

Vergleiche von Klimainformationen aus Gletschermassenbilanzmessungen an Punkt und Fläche

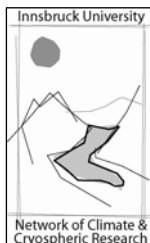
–
Auswertungen der Massenbilanzreihen von Hintereis-,
Weißbrunn- und Kesselwandferner und deren
Interpretation mit Hilfe von Klimadaten

Diplomarbeit

am Institut für Geographie
der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck

betreut von:
A. Univ. Prof. Dr. Georg Kaser

eingereicht von:
Rainer Prinz



Innsbruck, im August 2007

... für meine Eltern

ABSTRACT

A comparison between the mean specific mass balance (b_m) and the ice ablation on ablation stakes (b_{ia}) of three East Alpine glaciers (the Hintereis- and the Kesselwandferner in the Ötztal Alps and the Weißbrunnferner in the Ortler-Cevedale-Group) resulted in different qualities of an extracted climate signal.

For the last three decades the time series of b_m and b_{ia} demonstrate a continuous climate change which can be subdivided in three phases. In Phase I (before 1978) b_m values lie around zero. Hence the climate-glacier relationship is well-balanced. b_m and b_{ia} show the same signal. In Phase II (1979 - 1991) b_m and b_{ia} drop into negative values which correspond to increasing annual sums of positive degree days. Still, the different trends in b_m and b_{ia} indicate a diverse climatic signal which is due to the beginning shrinkage of the glacier surface extenuating b_m . In Phase III (1992 - 2005) the trends of b_m and b_{ia} are oppositional. While b_{ia} reflects the ongoing climate change, b_m is strongly influenced by a rapidly decreasing glacier surface (up to -18%) and single years of above-average winter accumulation.

Increasing ice ablation rates (up to 30%) and increasing length of the ice ablation season (earlier beginnings in spring but almost no extensions in autumn) signify the validity of b_{ia} . The earlier beginning of the ice ablation season was found to be due to increasing energy gains which is indicated by rising air temperatures in the months most responsible for snowmelt (May - July).

INHALTSVERZEICHNIS

Abstract.....	i
Inhaltsverzeichnis.....	ii
Abbildungsverzeichnis.....	iv
Tabellenverzeichnis.....	vii
Verzeichnis der häufig verwendeten Abkürzungen.....	ix
1 Motivation	- 1 -
2 Einleitung	- 2 -
3 Grundlagen der Massenbilanzmessung	- 3 -
3.1 Methoden der Massenbilanzmessung.....	- 3 -
3.2 Methodische Überlegungen zur glaziologischen Methode	- 4 -
3.3 Terminologie	- 8 -
3.4 Allgemeines.....	- 8 -
4 Ziel der Diplomarbeit	- 10 -
4.1 Hypothese.....	- 11 -
5 Einführung in die Untersuchungsgebiete.....	- 14 -
5.1 Der Weißbrunnferner (WBF)	- 15 -
5.2 Der Hintereisferner (HEF).....	- 18 -
5.3 Der Kesselwandferner (KWF)	- 20 -
6 Datengrundlagen.....	- 23 -
6.1 Auswahl der Ablationspegel	- 23 -
6.2 Massenbilanz- und Klimareihen	- 24 -
6.3 Überprüfung der Datensätze und Rekonstruktionen von fehlenden Daten	- 26 -
6.3.1 Überprüfung der Lufttemperatur in Weißbrunn	- 26 -
6.3.2 Rekonstruktion der Winterbilanzen am Ablationspegel L6	- 28 -
6.3.3 Lufttemperaturen in der Höhenlage der Ablationspegel.....	- 31 -
6.4 Zusammenfassender statistischer Überblick.....	- 32 -

7	Ergebnisse und Diskussion.....	- 37 -
7.1	Vergleiche der mittleren spezifischen Massenbilanzen und der Eisablation der Pegel auf HEF, WBF und KWF	- 37 -
7.2	Die Zeitreihen der mittleren spezifischen Massenbilanzen und der Eisablation an den Pegeln im Vergleich zu Temperatur und Niederschlag	- 42 -
7.3	Jährliche Eisablation an den Pegeln.....	- 47 -
7.3.1	Ablationsdauer und -raten.....	- 48 -
7.3.2	Höhere Winterniederschläge zur Kompensation des zunehmenden Energieeintrages?	- 54 -
7.4	Klimainformationen aus mittlerer spezifischer Massenbilanz und Eisablation eines Punktes im Ablationsgebiet	- 54 -
8	Zusammenfassung	- 57 -
9	Literaturverzeichnis	- 58 -
	Anhang A	- 63 -
	Anhang B	- 96 -
	Dank	- 101 -
	Curriculum vitae	- 102 -

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Schematische Darstellung von VBP und ELA (Kaser et al. 2002).....	- 6 -
Abb. 2: Das VBP des WBF 1991/92 bis 2002/03.	- 6 -
Abb. 3: Die Beziehung von AAR zu b_m am HEF (Kuhn et al. 1999).....	- 7 -
Abb. 4: Die Beziehung von ELA zu b_m am HEF (Kuhn et al. 1999).	- 7 -
Abb. 5: Skizze zur Unterscheidung der mittleren spezifischen Massenbilanz (b_m) von der Pegelbilanz (b_i). Während die Ermittlung von b_m über die Gletscherfläche interpolierte Messwerte von Ablationspegeln und Schneesächten erfolgt, stellt b_i eine Punktmessung dar.....	- 8 -
Abb. 6: Skizze der saisonalen Entwicklung der Gletscheroberfläche an einem Ablationspegel. Zwei Verschiebungsmöglichkeiten zwischen HHJ und NHJ sind in a) und b) dargestellt (eigener Entwurf nach Kaser et al. 2002). ...	- 9 -
Abb. 7: Schematisierte Antwort der mittleren spezifischen Massenbilanz (b_m) und der Punktmassenbilanz (b_i) auf einen plötzlichen, stufenförmigen Wechsel im Klima (eigener Entwurf nach Oerlemans 2001).	- 13 -
Abb. 8: Schematisierte Antworten der mittleren spezifischen Massenbilanzen (b_m) unterschiedlich schnell reagierender Gletscher auf einen kontinuierlichen Klimawandel im Vergleich zur Massenbilanz eines Punktes (b_i) im Ablationsgebiet.	- 13 -
Abb. 9: Lage der in der Arbeit behandelten Klimastationen und Gletscher. Quelle: IGI, Tirol Atlas.	- 14 -
Abb. 10: Der WBF an der Ostflanke der Hinteren Eggenspitze (3443 m; links). Quelle: Rainer Prinz, 18.07.2006.....	- 15 -
Abb. 11: WBF Übersichtskarte. Quelle: IGI. Stand 2003.	- 16 -
Abb. 12: Die saisonalen Massenbilanzen am WBF.	- 17 -
Abb. 13: Die kumulative Massenbilanz am WBF. (Der Wert für das Jahr 1992 schließt bei der Summe von 1988 an).....	- 17 -
Abb. 14: Vom Gipfel der Weißkugel (3738 m) erstreckt sich der HEF mit seiner langen Zunge ins Rofental. Quelle: IMGI, 12.09.2005.....	- 19 -
Abb. 15: HEF Übersichtskarte. Quelle: IMGI. Stand 2003.	- 19 -
Abb. 16: Die mittleren spezifischen Massenbilanzen des HEF und KWF.	- 21 -
Abb. 17: Die kumulativen Massenbilanzen des HEF und KWF.....	- 21 -
Abb. 18: Der KWF mit seinem Firnbecken im Sommer 2006. Am rechten oberen Bildrand ist der Fluchtkogel (3497 m) zu erkennen. Quelle: IMGI.	- 22 -

Abb. 19: Topographie und Lagebeziehung HEF und KWF. Quelle: IMGI. Stand 2003.	- 22 -
Abb. 20: Die mittleren Lufttemperaturen im Sommer (VI - VIII) der im Text angeführten Stationen im und um das Ultental. Lage der Stationen siehe Abb. 21.....	- 27 -
Abb. 21: Lage der verwendeten Klimastationen zur Überprüfung der Lufttemperatur in Weißbrunn. Quelle: IGI, Tirol Atlas.	- 27 -
Abb. 22: Korrelation des Winterniederschlages (X - V) in Vent mit dem Verhältnis aus Schneehöhe bei Pegel L6 zum Winterniederschlag (X - V) in Vent für die Jahre 1993 - 2005.....	- 30 -
Abb. 23: Korrelation der gemessenen Werte der Schneehöhe von Bortenschlager (2006) mit den aus Niederschlagsdaten von Vent rekonstruierten Schneehöhen jeweils bei L6. Die Spreizung der Werte (um 700 und 1300 mm) wird hier ersichtlich.	- 30 -
Abb. 24: Mittlere spezifische Massenbilanz (b_m) und kumulative Massenbilanz (b_{kum}) am HEF und WBF. Der Beginn der Kurve von b_{kum} am WBF wurde aus ästhetischen Gründen bei -11500 mm we angesetzt und schließt 1992 bei der Summe von 1988 an.	- 39 -
Abb. 25: Standardisierte Abweichung der mittleren spezifischen Massenbilanz (b_m) bzw. der Eisablation an den Pegeln (b_{ia}) vom Mittelwert der entsprechenden Reihe.	- 39 -
Abb. 26: AAR der betreffenden Gletscher.	- 40 -
Abb. 27: Höhenlage der Gleichgewichtslinien der genannten Gletscher. In den Jahren in denen die Grafik keine ELA zeigt (HEF: 2003, WBF: 1992 - 2000 und 2003 - 2005), liegt sie über dem höchsten Punkt des Gletschers.	- 40 -
Abb. 28: Gewichtete (0,25 - 0,5 - 0,25) gleitende Mittel (3 Jahre übergreifend) der Eisablation an den Pegeln (b_{ia}) und der mittleren spezifischen Massenbilanz der Gletscher (b_m).....	- 41 -
Abb. 29: Gewichtete (0,25 - 0,5 - 0,25) gleitende Mittel (3 Jahre übergreifend) der mittleren spezifischen Massenbilanzen der Gletscher (b_m), der Eisablation der Pegel (b_{ia}), der jährlichen Temperatursummen positiver Gradtage (ΣT^+) und der Winterniederschlagssummen (NS) von Oktober bis Mai (X-V) - in die einzelnen Phasen (I, II, III) gegliedert.....	- 45 -
Abb. 30: Schematisierte Antworten der mittleren spezifischen Massenbilanzen (b_m) unterschiedlich schnell reagierender Gletscher auf einen kontinuierlichen Klimawandel im Vergleich zur Massenbilanz eines	

Punktes (b _i) im Ablationsgebiet (entspricht Abb. 8). Zusätzlich sind die im Text erklärten Phasen (I - III) eingetragen. In Kombination mit Abb. 29 gilt diese Hypothese für die angegebenen Gletscher als verifiziert.....	- 46 -
Abb. 31: Verlauf der Eisablation am Pegel L6 während der Ablationsperiode 1981. Die Punkte zeigen den jeweiligen Zeitpunkt der Begehungen. t ₀ und t ₁ werden im Text erklärt.	- 49 -
Abb. 32: Verlauf der Eisablation an den Pegeln L6 und P10 während der Ablationsperiode 1994. Die Punkte zeigen den jeweiligen Zeitpunkt der Begehungen, die schwarzen Linien die Extrapolation zur Bestimmung des Einsetzens der Eisablation.	- 50 -
Abb. 33: Mittelwerte der Perioden II und III der Schnee- und Eisablationsraten bei Pegel L6, sowie mittlerer Beginn und Ende jener.....	- 52 -
Abb. 34: Verlauf des Mittelwertes der Lufttemperatur der Monate Mai - Juli (V-VII) in Vent.....	- 53 -

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Die Maßzahlen für die ausgewählten Pegel im Überblick.	- 24 -
Tab. 2: Zeitraum der Massenbilanzmessungen (b_m sowie b_i) der entsprechenden Gletscher und Pegel.	- 25 -
Tab. 3: Zeitraum der zur Verfügung stehenden Klimadaten.	- 25 -
Tab. 4: Auflistung des Winterniederschlages in Vent, der Schneehöhen bei Pegel L6 nach Bortenschlager (2006), des Umrechnungsfaktors Winterniederschlag - Schneehöhe und der rekonstruierten Schneehöhe.	- 29 -
Tab. 5: Charakteristische Messwerte an den Ablationspegeln und Klimastationen: Eisablation (b_{ia}), Pegelbilanzen im HHJ (b_i) und der entsprechenden Halbjahre (b_{iw} , b_{is}), Winterniederschlagssummen in den Monaten Oktober bis Mai (X-V) und Temperatursummen der positiven Gradtage pro Jahr ($\Sigma T+$) in der Seehöhe der Ablationspegel.	- 33 -
Tab. 6: Mittlere spezifische Massenbilanzen [mm we] des HEF, WBF und KWF nach HHJ (b_m) und entsprechenden Halbjahren (b_{mW} bzw. b_{mS}).....	- 34 -
Tab. 7: Jahresmittel der Lufttemperatur (T), Niederschlagssumme in den Wintermonaten Oktober bis Mai (NS (XV)) und im HHJ (NS (HHJ)) der Klimastationen und Temperatursumme der positiven Gradtage pro Jahr ($\Sigma T+$) in der Seehöhe der Ablationspegel.	- 35 -
Tab. 8: Überblick der Korrelationen der einzelnen Massenbilanzdaten. Mittlere spezifische Massenbilanz (b_m), Eisablation an den Pegeln (b_{ia}) und Pegelbilanz (b_i).	- 36 -
Tab. 9: Erklärte Varianzen der Eisablation am Pegel (b_{ia}), der Pegelbilanz (b_i) sowie der saisonalen Pegelbilanzen (b_{iw} , b_{is}) zur Winterniederschlagssumme der Monate Oktober bis Mai (X-V) und zur Temperatursumme der positiven Gradtage pro Jahr in der Seehöhe des Ablationspegels ($\Sigma T+$).	- 36 -
Tab. 10: Erklärte Varianzen von saisonalen mittleren spezifischen Massenbilanzen (b_m , b_{mW} bzw. b_{mS}), Eisablation an den Pegeln (b_{ia}) und Pegelbilanz (b_i , b_{iw} bzw. b_{is}).	- 36 -
Tab. 11: Höhenlage der Gleichgewichtslinie und AAR im Mittel der drei Phasen.	- 40 -
Tab. 12: Mittelwerte der Temperatursummen positiver Gradtage pro Jahr ($\Sigma T+$), der Winterniederschlagssummen in den Monaten Oktober bis Mai (NS (X-V)), der mittleren spezifischen Massenbilanzen (b_m), der Eisablation (b_{ia})	

und der Winterbilanzen (b_{iw}) an den Pegeln in den einzelnen Perioden sowie die absoluten und relativen Differenzen (Δ) zur vorhergehenden Periode.....	- 44 -
Tab. 13: Beginn, Ende, Dauer, Menge und Rate der Schnee- und Eisablation an den Pegeln.....	- 51 -
Tab. 14: Flächenveränderungen (Δ) der jeweiligen Gletscher absolut und relativ.	- 55 -

VERZEICHNIS DER HÄUFIG VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN

AAR	accumulation area ratio (Verhältnis der Akkumulationsfläche zur Gesamtgletscherfläche)
B	(Gesamt)Massenbilanz eines Gletschers [$\text{m}^3 \text{we}$]
b_i	Massenbilanz eines Punktes, Pegelbilanz [mm we]
b_{ia}	Eisablation an einem Punkt bzw. Ablationspegel [mm we]
b_{is}	Sommermassenbilanz eines Punktes [mm we]
b_{iw}	Wintermassenbilanz eines Punktes [mm we]
b_m	mittlere spezifische Massenbilanz [mm we]
b_s	mittlere spezifische Sommermassenbilanz [mm we]
b_w	mittlere spezifische Wintermassenbilanz [mm we]
ELA	equilibrium line altitude (Höhenlage der Gleichgewichtslinie)
HAB	Hydrographisches Amt der Provinz Bozen – Südtirol
HEF	Hintereisferner
HHJ	hydrologisches Haushaltsjahr
ie	Eisäquivalent
IGI	Institut für Geographie der Universität Innsbruck
IMGI	Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck
KWF	Kesselwandferner
NHJ	natürliches Haushaltsjahr
NS	Niederschlagssumme [mm]
T	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$], in dieser Arbeit meist Tagesmitteltemperatur
$\sum T^+$	Temperatursumme der positiven Gradtage [$^{\circ}\text{C}$]
VBP	vertikales Bilanzprofil
WBF	Weißbrunnferner
we	Wasseräquivalent
X - V	Zeitraum in Monaten z. B. Oktober bis Mai

1 Motivation

„Das Naturschauspiel Gletscher hat die Menschen der Alpen und außerhalb der Alpen in allen Erdteilen fasziniert. Das geheimnisvolle Wachsen und Zurückweichen konnte nicht erklärt werden. Schreckliche Ereignisse kündeten davon, dass die Gletscher über Almen und Dörfer gefahren sind, dass sie große Eismassen gebildet haben, dass es große Überschwemmungen und Eislawinen gegeben hat. In den letzten Monaten und Jahren gingen Berichte von abstürzenden Eismassen durch die Weltpresse, am Mont Blanc und in Südamerika. Bergsteiger kamen zu Tode. Das eigentlich Selbstverständliche der Naturereignisse wird jetzt zum dramatischen Kuriosum. Das kennen die Einheimischen in einigen Bergtälern der Alpen seit Jahrhunderten, ja seit Jahrtausenden.“ (Haid 2004)

Schon in der Kindheit wurde mir die Liebe zu den Bergen in die Wiege gelegt. Die wertvollen Kenntnisse, Erfahrungen und Eindrücke, die ich im Bergsteigen gewonnen hatte, konnte ich auch im Laufe des Geographiestudiums einsetzen. Georg Kaser warb mich als „Gletscherknecht“ an und lehrte mich an den Südtiroler Gletschern Weißbrunn- und Langenferner Massenhaushaltsmessungen durchzuführen. Eine Auswertung einiger der vielen verschiedenen gesammelten Daten in Form einer Diplomarbeit ist nun die logische Konsequenz; ein weiteres kleines Puzzlestück zum näheren Verständnis des oben erwähnten Naturschauspieles, vor allem in Zeiten erhöhter Medienpräsenz des „ewigen Eises“.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich im Wesentlichen auf drei Gletscher der Ostalpen, deren Ausdehnung und jährliche Volumenschwankungen seit Jahren und Jahrzehnten beobachtet werden.

Im Rofental der Öztaler Alpen liegen der Hintereis- und der Kesselwandferner, auf denen bereits seit 1952 bzw. 1965 die Massenbilanz bestimmt wird. Seit 1991 werden Massenhaushaltsmessungen am Weißbrunnferner im Ultental in der Ortlergruppe durchgeführt.

Alle Messdaten dieser Gletscher sind über das Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck und über das Institut für Geographie der Universität Innsbruck zugänglich.

2 Einleitung

Die vergletscherten Regionen der Erde zeigen augenscheinlich die Auswirkungen von Klimaschwankungen durch Wachstum und Rückzug der Eismassen. Zur Quantifizierung dieses Wachstums und Schrumpfens von Gletschern dient die Massenbilanzierung. Die Massenbilanz eines Gletschers, die Massengewinn und -verlust von Schnee und Eis bezogen auf die Gletscherfläche innerhalb eines (hydrologischen) Jahres gegenübergestellt, wird direkt vom Klima beeinflusst. In den Alpen wird der hydrologische Zyklus durch den Jahresgang der Lufttemperatur bestimmt und gliedert sich in Saisonen mit vorherrschendem Massengewinn (Akkumulation) im Winter und vorherrschendem Massenverlust (Ablation) im Sommer. Ein Klimawandel wird Änderungen in der Menge der Akkumulation und der Ablation sowie in der Länge der Saisonen der Massenänderung bewirken. Folglich wird der Gletscher seine Ausdehnung an die geänderten klimatischen Verhältnisse anpassen, sodass seine als Bilanz formulierte Massenänderung Null ergibt. Allerdings wird ein statisches Gleichgewicht aufgrund von Schwankungen in der Variabilität des Klimas und verzögerten Reaktionszeiten des Gletschers nie erreicht. Die Änderungen in der Gletscherausdehnung hinken den Klimaschwankungen je nach Lage, Größe und Topographie des Gletschers um Jahre bis Jahrhunderte hinterher (vgl. IPCC 2007).

Die Analysen von Messreihen von Massenbilanzdaten und deren Diskussion anhand von Klimadaten geben qualitativ und quantitativ Einblicke in die Auswirkungen des Klimas auf einen Gletscher, die je nach Betrachtungsmaßstab und zur Verfügung stehender Datenqualität in entsprechender Weise räumlich und zeitlich aufgelöst werden können. Die vorliegende Arbeit untersucht qualitativ die Beziehungen zwischen den klimatischen Bedingungen der letzten dreieinhalb Jahrzehnte und der Massenbilanz dreier Ostalpengletscher (Hintereis-, Weißbrunn- und Kesselwandferner) einerseits, sowie der Eisablation an nur einem ausgewählten Punkt der beiden erstgenannten Gletscher andererseits.

Kapitel 3 gibt eine kurze terminologische Einführung zu unterschiedlichen Massenbilanzbegriffen und erklärt die Messung dieser Bilanzen an sich. Kapitel 4 präzisiert das zentrale Thema der Arbeit anhand einer Hypothese und definiert die zu erreichenden Ziele. Kapitel 5 zeigt die Lage der in der Arbeit behandelten Gletscher. Kapitel 6 listet inklusive der Beschreibung diverser Messprobleme und Überbrückungen von Datenlücken die vorhandenen Messdaten auf, die in Kapitel 7 interpretiert und diskutiert werden.

3 Grundlagen der Massenbilanzmessung

3.1 Methoden der Massenbilanzmessung

Nach Hoinkes (1970) gibt es drei Methoden der Massenbilanzierung:

Die *hydrologische Methode* sieht die Massenänderung (B) eines Gletschers als ein Speicherglied der hydrologischen Haushaltsgleichung.

$$B = P - Q - E \pm \Delta S \quad [m^3 \text{ oder } kg] \quad (1)$$

Die Massenänderung (B) berechnet sich demnach aus dem Niederschlag (P) abzüglich des Abflusses (Q), der Verdunstung (E) und Änderungen anderer Speicher (ΔS) wie Grundwasser oder Interzeption im Einzugsgebiet. Diese Methode lässt sich gut auf große Einzugsgebiete anwenden, hat aber in den relativ großen Fehlern einzelner Terme ihre Schwächen.

Die *geodätische Methode* bedient sich exakter Abbildungen von Gletschern. Der Vergleich von Karten oder Photographien unterschiedlicher Aufnahmedaten lässt genaue Aussagen über Volumensänderungen zu. Aufgrund der Schwierigkeiten und der hohen Kosten der Kartenaufnahme im Hochgebirge umfassen Massenhaushaltsanalysen auf Basis der geodätischen Methode oft mehrere Haushaltsjahre und -jahrzehnte. Heute erhält diese Methode durch neue Fernerkundungstechniken, vor allem durch Laserscanning, neue Impulse. Schwierigkeiten bestehen in der Parametrisierung von Dichtewerten für bestimmte Areale (Schnee, Altschnee, Firn, Eis), um die gemessenen Volumensänderung in Massenänderungen zu konvertieren (Geist 2005).

Die *glaziologische Methode* ermittelt die Massenbilanz (B) aus der Summe von positiven Werten der Akkumulation (C) und negativen Werten der Ablation (A).

$$B = C + A \quad [kg \text{ oder } m^3 \text{ we}] \quad (2)$$

Die Messdaten werden direkt an der Gletscheroberfläche gewonnen. Dabei gelten alle Vorgänge des Massenzuwachses (Ablagerung von Festniederschlag, Frieren von Regen, Re-Sublimation, Winddrift und Lawinen) als Akkumulation und alle Prozesse

des Massenverlustes (Schmelze und Abfluss, Sublimation, Erosion durch Wind, Lawinen, Wasser und Kalbung) als Ablation.

Die Messung der Akkumulation erfolgt im Wesentlichen aus Schneehöhensondierungen verteilt über die Gletscherfläche und Schneedichtemessungen in Schneeschächten. Ablationswerte werden durch Ablesen von ins Eis gebohrten Pegelstangen (Ablationspegel; kurz Pegel genannt) gewonnen. Die Übertragung dieser punktuellen Messungen der Höhenänderung der Gletscheroberfläche auf die Gletscherfläche erfolgt meist händisch in Übereinstimmung mit der Topographie und den gletscherspezifischen Rückhalte- und Schmelzmustern.

3.2 Methodische Überlegungen zur glaziologischen Methode

Die systematische Vorgangsweise zur Bestimmung der Massenbilanz eines Gletschers mit der glaziologischen Methode fassen Kaser et al. (2002) wie folgt zusammen:

Die Höhenänderung der Gletscheroberfläche mit der Zeit (\dot{h}) wird unter Beachtung des Prinzips der Massenerhaltung durch die Massenbilanzrate (\dot{b}_i), die Dichte (ρ) und den horizontalen Gradienten des Massenflusses des Eises ($\bar{\nabla}q$) bestimmt.

$$\dot{h} = \frac{\dot{b}_i}{\rho} - \bar{\nabla}q \quad [kg\ m^{-2}\ oder\ mm\ we] \quad (3)$$

Bei Integration von Gleichung (3) über die gesamte Gletscherfläche wird $\bar{\nabla}q$ gleich Null und die Massenbilanz ist das Produkt aus Höhenänderung und spezifischem Volumen. Hierauf beruht die geodätische Methode.

Die Massenbilanz an einem Punkt (b_i) an der Gletscheroberfläche und über eine beliebige Zeitspanne kann bei mitunter ständigen Wechsel von Akkumulation und Ablation als Zeitintegral der Massenbilanzrate (\dot{b}_i) ausgedrückt werden.

$$b_i = \int_t \dot{b}_i dt \quad [kg\ m^{-2}\ oder\ mm\ we] \quad (4)$$

Wird die Punktmassenbilanz (b_i) über die Gletscherfläche (S) integriert, erhält man die (Gesamt)Massenbilanz (B) eines Gletschers, die auch als Änderung des Produktes

aus Volumensänderung (ΔV) und der Dichte (ρ) von Schnee oder Eis gesehen werden kann.

$$B = \int_S b_i dS = \rho \Delta V \quad [kg \text{ oder } m^3 \text{ we}] \quad (5)$$

Am Ende eines hydrologischen oder natürlichen Haushaltsjahres teilt sich die Gletscherfläche in ein Nährgebiet mit Massenzuwachs (S_C) und einem Zehrgebiet mit Nettomassenverlust (S_A).

$$S = S_C + S_A \quad [m^2] \quad (6)$$

In Ausnahmefällen kann entweder S_C oder S_A auch Null sein. Gerade in jüngster Zeit hatten die Alpengletscher des Ötteren kein Nährgebiet. Bei sehr kleinen Gletschern kann es im Prinzip auch vorkommen, dass sie in besonderen Jahren kein Zehrgebiet besitzen.

Die mittlere spezifische Massenbilanz (b_m) errechnet sich aus

$$b_m = \frac{B}{S} = \frac{\rho \Delta V}{S} = \rho \overline{\Delta h} \quad [kg \text{ m}^{-2} \text{ oder } mm \text{ we}] \quad (7)$$

und übersetzt die Massenänderung durch Volumensänderung und mittleren Höhenänderung ($\overline{\Delta h}$) in Einheiten von Masse bzw. Höhe. Als wichtige glaziologische Kennzahl eignet sich b_m als Maß zum Vergleich mehrerer Gletscher untereinander.

Wird b_m nicht nur für die gesamte Gletscherfläche berechnet, sondern auch für die Flächen der einzelnen Höhenstufen (b_z), so lässt sich die Massenbilanz als Funktion der Höhe (z), im vertikalen Bilanzprofil (VBP) darstellen (Abb. 1). Der Nulldurchgang dieses Graphen definiert die mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie (ELA). Jeder Gletscher besitzt sein eigenes, typisches VBP, das sich Jahr für Jahr ähnlich ist, aber je nach Massenbilanz mehr oder weniger parallel zur Höhe verschoben ist. Treten drastische Änderungen im VBP auf, so ist dies ein Indiz für ein zunehmendes Ungleichgewicht des Gletschers zu seinem treibenden Klima.

Aus dem Verhältnis der Akkumulationsfläche zur Gesamtgletscherfläche lässt sich eine weitere gebräuchliche Kennzahl ableiten. Diese Größe wird allgemein als AAR (accumulation area ratio) bezeichnet (Anonym 1969).

$$AAR = \frac{S_C}{S} \quad (8)$$

Für den Weißbrunnferner (WBF) wurde eine Änderung des VBP besonders in den Jahren 1997/98 und 2002/03 bemerkt (Abb. 2). Auffallend ist besonders ein Abkippen des Profils in den höheren Bereichen des Gletschers. Dies wurde auf ein vermehrtes Abschmelzen der Firnrücklagen und einem damit einhergehenden Abfall der Albedo zurückgeführt (Kaser et al. 2001).

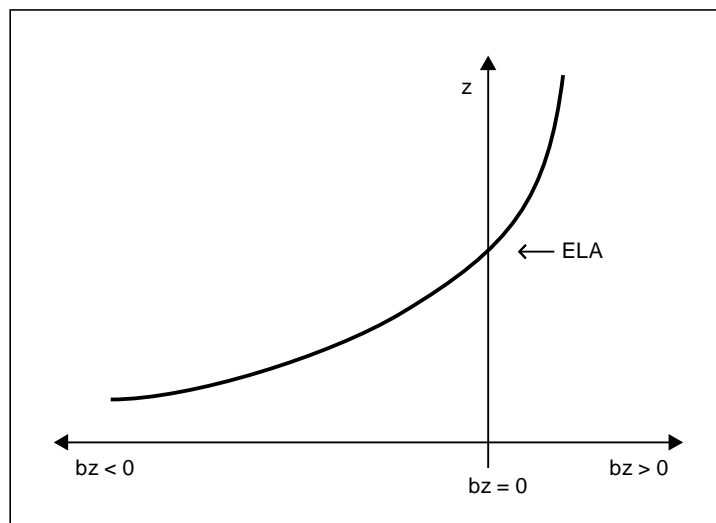


Abb. 1: Schematische Darstellung von VBP und ELA (Kaser et al. 2002).

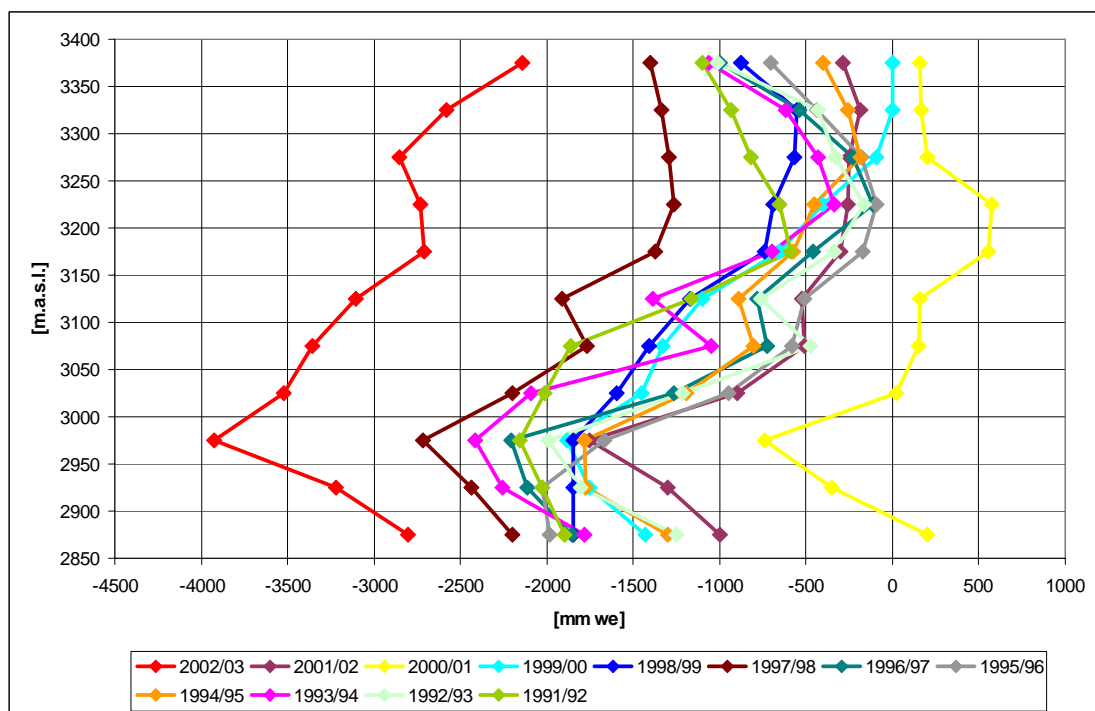


Abb. 2: Das VBP des WBF 1991/92 bis 2002/03.

Am Hintereisferner (HEF) korrelieren AAR und ELA statistisch eng mit der mittleren spezifischen Massenbilanz (b_m), zeigen aber auch für gewisse gegebene Werte (z. B. AAR von 0,4 oder ELA bei 3100 m) hohe Schwankungsbreiten von b_m (Abb. 3 und Abb. 4), sodass Vorhersagen von b_m aus von Luftbildern oder Feldarbeiten abgeleiteten Werten für AAR und ELA nur begrenzt möglich sind (Kuhn et al. 1999).

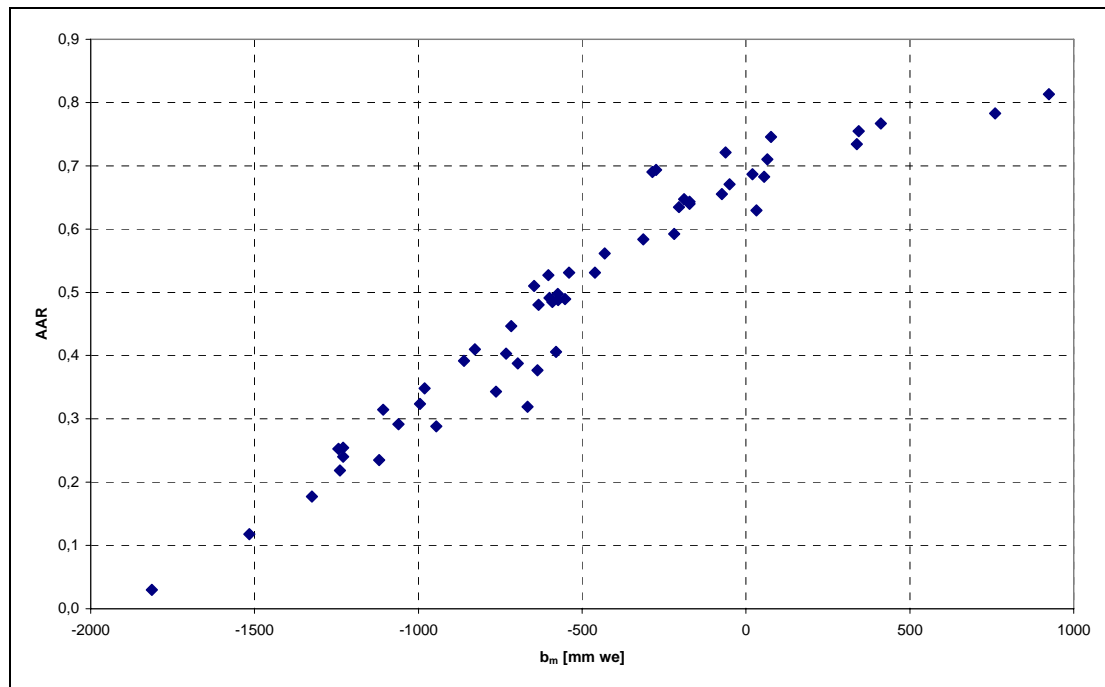


Abb. 3: Die Beziehung von AAR zu b_m am HEF (Kuhn et al. 1999).

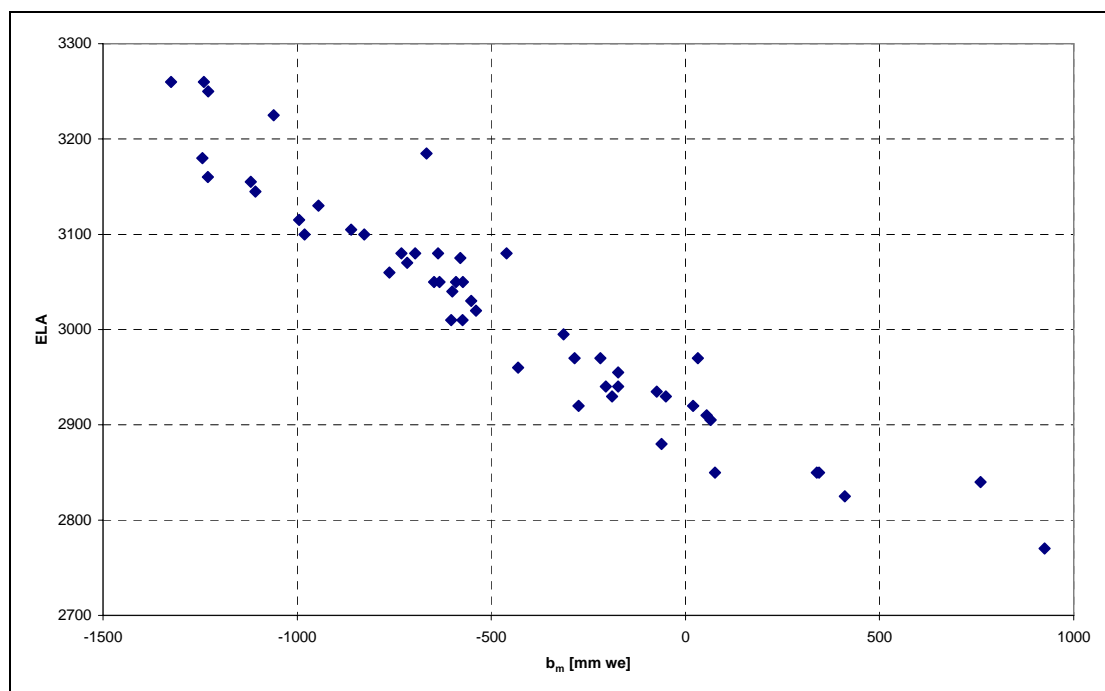


Abb. 4: Die Beziehung von ELA zu b_m am HEF (Kuhn et al. 1999).

3.3 Terminologie

Die Massenbilanz (manchmal auch als Massenhaushalt bezeichnet) beschreibt die Massenänderung eines Gletschers in Form einer Gegenüberstellung von Akkumulation (Massengewinn) und Ablation (Massenverlust) in einem gewissen Zeitraum (Gleichung (2)). Bei bekannter Gletscherfläche und bekannter Dichte von Schnee und Eis kann diese Massenänderung als Änderung im Volumen bzw. auch als mittlere Änderung in der Höhe als Wasseräquivalent (w_e) ausgedrückt werden und wird im Allgemeinen als mittlere spezifische Massenbilanz (b_m) benannt (Gleichung (7)).

Davon wird die Massenbilanz an einem Punkt (Gleichung (4)) unterschieden (Punktmassenbilanz, b_i), die auch aufgrund der Messung an Ablationspegeln kurz Pegelbilanz genannt wird.

Das bestimmende Element von b_i ist die Eisablation (b_{ia}), die die Akkumulation an diesem Punkt (sofern er deutlich im Ablationsgebiet liegt) überwiegt und die gesamte Ablation einer Ablationsperiode bezeichnet (Abb. 6).

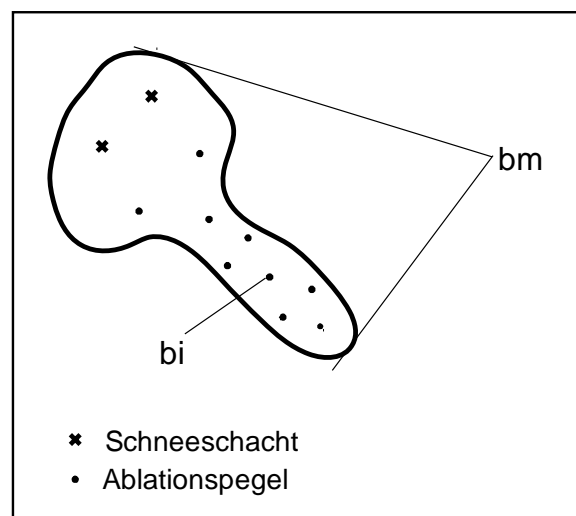


Abb. 5: Skizze zur Unterscheidung der mittleren spezifischen Massenbilanz (b_m) von der Pegelbilanz (b_i). Während die Ermittlung von b_m über die Gletscherfläche interpolierte Messwerte von Ablationspegeln und Schneescharten erfolgt, stellt b_i eine Punktmessung dar.

3.4 Allgemeines

In den mittleren Breiten der Nordhemisphäre wird der Messzeitraum der Massenbilanz als hydrologisches Haushaltsjahr (HHJ) bezeichnet und dauert jeweils vom 01.10. bis zum 30.09. des Folgejahres. Das natürliche Haushaltsjahr (NHJ)

beschreibt die Zeitspanne von einem Minimum der Gletschermasse zum nächsten und stimmt zum Teil mit dem HHJ überein. Das HHJ wird meist noch in ein Winter- (01.10. - 30.04., „Winterbilanz“) bzw. Sommerhalbjahr (01.05. - 30.09., „Sommerbilanz“) unterteilt. Analog dazu kann auch das NHJ gegliedert werden (Minimum - Maximum bzw. Maximum - Minimum).

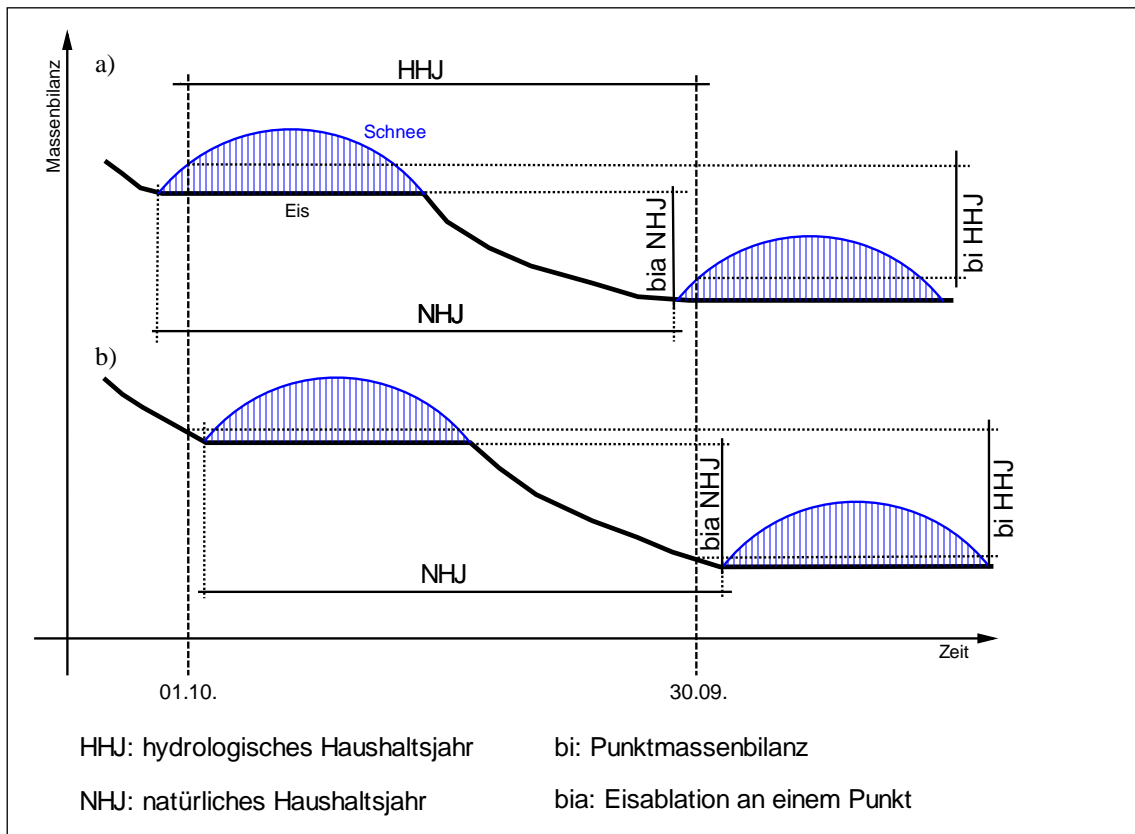


Abb. 6: Skizze der saisonalen Entwicklung der Gletscheroberfläche an einem Ablationspegel. Zwei Verschiebungsmöglichkeiten zwischen HHJ und NHJ sind in a) und b) dargestellt (eigener Entwurf nach Kaser et al. 2002).

Ein Gletscher im Gleichgewicht wird als stationär bezeichnet. Dies bedeutet, dass die gegen Ende des HHJ übrig gebliebene Akkumulation im Nährgebiet submergiert, eine äquivalente Menge durch das von der Gleichgewichtslinie definierte Querprofil fließt und jenen Teil ersetzt, der während der Ablationsperiode geschmolzen wurde. In diesem Fall bleibt die Höhe der Gletscheroberfläche unverändert (Finstertal 1897).

4 Ziel der Diplomarbeit

Die mittlere spezifische Massenbilanz eines Gletschers wird häufig als „Klimameter“ interpretiert. In dieser Arbeit soll nun die Eignung einer Punktmessung der Massenbilanz im Ablationsgebiet eines Gletschers als solch ein „Klimameter“ diskutiert werden. Der grundlegende Gedanke ist also, die Massenänderung (an Hintereis- (HEF), Weißbrunn- (WBF) und Kesselwandferner (KWF)) als Auswirkung des Klimas nicht nur an der gesamten Gletscherfläche, sondern auch an je einem ausgewählten Punkt von HEF und WBF zu untersuchen. Ziel ist es, einerseits Unterschiede und Gemeinsamkeiten in den Messreihen beider Datenquellen (Fläche bzw. Punkt) aber auch der drei Gletscher zu finden. Andererseits sollen aus einer inversen Sichtweise aus Massenbilanz- und Klimadaten von nahe an den Gletschern gelegenen Stationen Informationen gewonnen werden, die den globalen Klimawandel der letzten Jahrzehnte (Greene 2005, Kaser et al. 2006, IPCC 2007) auch im Untersuchungsraum detailliert wiedergeben. Dank der sorgfältigen und regelmäßig durchgeführten Feldarbeiten lassen sich die auf den Gletschern gewonnenen Daten bis auf wenige Tage genau auflösen. Die daraus gewonnenen Daten der Dauer und Intensität von Akkumulations- und Ablationsperioden können den aus den Massenbilanzen abgeleiteten Klimawandel bestätigen. HEF und KWF sollen Gletscher nördlich des Alpenhauptkammes, der WBF Gletscher südlich des Alpenhauptkammes repräsentieren.

Anstelle der Daten von Punktmassenbilanzen (b_i) werden Daten der Eisablation an einem Punkt (b_{ia}) im NHJ verwendet, da diese die Dauer der Ablationsperiode exakter als b_i wiedergeben. Eine eventuell andauernde Ablation im Oktober versteckt sich nach der Einordnung in das fixe System der HHJ im HHJ des Folgejahres (Abb. 6). Bei sehr hohen Schneerücklagen der Vorjahre an der Stelle des Pegels ist es möglich, dass keine Eisablation einsetzt. Im Allgemeinen sind die Unterschiede zwischen b_i und b_{ia} an den hier untersuchten Pegeln sehr gering (Tab. 5).

Als gletscherrelevante Faktoren wird das Klima in dieser Arbeit auf Temperatursummen positiver Gradtage zur Beschreibung der Ablation und auf Winterniederschlagssummen (Oktober - Mai) zur Beschreibung der Akkumulation rediziert.

Anhand einer Gegenüberstellung der mittleren spezifischen Massenbilanz (b_m) der Gletscher zur Eisablation eines Ablationspegels (b_{ia}) soll mit Hilfe von Klimadaten gezeigt werden,

- ob sich b_m und b_{ia} am HEF (KWF) und WBF ähnlich verhalten,
- wie b_m und b_{ia} mit Niederschlags- und Temperaturreihen der letzten Jahrzehnte im Verhältnis stehen und ob sich daraus Klimainformationen in ableiten lassen,
- ob sich Dauer und Intensität von Akkumulations- und Ablationsperioden ändern,
- ob es Unterschiede im klimatologischen Informationsgehalt zwischen b_m und b_{ia} gibt.

4.1 Hypothese

Die Massenbilanz eines Gletschers kann als Reflexion der vorherrschenden Witterungsverhältnisse eines bestimmten Zeitraumes verstanden werden. Wenn die Massenbilanz ausgeglichen ist, so steht ein Gletscher mit seinem Volumen und damit mit seiner Oberfläche im Gleichgewicht zu den Witterungsverhältnissen im Beobachtungszeitraum (meist ein Jahr) (Finsterwalder 1897). Hohe Beträge der Massenbilanz (negative wie positive) resultieren aus dem Versuch des Gletschers, sich geänderten Witterungsverhältnissen anzupassen. Betrachtet im Zeitmaßstab des Klimas wird ein Gletscher den Ausgleich seines Ungleichgewichtes durch Veränderungen in seiner Geometrie und in seinem Fließverhalten (Gleichung (3)) so lange anstreben, bis er wieder im Einklang mit seinen treibenden Faktoren steht. Reaktionszeit und Eisdynamik bewirken hierbei Verzögerungen und Unschärfen. Das Klimasignal der Massenbilanz wird also durch das Gleichgewichtsbestreben des Gletschers verwischt (Oerlemans 2001).

Wesentlich stärker hingegen ist die klimatische Aussagekraft eines Punktes an der Gletscheroberfläche, dessen Massenbilanz direkt gemessen und nicht wie im Falle von b_m über die Gletscherfläche (Gleichung (5) bzw. (7)) bestimmt werden. Als reines Klimasignal kann b_i interpretiert werden, da hier die Verzerrungen des Gleichgewichtsbestrebens im Zusammenhang mit der Änderung der Gletscherausdehnung keine Rolle spielen. Als Messpunkte eignen sich Ablationspegel. Da die Akkumulation in der Massenbilanz eines Ablationspegels (sofern er nicht nahe an der ELA steht) in der Regel sehr viel kleiner als die Ablation ist und die Ablation im NHJ mehr den Witterungsverlauf der gesamten Ablationsperiode als die Ablation im HHJ entspricht, werden anstatt der Werte von b_i nur Werte von b_{ia} verwendet (Abb. 6).

Diese Ablationspegel sind allerdings aufgrund der Eisbewegung nicht ortsfest. Inhomogenitäten in der Messreihe aufgrund eines Tieferwanderns des Pegels mit der

Eisbewegung werden durch das Rücksetzen des Pegels an die Originalposition minimiert. (Am HEF und WBF schmilzt der Ablationspegel je nach Witterung, Höhenlage und Stablänge etwa alle 2 bis 4 Jahre aus dem Eis und wird dann an seine ursprüngliche Position zurück gesetzt). Höhenänderungen der Position sind somit rein durch die stetige Abschmelzung der Gletscheroberfläche begründet. Dieses Einsinken der Gletscheroberfläche beträgt beispielsweise bei dem hier ausgewählten Pegel am HEF 53,6 m we (59,6 m ie) in 33 Jahren (Tab. 1) und wird nicht weiter berücksichtigt, da die Temperaturzunahme durch das Tieferwandern nur wenige Zehntel Grade beträgt, die sich bei der Ableitung von Temperatursummen positiver Gradtage nicht gravierend auswirken (Kapitel 6.3.3).

Diese Unterschiede und Vorteile von Punktmassenbilanzen gegenüber mittleren spezifischen Massenbilanzen berücksichtigen unter anderen schon Dreiseitl (1973), Müller und Kapfenberger (1991), Kuhn et al. (1999) und Vincent et al. (2004).

Abb. 7 zeigt schematisiert die Antwort der mittleren spezifischen Massenbilanz eines Gletschers und der Pegelbilanz auf einen plötzlichen, stufenförmigen Wechsel im Klima. Während b_m mit der Klimaänderung aus dem Gleichgewicht gerät und jenes aber mit der Zeit wieder (durch Anpassungen der Gletscherfläche) anstrebt, verläuft b_i spiegelbildlich zum klimatischen Treiber. Im Extremfall kann aufgrund des Klimawandels der Gletscher an diesem Punkt gar nicht mehr existieren und hat sich in größere Höhen zurückgezogen (unterbrochene Linie). Rückschlüsse auf das Klima rein auf Basis von b_m können zu falschen Interpretationen führen. Wenn beispielsweise rein der im Kasten dargestellte Ausschnitt betrachtet wird, könnte aufgrund zunehmend ausgeglichener b_m fälschlicherweise auf ein gletscherfreundliches Klima geschlossen werden.

Näher an aktuelle Beobachtungen angelehnt verläuft ein Klimawandel jedoch wesentlich komplexer und führt somit zu anderen Reaktionen der Massenbilanzen (Abb. 8). Der Unterschied in der Klarheit der Aussagekraft zwischen Punkt- und mittlerer spezifischer Massenbilanz wird in Abb. 8 in den Winkeln (α und β) verdeutlicht. Bei einem kontinuierlichen Klimawandel wird b_m eines Gletschers aufgrund der bereits genannten Verzögerungen nie das angestrebte Gleichgewicht erreichen. In gewisser Weise hinkt b_m dem Klima hinterher. Das Gleichgewichtsbestreben schwächt die Klarheit der Klimainformation ($\beta < \alpha$). Je nach Intensität des Klimawandels und der gletscherspezifischen Reaktionszeit kann sich b_m leicht verändern oder mitunter sogar erholen. Jedoch wird die aus b_m abgeleitete Klimainformation nicht so rein sein wie die Information aus b_i , deren Kurve die Klimaänderung spiegelt.

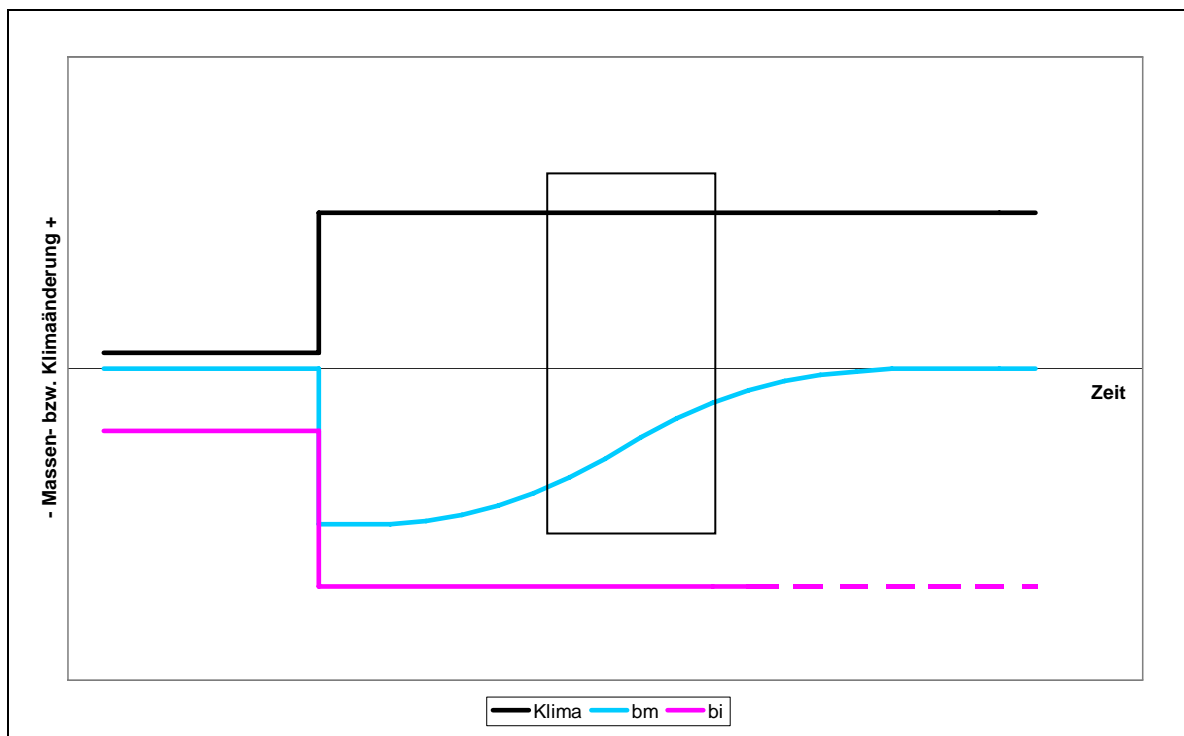


Abb. 7: Schematisierte Antwort der mittleren spezifischen Massenbilanz (b_m) und der Punktmassenbilanz (b_i) auf einen plötzlichen, stufenförmigen Wechsel im Klima (eigener Entwurf nach Oerlemans 2001).

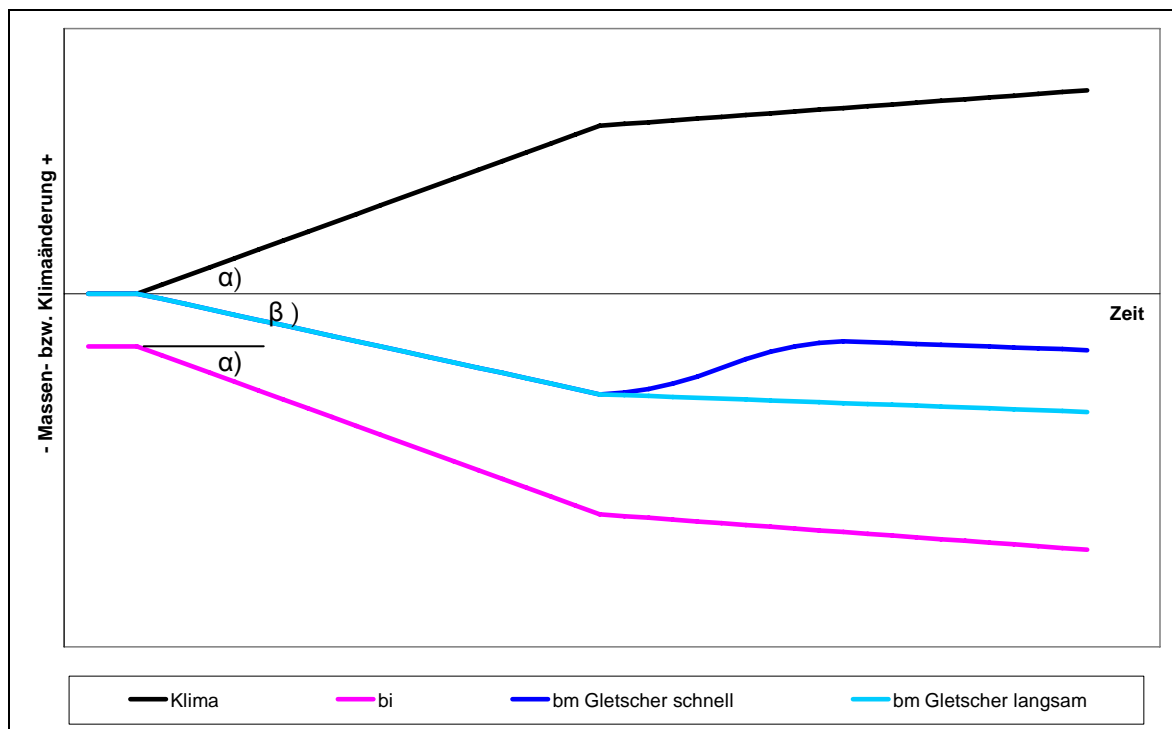


Abb. 8: Schematisierte Antworten der mittleren spezifischen Massenbilanzen (b_m) unterschiedlich schnell reagierender Gletscher auf einen kontinuierlichen Klimawandel im Vergleich zur Massenbilanz eines Punktes (b_i) im Ablationsgebiet.

5 Einführung in die Untersuchungsgebiete

Die in dieser Arbeit untersuchten Gletscher liegen in etwa auf derselben geographischen Länge (10,77 E) im breitesten Abschnitt der Ostalpen. Die Luftlinie zwischen HEF und WBF misst ca. 40 km. Die weit über 3500 m aufragenden Gebirgsketten der Ötztaler Alpen und der Ortler-Cevedale-Gruppe, zwischen denen sich der als inneralpine Trockeninsel bekannte Vinschgau erstreckt, trennen die beiden Gletscher in ihren Klimaregimen. Fliri 1975 teilt die Alpen im Tiroler Raum in drei „Klimagebiete“. Dabei fallen der HEF und KWF in das nördliche Gebiet mit stark mittlerer Prägung und der WBF in das mittlere Gebiet mit stark südlicher Prägung. Besonders die Hauptströmungsrichtungen und die Niederschlagsverhältnisse unterscheiden sich in diesen Gebieten. Dominieren am WBF Südstauereffekte feucht-warmer Luftmassen, so gelangen zum HEF (und KWF) vergleichsweise feucht-kühle Luftmassen – wenn auch abgeschwächt – sowohl aus nord- als auch aus südwestlicher Richtung. Diese synoptischen Muster beeinflussen maßgeblich die Niederschlagscharakteristika wie Menge, Häufigkeit, Variabilität und Schneefallgrenze (Fliri 1975, Fliri 1985).

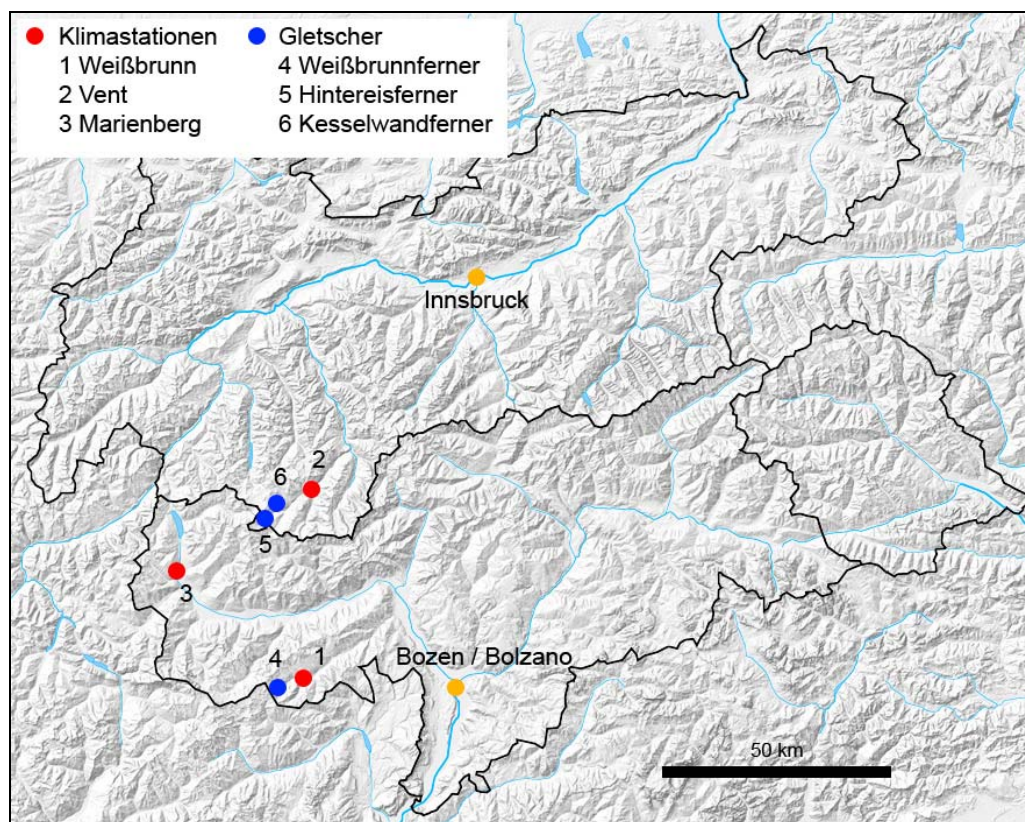


Abb. 9: Lage der in der Arbeit behandelten Klimastationen und Gletscher. Quelle: IGI, Tirol Atlas.

5.1 Der Weißbrunnferner (WBF)

Der WBF liegt in Südtirol, im hintern Ultental, in der Ortler-Cevedale-Gruppe. Der italienische Name des Gletschers lautet Ghiacciaio Fontana Bianca (wird in dieser Arbeit der Vereinfachung halber jedoch nicht weiter verwendet). Den höchsten Punkt seines Einzugsgebietes markiert die Hintere Eggenspitze (Cima Sternai) mit 3443 m, an deren Ostflanke sich der WBF mit seinen zwei Zungen erstreckt (Abb. 10.). Diese beiden Zungen werden durch einen Felskopf getrennt und besitzen unterschiedliche Flächen-Höhen-Verteilungen, weshalb die Massenbilanz für beide Teileinzugsgebiete auch getrennt erhoben wird. Die Gesamtfläche des WBF betrug 2004 0,54 km². Während der orographisch rechte Teil an der steilen Ostflanke der Hinteren Eggenspitze ansetzt und in einer steilen, felsumrahmten Zunge mündet, bildet der orographisch linke Teil oben eine plateauartige Verebnung und eine wesentlich breitere und flachere Zunge. Für den gesamten Gletscher gilt aber der massive Eiszerfall der letzten Jahre, der zusätzlich durch die Erwärmung der umgebenden und vermehrt ausapernden dunklen Gesteinsflächen (Ortler Quarzphyllit) verstärkt wird (Wendler 1974).

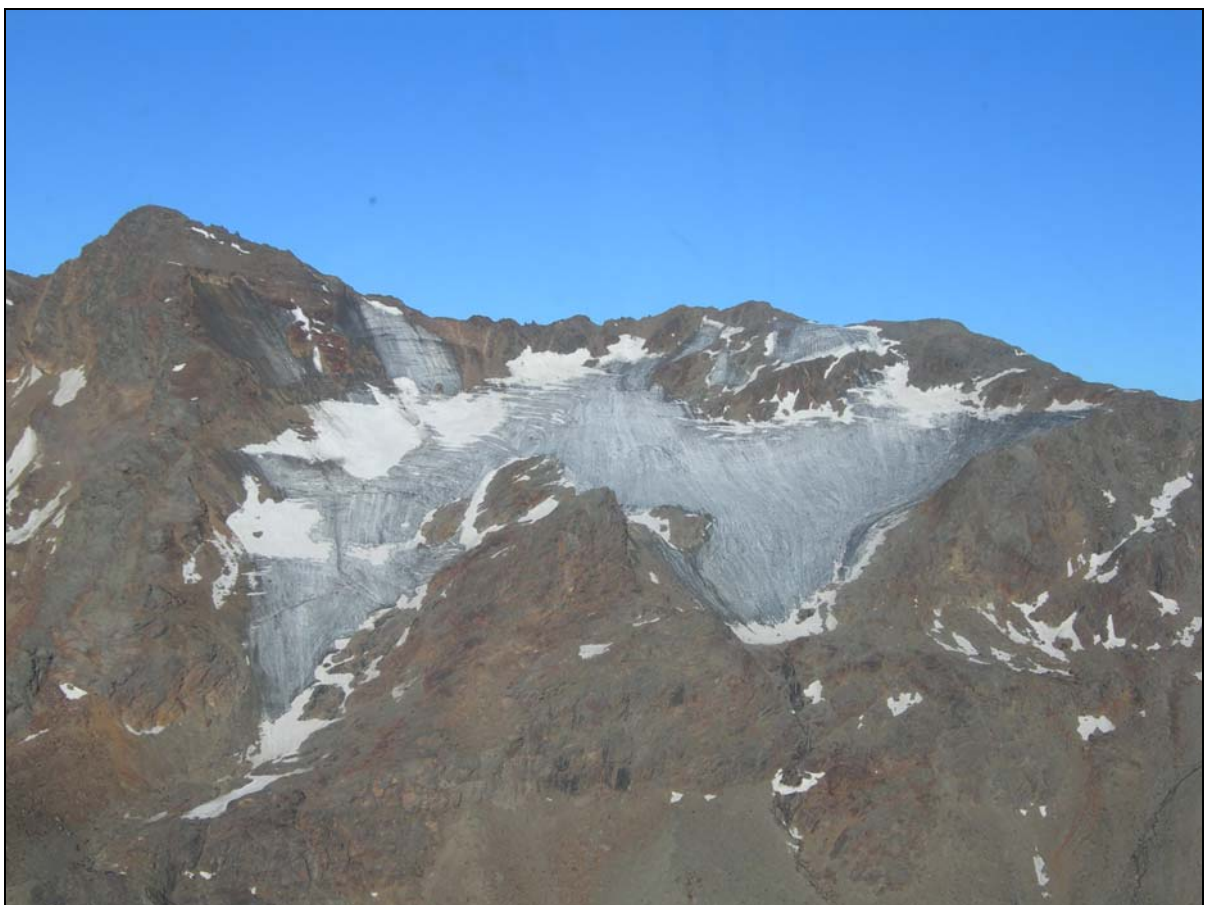


Abb. 10: Der WBF an der Ostflanke der Hinteren Eggenspitze (3443 m; links). Quelle: Rainer Prinz, 18.07.2006.

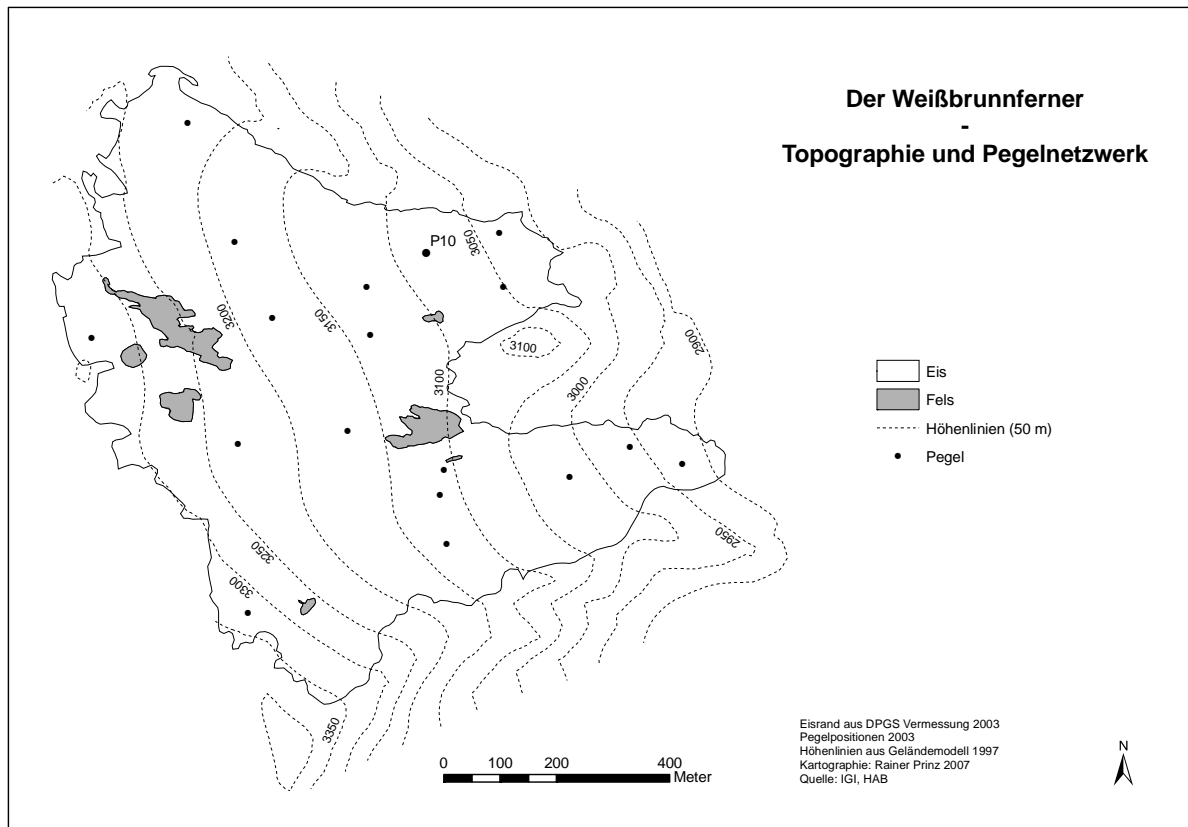


Abb. 11: WBF Übersichtskarte. Quelle: IGI. Stand 2003.

Keine vier Kilometer vom Zungenende des WBF entfernt liegt der Weiler Weißbrunn, in dem die ENEL (Ente Nazionale per l'Energia eLettrica, größter italienischer Energieversorger) eine Wetterstation (auf 1900 m Seehöhe) betreibt, deren Daten in den folgenden Ausführungen verwendet werden konnten.

Massenhaushaltsmessungen am WBF

Exemplarische Massenhaushaltsuntersuchungen wurden bereits in den Haushaltsjahren zwischen 1983/84 und 1987/88 durchgeführt (Secchieri, Valentini 1992). Im Auftrag des HAB wird seit 1991/92 in Zusammenarbeit mit dem IGI kontinuierlich der Massenhaushalt des hydrologischen Winterhalbjahres und des hydrologischen Jahres auf Basis der glaziologischen Methode gemessen. Seit 2003/04 werden die Arbeiten vom HAB alleine ausgeführt. Die Sommerbilanz wird als Restglied der gemessenen Bilanzen bestimmt. (Kaser et al. 1995). Folgende glaziologische Kenndaten werden gewonnen und in Jahrsberichten festgehalten: Gesamtmassenbilanz (B) und mittlere spezifische Massenbilanz (b_m) des HHJ und der entsprechenden Halbjahre, das vertikale Bilanzprofil (VBP), Höhe der Gleichgewichtslinie (ELA) und das Verhältnis der Akkumulationsfläche zur Gesamtgletscherfläche (AAR).

Zusätzlich werden auf beiden Zungen automatische Abflussmessungen durchgeführt, um die Bilanz des WBF auch hydrologisch bestimmen zu können.

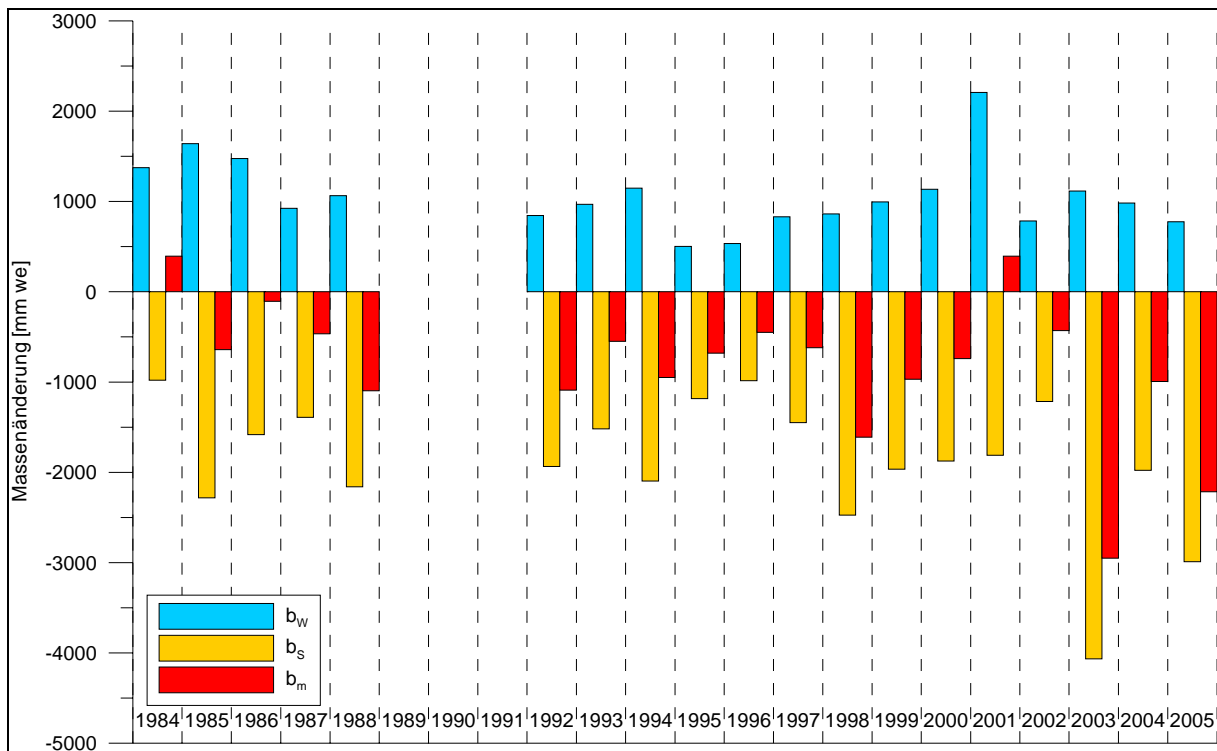


Abb. 12: Die saisonalen Massenbilanzen am WBF.

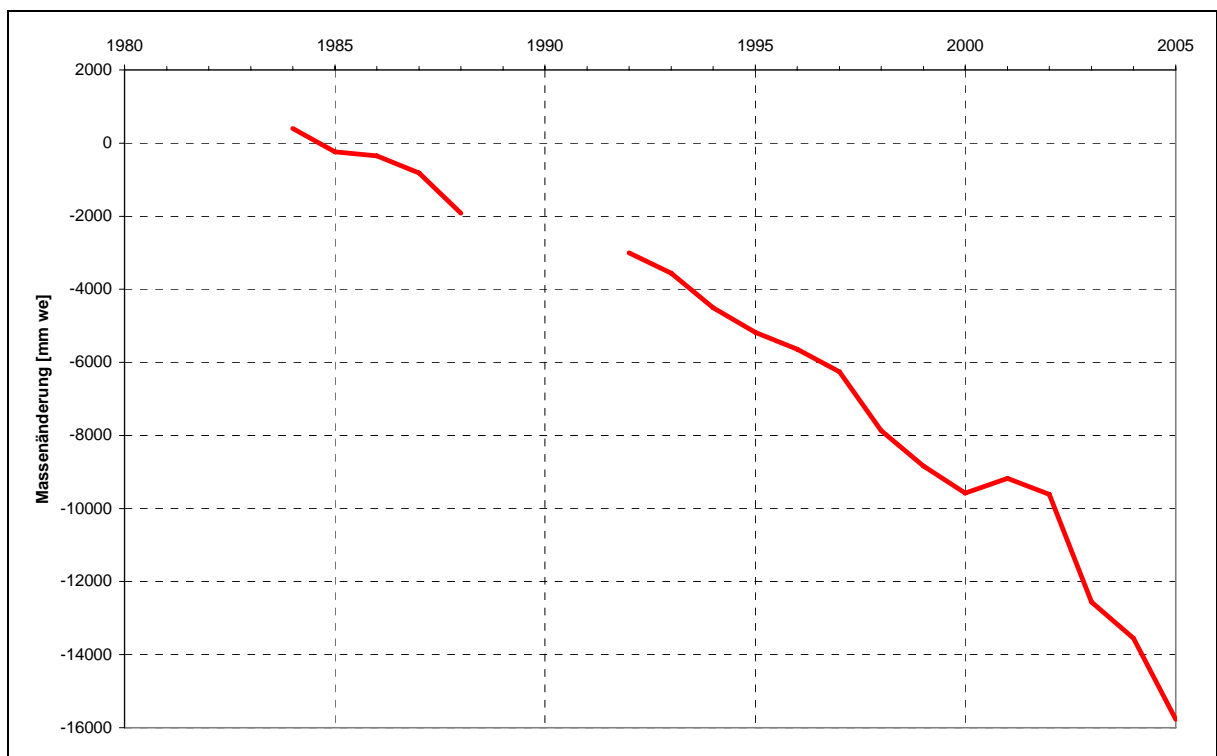


Abb. 13: Die kumulative Massenbilanz am WBF. (Der Wert für das Jahr 1992 schließt bei der Summe von 1988 an).

5.2 Der Hintereisferner (HEF)

Der HEF befindet sich in den Ötztaler Alpen, knapp an der Grenze zu Italien. Er fließt vom höchsten Punkt seines Einzugsgebietes, am Fuße des Gipfelaufbaues der Weißkugel (3738 m), zuerst in östlicher, später in nordöstlicher Richtung ins Rofental, wo er den Talschluss bildet. Seine im unteren, orographisch rechten Teil schuttbedeckte Zunge endet auf 2490 m Höhe (2003). Als typischer alpiner Talgletscher besitzt er ein konkaves, durch mehrere Spaltenzonen zergliedertes Firnbecken, das sich in einer langen konvexen Zunge als Ablationszone fortsetzt. 2005 maß seine Fläche 7,5 km². Zu seinem Einzugsgebiet werden noch der Stationsferner (SF) und der Langtaufererjochferner (LJF) gezählt, deren Akkumulationsgebiete noch mit dem HEF zusammenhängen, deren Zungen aber seit 1969 (SF) beziehungsweise seit 2000 (LJF) nicht mehr mit dem HEF in Verbindung stehen (Abb. 15).

Am Ausgang des Rofentales, etwa 10 km von der Zunge des HEF entfernt, liegt die Ortschaft Vent, in der das Institut für Meteorologie und Geophysik (IMGI) eine Wetterstation (auf 1900 m Seehöhe) betreibt. Die dort gemessenen Klimadaten finden Eingang in fast alle Modelle zur Berechnung der Massenbilanzen des HEF, die insbesondere von Mitgliedern des IMGI im HEF Programm ausgeführt wurden und werden (Dreiseitl 1973, Hoinkes und Steinacker 1975, Tanzer 1986, Stuefer 1994, Hofinger and Kuhn 1996, Schlosser 1996, Kuhn et al. 1999, Butschek 2000, Oitzl 2003, Bortenschlager 2006, Schrott 2006). Auch die Analysen dieser Arbeit basieren auf den Daten der Wetterstation in Vent.

Massenhaushaltsmessungen am HEF

Seit dem Haushaltsjahr 1952/53 werden auf dem HEF Massenhaushaltsmessungen mit der glaziologischen Methode von Angehörigen des IMGI durchgeführt. Diese Messreihe zählt zu den ältesten ihrer Art weltweit. Die Messungen stehen mit dem übergeordneten glazial-meteorologisch-hydrologischen Forschungsprogramm in Verbindung, das 1948 in den Ötztaler Alpen initiiert wurde und im Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 einen wichtigen Impuls erhielt (Hoinkes 1970). In diesem Rahmen wird die Massenänderung dreier großer Gletscher im Einzugsgebiet der Rofenache (Hintereis-, Kesselwand- und Vernagtferner) erhoben. Im Jahre 1966 wurde am orographisch linken Rand des HEF auf einem Felsrücken auf 3030 m Höhe die Station Hintereis als Unterkunft errichtet, die zusätzlich nach und nach als Klimastation erweitert wurde.

Am HEF werden alljährlich folgende glaziologischen Kenngrößen ermittelt: Gesamtmassenbilanz (B) und mittlere spezifische Massenbilanz (b_m) des HHJ, das vertikale Bilanzprofil (VBP), Höhe der Gleichgewichtslinie (ELA) und das Verhältnis der Akkumulationsfläche zur Gesamtgletscherfläche (AAR). Weiters wurden Daten zur Eisdynamik (Span 1993 und Span et al. 1997) und Energiebilanz (Wagner 1979, Wagner 1980, Tanzer 1986) gemessen. Der HEF ist wohl einer der am besten untersuchten Gletscher weltweit.

Aufgrund der Länge und Homogenität der Messreihen entstand eine große Anzahl von glaziologischen Arbeiten, von denen Kuhn et al. (1979) und Kuhn et al. (1999) die wichtigsten zusammenfassen.

5.3 Der Kesselwandferner (KWF)

Der KWF ist ein unmittelbarer Nachbar des HEF im Rofental. Vom Gipfel des Fluchtkogels (3497 m) fließt er zunächst nach Südwesten und später nach Südosten. Seine Zunge endete 2005 auf ca. 2800 m. Im selben Jahr erreichte er eine Ausdehnung von 3,9 km².

Sein besonderes Kennzeichen ist die kurze Reaktionszeit auf unterschiedliche Witterungseinflüsse. Jahre mit gletscherungünstiger Witterung lassen die schmale, steile Zunge schnell zurück schmelzen. Jedoch bewirken Jahre mit gletscherfreundlicher Witterung ein rasches Vorstoßen der Zunge, angetrieben durch die Masse des hoch liegenden und weit ausladenden Firnbeckens. Ein ausgeglichener Haushalt des KWF ist also aufgrund seiner Dynamik und seines günstigen Verhältnisses von Nährgebiet zu Zehrgebiet relativ rasch zu erreichen (Schneider 1975, Kuhn et al. 1985, Span 1999).

Massenhaushaltsmessungen am KWF

Die Arbeiten am KWF sind im Kontext zum Messprogramm im hinteren Rofental zu sehen. Maßgeblich beteiligt am Messprogramm des KWF ist Heralt Schneider (Institut für Mathematik - Universität Innsbruck), der seit 1965/66 auf Basis der geodätischen Methode die Massenbilanz (B und b_m) des KWF in zeitlich hoher Auflösung bestimmt.

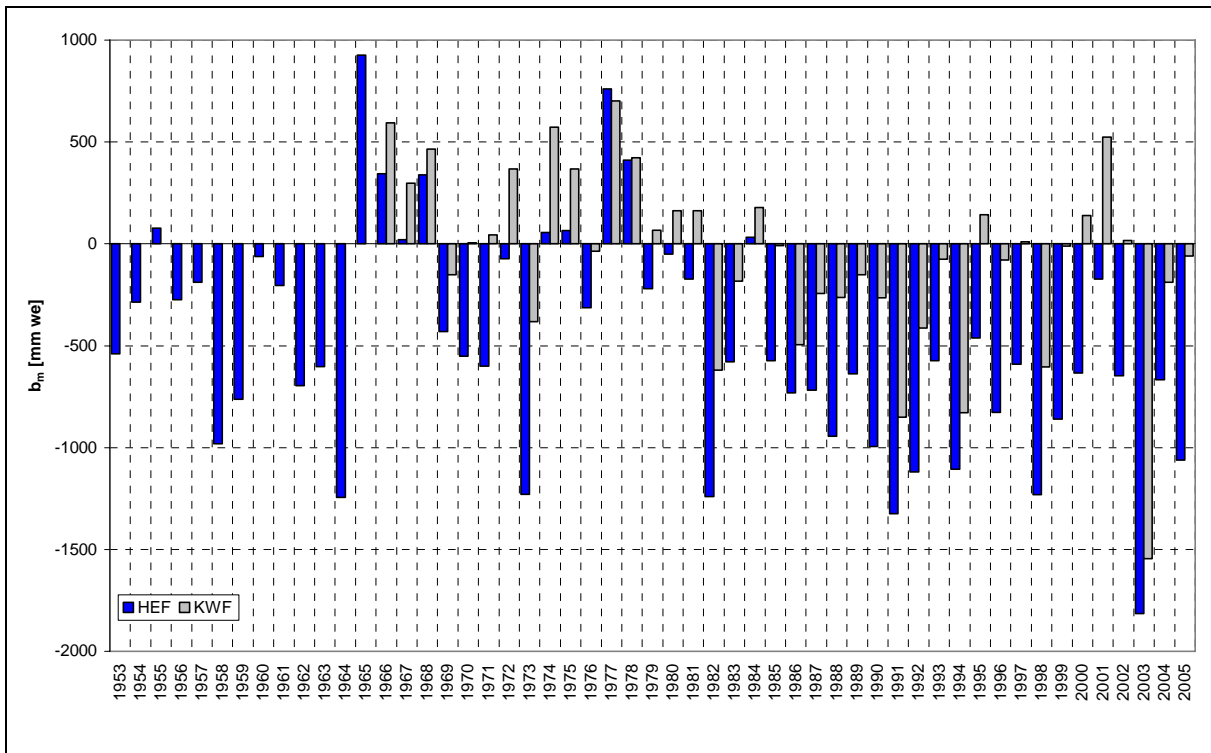


Abb. 16: Die mittleren spezifischen Massenbilanzen des HEF und KWF.

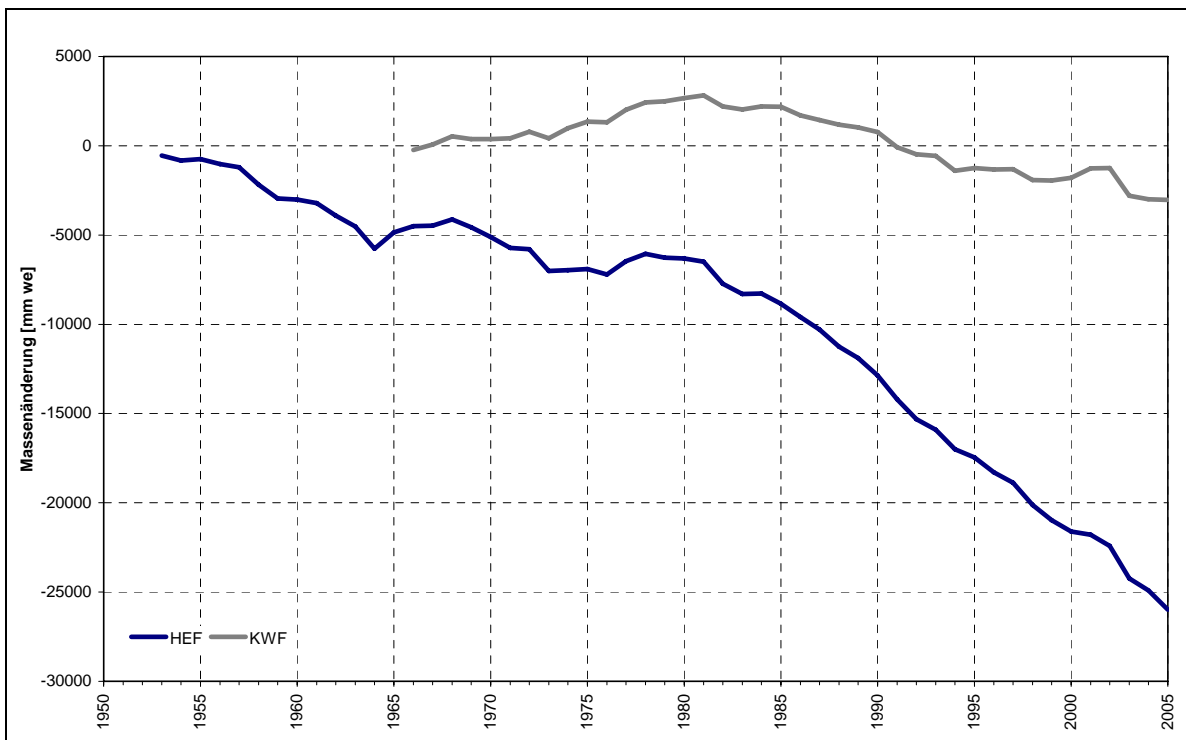


Abb. 17: Die kumulativen Massenbilanzen des HEF und KWF.



Abb. 18: Der KWF mit seinem Firnbecken im Sommer 2006. Am rechten oberen Bildrand ist der Fluchtkogel (3497 m) zu erkennen. Quelle: IMGI.

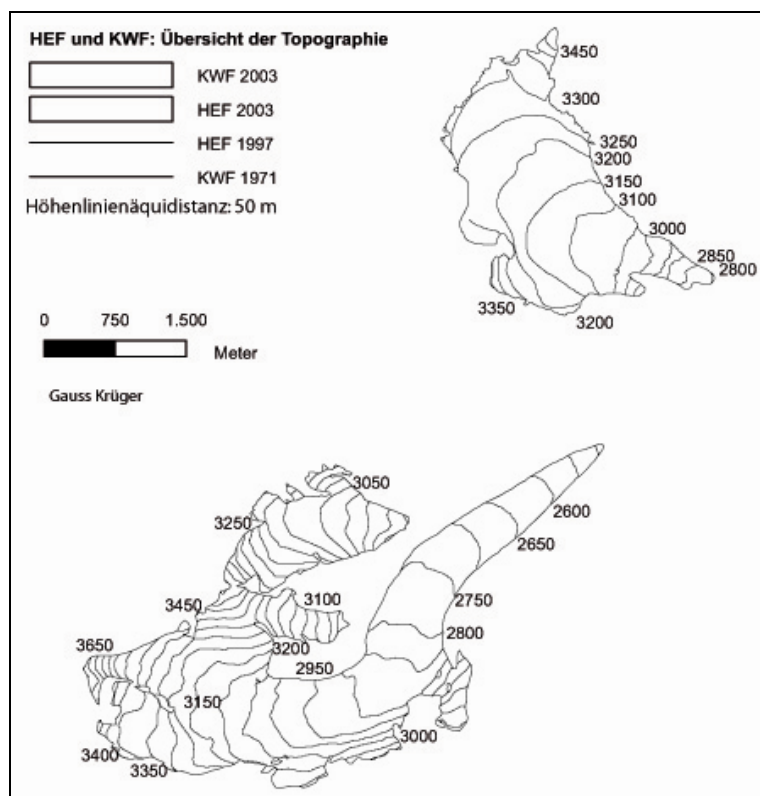


Abb. 19: Topographie und Lagebeziehung HEF und KWF. Quelle: IMGI. Stand 2003.

6 Datengrundlagen

Die in diesem Kapitel vorgestellten Daten liefern die Grundlage zur Beantwortung der in Kapitel 4 gestellten Fragen. Massenbilanz (b_i) und Eisablation (b_{ia}) der Ablationspegel sind Messdaten eines Punktes an der Gletscheroberfläche. Die mittlere spezifische Massenbilanz (b_m) berechnet sich anhand der Gletscherfläche. Als Klimadaten gelten hier die jährliche Temperatursumme positiver Gradtage an der Seehöhe der Ablationspegel und die Niederschlagssumme im Winter, der in dieser Arbeit als Zeitraum von Oktober bis Mai definiert wird. Einige Datenreihen mussten überprüft und rekonstruiert werden. Mit den abschließend in Tabellen aufgelisteten Daten können b_m und b_{ia} untereinander und hinsichtlich ihrer Klimainformation verglichen werden sowie Ablationsperioden und -raten berechnet werden.

6.1 Auswahl der Ablationspegel

Die Auswahl der Ablationspegel als Datenquelle einer Punktmessung an der Gletscheroberfläche und zur Bestimmung von Ablationsperioden und -raten erfolgte sowohl nach Überlegungen der Theorie, als auch nach praktischen Gesichtspunkten. Folgende Kriterien zur Selektion der Ablationspegel wurden erstellt:

1. zahlreiche Ablesungen während des HHJ zur Erlangung einer größtmöglichen zeitlichen Auflösung
2. Schneeschächte oder Schneehöhenmessungen an der Pegelposition zur Zeit des Akkumulationsmaximums im Frühjahr

Punkt 1 trifft besonders auf die Pegel mit der Nummer L6 am HEF und P10 am WBF zu. Punkt 2 entfällt am HEF, da diese Messungen vor 1993 nur in Ausnahmefällen durchgeführt wurden.

Pegel L6 (2770 m) besitzt zusätzlich eine hohe Korrelation zu Pegeln in seiner Umgebung und kann daher als Indikatorpegel für diesen Raum bezeichnet werden (Fountain and Vecchia 1999, Kuhn et al. 1999). Seine zentrale Lage (Abb. 15) mitten auf der Zunge und seine leichte Zugänglichkeit erlaubten ein oftmaliges Ablesen im HHJ. Leider wird am HEF keine Winterbilanz gemessen. So sind Schneehöhenaufzeichnungen insbesondere vor 1993 selten und mussten anhand von Niederschlagsdaten von Vent rekonstruiert werden (Kapitel 6.3.2). Ebenso konnte

mit L6 die lange Messreihe des HEF nicht ausgeschöpft werden, da dieser Pegel erst im Jahre 1971 erstmals gebohrt wurde. L6 wurde bei jeder neuen Bohrung wieder an seine ursprüngliche Position gesetzt.

Pegel P10 (3070 m) am WBF liegt quasi auf dem Weg zu jeder Feldarbeit am Gletscher (Abb. 11). Somit ist eine hohe zeitliche Auflösung der Messungen gegeben. Nebenbei ist P10 auch ein fixer Standort eines Schneeschachtes zur Messung der Winterbilanz Ende April / Anfang Mai. Da der WBF eine sehr geringe Eisbewegung aufweist (Öggl 2000), erfolgte ein Zurücksetzen des Pegels nach „Augenmaß“.

Höhenänderungen der Position sind somit rein durch die stetige Abschmelzung der Gletscheroberfläche begründet. Für Pegel L6 beträgt die Summe der Eisablation während des Messzeitraumes -53,6 m we für Pegel P10 -20,2 m we (Tab. 1). In Eisäquivalent umgerechnet ergeben sich dabei Höhenänderungen der Gletscheroberfläche von -59,6 m beziehungsweise -22,4 m (bei einer Dichte von Eis von 900 kg/m³). Diese Höhenänderung bewirkt eine geringfügige Änderung des Mikroklimas am Ablationspegel, jedoch wurde dieser Effekt vernachlässigt (Kapitel 6.3.3).

Tab. 1: Die Maßzahlen für die ausgewählten Pegel im Überblick.

Pegel	Seehöhe [m]	Zeitraum	$\sum b_{ia}$ [m we]	$\sum b_i$ [m we]	Mittel b_{ia} [mm we]	Mittel b_i [mm we]	Mittel $\sum T+$ [°C]	mittlerer NS im HHJ [mm]
L6 (HEF)	2770	1973 - 2005	-53,6	-54,0	-1577	-1588	629	675 (Vent)
P10 (WBF)	3070	1992 - 2005	-20,2	-19,6	-1445	-1400	436	1054 (Weißbrunn)

$\sum b_{ia}$: kumulative Eisablation

$\sum b_i$: kumulative Pegelbilanz

Mittel b_{ia} : mittlere Eisablation

Mittel b_i : mittlere Pegelbilanz

Mittel $\sum T+$: mittlere Temperatursumme der positiven Gradtage pro Jahr am Pegel

mittlerer NS im HHJ: mittlere Niederschlagssumme im Haushaltsjahr an der angegebenen Station

Von den ausgewählten Pegeln wurden alle Ablesedaten während des HHJ sowie die Daten der Pegelbilanzen (b_i) und der Eisablation (b_{ia}) gesammelt. In der Auswertung (Kapitel 7) wurde b_{ia} im NHJ besonderes Augenmerk geschenkt, da diese die Dauer der Ablationsperiode exakter als b_i wiedergibt. Die Beträge von b_i und b_{ia} sind neben anderen pegelspezifischen Daten in Tab. 5 aufgelistet.

6.2 Massenbilanz- und Klimareihen

Die in dieser Untersuchung verwendeten Massenbilanzdaten des HEF und KWF wurden in Jahrzehnte langer, sorgfältiger Arbeit von Mitgliedern des IMGI aufgenommen und von diesem zur Verfügung gestellt. Es handelt sich hierbei um

die gesamte Reihe der HEF Massenbilanz seit 1952, seit 1972 für Pegel L6 und seit 1966 für die Massenbilanz des KWF. Leider wird auf keinem der beiden Gletscher die Winterbilanz gemessen. Das IMGI ist ebenso als Quelle der Klimadaten von Vent zu nennen.

Die Massenbilanzdaten des WBF stammen aus den Erhebungen des IGI und des HAB seit 1992. Daten früherer Messungen wurden aus Secchieri, Valentini (1992) übernommen. Alle Massenbilanzen am WBF können in Winter- und Sommerbilanzen gegliedert werden. Die Quelle der Klimadaten aus Südtirol ist die ENEL und das HAB.

Ein geringfügiger systematischer Unterschied zwischen HEF und WBF besteht in der Definition des Zeitraumes des Winterhalbjahres. Am HEF wird das Ende des Winterhalbjahres am 31. Mai festgesetzt. Um dasselbe Datum erfolgen die Feldarbeiten zur Erstellung der Winterbilanz (systematisch erst seit 1993). Somit ist in der Niederschlagssumme des Winterhalbjahres der Mai noch enthalten. Auch am WBF wird der Winterniederschlag von Oktober bis Mai addiert, wengleich der 30. April als Stichtag gilt. Aufgrund der steilen und lawinengefährdeten Hänge unterhalb des WBF erfolgten die Feldarbeiten zur Erstellung der Winterbilanz jedoch meist erst Mitte Mai. Auf eine Korrektur der Bilanzwerte auf Ende Mai wurde verzichtet.

Tab. 2: Zeitraum der Massenbilanzmessungen (b_m sowie b_i) der entsprechenden Gletscher und Pegel.

	b_m		b_i
HEF	1952/53 - 2004/05	L6	1971/72 - 2004/05
WBF	1983/84 - 1987/88 1991/92 - 2004/05	P10	1991/92 - 2004/05
KWF	1967/68 - 2004/05		

Tab. 3: Zeitraum der zur Verfügung stehenden Klimadaten.

	Lufttemperatur (T)		Niederschlagssumme (NS)	
	Tagesmittel	Monatsmittel	Tagessumme	Monatssumme
Vent	01.01.1950 - 31.12.2004	Jän. 1950 - Jul. 2006	01.05.1997 - 31.12.2004	Jän. 1950 - Jul. 2006
Weißbrunn	01.01.1983 - 06.12.2006	Jän. 1983 - Nov. 2006	01.01.1961 - 04.12.2006	Jän. 1961 - Nov. 2006
Marienberg	01.01.1967 - 28.11.2006	Jän. 1967 - Okt. 2006	01.01.1924 - 29.11.2006	Jän. 1924 - Okt. 2006

6.3 Überprüfung der Datensätze und Rekonstruktionen von fehlenden Daten

Um systematische Fehler zu vermeiden, mussten manche Datenreihen genauer „unter die Lupe“ genommen werden. Weiters galt es aus Messdaten neue Datensätze zu berechnen, die ihrerseits erst eine Grundlage zur Beantwortung der gestellten Fragen bilden.

6.3.1 Überprüfung der Lufttemperatur in Weißbrunn

Während die Reihen von Niederschlag und Temperatur in Vent und Marienberg als zuverlässig gelten, so machte ein markantes Abfallen der Temperaturen in Weißbrunn zu Mitte der 1990er Jahre eine Überprüfung dieser Aufzeichnungen ratsam. Dabei wurden die Daten der Stationen Marienberg (Vinschgau), Weißbrunn (automatische Aufzeichnungen und Ablesungen des Stationswartes der ENEL) St. Pankraz, Pawigl, Grünsee (Ultental), Zufritt (Martelltal), und Vent (hinteres Ötztal) aufgeteilt nach Jahreszeiten graphisch miteinander verglichen. Da die Lufttemperatur in den Datenauswertungen zu Temperatursummen positiver Gradtage addiert wird, die auf der Seehöhe des Pegels P10 im Wesentlichen die Sommertemperaturen umfassen, zeigt Abb. 20 die mittleren Sommertemperaturen der erwähnten Stationen (Vergleich der anderen Jahreszeiten siehe Anhang B). Die Kurven der automatischen Aufzeichnungen (Wbrunn) und der Aufzeichnungen des Stationswärters (Wbrunn_B) verlaufen bis auf wenige Ausnahmen exakt deckungsgleich. Qualitativ zeigen auch die Daten der in der Nähe liegenden Stationen das gleiche Muster des Temperaturverlaufes. Die kurzfristige Abkühlung, die um das Jahr 1996 ihren Höhepunkt erreicht, ist also ein Phänomen, das besonders das Ultental betrifft, aber auch noch im Raum Vinschgau - hinteres Ötztal zu verzeichnen ist.

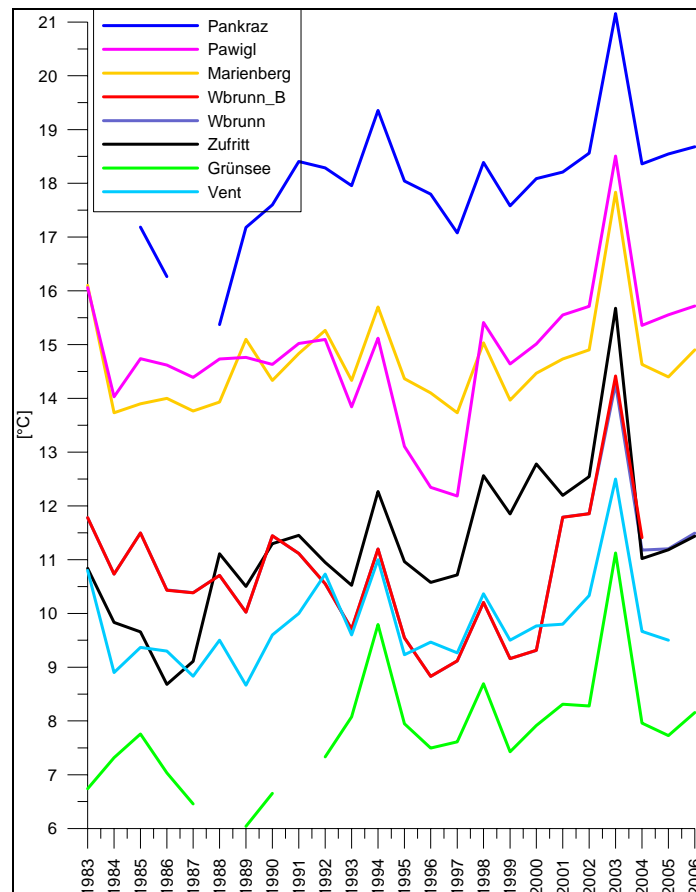


Abb. 20: Die mittleren Lufttemperaturen im Sommer (VI - VIII) der im Text angeführten Stationen im und um das Ultental. Lage der Stationen siehe Abb. 21.

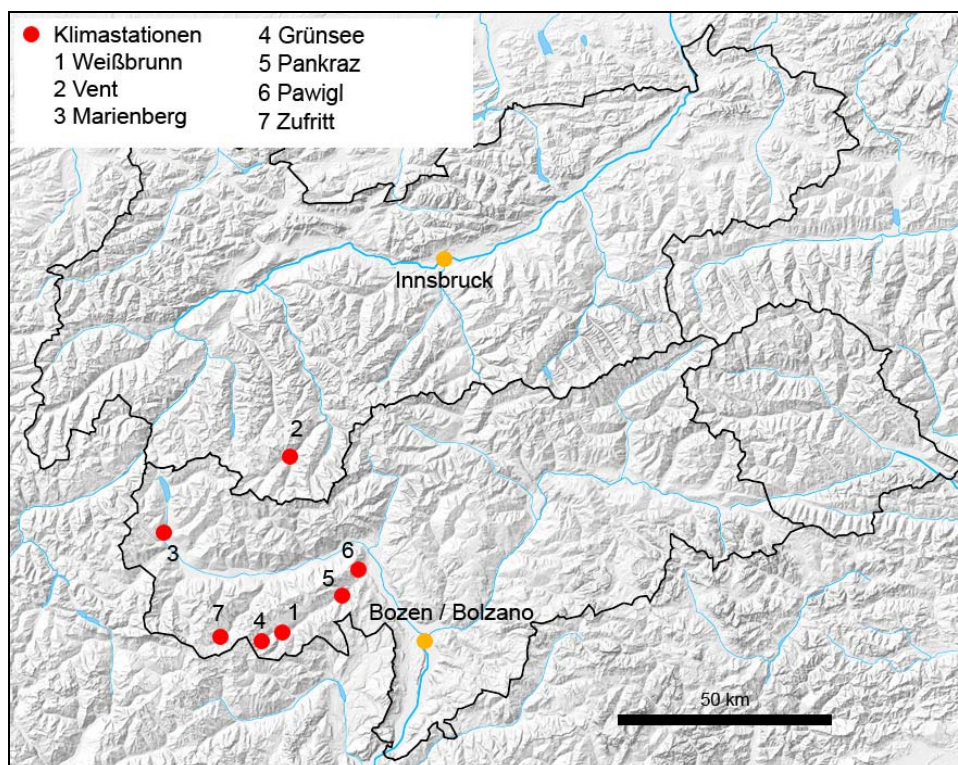


Abb. 21: Lage der verwendeten Klimastationen zur Überprüfung der Lufttemperatur in Weißbrunn. Quelle: IGI, Tirol Atlas.

6.3.2 Rekonstruktion der Winterbilanzen am Ablationspegel L6

Zur näheren Analyse der Massenbilanzwerte des HEF im Zusammenhang mit dem vorherrschenden Klima sind Kenntnisse von Akkumulation und Ablation nötig. Im Gegensatz zum WBF werden am HEF aber keine Messungen der Akkumulationsmaxima durchgeführt. Zur Erreichung der Ziele der Diplomarbeit sind insbesondere Kenntnisse der maximalen Schneehöhe bei Pegel L6 wichtig.

Erste Berechnungen der Winterbilanz zeigten Hofinger and Kuhn (1996), die jene als Restglied aus der gemessenen Jahresbilanz und der modellierten Sommerbilanz bestimmten. Bortenschlager (2006) rekonstruierte die Winterbilanzen am HEF für die Jahre 1992/93 - 2004/05 aus Schneehöhensondierungen der „Regenmesserrunden“, die je nach Witterung Anfang April und/oder Anfang Juni durchgeführt werden, um die Totalisatoren im Umfeld des HEF abzulesen. Dabei wurden die Schneehöhen entlang des Längsprofils des HEF sondiert. Diese Schneehöhen konnten mit rekonstruierten Dichtewerten (Matzi 2004) in Zusammenhang gesetzt, mit Niederschlagsdaten aus Vent für den Zeitraum 01.10. - 31.05. korrigiert und räumlich ausgewertet werden. Stuefer (1994) und Kerschner (1997) verweisen jedoch auf eine bessere Niederschlags-Massenbilanz (HEF) Korrelation mit Niederschlagsdaten aus Marienberg. Zugunsten der Beibehaltung der Systematik von Bortenschlager (2006) wird dennoch mit den Niederschlagsdaten aus Vent gerechnet, die nur unwesentlich von den Werten aus Marienberg abweichen (Tab. 7).

Für die vorliegenden Auswertungen wurde der Wasserwert der sondierten Schneehöhen (Bortenschlager 2006) in der Umgebung von Pegel L6 (als Mittelwert der zwei bis drei nächstliegenden Sondierungen) mit den entsprechenden Dichtewerten (Matzi 2004) errechnet und mit Niederschlagsdaten aus Vent für den Zeitraum 01.10. - 31.05. korrigiert. Dabei zeigte sich im Durchschnitt der gesamten Periode 1993 - 2005 ein Wasserwert der Schneedecke am Pegel L6, der das 2,04-fache des Niederschlags in Vent beträgt. Bei näherer Betrachtung ändert sich dieser Faktor aber je nach Niederschlagsmenge. In feuchten Wintern ($NS(X-V) > 450$ mm) ist dieses Verhältnis im Mittel größer (2,71) als in trockenen Wintern ($NS(X-V) < 450$ mm), in denen bei L6 nur das 1,77-fache des Niederschlags in Vent zu verzeichnen ist (Abb. 22). In weiterer Folge konnte nun analog der Vorgehensweise zu Bortenschlager (2006) der Wasserwert der Schneedecke bei L6 für die Jahre vor 1993 aus dem Niederschlag von Vent (Oktober bis Mai) multipliziert mit den entsprechenden Faktoren rekonstruiert werden (Tab. 4). Einerseits werden die Akkumulationswerte durch die Wahl des Schwellenwertes und der Faktoren stark gespreizt (Abb. 23),

andererseits werden dadurch Jahre mit besonders hohen Schneeniederschlägen besser wiedergegeben und somit auch höhere Korrelationen erreicht als ohne Einführung dieses Schwellenwertes (Abb. 22).

Obwohl die Korrelation dieser rekonstruierten Werte zu den gemessenen Werten nicht besonders hoch ist (Abb. 23 und Tab. 4), wurde der Winterniederschlag mit dieser Methode für den Pegel L6 für die Jahre 1972 - 1992 bestimmt. Ab 1993 wurden die Messwerte aus der Arbeit von Bortenschlager (2006) verwendet.

Zur klimatologischen Beschreibung der Akkumulation dienen die am Pegel gemessenen Schneehöhen bzw. Winterbilanzen, die aus den Niederschlagssummen der Winterhalbjahre (Oktober - Mai) rekonstruiert wurden. Durch die Probleme der Niederschlagsmessung an sich und den mitunter starken Einflüssen der Topographie und des Windes auf die Schneedeckung im Hochgebirge sind diese Akkumulationsbeträge mit einigen Fehlern behaftet (Sevruck 1986), werden aber in dieser Arbeit dennoch ohne Korrekturen vor allem zur Berechnung von Schneeablationsraten verwendet.

Tab. 4: Auflistung des Winterniederschlages in Vent, der Schneehöhen bei Pegel L6 nach Bortenschlager (2006), des Umrechnungsfaktors Winterniederschlag - Schneehöhe und der rekonstruierten Schneehöhe.

Jahr	Vent (X-V)	L6 Bort.	Faktor	L6 rek.
1971/72	286		1,77	506
1972/73	289		1,77	512
1973/74	389		1,77	689
1974/75	383		1,77	678
1975/76	242		1,77	428
1976/77	529		2,71	1434
1977/78	325		1,77	575
1978/79	337		1,77	596
1979/80	387		1,77	685
1980/81	428		1,77	758
1981/82	309		1,77	547
1982/83	458		2,71	1241
1983/84	325		1,77	575
1984/85	282		1,77	499
1985/86	366		1,77	648
1986/87	332		1,77	588
1987/88	300		1,77	531
1988/89	292		1,77	517
1989/90	289		1,77	512
1990/91	308		1,77	545
1991/92	461		2,71	1249
1992/93	407	594	1,77	721
1993/94	507	1152	2,71	1373
1994/95	385	907	1,77	681
1995/96	276	568	1,77	488
1996/97	422	497	1,77	747
1997/98	362	634	1,77	641
1998/99	487	774	2,71	1319
1999/00	444	378	1,77	786
2000/01	529	1456	2,71	1433
2001/02	457	1307	2,71	1237
2002/03	393	886	1,77	696
2003/04	448	1323	1,77	794
2004/05	322	716	1,77	570
Mittelwert	375	861		759
Stabw	79	348		309

Vent (X-V): Niederschlagssumme in Vent (Oktober - Mai) [mm]
L6 Bort.: Schneehöhe nach Bortenschlager bei Pegel L6 [mm we]
L6 rek.: rekonstruierte Schneehöhe bei Pegel L6 [mm we]

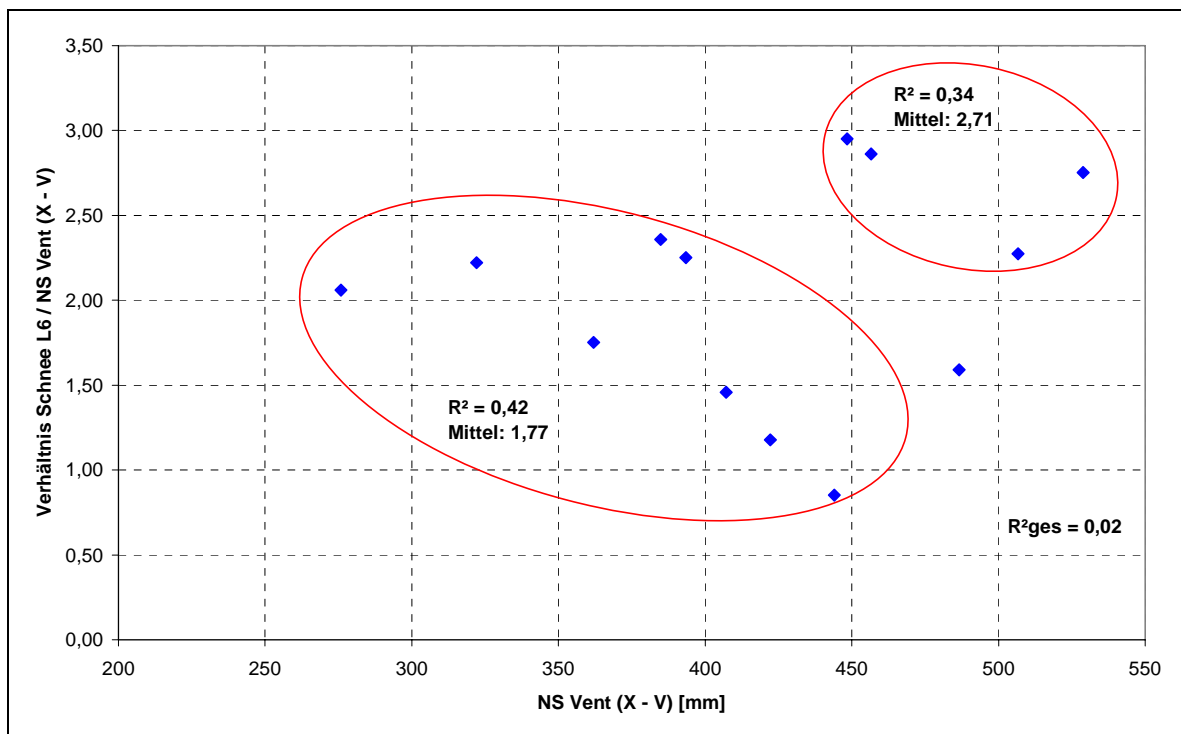


Abb. 22: Korrelation des Winterniederschlages (X - V) in Vent mit dem Verhältnis aus Schneehöhe bei Pegel L6 zum Winterniederschlag (X - V) in Vent für die Jahre 1993 - 2005.

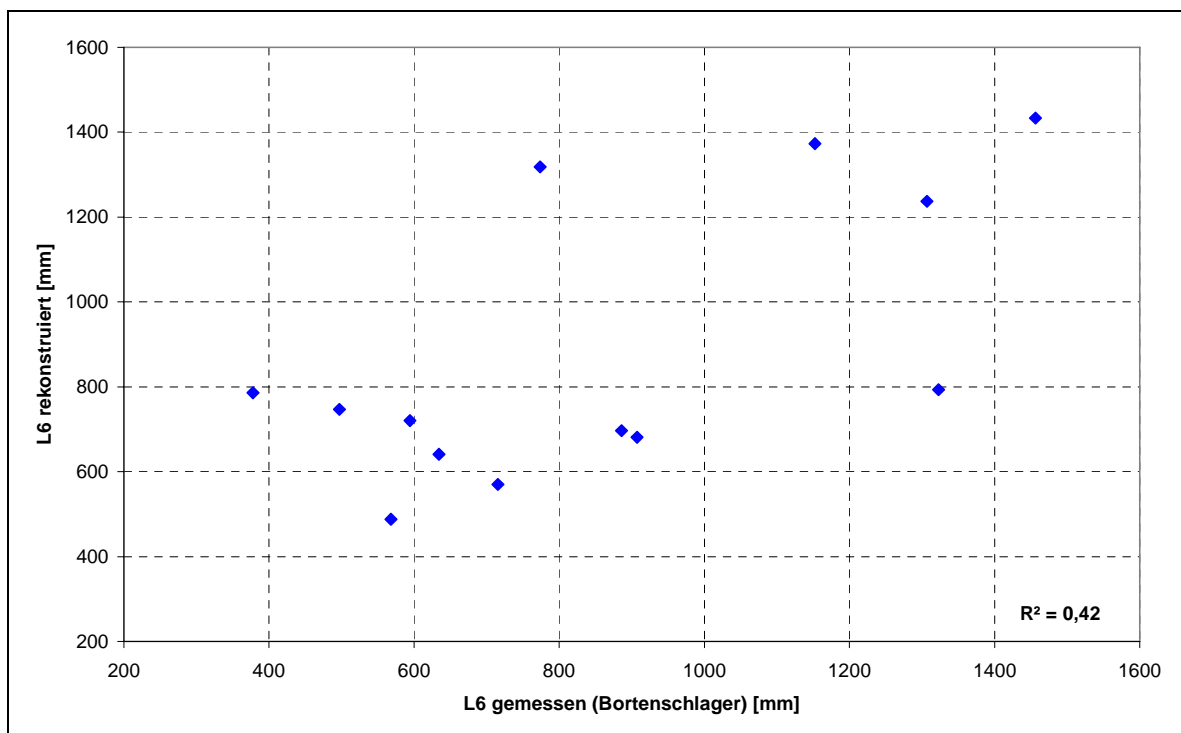


Abb. 23: Korrelation der gemessenen Werte der Schneehöhe von Bortenschlager (2006) mit den aus Niederschlagsdaten von Vent rekonstruierten Schneehöhen jeweils bei L6. Die Spreizung der Werte (um 700 und 1300 mm) wird hier ersichtlich.

6.3.3 Lufttemperaturen in der Höhenlage der Ablationspegel

Zum Vergleich der Lufttemperatur auf der Seehöhe der Pegel wurden die Temperaturwerte der Talstationen in die Höhe extrapoliert. Die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur der Stationen Vent und Weißbrunn (beide auf 1900 m) wurden jeweils auf die Höhenlage der Ablationspegel (L6: 2770 bzw. P10: 3070 m) gerechnet. Dazu wurde ein in den Sommermonaten allgemein gebräuchlicher Gradient von $-0,6^{\circ}\text{C}$ pro 100 m Höhendifferenz verwendet (Dreiseitl 1973, Kuhn et al. 1999, Kuhn 2003). Für die Jahre 1969 - 1978 wurde beispielsweise ein mittlerer Temperaturgradient von Vent (1900 m) bis zur Station Hintereis (3030 m) von $-0,61^{\circ}\text{C}$ pro 100 m in den Monaten Juni - September gemessen (Kuhn et al. 1979). Jahreszeitliche Unterschiede im Temperaturgradienten, wie sie von Kuhn et al. 1979 berichtet werden, werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Die wenigen Zehntel Grade verursachen vor allem im Winter keine Veränderung der positiven Temperatursummen, da die Tagesmittel der Lufttemperatur an den Stationen in den Wintermonaten ohnehin weitgehend unter dem Gefrierpunkt liegen. Somit ergibt sich eine Reduktion der Lufttemperatur um $-5,2^{\circ}\text{C}$ von Vent zum Pegel L6 und um $-7,0^{\circ}\text{C}$ von Weißbrunn zum Pegel P10. Tage mit positiven Mittelwerten der Lufttemperatur auf der Höhe der Pegel werden als positive Gradtage bezeichnet und im folgenden Kapitel meist zu jährlichen Temperatursummen ($\sum T+$) addiert dargestellt.

Die Verringerung des Höhenunterschiedes von der Messstation zum Ablationspegel aufgrund des gemessenen Einsinkens der Gletscheroberfläche von ca. 50 m beträgt übertragen auf eine Temperaturzunahme rund $0,3^{\circ}\text{C}$. Angenommen man berechnet die Lufttemperatur am Pegel L6 ab 1992 (da diese „Erwärmung“ ja nur langsam und besonders im letzten Jahrzehnt mit stark negativen Massenbilanzen eingetreten ist) mit einem Gradienten von $-4,9^{\circ}\text{C}$ (anstelle von $-5,2^{\circ}\text{C}$) so ergibt sich eine Zunahme der Temperatursumme der positiven Gradtage der gesamten Reihe von lediglich 1,7%. Dieser „Erwärmungseffekt“ durch das Einsinken der Gletscheroberfläche wird somit vernachlässigt.

Bereits 1887 verweisen Finsterwalder und Schunck auf die Proportionalität der Ablation zur *„schneefreien Zeit und der mittleren Temperatur über dem Gefrierpunkt während derselben.“* Temperatursummen positiver Gradtage gerechnet auf die Seehöhe der Pegel skizzieren hier qualitativ die Ablationsenergie, auch wenn das Schmelzen von Schnee und Eis physikalisch betrachtet nicht nur von der Lufttemperatur, sondern von allen Variablen der Energiebilanz einer Schnee- oder

Eisoberfläche, vor allem vom Strahlungshaushalt, abhängt. Jedoch ist die Lufttemperatur leicht zu messen, räumlich homogen verteilt, korreliert statistisch gut zur Ablation und integriert - je nach Messstandort - Einflüsse lang- und kurzwelliger Strahlung sowie der turbulenten Energieflüsse (Ohmura 2001). Darauf beruht die Gradtagmethode, die unter der Annahme einer konstanten Oberflächentemperatur von 0°C den fühlbaren Wärmestrom mittels der Temperatursumme der positiven Gradtage und dem Gradtagfaktor in einem beliebigen Zeitraum parametrisiert. Kuhn (1984) gibt ausführliche, auf der Energiebilanz der Gletscheroberfläche basierende Erklärungen zur Funktionsweise des Gradtagmodells.

Hoinkes und Steinacker (1975) verfeinern dieses Gradtagmodell am HEF zur TS-Methode, in der Niederschlag und Albedoänderung berücksichtigt werden.

Tab. 7 zeigt die entsprechenden Werte der Jahresmittel der Lufttemperatur, der Niederschlagssummen im Winter (Oktober - Mai) und im HHJ, sowie die jährliche Temperatursumme der positiven Gradtage auf der Seehöhe der Ablationspegel.

6.4 Zusammenfassender statistischer Überblick

Dieses Kapitel zeigt die Messwerte der Bilanzen der Gletscher und Pegel im tabellarischen Überblick. Die Werte dieser Tabellen finden Eingang in die Graphen von Kapitel 7. Korrelationstabellen stellen statistische Zusammenhänge zwischen den Massenbilanzen aber auch zu den Klimadaten dar (Tab. 8 und Tab. 9).

Tab. 5: Charakteristische Messwerte an den Ablationspegeln und Klimastationen: Eisablation (b_{ia}), Pegelbilanzen im HHJ (b_i) und der entsprechenden Halbjahre (b_{iW} , b_{iS}), Winterniederschlagssummen in den Monaten Oktober bis Mai (X-V) und Temperatursummen der positiven Gradtage pro Jahr ($\Sigma T+$) in der Seehöhe der Ablationspegel.

Jahr	L6				Vent		P10				Weißbrunn	
	b_{ia}	b_i	b_{iW}	b_{iS}	X-V	$\Sigma T+$	b_{ia}	b_i	b_{iW}	b_{iS}	X-V	$\Sigma T+$
	[mm we]				[mm]	[°C]	[mm we]				[mm]	[°C]
1971/72	0	40	506	-466	286	436						
1972/73	-2160	-2060	512	-2572	289	647						
1973/74	-342	-362	689	-1051	389	527						
1974/75	-468	-581	678	-1259	383	581						
1975/76	-1026	-883	428	-1311	242	531						
1976/77	0	-50	1434	-1484	529	520						
1977/78	0	-30	575	-605	325	454						
1978/79	-1053	-1183	596	-1779	337	544						
1979/80	-477	-488	685	-1173	387	492						
1980/81	-1044	-993	758	-1751	428	624						
1981/82	-2223	-2333	547	-2880	309	734						
1982/83	-1224	-1224	1241	-2465	458	746						
1983/84	-657	-629	575	-1204	325	470						
1984/85	-1512	-1612	499	-2111	282	665						
1985/86	-1737	-1710	648	-2358	366	739						
1986/87	-1620	-1647	588	-2235	332	625						
1987/88	-1926	-1773	531	-2304	300	658						
1988/89	-1143	-1296	517	-1813	292	576						
1989/90	-2097	-2097	512	-2609	289	625						
1990/91	-2682	-2682	545	-3227	308	663						
1991/92	-1926	-1926	1249	-3175	461	735	-2016	-1951	753	-2704	511	427
1992/93	-1800	-1700	594	-2294	407	634	-1233	-1136	957	-2093	577	316
1993/94	-2475	-2575	1152	-3727	507	804	-1953	-2022	1162	-3184	753	469
1994/95	-1377	-1274	907	-2181	385	610	-1071	-972	522	-1494	503	360
1995/96	-2277	-2317	568	-2885	276	538	-1051	-1114	546	-1660	343	241
1996/97	-1881	-1971	497	-2468	422	677	-1224	-1200	768	-1968	575	348
1997/98	-3024	-3030	634	-3664	362	686	-2088	-2131	794	-2925	523	375
1998/99	-2070	-2190	774	-2964	487	670	-1476	-1383	1093	-2476	585	303
1999/00	-2070	-2070	378	-2448	444	659	-1278	-1228	990	-2218	626	286
2000/01	-1584	-1484	1456	-2940	529	680	0	200	2244	-2044	1192	580
2001/02	-2187	-2207	1307	-3514	457	636	-959	-890	748	-1638	612	530
2002/03	-3267	-3347	886	-4233	393	936	-3030	-2961	1089	-4050	714	794
2003/04	-1701	-1651	1323	-2974	448	644	-1071	-1071	1228	-2299	700	518
2004/05	-2592	-2642	716	-3358	322		-1782	-1739	699	-2438	573	555
Mittelwert	-1577	-1588	750	-2338	375	629	-1445	-1400	971	-2371	628	436
Stabw	858	866	313	919	79	105	707	740	428	685	192	149

$\Sigma T+$ sind Werte der Klimastation bezogen auf den entsprechenden Pegel: L6: Vent; P10: Weißbrunn

Tab. 6: Mittlere spezifische Massenbilanzen [mm we] des HEF, WBF und KWF nach HHJ (b_m) und entsprechenden Halbjahren (b_{mW} bzw. b_{mS}).

[mm we]	HEF			WBF			KWF
Jahr	b_m	b_{mW} ¹⁾	b_{mS}	b_m	b_{mW}	b_{mS}	b_m
1952/1953	-540	860	-1400				
1953/1954	-286	374	-660				
1954/1955	76	706	-630				
1955/1956	-275	685	-960				
1956/1957	-189	511	-700				
1957/1958	-981	599	-1580				
1958/1959	-763	677	-1440				
1959/1960	-62	628	-690				
1960/1961	-205	1705	-1910				
1961/1962	-696	584	-1280				
1962/1963	-603	727	-1330				
1963/1964	-1244	696	-1940				
1964/1965	925	1385	-460				
1965/1966	344	1184	-840				594
1966/1967	20	1140	-1120				297
1967/1968	338	858	-520				464
1968/1969	-431	549	-980				-152
1969/1970	-552	748	-1300				5
1970/1971	-600	800	-1400				43
1971/1972	-74	326	-400				368
1972/1973	-1229	671	-1900				-383
1973/1974	55	1105	-1050				573
1974/1975	65	1285	-1220				369
1975/1976	-314	526	-840				-37
1976/1977	760	1460	-700				701
1977/1978	411	1191	-780				422
1978/1979	-219	751	-970				68
1979/1980	-50	1140	-1190				162
1980/1981	-173	1087	-1260				162
1981/1982	-1240	790	-2030				-620
1982/1983	-580	1780	-2360				-182
1983/1984	32	1102	-1070	395	1375	-980	178
1984/1985	-574	1286	-1860	-642	1640	-2282	-9
1985/1986	-732	1178	-1910	-107	1475	-1582	-495
1986/1987	-717	1183	-1900	-466	924	-1390	-243
1987/1988	-945	805	-1750	-1096	1064	-2160	-264
1988/1989	-637	563	-1200				-151
1989/1990	-995	485	-1480				-264
1990/1991	-1325	1035	-2360				-851
1991/1992	-1120	1050	-2170	-1090	844	-1934	-413
1992/1993	-573	857	-1430	-550	968	-1518	-75
1993/1994	-1107	1104	-2211	-950	1146	-2096	-828
1994/1995	-461	1041	-1502	-680	503	-1183	144
1995/1996	-827	1090	-1917	-450	534	-984	-79
1996/1997	-591	1053	-1644	-620	829	-1449	11
1997/1998	-1230	1046	-2276	-1610	863	-2473	-604
1998/1999	-861	1318	-2179	-970	995	-1965	-12
1999/2000	-633	768	-1401	-740	1134	-1874	140
2000/2001	-173	1335	-1508	395	2206	-1811	524
2001/2002	-647	1297	-1944	-430	784	-1214	17
2002/2003	-1814	1092	-2906	-2950	1115	-4065	-1546
2003/2004	-667	1328	-1995	-994	983	-1977	-189
2004/2005	-1061	1050	-2111	-2215	774	-2989	-59
Mittelwert	-490	955	-1445	-830	1061	-1891	-55
Stabw	545	326	581	795	398	740	443

¹⁾ bis 1993: Hofinger and Kuhn (1996); ab 1993: Bortenschlager (2006)

Tab. 7: Jahresmittel der Lufttemperatur (T), Niederschlagssumme in den Wintermonaten Oktober bis Mai (NS (XV)) und im HHJ (NS (HHJ)) der Klimastationen und Temperatursumme der positiven Gradtage pro Jahr ($\Sigma T+$) in der Seehöhe der Ablationspegel.

Jahr	Vent			L6	Weißbrunn			P10	Marienberg		
	T [°C]	NS (X-V) [mm]	NS (HHJ) [mm]	$\Sigma T+$ [°C]	T [°C]	NS (X-V) [mm]	NS (HHJ) [mm]	$\Sigma T+$ [°C]	T [°C]	NS (X-V) [mm]	NS (HHJ) [mm]
1950	2,3			712						413	717
1951	2,5	482	743	685						467	779
1952	1,4	272	585	664						246	577
1953	2,0	346	675	693						301	666
1954	0,9	317	759	456						307	851
1955	1,3	384	667	489						373	628
1956	0,2	246	669	557						259	610
1957	1,8	296	747	507						238	646
1958	1,7	271	581	666						346	675
1959	2,1	373	594	580						370	580
1960	1,5	306	752	515						379	876
1961	2,4	373	573	667						560	726
1962	0,5	336	527	560		646	918			370	526
1963	0,9	295	600	583		612	996			295	662
1964	1,7	226	485	599		500	743			337	529
1965	0,7	379	837	444		532	1112			349	859
1966	1,5	283	727	567		364	811			288	651
1967	1,6	418	722	585		714	1133		6,7	447	765
1968	1,4	234	605	464		526	978		6,3	481	834
1969	0,9	265	554	583		672	961		6,0	325	582
1970	0,8	255	596	550		425	764		6,1	348	665
1971	1,3	262	542	545		545	758		6,8	361	561
1972	1,5	286	620	436		537	968		6,0	301	599
1973	1,2	289	601	647		283	788		6,4	225	600
1974	1,3	389	717	527		522	812		6,4	288	594
1975	1,6	383	777	581		711	1083		6,8	333	685
1976	1,2	242	562	531		436	918		6,3	215	518
1977	2,0	529	847	520		1239	1596		6,6	596	940
1978	1,4	325	554	454		624	894		6,4	378	607
1979	1,1	337	648	544		583	886		6,4	389	671
1980	0,8	387	569	492		578	868		6,1	464	705
1981	1,4	428	782	624		695	1298		6,5	378	786
1982	2,4	309	619	734		400	826		7,0	290	712
1983	2,5	458	646	746	4,2	979	1230	591	7,4	660	874
1984	1,1	325	535	470	2,9	619	993	429	5,5	394	589
1985	1,6	282	587	665	3,7	712	1075	661	5,9	329	639
1986	1,6	366	621	739	3,2	772	1161	533	5,9	378	724
1987	1,6	332	638	625	3,6	488	990	532	6,2	243	663
1988	2,2	300	580	658	3,4	640	1081	470	6,4	310	608
1989	2,5	292	575	576	4,1	690	1096	415	7,9	353	572
1990	2,3	289	524	625	4,0	394	693	563	7,1	373	629
1991	1,7	308	518	663	2,8	680	1028	503	6,1	349	613
1992	2,4	461	714	735	3,3	511	985	427	7,1	390	763
1993	2,1	407	694	634	2,4	577	1086	316	6,4	355	676
1994	3,3	507	802	804	3,4	753	1193	469	7,4	536	915
1995	1,9	385	721	610	2,0	503	932	360	6,1	279	561
1996	1,5	276	608	538	1,5	343	753	241	5,7	181	538
1997	2,6	422	721	677	3,3	575	1035	348	6,9	362	696
1998	2,1	362	747	686	2,3	523	955	375	6,6	301	658
1999	2,0	487	873	670	2,0	585	993	303	6,3	406	819
2000	2,6	444	860	659	2,4	626	1155	286	6,8	403	812
2001	2,1	529	926	680	3,8	1192	1685	580	6,4	641	1076
2002	2,8	457	815	636	4,1	612	1082	530	7,0	298	634
2003	2,5	393	592	936	4,1	714	982	794	7,2	396	603
2004	1,9	448	700	644	3,4	700	980	518	6,5	325	577
2005	1,1	322	612		3,0	573	935	555	6,1	287	410
Mittelwert	1,7	352	663	608	3,2	611	1005	469	6,5	362	679
Stabw	0,6	80	104	98	0,8	186	198	131	0,5	98	123

Tab. 8: Überblick der Korrelationen der einzelnen Massenbilanzdaten. Mittlere spezifische Massenbilanz (b_m), Eisablation an den Pegeln (b_{ia}) und Pegelbilanz (b_i).

	R^2	HEF			WBF			KWF
		b_m	b_i	b_{ia}	b_m	b_i	b_{ia}	b_m
HEF L6	b_m	1	0,85	0,86	0,79	0,93	0,92	0,81
	b_i		1	0,96	0,63	0,58	0,58	0,63
	b_{ia}			1	0,65	0,64	0,62	0,63
WBF P10	b_m				1	0,78	0,81	0,50
	b_i					1	0,99	0,83
	b_{ia}						1	0,83
KWF	b_m							1

Tab. 9: Erklärte Varianzen der Eisablation am Pegel (b_{ia}), der Pegelbilanz (b_i) sowie der saisonalen Pegelbilanzen (b_{iW} , b_{iS}) zur Winterniederschlagssumme der Monate Oktober bis Mai ($X-V$) und zur Temperatursumme der positiven Gradtage pro Jahr in der Seehöhe des Ablationspegels ($\Sigma T+$).

	R^2	L6			
		b_{ia}	b_i	b_{iW}	b_{iS}
Vent	$X-V$		0,00	0,62	
	$\Sigma T+$	0,61	0,65		0,72

	R^2	P10			
		b_{ia}	b_i	b_{iW}	b_{iS}
Weißbrunn	$X-V$		0,15	0,91	
	$\Sigma T+$	0,12	0,09		0,33

Tab. 10: Erklärte Varianzen von saisonalen mittleren spezifischen Massenbilanzen (b_m , b_{mW} bzw. b_{mS}), Eisablation an den Pegeln (b_{ia}) und Pegelbilanz (b_i , b_{iW} bzw. b_{iS}).

	R^2	HEF			WBF			KWF
		b_m	b_{mW}	b_{mS}	b_m	b_{mW}	b_{mS}	b_m
HEF	b_m	1	0,03	0,70	0,79	0,12	0,59	0,81
	b_{mW}		1	0,15	0,05	0,11	0,00	0,01
	b_{mS}			1	0,62	0,04	0,54	0,64
WBF	b_m				1	0,15	0,75	0,50
	b_{mW}					1	0,02	0,03
	b_{mS}						1	0,45
KWF	b_m							1

	R^2	L6				P10			
		b_{ia}	b_i	b_{iW}	b_{iS}	b_{ia}	b_i	b_{iW}	b_{iS}
L6	b_{ia}	1	0,99	0,00	0,88	0,62	0,64	0,03	0,56
	b_i		1	0,00	0,88	0,63	0,65	0,04	0,56
	b_{iW}			1	0,11	0,05	0,06	0,26	0,00
	b_{iS}				1	0,41	0,41	0,01	0,58
P10	b_{ia}					1	0,99	0,14	0,70
	b_i						1	0,17	0,68
	b_{iW}							1	0,03
	b_{iS}								1

7 Ergebnisse und Diskussion

Das folgende Kapitel zeigt Gletscher-Klima-Zusammenhänge für den HEF, WBF und KWF und beantwortet die in Kapitel 4 gestellten Fragen.

Der Vergleich wichtiger glaziologischen Kenndaten der Gletscher untereinander beschreibt die Gletscher abhängig von klimatischen (und topographischen) Einflüssen. In weiterer Folge sollen aus einer inversen Sichtweise durch die Gegenüberstellung von mittleren spezifischen Massenbilanzen (b_m) und Eisablation am Ablationspegel (b_{ia}) zu jährlichen Temperatursummen positiver Gradtage (ΣT^+) und Winterniederschlagssummen (NS_{X-V}) vor allem aber klimatologische Informationen aus b_m und b_{ia} gewonnen werden. Die klimatischen Bedingungen der letzten Jahrzehnte können damit in Phasen gegliedert, der Informationsgehalt von b_m und b_{ia} differenziert und durch veränderte Längen und Intensitäten von Ablationsperioden begründet werden.

Der Vergleich HEF und KWF soll die eingangs erwähnten langsam und schnell reagierenden Gletscher skizzieren, unter der Annahme, Pegel L6 wäre ein Ablationspegel des in unmittelbarer Nachbarschaft liegenden KWF, wengleich bewusst ist, dass das Vorfeld des KWF auf der Seehöhe von L6 eisfrei ist und wesentlich andere Geländevariablen, wie Exposition und Hangneigung, aufweist. Klimadaten von Marienberg ermöglichen einerseits, die Ergebnisse ausgehend von einer kleinräumig-lokalen Ebene in einer übergeordneten regionalen Ebene zu sehen, da Temperatur und Niederschlag qualitativ gleich zu Vent und Weißbrunn verlaufen und führen andererseits die Überlegungen von Kerschner (1997) weiter, der die Höhe der ELA am HEF mit dem Niederschlag in Marienberg korreliert.

Die folgenden Abbildungen bedienen sich der Werte aus den in Kapitel 6 vorgestellten Tabellen und sind zur einfacheren Visualisierung zum Teil als gewichtete (0,25 - 0,5 - 0,25) gleitende (3 Jahre übergreifend) Mittel dargestellt.

7.1 Vergleiche der mittleren spezifischen Massenbilanzen und der Eisablation der Pegel auf HEF, WBF und KWF

Abb. 16, Abb. 17, Abb. 24 und Abb. 25 zeigen den streng synchronen Verlauf der mittleren spezifischen Massenbilanzen und der Eisablation der Pegel am HEF, WBF und KWF. Klar ersichtlich sind Phasen der Massenzu- und -abnahme sowie diesbezüglich offensichtliche Ausreißerjahre wie 2001 und 2003. Jahre mit positiven b_m konzentrieren sich Mitte der 1960er und 1970er Jahre und treten am HEF nach

1984 überhaupt nicht mehr, am WBF nur einmal (2001) und am KWF noch fünfmal (1995, 1997, 2000, 2001, 2002) auf. Eine Gegenüberstellung von b_m und b_{ia} zeigt Abb. 28. Die Werte der Eisablation an den Pegeln liegen unter den Werten der mittleren spezifischen Massenbilanz. Beide Kurven (b_m wie b_{ia}) verlaufen synchron zueinander, das heißt, sie zeigen Maxima und Minima in den selben Jahren, besonders deutlich im extrem warmen Jahr 2003. Statistisch wird dieser Gleichlauf durch hohe Korrelationen (Tab. 8) unterstrichen.

Am WBF nähern sich die Kurven von b_m und b_{ia} an (Abb. 28). Nach 2002 fällt b_m am WBF immer stark negativ aus und erreicht schließlich 2005 sogar einen negativeren Wert als b_{ia} bei Pegel P10.

Sehr auffällig jedoch ist die zunehmende Differenz zwischen b_m des HEF (und KWF) und b_{ia} an Pegel L6, erkennbar an den unterschiedlichen Neigungen der Kurven. Diese Situation wird schematisch bereits in den Winkeln (α und β) in Abb. 8 angedeutet. Seit Ende der 1970er Jahre fallen b_m und b_{ia} zunehmend negativ aus und pendeln sich erst in den frühen 1990er Jahren auf niedrigem Niveau ein, wobei b_{ia} einen leicht negativen Trend beibehält und der KWF wieder einen Trend zu ausgeglichenen Massenbilanzen zeigt.

AAR (Abb. 26) und ELA (Abb. 27) verlaufen besonders am HEF und KWF ähnlich, unterscheiden sich jedoch deutlich zum WBF. Als nützliche Indikatoren einer Gletscher-Klima-Beziehung sind in AAR und ELA auch topographische Faktoren miteinbezogen. Der KWF besitzt mit seinem hoch liegenden Einzugsgebiet eine günstigste AAR, welche im stationären Zustand meist Werte um 0,67 einnimmt. Dieser für Alpengletscher im Gleichgewicht typische Wert, der eine (für Alpengletscher) typische hypsographische Kurve voraussetzt (Kerschner 1990), verdankt der KWF aber seiner speziellen Flächen-Höhen-Verteilung (hoch liegendes Einzugsgebiet, kurze steile Zunge), die nicht dem klassisch alpinen Typ des Talgletschers entspricht, aber auch bei gletschernachteiligen Klimaverhältnissen noch genügend große Akkumulationsflächen bietet. Der HEF liegt besonders nach 1979 unter diesem Wert, der WBF generell weit davon entfernt. Lediglich im Jahr 2001 verzeichnete der WBF aufgrund hoher Schneeniederschläge, die durch Winddrift verstärkt wurden, ein hohes Verhältnis der Akkumulationsfläche zur Gesamtgletscherfläche. Die überdurchschnittlich schneereichen Jahre kommen um die Jahrtausendwende klar zum Vorschein. Da die Bestimmung der AAR über die Höhe der ELA durchgeführt wird, sind diese beiden Variablen direkt von einander abhängig. So wie die AAR in den einzelnen Phasen sinkt, steigt die ELA an.

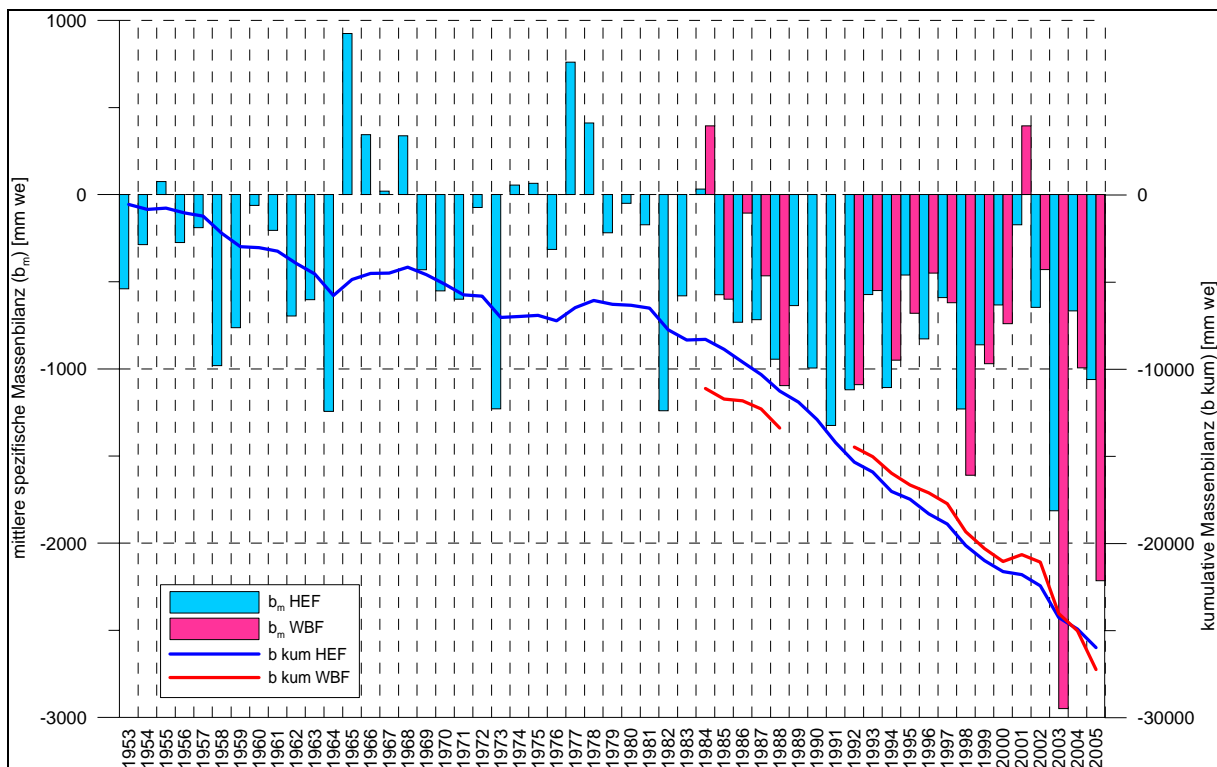


Abb. 24: Mittlere spezifische Massenbilanz (b_m) und kumulative Massenbilanz (b_{kum}) am HEF und WBF. Der Beginn der Kurve von b_{kum} am WBF wurde aus ästhetischen Gründen bei -11500 mm we angesetzt und schließt 1992 bei der Summe von 1988 an.

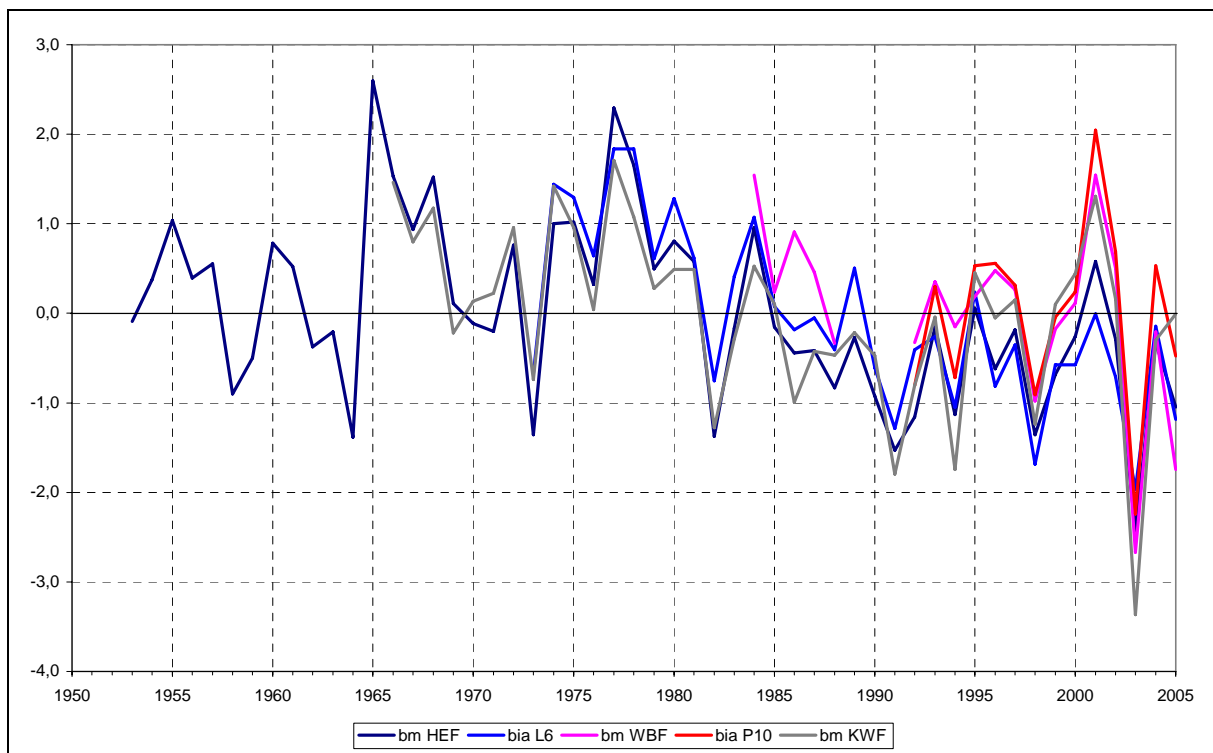


Abb. 25: Standardisierte Abweichung der mittleren spezifischen Massenbilanz (b_m) bzw. der Eisablation an den Pegeln (b_{ia}) vom Mittelwert der entsprechenden Reihe.

Tab. 11: Höhenlage der Gleichgewichtslinie und AAR im Mittel der drei Phasen.

	Höhe ELA [m]		AAR		
	HEF	KWF	HEF	KWF	WBF
Mittel I	2954	3083	0,63	0,81	
Mittel II	3068	3160	0,44	0,62	
Mittel III	3101	3168	0,38	0,59	0,11

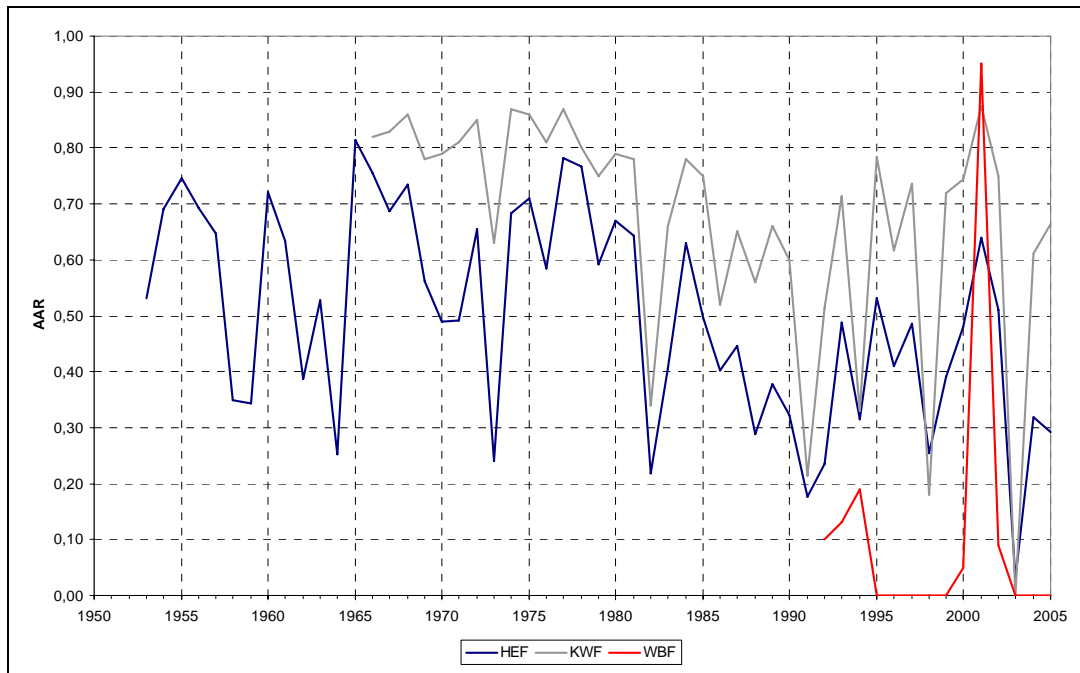


Abb. 26: AAR der betreffenden Gletscher.

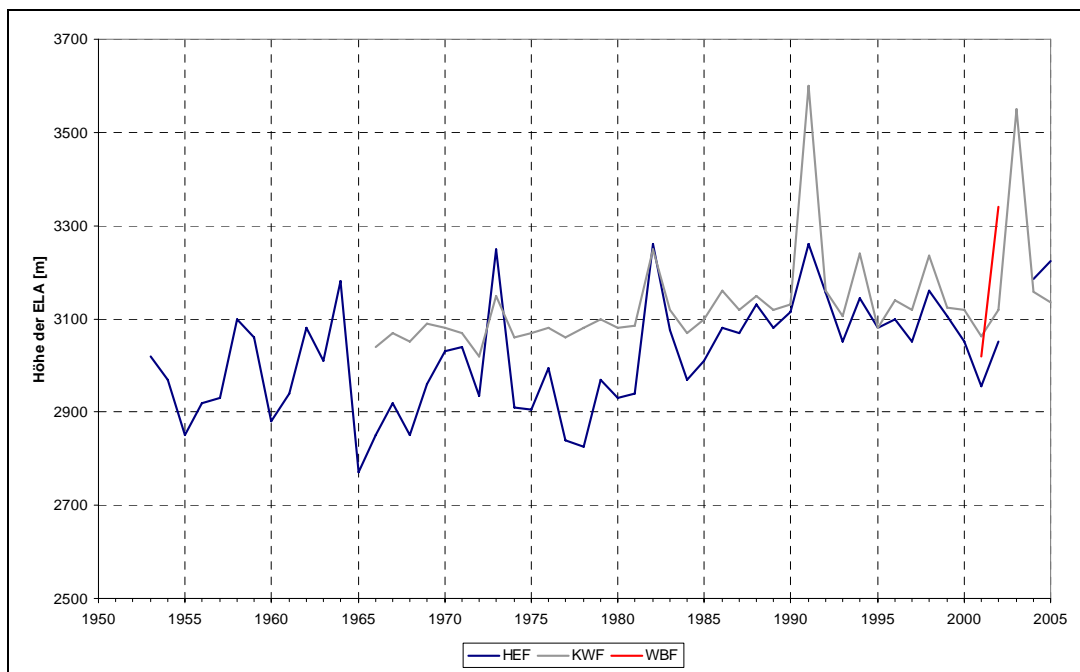


Abb. 27: Höhenlage der Gleichgewichtslinien der genannten Gletscher. In den Jahren in denen die Grafik keine ELA zeigt (HEF: 2003, WBF: 1992 - 2000 und 2003 - 2005), liegt sie über dem höchsten Punkt des Gletschers.

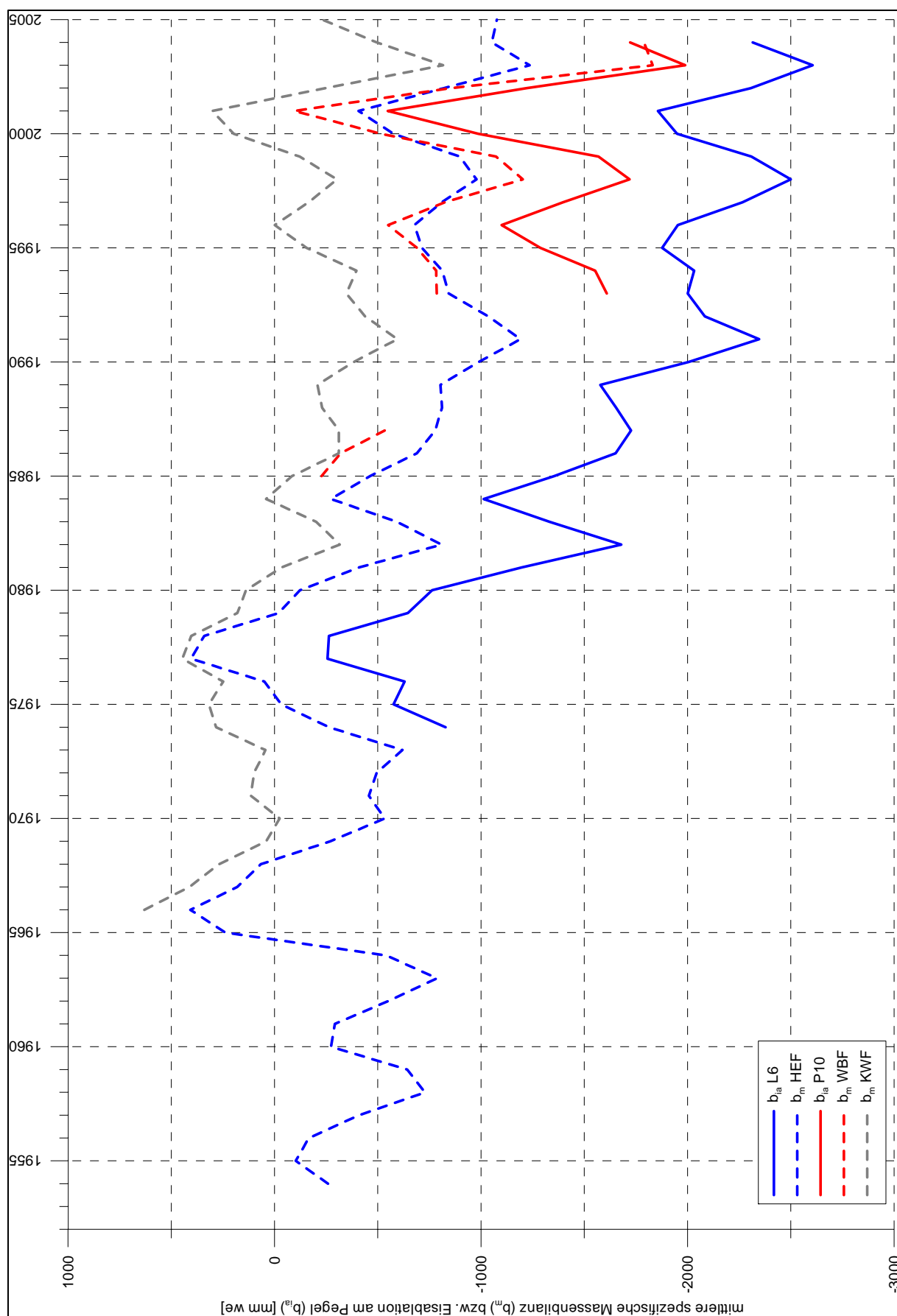


Abb. 28: Gewichtete (0,25 - 0,5 - 0,25) gleitende Mittel (3 Jahre übergreifend) der Eisablation an den Pegeln (b_{ia}) und der mittleren spezifischen Massenbilanz der Gletscher (b_m).

7.2 Die Zeitreihen der mittleren spezifischen Massenbilanzen und der Eisablation an den Pegeln im Vergleich zu Temperatur und Niederschlag

Anhand der schon kurz angerissenen Eigenschaften und Trends der Messreihen können diese in drei verschiedene Phasen differenziert und qualitativ den Parametern einer klimatischen Deutung der Ablation (jährliche Temperatursumme der positiven Gradtage) und Akkumulation (Winterniederschlagssumme in den Monaten Oktober - Mai (X-V)) gegenüber gestellt werden. Dabei zeigt sich, dass unter gewissen klimatischen Bedingungen b_m und b_{ia} einander sehr ähnlich, aber auch stark unterschiedlich sein können. Abb. 29 und Tab. 12 dienen zur Illustration des Textes und zum besseren Verständnis.

Phase I: 1973 - 1978 bzw. vor 1978:

In diesem Zeitraum zeigt sich b_m des HEF sehr ausgeglichen und pendelt etwa um das Gleichgewicht. Der KWF bilanziert fast ausschließlich positiv. Zu dieser Zeit verzeichnen Gletscher weltweit ausgeglichene und positive b_m (Greene 2005, Kaser et al. 2006). Der Verlauf der Kurve von b_{ia} bei Pegel L6 scheint parallel zur b_m des HEF verschoben. In den Jahren 1977 und 1978 gibt es keine Eisablation am Pegel L6. Die mittleren spezifischen Massenbilanzen zeigen keinen Trend, dafür aber eine hohe Variabilität.

Die jährlichen Temperatursummen positiver Gradtage auf der Höhe des Pegels L6 schwanken nur geringfügig. Die Winterniederschlagsmengen von Vent und Marienberg sind einander fast gleich, weisen eine gewisse Variabilität, aber keinen Trend auf. In Weißbrunn verläuft der Winterniederschlag ähnlich, jedoch sind die Mengen höher und die Variabilität größer. Augenscheinlich erreichen die mittleren spezifischen Massenbilanzen immer dann ein Maximum (und die Eisablation ein Minimum), wenn auch die Winterniederschläge ein Maximum zeigen. In dieser Phase können der HEF als stationär und der KWF als wachsend bezeichnet werden.

Phase II: 1979 - 1991:

Diese Periode ist durch geringer werdende Werte der b_m sowie zunehmende Ablationsbeträge am Pegel L6 gekennzeichnet. Der Trend ist (verglichen zu Phase I) bei geringerer Variabilität deutlich negativ. Nur in den ersten Jahren dieser Phase können die Gletscher noch positiv bilanzieren. Zu Beginn dieser Phase setzt das Auseinanderdriften von b_m (HEF und KWF) und b_{ia} am Pegel L6 ein. Der negative

Trend letzterer ist stärker, während die Verluste der b_m durch beginnende Anpassungen der Gletschergeometrie (in diesem Fall Verkleinerung der Oberfläche) (Tab. 14) gedämpft werden. Gleichzeitig steigen die Temperatursummen der positiven Gradtage auf der Seehöhe von Pegel L6 gegenüber der vorhergehenden Periode im Mittel um fast ein Fünftel, während die Winterniederschläge in Vent nahezu unverändert bleiben. Die erhöhten Winterniederschläge in Marienberg kommen in den Reihen von b_m und b_{ia} nicht markant zum Vorschein.

Durch die teils positiven b_m der 1970er Jahre fällt verzögert in diese Periode die Vorstoßphase zu Beginn der 1980er Jahre, die der HEF aufgrund seiner Größe und Trägheit nicht zeigte, der KWF aufgrund seiner speziellen Topographie mit einer vorrückenden Zunge (Kuhn et al. 1985, Patzelt 1985, Span 1999). Im Zusammenhang damit verliert der HEF mit Fortdauer dieser Phase bereits leicht an Fläche, während der KWF in seiner Ausdehnung noch konstant bleibt. Die zeitverzögerte Längenänderung als Klimasignal der Vergangenheit überlagert hier teilweise die Flächenänderung als unmittelbare Auswirkung des Klimas in „Echtzeit“. Davon ist auch die klimatologische Aussagekraft von b_m betroffen, während b_i unabhängig von zeitverschobenen, gletscherdynamischen Einflüssen ist.

Phase III: 1992 - 2005:

In dieser Phase sind die Trends zwischen b_m (HEF/KWF) und b_{ia} am Pegel L6 gegensätzlich. Am HEF pendelt sich b_m auf negativem Niveau mit mäßiger Variabilität ein. Der KWF kann teilweise sogar wieder ausgeglichen bilanzieren. Die Eisablation am Pegel L6 fängt sich zwar leicht, verzeichnet aber immer noch zunehmend negative Werte.

Die mittlere spezifische Massenbilanz des WBF ist jener des HEF sehr ähnlich. Die Eisablation am Pegel P10 weist aufgrund des Höhenunterschiedes von 300 m weniger starke Ablationswerte auf, zeigt aber ein ähnliches Verhalten zur Eisablation am Pegel L6, obwohl die klimatischen Treiber unterschiedlich sind. In der Höhe von Pegel L6 steigen die Temperatursummen der positiven Gradtage um fast 10% gegenüber Periode II. Bei Pegel P10 hingegen treten anfangs niedrige Temperatursummen auf, die in der Reihe von b_m wohl aufgrund geringer Winterakkumulation nicht wiedergegeben werden.

Am WBF nähern sich die Kurven von b_{ia} und b_m an (Abb. 28). Nach 2002 fällt b_m am WBF immer stark negativ aus und erreicht schließlich 2005 sogar einen geringeren Wert als b_{ia} bei Pegel P10. Dies gibt die Situation des Gletschers wieder, der in den letzten 13 Jahren (ausgenommen im Jahr 2001) kaum Akkumulationsflächen aufwies.

AAR, ELA und kumulative Massenbilanz (Abb. 24) unterstreichen das massive Ungleichgewicht des WBF, das auch bei den Feldarbeiten augenscheinlich wird. Die kleine Eismasse des WBF zeigt schon starke Auflösungserscheinungen (Abb. 10), die durch die hohen Massen- und Flächenverluste der letzten Jahre fortgeführt werden. In den Jahren 2003 bis 2005 ist die mittlere spezifische Massenbilanz bereits (auch gegenüber jener des HEF) deutlich abgekippt. Erholungsphasen wie im Jahre 2001 sind Einzelereignisse und als solche nicht fähig, den weiteren Zerfall des Gletschers zu verhindern, der zusätzlich noch durch das vermehrte Ausapern großer, dunkler Felspartien verstärkt wird (Wendler 1974).

Die Winterniederschläge in Vent legen in dieser Periode um ein Viertel zu. Diese Zunahme bestätigen die gemessenen Akkumulationsmaxima bei Pegel L6, wengleich der markante Anstieg zur Vorperiode wohl aufgrund der Wahl der Methodik zur Rekonstruktion der Winterbilanzen übertrieben scheint. Ein klares Niederschlagssignal ist aber um das Jahr 2001 zu erkennen, als alle Gletscher aufgrund starker Winterniederschläge nahezu ausgeglichen bilanzieren - trotz hoher Temperatursummen. Bemerkenswert ist das absolute negative Maximum aller Bilanzen im Jahre 2003 bei absoluten Maxima der Temperatursummen und durchschnittlicher Winterakkumulation.

Tab. 12: Mittelwerte der Temperatursummen positiver Gradtage pro Jahr ($\Sigma T+$), der Winterniederschlagssummen in den Monaten Oktober bis Mai (NS (X-V)), der mittleren spezifischen Massenbilanzen (b_m), der Eisablation (b_{ia}) und der Winterbilanzen (b_{iw}) an den Pegeln in den einzelnen Perioden sowie die absoluten und relativen Differenzen (Δ) zur vorhergehenden Periode.

		I		II		III		
		Mittelwert	Mittelwert	Δ	Δ [%]	Mittelwert	Δ	Δ [%]
$\Sigma T+$ [°C]	Vent	528	628	100	19	685	57	9
	Weißbrunn		522			436	-86	-16
NS (X-V) [mm]	Vent	349	339	-10	-3	421	82	24
	Weißbrunn	636	633	-3	0	628	-5	-1
	Marienberg	339	378	39	12	369	-9	-2
b_m [mm we]	HEF	-232	-627	-395	170	-840	-213	34
	KWF	251	-193	-444	177	-212	-19	10
	WBF		-383			-990	-607	158
b_{ia} [mm we]	L6	-666	-1492	-826	124	-2159	-667	45
	P10					-1445		
b_{iw} [mm we]	L6	689	634	-55	-8	899	265	42
	P10					971		

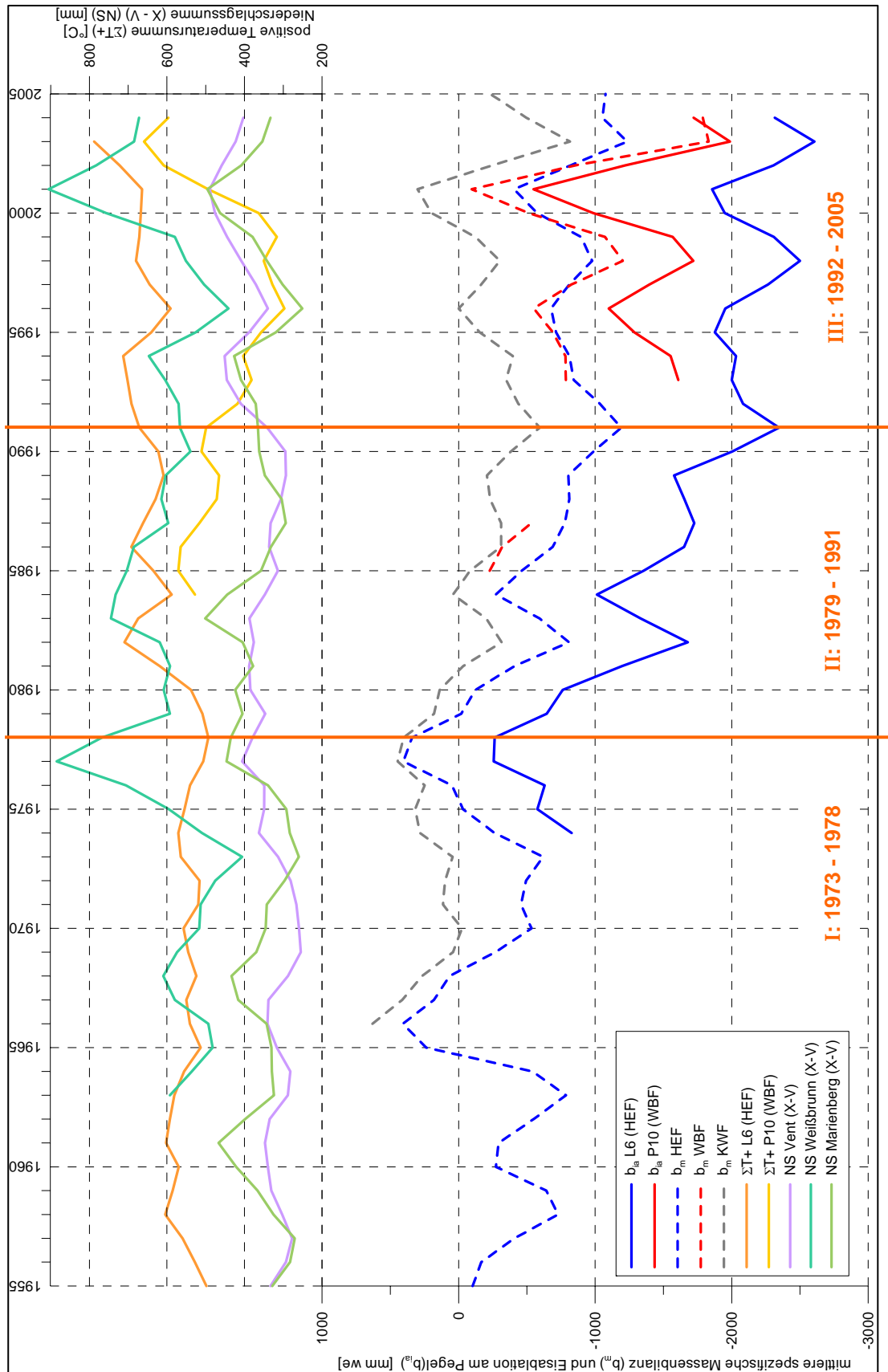


Abb. 29: Gewichtete (0,25 - 0,5 - 0,25) gleitende Mittel (3 Jahre übergreifend) der mittleren spezifischen Massenbilanzen der Gletscher (b_m), der Eisablation der Pegel (b_{ia}), der jährlichen Temperatursummen positiver Gradtage ($\Sigma T+$) und der Winterniederschlagssummen (NS) von Oktober bis Mai (X-V) - in die einzelnen Phasen (I, II, III) gegliedert.

Abb. 29 deutet in den unterschiedlich steilen Trends von b_m und b_{ia} am HEF, der Hypothese aus Kapitel 4 (Abb. 8) folgend, einen Klimawandel an. Dieser ist wiederum an den Temperatur- und Niederschlagsreihen abzulesen. Ebenso lässt sich in den einzelnen Phasen der klimatologische Informationsgehalt von b_m und b_{ia} differenzieren. Abb. 30 zeigt die einzelnen Phasen in der schematisierten Darstellung der Hypothese (Abb. 8). Die Winkel α und β deuten die unterschiedliche klimatologische Aussagekraft der Messreihen an, die in Phase III (Beispiel KWF bzw. b_m Gletscher schnell) sogar widersprüchlich sein kann.

Die formulierte Hypothese ist anhand der Zeitreihen der mittleren spezifischen Massenbilanzen am HEF und KWF und der Eisablation am Pegel L6 bestätigt. Am WBF kann die Hypothese nicht eindeutig verifiziert werden. Da die Messreihen zu kurz und die Einflüsse des Klimas durch die Prozesse der Zerfallserscheinung der Eismasse verzerrt sind, divergieren b_m und b_{ia} nicht (nach 2003 aber sogar mit anderen Vorzeichen als am HEF).

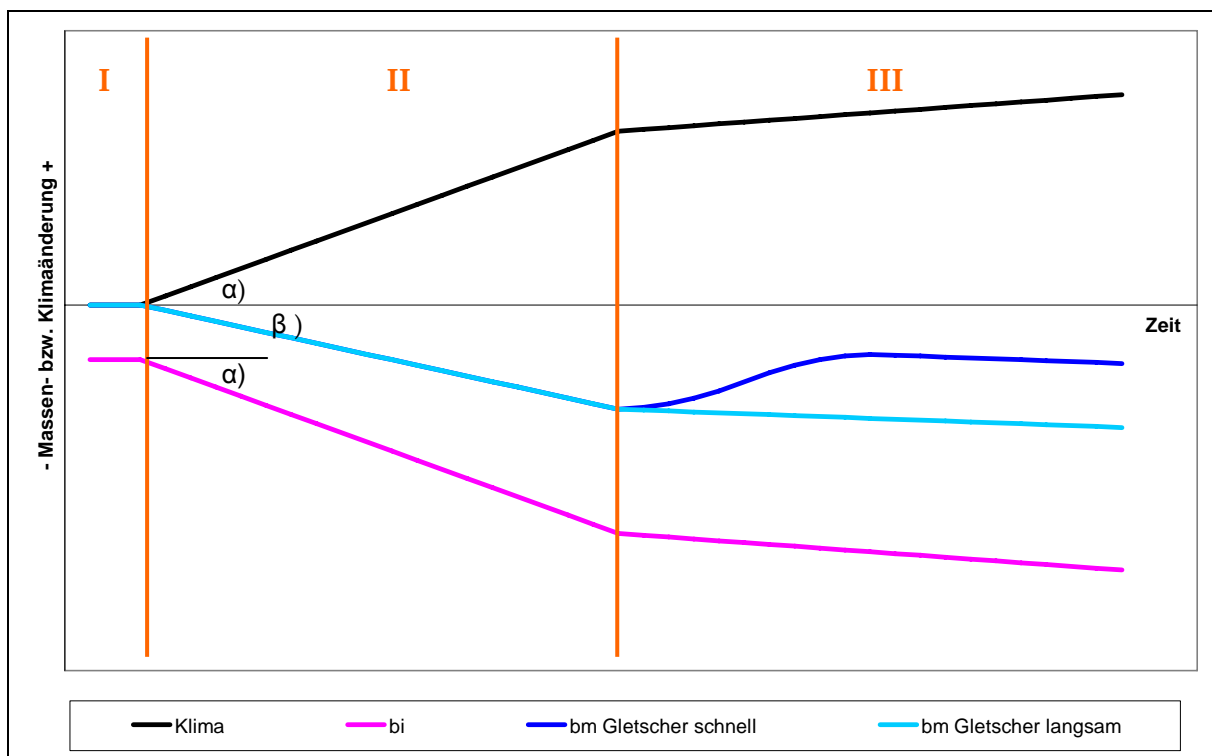


Abb. 30: Schematisierte Antworten der mittleren spezifischen Massenbilanzen (b_m) unterschiedlich schnell reagierender Gletscher auf einen kontinuierlichen Klimawandel im Vergleich zur Massenbilanz eines Punktes (b_i) im Ablationsgebiet (entspricht Abb. 8). Zusätzlich sind die im Text erklärten Phasen (I - III) eingetragen. In Kombination mit Abb. 29 gilt diese Hypothese für die angegebenen Gletscher als verifiziert.

7.3 Jährliche Eisablation an den Pegeln

Durch die Untersuchungen von Ablationsdauer und -raten und die Änderungen derselben kann aus den Ablationswerten eines Punktes an der Gletscheroberfläche ein Signal, das rein durch klimatische Faktoren bestimmt wird, abgeleitet werden. Dieses Klimasignal quantifiziert die in Kapitel 7.2 auf der Basis von b_m und b_{ia} gezeigte Klimaänderung und bestätigt die Eignung einer Punktmessung (b_{ia} bzw. b_i) als „Klimameter“

Die gemessenen Ablationswerte von Eis beider Pegel werden in Diagramme für jedes Kalenderjahr (Abb. 32 und Anhang A) kumulativ gegen die Zeit aufgetragen, um qualitativ wie quantitativ grobe Muster erkennen zu können. Es zeigen sich große Unterschiede in der Anzahl der Ablesungen von Jahr zu Jahr. Die Spannweite reicht von 2 Ablesungen (P10: 1993) bis zu 13 Ablesungen (L6: 1973). Im langjährigen Durchschnitt werden beide Pegel fünf Mal im Jahr besucht.

Der Verlauf der Eisablation ist bei Pegel L6 von Jahr zu Jahr sehr ähnlich. Im Juli und August treten kurzfristig hohe Schmelzraten auf (bis zu 55 mm we pro Tag wie im Sommer 2003). Im September sind diese Raten schon deutlich abgeschwächt, während im Oktober nur mehr selten ein Massenverlust zu beobachten ist. Die absolute Eisablation unterliegt jährlichen Schwankungen wobei nach 1990 Werte unter -2000 mm we mehr die Regel als die Ausnahme bilden. Als Extrema seien hier -3267 mm we im Jahre 2003 und die fehlende Eisablation in den Jahren 1977 und 1978 erwähnt (Tab. 5).

Im Vergleich zu Pegel L6 ist die absolute Eisablation bei Pegel P10 aufgrund der um 300 m höheren Lage deutlich geringer. Die Differenz der mittleren Eisablation der Periode 1992 - 2005 beträgt 714 mm we. Auffällig sind die weitgehend streng parallel verlaufenden Kurven beider Pegel, wobei die Eisablation bei Pegel P10 später einsetzt, im September deutlich stärker gedämpft wird und meist auch früher endet. Ausgenommen von diesen ähnlichen Ablationsverhalten sind die Jahre 2001 und 2002, in denen bei Pegel P10 aufgrund ergiebiger Schneefälle im Winter wie gegen Ende des Sommers, die eine Ablation unterbinden oder zumindest dämpfen, deutlich geringere Massenverluste gemessen wurden.

Die Graphen der Eisablation beider Pegel beginnen steil und verflachen sich erst gegen Ende der Ablationsperiode, selten in den Monaten Juli oder August. Dies bedeutet, dass sommerliche Schneefall- oder Kälteperioden, die die Eisablation unterbrechen, in der Anzahl der Ablesungen nicht aufgelöst werden, oder in einigen Jahren auch gar nicht vorkommen. Lediglich in Jahren mit überdurchschnittlich

vielen Ablesungen (z. B. 1973, 1976, 1979, 2005) können solche Perioden ausgemacht werden.

Im Allgemeinen verläuft die Ablationsperiode an beiden Pegeln sehr ähnlich. Dies lässt auf ähnliche sommerliche Witterungsverhältnisse auf beiden Gletschern schließen.

7.3.1 Ablationsdauer und -raten

Mangels besserer Daten, die genauere physikalische Interpretationen zuließen, wurde mittels eines intuitiven Näherungsverfahrens durch die Lufttemperatur das Einsetzen der Schneeablation in der Höhe der Pegel bestimmt. Sie beginnt am fünften Tag einer zum ersten Mal im Jahr auftretenden Reihe unmittelbar aufeinander folgender positiver Gradtage. Unterbrechungen der Schneeschmelze werden bei dieser Näherung nicht berücksichtigt. Die Schneeablation endet mit dem Beginn der Eisablation, in manchen Jahren, in denen jene ausblieb (1977, 1978 und 2001), am Datum der letzten Pegelablesung im Jahr.

Zum Zeitpunkt der ersten Pegelablesung im Jahr hat die Eisablation meistens bereits eingesetzt. Da die Ablationspegel nicht täglich aufgesucht werden, kann der Beginn der Eisablation nicht auf den Tag genau fixiert werden. Als Annäherung gilt:

- a) das Datum jener Pegelablesung (t_0), an der noch keine Höhenänderung zum Vorjahr (bzw. zu einer früheren Begehung) gemessen wurde, wenn die darauf folgende Begehung (t_1) eine Höhenänderung verzeichnete (Abb. 31). Die Eisablation beginnt eigentlich irgendwann zwischen diesen beiden Zeitpunkten. Da aber bei t_0 stets nur mehr eine geringe Schneedecke registriert wird, die durch den hohen Energieeintrag zu dieser Jahreszeit schnell schmilzt und t_1 in der Regel etwa eine Woche später erfolgt, überschätzt dieses Datum zwar letztendlich die Dauer der Eisablationsperiode, weicht mit hoher Wahrscheinlichkeit aber nicht weit (wenige Tage) vom realen Einsetzen der Eisablation ab.
- b) jenes Datum aus der graphischen Extrapolation (Abb. 32), wenn kein t_0 vorliegt. Da die Ablationsraten zu dieser Jahreszeit aufgrund des hohen Energieeintrages durch Strahlung und Temperatur groß sind und die Schneeablation sprunghaft in die Eisablation übergeht ist kein Abflachen der Kurve am Anfang der Eisablationsperiode zu erwarten. Daher kann die Extrapolation linear erfolgen.

Das Ende der Eisablationsperiode wurde mit dem Datum jener Begehung festgesetzt, an der zum ersten Mal im Sommerhalbjahr eine Schneedecke registriert wurde, die einen weiteren Massenverlust bis zum Winter verhinderte. Hier gilt umgekehrt zu

Punkt a) eine Unterschätzung der Dauer. In den meisten Jahren liegt dieses Datum um den 30. September („Abschlussbegehung“). Die Aufzeichnungen bestätigen die Erfahrungswerte, dass eine Schneedecke im Herbst auf dieser Höhe kaum mehr zur Gänze geschmolzen wird. Sollte dies dennoch geschehen, so sind die Beträge der Eisablation aufgrund des niedrigen Energieeintrages wegen der kurzen Tageslänge und der mit der tiefer stehenden Sonne verminderten Einstrahlung sehr gering. Wenn Ende September kein Schnee verzeichnet wurde, so stand das Ende der Ablationsperiode ebenso mit dem Datum der Abschlussbegehung fest. Sollte aufgrund warmer Witterung im Herbst die Ablation weiter andauern, wird diese durch eine Pegelablesung im Herbst gemessen. Dies geschah bei Pegel L6 in den Jahren 1975, 1980, 1988 und 1997 sowie 1997 bei Pegel P10 mit einer maximalen Herbstablation von -162 mm we (etwa ein Zehntel der durchschnittlichen jährlichen Eisablation). In diesem Fall gilt das Datum dieser Herbstbegehung als Ende der Ablationsperiode. Zur Berechnung von Ablationsraten müssen hier die Werte von b_{ia} verwendet werden, da sich vor allem in diesen Jahren b_i und b_{ia} stark unterscheiden.

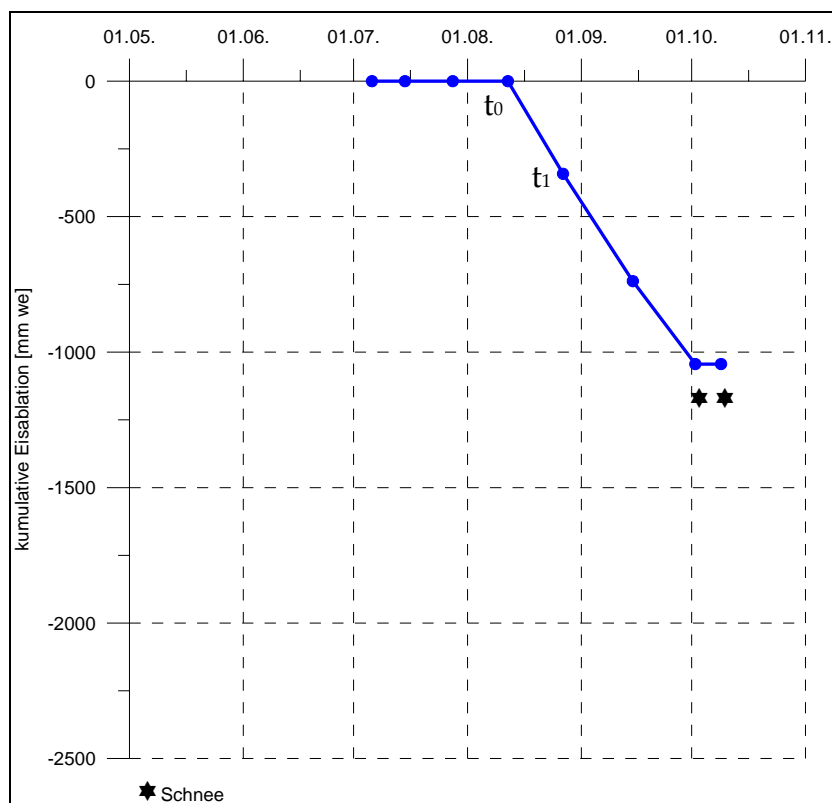


Abb. 31: Verlauf der Eisablation am Pegel L6 während der Ablationsperiode 1981. Die Punkte zeigen den jeweiligen Zeitpunkt der Begehungen. t_0 und t_1 werden im Text erklärt.

Aus Abb. 32 beispielsweise ergeben sich somit folgende Daten für Beginn und Ende der Eisablation im Jahre 1994: L6: 11.07. bzw. 03.10.; P10: 20.07. bzw. 20.09.

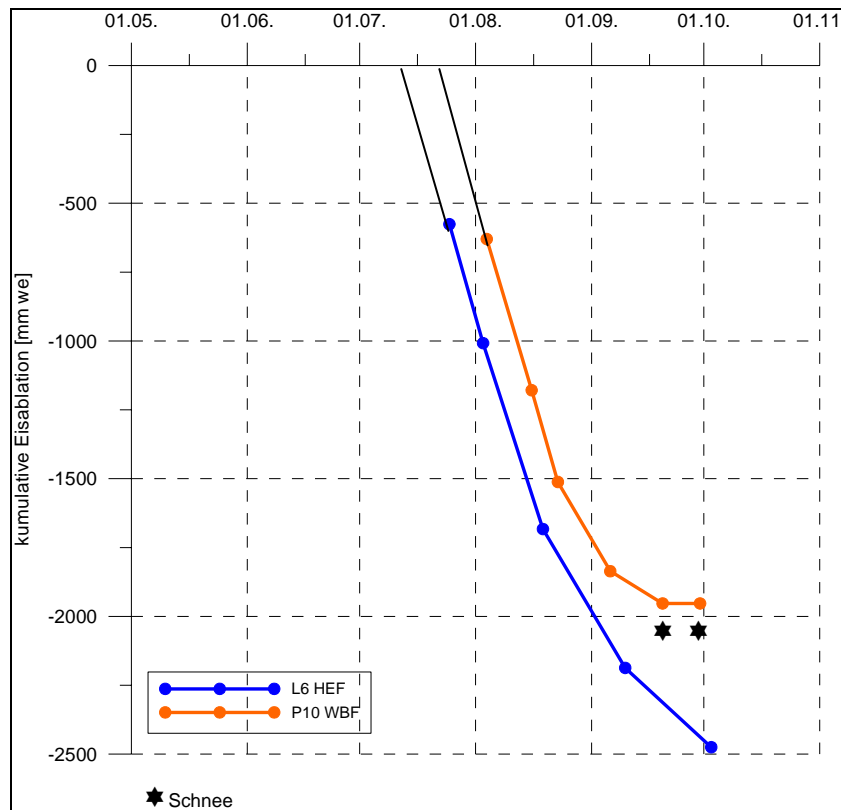


Abb. 32: Verlauf der Eisablation an den Pegeln L6 und P10 während der Ablationsperiode 1994. Die Punkte zeigen den jeweiligen Zeitpunkt der Begehungen, die schwarzen Linien die Extrapolation zur Bestimmung des Einsetzens der Eisablation.

Aus dem Verhältnis der Beträge der Schneeakkumulation bzw. der Eisablation und der nun bestimmbaren Dauer der Ablation können die entsprechenden Raten der Schnee- und Eisablation [mm we d^{-1}] berechnet werden.

Eine Fehlerabschätzung in der Bestimmung der Dauer der Ablationsperioden ist schwierig. Vermutlich gleicht sich der Fehler durch Überschätzung des Beginns der Eisablationsperiode durch Unterschätzung deren Endes wieder aus und liegt wohl kaum höher als 10%. Der Fehler der Dauer der Schneeablation kann nicht quantifiziert werden. Er ist aber sicher höher als 10%.

Tab. 13 listet die Start- und Enddaten sowie die Dauer, Menge und Raten der Ablationsperioden nach Jahren und Phasen auf. Abb. 33 zeigt die Schnee- und Eisablationsraten für Pegel L6 in den Phasen II und III.

Tab. 13: Beginn, Ende, Dauer, Menge und Rate der Schnee- und Eisablation an den Pegeln.

	L6						P10												
	Schneeablation			Eisablation			Schneeablation			Eisablation									
	Beginn	Dauer [d]	Menge [mm we]	Rate [mm we d ⁻¹]	Beginn	Dauer [d]	Menge [(mm we) ⁻¹]	Rate [mm we d ⁻¹]	Beginn	Dauer [d]	Menge [mm we]	Rate [mm we d ⁻¹]	Beginn	Dauer [d]	Menge [(mm we) ⁻¹]	Rate [mm we d ⁻¹]			
1973	01.05.	64	512	8	04.07.	19.09.	77	2160	28										
1974	17.05.	104	689	7	29.08.	01.10.	33	348	11										
1975	15.05.	110	678	6	02.09.	22.10.	50	468	9										
1976	04.05.	58	428	7	01.07.	01.09.	62	1026	17										
1977	18.05.	135	1317	10		30.09.	0	0	0										
1978	18.05.	135	575	4		30.09.	0	0	0										
1979	15.05.	67	596	9	21.07.	01.10.	72	1053	15										
1980	05.06.	78	685	9	22.08.	19.10.	58	477	8										
1981	19.05.	85	758	9	12.08.	02.10.	51	1044	20										
1982	14.05.	49	547	11	02.07.	30.09.	90	2223	25										
1983	12.05.	81	1140	14	01.08.	04.10.	64	1224	19										
1984	08.06.	65	575	9	12.08.	30.09.	49	657	13										
1985	11.05.	78	499	6	28.07.	01.10.	65	1512	23										
1986	11.05.	57	648	11	07.07.	03.10.	88	1737	20										
1987	11.06.	56	588	10	06.08.	01.10.	56	1620	29										
1988	05.05.	76	531	7	20.07.	01.11.	104	1926	19										
1989	17.05.	61	517	8	17.07.	26.09.	71	1143	16										
1990	30.04.	80	512	6	19.07.	02.10.	75	2097	28										
1991	30.05.	32	545	17	01.07.	30.09.	91	2682	29										
1992	08.05.	77	1148	15	24.07.	30.09.	68	1926	28	13.05.	78	753	10	30.07.	01.10.	2016	63	32	
1993	07.05.	61	594	10	07.07.	05.10.	90	1800	20	23.05.	63	957	15	25.07.	31.08.	1233	37	33	
1994	13.05.	58	1152	20	10.07.	03.10.	85	2475	29	14.06.	36	1162	32	20.07.	20.09.	1953	62	32	
1995	04.05.	72	907	13	15.07.	30.09.	77	1377	18	18.06.	27	522	19	15.07.	13.09.	1071	60	18	
1996	14.05.	51	568	11	04.07.	12.10.	100	2277	23	08.06.	44	546	12	22.07.	30.09.	1051	70	15	
1997	11.05.	65	497	8	15.07.	15.10.	92	1881	20	14.05.	98	768	8	20.08.	15.10.	1224	56	22	
1998	23.04.	75	634	8	07.07.	30.09.	85	3024	36	09.05.	67	794	12	15.07.	19.09.	2088	66	32	
1999	01.05.	86	774	9	26.07.	30.09.	66	2070	31	23.05.	67	1093	16	29.07.	02.10.	1476	65	23	
2000	26.04.	77	378	5	12.07.	30.09.	80	2070	26	01.06.	58	990	17	29.07.	22.09.	1278	55	23	
2001	29.04.	82	1456	18	20.07.	20.09.	62	1584	26	07.05.	146	2244	15		30.09.	0	0	0	
2002	15.05.	53	1307	25	07.07.	02.10.	87	2187	25	13.05.	80	748	9	01.08.	28.09.	959	58	17	
2003	28.04.	64	886	14	01.07.	30.09.	91	3267	36	04.05.	62	1089	18	05.07.	03.10.	3030	90	34	
2004	17.05.	66	1323	20	22.07.	30.09.	70	1701	24	03.06.	63	1228	19	05.08.	01.10.	1071	57	19	
2005			716		15.06.	15.09.	92	2592	28	29.04.	61	699	11	29.06.	30.09.	1782	93	19	
Mittel I	10.05.	101	700	7	31.07.	24.09.	37	667	11										
Mittel II	18.05.	67	626	10	23.07.	04.10.	72	1492	20										
Mittel III	04.05.	68	881	13	09.07.	29.09.	82	2159	26	21.05.	68	971	15	22.07.	24.09.	1445	59	23	

2005: keine Tagesmittel von Vent verfügbar, daher kein Beginn der Schneeablation bestimmbar

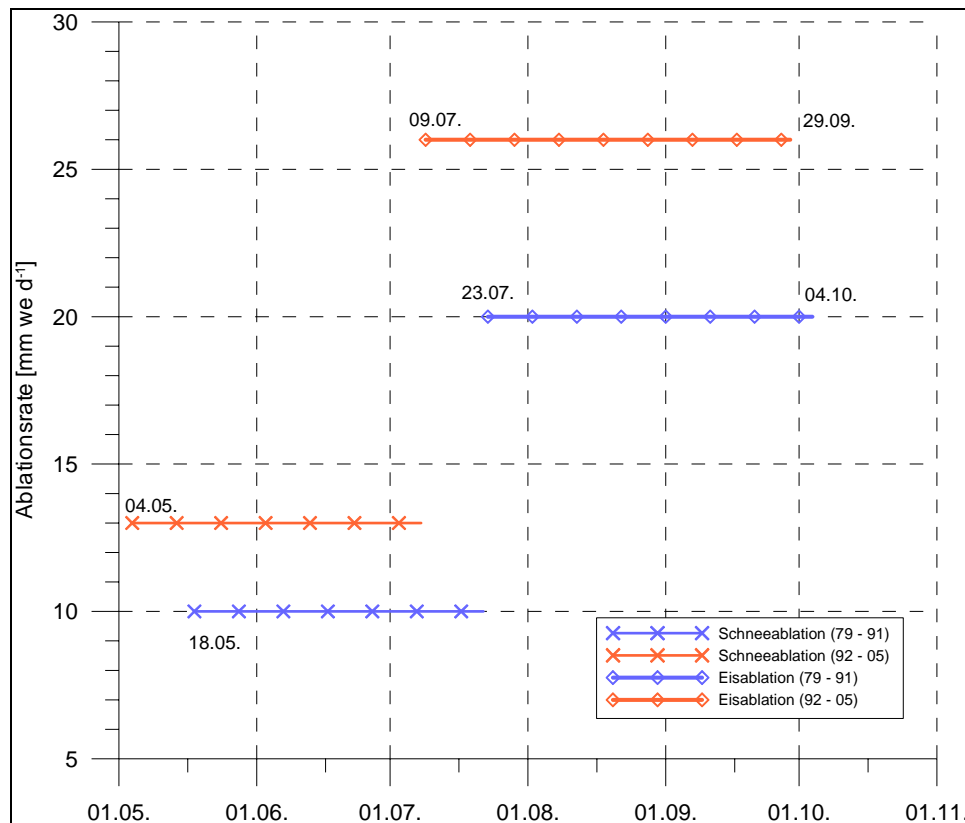


Abb. 33: Mittelwerte der Perioden II und III der Schnee- und Eisablationsraten bei Pegel L6, sowie mittlerer Beginn und Ende jener.

Der Anstieg der Schneeablationsraten bei Pegel L6 könnte durch die Berechnung der Akkumulation verzerrt sein, da die Schneehöhen für Phase II etwas zu niedrig bzw. für Phase III etwas übertrieben scheinen (Tab. 12). Allerdings stimmt das Periodenmittel gut mit den am WBF bestimmten Werten überein, denen eine gemessene Akkumulation (und nicht wie bei Pegel L6 eine angenäherte) zugrunde liegt. Die gewählte Methode der Bestimmung des Einsetzens der Schneeablation ist sehr grob und beeinflusst daher die berechneten Ablationsraten. Sehr zuverlässig hingegen sind die mittleren Raten der Eisablation, da Beginn und Ende mit geringen Fehlern festgelegt werden können und die Ablationsbeträge sorgfältig gemessen wurden. Vincent et al. (2004) berichten für die Perioden 1954 - 1981 und 1982 bis 2002 ähnliche Ablationsraten und deren Zunahme von Pegeln am Claridenfirn und vor allem am Glacier de Sarnes, verweisen jedoch auf eine Verlängerung der Ablationsperiode in den Herbst.

Die Zunahme der Rate der Eisablation (trotz gleichzeitiger Verlängerung der Eisablationsperiode) bei Pegel L6 um 30% (von 20 mm we d⁻¹ in Periode II auf 26 mm we d⁻¹ in Periode III) gilt als Indiz für einen steigenden Energieeintrag auf die Gletscheroberfläche. Im Zusammenhang damit steht eine mittlere Abnahme der

Albedo, die über Gletschereis nach dem (immer früheren) Abschmelzen des Winterschnees sprunghaft abfällt. Wie zusätzlich in den letzten Jahren mit stark negativen Massenbilanzen beobachtet wurde, erscheinen bei vermehrter Abschmelzung von Firnrücklagen im Akkumulationsgebiet größere Flächen an schmutzigen Gletschereis, die in Form positiver Rückkoppelungseffekte durch Erniedrigung der Oberflächenalbedo maßgeblich in den Energiehaushalt eingreifen (Kaser et al. 2001).

Das frühere Einsetzen der Schneeablation bei gleicher Dauer ergibt ein früheres Einsetzen der Eisablation (in Phase III im Mittel um 14 Tage verglichen zu Phase II) und somit eine Ausdehnung der Eisablationsperiode in den Frühsommer. Steigende Temperaturen in den für die Schneeschmelze verantwortlichen Monaten Mai - Juli (V - VII) weisen ebenfalls auf diesen erhöhten Energieeintrag (Abb. 34) hin.

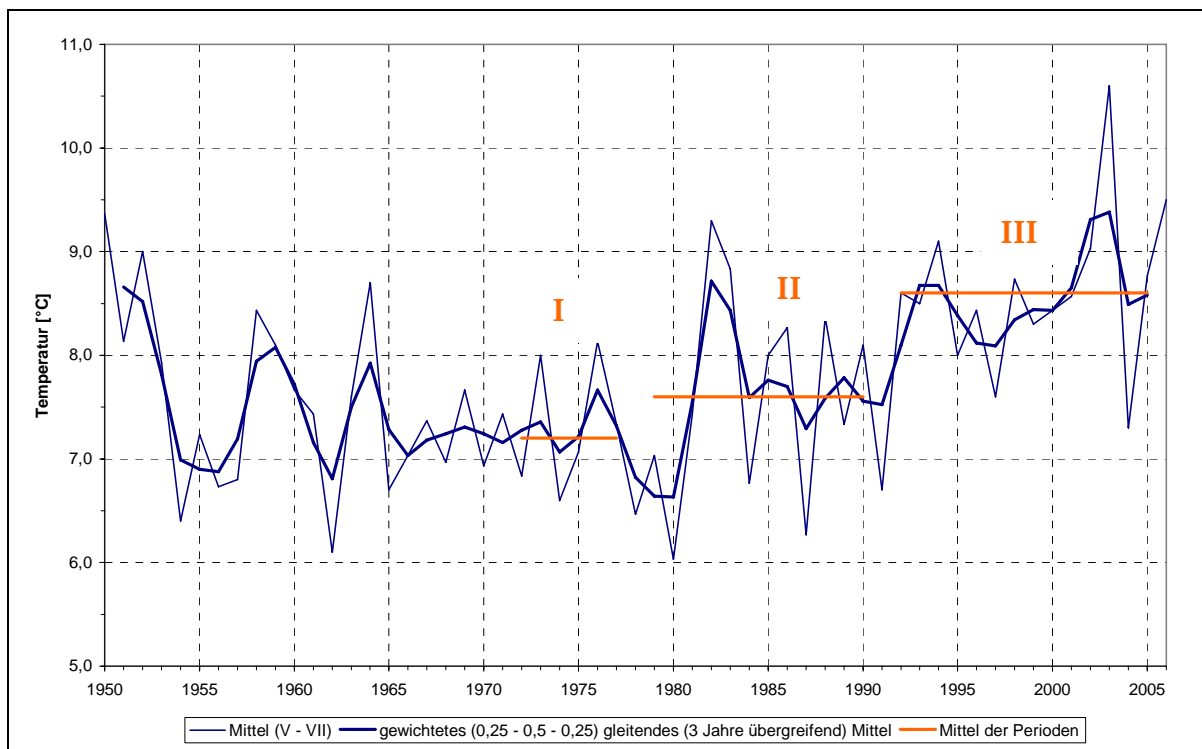


Abb. 34: Verlauf des Mittelwertes der Lufttemperatur der Monate Mai - Juli (V-VII) in Vent.

7.3.2 Höhere Winterniederschläge zur Kompensation des zunehmenden Energieeintrages?

Laut IPCC (2007) wird für Mitteleuropa eine Zunahme der Winterniederschläge gegen Ende dieses Jahrhunderts von 0 - 20% prognostiziert. Um das Jahr 2001 zeigen alle drei Gletscher schwach negative (HEF) bis stark positive (WBF, KWF) mittlere spezifische Massenbilanzen und eine verminderte Eisablation an den Pegeln offensichtlich aufgrund starker Winterniederschläge. Kann dieser Zuwachs der Winterakkumulation den Anstieg in der Eisablation aufwiegen?

Folgende Überlegung kann für diesen Kompensationseffekt gelten: Um die mittlere Eisablation bei Pegel L6 in Phase III wieder auf das Niveau von Phase II zu senken, wäre eine Reduktion der Ablation um 667 mm we nötig (Tab. 13). Ausgedrückt in Tagen müsste die Dauer der Eisablationsperiode um etwa 26 Tage (bei 26 mm we d⁻¹) verkürzt werden. Angenommen man erreiche diese Reduktion nur durch eine Verzögerung des Einsetzens der Eisablation mittels einer länger andauernden Schneedecke, so wäre dafür ein Zuwachs der Akkumulation von 338 mm we (bei einem mittleren täglichen Abtrag von 13 mm we d⁻¹) erforderlich. Dies entspräche einem Anstieg der mittleren Winterbilanz an Pegel L6 um 38% und wäre mehr als doppelt so hoch als nach den IPCC-Szenarien zu erwarten, ohne dabei den Anstieg der Temperatur zu berücksichtigen.

Auf Dauer können überdurchschnittliche Winterniederschläge und eine daraus folgende erhöhte Winterakkumulation den steigenden Massenabtrag aufgrund des zunehmenden Energieangebotes nicht kompensieren.

7.4 Klimainformationen aus mittlerer spezifischer Massenbilanz und Eisablation eines Punktes im Ablationsgebiet

In der Hypothesenstellung in Kapitel 4 werden b_m als Folge des vorherrschenden Klimas betrachtet. Aus der inversen Sichtweise von den Messreihen von b_m auf treibende klimatische Faktoren zu schließen kann tückisch sein, da schließlich die Gesamtheit der mannigfachen Interaktionen aller Klimavariablen den Massenzuwachs und -abtrag bestimmen und in die umgekehrte Richtung ohne exakte physikalische Modelle nicht aufzulösen sind. Die starke Vereinfachung durch Reduktion der gletscherrelevanten Klimafaktoren auf Temperatursummen positiver Gradtage und Winterniederschlägssummen und die Gegenüberstellung dieser zu

den Massenbilanzreihen lässt allerdings qualitativ Vergleiche zum Informationsgehalt von b_m einerseits und b_{ia} andererseits zu.

Wie in Abb. 8 bereits schematisch im Gedankenexperiment angedeutet und in Abb. 29 gemessen, driften die Reihen von b_m und b_{ia} in Phase II bei steigenden Temperatursummen positiver Gradtage und gleichbleibenden Winterniederschlägen auseinander und zeigen in Phase III sogar gegensätzliche Trends. Das in Phase II einsetzende, schon angesprochene Ausgleichsbestreben durch Flächenveränderungen ist die Hauptursache für den unterschiedlichen Informationsgehalt der beiden Datenreihen. Wie sehr die momentane Gletscherausdehnung im Ungleichgewicht mit dem Klima steht, unterstreichen Tab. 11, Abb. 26 und Abb. 27.

Die Divergenz von b_m und b_{ia} ist Ausdruck der Anpassungen der Gletschergeometrie an die sich ändernden klimatischen Verhältnisse zur Wiedererlangung eines Gleichgewichtszustandes. Dieses Ausgleichsbestreben wird durch die in Tab. 14 gezeigten Flächen und Flächenveränderungen der Gletscher besonders in den letzten 13 Jahren angedeutet. In dieser Zeitspanne ist ein Rückgang der Gletscherfläche zwischen 12 und 18% aufgetreten, wobei der KWF die geringsten relativen Verluste, der WBF die größten relativen Verluste zu verzeichnen hatte. Dabei ergibt sich die Schwankungsbreite aus den verschiedenen topographischen Verhältnissen und der Ausgangsgröße der Gletscher. Der KWF mit seinem in großer Höhe liegenden Firnbecken und seiner schmalen, steilen Zunge reagiert gegenüber klimatisch bedingten Schwankungen von Akkumulations- und Ablationsmengen rasch mit einem Vorstoß oder Rückzug. Diese kurze Reaktionszeit (5 Jahre (Span 1999)) ermöglicht es dem KWF eher ein Gleichgewicht zu erreichen, als es der träge, flache Talgletscher des HEF kann (Kuhn et al. 1985).

Tab. 14: Flächenveränderungen (Δ) der jeweiligen Gletscher absolut und relativ.

		1973	1978	Δ	$\Delta\%$	1991	Δ	$\Delta\%$	2005	Δ	$\Delta\%$
Gletscherfläche [km ²]	HEF	8,99	9,08	0,09	1	8,88	-0,20	-2	7,47	-1,41	-16
	KWF	3,94	4,42	0,48	12	4,43	0,01	0	3,90	-0,53	-12
	WBF					0,66			0,54	-0,12	-18

Die Abnahme der AAR bedeutet ein für das vorherrschende Klima zu großes Ablationsgebiet des Gletschers, das zur Erlangung des Gleichgewichtszustandes verkleinert, also abgeschmolzen werden muss. Diese intensivierete Eisschmelze gibt Pegel L6 wieder; b_m durch die abnehmende Gletscherfläche nur in abgeschwächter

Form. Wie stark die Unterschiede in der Qualität des Klimasignals sein können, zeigt ein Vergleich zwischen b_{ia} am Pegel L6 und b_m am HEF (und des KWF) (Abb. 28 bzw. Abb. 29). Während b_m besonders in Phase III zunehmend gletschergünstige Klimaverhältnisse vermuten lässt, erklärt b_{ia} das Gegenteil. Zwar können einzelne, auch in kurzen Phasen von wenigen Jahren auftretende hohe Winterniederschläge kurzfristig den bereits gezeigten gestiegenen Energieeintrag der letzten Jahrzehnte kompensieren, so zeigen doch die Ablationsraten (Abb. 33 und Tab. 13) und die Korrelationen zur Eisablation und Sommermassenbilanz (Tab. 10) schon, dass die Dauer der Eisablation der dominierende Faktor im Massenhaushalt ist.

Qualitativ eignet sich die Eisablation eines Einzelpegels als „Klimameter“. Besonders in Perioden wie Phase III, in der sich die mittlere spezifische Massenbilanz durch etwas erhöhte Winterniederschläge bei schrumpfenden Gletscherflächen trotz hoher Temperaturen anscheinend leicht „erholen“ kann, zeigt die Punktmessung ein unverfälschtes Klimasignal. Auch in Phase II ist die klimatologische Aussagekraft von b_{ia} gegenüber b_m stärker, da die Amplitude von b_m durch die bereits einsetzende Verkleinerung der Gletscherfläche bereits gedämpft wird. In Perioden mit ausgeglichenen Massenbilanzen und folglich (für den Gletscher) ausgeglichenen klimatischen Verhältnissen unterscheiden sich die Klimainformationen aus beiden Quellen kaum.

In Phasen starker Flächenverluste der Gletscher empfiehlt es sich daher für klimatologische Interpretationen der mittleren spezifischen Massenbilanzen zusätzlich die Massenbilanzen oder bei dominanter Sommermassenbilanz die Eisablation eines Punktes im Ablationsgebiet näher zu untersuchen.

Eine Übertragung der Ergebnisse dieser Arbeit auf andere Gletscher im Untersuchungsraum (Öztaler Alpen - Ortler-Cevedale-Gruppe) ist bei Beachtung gletscherspezifischer Merkmale (vor allem der Topographie) unter Umständen möglich, da die klimatischen Verhältnisse in diesem Raum nicht stark von den beschriebenen abweichen werden. Jedoch wurde diese Überlegung in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

8 Zusammenfassung

Ein Vergleich der Messreihen von mittleren spezifischen Massenbilanzen (b_m) des Hintereisferners und des Kesselwandferners in den Ötztaler Alpen sowie des Weißbrunnferners in der Ortler-Cevedale-Gruppe und der Eisablation (b_{ia}) an ausgewählten Ablationspegeln jener ergibt hinsichtlich ihrer Eignung als „Klimameter“ unterschiedlich starke klimatologische Informationsgehalte.

Die Untersuchungen der Zeitreihen von b_m und b_{ia} zeigen einen kontinuierlichen klimatischen Wandel, der unter Betrachtung der Verläufe der Temperatursummen positiver Gradtage und des Winterniederschlages in drei Phasen unterschieden werden kann. In diesen Phasen lässt sich die Klimainformation aus b_m und b_{ia} differenzieren. In Phase I (vor 1978) bilanzieren die Gletscher bei stabilen Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen ausgeglichen. Die Trends von b_m und b_{ia} unterscheiden sich nicht. In Phase II (1979 - 1991) sinken bei starkem Anstieg der Temperaturen b_m und b_{ia} ins Negative ab, wobei b_{ia} die klimatischen Veränderungen in dieser Phase deutlicher wieder gibt. In Phase III (1992 - 2005) pendeln sich die Zeitreihen bei negativen Werten ein, wobei b_m im Gegensatz zu b_{ia} ausgeglichene bis leicht positive Trends zeigt. In dieser Phase können höhere Winterniederschläge den anhaltenden Temperaturanstieg nur in Einzeljahren kompensieren. Besonders in dieser Phase ist die klimatologische Aussagekraft von b_{ia} reiner als von b_m . Die gegensätzlichen Trends von b_m und b_{ia} werden durch Änderungen in der Gletschergeometrie erklärt. Durch die Abnahme der Gletscherfläche von bis zu 18% in den letzten 13 Jahren wird die klimatologische Information von b_m verzerrt.

Anhand der Messwerte an den Pegeln konnte eine Ausdehnung der Eisablationsperiode um 14 Tage in den Frühsommer festgestellt werden. Dies ist auf einen zunehmenden Energieeintrag auf die Gletscheroberfläche zurückzuführen, der vor allem durch steigende Temperaturen in den Monaten Mai bis Juli skizziert werden kann. Um bis zu 30% gestiegene Schnee- und Eisablationsraten sind die Folge.

Die synchronen Verläufe in den Zeitreihen der Daten von Klimastationen und Gletschern, die im Umkreis von etwa 40 km liegen, deuten auf ein ähnliches Verhalten in den entsprechenden Phasen aller Gletscher in diesem Raum hin.

9 Literaturverzeichnis

ANONYM (1969): Mass-balance terms. *Journal of Glaciology*, 8, 3 - 7.

BORTENSCHLAGER, T. (2006): Bestimmung der Winterbilanz des Hintereisferners von 1993 bis 2005. Diplomarbeit. Institut für Meteorologie und Geophysik. Universität Innsbruck.

BUTSCHEK, M. (2000): Untersuchungen zum langfristigen Einfluss der Sonnenaktivität auf die Massenbilanz des Hintereisferners. Diplomarbeit. Institut für Meteorologie und Geophysik. Universität Innsbruck.

DREISEITL, E. (1973): Witterungsklimatologie von Vent und Massenbilanz des Hintereisferners 1995 - 1971. Ein Beitrag zur Meteorologie der Gletscher. Dissertation. Institut für Meteorologie und Geophysik. Universität Innsbruck.

FINSTERWALDER, S. (1897): Der Vernagtferner. Seine Geschichte und seine Vermessung in den Jahren 1888 und 1889. *Wissenschaftliche Ergänzungshefte zur Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereines*, 1, 1.

FINSTERWALDER, S. und H. SCHUNCK (1887): Der Suldenferner. *Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereines*, 18, 70 - 89.

FLIRI, F. (1975): Das Klima der Alpen im Raume von Tirol. = A. Leidlmeier, F. Huter (Hg.): Monographien zur Landeskunde Tirols, Folge I.

FLIRI, F. (1985): Synoptische Klimatographie der Alpen zwischen Mont Blanc und Hohen Tauern. *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte*, 29.

FOUNTAIN, A. and A. VECCHIA (1999): How many stakes are required to measure the mass balance of a glacier? *Geografiska Annaler*, 81A, 563 - 573.

GEIST, T. (2005): Application of airborne laser scanner technology in glacier research. Dissertation. Institut für Geographie. Universität Innsbruck.

GREENE, A. M. (2005): A time constant for hemispheric glacier mass balance. *Journal of Glaciology*, 51 (174), 535 - 562.

HAID, H., Pro Vita Alpina (Hg.) (2004): Mythos Gletscher.

HOFINGER, S. and M. KUHN (1996): Reconstruction of the summer mass balance of Hintereisferner since 1953. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 32-2, 137 - 149.

HOINKES, H. (1970): Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. Ergebnisse der Messreihe Hintereisferner (Ötztaler Alpen) 1953 - 1968. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 6, 37 - 90.

HOINKES, H. und R. STEINACKER (1975): Zur Parametrisierung der Beziehung Klima - Gletscher. *Rivista Italiana di Geofisica*, 1, 97 - 104.

IPCC 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

KASER, G., M. MUNARI, B. NOGGLER, C. OBERSCHMIED & P. VALENTINI (1995): Ricerche sul bilancio di massa del ghiacciaio di Fontana Bianca (Weißbrunnferner) nel gruppo Ortles-Cevedale. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 18, 277 - 280.

KASER, G., C. ZINGERLE, C. OBERSCHMIED, M. MUNARI (2001): An exceptionally negative mass balance of a small alpine glacier. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, Supplement*, V, 99 - 102.

KASER, G., A. FOUNTAIN and P. JANSSON (2002): A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers. *Technical Documents in Hydrology*, IHP-VI, 59.

KASER, G., J. G. COGLEY, M. B. DYURGEROV, M. F. MEIER and A. OHMURA (2006): Mass balance of glaciers and ice caps: Consensus estimates for 1961 - 2004. *Geophysical Research Letters*, 33, L19501.

KERSCHNER, H. (1990): Methoden der Schneegrenzbestimmung. Liedtke, H. (Hg.): *Eiszeitforschung*. 299 - 311.

KERSCHNER, H. (1997): Statistical modelling of equilibrium-line altitudes of Hintereisferner, central Alps, Austria, 1859-present. *Annals of Glaciology*, 24, 111 - 115.

KUHN, M. (1984): Physikalische Grundlagen des Energie- und Massenhaushaltes der Schneedecke. H.-M. Brechtel (Ed.): Schneehydrologische Forschung in Mitteleuropa / Snow Hydrologic Research in Central Europe. = *Mitteilungen Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK)* 7, 5 - 56.

KUHN, M. (2003): Redistribution of snow and glacier mass balance from a hydrological model. *Journal of Hydrology*, 282, 95 - 103.

KUHN, M., G. KASER, G. MARKL, H. P. WAGNER, H. SCHNEIDER (1979): 25 Jahre Massenhaushaltsuntersuchungen am Hintereisferner. Auszug aus den glazialmeteorologischen Arbeiten im Gebiet des Hintereisfernens in den Öztaler Alpen.

KUHN, M., G. MARKL, G. KASER, U. NICKUS, F. OBLEITNER, and H. SCHNEIDER (1985): Fluctuations of climate and mass balance: different responses of two adjacent glaciers. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 21, 409 - 416.

KUHN, M., E. DREISEITL, S. HOFINGER, G. MARKL, N. SPAN and G. KASER (1999): Measurements and models of the mass balance of Hintereisferner. *Geografiska Annaler*, 81A, 659 - 670.

MATZI, E. (2004): Zeitreihen der Dichteentwicklung am Hintereisferner von 1964 bis 2002. Diplomarbeit. Institut für Meteorologie und Geophysik. Universität Innsbruck.

MÜLLER, H. und G. KAPPENBERGER (1991): Claridenfirn-Messungen 1914 - 1984. Daten und Ergebnisse eines gemeinschaftlichen Forschungsprojektes. *Zürcher Geographische Schriften*, 40.

OERLEMANS, J. (2001): *Glaciers and Climate Change*. Balkema.

ÖGGL, B. (2000): Rekonstruktion von Volums- und Flächenänderungen des Weißbrunnfernens (Ortlergruppe) mit Hilfe eines digitalen Geländemodells. Diplomarbeit. Institut für Geographie. Universität Innsbruck.

OHMURA, A. (2001): Physical basis for the temperature-based melt-index method. *Journal of Applied Meteorology*, 40, 753 - 761.

OITZL, S. (2003): Rekonstruktion der Massenbilanz des Hintereisfernens mit Hilfe der NCEP/NCAR-Reanalysis-Daten über den Zeitraum von 1953 - 2000. Diplomarbeit. Institut für Meteorologie und Geophysik. Universität Innsbruck.

PATZELT, G. (1985): The period of glacier advances in the Alps, 1965 to 1980. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 21, 403 - 407.

SCHLOSSER, E. (1996): Modellierung der neuzeitlichen Schwankungen des Hintereisferners. Dissertation. Institut für Meteorologie und Geophysik. Universität Innsbruck.

SCHNEIDER, H. (1975): Die Karte des Kesselwandferners 1971 und die Grundlagen der Vermessungen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 11-2, 229 - 244.

SCHROTT, D. (2006): Flächenhafte Modellierung der Energie- und Massenbilanz am Hintereisferner. Diplomarbeit. Institut für Meteorologie und Geophysik. Universität Innsbruck.

SECCHIERI, F., P. VALENTINI (1992): I ghiacciai della Val d'Ultimo (Gruppo Ortles-Cevedale) ed il loro contributo agli apporti idrici dei sottostanti bacini. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 15, 171 - 176.

SEVRUK, B. (ed.) (1986): Correction of precipitation measurements. ETH/IAHS/WMO Workshop. *Zürcher Geographische Schriften*, 23.

SPAN, N. (1993): Untersuchung der Dynamik des Hintereisferners zwischen 1894 und 1992. Diplomarbeit. Institut für Meteorologie und Geophysik. Universität Innsbruck.

SPAN, N. (1999): Zur Dynamik des Kesselwandferners. Dissertation. Institut für Meteorologie und Geophysik. Universität Innsbruck.

SPAN, N., M. KUHN and H. SCHNEIDER (1997): 100 years of ice dynamics of Hintereisferner, Central Alps, Austria, 1894 - 1994. *Annals of Glaciology*, 24, 297 - 302.

STUEFER, M. (1994): Der unterschiedliche Einfluss des Klimas auf die Gletscher der Öztaler Alpen und der Silvretta Gruppe. Diplomarbeit. Institut für Meteorologie und Geophysik. Universität Innsbruck.

TANZER, G. (1986): Berechnung des Wärmehaushalts an der Gleichgewichtslinie des Hintereisferners. Diplomarbeit. Institut für Meteorologie und Geophysik. Universität Innsbruck.

VINCENT, C., G. KAPPENBERGER, F. VALLA, A. BAUDER, M. FUNK and E. LE MEUR (2004): Ice ablation as evidence of climate change in the Alps over the 20th Century. *Journal of Geophysical Research*, 109, D10104.

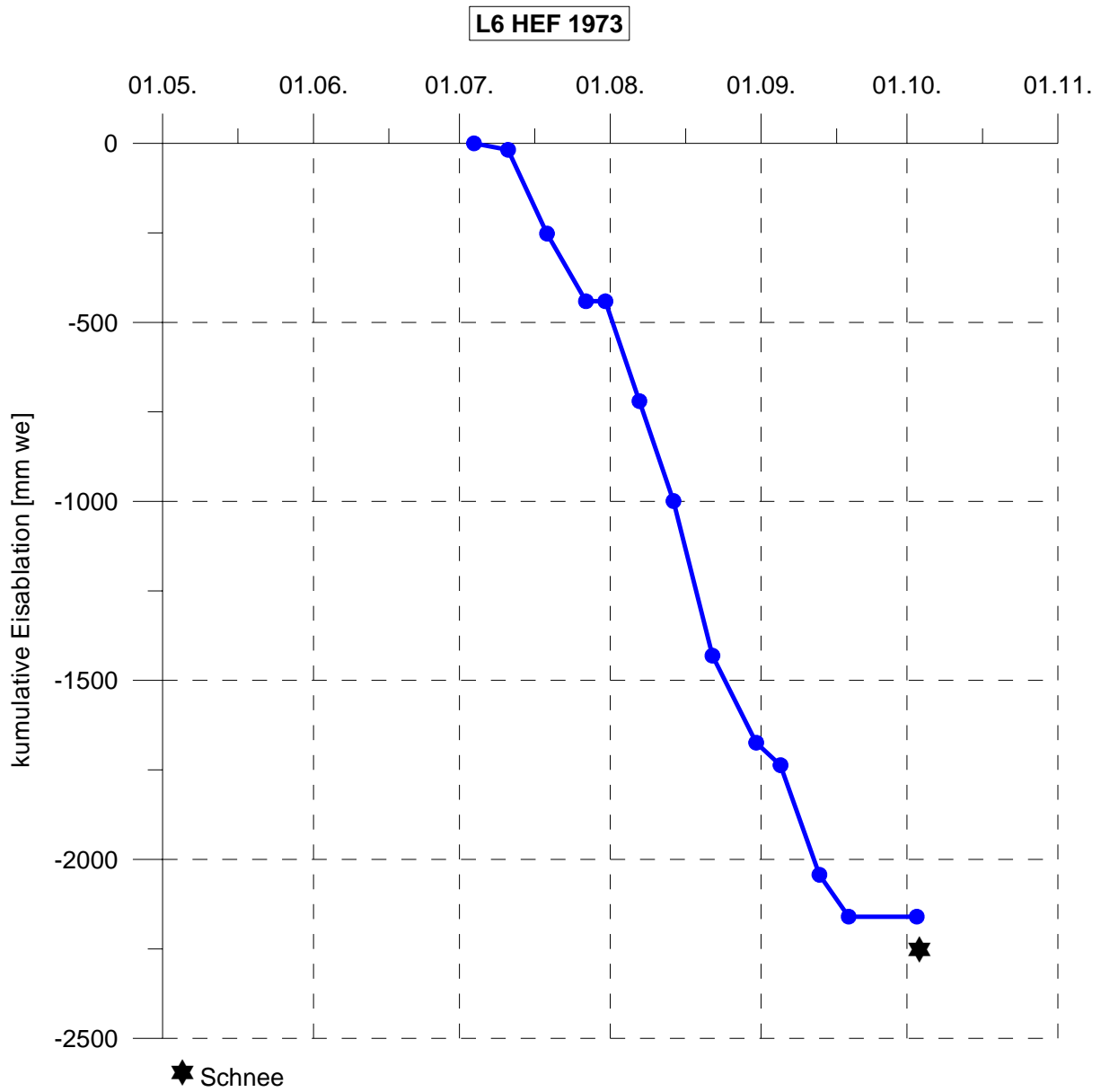
WAGNER, H. P. (1979): Strahlungshaushaltsuntersuchungen an einem Ostalpengletscher während der Hauptablationsperiode. Teil I: Kurzwellige Strahlung. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 27, 297 - 324.

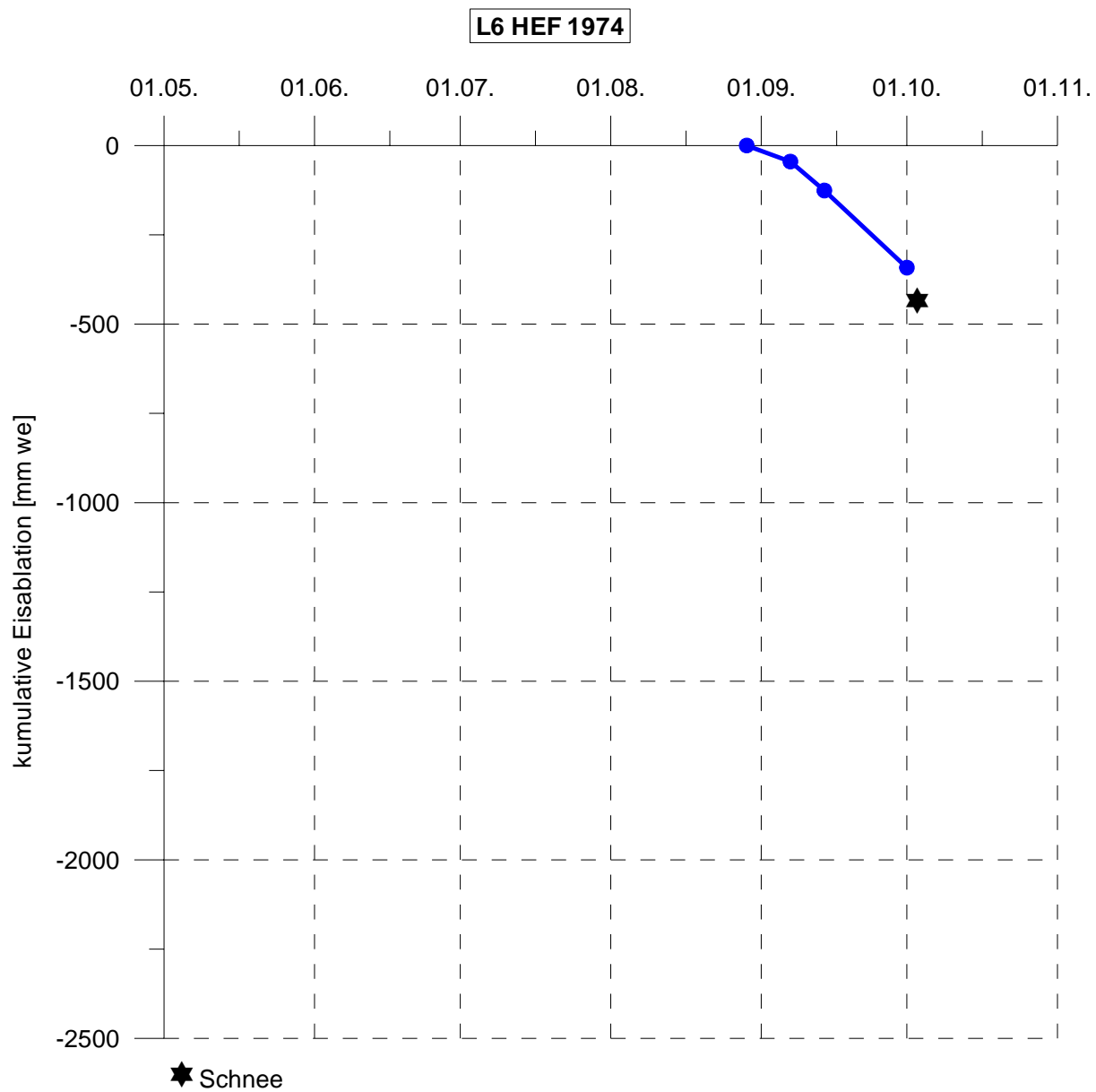
WAGNER, H. P. (1980): Strahlungshaushaltsuntersuchungen an einem Ostalpengletscher während der Hauptablationsperiode. Teil II: Langwellige Strahlung und Strahlungsbilanz. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 28, 41 - 62.

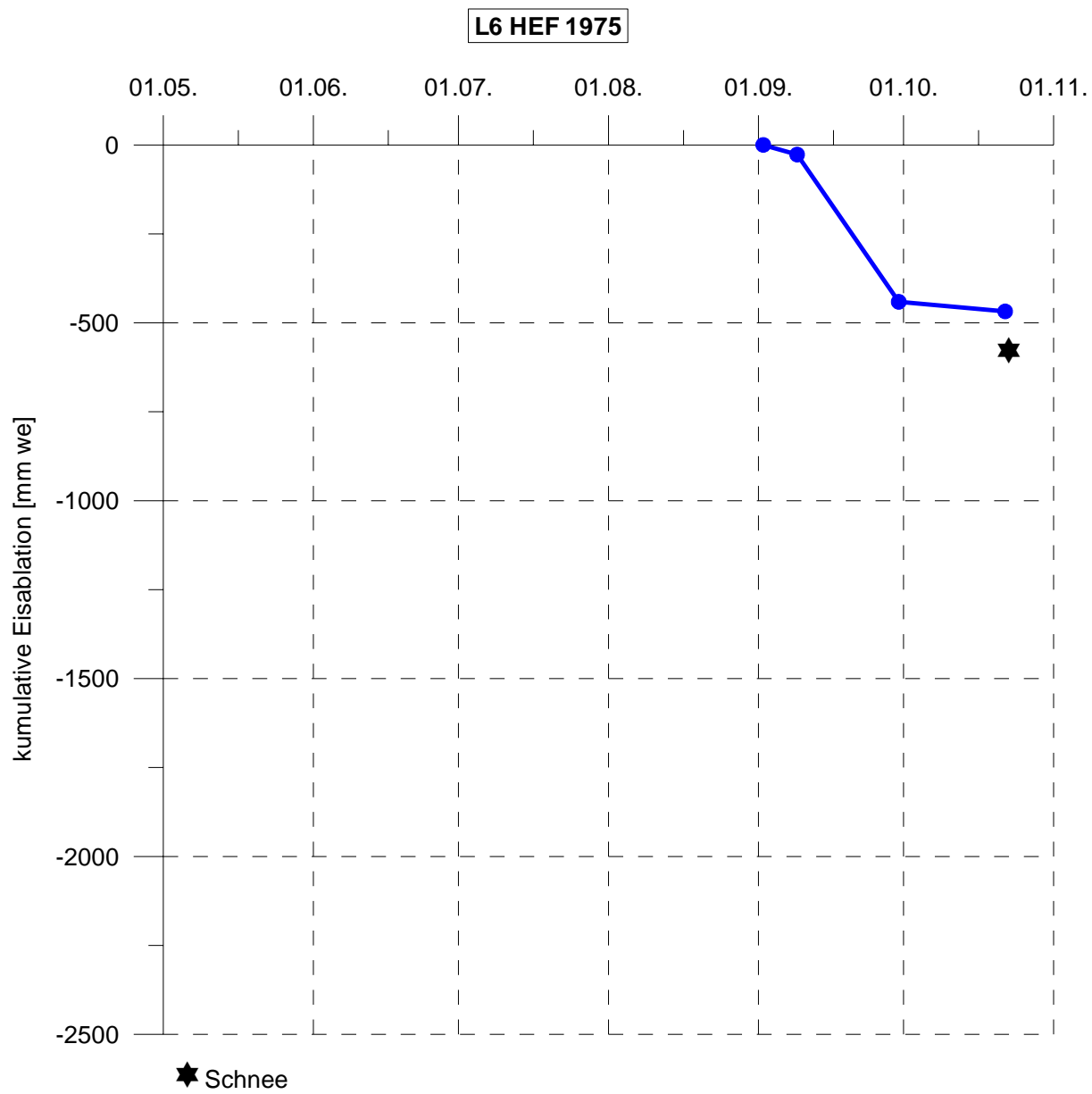
WENDLER, G. (1974): A note on the advection of warm air towards a glacier. A contribution to the International Hydrological Decade. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 10, 199 - 205.

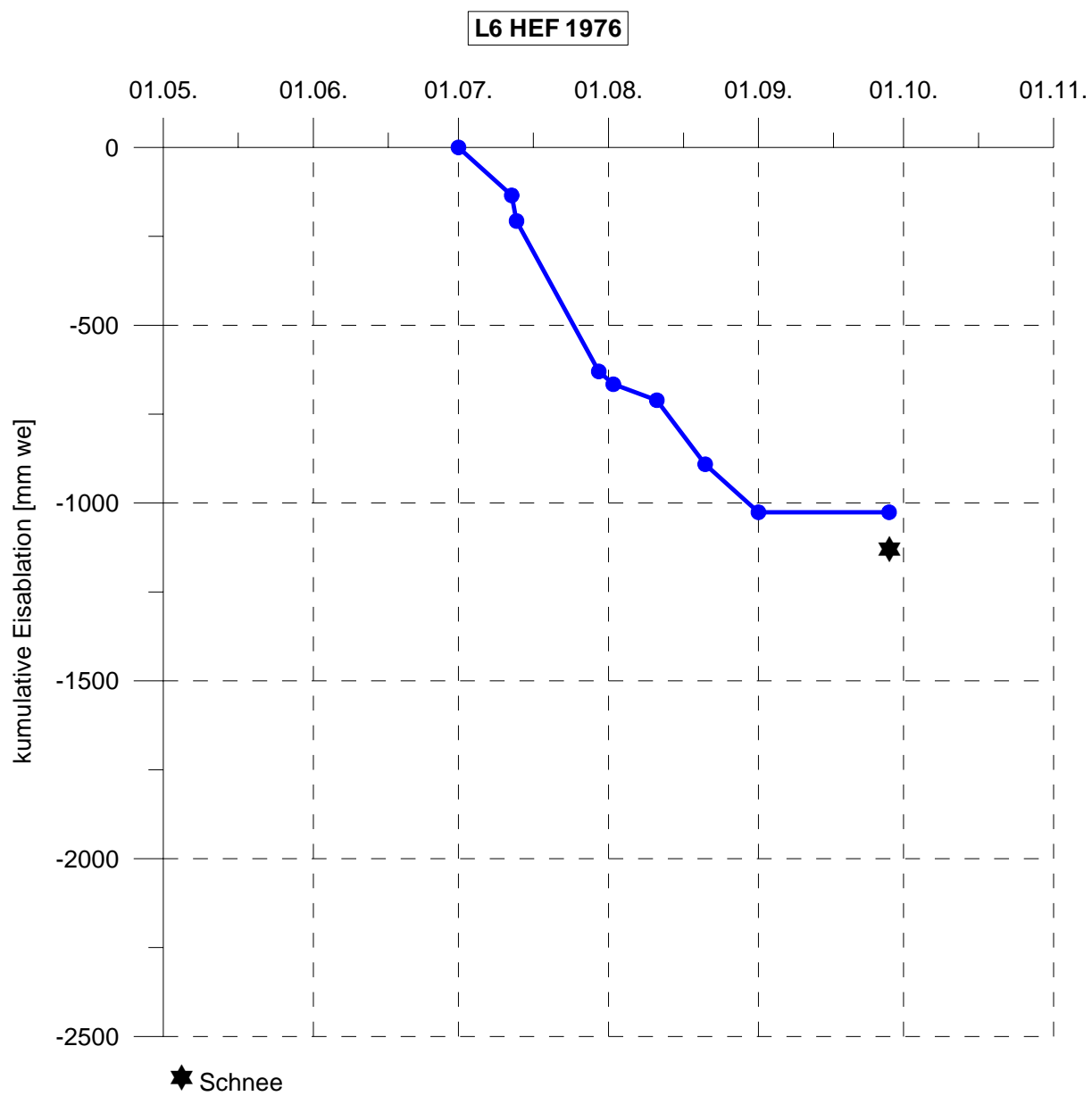
ANHANG A

Die Eisablation an Pegel L6 (1973 - 2005) und Pegel P10 (1992 - 2005):

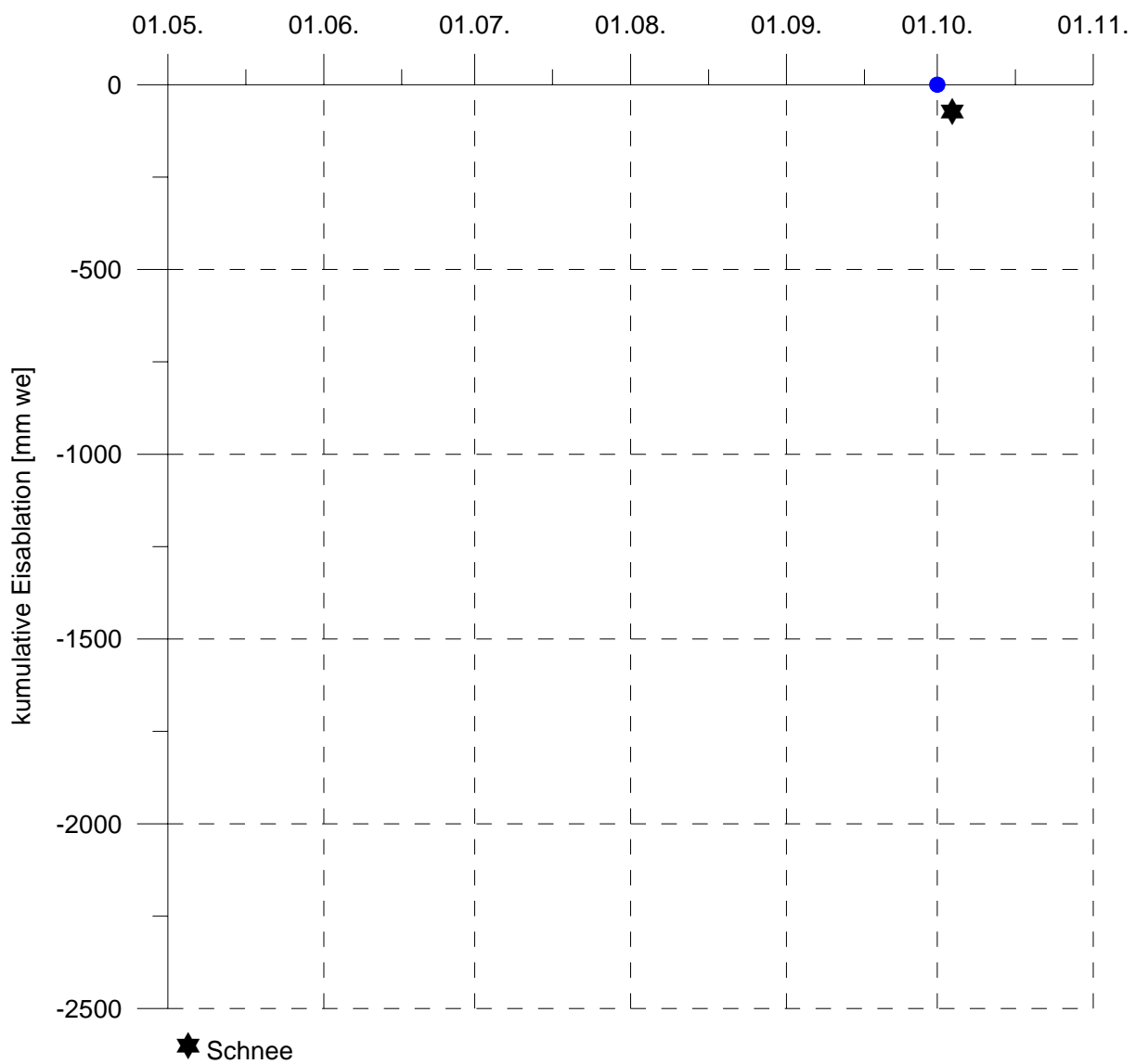


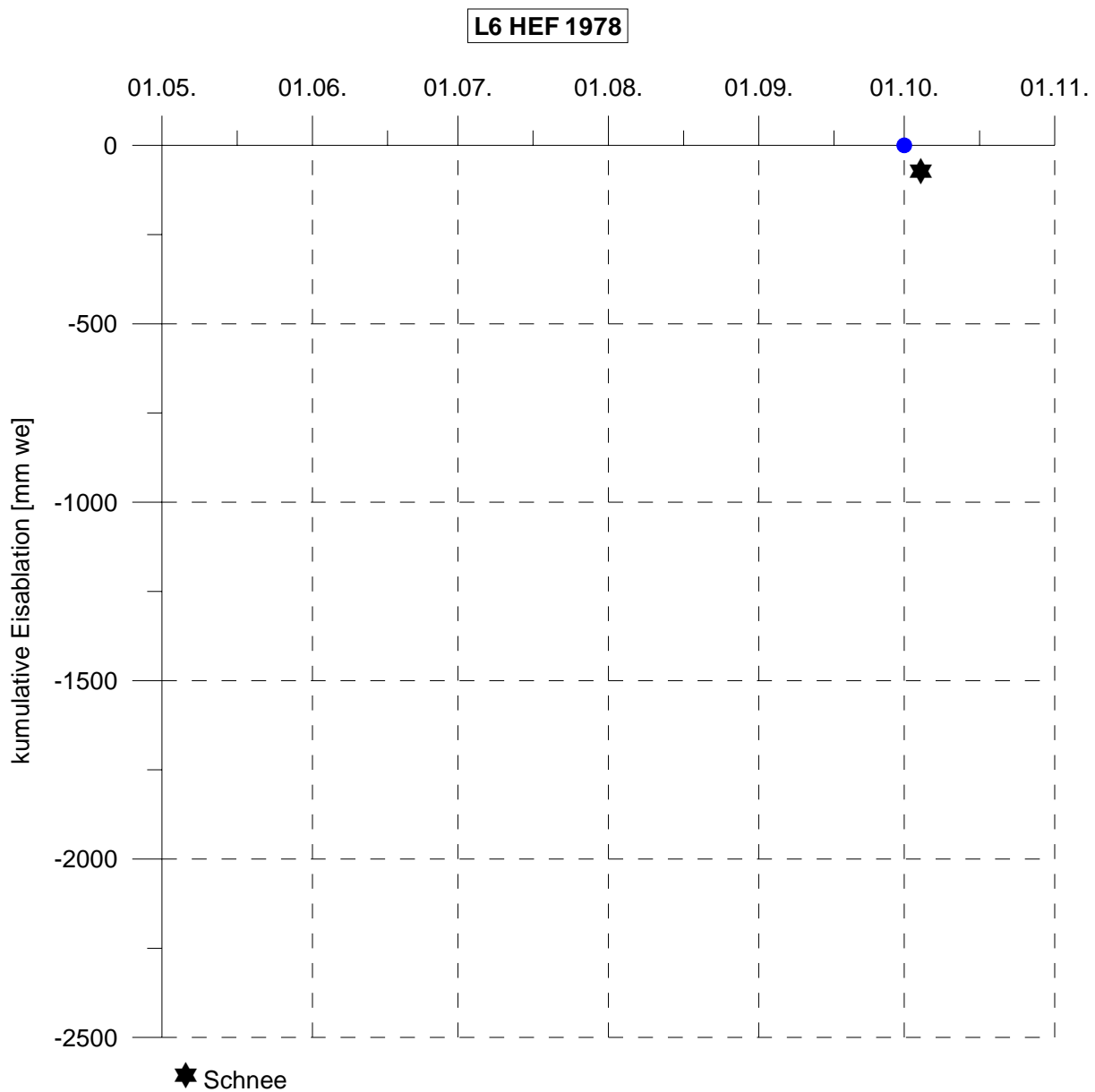


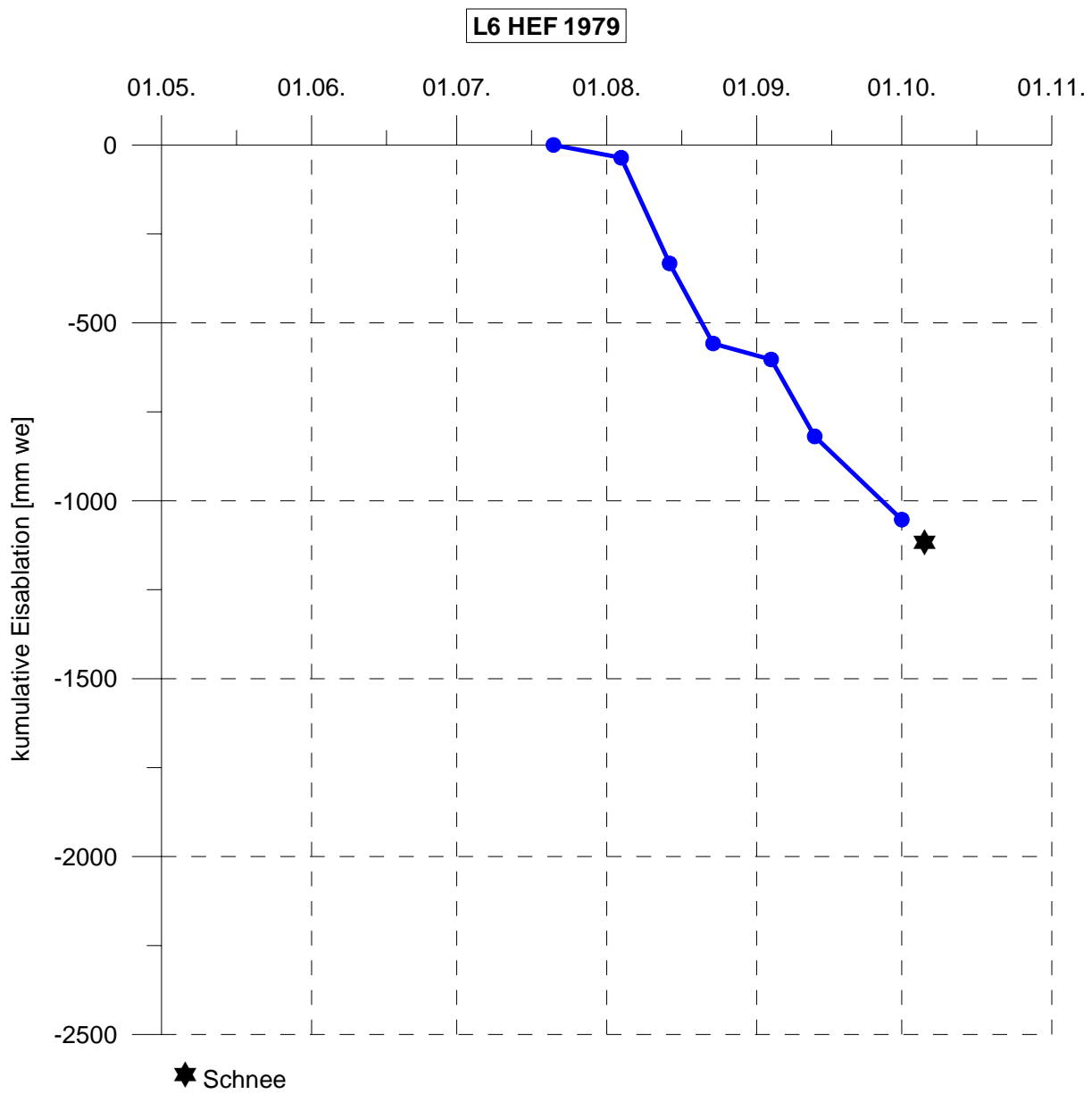


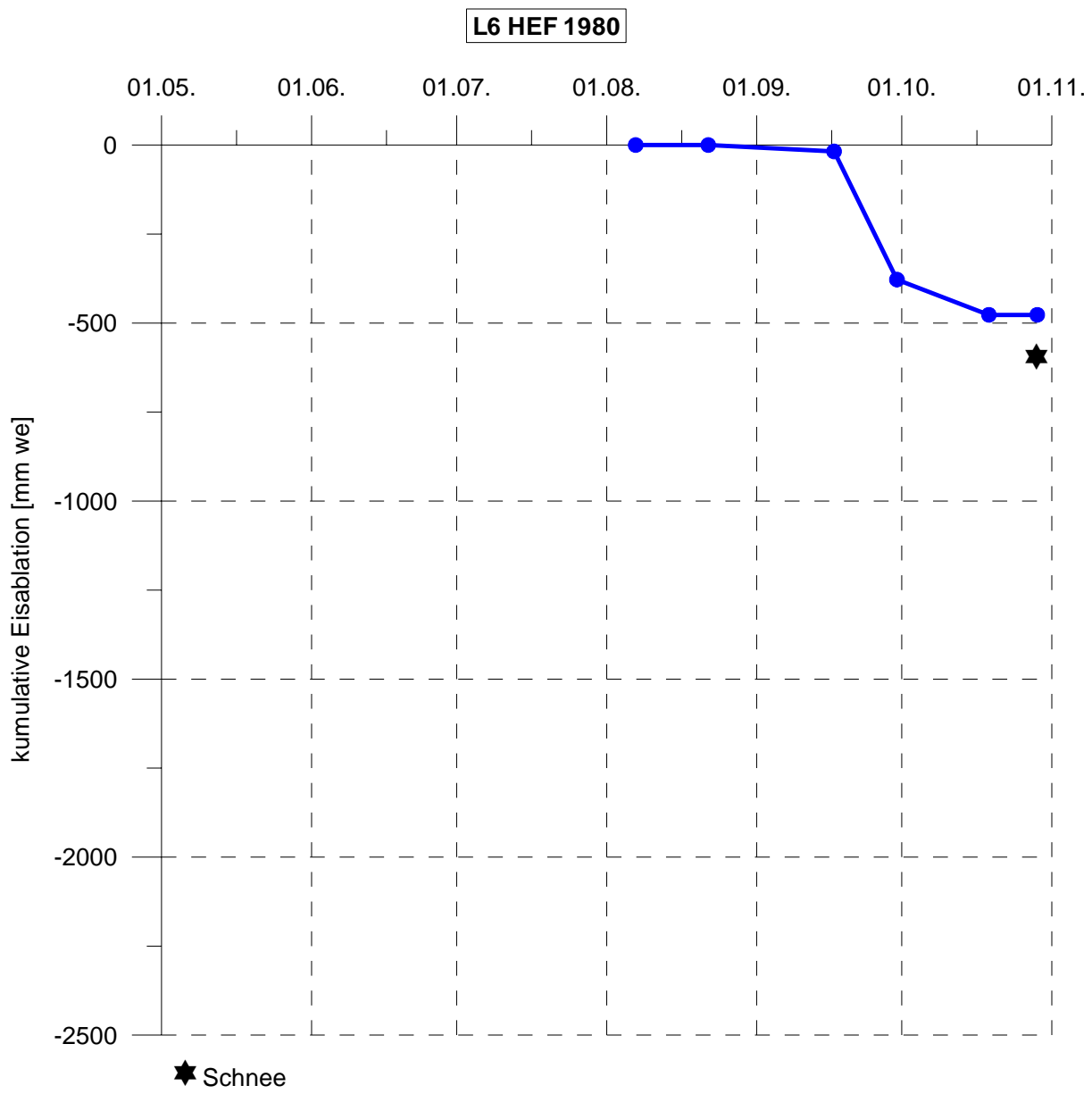


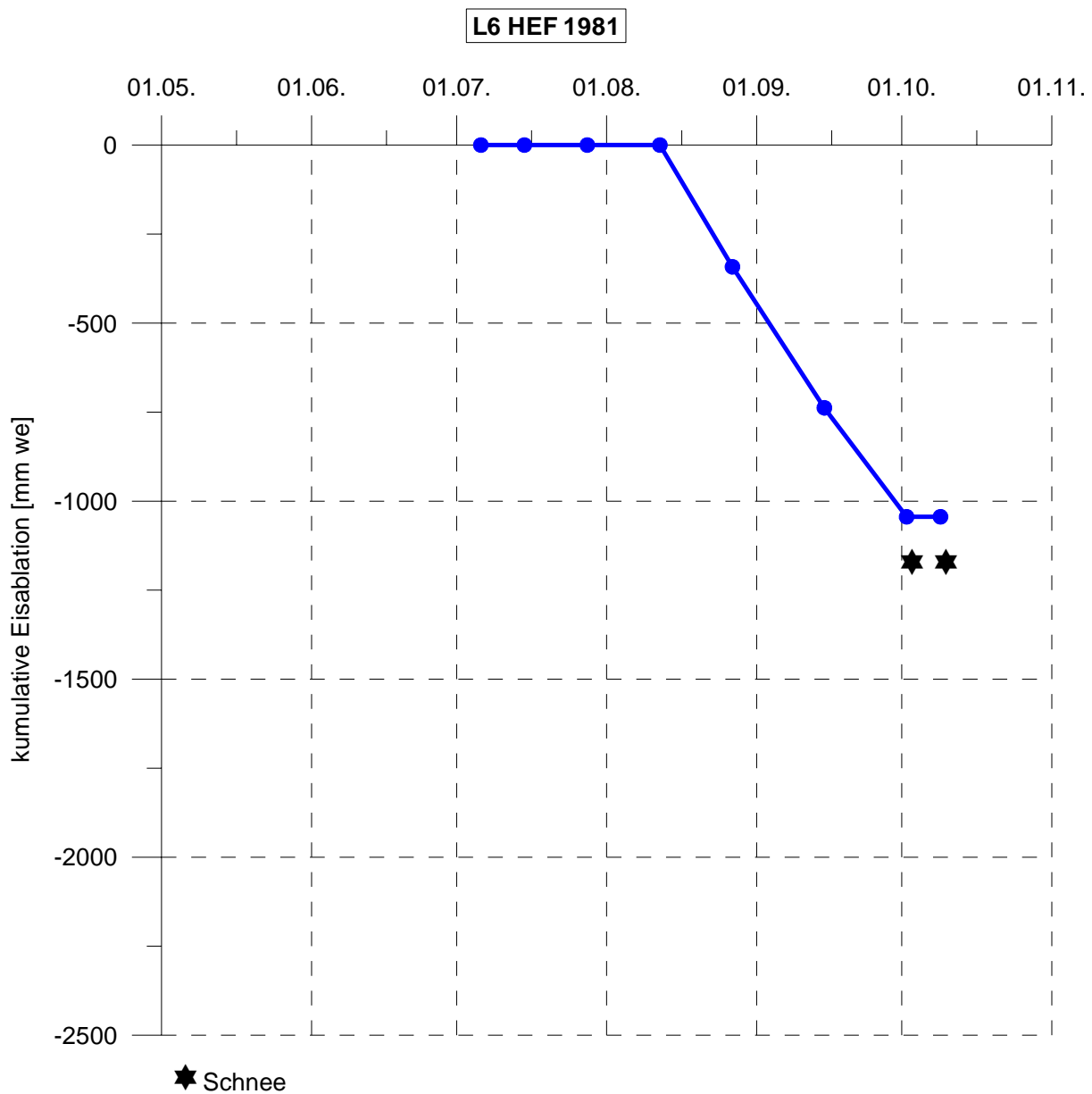
L6 HEF 1977

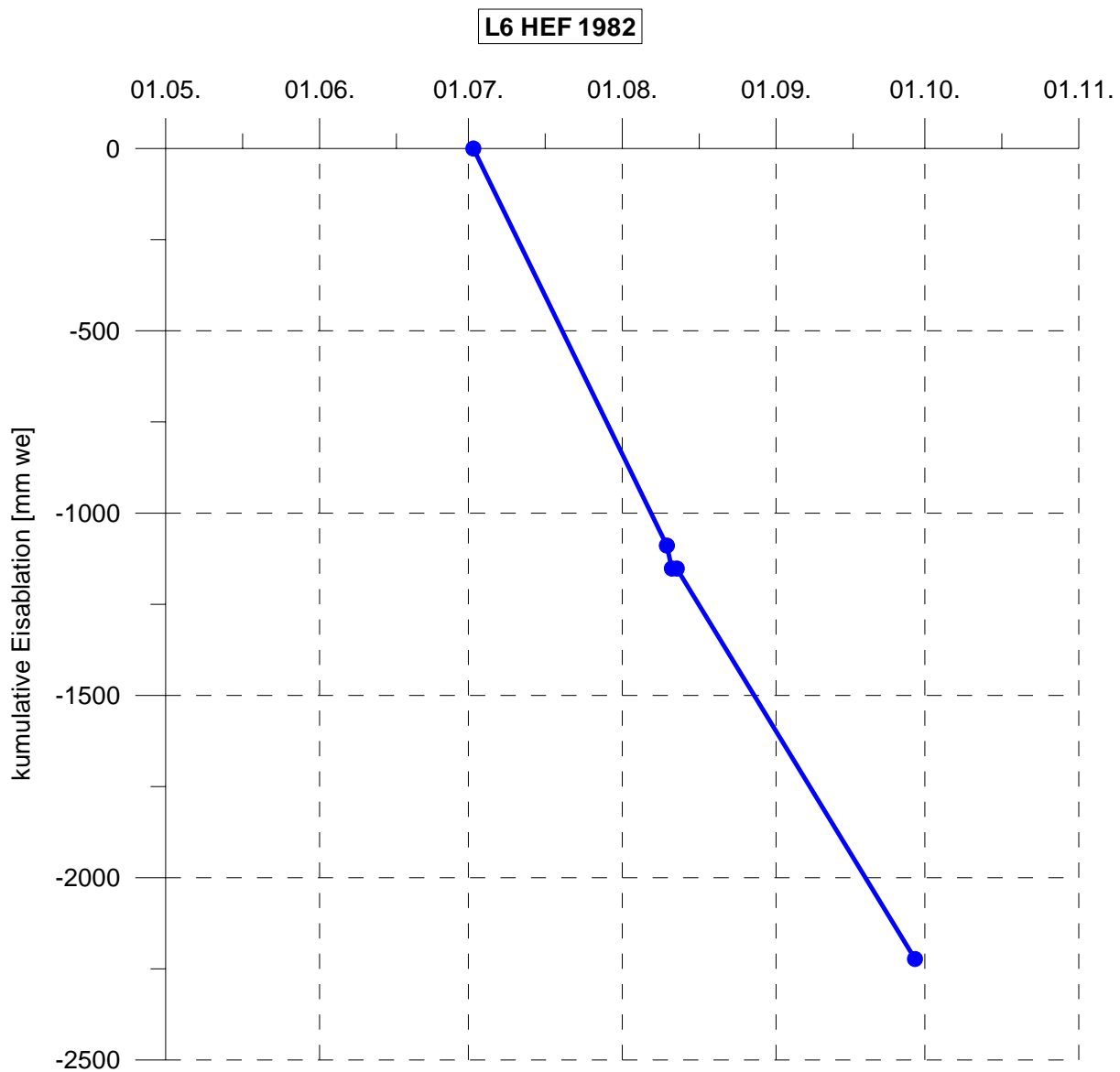


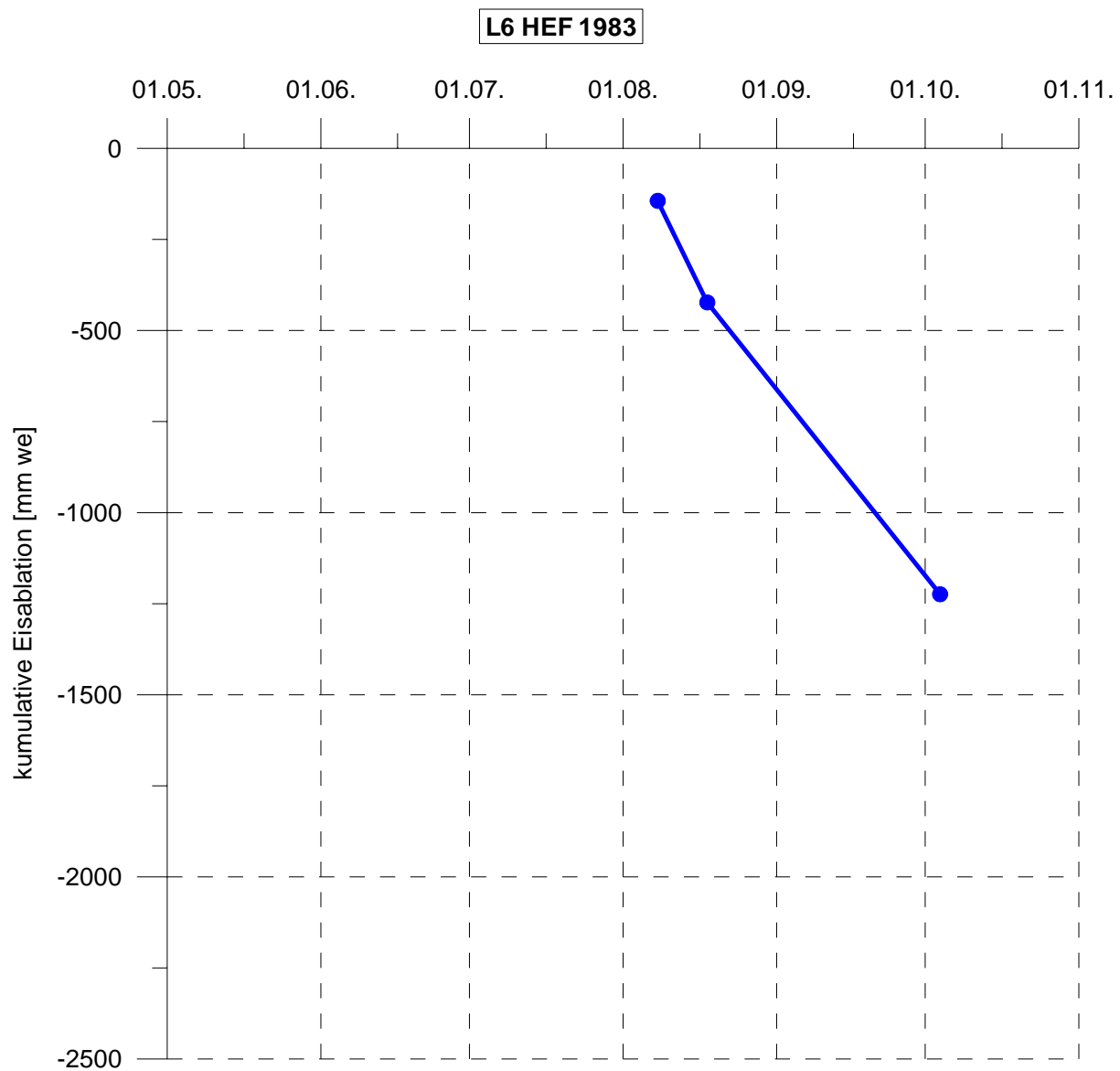


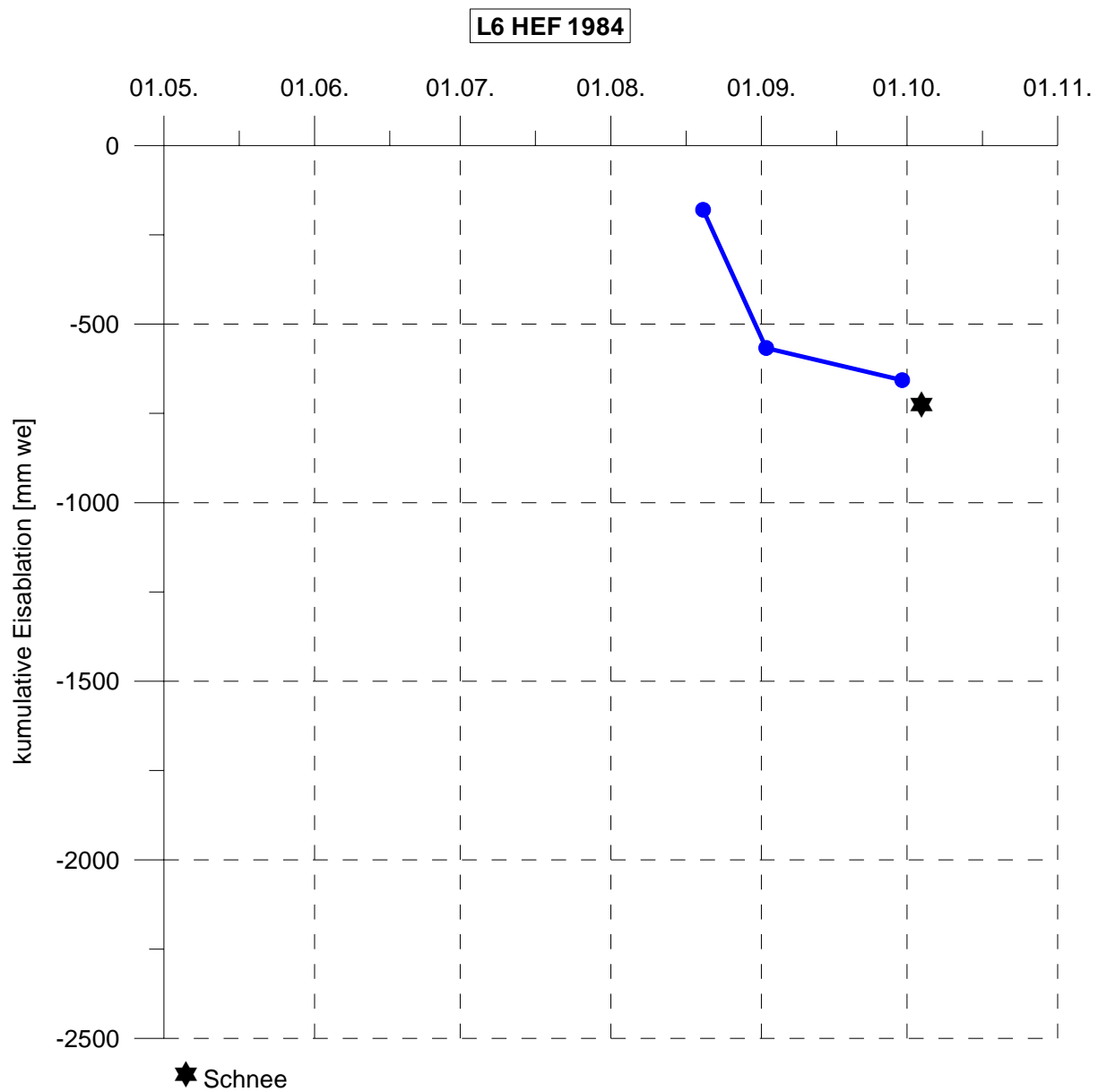


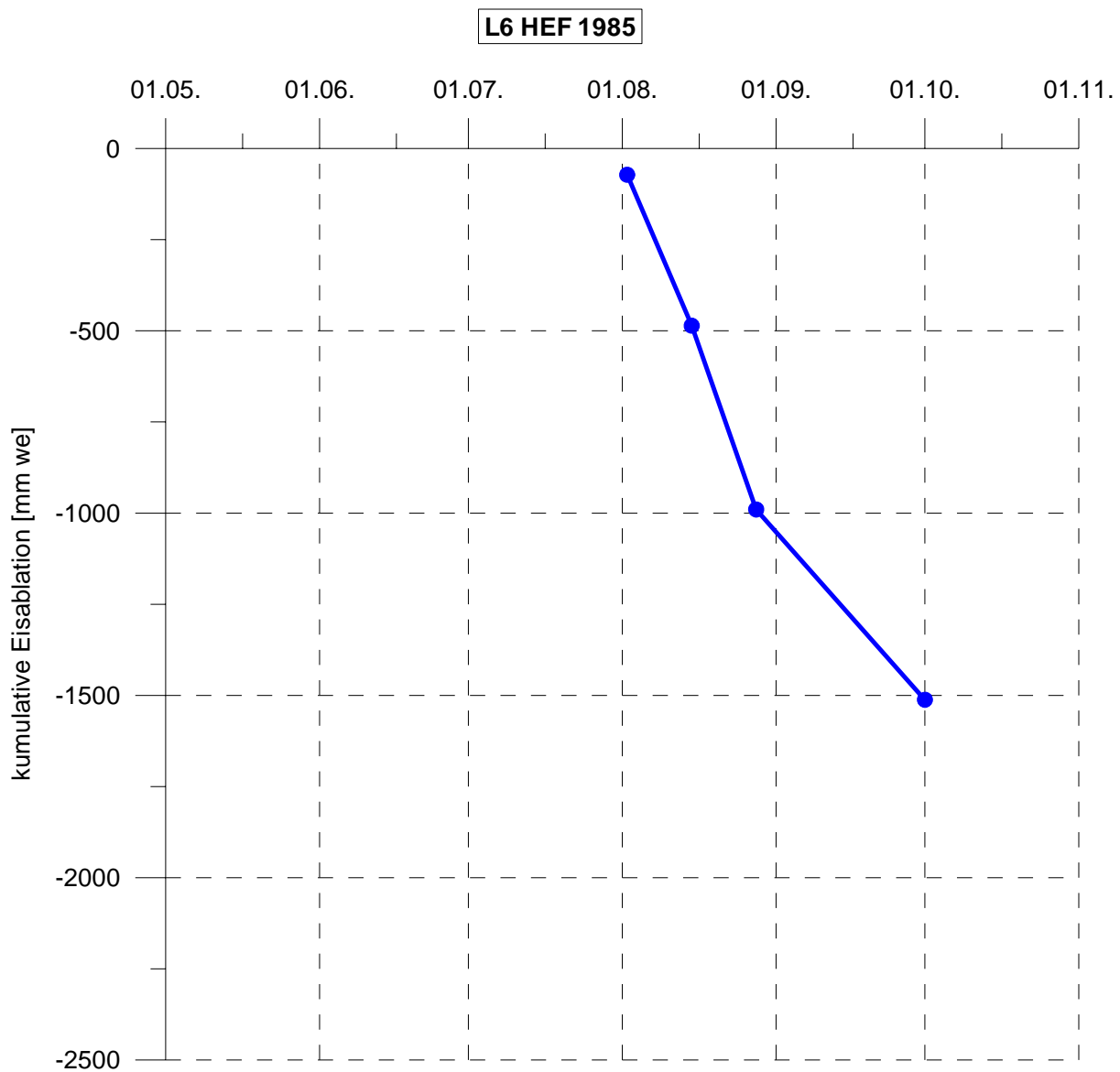


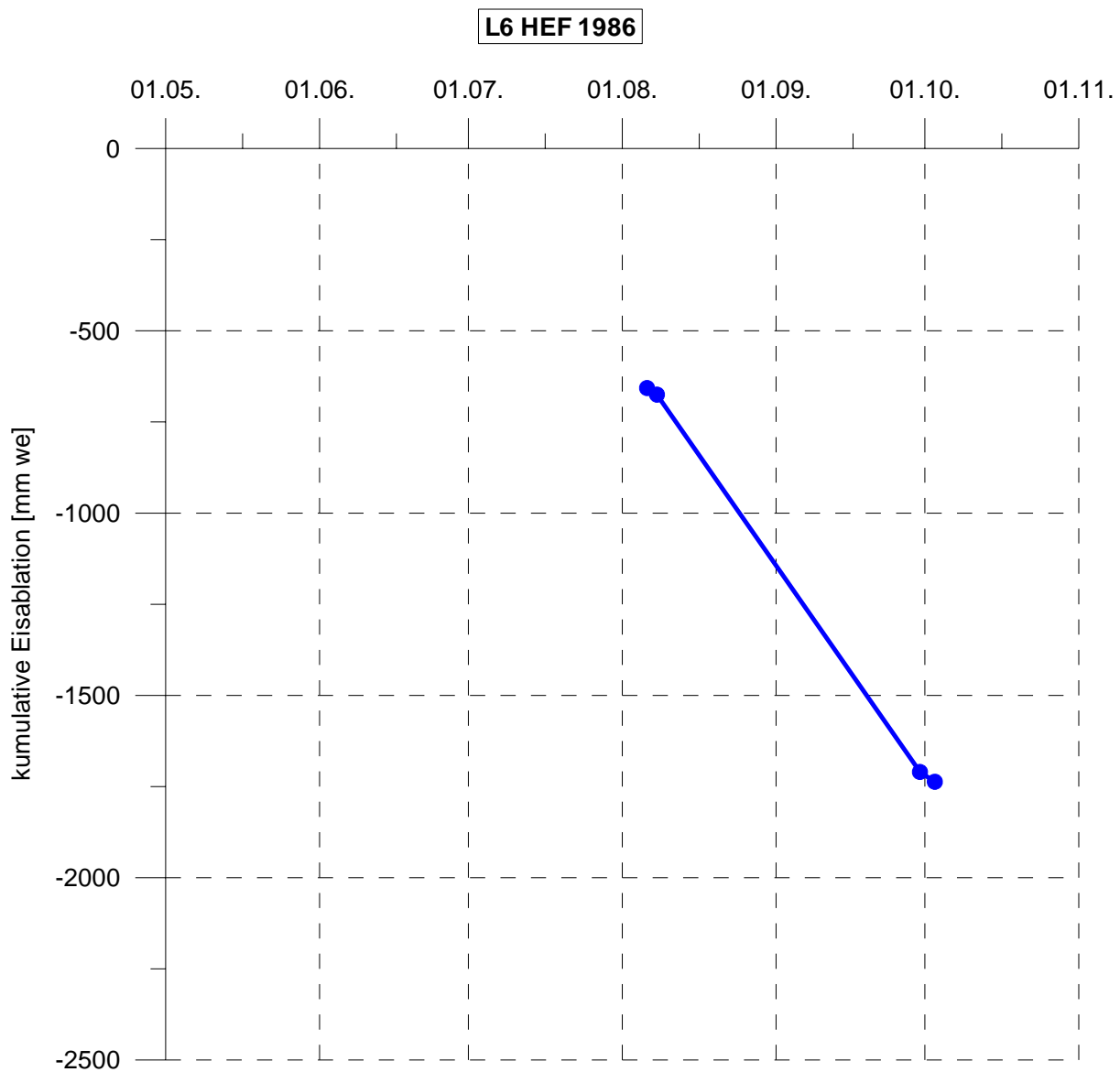


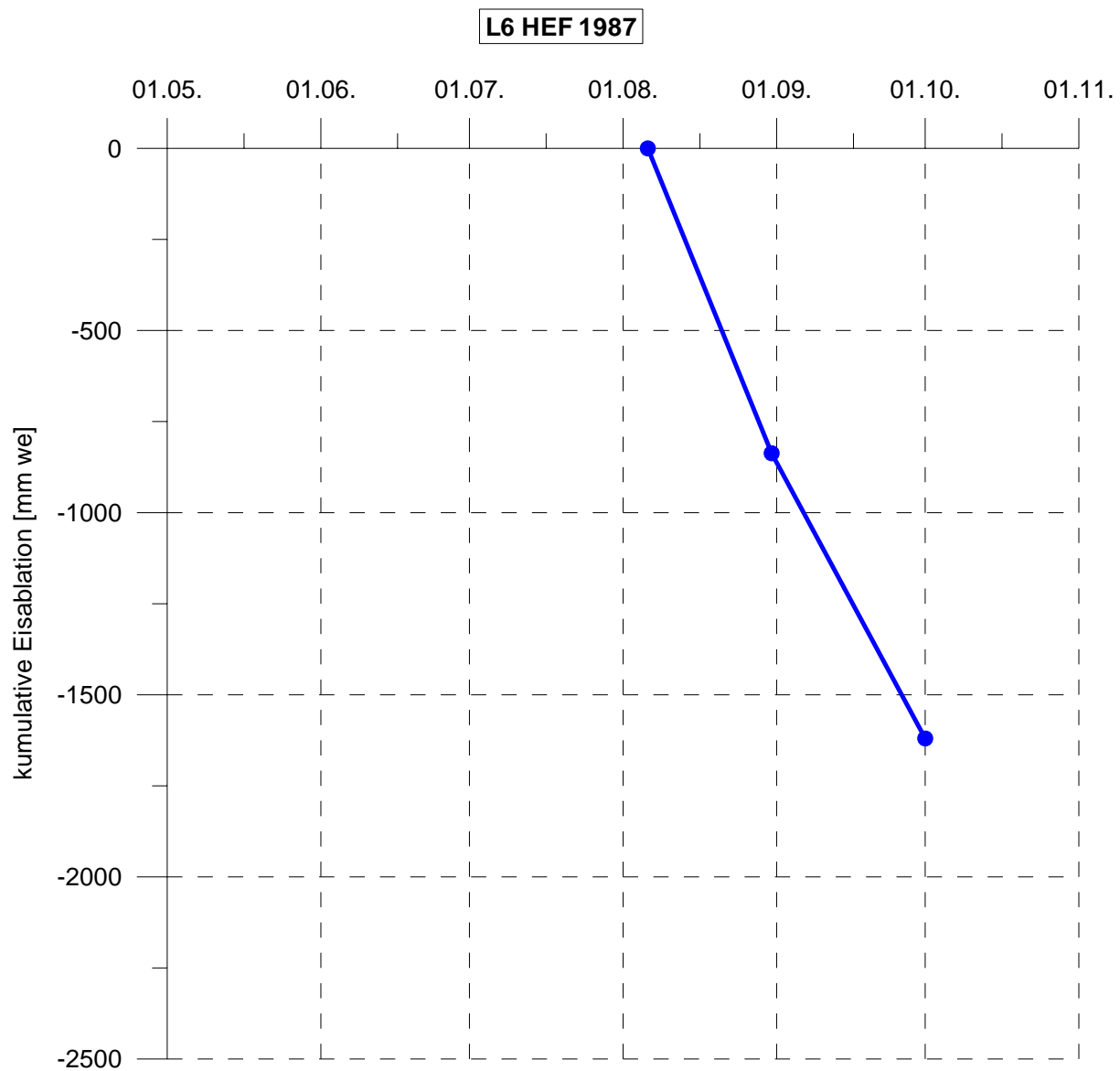


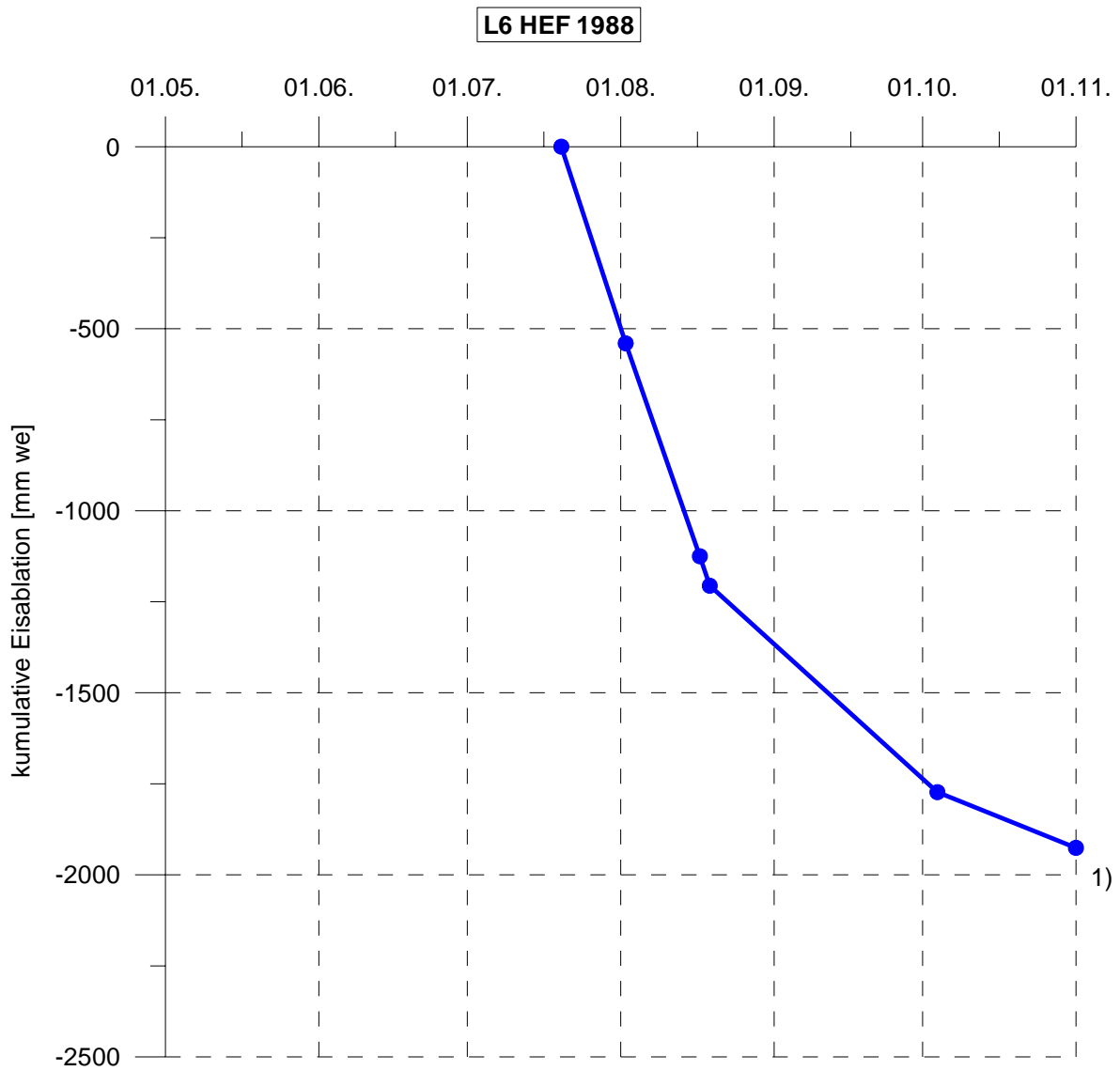




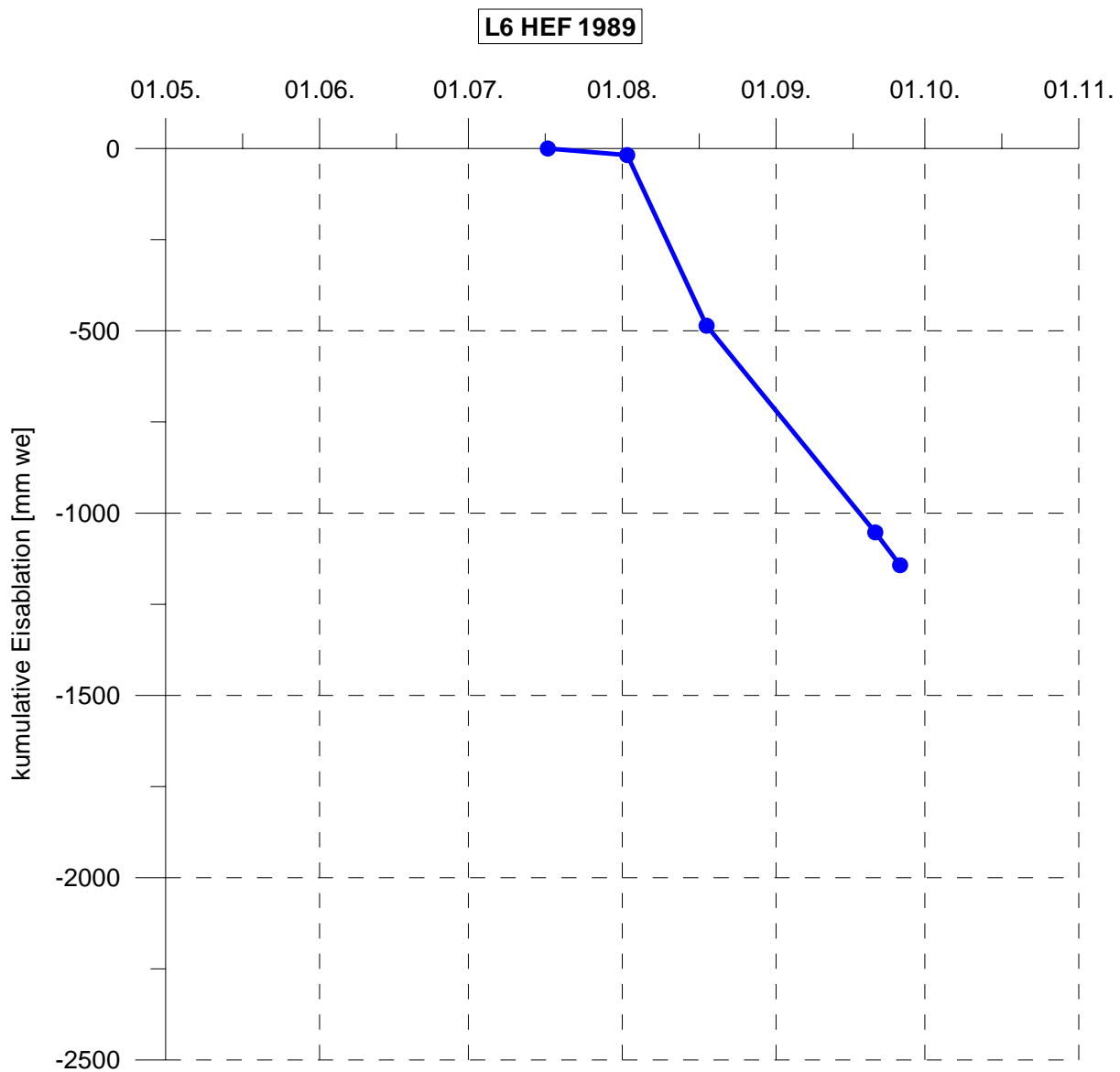


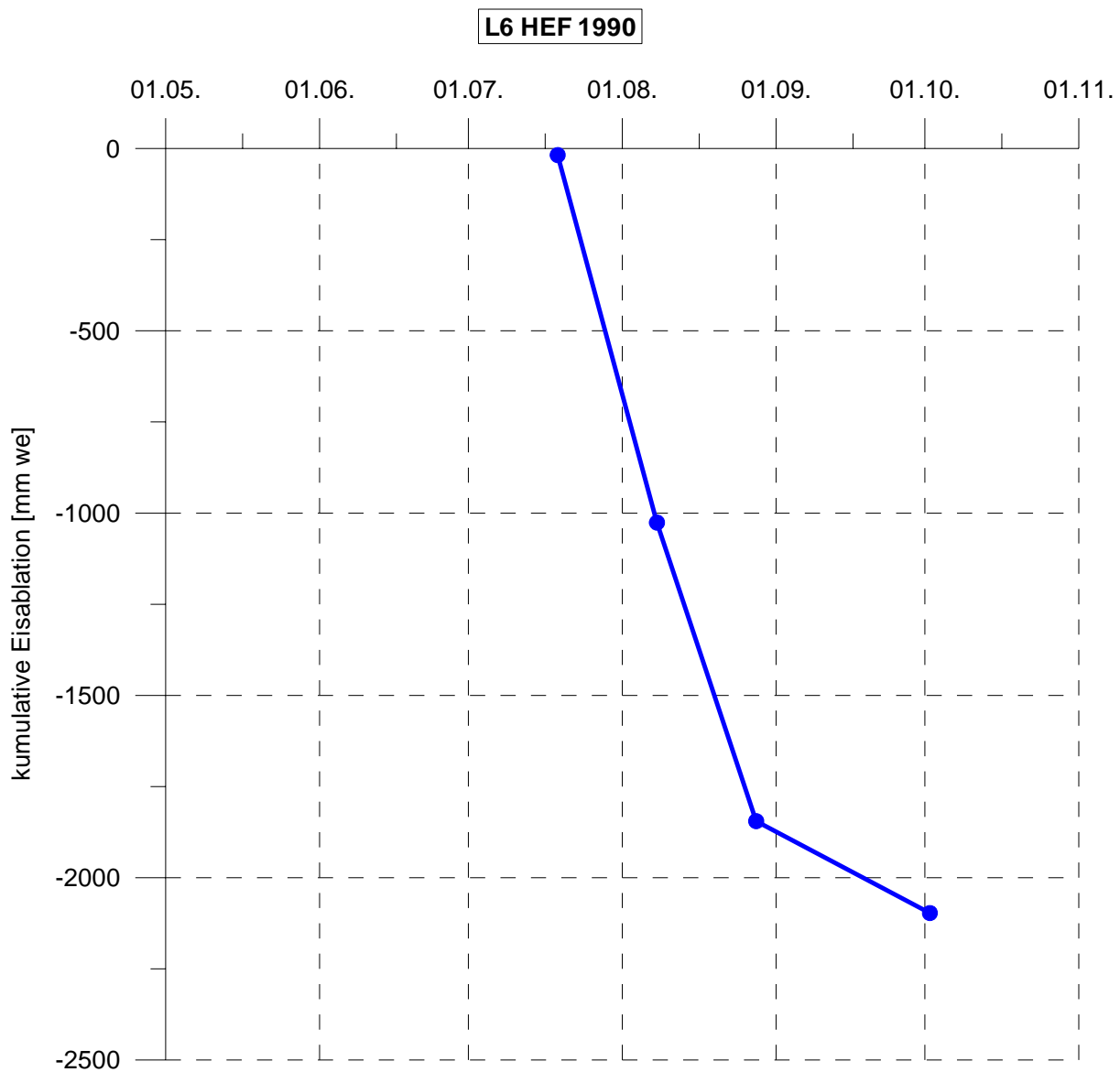


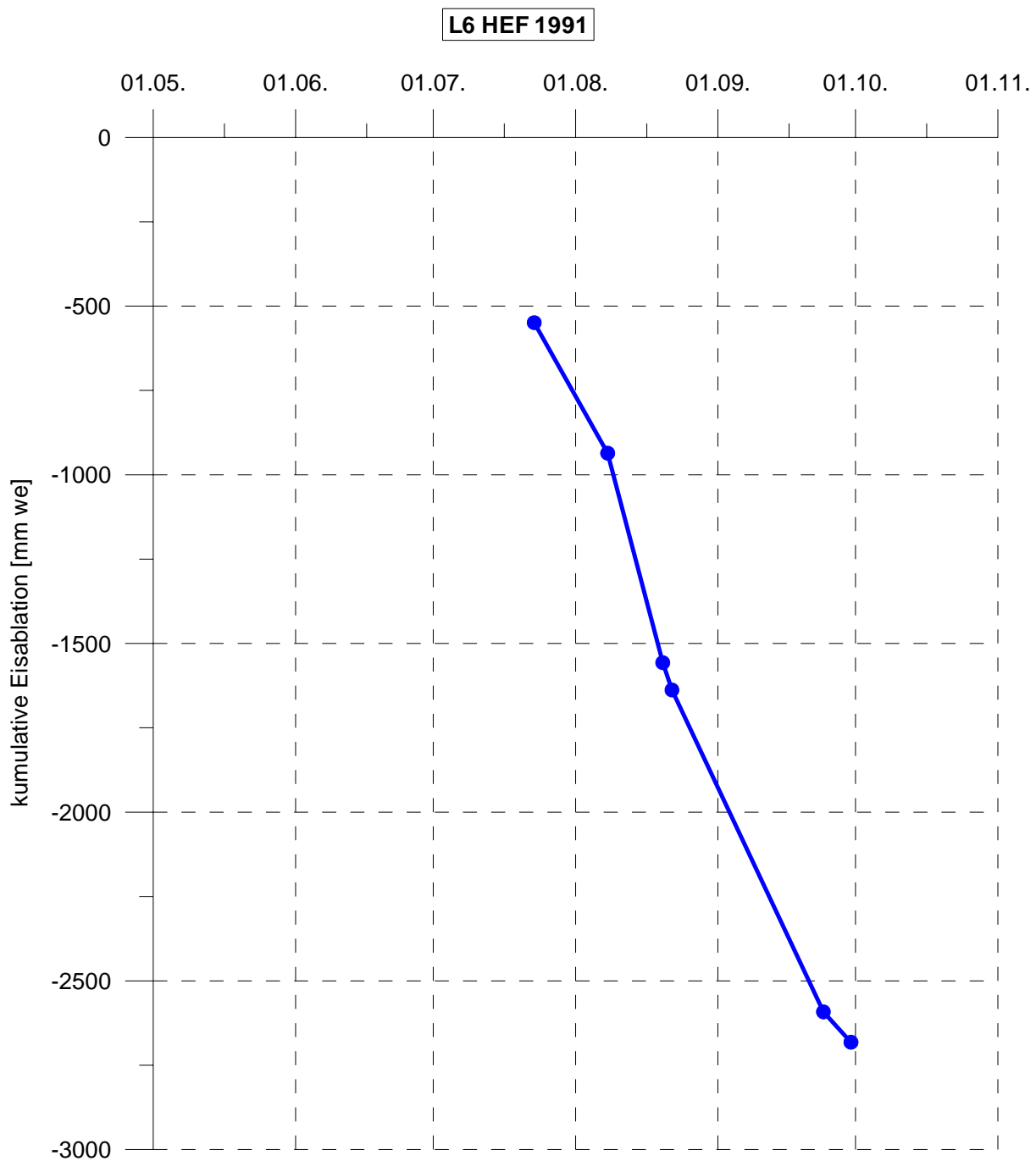


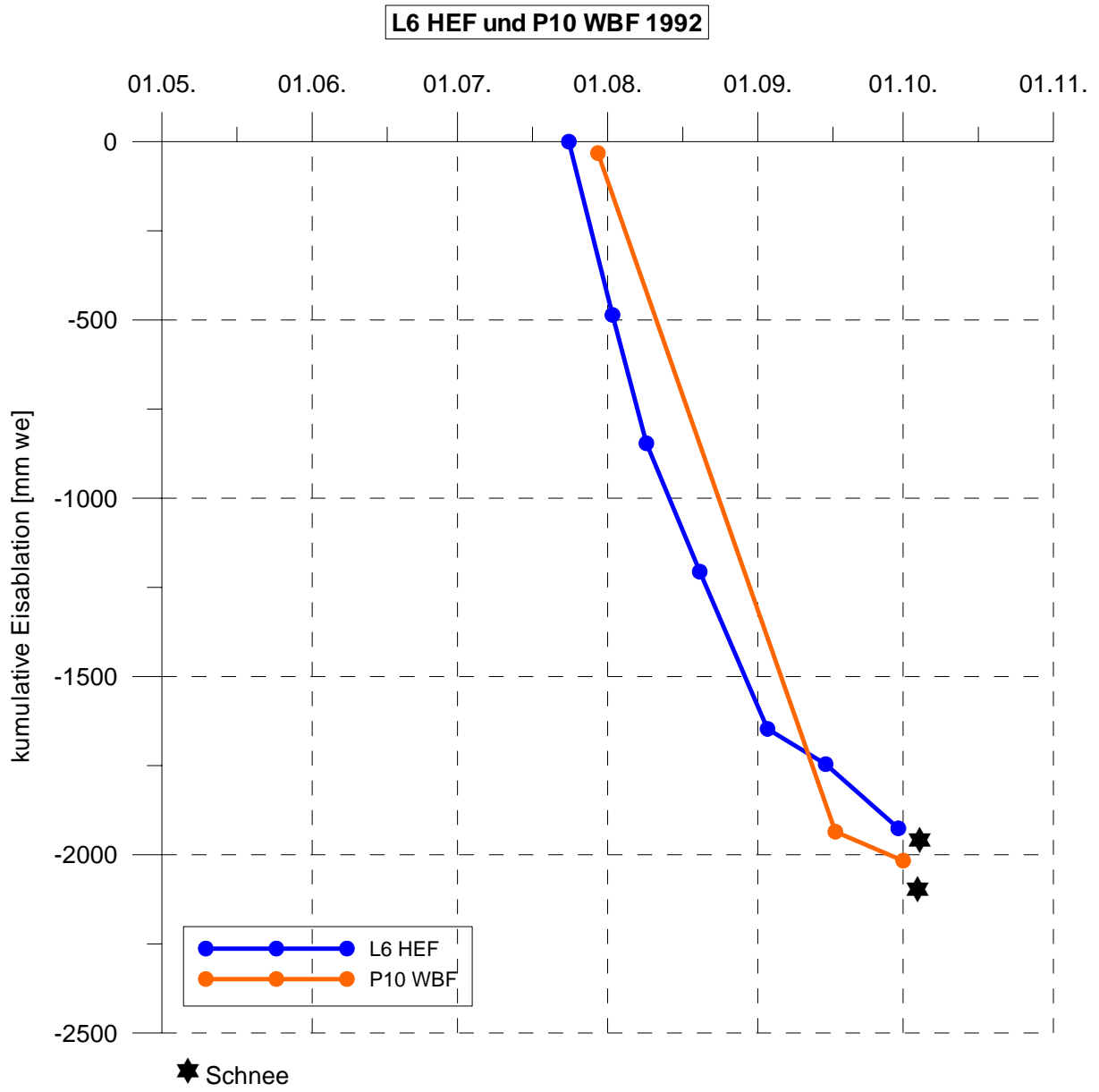


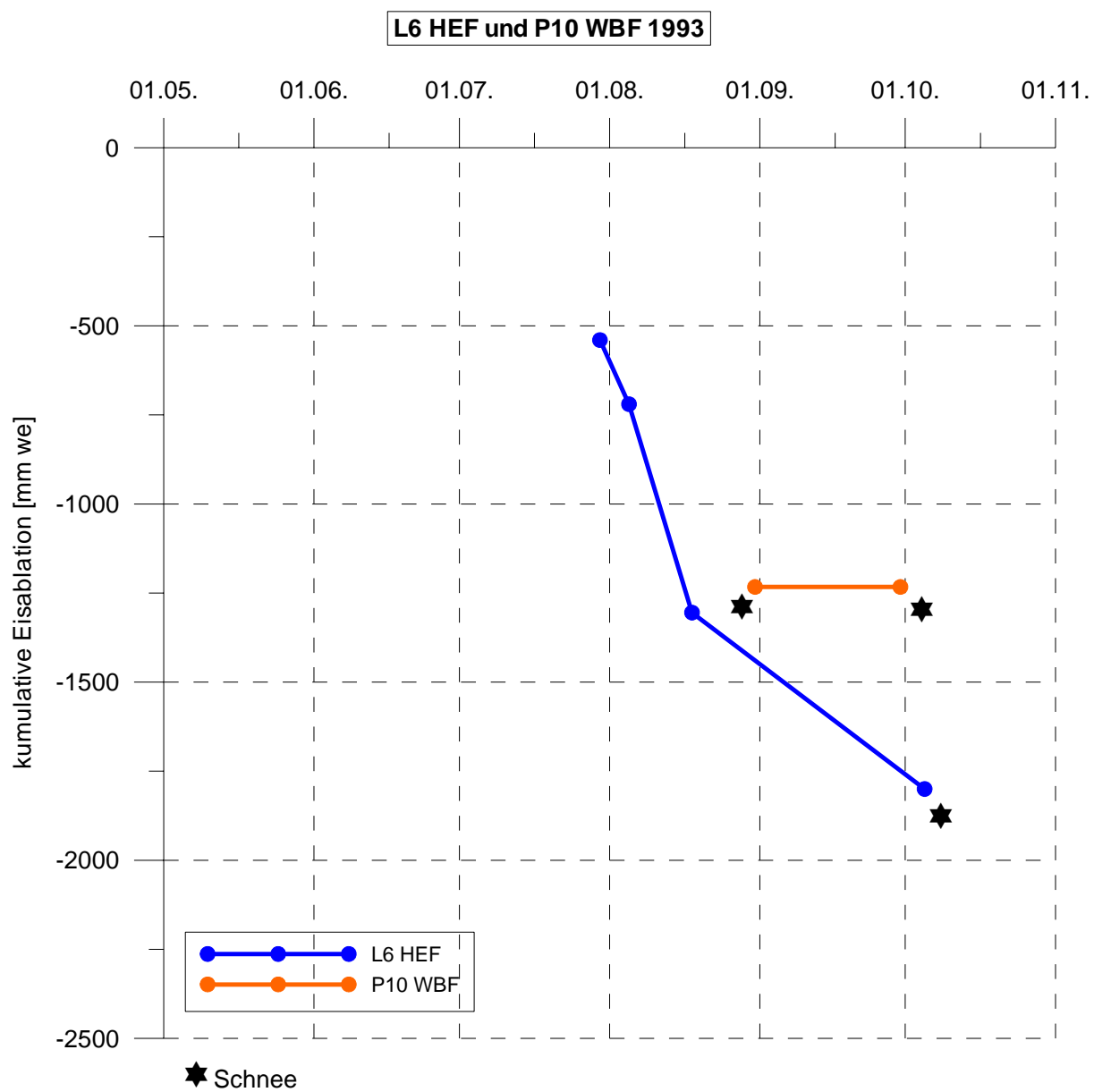
1) Ablesedatum 31.03.1989. Keine Ablation im Winter angenommen daher auf 01.11.1988 gesetzt.



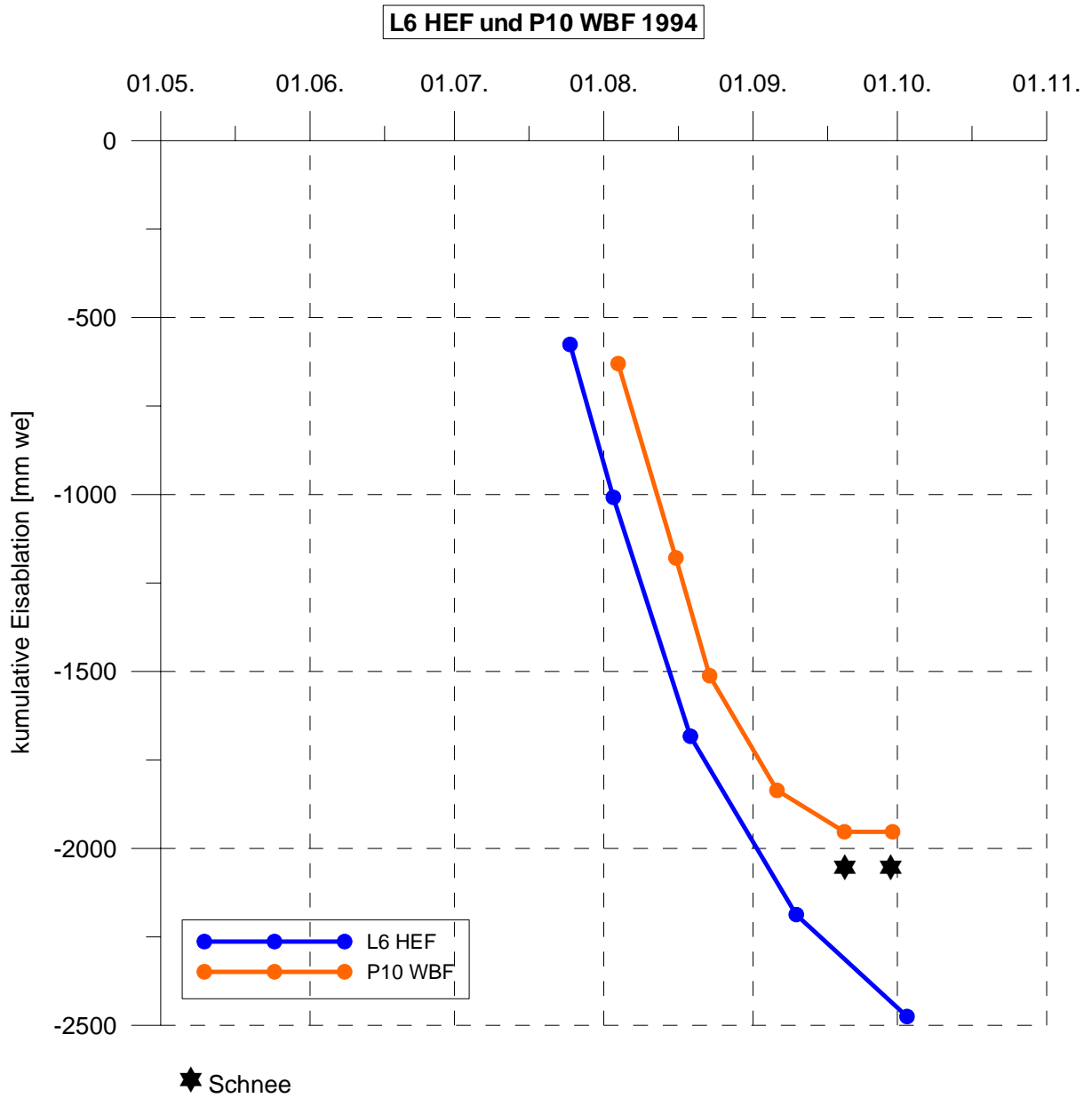


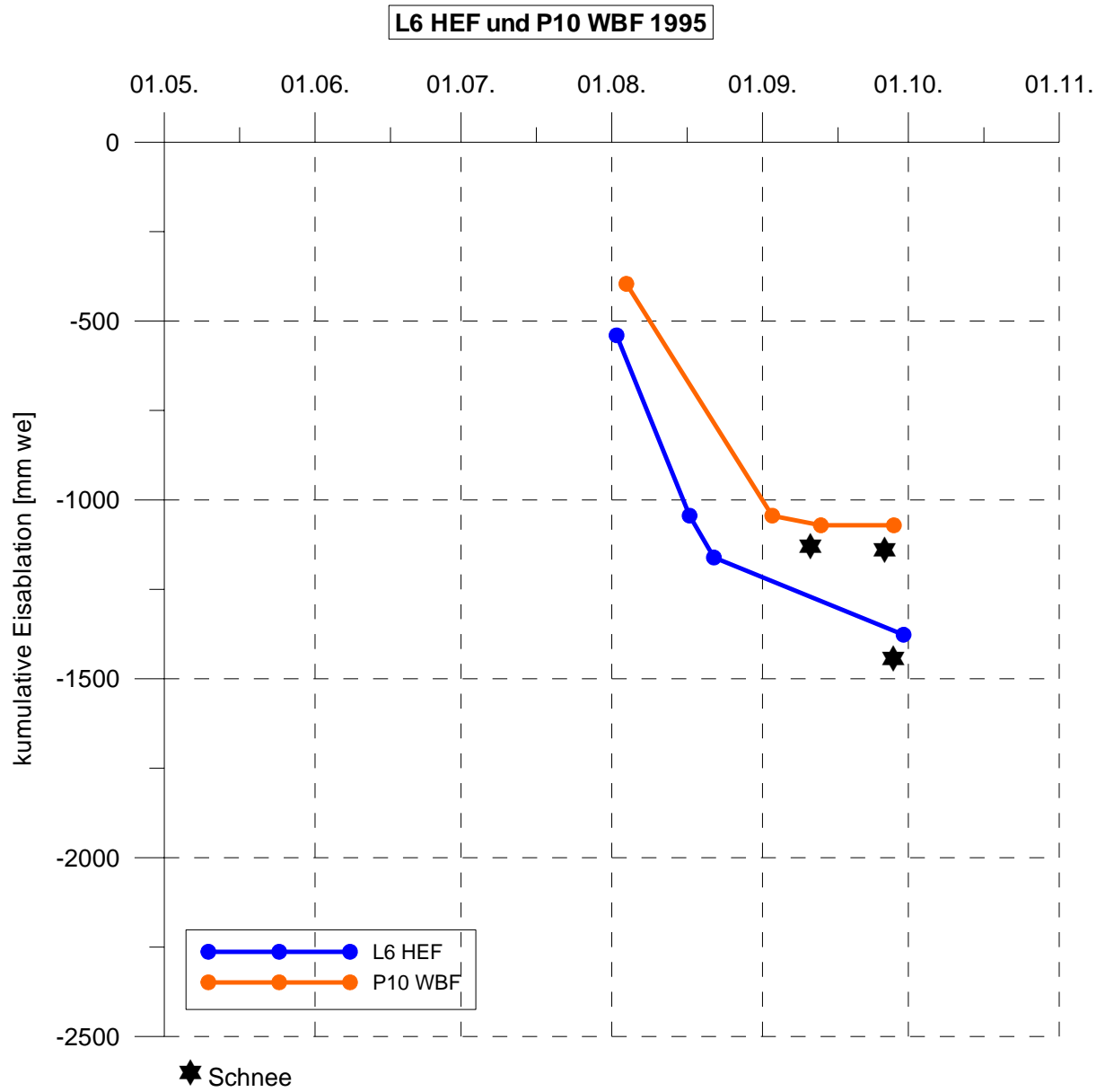


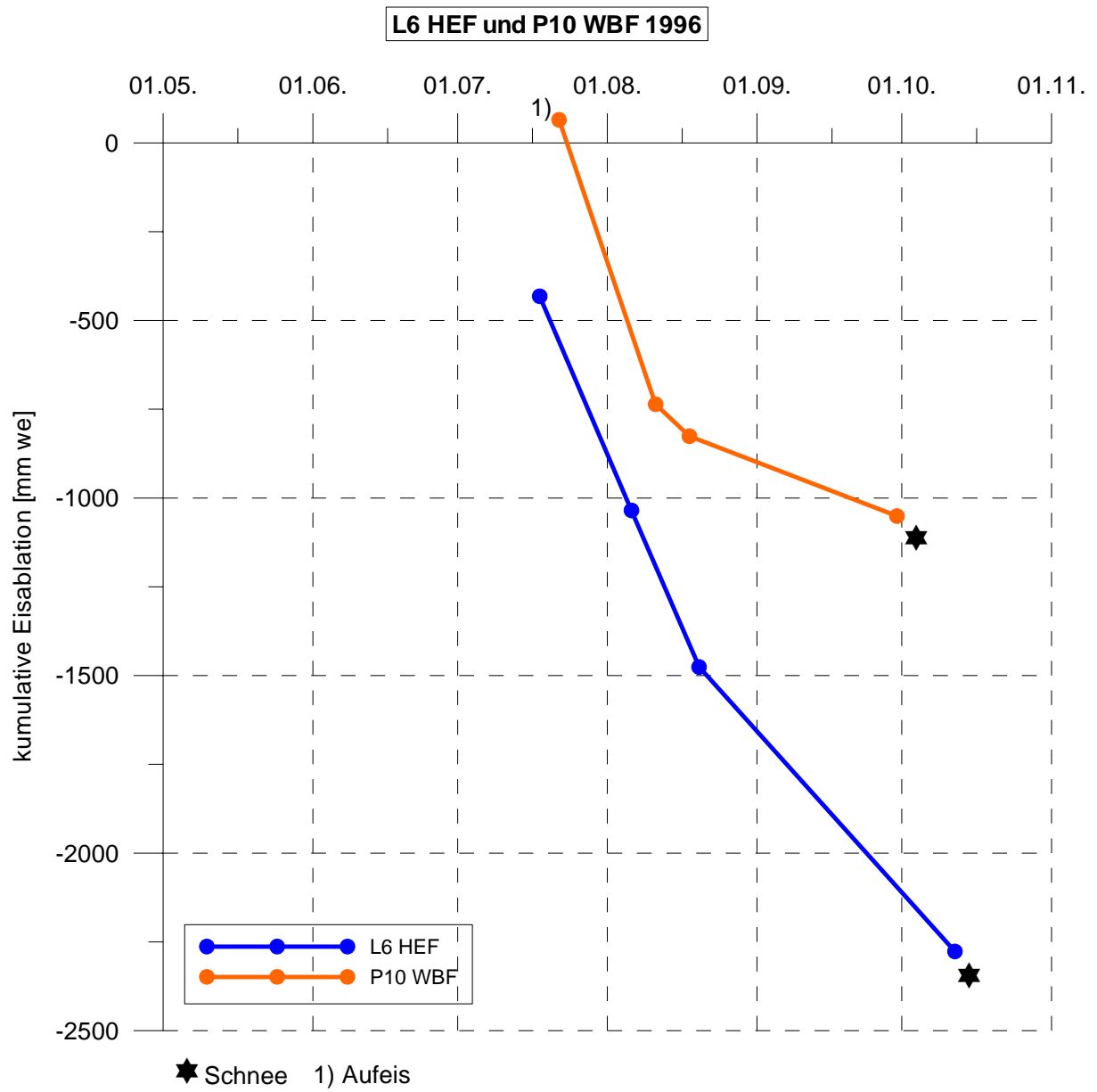


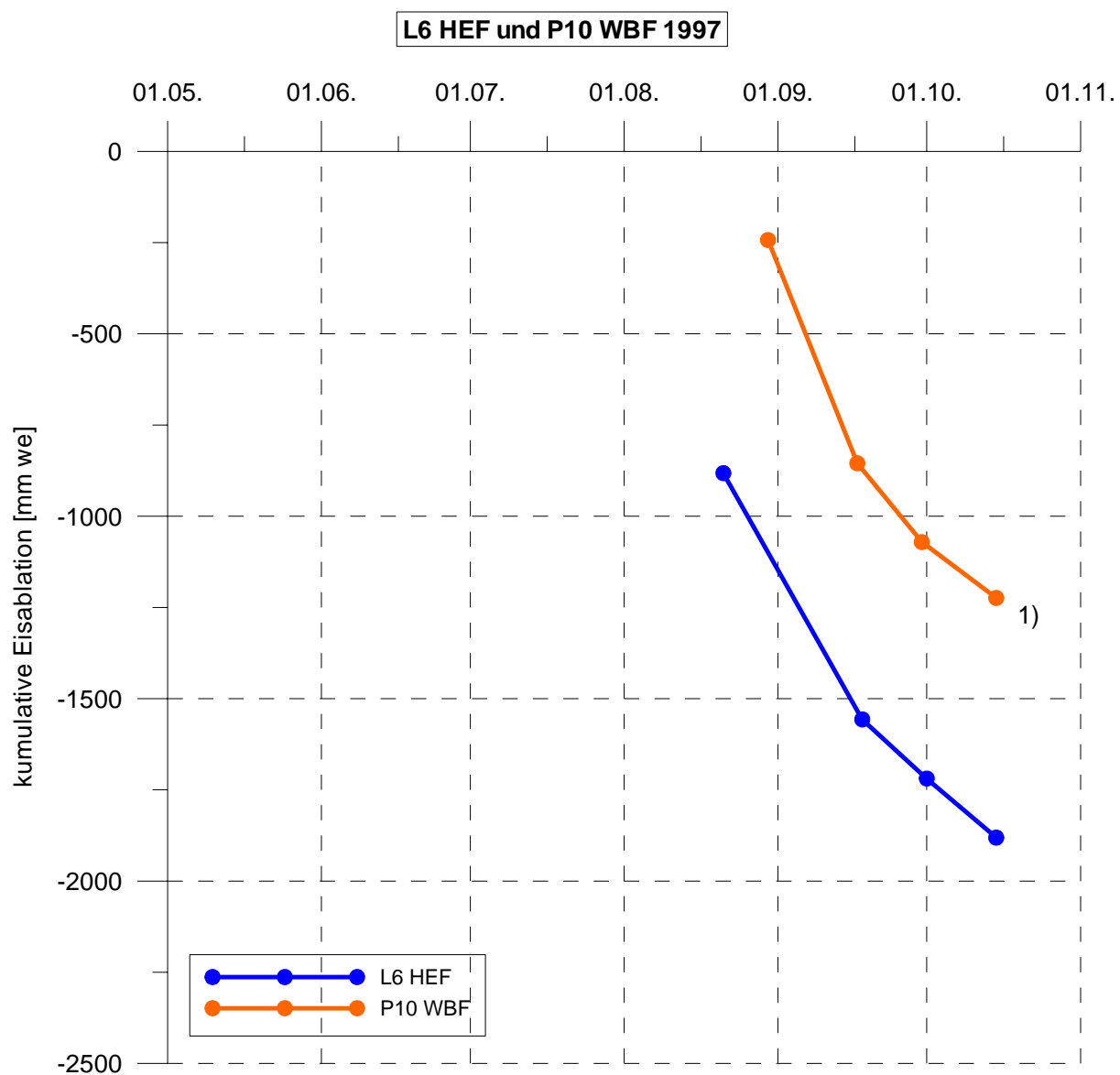


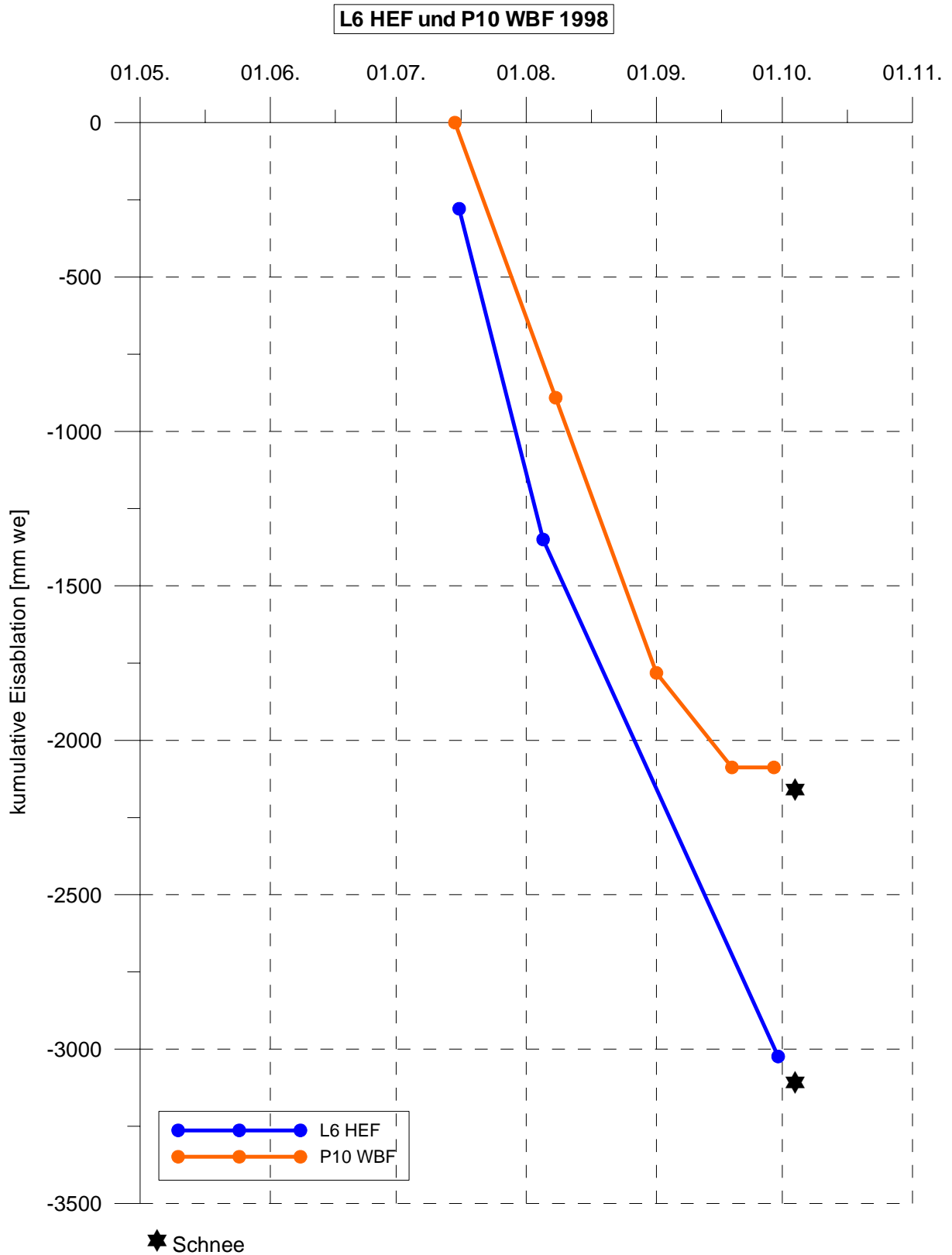
(Extrapolation parallel zu L6)

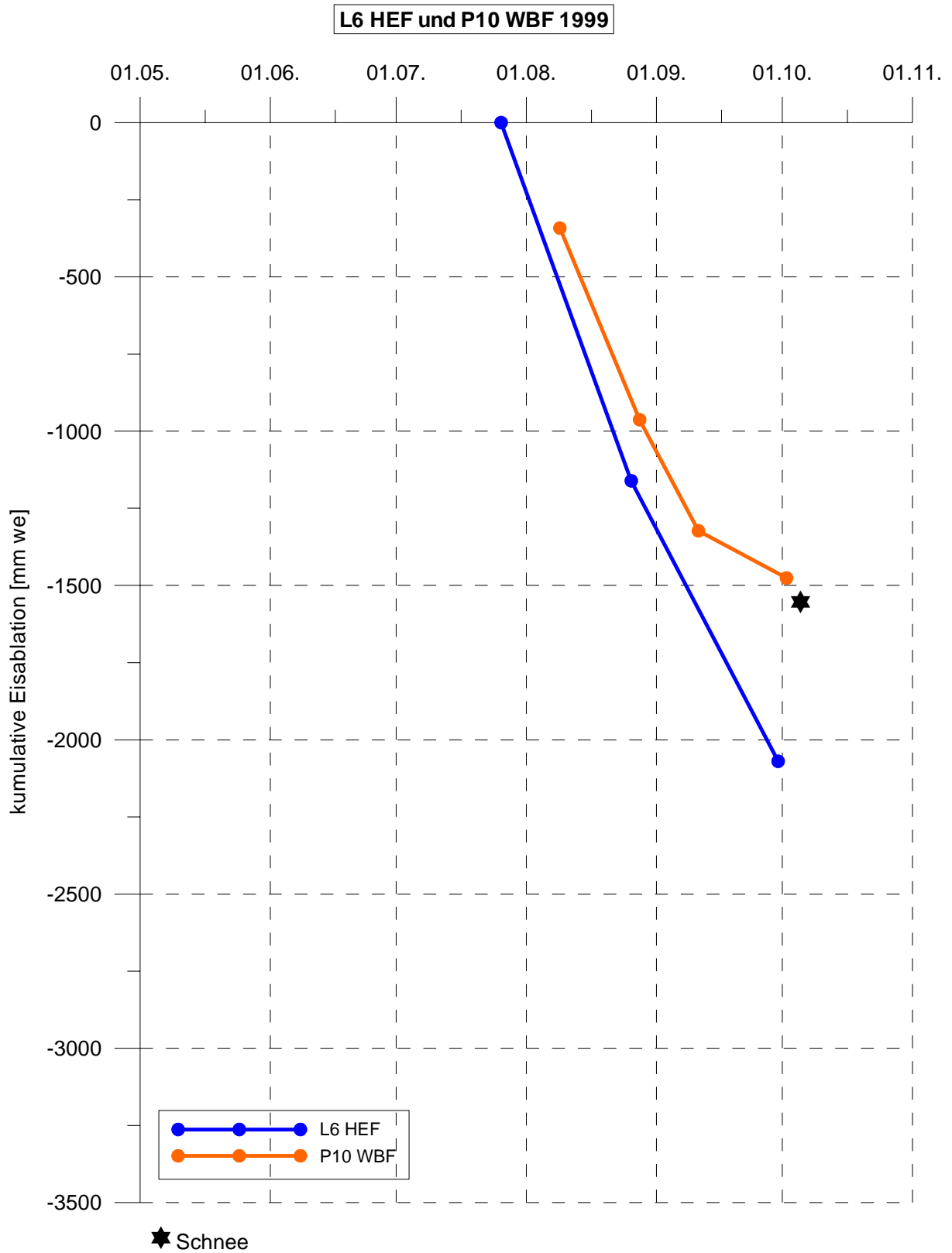


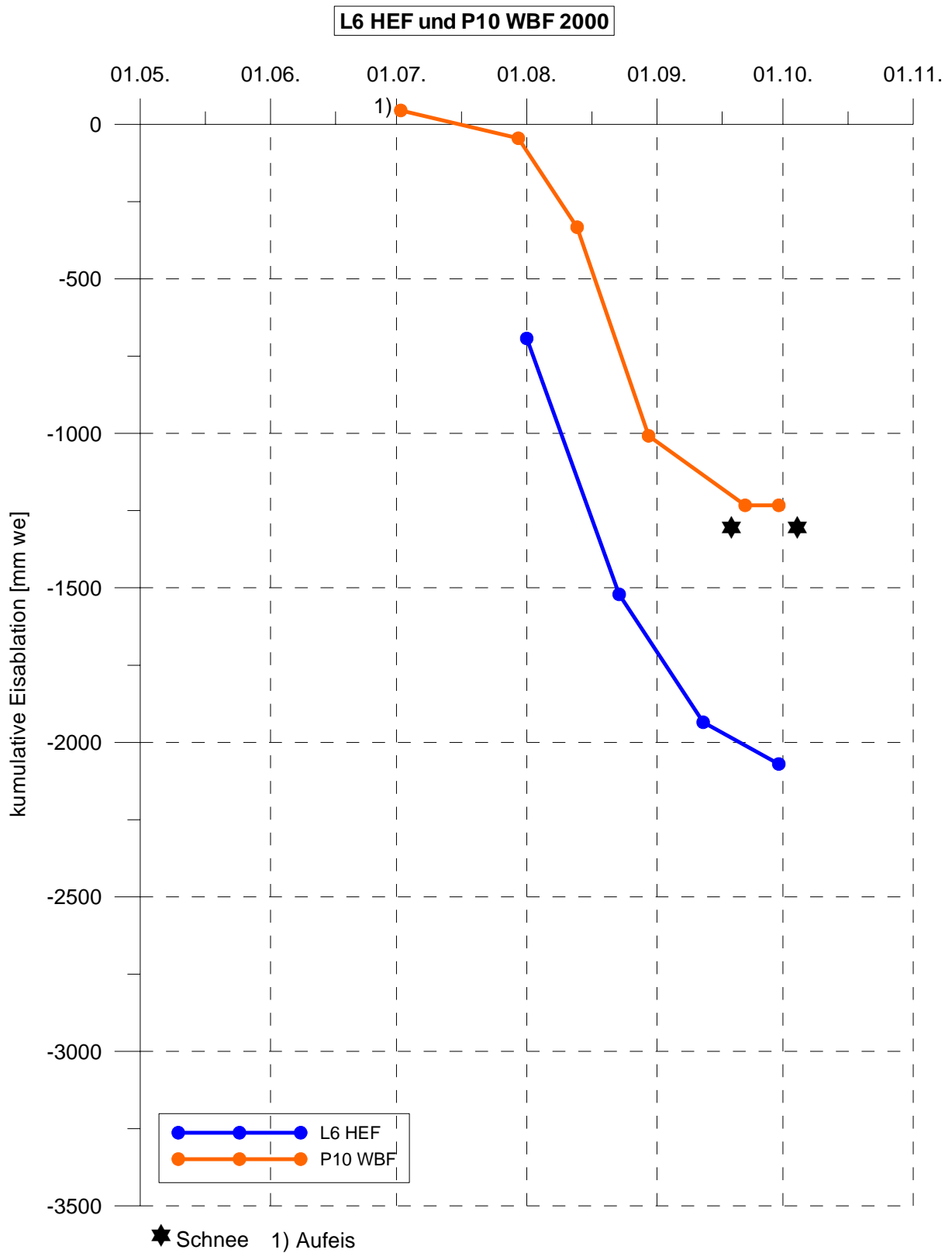


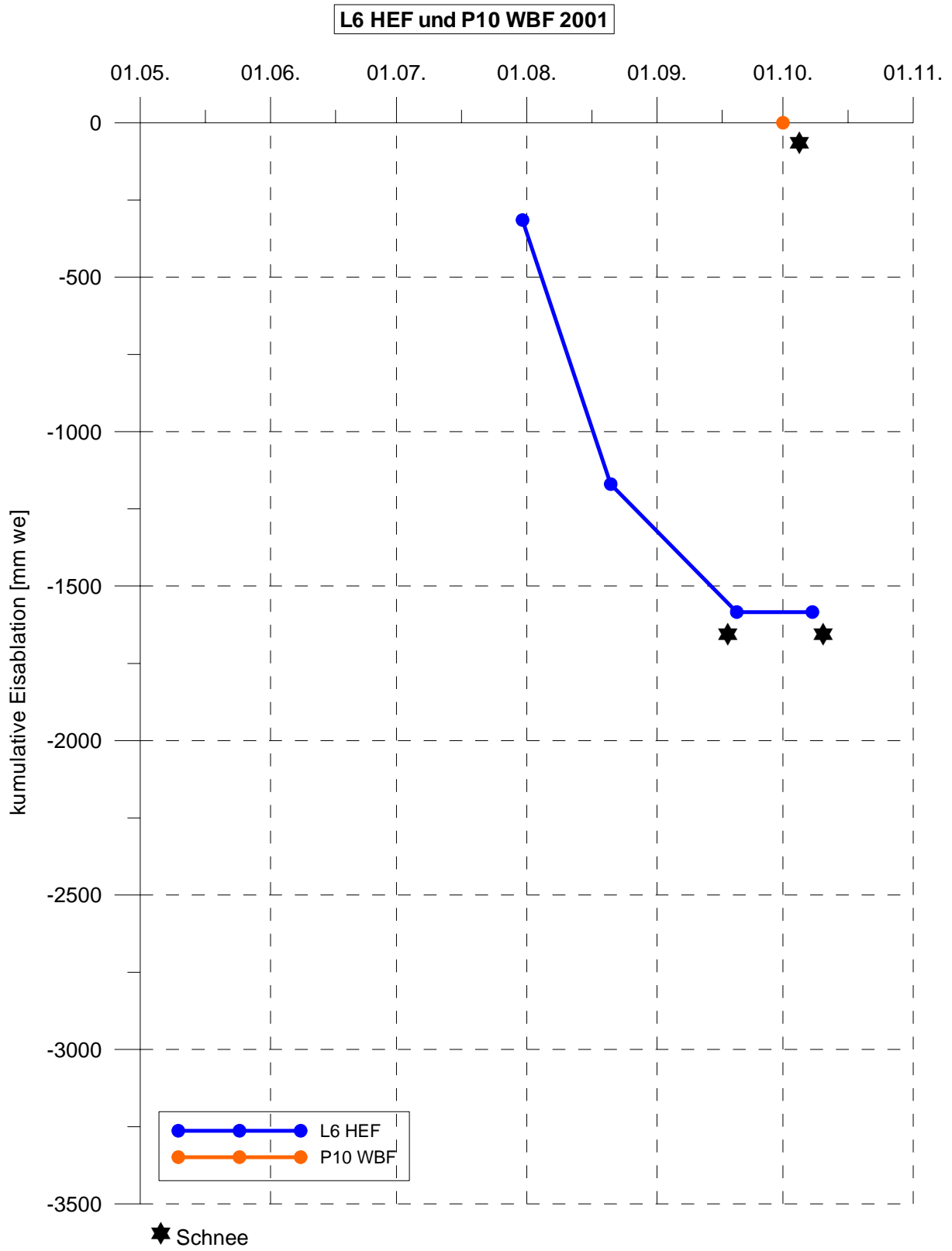


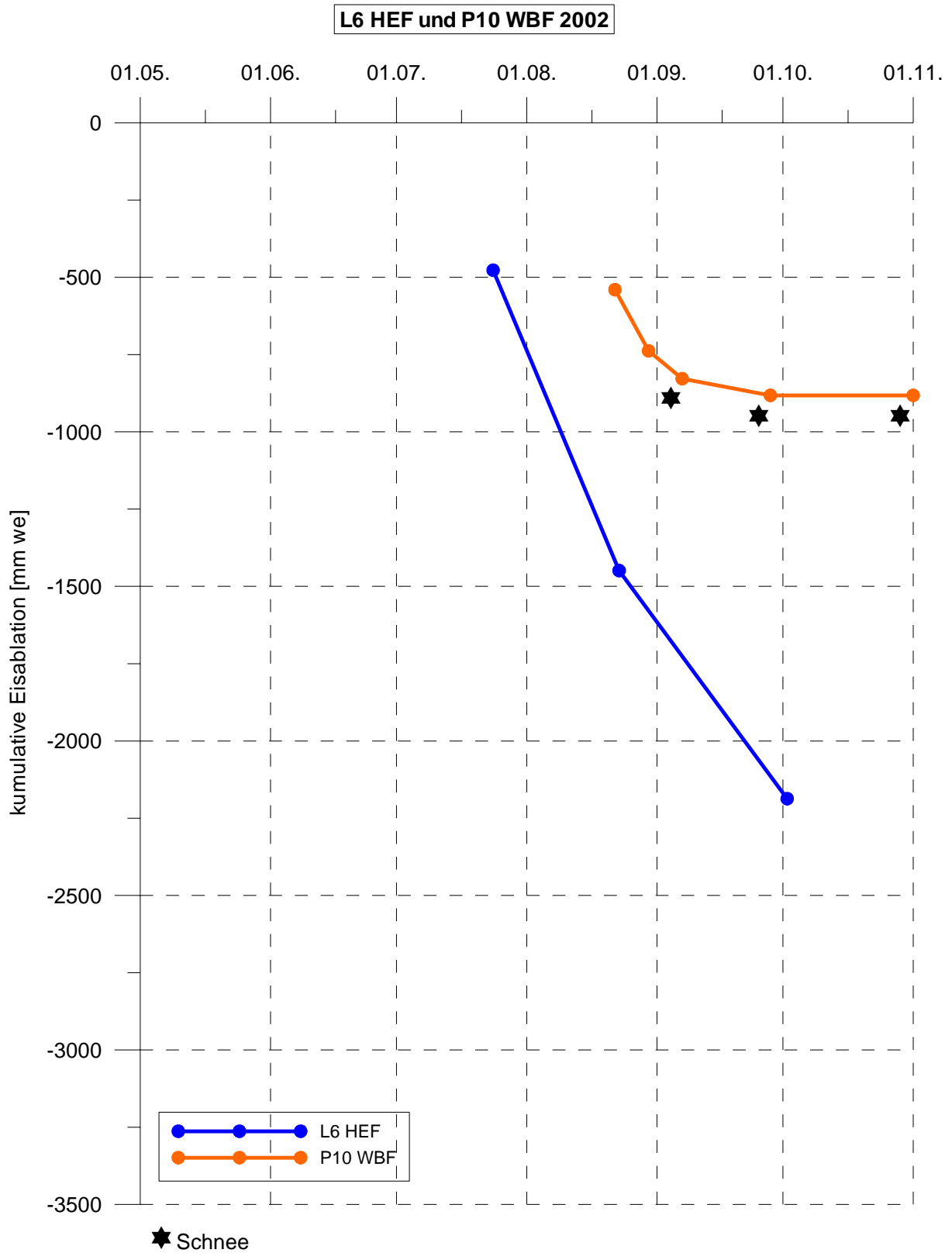


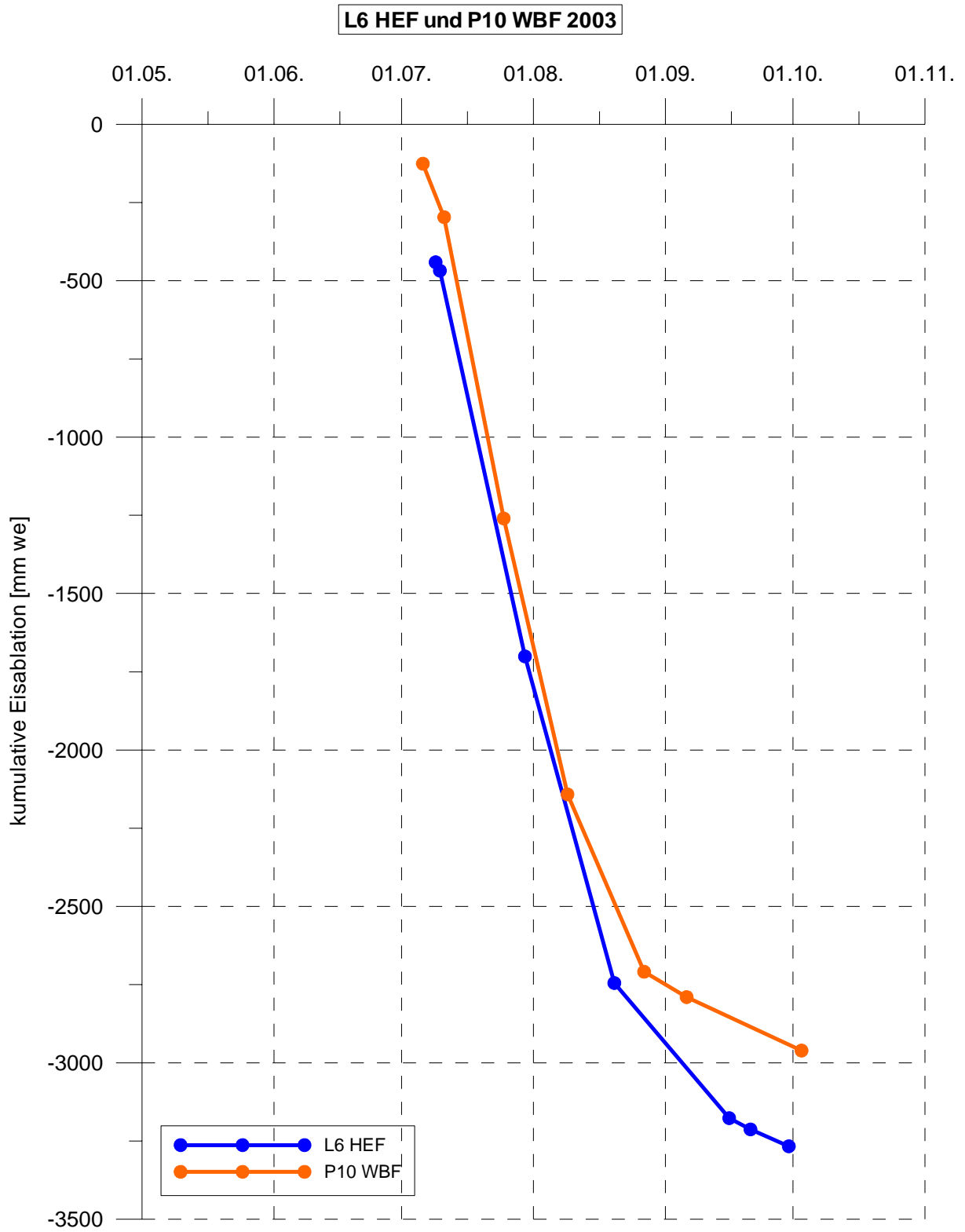


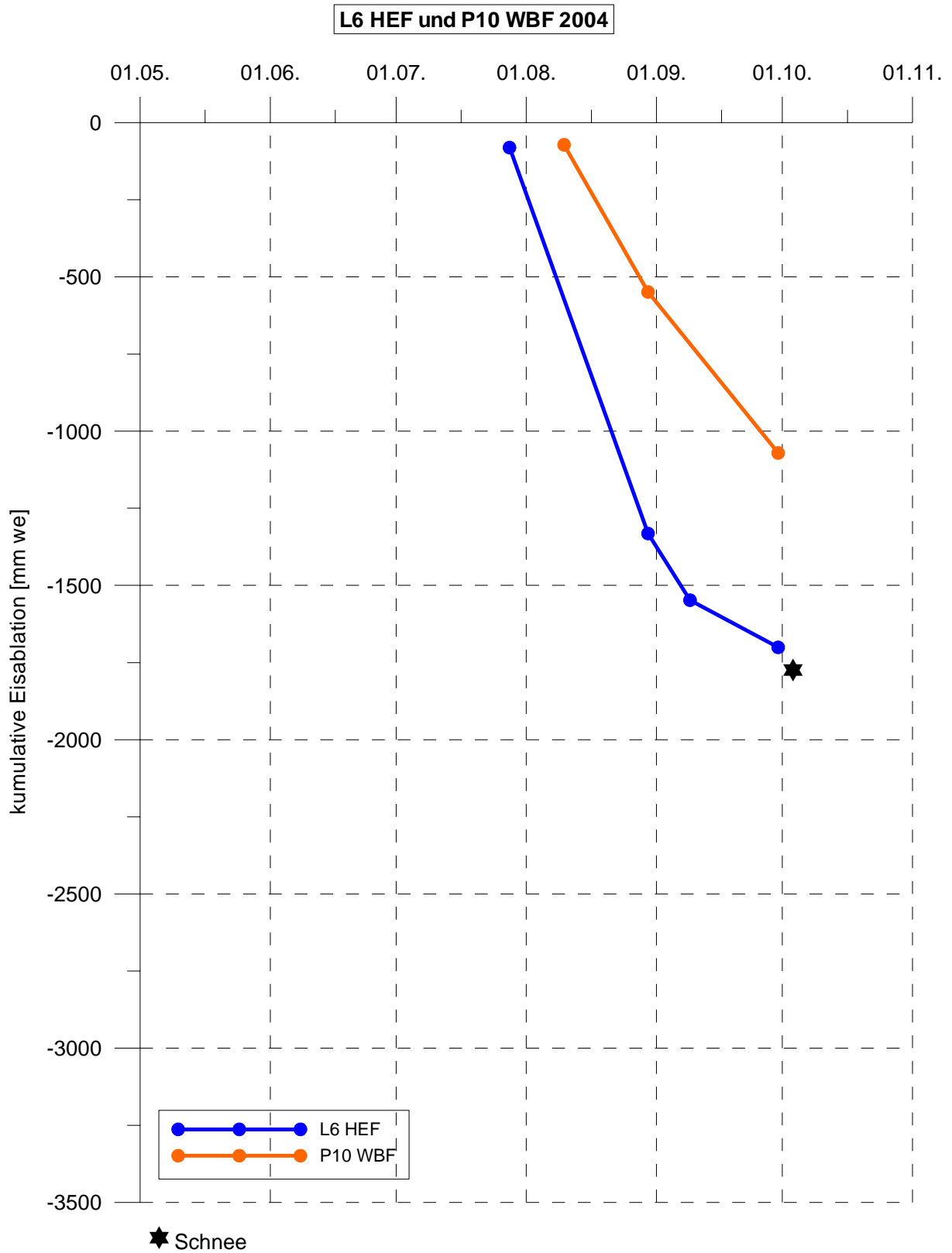


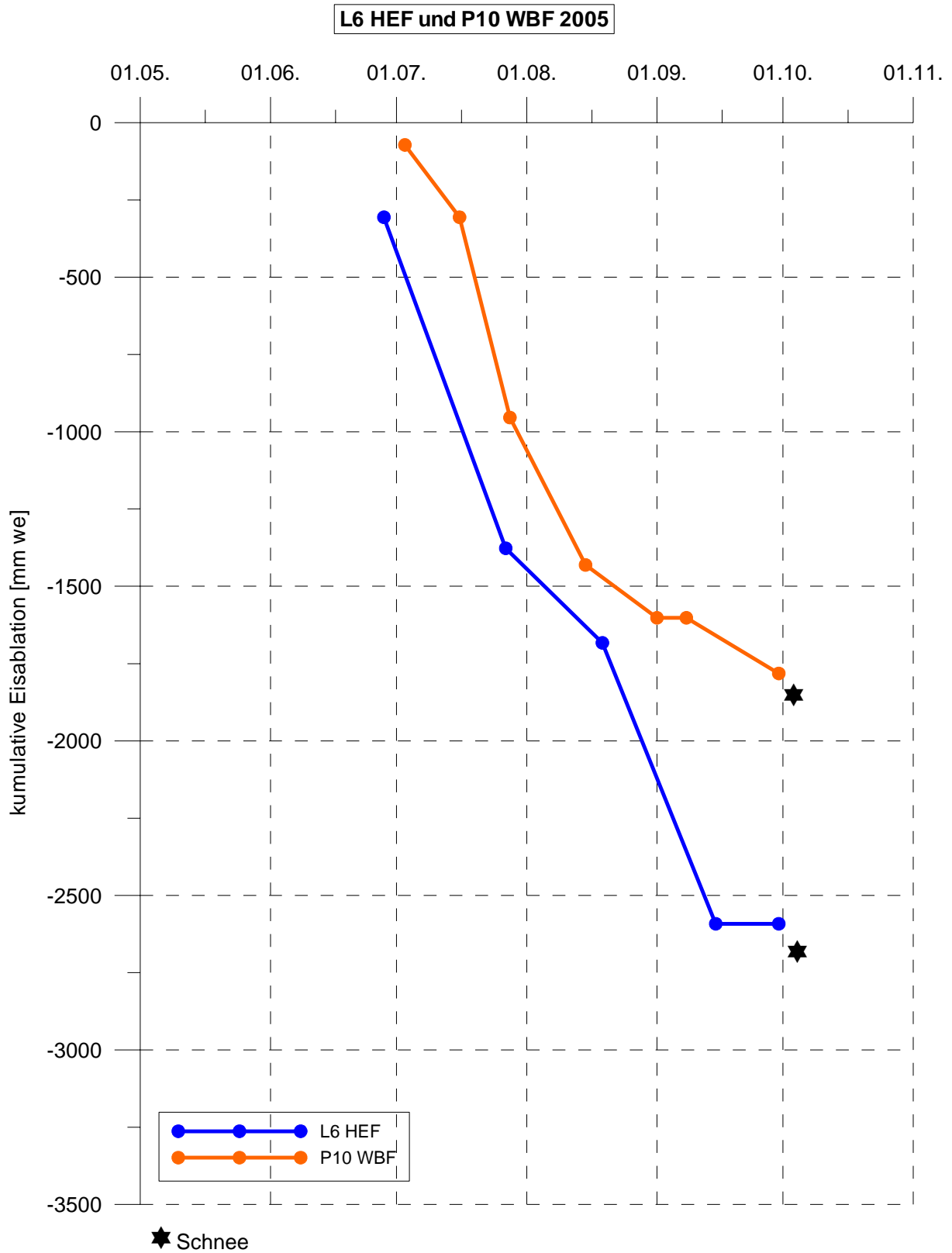






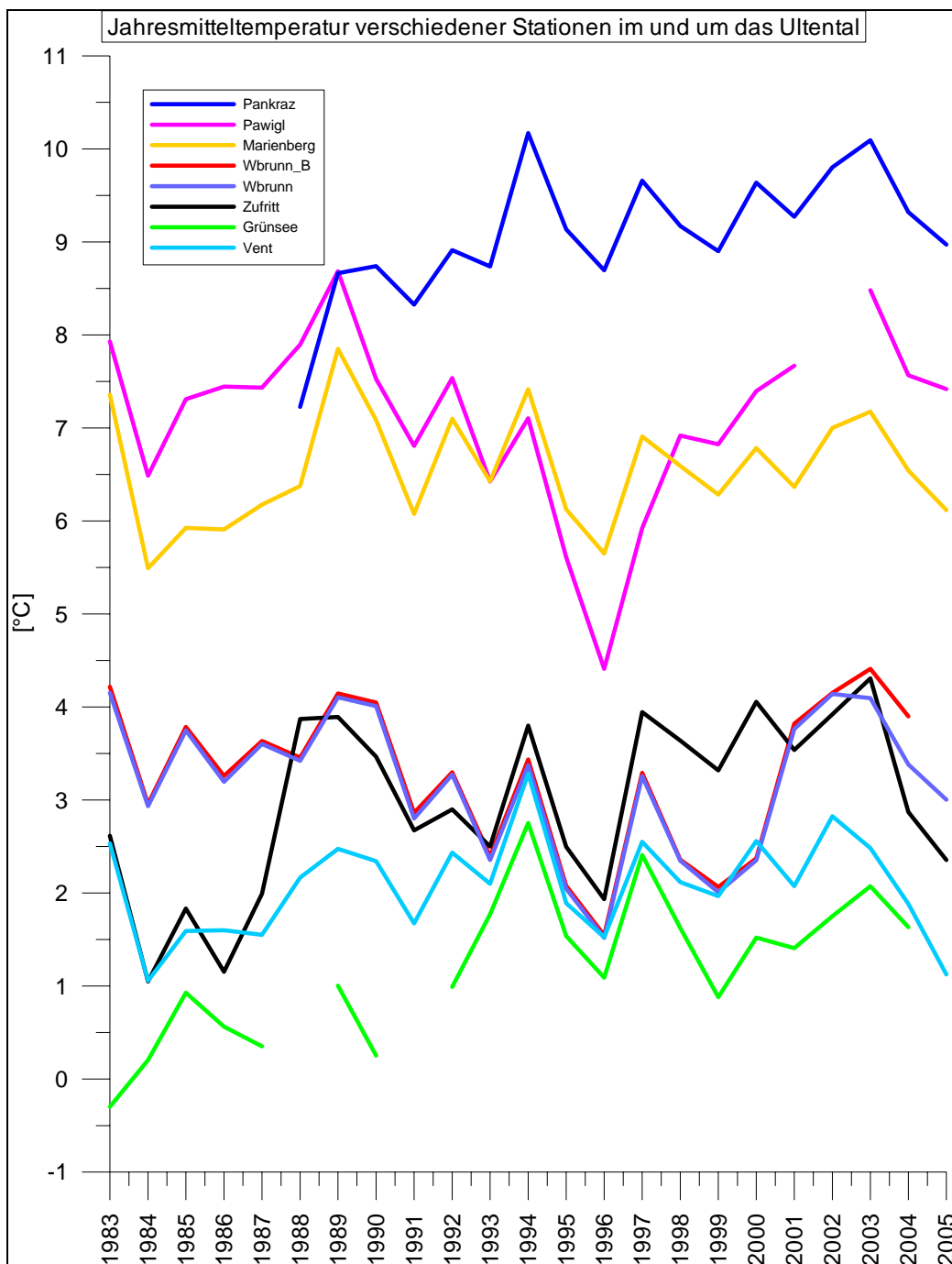


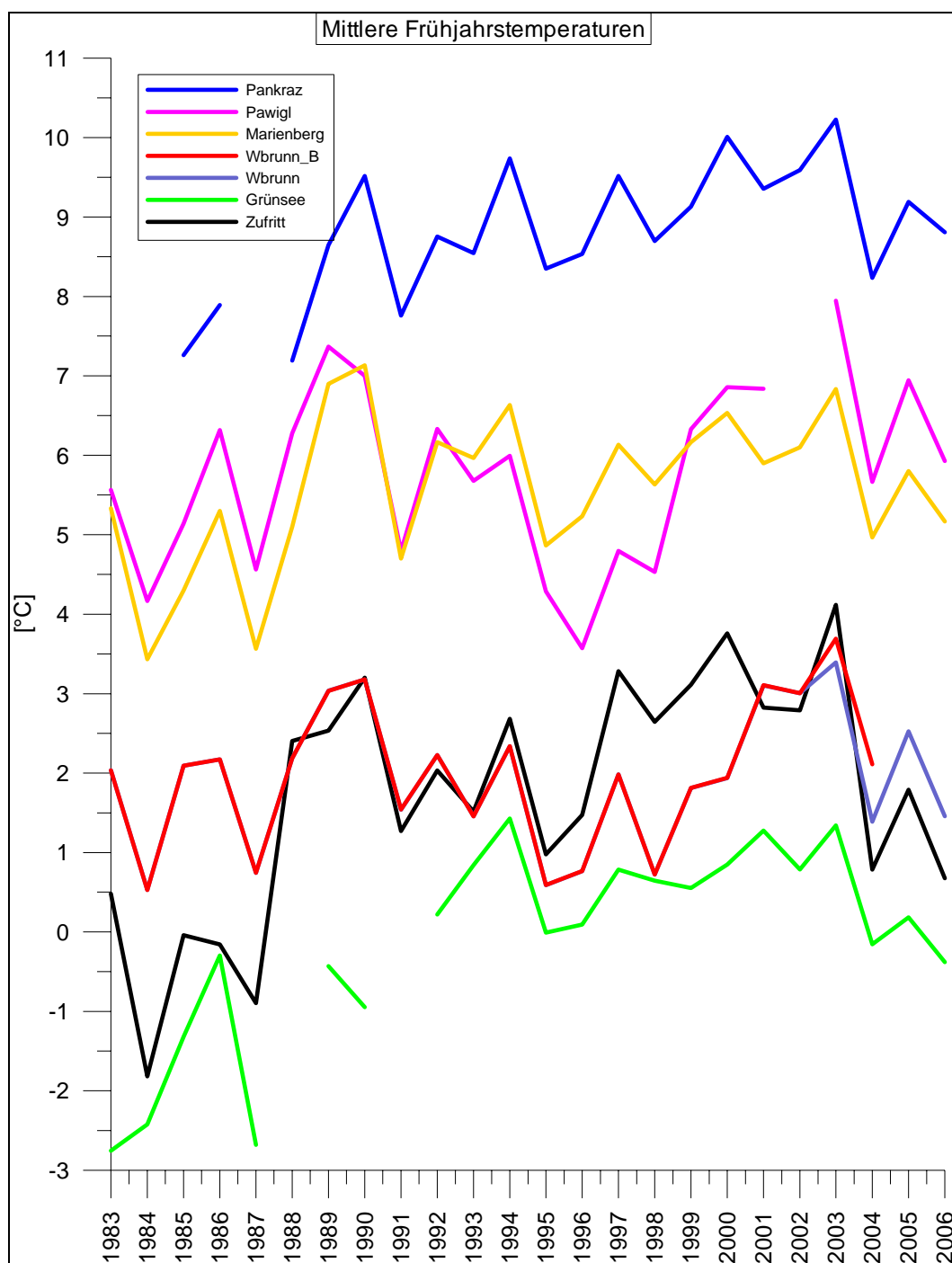


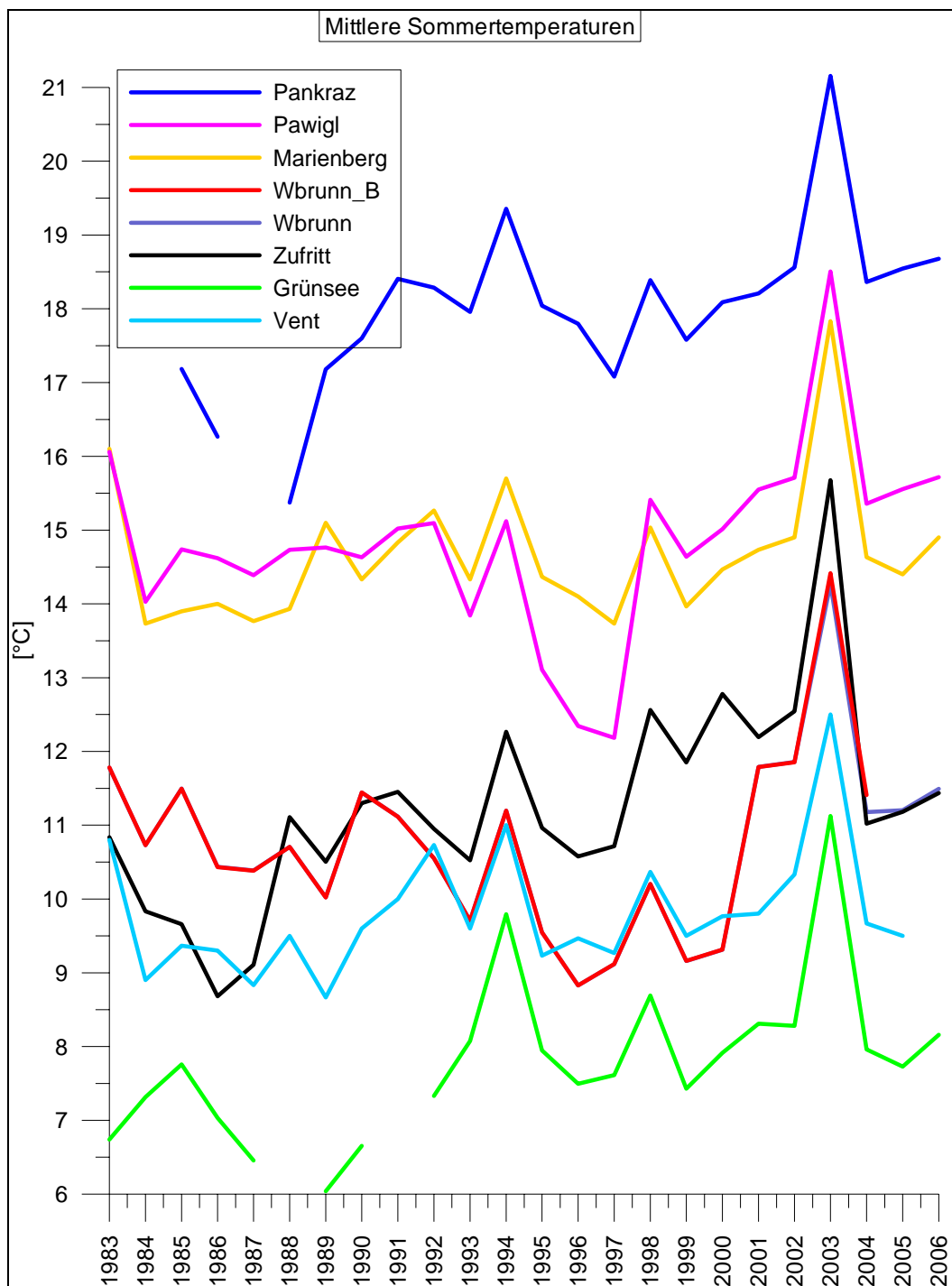


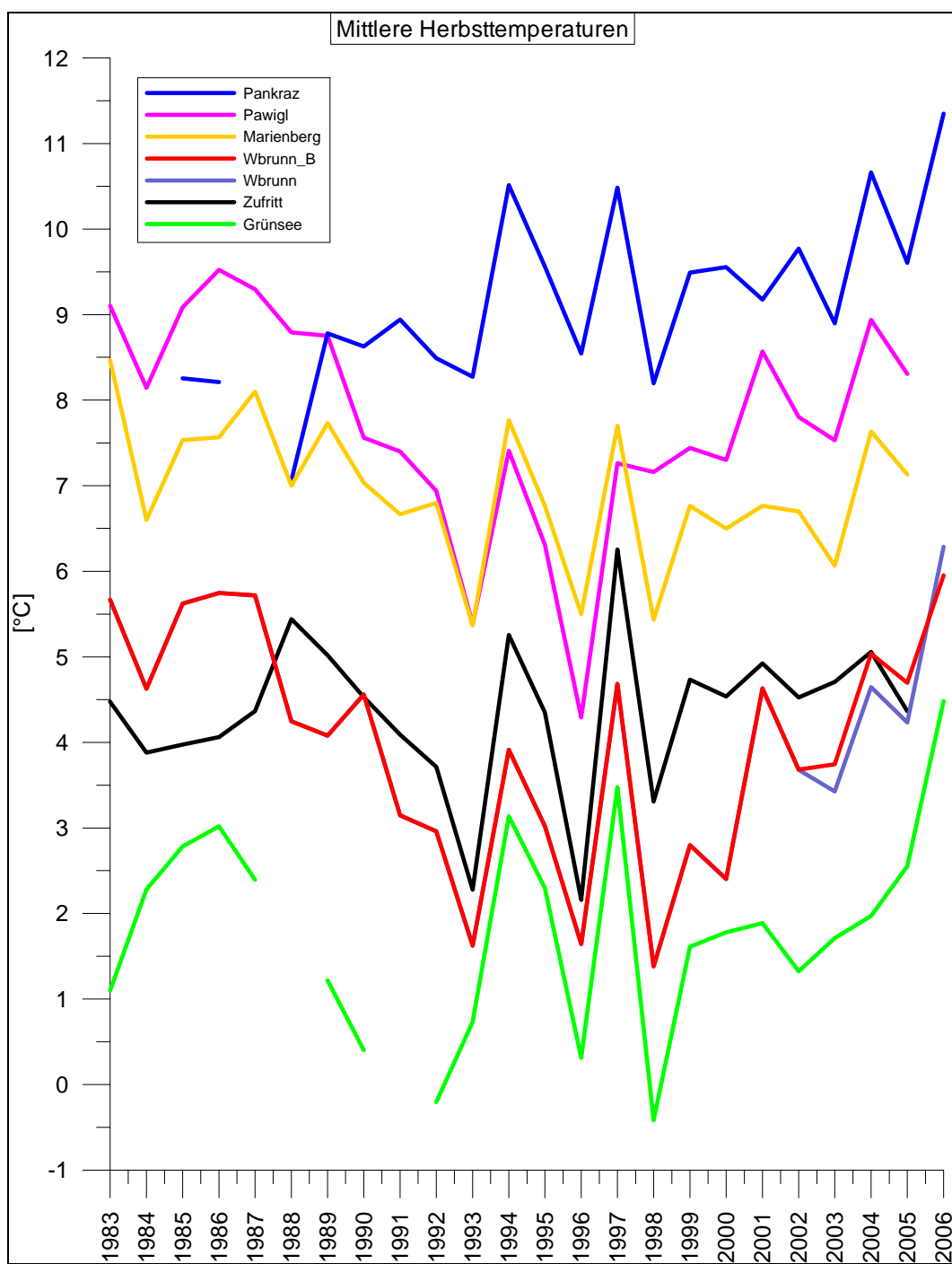
ANHANG B

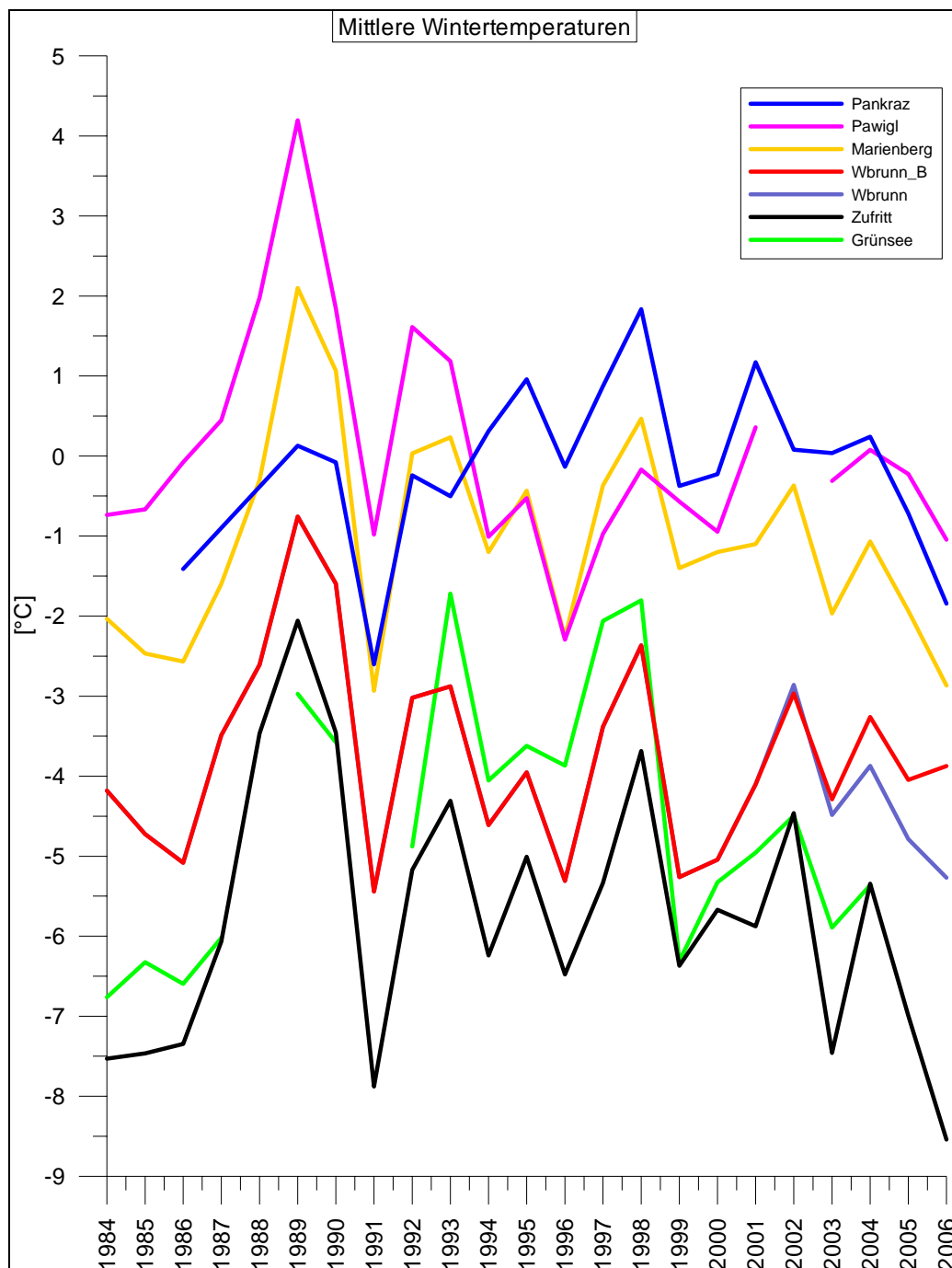
Die Kurven der Lufttemperatur von Stationen im Ultental und benachbarter Täler (Lage siehe Abb. 21) nach Jahreszeiten:











DANK

Abschließend gilt es allen, die bei der Durchführung dieser Diplomarbeit unterstützend mitgewirkt haben, ein herzliches Dankeschön auszusprechen:

Ao. Univ. Prof. Dr. Georg Kaser, der mir die Gelegenheit gegeben hat am Weißbrunn- und Langenferner zu arbeiten, der diese Arbeit betreut hat und mir, obwohl seine zeitlichen Ressourcen nicht unerschöpflich waren, mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist, wenn ich Hilfe benötigte,

Dr. Michela Munari, Ing. Roberto Dinale, Mag. Christian Mallaun und Christoph Oberschmied vom Hydrographischen Amt der Autonomen Provinz Bozen - Südtirol, die durch das Projekt Weißbrunnferner den finanziellen Rahmen schafften und mich mit Daten vom Weißbrunnferner und von den Klimastationen in Südtirol versorgten,

O. Univ. Prof. Dr. Michael Kuhn, Dr. Andrea Fischer, Gerhard Markl und Fritz Pellet vom Institut für Meteorologie und Geophysik an der Universität Innsbruck, die mich bereitwillig mit Literatur und allen erforderlichen Daten des Hintereis- und Kesselwandfernners sowie von Vent eindeckten,

den Mitgliedern der Tropical Glaciology Group (Dr. Irmgard Juen, Dr. Javier Corripio, Dr. Nicolas Cullen, Dr. Thomas Mölg, Marlies Hofer und Michael Winkler), die immer als Diskussionspartner bei unzähligen Kaffeepausen herhalten mussten,

meiner Familie, für die ideelle und finanzielle Unterstützung meines Studiums,

meiner Freundin Daniela, die nie an mir gezweifelt hat,

all meinen Freunden, für unvergessliche Stunden in den Bergen, die stets die Quelle neuer Inspiration waren

(und allen, die ich beim Verfassen dieser Zeilen vergessen habe).

CURRICULUM VITAE

Name: Prinz
Vorname: Rainer
geboren am: 16. Oktober 1978
Geburtsort: Hall in Tirol
Anschrift: Schulstraße 12, 6067 Absam

Eltern: Klaus Prinz († 26. September 1992)
Maria Prinz

Ausbildung:

1985 - 1989: Volksschule in Absam
1989 - 1997: Öffentliches Gymnasium der Franziskaner in Hall
1998 - 2002: Studium der Pharmazie an der Leopold-Franzens-Universität
Innsbruck - abgebrochen
2002 - 2007: Diplomstudium Geographie an der Leopold-Franzens-Universität
Innsbruck