

MASSENHAUSHALTSBESTIMMUNG ALPINER GLETSCHER



Arbeitsunterlagen für die Lehrveranstaltung
„Gletschermassenhaushaltsuntersuchungen“
am Institut für Meteorologie und Physik der Universität für Bodenkultur Wien
und am
Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien

3. überarbeitete Ausgabe

Februar 2003

von Wolfgang Schöner

1. GRUNDBEGRIFFE

Die **Massenbilanz** (der **Massenhaushalt**, mass balance) eines Gletschers setzt sich aus dem Massengewinn durch die **Akkumulation** (total accumulation) C und dem Massenverlust durch die **Ablation** (total ablation) A zusammen.

$$B = C + A \text{ (kg)}$$

Die Ablation wird üblicherweise durch negative Zahlenwerte ausgedrückt. Praktischerweise bezieht man die Massenbilanz auf die horizontale Einheitsfläche und spricht dann von der **spezifischen Bilanz** (specific balance). Spezifische Massenbilanzgrößen (auf die Flächeneinheit bezogene Massenbilanzgrößen) werden mit Kleinbuchstaben bezeichnet.

$$b = c + a \text{ (kg m}^{-2}\text{)}$$

mit: $b = B / S$ S Gletscherfläche
 $c = C / S$
 $a = A / S$

Dividiert man die obigen Bilanzgrößen durch die Dichte des Wassers so erhält man die entsprechenden Wasseräquivalente. Da die Dichte von Wasser 1000kg/m^3 beträgt, folgt weiters: $b(\text{kg m}^{-2}) = b(\text{mm})$ Wasseräquivalent.

Zur Akkumulation zählen:

* Schneefall (und anderer fester Niederschlag), Ablagerung von Treibschnee, Ablagerung von Lawinen, Kondensation von atmosphärischen Wasserdampf und Anfrieren von Regenwasser.

Zur Ablation zählen:

* Schmelzen, Erosion von Treibschnee, Abbruch von Lawinen, Verdunstung und Kalben.

Die relative Bedeutung der einzelnen Komponenten hängt von Klima und Topographie ab. Akkumulation und Ablation treten vorwiegend an der Gletscheroberfläche auf, in geringem Ausmaß und meist der Messung nicht zugänglich, auch am Grund des Gletschers oder im Inneren in Spalten, Gletschermühlen und Kanälen.

In einem bestimmten Zeitabschnitt t_1 bis t_2 können auf einem beliebigen Flächenelement des Gletschers sowohl Akkumulation als auch Ablation auftreten. Ist das Integral von t_1 bis t_2 über diese Massenänderung b ($\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$) positiv, so spricht man von **Nettoakkumulation** (net accumulation) c_n , im negativen Fall von **Nettoablation** (net ablation) a_n . Die spezifische Massenbilanz wird dann auch als spezifische Nettomassenbilanz bezeichnet.

$$b = b_n = \int_{t_1}^{t_2} b \, dt$$

mit: $b_n = a_n$ für $b_n < 0$ und $b_n = c_n$ für $b_n > 0$

Bezeichnen t_1 und t_2 Beginn und Ende des Winters, so handelt es sich um die sogenannte **Winterbilanz** (winter balance) (analog für die **Sommerbilanz** (summer balance)). Hat der zeitliche Verlauf der Massenbilanz jeweils nur ein Maximum und ein Minimum pro Jahr (was nicht in jedem Klimagebiet, in jedem Jahr oder auf jeden Punkt eines Gletschers zutreffen muss), dann wird die Zeit vom Minimum zum Maximum die **Akkumulationsperiode** (accumulation period) genannt, die vom Maximum zum Minimum die **Ablationsperiode** (ablation period), und die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Minima das **Bilanz- oder Haushaltsjahr** (balance year). Die dem gesamten Haushaltsjahr entsprechende Bilanz wird dann als **Jahresbilanz** (annual balance) bezeichnet.

Diese Einteilung des Haushaltsjahres in eine Winterperiode und eine Sommerperiode ist nicht ganz unproblematisch und führt zu unterschiedlichen Methoden für die Bestimmung von Wintermassenbilanz und Sommermassenbilanz (siehe Abbildung 1 bzw. Østrem and Brugman, 1991).

- a) **Stratigraphic System**: Die Winterbilanz des Gletschers wird zum Zeitpunkt der maximalen Akkumulation und die Jahresbilanz zum Zeitpunkt maximaler Ablation gemessen. Dieses System ist genau betrachtet nur für eine punktuelle Messung durchführbar, da für verschiedene Punkte eines Gletschers und für verschiedene Gletscher die Zeitpunkte maximaler Akkumulation und maximaler Ablation verschieden sind. Durch die anschließende Interpolation zwischen den Messpunkten kommt es daher zu einer Interpolation der Dauer des Haushaltsjahres (vorwiegend in Abhängigkeit von der Seehöhe). Außerdem ist es in der Praxis oft schwer genau zu den geforderten Zeitpunkten zu messen (Witterungsabhängigkeit, Notwendigkeit einer genauen Beobachtung des Gletschers während des gesamten Haushaltsjahres und dadurch höherer finanzieller- und zeitlicher Aufwand). Meist ist daher auch bei dieser Methode eine Inter- oder Extrapolation z.B. aus meteorologischen Aufzeichnungen notwendig. Auch wird eine Vergleichbarkeit der Massenbilanz mit meteorologischen Aufzeichnungen auf Grund der unterschiedlichen Periodenlänge erschwert.
- b) **Fixed-Date System**: Um die Probleme des „Stratigraphic System“ zu umgehen bezieht man sich bei dieser Methode auf fixe Daten für die Ermittlung der Wintermassenbilanz und der Jahresmassenbilanz. In Anlehnung an das hydrologische Jahr wird das Haushaltsjahr mit der Periode 1. Oktober bis 30. September festgelegt. Die Festlegung des Winterhaushaltsjahres und des Sommerhaushaltsjahres ist uneinheitlich, da das Maximum der Winterakkumulation

für die meisten Gletscher zwischen Anfang und Ende Mai erreicht wird. Daraus folgend wird das Winterhaushaltsjahr entweder bis zum 30. April oder bis zum 31. Mai gerechnet. In Praxis wird diese Methode zwar häufig verwendet aber nicht strikt eingehalten, da auch die Messung am 30. April bzw. 30. September zum Beispiel witterungsbedingt nicht immer möglich ist. Man muss daher auch bei dieser Methode oft erst auf die „fixed dates“ inter- oder extrapolieren.

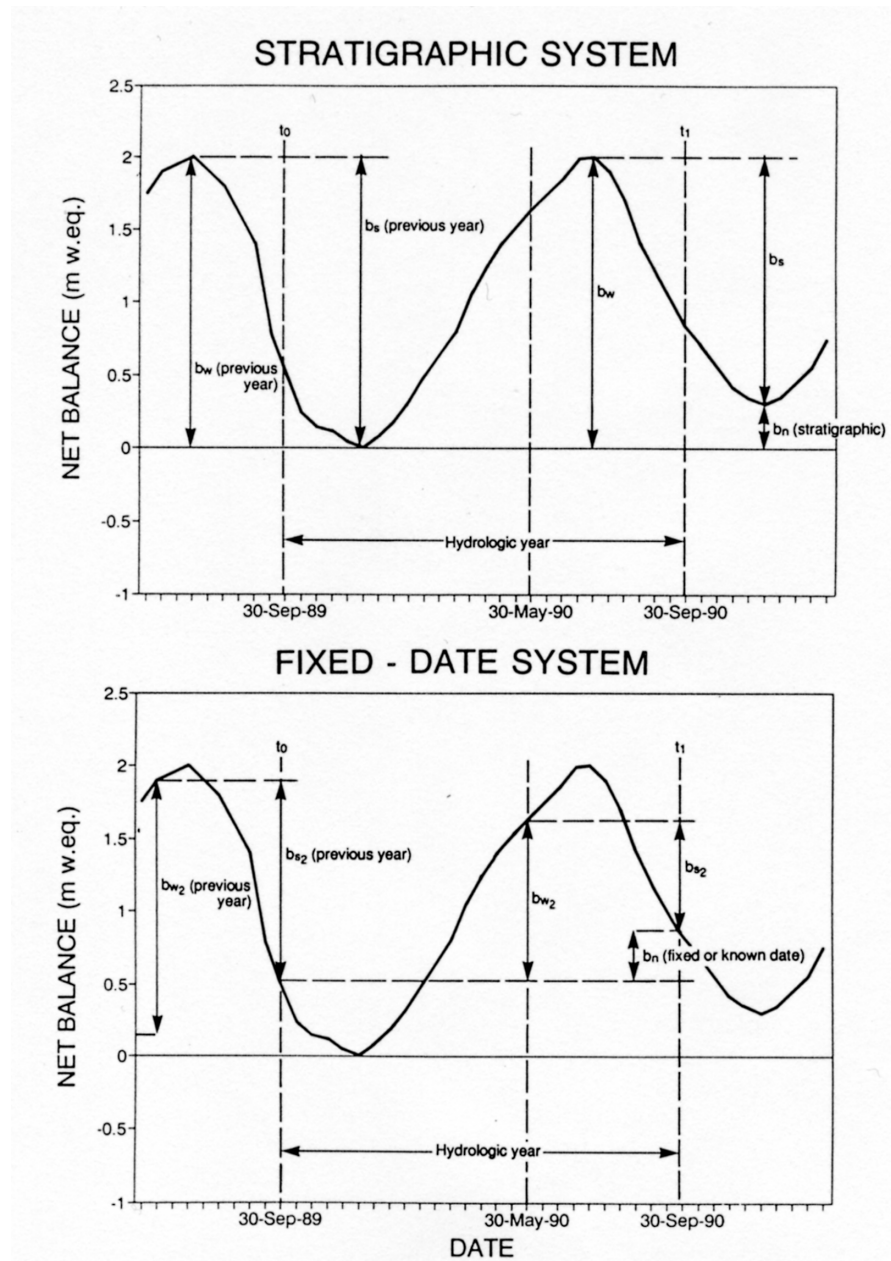


Abbildung 1: Vergleich des „Stratigraphic System“ mit dem „Fixed-Date System“ zur Bestimmung von Winterbilanz, Sommerbilanz und Jahresbilanz eines Gletschers (aus: Østrem and Brugman, 1991)

- c) **Floating-Date System**: Bei dieser Methode wird die Massenbilanzmessung nicht auf eine fixe Zeitperiode bezogen, sondern für die Perioden die durch die Messtermine bestimmt sind ermittelt. Die Messtermine sind meist (entsprechend dem hydrologischen Jahr) Anfang Mai und Anfang Oktober. Es wird jedoch im Gegensatz zum Fixed-Date System keine Inter- oder Extrapolation auf einen vorgegebenen Termin durchgeführt.
- d) **Combined System**: Diese Methode versucht eine Verbindung der Methoden a) und c) manchmal auch zwischen b) und c) herzustellen (siehe Østrem and Brugman, 1991). Für diese Methode ist es wichtig, dass die Akkumulation am Ende des Haushaltsjahres (vor der Messung im Herbst) sowie die Ablation nach der Herbstbegehung genau gemessen wird. Diese Methode bietet den Vorzug, dass sowohl $b_{(\text{stratigraphic})}$ als auch $b_{(\text{fixed date})}$ berechnet werden kann.

Während am Wurtenkees ausschließlich $b_{(\text{fixed date})}$ ermittelt wird, kann für das Goldbergkees sowohl $b_{(\text{fixed date})}$ als auch $b_{(\text{stratigraphic})}$ angegeben werden.

Der Teil der gesamten Gletscherfläche S , in dem die **spezifische Jahresbilanz** (auch **spezifische Nettobilanz** genannt, annual net balance) positiv ist, wird als das **Akkumulationsgebiet** S_C (Nährgebiet, accumulation area) des Gletschers bezeichnet, der, in dem sie negativ ist, als das **Ablationsgebiet** S_A (Zehrgebiet, ablation area) genannt, mit

$$S = S_C + S_A.$$

Die **mittlere spezifische Bilanz** (mean specific net balance) b bezieht sich auf den gesamten Gletscher.

$$b = b_n = B / S = 1 / S \int_S b \, ds$$

2. BESTIMMUNG DER MASSENBILANZ

2.1. METHODENÜBERSICHT

Es gibt eine Vielzahl von Methoden zur Bestimmung der Massenbilanz eines Gletscher. Eine Übersicht der Methoden ist in Tabelle 1 dargestellt. Von diesen Methoden werden in diesem Skriptum die Methoden 1, 3, 4 und 5 näher erläutert, wobei das Schwergewicht entsprechend dem Ziel der Lehrveranstaltung auf Methode 1 gelegt wird.

	METHODE	BEMERKUNG
1	Direkte glaziologische Methode	Schnee- und Ablationspegel, Schneetiefensondierung, Schneedichtepprofile, Snowsampler,
2	Index Stake	basierend auf längerer Messperiode mit Methode 1 wird 1 Pegel, eine Pegelgruppe oder 1 Schneeprofil mit der Massenbilanz des Gesamtgletschers in Beziehung gesetzt
3	Geodätische Methode	Höhenlinienpläne, Luftbildauswertung, DHM, Radar und Laseraltimetrie, Volumsänderung
4	Hydrologische Methode	Parameter der Wasserbilanz auf Einzugsgebietsebene, vergletscherte Fläche
5	Statistische Methoden	ELA, AAR, Degree days, Temperatur und Niederschlag einer nahen Klimastation,; setzt meist eine Messperiode nach Methode 1 voraus
6	Klima-Gletschermodelle	Energiebilanz der Gletscheroberfläche, Niederschlag; setzt meist eine Messperiode nach Methode 1 voraus

Tabelle 1: Auswahl wichtiger Methoden zur Bestimmung der Massenbilanz eines Gletscher

2.2. BESTIMMUNG DER MASSENBILANZ ALS RESTGLIED DER WASSERBILANZGLEICHUNG (HYDROLOGISCHE METHODE)

Bei der Bestimmung der Massenbilanz eines Gletschers aus der Wasserbilanz eines ganzen Einzugsgebietes, wird die Massenbilanz als Restglied der Wasserbilanzgleichung ermittelt.

$$b = (P - R - E) S_E / S$$

P Niederschlag (mm)

R Abfluß (mm)

E Verdunstung (mm)

S_E Fläche des Ein-

S vergletscherte

zugsgebietes (m^2)

Fläche (m^2)

Diese Methode leidet aber an der ungenauen Messung von P, R und E, deren Fehlermöglichkeiten in der Größenordnung von ($b S / S_E$) liegt. Tabelle 2 zeigt dies am Beispiel des Ötztals.

Tabelle 2: Die Wasserbilanz des Pegels Obergurgl im Ötztal, 1974/75 - 77/78.
 $SE = 72 \text{ km}^2$, $S = 28 \text{ km}^2$. (aus Kuhn und Herrmann 1990)

	Messung mm	geschätzte Fehlermöglichkeit mm
Gebietsniederschlag	1600	+/-100
Abfluß	1300	+/-100
Verdunstung	200	+/- 50
Massenbilanz b S / S_E und tatsächlicher Fehler	100	

2.3. BESTIMMUNG DER MASSENBILANZ AUS BERECHNETEN VOLUMSÄNDERUNGEN (GEODÄTISCHE METHODE)

Liegen von einem Gletscher topographische Karten in einem hinreichend genauen Maßstab von verschiedenen Jahren vor, so kann die Volumenänderung zwischen den einzelnen Jahren nach einer von R. Finsterwalder (1953) beschriebenen Methode berechnet werden. Sie beruht auf einer Berechnung der Volumenänderung nach der Kegelstumpfmethode. Eine ähnliche Methode wurde von Hoffmann (1962) vorgeschlagen.

Wesentlich weniger zeitaufwendig - bei gleicher Genauigkeit - als der Vergleich von zwei topographischen Karten, ist heutzutage die Berechnung der Volumendifferenz digitaler Höhenmodelle (DHM) zweier Zeitpunkte. Reinhardt und Rentsch (1986) haben einen Vergleich dieser heute weit verbreiteten Methode (Berechnung der Volumenänderung aus DHM-Differenzen) zu der früher üblichen Methode (Flächenplanimetrierung und Volumsberechnung mittels Kegelstumpfmethode) für den Vernagtferner durchgeführt. Um eine hinreichende Genauigkeit mit der Planimetermethode zu erreichen, ist ein $3\frac{1}{2}$ mal so großen Zeitaufwand wie für die DHM-Methode erforderlich.

Neuere Arbeiten für die DHM-Generierung und anschließende Volumsänderungsbestimmung verwenden Lasersysteme (siehe zB. Favey u.a., 1999). Dabei können sowohl flugzeuggebundene Systeme als auch (seit kurzer Zeit) terrestrische Lasersysteme zum Einsatz kommen. Flugzeug- oder auch Satellitengetragene Systeme (Laser oder auch Radar) eignen sich besonders für die DHM-Erstellung und Massenbilanzberechnung großer Eissysteme wie in Grönland oder in der Antarktis (, Bindschadler 1998, Reeh, 1999).

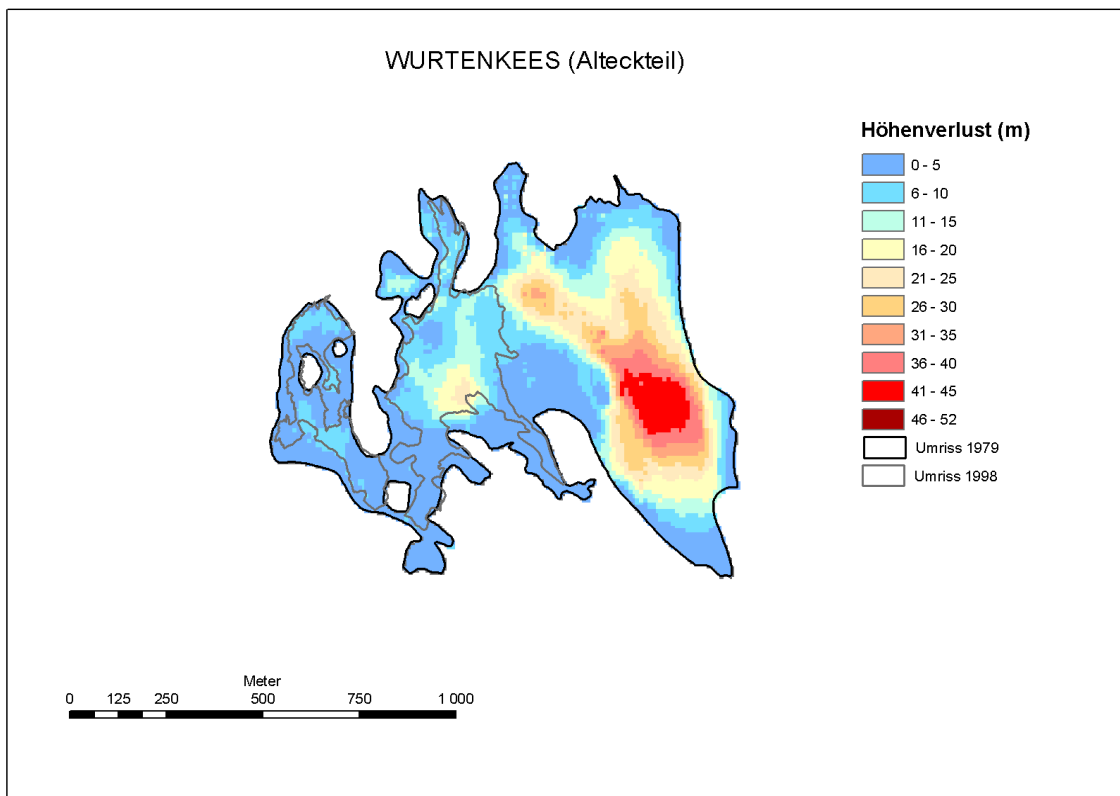
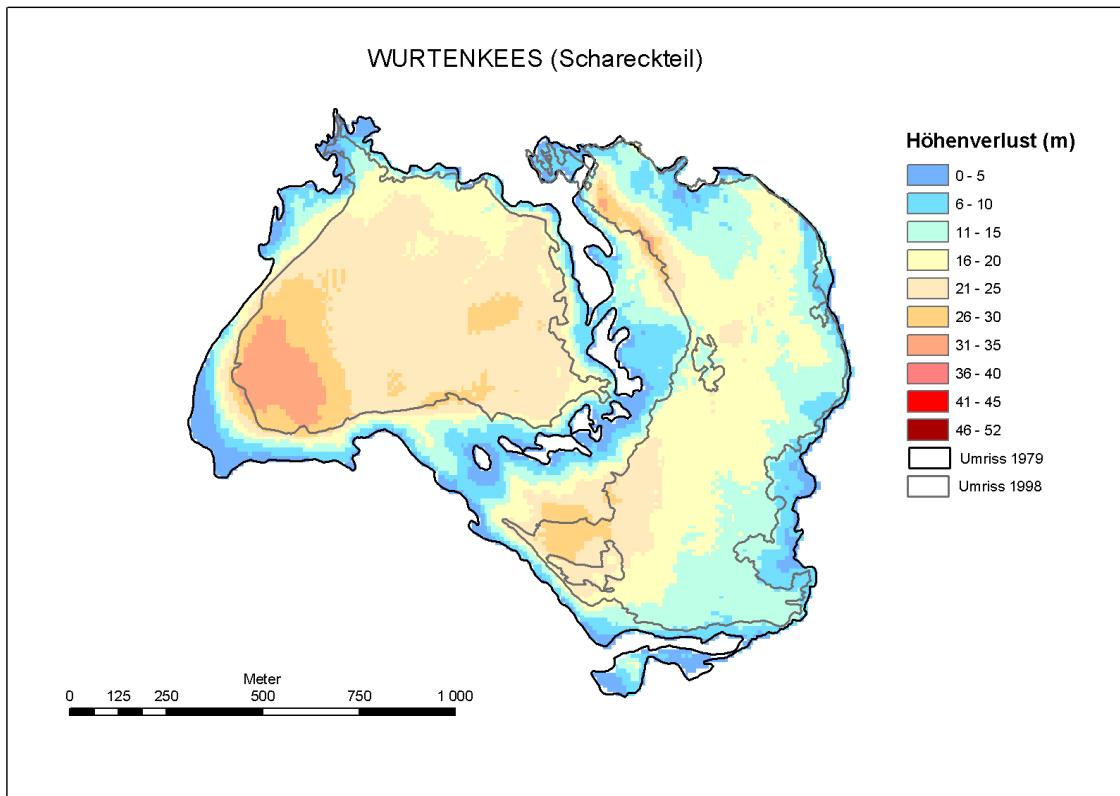


Abbildung 2: Höhenänderung des Würtenkees (Schareckteil oben, Alteckteil unten) während der Periode 1979 bis 1998 (aus Auer u.a. 2002)

Alle erwähnten geodätischen Methoden haben aber einen wesentlichen Nachteil. Für die Umrechnung der Volumensänderung in eine Massenbilanzänderung ist eine Annahme über die Schnee- bzw. Firndichte notwendig. Da entsprechende Messungen normalerweise fehlen können durch die angenommenen Werte beträchtliche Fehler entstehen. Im Falle des Hintereisferners (Lang und Patzelt, 1971) wurde für die Umrechnung die Dichte von Eis eingesetzt und eine gute Übereinstimmung mit der direkten glaziologischen Methode gefunden. Andere Arbeiten jedoch wie z.B. Krimmel (1989) zeigen beträchtliche Unterschiede der ermittelten Massenbilanz zwischen der direkten glaziologischen und der geodätischen Methode.

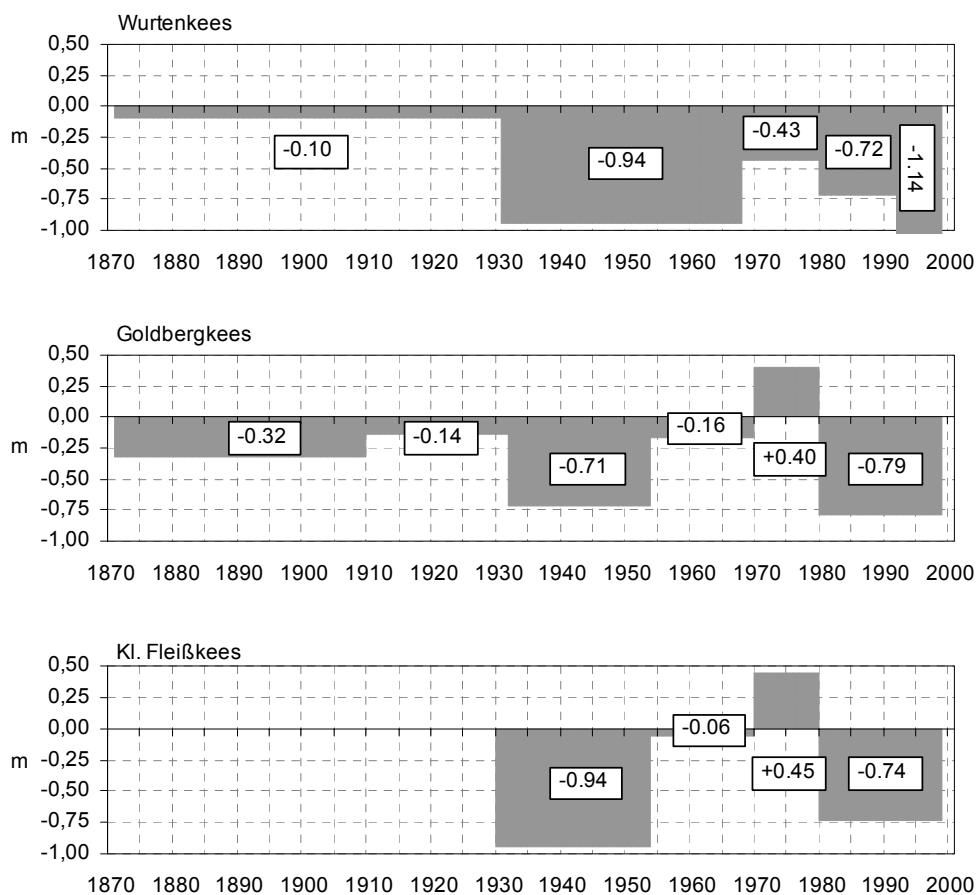


Abbildung 3: Zeitreihen der mittleren Höhenänderungen der drei Hauptgletscher des Sonnblickgebiets zwischen den vorhandenen Kartenterminen. Durch Multiplikation der Höhenänderung mit dem Verhältnis „mittlere Dichte des abgeschmolzenen Volumens zu Dichte von Wasser“ errechnet man die entsprechende spezifische Nettomassenbilanz. (aus Auer u.a. 2002)

Ein weiterer relativ großer Fehler kann bei der Auswertung von Luftbildern in kontrastschwachen Bereichen entstehen. Berechnet man die Volumenänderung jedoch über längere Zeiträume, so kann der Fehler in der mittleren Jahresbilanz verringert werden.

Die geodätische Methode ist nicht dazu geeignet, den Massenhaushalt einzelner Punkte oder Teilgebiete des Gletschers zu bestimmen, da die glaziologischen Haushaltsgrößen Akkumulation und Ablation nicht erfasst werden können und außerdem für lokale Aussagen die Gletscherbewegung (und besonders deren vertikale Komponente) Berücksichtigung finden müsste. Der große Vorzug dieser Methode besteht aber in deren einfachen und zeitsparenden Anwendbarkeit.

2.4. BESTIMMUNG DER MASSENBILANZ MIT DER DIREKTEN (GLAZIOLOGISCHEN) METHODE (TRADITIONAL METHOD)

Aus der Bestimmung der spezifischen Bilanz in einem möglichst dichten Netz von Messpunkten und der darauffolgenden Interpolation und Mittelung über die Gesamtfläche, kann der Massenhaushalt eines Gletschers direkt bestimmt werden. Im Ablationsgebiet wird b mit Hilfe sogenannter Ablationspegel (Holz- oder Metallstangen bzw. Kunststoffrohre), die mit einem Bohrer (meist Dampfbohrer) in das Eis eingebracht werden, bestimmt. Durch Abmessen des herausragenden Teiles zu Beginn und Ende des Haushaltsjahres wird Δh und daraus die Ablation bestimmt (Dichte von Eis: $\rho_{\text{Eis}} = 900 \text{ kg m}^{-3}$).

$$a = - \rho_{\text{Eis}} \Delta h \text{ (kg m}^{-2}\text{)}$$

Im Akkumulationsgebiet werden entweder Schneeschächte gegraben, in deren Wänden Dichteprofile aufgenommen werden, oder die Dichte des Schnees wird an den Messpunkten mit einem Snowsampler bestimmt. Ein Snowsampler ist ein längeres (zB. 150cm) Alu-, Kunststoff- oder Stahlrohr, meist mit einem Schneidekopf versehen und über weitere Teilstücke oder Teleskopgestänge bis ungefähr 5m verlängerbar. Mit dem Sampler werden Schneekerne erbohrt, anschließend gewogen und daraus (Volumen bekannt) die Dichte bestimmt. Durch Integration über die Jahresrücklage wird die Akkumulation bestimmt.

$$c = \int_{h(t1)}^{h(t2)} \rho \, dz \text{ (kg m}^{-2}\text{)}$$

Dabei ist $h(t1)$ die Höhe, in der die Rücklagen des untersuchten Haushaltsjahres beginnen, $h(t2)$ die, wo sie enden. Es ist nicht immer einfach, den Horizont $h(t1)$ zu bestimmen, er hat aber unter alpinen Bedingungen oft eine mehrwöchige Sommerperiode ohne Akkumulation durchlaufen und kann daher an der größeren Härte und Dichte oder an Staubablagerungen (Verfärbung) erkannt werden. Weiterhin

dadurch, dass die Schneeschichten unmittelbar über ihm, die also im Herbst und Frühwinter gefallen sind, durch aufbauende Metamorphose große, lockere Becherkristalle beinhalten (Tiefenreif, Schwimmschnee).

Wenn der 1. Oktober als Beginn des Haushaltsjahres angesetzt wird, die Akkumulation aber schon davor eingesetzt hat, liegt der eben beschriebene Horizont zu tief und eine Korrektur muss mit Hilfe von Niederschlagsaufzeichnungen einer naheliegenden Messstation versucht werden (siehe Erläuterungen zum Fixed-Date System in Kapitel 1).

Auch der scheinbar klare Fall, in dem die Jahresakkumulation auf einer Eisunterlage ruht, kann durch das Anfrieren von durchgesickertem Schmelzwasser kompliziert werden. Dieses aufgefrorene Eis (Aufeis, **Superimposed Ice**) stammt aus der selben Jahresbilanz und muss zur Akkumulation gerechnet werden. Es kann meist an seiner Struktur vom Gletschereis unterschieden werden.

Die so bestimmten Werte von a und c werden in eine Karte eingetragen. Anschließend wird zwischen den Messpunkten interpoliert, wobei dafür heutzutage Interpolations-Softwareprodukte (zB. GIS-Programme) zum Einsatz kommen. Bei der Interpolation hilft die Tatsache, dass die Extremwerte der Bilanz jährlich an der selben Stelle auftreten und die Isolinien zwischen ihnen ein jährlich wiederkehrendes Muster bilden. Photographien des Akkumulationsgebietes sind eine zusätzliche Hilfe bei der Interpolation. Als letzter Schritt erfolgt die Integration der Massenbilanz über die Fläche (Volumsbestimmung) und die Berechnung der Massenbilanz-Maßzahlen.

Die Gleichgewichtslinie verbindet die Punkte, an denen $b = 0$ und hat meist einen über weite Höhenbereiche unzusammenhängenden Verlauf. Die übliche Mittelung besteht darin, dass aus der Karte die mittleren spezifischen Bilanzen $b(z)$ für einzelne Höhenstufen bestimmt werden (Abbildung 4, 5 und 6). Die Höhe in der $b(z) = 0$, wird als die **mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie** (Equilibrium Line Altitude ELA) bezeichnet. Der Verlauf von $b(z)$ hat bei den Alpengletschern einen typischen Verlauf, der auch in den Abbildungen 4, 5 und 6 deutlich zum Ausdruck kommt. Die Steigung dieser Kurve im Bereich der ELA stellt eine wichtige Maßzahl eines Gletschers dar und wird als **Activity Index** bezeichnet.

Es ist auffällig, dass die Kurven $b(z)$ der einzelnen Haushaltsjahre durch Parallelverschiebung um Δb weitgehend zur Deckung gebracht werden können.

Diese Erfahrung (bei manchen Gletschern auch der bis ins Akkumulationsgebiet konstante Wert von $\partial b / \partial z$) erklärt, warum die Abweichung der ELA eines Jahres von der für ausgeglichene Massenbilanzen typischen ELA ein Maß für die Bilanz dieses Jahres ist.

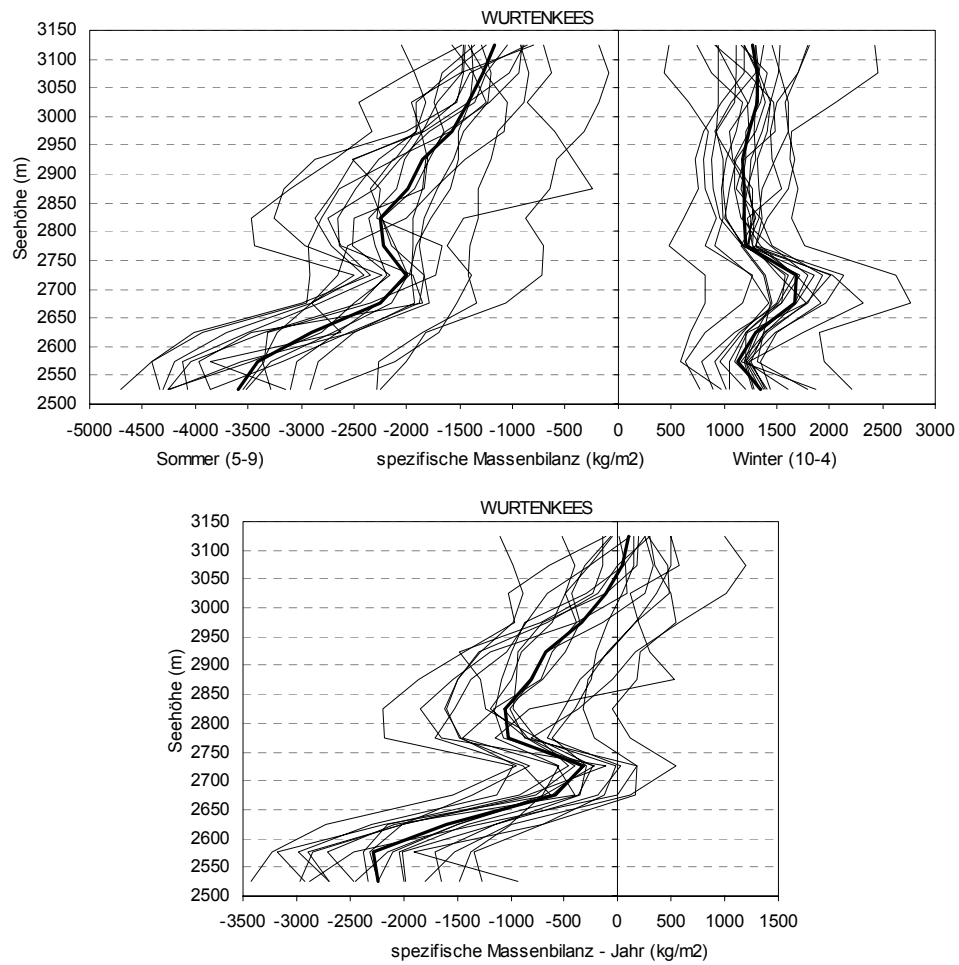


Abbildung 4: Verlauf der spezifischen Massenbilanz mit der Höhe für das Wurtenkees (Haushaltsjahr 1982/83 bis 2000/01) für Winter- und Sommerhalbjahr sowie gesamtes Haushaltsjahr); dünne Linien = Einzeljahre, dicke Linie = Mittel (aus Auer u.a. 2002)

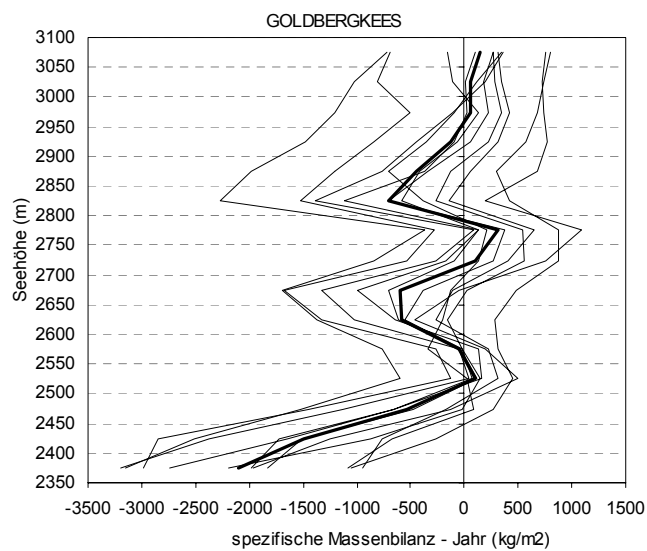
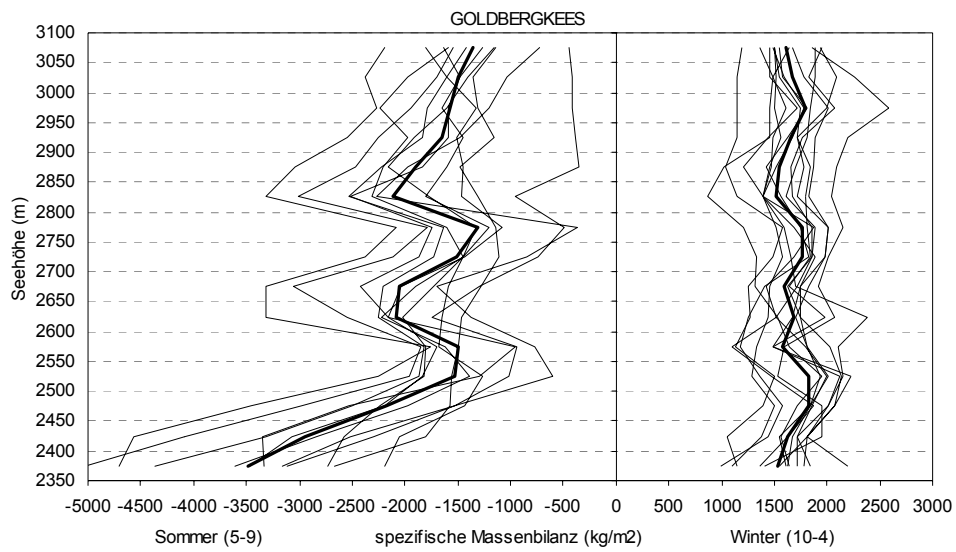


Abbildung 5: Verlauf der spezifischen Massenbilanz mit der Höhe für das Goldbergkees (Haushaltsjahr 1986/87 bis 2000/01) für Winter- und Sommerhalbjahr sowie gesamtes Haushaltsjahr; dünne Linien = Einzeljahre, dicke Linie = Mittel (aus Auer u.a. 2002)

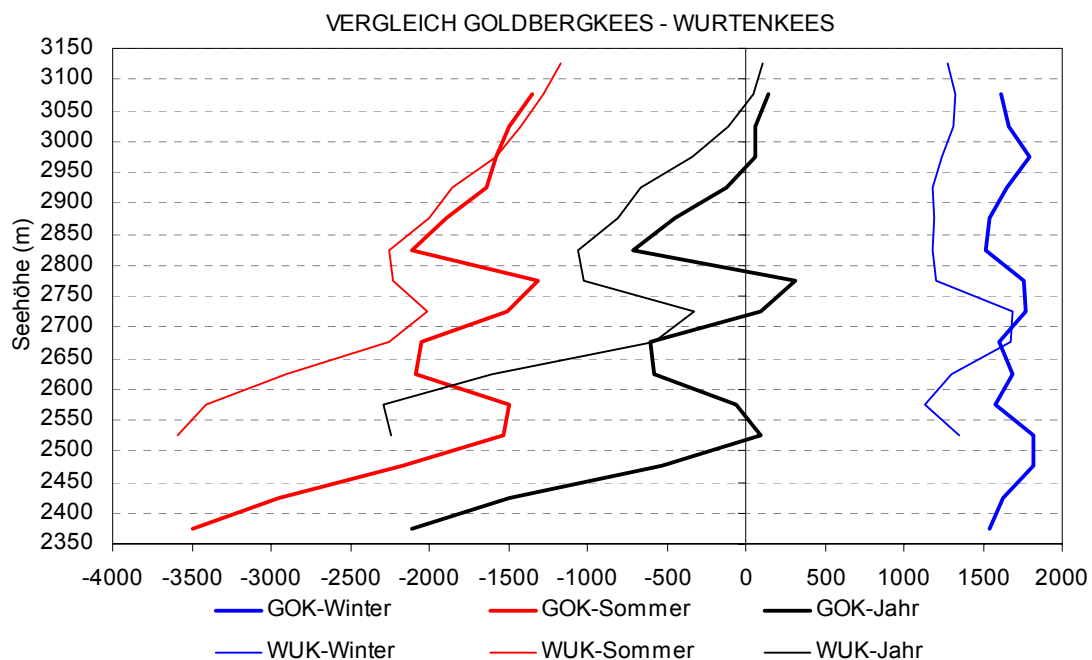


Abbildung 6: Mittlere Massenbilanz-Höhenkurven Goldbergkees und Wurtenkees Winter-, Sommer- und Jahresbilanz (aus Auer u.a. 2002)

2.5. INDIREKTE METHODEN ZUR BESTIMMUNG DER MASSEN-BILANZ EINES GLETSCHERS (STATISTISCHE METHODEN)

Alle hier beschriebenen indirekten Methoden der Massenbilanzbestimmung setzen eine längere Periode mittels direkter Messung voraus. Wie bereits im Punkt 2.3. erklärt wurde, hat $b(z)$ für die Alpengletscher einen charakteristischen Verlauf, so daß die $b(z)$ Kurven für die einzelnen Jahre durch Parallelverschiebung zur Deckung gebracht werden können. Daher weist auch die ELA (die mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie) einen starken Zusammenhang mit der Massenbilanz auf (Abbildung 7) und es kann die Massenbilanz, durch Abschätzung der ELA näherungsweise bestimmt werden. Diese Methode eignet sich besonders für die großflächige Abschätzung der Massenbilanz von Gletschern mittels Luftbilder oder Satellitenaufnahmen. Weiters ermöglicht es diese Methode den Zusammenhang zwischen einer Veränderung der ELA (zB. durch eine Klimaänderung) und der Massenbilanz eines Gletschers zu untersuchen.

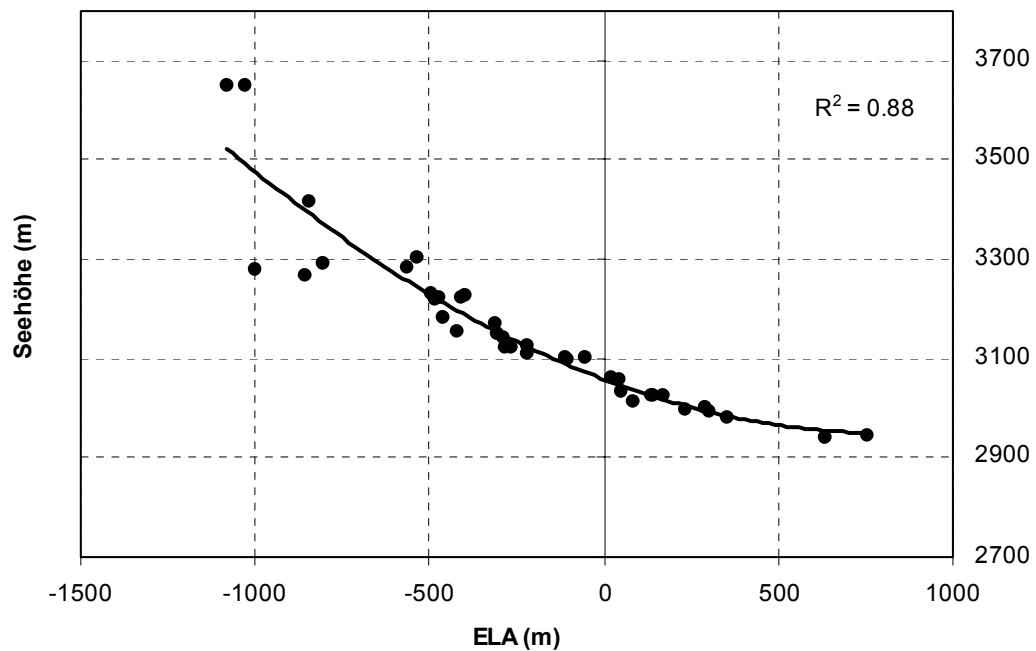


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen der mittleren Höhe der Gleichgewichtslinie und der mittleren spezifischen Massenbilanz des Vernagtferners für die Haushaltsjahre 1964/65 bis 2000/01 (Datenquelle: www.glaziologie.de)

Eine weitere empirische Größe zur indirekten Bestimmung der Massenbilanz ist das Verhältnis der Akkumulations- zur Gesamtfläche S_c/S eines Gletschers. Dieses Flächenverhältnis, auch als **Accumulation Area Ratio (AAR)**, bezeichnet, hat für die Gletscher der Alpen bei ausgeglichenem Haushalt ($b = 0$) den Wert 0,6 - 0,7. Abweichungen davon lassen sich für individuelle Gletscher als b -Werte eichen (Abbildung 8). Auch diese Methode ist wie die ELA-Methode für die großflächige Abschätzung der Massenbilanz von Gletschern mittels Luftbildern oder Satellitenbildern gut geeignet.

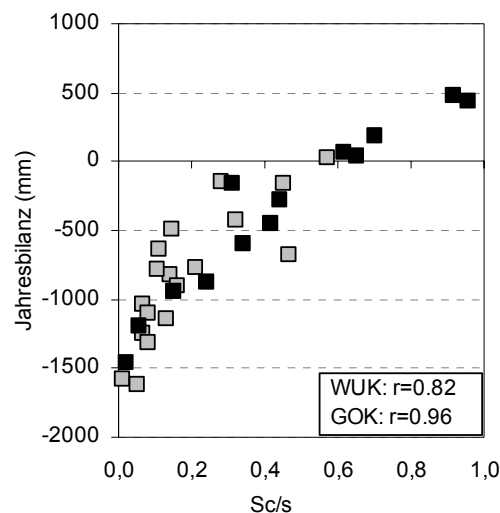


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen der mittleren spezifischen Massenbilanz (mm) und den Flächenverhältnissen von Akkumulationsgebiet zur Gesamtfläche des Gletschers (Sc/S) des Wurtenkees (WUK) und Goldbergkees (GOK) für die Haushaltsjahre 1982/83 (WUK) bis 2000/01 (aus Auer u.a. 2002)

Schließlich soll noch die Berechnung von Massenhaushaltsdaten mit Hilfe von Klimadaten (einer nahegelegenen Klimastation) erwähnt werden. Diese Methode verlangt aber ebenfalls eine längere Messreihe mit direkter Bestimmung der Massenbilanz, um eine Beziehung (etwa durch eine Regressionsgleichung) zwischen der Massenbilanz und den Klimadaten herstellen zu können. Ist nun eine Beziehung zwischen den Klimaaufzeichnungen der Klimastation und der Massenbilanz des Gletschers bekannt, kann mittels langjähriger Klimaaufzeichnungen die Massenbilanz des Gletschers für Zeitpunkte ohne direkter Messung rückgerechnet werden (Temperatursummenmethode).

Für das Wurtenkees wurde der Zusammenhang zwischen der Massenbilanz und dem Klima an Hand der Aufzeichnungen des Observatoriums auf dem Rauriser Sonnblick mittels der Temperatursummenmethode untersucht (Hammer, 1993). Da die Aufzeichnungen des Sonnblickobservatoriums bis in die 80er Jahre des letzten Jahrhunderts zurückreichen, war es möglich, eine sehr lange Reihe der Massenbilanz für das Wurtenkees zu berechnen (Abbildung 9). Eine Überprüfung der berechneten Massenbilanzwerte war mittels der geodätischen Methode möglich (Abbildung 10)

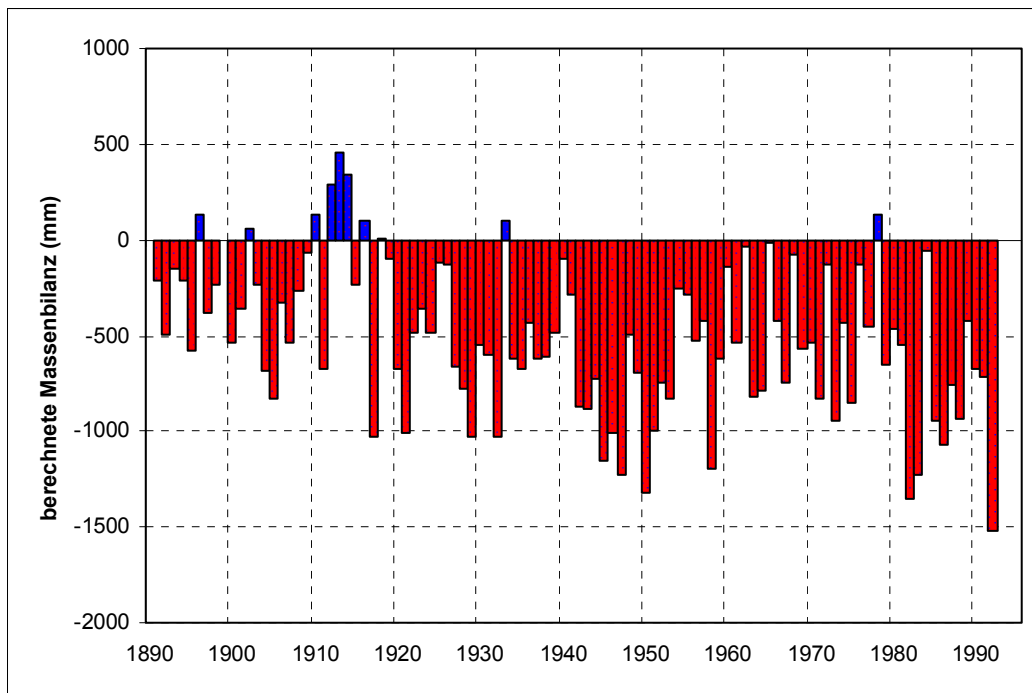


Abbildung 9: Zeitreihe der mittleren spezifischen Massenbilanz (in kg m^{-2}) des Würtenkees rückgerechnet mittels der Temperatursummenmethode (aus Auer u.a., 1995)

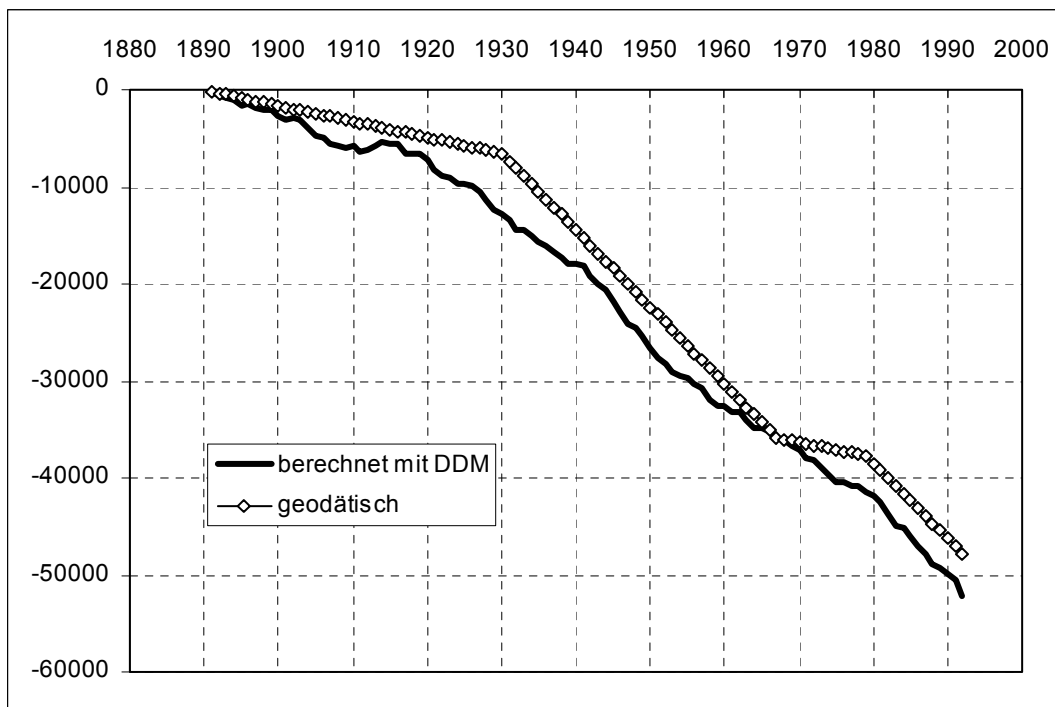


Abbildung 10: Vergleich zwischen der kumulierten Massenbilanz des Würtenkees berechnet mittels der Temperatursummenmethode und der mittels geodätischer Methode ermittelten kumulierten Massenbilanz (aus Auer u.a. 1995)

3. ZWECK DER MASSENBILANZBESTIMMUNG

Die Massenbilanz eines Gletschers ist ein sehr sensibler Klimaindikator. Bereits geringe Änderungen der Klimaparameter (Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung etc.) bewirken eine starke Änderung der Massenbilanz. Klimaänderungen können daher durch die Änderung der Massenbilanz sehr gut erfasst werden. Allgemein gibt es nur wenige Möglichkeiten eine Klimaänderung anschaulich zu zeigen. Die Gletscher zählen zu den am meisten verwendeten Beispielen zur Darstellung von Klimaänderungen.

Da die Gletscher ein sehr wichtiger Süßwasserspeicher sind, ist ihre Veränderung auch von enormer praktischer Bedeutung und zwar sowohl für die Energiewirtschaft als auch für die Wasserversorgung. Von Interesse ist nicht nur die unmittelbare Schmelzwasserproduktion aus dem glazialen Bereich, sondern auch daraus abgeleitete Folgewirkungen wie zB. der aus dem Abflussverhalten resultierende Geschiebe- und Schwebstofftransport. Besonderes Interesse besteht natürlich auch an den möglichen Folgen einer Klimaänderung für den hochalpinen Wasserkreislauf.

Wichtig sind die Gletscher auch für den sommerlichen Abfluss im Hochgebirge, dem sie einerseits mit ihrem Schmelzwasser ein spätsommerliches Maximum geben, auf den sie andererseits auch eine ausgleichende Wirkung ausüben (Bei Niederschlagsereignissen fällt der Niederschlag im Hochgebirge in Form von Schnee, wird gespeichert und trägt erst zu einem späteren Zeitpunkt zum Abfluss bei).

Schließlich können die Massenbilanzuntersuchungen an Gletschern auch für die Tourismusbranche (zB. Gletscherschigebiete) von Interesse sein, wobei aber das Wurtenkees ein trauriges Beispiel für mangelndes Interesse ist. Das Gletscher eine wichtige „touristische Attraktion“ darstellen können, zeigt das Beispiel Norwegen. Neben dem Besuch von Gletschermuseen und Gletscherausstellungen stellt für viele Touristen der Besuch beziehungsweise das Betreten eines Gletschers ein wichtiges Erlebnis eines Urlaubes in Norwegen dar.

4. BESTIMMUNG DER MASSENBILANZ NACH DER DIREKTEN GLAZIOLOGISCHEN METHODE AM BEISPIEL DES WURTENKEES UND GOLDBERGKEES

Für Wurten- und Goldbergkees wird sowohl die Winter- als auch die Jahresmassenbilanz bestimmt, woraus sich die Sommermassenbilanz durch Differenzbildung ermitteln lässt. Dies wird für das Wurtenkees seit dem Haushaltsjahr 1982/83 für das Goldbergkees seit dem Haushaltsjahr 1986/87 durchgeführt. An

anderen Gletschern existieren schon wesentlich längere Reihen (Hintereisferner in den Öztaler Alpen seit 1952 und Storglaciären in Schwedisch Lapland seit 1946).

4.1. WINTERBILANZ

Die Wintermassenbilanz ist für die Gletscher im Sonnblickgebiet mit dem Zeitraum 1.10. bis 30.4. festgelegt (Fixed-Date System). In dieser Zeitspanne wird im Falle von Wurtenkees und Goldbergkees meist auch tatsächlich die maximalen Winterakkumulation erreicht. Im Folgenden soll die Ermittlung der Massenbilanz am Beispiel des Haushaltsjahres 1992/93 (Abbildung 11 und Abbildung 14) erklärt werden.

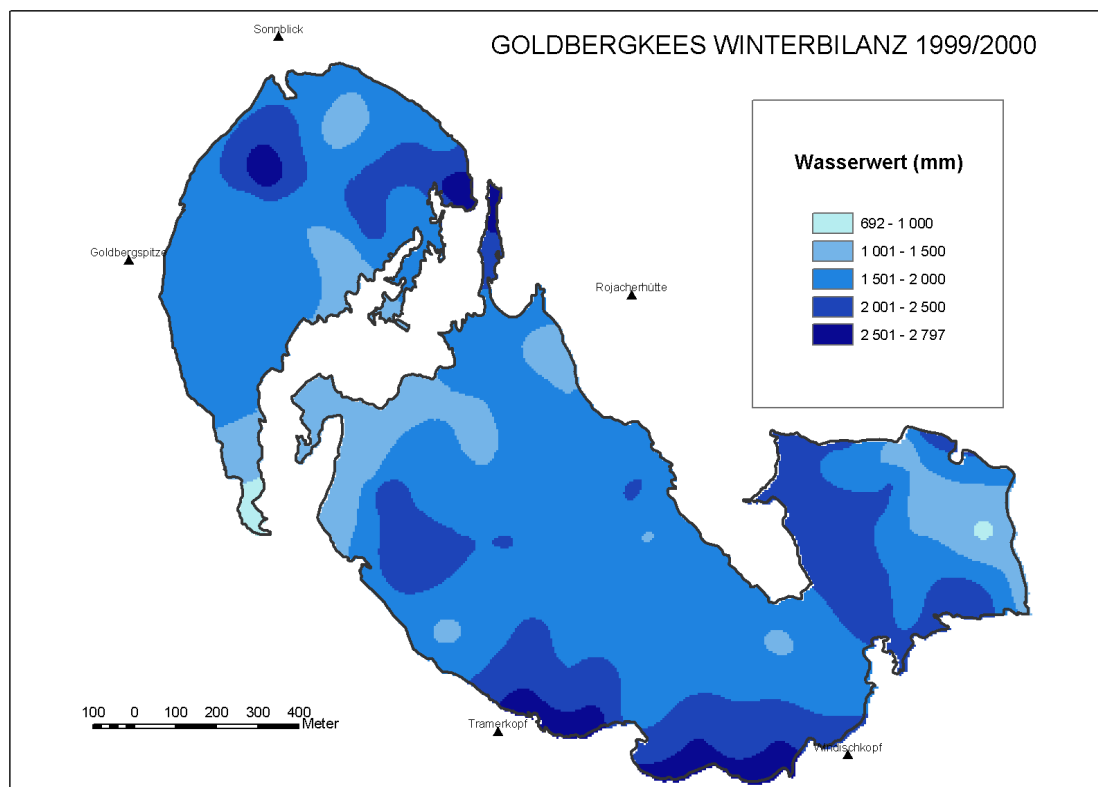


Abbildung 11: Wintermassenbilanz des Goldbergkees im Haushaltsjahr 1992/93 (aus Auer u.a. 2002)

Über die ganze Gletscherfläche verteilt werden Anfang Mai (vom Wetter abhängig) Schneeprofile bis zum Vorjahrshorizont (Eis oder Firn) gegraben. Dabei muss versucht werden, durch die Auswahl der gegrabenen Profile die flächenmäßige Verteilung der Massenbilanz, dh. möglichst alle Bereiche mit Minimum und Maximum sowie die Form der Verteilung richtig zu erfassen. Die Anzahl der Schneeprofile beträgt für Wurten- und Goldbergkees ca. 10 bis 15. In den Schneeprofilen wird die Dichte der Schneedecke (in

ungefähr 20 cm Stufen) und die Schneetemperatur gemessen, sowie die Stratigraphie bestimmt (Abbildung 13). Aus der Dichte der Schneedecke kann man dann den Wasserwert (= spezifische Massenbilanz) bestimmen, während die Schneetemperatur und die Stratigraphie Aufschluss über einen etwaigen Schmelzwasserabfluss gibt. Die Lage der Profile im Landeskoordinatensystem wird mit einem Theodoliten oder GPS (Global Positioning System) eingemessen. Zusätzlich wird zwischen den gegrabenen Profilen die Schneetiefe in 50 bis 100 m Abständen mit einer Lawinensonde bestimmt, die mittlere Dichte linear inter- beziehungsweise extrapoliert und daraus ebenfalls der Wasserwert errechnet.

Alle ermittelten Wasserwerte werden in eine Karte 1:5.000 lagerichtig eingezeichnet und die spezifischen Massenbilanz mittels des GIS-Programmes ArcView oder ArcGis zwischen den Messpunkten interpoliert (siehe Abbildung 11). Dabei muss für unzugängliche Bereiche, wo keine Informationen vorliegen, auf die Erfahrung, Aufzeichnungen von Lawinenabgängen und starken Verwehungen sowie Photographien zurückgegriffen werden.

Im nächsten Arbeitsschritt wird für jede 50 m Höhenstufe der Karte die Winterakkumulation (und durch Division durch die Fläche pro Höhenstufe die spezifische Winterbilanz) berechnet. Dafür wird mittels des GIS-Programmes jede Teilfläche und die Massenbilanz B und in weiterer Folge b bestimmt. Kaser u.a. 1995 haben den Einfluss verschiedener Interpolationsmethoden auf die berechnete Massenbilanz untersucht und auch mit der früher üblichen „händischen“ Isolinienkonstruktion (durch verschiedene Bearbeiter) verglichen. Die Unterschiede in den Ergebnissen liegen dabei in der Größenordnung von 5% (verschiedene Interpolationsmethoden, verschiedene Bearbeiter). Die gewählte Methode hat also im Vergleich zu anderen Unsicherheiten (Schneetiefensondierung, Vorjahreshorizont, etc.) kaum einen Einfluss auf das Ergebnis.

4.2. JAHRESBILANZ

Die Ermittlung der Jahresbilanz (Abbildung 14) erfolgt sehr ähnlich der Ermittlung der Winterbilanz. Im gesamten Ablationsgebiet müssen Ablationspegel in das Eis eing bohrt werden, wobei wieder versucht werden muss die Verteilung der Maxima und Minima der spezifischen Massenbilanz zu erfassen. Das Beispiel eines Eisbohrers ist in Abbildung 12 zu sehen. Die Pegel werden mit einem Theodoliten oder GPS eingemessen und zumindest am 1.10. und 30.9. des Folgejahres abgelesen. Aus der Eisabschmelzung wird durch Multiplikation mit der Dichte des Gletschereises ($\rho = 900 \text{ kg m}^{-3}$) der Wasserwert für jeden Pegel bestimmt.

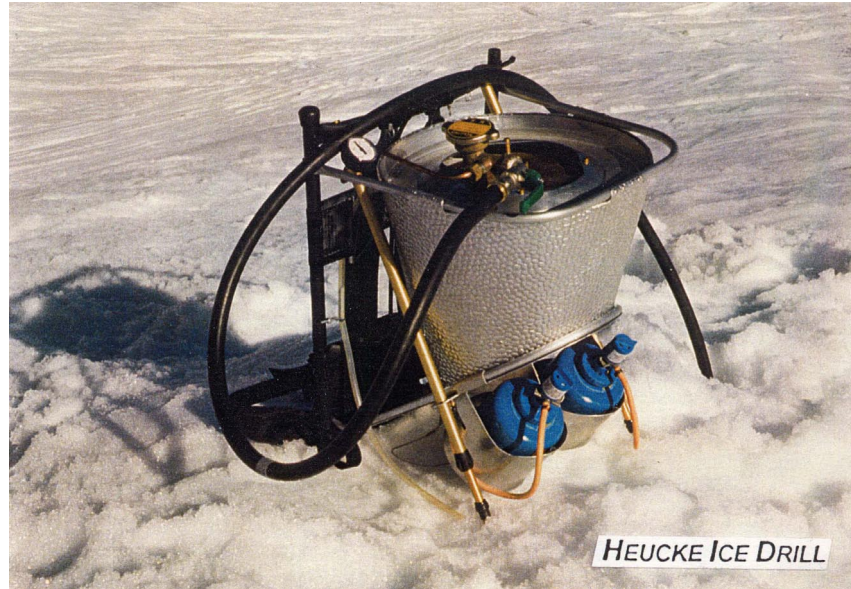


Abbildung 12: Dampfbohrer (Entwicklung E. Heucke München) zum Einbohren der Ablationspegel in Eis oder Firn

Im Akkumulationsgebiet müssen wieder Schneeprofile gegraben werden, in denen die Dichte und die Schneetiefe und daraus der Wasserwert bestimmt wird. Im Falle des Wurtenkees ist dies meist nicht notwendig, da der Gletscher oft zur Gänze ausapert.

Alle Messpunkte werden wieder in eine Karte 1:5.000 eingetragen und mittels des GIS-Programmes ArcView bzw. ArcGis wird zwischen den Messpunkten eine Interpolation durchgeführt. Wie bei der Winterbilanz wird die Massenbilanz B und spezifische Bilanz b je 50m Höhenstufe berechnet. Bei der Konstruktion der Isolinien stellen Photographien oder eine Ausaperungskartierung eine große Hilfe dar. Weitere glaziologische Parameter wie zB. Größe des Akkumulationsgebietes und Größe des Ablationsgebietes oder Nettoakkumulation und Nettoablation können mittels des GIS-Programmes ebenfalls sehr leicht bestimmt werden. Sehr einfach gestaltet sich auch die Berechnung der Karte der Sommerbilanz, die durch Differenzbestimmung konstruiert werden kann.

Schneeprofil am Wurtenkees - Chemieprofil Gipfel (3050 m) vom 30.04.2002

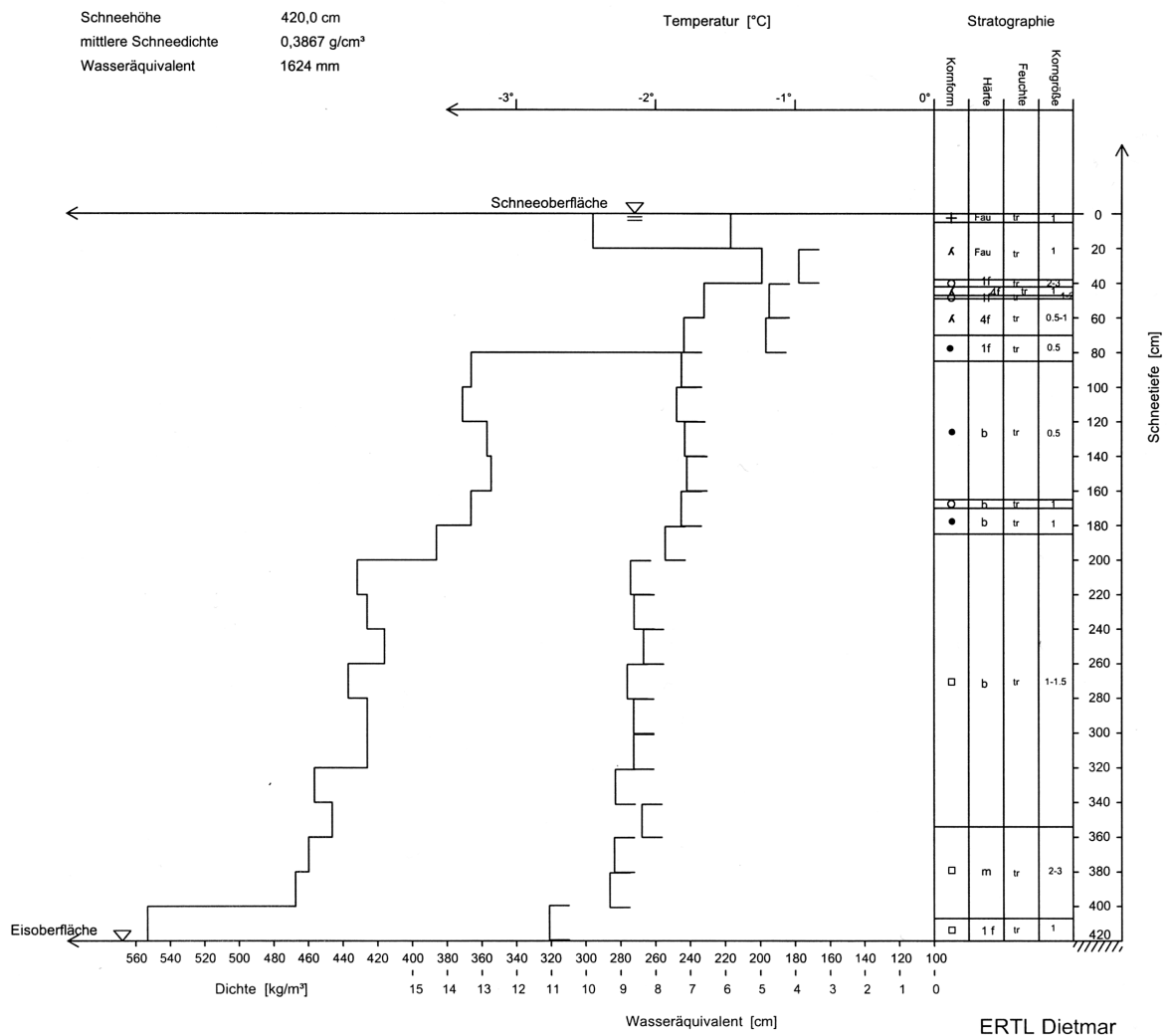


Abbildung 13: Profil der Dichte, des Wasserwertes, der Stratigraphie und der Schneetemperatur der Schneedecke an einem Meßpunkt für die Bestimmung der Wintermassenbilanz des Wurtenkees

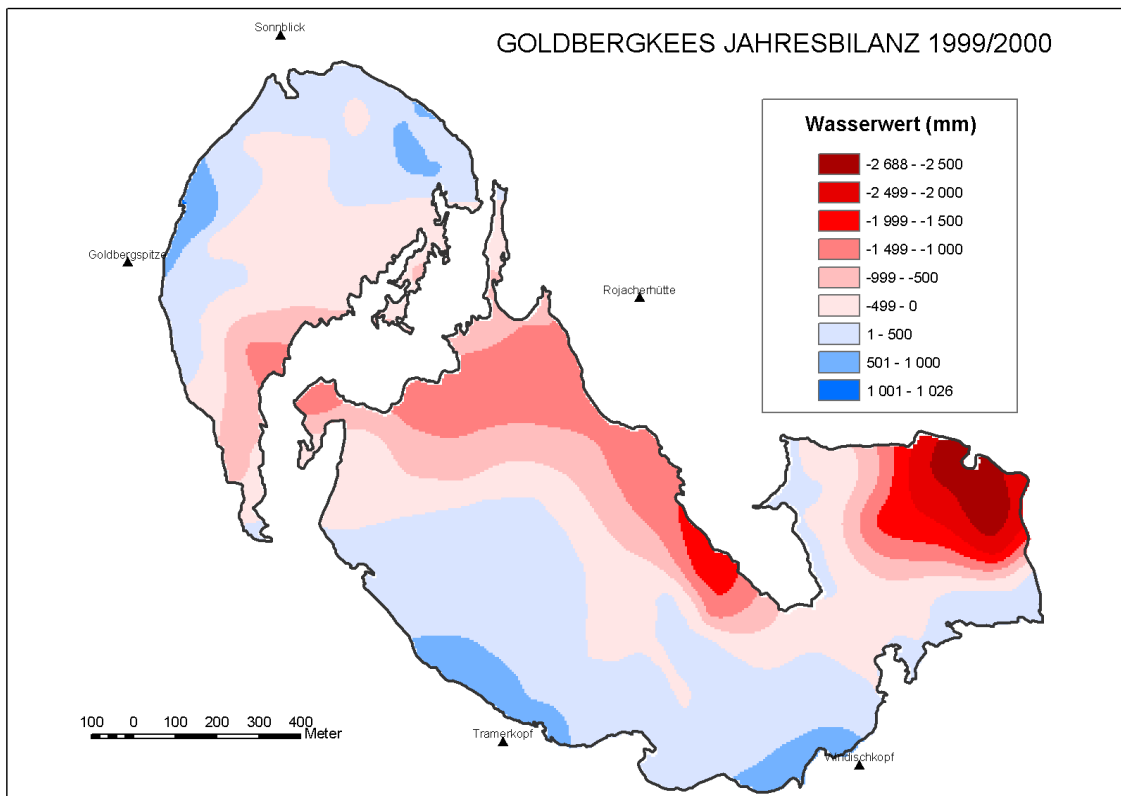
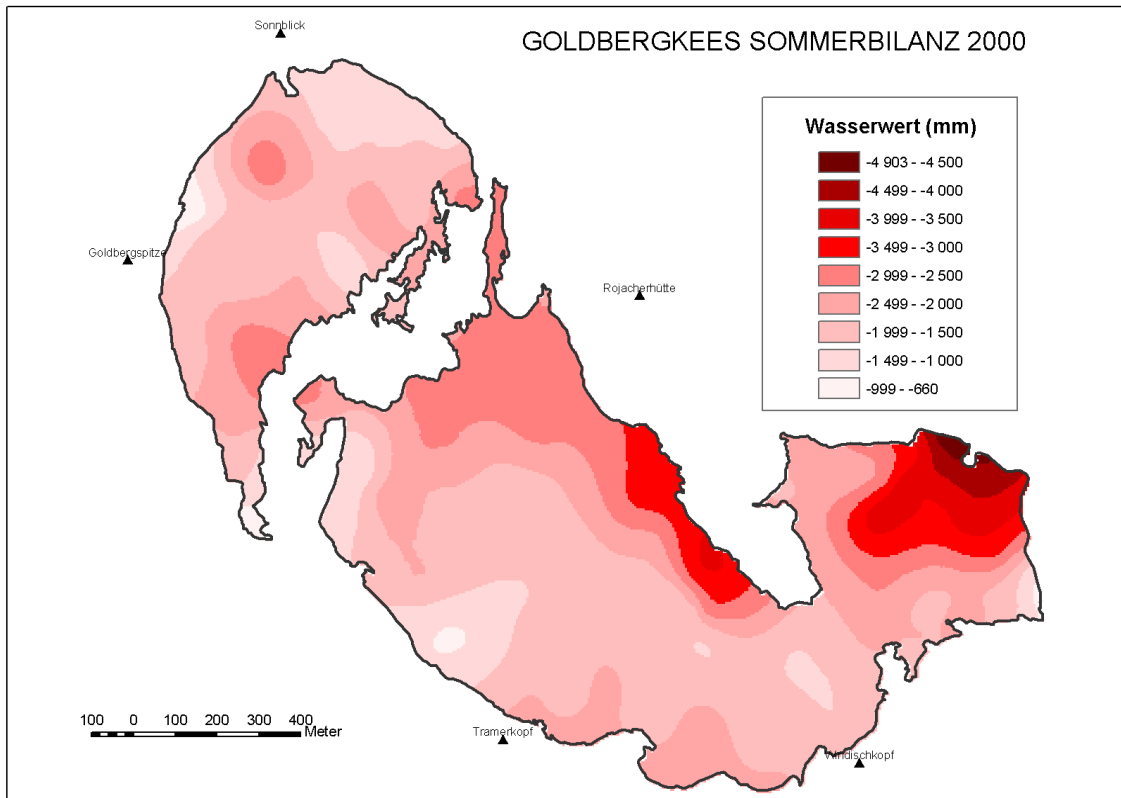


Abbildung 14: Sommerbilanz und der Jahresbilanz des Goldbergkees im Haushaltsjahr 1992/93 (aus Auer u.a. 2002)

5. ERGEBNISSE DER MASSEBILANZUNTERSUCHUNGEN IM SONNBLICKGEBIET

Wie bereits erwähnt werden die Massenbilanzmessungen auf dem Wurtenkees seit dem Haushaltsjahr 1982/83 auf dem Goldbergkees seit dem Haushaltsjahr 1986/87 und auf dem Kleinen Fleißkees seit dem Haushaltsjahr 1998/99 durchgeführt. Eine ausführliche Zusammenfassung der Ergebnisse für das Wurtenkees in der Periode 1982/82 bis 1992/93 findet sich in Auer u.a. (1995), für Wurtenkees und Goldbergkees in Auer u.a. (2002).

Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse aller Massenbilanzmessungen bis einschließlich des Haushaltsjahres 2000/01 getrennt nach Winterbilanz, Sommerbilanz und Jahresbilanz. Für das Wurtenkees kommt deutlich der fast ununterbrochene Massenverlust seit dem Beginn der Messungen zum Ausdruck. Deutlich positiver bilanzierte dagegen das Goldbergkees. Derzeit liegt noch keine detaillierte Arbeit zur Begründung dieser Massenbilanzunterschiede auf kleinstem Raum vor. Jedoch ist sicherlich die unterschiedliche Lage der beiden Gletscher zum Alpenhauptkamm (Wurtenkees südlich, Goldbergkees nördlich davon) eine wesentliche Ursache. Diese Lage bewirkt eine deutlich höhere Winterbilanz für das Goldbergkees aber auch eine erhöhte Akkumulation während der Sommerperiode. Dieser vermehrte Sommerniederschlag in Form von Schnee im Bereich des Goldbergkees bietet einen wesentlichen Schutz gegen die Hauptenergiequelle für die Ablation, die kurzweilige Strahlung (starke Albedoerhöhung durch weissen Schnee). Sehr deutlich wird die unterschiedliche Bilanzierung von Wurtenkees und Goldbergkees in Abbildung 16, in der die Jahreswerte der spezifischen Winter- und Sommerbilanz aufsummiert dargestellt sind. Für das Kleine Fleißkees können auf Grund der erst sehr kurzen Messperiode noch keine Angaben gemacht werden. Prinzipiell scheint dieser Gletscher ähnlich negativ wie das Wurtenkees zu bilanzieren. Auch das Kleine Fleißkees befindet sich südlich des Alpenhauptkammes.

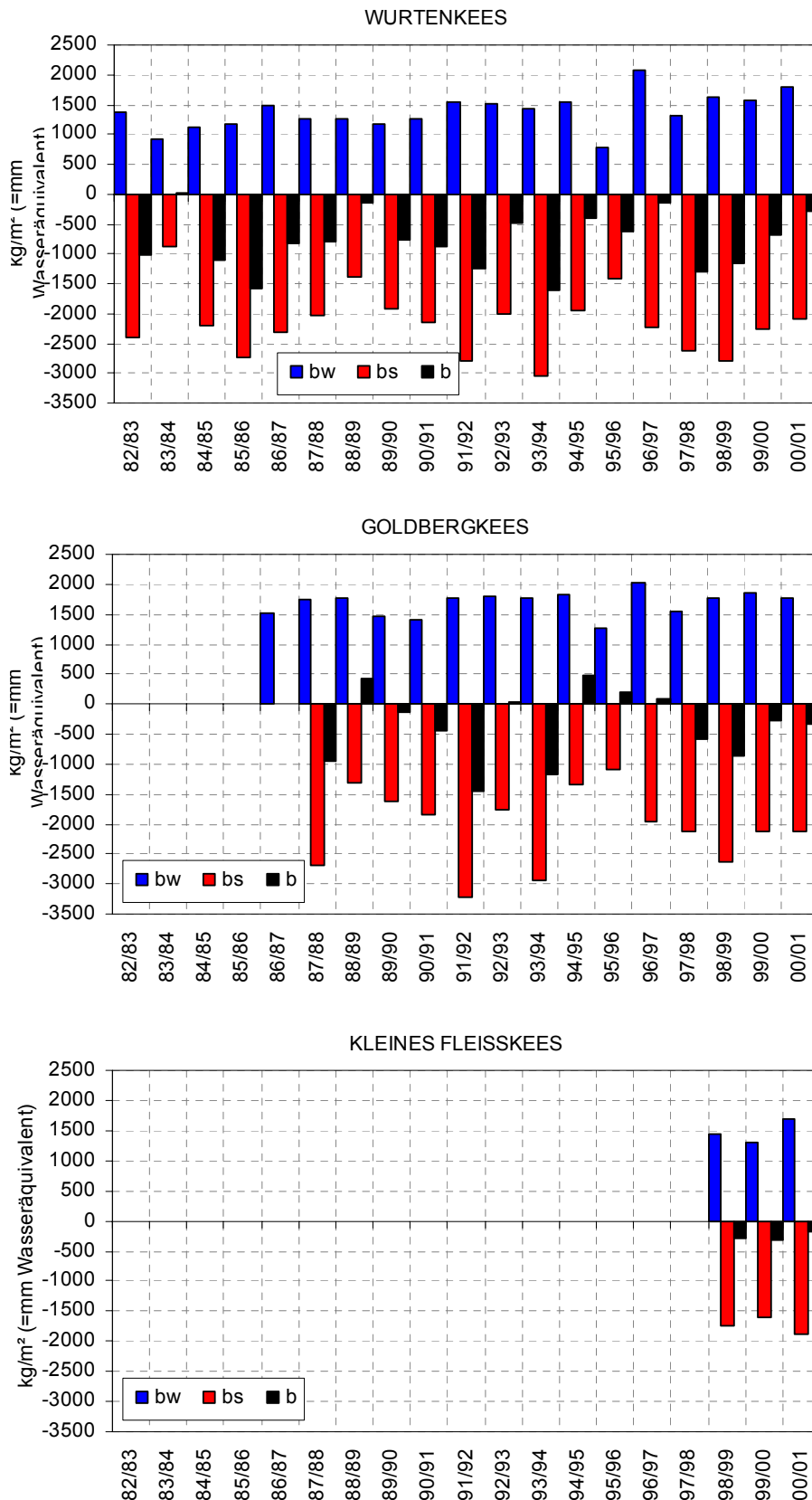


Abbildung 15: Zeitreihe der mittleren spezifischen Winter-, Sommer- und Jahresbilanz von Wurtenkees, Goldbergkees und Kleinem Fleißkees für die Periode 1982/83 bis 2000/01

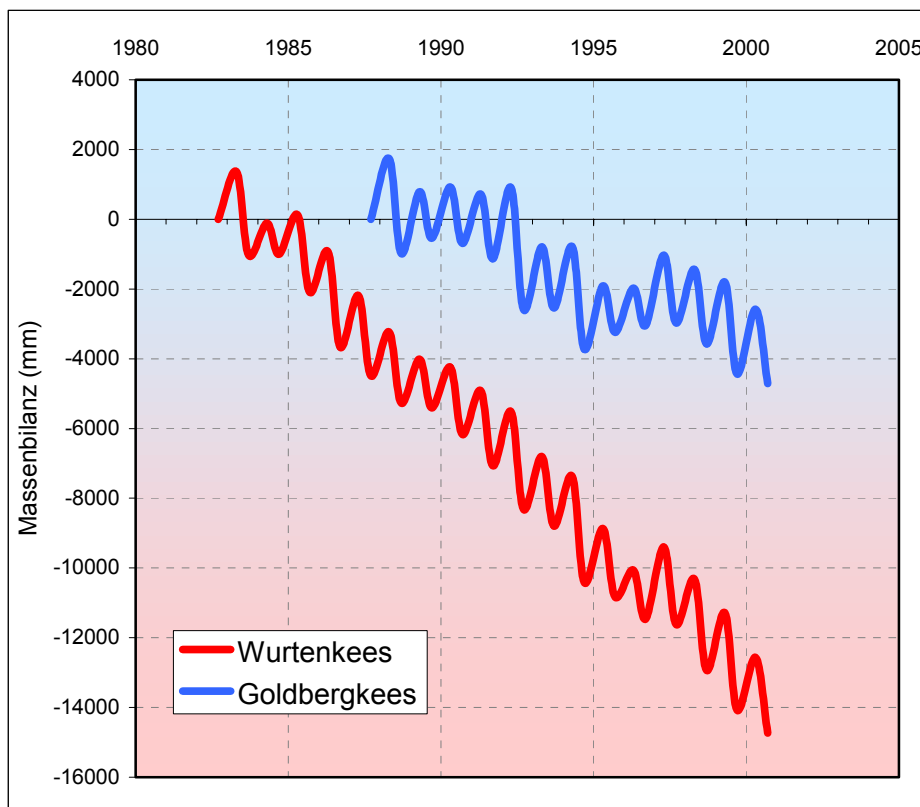


Abbildung 16: Kummulierte Massenbilanz (Winterbilanz und Sommerbilanz) von Wurtenkees und Goldbergkees

5. MASSEBILANZMESSUNGEN WELTWEIT

Die Stellung der beiden Gletscher des Sonnblickgebiets in Relation zu den anderen existierenden Massenbilanzreihen der Alpen, Skandinaviens, Nordamerikas und Asiens kann den Abbildungen 17 bis 20 entnommen werden. Dyurgerov (2002) führt in seiner umfassenden Gletscher-Datenbank 42 Gletscher mit längeren Zeitreihen direkt gemessener Massenbilanzen von frühestens 1946 (der ersten Massenbilanzierung durch Feldmessungen nach der direkten glaziologischen Methode auf dem Storglacieren in Schwedisch Lappland) bis 1999. In der Abbildung werden die kumulativen Reihen mit dem Bezugsjahr 1998 gezeigt, geordnet nach den vier erwähnten Großräumen und zusätzlich mit regionalen und sub-regionalen Mitteln.

In den Alpen reicht der Bogen von seit den 1950er Jahren weitestgehend ausgeglichen bilanzierenden Gletschern (Kesselwandferner, Silvrettagletscher) bis zu generell stark negativ bilanzierenden, wie der Careser Ferner und der Glacier de Sarnes, die seit den 1950er Jahren bis zu 30 m an Masse verloren haben. Seit dem Ende einer eher ausgeglichenen bis positiven Phase der Alpengletscher von 1965 bis 1980, herrscht

während der letzten beiden Jahrzehnte beinahe ununterbrochen Massenverlust. Die beiden Gletscher des Sonnblickgebietes bilden dabei einerseits die untere Grenze mit den geringsten Massenverlusten (Goldbergkees), andererseits liegen sie mit dem Wurtenkees im oberen, aber nicht im extremen Bereich mit stärkeren Massenverlusten. Eine Zusammenfassung in regionale Untergruppen in den Alpen ist nicht sinnvoll, da die Unterschiede bereits auf kleinstem Raum auftreten, wie etwa die konträren Paare Hintereisferner und Kesselwandferner bzw. Wurtenkees und Goldbergkees zeigen.

Grundlegend anders ist die Situation der Skandinavischen Gletscher. Es gibt drei deutlich trennbare regionale Untergruppen: Die polaren Gletscher Spitzbergens mit den stärksten Massenverlusten (die aber immer noch geringer sind, als die der meisten Alpengletscher); eine Gruppe von Gletschern im Lee des ersten Hauptkamms des kaledonischen Gebirges (von Südnorwegen bis Schwedisch Lappland) mit schwachem Rückgang bis 1970, dann ausgeglichener Bilanz und schwach positiver Bilanz in den 1990er Jahren, und die Gletscher der Westküste von Jostedal bis zum Svartisen, die generell positiv bilanzierten und zwar besonders stark positiv in den 1990er Jahren, wo in den Alpen besonders starker Gletscherrückgang herrscht. Diese Anomalie der Westnorwegischen Gletscher ist hauptsächlich auf die dort im Luv des Küstengebirges exorbitant gestiegenen Niederschläge (im Zuge einer leichten Nord-Verlagerung der Zugstrasse der Tiefdruckgebiete) zurückführbar, die sogar die auch in dieser Region angestiegenen Temperaturen überkompensiert.

Die Gletscher Nordamerikas (alle im Westen und Norden des Kontinents gelegen) zeigen generell eher negative Massenbilanzen, allerdings mit einer interessanten Umkehrung der Verhältnisse gegenüber denen Skandinaviens: Am ausgeglichensten bilanzierten die Gletscher in den Polargebieten der kanadischen Arktis, die stärksten Rückgänge wurden in der westlichsten Küstenregion des Grenzgebietes Kanada-USA beobachtet, die bezüglich geographischer Breite dazwischen liegenden Gletscher Alaskas nehmen eine Mittelstellung ein. Der eher kleine Blue Glacier (ebenfalls im westlichen Küstengebiet der Olympic Range) zeigt mit seiner insgesamt positiven Massenbilanzreihe, welche Überraschungen sich noch ergeben könnten, hätten wir eine größere Stichprobe als weltweit nur 46 Gletscher mit Massenbilanzreihen zur Verfügung.

Besonders schwach vertreten sind die Gletscher Asiens mit nur sechs Massenbilanzreihen vom Kaukasus bis zum Altai. Die vorhandene Stichprobe reicht von ausgeglichenen Bilanzreihen im Westen des Kontinents zu immer negativeren Reihen je weiter östlich die Gletscher liegen. Die gesamte Breite des Massenbilanzspektrums und auch die regionale Zuordnung ist durch die 6 Gletscher jedoch zweifellos nicht gegeben.

Generell zeigen die vorhandenen Massenbilanzreihen (von weltweit nur 46 Gletschern, keine Daten vor 1946, eine größere Anzahl an Reihen erst ab etwa 1960) keineswegs ein einheitliches Bild von allgemeinem Gletscherrückgang. Etwa ein Drittel dieser Stichprobe entspricht diesem Bild, der größere Teil bilanzierte in den letzten 4 bis 5

Dekaden nur schwach negativ bis ausgeglichen, und etwa 10 % zeigten zum Teil stark positive Massenbilanzreihen, die hauptsächlich an der Skandinavischen Westküste konzentriert sind. Die beiden unmittelbar benachbarten Gletscher im Sonnblickgebiet gehören sehr unterschiedlichen Kategorien an – das Wurtenkees eher zu den stärker zurückgehenden Gletschern, während das Goldbergkees zu der Klasse der ausgeglichener bilanzierenden Gletschern gehört. Die Lücken unseres Wissens über die Massenbilanz der Gletscher (die das Bindeglied zwischen Klima und Gletschern darstellt) sind jedoch noch groß. Die überwältigende Mehrzahl der Gletscher ist diesbezüglich unerforscht, und man kann hoffen, dass vor allem durch Remote-Sensing-Aktivitäten (wie durch den erwähnten ENVISAT) Teile dieser Wissenslücken geschlossen werden können. Die „ground-truth“ der arbeitsaufwendigen Feldarbeiten zur direkten Massenbilanzbestimmung wird dabei immer notwendig bleiben, in gewissen Regionen wahrscheinlich sogar in größerer Dichte als derzeit.

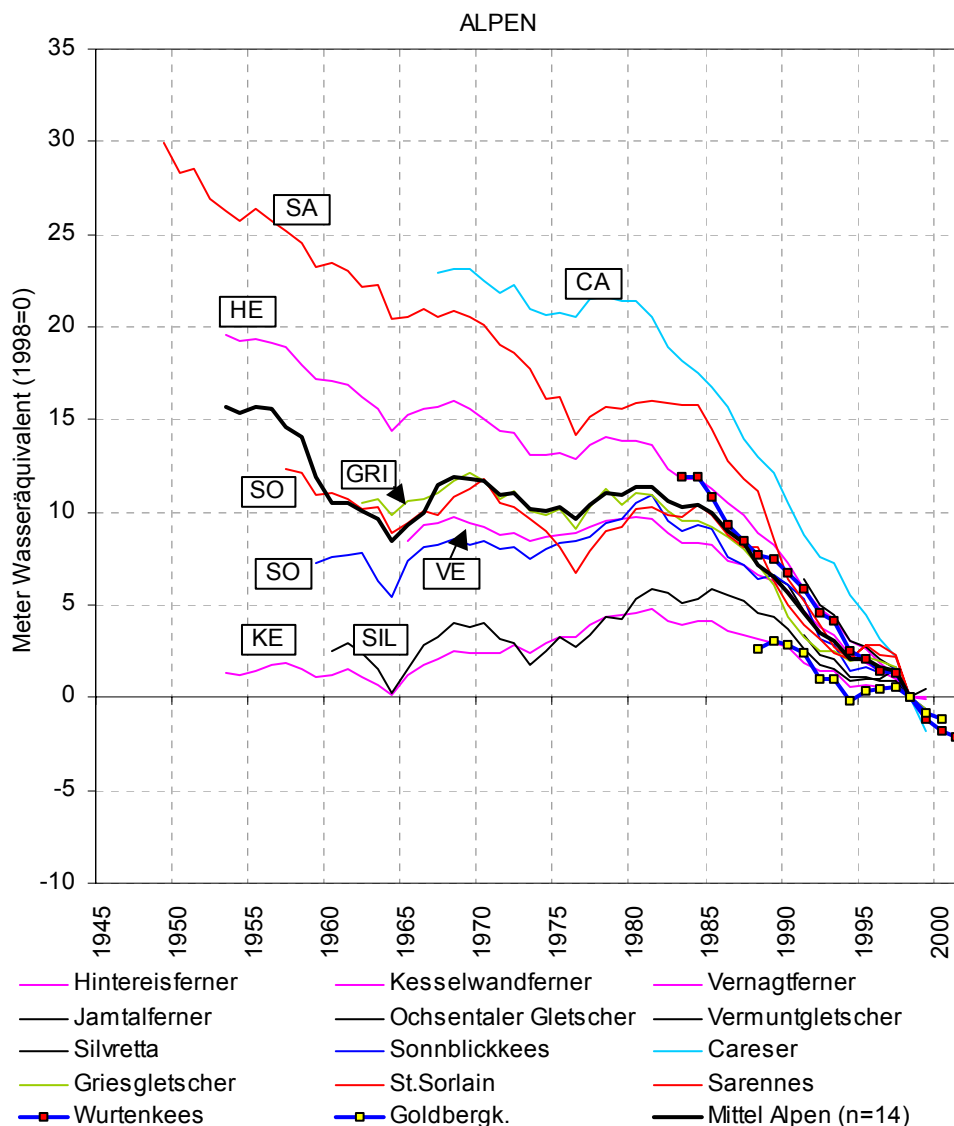


Abbildung 17: Kumulative Jahres-Massenbilanzen der Gletscher der Alpen, Skandinaviens, Nordamerikas und Asiens – alle Einzelgletscher mit längeren Zeitreihen, die derzeit noch gemessen werden sowie regionale Mittel

Farbgebung Alpen: Rot: Les Ecrins (F), grün: Zentralschweiz, hellblau: Ortler-Cevedale, blau: Hohe Tauern, schwarz: Silvretta, pink: Öztaler Alpen

Farbgebung Skandinavien: blau: Norwegen,-Westküste, grün: kontinentalere Lagen, pink: polar (Spitzbergen)

Farbgebung Nordamerika: blau: Cascade, Coastal and Olympic Range, orange: Can. Rockies, grün: Alaska <65N, pink: polar (75-79N)

Farbgebung Asien: blau: Kaukasus, grün: Pamir, Tien Shan west, orange: Altai, Tien Shan ost

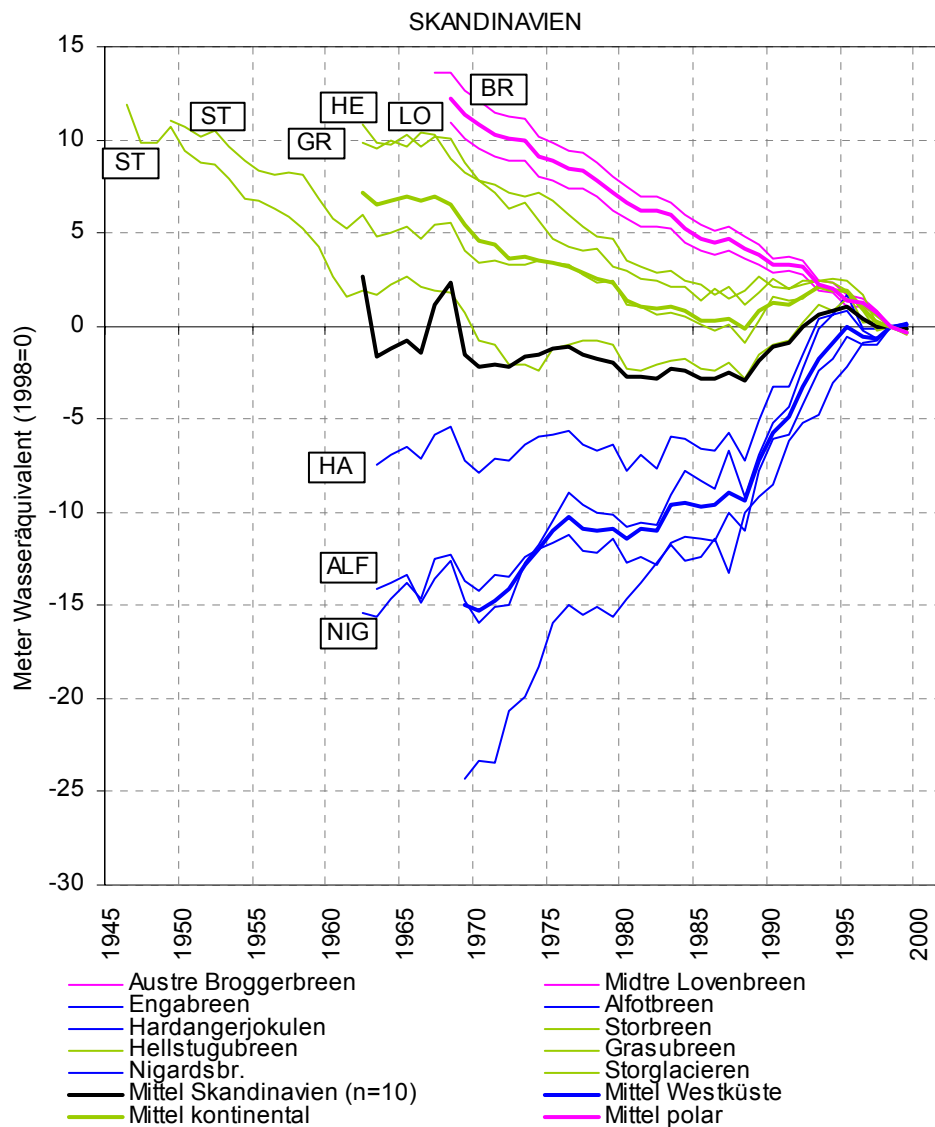


Abbildung 18: Kumulative Jahres-Massenbilanzen der Gletscher der Alpen, Skandinaviens, Nordamerikas und Asiens – alle Einzelgletscher mit längeren Zeitreihen, die derzeit noch gemessen werden sowie regionale Mittel

Farbgebung Alpen: Rot: Les Ecrins (F), grün: Zentralschweiz, hellblau: Ortler-Cevedale, blau: Hohe Tauern, schwarz: Silvretta, pink: Ötztaler Alpen

Farbgebung Skandinavien: blau: Norwegen,-Westküste, grün: kontinentalere Lagen, pink: polar (Spitzbergen)

Farbgebung Nordamerika: blau: Cascade, Coastal and Olympic Range, orange: Can. Rockies, grün: Alaska <65N, pink: polar (75-79N)

Farbgebung Asien: blau: Kaukasus, grün: Pamir, Tien Shan west, orange: Altai, Tien Shan ost

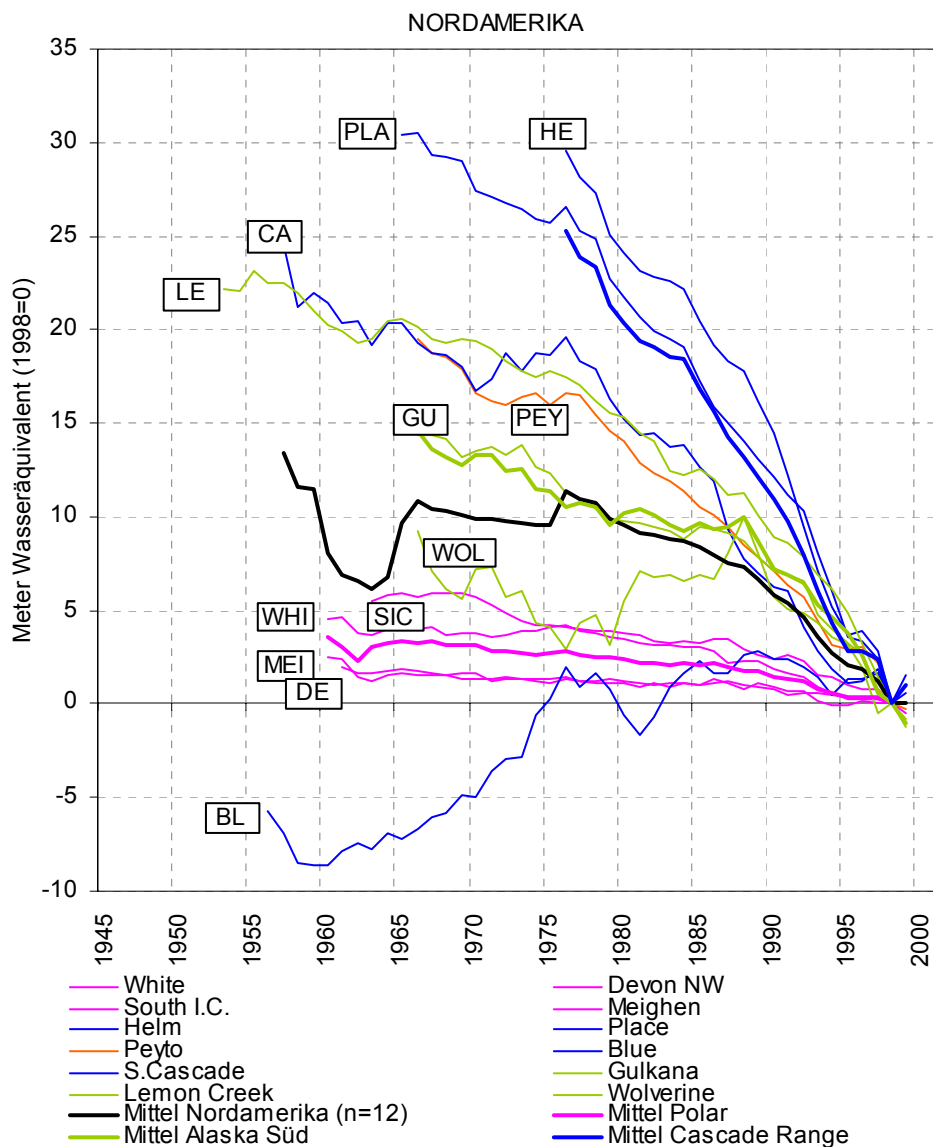


Abbildung 19: Kumulative Jahres-Massenbilanzen der Gletscher der Alpen, Skandinaviens, Nordamerikas und Asiens – alle Einzelgletscher mit längeren Zeitreihen, die derzeit noch gemessen werden sowie regionale Mittel
 Farbgebung Alpen: Rot: Les Ecrins (F), grün: Zentralschweiz, hellblau: Ortler-Cevedale, blau: Hohe Tauern, schwarz: Silvretta, pink: Ötztaler Alpen
 Farbgebung Skandinavien: blau: Norwegen,-Westküste, grün: kontinentalere Lagen, pink: polar (Spitzbergen)
 Farbgebung Nordamerika: blau: Cascade, Coastal and Olympic Range, orange: Can. Rockies, grün: Alaska <65N, pink: polar (75-79N)
 Farbgebung Asien: blau: Kaukasus, grün: Pamir, Tien Shan west, orange: Altai, Tien Shan ost

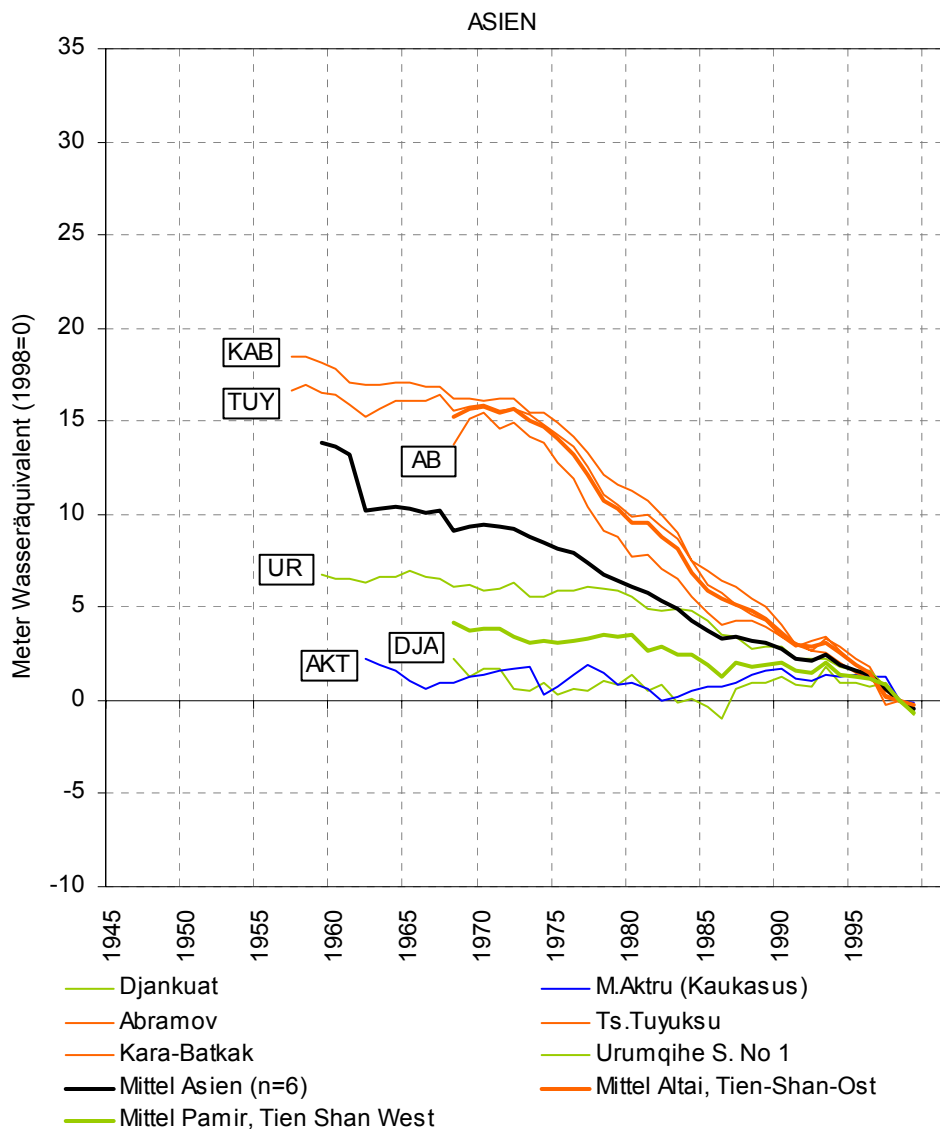


Abbildung 20: Kumulative Jahres-Massenbilanzen der Gletscher der Alpen, Skandinaviens, Nordamerikas und Asiens – alle Einzelgletscher mit längeren Zeitreihen, die derzeit noch gemessen werden sowie regionale Mittel

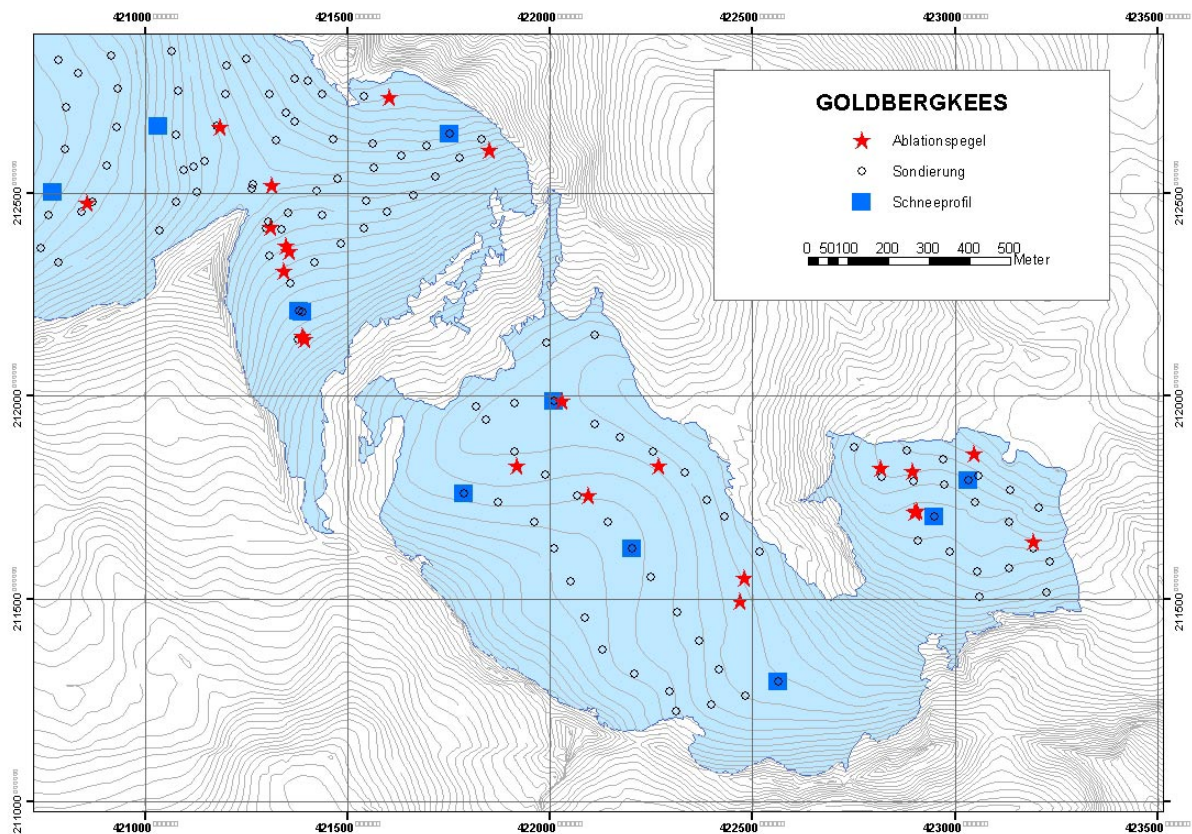
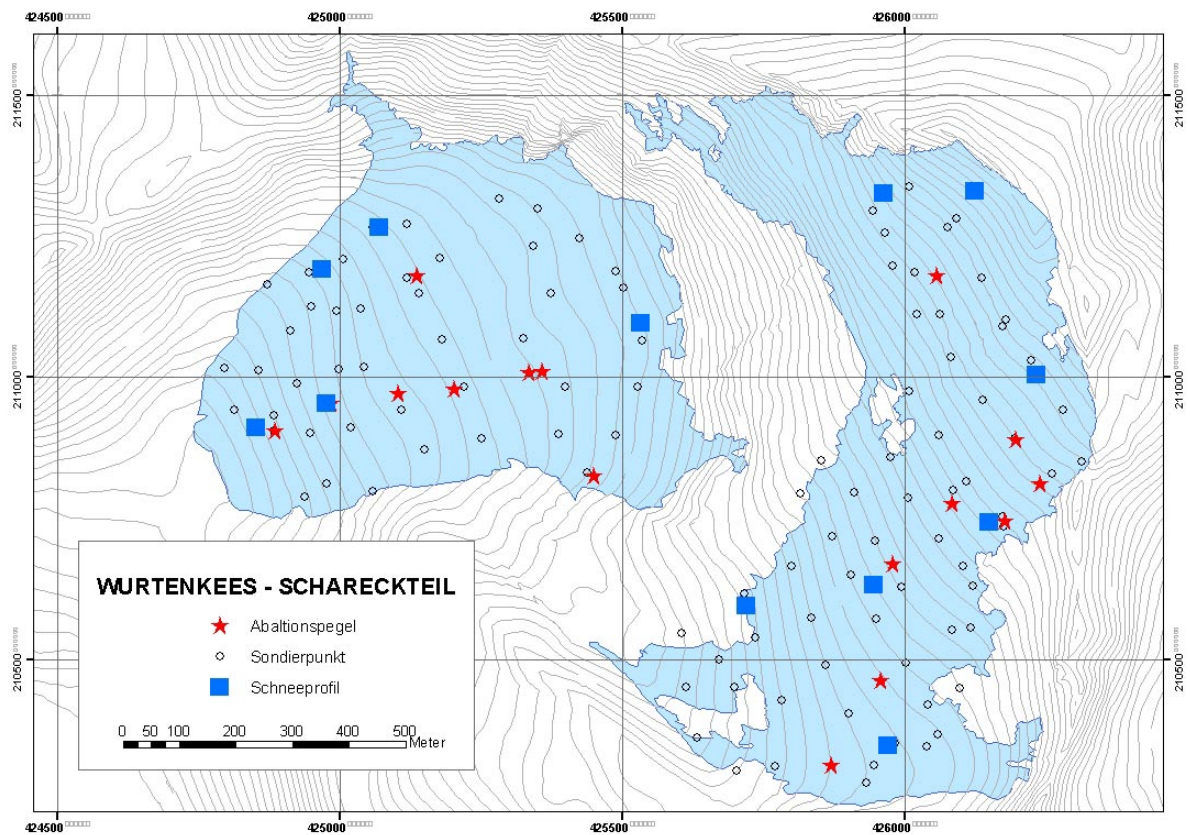
Farbgebung Alpen: Rot: Les Ecrins (F), grün: Zentralschweiz, hellblau: Ortler-Cevedale, blau: Hohe Tauern, schwarz: Silvretta, pink: Öztaler Alpen

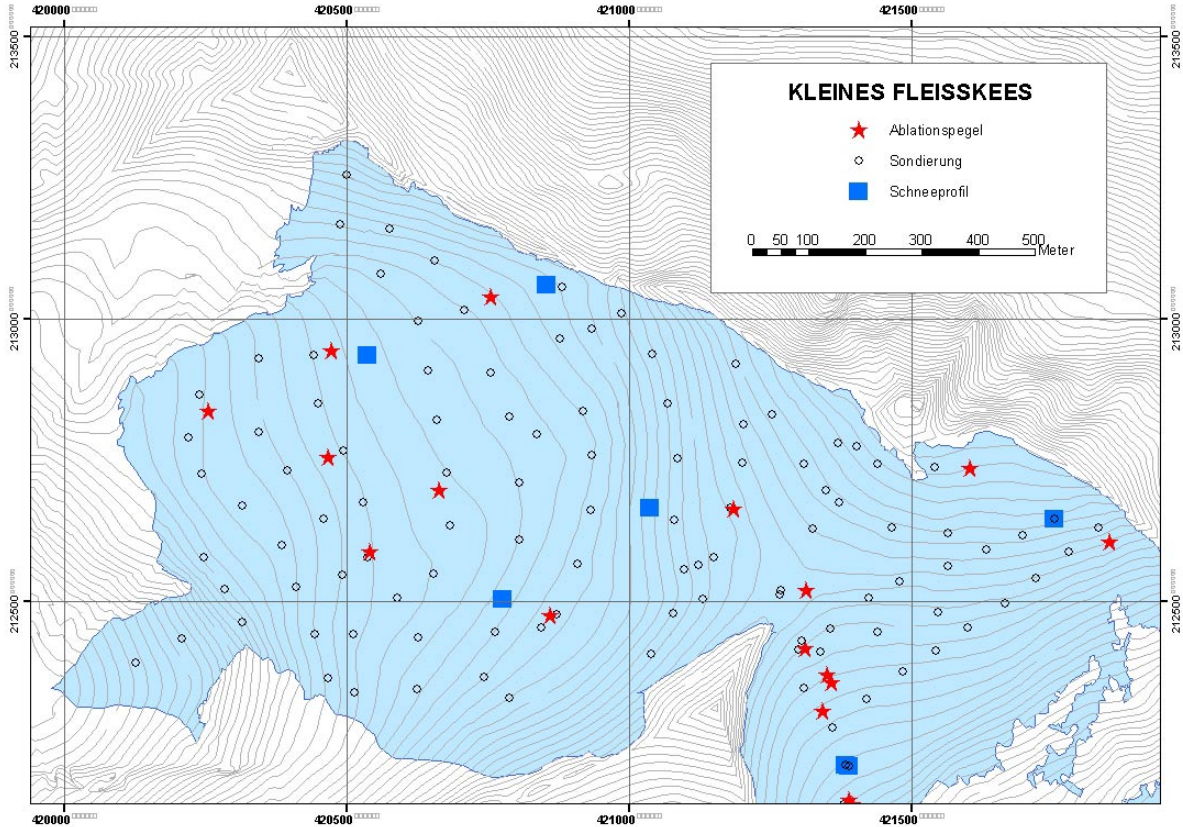
Farbgebung Skandinavien: blau: Norwegen,-Westküste, grün: kontinentalere Lagen, pink: polar (Spitzbergen)

Farbgebung Nordamerika: blau: Cascade, Coastal and Olympic Range, orange: Can. Rockies, grün: Alaska <65N, pink: polar (75-79N)

Farbgebung Asien: blau: Kaukasus, grün: Pamir, Tien Shan west, orange: Altai, Tien Shan ost

6. ANHANG: Glaziologisches Messnetz Wurtenkees, Goldbergkees und Kleines Fleißkees im Jahr 2000/01





7. LITERATUR

Auer I., Böhm R., Hammer N., Schöner W., Wiesinger T. und W. Winiwarter (1995): Glaziologische Untersuchungen im Sonnblickgebiet: Forschungsprogramm Wurtenkees (Glaciological Studies in the Region of Sonnblick (Austria): Research Programme Wurtenkees. Österreichische Beiträge zur Meteorologie und Geophysik, Heft 12.

Auer I., Böhm R., Leymüller M. und W. Schöner (2002): Das Klima des Sonnblicks – Klimaatlas und Klimatographie der GAW-Station Sonnblick einschließlich der umgebenden Gebirgsregion. Österreichische Beiträge zur Meteorologie und Geophysik, Heft 28.

Bindschadler Robert (1998): Monitoring ice sheet behaviour from space. *Reviews of Geophysics* 36,1, 79 – 104.

Ferguson S.A. (1992): *Glaciers of North America, A Field Guide*. Fulcrum Publishing, Colorado

Finsterwalder Ri. (1953): Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückganges an Ostalpengletscher. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, Bd. II, H 2, 189 - 239

Fountain A.G., Jansson P., Kaser G. and M. Dyurgerov (Eds.) (1999): Special Issue: Methods of Mass Balance Measurements and Modelling. Workshop on Methods of Mass Balance Measurements and Modelling. Tarfala, Sweden August 10-12 1998, *Geografiska Annaler Series A*, Vol. 81A, No. 4.

Haeberli W., M. Hoelzle and S. Suter (Eds) (1998): *Into the second century of worldwide glacier monitoring: prospects and strategies*. UNESCO Publishing, Paris, France.

Hammer N. (1993): Wurtenkees: Rekonstruktion einer 100 jährigen Reihe der Gletschermassenbilanz. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 29 H 1, 15-37

Hofmann W. (1962): Der Vorstoß des Nisqually-Gletschers am Mt. Rainier, USA, von 1952 bis 1956. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, Bd. IV(1961/62), Heft 1-2, 47 - 60

Hoinkes H. (1970): Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, Bd. 6, Heft 1 - 2, 37 - 89

IAHS(ICSU)-UNEP-UNESCO (2001): *Glacier Mass Balance Bulletin - Bulletin No. 5 (1998 - 1999)*. Edited by Wilfried Haeberli, R. Frauenfelder and M. Hoelzle, Zürich, Switzerland.

IAHS(ICSU)-UNEP-UNESCO (1999): *Glacier Mass Balance Bulletin - Bulletin No. 5 (1996 - 1997)*. Edited by Wilfried Haeberli, M. Hoelzle and R. Frauenfelder, Zürich, Switzerland.

IAHS(ICSU)-UNEP-UNESCO (1996): *Glacier Mass Balance Bulletin - Bulletin No. 4 (1994 - 1995)*. Edited by Wilfried Haeberli. Zürich, Switzerland.

IAHS(ICSU)-UNEP-UNESCO (1994): *Glacier Mass Balance Bulletin - Bulletin No. 3 (1992 - 1993)*. Edited by Wilfried Haeberli, Zürich, Switzerland.

IAHS(ICSU)-UNEP-UNESCO (1993): *Glacier Mass Balance Bulletin - Bulletin No. 2 (1990 - 1991)*. Edited by Wilfried Haeberli, Zürich, Switzerland.

IAHS(ICSU)-UNEP-UNESCO (1991): *Glacier Mass Balance Bulletin - Bulletin No. 1 (1988 - 1989)*. Edited by Wilfried Haeberli. Bulletin, Zürich, Switzerland.

Kaser G., Munari M., Noggler B., Oberschmied C. und P. Valentini (1995): Recherche sul bilancio di massa del Ghiacciaio di Fontana Bianca (Weissbrunnferner) nel gruppo Ortles-Cevedale. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 18, 277-280

Kuhn M., F. Obleitner, H. P. Nachtnebel, G. Reichel (1991): Hydrologie, Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt Österreichs. in: *Bestandsaufnahme, anthropogene*

Klimaänderung, mögliche Auswirkungen auf Österreich, mögliche Maßnahmen in Österreich, ÖAW 1991

Kuhn M. und A. Herrmann (1990): Schnee und Eis. Kapitel 9 in Hydrologie, Hrg. A. Baumgartner,

Kuhn M. (1984): Physikalische Grundlagen des Energie- und Massenhaushalts der Schneedecke. in: H. M. Brechtel (Hrg.) Schneehydrologische Forschung in Mitteleuropa, DVWK Mitteilungen 7, 5 - 56

Lang H. und G. Patzelt (1971): Die Volumenänderung des Hintereisferners (Ötztaler Alpen) im Vergleich zur Massenänderung im Zeitraum 1953-1964. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie Bd VII, Heft 1-2, 39 – 55.

Paterson W. S. B. (1994): Physics of Glaciers. 3rd Edition, Pergamon Press, Oxford

Reeh N. (1999): Mass balance of the Greenland ice sheet: Can modern observation methods reduce uncertainty? Geografiska Annaler Series A, Vol. 81 A, Number 4, 735 – 742.

Reinhardt W. und H. Rentsch (1986): Determination of Changes in Volume and Elevation of Glaciers using Digital Elevation Models for the Vernagtferner, Ötztal Alps, Austria. Annales of Glaciology 8, 151 - 155

Schöner W., Auer I., Böhm R., Hammer N. and T. Wiesinger (1997): Retreat of Wurtenkees since 1850. Annals of Glaciology Vol.24, 102 - 105.

Schöner W., I. Auer and R. Böhm. 2000. Klimaänderung und Gletscherverhalten in den Hohen Tauern. Salzburger Geographische Arbeiten, Heft 36, 97 - 114.

Schöner W., I. Auer and R. Böhm. 2000. Climate variability and glacier reaction in the Austrian eastern Alps. Annals of Glaciology, Vol. 31, 31 - 38.

Østrem G. and M. Brugman (1991): Glacier Mass-Balance Measurements, A Manual for Field and Office Work. National Hydrology Research Institute, Science Report No.4