295	2338	-335	-334
DP21	5261081	21638	2208	-463	-435
DP22	5260794	21997	2208	-379	-327
DP24	5261361	21402	2316	-309	-389
DP25	5260877	21488	2301	-232	-346
DP27	5261221	21194	2391	-235	-148
DP29	5260571	21983	2363	-239	-263
DP30	5260430	21722	2452	-86	-96
DP31	5260204	21923	2469	-185	-156
DP32	5261356	21063	2426		-159
DP33	5259953	21872	2425	-148	-115
DP34	5260216	21590	2508	-151	-222
DP36	5260340	21387	2386		-98
DP37	5260502	21932	2405		-278
DP38	5259856	21946	2436		-90

Tabelle A.1: Koordinaten (Gauß-Krüger-Abbildung M31) und Ablationswerte der Pegel am Hallstätter Gletscher 2006/2007 und 2007/2008.

Schacht	Koordinaten [GK M31]			Akkumulation [mm we]			
	Hochwert	Rechtswert	Höhe	05/2007	09/2007	05/2008	09/2008
DS1	5259680	21464	2625	2521	1284		1420
DS2	5259884	21144	2719	1937	1576	2633	393
DS3	5260533	20641	2629	2632	1165		331
DS4	5261234	20815	2474	3432	1470		412

Tabelle A.2: Koordinaten (Gauß-Krüger-Abbildung M31) und Akkumulationswerte der Schachtpositionen am Hallstätter Gletscher (korrigierte Daten auf jeweils den 1.5. und 30.09.).

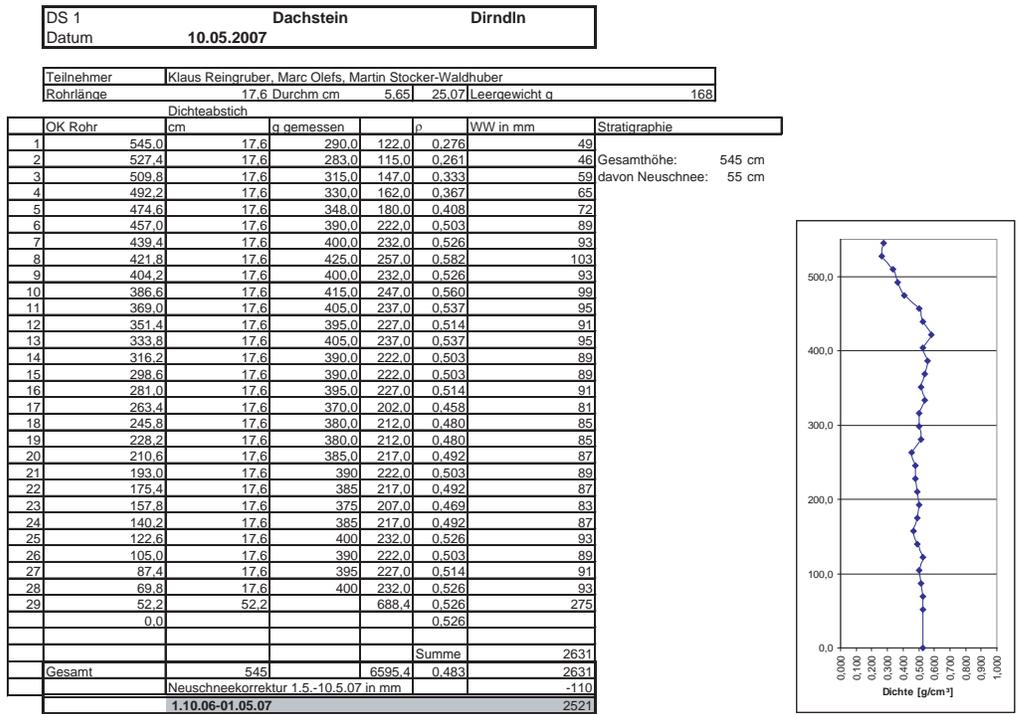


Abbildung A.1: Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 1 korrigiert auf den 1.05.2007.

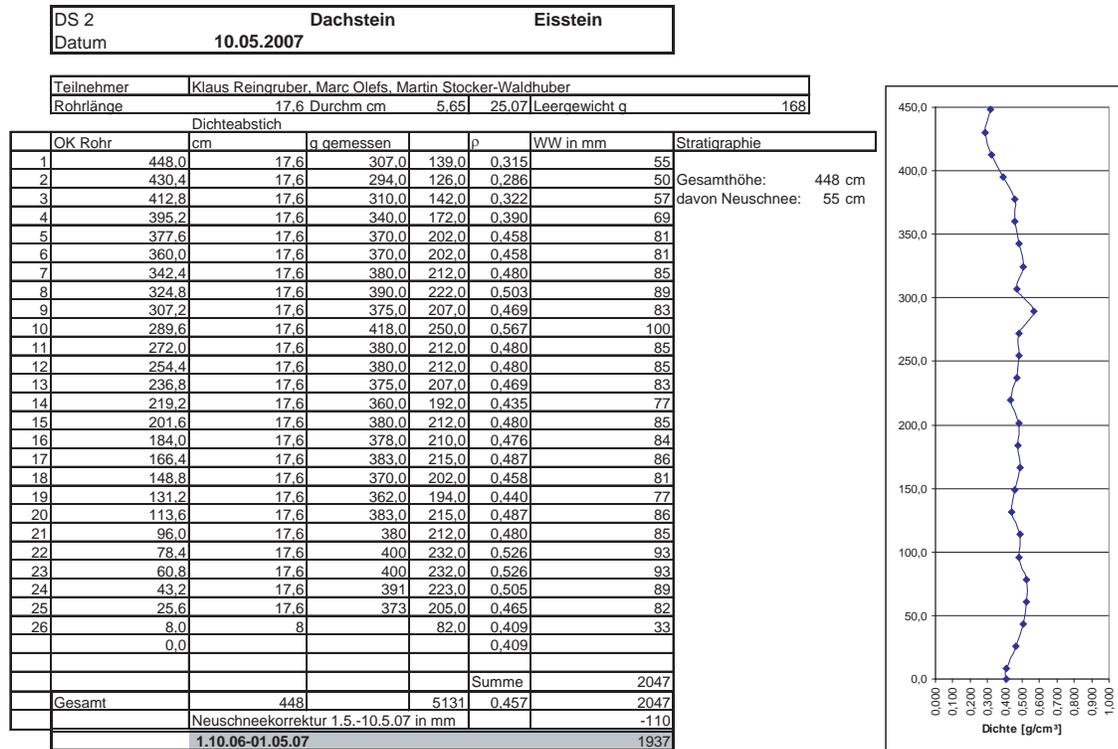


Abbildung A.2: Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 2 korrigiert auf den 1.05.2007.

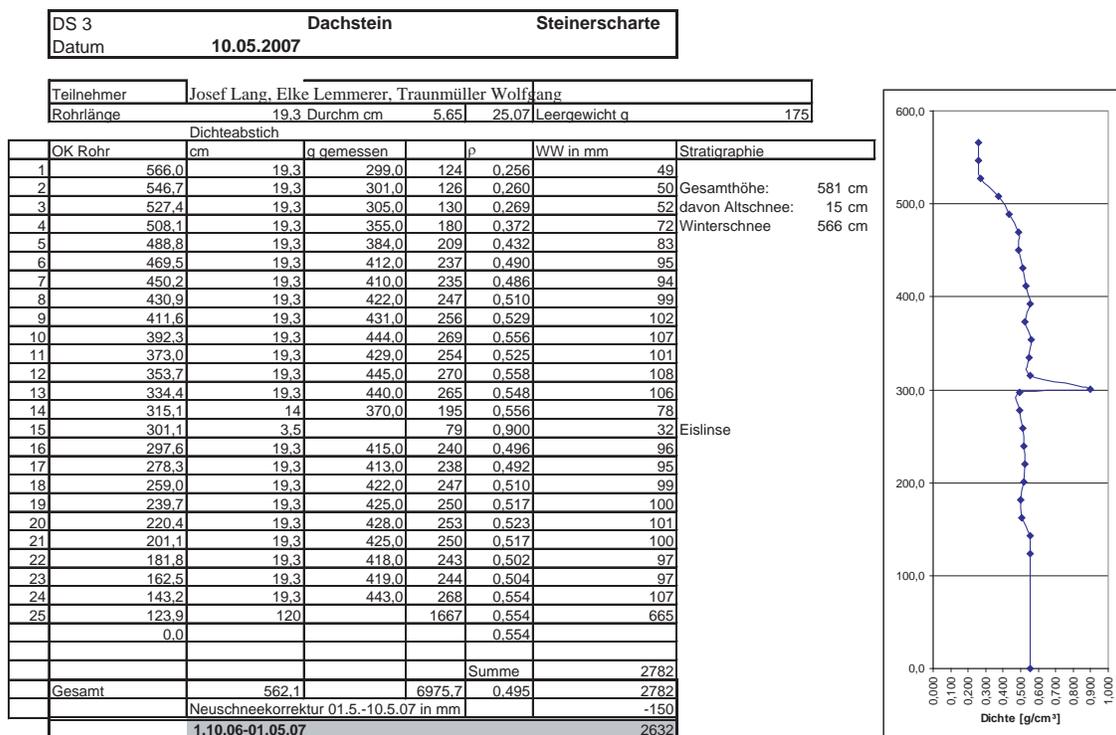


Abbildung A.3: Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 3 korrigiert auf den 1.05.2007.

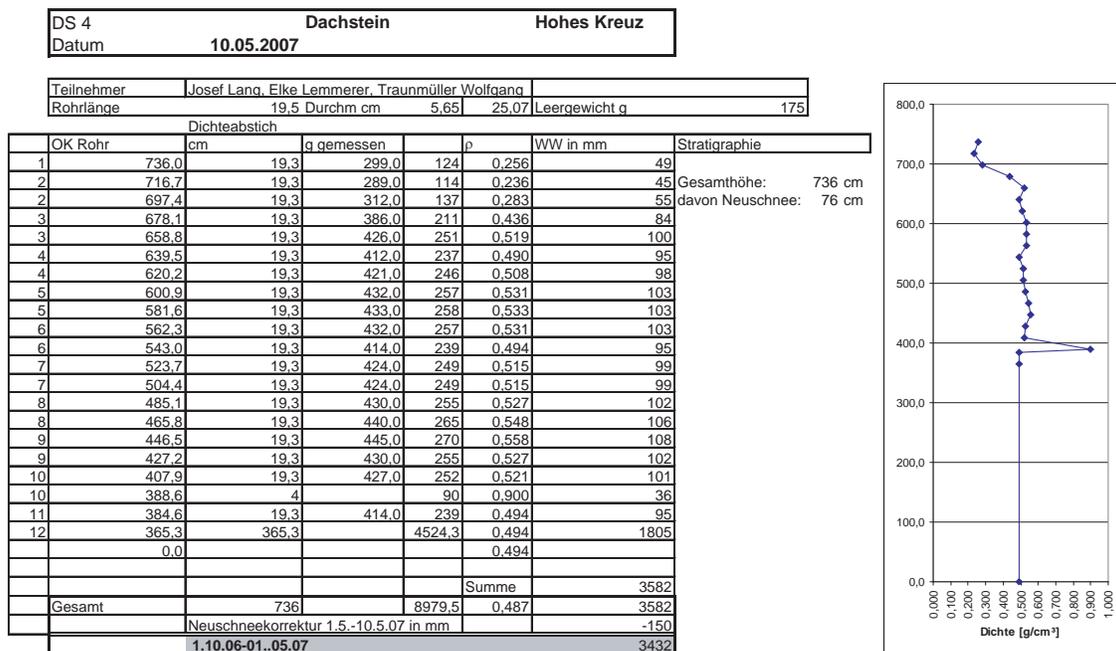


Abbildung A.4: Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 4 korrigiert auf den 1.05.2007.

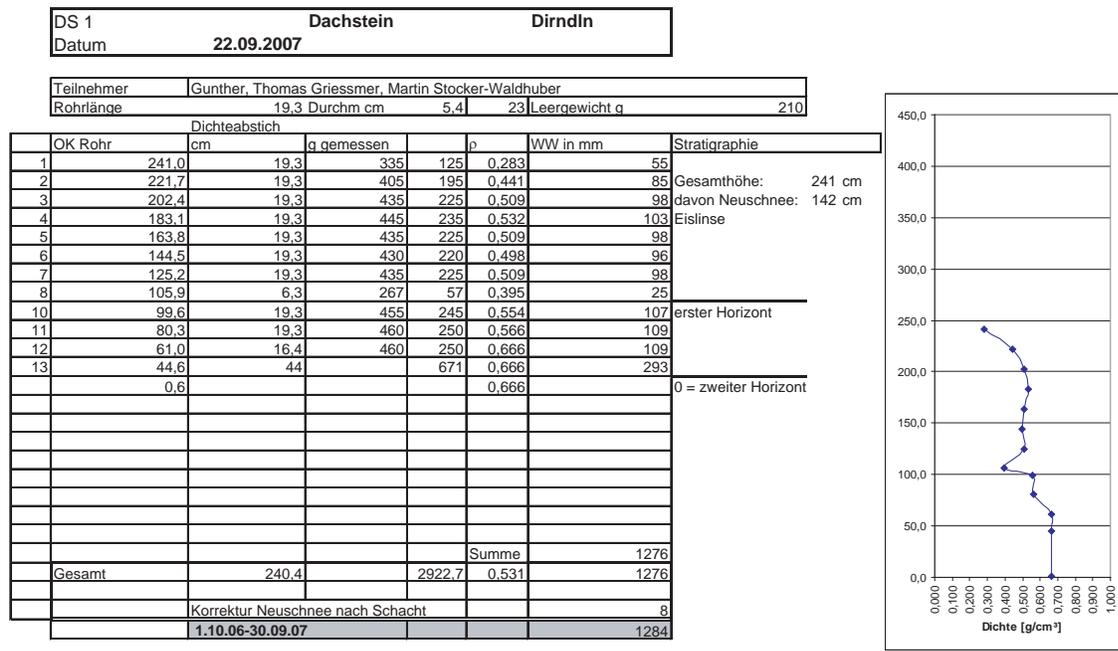


Abbildung A.5: Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofiles des Schachtes DS 1 korrigiert auf den 30.09.2007.

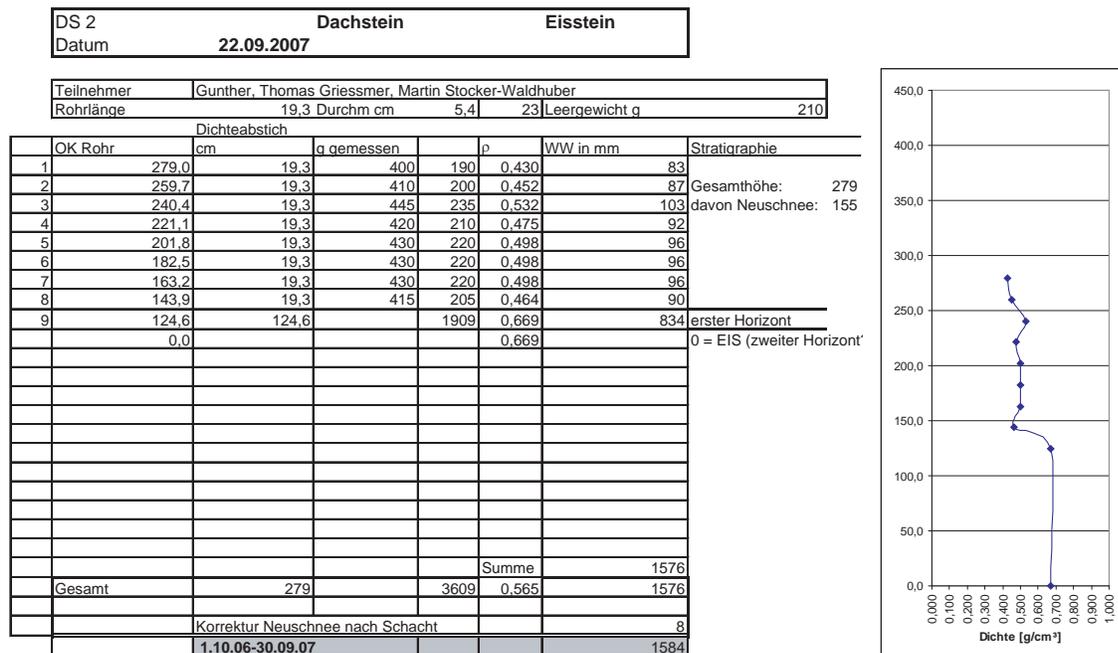


Abbildung A.6: Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofiles des Schachtes DS 2 korrigiert auf den 30.09.2007.

DS 3		Dachstein		Steinerscharte		
Datum		22.09.2007				
Teilnehmer		Klaus Reingruber, Andrea Fischer, Konrad Meindl				
Rohrlänge		19,5 Durchm cm		25 Leergewicht g		
Dichteabstich						
OK Rohr	cm	g gemessen	ρ	WW in mm	Stratigraphie	
1	310,0	19,5	183	145	0,297	58
2	290,5	19,5	252	214	0,438	85
3	271,0	19,5	294	256	0,524	102
4	251,5	13	197	159	0,488	63
5	238,5	2			0,900	2
6	236,5	15,5	227	189	0,486	75
7	221,0	16	226	188	0,469	75
8	205,0	19,5	287	249	0,509	99
9	185,5	19,5	292	254	0,520	101
10	166,0	19,5	284	246	0,503	98
11	146,5	7	158	120	0,684	48
12	139,5	14	244	206	0,587	82
13	125,5	14	246	208	0,593	83
14	111,5	16	254	216	0,538	86
15	95,5	17	288	250	0,587	100
	78,5				0,587	
				Summe		1159
Gesamt		231,5	2900	0,500		1157
Korrektur Neuschnee nach Schacht						8
1.10.06-30.09.07						1165

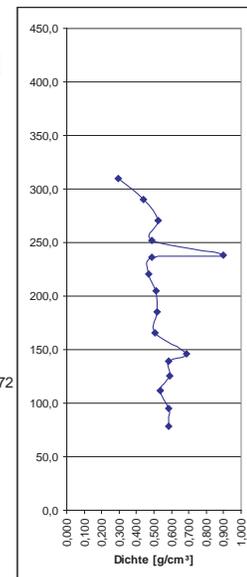


Abbildung A.7: Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 3 korrigiert auf den 30.09.2007.

DS 4		Dachstein		Hohes Kreuz		
Datum		22.09.2007				
Teilnehmer		Klaus Reingruber, Andrea Fischer, Konrad Meindl				
Rohrlänge		19,5 Durchm cm		25 Leergewicht g		
Dichteabstich						
OK Rohr	cm	g gemessen	ρ	WW in mm	Stratigraphie	
1	414,0	19,5	198	160	0,327	64
2	394,5	19,5	249	211	0,432	84
3	375,0	19,5	259	221	0,452	88
4	355,5	19,5	284	246	0,503	98
5	336,0	19,5	254	216	0,442	9
6	316,5	19,5	236	198	0,405	79
7	297,0	19,5	243	205	0,419	82
8	277,5	19,5	246	208	0,425	83
9	258,0	15	212	174	0,463	69
10	243,0	19,5	267	229	0,468	91
11	223,5	6	115	77	0,512	31
12	217,5	12	207	169	0,562	67
13	205,5	96,0		1353	0,562	540
	109,5				0,562	
				Summe		1385
Gesamt		304,5	3666,6	0,480		1462
Korrektur Neuschnee nach Schacht						8
1.10.06-30.09.07						1470

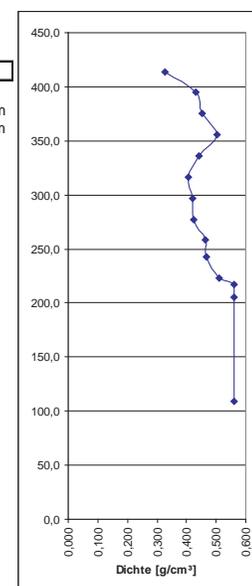


Abbildung A.8: Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofils des Schachtes DS 4 korrigiert auf den 30.09.2007.

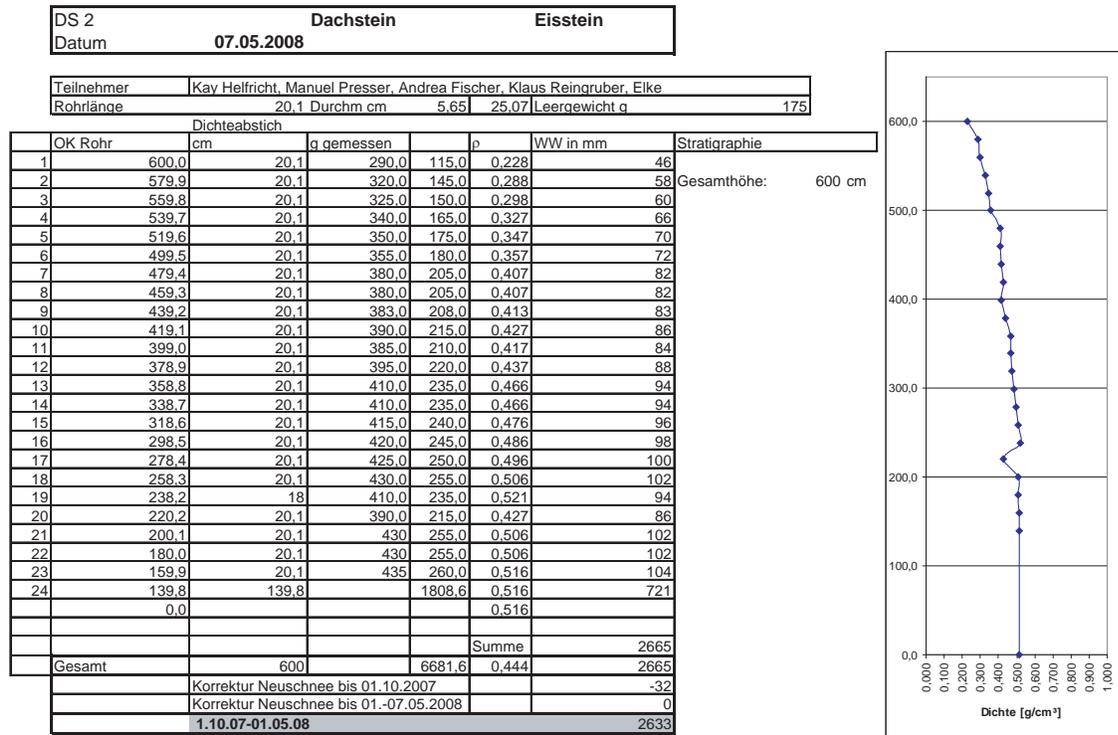


Abbildung A.9: Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofiles des Schachtes DS 2 korrigiert auf den 1.05.2008.

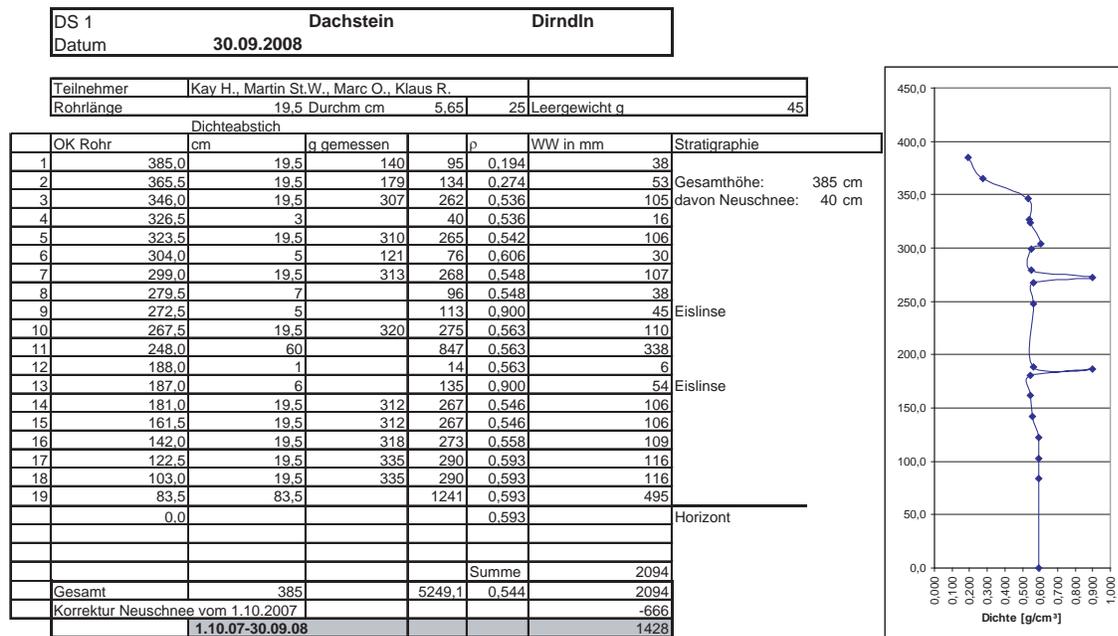


Abbildung A.10: Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofiles des Schachtes DS 1 korrigiert auf den 30.09.2008.

DS 2		Dachstein		Eisstein					
Datum		30.09.2008							
Teilnehmer		Klaus R., Roland, Marc O., Wolf T.							
Rohrlänge		17,5 Durchm cm		25 Leergewicht g					
Dichteabstich									
OK Rohr	cm	g gemessen	ρ	WW in mm	Stratigraphie				
1	224,0	17,5	240	95	0,217	38			
2	206,5	17,5	275	130	0,296	52			
3	189,0	17,5	315	170	0,387	68			
4	171,5	17,5	375	230	0,524	92			
5	154,0	17,5	390	245	0,558	98			
6	136,5	7		98	0,558	39			
7	129,5	8		181	0,900	72			
8	121,5	17,5	373	228	0,520	91			
9	104,0	17,5	380	235	0,536	94			
10	86,5	17,5	400	255	0,581	102			
11	69,0	17,5	400	255	0,581	102			
12	51,5	17,5	394	249	0,568	99			
13	34,0	17,5	400	255	0,581	102			
14	16,5	16,5		240	0,581	96			
	0,0				0,581				
					Horizont				
					Summe				
Gesamt		224		2865,784		0,510		1143	
Korrektur Neuschnee vom 1.10.2007								-750	
1.10.07-30.09.08								393	

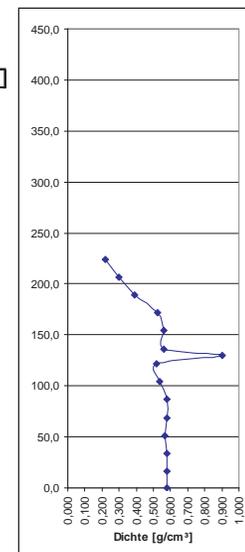


Abbildung A.11: Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofiles des Schachtes DS 2 korrigiert auf den 30.09.2008.

DS 3		Dachstein		Steinerscharte					
Datum		29.09.2008							
Teilnehmer		Marc O., Wolf T., Roland							
Rohrlänge		17,5 Durchm cm		25 Leergewicht g					
Dichteabstich									
OK Rohr	cm	g gemessen	ρ	WW in mm	Stratigraphie				
1	223,0	17,5	221	76	0,173	30			
2	205,5	17,5	254	109	0,248	43			
3	188,0	17,5	271	126	0,287	50			
4	170,5	17,5	375	230	0,524	92			
5	153,0	17,5	400	255	0,581	102			
6	135,5	17,5	397	252	0,574	101			
7	118,0	17,5	392	247	0,563	99			
8	100,5	3		42	0,563	17			
9	97,5	3		68	0,900	27			
10	94,5	17,5	393	248	0,565	99			
11	77,0	17,5	400	255	0,581	102			
12	59,5	17,5	391	246	0,561	98			
13	42,0	17,5	394	249	0,568	99			
14	24,5	17,5	395	250	0,587	103			
15	7,0	7		103	0,587	41			
	0,0				0,587				
					Horizont				
					Summe				
Gesamt		223		2756		0,493		1099	
Korrektur Neuschnee vom 1.10.2007								-768	
1.10.07-30.09.08								331	

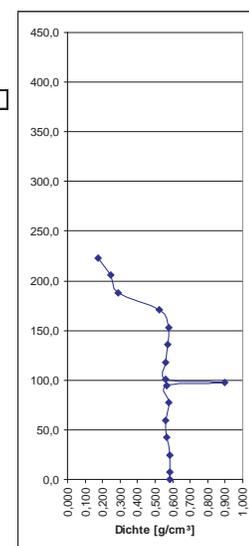


Abbildung A.12: Tabelle und Diagramm des Schneedichteprofiles des Schachtes DS 3 korrigiert auf den 30.09.2008.

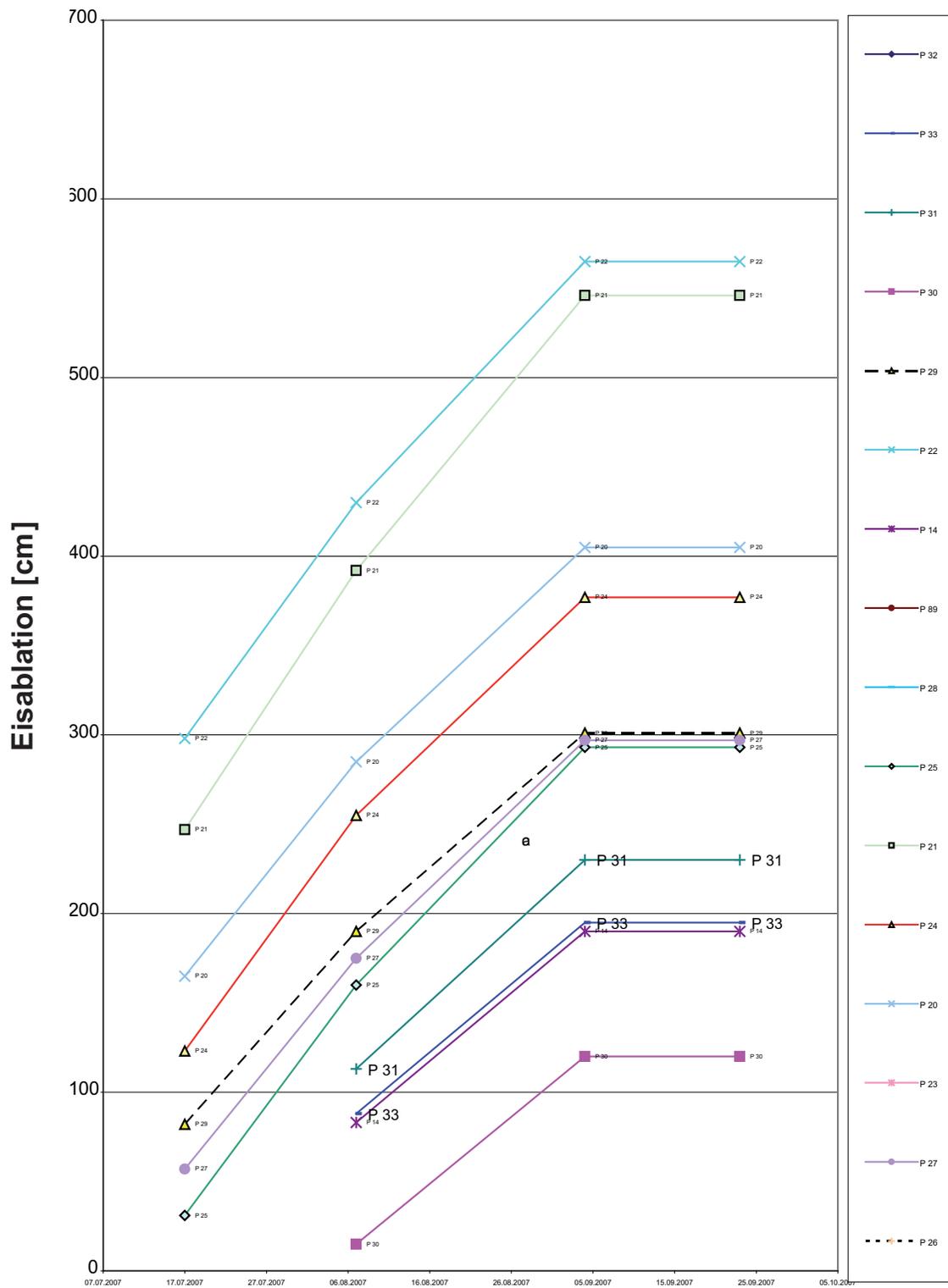


Abbildung A.14: Verlauf der Eisablation 2007 an den Ablationspegeln auf dem Hallstätter Gletscher.

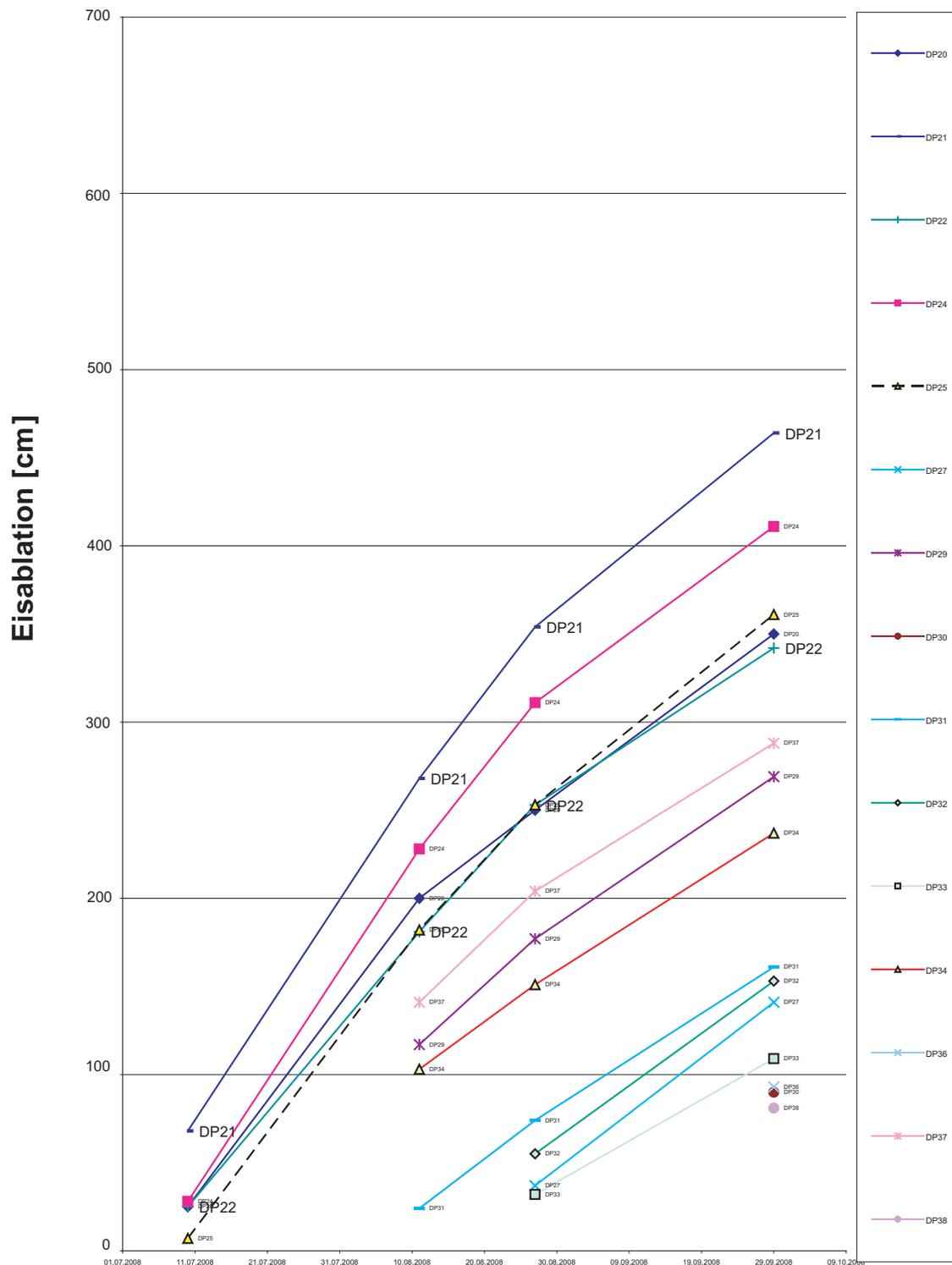


Abbildung A.15: Verlauf der Eisablation 2008 an den Ablationspegeln auf dem Hallstätter Gletscher.

$\Delta h(m)$	1856	1899	1915	1958	1969	2002
1856						
1899	-25,4					
1915	-30,5	-5,8				
1958	-38,2	-14,9	-9,6			
1969	-28,4	-14,5	-10,3	-3,0		
2002	-44,8	-22,4	-17,6	-9,5	-6,6	
2007	-47,4	-25,6	-21,0	-13,4	-10,8	-4,3

Tabelle A.3: Mittlere Eisdickenverluste Δh in den Perioden.

$\Delta V(m^3)$	1856	1899	1915	1958	1969	2002
1856						
1899	-133745769					
1915	-160502390	-25418235				
1958	-201018243	-64931948	-40624187			
1969	-149562703	-63057034	-43552393	-10510370		
2002	-236173921	-97519380	-74174919	-33459536	-22203524	
2007	-249717950	-111450590	-88378105	-47335659	-36009439	-13630750

Tabelle A.4: Volumsverluste $\Delta V(m^3)$ in den Perioden.

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1851	-8	-9,2	-9,3	-5	-5,7	4,9	4,9	5,1	-2,7	0,6	-11	-8,6	-3,5
1852	-5,9	-10,6	-11,7	-7	-0,4	3,5	4,9	4,9	0,8	-1,8	-0,1	-2,6	-2,1
1853	-6,8	-12,5	-9,7	-6,5	-0,2	1,9	8	7,4	4,4	0,3	-5,7	-10,1	-2,4
1854	-7,7	-13,7	-7,5	-1,1	1,6	3,4	6,7	5	5,5	1,4	-10,5	-8,2	-2
1855	-12,8	-7,7	-8,6	-4,9	-2,7	3	6,2	8,8	2,5	2,9	-5,9	-13,4	-2,7
1856	-5,7	-5,7	-7	-3,1	0	6,3	3,2	8,1	-0,3	3,1	-10,5	-8,1	-1,6
1857	-13,7	-8,8	-8,8	-6,5	0,3	2,6	7,3	7	4,9	2	-2,5	-5,4	-1,7
1858	-13,2	-13,3	-7,9	-2,1	0,1	4,9	5,4	5,6	5,4	2,6	-5,1	-9,1	-2,2
1859	-8,5	-9	-8,2	-4,2	0,6	3,8	10,8	9,9	2,8	2,3	-5,8	-8,8	-1,2
1860	-6,1	-12,8	-9,6	-6,6	0,8	4,2	2	5,3	3,7	1,3	-7,6	-9,9	-2,9
1861	-8,3	-6,8	-9,3	-6,6	0,7	3,4	6,5	10,5	3,9	2,1	-4,6	-6,3	-1,2
1862	-9,2	-7,5	-3,7	-1,5	2,6	3,8	5,9	5,7	3,7	1,7	-5,2	-7,6	-1
1863	-7,2	-6,7	-5,9	-3	1,8	3,7	4,6	6,9	2,9	2	-4,3	-6,1	-0,9
1864	-10,8	-8,4	-6,5	-7,4	-0,8	2,2	4	4	3,4	-3,2	-6	-6,9	-2,9
1865	-7,7	-13,7	-11,5	1,7	6,3	2,9	9,1	7,8	6,4	-0,2	-2,2	-5	-0,5
1866	-4,8	-5	-6,8	-1,8	-2,1	5,7	5	3,6	4,6	-0,1	-5,9	-3,9	-0,9
1867	-7,6	-5,9	-7,3	-4,4	1	4,6	4,2	6,7	4,7	-1,6	-5,3	-10,6	-1,7
1868	-10,9	-5,9	-9,8	-4,7	5	4,9	5,7	6,3	5,7	0,9	-5,6	-3,1	-1
1869	-10,7	-3,1	-9,8	-2,2	4	1,3	7,7	4,3	4,9	-2,8	-5,6	-7,6	-1,6
1870	-11,7	-9	-10,6	-5,7	2,9	4	7,4	3,6	1,8	-2,1	-3,9	-9,2	-2,7
1871	-11,4	-6,5	-6,1	-4,6	-1,8	0,1	6,2	5,8	4,2	-2,1	-7	-10	-2,7
1872	-8	-7,2	-6,3	-2,4	1,7	4,1	6,9	5,4	4,4	1,4	-2,6	-5	-0,6
1873	-5,6	-9,6	-5	-5,6	-2	2,2	7,4	8,3	3,4	2	-4,4	-5,2	-1,1
1874	-6,1	-10	-8,4	-2,2	-3,2	5	8,6	5,4	6	1,4	-8	-9,4	-1,7
1875	-6,6	-13,2	-9,4	-5	2,6	5,8	5,2	8	3,5	-1,1	-6,3	-9,1	-2,1
1876	-8	-6,7	-6,9	-3,3	-1,5	4,1	6,1	6,7	2,2	3,1	-6,7	-3,9	-1,1
1877	-6,1	-6,7	-8,5	-4,5	-1,6	6,4	5,8	9,2	1,6	-2,1	-3,1	-8,3	-1,4
1878	-9,4	-4,5	-8,8	-4,1	1,7	3,4	4,5	7,1	4,1	-0,4	-6,8	-10,7	-1,9
1879	-9,8	-7,6	-8,2	-5,7	-3,2	4,2	2,7	8,1	4,5	-1,1	-8,6	-11	-2,9
1880	-9,4	-5,8	-4,7	-1,7	0,5	2,5	7,3	4,2	3,8	0,4	-2,4	-4,6	-0,8

Tabelle A.5: Rekonstruierte Monats- und Jahresmitteltemperaturen an der Station Simonyhütte 1851 bis 1880 in °C.

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1881	-12,3	-7,5	-6,3	-5	-0,8	2,7	7,8	6,6	1,8	-4,7	0,2	-5,8	-1,9
1882	-3,3	-6,8	-3,5	-4,4	1,4	2,4	3,8	4,3	2,5	-0,6	-5,6	-6,4	-1,3
1883	-9,1	-7	-12,2	-5,9	-0,4	3,2	4,2	5,8	2,5	-1,2	-5,3	-9,5	-2,8
1884	-6,4	-6,6	-5,8	-4,1	2,2	-1,1	5,5	5,7	3,7	-4	-7,3	-6	-1,9
1885	-10,3	-4,7	-7,2	-3	-2,1	5	5,5	4,9	4,1	-2,8	-3,7	-7,9	-1,8
1886	-8,6	-8,9	-8,7	-2,4	0,9	2,2	5,7	6,3	6	2	-3,5	-7,8	-1,4
1887	-8,3	-10,4	-6,6	-5	-2,2	3,2	7,4	5,7	3,6	-5,4	-5,1	-10,4	-2,7
1888	-10,1	-10,6	-8,6	-5,5	0,7	4,5	3	5	4,6	-2,6	-3,1	-3,9	-2,2
1889	-9	-12,5	-10,1	-5,6	3,4	5,6	4,4	5	0,5	-0,2	-3,4	-8,7	-2,6
1890	-5,3	-10,9	-6,9	-5	1,4	1,8	4,7	7	1,8	-2,6	-6,5	-9,8	-2,4
1891	-12,5	-8,8	-7,6	-7,7	1,1	3,4	4,4	5,1	5,4	1,4	-5,1	-5,7	-2,2
1892	-9,1	-8,8	-9,8	-3,8	0,6	3,4	4,3	7,5	4,7	-1,1	-2,9	-8,5	-1,9
1893	-13,3	-7,8	-6,8	-2	-0,6	2,6	5,7	6,4	3,8	2,1	-5,4	-6	-1,7
1894	-8,1	-7,8	-6,8	-1,5	0,6	2	6,7	5,7	2,4	-0,8	-2,3	-9	-1,6
1895	-12,1	-13,7	-8,2	-3	-0,7	4,1	6,5	5,7	6,9	-1,1	-1	-7,4	-2
1896	-8,2	-6,1	-5,3	-7,4	-1,7	3,5	5,9	3,2	2,7	0,1	-6,1	-6,7	-2,1
1897	-8,8	-5,1	-5,4	-3,8	-2,2	5	5,9	6,5	3,9	-1,3	-2,2	-5,7	-1,1
1898	-3	-9,6	-6,4	-3,2	0,3	2,9	3,5	7,5	5,5	1,9	-0,9	-5,4	-0,5
1899	-5,7	-5,3	-6,7	-4	-0,6	2,9	4,9	6,2	2,7	2	-1,6	-8,6	-1,2
1900	-7,5	-6	-9,6	-5,9	0,2	4,3	7	4,8	5,9	0,7	-3,4	-3,9	-1,1
1901	-9,7	-13,8	-8,6	-3,8	0,1	4,1	5,6	5,6	4	0	-5,9	-6,3	-2,3
1902	-6,6	-6,9	-7,7	-2,1	-4,3	2	5,7	5,6	4,1	-1,1	-4,2	-7,1	-1,8
1903	-7	-5,2	-5,7	-8,2	0,5	2,7	4,3	6,5	4	0,5	-4,7	-6,8	-1,5
1904	-7,6	-8,4	-6	-2,9	1,9	5	7,9	6,5	1	-0,7	-5,7	-5,7	-1,2
1905	-11,6	-9,7	-6,4	-5,5	0,3	4,6	8,2	6,7	5,1	-7	-5,5	-5,4	-2,1
1906	-8,1	-9,9	-7,6	-4,5	0,7	2,6	5,7	6,5	1,5	1,9	-2,4	-11,4	-2,1
1907	-10,2	-10,8	-10,1	-6,3	1,7	4,4	3,8	7	4,8	2,3	-3,5	-6,5	-1,9
1908	-7	-9,6	-9,5	-7,5	3,3	5,6	4,9	4,3	2,2	1,4	-5,3	-6,7	-1,9
1909	-9,7	-13,1	-9,3	-3,3	-0,3	2,5	3,7	5,9	2,8	1	-7,2	-5,8	-2,7
1910	-8,3	-7,8	-6,9	-4,9	-0,6	3,9	3,5	5,4	1,4	0,9	-7,8	-4,6	-2,2
1911	-8,7	-9,2	-7,1	-5	0,5	3,2	7,4	7,8	5,3	0,7	-2,1	-5,4	-1
1912	-7,2	-5,1	-5,3	-6,8	0,9	4,1	5,4	3,6	-2,6	-1,5	-8,6	-3,4	-2,1
1913	-7,4	-9,4	-4	-4,6	0,3	3,5	1,8	4,2	2,7	2,3	-2,3	-7,2	-1,7
1914	-9,6	-4,1	-6,6	-2,2	-0,7	2,1	3,8	6,4	2,1	-1,3	-5,1	-5	-1,7
1915	-9,9	-9,2	-7,9	-4,6	3,3	5,5	4,9	4,2	1,7	-2,9	-7,4	-3,7	-2,2
1916	-5,2	-8,1	-4,4	-3,8	1,5	2,2	4,6	5,3	1,5	-0,3	-3,5	-5,4	-1,3
1917	-9,9	-9,6	-9	-7,8	3,4	6	5,6	6,3	6	-2	-4,9	-9,2	-2,1
1918	-6,1	-6,8	-6,7	-2,5	1,5	0,8	4,8	4,9	5,2	-1,8	-5,3	-4,9	-1,4
1919	-7,6	-9,1	-7,1	-6,6	-2,6	2,9	2,1	6,9	5	-4,5	-7	-7	-2,8
1920	-5,8	-4,9	-3,8	-2,3	4,2	3	6,4	4,5	3,8	1,1	-3,1	-4,7	-0,2
1921	-4,8	-8,2	-4,8	-5,5	2,6	2,9	7,7	7,1	5	3,4	-6	-6,4	-0,5
1922	-9,8	-7,6	-5,2	-5,5	1,8	4,3	5,1	7,1	1,9	-1,9	-7,3	-6,7	-2
1923	-9,2	-7,3	-6,1	-4	1,6	0	7,4	7,3	2,8	1,9	-3,9	-9,1	-1,5
1924	-9,4	-10,7	-7,4	-4	3,1	3,7	5,7	3,2	4,1	0,3	-3,2	-3,7	-1,5
1925	-4,2	-7,3	-10,2	-4,3	1	3,2	4,9	5,7	0,5	0,6	-4,8	-8	-1,9
1926	-8,8	-3,9	-6,7	-2,4	-0,9	1	4,4	5,9	5,5	0,7	-0,7	-7,3	-1,1
1927	-8	-8,8	-5,5	-4	1	4,9	6	6,5	3,9	0,7	-2,7	-6,9	-1,1
1928	-6,9	-7,4	-6,3	-3,1	-2,1	4	8,9	8,2	3,6	-0,1	-3,8	-8	-1,1
1929	-11,8	-13,1	-6	-7	2,3	4,6	6,9	7,6	5,8	0,7	-3,5	-5,9	-1,6
1930	-4,5	-8,8	-4,9	-2,9	0,4	7,9	5,1	5,7	1,7	-0,3	-2,6	-7	-0,9

Tabelle A.6: Rekonstruierte Monats- und Jahresmitteltemperaturen an der Station Simonyhütte 1881 bis 1930 in °C.

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1931	-9,5	-9,8	-9,3	-5,9	3,4	6,3	5,8	4,9	-1,4	-2	-2,6	-8,5	-2,4
1932	-4,5	-13,8	-9,2	-4,9	1	2,7	6,7	8,9	7,5	-0,8	-2,4	-2,6	-1
1933	-9,7	-10,2	-5,1	-5,6	-1,5	1,4	6,2	6,6	4,1	-0,2	-5,2	-9,7	-2,4
1934	-7,3	-7,9	-5,3	-0,3	3	4	7	6	5,6	-0,4	-3,5	-2,2	-0,1
1935	-12,6	-9,1	-8,5	-5,2	-0,5	6,4	6,1	6,5	4,8	-0,2	-2,8	-7	-1,9
1936	-4,8	-7,8	-3,4	-3,5	1,2	3,7	5,6	5,2	3,9	-5,2	-3	-4,6	-1,1
1937	-5,9	-6,8	-6,4	-5	3,6	5,7	5,6	5,7	4	1,8	-5,5	-9,3	-1,1
1938	-9,1	-7,5	-3,8	-9,1	-0,6	5,8	5,7	6,2	5	1	0,6	-7,6	-1,1
1939	-5,5	-5,1	-10,7	-0,7	-1,4	4,8	5,9	7,2	3	-1,7	-2,1	-8	-1,2
1940	-11,9	-7,9	-8,1	-3,7	-0,4	3,5	4,6	3,3	3,7	1,1	-3,3	-12	-2,6
1941	-9,4	-7,7	-6,3	-5,5	-2,5	4,3	6	4,9	2,5	-2,3	-4,1	-7,5	-2,3
1942	-14,4	-10,9	-3,9	-5,4	0,9	3,4	5	7,4	7,5	3,4	-6,1	-3,6	-1,4
1943	-7,5	-5,7	-3,8	-3	0,7	2	6,2	8,6	5,5	4	-6,2	-5,1	-0,4
1944	-6,7	-11,4	-12,2	-2,9	-0,4	2,5	5,4	10,1	3,7	-0,6	-5,6	-8,1	-2,2
1945	-13,1	-5,9	-5,6	-3,3	2,1	6,3	6,9	6,5	4	-0,3	-4,6	-6,4	-1,1
1946	-7,6	-8,1	-3,8	-0,2	4,1	4,1	7,5	6,9	6	-1,9	-3,6	-8,2	-0,4
1947	-11,9	-8,7	-4,1	-0,9	4	6	7,8	7,4	7,5	1,2	-3,7	-8,5	-0,3
1948	-5,3	-8,5	-3,4	-3	3,1	2,6	3,5	6,5	5,2	1,7	-2,1	-3,8	-0,3
1949	-6	-6,6	-9,1	-0,4	1	2,5	5,7	6,3	7	2,8	-5,5	-4,8	-0,6
1950	-8,1	-5	-5,3	-5,2	3,4	6,6	7,9	7,5	3,4	-0,1	-4,6	-8,3	-0,7
1951	-6,4	-7,6	-8	-4,6	0,5	4	6	7,8	5,9	1,2	-2	-3,1	-0,5
1952	-9,6	-11	-6,7	-0,6	0,2	5,4	9,1	8,4	0,4	-1,9	-6,9	-7,4	-1,7
1953	-10,7	-9,4	-4,9	-2,1	1,4	4,2	7	6,7	5,8	2,8	-0,1	-2,7	-0,2
1954	-12,7	-9,7	-4,4	-6,7	-0,4	4,9	3	5,9	4,7	0	-3,3	-5,4	-2
1955	-4,8	-9,5	-8,7	-6,1	-0,7	3,1	5,2	5,3	3,5	-1,1	-4,4	-4,4	-1,9
1956	-7,6	-17,4	-7,3	-5,6	0,7	1,3	6	5,5	6,6	-0,6	-6,7	-6,2	-2,6
1957	-7,2	-5	-2,8	-4,3	-3	6,6	6,2	5	2,5	2,1	-2,7	-6,1	-0,7
1958	-8	-5,8	-11,2	-6,5	4,8	3,1	6,7	7,6	5,6	0,3	-1,9	-5,5	-0,9
1959	-9,3	-5	-2,5	-2,2	0,9	4,1	7,2	5,8	4,4	1,1	-2,7	-4,9	-0,3
1960	-8,4	-6,9	-5,6	-4,6	1,2	4,8	3,7	6,1	2,5	0,9	-2,3	-5,1	-1,2
1961	-6,6	-4,6	-4,9	0,6	-1,6	5,3	4,2	6,6	8,8	2,8	-2,8	-7	0,1
1962	-6,9	-9,9	-10,3	-5,4	-1,6	1,8	4,7	7,9	3,8	1,5	-5,1	-8,4	-2,3
1963	-14,4	-11,2	-6,5	-2,1	0,2	5,2	7,3	6	5,6	0,4	-0,5	-7,4	-1,5
1964	-7,6	-7,6	-7,5	-2,5	1,5	5,8	7	5,4	4,7	-2	-3,9	-5,6	-1
1965	-8	-14,3	-7,2	-6,1	-1,9	4,6	4,7	4,6	4	2,7	-5,5	-6,2	-2,4
1966	-11,3	-2,6	-9,1	-1,8	0,6	4,6	3,9	5,2	5,3	3,5	-6,3	-8,4	-1,4
1967	-9	-7,2	-6,2	-5,4	0,9	3,3	7,8	6,4	4,6	4,2	-1,9	-8,9	-1
1968	-11,1	-6,6	-6,5	-1,6	0,8	4,3	4,7	4,8	3,6	2,5	-2,6	-8,9	-1,4
1969	-6,4	-11,2	-6,8	-4,2	3,1	2,2	6,7	4,9	5,6	3,3	-3,7	-10,7	-1,4
1970	-6,7	-10,7	-9,9	-6,7	-2,1	5,5	5,1	6,9	4,5	0,4	-1,7	-7,3	-1,9
1971	-6,3	-10	-10,8	-1,4	3,5	2,7	7,3	9,4	2	1,5	-5	-3,7	-0,9
1972	-6,9	-3,8	-3,3	-4,8	0,3	4,4	6	6,2	0,5	-2	-4,4	-2,9	-0,9
1973	-6,4	-10,4	-8,3	-7,3	1,7	4,6	5,2	8,7	5,4	-0,3	-4,6	-7,4	-1,6
1974	-4,3	-6	-3,6	-4,1	-0,5	2,1	5,1	8,9	4,5	-6,3	-4,7	-5,3	-1,2
1975	-4,2	-7	-6,9	-5	2	2,8	6,3	7,1	6,6	-0,3	-4,9	-5,8	-0,8
1976	-8,7	-5,3	-9,5	-3,7	1,9	5,5	7,6	4,2	3,2	3,7	-4,4	-8,3	-1,2
1977	-6,6	-6,6	-2,9	-5,7	1,3	5	6	6,2	2	4,2	-5	-4,3	-0,5
1978	-7,4	-9,1	-5,8	-5	-0,9	3,6	4,6	5,1	2,5	0,3	-1,6	-4,4	-1,5
1979	-10,8	-7,8	-5,5	-5,6	1,7	5,9	4	5,5	4,3	2,6	-5,7	-3,9	-1,3
1980	-9,4	-6,8	-6,8	-7	-1,2	2,8	4	7,4	5,1	-0,9	-5	-8,6	-2,2
1981	-11,5	-10,5	-3,2	-2,6	1,7	5,1	5,1	7	5,1	0	-5,7	-8,9	-1,5

Tabelle A.7: Rekonstruierte Monats- und Jahresmitteltemperaturen an der Station Simonyhütte 1931 bis 1980 in °C.

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1981	-11,5	-10,5	-3,2	-2,6	1,7	5,1	5,1	7	5,1	0	-5,7	-8,9	-1,5
1982	-7	-8,3	-6,9	-6,6	1,8	5,8	7,9	7,2	7,9	1,6	-0,8	-5,5	-0,3
1983	-5	-11,2	-5,5	-1,7	1,6	5	10,4	7,8	5,5	0,9	-3,2	-5,3	-0,1
1984	-7,8	-10,4	-8,5	-5,5	-0,3	3,2	5,4	6,5	2,7	2,3	1,3	-4,9	-1,3
1985	-11,9	-10,6	-6,9	-4,1	2,3	1,9	7,5	7,2	5,4	1,7	-7,6	-2,8	-1,5
1986	-8,7	-12,8	-5,2	-2,9	4,5	4,3	5,7	7,4	4,7	2,5	-1,7	-6,1	-0,7
1987	-11,1	-6,6	-11,4	-2,7	-1,7	3,6	7,3	6	7,4	3,2	-3,8	-4,1	-1,2
1988	-3,9	-8,4	-9,1	-2,7	3,2	3,6	7,5	7,6	3,6	3,8	-6,3	-6,5	-0,6
1989	-3,5	-3,5	-2,8	-2,5	1,6	2,6	6,7	6,6	4,6	2	-3,9	-2,3	0,5
1990	-4,2	-2,2	-2,8	-4,6	3	4,3	6,2	8,4	1,9	3,7	-4,6	-8	0,1
1991	-5,4	-9,4	-1,9	-4,8	-3,3	3,4	7,7	7,9	6,5	-0,1	-3,4	-6,3	-0,8
1992	-5,5	-6,5	-6,1	-4	3	5,6	8	11,6	5,5	-1,4	-2,3	-4	0,3
1993	-4,8	-6,5	-7,5	-1,8	4,4	5	5,4	7,7	4,2	1,8	-4,9	-5,1	-0,2
1994	-6	-7,4	-3,2	-4,1	2,2	5,5	10,2	9,3	5,5	0,6	-0,6	-4,6	0,6
1995	-8,7	-4,6	-8,2	-3,5	1,4	2,8	9,6	6,5	2,3	5,5	-5	-6	-0,7
1996	-4,3	-10	-9,2	-2,8	2	5,9	5	6,3	-0,1	0,5	-3,2	-5,4	-1,3
1997	-3,1	-4,9	-4,5	-6,9	1,9	5,2	5,1	8,2	5,9	-1	-2,5	-5,3	-0,2
1998	-5,3	-3	-7,4	-2,7	2,1	5,8	6,4	7,8	3,8	0,2	-7,6	-6,1	-0,5
1999	-4,7	-11,2	-4,9	-3,2	3,5	4,4	7,5	7,4	7,1	0,6	-5,1	-6,7	-0,5
2000	-8,6	-6,4	-6,2	-0,5	4,1	7,2	4,3	9,2	5	2,7	-1,5	-2,7	0,5
2001	-6,4	-6,9	-3,5	-4,6	4,7	3,2	7,2	9,1	0,9	5,5	-5,8	-9,9	-0,6
2002	-6	-4	-3,7	-3,7	4	8	7,5	7,7	2,1	0,3	-1,5	-4,4	0,5
2003	-8,8	-10	-4,7	-3,6	4,7	10	8,1	11,7	4,6	-2,9	-0,3	-4,1	0,4
2004	-10,1	-7,8	-6,5	-2,5	-0,2	4,3	6,6	8,3	4,3	3,4	-4,3	-3,9	-0,7
2005	-8,6	-11,9	-6,6	-2,7	2,5	5,7	7,1	5,3	5,3	4	-4,2	-9,1	-1,1
2006	-7,6	-9,4	-8,2	-2,9	1,6	6,1	10,9	4,3	8,2	5,1	-0,9	-2,1	0,4
2007	-4,8	-5,1	-4,9	1,4	3,7	7	7,4	7,3	2,1	-0,3	-5,8	-5,8	0,2
2008	-4,4	-5	-7,3	-3,5	3,8	6,6	6,7	7,9	2,4	1,9	-2,8	-6,2	0

Tabelle A.8: Rekonstruierte Monats- und Jahresmitteltemperaturen der Station Simonyhütte 1981 bis 2008 in °C.

Jahr	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
1858	120	19	46	131	213	243	360	275	155	175	69	123	1928
1859	49	129	374	106	139	199	172	354	181	110	103	145	2061
1860	121	101	163	85	167	156	268	84	237	112	95	216	1805
1861	174	6	156	90	311	259	133	191	144	3	114	169	1748
1862	440	207	27	137	144	292	213	369	98	118	-2	303	2346
1863	123	55	131	305	161	292	221	170	163	36	128	336	2121
1864	50	47	156	185	114	292	423	477	234	106	148	-6	2225
1865	125	76	47	16	278	240	196	372	38	156	69	27	1639
1866	107	144	95	123	104	155	409	437	120	8	399	235	2335
1867	140	189	148	320	254	170	129	156	230	148	178	396	2461
1868	84	140	245	254	47	77	275	175	55	207	54	287	1900
1869	140	215	91	118	123	189	259	325	93	156	388	98	2196
1870	49	13	147	104	137	180	200	402	257	388	137	224	2239
1871	27	129	91	246	238	294	428	177	96	84	69	24	1903
1872	33	50	136	145	95	240	246	432	159	35	106	144	1821
1873	28	96	55	156	415	256	144	211	235	60	221	114	1991
1874	88	80	136	87	320	210	226	371	65	63	30	112	1787
1875	142	84	144	41	169	200	328	243	350	216	202	139	2258
1876	52	259	262	114	153	167	303	286	322	50	185	134	2286
1877	148	379	139	265	185	175	346	249	232	125	128	215	2585
1878	331	80	385	150	227	148	478	301	295	163	107	93	2760
1879	43	80	109	142	106	341	393	319	57	211	219	96	2116
1880	148	63	131	93	230	257	252	693	241	172	112	526	2919
1881	16	46	352	136	357	328	211	298	290	167	169	58	2428
1882	-2	25	73	79	142	248	502	442	123	153	278	383	2446
1883	172	77	106	106	139	325	262	218	211	114	63	352	2144
1884	224	22	31	84	66	365	406	333	139	308	90	159	2226
1885	1	61	110	16	189	150	284	273	188	194	181	175	1824
1886	60	3	99	103	69	472	234	557	172	103	80	177	2128
1887	-6	22	106	3	382	145	125	418	128	222	114	186	1844
1888	278	216	90	172	112	260	361	485	222	82	145	28	2452
1889	47	260	172	142	71	197	464	372	308	91	80	55	2261
1890	158	-2	54	164	158	396	320	409	294	262	265	-2	2476
1891	90	25	74	128	148	177	374	237	145	61	50	346	1855
1892	248	245	43	129	142	563	262	137	331	58	52	123	2334
1893	166	208	207	35	325	219	305	91	156	245	194	46	2196
1894	-3	174	133	82	227	360	159	360	279	164	46	110	2091
1895	71	44	213	118	163	188	252	270	129	281	43	372	2144
1896	161	35	413	294	281	110	252	470	325	24	50	30	2446
1897	20	281	200	120	308	218	634	316	221	120	36	33	2507
1898	164	218	144	121	243	249	316	265	69	112	28	145	2075
1899	234	66	98	298	221	207	328	226	911	63	99	142	2892
1900	252	110	164	117	142	281	301	148	76	183	96	205	2076
1901	76	47	90	275	71	264	245	440	109	114	120	133	1982
1902	183	11	325	88	279	270	257	177	142	164	-5	267	2158
1903	88	107	55	268	112	219	661	335	151	309	260	24	2591
1904	17	163	85	211	188	328	221	292	270	391	259	181	2607
1905	197	169	181	164	77	109	202	399	126	282	265	61	2234
1906	142	87	240	103	271	344	417	325	557	47	167	202	2902
1907	292	63	208	273	115	139	491	222	230	58	65	191	2348
1908	121	249	35	161	199	197	222	238	194	-16	118	73	1792

Tabelle A.9: Rekonstruierte Monats- und Jahresniederschlagssummen im Bereich des Totalisators am Hallstätter Gletscher für den Zeitraum 1858 - 1908.

Jahr	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
1909	90	276	80	99	112	175	368	287	221	142	169	167	2187
1910	262	101	60	325	204	271	388	385	237	93	262	125	2712
1911	49	186	85	109	224	196	80	43	153	140	33	287	1585
1912	254	150	240	178	387	276	369	260	497	148	189	88	3038
1913	164	61	46	73	174	404	354	241	295	126	533	300	2771
1914	109	3	347	136	279	218	556	106	448	185	66	69	2521
1915	295	84	262	107	118	262	426	379	147	128	169	189	2566
1916	237	189	58	188	129	264	404	312	297	139	90	189	2496
1917	145	25	68	295	28	88	383	194	156	245	183	74	1885
1918	66	145	79	61	123	297	466	445	185	66	39	458	2430
1919	49	17	22	158	226	365	390	207	82	174	243	450	2381
1920	333	71	50	96	240	208	371	503	133	6	28	112	2152
1921	303	161	31	148	66	268	169	224	163	90	103	126	1852
1922	298	150	46	136	151	197	268	271	489	140	335	169	2651
1923	278	286	73	172	77	347	151	229	114	188	84	357	2354
1924	109	120	57	158	188	395	282	325	286	44	109	36	2108
1925	77	110	120	153	145	230	235	529	207	240	129	245	2420
1926	136	180	270	90	275	417	448	178	114	117	54	268	2545
1927	194	71	82	290	159	240	254	275	295	52	133	9	2054
1928	77	294	46	136	377	270	95	303	177	87	226	191	2277
1929	90	27	43	104	207	221	290	200	128	213	84	237	1843
1930	25	9	106	208	271	49	229	418	205	287	180	101	2089
1931	218	133	69	123	101	216	393	357	377	137	65	188	2376
1932	243	44	103	99	361	211	443	103	137	222	202	-3	2166
1933	159	183	57	260	305	338	287	249	216	205	68	126	2454
1934	98	63	55	39	79	282	275	314	60	103	54	170	1592
1935	174	393	121	249	229	257	284	180	208	298	103	84	2580
1936	213	133	33	133	252	278	407	259	282	352	104	189	2635
1937	200	204	85	226	96	297	218	431	298	156	101	172	2484
1938	240	84	286	177	145	145	301	418	126	77	161	47	2207
1939	96	106	248	25	241	200	265	264	196	186	246	155	2228
1940	46	52	156	104	290	189	276	136	271	69	117	159	1866
1941	123	95	205	133	134	136	455	437	374	344	77	196	2708
1942	125	36	88	235	284	270	365	207	109	417	189	38	2362
1943	98	114	77	286	377	336	300	226	161	-2	144	126	2242
1944	320	199	306	219	213	335	453	238	216	125	333	161	3118
1945	112	301	204	188	115	317	249	312	361	267	76	194	2697
1946	120	361	39	25	98	213	249	287	104	180	136	123	1936
1947	118	36	126	123	35	286	361	65	30	61	527	437	2206
1948	292	398	282	148	139	377	578	406	80	60	52	80	2892
1949	243	68	140	194	276	276	421	638	123	46	177	290	2892
1950	271	118	61	145	49	73	338	240	417	137	227	43	2119
1951	216	55	142	43	145	221	254	230	101	5	249	163	1824
1952	156	238	306	55	402	281	99	338	158	287	312	117	2750
1953	65	96	52	115	251	246	432	202	110	41	20	90	1721
1954	354	20	36	121	314	256	655	213	240	271	167	328	2976
1955	54	200	33	320	177	227	706	415	221	96	52	251	2752
1956	128	57	248	175	134	404	237	350	207	276	181	316	2712
1957	178	238	80	226	107	121	603	249	279	9	63	101	2256
1958	139	303	151	153	134	395	245	240	199	477	57	210	2701

Tabelle A.10: Rekonstruierte Monats- und Jahresniederschlagssummen im Bereich des Totalisators am Hallstätter Gletscher für den Zeitraum 1909 - 1958.

Jahr	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
1959	114	25	68	262	110	478	301	466	85	41	31	202	2184
1960	216	136	194	118	237	232	406	360	167	161	110	39	2376
1961	38	232	213	155	402	281	241	312	50	44	95	350	2414
1962	181	169	104	136	338	194	369	183	189	96	71	249	2280
1963	96	20	175	52	161	237	178	322	137	125	145	36	1685
1964	22	115	131	256	325	271	257	279	227	341	330	139	2694
1965	150	192	177	347	436	341	235	268	166	-13	148	264	2711
1966	131	167	278	219	331	421	365	387	107	71	131	382	2990
1967	238	186	224	237	256	221	298	95	222	84	93	204	2357
1968	219	44	126	52	114	211	505	328	218	129	28	104	2079
1969	205	68	88	174	91	322	271	230	120	39	93	104	1806
1970	73	423	158	245	249	312	462	415	196	317	181	104	3135
1971	8	151	129	38	96	308	112	339	115	31	118	192	1639
1972	8	74	20	297	202	219	352	183	50	183	251	5	1844
1973	121	140	136	234	145	342	147	126	131	153	385	268	2329
1974	275	79	101	103	413	502	426	150	181	306	199	533	3268
1975	267	28	120	196	180	361	568	222	85	80	118	50	2277
1976	382	-3	38	98	297	140	241	275	218	66	251	163	2165
1977	145	268	139	309	112	325	383	316	117	68	192	189	2564
1978	91	57	235	66	200	151	316	170	480	252	41	109	2169
1979	118	69	349	170	121	393	383	290	153	41	505	104	2698
1980	120	164	148	434	144	328	311	306	161	210	156	282	2765
1981	355	101	208	58	191	174	563	342	222	279	297	199	2990
1982	406	39	58	99	189	330	314	174	91	140	68	192	2102
1983	387	103	96	230	177	330	115	181	180	213	164	142	2318
1984	125	167	93	103	213	218	393	365	297	79	35	115	2201
1985	121	265	117	196	208	333	358	581	188	85	153	240	2845
1986	358	27	158	101	204	166	227	238	74	181	68	301	2103
1987	219	245	264	205	311	289	240	287	158	54	205	281	2757
1988	158	200	532	133	174	249	279	333	237	120	243	464	3121
1989	159	159	118	189	180	316	316	447	305	178	66	123	2556
1990	49	276	103	216	115	311	259	199	325	148	200	163	2364
1991	41	46	129	73	324	262	548	374	104	87	147	469	2602
1992	24	172	358	159	30	219	207	248	186	140	448	106	2297
1993	276	91	218	186	126	330	527	243	213	128	49	219	2607
1994	243	57	251	312	298	300	80	235	164	129	287	210	2567
1995	230	158	219	286	158	491	99	303	252	38	218	180	2632
1996	16	35	93	145	289	262	303	308	491	314	172	41	2468
1997	-8	137	406	251	192	134	786	197	77	311	153	185	2821
1998	73	33	388	128	159	317	355	174	371	240	273	172	2682
1999	142	417	151	226	235	133	213	249	150	90	159	222	2387
2000	227	240	443	54	290	123	300	230	232	144	79	147	2509
2001	76	161	254	222	110	393	194	216	491	58	199	314	2689
2002	136	163	361	133	91	248	229	480	259	246	270	200	2815
2003	186	61	68	87	185	96	347	107	270	260	68	110	1846
2004	246	164	121	79	297	371	352	317	426	87	230	44	2735
2005	235	232	156	186	276	137	589	380	204	20	151	314	2881
2006	169	216	290	222	257	393	196	529	194	148	310	61	2985
2007	194	100	150	29	303	286	290	234	510	153	317	143	2709
2008	136	89	278	187	27	247	397	180	105	103	145	174	2067

Tabelle A.11: Rekonstruierte Monats- und Jahresniederschlagssummen im Bereich des Totalisators am Hallstätter Gletscher für den Zeitraum 1959 - 2008.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen mich nochmals bei allen Leuten zu bedanken, welche mich bis zum Abschluß dieser Arbeit unterstützt haben. Allem voran sind natürlich die Eltern zu nennen. Die Freiheit der Studienwahl und die Unterstützung ihrerseits waren Grundlage für den Weg bis zum heutigen Tage. Ein besonderer Dank gilt auch Dr. Andrea Fischer. Bereits früh gab sie zahlreiche Gelegenheiten, an Feldmessungen der glaziologischen Arbeitsgruppe teilzunehmen. Mit der Durchführung des Massenbilanzprojektes am Hallstätter Gletscher bekam ich die Möglichkeit, an einem für mich besonderem Ort gletscherkundliche Messungen voranzutreiben. Dem Besuch dieses landschaftlich großartigen Massivs am Dachstein in Form von Trainingslagern seit 1992 folgte nun wissenschaftliche Arbeit. In diesem Zusammenhang möchte ich mich für die Unterstützung seitens der Firma Bluesky, allen voran Klaus Reingruber, und natürlich den Gletscherknechten bedanken, welche mit Tat und Schaufel hilfreich zur Seite standen. Da noch weitere tiefe Löcher gegraben werden müssen, freu ich mich schon auf die kommende Messsaison. Dank gilt auch den Jungs um Lambert Traninger von der Dachsteinbahn, den Hüttenwirten Michi (Simonyhütte) und Wilfried (Seethalerhütte) sowie dem Umweltschutzrat Rudi Anschober und der Oberösterreichischen Energie AG, welche das Projekt auf eine logistische und finanzielle Basis stellen. Weiter gilt Dank Herrn Prof. Dr. Michael Kuhn. Er gab mir das Vertrauen, auf öffentlichkeitswirksamen Exkursionen und Weiterbildungen als Referendar und Exkursionsleiter das Institut zu vertreten. Bei Fragen bezüglich der Arbeit standen auch seine Türen stets offen. Zusammenfassend bedanke ich mich hiermit bei all jenen, mit denen ich am Seil das Vertrauen und auf der Hütte die Gemütlichkeit teilen durfte. Auch sei jeder hilfreiche Rat bei der Erstellung dieser Arbeit nochmals mit einem Danke versehen. Zu guter letzt sollen meine Schwester Angela sowie Freundin Ricarda Frenkler lobend erwähnt sein, welche die finalen Seiten nochmals mit strengem Blick ohne Gnade Korrektur lasen.

Curriculum Vitae

Kay Helfricht

Lohbachufer 7

A-6020 Innsbruck

Born on 05. September 1981 in Dresden, Germany

SCHOOL EDUCATION:

1988–1992 Primary School, Dresden.

1992–1997 Secondary School with focus on math and natural science , Dresden.

1997–2000 Secondary School with focus on math and natural science , Altenberg.

2000 Abitur (German secondary school leaving examination)

2000–2004 Athlete of cross-country skiing at the German armed forces. Alpine education by the mountain infantry, Mittenwald.

STUDY:

since 2004 Diploma study at the University of Innsbruck *Master of Natural Science (Magister rerum naturalium)* in Meteorology and Geophysics.

since 2007 Research assistant in the group of Dr. A. Fischer at the Department of Meteorology and Geophysics, University of Innsbruck. Management and evaluation of a climate and mass balance project at the Hallstätter Glacier (Austria).

since 2008 lecturer at excursions and seminars dealing with glaciology at the Alpine Research Centre Obergurgl and in cooperation with the Nationalpark Hohe Tauern.

since 2009 Diploma thesis under the guidance of Dr. A. Fischer, Department of Meteorology and Geophysics

PARTICIPATION IN FIELD EXPERIMENTS:

- mass balance measurements at different glaciers since spring 2006
- ice thickness measurements with geodetic radar 2007/2008
- measurements with terrestrial laser scanner 2008