



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Fehlervarianz in der Berechnung der
Gletschermassenbilanz nach der direkten Methode“

Verfasser

Patrick Schlechter

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaft (Mag.rer.nat)

Wien, 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 453

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Theoretische und Angewandte Geographie

Betreuer:

Univ.-Prof. Mag. Dr. Cyrus Samimi

Zusammenfassung

Bei Erhebung des Gletschermassenhaushalts mit der direkten Methode werden im Feld gemessene punktuelle Massenbilanzen über ein Auswertungsverfahren auf die Gletscherfläche übertragen. In jeder dieser Faktoren Punkt, Fläche und Auswertungsmethode werden Unsicherheiten identifiziert und quantifiziert, die beim Endergebnis als Fehlerbalken angegeben werden.

In dieser Arbeit sind die Fehlerarten beschrieben und diskutiert worden. Drei davon sind für drei Gletscher in der Goldberggruppe in den Hohen Tauern für elf Winter- und Jahresbilanzen berechnet worden. Diese sind der Extrapolationsfehler durch die Übertragung der Massenbilanzinformation von Punkten auf die Fläche, der Fehler durch die Verwendung nicht aktueller Gletscherflächen (Flächenfehler) bei der Auswertung und der Einfluss von Expert Knowledge.

Die Ergebnisse vier verschiedener Interpolationsroutinen sind mit den Werten der Haushaltsberichte verglichen worden. Die Spannweite der Ergebnisse ergibt die Fehlervarianz durch die Extrapolation der Punktwerte. Die einheitliche Auswertung mit der ältesten Gletscherfläche der Zeitreihe gibt die Varianz des Flächenfehlers. Durch Weglassen von künstlichen Punktwerten, die zusätzliches Expertenwissen über den Massenhaushalt in die Auswertung einbringen, wurde der Einfluss von Expert Knowledge berechnet.

Die Varianzen von Extrapolations- und Flächenfehler der Winterbilanzen sind wesentlich geringer als für die Jahresbilanzen. Für letztere bestehen Fallweise Mängel in den Punktdaten wegen nicht verfügbaren Ablationspegeln. Das eingebrachte Expert Knowledge in diesen Jahren führt zu Veränderungen in der Massenbilanz um bis zu 30 %. Jahre mit geringer Punktdichte und ungünstigen Punktmuster haben keinen signifikanten Einfluss auf das Ausmaß der Fehlervarianz.

Unterschiedliche Auswertungsmethoden und darauf folgend unterschiedliche Berechnungen der Fehlervarianz erschweren einen Vergleich von Fehlerstudien. Die berechneten Fehlerva-

rianzen der Winterbilanzen stimmen gut mit vergleichbaren Studien überein, jene der Jahresbilanzen sind wesentlich höher. Für eine umfassende Fehlererhebung ist neben der Berechnung der weiteren Fehlerarten eine Auseinandersetzung mit der Fehlererhebung anderer Auswertungsmethoden gewinnbringend.

Abstract

Calculating glacier mass balance with the traditional method means inter- and extrapolating point values over the glacier area. In all these factors points, area and interpolation method uncertainties are identified and quantified to give the calculated mass-balance an error-bar.

In this study all kinds of errors in the traditional method are described and discussed. Three kinds of error are quantified for three glaciers in the Austrian eastern Alps for eleven years of winter and annual balance. These errors are the extrapolation-error, the error of using not-yearly-updated glacier areas (area-error) and the influence of expert knowledge in the mass-balance-evaluation.

The the mass balances evaluated by four different interpolation-routines are compared to the mass-balance-report values. The span of these results equals the errorvariance of the extrapolation-procedure. The evaluation of the massbalance by using the oldest glacier area of the time series brings up the variance of the area-error. By omitting artificial point values, set to add further mass-balance-relevant information, the influence of expert knowledge is calculated.

The variance of extrapolation- and area-error for winter balances are smaller than for annual balances. In many cases annual balances do not have the sufficient point information available in many cases due to a lack in the number of ablation stakes. The needed expert knowledge in these years causes changes of up to 30 % of mass balance. Years with small point density and clustered point pattern do not have a significant influence to the extent of the error variance.

Different evaluation-methods and therefore different error-calculations make it difficult to compare error studies. The calculated error variances of the winter balances are conform to results of comparable error studies whereas the error variances of the annual balances are higher. Besides the calculation of all the other errors found for the traditional method a dis-

cussion of the error-calculation for other evaluation methods is sensible to generate a blanket error analysis.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Abstract.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	7
0 Einleitung	11
1 Gletschermassenbilanz.....	13
1.1 Ablation und Akkumulation	13
1.2 Zeitliche Komponente	15
1.2.1 Stratigraphic System.....	17
1.2.2 Fixed-Date System.....	17
1.2.3 Floating-Date System	18
1.2.4 Combined System.....	18
1.3 Räumliche Komponente	18
2 Erhebung von Gletschermassenbilanzen	21
2.1 Geodätische Methode.....	22
2.2 Hydrologische Methode	23
2.3 Indirekte Methoden	24
2.4 Physikalische und statistische Modelle	24
2.5 Direkte Methode	25
2.5.1 Ablationspegel.....	28
2.5.2 Snowline	28
2.5.3 Schneeprofil.....	28
2.5.4 Schneesondierung.....	30
2.5.5 Georadar (Ground Penetrating Radar, GPR).....	31
2.5.6 Schneehöhenmessung über Ultraschall.....	31
2.5.7 Stützstellen (künstliche Punktwerte)	32
2.6 Warum sind Massenbilanzerhebungen wichtig?	33
2.6.1 Einfluss auf Mensch und Infrastruktur bei wandelndem Klima	33
2.6.2 Gletschermassenbilanz als Klimaindikator	34
3 Fehlersuche bei der Massenbilanzerhebung	39
3.1 Unsicherheiten in Punktdaten:	40
3.1.1 Feldfehler	40
3.1.2 Punktdichte	41

3.1.3 Punktmuster	42
3.1.4 Lokale Unterschiede	42
3.1.5 Punktqualität	43
3.1.6 Expert Knowledge – Punkte	44
3.2 Flächenfehler	44
3.2.1 Aktualität	45
3.2.2 Wahre Gletscheroberfläche	45
3.3 Interpolationsmethode	46
3.3.1 Verschiedene Methoden und Varianten	46
3.3.2 Expert Knowledge – Interpolationsmethode	47
3.4 Andere Fehler	49
3.4.1 Zeitsystem – Abgrenzung	49
3.4.2 Flux Divergence – Gletscherfließbewegung	49
3.4.3 Interne und basale Massenbilanz	49
3.5 Zusammenfassung	50
4 Aufgabenstellung	51
4.1 Literatursauswahl über Fehlervarianz	51
4.1.1 Beispiel 1 Glacier de Sarennes	51
4.1.2 Beispiel 2 Silvretta- und Griesgletscher	52
4.1.3 Beispiel 3 Storglaciären	52
4.1.4 Diskussion der Fehler anhand der Beispiele	53
4.2 Mögliche Fehlerberechnungen für Sonnblickgletscher	56
4.2.1 Andere Fehler	56
4.2.2 Punktfehler	56
4.2.3 Flächenfehler	57
4.2.4 Fehler über die Interpolationsmethode	58
4.3 Zielsetzung	58
4.3.1 Zielsetzung als Fragen	61
5 Untersuchungsgebiet	63
5.1 Die Gletscher	63
5.1.1 Goldbergkees	63
5.1.2 Kleinfleißkees	64
5.1.3 Wurtenkees	64
5.3 Gletschermonitoring	65
5.2 Gletscherentwicklung	70

6 Daten	71
6.1 Massenhaushaltszeitreihe.....	71
6.2 Punktdaten	73
6.2.1 Messpunkte des Wurtenkees.....	74
6.2.2 Messpunkte des Goldbergkees	76
6. 2.3 Messpunkte des Kleinfleißkees	77
6.2.4 Einteilung in Punktqualität	78
6.3 Gletscherflächen	81
7 Methoden	83
7.1 Angewendete Interpolationsverfahren.....	83
7.1.1 Ordinary Kriging (ok)	83
7.1.2 Regular Spline (sp).....	85
7.1.3 Default Kriging (dk).....	85
7.1.4 Gridfit + Bilineare Interpolation (bi).....	86
7.2 Verwendung verschiedener Gletscherflächen	87
7.3 Einfluss von Expert Knowledge	87
7.4 Kennwerte für räumliche Verteilung von Punkten	87
7.4.1 Autokorrelationsmaße	87
7.4.2 Nearest-Neighbor-Index (NNI)	88
8 Ergebnisse	89
8.1 Fehlervarianz in der Extrapolation	89
8.2 Flächenfehler.....	94
8.3 Einfluss von Expert Knowledge	99
8.4 Überprüfung auf Zusammenhang von Punktmuster und	103
9 Diskussion	105
9.1 Beantwortung der Forschungsfragen	105
9.2 Diskussion mit Literaturbezug.....	107
10 Ausblick	111
Literaturverzeichnis.....	113
Haushaltsberichte	120
Weitere Quellen	122
Abbildungsverzeichnis.....	125
Tabellenverzeichnis	127
Danksagungen.....	128

Lebenslauf.....	129
Eidesstattliche Erklärung.....	130

0 Einleitung

Die Berechnung von Gletschermassenbilanzen bringt viele Unsicherheiten mit sich. Diese sind aber Teil eines Massenbilanzergebnisses und geben darüber Auskunft, wie man mit dem Ergebnis umgehen kann. Es gibt verschiedene Unsicherheiten in der Erhebung der Massenbilanz. Diese ist abhängig von der gewählten Methode und diese wiederum von ihrer Handhabung. Denn unterschiedliche Leute haben verschiedene Zugangsweisen zu wissenschaftlichen Aufgabenstellungen [Englund 1990]. Die Unsicherheiten stecken also nicht nur in den Daten, sondern auch in der Methode.

Ziel dieser Arbeit ist es diese Fehler zu identifizieren und nach Möglichkeit zu quantifizieren. Dazu wird in Kapitel 1 und 2 die Gletschermassenbilanz und ihre Erhebungsmethode(n) in ihren Grundzügen beschrieben, um diese dann in Kapitel 3 auf Fehler zu überprüfen. Die gefundenen Fehler – in diesem Fall für die Auswertung von drei Gletschern im Sonnblickmassiv der Hohen Tauern – werden in Kapitel 4 mit Fehlern in anderen Studien verglichen. Anschließend wird diskutiert, ob diese mit den vorhandenen Daten, Werkzeug und Know-How berechenbar sind. Mit einem Auswahl- und Abwägungsverfahren (decision-making process) wird entschieden, welche Fehler in dieser Arbeit behandelt werden. Nach Einführung ins Untersuchungsgebiet (Kapitel 5) und in die Datenlage (Kapitel 6) wird in Kapitel 7 der Vorgang der Fehlerberechnung beschrieben. In Kapitel 8 werden die Ergebnisse präsentiert und in Kapitel 9 diskutiert. Kapitel 10 liefert einen Ausblick, wie es mit der Auswertung weitergehen könnte.

1 Gletschermassenbilanz

Über die Gletschermassenbilanz lässt sich eine Aussage über den Gesundheitszustand eines Gletschers treffen. Der Gesundheitszustand eines Gletschers kann schlecht sein, dass bedeutet, dass dieser schrumpft und an Masse verliert. Ein gesunder Gletscher hingegen wächst oder bleibt in seiner Masse konstant. Weniger gut lässt sich der Gesundheitszustand über die Längenänderung des Gletschers feststellen [Zemp, Hoelzle & Haeberli 2009].

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Gletschermassenbilanz erklärt. Dazu gehören Massen-beeinflussenden Prozesse sowie die zeitliche und räumliche Abgrenzung. Mit dieser Grundlage wird im folgenden Kapitel die Erhebungsmethode beschrieben, um diese dann in Kapitel 3 und 4 in Bezug auf ihre Fehleranfälligkeit zu diskutieren.

1.1 Ablation und Akkumulation

Die Massenbilanz an einem bestimmten Punkt auf einem Gletscher b setzt sich aus dem dortigen Massengewinn (Akkumulation) c und Massenverlust (Ablation) a innerhalb eines definierten Zeitraums zusammen:

$$b = c + a \quad [\text{mm, kg/m}^2] \quad (1.1)$$

Es ist üblich, dass die Ablation in negativen Zahlenwerten angegeben wird. Bei räumlicher Integrierung einer punktuellen Massenbilanz (oder mehrerer) über die gesamte Gletscherfläche ergibt die Massenbilanz B in kg [Kaser, Fountain & Jansson 2003].

Die Ablations- und Akkumulationsprozesse finden in allen Aggregatzuständen von Wasser statt (Abb. 1.1). Der größte Massenumsatz findet in der Schneeschicht (hellgrau) statt, im Eis weit weniger (dunkelgrau). [Paterson 1994]

Sämtliche Prozesse, bei denen der Gletscher Schnee oder Eis verliert, tragen zur Ablation bei [Schöner 2003]. Die Absorption von Strahlung und die Wärmezufuhr durch turbulente Luftbewegungen wirken stark auf das Abschmelzen. Das Schmelzen selbst führt dabei noch zu keinem Massenverlust. Erst durch das Abfließen des Schmelzwassers vom Gletscher ist das

der Fall. Wenn die Schneeoberfläche noch nicht Wassergesättigt ist, kann das Schmelzwasser versickern und in Spalten und Kanälen wieder gefrieren. Ablation entsteht auf einem Gletscher in der Regel über:

- Abschmelzen
- Erosion von Triebsschnee
- Abbruch von Lawinen
- Verdunstung und Sublimation
- Kalben (Abdrift von Gletscherteilen in See oder Meer) [Paterson 1994]

Die wichtigste Ablationsgröße für Alpine Gletscher ist der Schmelzwasserabfluss, der vor allem auf der Gletscheroberfläche entsteht. Die Verdunstung von Schnee geschieht nur in kurzen Perioden im Frühjahr und macht meist nur einen Bruchteil der Gletscherschmelze aus [Østrem & Brugman 1991].

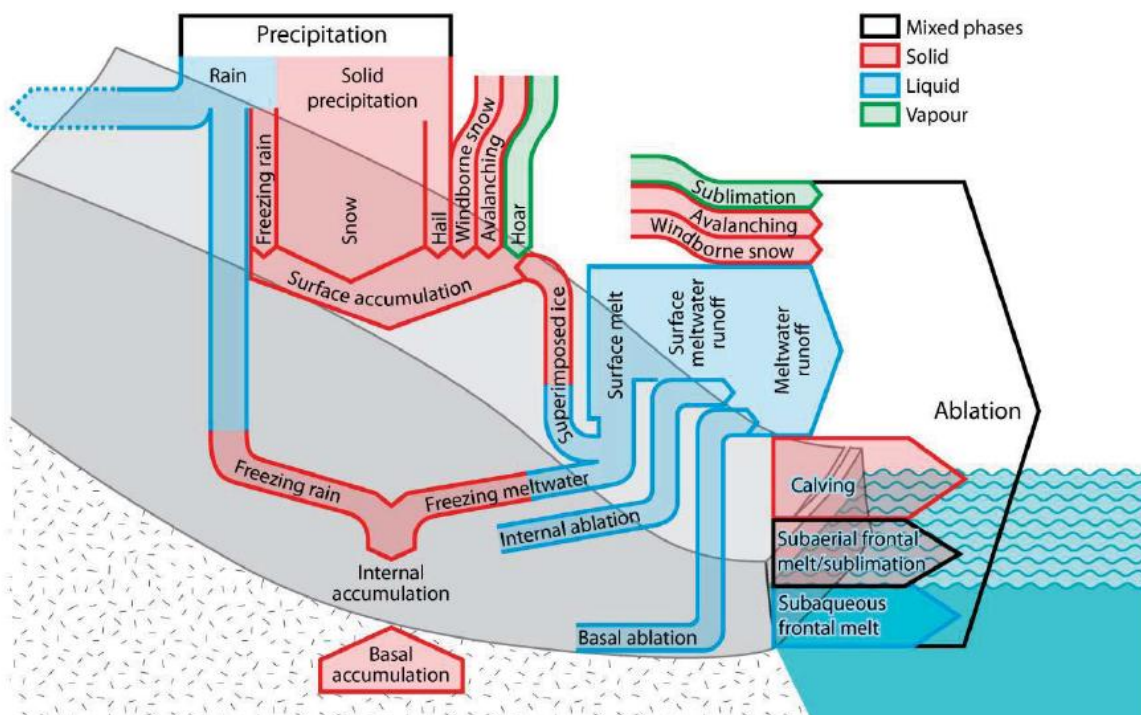


Abbildung 1.1 Ablations- und Akkumulationsprozesse [Cogley et al. 2011]

Ein Massenzuwachs findet meist in Form von Schnee statt, welcher in Firn und schließlich in Eis umgewandelt wird. Dieser langwierige Prozess beginnt schon mit dem Niederschlag

durch mechanische Zerkleinerung der Kristalloberfläche. Eine Massenanreicherung passiert auf verschiedenste Arten:

- Ablagerung von Treibschnee und Lawinen
 - Schneefall und andere festen Niederschlag
 - Kondensation von atmosphärischen Wasserdampf und Anfrieren von Regenwasser
- [Paterson 1994]

1.2 Zeitliche Komponente

Betrachtet man die Masseveränderung eines Gletschers über ein Jahr, so lässt sich diese in eine Akkumulationszeit und Ablationszeit einteilen. Der zeitliche Verlauf der Massenbilanz hat für Gletscher in den Alpen jeweils nur ein Maximum und ein Minimum. Die Zeit von Minimum zu Maximum wird Akkumulationsperiode und die Zeit von Maximum zu Minimum Ablationsperiode bezeichnet. Man spricht von einem Haushaltsjahr, wenn man sich auf die Zeit zwischen zwei Minima bezieht. [Benn & Evans 2010]

Die dem gesamten Haushaltsjahr entsprechende Bilanz wird dann als Nettobilanz oder Jahresbilanz bezeichnet (b_n) (Abbildung 1.2). Von Winterbilanz (b_w) spricht man, wenn man sich auf die Massenbilanz zwischen Beginn (t_1) und Ende (t_m) der Akkumulationsperiode bezieht. Die Sommerbilanz umfasst die Massenänderung zwischen Anfang (t_m) und Ende (t_2) der Ablationsperiode. [Paterson 1994]

Die zwei Minima t_1 und t_2 grenzen das Haushaltsjahr ab. Zwischen diesen Zeitpunkten befindet sich ein Zeitpunkt maximaler Akkumulation (t_m). Die Buchstaben $\dot{c}$ und $\dot{a}$ sind Raten von Massenzunahme und -abnahme an definierte Punkten auf dem Gletscher.

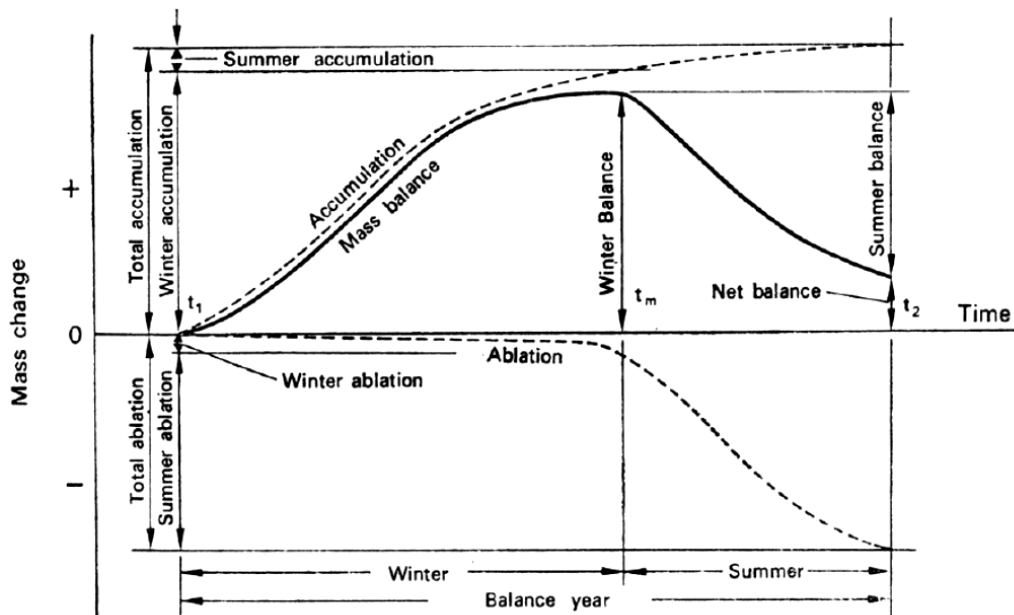


Abbildung 1.2: Definition der Massenbilanzterme [Paterson 1994]

$$b_n = b_w + b_s = c_t + a_t = c_w + a_w + c_s + a_s = \int_{t_1}^{t_m} (\dot{c} + \dot{a}) dt + \int_{t_m}^{t_2} (\dot{c} + \dot{a}) dt \quad [1.2]$$

Das zeitliche Integral von t_1 bis t_2 erfasst die gesamte Akkumulation (total accumulation, c_t) und gesamte Ablation (a_t). Dabei unterscheidet man zwischen Akkumulation im Winter (c_w) und Sommer (c_s) sowie Sommer- und Winterablation (a_s und a_w). [Paterson 1994]

Eine gern verwendete Kenngröße, wenn es um Fragen der Gletscherbewegung und -geschwindigkeit geht, ist der Gesamtmassenumsatz (total exchange, e_t); gebildet aus der die Summe der Beträge von Gesamtablation und -akkumulation. [Anonymous 1969]

Messungen zum Massenhaushalt finden in Zeiten maximaler Akkumulation oder maximaler Ausaperung statt. Diese sind am Ende der Akkumulationsperiode im Frühjahr und am Ende der Ablationsperiode im Herbst. Es ist sehr schwierig, die Bilanzperiode einzugrenzen. Es kann sein, dass gegen Ende des Sommers in hohen Lagen des Gletschers schon wieder fester Niederschlag fällt, während die Ablation an der Gletscherzunge noch im vollen Gange ist. Die Länge des Haushaltsjahres variiert auf der ganzen Gletscherfläche; vor allem nach Höhenstufen. [Paterson 1994]

Diverse Ansätze gibt es, um dem Haushaltsjahr einen Anfang und ein Ende zu geben. Diese Methoden zur zeitlichen Abgrenzung von Massenbilanzen werden in der Literatur auch Zeitsysteme (time systems, reporting systems) [Østrem & Brugman 1991] genannt:

1.2.1 Stratigraphic System

Nach dem Stratigraphischen Ansatz wird angestrebt am tatsächlichen Maximum oder Minimum die Massenbilanzmessungen durchzuführen. [Østrem & Brugman 1991] Dazu muss allerdings der Gletscher das gesamte Haushaltsjahr observiert werden, um Termine für die Feldmessungen festlegen zu können. Ob diese dann durchführbar sind, ist von der Witterung und verfügbaren Personal abhängig. Vom tatsächlichen Zeitpunkt der Messung bis zum tatsächlichen Maximum oder Minimum wird mithilfe von meteorologischen Aufzeichnungen und einem Gradtagmodell (Erklärung in Kapitel 3.4) interpoliert [Schöner 2003]. Das Haushaltsjahr kann also verschieden lange dauern, was vorwiegend von der Seehöhe abhängt. Die stratigraphische Methode erfordert ein meteorologisches Monitoring und ist deshalb sehr aufwändig.

1.2.2 Fixed-Date System

Bei der Fixed-Date-Methode wird für Anfang und Ende des Haushaltsjahres jeweils ein Datum festgelegt. In Anlehnung an das hydrologische Jahr findet das glaziologische Haushaltsjahr von 1. Oktober bis 30. September statt. Das Maximum der Winterakkumulation ist meist Anfang oder Ende Mai erreicht. Bilanzmessungen zum Winterhaushaltsjahr werden deshalb für 30. April oder 31. Mai vorgesehen. Die Feldbegehungen können nicht bei jeder Witterung ausgeführt werden. Daher muss auch bei dieser Methode oft erst auf die festgelegten Termine mit Interpolation hin gerechnet werden.

Statt Nettobilanz und Gesamtakkumulation schrieb man lange Zeit Jahresbilanz sowie Jahresakkumulation und -ablation oder -umsatz, um eine Verwechslung mit Massenbilanzen nach Stratigraphischem System vorzubeugen. Mit Erscheinen des ‚Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms‘ der International Association of Cryospheric Sciences (IACS) ist das nicht mehr der Fall. Netto- und Jahresbilanz können synonym verwendet werden [Cogley et al. 2011]. In dieser Arbeit wird bevorzugt Jahresbilanz verwendet, da im Monitoring des

Untersuchungsgebiets die Massenbilanz nach dem Fixed-System festgelegt ist [Schöner et al. 2009]

1.2.3 Floating-Date System

Beim Floating-Date Ansatz wird keine Inter- oder Extrapolation auf einen vorgegebenen Termin durchgeführt. Die Messtermine für Feldmessungen werden nach Fixed-Date- oder Stratigraphischen Methode festgelegt und davon leitet sich die Dauer der Akkumulations- und Ablationsperiode ab. [Schöner 2003]

1.2.4 Combined System

Für weltweite Vergleiche von Massenbilanzen, dessen Haushaltsjahre auf verschiedenen Anfängen und Enden beruhen, ist es sinnvoll, einen kombinierten Ansatz zu wählen, sodass man im Nachhinein die Massenbilanz nach verschiedenen Zeitsystemen berechnen kann [Schöner 2003]. Dabei wird versucht eine Verbindung aus Fixed-Date oder Stratigraphischer Methode mit der Floating-Date-Methode herzustellen. Feldmessungen vor und nach der Jahresbilanzmessung sind dabei notwendig. [Østrem & Brugman 1991]

1.3 Räumliche Komponente

Durch seine Fließbewegung stößt der Gletscher in Höhenstufen vor, wo die Lufttemperatur höher ist, sodass es zu einer größeren Ablation als Akkumulation kommt [Paterson 1994]. Am Ende des Haushaltsjahres lässt sich für jeden Punkt auf dem Gletscher die Jahresbilanz bestimmen. Somit lässt sich der Gletscher in eine Zone mit Massenzuwachs und in einen mit Masseverlust einteilen. Diese Zonen werden auch Nähr- und Zehrgebiet genannt. Die Gesamtgletscherfläche S besteht damit aus einem Akkumulationsgebiet S_c und einem Ablationsgebiet S_a . Jene Linie, die alle Punkte mit ausgeglichener Jahresbilanz ($b_n = 0$) wird Gleichgewichtslinie (equilibrium line) genannt.

$$S = S_c + S_a \quad [m^2] \quad [1.3]$$

Schwankungen in der mittlere Seehöhe der Gleichgewichtslinie (equilibrium line altitude, ELA) werden gerne als Indikator für Gletscheraktivität verwendet. Gleiches gilt für das Verhältnis zwischen S_c und S (Accumulation Area Ratio, AAR). Das Verhältnis gibt Auskunft, ob der Gletscher an Masse verliert oder gewinnt. In der Regel muss das Akkumulationsgebiet etwa 60 % der Gletscherfläche einnehmen, sodass die Akkumulation der Ablation überwiegt und eine ausgeglichene Bilanz entsteht. [Kaser, Fountain & Jansson 2003, Karpilo 2009]

$$AAR = \frac{S_c}{S_c + S_a} \quad [m^2] \quad [1.4]$$

Von einer spezifischen Massenbilanz b spricht man, wenn die einer Zeitperiode nur an einem Teil des Gletschers gemeint ist [Cogley 2010]. Die mittlere spezifische Massenbilanz $\bar{b}$ entspricht der Gesamtmassenbilanz B durch die Gletscherfläche S .

$$\bar{b} = B / S \quad [mm, kg/m^2] \quad [1.5]$$

Die spezifische Massenbilanz wird meist als mm Wasseräquivalent (mm w.e. Wasserwert) angegeben. Ein mm entspricht 1 kg oder 1 l Wasser pro m^2 . Die spezifische Massenbilanz im Akkumulationsgebiet ist positiv ($b_a = b > 0$), im Ablationsgebiet negativ ($b_c = b < 0$), und entlang der Gleichgewichtslinie ausgeglichen ($b = 0$) [Benn & Evans 2010]. Die mittlere spezifische Massenbilanz $\bar{b}$ wird verwendet, um die Massenbilanz verschieden großer Gletscher miteinander vergleichen zu können. [Kaser, Fountain & Jansson 2003]

Bei temperierten Gletschern (nicht im Gletscherbett festgefroren) – wie sie bis auf wenige polythermale und zwei kalte fast ausschließlich in den Alpen zu finden sind [swisseduc.ch] – entspricht die Gleichgewichtslinie der Schneelinie. Das ist jene Grenze, die auf der Sommeroberfläche zwischen Firn- und Schneegebiet zu sehen ist (Abb. 1.3). Unter Firn versteht man Schnee, der ein Haushaltsjahr auf dem Gletscher überdauert hat bzw. ein Stadium im Transformationsprozess von Schnee zu Eis [Cogley 2010].



Abbildung 1.3 Grenze zwischen Schnee und Firn am Oberen Goldbergkeesboden [Hynek et al. 2009]

Wie erwähnt, findet der Großteil der Massenänderung auf der Gletscheroberfläche statt. Im Inneren des Gletschers sowie basal bzw. subglazial ereignen sich ebenso Akkumulations- und Ablationsprozesse (Abb. 1.1.).

Basale oder subglaziale Akkumulation entspricht angefrorenem Eis am Gletscheruntergrund. Über Eisbohrkerne lässt sich, neu angefrorenes Eis vom älteren Gletschereis unterscheiden. Die Notwendige Energie für Ablationsprozesse stammt zum einen über die Reibung im Gletscherbeet, Geothermie und Änderungen im Druck-Schmelzpunkt. Die basale Massenbilanz an einem Punkt b_b ist die Summe aus der basalen Ablation a_b und Akkumulation c_b . Gleiches gilt für die interne Massenbilanz b_i , wo die interne Akkumulation c_i aus (Wieder-)Gefrieren im Gletscher und die interne Ablation a_i aus dem Abschmelzen im Gletscherinneren besteht. Der Großteil der Energie für die interne Schmelze wird durch Fließ- und Fallbewegung von Wasser und Eis freigesetzt. [Cogley et al. 2011]

Interne und basale Massenbilanz werden separat bestimmt. Die interne Akkumulation spielt bei temperierten Gletschern in den Alpen eine vernachlässigbare Rolle (Huss via Email). Über den Anteil der basalen Massenbilanz an der basalen Klimabilanz (Klimabilanz ist Oberflächen- plus Interner Massenbilanz) ist man sich unsicher [Huss, Bauder & Funk 2009, Cogley 2011], weshalb diese Komponente oft kommentiert und weggelassen wird. Gleiches gilt für die Fließbewegung des Gletschers (flux divergence), die bei der Massenbilanz mitberücksichtigt werden soll [Zemp et al. 2010].

2 Erhebung von Gletschermassenbilanzen

Seit der Entwicklung erster Massenbilanzkonzepte in den 1920er Jahren in Schweden hat die traditionelle Methode (=direkte glaziologische Methode) in ihrer Durchführung und Terminologie mehrere Reformen durchgemacht [Braithwaite 2009]. Neben dieser bestehen heute andere Methoden (Kapitel 2.1 -2.4) die andere Messzugänge und damit Potenzial für Kombinations- und Validierungsverfahren haben. Eine Verbesserung und Ausweitung von Gletscherdaten ist von großem gemeinschaftlichem und wissenschaftlichem Interesse (Kapitel 2.6).

Es gibt eine Vielzahl von Methoden zur Bestimmung der Massenbilanz. Massenbilanz-Parameter lassen sich mit Feld- und Fernerkundungsmethoden aufnehmen. Diese lassen sich aber auch über hydrologische und klimatologische Messungen sowie physikalische oder statistische Modelle herleiten. [Knight 1999]

Einen Methodenüberblick gibt Tabelle 2.1. Die Methoden haben alle Stärken und Schwächen. Welche man anwenden soll, hängt wesentlich von der Fragestellung der Untersuchung ab. Welche Art von Masse will man denn in der Bilanz haben? Bei glazialhydrologischen Fragestellungen werden im Gegensatz zu Energiehaushaltsfragen Wasser im festen und flüssigen Zustand nicht getrennt behandelt. Beschäftigt man sich mit dem Fließverhalten von Gletschern will man unter Umständen auch die Schuttablagerungen darauf berücksichtigen. [Anonymous 1969]

Nach der direkte glaziologische Methode (oder direkte bzw. glaziologische Methode) wird durch ein möglichst repräsentatives Messnetz von Messpunkten die spezifische Massenbilanz bestimmt und anschließend über Extrapolation über die Gletscherfläche die mittlere spezifische Massenbilanz ermittelt. Sie ist jene Methode, bei der direkt auf dem Gletscher Messungen stattfinden. Die Methode wird in dieser Arbeit eingesetzt und deshalb in einem eigenen Unterkapitel 2.5 ausführlich erklärt.

Tabelle 2.1 Ausgewählte Methoden Massenbilanzbestimmung (nach Schöner 2003, Reisenhofer 2009)

Methode	Bemerkung
Direkte glaziologische Methode	Direkte Messung mittels Ablationspegel, Schneeschächten, Schneetiefensondierungen
Geodätische Methode	Berechnung der Volumensänderung mittels Fernerkundungsdaten, Radar- bzw. Lasersystemen
Hydrologische Methode	Berechnung mittels Niederschlag Evaporation und Abfluss im Gletscherinzugsgebiet
Indirekte Methode	Berechnung der Massenbilanz mittels AAR bzw. ELA
Physikalische und statistische Modelle	Berechnung auf Basis der Energiebilanz der Gletscheroberfläche Regressionsmodelle

2.1 Geodätische Methode

Höhenmodelle von Gletschern zu verschiedenen Zeitpunkten werden von einander abgezogen, um so eine Volumenveränderung zu bekommen. Dieser Volumendifferenz wird mit einer geschätzten Dichte multipliziert, um die Massenänderung zu erhalten.

In der vordigitalen Zeit sind die Höhenmodelle topographischer Karten verwendet worden. Die Volumina wurden mittels Kegelstumpfmethode nach Finsterwalder [1953] berechnet. Höhenmodelle bzw. Geländemodelle in digitalem Format können unterschiedliche Quellen haben. Diese können mit Laserscanner terrestrisch oder von der Luft aus aufgenommen werden. Radarmessungen aus Flugzeug oder von Satelliten eignen sich besonders gut für große Eisgebiete, wie in Grönland oder Antarktis [Schöner 2003]. Über analytische und digitale photogrammetrische Methoden lässt sich aus Luftbildern ein Höhenmodell ableiten [Bauder, Funk & Huss 2007, Koblet et al. 2010]. Kaufmann & Ladstädter [2004], Kajuutti et al. [2007] und Winkler et al. [2010] generieren digitale Geländemodelle bzw. Oberflächenmodelle über 3D-Modellierung von terrestrischen Fotoaufnahme. Desweiteren lassen sich ebenso aus digitalisierten topographischen Karten über räumliche Interpolation Höhenmodelle erstellen [Unger et al. 2012].

Berechnet man die Volumendifferenz von Höhenmodellen verschiedenen Jahres, so fehlt noch die Dichteinformation, um auf die Massendifferenz zu kommen. Bestimmte Satellitenmethoden ermöglichen auch die Erhebung von Dichtewerten, womit sich direkt die Massenänderung berechnen lässt [Böhm et al. 2007]. Liegen keine Dichtewerte vor – etwa über Erhebung mit der direkten Methode – so werden vereinfachte Annahmen über Schnee- bzw. Firndichte und Eisdichte getroffen.

Diese Dichteschätzung und schlechte Qualität von Fernerkundungsdaten führen zu Fehlern in der berechneten Massenbilanz. Thibert et al. [2008] und Zemp et al. [2010] beziehen in ihren Fehleranalysen auch die Unsicherheiten in der Erstellung der DGMs mit ein. Mit der geodätischen Methode lassen sich keine Aussagen über den Massenhaushalt auf Teilgebieten oder einzelnen Punkten des Gletschers treffen, da die Haushaltsgrößen von Akkumulation und Ablation nicht erfasst werden [Paterson 1994].

Cogley [2010] beobachtet, dass Massenbilanzmessungen über Fernerkundung – im speziellen mit Digitalen GeländeModellen (DGM) – mittlerweile schon für Gletscher in jeder Größe Routine sind und dass diese zunehmend an Wichtigkeit gewinnen werden. Diese Methode ist zwar mit Fehler behaftet, die aber im Vergleich zu anderen Methoden berechenbar sind [Huss, Bauder & Funk 2009, Cogley 2009].

2.2 Hydrologische Methode

Nach der hydrologischen Methode berechnet man die Nettomassenbilanz (b_n) eines Gletschers als Restglied der Wasserhaushaltsgleichung. Dabei steht P für den Niederschlag im Einzugsgebiet, R für den Abfluss und E für Verdunstung:

$$b_n = P - R - E \quad [3.1]$$

Dabei können keine höhenspezifischen Unterscheidungen gemacht werden, da sich die Größen auf das gesamte Einzugsgebiet beziehen. Die Verdunstung E ist im Vergleich zu den anderen Größen klein, und muss nicht notwendigerweise gemessen werden. [Schöner 2003]

2.3 Indirekte Methoden

Indirekte Methoden setzen eine Messreihe, die nach der direkten Methode erstellt worden ist, voraus. Die Entwicklung der mittleren spezifischen Massenbilanz $b(z)$ je Höhenzone über mehrere Jahre hinweg korreliert relativ gut mit der Entwicklung der mittleren Höhe der Gleichgewichtslinie (ELA). Die Massenbilanz $b(z)$ ist unterhalb der ELA negativ. Mit zunehmender Höhe geht diese gegen Null, bis zur ELA, und wird ab dieser positiv. Näherungsweise lässt sich die Massenbilanz anhand der ELA abschätzen. [Schöner 2003]

Desweiteren lässt sich mit dem Verhältnis Akkumulationsfläche S_c zur Gesamtfläche (AAR, siehe oben) die Massenbilanz indirekt bestimmen. Bei ausgeglichenen Haushalt alpiner Gletscher beträgt die AAR 0,6 bis 0,7. Bei bekannter Fläche des Akkumulationsgebiet lässt sich die Massenbilanz näherungsweise anhand der AAR bestimmen. [Schöner 2003]

Diese Methoden sind geeignet, um großflächige Abschätzungen der Massenbilanz von großen Gletschern mittels Luft- oder Satellitenbildern zu machen. Verschiedene Wege werden gesucht, die erforderliche Messreihe für diese Methode zu substituieren. Nach Dyurgerov [1996] kann die obligate Messzeitreihe durch Feldmessungen eines Sommers ersetzt werden. Braithwaite und Raper [2009] schätzen ELA aus Gletscherinventar-Daten wie maximale und minimale Seehöhe sowie Flächenmedian.

2.4 Physikalische und statistische Modelle

Massenbilanzmodellierungen beziehen sich unmittelbar auf die Energiebilanz eines Gletschers. Der Massenhaushalt wird dabei aus Klimadaten berechnet. Parameter wie Lufttemperatur, Niederschlag, Windstärke und -richtung sowie Sonnenscheindauer usw. spielen dabei eine Rolle. Oft sind diese Daten für Gletscher nicht erhältlich und müssen geschätzt bzw. über andere Modelle erstellt werden. Ein Massenbilanzmodell, dass das Wettergeschehen in Nettomassenverlust oder -gewinn auf der Gletscheroberfläche berechnet, braucht eine profunde meteorologische Theoriebasis. [Oerlemans 2001]

Laut Ohmura [2001] lässt sich die Energiebilanz sehr gut durch die Lufttemperatur parametrisieren. Einer der einfacheren Modellierungsansätze ist demnach das Grad-Tag-Modell, bei dem die Abschmelzrate in Beziehung zur Lufttemperatur gestellt wird [Knight 1999]. Regressionsmodelle basieren auf Extrapolation von empirischen Daten zwischen Massenbilanz und Klimaparametern in Zeiten ohne glaziologische Aufzeichnung [Schöner & Böhm 2007].

2.5 Direkte Methode

Die direkte oder glaziologische Methode beruht in-situ Messungen auf dem Gletscher. [Kasser, Fountain & Jansson 2003] Dabei werden punktuell Daten über die Ablation und Akkumulation aufgenommen, die jeweils andere Techniken der Erhebung erfordern (siehe unten). Diese Punktinformation wird anschließend auf die ganze Gletscherfläche übertragen. Das erreicht man über das Zeichnen von Konturlinien und Bilden von Wertefeldern. Diese werden mit dem Planimeter abgemessen, um die Flächen dieser Wertfelder zu erhalten und aufzusummieren, womit man die Gesamtmassenbilanz des Gletschers erhält (Kegelstumpfmethode nach Finsterwalder [1953]. Eine eigene Methode ist die Index-Stake-Methode, wo nur anhand von einem oder weniger Pegel zusammen mit einer Flächen-Höhen-Verteilung die Massenbilanz berechnet wird.

Ein anderer Weg ist das Interpolieren und Extrapolieren der Punktwerte über die Gletscherfläche mit einer Interpolationsmethode in einem GIS oder einer anderen Software. Damit hat jeder Punkt am Gletscher eine Massenbilanz (punktuelle Massenbilanz). Diese Punkte werden für Gesamtmassenbilanz einfach aufsummiert.

Interpolationsmethode

Eine Interpolation ist ein Schätzverfahren zwischen zwei oder mehr Punkten, also innerhalb eines gesicherten Bereichs. Unter Extrapolation versteht man die Schätzung von Werten über einen gesicherten Bereich hinaus. Die geschätzten Werte befinden sich nicht zwischen gesicherten/gemessenen Werten. Beide Schätzverfahren werden bei einer Interpolationsmethode berücksichtigt. Wird also in dieser Arbeit von einer Interpolation im Zusammenhang mit der Massenbilanzerhebung gesprochen, so ist dabei die Extrapolation mit inbegriffen und umgekehrt.

Punktinformation

Wo genau die Punktinformation erhoben werden soll, nach welchem Konzept und welcher Anordnung, sind wichtige Fragen bei der Erstellung eines Pegelnetzes. Grundsätzlich sollen die Pegel homogen über die Fläche verteilt sei, um ein besonders repräsentatives Bild der Massenänderung an der Gletscheroberfläche zu bekommen. Zu berücksichtigen ist auch, dass es durch Konturlinienzeichnen oder Interpolieren zu keinen größeren oder kleineren punktuellen Massenbilanzwerten kommen kann. Die Bereiche des Gletschers, wo ein Maximum und Minimum zu erwarten sind, müssen also bei der Messung erfasst werden. [Østrem & Brugman 1991]

Flächeninformation

Die für die Auswertung verwendeten Gletscherflächen stammen Großteils von Orthofotos und DGMs. In einem GIS werden die Gletscherumrisse digital nachgezeichnet. Gletscherränder sind oft von Schutt bedeckt, was es oft schwierig macht, diese vom Gletscherumfeld abzugrenzen. Durch Verschneidung von DGMs bekommt man eine Differenzfläche, die auch die Höhenänderung an den Schuttbedeckten Rändern wiedergibt (Abb. 2.1), was eine Unterscheidung erleichtert [Abermann et al. 2010] . Orthofotos und DGMs sind nicht jährlich verfügbar, was dazu führt, dass nicht immer eine aktuelle Gletscherfläche zur Verfügung steht, und man dazu gezwungen ist, das aktuellste wieder zu verwenden.

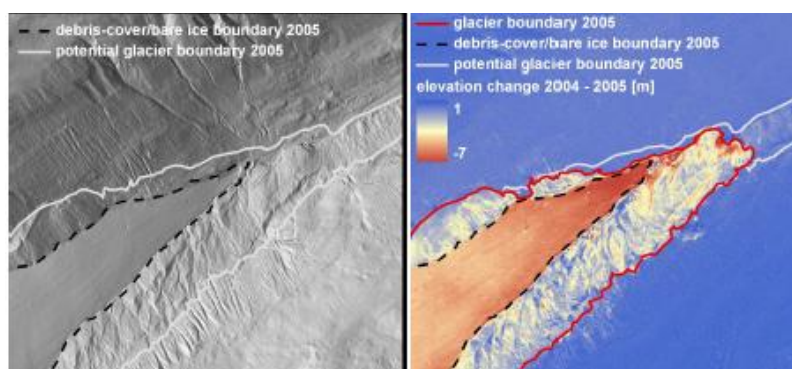


Abbildung.2.1 Abgrenzung Schuttbedeckter Gletscherränder zum Gletscherumfeld [Abermann et al 2011]

Die digitalisierte Gletscherfläche entspricht nicht der realen Gletscherfläche. Diese ist Abhängig von der Hangneigung. Bei Gletschern in sehr steilem Gelände, wird die Gletscherfläche bei einer Luftaufnahme kleiner dargestellt. Die Massenbilanz nach der direkten Methode ist so definiert, dass man für die Auswertung eine projizierte Fläche verwendet und nicht die reale Fläche. Die Oberflächenveränderung wird also vertikal gemessen und nicht normal. Die Vernachlässigung des steilen Gebietes ist ein Konsens in der Scientific Community. Es sei nämlich weniger einfach in steilem Gelände Messungen durchzuführen [Meier 1962]. Die wahre Oberfläche erhält man, indem man die Fläche mit ihrem Neigungswinkel multipliziert.

Oberflächenmassenbilanz

Der Großteil des Massenumsatzes auf einem Gletscher findet auf der Oberfläche bzw. in der Schneeschicht über dem Eis statt. Wasser, das in die Eisschicht perkoliert und gefriert (interne Akkumulation, Abb. 1.1), wird bei der direkten Methode nicht mitberücksichtigt, genauso wenig wie Änderungen in der Massenbilanz, die basal bzw. subglazial stattfinden. Wasser das beim Durchsickern durch die Schneeschicht an der Eisoberfläche gefriert (superimposed ice) wird bei der Aufnahme eines Schneeprofiles sehr wohl berücksichtigt. Bei der Messung nach der direkten Methode steht die Gletscheroberfläche im Mittelpunkt. [Knight 1999]

Messzeitpunkt

Für die Erstellung der Jahresbilanz nach der direkten Methode finden Feldmessungen zum Ablationsmaximum, also gegen Ende der Ablationszeit und damit des Haushaltsjahres statt. Die Winterbilanzmessungen finden im Frühjahr statt, zur Zeit des Akkumulationsmaximums. Die Winterbilanzmessungen sind relativ aufwendig. Es müssen repräsentativ Profile gegraben werden, um die Schneedichte messen zu können. Dazu werden mit Lawinenstangen bzw. Georadar die Schneehöhe aufgenommen, die wesentlich heterogener verteilt. Die Messungen im Herbst sind weniger Arbeitsaufwendig. Die Schneelinie wird mit einem GPS abgegangen und die Ablationspegel sind abzumessen. [Böhm et al. 2007]

Sehr detaillierte Ausführungen über die direkte Methode findet man in Østrem & Brugman [1991], Kaser, Fountain & Jansson [2003] sowie Hubbard & Glasser [2005]. Im Wesentlichen geht es bei der direkten Methode darum, punktuelle Massenbilanzen, die an verschiedenen

Stellen des Gletschers gemessen worden sind, auf die Fläche zu bringen. Die aufgenommenen Punkte unterscheiden sich in ihrer Qualität. Im Folgenden werden diese mit ihrer Erhebungsmethode dargestellt:

2.5.1 Ablationspegel

Ablationspegel werden mit Hilfe eines Dampfbohrers in das Eis eingebracht. Durch Abmessen des herausragenden Ende zu Beginn und Ende des Haushaltsjahres wird die Höhe des abgeschmolzenen Eises festgestellt. Diese wird mit der Dichte von Eis (900 kg/m^3) multipliziert und man erhält den Wasserwert der weggeschmolzenen Masse [Østrem & Brugman 1991]. Droht der Pegel bis zum nächsten Messtermin auszuapern, wird dieser mit einem Dampfbohrer (z. B. Heucke 1999) nachgebohrt.

2.5.2 Snowline

Zu den Feldbegehungen im Herbst (Jahresbilanzmessungen) lässt sich der Gletscher leicht in Ablations- und Akkumulationsgebiet einteilen, da man davon ausgeht, dass dort wo noch Schnee vorhanden ist, der Massenzuwachs in dem Haushaltsjahr überwogen hat. Das gilt für temperierte Gletscher der in den mittleren Breiten. Geht man mit einem GPS diese Schneegrenze ab, so bekommt man Punktdaten, an denen die Massenbilanz Null ist. Über weite Höhenbereiche hat die Gleichgewichtslinie einen unzusammenhängenden Verlauf. [Cogley et al. 2011]

2.5.3 Schneeprofil

Durch Graben eines Schneeprofiles/Schneeschaters kann man die Massenakkumulation an einem Punkt am Gletscher feststellen. Es wird bis zum Horizont des Vorjahres (Jahresbilanzmessung) bzw. der letzten Sommeroberfläche (Winterbilanzmessung) gegraben. Aufgrund von Verfärbungen durch Staubablagerungen der letzten Ausaperung sind diese identifizierbar. Größere Härte und Verdichtung sind ebenso Anzeichen für den Vorjahrshorizont. Unmittelbar darüber befindet sich ein Horizont, der aus dem Niederschlag von Herbst und Frühwinter besteht. In diesem haben sich Becherkristalle gebildet.

Hat die Akkumulation der nächsten Periode schon vor Ende des Haushaltsjahres eingesetzt, so liegt der Horizont zu tief, da dieser Akkumulation der Vorperiode beinhaltet. [Kaser, Fountain & Jansson 2003] Nach fixed-date-system wird die Akkumulation dazu gezählt, nach stratigraphic system nicht.

An der Gletscheroberfläche bildet sich oft Schmelzwasser, das durch die Schneeschichten durchsickert und an der Eisoberfläche wieder gefriert. Diese bildet dort eine weitere Eisschicht (superimposed ice), die zur Akkumulation dazugerechnet werden muss. Erkennbar ist die neue Eisschicht durch eine andere Struktur als das darunterliegende. Wasser kann auch in die Eisoberfläche eindringen und erst dort gefrieren (interne Akkumulation). Østrem & Brugman [1991] schreiben, dass der Betrag der internen Akkumulation vernachlässigbar gering ist.

Ein Dichteprofil wird an der Schachtwand angelegt. Dafür wird mit einem genormten Stahlzylinder von der Oberfläche bis zum Vorjahreshorizont Schneeproben entnommen und abgewogen (Abbildung 2.2). Nebenbei wird noch Temperatur und Schichtung (nach Kristallstruktur) aufgenommen. Man spricht von einer Null-Grad-Isothermie, wenn das Profil durchgehend 0° C aufweist. Ist das der Fall, so muss man mit einem Abschmelzverlust rechnen bzw. hat die Schneedecke dann einen Wasseranteil, was die Dichte erhöht. Mit der Dichteinformation und der Tiefe des Schachtes lässt sich die Massenänderung und damit eine punktuelle Massenbilanz berechnen. [Kaser, Fountain & Jansson 2003]

Schneeschnäbchen sind relativ Arbeitsaufwändig und werden deshalb nur an ausgewählten Positionen angelegt, die sich bei den Winterbilanzmessungen in der Nähe der (eingeschneiten) Schneepegel befinden. Für den Goldbergkees (etwa 1,5 km² groß) sind es etwa 8 Profile, was ausreicht, um die räumlich relativ homogen verteilte Schneedichte zu erfassen. [Böhm u.a. 2007]

Anstatt ein Profil zu graben, kann auch ein Snowsampler verwendet werden. Das ist ein auf bis zu mehreren Metern mit Teilstücken verlängerbares Rohr aus Aluminium oder Kunst-

stoff; oft mit einem Schneidekopf versehen. Damit werden Schneekerne gebohrt und für die Schneedichtemessung ausgewogen. [Schöner 2003]



Abbildung 2.2 Rainer Unger beim Auswiegen einer Schneeprobe

2.5.4 Schneesondierung

Durch Sondieren mit Lawinenstangen erhält man relativ rasch die Schneetiefe bis zum Vorjahreshorizont. Des Öfteren stößt man auf Eislinsen, die ab einer bestimmten Tiefe mit dem Vorjahreshorizont zu verwechseln sind. Im Gegensatz zum Schneeprofil bekommt man von einer Sondierung nur Information über die Schneetiefe. Die Dichte wird entweder vom nächsten Schacht verwendet oder über mehrere Schächte hin interpoliert. Schneehöhen variieren stärker als Schneedichten, weshalb man viele Sondierungen durchführt – bis über hundert an den Gletschern der Goldberggruppe im jeweiligen Abstand von etwa 100 m zueinander. Die Schneehöhe hängt nicht so sehr von der Seehöhe ab. [Hynek & Kroisleitner 2008]

2.5.5 Georadar (Ground Penetrating Radar, GPR)

Mithilfe eines Georadars lassen sich Schneetiefen noch schneller aufnehmen als durch Sondierungen. Dabei wird die Radarantenne auf einer Kunststoffrodel über den Gletscher gezogen (Abb. 2.3). Das System detektiert Veränderungen der dielektrischen Eigenschaften des Untergrundes, und misst die Tiefe in der Schnee an Eis angrenzt. Durch Stichproben-Sondieren nebenher lassen sich die Radarergebnisse gut überprüfen. Bis zu 500 Punkte werden mit dem Georadar bei den Winterbilanzmessungen aufgenommen. [Hynek & Kroisleitner 2008]



Abbildung 2.3 Bernhard Hynek mit Georadarausstattung

2.5.6 Schneehöhenmessung über Ultraschall

Die Schneehöhe lässt sich auch gut und kosteneffizient mit Ultraschall messen [Keeler & Brugger 2012]. An automatischen Wetterstationen (AWS) werden Ultraschallmessgeräte angebracht, um in regelmäßigen Abständen Informationen über die Schwankungen in der Schneedecke zu bekommen [Dadic, Corripio & Burlando 2008,]. Auf der Fleißcharte zwischen Goldbergkees und Kleinfleißkees steht eine AWS mit automatischer Schneehöhenmessung mit Ultraschall. Die Werte sind aber nicht immer verlässlich [Hynek via Email].

2.5.7 Stützstellen (künstliche Punktwerte)

Bestimmte Gegebenheiten (Abschattung, Bach, Lawine) werden durch die aufgenommenen Punkte nicht erfasst. Bestimmte Stellen am Gletscher sind oft auch zu steil oder zu schlecht zu erreichen, um Messungen dort vornehmen zu können. Deshalb werden künstliche Punkte gesetzt, die eine Bilanzänderung in diesen Bereichen repräsentieren. Diese Schätzung basiert auf die Erfahrung des Auswertenden (educated guess). Solche Stützstellen dienen auch dazu die Punktdichte für die Interpolation zu erhöhen.

Punkteverwertung

Die über GPS aufgenommenen Koordinaten der Messpunkte sind leicht in ein Geographisches Informationssystem (GIS) oder anderes Programm einzulesen. Über (digitales) Konturlinienzeichnen oder Anwenden einer Interpolationsroutine werden die Punktwerte auf die gesamte Gletscherfläche übertragen. Gletscher-Maßzahlen wie Bilanzvolumen (B), Nettoakkumulation und -ablation (B_c , B_a), Akkumulationsfläche (S_c), Ablationsfläche (S_a), AAR und spezifische Massenbilanzen können berechnet werden. Mithilfe eines möglichst aktuellen DGMs lassen sich die ELA sowie die Akkumulations- und Ablationsflächen in Höhenstufen einteilen sowie spezifischen Bilanzen (b) nach Höhenstufen erstellen.

Bei der Messung der Winterbilanz im Frühjahr werden im wesentlichen Erhebungsmethoden zur Akkumulationsmessung verwendet. Diese sind Schneeprofile, Schneesondierungen und Georadarmessungen. Für die Jahresbilanz-Messungen im Herbst zum Ablationsmaximum liest man Ablationspegel ab und geht die Schneelinie ab. [Cogley et al. 2011]

Direkte Methode vs. geodätische Methode

Die räumliche Verteilung der Punkte bei der direkten Methode hat eine geringere Informationsdichte als die Verwendung von Geländemodellen bei der geodätischen Methode. Die räumliche Auflösung ist bei letzterer besser. Dafür hat man eine geringere zeitliche Auflösung in der geodätischen Methode. Veränderungen auf der Gletscheroberfläche werden bei der direkten Methode durch Winterbilanzmessungen und monatlichen Sommerbegehungen (Ablationspegel ablesen und nachbohren, Fließgeschwindigkeitsmessung) miterfasst. Die Kombination beider Methoden und somit von guter räumlicher und zeitlicher Auflösung ist

noch in der Entwicklungsphase benötigt noch beträchtlichen Arbeitsaufwand [Cogley 2009]. Die Varianz in den Ergebnissen ist noch zu hoch [Thibert & Vincent 2009, Fischer 2011].

2.6 Warum sind Massenbilanzerhebungen wichtig?

In der aktuellen Klimadiskussion spielen Gletscher eine wichtige Rolle [Kuttler 2009]. Zum einen haben diese einen nicht unwesentlichen Einfluss im Wasserhaushalt und wirken direkt auf die Flusshydrologie [Østrem & Brugman 1991]. Änderungen in der Speicherkapazität und im Ablationsregime können sich verschieden auf Mensch und Infrastruktur auswirken. Zum anderen lässt sich an Gletschern – insbesondere über die Massenbilanz – zeigen, wie sehr sich ein Klimaregime im Wandel befindet [Ohmura et al. 2007].

2.6.1 Einfluss auf Mensch und Infrastruktur bei wandelndem Klima

Betrachtet man Gletscher in einer Wasserhaushaltsformel, so sind Gletscher vor allem ein Speicher. Sie nehmen bei starken Niederschlägen Wasser auf und geben diesen verzögert in niederschlagsarmen Perioden wieder ab. Hat ein Fluss ein Einzugsgebiet mit großen Gletscherflächen, so sind die Abweichungen zwischen sommerlichen Abflusshoch und jährlichen Abflussmittel gering. Kläranlagen, Wasserkraftwerke und Binnenschifffahrt sind von einem Soll-Wasserstand abhängig. Wissen über das Schmelzregimes eines Gletschers ist eine wichtige Voraussetzung für umfangreiches Nutzungs- und Risikomanagement [Barnett et al. 2005].

Laut Brandstetter [2011] wird in Österreich mit keinen klimatischen Änderungen gerechnet. Eine laufende Beobachtung des Wasserhaushalts sei jedoch wichtig, um auf Veränderungen rechtzeitig reagieren zu können. Hydrologische Simulationen zeigen für bestimmte regionale Wasserkreisläufe starke Änderungen [Alpenkonvention 2009,], womit auch wirtschaftlichen Konsequenzen verbunden sind: Fischer et al. [2011] schreiben von kleineren Gletscherflächen für die Gletscherschgebiete und kürzeren Schisaisonen. Für die Energiegewinnung mittels Wasserkraft wird sowohl für die Schweiz [Nantel & Agrawala 2007, Schaepli et al. 2007] als auch für Österreich [Stanzel und Nachtnebel 2010] mit einer Abnahme für das 21. Jahrhundert. Für die Schweiz spielt die Abnahme der Eisschmelze eine größere Rolle. In Öster-

reich kann die Gletscherschmelze (die insbesondere in trocken-heißen Sommern von Bedeutung ist) bis 2040/50 eher noch zunehmen [Kuhn et al. 2009].

Gletscher als Risikoquelle für Mensch und Infrastruktur wird noch nicht so lange breit diskutiert [zB Richardson & Reynolds 2000]. In den Gebirgen Zentralasiens, zum Beispiel, wird bei zunehmenden Gletscherschwund die Wasserversorgung zum Problem; werden doch die größten Flüsse aus diesem Gebiet gespeist [Barnett et al. 2005]. Extremereignisse wie z.B. Gletscherseeausbrüche oder rasche Gletschervorstöße (glacier surges) spielen in dicht besiedelten Tälern eine Rolle [Richardson & Reynolds 2000, Mayer et al. 2011]. Nicht nur beim Risikomanagement, sondern auch in Sachen wirtschaftlicher, ökologischer und zukünftiger Wasser- und Energieversorgung ist die Politik gefordert [Jetté-Nantel & Agrawala 2007, Alpenkonvention 2009, Giddens 2011, opendemocracy 2012].

Nach dem Rückzug der Gletscher steht durch die Moränen viel leicht zu mobilisierendes Material der Moränen für Muren und Lawinen (zB in Erdbeben-gefährdeten Gebieten) zur Verfügung. Gleiches gilt für vulkanische Ablagerungen, die durch Gletscherschmelzen – z.B. durch vulkanische Aktivität – rasch mobilisiert werden und als Feststoffe im Abfluss gefährliche Naturereignisse bilden. [Knight 1999]

Meier [1984] zeigte Beachtung dafür, dass Gletscher nicht nur teil des Wasserhaushalts in deren Einzugsgebiete sind, sondern auch für das Meer. Laut IPCC-Bericht 2007 tragen das Abschmelzen von Eiskappen und Gletscher deutlich zum Meeresspiegelanstieg bei. Und dieser Prozess findet in jüngeren Jahren verstärkt statt [Oerlemans 2001].

2.6.2 Gletschermassenbilanz als Klimaindikator

Klima und Gletscher haben eine sehr komplexe Wechselwirkungsbeziehung zueinander. Zum einen steuern klimatische Parameter wie Lufttemperatur, Niederschlag oder Strahlung die Gletscherentwicklung (tabelle 2.4), zum anderen haben große Eisflächen über ihre Albedo Einfluss auf das Globalklima [Knight 1999]. Variationen in der Massenbilanzzeitreihe korrelieren hoch mit Temperatur- und Niederschlagsschwankungen. Deshalb lassen sich Klimaänderungen aus Massenbilanzzeitreihen ablesen [Kapilo 2009]. Gletscher in gemäßigtem und

feuchtem Klimaregime haben einen höheren Massenumsatz und sind deshalb anfälliger auf Klimaänderungen. Je kleiner der Gletscher, umso schneller reagiert dieser auf eine Änderung im Input [Knight 1999].

In Zeiten der Klimadiskussion spielen Gletschergebiete nicht nur eine wichtige Rolle im globalen Umweltwandel (IPCC 2007), sondern sind auch Anzeiger für atmosphärische Umstellungen [Kaser et al. 2006, Cogley 2009, Zemp et al. 2006]. Eine Verschiebung oder Veränderung in klimatischen Prozessen spiegelt sich in der Veränderung von Akkumulation oder Ablation auf jedem beliebigen Punkt auf einem Gletscher wieder [Ohmura et al. 2007]. Längenänderungen sind hingegen weniger gute Klimazeiger [Böhm et al. 2011].

Gletscher sind interessante Untersuchungsgebiete für meteorologische Studien. Auch wenn man nicht an Massenbilanzen oder Klimawandel interessiert ist, sind meteorologische Studien am Gletscher spannend, da es öfter zu extremen Wettersituationen kommt. Es besteht eine starke Kopplung zwischen Oberflächenabschmelzen und Albedo, was die Oberflächenprozesse sehr dynamisch macht [Oerlemans 2001].

Tabelle 2.2 Gletschermassenbilanz beeinflussende Faktoren [Karpilo 2009 nach Knight 1999]

<u>Glacier controls</u>	<u>Conditions favoring glacier development</u>
<u>Climatic Conditions</u>	
Precipitation	High and winter dominated
Temperature	Low annual mean and low summer mean
Insolation	Low
Wind	Low
Humidity	High
<u>Physical Conditions</u>	
Elevation	Predominately high
Gradient	Low
Latitude	High
Continentality	Maritime
Aspect	Poleward and leeward
Accumulation character	Large area and prone to avalanches
Termination character	Not terminating in water or cliffs
Landslides/debris-cover	Frequent landslides and highly debris-covered
Geothermal heat	Low

In Tabelle 2.4 sieht man, dass nicht nur klimatische Größen Einfluss auf die Masse des Gletschers nimmt. Die räumliche Lage und Seehöhe sowie Neigung und Ausrichtung spielen eine wichtige Rolle. Für den zu erwartenden Rückzug einzelner Gletscher bestehen Unsicherheiten, da Faktoren wie die Schuttbedeckung, Anpassungszeiten der Gletscher, Eisdickenverteilung, Gletscherbewegung und anderes nicht hinreichend bekannt sind [Zemp, Hoelzle & Haeberli. 2009]. Nicht-klimatische Einflüsse sind in der Massenbilanz mit enthalten. Die klimatischen Einflüsse überwiegen jedoch über die nicht-klimatischen [Karpilo 2009].

Referenzoberflächen-Massenbilanz

Anhand von sogenannten Referenzoberflächen-Massenbilanzen kann man das Klimasignal besser abbilden als in konventionellen Massenbilanzen [Elsberg et al. 2001, Harrison et al. 2009]. Eine Referenzoberflächen-Massenbilanz bezieht sich immer auf eine Gletscherfläche in der Vergangenheit, meistens die erste Fläche seit Beginn des Monitorings, oder aber auch jene Fläche in bester Qualität. Die konventionelle Massenbilanz wird mit jährlich aktualisierten Gletscherumrissen berechnet. Für gewöhnlich hat man in einer Massenbilanzzeitreihe sowohl die eine als auch die andere, weil nicht jährlich neue Gletscherumrisse verfügbar sind.

Referenzoberflächen-Zeitreihen korrelieren besser mit Klimazeitreihen als konventionelle. Letztere beinhalten aber die tatsächliche Wassermenge, die in einem Haushaltsjahr gespeichert oder abgegeben worden ist [Harrison et al. 2005], was für Wasserhaushaltserhebungen wichtiger ist. Huss et al. [2012] berechnen für ihre Untersuchungsgletscher einen Langzeit-Negativtrend in den Referenzoberflächen-Massenbilanzen. Das Klimasignal wird auch in konventionellen Massenbilanzen gezeigt, der Langzeit-Negativtrend allerdings unterschätzt.

World Glacier Monitoring Service (WGMS)

Für globale Klima-Gletscher-Studien – z.B. zum Thema Meeresspiegelanstieg aus schrumpfender Kryosphäre [z. B. Hock et al. 2009] – werden Daten über das World Glacier Monitoring Service gesammelt. Forschungseinrichtungen (z.B. ZAMG) schicken ihre neuen Gletscherdaten, Massenbilanzanalysen und weitere Gletscherkenngrößen aus ihren Monitorings ein. Um die Daten zu homogenisieren und Fehler herauszuarbeiten, ist ein Jahr Zeit. Alle

zwei und fünf Jahre wird vom WGMS ein Bericht über Gesundheitszustand und Änderungen in der Verbreitung herausgegeben. [wgms.ch]

Die Anzahl der gemessenen Gletscher ist im Vergleich zur Gesamtzahl sehr klein und die Datenqualität ist oft verbesserungswürdig. Deshalb ist das WGMS besonders bemüht, dass Monitoringsysteme erhalten bleiben oder wieder aufgenommen werden, um lange Zeitreihen zu erhalten. Angestrebt ist auch die Ausweitung der Messungen – vor allem auf der Südhalbkugel, wo weit weniger Gletscher monitort werden [Braithwaite 2009]. Um eine Ausweitung zu vereinfachen, wird versucht, bestehende Methoden [z.B. Kulkarni 1992] und Modelle zu verbessern und zu verknüpfen [Braithwaite & Raper 2009, Carturan, Cazorzi & Dalla Fontana 2009, Kuhn et al. 2009, Paul, Frey & LeBris 2011, Huss 2012].

Ein wesentlicher Beitrag zur Erfassung von Unsicherheiten in den Methoden ist die Suche und Quantifizierung von Fehlern. Elsberg et al. [2001] schreiben:

“We believe that the first priority of mass-balance programs should be to understand and control the large systematic errors that seem to plague most glacier-wide balance estimates made by glaciologic methods.”

3 Fehlersuche bei der Massenbilanzerhebung

Wenn man sich mit Fehlern bei der Erstellung von Gletschermassenbilanzen nach der direkten Methode auseinandersetzen will, sieht man sich zunächst die Konzeption der Massenbilanz nach der direkten Methode an. Welche Prozesse werden berücksichtigt, welche ausgeblendet? Die direkte Methode erfasst die Massenveränderung an der Gletscheroberfläche zwischen zwei definierten Zeitpunkten. Die Masse der Schneedecke samt superimposed ice (Schmelzwasser, das an der Oberfläche der Eisschicht gefriert) wird gemessen. Was sich an Masse im Inneren des Gletschers verändert hat – sprich interne Akkumulation oder Ablation – oder am Gletscheruntergrund (subglazial oder basal), wird nicht mit einbezogen. [Knight 1999]

Des Weiteren sieht man sich die Vorgehensweise der Massenbilanzauswertung an. Es geht darum, gemessene Punktinformation über eine Interpolationsmethode auf eine Fläche zu bringen. In jeder dieser drei Faktoren Punkt, Methode und Fläche finden sich Unsicherheiten, die unberücksichtigt zu unerwünschten Ergebnissen führen können.

In Tabelle 3.1 sind Unsicherheiten und Fehler aus Punkt, Fläche und Methode sowie andere aufgelistet. Unterteilt werden sie in solche, die sich innerhalb des Rahmens der direkten Methode befinden, außerhalb des Rahmens und im Graubereich dazwischen. Fehler stehen in dieser Arbeit für unvollständige Ausführung der Methode um auf das gewünschte/definierte Ergebnis zu kommen und Mängel in der Datenqualität. Unsicherheiten spiegeln Entscheidungen in der Ausführung wieder, wo man wählen kann, wie das Ergebnis aussehen soll. Diese Tabelle zeigt also auch Unsicherheiten, die zwar nicht Teil der Methode sind aber nicht weggelassen werden dürfen, wenn man bemüht ist möglichst viele Prozesse und Informationen in der Massenbilanz zu berücksichtigen. In diesem Kapitel werden diese Fehler und Unsicherheiten der Tabelle nach der Reihe beschrieben, um dann im folgenden Kapitel 4 über die Möglichkeiten ihrer Quantifizierung zu diskutieren.

Tabelle 3.1 Einteilung der Unsicherheiten in der direkten Methode in Punkt, Fläche, Interpolation und Anderes

	Anderes	Punkt	Fläche	Interpolation
im Konzept	Zeitsystem	Feldfehler	Aktualität	ver. Methoden
		Muster		ver. Varianten
		Dichte		
		lok. Unterschiede		
		Qualität		
außerhalb	Flux Divergence	Expertknow. (pts)	Expertknow. (int)	
	int. Bilanz	Wahre Fläche		
	bas. Bilanz			

3.1 Unsicherheiten in Punktdaten:

Um die aufgenommenen Punktdaten auf Konsistenz und Homogenität zu prüfen, bedarf es oft erst der Messdaten des darauffolgenden Jahres. Man erkennt dann erst, dass bestimmte Messwerte nicht richtig geschätzt sein können. Ausreißer und Punktwerte, die unlogisch scheinen, werden entfernt. Daten homogenisieren ist Teil der Qualitätssicherung aber nur ein kleiner Teil in der Fehleranalyse.

3.1.1 Feldfehler

Bei jeder Art der Messung im Feld spielen Fehler eine Rolle. Über Sondierungen und Schneeschächte wird die dazugekommene Schneehöhe seit der letzten Sommeroberfläche erfasst. Ist diese schwach ausgeprägt gewesen, so erschwert dies die Identifizierung bei den Sondierungsarbeiten. War die letzte Sommeroberfläche an einem bestimmten Punkt Eis, ist der Fehler relativ gering. Wobei auch große Eislinsen hinderlich bei der Identifikation sein können. War Firn die letzte Sommeroberfläche, so ist die Fehlerwahrscheinlichkeit größer, da dieser – wie gesagt, in schwach ausgeprägten Sommern – ebenso einfach zu durchdringen

sind wie Schnee. In besonders hohen Schneedecken ist die Messung Fehleranfälliger als in dünneren [Østrem und Haakensen 1999].

Bei Schneeschächten ist neben der Horizontidentifizierung und Mitaufnahme von superimposed ice auch die Temperaturmessung wichtig. Diese gibt an, ob man mit einem Wasseranteil in der Schneedecke rechnen muss. Wasser hat eine höhere Dichte als Schnee und Eis [Thibert et al. 2008].

Pegel können im Ablationsgebiet (Ablationspegel) oder im Akkumulationsgebiet (Schneepegel) positioniert sein. Im Akkumulationsgebiet können diese Pegel im Firn einsinken, was zu einer Überschätzung der Akkumulation führen kann [Jansson 1999]. Auch Pegel im Ablationsgebiet können in einer Spalte enden, was ebenso zu einer Abweichung beim Abmessen führen kann. Für Pegel im Akkumulationsgebiet wird ein Fehler von $\pm 0,3$ m w.e. geschätzt. Pegel im Ablationsgebiet werden mit einem Fehler von $\pm 0,1$ m w.e. bewertet [Müller & Kappenberger 1991, Huss, Bauder & Funk 2009].

3.1.2 Punktdichte

Für die Auswertung mit einer Interpolationsroutine ist eine möglichst hohe Punktdichte wünschenswert. Besonders der Anteil von Schneeschächten und Ablationspegel sind wichtig [Fischer 2011], da diese ohne weitere Schätzung punktuelle Massenbilanzen darstellen. Nur sind Ablationspegel nicht immer auffindbar bei der Feldbegehung. Diese können noch unter einer Schneeschicht begraben sein (Abb. 2.13). Oder aber, wie es beim Wurtenkees der Fall ist, sind diese bei Präparierungsarbeiten des Gletscherschigebiets zum Opfer gefallen [Hynek 2004].

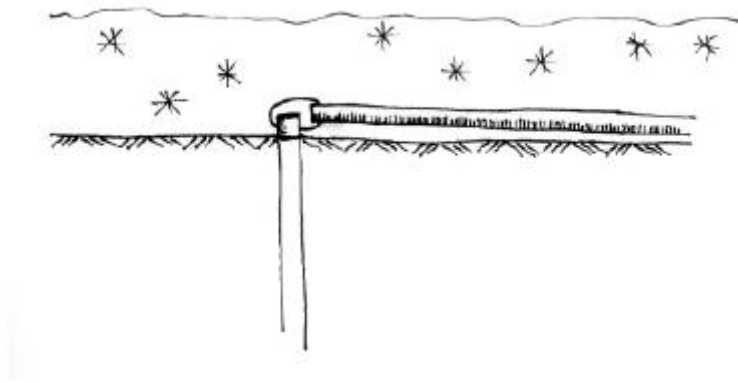


Abbildung 3.1 Einschneider Messpegel [Kaser, Fountain & Vecchia 2003]

3.1.3 Punktmuster

Sind weniger Punkte verfügbar leidet nicht nur die Punktdichte darunter, sondern auch das Messnetzmuster wird verändert. Durch Prüfen der räumlichen Autokorrelation und Nearest-Neighbourhood-Analyse lässt sich feststellen, ob die Punkte eines Gletschers homogen verteilt oder geclustert sind (Abb. 3.2). Letzteres fordert eine höhere Punktdichte, um auf ein gleichgutes Ergebnis zu kommen [Albrecht 2007]. Also je homogener die Verteilung, desto weniger Punkte werden gebraucht. Cogley [1999] schreibt, dass man auf kein gutes Ergebnis kommt, wenn zu wenige Punkte zur Verfügung stehen oder zu weit auseinander liegen.

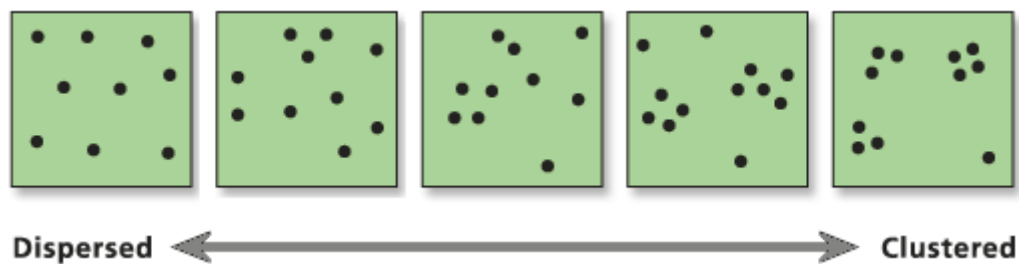


Abbildung 3.2 Homogen verteilte Punkte bis Punktcluster (esri.com)

3.1.4 Lokale Unterschiede

Messpegel können auch ganz nahe beinander liegen und aufgrund von Schneeverwehungen oder anderen Gegebenheiten unterschiedliche Akkumulationswerte aufweisen. Huss, Bauder & Funk (2009) haben auf zwei Gletschern Pegel die entweder 50m oder 5 Höhenmeter voneinander entfernt sind verglichen und sind auf Abweichungen von $\pm 0,3$ m w.e. und $\pm 0,54$ m w.e. gekommen. Beim Interpolationsprozess kann es durch solche nahen Un-

terschiede zu starken Ausprägungen von Gradienten auf der Oberfläche kommen, die man als erfahrener Glaziologe vielleicht kleiner eingeschätzt hätte.

3.1.5 Punktqualität

Die wichtigsten Punkte sind Ablationspegel (ablation stake, AST, wooden stake WST) und Schneeschächte (snowpit, PIT). Eine Pegel- oder Schachtmessung bringt ohne weitere Messungen oder Annahmen eine punktuelle Massenbilanz, also eine Veränderung der Masse der Gletscheroberfläche innerhalb eines definierten Zeitraums. Bei ihrer Aufnahme erhalten diese Punkte einen Dichtewert (ρ), einen Niveauänderungswert (h) sowie räumliche Koordinaten (xy) Tabelle 3.2. Die Schneelinie (snow line, SLI) die auf der Sommeroberfläche mit dem GPS abgegangen wird, spiegelt unter der Annahme, dass darunter kein superimposed ice ist, eine ausgeglichene punktuelle Massenbilanz wieder.

Tabelle 3.2 Einteilung der Punktwerte nach Informationsqualität (Beschreibung im Text)

ρ	h	xy	Punktart	KI
x	x	x	PIT, AST, WST, SLI	A
-	x	x	PRO, GPR, ULT	B
-	-	-	STS	C

Ultraschallhöhenmessungen (ULT), Sondierungen (probe, PRO) und Georadar-Punkte (GPR) wird ein Dichtewert zugewiesen. Das erfolgt an der ZAMG durch Interpolation von Schneeschächten auf diese Punkte ohne Dichtewert. Das sei besser als einfach den Dichtewert des nächsten Schachtes zu nehmen, auch wenn die Schneedichte relativ homogen auf der Gletscherfläche ist. Letzteres, meint Pertzinger [1996], sei eine größere Fehlerquelle als das Weglassen der internen Akkumulation. So erhält man also auch punktuelle Massenbilanzen an den Sondier- und Georadarpunkten.

Künstliche Punkte zur Stützung (Stützstellen, STS) von Geländeeigenschaften oder Prozessen, die Einfluss auf die Massenbilanz haben, oder zum simplen drehen an den Parametern, um das Ergebnis – sprich die flächenhafte Massenbilanz – nachvollziehbar oder ‚real‘ zu hal-

ten, sind Experten-Schätzungen. Sowohl Masse also auch Lokalität werden geschätzt. Expert Knowledge parametrisieren ist schwierig. Eine Bewertung kann man allerdings durchführen.

3.1.6 Expert Knowledge – Punkte

Expert Knowledge kann je nach Auswertungsverfahren verschieden einfließen. Beim Konturlinienzeichnen werden topographische Einflüsse (wie in Tabelle 2.2 nach Knight 1999)) mitberücksichtigt. Bei der räumlichen Interpolation von Punkten werden die Grenzen zwischen Bereiche unterschiedlich hoher Massenbilanz nicht manuell erstellt, sondern mit einer Interpolationsmethode. Dabei gibt es verschiedene Varianten von bestimmten Methoden und diese haben wiederum Einstellungen, die man ändern kann. Dazu kann der Glaziologe noch künstliche Punktwerte setzen, um sein Wissen in die Auswertung mit einzubringen. Diese künstlichen Punktwerte lassen sich labeln und jeweils im Programm mit einem Kommentar versehen. Eine allgemeingültige Klassifikation, welcher Einfluss wie stark zu gewichten ist, gibt es nicht. In Gletschern mit aufwändigen Monitoring und dichtem Messnetz spielen künstliche Punktwerte weniger eine Rolle, als bei Gletschern mit abwechslungsreichen Relief und schlechter Erreichbarkeit. Eine weitere Entscheidung, die zu treffen ist, in welchen Abständen werden die Punkte der Schneelinie aufgenommen. Der Einfluss auf das Ergebnis kann also vierschieden groß sein.

3.2 Flächenfehler

Für die Auswertung der Massenbilanz wird eine Flächenmaske über die interpolierte Fläche drübergelegt. Diese Maske wird von erfahrenen Glaziologen aus möglichst hoch aufgelösten Orthofotos und DGMs abgeleitet. Wobei dieser Prozess mit Fehlern behaftet ist, die über Technik, Expert Knowledge und Gletscherbegehung abschätzbar sind. Die Erstellung von Orthofotos und DGMs ihrerseits ist auch mit Fehlern behaftet, die sich systematisch in der Massenbilanz fortsetzen. Fehler bei der DGM-Erstellung sind auch Teil der Fehler in der geodätischen Methode und werden bei Reanalyse-Studien mit dieser Methode kontrovers diskutiert [Thibert et al. 2008, Huss, Bauder & Funk 2009, Thibert & Vincent 2009, Zemp et al.

2010, Fischer 2011]. Neben der Qualität der Flächen stellt die Verfügbarkeit von Flächendaten oft eine größere Herausforderung dar.

3.2.1 Aktualität

Für die Berechnung konventioneller Massenbilanzen wird für die Jahresbilanz der Gletscherumriss jenes Jahres verwendet. Der hydrographische Dienst ist vor allem an konventionellen Massenbilanzen interessiert, denn diese gibt relativ genau an, wieviel an Masse umgesetzt worden ist und wie viel abgeschmolzen ist. Die Referenzoberflächen-Massenbilanz nach Elsberg et al. [2001] ist da ungenauer, dafür korreliert diese besser mit Lufttemperatur oder Strahlung. Dabei wird die jährliche Massenbilanz immer auf einer bestimmten Gletscherfläche ausgewertet. Diese kann die erste seit Beginn des Monitorings sein oder auch die beste in Qualität. Die Entwicklung der Gletscherfläche wird also nicht berücksichtigt.

Die Massenbilanzen der Haushaltsberichte, die regelmäßig im Jahresbericht des Sonnblickvereins publiziert werden, sind meist eine Mischung aus konventioneller und Referenzoberflächen-Massenbilanz [Huss 2010]. Denn die aktuellen Gletscherumrisse stehen oft noch nicht für jenes Jahr zur Verfügung, da die Befliegung der Landesvermessungsämter auch erst im Herbst bei Bedeckungsminimum stattfindet. Die Gletscherumrisse werden, wie oben erwähnt, Anhand der Orthofotos in einem GIS nachgezeichnet. DGMs unterstützen dabei sehr und helfen, schuttbedeckte Gletscherränder vom Umfeld zu identifizieren (Abermann et al. 2010). Huss, Bauder und Funk [2009] rechnen mit einem Fehler von $\pm 0,03$ m w.e. bei Verwenden nicht aktueller Gletscherflächen wie nach der Methode nach Elsberg et al. [2001].

3.2.2 Wahre Gletscheroberfläche

Die wahre Gletscheroberfläche wird durch Orthofotos nicht erfasst, denn diese ist wesentlich größer, je stärker die Neigung des Gletschers ist. Aber die Massenbilanz nach der direkten Methode ist ohnehin in vertikaler Richtung – also aus der Draufsicht – definiert. Das ist ein Konsens in der Scientific Community, da es sehr schwierig ist, Messungen in sehr steilem Gelände durchzuführen. Durch Multiplikation mit ihrer Neigung können steile Gletscherabschnitte in ihrer tatsächlichen Größe erfasst und ausgewertet werden. Ablation kann durch Vernachlässigen der wahren Größe (bis zu 20% mehr Oberfläche) stark unterschätzt werden;

gleiches gilt bei hoher Dichte an Gletscherspalten [Jacobsen & Theakstone 1996]. Fällt nur ein geringer Teil des Gletschers in sehr steiles Gebiet kann dieser vernachlässigt werden [Fischer 2011].

3.3 Interpolationsmethode

3.3.1 Verschiedene Methoden und Varianten

Reich ist die Zahl an Interpolationsroutinen, die für Massenbilanzauswertungen verwendet worden sind. In der Literatur werden Ordinary Kriging (McGee 1993, Kaser et al. 1995, Hock und Jensen 1999, Holmlund, Jansson & Petersson 2005, Jansson & Petersson 2007), IDW und Trendanalyse (Kaser et al. 1995). Spline-Interpolation wird hier für die Sonnblickgletscher seit 1999 angewendet.

Kaser et al. [1995] schreiben, dass die Interpolationswerkzeuge sehr ähnliche Ergebnisse wiedergeben, sie seien auch vergleichbar mit den Ergebnisse aus Konturlinienzeichnen und Planimetrieren. Kaser , Fountain & Vecchia [2003] meinen, dass Interpolationsmethoden gegenüber händisch ausgewerteten Flächenbilanzen ein höheres Fehlerpotenzial haben. Zu diesen Zeiten waren die Programmiercodes Man solle also händisch die Flächen unterschiedlicher Massenbilanz berechnen und dann im GIS weiterbearbeiten.

Neben Interpolation in einem GIS oder Konturlinienzeichnen, lassen sich auch die Punkte über eine Höhenverteilungsfunktion auf die Fläche übertragen. Die spezifische Massenbilanz korreliert relativ gut mit der Seehöhe und damit lässt sich ein Gradient ableiten.

So wird das auch von Andrea Fischer gehandhabt. Aus ihrer Sicht bringen Interpolationsroutinen neue Fehler. Künstliche Punktwerte müssen gesetzt werden, um Prozesse wie Abschattung, Lawine, Bach etc. mit in die Massenbilanz einbeziehen zu können. Die Schätzung dieser Punkte fällt unter Expert Knowledge oder educated guess. Des weiteren werden durch Interpolation Gradienten gebildet, deren Größe oft unseren Vorstellungen von Gradienten übertrifft.

Interpolation allerdings eine objektive und reproduzierbare Auswertungsmethode. Sind die Verteilung und Dichte der Punkte optimal, so bringen Interpolationen sehr gute Ergebnisse.

3.3.2 Expert Knowledge – Interpolationsmethode

Wie man mit Schneeverwehungen und so der gleichen umgeht, hängt davon ab, was der Auswertende in der Massenbilanz wiedergespiegelt haben will. Je nach Argumentation lassen sich auch weitere Informationen für die Erstellung der Massenbilanz aufnehmen. So habe ich zu Anfang meiner Auswertungen den Goldbergkees als ganzen mit allen seine Punkdaten (gok) ausgewertet (Abbildung 3.4). Nun besteht diese Gletscher aus zwei Teilen (Abb. 3.3). Wenn man diese getrennt voneinander auswertet (g), erhält man ein anderes Ergebnis, weil sich besonders im oberen Bereich des unteren Teils und im unteren Bereich des oberen Teils die Werte beeinflussen. Wie soll nun ausgewertet werden, getrennt oder gemeinsam?

Ziel soll es ja sein, möglichst viel Information mit einzubeziehen. dass die Methode die Prozesse möglichst gut widerspiegelt. Wolfgang Schöner [pers. Gespräch] sagt, die Seehöhe erklärt mir sehr viel von der Fläche einzelner Massenbilanzverteilung, dadurch, dass diese mit der Lufttemperatur gekoppelt ist und so die Schmelzrate beeinflusst [Ohmura 2001] und die Akkumulation über festen Niederschlag.

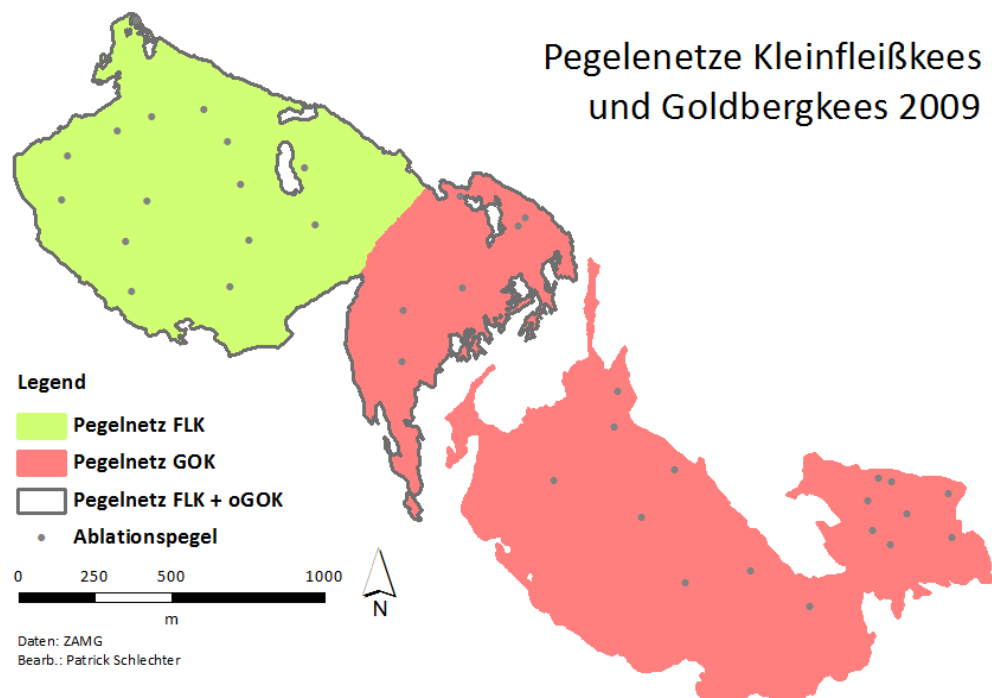


Abbildung 3.3 Möglichkeiten der Einbeziehung von Pegelnetzen zur Auswertung

Bilanzentwicklung bei einzelner/gemeinsamer Auswertung, Sonnblickgletscher 1999-2009

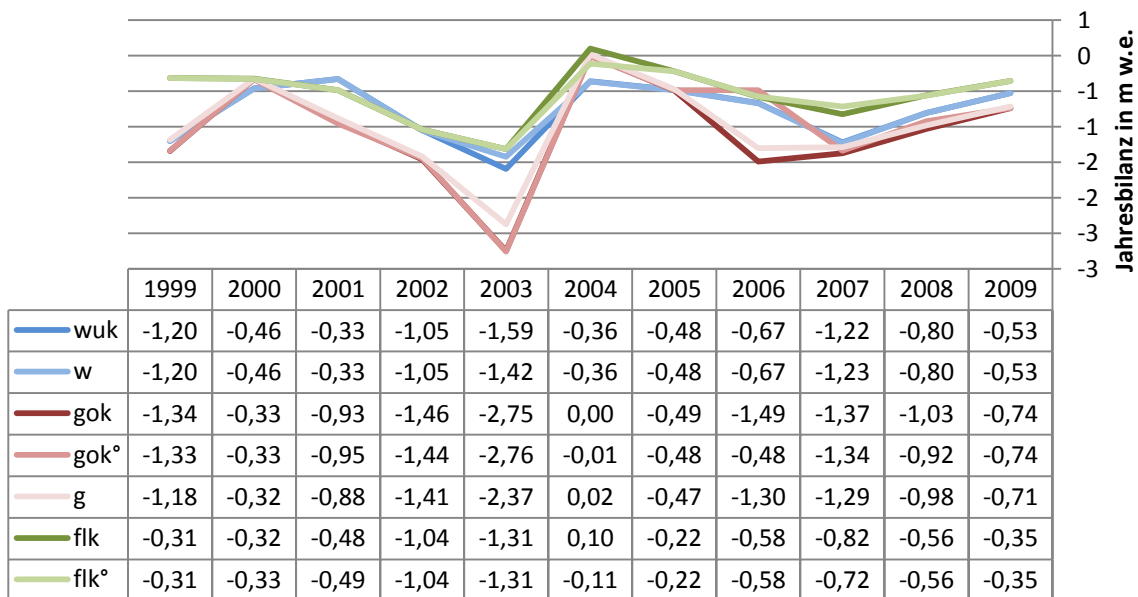


Abbildung 3.4 Entwicklung der Jahresbilanzen bei gemeinsamer und einzelner Auswertung von Goldbergkees, Wurtenkees und Kleinfleißkees 1999-2009, Beschreibung im Text

Bernhard Hynek [pers. Gespräch] meint, die Punkte des Kleinfleißkees auch mit hinein nehmen. Das ist im Prinzip derselbe Gletscher, nur dass dieser Teil halt auf der anderen Seite des Grats herunterläuft. Ein Grund für die Aufnahme des Kleinfleißkees in das Gletschermonitoring war, weil es die Südseite des Alpenhauptkammes mit weniger Niederschlägen repräsentiert. Eine gemeinsame Auswertung (gok° oder flk°) bringt mehr Information in die Auswertung mit ein. Die Niederschlagsintensität wäre gut über die Pegel repräsentiert, so Hynek. Es steht einem aber auch frei, den unteren Teil des Goldbergkees einzeln auszuwerten und den oberen Teil zusammen mit dem Pegelnetz des Kleinfleißkees (grauer Rahmen in Abbildung 3.3, nicht gezeigt in Abb. 3.4). Man müsse das halt argumentieren.

Man erkennt, dass die Varianten besonders bei geringer Punktdichte Ergebnisse bringen, die bis zu 0,4 m w.e. im Jahr abweichen können. Die Variation mit den Pegelnetzen ist nur ein Beispiel, wie man bei der Auswertung Einstellungen ändern kann. Das ist auch wesentlich von den topographischen Gegebenheiten und den verfügbaren Daten abhängig.

3.4 Andere Fehler

3.4.1 Zeitsystem – Abgrenzung

Zu guter letzt noch den Fehler in der Abgrenzung der Haushaltjahres. Cogley und Co-Autoren [2011] beklagen im Vorwort des Massenbilanz-Glossars, dass selten angegeben wird, wie man vom Datum der Feldmessungen auf das fixierte Datum hinrechnet oder hininterpoliert. Genauso wie die Wechsel von Auswertungsmethoden (Holmlund et al. 2004) erschwert ein Wechsel im Datum der Feldaufnahmen die Vergleichbarkeit von Massenbilanzen. Über einem Massenbilanzmodell mit Auflösung auf Tagesbasis errechnen Huss, Bauder & Funk [2009] einen Fehler um die 0,2 m w.e. relativ zum fixed date system.

3.4.2 Flux Divergence – Gletscherfließbewegung

Die Fließbewegung des Gletschers soll laut Zemp et al. [2009] in der Oberflächenmassenbilanz mitberücksichtigt werden. Abschätzungen, wie groß der Fehler bei Nicht-Berücksichtigung ist oder wie groß die Fehler bei der Berechnungsmethode sind, habe ich in meinen Recherchen nicht gefunden. Matthias Huss schreibt [via Email], dass man für eine Oberflächenmassenbilanz die Fließbewegung des Gletschers nicht berücksichtigen muss. Deshalb befindet sich dieser Fehler auch im Graubereich in Tabelle 3.1.

3.4.3 Interne und basale Massenbilanz

Interne und basale Massenbilanz befindet sich außerhalb der Konzeption der direkten Methode, die sich ja nur mit der Oberflächenmassenbilanz beschäftigt. Für polythermale Gletscher sind interne Akkumulation und Ablation Massenbilanz-relevant [Schneider & Jansson 2004]. Für alpine Gletscher ist die interne Bilanz in der Jahresbilanz vernachlässigbar [Kaser, Fountain & Vecchia 2003], für Reanalysen von mehreren Dekaden spielt diese laut Thibert et al. [2008] doch eine Rolle. Huss, Bauder & Funk [2009] sind der Ansicht, dass interne Prozesse in Alpengletschern keine signifikante Größe sind und schätzen den Fehler für Ihre Untersuchungsgletscher auf -0,01 m w.e. Man ist sich auch unsicher, wie groß der Einfluss der basalen Schmelze auf die Massenbilanz ist [Huss via Email], da diese von Gletschertyp (z.B. kalter, temperierter oder polythermaler Gletscher) zu Gletschertyp verschieden sein kann [Alexander, Shulmeister & Davies 2011].

3.5 Zusammenfassung

Bei der Erfassung der Massenbilanz nach der direkten Methode wird nur ein Teil der Gletschermassenhaushalts erfasst, nämlich die Oberflächenmassenbilanz, die auch den Großteil des Massenumsatzes ausmacht. Für den gesamten Gletscherhaushalt (basal climate balance) müssen interne und basale Massenbilanz sowie Gletscherfließbewegung und die wahre Oberfläche mitberücksichtigt werden. Jeder dieser Faktoren ist auch quantifizierbar.

Innerhalb der direkten Methode entstehen Fehler bei der Interpolation der Massenbilanz vom Messtag zum Stichtag, bei der Verwendung nicht-aktueller Flächen und aus Mangel in und an Punktdaten. Unsicherheiten entstehen durch die Variationsmöglichkeiten von Interpolationsroutinen, Entscheidungen beim setzen von künstlichen Punktwerten und Entscheidungen die über educated guess getroffen werden, und Einfluss auf das Massenbilanzergebnis nehmen.

4 Aufgabenstellung

Bevor man für bestimmte Gletscher die Fehler in der Massebilanzerstellung nach der direkten Methode untersucht, ist es hilfreich andere Arbeiten zu diesem Thema zu anzusehen. Welche Fehler sind für welche Art von Gletscher berechnet worden? Mit welchen Ergebnissen kann man rechnen? Anschließend wird diskutiert, welche Fehleranalysen für den Goldbergkees sinnvoll und (in dieser Arbeit) durchführbar sind (decision making process).

4.1 Literaturauswahl über Fehlervarianz

In den Arbeiten von Thibert et al. [2008], Huss, Bauder & Funk [2009] sowie Zemp et al. [2010] werden der Großteil der in der Tabelle 3.1 präsentierten Fehler und Unsicherheiten behandelt. Der Zungänge sind jeweils etwas verschieden, da es verschiedene Gletscher sind, und die direkte Methode jeweils anders gehandhabt wird. Das betrifft ins besondere die Übertragung der Punktwerte auf die Fläche.

4.1.1 Beispiel 1 Glacier de Sarennes

Bei Thibert et al. [2008] wird die Jahresbilanz an fünf Pegeln erhoben und über eine Flächen-Höhen-Verteilung auf der Gletscherfläche extrapoliert (Index-Stake-Methode). Durch Anpassung der Flächen-Höhen-Verteilung über neue DGMs sind die Fehlervarianz über unterschiedliche Interpolationsmethoden mitberücksichtigt worden. Der Untersuchungsgletscher Glacier de Sarennes liegt in den französischen Alpen und laut Huss, Bauder & Funkt [2009] und Fischer [2011] wäre die interne und basale Massenbilanz vernachlässigbar. Für die kumulierte Massenbilanz von 1952-2003 ist diese aber über ein Modell berechnet worden. Über die jährliche Anpassung von Feld- zu Stichtag ist nichts erwähnt (kritisiert von Cogley et al. [2011]); lediglich, dass beim Vergleich mit der geodätischen Massenbilanzzeitreihe, das Anfangsdatum angeglichen werden musste. Dieses wurde mit Tagesablationsraten aus den Feldaufzeichnungen 1952 berechnet. Fehler für Ablations- und Schneepegel sowie Dichte- und Schneetiefenmessungen sind erhoben worden (Feldfehler). Ob künstliche Punktwerte gesetzt worden sind, geht ebenso nicht aus dem Aufsatz hervor. Fehler auf Veränderungen im Punktmuster, -dichte, -qualität, Aktualität der Gletscherflächen, Bezugnahme zur wahren

Gletscherfläche oder die Frage, ob es starke Abweichungen naher Messpunkte gibt, werden nicht erwähnt.

4.1.2 Beispiel 2 Silvretta- und Griesgletscher

Huss, Bauder & Funk [2009] verwenden dieses veränderte Massenbilanzmodell, dass die gemessenen Punkte über die Fläche inter- und extrapoliert. Das geschieht über einen Algorithmus, der speziell auf Faktoren der räumlichen Massenbilanzverteilung ausgerichtet ist. Künstliche Punktwerte werden keine gesetzt [Huss via Email]. Sowohl Winterbilanz- und Jahresbilanzmesswerte werden in das Modell eingelesen. Über ein zeitliches Downscaling bekommt man die Massenbilanz auf Tagesbasis. Die Anpassung von Feldtag zum definierten Ende des Haushaltsjahres ist im Modell bereits berücksichtigt. Für die Unterschiede von punktuellen Massenbilanzen auf kurzer Distanz, die beim Interpolationsprozess hohe Gradienten verursachen, werden Standardabweichungen berechnet. Durch zufälliges Weglassen von Pegeln in mehreren Modelldurchläufen wird die Fehlervarianz von Extrapolation, Punktmuster und -dichte erhoben. Modelldurchläufe mit der ältesten Flächenmaske (Referenzoberflächen-Massenbilanz nach Elsberg et al. [2001]) für alle Haushaltsjahre bringen die Abweichungen zur aktuellen Fläche. Die wahre Fläche wird im Aufsatz nicht behandelt. Interne- und basale Massenbilanz werden als nicht signifikante Massenbilanzbeiträge für die Untersuchungsgletscher (Silvretta- und Griesgletscher) beschrieben.

4.1.3 Beispiel 3 Storglaciären

Die Fehleranalyse von Zemp et al. [2010] am Storglaciären umfassen, Berechnung von interner Massenbilanz, Berechnung des Flächenfehlers bei Verwendung der ältest-verfügbaren Flächenmaske sowie die Interpolation der Massenbilanz zwischen Messtag und Stichtag über ein Grad-Tag-Modell. Am Storglaciären wird die Oberflächenmassenbilanz nach der direkten Methode über Kriging-Interpolation ausgewertet. Die Abweichungen von verschiedenen Varianten von Kriging sind schon von Hock & Jensen [1999] berechnet worden. Darin werden ebenso die Massenbilanz-Gradienten diskutiert, die aufgrund großer Unterschiede naher Punktmassenbilanzen entstehen. Ebenso sind schon Arbeiten zu Feldfehlern (z.B. Jansson [1999]) am Storglaciären vorhanden. Ein linearer Ablationsgradient [Jansson 1999] ist verwendet worden, um Ablation in sehr steilen Bereichen und solchen mit hoher Spaltendichte

zu extrapolieren. Folglich sind dafür auch keine Stützstellen gesetzt worden. Diese Arbeit erwähnt auch die Gletscherbewegung als zu berücksichtigender Faktor in der Massenbilanzauswertung. Berechnet wird die Flux Divergence allerdings nicht. Die wahre Fläche wird nicht erwähnt und auch nicht, wie die Dichtewerte auf die Schneepegel übertragen werden (Punktqualität).

4.1.4 Diskussion der Fehler anhand der Beispiele

Man merkt in Tabelle 4.1, dass nicht alle Beispielstudien (1-3) alle Fehler behandeln. Im Beispiel 1 Glacier de Sarnes wird das Zeitsystem, die Flächenaktualität, die wahre Fläche und bestimmte Punktfehler nicht behandelt; ebenso wenig die Gletscherbewegung oder die Anwendung von Expert Knowledge. Dabei ist ersteres nur zu kritisieren, da die anderen Fehler entweder außerhalb der Konzeption liegen oder für die verwendete Auswertungsmethode als nicht oder wenig wichtig oder nicht existent verstanden werden.

Die meisten Fehler in der Tabelle werden in Beispiel 2 behandelt. Die verwendete Auswertungsmethode ist sehr durchdacht. Dadurch, dass keine Stützstellen gesetzt werden, fällt ein großer Unsicherheitsfaktor weg. Die Unsicherheit liegt somit nur in der Extrapolation. Die Punktqualität wird außer Acht gelassen, da dieser Einfluss als sehr gering eingeschätzt worden ist. Beziehungsweise kann dieser Fehler auch durch die verschiedenen gestalteten Modelldurchläufe berechnet werden. Die behandelten Fehler seien die wichtigsten, so Huss [via Email]. Es gebe noch andere, die aber keinen signifikanten Einfluss haben. Dazu sei der Aufsatz auch nicht speziell auf Fehler ausgerichtet. Bernhard Hynek meint dazu [via Email]: „Klar muss man sich da einschränken, sonst wird's kein Aufsatz, sondern ein Lexikon.“ Die basale Schmelze hätte allerdings mit hinein gehört, aber der Prozess und die Quantifizierung speziell für diese Gletscher sind noch zu wenig erforscht. Die wahre Fläche sei ein interessanter Punkt. Dieses Thema ist erst durch den Aufsatz von Fischer [2011] (wieder-) eingebracht worden.

Tabelle 4.1 Behandelte Fehler und Unsicherheiten in den Beispielstudien

	Anderes	Punkt	Fläche	Interpolation
im Konzept	Zeitsystem 2 3	Feldfehler 1 2 3	Aktualität 2 3	ver. Methoden 1 2 3
		Muster 2		ver. Varianten 1 2 3
		Dichte 2		
		lok. Untersch. 2 3		
		Qualität		
außerhalb	Flux Div. 3	Expertknow. (pts)		Expertknow. (int)
	int. Bilanz 1 2 3		Wahre Fläche	
	bas. Bilanz 1 2 3			

Ebenso steht es mit der Flux Divergence, die laut Zemp et al. [2010] mitberücksichtigt gehört. Das sehen andere Glaziologen für ihre Untersuchungsgletscher anders. Die Berechnung der internen Bilanz ist für einen polythermalen Gletscher – wie es der Storglaciären einer ist – sehr wohl wichtig [Pettersson et al. 2003]. Obwohl ein alpiner Gletscher, trifft das auf Glacier de Sarnen auch zu. Recht interessant ist auch die Verwendung von Standardeinstellungen bei der Kriging-Interpolation. Laut Doris Riedl [pers. Gespräch] ist besonders beim Kriging darauf zu achten, dass man eine ordentliche Vorarbeit macht – Trendanalyse, Isotropieprüfung, Variographie. Wie die Standardeinstellungen tatsächlich aussehen ist im Aufsatz (Hock & Jensen 1999) nicht ersichtlich. Es kann sich um statische Einstellungen handeln, oder um welche, die sich den Daten anpassen. Ich habe Frau Hock um Antwort gebeten und aber noch keine Antwort zurückbekommen. Ein Grund für die Wahl von Standardeinstellungen kann sein, dass das Messnetz am Storglaciären ohnehin in einem Regelmäß angeordnet ist (Abb. 4.1), dass es egal ist, welche Kriging-Einstellung man verwendet:

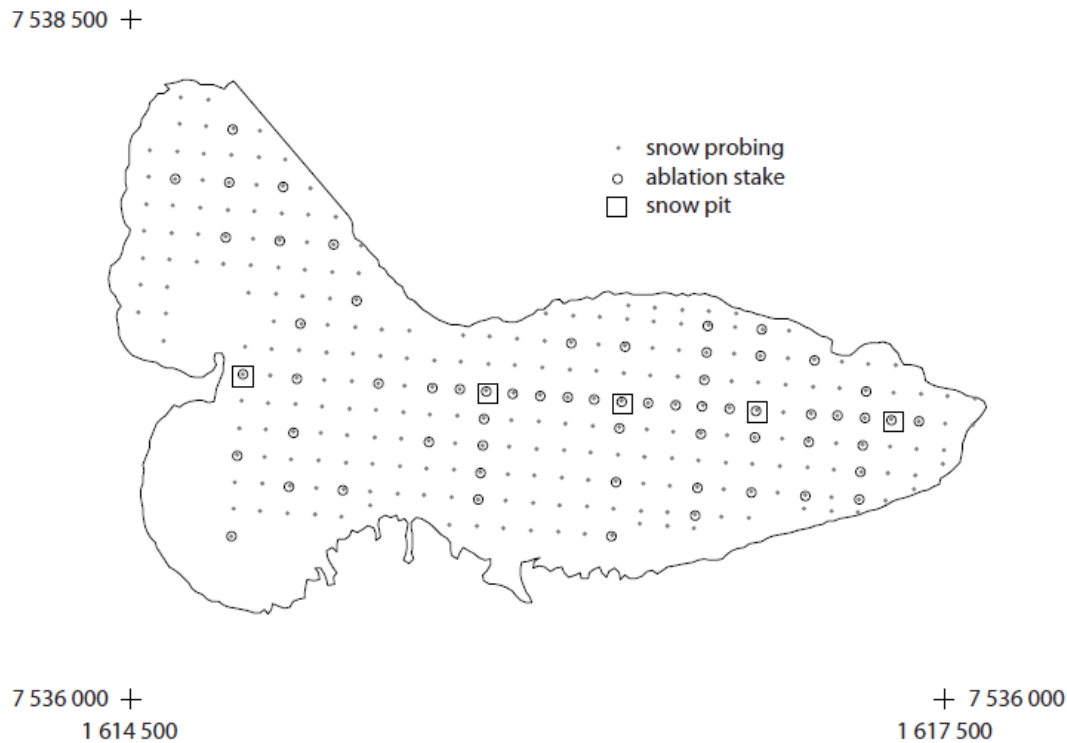


Abbildung. 4.1 Messnetz des Storglaciären 2006/07 [Zemp et al. 2010]

Man erkennt anhand des Vergleichs dieser Beispiele, dass ein Teil der Fehler in der direkten Methode durch das Auswertungsverfahren determiniert sind. Der Zweck der berechneten Massenbilanz und die Entscheidungen, welche Faktoren dafür berücksichtigt werden müssen, erschweren die Entwicklung eines allgemeingültigen Fehleranalyseschemas. Die Fehler in der Tabelle sind auf jene Fehler ausgerichtet, die beim Auswertungsverfahren für die Sonnblickgletscher eine Rolle spielen. Die Unterschiede in den Auswertungsverfahren schließen bestimmte Fehlerquellen aus und schaffen dafür andere.

Auch bei gleichen Fragestellungen für die Auswertung ist nicht sicher, ob alle Gletscher denselben statistischen Modellen folgen und dieselben Fehlercharakteristika aufweisen. Statistische Modelle fußen meist auf zufälligen Variationen in den Datengrundlagen und wiederholten Modelldurchläufen (z. B. Huss, Bauder & Funk [2009]). Ein Problem hierbei ist, dass bestimmte Variationen unplausibel sein können. Damit ist gemeint, dass z. B. bestimmte zufällig angeordnete Punktmuster gar nicht möglich sind, da sich bestimmte Punkte an Spalten oder sonstigem schwierigem Gelände befinden. Desweiteren hängen die Punktwerte von einander und von externen Faktoren ab, wie z.B. Windverfrachtung. Nahe Punktwerte kön-

nen also wesentlich voneinander abweichen [Kuhn et al. 1999, Huss, Bauder & Funk 2009]. Einer zufällig generierten Anordnung der Daten, können solche Abhängigkeiten kaum berücksichtigt werden. Diese Art der Fehlererhebung auf Geodaten angewendet ist also problematisch. Dazu kommt, dass in bestimmten Jahren die Datengrundlage spärlich ist (geringe Punktdichte, Unsicherheiten in den Punktwerten) und die externen Faktoren kein stärkeres Bild in den Punkten hinterlassen. Variationen dieses Datensatzes können schwer noch Information mitnehmen, da der Ausgangsdatsatz selber nur schwache Signale zeigen kann. [Fischer 2011]

4.2 Mögliche Fehlerberechnungen für Sonnblickgletscher

Speziell für die Untersuchungsgletscher um den Hohen Sonnblick sind bei einer Fehlerevaluation andere Einflüsse zu berücksichtigen als für andere Gletscher. Manche Berechnungen von Fehlern sind sehr aufwändig und erfordern ein spezielles Fachwissen, andere Fehler sind durch Programmabfragen und Wiederholungen von Auswertungen mit veränderten Datensätzen möglich.

4.2.1 Andere Fehler

Wurtenkees, Goldbergkees und Kleinfleißkees gelten als temperierte Gletscher [Auer 2003] und die interne Massenbilanz wird deshalb als vernachlässigbar gesehen. Die basale Massenbilanz müsste man für eine vollständige Massenbilanzerhebung mitberücksichtigen. Der Anteil der basalen Massenbilanz sowie der Einfluss der Fließgeschwindigkeit, wurde für diese Gletscher noch nicht ausführlich untersucht. Mithilfe eines Massenbilanzmodells (z. B. Grad-Tag-Modell [Paterson 1994]) lassen sich die Fehler für den nicht einheitlichen Messtermin errechnen.

4.2.2 Punktfehler

Die Punktfehler lassen sich alle relativ gut mit einem GIS oder Programmiersoftware berechnen. Unsicherheiten über Mangel an Punktdichte und -muster können durch Weglassen von Punkten und mehreren Auswertungsdurchläufen erhoben werden [Huss, Bauder & Funk

2009]. Schlägt man für beliebige Punkte einen Unsicherheitswert von $\pm 0,3$ m w.e. für Winterbilanzberechnungen und $\pm 0,15$ m w.e. auf Jahresbilanzberechnungen dazu, so erhält man den Fehler für die Ungenauigkeiten bei den Feldmessungen. Die Abweichungen in den Punktwerten naher Pegel kann über Abfragen eruiert werden. Um zu sehen, wie groß der Fehler in der Übertragung der Dichteinformation auf Sondier- und Radarpunkte ist, kann man die Interpolation wiederholt auf Schneeschächte durchführen und den Interpolationswert mit den Messwert vergleichen. Wenn man in seiner Auswertung künstliche Punktwerte setzt. Der Einfluss von künstlichen Punktwerten ist ein schwieriges Thema. Durch schlichtes weglassen dieser Punkte wird deren Einfluss deutlich. Durch eine Einteilung von künstlichen Punktwerten nach verschiedenen Merkmalen (z. B. Punkt für Interpolationshilfe in bei geringer Punktdichte oder Abschattung) lässt sich möglicherweise eine Systematik erstellen. Diese neue Punktklassifikation kann man wiederum diskutieren und sich Beispiele zu jedem Thema ansehen, um eine Regelmäßigkeit herauszulesen.

4.2.3 Flächenfehler

Durch Vergleich von Referenzoberflächen-Massenbilanzen [Elsberg et al. 2001] mit konventionellen (Flächenmaske jährlich verfügbar) erhält man die Unsicherheiten in der Massenbilanz, die durch Verwendung ungenauer Gletscherflächen entstehen.

Die Berechnung der wahren Oberfläche ist eine relativ aufwändige Arbeit. Steile Hangneigungen und eine Hohe Dichte an Gletscherspalten zeigen in der Wirklichkeit eine größere Gletscheroberfläche als die projizierte Fläche auf einer Karte oder Orthofoto. Sehr genaue Daten werden gebraucht, um die Vergößerung der Oberfläche durch die Spalten abzuschätzen und dann weiß man immer noch nicht, wie viel in den Spalten dann wirklich mehr abschmilzt. Mit einem 3D-Modell (z. B. digitales Oberflächenmodell) ist das einfacher zu bearbeiten. Die Flächen sind auch größer bei einem 3D-Modell. Akkumulation und Ablation gleichen sich aber aus. Das heißt, nur bei einer signifikant verschiedenen mittleren Neigung zwischen Akkumulationsgebiet und Ablationsgebiet hat die tatsächliche Fläche einen Einfluss auf die Massenbilanz. [Huss via Email]

4.2.4 Fehler über die Interpolationsmethode

Den Extrapolationsfehler kann man berechnen, indem man verschiedene Interpolationsroutinen und verschiedene Einstellungen durchprobiert [Hock & Jensen 1999]. Eine weitere Möglichkeit ist jene von Huss, Bauder & Funk [2009] durch Variationen im Punktmuster die Ungenauigkeit der Extrapolation zu quantifizieren. Inwiefern man noch Expert Knowledge in die Interpolation mit einbezieht, ist hängt vom gewünschten Ergebnis ab. Im Falle von Goldbergkees und Kleinfleißkees ist es sinnvoll die Auswertung mit beiden Punktnetzen durchzuführen (Kapitel 3.3.2), wie es auch für die Haushaltsberichte durchgeführt wird.

4.3 Zielsetzung

In dieser Arbeit werden nur drei Fehler behandelt. Die Berechnung von Fehlern verlangt bestimmte Voraussetzungen an die Software und Daten, an Fachwissen und Arbeitszeit. Vor allem der Zeitdruck für diese Arbeit spielt eine wichtige Rolle, da der Diplomstudienplan ausläuft. Die Einarbeitung in interessante neue Methoden würden nicht berechenbar viele Kapazitäten verbrauchen. Deshalb werden mit Priorität Fehler ausgewählt, die man mit einem GIS berechnen kann.

Manche berechneten Fehler kann man in weiteren Arbeiten berücksichtigen, andere sind einfach nur als Unsicherheit anzugeben. Die Entscheidung für die Berechnung der in dieser Arbeit behandelten Fehler ist anhand folgenden Prozesses getroffen worden.

Außerhalb des Konzeptes

Die Berechnung von Fehlern die außerhalb des Konzeptes der direkten Methode liegen, werden nicht durchgeführt. Das sind die basale Massenbilanz und die wahre Gletscheroberfläche. Diese erfordern auch ein weiteres Fachwissen über physikalische Prozesse im und auf dem Gletscher.

Zeitsystem

Für die Berechnung des Fehlers durch die uneinheitlichen Messtermine ist die Einarbeitung in ein Modell nötig. Und das verlangt neben physikalische Vorkenntnisse auch größere Programmiererfahrung.

Punktdaten

Unterschiede in den Punktwerten benachbarter Pegel oder Schächte kann über ein Set von Abfragen in einem GIS durchführen. Die Ergebnisse bringen allerdings keine Fehler, die man z. B. in einer Reanalyse berücksichtigen könnte [Kuhn et al. 1999, Huss, Bauder & Funk 2009, Fischer 2011]. Man ist lediglich darüber informiert wie schwach bestimmte Punktwerte miteinander korrelieren.

Punktdichte, -muster und Feldfehler lassen sich wie in Kapitel 4.2.2 mit einem statistischen Modell berechnen. Mit einem Programm zu automatischen Berechnung der Massenbilanz [Hynek 2011] lassen sich auch Einstellungen programmieren, mit denen Datensätze über eine Zufallsfunktion variiert werden. Durch mehrere Modelldurchläufe von den variierten Daten erhält man eine mittlere Abweichung berechnen. Dabei stellt sich nur die Frage, mit welcher Interpolationsroutine soll das Programm die Auswertung durchführen? Diese Vorarbeit kann durch einen Vergleich von Interpolationsroutinen erledigt werden. Und dabei lässt sich gleich die Unsicherheit über die Extrapolation mit berechnen.

Die Unsicherheit der Interpolation der Dichte auf die Sondier- und Radarpunkte wird in dieser Arbeit aus reinen Zeitgründen vernachlässigt. Der Einfluss der künstlichen Punktwerte soll allerdings durch Auswertung ohne diese berechnet werden.

Flächenfehler

Mit der gewählten Interpolationsroutine lassen sich anschließend Referenzoberflächen- sowie konventionelle Massenbilanzen berechnen. Daten stehen hierfür von 1999-2009 zur Verfügung. Damit lassen sich die Abweichungen bei Auswertung mit nicht aktuellen Gletscherflächen berechnen.

Desweiteren soll noch ein Vergleich mit eingebracht werden: Das Orthofoto eines Jahres ist eine Momentaufnahme. Wie groß die Fläche zu Beginn des Haushaltsjahres oder kurz vor Ende des Haushaltsjahres war, geht aus diesem einen Bild nicht hervor. Die Möglichkeit besteht, dass die Fläche, die erst in der nächsten Haushaltsperiode aufgenommen wird, die

Gletscherfläche jenes Jahres besser darstellt. Um diese Unsicherheit zu erheben, werden die Massenbilanzen jeweils mit der Fläche des Vorjahres und des Jahres danach ausgewertet.

Interpolationsmethode

In dieser Arbeit wird die Unsicherheit in der Extrapolation durch Vergleich der errechneten Massenbilanz über verschiedene Interpolationsroutinen lässt sich die Unsicherheit der Extrapolation erheben. Die Gletscher werden einzeln ausgewertet. Das bedeutet, dass bei der Berechnung der Massenbilanz eines Gletschers auch nur dessen Punktwerte verwendet werden und keine des Nachbargletschers. Der Grund dafür liegt in der einfacheren Handhabbarkeit für die folgende Fragestellung.

Weitere Fragestellung

Es wird angenommen, dass Punktdichte und -muster einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des Interpolationsergebnisses hat. Je höher die Punktdichte und je homogener die Punkte verteilt sind, desto genauer die Interpolation [Longley et al. 2001, Albrecht 2007]. Das bedeutet, dass für Jahre mit homogenen Punktmuster und hoher Dichte die unterschiedlichen Interpolationsvarianten Ergebnisse bringen, die sehr ähnlich sind. Ist die mittlere Abweichung vom Mittelwert der Ergebnisse also gering, muss das Punktmuster ein regelmäßig angeordnetes und eine hohe Anzahl an Punkten gegeben sein.

Durch räumliche Kennzahlen wie Nearest-Neighbor-Index, Moran's I und Geary's C lässt sich der Grad der Clusterung eines Punktmusters klassifizieren [Levine 2010]. Diese Kennzahlen geben also an, ob ein Punktmuster eine regelmäßige Verteilung hat oder ob das Punktmuster Konzentrationen von Punkten in gewissen Bereichen zeigt. Korrelieren dies Kennzahlen mit den mittleren Abweichungen der Interpolationsergebnisse, so würde das einen Diskussionspunkt beim Design eines Messnetzwerks darstellen.

4.3.1 Zielsetzung als Fragen

Zusammenfassend lassen sich also folgende Forschungsfragen stellen:

- Welchen Einfluss hat die Interpolationsroutine auf die Massenbilanz?
- Welchen Einfluss hat die Verwendung nicht aktueller Gletscherflächen bei der Auswertung auf das Ergebnis?
- Wie sieht das Ergebnis aus, wenn kein Expert Knowledge in die Auswertung eingeflossen ist?

Diese Fragen werden für Wurtenkees, Goldbergkees und Kleinfleißkees für Winterbilanz und Jahresbilanz von 1999-2009 beantwortet. Dieser Zeitraum ist gewählt worden, weil seit 1999 das Kleinfleißkees ins Monitoring aufgenommen worden ist und seit 1999 wird die Auswertung mit GIS durchgeführt. Das bedeutet, dass seit diesem Jahr Stützstellen für die Interpolation gesetzt worden sind.

Ein Manko ist, dass die Daten nicht homogenisiert sind, was aus dieser Arbeit nicht weiteres als einen Testdurchlauf für eine aufwändigere Fehlererhebung macht. Die dadurch gewonnen Erkenntnisse können Gewinnbringend für die Vorarbeiten oder Design einer weiterführenden Fehleranalyse sein.

Durch das Ausprobieren verschiedener Interpolationsroutinen lassen sich auch folgende Fragen beantworten wie:

- Welche Interpolationsroutine ist am besten geeignet?
- Welche Interpolationsroutine kann gewählt werden, um die Massenbilanz in Gebieten geringer Messpunktdichte zu interpolieren?
- Hat die Verteilung der Punkte einen Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses?

Vergleicht man die Ergebnisse der verschiedenen angewendeten Interpolationsmethoden, so ist jene für die weitere Fehleranalysen am besten geeignet, die der publizierten Haushaltszeitreihe und dem Mittelwert der Ergebnisse am nächsten kommt. Die Haushaltszeitreihe dient hierbei als Referenzzeitreihe. Die Massenbilanzen für die Haushaltsberichte sind

selten auf der aktuellen Gletscherfläche ausgewertet worden. Das bedeutet, dass die Auswertungen mit den unterschiedlichen Interpolationsroutinen auf den selben Gletscherflächen stattfinden muss, um einen Vergleich herstellen zu können.

Die Ergebnisse jener Interpolationsmethode, die in Jahren geringer Punktdichte dem Mittelwert am häufigsten am nächsten liegt, ist die zu empfehlende. Dabei ist vorher noch festzulegen, was eine geringe Punktdichte ist. Das ist jene Punktdichte die geringer ist, als zu jenen Jahren, wo die Ergebnisse der Interpolationsmethoden am wenigsten von einander abgewichen sind.

Wenn die Abweichungen vom Mittelwert mit den Maßzahlen der homogenen Punktverteilung korrelieren, so bedeutet das, dass das Punktmuster einen Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses hat. Sollte das sehr klar der Fall sein (höchstsignifikant), so ist das ein wichtiger Punkt der Diskussion über eine Netzwerkoptimierung.

5 Untersuchungsgebiet

5.1 Die Gletscher

Die Untersuchungsgletscher Wurtenkees, Goldbergkees und Kleinfleißkees sind Teil der Gletscher der Goldberggruppe. Diese Berggruppe befindet sich in den Hohen Tauern an der Grenze zwischen Salzburg und Kärnten. Die Hauptgipfel der Goldberggruppe sind der Hohe Sonnblick (3106 m ü. A.), Schareck (3123 m ü. A.) und Hocharn (3254 m ü. A.) (Abb. 5.1). Am Gipfel des Hohen Sonnblicks steht das gleichnamige meteorologische Observatorium. Nördlich davon beginnt das Raurisertal, das ins große Salzachtal mündet. Im Süden des Sonnblicks beginnt das Mölltal, dass sich bis zum Drautal erstreckt. Auf der Nordseite des Sonnblicks befindet sich das Goldbergkees und auf der Südseite das Kleinfleißkees. Die beiden Gletscher sind über die Fleißcharte verbunden. Das Wurtenkees liegt südlich des Alpenhauptkammes etwa 2 km östlich des Goldbergkees. Die Gletscher liegen räumlich nicht weit auseinander, allerdings gibt es jeweils markante topographische Unterschiede, so dass jeder Gletscher ein anderes Lokalklima aufweist [Schöner et al. 2009].



Abbildung 5.1 Lage der Untersuchungsgletscher in der Goldberggruppe [AMAP]

5.1.1 Goldbergkees

Das Goldbergkees ist drei Kilometer lang, hat eine Höhenausbreitung zwischen 3080 und 2310 m ü. A. und eine Größe von knapp 1,5 km² (Stand 2009). Dabei lässt sich der Gletscher in drei Teilbereiche einteilen; in einen oberen Teil einen mittleren und einen unteren Teil. Diese drei Gletscherteile zeigen jeweils in eine andere Himmelsrichtung exponiert. So ist

der obere Teil südexponiert, der mittlere nach Osten und der untere nach Nordosten. Die meisten Haushaltsjahre zeigen Akkumulations- und Ablationsgebiete auf allen Gletscherteilen (Abb. 5.2). Der obere Gletscherteil ist von den unteren beiden über einen Steilhang getrennt. Somit bekommen diese kein Eis über die Gletscherbewegung nach und die Akkumulation findet rein über Tribschnee und Lawinen statt [Auer 2002 et al.]. Das führt zu einer schwierigen Bestimmung der klimatisch wichtigen Gleichgewichtslinie [Hynek 2007]. Auch der mittlere und untere Teil des Gletschers sind seit 2011 getrennt. Über Totalisatoren lassen sich mittlere Jahresniederschläge für die Gletscherteile berechnen. Diese betragen für den oberen 2680 mm, den mittleren 2530 mm und den unteren 1720 mm [Koboltschnig 2009].

5.1.2 Kleinfleißkees

Das Kleinfleißkees ist knapp 1 km² groß, liegt auf der Südseite des Alpenhauptkammes und ist nach Süden exponiert. Es erstreckt sich von 3050 bis auf 2700 m ü. A. und ist im oberen Bereich über die Fleißcharte mit dem Goldbergkees verbunden. Im Gegensatz zu den beiden anderen Untersuchungsgletschern folgt es keinem Stufenaufbau und besteht aus einer einzigen Gletscherfläche. 2002 ereignete sich ein Eissturz am Kleinfleißkees, wobei es seine Gletscherzunge verloren hat (in Abb. 5.2 noch sichtbar, in den Gletscherumrissen in Abb. 5.3 nicht mehr). Im Hitzesommer 2003 ist diese vollständig abgeschmolzen [Böhm et al. 2007]. Durch die Südlage bekommt es gemeinsam mit dem Wurtenkees weniger Niederschläge (1840 mm im oberen Bereich [Koboltschnig 2007]) als das Goldbergkees ab, was zu einer geringeren Winterakkumulation führt.

5.1.3 Wurtenkees

Das Wurtenkees ist aufgrund seiner Lage südlich des Alpenhauptkammes in einem niederschlagsärmeren Gebiet. Es erstreckt sich von 3080 m auf 2380 m ü. A. und ist knapp 1 km² groß. Ein Teil des Schigebiets Mölltaler Gletscher befindet sich auf dem Wurtenkees (Schilifte in Abb. 5.4). Durch Schneekanonen und Pistenpräparierungen wird die Massenbilanz beeinflusst. Der Wurtenkees ist keinen Quadratkilometer mehr groß. Wobei auch dieser Gletscher in einen oberen und unteren Teil getrennt ist. Der obere Teil des Gletschers erhält aufgrund der Orographie des Einzugsgebietes weniger Jahresniederschlag (1800 mm) als der untere

(2400 mm) [Koboltschnig 2007], das aufgrund höherer Akkumulation noch eine höhere Eisdicke hat. Das Wurtenkees ist mit der Exposition nach Süden bzw. Südwesten sehr der Sonnen exponiert, was im Vergleich zum Goldbergkees höhere Abschmelzraten zur Folge hat.

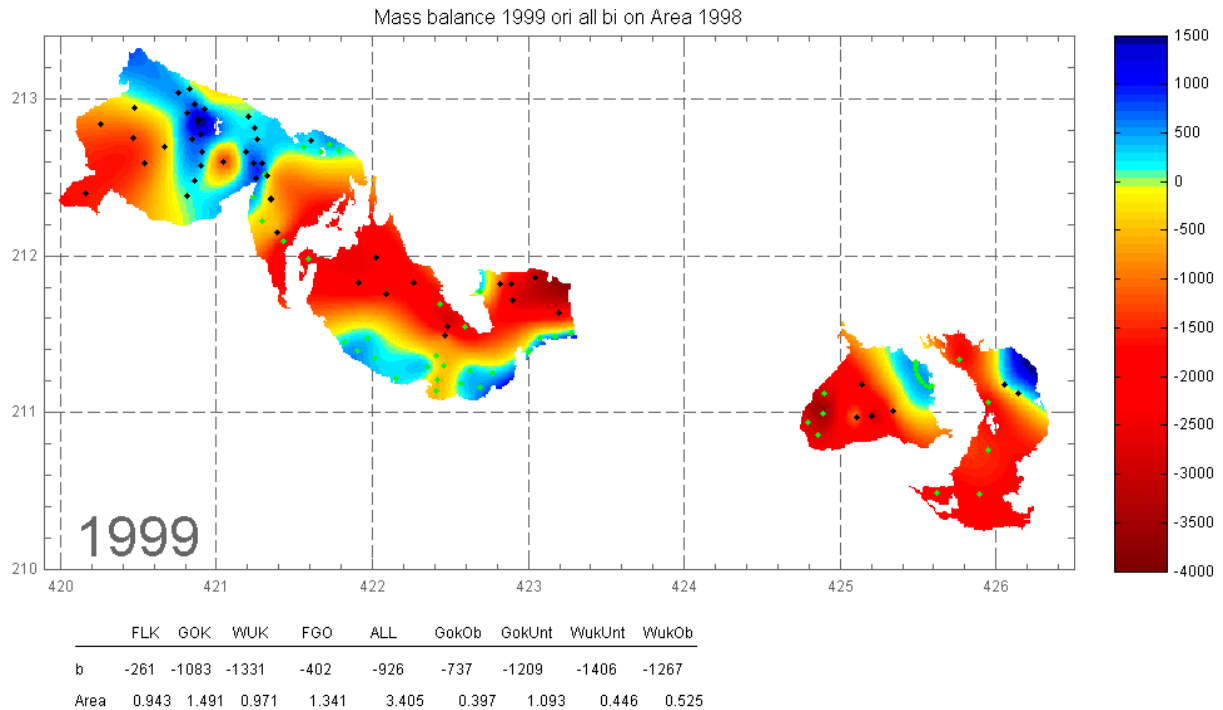


Abbildung 5.2 Spezifische Jahresbilanz 1999 auf den Gletschern der Goldberggruppe (schwarze Punkte sind Ablationspegel, grüne sind gesetzte Stützstellen)

5.3 Gletschermonitoring

Die drei Gletscher des Monitorings sind mit ihrer Größe kleiner als andere Gletscher, an denen Massenhaushaltsuntersuchungen durchgeführt werden. Durch ihre geringe Masse sind reagieren diese Gletscher klimasensitiver. Sie stellen sich also auf Klimasignale schneller ein als große Gletscher, oder Gletscher mit größerem Akkumulationsgebiet. Das macht die Gletscher für klimatologische Untersuchungen besonders interessant. Dazu befindet sich das Observatorium in unmittelbarer Nähe, das nicht nur über eine lückenlose Klimazeitreihen seit 1886 verfügt, sondern auch noch Standort für zahlreiche Projekte aus den unterschiedlichsten Disziplinen ist. Die mittlerweile 125-jährige Geschichte des Observatoriums ist in Böhm, Auer & Schöner [2011] nachzulesen.

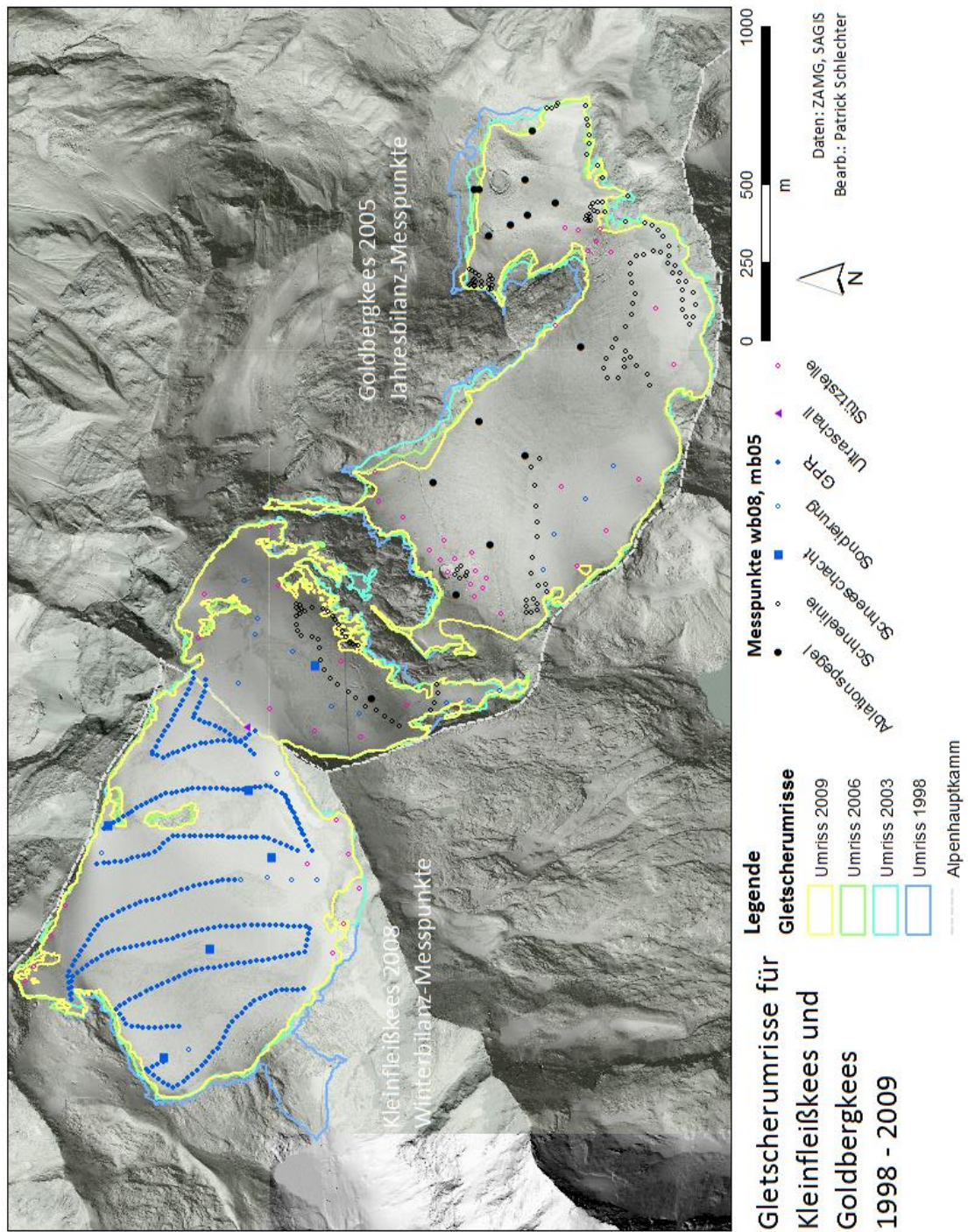


Abbildung 5.3 Gletscherumrisse und Punktmuster von Winter- und Jahresbilanz

Schon 1896 sind erste glaziologische Untersuchungen in der Goldberggruppe durchgeführt worden. Zu Beginn wurden Gletscherlängenänderungen aufgezeichnet und ab den 1920er Jahren auch Flächenänderungen. Die jährliche Gletschermassenbilanz nach der direkten gla

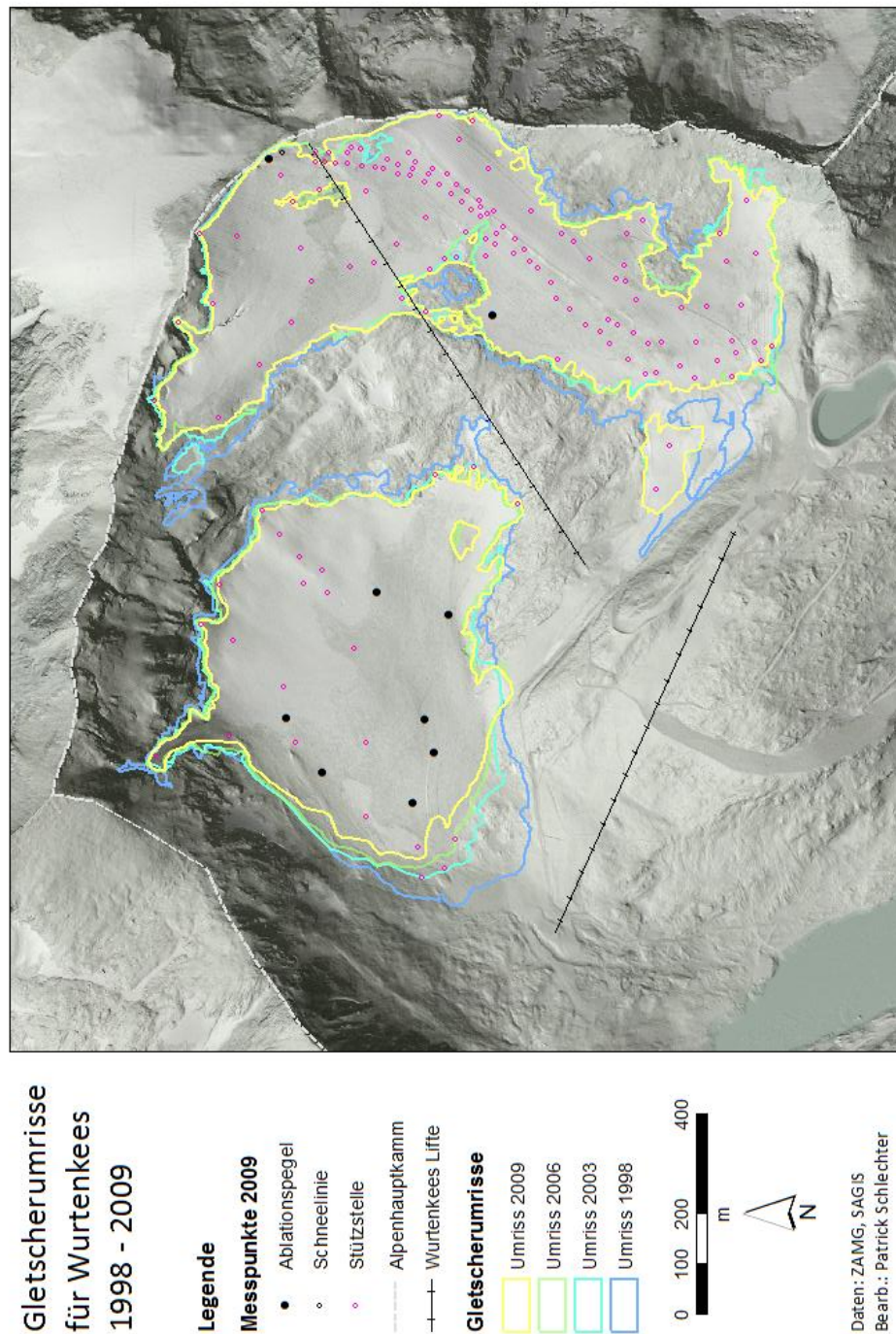


Abbildung 5.4 Gletscherumrisse und Punktmuster mit vielen Stützstellen für Jahresbilanz

ziologischen Methode wird seit 1982 durch die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) erhoben. Zu Beginn wurden die Messungen nur für Würtenkees durchge-

führt, 1986 (Wintermassenbilanz) bzw. 1988 (Jahresbilanz) dann auch für den Goldbergkees und 1998 wurde auch das Kleinfleißkees ins Monitoring mit aufgenommen.

Im Monitoring werden Schneehöhe, Schneebedeckung, Gletscherlängenänderungen, Gletschermassenbilanzen (Winter- und Jahresbilanz), Eisfließgeschwindigkeiten und Eismächtigkeitsänderungen erfasst. Neben dem Pegelmessnetz sind auch automatische Wetterstationen (AWS) auf Goldberg- und Kleinfleißkees Teil des Monitorings. Die hohe Messnetzdicke sowie die Nähe zum Sonnblickobservatorium mit seinen umfassenden Messprogrammen bieten viele Vorteile für Projekte oder Modellversuche (benchmark glacier).

Jahresbilanz

Das Haushaltsjahr der untersuchten Gletscher beginnt mit 1. Oktober und endet mit 30. September. Mittels Ablationspegel wird zur Feldbegehung im September gemessen, wie viel Masse weggeschmolzen ist. Ablationspegel werden in der Sommerperiode monatlich (Mai bis September) abgelesen und ein neuer Pegel nachgebohrt, falls dieser bis zur nächsten Feldbegehung auszuapern droht. Die gemessene Eisabschmelzung multipliziert mit Eisdichte ergibt den Wasserwert an diesem Punkt (punktuelle Massenbilanz). Durch monatliches Abmessen im Sommer lässt sich auf die Abschmelzrate Rückschlüsse ziehen. Die Gleichgewichtslinien werden mit dem GPS abgegangen, um Punkte mit ausgeglichener Massenbilanz aufzunehmen und so die Punktdichte zu erhöhen.

Winterbilanz

Für die Sonnblick Gletscher ist der 1. Oktober bis 30. April der Zeitraum der Wintermassenbilanz. Für Wurtenkees und Goldbergkees ist in diesem Zeitraum auch das tatsächliche Maximum der Winterakkumulation erreicht. Über die Gletscherflächen werden 10 bis 15 Schneeprofile gegraben, beim Kleinfleißkees sind es im Schnitt 5 (Abb. 5.3). Neben Dichte wird auch Schneetemperaturen in den Schächten gemessen. Diese geben zusammen mit der Stratigraphie des Profils Aufschluss über etwaige Schmelzabflüsse. Aus Dichte und Höhe berechnet man den Wasserwert, der einer punktuellen Massenbilanz entspricht. Die Plätze an denen ein Profil aufgenommen wird, sind repräsentativ für die Schneehöhenverteilung des Gletschers). Sie umfassen also Minima und Maxima der Schneehöhen, die etwa durch Expo-

sition oder Schneeverwehungen entstehen. Zwischen den Profilen wird in Abständen von 50 bis 100 m die Schneetiefe mit einer Lawinensonde bestimmt; seit 2007 arbeitet man auch mit GPR. Die aus den Profilen errechneten Wasserwerte, werden auf die Sondierpunkte und Georadatpunkte inter- bzw. extrapoliert. Die über Differential-GPS aufgenommenen Positionen der Punkte lassen sich einfach in ein GIS einlesen.

Die Verteilung der Punkte sieht für die Winterbilanz anders aus, als für die Jahresbilanz. Die Punktdichte ist höher und die Spur, an der das Georadar bewegt worden ist, ist sichtbar (Abb. 5.3 Kleinfleißkees Winterbilanz).

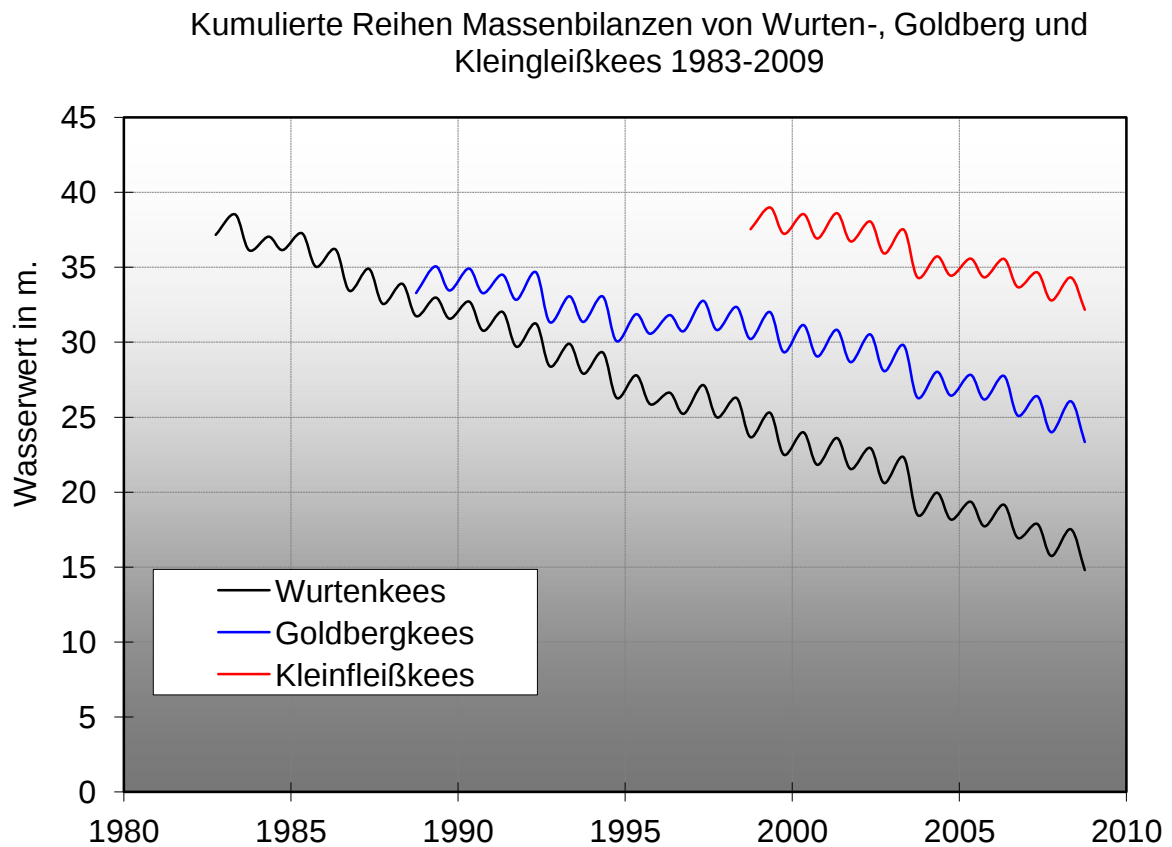


Abbildung 5.5 Zeitreihen der kumulativen spezifischen Massenbilanzen der drei Gletscher im Sonnblick [verändert nach Böhm 2007]

Die Interpolation über die Gesamte Gletscherfläche erfolgt an der ZAMG seit 1999 mit der einer Spline-Interpolation in ArcGIS; Wobei Gletscherbereiche, die schwer zugänglich sind, Sützstellen (Abb. 5.2), also künstliche Punktwerte, zugeordnet werden. Hilfsmittel dabei können Fotografien, DGMs, Orthofotos oder verschiedene Messungen (z. B. Strahlung) sein.

Die für die Auswertung benötigten Gletscherumrisse (Abb. 5.2 und 5.3) werden von den Landesvermessungsämtern bezogenen Orthofotos abgezeichnet. Allerdings sind diese nicht für jedes Jahr verfügbar.

5.2 Gletscherentwicklung

Am letzten Gletscherhöchststand 1850 betrug die vergletschert Fläche der Goldberggruppe noch 34 km². Diese Fläche umfasste 37 einzelne Gletscher. Diese Fläche ist auf 8,5 km² (Stand 1992) – also auf ein Viertel – zurückgegangen. Dabei sind 14 Gletscher völlig verschwunden [Kroisleitner 2007]. Dabei ist zu bemerken, dass die Gletscherflächen südlich des Alpenhauptkammes stärker zurückgegangen sind als die nördlichen.

Die Entwicklung der Massenbilanzen seit dem Beginn der Massenbilanzerhebungen 1982 zeigt für alle drei Gletscher schwach fallende Trends (Abb. 5.5), wobei das Wurtenkees stärker betroffen ist. Das Goldbergkees kann auch während der Messzeitreihe auch mehrere positive Haushaltsjahre aufweisen. Die Jahresbilanz wird mehr von der Ablationsperiode als von der Akkumulationsperiode beeinflusst. Die langjährigen Winterakkumulationen für den Goldbergkees sind höher als für Wurten- und Kleinfleißkees.

6 Daten

Das Glazialhydrologische Monitoring im Sonnblickgebiet bietet eine Vielfalt an Datenmaterial – seien das meteorologische Zeitreihen oder Eistiefenmessungen [Schöner et al. 2009]. Die für die Massenbilanzberechnung nach der glaziologischen wichtigen Messpunkte und Gletscherflächen sowie Ergebnisse der Haushaltsberichte finden in dieser Arbeit Verwendung.

Digitale Geländemodelle (DGM) von 2002 und 2009 stehen zur Verfügung. Für die Berechnung von bestimmten Kenngrößen, die man etwa auf die Seehöhe bezieht, oder z.B. der ELA werden DGM verwendet. In dieser Arbeit kommen sie allerdings nicht zum Einsatz.

6.1 Massenhaushaltszeitreihe

Der Massenhaushalt der drei Sonnblickgletscher wird in den Haushaltsberichten dokumentiert. Diese wiederum werden in den Jahresberichten des Sonnblickvereins publiziert. Von 1983 bis 2001 wurde ausschließlich über die Haushaltsentwicklung des Wurtenkees berichtet. Seit 2002 werden alle drei Gletscher im Bericht behandelt (Tabelle 6.1).

Bis 1995 erfolgte die Auswertung für die Massenbilanzen mit der Kegelstumpfmethode nach Finsterwalder [1953], also vor allem über Konturlinienzeichnen und Planimetrieren. 1996 bis 1998 wurde mit Grafiktablett und einem Flächenberechnungsprogramm gearbeitet. Seit 1999 erfolgt die Auswertung in ArcGIS mittels räumlicher Interpolation bzw. Extrapolation. Das Interpolationswerkzeug Spline kommt dabei zum Einsatz (wird in Methodenteil weiter ausgeführt). Akkumulationsperiode und Haushaltsjahr wurden jeweils mit dem Fixed-Date-Ansatz abgegrenzt.

Tabelle 6.1 Jahres- und Winterbilanzen nach Massenhaushaltsberichte

Jahr	Methode	Wurtenkees		Goldbergkees		Kleinfleißkees		Fläche	Autor
		B	B _w	B	B _w	B	B _w		
2009	GIS	-482	1720	-773	2758	-351	1645	2003	Hynek ¹
2008	GIS	-773	1471	-928	2949	-543	1337	2003	Hynek ²
2007	GIS	-990	771	-1576	1847	-825	862	2003	Hynek ³
2006	GIS	-641	1188	-1537	2249	-571	1076	2003	Hynek ²
2005	GIS	-370	984	-370	1982	-97	996	2003	Hynek
2004	GIS	-258	1237	196	2475	109	1235	2003	Hynek
2003	GIS	-2116	1683	-2697	2591	-1296	1449	1998 ^f	Hynek ⁴
2002	GIS	-939	1360	-914	2774	-763	1259	1998	Hynek ⁴
2001	GIS	-291	1741					1998	Schöner ¹
2000	GIS	-661	1531					1998	Schöner ¹
1999	GIS	-1139	1590					1998	Schöner ¹
1998	PC [^]	-1436	1427					1991	Schöner ²
1997	PC [^]	-265	2111					1991	Wiesinger
1996	PC [^]	-698	842					1991	Wiesinger
1995	PL	-445	1666					1991	Wiesinger
1994	PL	-1768	1555					1991	Schmittner
1993	PL	-529	1655					1991	Formayer ¹
1992	PL	-1432	1696					1991	Formayer ¹
1991	PL	-1172	1376					1991	Formayer ¹
1990	PL	-1035	–					1983	Schöner
1989	PL	-193	–					1983	Schöner
1988	PL	-1060	1831					1983	Schöner
1987	PC [*]	-1121	2011					1983	Böhm ¹
1986	DPL [*]	-2149	1596					1983	Böhm ¹
1985	DPL [*]	-1497	1535					1983	Böhm ¹
1984	DPL	41	1228					1983	Böhm ¹
1983	PL	-1406	1863					1983	Böhm

B und B_w in 1000 t, Werte auf ganze Zahlen gerundet

GIS = Bearbeitung mit GIS Software, Spline Interpolation;

Auswertung nach Finsterwalder [1953] mit PL = Planimeter, DPL = Digitales Planimeter,

PC = Software;

[^] = gezeichnet mit Grafiktablett, ^{*} = gezeichnet mit CAD-System;

Hynek¹ = Hynek, Riesenhofer, Unger & Weyss

Hynek² = Hynek & Kroisleithner;

Hynek³ = Hynek, Kroisleitner & Schöner

Hynek⁴ = Hynek & Schöner;

Schöner¹ = Schöner & Klausch;

Schöner² = Schöner & Tomberger;

Formayer¹ = Formayer, Ruhsam & Schöner;

Böhm¹ = Böhm, Hammer & Strobl;

^f = Kleinfleißkeesfläche 2002 (siehe Kapitel 4.3)

Bericht 1989 und 1990 nicht zugänglich

Man sieht in Tabelle 6.1, dass im Laufe der Zeit verschiedene Personen die Auswertungen durchgeführt haben. Das führt zu Inhomogenitäten in dieser Zeitreihe. Kaser et al. [1995] zeigen, indem sie verschiedene routinierte Glaziologen die gleiche Auswertung nach Finsterwalder durchführen lassen, dass die Ergebnisse zwar abweichen aber nur um 10-mm-Werte. Und diese Fehler treten auch in anderen Bereichen im Zuge der Auswertung nach glaziologischer Methode auf.

In der Bakkalaureatsarbeit von Dragosics [2009] sind die Haushaltsergebnisse mit reanaly-sierten (mittels Spline in ArcGIS) Massenbilanzen verglichen worden, und die Ergebnisse korrelieren sehr gut. Damit sei auch gezeigt, dass man mit den verschiedenen angewendeten Flächenberechnungsverfahren auf sehr ähnliche Ergebnisse kommt.

Die Jahresbilanzen 1999 bis 2009 dienen in dieser Arbeit als Referenzwerte. Diese sind einheitlich mit GIS berechnet worden. Bei einer GIS-Auswertung werden neben den Messwerten noch ‚künstliche Punkte‘ (Stützstellen, siehe Kapitel 3.2.1) gesetzt, um Expert Knowledge über das Gelände und die Eigenheiten des Gletschers oder sonstige Bilanzbeeinflussende Gegebenheiten (Bach, Lawine, Abschattung) in die Auswertung miteinfließen zu lassen. Für die Haushaltsjahre vor 1999 sind diese (z. B. für die Reanalyse von Dragosics [2009]) im Nachhinein gesetzt worden.

6.2 Punktdaten

Das Pegelmessnetz auf den jeweiligen Gletschern unterliegt einem jeweiligen Messdesign, das etwa Bereiche, wo minimale oder maximale Ablation auftreten, berücksichtigt und eine homogene Pegelverteilung vorsieht. Die Verfügbarkeit der Pegel ist bei der Feldbegehung oft nicht gegeben. Pegel können zerstört worden, noch vom Schnee begraben oder heraus geschmolzen sein. Oft können bestimmte Gletscherbereiche aus Sicherheitsgründen nicht be-

gangen werden. Die geplante Pegeldichte bzw. Punktdichte für die jährlichen Auswertungen zur Verfügung zu haben, ist kaum möglich. In sehr heißen Jahren wie 2003 wandert die Schneelinie soweit nach oben, dass diese sehr kurz ist und mit wenigen Punkten aufgenommen ist. Die Messpunktanzahl variiert von Jahr zu Jahr und hat in den letzten Jahren zugenommen. Das bedeutet bei zeitgleichem Schrumpfen der Gletscherfläche eine Zunahme der Messpunktdichte.

In den Tabellen (6.2-6.7) lassen sich die Schwankungen der Punktzahl (damit auch Punktdichte) für die Winter- und Jahresbilanzen von Wurtenkees, Goldbergkees und Kleinfleißkees sehr gut erkennen. Neben Punktzahl werden auch die Punktarten (Schneeschart, Ablationspegel, etc.; siehe Kapitel 2.3.1) nach folgendem Schlüssel angegeben:

ΣSumme der Punkte
AST.....Ablationspegel (Ablation stake)
SLISchneelinie (Snowline)
STSStützstelle, ‚künstlicher Wert‘
WSTHolzpegel (Wooden stake)
PITSchneeschart (Snow pit)
PRO.....Sondierung (Probe)
GPRGeoradar-Messpunkt (Ground penetrating radar)
ULTUltraschallmessung
Mittelwerte Ø sind auf ganze Zahlen abgerundet

6.2.1 Messpunkte des Wurtenkees

Im Durchschnitt stehen zehn Ablationspegel pro Jahre für den Referenzzeitraum zur Verfügung. Es ist in Tabelle 4.2 erkennbar, dass immer mehr Stützstellen gesetzt und Schneelinienpunkte aufgenommen worden sind. Im Jahrhundertssommer 2003 ist der Gletscher vollständig ausgeapert, weshalb keine Schneelinie vorhanden war. Aufgrund des Schibetriebs am Wurtenkees (Abb. 4.11) lässt sich nicht verhindern, dass Schneepegel durch Pistengeräte beschädigt werden. Nicht immer können alle Pegel abgelesen werden.

Dividiert man die mittlere Punktzahl durch die Gletscherfläche 2003 (0,82 km²) so erhält man eine mittlere Punktdichte von 142 je Quadratkilometer. Die mittlere Pegeldichte beträgt 12 je km².

Tabelle 6.2 Punktwerte für Wurtenkees- Jahresbilanzen

Jahr	Σ	AST	SLI	STS
2009	149	9	1	139
2008	204	9	124	71
2007	120	9	7	104
2006	210	7	111	92
2005	157	7	108	42
2004	135	6	88	40
2003	32	10	22	-
2002	24	13	9	2
2001	83	15	54	14
2000	100	15	65	20
1999	77	6	53	18
Ø	117	10	58	49

Tabelle 6.3 Punktwerte für die Wurtenkees-Winterbilanzen

Jahr	Σ	PIT	PRO	STS	GPR
2009	238	10	-	2	226
2008	101	10	91	-	-
2007	456	16	22	26	392
2006	100	10	81	9	-
2005	103	8	85	10	-
2004	101	8	82	6	-
2003	122	13	107	2	-
2002	107	14	93	-	-
2001	88	12	76	-	-
2000	96	13	83	-	-
1999	96	13	80	3	-
Ø	146	11	72	5	

Da für die Winterbilanzberechnung aufgrund von Sondierungen und Georadarmessungen zu Verfügung stehen, werden weniger Stützstellen benötigt, um auf eine adäquate Punktdichte zu kommen. Seit 2007 wird auf den drei Gletschern mit dem Georadar Messpunkte für die Winterbilanz aufgenommen. Allerdings sind diese Punkte nicht homogen auf der Gletscherfläche verteilt, sondern entlang einer Route (Abb. 4.12, Kleinfleißkees). Durch die Georadarmessungen wird die Punktzahl deutlich erhöht (Tabelle 4.3 und auch 4.5 und 4.7). Die durchschnittlichen Punkt- und Schneeschachtdichten sind 178 und 13 je km². Die Streuung

der Schneedichtewerte ist am Wurtenkees wegen der Pistenpräparierung am höchsten. Eine möglichst hohe Schneeschachtdichte ist dort umso notwendiger.

2008 sind keine GPR-Messungen am Wurtenkees durchgeführt worden. Dafür hat man sich für das Setzen von Stützstellen

6.2.2 Messpunkte des Goldbergkees

Besonders die Stützstellen und Schneelinien-Punkte sorgen für eine hohe Anzahl an Punktwerten für die Berechnung der Jahresbilanz (Tab. 6.4). Die heterogene Topographie des Gletscherumfelds verlangt vermehrten Einsatz von Stützstellen. Die mittlere Punktdichte und Pegeldichte beträgt bei der Gletscherfläche von 2003 149 und 12 je km². Die Punkt- und Schneeschachtdichte für die Winterbilanzberechnung beträgt 162 und 6 je km².

Auf der Fleißcharte findet eine automatische Höhenmessung mit Ultraschall statt (Abbildung 6.12). Das Messgerät gehört zur Automatischen Wetterstation, die dort postiert ist. Die Ultraschallmessungen geben allerdings selten verlässliche Messwerte.

Tabelle 6.4 Punktwerte für Goldbergkees- Jahresbilanzen

Jahr	Σ	AST	SLI	STS	PIT	PRO	ULT
2009	179	22	139	18			
2008	378	23	339	-	2	14	-
2007	454	21	427	6	-	-	-
2006	210	16	82	112	-	-	-
2005	223	15	155	37	1	14	1
2004	205	15	116	9	-	-	-
2003	42	20	7	15	-	-	-
2002	58	13	44	1	-	-	-
2001	210	13	186	11	-	-	-
2000	240	17	188	35	-	-	-
1999	160	16	84	60	-	-	-
Ø	214	17	160	27			

Tabelle 6.5 Punktwerte für die Goldbergkees-Winterbilanzen

Jahr	Σ	PIT	PRO	STS	GPR
2009	755	9	-	84	662
2008	425	10	6	53	356
2007	477	9	58	43	367
2006	121	8	103	10	-
2005	168	8	138	22	-
2004	132	6	120	6	-
2003	120	16	103	1	-
2002	104	6	98	-	-
2001	76	8	68	-	-
2000	93	8	85	-	-
1999	84	8	76	-	-
Ø	232	8	77	19	

6. 2.3 Messpunkte des Kleinfleißkees

Das Kleinfleißkees hat mit durchschnittlich 154 je km² eine so ähnlich hohe Punktdichte wie der Goldbergkees. Neben Kunststoffpegel sind zusätzlich noch Holzpegel eingebohrt. Die Pegeldichte bezieht sich nur auf die Kunststoffpegel und beträgt durchschnittlich 10 je km². Punkt- und Schachtdichte für die Winterbilanzauswertungen streuen um die 168 und 5 je km².

Tabelle 6.4 Punktwerte für Kleinfleißkees-Jahresbilanzen

Jahr	Σ	AST	SLI	STS	PIT	PRO	WST
2009	66	7	51	8	-	-	-
2008	125	9	106	-	2	-	-
2007	422	9	401	12	-	-	-
2006	160	10	100	50	-	-	-
2005	154	9	114	14	-	-	-
2004	169	7	124	10	2	-	4
2003	21	8	-	13	-	-	-
2002	36	8	9	19	-	-	-
2001	97	5	75	4	-	13	-
2000	105	7	94	1	-	-	3
1999	122	27	94	1	-	-	-
Ø	134	9	106	12			

Tabelle 6.7 Punktwerte für die Kleinfleißkees-Winterbilanzen

Jahr	Σ	PIT	PRO	STS	GPR
2009	378	3	-	65	310
2008	341	5	7	10	319
2007	287	7	9	14	257
2006	76	5	54	17	-
2005	92	5	84	3	-
2004	86	5	76	5	-
2003	85	10	68	7	-
2002	74	4	65	5	-
2001	57	5	46	6	-
2000	78	4	74	-	-
1999	72	6	59	7	-
Ø	147	5	49	12	

6.2.4 Einteilung in Punktqualität

Wie schon in Kapitel 3.1.5 besprochen lassen sich die Punkte in verschiedenen Klassen bezüglich ihrer Informationsqualität einteilen (Tabelle 6.8). Diese sei besonders gut, wenn man sich auf gemessene (bzw. bekannte) Werte beziehen kann. Das ist bei Schneeschächten, Ablaitons- und Holzpegel sowie Schneelinie der Fall (Klasse A). Bei Sondierpunkt, Radarpunkt oder Ultraschallmessung wird Höhenunterschied und Koordinaten gemessen, nicht aber die Schneedichte (Klasse B). Für Stützstellen werden alle diese drei Parameter geschätzt (educated guess) (Klasse C).

Tabelle 6.8 Einteilung der Punktarten in Klassen nach Informationsqualität

ρ	h	xy	Punktart	KI
x	x	x	PIT, AST, WST, SLI	A
-	x	x	PRO, GPR, ULT	B
-	-	-	STS	C

ρ = gemessene oder bekannte Dichte; h = gemessene Höhenänderung; xy = gemessene Koordinaten;
KI = Klasse nach Informationsqualität

Grundsätzlich trachtet man nach einer möglichst hohen Punktwertdichten mit homogener Verteilung über die Gletscherfläche. Die Qualität der Punkte spielt allerdings eine große Rolle. Für die Jahresbilanzerstellung sind Ablationspegel sehr wichtig, weil sie gemessene Werte sind und die räumliche Variabilität der punktuellen Massenbilanzen wiedergeben. Diese bilden aber in der Regel die Minderheit der Punktwerte für die Jahresbilanz. Der Hauptteil der A-Punktwerte wird von den Schneelinien-Punkten geprägt. Diese bildet von Jahr zu Jahr ein anderes räumliches Muster. Und je nach Form und Länge lassen sich verschieden viele Punkte aufnehmen. Dazu kommt, dass verschiedene Bearbeiter bei der Feldaufnahme verschiedene Entscheidungen treffen. So wurde etwa am Goldbergkees und Kleinfleißkees 2007 die Entscheidung getroffen über 400 Schneelinien-Punkte aufzunehmen.

In den Jahren 2006 (GOK), 2007 und 2008 (WUK) überwiegen geschätzte Werte sogar über die gemessenen. Der Fehlerbalken über eine dieser Jahresbilanzen muss wesentlich größer sein, als in Jahren mit geringem oder gar keinen Anteil an C-Punkten. Für die Datensammlung der Sommerfeldmessungen gibt es nur ganz wenige Jahre mit B-Punktwerten, und auch dann sind es nur knapp so viele wie Ablationspegel.

In den Daten für die Winterbilanz dominieren die B-Punktwerte. Besonders seit Verwendung des Georadars sind die Punktdichten sehr hoch (556 je km² für WUK 2007, 540 je km² für GOK 2009, 420 je km² für FLK 2009).

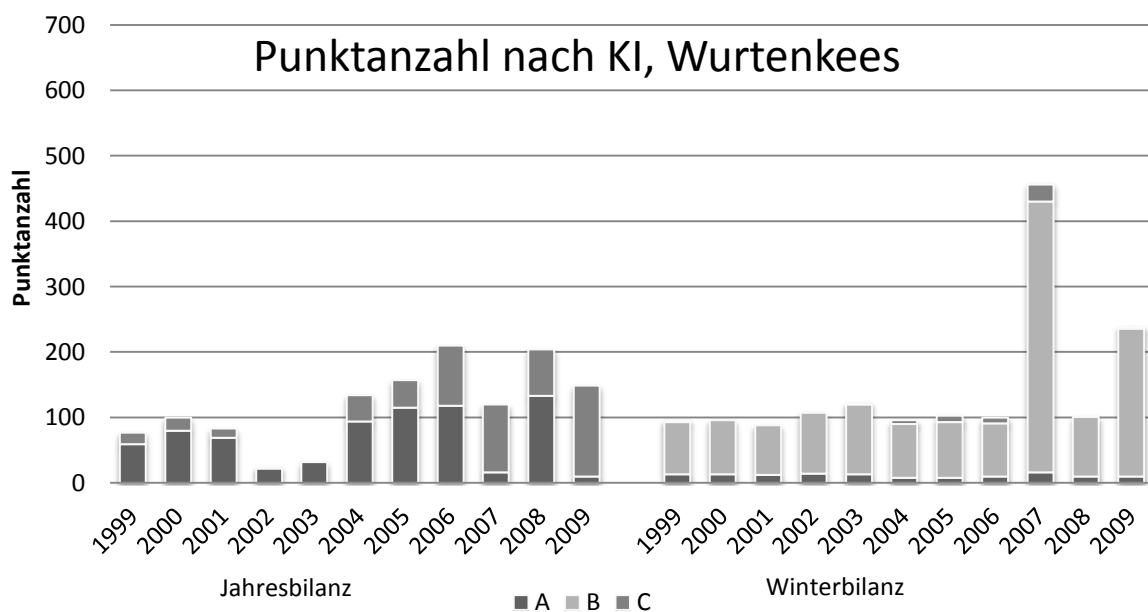


Abbildung 6.8: Punktzahl nach Informationsqualität

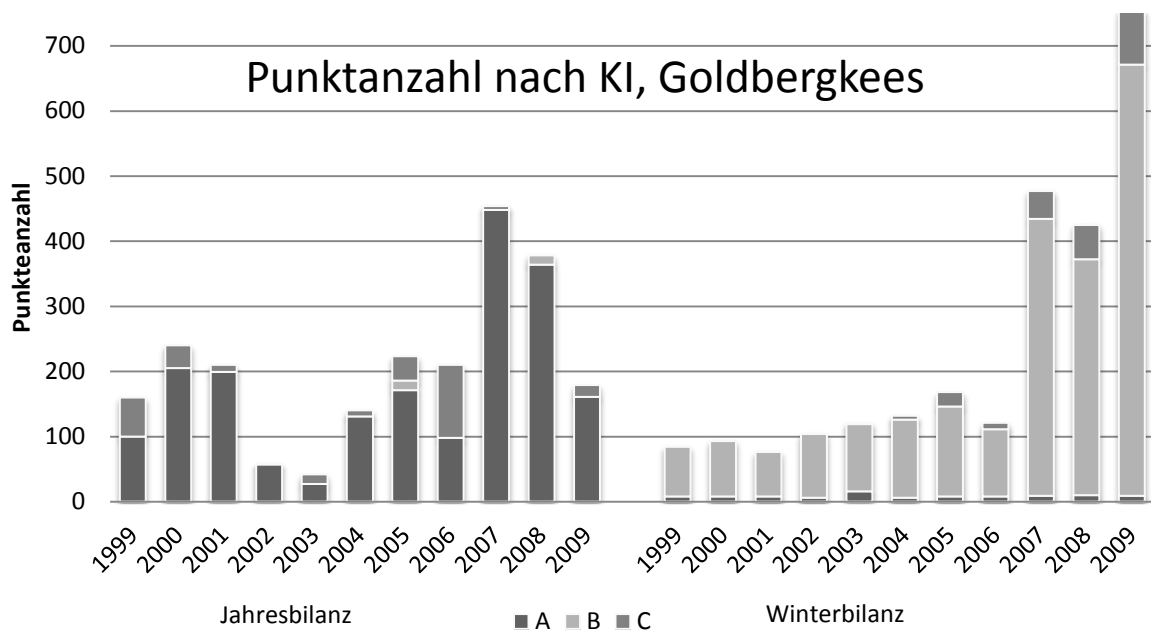


Abbildung 6.9: Punktzahl nach Informationsklasse

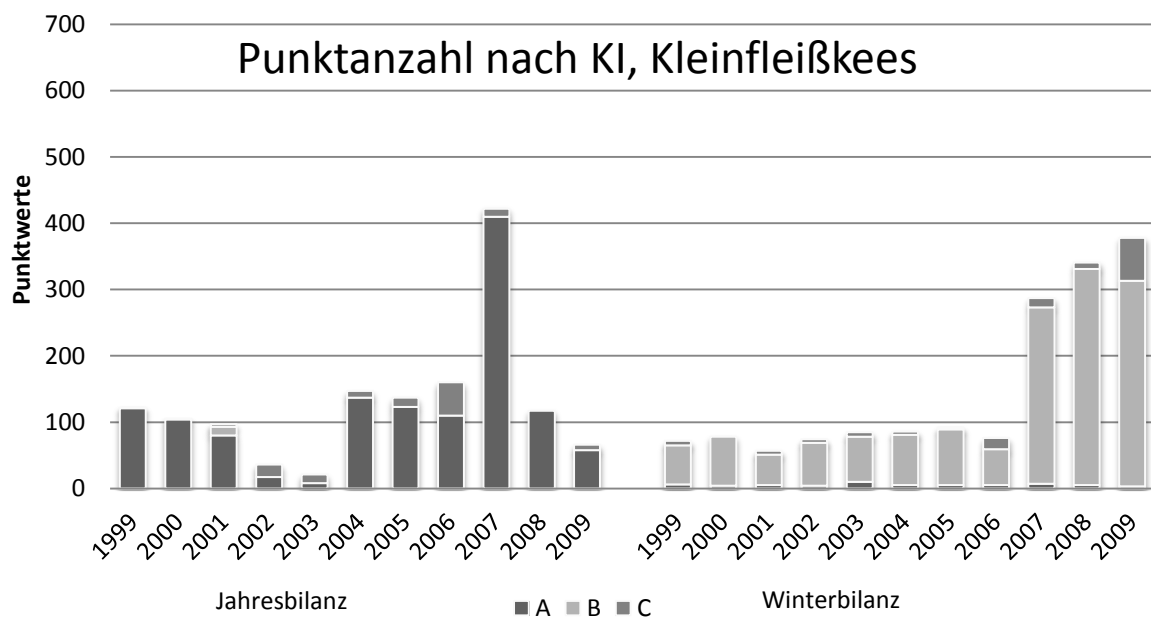


Abbildung 6.10: Punktzahl nach Informationsklasse (KI), Kleinfleißkees, Jahresbilanz

6.3 Gletscherflächen

Für die Berechnung der Massenbilanzen sind jeweils die aktuellsten Gletscherflächen verwendet worden. Diese Flächen leitet man von einem Orthofoto bzw. DGM des Gletschers ab, indem in einem GIS die Gletscherumrisse nachgezeichnet werden (Abb. 5.3 & 5.4). Orthofotos von 1998, 2003, 2006 und 2009 sind verfügbar. Diese stammen von den Landesaufnahmen vom Land Salzburg (SAGIS) und Kärnten (KAGIS) (Tabelle 6.9).

Tabelle 6.9 Von Orthofotos abgeleitete Gletscherflächen 1998-2009

Jahr	WUK [km ²]	GOK [km ²]	FLK [km ²]
2009	0,770	1,316	0,945
2006	0,801	1,354	0,872
2003	0,824	1,424	0,872 (2002: 0,898)
1998	0,972	1,493	0,945

2002 ereignete sich ein Eissturz auf dem Kleinfleißkees. Der Gletscher hat dabei etwa 5 % seiner Fläche eingebüßt [Hynek & Schöner 2002]. Die Gletscherfläche für die Auswertungen 2002 mussten daraufhin angepasst werden.

In der Zwischenzeit sind auch für die Jahre ohne Orthofoto Gletscherflächen erstellt worden. Dafür dienten die jährlich gemessenen Längenänderungen sowie die vorhandenen Orthofotos und DGMs als Grundlage. [Hynek persönliches Gespräch]

Eine wichtige Unterstützung beim Erstellen von Gletscherflächen sind möglichst hochauflösende digitale Geländemodelle. Daraus lässt sich in einem GIS ein Relief erstellen, das Geländestrukturen des Gletscherumfeldes besonders gut visualisiert.

Bei Vergleich von DGMs zweier verschiedener Zeitpunkte lässt sich die Veränderung der Dicke des Gletschers zeigen, insbesondere an den Gletscherrändern. Diese sind oft von Schutt bedeckt. Es ist anhand von Orthofotos allein schwierig, bedeckte Gletscherteile vom Gletschervorfeld abzugrenzen (siehe Kapitel 2.5). Höhenunterschiede in diesen Bereichen weisen auf bedeckte Gletscherteile hin. [Abermann et al. 2010]

7 Methoden

Die Fehlervarianz der direkten Methode wird in dieser Arbeit auf drei verschiedene Fehler geprüft: auf den Extrapolationsfehler, den Fehler durch Verwenden von nicht aktuellen Gletscherflächen und der Einfluss von Expert Knowledge auf die Massenbilanz. Im Folgenden werden die Arbeitsschritte der Analyse beschrieben.

7.1 Angewendete Interpolationsverfahren

Mit vier verschiedenen Interpolationsroutinen, die in der Literatur schon für die Massenbilanzauswertung verwendet worden sind, wird die Zeitreihe von 1999 bis 2009 für Wurten-, Goldberg- und Kleinfleißkees (jeweils Jahres- und Winterbilanz) reanalysiert. Die vier neu entstandenen Zeitreihen werden mit der Haushaltsberichtszeitreihe verglichen. Es wird für jedes Jahr geprüft, welche Interpolationsroutine bringt den höchsten, den tiefsten und den Wert, der dem Mittelwert und dem Referenzwert am nächsten ist. Jene Interpolationsroutine, die letztere beide Bedingungen am häufigsten erfüllt ist die, die bei den weiteren Analysen verwendet werden soll. Das Maximum und Minimum eines Jahres geben den Fehler der Extrapolationsmethode wieder.

Für die Interpolationen finden einheitlich auf einem 10-m-aufgelösten Raster statt. Wie in der Referenzzeitreihe werden die Jahre 1999-2003 auf der Gletscherfläche von 2008 und von 2004 bis 2009 auf der Gletscherfläche von 2003 ausgewertet.

7.1.1 Ordinary Kriging (ok)

Diese Anwendung dieser Interpolationsroutine auf ausgewählte Daten des Storglaciären wurde von Hock und Jensen [1999] ausführlich diskutiert. Für die Reanalyse der Storglaciären-Zeitreihe [Holmlund, Jansson & Petterson 2005] ist diese Methode ebenso angewendet worden. Eine genaue Beschreibung des

In dieser Arbeit wird Ordinary Kriging wie bei Hock und Jensen [1999] in einem GIS angewendet. In ArcGIS 10.1.4 gibt es mehrere Instrumente zum Prüfen der Daten auf Autokorrelation (Kapitel 7.4), Normalverteilung, Trend und Isotropie. Für jedes Winter- und Jahresbi-

lanz jedes Gletschers sind die Daten über Histogramm und QQ-Plots auf Normalverteilung überprüft worden (Prüfung auf Stationarität 1. Ordnung). Mit einer Applikaion zur Trendanalyse (Abb. 7.1) lässt sich feststellen, ob ein Trend besteht, und wenn ja, welchen Grades. Dieser identifizierte Trend (immer zweiter Ordnung) wurde entfernt und nach der Kriging-Durchführung wieder dazugerechnet. Über ein Tool zur Trenddetektion lässt sich nach Trendentfernung noch überprüfen, ob (und auch in welche Richtung) die Werte tatsächlich unabhängig sind. Ist das der Fall, so wurde bei den Funktionseinstellungen anisotrop gewählt.

Trend Analysis

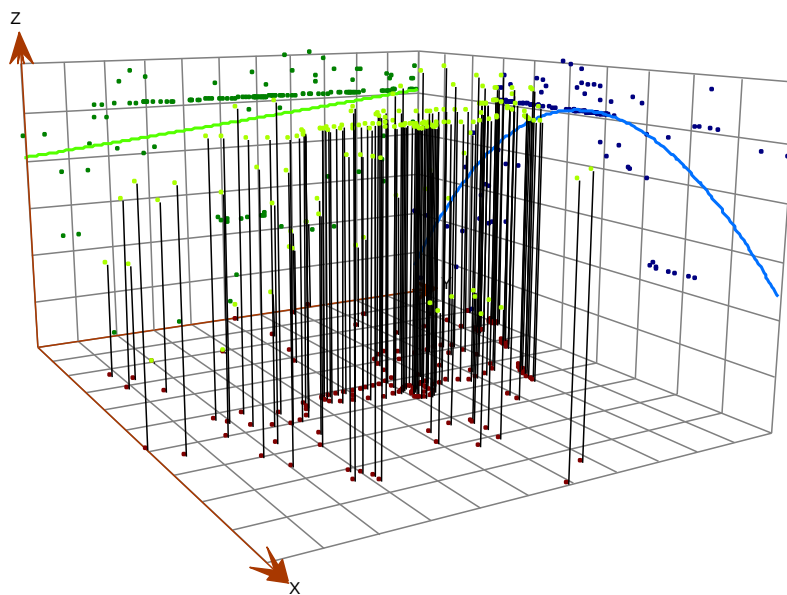


Abbildung 7.1 Applikation zur Trendanalyse in ArcGIS, U-Formen zeigen guten globalen Trend [esri.com]

Die Anpassung des theoretischen Modells an das empirische (Abb. 7.2) geschieht über automatische Anpassung über die Methode der kleinsten Quadrate. Die interpolierte Fläche wurde in ein Raster mit 10 x 10 m Auflösung umgewandelt und aus den Pixelwerten die Summe gebildet. Somit erhält man die Jahresbilanz B.

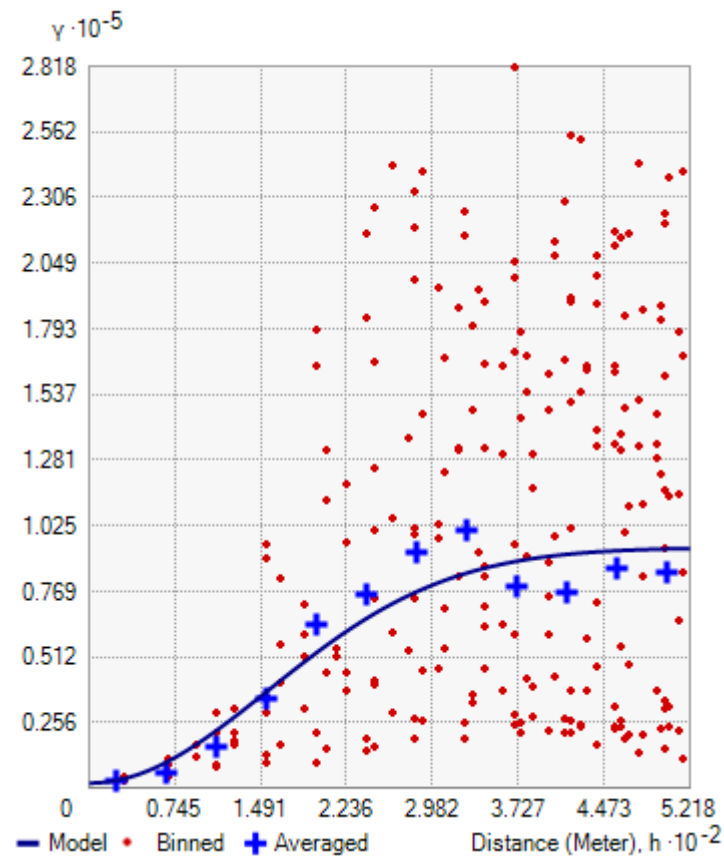


Abbildung. 7.2 Automatische Anpassung des theoretischen an das empirische Variogramm [esri.com]

7.1.2 Regular Spline (sp)

Auf der ZAMG wird seit 1999 mit einem robust spline die Massenbilanzauswertungen durchgeführt. Dazumals noch mit einer ArcView-Version. Mit jeder neuen Version oder sogar mit jedem neuen Patch können die Ergebnisse abweichen [Riedl pers. Gespräch]. Für die Spline-Interpolation sind keine Vorarbeiten durchgeführt worden.

7.1.3 Default Kriging (dk)

Wie schon in Kapitel 4.1.4 beschrieben wird für die jährliche Auswertung am Storglaciären die Standardeinstellung von Kriging in der GIS-Software Surfer verwendet. Dabei wird nicht erwähnt, ob sich dabei die Interpolaitonseinstellungen automatisch an die Daten anpassen (automatische Prüfung) oder ob das statische Einstellungen sind. Diese Interpolationsroutine wird hier auch durchgeführt, allerdings nicht in einem GIS, sondern in der Programmiersoftware Matlab, wie es bei Holmlund, Jansson & Petersson [2005] gemacht worden ist. Diese haben sich der Funktion in der Geostatistical Library bedient und verweisen dabei auf die

Autoren Deutsch & Journeel [1992]. Das hier verwendete Kriging-Skript (Zusammensetzung aus drei Skripten [Pankratov 1995, Schwanghart 2010 & 2011]) stammt aus dem Matlab-Fileexchange und wird als Interpolationsroutine in das Auswertungsprogramm von Bernhard Hynek [2011] (10-m-Auflösung) eingesetzt.

7.1.4 Gridfit + Bilineare Interpolation (bi)

Das Auswertungsprogramm von Hynek [2011] hat als Standardeinstellung eine Gridfit-Funktion [D’Ericco 2006]. Diese Funktion generiert eine Oberfläche aus einem 2D-Raster (Abb. 7.3). Dabei wird durch das gestreute Punktmuster (scattered data) ein Raster angepasst, so dass zu jedem Punkt in der Z-Achse ein minimaler Abstand entsteht. An jenen Rasterzellen, wo mindestens ein Punkt gewesen ist erhält einen Wert. Den leeren Zellen wird über bilineare Interpolation ein Wert zugewiesen.

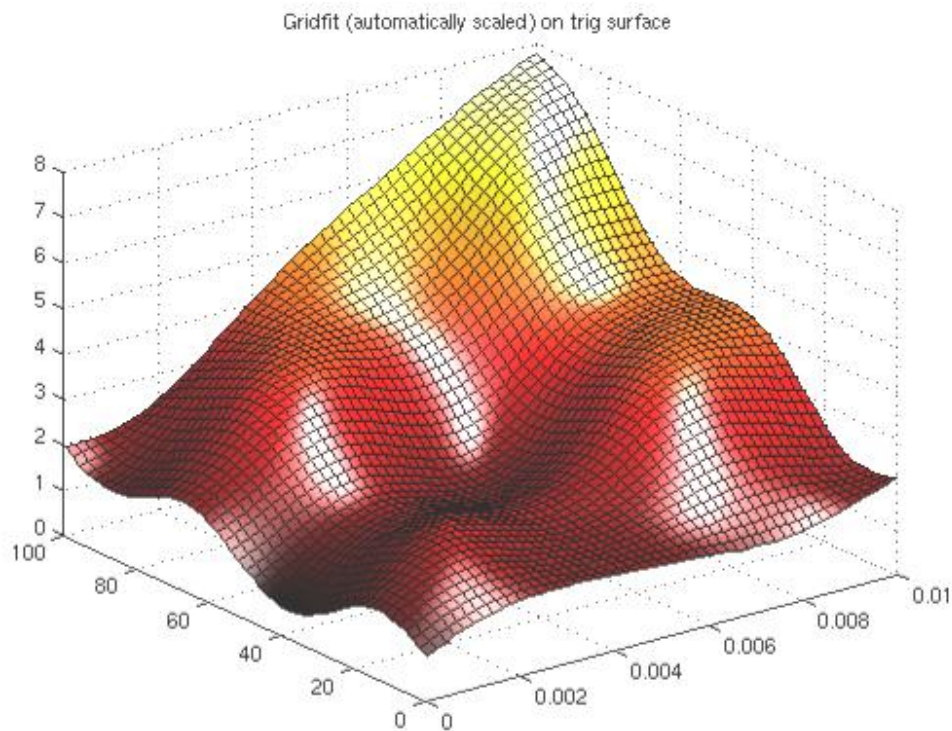


Abbildung 7.3 Über Gridfit generierte Oberfläche [D’Ericco 2006]

7.2 Verwendung verschiedener Gletscherflächen

Mit der ausgewählten Interpolationsmethode werden konventionelle Massenbilanzen (Winter- und Jahresbilanz) sowie Referenzoberflächen-Massenbilanzen [Elsbert et al. 2001] (nicht für Winterbilanz) erstellt. Letztere verwendet für Auswertungen nur die Gletscherfläche von 1998. Dazu werden noch zwei weitere Durchgänge mit der Gletscherfläche des Vorjahres und des Jahres danach durchgeführt.

7.3 Einfluss von Expert Knowledge

Die künstlichen Punktwerte sind für die Auswertungen jeweils weggelassen worden. Dadurch erhält man eine Zeitreihe die von der Referenzzeitreihe positiv oder negativ abweicht. Sind viele Stützstellen gesetzt worden, wird eine größere Abweichung erwartet.

7.4 Kennwerte für räumliche Verteilung von Punkten

Die Kennwerte Nearest-Neighbor-Index (NNI), Morans' I und Geary's C wurden mit der Software Crimestat 3 [Levine 2010] berechnet. Die Datensätze sind vor dieser Berechnung durch Trendbereinigung standardisiert worden.

7.4.1 Autokorrelationsmaße

Moran's I und Geary's C sind Maße für räumliche Autokorrelation. Sie geben also Auskunft über die Beziehung die zwischen dem Unterschied der nichträumlichen Attribute (punktuelle Massenbilanz) und der Entfernung zwischen diesen Objekten besteht. Objekte die einander nahe sind und sehr ähnliche Attributwerte haben, korrelieren auch stark miteinander (positive Autokorrelation). Sind Objekte nahe bei einander und haben stark voneinander abweichende Attributwerte, so korrelieren diese negativ. [Anselin 1995]

Moran's-I-Werte reichen von -1 (negative Autokorrelation) bis +1 (positive Autokorrelation), Geary's-C-Werte liegen zwischen 0 (positive Autokorrelation) und 2 (negative Autokorrelation).

on), wobei 1 keine Autokorrelation bedeutet. Je näher ein Moran's-I-Wert an -1 reicht, desto homogener ist die Punktverteilung. Für Geary's C gilt das für einen Wert nahe 2.

7.4.2 Nearest-Neighbor-Index (NNI)

Der NNI verwendet Distanzen zwischen jeden Punkt und seinen nächsten Nachbarpunkt eines Datensatzes und bestimmt damit, ob das Punktmuster geclustert, zufällig verteilt oder regelmäßig angeordnet ist [Levine 2010]. Ein Wert unter 1 bedeutet, dass das Punktmuster zu Clusterbildung neigt. Je weiter der Wert über 1 liegt, desto homogener ist das Punktmuster verteilt.

Diese drei Maßzahlen und die Punktdichte werden mit den mittleren Abweichungen von den Mittelwerten der Interpolationsergebnisse korreliert, und somit geprüft, ob ein Zusammenhang besteht.

8 Ergebnisse

8.1 Fehlervarianz in der Extrapolation

Die Ergebnisse der verschiedenen Interpolationsmethoden für die spez. Jahresbilanz b auf dem Wurtenkees weichen im Schnitt um $\pm 0,15$ mm w.e. vom Mittelwert ab. Die maximale mittlere Abweichung beträgt $\pm 0,9$ mm w.e. im Jahr 2003. Vor allem die Kriging-Varianten Ordinary Kriging (ok) und Default Kriging (dk) weichen positiv von den anderen Interpolationsergebnissen ab (Abb. 8.1). Diese berechneten Werte dieser beiden Methoden liegen enger zusammen als im Verhältnis zu den anderen Methoden. Auch die Spline Methode zeigt oft große Übereinstimmung mit der Referenzzeitreihe, die auch mit einer Spline-Interpolation berechnet worden ist. Ohne das Jahr 2003 beträgt die mittlere Abweichung vom Mittelwert $\pm 0,08$ m w.e. Vor allem die Ergebnisse der Gridfit-Methode (gf bi) liegen nahe an den Mittelwerten. Abbildung 8.2 zeigt die Fehlervarianz in Balkenansicht. Die Balken zeigen die absoluten Abweichungen vom Mittelwert wieder bzw. die Spannweite der Fehlervarianz.

Für das Goldbergkees beträgt die mittlere Abweichung vom Mittelwert der Massenbilanzen bei $0,16$ m w.e. Die größten Unterscheide werden hier (Abb. 8.3, Abb. 8.4) allerdings nicht im Jahr 2003, sondern 2001 und 2007 gezeigt, mit den mittleren Abweichungen von $\pm 0,36$ m w.e. Der Goldbergkees wie auch der Kleinfleißkees werden in den Haushaltsberichten erst seit 2002 behandelt, deshalb der späte Beginn dieser Zeitreihe.

Für das Kleinfleißkees weichen die Interpolationsergebnisse weitaus weniger voneinander ab. Die Mittlere Abweichung vom Mittelwert beträgt $\pm 0,08$ m w.e. Etwa doppelt so hoch sind die maximalen Mittlere Abweichungen 2002, 2003 und 2007.

Sehr geringe Abweichungen zeigen auch die Winterbilanzergebnisse: Wurtenkees $\pm 0,04$ m w.e., Goldbergkees $\pm 0,07$ m w.e. und Kleinfleißkes $\pm 0,09$ m w.e. Die Zeitreihen zeigen kaum Abweichungen, deshalb sei hier auch nur jene vom Goldbergkees gezeigt (Abb. 8.7, Abb. 8.8), die noch die größten Schwankungen zeigt, die wahrscheinlich auf unterschiedlichen Punktdichten fußen.

Fehlervarianz Interpolationsmethoden, spez. Jahresbilanz Wurtenkees 1999-2009

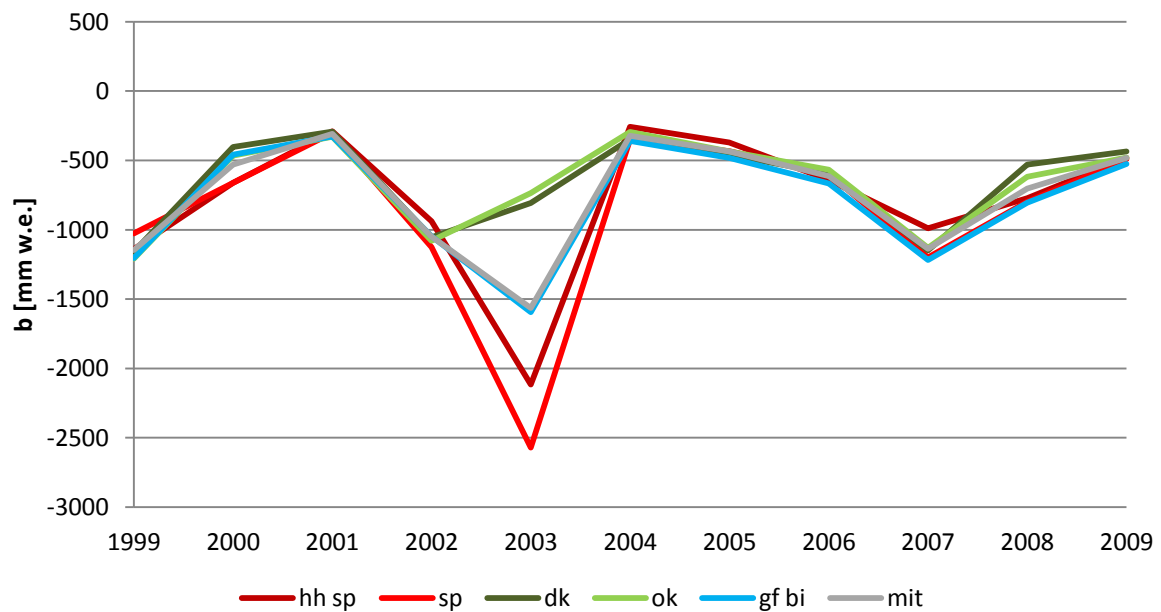


Abbildung 8.1 Fehlervarianz Interpolationsmethoden Wurtenkees, Jahresbilanz

Fehlerbalken Interpolationsmethoden, spez. Jahresbilanz Wurtenkees 1999-2009,

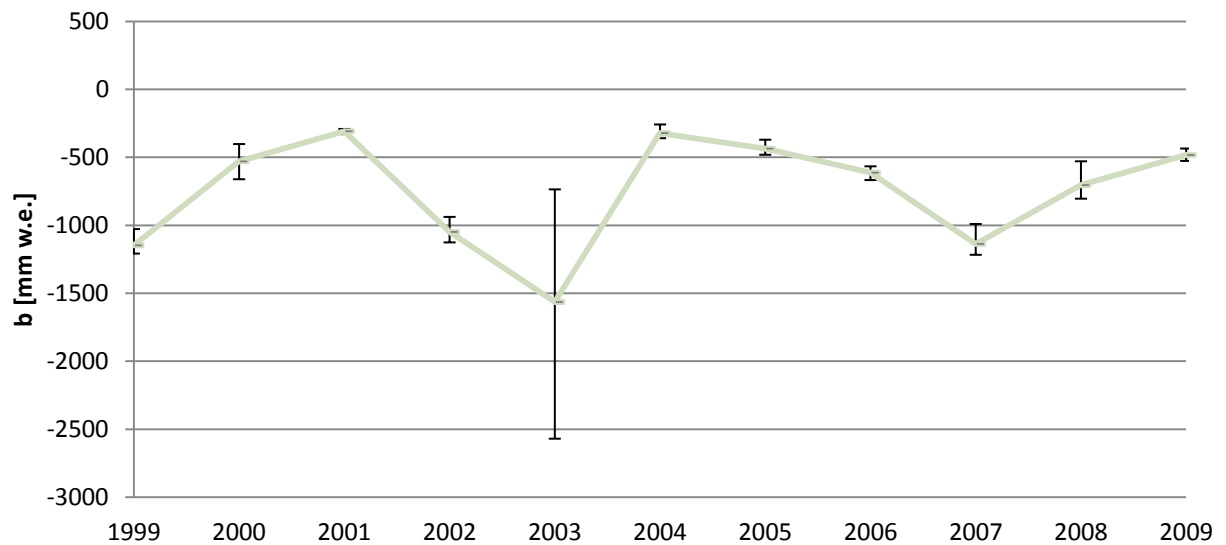


Abbildung. 8.2 Fehlerbalken Interpolationsmethoden Wurtenkees, spez. Jahresbilanz

Fehlervarianz Interpolationsmethoden, spez. Jahresbilanz Goldbergkees 1999-2009

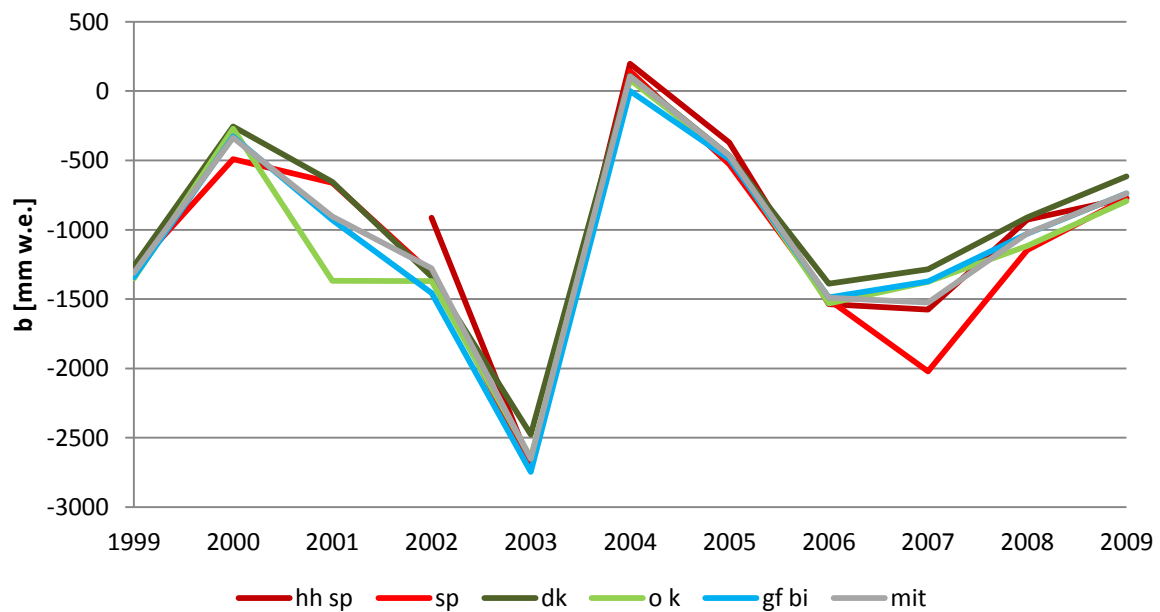


Abbildung 8.3 Fehlervarianz Interpolationsmethoden Goldbergkees, Jahresbilanz

Fehlerbalken Interpolationsmethoden, spez. Jahresbilanz Goldbergkees 1999-2009,

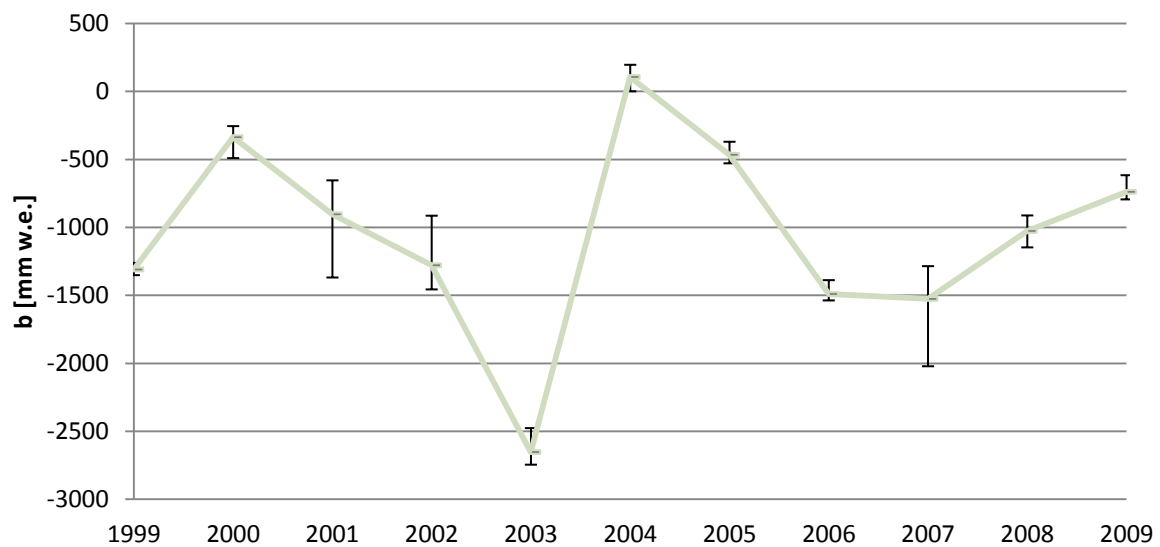


Abbildung 8.4 Fehlerbalken Interpolationsmethoden Goldbergkees, Jahresbilanz

Fehlervarianz Interpolationsmethoden, spez. Jahresbilanz Kleinfleißkees 1999-2009



Abbildung 8.5 Fehlervarianz Interpolationsmethoden Goldbergkees, Jahresbilanz

Fehlerbalken Interpolationsmethoden, spez. Jahresbilanz Kleinfleißkees 1999-2009

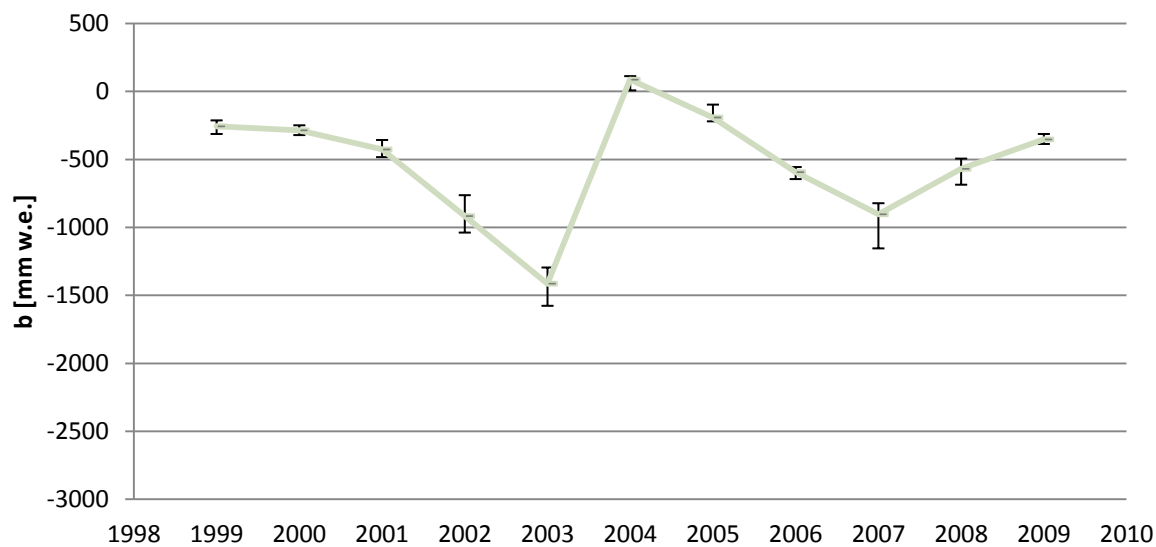


Abbildung 8.6 Fehlerbalken Interpolationsmethoden Goldbergkees, Jahresbilanz

Fehlervarianz Interpolationsmethoden, spez. Winterbilanz Goldbergkees 1999-2009

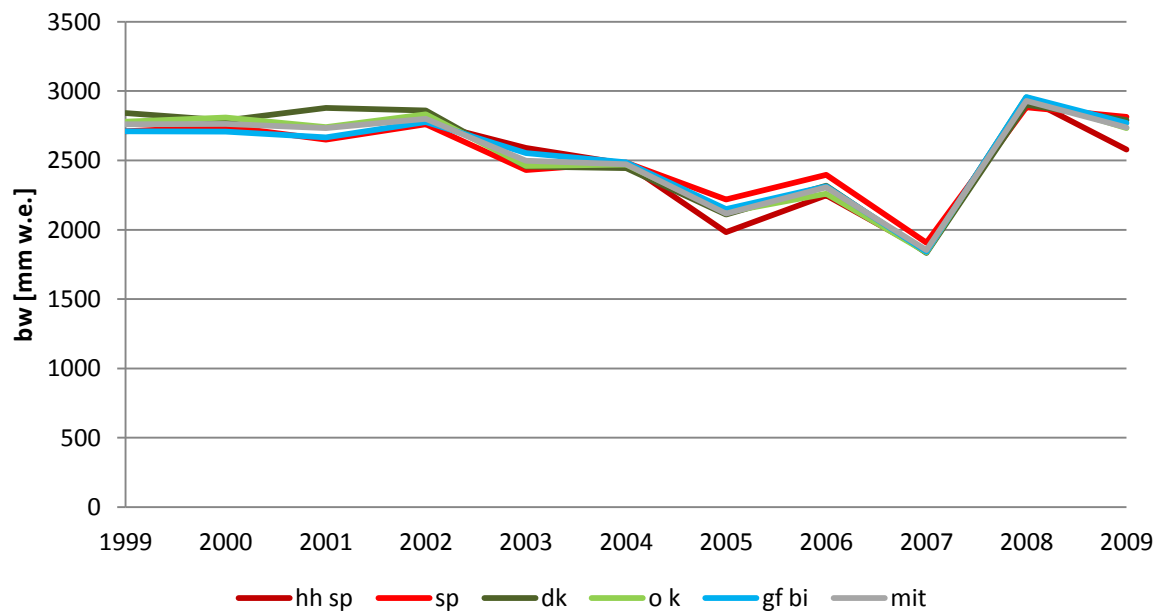


Abbildung 8.7 Fehlervarianz Interpolationsmethoden Goldbergkees, Winterbilanz

Fehlerbalken Interpolationsmethoden, spez. Winterbilanz Goldbergkees 1999-2009

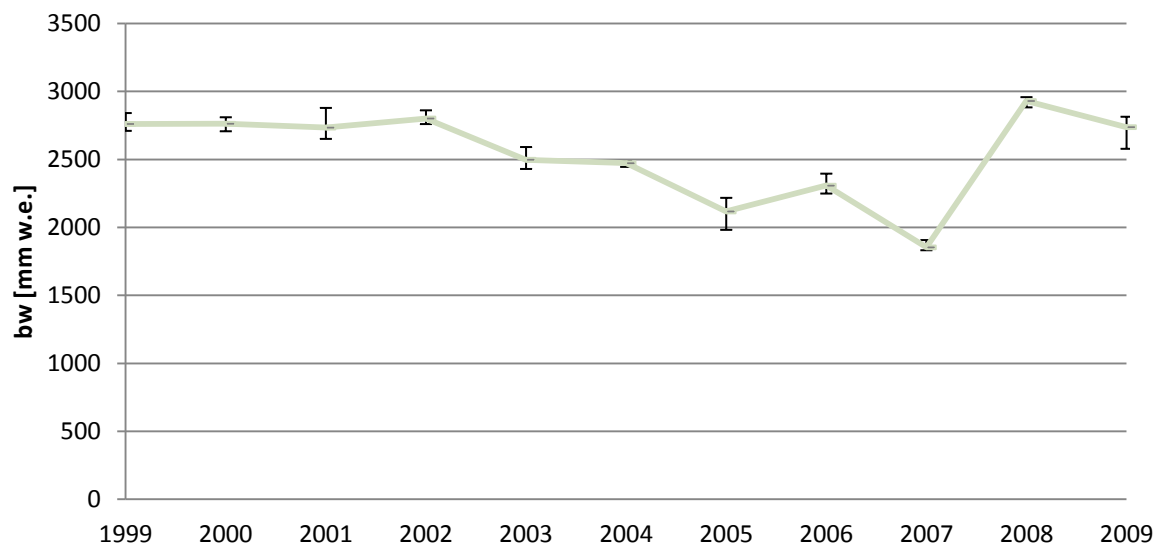


Abbildung 8.8 Fehlerbalken Interpolationsmethoden Goldbergkees, Winterbilanz

Jene Interpolationsroutine die am häufigsten den Referenzwert und dem Mittelwert am nächsten ist, soll als Methode für die weiteren Analysen eingesetzt werden (Kapitel 4.3.1). In Tabelle 8.1 sieht man die Häufigkeiten mit der eine Methode den Referenzwert am nächsten ist. Von 54 Vergleichsjahren mit dem Referenzwert (Jahres- und Winterbilanz von Wurtenkees 99-09, sowie Goldberg- und Kleinfleißkees 02-09) und 60 Jahren Vergleichswerte mit dem Mittelwert (Jahresbilanz- und Winterbilanz der Gletscher 99-09 und sechs Jahren wo der Referenzwert dem Mittel am nächsten ist) sind 24 dabei, wo das auf die Spline-Interpolation (sp) zutrifft. Die Ergebnisse von Default Kriging sind in Summe 22 Mal den Referenz- und Mittelwerten am nächsten, jene von Ordinary Kriging 33 Mal und jene von Gridfit mit bilinearer Interpolation 35 Mal. Was für die Weiterverwendung von Gridfit spricht. Diese Methode ist auch jene die am Häufigsten den Mittelwert bei einer Punktdichte unter 100 je km² trifft (Tabelle 8.1 Ø*)

Tabelle 8.1 Häufigkeiten der nächsten Distanz zum Referenzwert und Mittelwert

	gesamt	sp	dk	ok	gf bi
hhb	54	12	9	13	20
Ø	60	12	13	20	15
Σ	114	24	22	33	35
Ø*	20	6	3	4	7

*Jahre mit Punktdichte unter 100 pts/km²

8.2 Flächenfehler

Die mittlere Varianz in den Flächenfehlern ist höher als beim Extrapolationsfehler. Tabelle 8.2 zeigt die gemittelte Fehlervarianz der 11-jährigen Zeitreihe. Die Spannweite (span) zeigt, wie groß der Abstand des größten berechneten Wertes zum kleinsten Wert ist – ebenfalls auf die 11 Jahre gemittelt. Das Jahr mit der höchsten Fehlerspannweite (Fehlerbalken) wird als max und das mit der niedrigsten als min gekennzeichnet. Die größten Spannweiten zeigen die Flächenänderungen bei den spezifischen Jahresbilanzen von Goldbergkees und Wur-

tenkees 0,6 und 0,4 m w.e. Dabei zeigt die maximale Spannweite des Flächenfehlers sogar ein Jahr mit beinahe 1,5 m w.e. Unterschied.

Das lässt sich genauer in den Zeitdiagrammen erkennen (Abbildung 8.9-8.14). Die Linie In Abbildung 8.10 zeigt das Jahr ganz besonders große Unterschiede zwischen den Berechnungen über unterschiedliche Flächen. Bei dem Durchgang mit der Referenzoberfläche müssen die Werte gegen Ende der Zeitreihe weiter voneinander abweichen als die früheren. Bei einem weiteren Durchgang (der sich auf die Flächen bezieht, mit denen die Haushaltsberichte erstellt worden sind) sind die Jahre 99-03 auf der Fläche von 1998 ausgewertet worden sowie die Jahre 04-09 auf der Fläche von 2003. Das es gegen Ende dieser Perioden immer zu größeren Abweichungen kommt erkennt man bei den Wurtenkees Jahres- und Winterbilanzen sowie bei den Goldbergkees Jahres- und Winterbilanzen. Die Fehlervarianzen des Kleinfleißkees (besonders Winterbilanz) sind klein gegenüber den Werten der anderen Gletscher.

Tabelle 8.2 Mittlere, minimale und maximale Abweichung der über die Zeitreihe gemittelten Ergebnisse (Interpolationsmethode und Flächenaktualität) [mm w.e.]

	Interpolationsmethode				Aktuelle Fläche			
	Ø	span	max	min	Ø	span	max	min
WUK B	± 0,15	0,31	1,00	0,02	± 0,10	0,20	0,33	0,06
GOK B	± 0,16	0,32	0,70	0,09	± 0,30	0,60	1,47	0,04
FLK B	± 0,08	0,16	0,33	0,07	± 0,20	0,40	0,90	0,13
WUK Bw	± 0,04	0,08	0,21	0,01	± 0,08	0,15	0,33	0,06
GOK Bw	± 0,07	0,14	0,24	0,04	± 0,14	0,28	0,40	0,16
FLK Bw	± 0,09	0,20	0,27	0,17	± 0,03	0,06	0,11	0,04

Fehlervarianz Flächenänderung, spez. Jahresbilanz Wurtenkees 1999-2009

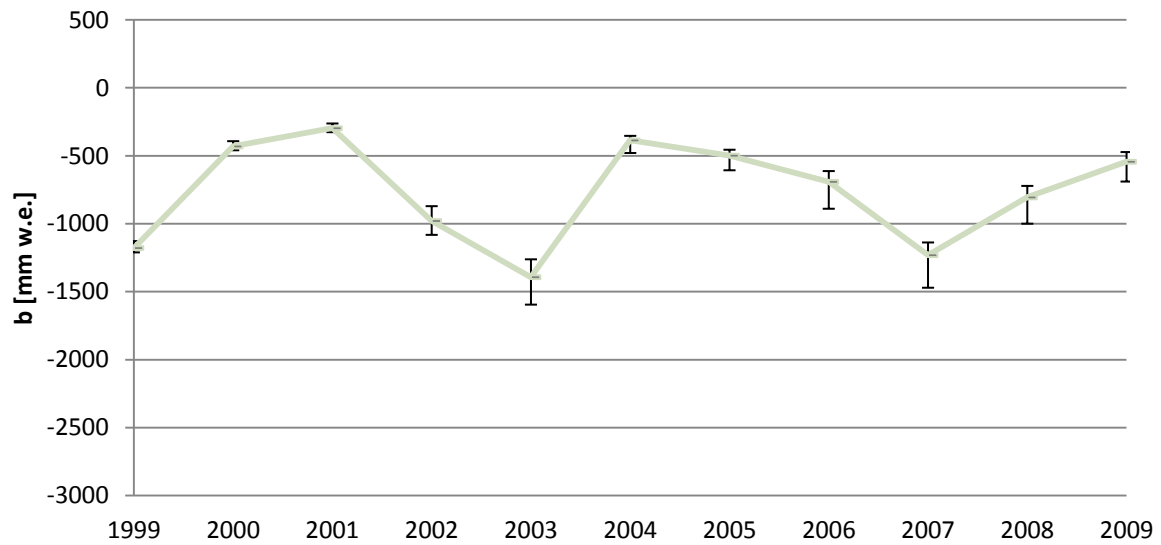


Abbildung 8.9 Fehlervarianz Flächenänderung Wurtenkees, Jahresbilanz

Fehlervarianz Flächenänderung, spez. Jahresbilanz Goldbergkees 1999-2009

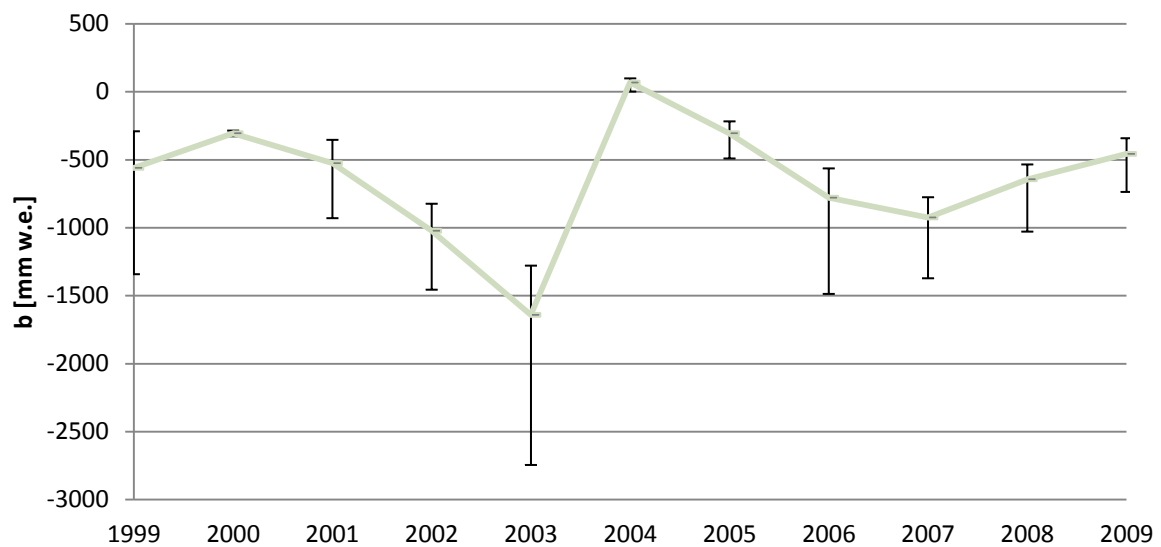


Abbildung 8.10 Fehlervarianz Flächenänderung Goldbergkees, Jahresbilanz

Fehlervarianz Flächenänderung, spez. Jahresbilanz Kleinfleißkees 1999-2009

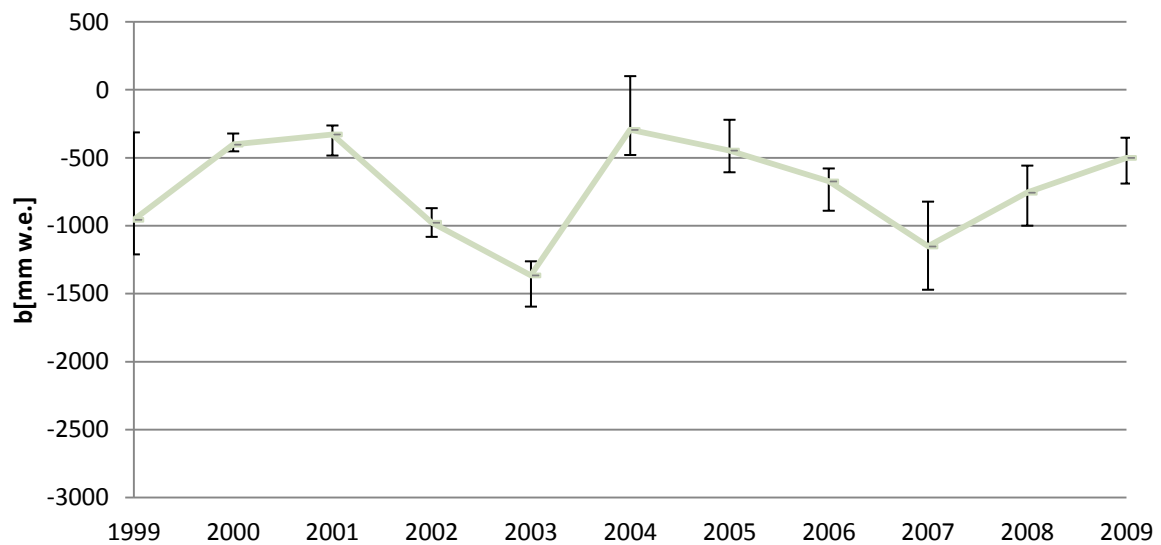


Abbildung 8.11 Fehlervarianz Flächenänderung Kleinfleißkees, Jahresbilanz

Fehlervarianz Flächenänderung, spez. Winterbilanz Wurtenkees 1999-2009

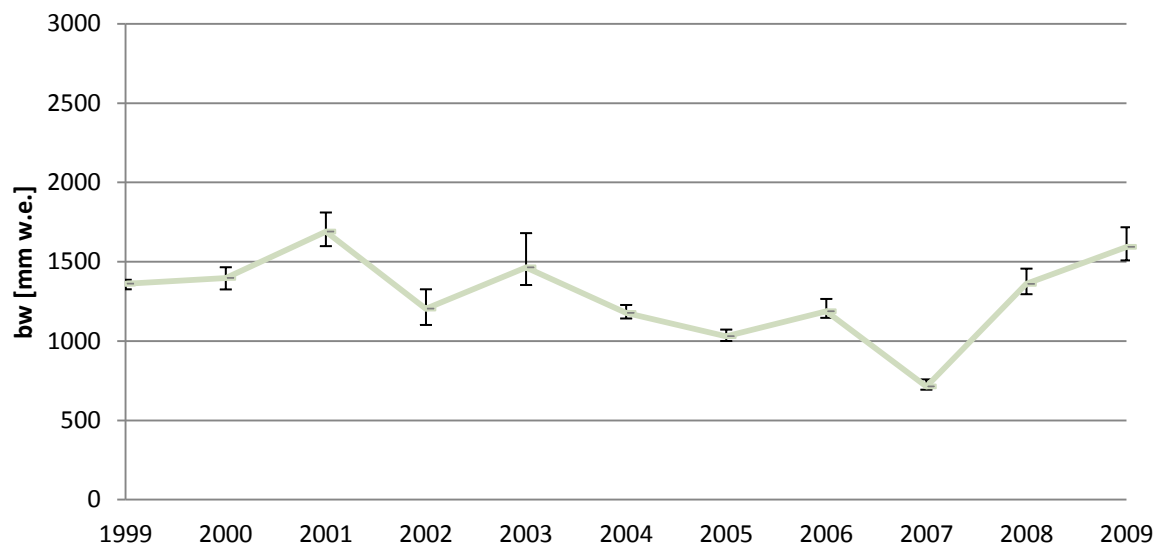


Abbildung 8.12 Fehlervarianz Flächenänderung Wurtenkees, Winterbilanz

Fehlervarianz Flächenänderung, spez. Winterbilanz Goldbergkees 1999-2009

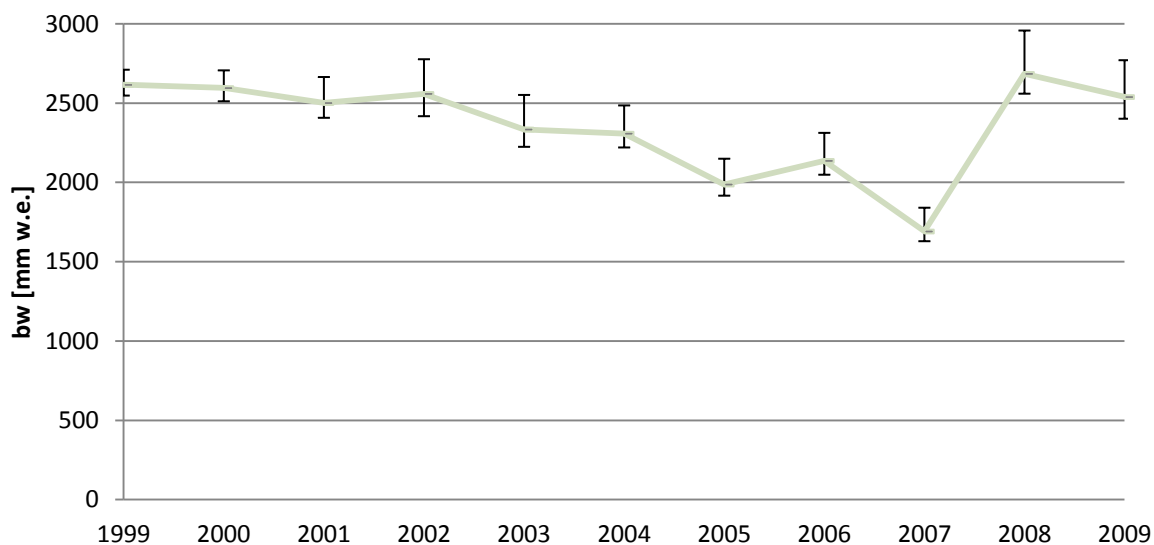


Abbildung 8.13 Fehlervarianz Flächenänderung Goldbergkees, Winterbilanz

Fehlervarianz Flächenänderung, spez. Winterbilanz Kleinfleißkees 1999-2009

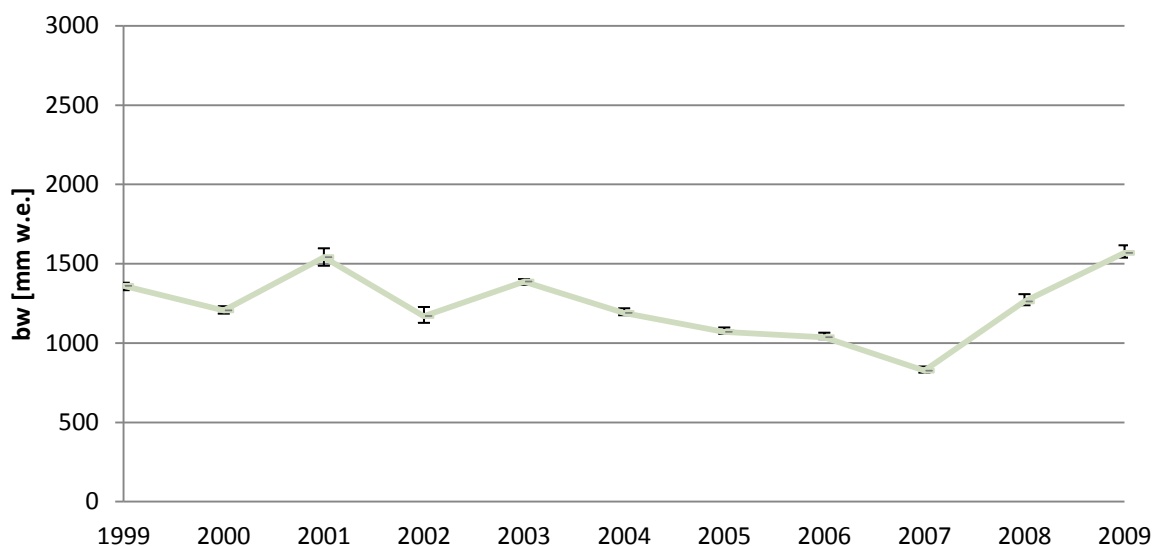


Abbildung 8.14 Fehlervarianz Flächenänderung Kleinfleißkees, Winterbilanz

8.3 Einfluss von Expert Knowledge

Der Einfluss von Expert Knowledge auf die Massenbilanz wird durch Weglassen der Stützstellen berechnet. Innerhalb der 11 jährigen Zeitreihe ist beinahe jede berechnete Massenbilanz mit Stützstellen gearbeitet worden (Tabelle 8.3). Abbildungen 8.15-8.20 zeigen die Ergebnisse mitsammen der Punktdichte mit und ohne Stützstellen. Für die Berechnung der Jahresbilanzen werden mehr Stützstellen gesetzt als für die Winterbilanzen. Für letztere schwankt die jährliche Punktdichte auch weniger. Seit Verwendung des Georadars für die Schneehöhenmessungen 2007 sind die Punktdichten für die Winterbilanzberechnungen stark gestiegen (Abb. 8.18-8.20).

Tabelle 8.3 Anzahl der Jahre mit gesetzten Stützstellen und mittlere Abweichung ($\bar{\sigma}$)

	x/11 Jahren	$\bar{\sigma}$ pts/km ²	$\bar{\sigma}$ m w. e.
GOK B	10	60	0,20
WUK B	10	20	0,07
FLK B	10	15	0,06
WOK Bw	7	5	0,01
WUK Bw	7	15	0,03
FLK Bw	10	15	0,02

Die mittlere Abweichung der Auswertungen ohne Stützstellen zu den Auswertungen mit Stützstellen bei den spezifischen Winterbilanzen ist im Durchschnitt kleiner als bei den spezifischen Jahresbilanzen.

Die größten Unterschiede zwischen den Jahresbilanz-Ergebnissen sind in Abbildung 8.15 bei der Jahresbilanzzeitreihe des Wurtenkees zu sehen. Die Stützstellen beeinflussen die Massenbilanz in den einen Jahren positiv und in anderen negativ. Abweichungen bis zu 0,6 m w.e. sind im Verhältnis zur mittleren jährlichen Jahresbilanz von -1,4 m w.e. keine Kleinigkeit. Jahre wie 2006 bei Goldberg- und Kleinfleißkkeses (Abb. 8.16 und 8.17) zeigen allerdings, dass auch das Setzen von vielen Stützstellen keine wesentliche Veränderung in der spezifischen Massenbilanz bringen kann.

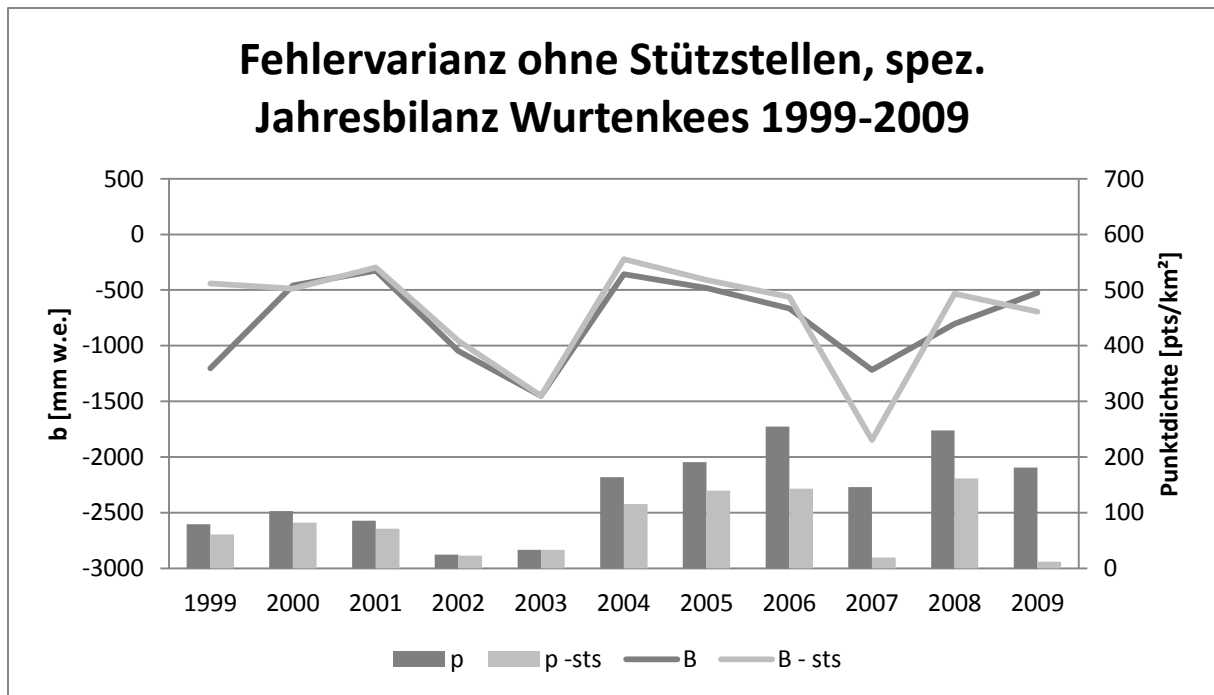


Abbildung 8.15 Einfluss von Expert Knowledge auf Jahresbilanz Wurtenkees

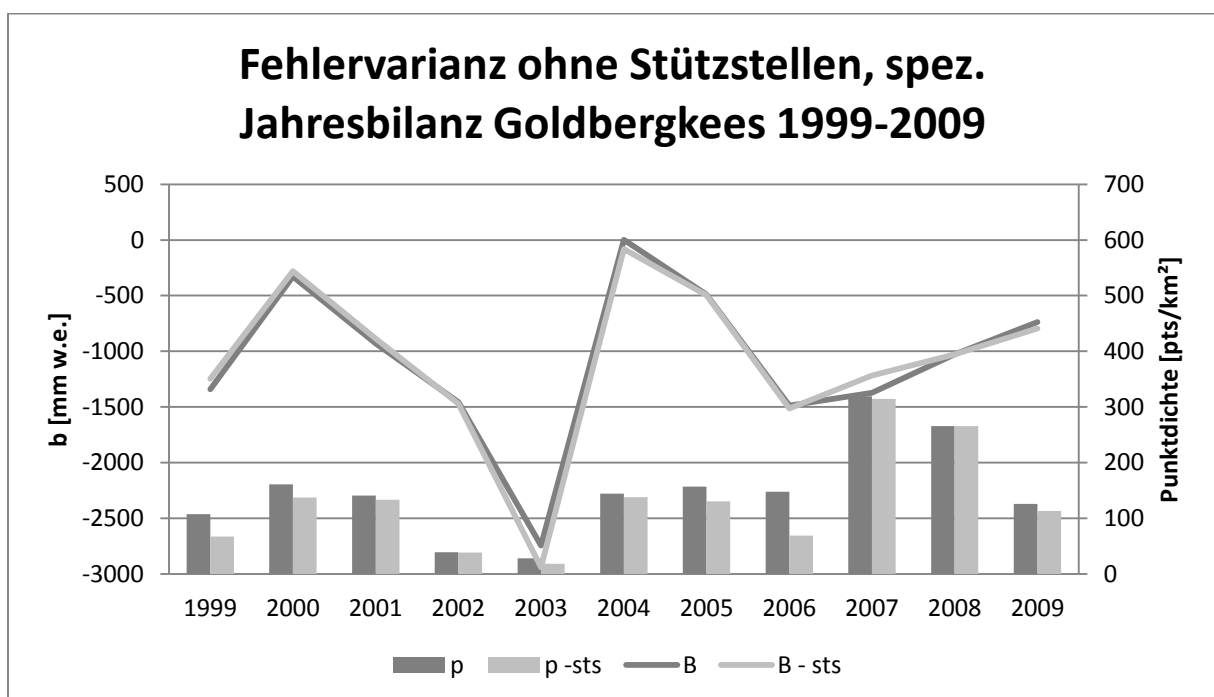


Abbildung 8.16 Einfluss von Expert Knowledge auf Jahresbilanz Goldbergkees

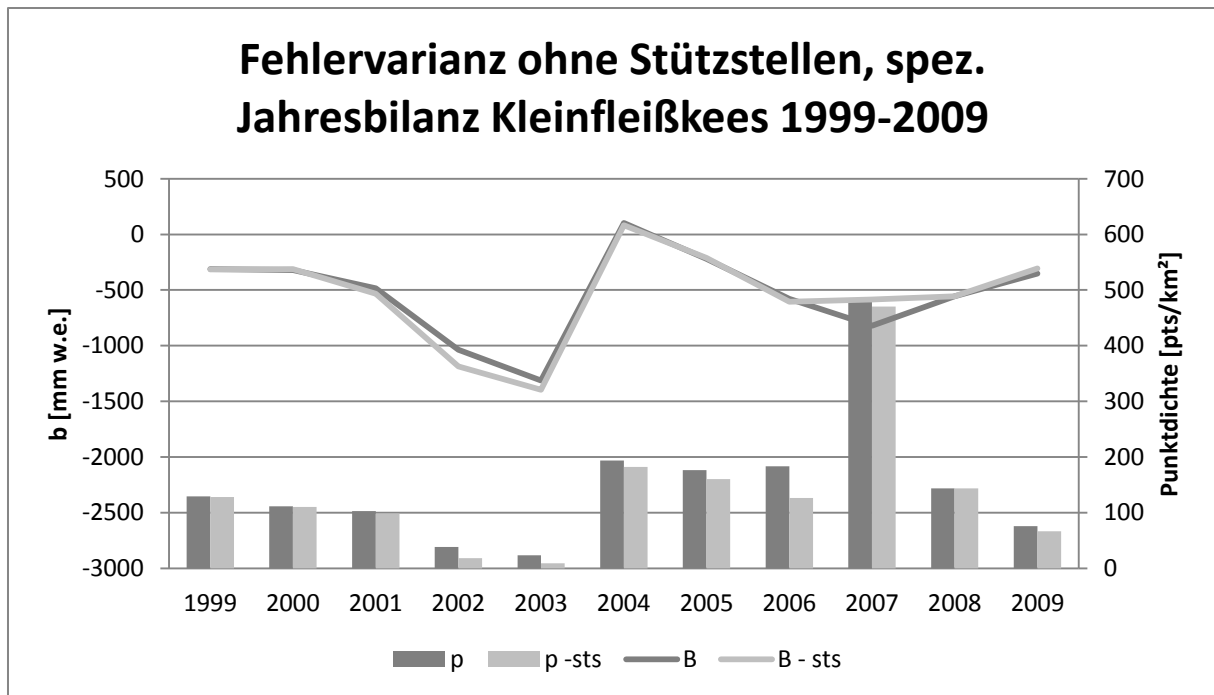


Abbildung 8.17 Einfluss von Expert Knowledge auf Jahresbilanz Kleinfleißkees

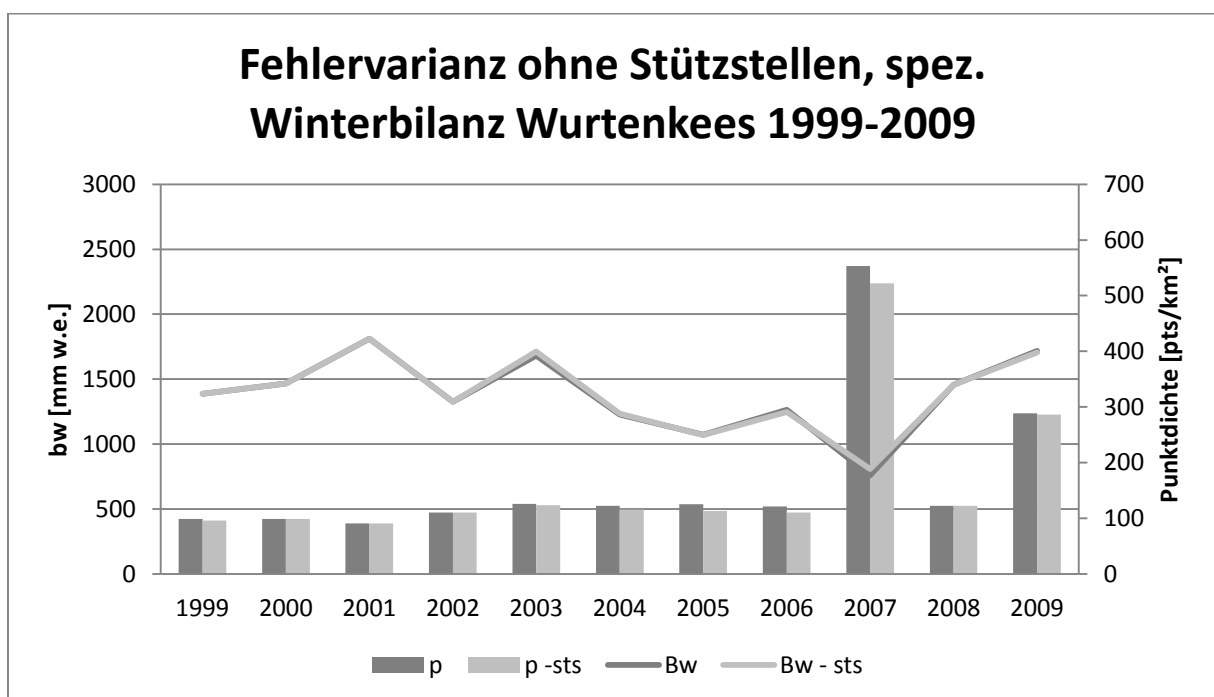


Abbildung 8.18 Einfluss von Expert Knowledge auf Winterbilanz Wurtenkees

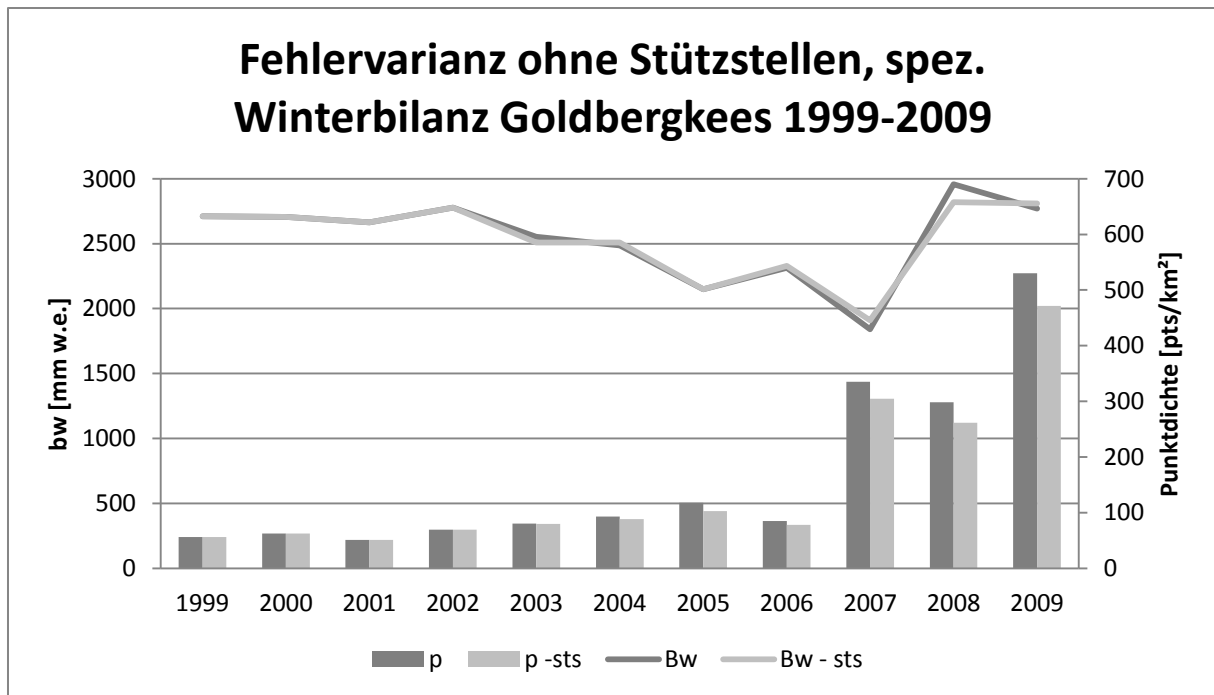


Abbildung 8.19 Einfluss von Expert Knowledge, Winterbilanz Goldbergkees

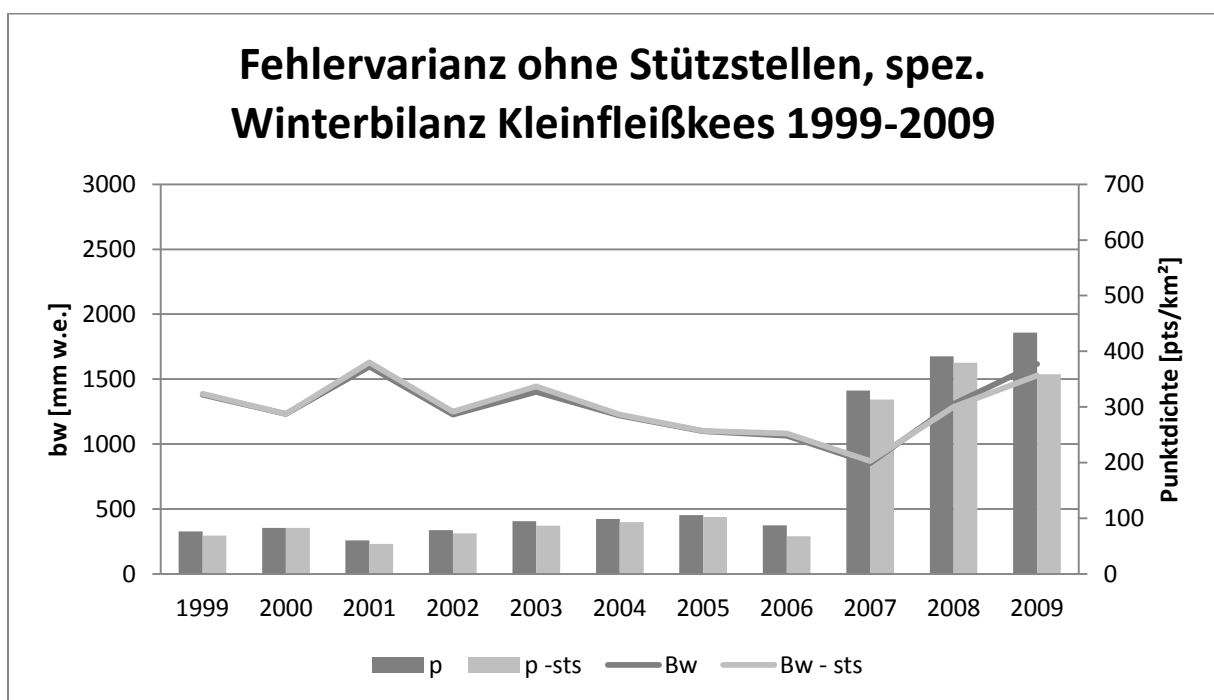


Abbildung 8.20 Einfluss von Expert Knowledge, Winterbilanz Kleinfleißkees

8.4 Überprüfung auf Zusammenhang von Punktmuster und

Für den Vergleich von den mittleren Abweichungen zu den Maßzahlen der räumlichen Verteilungsmuster wird eine positive Korrelation erwartet: je geringer die Varianz, desto geringer die Clusterbildung. Nicht alle Maßzahlenberechnungen zeigten signifikante Werte, so mussten vier von 66 Jahren aus dem Datensatz entfernt werden. Ein weiterer Vergleich mit der Fehlervarianz wurde mit der Punktdichte durchgeführt,

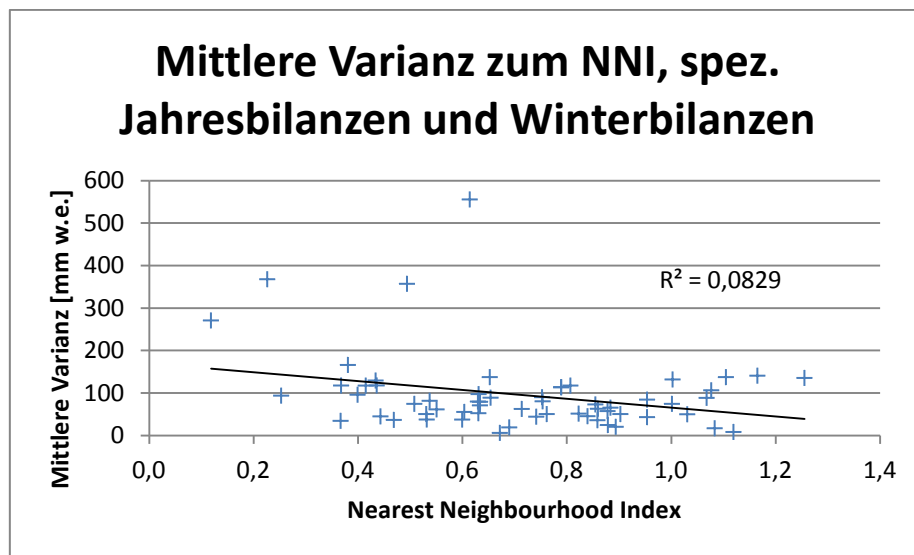


Abbildung 8.21 Korrelation der mittleren Abweichungen zum NNI

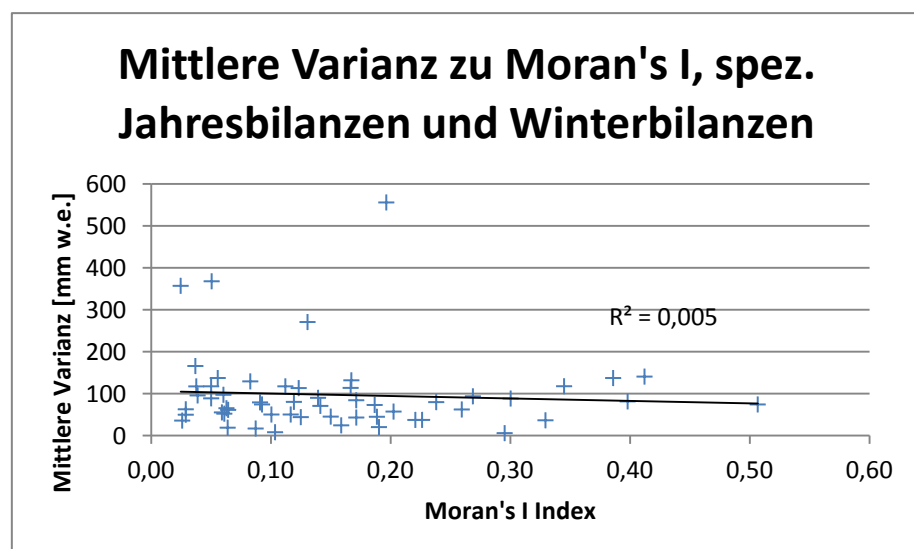


Abbildung 8.22 Korrelation der mittleren Abweichungen zum Moran's I

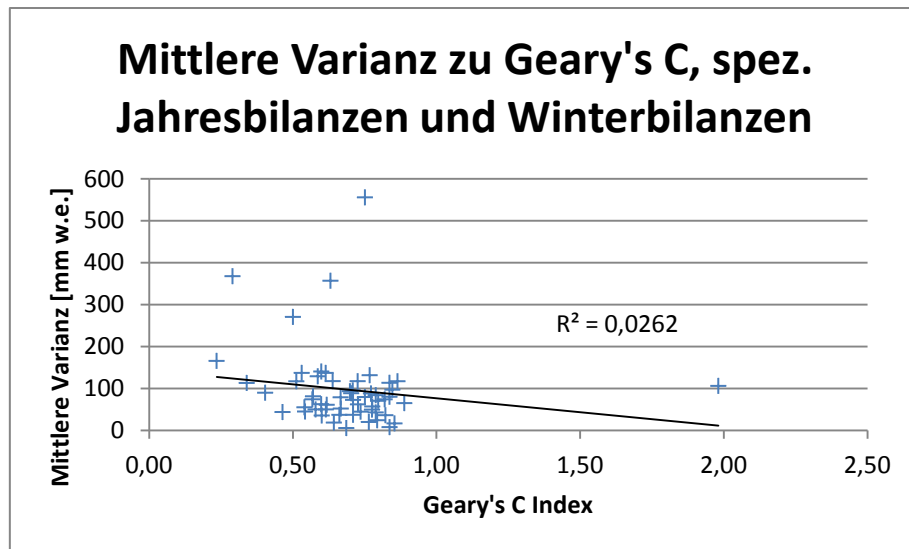


Abbildung 8.22 Korrelation der mittleren Abweichungen zum Moran's I

Die Vergleiche mit den räumlichen Maßzahlen (Korrelationsplots 8.21 bis 8.23) zeigen alle den erwarteten Trend – je homogener Verteilt desto geringer die Varianz – sind aber nicht signifikant. Die Korrelation von Fehlervarianz mit Punktdichte (Abb. 8.23) zeigte sogar ein abweichendes Muster: Bei höherer Punktdichte sind die Fehlervarianzen größer.

Wenn man nur die Werte der Winterbilanzen oder jene der Jahresbilanzen mit den Maßzahlen korreliert, erhält man den selben Trend mit nicht signifikanten Ergebnissen.

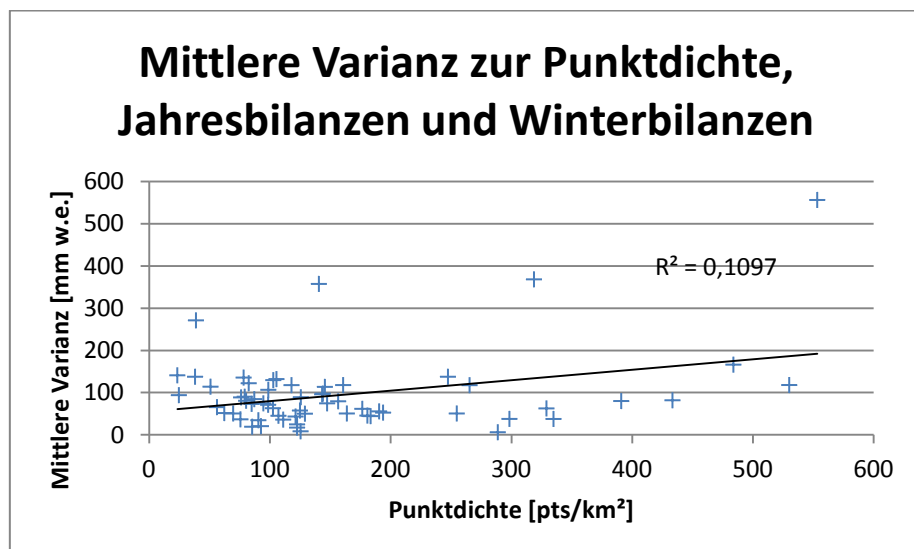


Abbildung 8.23 Korrelation der mittleren Abweichungen zur Punktdichte

9 Diskussion

9.1 Beantwortung der Forschungsfragen

- a) Welche Interpolationsroutine ist am besten geeignet?
- b) Welche Interpolationsroutine kann gewählt werden, um die Massenbilanz in Gebieten geringer Messpunktdichte zu interpolieren?
- c) Welchen Einfluss hat die Interpolationsroutine auf die Massenbilanz?
- d) Welchen Einfluss hat die Verwendung nicht aktueller Gletscherflächen bei der Auswertung auf das Ergebnis?
- e) Wie sieht, das Ergebnis aus, wenn kein Expert Knowledge in die Auswertung eingeflossen ist?
- f) Hat die Verteilung der Punkte einen Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses?

Der Methodenvergleich zeigt, dass die Ergebnisse der Gridfit-Methode die meisten Übereinstimmungen haben mit der Referenzzeitreihe und dem arithmetischen Mittel aller verwendeten Interpolationsroutinen(a). Die Gridfit-Ergebnisse sind auch in Jahren mit Punktdichten unter 100 pro km² jene, die am besten mit den Mittelwerten übereinstimmen (b) (Tabelle 8.1). Damit ist auch die Methode gefunden, mit der die weiteren Analysen durchgeführt werden soll.

Die Spannweite zwischen den Ergebnissen des Methodenvergleichs kann bis zu einem Meter Wasserwert betragen und umfasst im Mittel für die Jahresbilanzen 0,16 bis 0,32 m w.e., für die Winterbilanzen 0,08 bis 0,2 m w.e. (Tabelle 9.1). Die Abweichungen vom Mittelwert umfassen demnach die Hälfte der Spannbreite ($\emptyset$). Um eine Aussage zu treffen, ob die Fehlervarianzen für eine Massenbilanz groß sind, muss die Varianz mit der Massenbilanz ins Verhältnis gesetzt werden. Doch welches Verhältnis ist angemessen, um zu sagen, dass ein bestimmter Fehlerbetrag eine Auswirkung hat auf die Massenbilanz.

Andrea Fischer schreibt mir, durch die Auswertung über Konturlinienzeichnen erhalte man nur einen Fehler von 50 mm w.e. Das soll heißen, wenn ihr Vorgänger eine Massenbilanz über Konturlinienzeichnen und Planimetrieren auswertet, so weicht das Ergebnis nur um 50

mm w.e. von ihrem Ergebnis ab, wenn sie dasselbe tut. Dass das Ergebnis sehr ähnlich ist, wenn Experten die gleiche Methode anwenden, bestätigt auch Kaser et al. [1995]. Die mittlere Jahresbilanz des Hintereisferners beträgt über 50 Jahre -453 mm w.e. [Fischer 2010], wobei 50 mm 11 % von der Massenbilanz ausmachen. Haltet man sich in diesem Fall daran, dass 11 % tolerierbarer Fehler sind, so ist das für die Winterbilanzen der Fall und für die Jahresbilanzen nicht (Tabelle 9.1). (c)

Die mittlere Fehlervarianz der Ergebnisse des Flächenvergleichs ist wesentlich höher als jene des Methodenvergleichs. Die umfasst von 0,06 bis zu 0,6 m w.e. und maximal 1,47 m w.e. Die höheren Werte bei Goldbergkees und Kleinfleißkees zeigen, dass sich die Flächenänderung wesentlich stärker auf Massenbilanz auswirkt. Wie beim Methodenvergleich, kann man sagen, dass die Verwendung von nicht aktuellen Gletscherflächen bei der Auswertung für die Jahresbilanzen einen Einfluss hat und für die Winterbilanzen nicht. (d)

Stützstellen können die berechneten Massenbilanzwerte sowohl nach oben als auch nach unten verändern. Abweichungen bis zu 0,76 m w.e. sind in den Zeitreihen verzeichnet. Besonders stark und schwankend ist der Einfluss auf die Jahresbilanz des Wurtenkees. Für die Auswertung der Bilanz des Wurtenkees werden auch viele gebraucht, weil durch den Schibetrieb oft Pegel nicht auffindbar sind. (e)

Tabelle 9.1 Vergleich der Fehlervarianz (span) von Methode, Fläche und Expert Knowledge

	ømb	Interpolationsmethode				Aktuelle Fläche				Expert Know.		
		ø	span	max	min	ø	span	max	min	span	max	min
WUK B	-0,75	± 0,15	0,31	1,00	0,02	± 0,10	0,20	0,33	0,06	0,22	0,76	0,03
GOK B	-1,01	± 0,16	0,32	0,70	0,09	± 0,30	0,60	1,47	0,04	0,07	0,19	0,01
FLK B	-0,53	± 0,08	0,16	0,33	0,07	± 0,20	0,40	0,90	0,13	0,06	0,24	0,01
WUK B _w	1,40	± 0,04	0,08	0,21	0,01	± 0,08	0,15	0,33	0,06	0,01	0,05	0,01
GOK B _w	2,54	± 0,07	0,14	0,24	0,04	± 0,14	0,28	0,40	0,16	0,05	0,14	0,01
FLK B _w	1,25	± 0,09	0,20	0,27	0,17	± 0,03	0,06	0,11	0,04	0,03	0,09	0,01

Die Korrelationen mit den Maßzahlen für räumliche Verteilungsmuster zeigen zwar durch die Trendlinie das erwartete Ergebnis – dass die mit verschiedenen Interpolationsmethoden

ausgewerteten Massenbilanzen weniger voneinander abweichen, wenn das Punktmuster eine homogene Verteilung zeigt – sind aber nicht signifikant (f). Interessant ist auch das Ergebnis, dass bei höherer Punktdichte, die Massenbilanzvarianzen größer sind. Das ist allerdings auch nicht signifikant. Jansson [1999] schreibt, dass die Güte einer Massenbilanzberechnung nicht von Punktdichte oder Messnetzanordnung abhängig sei.

9.2 Diskussion mit Literaturbezug

Zemp et al. [2010] berechnen für elfjährige und zehnjährige Jahresbilanzzeitreihe des Storglaciären kumulierte Fehler durch Kriging-Variationen von $\pm 0,32$ bis $0,53$ m w.e., also auf ein Jahr geschätzt $0,03$ bis $0,05$ m w.e (Schätzung folgt dem Gesetz der Fehleranhäufung: kumulierter Fehler ist die Summe aus den Betragswerten der einzelnen Fehler) . Das lässt sich im Vergleich zu den hier berechneten Werten sehr niedrig und am ist ehesten noch mit den mittleren Fehlervarianzen der Winterbilanzen vergleichbar.

Ein Auswertungsdurchgang mit der Referenzoberflächenmassenbilanz für die 40 Jahre zeigt kumulierte Abweichungen von $\pm 0,03$ m w.e (geschätzt nach Gesetz der Fehleranhäufung). In Jahren mit positivem Massenhaushalt hat sich die größere Referenzoberfläche ebenso positiv auf die Bilanz ausgewirkt.

Eine jährliche Abweichung von $\pm 0,12$ m w.e. berechnen Huss, Bauder & Funk [2009], durch Modelldurchläufe mit verschiedenen Pegelanordnungen mit zwei über 40-jährige Zeitreihen. Bei Vergleich von konventioneller Massenbilanz mit Referenzoberflächenmassenbilanz ergibt sich bei ihrer Untersuchung eine mittlere Abweichung von $\pm 0,03$ m w.e. wie bei Zemp et al. [2010].

Kritik an der Vorehensweise in anderen Arbeiten

Die berechneten Varianzen sind größer als jene von anderen Studien. Es ist auch nicht klar inwiefern, diese auch miteinander zu vergleichbar sind, da sie mit anderen Methoden berechnet wurden. Die Methoden zur Fehlerberechnung beruhen auf den Auswertungsmethoden, und diese sind jeweils verschiedene. Ob die Varianzberechnungen von den Beispielen besser genauer ist, kann nicht so einfach mit Ja beantwortet werden. Wie Fischer [2011] meint, sind wiederholte Modelldurchläufe

mit Variationen in den Datensätzen eine übliche Vorgehensweise. Geodaten aus Umweltwissenschaften autokorrelieren grundsätzlich [Englund 1990]. Durch zufällige Erstellung von Geodatensätzen aus bestehenden Datensätzen erhält man allerdings keine Autokorrelation. Wenn man Datensätze variiert, bekommt man möglicherweise nicht jene Signale aus den Daten heraus, die durch externe Faktoren wie Abschattung, Windverfrachtung etc. in den erhobenen Daten enthalten sind. Ist in einem Jahr die Datenmenge sehr spärlich, so lassen sich daraus schwierig Variationen erstellen, die noch ein Signal beinhalten, wo doch das Signal in dem spärlichen Datensatz schon sehr schwach sein muss. [Fischer 2011]

Zemp et al. [2010] führen keine eigene Fehleranalyse für den Extrapolations- bzw. Punktdichtefehler durch, sondern berufen sich auf Jansson [1999], der die ideale Punktverteilung sehr genau diskutiert hat: Je homogener die Punktverteilung, desto genauer das Massenbilanzergebnis und die räumliche Auflösung für spezifische Massenbilanzen nach Höhenstufe. Auf gute Massenbilanzergebnisse komme man auch schon mit geringer Punktdichte, da die Autokorrelation zwischen den Punkten die nötige Information schon bereitstellen [Cogley 1999]. Jansson [1999] arbeitet auch mit Variationen von Datensätzen, in denen bestimmte Punkte weggelassen werden und kommt dabei auf Abweichungen von 0,00 und 0,07 mm w.e. Er schreibt, dass bei der mittleren spezifischen Nettobilanz von Storglaziären von -1,31 mm w.e. ein Fehler von 0,1 mm w.e. tolerierbar sei, wobei das wieder den 11 % Fehlertoleranz von Fischer [via Email] entspräche.

Diese 11 % sind kein Kompromiss in der Scientific Community. Die Autoren wollen sich auch gar nicht so richtig darauf festlegen. Es wird geschrieben, dass eine Fehlervarianz nicht ins Gewicht fällt, wenn sie tolerierbar ist [Cogley 1999]. Das bedeutet, der Zweck der Massenbilanz (hydrologisches Interesse, Klimatologisches Interesse, Interesse an Gletscherbewegung) ist determinierend, ob eine bestimmte Fehlergröße für das Ergebnis verkraftbar ist oder nicht. Eine Varianzanalyse wird in den Arbeiten für konventionelle Massenbilanzen gemacht, deshalb auch der Vergleich mit der Referenzoberflächenmassenbilanz für den Flächenfehler. Es stellt sich also die Frage, ob man vorher die Art der Massenbilanz bestimmen soll, um die Varianzanalyse daran anzupassen, oder, ob man eine Varianzanalyse (für konventionelle Massenbilanzen) machen soll, um dann den Fehler für die gewünschte Massenbilanz abzuschätzen.

Kritik an der Vorgehensweise in dieser Arbeit

Es lässt sich darüber diskutieren, ob vier verwendete Interpolationsmethoden (wobei Gridfit allein kein Interpolant ist, die bilineare Interpolation im Anschluss allerdings schon) ausreichen, um eine

gültige Fehlervarianz berechnen zu können. Für die Berechnung der Fehlervarianz durch Verwendung älterer Gletscherflächen in der Auswertung ist dasselbe Schema angewendet worden als in Huss, Bauder & Funk [2009] und Zemp et al. [2010]. Allerdings sind die mittleren Abweichungen nicht von der Berichtszeitreihe berechnet worden, sondern vom arithmetischen Mittel der Zeitreihen mit verschiedener Flächenverwendung, was allerdings keinen Einfluss auf die Fehlervarianz hat.

Es lässt sich auch darüber diskutieren, ob Häufigkeiten das Kriterium sind, um zu entscheiden, dass eine Interpolationsmethode die Massenbilanz besser berechnen kann, als die andere. Vergleiche mit geodätischen Massenbilanzen oder hydrologischen Vergleichswerten sind dabei sicher ein besseres Kriterium. Aber was verwenden, wenn keines davon Verfügbar ist? Der Bezug auf Mittelwerte ist ein nachvollziehbarer Kompromiss, wenn man behauptet, der wahre Wert liegt in der Fehlerspannbreite also in der Varianz.

Expert Knowledge

In der Literatur finden sich Arbeiten, die sich mit Unterschieden in der Auswertung durch Expert-Knowledge beschäftigen [Englund 1990, Kaser et al. 1995]. Auf den Einfluss der gesetzten Stützstellen bei der Auswertung, ist mir in den Recherchen nicht begegnet. Wie gesagt, ist es wesentlich davon abhängig, ob diese Methode des Stützstellen-Setzens überhaupt zur Anwendung kommt. Der Einfluss von Stützstellen ist, wie das Beispiel von der Jahresbilanz vom Wurtenkees zeigt, nicht zu vernachlässigen. Wie schon im Kapitel 4 diskutiert, könne man eine Systematik für Typen von Stützstellen erstellen, um diesen Expert-Knowledge-Prozess zu objektivieren. Diese Systematik ist dann aber mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht auf andere Gletscher übertragbar. Mit der Verwendung von Stützstellen schafft man sich also eine Fehlerquelle, die schwierig zu quantifizieren ist. Allerdings kann ein Umstieg auf eine andere Auswertungsmethode neue Unsicherheiten aufweisen bzw. diese Unsicherheiten mitnehmen und noch unangreifbarer machen. Dazu kommt, dass eine Veränderung in der Auswertungsmethode einen anderen systematischen Fehler in die Haushaltszeitreihe einbringt, was dafür spricht, die verwendete Methode bei zu behalten [Fischer 2011].

Einfluss von Punktdichte und –muster auf Qualität der Interpolation

Wie schon erwähnt, wird in der Literatur geschrieben, dass Muster und Dichte der Punkte [Cogley 1999, Jansson 1999] keinen nennenswerten Einfluss auf das Massenbilanzergebnis haben. Hauptkomponentenanalysen haben das aufgezeigt [Jansson 1999]. Laut zahlreichen Fallstudien [Li & Heap 2008] haben die Punktdichte und das Muster sehr wohl einen Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses. In einem dichten und regelmäßig angeordneten Punktmuster mit kurzen Abständen zueinander

weichen die Ergebnisse verschiedener Interpolationsroutinen weniger von einander ab. Je geringer die Menge an aufgenommenen Daten, desto höher auch der erwartete Fehler. Ist diese gering, überschätzen oder unterschätzen bestimmte Kriging-Varianten das Ergebnis dramatisch [Puate & Bras 1986]. Die unregelmäßige Anordnung von Punkten (scattered data) ist nicht die Idealbedingung für die Verwendung von Splines. Die Variabilität der Interpolierten Fläche ist bei hoher Punktdichte in unregelmäßiger Punktanordnung höher als bei geringer Punktdichte [Goovaerts 1997]. Andere Interpolanten wie Ordinary Kriging zeigen keine signifikant besseren Ergebnisse bei regelmäßiger Punktanordnung [Englund et al. 1992]. Um die Methode zu finden, die das beste Ergebnis bringt, lassen sich mehrere Diplomarbeiten schreiben. Die verwendete Methode in Jahren mit abweichendem Punktmuster zu wechseln ist sehr problematisch. Da die Zeitreihe dadurch an Homogenität verliert.

10 Ausblick

Die Berechnung von Fehlern in der Massenbilanzerstellung nach der direkten Methode variiert mit ihrer Auswertungsmethode. Flächenfehler und andere Fehler (Zeitsystem) lassen sich für alle gleich berechnen. Für die Übertragung der Punktinformation auf die Fläche weicht die Fehlerberechnung zwischen den Auswertungsmethoden ab. Dabei ist das Einsetzen von Expert Knowledge ein noch zu diskutierbarer Einfluss. Über das Setzen von Stützstellen wird das sehr deutlich.

Für verschiedene Punktmuster sind bestimmte Interpolanten besser geeignet. Die jährliche Variation in der aufgenommenen Datenmenge und die damit verbundenen Änderungen im Punktmuster sind ein Problem bei der Verwendung von Interpolationsroutinen für die Massenbilanzauswertung.

Eine Vereinheitlichung der Auswertungsmethode würde die Erstellung eines Schemas zur Fehlerberechnung, die allgemeingültig ist, erleichtern. Das lässt sich aber nicht umsetzen, da möglichst lange homogen ausgewertete Zeitreihen Priorität haben. Und ein Bruch in der Auswertungsmethode würde dagegen arbeiten.

In dieser Arbeit ist nur ein Teil des Fehlerspektrums in der direkten Methode behandelt worden. Für die Sonnblickgletscher lassen sich aber noch – wie Kapitel 4 diskutiert – weitere Fehler berechnen. Der Fehler durch die lokalen Unterschiede von Punktwerten wäre über Abfragen in einem GIS oder durch das Schreiben eines Skripts mit Filter oder Sucheigenschaften durchführbar. Den Fehler der Übertragung der Dichteinformation auf die Sondier- und Radarpunkte ließe sich noch einfach erheben. Über ein Tag-auflösendes Modell bekäme man den Fehler über uneinheitliche Messtermine.

Spannend wird zu beobachten sein, ob das wiederaufgebrachte Thema der wahren Oberfläche von Fischer [2011] weiter behandelt wird. Es sei wohl nicht einfach, diese zu berechnen. Aber mit fortschreitender Messtechnik und Auswertungsverfahren kann das möglicherweise in das Konzept der direkten Methode mit aufgenommen werden.

Literaturverzeichnis

- [Abermann et al. 2010]** Abermann J, Fischer A, Lambrecht A & Geist T [2010] On the potential of very high-resolution repeat DEMs in glacial and periglacial environments; *The Cryosphere*, 4, 53-65.
- [Albrecht 2007]** Albrecht J [2007] Key concepts and techniques in GIS; SAGE Publications; Los Angeles, London, Neu Delhi, Singapore.
- [Alexander, Shulmeister & Davies 2011]** Alexander D, Shulmeister J & Davies T [2011] High basal melting rates within high-precipitation temperate glaciers; *Journal of Glaciology*, 57, 205, 789-795.
- [Alpenkonvention 2009]** Alpenkonvention [2009] Wasserhaushalt und Gewässerbewirtschaftung – Alpenzustandsbericht; Ständiges Sekretariat der Alpenkonvention; Bozen.
- [Anselin 1995]** Anselin L [1995] Local Indicators of Spatial Association – LISA; *Geographical Analysis*, 27, 93-115.
- [Auer et al. 2002]** Auer I, Böhm R, Leymüller M & Schöner W [2002] Das Klima des Sonnblicks; *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik*, 28.
- [Bahrenberg, Giese & Nipper 1992]** Bahrenberg G, Giese E & Nipper J [1992] Statistische Methoden in der Geographie; Teubner (2. Auflage); Stuttgart.
- [Barnett, Adam & Lettenmaier 2005]** Barnett TP, Adam JC & Lettenmaier DP [2005] Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions; *nature reviews*, 438, 17, 303-309.
- [Bauder, Funk & Huss 2009]** Bauder A, Funk M & Huss M [2007] Ice-volume changes of selected glaciers in the Swiss Alps since the end of the 19th century; *Annals of Glaciology*, 46, 145-149.
- [Böhm et al. 2007]** Böhm R, Schöner W, Auer I, Hynek B, Kroisleitner C & Weyss G [2007] Gletscher im Klimawandel – Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Höhen Tauern; ZAMG; Wien.
- [Böhm, Auer & Schöner 2011]** Böhm R, Auer I und Schöner W [2011] Labor über den Wolken – Die Geschichte des Sonnblick Observatoriums; Böhlau; Wien.
- [Braithwaite 2009]** Braithwaite RJ [2009] After six decades of monitoring glacier mass balance we still need data but it should be richer data; *Annals of Glaciology*, 50, 50, 191-197.

- [Brandstetter 2011]** Brandstetter S [2011] Wasserzeichen –Watermarks; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Wien.
- [Carturan, Cazorzi & Fontana]** Carturan L, Cazorzi F & Dalla Fontana G [2009] Enhanced estimation of glacier mass balance in unsampled areas by means of topographic data; *Annals of Glaciology*, 50, 50, 37-46.
- [Cogley 1999]** Cogley JG [1999] Effective sample size for glacier mass balance; *Geografiska Annaler*, 81A, 4, 497-507.
- [Cogley 2009]** Cogley JG [2009] Geodetic and direct mass-balance measurements: comparison and joint analysis; *Annals of Glaciology*, 50, 50, 96-100.
- [Colgey 2010]** Cogley JG [2010] Mass balance terms revisited; *Journal of Glaciology*, 56, 200, 997-1001.
- [Cogley et al. 2011]** Cogley JG., Hock R, Rasmussen LA, Arendt AA, Bauder A, Braithwaite RJ, Jansson P, Kaser G, Möller M, Nicholson L & Zemp M [2011] Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms; IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2; UNESCO-IHP; Paris.
- [Dadic, Corripio & Burlando 2008]** Dadic R, Corripio JG & Burlando P [2008] Mass-balance estimates for Haut Glacier d’Arolla, Switzerland from 2000 to 2006 using DEMs and distributed mass-balance modeling; *Annals of Glaciology*, 49, 22-26.
- [Deutsch & Journel 1992]** Deutsch CV & Journel AG [1992] GSLIB – Geostatistical Software Library and User’s Guide; Oxford University Press; New York, Oxford.
- [Dragosics 2009]** Dragosics M [2009] Reanalyse der Massenbilanz des Wurtenkees; Bakkalaureatsarbeit, Karl-Franzens-Universität; Wien, Graz.
- [Dyurgerov 1996]** Dyurgerov, M. [1996] Substitution of long term mass balance data by measurements of one summer; *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 32, 177–184.
- [Dyurgerov 2002]** Dyurgerov, M. B. [2002] Glacier mass balance and regime: data of measurements and analysis; INSTAAR Occasional Paper (Hrsg. Meier M & Armstrong R), 55.
- [Elsberg et al. 2001]** Elsberg DH, Harrison WD, Echelmeyer KA & Krimmel RM [2001] Quantifying the effects of climate and surface change on glacier mass balance; *Journal of Glaciology*, 47, 159, 649-658.
- [Englund 1990]** Englund EJ [1990] Variance of Geostatisticians; *Mathematical Geology*, 22, 4, 417-455.

- [Englund et al. 1992]** Englund E, Weber D & Leviant N [1992] The effects of sampling design parameters on block selection. *Mathematical Geology*, 24, 3, 329-343.
- [Finsterwalder 1953]** Finsterwalder R [1953] Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückgangs an Ostalpengletschern; *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziogeologie*, 2, 189-139.
- [Fischer 2010]** Fischer A [2010] Glaciers and climate change: Interpretation of 50 years of direct mass balance of Hintereisferner; *Global and Planetary Change*; 71, 13-26.
- [Fischer 2011]** Fischer A [2011] Comparison of direct and geodetic mass balances on a multi-annual time scale; *The Cryosphere*, 5, 107-124.
- [Fischer, Olefs & Abermann 2011]** Fischer A, Olefs M & Abermann J (2011) Glaciers, snow and ski tourism in Austria's changing climate; *Annals of Glaciology*, 52, 58, 89-96.
- [Giddens 2011]** Giddens A [2011] *Politics of climate change*; Polity Press; Cambridge.
- [Goovaerts 1997]** Goovaerts P [1997] *Geostatistics for Natural Resources Evaluations*; Oxford University Press; New York.
- [Harrison et al. 2005]** Harrison WD, Elsberg DH, Cox LH & March RS [2005] Different mass balances for climatic and hydrological applications; *Journal of Glaciology*, 51, 172, 176.
- [Harrison et al. 2009]** Harrison WD, Cox LH, Hock R, March RS & Pettit EC [2009] Implications for the dynamic health of a glacier from comparison of conventional and reference-surface balances; *Annals of Glaciology*, 50, 25-30.
- [Heucke 1999]** Heucke E [1999] A light portable steam-driven ice drill suitable for drilling holes in ice and firn; *Geografiska Annaler*; 81A, 4, 603-609.
- [Hock & Jensen 1999]** Hock R & Jensen H [1999] Application of kriging interpolation for glacier mass balance computations; *Geografiska Annaler*, 81A, 4, 611-619.
- [Hock et al. 2009]** Hock R, De Woul M, Radic V & Dyurgerov M [2009] Mountain glaciers and ice caps around Antarctica make a large sea-level rise contribution; *Geophysical Research Letters*, 36, L07501.
- [Holmlund, Jansson und Pettersson 2005]** Holmlund P, Jansson P & Pettersson R [2005] A re-analysis of the 58 year mass-balance record of Storglaciären, Sweden; *Annals of Glaciology*, 42, 389-394.
- [Hubbard & Glasser 2005]** Hubbard B & Glasser N [2005] *Field Techniques in Glaciology and Glacial Geomorphology*; Jon Wiley & Sons, Ltd; Aberystwyth.

- [Huss et al. 2008]** Huss M, Bauder A, Funk M & Hock R [2008] Determination of seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865; *Journal of Geophysical Research*, 113, F1, F01015.
- [Huss, Bauder & Funk 2009]** Huss M, Bauder A & Funk M [2009] Homogenization of long-term mass-balance time series; *Annals of Glaciology*, 50, 198-206.
- [Huss 2012]** Huss M [2012] Extrapolation glacier mass balance to the mountain-range scale: the European Alps 1900-2100; *The Cryosphere*, 6, 713-727.
- [Hynek 2007]** Hynek B [2007] Messungen zum Energiehaushalt am Goldbergkees; Diplomarbeit, Universität Wien; Wien.
- [IPCC 2007]** IPCC [2007] Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg. Solomon S, Qin D, Manning M, Marquis M, Averyt K, Tignor MMB, Miller HL & Chen Z); Cambridge; New York.
- [Jacobsen & Theakstone 1995]** Jacobsen FM & Theakstone WH [1995] The use of planimetric surfacearea in glacier mass-balance calculations: a potential source of errors, *Journal of Glaciology*, 41, 441-444.
- [Jansson 1999]** Jansson P [1999] Effect of uncertainties in measured variables on the calculated mass balance of Storglaciären; *Geografiska Annaler*, 81A, 4, 633-642.
- [Jansson & Pettersson 2007]** Spatial and Temporal Characteristics of a Long Mass Balance Record, Storglaciären, Sweden; *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 39, 3, 432-437.
- [Jetté-Nantel & Agrawala 2007]** Jetté-Nantel S & Agrawala S (2007) Climate change adaption and natural hazards management; *Climate Change in the European Alps*, OECD, 61-93.
- [Kaajuutti et al. 2007]** Kaajuutti K, Jokinen O, Geist T & Pitkänen T [2007] Terrestrial Photography for Verification of Airborne Laser Scanner data on Hinterisferner in Austria; *Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research*, 4, 2, 24-39.
- [Kaser et al. 1995]** Kaser G, Munari M, Noggler B, Oberschmied C & Valentini P [1995] Recherche sul bilancio di massa del Chiachiaio di Fontana Bianca (Weissbrunnferner) nel gruppo Ortles-Cevedale; *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 18, 277-280.
- [Kaser et al. 2006]** Kaser G, Cogley JG, Dyurgerov MB, Meier MF & Ohmura A [2006] Mass balance of glaciers and ice caps: consensus estimates for 1961-2004; *Geophysical Research Letters*, 33, 19, L19501.
- [Karpilo 2009]** Karpilo RD [2009] Glacier monitoring techniques; *The Geological Society of America* 141-162. Doi10.1130/2009.monitoring(06).

- [Kaufmann & Ladstätter 2004]** Kaufmann V & Ladstätter R [2004] Documentation of the retreat of small debris-covered cirque-glacier (Goessnitzkees, Austrian Alps) by means of terrestrial photogrammetry - 4th ICA Mountain Cartography Workshop, vall de Nuria, Catalonia, Spain, 30 September -2 October 2004; TU Graz, Graz.
- [Keeler & Brugger 2012]** Keeler ML & Brugger A [2012] Instruments and Methods: A Method for recording ice ablation using a low-cost ultrasonic rangefinder; *Journal of Glaciology*, 58, 565-568.
- [Koblet et al. 2010]** Koblet T, Gärtner-Roer I, Zemp M, Jansson P, Thee P, Haeberli W & Holmlund P [2010] Reanalysis of multi-temporal aerial images of Storglaciären, Sweden (1959–99) – Part 1: Determination of length, area, and volume changes; *The Cryosphere*, 4, 333–343,
- [Koboltschnig 2007]** Koboltschnig GR [2007] Mehrfachvalidierung hydrologischer Eis- und Schneeschmelzmodelle in hochalpinen, vergletscherten Einzugsgebieten; Dissertation, Universität für Bodenkultur; Wien.
- [Kroisleitner 2007]** Kroisleitner C [2007] Der Einfluss der Gletscherschmelze auf die Wassertemperatur und die Wasserchemie des Gletscherbaches; Diplomarbeit, Universität Wien; Wien.
- [Kuhn et al. 1985]** Kuhn M, Markl G, Kaser G, Nickus U, Obleitner & Schneider H [1985] Fluctuations of climate and mass balance: different responses of two adjacent glaciers; *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*; 21, 409-416.
- [Kuhn et al. 1999]** Kuhn M, Dreiseitl E, Hofinger S, Markl G, Span N & Kaser G [1999] Measurements and models of the mass balance of Hintereisferner; *Geografiska Annaler*, 81A, 569-572.
- [Kuhn et al. 2009]** Kuhn M, Abermann J, Olefs M, Fischer A & Lambrecht A [2009] Gletscher im Klimawandel: Aktuelle Monitoringprogramme und Forschungen zur Auswirkung auf den Gebietsabfluss im Ötztal; *Mitteilungsblatt des hydrographischen Dienstes in Österreich*, 86, 31-48.
- [Kuttler 2009]** Kuttler G [2009] *Klimatologie*; UTB; Paderborn.
- [Levine 2010]** Levine N [2010] **CrimeStat III: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations (version 3.3)**; National Institute of Justice; Washington DC.
- [Li & Heap 2008]** **A Review of Spatial Interpolation – Methods for Environmental Scientists**; Geoscience Australia; 2008/23, 137.
- [Longley et al. 2001]** Longley PA, Goodchild MF, Maguire DJ & Rhind DW [2001] *Geographic Information Systems and Science*; Jon Wiley & Sons, Ltd.; Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto.

- [Mayer et al. 2011]** Mayer C, Fowler AC, Lambrecht A & Scharrer K (2011) A surge of North Gasherbrum Glacier, Karakoram, China; *Journal of Glaciology*, 57, 204, 904-916.
- [Meier 1962]** Meier M [1962] Proposed definitions for glacier mass budget terms; *Journal of Glaciology*, 4, 252–265.
- [Müller & Kappenberger]** Müller H & Kappenberger G [1991] Claridenfirn-Messungen 1914-1984; *Zürcher Geographische Schriften*, 40, ETH Zürich, Zürich.
- [Oerlemans 2001]** Oerlemans J [2001] *Glaciers and Climate Change*; Swets and Zeitlinger BV, Amsterdam.
- [Ohmura 2001]** Ohmura A [2001] Physical Basis for the Temperature-Based Melt-Index Method; *Journal of Applied Meteorology*, 40, 753-761.
- [Ohmura 2007]** Ohmura A, Bauder A, Müller H & Kappenberger G, [2007] Longterm change of mass balance and the role of radiation; *Annals of Glaciology*, 46, 367-374.
- [Østrem & Brugman 1991]** Østrem G & Brugman M [1991] *Glacier mass-balance measurements – A manual for field and office work*; National Hydrology Research Institute; Saskatoon.
- [Østrem & Haakensen 1999]** Østrem G & Haakensen [1999] Map comparison of traditional mass-balance measurements: Which method is better?; *Geografiska Annaler*; 81A, 4, 703-711.
- [Paul, Frey & LeBris 2011]** Paul F, Frey H & LeBris R [2011] A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: challenges and results; *Annals of Glaciology*, 52, 59, 144-152.
- [Pertzinger 1996]** Pertzinger FI [1996] *Abramov Glacier Data Reference Book: Climate, Run-off, Mass Balance*; Central Asian Regional Research Hydrometeorological Institute, Tashkent.
- [Puente & Bras 1986]** Disjunctive kriging, universal kriging, or no kriging: Small sample results with simulated fields; *Mathematical Geology*, 18, 3, 287-305.
- [Reisenhofer 2009]** Reisenhofer S [2009] *Modellierung der Massen- und Energiebilanz eines Gletschers, am Beispiel der Pasterze*; Diplomarbeit, Wien.
- [Richardson & Reynolds 2000]** Richardson SD & Reynolds JM [2000] An overview of glacial hazards in the Himalayas; *Quaternary International*, 65, 66, 31-47.
- [Schaefli, Hingray & Musy 2007]** Schaefli B, Hingray B, & Musy A (2007) Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and

related modelling uncertainties, *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1191–1205.

- [Schöner 2003]** Schöner W [2003] Massenhaushaltsbestimmung alpiner Gletscher. Arbeitsunterlagen für die Lehrveranstaltung „Gletschermassenhaushaltsuntersuchungen“ am Institut für Meteorologie und Physik der Universität Wien; 3. überarbeitete Ausgabe; Erhältlich unter:
<http://www.wau.boku.ac.at/uploads/media/MassenHausHaltsbestimmung.pdf> (September 2012)
- [Schöner & Böhm 2007]** Schöner W & Böhm Reinhard [2007] A statistical mass-balance model for the reconstruction of LIA ice mass for glaciers in the European Alps; *Annals of Glaciology*, 46, 161-169.
- [Schöner et al. 2009]** Schöner W, Hynek B, Böhm R, Binder D, Koboltschnig G & Holzmann H [2009] Glazialhydrologisches Monitoring im Bereich des Rauriser Sonnblicks (Hohe Tauern, Österreich); *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 1, 2, 1-8.
- [Stanzel & Nachtnebel 2010]** Stanzel P & Nachtnebel HP [2010] Wasserkrafterzeugung bei Klimaveränderungen; Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, 191-202.
- [Thibert et al. 2008]** Thibert E, Blanc R, Vincent C & Eckert N [2008] Instruments and Methods: Glaciological and volumetric mass-balance measurements: error analysis over 51 years for Glacier de Sarennes, French Alps; *Journal of Glaciology*, 54, 186, 522-532.
- [Thibert & Vincent]** Thibert E & Vincent C [2009] Best possible estimation of mass balance combining glaciological and geodetic methods; *Annals of Glaciology*, 50, 50, 112-118.
- [Unger et al. 2012]** Unger R, Hynek B, Binder D, Schöner W & Böhm R [2012] Analysis of spatiotemporal volume changes of glaciers: An Example from Goldbergkees and Kleinfleisskees in Goldberggruppe (Hohe Tauern); *Geophysical Research Abstracts*, 14, EGU2012 – 11220-3, EGU General Assembly 2012.
- [Winkler et al. 2010]** Winkler M, Kaser G, Cullen NJ, Mölg T, Hardy DR & Pfeffer T [2010] Land-based marginal ice cliffs: focus on Kilimanjaro; *Erdkunde*, 64, 2, 179-193.
- [Zemp et al. 2006]** Zemp M, Haberli W, Hoelzle M & Paul F [2006] Alpine glaciers to disappear within decades?; *Geophysical Research Letters*, 33, L13504.
- [Zemp et al. 2009]** Zemp M, Hoelzle M & Haeberli W [2009] Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network; *Annals of Glaciology*, 50, 50, 101-111.

[Zemp et al. 2010] Zemp M, Jansson P, Holmlund P, Gärnter-Roer I, Koblet T, Thee P & W Haeberli [2010] Reanalysis of multi-temporal images of Storglaciären, Sweden (1959-99) – Part 2: Comparison of glaciological and volumetric mass balances; *The Cryosphere*, 4, 345-357.

Haushaltsberichte

[Böhm 1983] Böhm R [1983] Massenbilanzen Wurtenkees – Jahresbilanz 1982/83; Sonderdruck aus ‚Wetter und Leben‘, 208-229.

[Böhm, Hammer & Strobl 1985b] Böhm R, Hammer N & Strobl J [1985a] Massenhaushalt Wurtenkees – Jahresbilanz 1983/84*; Sonderdruck aus ‚Wetter und Leben‘, 37, 37-51.

[Böhm, Hammer & Strobl 1985a] Böhm R, Hammer N & Strobl J [1985b] Massenhaushalt Wurtenkees – Jahresbilanz 1983/84**; Sonderdruck aus ‚Wetter und Leben‘, 37, 88-96.

[Böhm, Hammer & Strobl 1986] Böhm R, Hammer N & Strobl J [1986] Massenhaushalt Wurtenkees – Jahresbilanz 1984/85; Sonderdruck aus ‚Wetter und Leben‘, 38, 202-220.

[Böhm, Hammer & Strobl 1988a] Böhm R, Hammer N & Strobl J [1988a] Massenhaushalt Wurtenkees – Jahresbilanz 1985/86; Sonderdruck aus ‚Wetter und Leben‘, 40, 43-56.

[Böhm, Hammer & Strobl 1988b] Böhm R, Hammer N & Strobl J [1988b] Massenhaushalt Wurtenkees – Jahresbilanz 1986/87; Sonderdruck aus ‚Wetter und Leben‘, 40, 235-251.

[Schöner 1990] Schöner W [1990] Massenhaushalt Wurtenkees – Jahresbilanz 1987/88; Sonderdruck aus ‚Wetter und Leben‘, 42, 85-102.

[Formayer, Ruhsam & Schöner 1993] Formayer H, Ruhsam M & Schöner W [1993] Massenhaushalt Wurtenkees für die Haushaltsjahre 1990/91, 1991/92 und 1992/93; 90.-91. Jahresbericht des Sonnblick-Vereins, 48-72.

[Schmittner 1995] Schmittner W [1995] Massenhaushalt Wurtenkees für das Haushaltsjahr 1993/94; 92.-93. Jahresbericht des Sonnblick-Vereins, 51-59.

[Wiesinger 1995] Schmittner W [1995] Massenhaushalt Wurtenkees für das Haushaltsjahr 1994/95; 92.-93. Jahresbericht des Sonnblick-Vereins, 60-68.

[Wiesinger 1997a] Wiesinger T [1997a] Massenhaushalt Wurtenkees für das Haushaltsjahr 1995/96; 94.-95. Jahresbericht des Sonnblick-Vereins, 26-33.

- [Wiesinger 1997b]** Wiesinger T [1997b] Massenhaushalt Wurtenkees für das Haushaltsjahr 1996/97; 94.-95. Jahresbericht des Sonnblick-Vereins, 26-33.
- [Schöner & Tomberger 1999]** Schöner W & Tomberger H [1999] Massenhaushalt Wurtenkees für das Haushaltsjahr 1997/98; 96.-97. Jahresbericht des Sonnblick-Vereins, 38-47.
- [Schöner & Klausch 2001a]** Schöner W & Klausch K [2001a] Massenhaushalt Wurtenkees für das Haushaltsjahr 1998/99; 98.-99. Jahresbericht des Sonnblick-Vereins, 30-40.
- [Schöner & Klausch 2001b]** Schöner W & Klausch K [2001b] Massenhaushalt Wurtenkees für das Haushaltsjahr 1999/2000; 98.-99. Jahresbericht des Sonnblick-Vereins, 41-51.
- [Hynek & Schöner 2004]** Hynek B & Schöner W [2004] Massenhaushalt 2001/2002 der Gletscher in der Goldberggruppe; 101.-102. Jahresbericht des Sonnblick-Vereins, 1-18.
- [Hynek 2004]** Hynek B [2004] Massenhaushalt 2003/2004 der Gletscher in der Goldberggruppe; ZAMG; Wien.
- [Hynek 2005]** Hynek B [2005] Massenhaushalt 2004/2005 der Gletscher in der Goldberggruppe; ZAMG; Wien.
- [Hynek & Kroisleitner 2006]** Hynek B & Kroisleitner C [2006] Massenhaushalt 2005/2006 der Gletscher in der Goldberggruppe; ZAMG; Wien.
- [Hynek & Kroisleitner 2007]** Hynek B & Kroisleitner C [2007] Massenhaushalt 2006/2007 der Gletscher in der Goldberggruppe; ZAMG; Wien.
- [Hynek & Kroisleitner 2008]** Hynek B & Kroisleitner C [2008] Massenhaushalt 2007/2008 der Gletscher in der Goldberggruppe; ZAMG; Wien.
- [Hynek, Reisenhofer, Unger & Weyss 2009]** Hynek B, Reisenhofer S, Unger R & Kroisleitner C [2009] Massenhaushalt 2008/2009 der Gletscher in der Goldberggruppe; ZAMG; Wien.

Weitere Quellen

Internetquellen

[AMAP] <http://www.austrianmap.at/amap/>

[esri.com] http://edndoc.esri.com/arcobjects/9.2/net/shared/geoprocessing/spatial_statistics_tools/average_nearest_neighbor_spatial_statistics_.htm (September 2012)

[opendemocracy.net] http://www.opendemocracy.net/globalization-climate_change_debate/kazakhstan_2551.jsp (September 2012)

[wgms.ch] <http://www.geo.uzh.ch/microsite/wgms/> (September 2012)

[swisseduc.ch] <http://www.swisseduc.ch/glaciers/alps/gornergletscher/docs/gornergletscher.pdf> (September 2012)

Matlab-Skripts

[D'Ericco 2006] D'Ericco J [2006] gridfit.

[Hynek 2011] Hynek B [2011] mb_calc_gfw.

[Pankratov 1995] Pankratov KK [1995] kriging.

[Schwanghart 2010] Schwanghart W [2010] variogramfit.

[Schwanghart 2011] Schwanghart W [2011] variogram.

Persönliche Gespräche

[Hynek pers. Gespräch] Bernhard Hynek – ZAMG Wien (September 2012)

[Riedl pers. Gespräch] Doris Riedl Universität Wien (Oktober 2012)

[Schöner pers. Gespräch] Wolfgang Schöner – ZAMG Wien (Oktober 2012)

Emailverkehr

[Fischer via Email] Andrea Fischer – Universität Innsbruck (Oktober 2012)

[Huss via Email] Matthias Huss – Universität Freiburg (Oktober 2012)

[Hynek via Email] Bernhard Hynek – ZAMG Wien (September, Oktober 2012)

[Kaser via Email] Georg Kaser – Universität Innsbruck (Oktober 2012)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Ablations- und Akkumulationsprozesse [Cogley et al. 2011]	14
Abbildung 1.2: Definition der Massenbilanzterme [Paterson 1994]	16
Abbildung 1.3 Grenze zwischen Schnee und Firn am Oberen Goldbergkeesboden [Hynek et al. 2009]	20
Abbildung.2.1 Abgrenzung Schuttbedeckter Gletscherränder zum Gletscherumfeld [Abermann et al 2011]	26
Abbildung 2.2 Rainer Unger beim Auswiegen einer Schneeprobe	30
Abbildung 2.3 Bernhard Hynek mit Georadarausstattung	31
Abbildung 3.1 Eingschneider Messpegel [Kaser, Fountain & Vecchia 2003]	42
Abbildung 3.2 Homogen verteilte Punkte bis Punktcluster (esri.com)	42
Abbildung 3.3 Möglichkeiten der Einbeziehung von Pegelnetzen zur Auswertung	47
Abbildung 3.4 Entwicklung der Jahresbilanzen bei gemeinsamer und einzelner Auswertung von Goldbergkees, Wurtenkees und Kleinfleißkees 1999-2009, Beschreibung im Text	48
Abbildung. 4.1 Messnetz des Storglaciären 2006/07 [Zemp et al. 2010]	55
Abbildung 5.1 Lage der Untersuchungsgletscher in der Goldberggruppe [AMAP]	63
Abbildung 5.2 Spezifische Jahresbilanz 1999 auf den Gletschern der Goldberggruppe (schwarze Punkte sind Ablationspegel, grüne sind gesetzte Stützstellen)	65
Abbildung 5.3 Gletscherumrisse und Punktmuster von Winter- und Jahresbilanz	66
Abbildung 5.4 Gletscherumrisse und Punktmuster mit vielen Stützstellen für Jahresbilanz ..	67
Abbildung 5.5 Zeitreihen der kumulativen spezifischen Massenbilanzen der drei Gletscher im Sonnblick [verändert nach Böhm 2007]	69
Abbildung 6.8: Punktzahl nach Informationsqualität	79
Abbildung 6.9: Punktzahl nach Informationsklasse	80
Abbildung 6.10: Punktzahl nach Informationsklasse (KI), Kleinfleißkees, Jahresbilanz	80
Abbildung 7.1 Applikation zur Trendanalyse in ArcGIS, U-Formen zeigen guten globalen Trend [esri.com]	84
Abbildung 7.3 Über Gridfit generierte Oberfläche [D’Ericco 2006]	86
Abbildung 8.1 Fehlervarianz Interpolationsmethoden Wurtenkkes, spez. Jahresbilanz	90
Abbildung. 8.2 Fehlerbalken Interpolationsmethoden Wurtenkees, spez. Jahresbilanz	90

Abbildung 8.3 Fehlervarianz Interpolationsmethoden Goldbergkees, Jahresbilanz	91
Abbildung 8.4 Fehlerbalken Interpolationsmethoden Goldbergkees, Jahresbilanz.....	91
Abbildung 8.5 Fehlervarianz Interpolationsmethoden Goldbergkees, Jahresbilanz	92
Abbildung 8.6 Fehlerbalken Interpolationsmethoden Goldbergkees, Jahresbilanz.....	92
Abbildung 8.7 Fehlervarianz Interpolationsmethoden Goldbergkees, Winterbilanz	93
Abbildung 8.8 Fehlerbalken Interpolationsmethoden Goldbergkees, Winterbilanz	93
Abbildung 8.9 Fehlervarianz Flächenänderung Wurtenkees, Jahresbilanz	96
Abbildung 8.10 Fehlervarianz Flächenänderung Goldbergkees, Jahresbilanz.....	96
Abbildung 8.11 Fehlervarianz Flächenänderung Kleinfleißkees, Jahresbilanz	97
Abbildung 8.12 Fehlervarianz Flächenänderung Wurtenkees, Winterbilanz	97
Abbildung 8.13 Fehlervarianz Flächenänderung Goldbergkees, Winterbilanz.....	98
Abbildung 8.14 Fehlervarianz Flächenänderung Kleinfleißkees, Winterbilanz	98
Abbildung 8.15 Einfluss von Expert Knowledge auf Jahresbilanz Wurtenkees	100
Abbildung 8.16 Einfluss von Expert Knowledge auf Jahresbilanz Goldbergkees.....	100
Abbildung 8.17 Einfluss von Expert Knowledge auf Jahresbilanz Kleinfleißkees.....	101
Abbildung 8.18 Einfluss von Expert Knowledge auf Winterbilanz Wurtenkees	101
Abbildung 8.19 Einfluss von Expert Knowledge, Winterbilanz Goldbergkees.....	102
Abbildung 8.20 Einfluss von Expert Knowledge, Winterbilanz Kleinfleißkees.....	102
Abbildung 8.21 Korrelation der mittleren Abweichungen zum NNI.....	103
Abbildung 8.22 Korrelation der mittleren Abweichungen zum Moran'sI	103
Abbildung 8.22 Korrelation der mittleren Abweichungen zum Moran'sI	104
Abbildung 8.23 Korrelation der mittleren Abweichungen zur Punktdichte	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Ausgewählte Methoden Massenbilanzbestimmung (nach Schöner 2003, Reisenhofer 2009)	22
Tabelle 2.2 Gletschermassenbilanz beeinflussende Faktoren [Karpilo 2009 nach Knight 1999]	35
Tabelle 3.1 Einteilung der Unsicherheiten in der direkten Methode in Punkt, Fläche, Interpolation und Anderes	40
Tabelle 3.2 Einteilung der Punktwerte nach Informationsqualität (Beschreibung im Text) ...	43
Tabelle 4.1 Behandelte Fehler und Unsicherheiten in den Beispielstudien	54
Tabelle 6.1 Jahres- und Winterbilanzen nach Massenhaushaltsberichte.....	72
Tabelle 6.2 Punktwerte für Wurtenkees- Jahresbilanzen	75
Tabelle 6.3 Punktwerte für die Wurtenkees-Winterbilanzen	75
Tabelle 6.4 Punktwerte für Goldbergkees- Jahresbilanzen	76
Tabelle 6.5 Punktwerte für die Goldbergkees-Winterbilanzen	77
Tabelle 6.4 Punktwerte für Kleinfleißkees-Jahresbilanzen	77
Tabelle 6.7 Punktwerte für die Kleinfleißkees-Winterbilanzen	78
Tabelle 6.8 Einteilung der Punktarten in Klassen nach Informationsqualität	78
Tabelle 6.9 Von Orthofotos abgeleitete Gletscherflächen 1998-2009	81
Tabelle 8.1 Häufigkeiten der nächsten Distanz zum Referenzwert und Mittelwert	94
Tabelle 8.2 Mittlere, minimale und maximale Abweichung der über die Zeitreihe gemittelten Ergebnisse (Interpolationsmethode und Flächenaktualität)	95
Tabelle 8.3 Anzahl der Jahre mit gesetzten Stützstellen und mittlere Abweichung (σ)	99
Tabelle 9.1 Vergleich der Fehlervarianz (span) von Methode, Fläche und Expert Knowledge	106

Danksagungen

Größten Dank gewährt meinen Betreuern Bernhard Hynek und Cyrus Samimi:

- Meinem Zweitbetreuer Bernhard für Geduld, Humor und motivierende Kritik,
- Meinem Hauptbetreuer Herrn Samimi danke ich für Begeisterung, Vorschläge, Motivation sowie absolute Unkompliziertheit und

Wolfgang Schöner will ich für Rat über Telefon, Vorschläge auf dem Gang und guten Ideen im Büro danken. Besten Dank auch an Andrea Fischer, Georg Kaser und Matthias Huss für die raschen und Perspektiven-erweiternden Antworten auf meine Emails.

Für die aufregende Studienzeit in Wien möchte ich vor allem meinem großen Bruder Christian und seiner Freundin Birgit meinen tiefsten Dank aussprechen. Meinen Eltern Ramgad und Paps will ich ebenso ein herzlichstes Dankeschön sagen.

Robert Peticzka und Franz Holawe sei gesagt, dass sie mich in meiner Studienzeit irrsinnig inspiriert und motiviert haben – jeder auf seine ganz, ganz eigene Art. Es hat eine riesige Freude gemacht aufs Institut zu gehen. Mein Dank gilt auch den Mitgliedern des Geographieinstituts, die immer kooperativ und freundlich waren. Den ganzen Studienfreunden (unabzählbar) und den Freunden außerhalb des Studiums, vor allem Sebastian, Daniel und Paola, sei gedankt.

Letztendlich gilt mein Dank auch noch dem Staat Österreich, der mich fünf Jahre lang über Studienbeihilfe bei den Mieten unterstützt hat. Ich werde mich revanchieren.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Patrick Andreas Schlechter
geboren am 17. Mai 1986 in Saalfelden am Steinernen Meer
Sohn von Hermann und Dagmar Schlechter
Österreichischer Staatsbürger, Präsenzdienst abgeleistet
patrick.schlechter@gmail.com

Schulbildung

1992 – 1996	Volksschule St. Martin bei Lofer
1996 – 2000	Hauptschule Lofer
2000 – 2005	HAK Zell am See

Wissenschaftlicher Werdegang

WS2006	Studium Mathematik, Uni Wien, nicht abgeschlossen
SS2007 – SS2012	Studium Geographie, Schwerpunkt Geoökologie
WS2008	Tutor für LV ‚Agrarökologie und Ressourcenmanagement‘, Universität Wien
SS2008 – WS2011	Studienassistent für Geoökologie, Universität Wien
März – April 2011	Praktikumsvertrag auf der ZAMG, Abteilung Klimafolgenforschung
Mai – Juni 2011	Werkvertrag auf der ZAMG, Abteilung Klimafolgenforschung

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere,

- dass ich die Diplomarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.
- dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am 31. Oktober 2012

Patrick Schlechter