

Zeitreihen der Dichteentwicklung am Hintereisferner von 1964 bis 2002

Diplomarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
Magistra der Naturwissenschaften
an der
Leopold – Franzens – Universität
Innsbruck



Eingereicht von
Elisabeth Matzi

Mai 2004

Für Karolin

ABSTRACT

The mass balance of Hintereisferner, one of the largest glaciers in the Ötztal Alps, has been determined using the direct glaciological method since 1952. This method requires a net of accumulation pits and ablation stakes distributed on the glacier. Pits are dug each year at the same location in spring, at Pentecost, and in autumn, on September 30th, which is by definition the end of the hydrological year.

In this thesis, the snow pit data measured since 1964 are used to study spatial and temporal variations of snow density, stratigraphy, and snow temperature.

In spring snow density and grain size increase continuously with depth. Until autumn many ice lenses are formed. The average snow density of the pits increases with altitude in spring, whereas in autumn no altitude dependence of the density is found. The snow temperature shows an annual cycle in the uppermost 10 meters of the snowpack, below it remains constant at about 0°C.

The mass balance of the glacier shows a prominent minimum in 1964, followed by a striking maximum in 1965 and a further one in 1977. Whereas the corresponding maxima in water equivalent of the snow pits can be found clearly at all sites, the mass balance minimum of 1964 is related to the minimum of water equivalent only for a few pits.

To compare the different snow pits, density profiles were calculated and averaged over the period 1964-2002 using a normalized depth, which gives a surprising result: the normalized density profiles of the pits are nearly congruent.

During the last 12 years the amount of freshly fallen snow in autumn was high, whereas during the first 20 years of measurements, fresh snowfall in autumn rarely occurred. Thus the same calculation was done for the periods 1990-2002 and 1964-1983, respectively, which gave similar results, only the absolute value of the density was slightly higher in the years with little freshly fallen snow.

Thus we can conclude that, at HEF, it should be possible to derive the water equivalent of the different snow pits by digging only one pit, complemented by accumulation stakes at the other pit locations, which would considerably simplify the otherwise strenuous and time-consuming direct glaciological method.

INHALTSVERZEICHNIS

Abstract.....	i
Inhaltsverzeichnis.....	ii
1. Einleitung.....	1
2. Ziel der Diplomarbeit.....	3
3. Massenbilanzmessungen am Hintereisferner.....	4
3.1 Allgemeines über die Massenbilanz.....	4
3.2 Lage des Hintereisferners.....	9
3.3 Messungen am Hintereisferner.....	10
3.3.1 Ablationspegel.....	11
3.3.2 Schneeschächte.....	11
4. Datengrundlagen.....	12
5. Änderung des Wasseräquivalents.....	17
5.1 Allgemeines.....	17
5.2 Frühjahr.....	20
5.3 Herbst.....	23
6. Die Schneeschäfte von 1964 bis 2002.....	31
6.1 Die Stratigraphie.....	31
6.2 Die Korngröße.....	32
6.3 Die Temperatur.....	33
6.4 Die Dichte.....	34
6.4.1 Setzung des Schnees.....	36
6.4.2 Das Dichteprofil.....	38
7. Profilzeichnungen.....	39
7.1 Frühjahrsprofile.....	39
7.2 Pfingstprofile.....	41

7.3	Herbstprofile.....	42
7.4	Profilzeichnungen mit normierter Tiefe.....	45
8.	Gemittelte Dichteprofile.....	46
8.1	Typische Dichteprofile von 1964 bis 2002.....	46
8.2	Gemittelte Dichteprofile seit 1990.....	53
8.3	Gemittelte Dichteprofile von 1964 bis 1983.....	61
9.	Zeitreihen der Dichteentwicklung.....	69
10.	Dichtemessung auf anderen Gletschern.....	72
10.1	Das Wurtenkees.....	72
10.2	Der Schwarzmilzferner.....	76
10.3	Der Claridenfirn.....	77
10.4	Der Storglaciären.....	77
11.	Zusammenfassung.....	79
Literaturverzeichnis.....		81
Anhang.....		85
Danksagung.....		90
Lebenslauf.....		91

1. Einleitung

„Lassen wir die Geschichte vor 150 Jahren beginnen. Die ersten Bergsteiger, Erstbegeher, Gletscherpioniere, Abenteurer, Touristen, „Fremde“ kamen jetzt in die Täler, angelockt von teilweise fantastischen Geschichten um riesige Gletscher, sich geheimnisvoll ins Tal wälzenden Ungeheuern, mit Teufel und Hexen in Verbindung gebracht, anno 1500, 1678, 1717, 1845, schreckliche Schäden verursachend und riesige Wassermassen von aufgestauten Fernerseen durch die Täler wälzend, zerstörend und verheerend.“ (Haid 1994)¹

Schon immer war es mein Wunsch meine Diplomarbeit über einen Gletscher zu schreiben. Das Studium in Innsbruck verstärkte die Liebe zu den Bergen und zur Natur, und die Feldarbeiten, an denen ich teilnehmen durfte, brachten mir die Faszination Gletscher noch näher.

Seit dem Jahr 1952 werden auf dem Hintereisferner regelmäßig Massenbilanzmessungen durchgeführt. Meine Diplomarbeit befasst sich mit den zwischen 1964 und 2002 gesammelten Daten.

Im Kapitel 2 steht genaueres über die Ziele, die ich mir vor Beginn der Aufarbeitung der Daten gesetzt habe.

Das Kapitel 3 befasst sich mit der Massenbilanzmessung am Hintereisferner. Anfangs wird eine Einführung in die verschiedenen Methoden der Bilanzmessung gegeben. Nach einer kurzen Beschreibung der Lage des Hintereisferrners werden die Messungen, die auf diesem Gletscher gemacht wurden, beschrieben.

Kapitel 4 beschreibt, wie ich begonnen habe, mit den Daten zu arbeiten, woher ich die Daten habe, und was ich mit ihnen gemacht habe.

¹ Ausführlicher dokumentiert in:

M. Stotter, 1846: Die Gletscher des Vernagtthales in Tirol und ihre Geschichte. Wagner'sche Buchhandlung Innsbruck, 75 S.,

J. Walcher, 1773: Nachrichten von den Eisbergen in Tyrol. K. k. Hofdrucker und Universitätsbuchhändler J. Kurzböcken zu Wien. 99 S.,

K. Nicolussi, 1990: Bilddokumente zur Geschichte des Vernagtferners im 17. Jh. ZGG 26(2): 97-119.

Das Wasseräquivalent steht im Kapitel 5 im Vordergrund. Die Änderungen des Wasseräquivalents an den einzelnen Messpunkten werden miteinander verglichen.

Das Kapitel 6 wendet sich den am Hintereisferner gegrabenen Schneeschächten zu. Die im Schneeschacht gemessenen Parameter Stratigraphie, Korngröße, Temperatur und Dichte werden einzeln beschrieben. Die Dichte ist das zentrale Thema dieser Arbeit. Deshalb befassen sich auch die weiteren Kapitel der Diplomarbeit mit der Dichtemessung.

In Kapitel 7 werden die gezeichneten Frühjahrs-, Pfingst- und Herbstprofile besprochen und miteinander verglichen.

In Kapitel 8 werden die entstandenen Ergebnisse vorgestellt: Die Herbstprofile aus 38 Jahren wurden gemittelt, und für jeden Standpunkt wurde ein typisches Profil gezeichnet.

Eine solche Mittelung wurde auch für die Jahre 1990 bis 2002 und 1964 bis 1983 durchgeführt.

Das Kapitel 9 befasst sich mit der Dichteentwicklung im Laufe eines Jahres an einem bestimmten Standpunkt.

In Kapitel 10 werden die Ergebnisse meiner Arbeit mit denen anderer Autoren verglichen.

2. Ziel der Diplomarbeit

In erster Linie war die Ausarbeitung der vorhandenen Dichtemessungen am Hintereisferner das Ziel der vorliegenden Arbeit. Seit Beginn der Messungen im Jahr 1952 gibt es unzählige Daten über die Messungen am Hintereisferner, die zum Teil in verschiedenen Diplomarbeiten, Dissertationen und Veröffentlichungen besprochen und ausgewertet wurden, zum Teil aber noch als Rohdaten vorlagen.

Meine Aufgabe war es, die Daten ab dem Jahre 1964 zusammenzustellen und zu bearbeiten. In erster Linie stellten sich dabei die praktischen Fragen: Was ist an Daten vorhanden? In wie weit sind die Daten nachvollziehbar?

Die nächste Aufgabe war es, die Daten in den Computer einzugeben und zu bearbeiten. Dichteprofile sollten gezeichnet werden, Stratigraphie, Korngröße und Eislinsen sollten, so weit vorhanden, dabei berücksichtigt werden. Die einzelnen Dichteprofile sollten so gezeichnet sein, dass sie anschließend auch miteinander verglichen werden können.

Für den Vergleich der Dichteprofile gab es wieder einige offene Fragen, auf die eine Antwort gesucht wurde:

Wie passen die unterschiedlichen Jahre zusammen?

Wie verändert sich die Dichte im Verlauf des Jahres?

Gibt es Durchschnittsdichteprofile für die verschiedenen Punkte oder Jahreszeiten, die man in Zukunft für die Bestimmung des Wasserwertes verwenden kann, ohne jedes Mal einen Schacht zu graben?

Wie unterscheiden sich diese typischen Herstdichteprofile voneinander?

Somit könnte man die Messungen am Hintereisferner vereinfachen und in Zukunft nur mehr Firnpegel an bestimmten Punkten aufstellen, die dann jedes Jahr im Herbst abgelesen werden. Auf diese Weise könnte man die Schneehöhe des seit dem letzten Herbst gefallenen Schnees schneller und leichter bestimmen und den Wasserwert mit den Dichtewerten des typischen Herbstschachtes berechnen. Eine Sondierung könnte die Messung bestätigen, wäre aber gar nicht unbedingt nötig.

Auf der Suche nach einem typischen Dichteprofil für den Hintereisferner bzw. für bestimmte Punkte am Hintereisferner galt es nun Dichteprofile zu zeichnen, zu vergleichen und zu mitteln.

3. Massenbilanzmessungen am Hintereisferner

3.1 Allgemeines über die Massenbilanz

Die Massenbilanzmessung befasst sich mit der Massenänderung eines Gletschers in einem Jahr. Seit vielen Jahren werden Gletscher beobachtet und man weiß, dass sie ihre Form und ihr Aussehen ändern. Dies hängt mit der Witterung im Jahresverlauf und im Lauf der Jahre zusammen, je nachdem wann wie viel an Masse auf den Gletscher kommt und wann wie viel seiner Masse verloren geht. Der Gletscher stellt ein natürliches Reservoir dar, er speichert in der kalten Jahreszeit das Wasser und lässt es im Sommer wieder abfließen. Mit der Messung der Massenbilanz eines Gletschers kann man Aussagen darüber treffen, wie viel Wasser im Gletscher gespeichert wird und wie sich das von Jahr zu Jahr ändert.

Für Massenhaushaltsmessungen stehen mehrere Methoden zur Verfügung, die sich teils sehr voneinander unterscheiden, sich teilweise aber auch gut ergänzen:

- die geodätische Methode,
- die hydrologisch-meteorologische Methode und
- die direkte glaziologische Methode

Bei der **geodätischen Methode** wird die Änderung des Gletschervolumens durch einen Vergleich verschiedener Karten aus verschiedenen Jahren bestimmt. Dazu werden möglichst genaue Karten des Gletschers benötigt. Die Kenntnis der Dichteprofile ist bei dieser Methode besonders wichtig.

Bei der **hydrologisch-meteorologischen Methode** wird über die Messung des Niederschlags und des Abflusses auf die Masse des Gletschers geschlossen. Dabei wird das ganze Einzugsgebiet miteinbezogen. Es gilt:

$$N - A - V = (R - M),$$

wobei N der Niederschlag, A der Abfluss, V die Verdunstung, R die Schneerücklage und M der Aufbrauch durch Schmelzung und Verdunstung von Firn, Altschnee und Eis ist. Unter Firn versteht man in der Glaziologie Schnee, der älter als ein Jahr ist.

Bei der **direkten glaziologischen Methode** wird direkt an der Gletscheroberfläche die Differenz von Akkumulation und Ablation gemessen.

Die *Akkumulation* beinhaltet alle Prozesse, bei denen dem Gletscher Material hinzugefügt wird, wie Schneefall und Ablagerung durch Wind und Lawinen.

Die *Ablation* beinhaltet alle Prozesse, bei denen dem Gletscher Masse entzogen wird, wie das Schmelzen, die Verdunstung oder die Erosion durch den Wind.

Im Ablationsgebiet des Gletschers werden Pegelstangen angebracht, die regelmäßig abgelesen werden. Bei den Pegeln handelt es sich um weiß gestrichene Hartholzstangen mit einem Durchmesser von 2 cm und einer Länge von 200 cm. Diese werden mit kurzen Gummischläuchen aneinander befestigt und in 8 bis 12 Meter tiefe Bohrlöcher gesteckt. Das Aufschwimmen oder Einsinken der Pegel soll verhindert werden. Beim Ablesen der Pegel wird jeweils das Stück abgemessen, das aus dem Schnee herausragt. Mehrmals jährlich müssen Stangen hinzugefügt oder abgenommen werden (Hoinkes 1970).

Im oberen Teil des Gletschers wird die Akkumulation mit Schneeschächten gemessen. Diese werden auch mehrmals jährlich an bestimmten Punkten, die sich über die Jahre bewährt haben, geegraben. Geegraben wird bis zu einem natürlichen Schmutzhorizont, der in einer spätsommerlichen Schönwetterperiode entstanden ist (Hoinkes 1957). An der Wand des Schachtes ermittelt man das Dichteprofil, die Stratigraphie, Korngröße und Härte. Für die Bestimmung der Dichte verwendet man Ausstechrohre aus Aluminium oder rostfreiem Stahl. Es gibt 2 Typen von Ausstechrohren, das große Rohr ist 50 cm lang und hat eine Fläche von 50 cm^2 , das kleine Rohr ist 19,6 cm lang und sticht mit einer Fläche von $25,5 \text{ cm}^2$ ab. In den Anfangsjahren wurde noch oft das große Ausstechrohr benutzt, später dann fast ausschließlich das kleine. Mit dem kleinen Rohr kann man die Stratigraphie besser berücksichtigen. Das gefüllte Rohr wird mit einer Federwaage gewogen, daraus kann die Dichte berechnet werden.

Schneeschäfte werden bis zu dreimal im Jahr geegraben und zwar am Ende des hydrologischen Winterhalbjahres (Ende März), sobald die Akkumulation ein Maximum erreicht (Ende Mai/ Anfang Juni) und am Ende des hydrologischen Jahres,

also Ende September. Diese drei Begehungen werden im weiteren Frühjahrs-, Pfingst- und Herbstbegehung genannt.

Am Ende des hydrologischen Jahres, also Ende September wird die minimale Dicke erreicht, die Zeit zwischen zwei Minima wird Bilanzjahr genannt. Ein Bilanzjahr muß nicht immer genau 365 Tage lang sein. Aus praktischen Gründen hat man sich dafür entschieden, das Haushaltjahr gleich wie das hydrologische Jahr festzulegen, es dauert somit vom 1. Oktober bis zum 30. September. Dementsprechend dauert die Akkumulationsperiode vom 1. Oktober bis zum 30. April und die Ablationsperiode vom 1. Mai bis zum 30. September.

Die spezifische Massenbilanz **b** an jedem Punkt ist die algebraische Summe von Akkumulation **c** und Ablation **a** (wobei $a < 0$):

$$\mathbf{b} = \mathbf{c} + \mathbf{a}$$

Auf das Bilanzvolumen **B** kommt man, wenn man die spezifischen Bilanzgrößen über die Gletscherfläche **S** integriert:

$$\mathbf{B} = \int_S b ds$$

Dabei werden in der Praxis die Flächenelemente ds durch 50 m Höhenstufen und 50 cm Bilanzstufen in der Ablation sowie 25 cm Bilanzstufen in der Akkumulation abgegrenzt.

Die Bilanzwerte werden getrennt für das Akkumulationsgebiet **B_c** und das Ablationsgebiet **B_a** analysiert. Die dazugehörigen Flächen sind **S_c** für die Fläche des Akkumulationsgebietes und **S_a** für die Fläche des Ablationsgebietes.

Die mittlere spezifische Massenbilanz \bar{b} ergibt sich aus:

$$\bar{b} = \frac{B}{S}$$

Eine Karte mit der Verteilung der spezifischen Massenbilanz eines Gletschers kann nur mit Hilfe von Rücklagenfiguren angefertigt werden. Diese von Jahr zu Jahr ähnlichen Figuren eines Gletschers sind geprägt vom Einfluß des Windes, der Sonne und der Hangneigung auf den Gletscher und sind dem Vermesser aus der Erfahrung bekannt. Besonders deutlich sieht man diese Muster in schneearmen Jahren.

In Abb. 3.1 kann man diese Muster erkennen.



Abb. 3.1: *Hintereisferner mit Weißkugel, deutlich erkennbare Rücklagenmuster, aufgenommen am 21.08.1989 (Institut für Meteorologie und Geophysik, Innsbruck)*

Abb. 3.2 und Abb. 3.3 zeigen Beispiele von einem sehr positiven und einem sehr negativen Jahr. Die Maxima und die Minima des Wasseräquivalents befinden sich meistens in den verschiedenen Jahren an den gleichen Stellen, auch wenn die Bilanz anders ist.

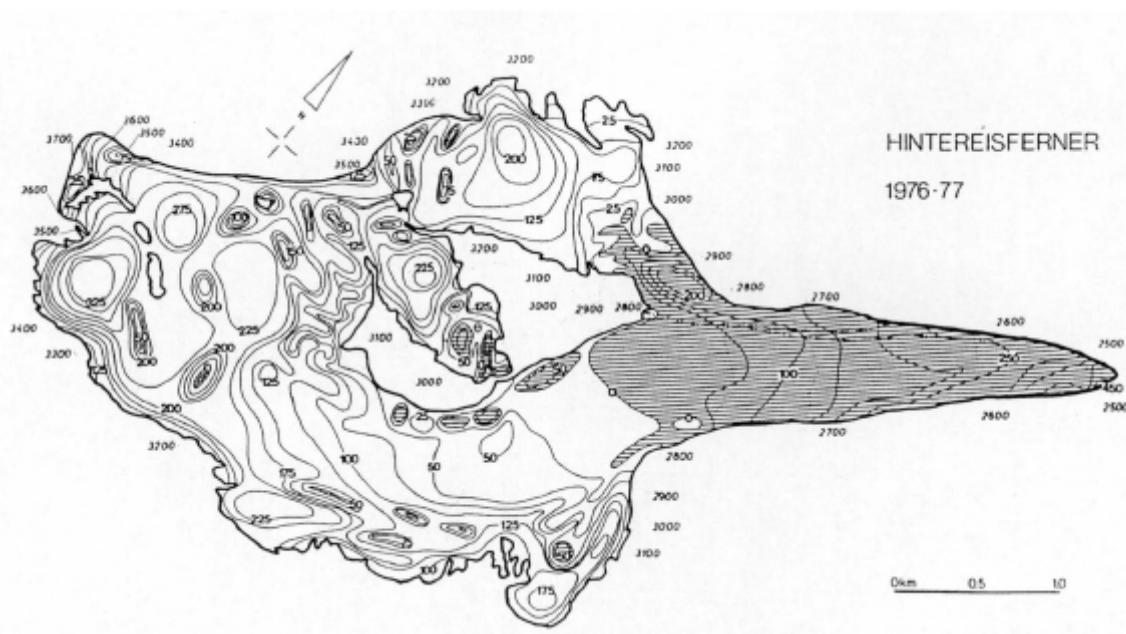


Abb. 3.2: Beispiel der Haushaltsverteilung vom sehr positiven Jahr 1976/77 (Kuhn et al. 1999)

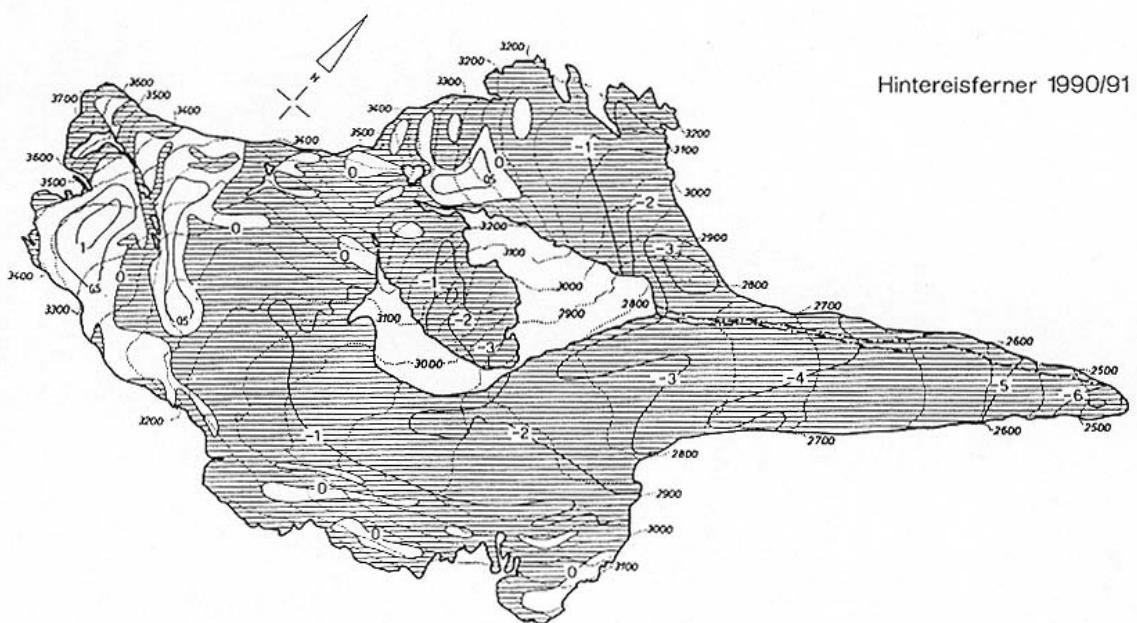


Abb. 3.3: Beispiel der Haushaltsverteilung vom sehr negativen Jahr 1990/91 (Kuhn et al. 1999)

3.2 Die Lage des Hintereisferners

Der Hintereisferner liegt in den Ötztaler Alpen und erstreckt sich von der 3739 m hohen Weißkugel aus anfangs nach Osten, dann weiter in Richtung Nordosten ins Rofental hinaus. Mit einer Fläche von knapp 8 km^2 - im Jahr 1952 waren es noch über 10 km^2 - ist er einer der größten Gletscher der Ötztaler Alpen. Von Innsbruck aus erreicht man den Hintereisferner, wie in Abb. 3.5 ersichtlich, über das Ötztal, dann weiter über das Venter- und das Rofental. Von Südtirol aus ist er über das Schnalstal von der Bergstation der Schnalstaler Gletscherbahn erreichbar.

Das auf 2412 m gelegene Hochjochhospiz sowie die Station Hintereis auf 3026 m auf der orographisch linken Seite des Gletschers eignen sich als Stützpunkte für Messungen auf dem Gletscher.



Abb. 3.4: Flugaufnahme vom Hintereisferner vom 23.09.1986 (Institut für Meteorologie und Geophysik, Innsbruck)

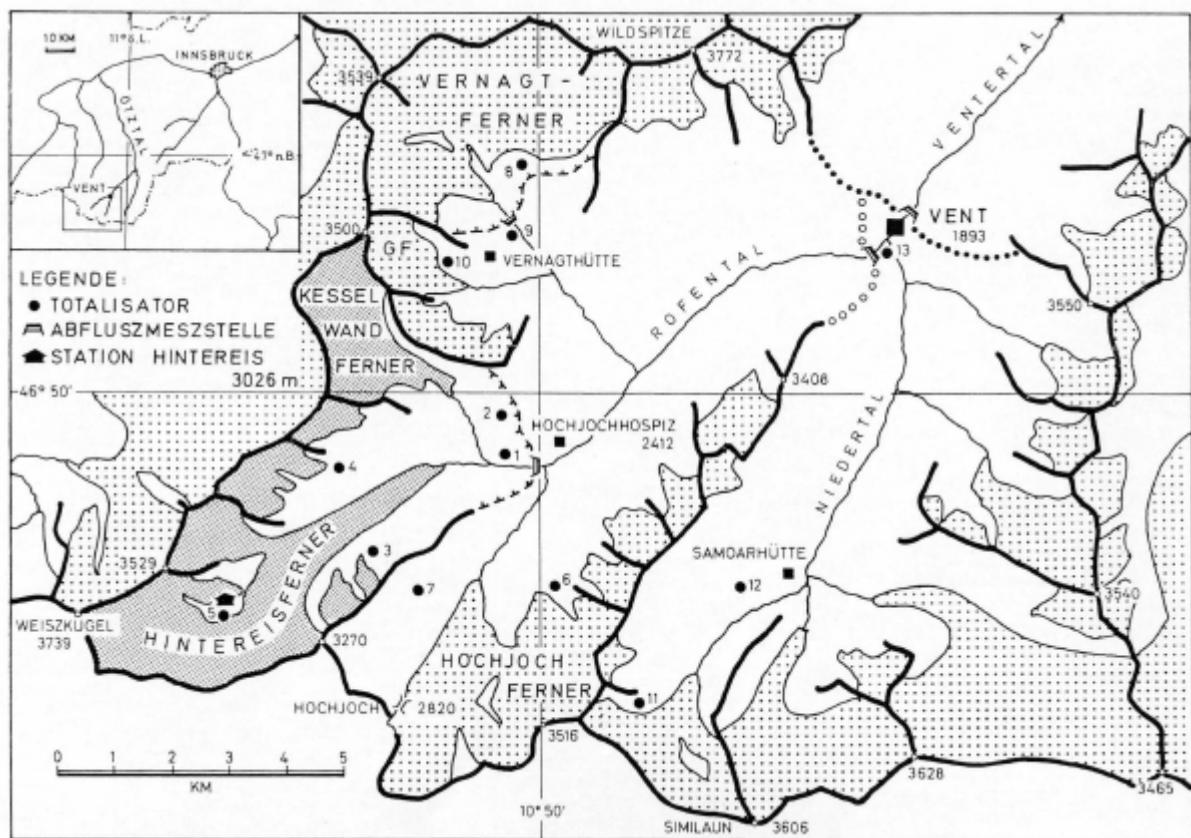


Abb. 3.5: Übersichtskarte vom Venter- und Rofental (Hoinkes 1970)

3.3 Messungen am Hintereisferner

Die Gletscher im Rofental werden schon seit langer Zeit beobachtet. Immer wieder machten sie durch Vorstöße auf sich aufmerksam und weckten das Interesse von Einheimischen und Reisenden.

Die Gebrüder Schlagintweit nahmen 1847 erstmals Geschwindigkeitsmessungen am Hintereisferner vor (H. und A. Schlagintweit 1850). Später beschäftigten sich Blümcke, Hess, Finsterwalder und Mothes mit Messungen am Gletscher (Blümcke u. Hess 1899, Hess 1924, Blümcke u. Finsterwalder 1905, Mothes 1927).

Mit der Aufstellung des ersten Niederschlagstotalisators im Firngebiet des Hintereisferners im Jahre 1926 durch das Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck hat die intensive bis heute andauernde Messarbeit am Gletscher begonnen (Hoinkes 1970).

Mit der Untersuchung des Massenhaushalts am Hintereisferner wurde im Jahre 1952 begonnen. O. Schimpp (1959) arbeitete anfangs mit einer kombinierten geodätisch-

glaziologischen Methode, im Jahr 1953/54 wurden seine Beobachtungen durch Abflussmessungen von R. Rudolph (1962) ergänzt.

3.3.1 Ablationspegel

Anfangs starteten die Messungen mit 60 Ablationspegeln, bald wurde auf 70 Pegel erweitert. Nach dem sehr positiven Jahr 1965 konnten einige Pegel nicht mehr aufgefunden werden und man brachte 20 neue am Gletscher an. Nachdem man im Jahr 1969 die alten Pegel wieder auffinden konnte, standen 90 Pegel auf dem Hintereisferner (Hoinkes 1970). In den 1970er Jahren pendelte die Zahl der Pegel zwischen 84 und 101. Auch in den positiven Haushaltsjahren 1976/77 und 1977/78 gingen vorübergehend Pegel verloren. 1979 wurden 10 Pegel zwischen 2800 und 2950 m aufgrund der Ausaperung des Gletschers neu gesetzt.

1978 wurde die Nummerierung der Pegel geändert. Eine neue durchlaufende Nummerierung wurde eingeführt (Bericht über die Arbeit im IHP-Projekt).

Heute werden etwas weniger als 50 Pegel regelmäßig abgelesen. Der Grund dafür ist die hohe Korrelation von benachbarten Pegeln besonders in der Mitte der Zunge (Kuhn et al. 1999).

3.3.2 Schneeschächte

Auch die Anzahl der gegrabenen Schneeschäfte hat sich im Verlauf der Zeit geändert. In den ersten Jahren, als man noch Erfahrungen sammeln musste, wurden wesentlich mehr Schäfte geegraben als in den letzten. Wo die Schäfte geegraben werden und wurden, hängt stark von der Topographie und den Rücklagenmustern ab. Außerdem müssen in Jahren mit positiver Massenbilanz mehr Schäfte geegraben werden als in den übrigen Jahren (Kuhn et al. 1999).

Dennoch gibt es eine Zahl von Schäften, die Jahr für Jahr an der gleichen Stelle geegraben werden, wie z.B. die Schäfte Badeeis, Hintereisjoch, Weißkugeljoch, Teufelseck und andere, sie liegen in den Maxima der Rücklagen (Abb. 3.2).

Im Jahr 1964 wurden noch einige Dichteabstiche mit dem großen Ausstechrohr gemacht, in den darauf folgenden Jahren wurde dann fast nur mehr das kleine Ausstechrohr verwendet.

4. Datengrundlagen

Diese Arbeit befasst sich mit den Schächten, die von 1964 bis zum Jahr 2002 am Hintereisferner gegraben wurden:

Als Grundlage dienten mehrere Ordner aus dem Archiv im Institut für Meteorologie in Innsbruck, in denen alle Daten, die in den Jahren von 1964 bis heute gemessen wurden, gesammelt aufbewahrt sind. Die Daten waren größtenteils noch handgeschrieben und enthielten die gemessenen Dichteprofile mit Angabe des Ortes, des Datums und der Höhe. Im Schacht wurde jeweils die Schichtdicke, das Volumen und das Gewicht gemessen und notiert, daraus wurde die Dichte berechnet. Oft und besonders in den früheren Jahren sind die Daten noch ergänzt durch genaue Aufzeichnungen über die Stratigraphie und Korngröße sowie durch Zeichnungen des Dichteprofils.

Weiters konnte ich eine von Gerhard Markl angefertigte Tabelle „Schneeschäfte“ verwenden, in welcher alle von 1955 bis 1995 gegrabenen Schächte aufgelistet sind. Die Tabelle enthält jeweils Datum, Ort, Höhe, Wasserwert, Dichte und Schneehöhe des ganzen Schachtes, aber keine einzelnen Dichteprofile. Einige Seiten dieser Tabelle sind als Beispiel im Anhang als Tabelle 1 wiedergegeben.

Die erste Aufgabe war es nun, von allen gegrabenen Schächten Tabellen im Excel anzulegen. Pro Jahr wurde eine Tabelle erstellt, die Wasserwert, Dichte und Schneehöhe des jeweils ganzen Schachtes enthält. Dazu habe ich die Daten aus den Ordnern des Archivs mit denen aus der Tabelle „Schneeschäfte“ verglichen und ergänzt. Von einzelnen Schächten existieren nur die Werte des gesamten Schachtes und kein ausführliches Dichteprofil des Schachtes. In diesen Fällen wurde meistens nur sondiert. Auch von der Herbstbegehung des Jahres 1970 sind keine Aufzeichnungen der Dichteprofile mehr vorhanden, es gibt nur die über den ganzen Schacht gemittelten Werte aus der Tabelle „Schneeschäfte“. Die Daten dieser Schächte wurden in den neuen Tabellen in Klammern angegeben.

Durch eine eigene Berechnung der gemittelten Dichte über den ganzen Schacht aus Schneehöhe und Wasserwert wurden die Daten kontrolliert und einzelne Schreibfehler ausgebessert.

Als nächstes wurden die einzelnen Dichteprofile eingegeben und gezeichnet. Wieder ging ich Jahr für Jahr vor, alle vorhandenen Dichteprofile der Frühjahrs-, Pfingst- und

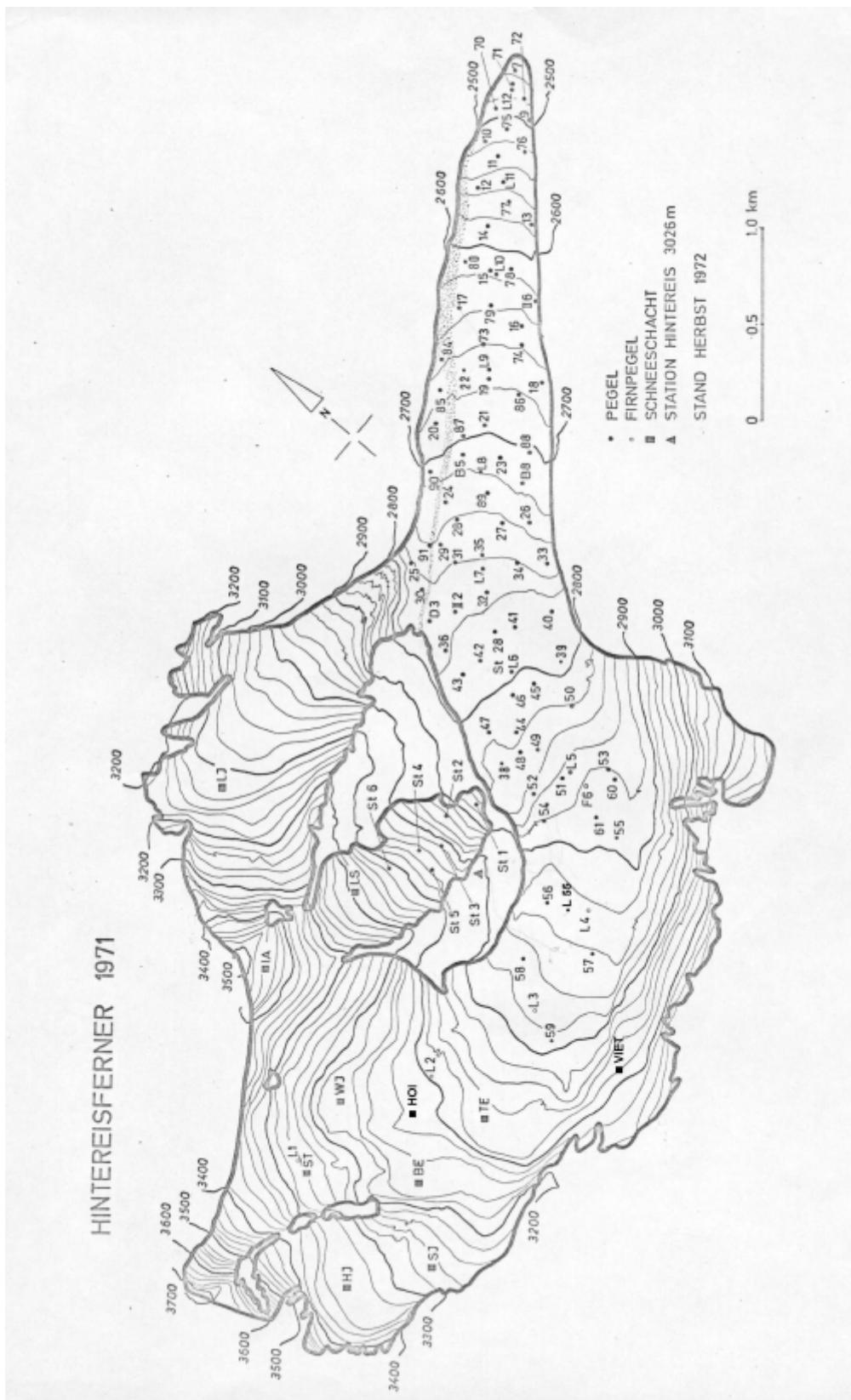
Herbstbegehungen wurden in einheitliche Diagramme gezeichnet. Damit sie besser miteinander vergleichbar sind, entschied ich mich für Diagramme mit einer Gesamttiefe von 5 Metern und einer maximalen Dichte von 1 g/cm³. Manche Schächte waren auch über 5 Meter tief, dann wurden zwei Diagramme erstellt, eines in der einheitlichen Form, in welchem die Kurve bei 5 Metern abgeschnitten ist und eines, in welchem das gesamte Dichteprofil gezeichnet ist.

Es war auch nicht immer einfach, den genauen Standpunkt des Schachtes ausfindig zu machen. Manche Schächte besitzen verschiedene Namen, und öfters waren die Angaben nicht vollständig. Auf der Zunge des Gletschers tragen die Schächte meist den Namen des Pegels, der daneben steht, im oberen Bereich des Gletschers besitzen die Schächte seit Beginn der Messungen eigene Namen. Viele Schächte besitzen als Ortsangabe auch nur die Bezeichnung Hef r (für orographisch rechte Seite, Hintereisferner), Hef l (linke Seite) oder Hef m (Mitte) in Verbindung mit einer Höhenangabe. Man versucht jedes Jahr den Schacht in etwa an der gleichen Stelle zu graben. Um eine Übersicht über alle im Verlauf der Jahre gegrabenen Schächte zu gewinnen, habe ich diese zusammen mit den verwendeten Abkürzungen und den dazupassenden Höhenangaben in der Tabelle 4.1 zusammengefasst. Alle genannten Punkte sind entweder auf der Karte des Hintereisferner aus dem Jahre 1971 (Abb. 4.1) oder auf der Karte aus dem Jahre 1967 (Abb. 4.2) zu finden. Natürlich haben sich die Höhenangaben der einzelnen Standpunkte im Laufe der Jahre etwas verändert, da sich in der Zeit zwischen 1964 und heute auch die Masse des Gletschers geändert hat. Deshalb stellen die Angaben in der oben genannten Tabelle nur ungefähre Höhenangaben dar und sollen nur dazu dienen, eine Vorstellung darüber zu bekommen, wo welcher Schacht liegt bzw. lag.

Weiters wurde eine Tabelle erstellt, auf der ersichtlich ist, wann welcher Schacht im Laufe der Jahre gegraben wurde. Farblich kann man in dieser Tabelle zwischen Frühjahrs-, Pfingst- und Herbstbegehungen unterscheiden. Diese Tabelle erleichterte die nächsten Arbeitsschritte, da man aus ihr sofort entnehmen kann, wo regelmäßig gegraben wurde und wo es eher selten Messungen gibt. Ein Teil der Tabelle ist als Tabelle 2 im Anhang beigefügt. Es fällt sofort auf, dass es im oberen Bereich des Gletschers eine Reihe von Schächten gibt, die sehr regelmäßig gegraben wurden. Dazu gehören die Schächte Teufelseck, Badeeis, Weißkugeljoch, Steinschlagjoch, Schimppstollen, Hintereisjoch, IA, LS und Langtaufererjoch. In den früheren Jahren

wurden viele Schäfte noch dreimal im Jahr gegraben, ab dem Jahr 1997 gibt es nur noch Daten der Herbstbegehung.

Abb. 4.1: Pegel und Schächte am Hintereisferner, 1971, nachbearbeitet



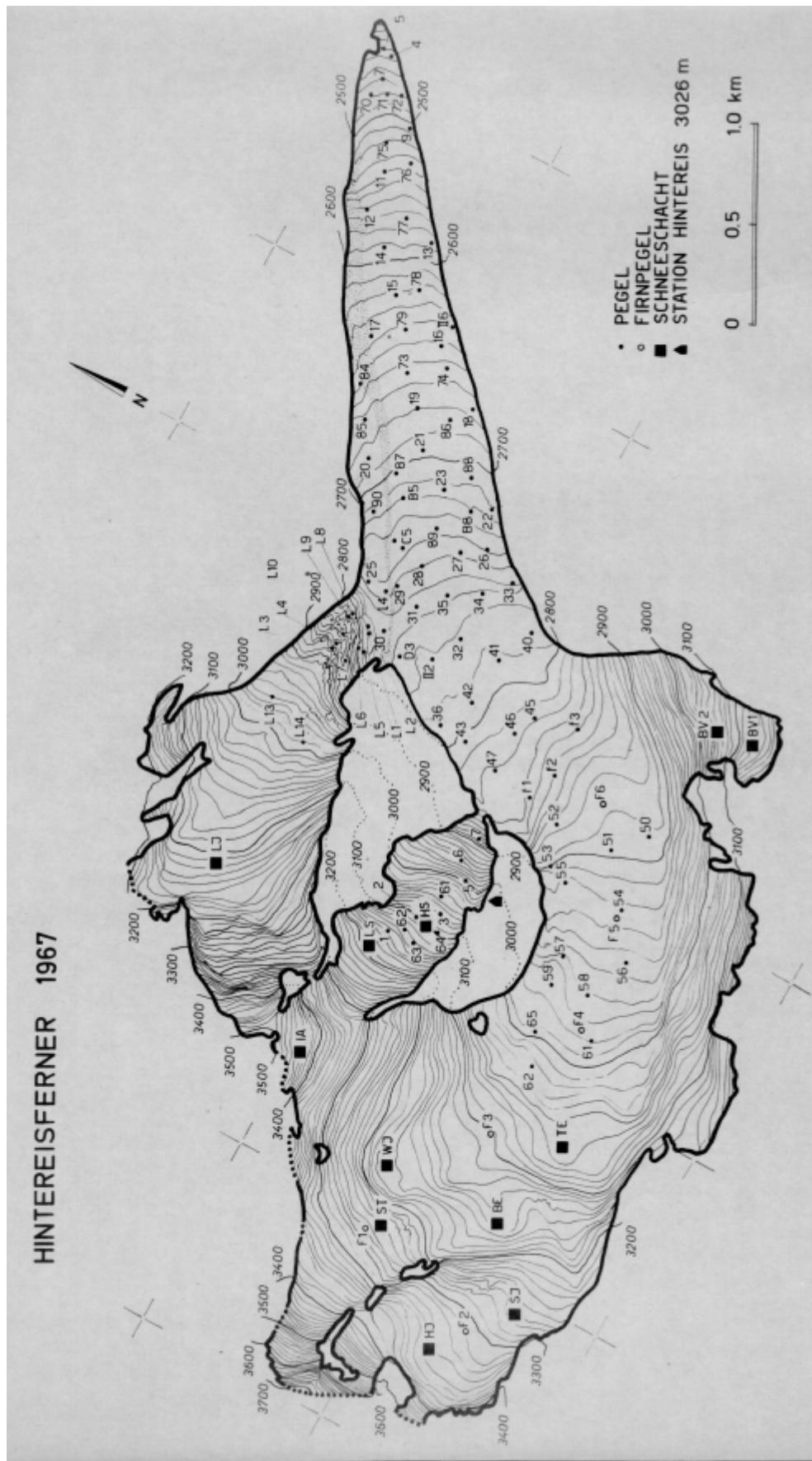


Abb. 4.2: Schächte und Pegel am Hintereisferner, 1967

Tabelle 4.1: Schächte am Hintereisferner 1964 bis 2002

Name	Abkürzung	Höhe in m
Pegel 3	P 3	2430
Pegel 7	P 7	2470
Pegel 71	P 71	2480
Pegel 75	P 75	2520
L 11	L 11	2550
Pegel 14	P 14	2590
Pegel II/6	P II/6	2630
Pegel 15	P 15	2640
Pegel 17	P 17	2640
Pegel 16	P 16	2650
L 9	L 9	2670
Pegel 27	P 27	2760
Pegel 35	P 35	2770
Pegel II/2	P II/2	2785
Pegel 40	P 40	2790
Pegel 41	P 41	2790
Pegel 42	P 42	2790
Station 28	St 28	2800
Pegel 47	P 47	2820
Pegel 46	P 46	2820
Pegel 60	P 60	2880
L 5	L 5	2880
Pegel 52	P 52	2880
F 6	F 6	2885
Pegel 51	P 51	2890
Pegel 61	P 61	2890
Pegel 54	P 54	2920
L 55	L 55	2920
L 4	L 4	2925
F 5	F 5	2930
Pegel 56	P 56	2940
F 4	F 4	2970
Pegel 59	P 59	2975
L 3	L 3	2980
Hüttenschacht	HS	3050
Teufelseckjoch, Vietoris	TEJ, VIET	3065
Teufelseck	TE	3065
Bellavista 2	BV 2	3075
F 3	F 3	3100
Langtaufererjoch	LJ	3110
Hoinkes	HOI	3110
Bellavista 1	BV 1	3130
Badeeis	BE	3150
Weißkugeljoch	WJ	3170
LS	LS	3200
Schimppstollen	ST	3250
Steinschlagjoch	SJ	3270
Hintereisjoch	HJ	3330
IA	IA	3450

5. Änderung des Wasseräquivalents

5.1 Allgemeines

Seit dem Beginn der Messungen im Haushaltsjahr 1952/53 hat es am Hintereisferner 41 negative und 10 positive Bilanzjahre gegeben. Das negativste Jahr war mit -1815 mm Wasseräquivalent das Haushaltsjahr 2002/03, gefolgt von den Jahren 1990/91 mit -1325 mm und 1963/64 mit -1244 mm. Das positivste Messergebnis stammt aus dem Messjahr 1964/65 mit 925 mm, gefolgt vom Haushaltsjahr 1976/77 mit 760 mm Wasseräquivalent.

Den größten Sprung gab es von 1963/64 auf 1964/65, hier wurde ein Jahr nach einer sehr negativen Bilanz die höchste Bilanz seit Beginn der Messungen aufgezeichnet. Die Massenbilanzen von Messbeginn 1952/53 bis 1963/64 waren bis auf ein einziges Jahr immer negativ, danach folgten sowohl negative als auch positive Jahre aufeinander und ab dem Jahr 1984/85 gab es nur noch negative Massenbilanzen.

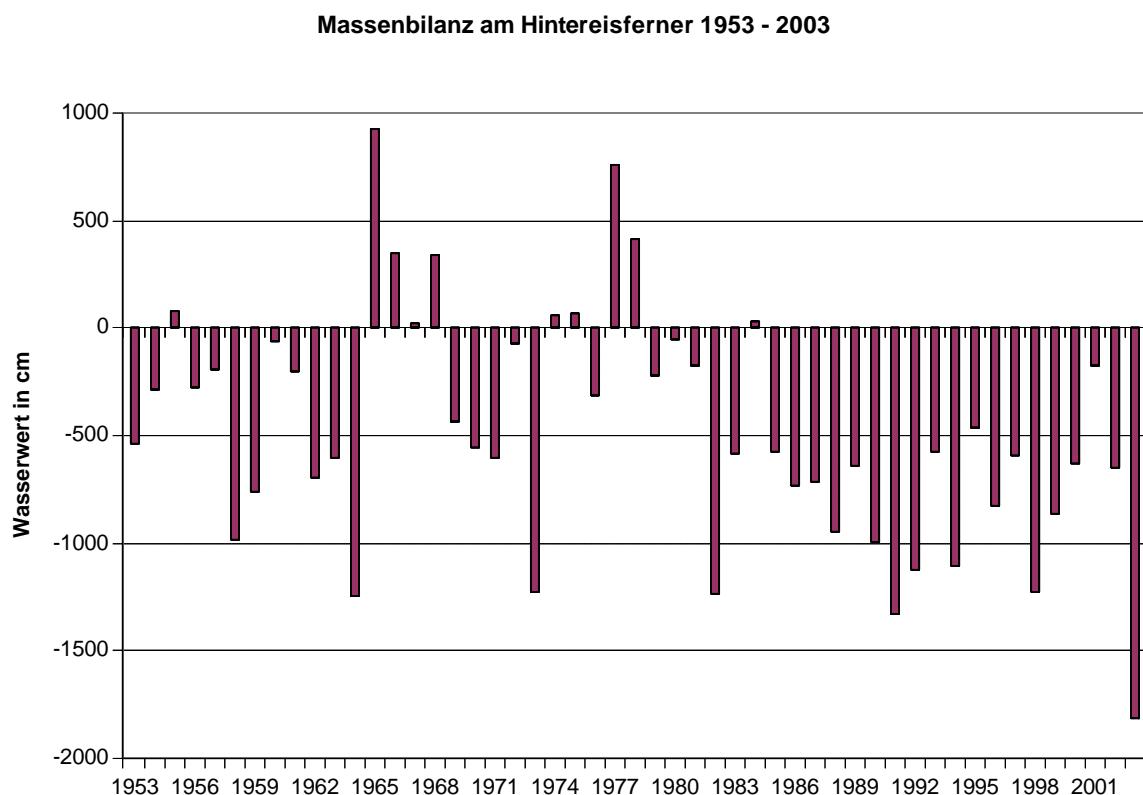


Abb. 5.1: Massenbilanz am Hintereisferner von 1953 bis 2003

Da von vielen Schächten fast jährlich Werte vorhanden sind, konnte ich die Änderungen des Wasseräquivalents der einzelnen Punkte am Gletscher in Diagramme auftragen. Im unteren Teil des Gletschers gibt es weniger kontinuierliche Messungen an den gleichen Punkten. Hier wurden verschiedene nahe beieinander liegende Schächte zu Gruppen zusammengefasst und ausgewertet.

Die Gruppen im unteren Teil des Hintereisferrers (vergleiche Tab. 4.1, Abb. 4.1 und 4.2):

Gruppe 1: P 59 / L 3 / F 4

Gruppe 2: L 4 / L 55 / P 56 / F 5

Gruppe 3: P 61 / P 60 / F 6

Gruppe 4: P 51 / P 52 / P 54 / L 5

Gruppe 5: P 42 / P 46 / P 47 / St 28

Gruppe 6: P 40 / P 41

Gruppe 7: P II/2 / P 35 / P 27

Gruppe 8: P 16 / P II/6

Gruppe 9: P 14 / P 15 / P 17

Gruppe 10: P 7 / P 71 / P 75 / P 3

Gruppe 11: L 9

Gruppe 12: Hef in einer Höhe von ca. 2700 m

Gruppe 13: Hef rechts, in einer Höhe von ca. 2950 m

Gruppe 14: Hef rechts, in einer Höhe von ca. 2800 m

Gruppe 15: L 11 und Umgebung

Gruppe 16: Vietoris und Hef rechts auf einer Höhe von über 3000 m

Gruppe 17: Hef links, auf einer Höhe von über 3000 m

Von den Schächten Hintereisjoch, Hoinkes, Hütenschacht, Badeeis, IA, Langtaufererjoch, LS, Schimppstollen, Steinschlagjoch, Teufelseck und Weißkugeljoch gibt es genug Daten, um für den jeweiligen Schacht allein eine Reihe zu zeichnen.

Die Gruppen 6, 8 und 12 konnten leider nicht mehr behandelt werden, es gibt nicht genug Daten, um ein aussagekräftiges Diagramm zu produzieren.

Leider fehlten immer wieder ein paar Daten, diese wurden über Korrelationen aus den Nachbarschächten berechnet und sowohl in den Tabellen als auch in den Diagrammen in einer anderen Farbe eingezeichnet.

So fehlten z. B. beim Schacht Schimppstollen im Herbst die Werte aus den Jahren 1965, 1981, 1984, 1993 und 2000. Durch Vergleich mit den Daten der Schächte Weißkugeljoch und Hintereisjoch wurden folgende Faktoren gefunden:

1. Faktor: Weißkugeljoch / Schimppstollen = 0,88
2. Faktor: Schimppstollen / Hintereisjoch = 0,96
3. Faktor: Schimppstollen – Hintereisjoch = -11,38 mm

Mit dem ersten Faktor wurde keine hohe Korrelation erreicht und somit wurden die fehlenden Daten mit den übrigen beiden berechnet.

Jahr	Wasserwert(berechnet mit 2. Faktor)	Wasserwert(berechnet mit 3. Faktor)	Wasserwert (Mittelung aus 2. und 3. Spalte)
1965	281,5 mm	281,8 mm	281,7 mm
1981	169,9 mm	165,6 mm	167,8 mm
1984	226,6 mm	224,6 mm	225,6 mm
1993	183,4 mm	179,6 mm	181,5 mm
2000	116,1 mm	109,5 mm	112,8 mm

Tab. 5.1: Zur Berechnung der fehlenden Daten beim Schimppstollen

Durch Mittelung entstanden die in den Diagrammen verwendeten Daten.

Nicht immer war es möglich, die fehlenden Daten zu berechnen. Manchmal fehlten auch die Daten eines oder mehrerer Nachbarschächte oder es konnte keine Korrelation gefunden werden. Ich fand es auch nicht vernünftig, ganze Datenreihen zu ergänzen; wenn zu viele Daten fehlten, wurden diese im Diagramm auch einfach frei gelassen.

Von den Schächten, die zu Gruppen zusammengefasst wurden, lieferten leider nur die Gruppen 1, 2 und 5 genügend Daten, damit ein aussagekräftiges Diagramm gezeichnet werden konnte. Für die Gruppe 1 konnte nur ein Diagramm für die Herbstbegehungen, für die Gruppen 2 und 5 nur ein Diagramm für die Frühjahrsbegehungen gezeichnet werden.

5.2 Frühjahr

Im oberen Bereich des Gletschers standen von vier Schächten genügend Daten zur Verfügung, um ein Diagramm für die Frühjahrsbegehungen zu zeichnen und zwar von den Schächten Badeeis, Hintereisjoch, Teufelseck und Weißkugeljoch.

Somit stehen zusammen mit den Schächten aus den Gruppen 2 und 5 von den Messungen des Frühjahrs sechs Diagramme zur Verfügung (Abb. 5.2 bis 5.7). In fünf der sechs Diagramme ist ein eindeutiges Maximum des Wasseräquivalents im Jahr 1975 zu erkennen. In vier Diagrammen sticht außerdem das Jahr 1980 mit einem der höchsten Werte hervor. Weiters wurden auch in den Jahren 1977, 1967 und 1981 Spitzenwerte erreicht. Ein deutliches Minimum wurde in fünf der sechs Diagramme im Jahre 1973 erreicht. Weitere Minima wurden in den Jahren 1969, 1976 und 1972 erreicht. Meistens waren die Daten von 1964 bis 1981 vorhanden, nur vom Schacht Teufelseck gibt es auch noch Daten zwischen 1990 und 1996.

Abb. 5.2: Badeeis, Frühjahrsbegehungen 1964-2002

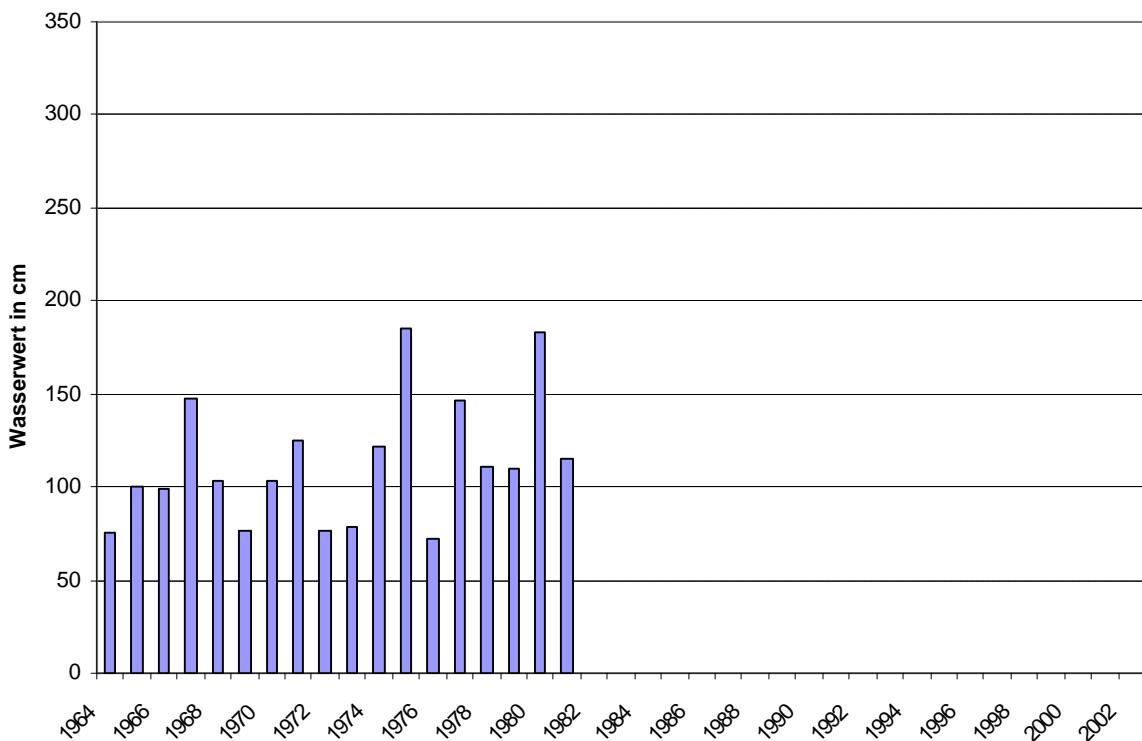


Abb. 5.3: Hintereisjoch, Frühjahrsbegehung 1964-2002

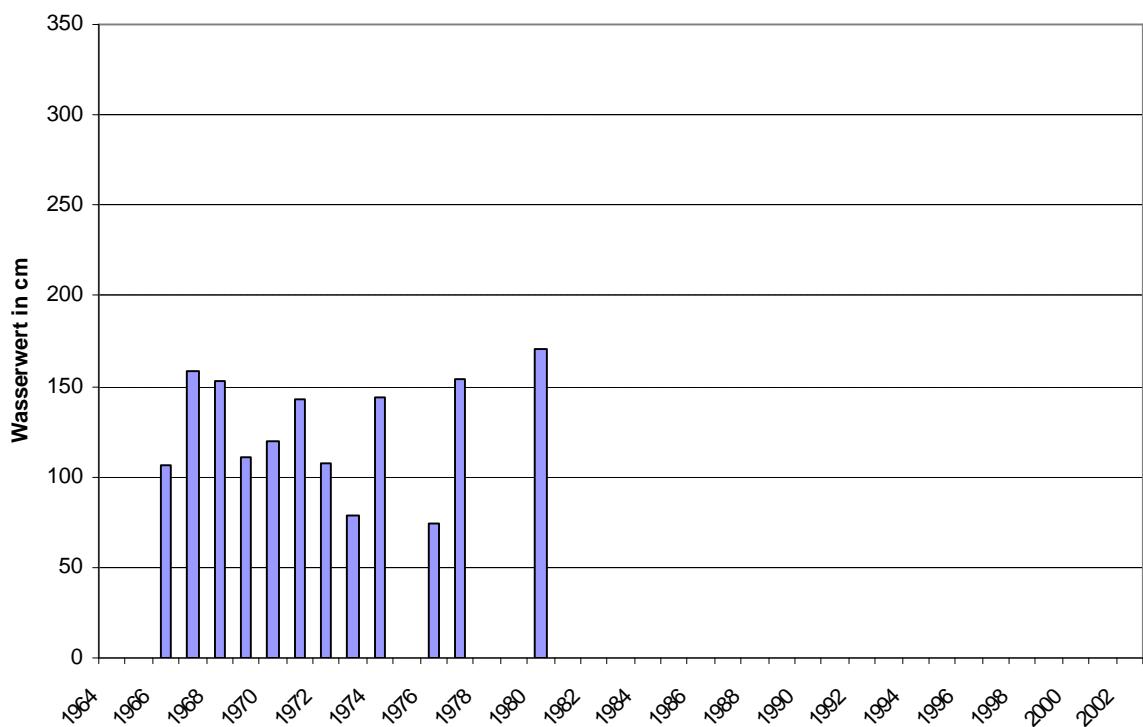


Abb. 5.4: Teufelseck, Frühjahrsbegehung 1964-2002

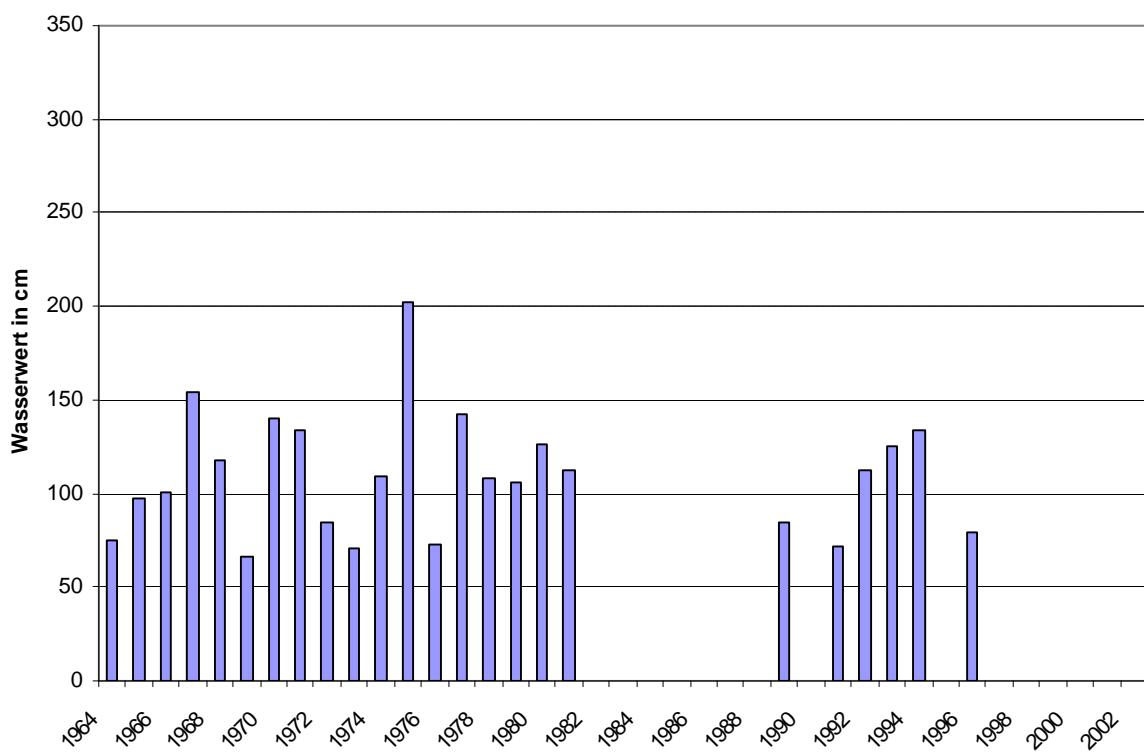


Abb. 5.5: Weißkugeljoch, Frühjahrsbegehung 1964-2002

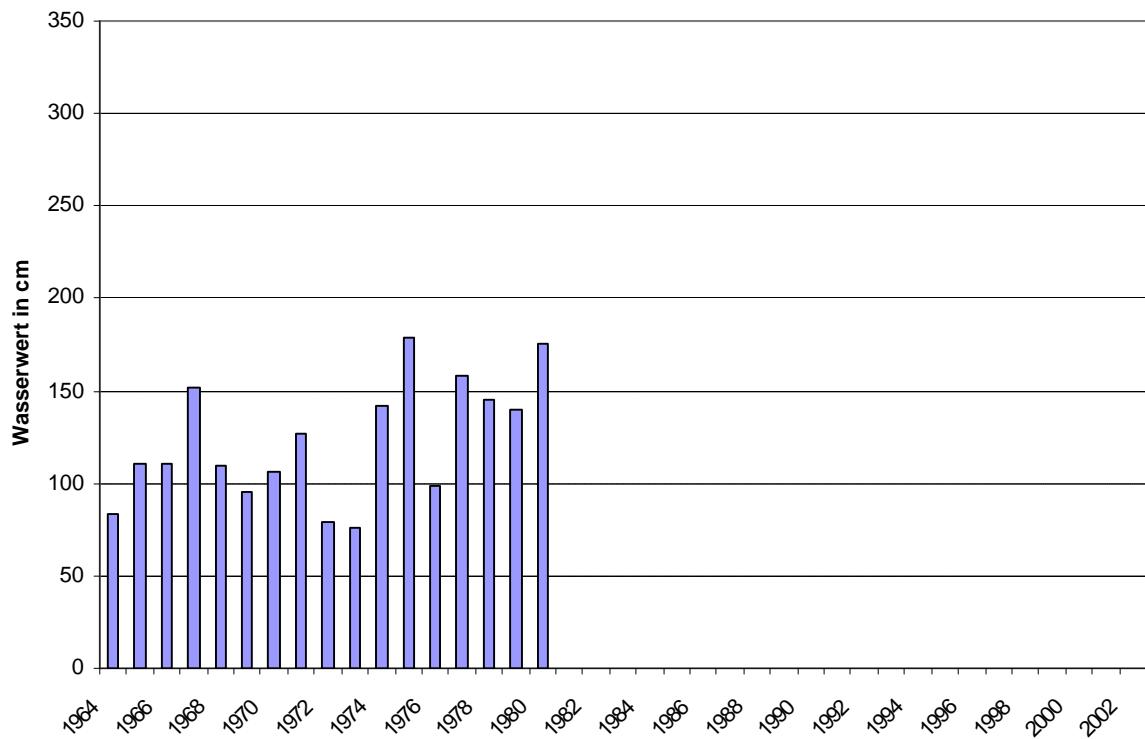


Abb. 5.6: Gruppe 2, Frühjahrsbegehung 1964-2002

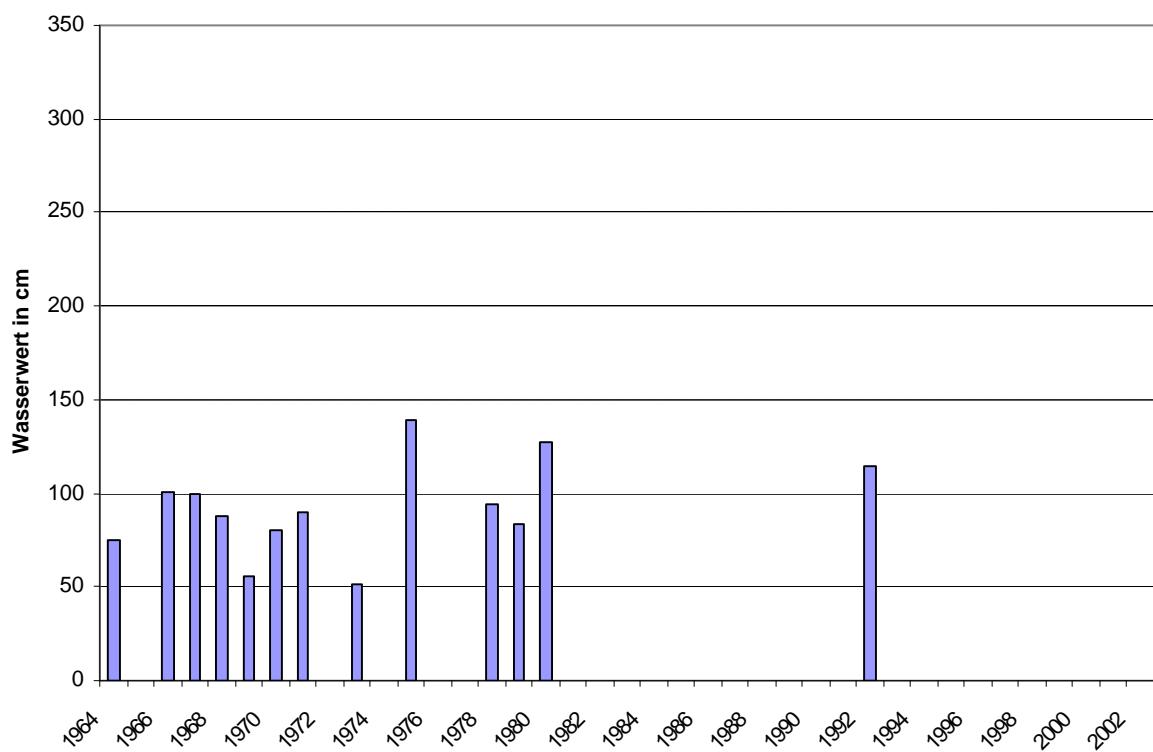
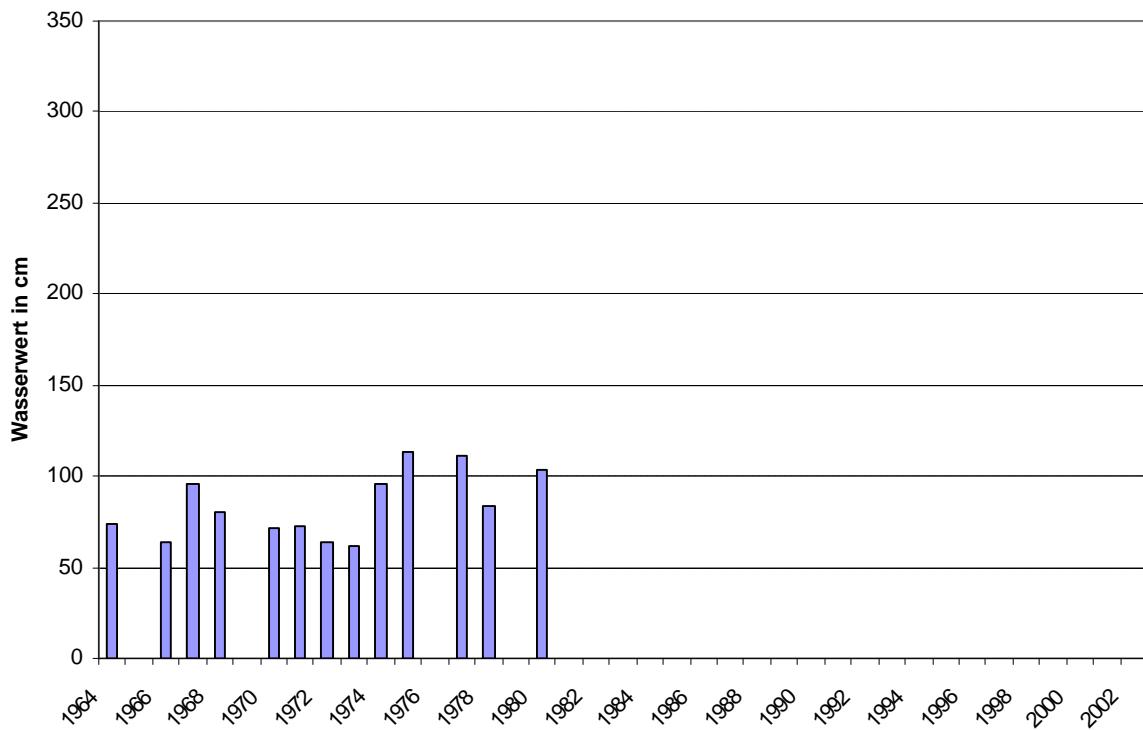


Abb. 5.7: Gruppe 5, Frühjahrsbegehung 1964-2002



5.3 Herbst

Für die Herbstbegehung konnten von allen Schächten ein Diagramm erstellt werden, damit stehen insgesamt 13 Diagramme zur Verfügung. Davon stammt eines von der Gruppe 1, die weiteren 12 von den einzelnen Schächten im Akkumulationsbereich. Von den übrigen Gruppen gibt es leider nicht genug Daten, um Aussagen zu treffen. Auf den ersten Blick stechen zwei Maxima ins Auge, die in fast allen Diagrammen zu finden waren, die Jahre 1965 und 1977. Beim Hütenschacht befindet sich ein weiteres Maximum bei 1966, hier fehlen aber die Daten von 1964 und 1965. Beim Schacht Steinschlagjoch sind die Werte von 1968 und 2001 höher als jener von 1977. Beim Schacht Vietoris befindet sich ein weiteres Maximum bei 1980, auch hier fehlt der Wert des Jahres 1965. Ähnliche Werte wie die Schächte von 1965 und 1977 liefern am Weißkugeljoch auch die Schächte aus den Jahren 1966 und 1978.

Bei der Betrachtung der Minima können keine so einheitlichen Aussagen getroffen werden. Die verschiedenen Schächte unterscheiden sich oft sehr voneinander. Öfters stellte das Jahr 1964 das absolute Minimum dar, aber auch in den Jahren

1969, 1971, 1973, 1983, 1986, 1990, 1991, 1994, 1996, 1997 und 1999 wurden in einzelnen Schächten Minima gemessen.

Insgesamt kann man sagen, dass zwischen der Frühjahrs- und der Herbstbegehung wenig Zusammenhang besteht. Die Maxima vom Frühjahr waren im Herbst nicht mehr vorhanden, dafür stechen andere hervor. Zwischen den Diagrammen vom Herbst und der Massenbilanz des Hintereisferners kann man jedoch sofort einen Zusammenhang sehen. Die Jahre 1965 und 1977 waren die positivsten Jahre in der Geschichte der Massenbilanz des Gletschers. Auch die Minima aus den Jahren 1964, 1973 und 1991 finden sich wieder. Das deutliche Minimum in der Massenbilanz im Jahre 1982 fällt bei den einzelnen Schächten nicht besonders auf.

Abb. 5.8: Badeeis, Herbstbegehungen 1964-2002

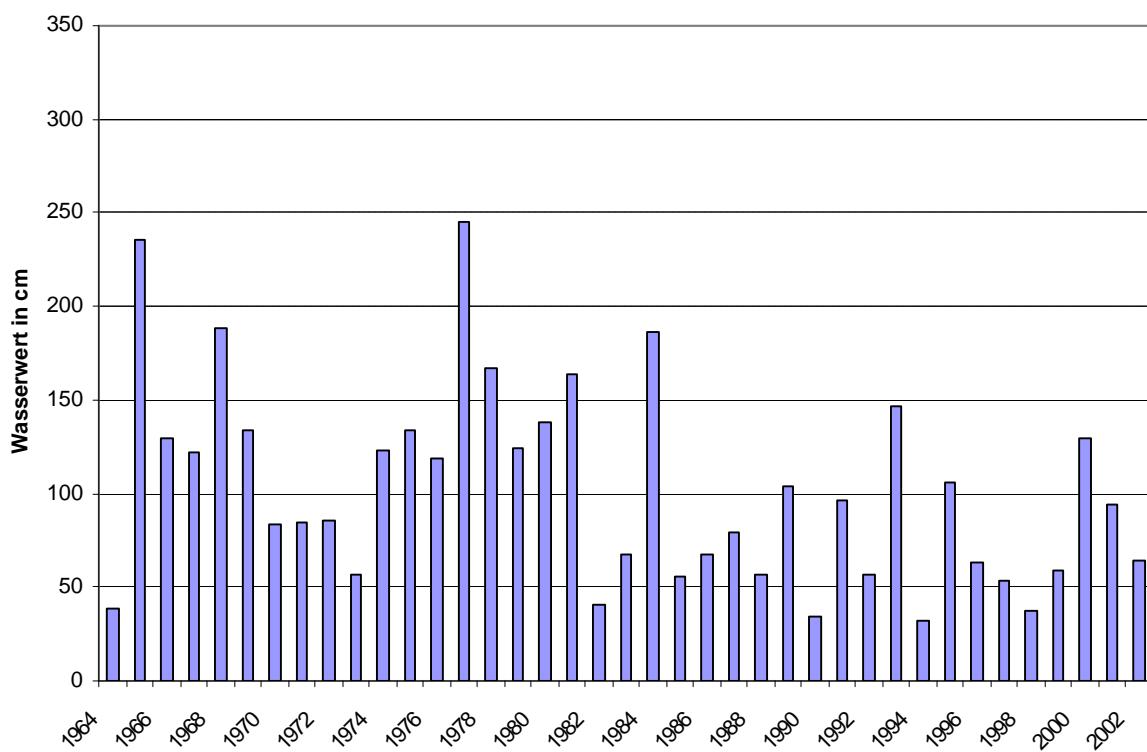


Abb. 5.9: Hintereisjoch, Herbstbegehung 1964-2002

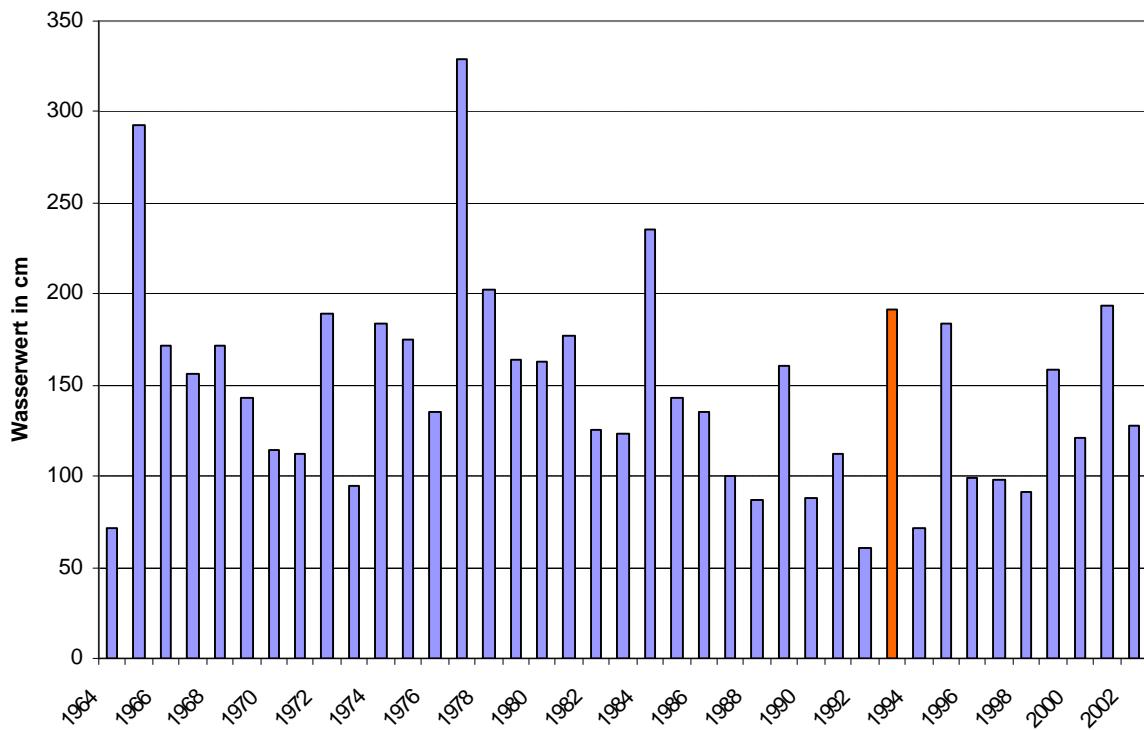


Abb. 5.10: IA, Herbstbegehung 1964-2002

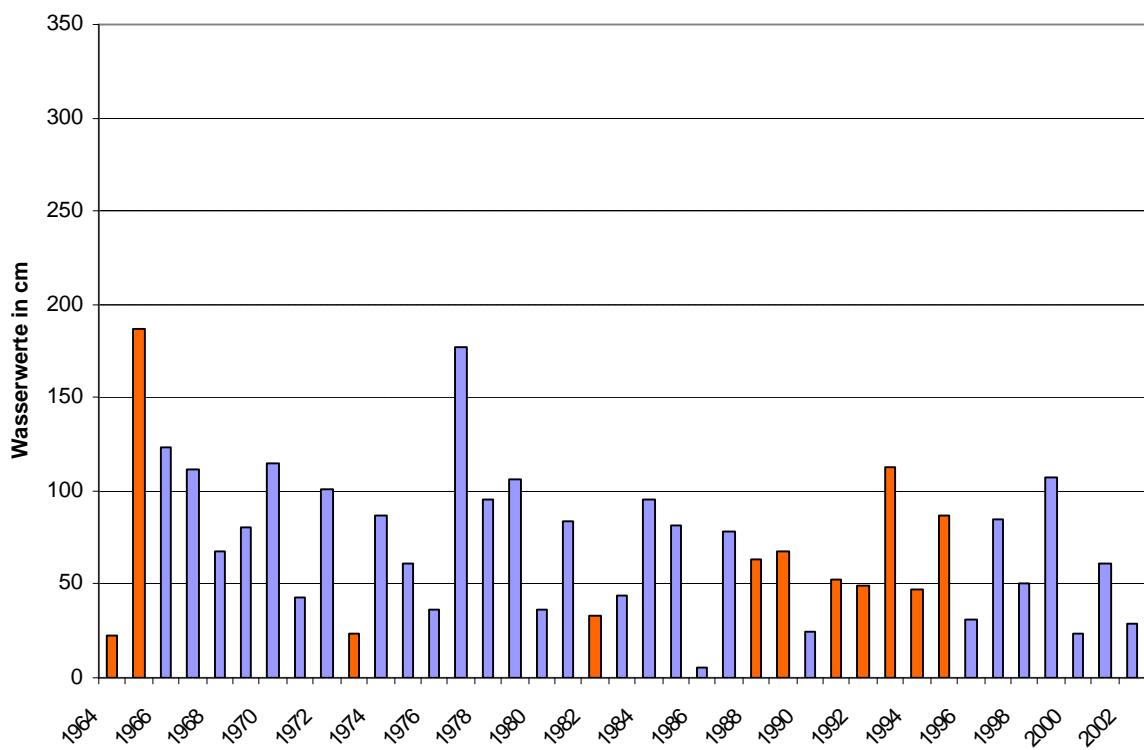


Abb. 5.11: Langtaufererjoch, Herbstbegehung 1964-2002

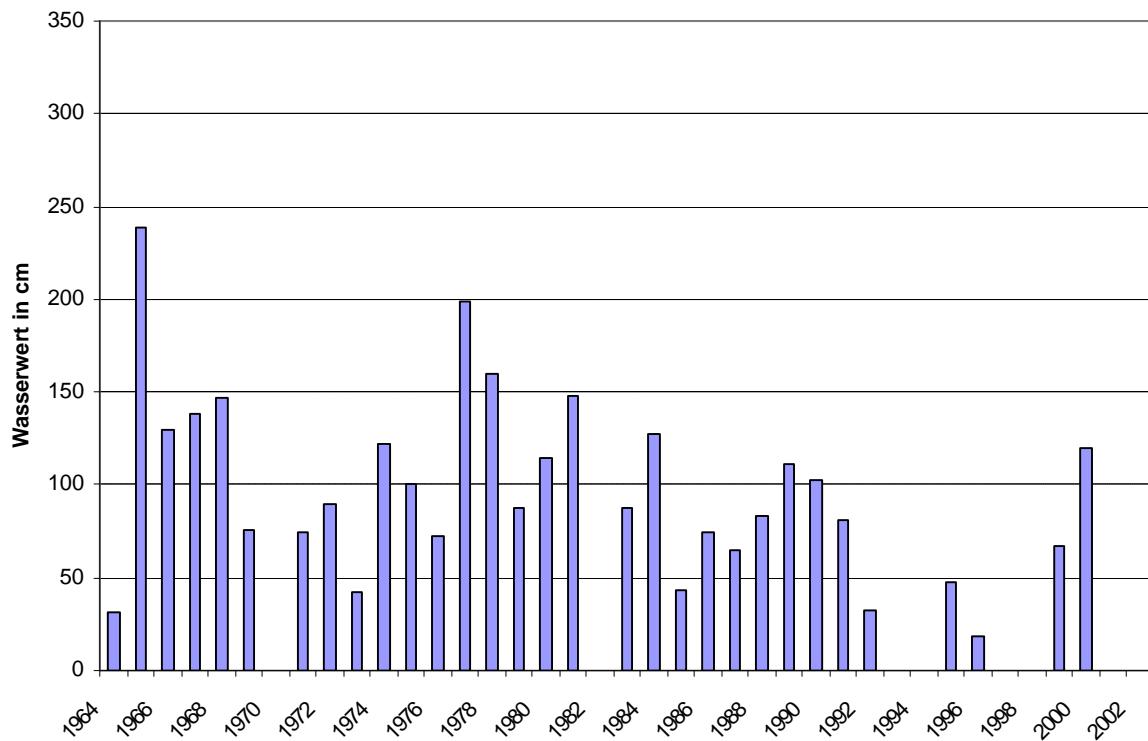


Abb. 5.12: LS, Herbstbegehung 1964-2002

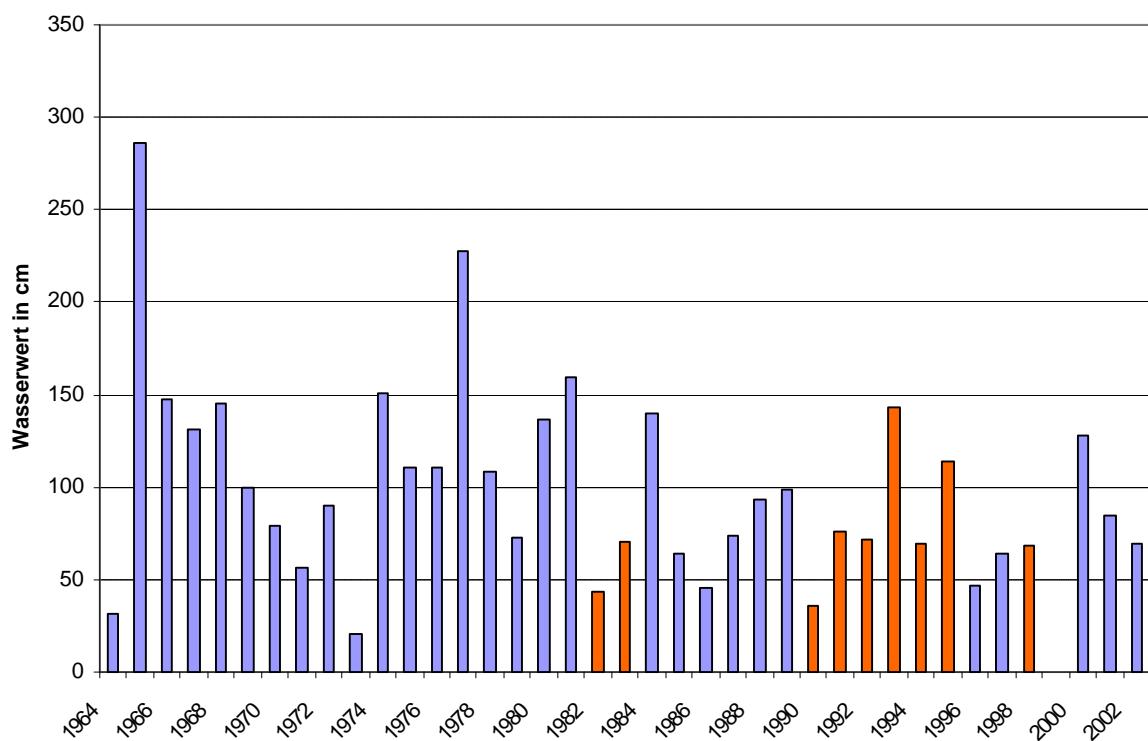


Abb. 5.13: Schimppstollen, Herbstbegehungen 1964-2002

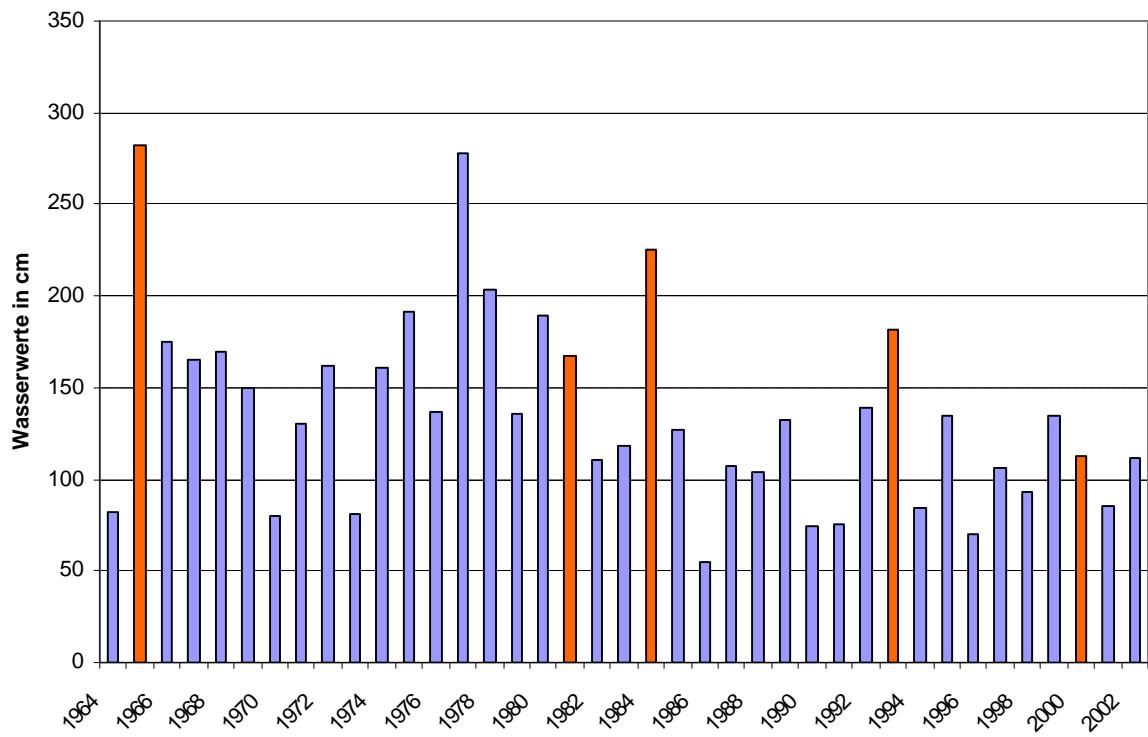


Abb. 5.14: Steinschlagjoch, Herbstbegehungen 1964-2002

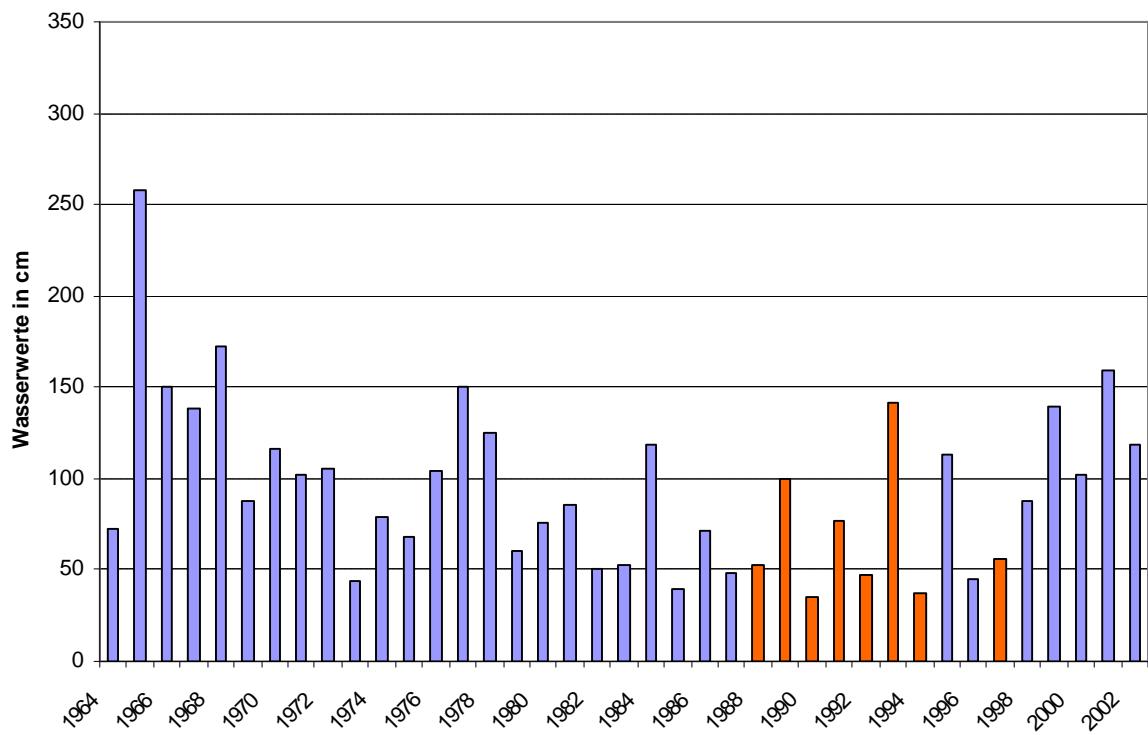


Abb. 5.15: Teufelseck, Herbstbegehungen 1964-2002

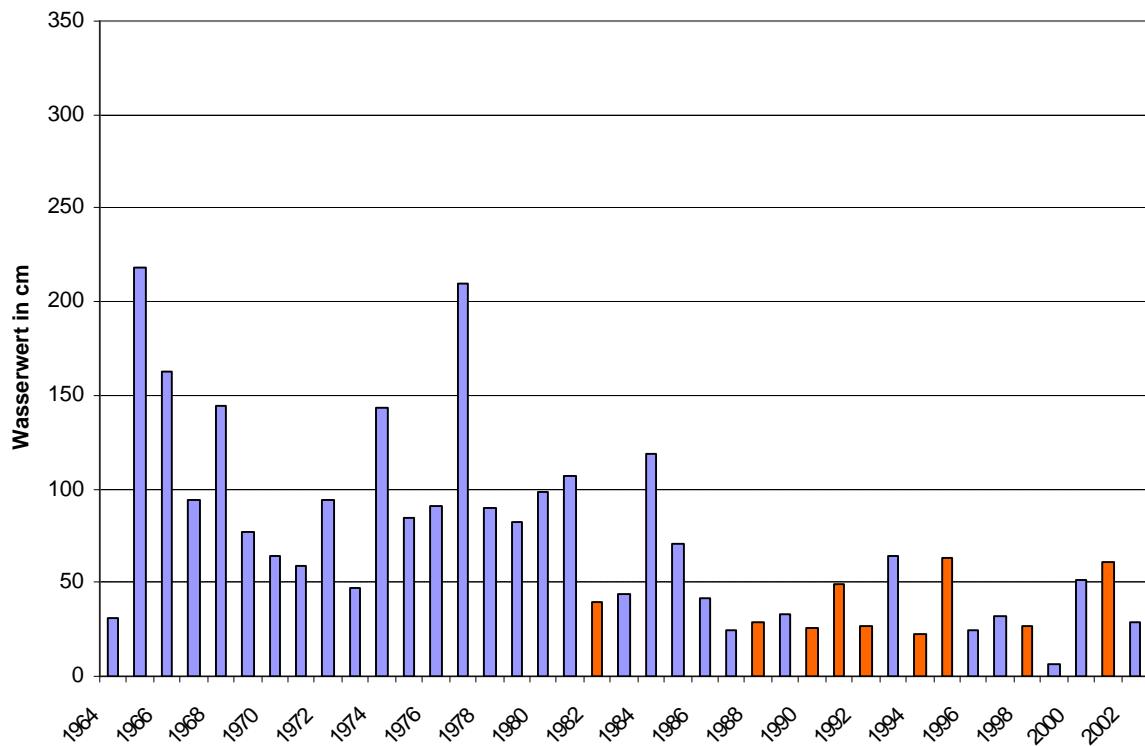


Abb. 5.16: Weißkugeljoch, Herbstbegehungen 1964-2002

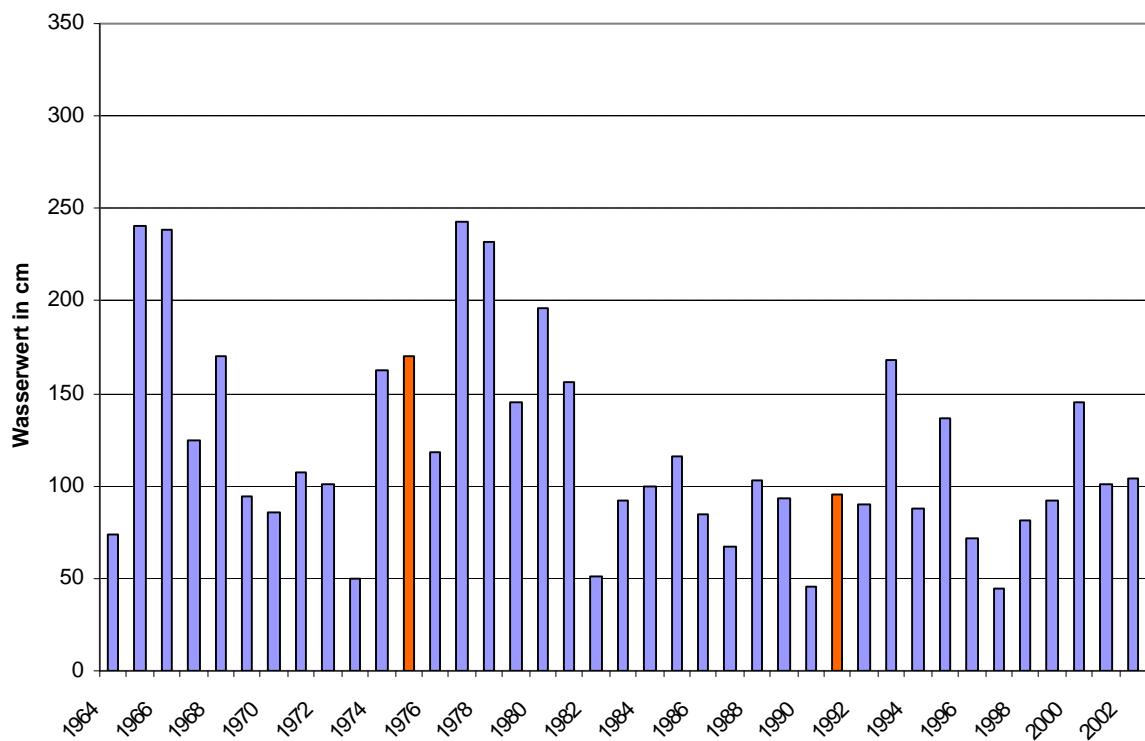


Abb. 5.17: Gruppe 1, Herbstbegehungen 1964-2002

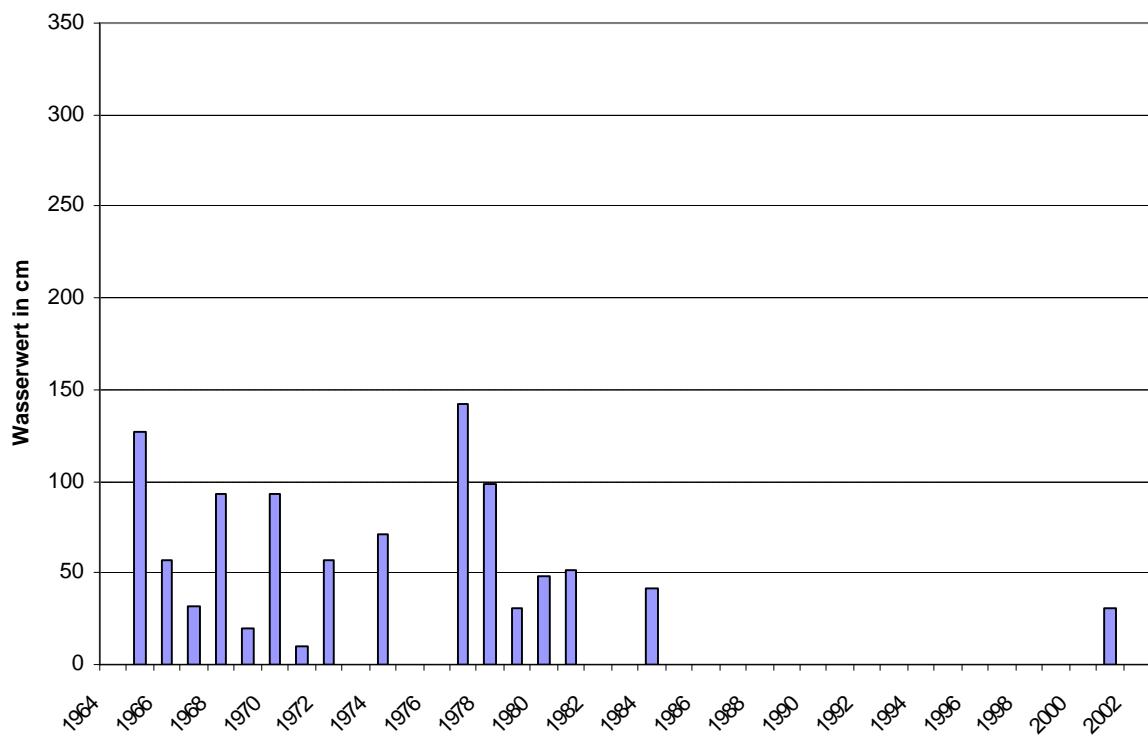


Abb. 5.18: Hoinkes, F 3, Herbstbegehungen 1964-2002

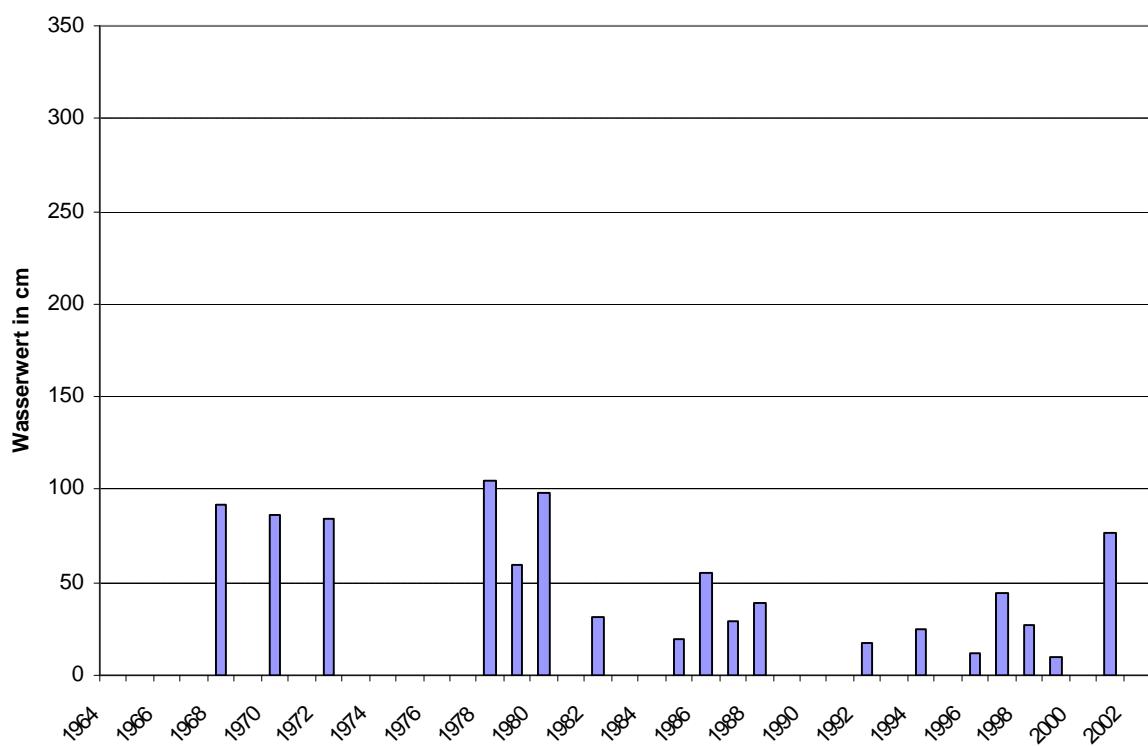


Abb. 5.19: Hütenschacht, Herbstbegehungen 1964-2002

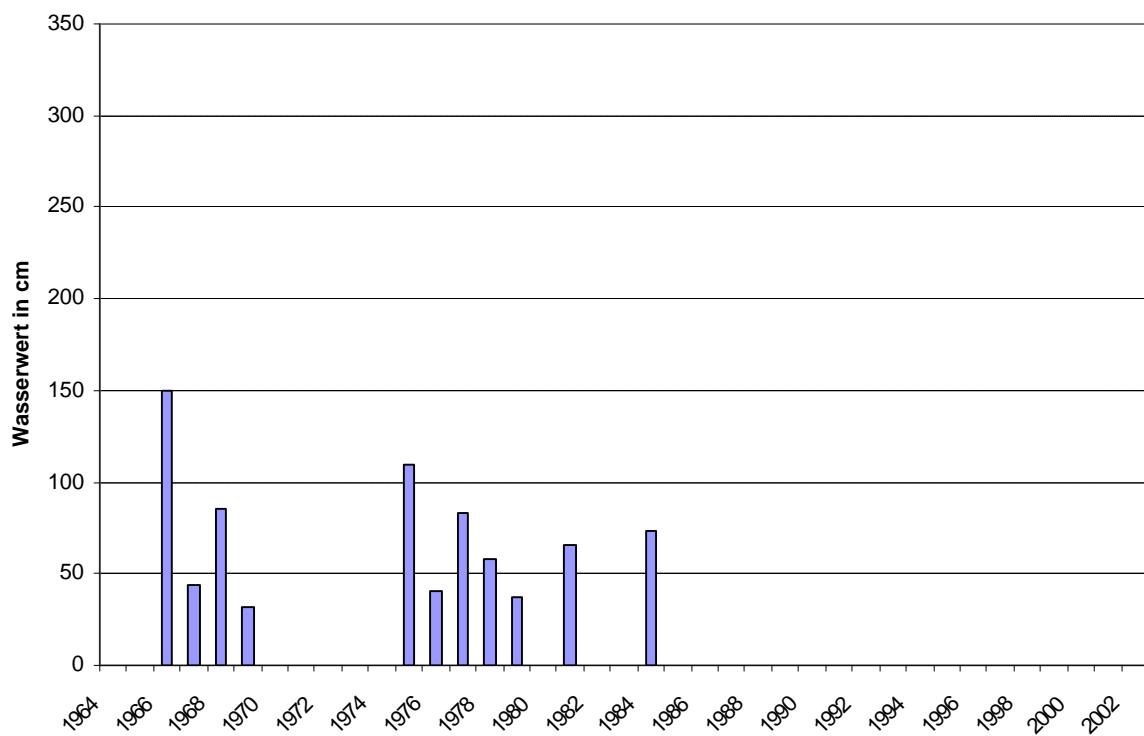
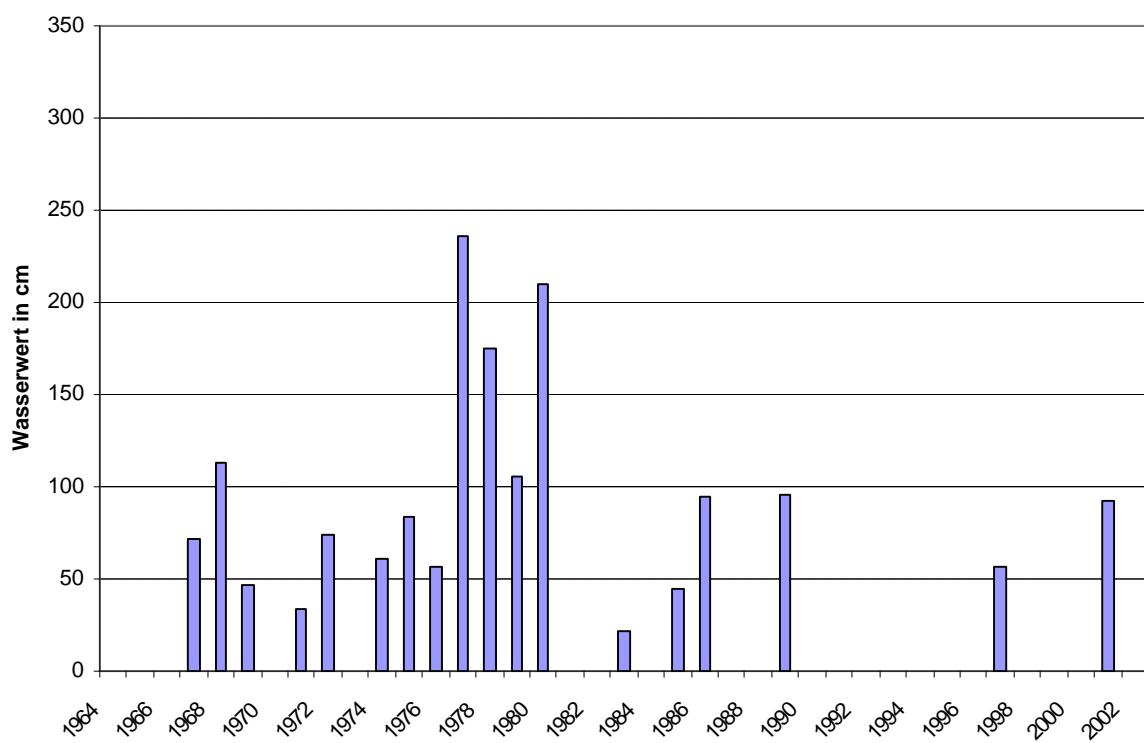


Abb. 5.20: Vietoris, Herbstbegehungen 1964-2002



6. Die Schneeschäfte von 1964 bis 2002

Am Hintereisferner werden seit 1952 Schneeschäfte gegraben. In meiner Arbeit habe ich mich mit den Schächten von 1964 bis zum Jahr 2002 befasst. Am Anfang wurden pro Jahr 30 bis 40 Schächte gegraben, davon ungefähr die Hälfte im Herbst und die restlichen im Frühjahr und rund um Pfingsten. Man musste erst testen, wie, wann und wo man am besten einen Schneeschacht gräbt, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Durch Vergleiche mit anderen Gletschern konnte man sehen, ob die Messungen glaubwürdig waren.

Ab dem Jahre 1980 wurden nur mehr 10 bis 20 Schächte pro Jahr gegraben, die meisten im Herbst. Seit dem Jahr 1997 gibt es nur noch Daten von den Herbstbegehungen.

Im Jahre 1979 wurde mit 46 Schächten die größte Anzahl an Schächten gegraben, davon 30 im Herbst. Aus dem Jahr 1977 stammt der tiefste Schacht. Er wurde am 30. September dieses Jahres am Hintereisjoch gegraben und ist 616 cm tief.

6.1 Die Stratigraphie

Bei der Untersuchung der Stratigraphie beschäftigt man sich mit der Beschaffenheit des Schnees im gegrabenen Schacht. Man notiert, in welcher Tiefe sich Eislinsen und Eislamellen befinden.

Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen Firn, grobkörnigem Firn, Becherkristallen, Eislamellen, Eislinsen und Eisstrünken (Queck 1966).

Bei der Untersuchung mehrerer Schächte auf dem Kesselwandferner kam H. Queck zu dem Ergebnis, dass die Anzahl der Eislamellen mit zunehmender Tiefe abnimmt, ihre Stärke jedoch wie in einem Flußnetz zunimmt. Eislamellen bilden sich bevorzugt in den oberflächennahen Schichten, weil hier das Retentionsvermögen besonders groß ist, und weil diese Schichten in besonders hohem Maße den täglichen Temperaturschwankungen unterworfen sind. Die kurzwellige Strahlung kann nur bis in eine bestimmte Tiefe eindringen und bringt dort den Schnee zum Schmelzen. Das Schmelzwasser sickert nach unten und gefriert, sobald es in einer etwas kälteren

Schicht angekommen ist. Das Retentionsvermögen hängt von der Korngröße und von der Dichte ab (de Quervain 1948). Je geringer die Dichte, desto höher ist das Retentionsvermögen und je grobkörniger der Schnee ist, umso geringer ist das Retentionsvermögen. Sowohl Dichte als auch Korngröße nehmen mit der Tiefe zu. Bei den Messungen am Hintereisferner gibt es anfangs sehr genaue Aufzeichnungen der Stratigraphie. In den Jahren 1964, 1965 und 1966 liegt fast jedem Schacht eine Aufzeichnung der Stratigraphie bei. In den darauf folgenden Jahren wurde die Stratigraphie nicht mehr ganz so oft notiert, in den letzten Jahren gibt es kaum Aufzeichnungen über die Stratigraphie.

6.2 Die Korngröße

Die Korngröße nimmt mit der Tiefe zu. Ein Schneekorn besteht meist aus ein bis zwei Schneekristallen. Die Kristallgröße wächst mit der Tiefe durch Verdichtungsprozesse. Für polaren Firn, der jahrelang ungestört wachsen kann, gilt:

$$D^2 - D_0^2 = kt$$

Wobei D^2 die Fläche des Querschnitts des Kristalls im Jahr t , D_0^2 die Fläche des Querschnitts am Anfang und k die Wachstumsrate ist. Die Wachstumsrate ändert sich mit der Temperatur nach dem Gesetz von Arrhenius:

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$$

wobei k_0 eine Konstante, T die absolute Temperatur, R die Gaskonstante (8,314 J/mol K) und E die Aktivierungsenergie ist (Paterson 1994).

Für den Sommerschnee im Firngebiet des Hintereisferners, der meist isotherm Schmelztemperatur hat, ist die Schmelzwassermetamorphose vermutlich wichtiger als die Auflast (Druckmetamorphose). In den untersten cm liegen oft die großen Becherkristalle des Schwimmschnees.

Am Hintereisferner gibt es relativ wenige Messungen der Korngröße. Manchmal ist die Korngröße bei den Aufzeichnungen der Stratigraphie beigefügt. Sie variiert in etwa zwischen 0,5 und 2,5 mm Durchmesser.

6.3 Die Temperatur

Die Temperaturverteilung eines Gletschers wird

- an der Oberfläche vom Klima,
- am Grund von der Erdwärme und der Reibung
- und im Inneren vom Wiedergefrieren des Schmelzwassers und der Deformation kontrolliert.

Man unterscheidet vier Formen:

1. Die Temperatur des gesamten Eises ist unter dem Gefrierpunkt,
2. Der Schmelzpunkt wird nur am Grund erreicht,
3. Eine begrenzte Schicht am Grund befindet sich am Schmelzpunkt oder
4. Das gesamte Eis ist am Schmelzpunkt außer einer ca. 15 m dicken Schicht an der Oberfläche, die je nach Jahreszeit die Temperatur ändert (Paterson 1994).

Bei den ersten beiden handelt es sich um kalte Gletscher, Punkt 3 beschreibt einen polythermalen Gletscher und Punkt 4 einen temperierten Gletscher.

Der Hintereisferner ist ein temperierter Gletscher. Aus dem Jahr 1964 gibt es Aufzeichnungen über Temperaturmessungen in den gegrabenen Schächten. So zum Beispiel vom 22. März 1964. Hier liegt die Temperatur an der Oberfläche bei -2°C, zwischen 0,5 und 1,5 m Tiefe bei -5°C und darunter bei -4,5°C. Dies zeigt, dass das Temperaturprofil etwas den Jahreszeiten hinterher hinkt. In der Mitte der Jahresschicht erkennt man noch die Temperatur des vergangenen Winters, an der Oberfläche wird es im März schon langsam wieder wärmer.

In den Sommermonaten der Jahre 1972-1974 wurden an der Station 28 (St 28) in 2800 m Seehöhe sowie an 5 weiteren Punkten im Firngebiet und auf der Zunge Temperaturmessungen bis in eine Tiefe von 15 m vorgenommen. Wie in Abb. 6.1 ersichtlich, schwankt die Temperatur in den obersten Metern zwischen 0 und -4,5 °C, diese Schwankungen werden mit zunehmender Tiefe geringer, und in ca. 10 m Tiefe

bleibt die Temperatur das ganze Jahr über relativ konstant bei ungefähr -1°C (Markl u. Wagner, 1977).

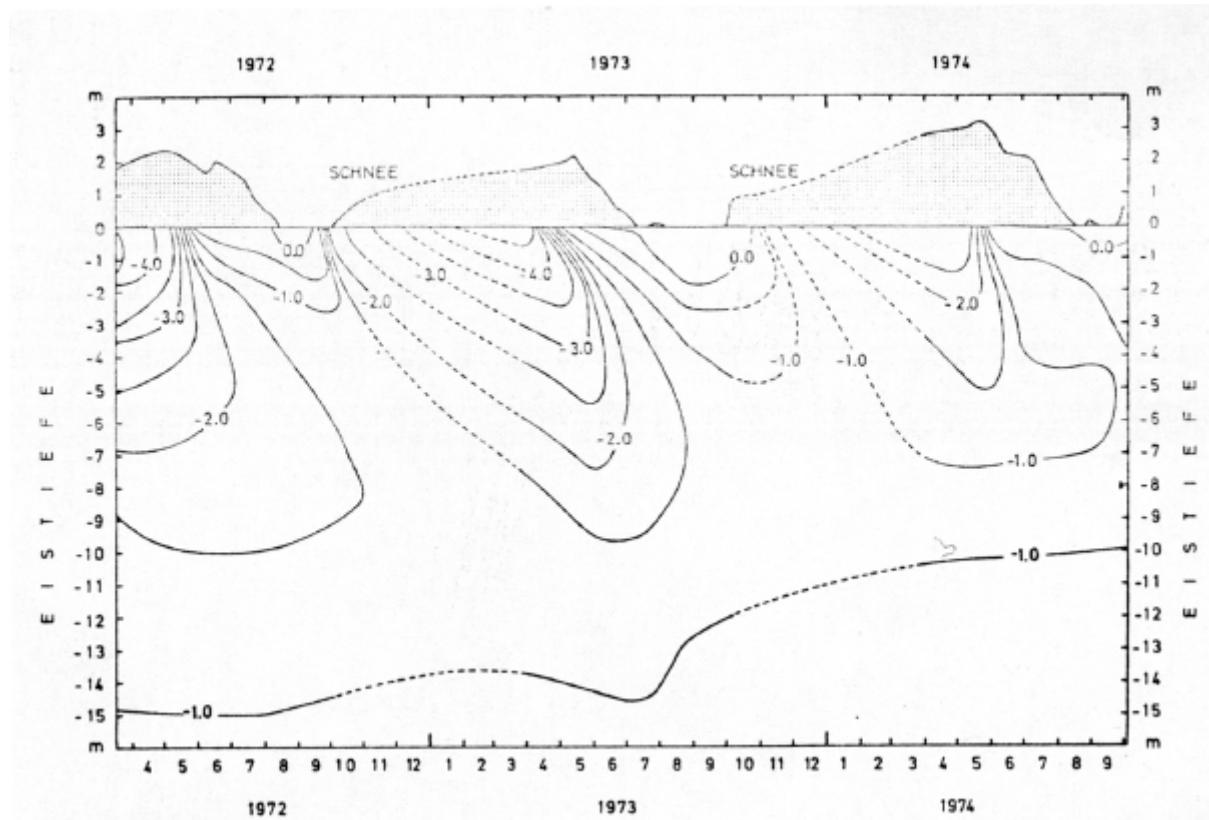


Abb. 6.1: Eistemperaturen am Hintereisferner in 2800 m Höhe (Station 28) in den Jahren 1972-1974 (Markl und Wagner 1977)

6.4 Die Dichte

Die Dichte von frisch gefallenem Schnee liegt bei 50 bis 100 kg/m^3 . Feuchter Neuschnee hat eine Dichte von 100 bis 200 kg/m^3 . Windgepresster Schnee weist eine Dichte von 350 bis 400 kg/m^3 und mehr auf, Firn hat eine Dichte von 400 bis 830 kg/m^3 und Gletschereis hat schließlich eine Dichte von 830 bis 917 kg/m^3 . Die Übergänge sind nicht genau definiert, man findet durchaus Altschnee mit einer Dichte von 500 kg/m^3 , und die Dichte von reinem Eis, also 917 kg/m^3 wird auf dem Gletscher wohl nie erreicht.

Im Gletscher nimmt die Dichte durch die Kompression des Porenraums durch die Masse des darüber liegenden Schnees zu. Der Druck nimmt mit der Tiefe zu. Sorge's Law (Bader 1954) stellte fest, dass sich im grönlandischen Schnee die

Dichte an einem bestimmten Punkt nicht mit der Tiefe ändert. Für die Alpengletscher der letzten 20 Jahre kann das nicht ohne Einschränkung angenommen werden.

Die Zunahme der Dichte mit der Tiefe kann man in einem entsprechenden Diagramm gut darstellen. Dort sieht man auch, wie unterschiedlich sich kalte und temperierte Gletscher bei der Zunahme der Dichte verhalten. Wie in Abb. 6.2 ersichtlich, nimmt die Dichte im trockenen Eis in Grönland mit der Tiefe nur langsam zu. In einem temperierten Gletscher geschieht dies viel schneller. So wird eine Dichte von 830 kg/m^3 in einem temperierten Gletscher schon in 10 bis 30 m Tiefe, in Grönland jedoch erst in einer Tiefe von ca. 60 m erreicht.

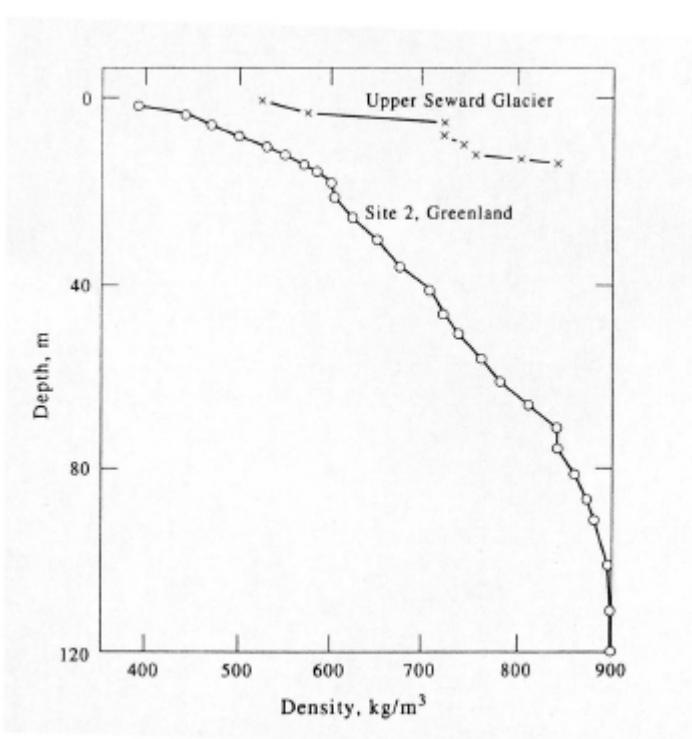


Abb. 6.2: Änderung der Dichte mit der Tiefe in einem temperierten Gletscher und in Grönland (Paterson 1994)

Die Dichte ist eines der charakteristischen Merkmale einer Schneedecke. Kennt man die Dichte, kann man auf verschiedene andere Eigenschaften schließen. Deshalb wurde auch schon früh begonnen, die Dichte zu messen und zu untersuchen.

E. Sorge (Bader 1954) fand auf empirischem Weg einen Zusammenhang von Schneeverdichtung und Tiefe unter der Gletscheroberfläche in Grönland.

V. Schytt (1958) hat auf ähnliche Weise eine Beziehung zwischen Tiefe und Dichtezunahme im Maudheim-Eisschelf gefunden.

6.4.1 Setzung des Schnees:

Filzschnee ist das erste Abbauprodukt des Neuschnees (Colbeck 1990). In Stunden bis Tagen werden primäre Kristallstrukturen durch mechanisches Zerbrechen und Metamorphose über dampfförmige und flüssige Phasen allmählich zu kleinen Schneekörnern mit weniger als 0,5 mm Durchmesser verändert.

Bei fortschreitender Metamorphose entwickelt sich innerhalb von Wochen Altschnee, der eine grobkörnige Struktur mit Korndurchmessern von 1 – 3 mm aufweist. Nach Monaten werden durch Schneedeckensetzung Dichtewerte bis zu 600 kg/m^3 erzielt.

Wenn Altschnee eine jährliche Ablationsperiode überdauert hat, spricht man von Firn.

Firn wird nur noch durch die Regelations- und die Druckmetamorphose weiter verdichtet. Bei einer Dichte von rund 820 kg/m^3 (d.h. einer Porosität von rund 10 %) wurde in vielen Fällen beobachtet, dass Firn für Luft und Wasser impermeabel wird, weswegen ab dieser Dichte von Firneis oder schlechthin von Eis gesprochen wird (Kuhn u. Herrmann 1990).

Zwischen der Dichte des Schnees, der Dichte des Eises ($0,917 \text{ g/cm}^3$) und dem Porenanteil n besteht folgender Zusammenhang (Lackinger 1996):

$$\mathbf{r} = (1 - n) \mathbf{r}_E$$

$$n = 1 - \left(\frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}_E} \right)$$

Die Regelationsmetamorphose (Schmelz–Gefrier–Metamorphose) ist charakteristisch für temperierten Schnee. Bei Schmelztemperatur beschleunigt sich das Wachstum der Einzelkörner. Durch Schmelzung werden Kornformen vereinfacht und zerstört, durch Wiedergefrieren werden Porenräume verschlossen.

Die Druckmetamorphose ist im kalten Schnee dominant.

Die Schneedeckensetzung erfolgt umso rascher, je näher die Schneetemperaturen am Schmelzpunkt liegen bzw. je höher die Regelationsfrequenz ist.

Die Last s auf der Grundfläche wird bestimmt aus

$$s = \int_0^Z \mathbf{r} \cdot g dz = c \cdot g \quad (\text{N/m}^2)$$

wobei Z die Dicke der aufliegenden Schneedecke, g die Schwerkraftbeschleunigung und c die spezifische Nettoakkumulation ist.

Die Deformation $\dot{\epsilon}$ (s^{-1}) des Schnees unter dieser Last ist gleich der relativen Verdichtungsrate

$$\dot{\epsilon} = \frac{\partial \ln \mathbf{r}}{\partial t}$$

und kann analog zur Deformation viskoser Flüssigkeiten als

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{s}}{h} = \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial t}$$

formuliert werden. Dabei ist h ein Viskositätskoeffizient, der in grober Näherung folgende Werte für temperierten Schnee

$$\log_{10} \eta = 7 + 0,01 \rho$$

und für polaren Schnee

$$\log_{10} \eta = 9 + 0,013 \rho$$

annimmt. Schnee mit geringer Dichte komprimiert also schneller als Schnee mit großer Dichte (Mellor 1977).

6.4.2 Das Dichteprofil

Zur Erstellung des Dichteprofils auf dem Gletscher wird bis zur Schmutzschicht des vorigen Spätsommers gegraben. Leider ist dieser Horizont nicht immer leicht zu erkennen, oft findet man jedoch eine Schmutzschicht, die sich in einer spätsommerlichen Schönwetterperiode gebildet hat (Hoinkes 1957). Anschließend sticht man an der Wand des Schachtes mit einem Ausstechrohr ab, so wie im Kapitel Massenbilanz beschrieben. Die Dichte wird über die Schneehöhe und die Masse berechnet.

Schon früh ergaben Dichteuntersuchungen (Seligman 1941) auch auf den Alpengletschern eine Zunahme der Dichte mit der Tiefe, jedoch ist die Gesetzmäßigkeit hier nicht so gut erfüllt (Queck 1966).

Tollner (1951) fand eine Abhängigkeit der DichteVerteilung innerhalb einer Jahresschicht von der Seehöhe in dem Sinn, dass die mittlere Dichte mit zunehmender Seehöhe abnimmt. Innerhalb einer Jahresschicht fand Tollner nach anfänglicher Verdichtung eine Abnahme der Dichte zur Basis hin. Dies kann als Folge der Temperaturverteilung erklärt werden (Hoinkes 1957). Durch das Schmelzwasser vergrößern sich die Zwischenräume zwischen den einzelnen Kristallen, und die Korngröße nimmt zu. Dabei entsteht Schwimmschnee, eine Kristallneubildung in der Schneedecke, die im Zuge der aufbauenden Metamorphose entlang eines Temperatur- und Dampfdruckgradienten erfolgt.

Queck (1966) hat bei Untersuchungen am Kesselwandferner herausgefunden, dass die Dichte, sofern nicht orographische oder exponentielle Bedingungen eine Störung verursachen, mit der Seehöhe zunimmt. Seine Ergebnisse beziehen sich auf Schächte, die im Juli und August der Jahre 1964 und 1965 gegraben wurden.

Die Dichteprofile der verschiedenen Jahreszeiten unterscheiden sich voneinander und man kann beim Betrachten eines gezeichneten Profils meist feststellen, ob es sich um ein Frühjahrs- oder Herbstprofil handelt.

7. Profilzeichnungen

Ich habe die Dichteprofile in gleiche Diagramme gezeichnet, damit sie untereinander vergleichbar sind. Im Folgenden wird auf die in den verschiedenen Jahreszeiten gegrabenen Dichteprofile einzeln eingegangen.

7.1 Frühjahrsprofile

Die ersten Profile im Jahr werden Ende März oder Anfang April gemacht.

Am Hintereisferner wurden in den ersten Jahren zwischen 5 und 10 Schächte in dieser Zeit gegraben. Von 1982 bis 1989 gibt es keine Aufzeichnungen von Frühjahrsschächten. Anschließend wurde bis 1994 jedes Jahr ein Schacht gegraben. Ab dem Jahr 1996 wurden keine Schächte Ende März und Anfang April gegraben.

Im Frühjahr kann auch in besonders tiefen Lagen ein Schacht gegraben werden, wo im Sommer und Herbst kein Schnee mehr liegt, deshalb ist die durchschnittliche Höhe der gegrabenen Schächte im Frühjahr niedriger als im Herbst. Sie liegt meistens bei ungefähr 2860 m.

Trägt man die durchschnittliche Dichte und die Höhe der Schächte in einem Diagramm ein, so kann man von 1964 bis 1970 eindeutig erkennen, dass die Dichte im Frühjahr mit der Höhe zunimmt. In den darauf folgenden Jahren ist dieser Zusammenhang nicht mehr eindeutig gegeben. Dies kann jedoch auch daran liegen, dass es immer weniger Messwerte gibt. Dieses Ergebnis passt gut mit den schon von Queck (1966) für den Kesselwandferner gefundenen Ergebnissen zusammen. Es ist außerdem auch mit der Zunahme des Niederschlags mit der Höhe und der deshalb größeren Schneemasse in größeren Höhen erklärbar. Um dies auch im Diagramm anschaulich zu machen, habe ich auch den Wasserwert eingetragen. In beiden Beispielen steigt er mit der Höhe an. Die Zunahme der Dichte mit der Höhe scheint also ihre Ursache in der Zunahme des Wasserwerts mit der Höhe und der damit zunehmenden Kompression des Schnees zu haben.

Abb. 7.1: Anstieg der Dichte und des Wasserwertes mit der Höhe / Frühjahr 1967

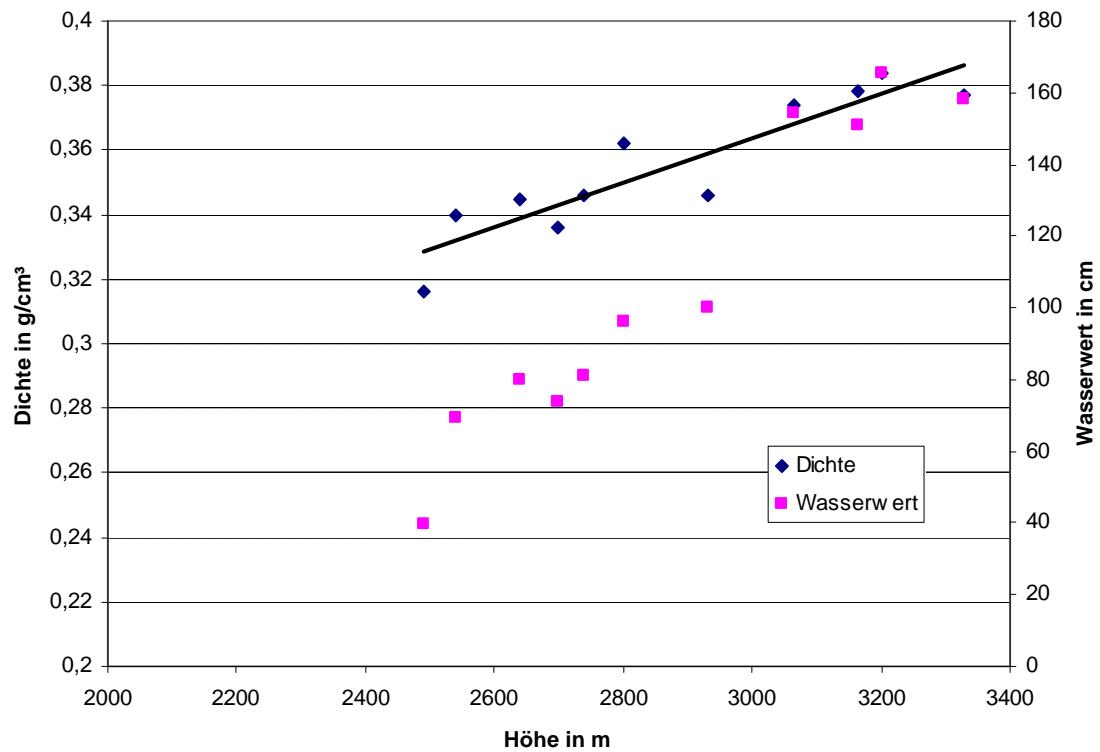
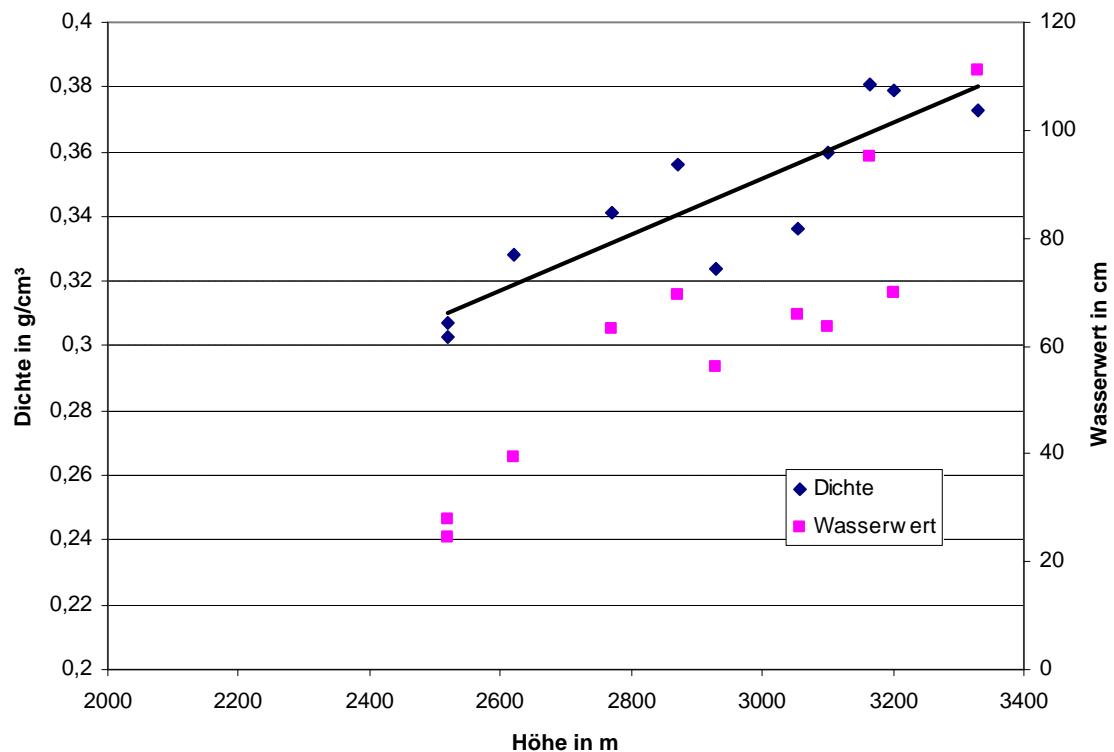


Abb. 7.2: Anstieg der Dichte und des Wasserwertes mit der Höhe / Frühjahr 1969



Die Dichteprofile der Frühjahrsschächte sind sehr regelmäßig. Die Dichte nimmt kontinuierlich mit der Tiefe zu, es gibt noch keine Eisschichten und Eislamellen, da noch kein Schmelzwasser in die Schneedecke eingedrungen ist. In der obersten Schicht ist die Dichte oft sehr gering, da meistens noch frischer Neuschnee vorhanden ist.

Die mittlere Dichte der Frühjahrsschächte liegt zwischen 0,33 und 0,38 g/cm³.

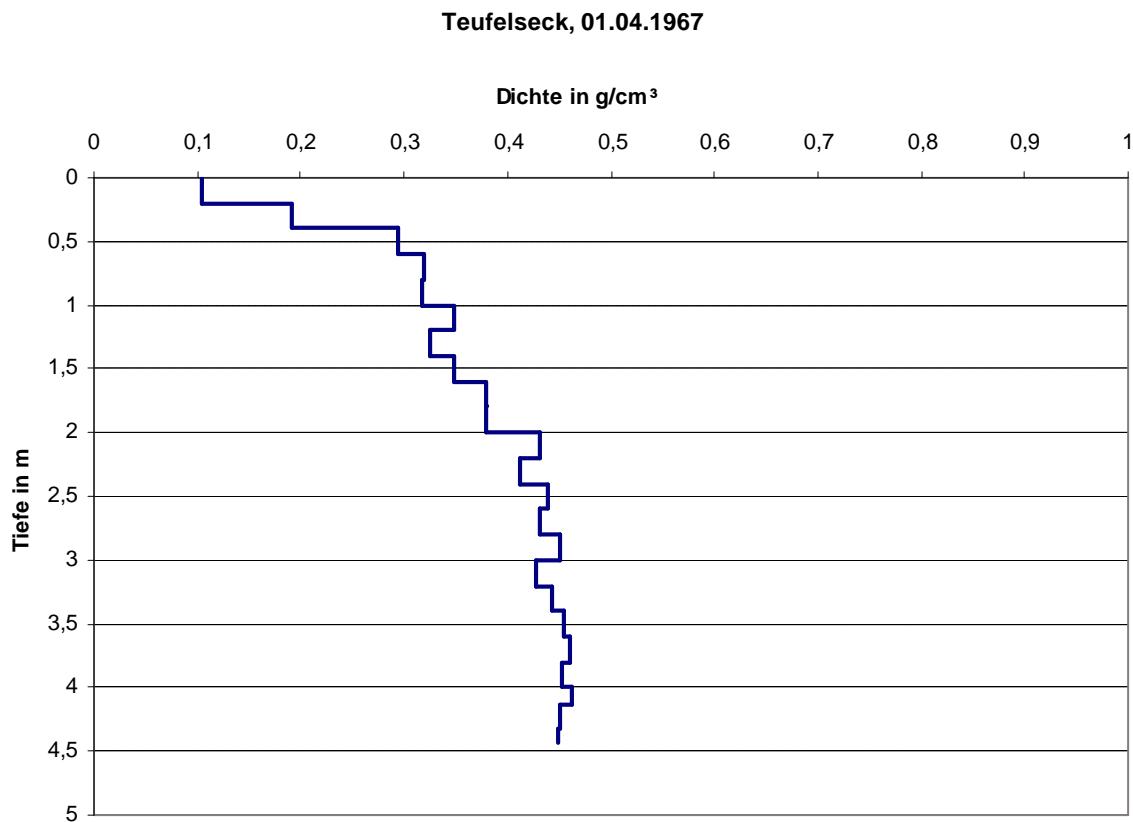


Abb. 7.3: Beispiel für ein Dichteprofil im Frühjahr, Teufelseck, 3065 m

7.2 Pfingstprofile

Die so genannten Pfingstprofile werden Ende Mai und Anfang Juni gegraben. Zu diesem Zeitpunkt hat die Akkumulation im oberen Teil des Gletschers meist ihr Maximum erreicht. Der im Winter gefallene Schnee hat sich inzwischen schon gesetzt und die Dichte erreicht höhere Werte.

Am Hintereisferner wurden zwischen 1966 und 1979 jährlich zwischen 5 und 11 Pfingstschanzen gegraben, in den darauf folgenden Jahren wurden nur mehr einzelne, ab 1997 schließlich keine Pfingstschanzen mehr gegraben.

Das Dichteprofil sieht inzwischen etwas anders aus als das Profil im Frühjahr. Am Gletscher gibt es schon Schmelzwasser, das bis in eine bestimmte Tiefe eingedrungen ist. Dort trifft es auf kältere Schichten und gefriert wieder. Deshalb kommen um diese Jahreszeit Eisschichten und Eislamellen im Profil vor.

Die mittlere Dichte der Pfingstschanzen liegt zwischen 0,42 und 0,54 g/cm³, der häufigste Wert ist 0,46 g/cm³.

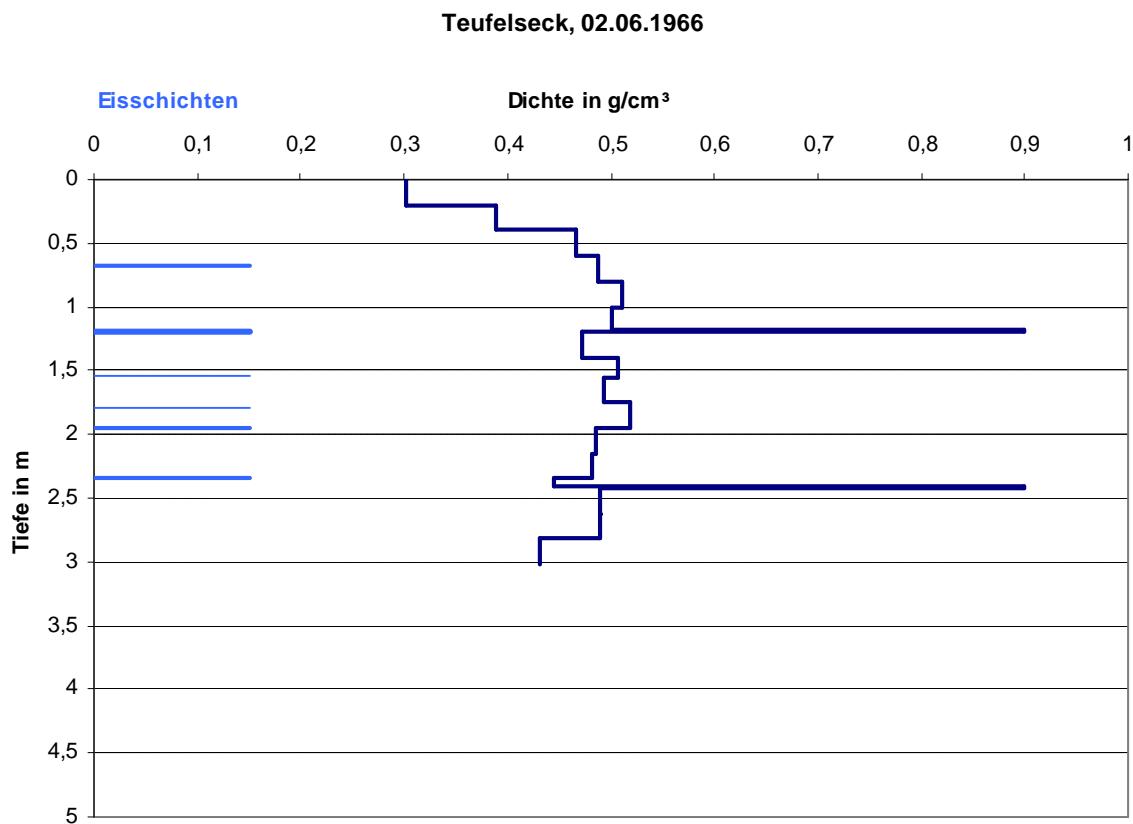


Abb. 7.4: Beispiel für ein Dichteprofil zu Pfingsten, Teufelseck, 3065 m

7.3 Herbstprofile

Am Ende des Haushaltsjahres, Ende September und Anfang Oktober werden die Herbstschanzen gegraben.

Von 1965 bis 1980 wurden am Hintereisferner jährlich zwischen 15 und 28 Herbstschächte gegraben. Ab 1980 wurden nur mehr 6 bis 13 Schächte jährlich gegraben.

Die Schächte wurden auf einer mittleren Höhe von 2990 bis 3250 m gegraben, wobei ab dem Jahr 1990 die mittlere Höhe immer bei ungefähr 3200 m liegt.

Wie bei den Frühjahrsschächten versuchte ich auch bei den Herbstschächten, Dichte und Höhe in ein Diagramm einzutragen und einen Zusammenhang zu finden. Dabei konnte ich keinen deutlichen Anstieg der Dichte mit der Höhe finden. Meist ändert sich die Dichte nicht mit der Höhe, sondern bleibt konstant bei ungefähr $0,5 \text{ g/cm}^3$. Beim genauen Vergleich der Diagramme vom Frühjahr und vom Herbst fällt jedoch auf, dass die Diagramme im Frühjahr schon bei einer viel niedrigeren Seehöhe, bei ca. 2600 m, beginnen. Aus dieser Höhe gibt es im Herbst natürlich keine Messungen mehr, da hier kein Schnee mehr liegt. Somit sind die Diagramme schwer vergleichbar und man kann erkennen, dass die Dichte in einer Höhe zwischen 3000 und 3400 m in etwa gleich bleibt.

Beim Wasserwert ist auch im Herbst ein Anstieg mit der Höhe erkennbar.

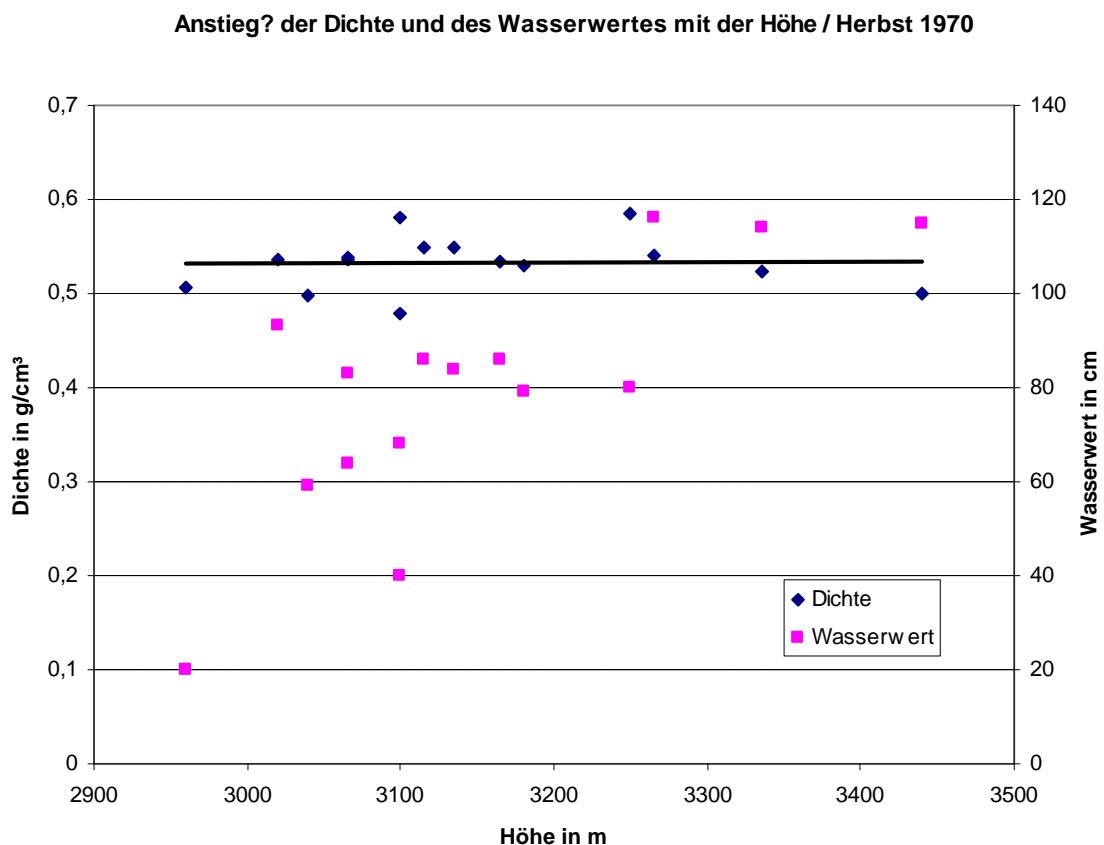


Abb. 7.5: Änderung der Dichte und des Wasserwertes mit der Höhe, Herbst 1970

Anstieg der Dichte und des Wasserwertes mit der Höhe / Herbst 1972

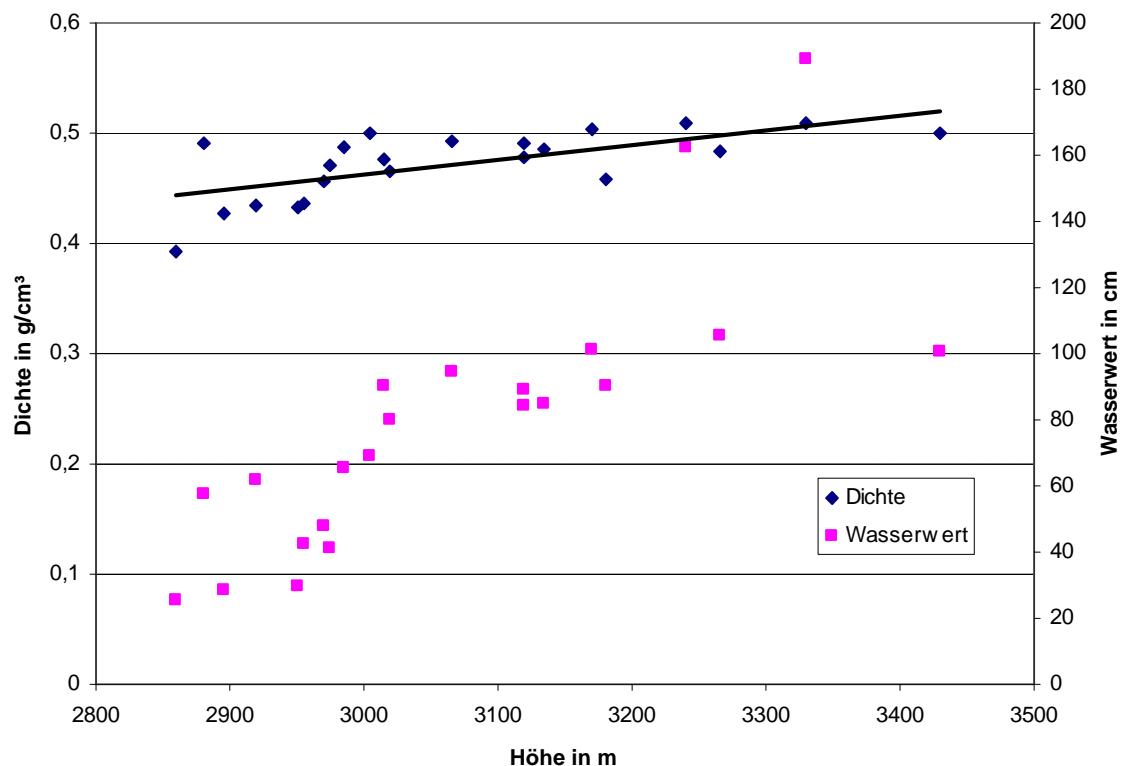


Abb. 7.6: Änderung der Dichte und des Wasserwertes mit der Höhe, Herbst 1972

Die Profile unterscheiden sich von Jahr zu Jahr und von Standort zu Standort. Manche Profile weisen viele Eislamellen und Eisschichten auf, bei manchen nimmt die Dichte sehr regelmäßig mit der Tiefe zu. Oft findet man an der Oberfläche eine Schicht mit geringer Dichte, dann hat es schon Neuschnee gegeben. Schmelzwasser ist in unterschiedliche Tiefen eingedrungen und wieder gefroren.

Die mittlere Dichte liegt im Herbst zwischen $0,36$ und $0,57$ g/cm^3 , wobei die meisten Werte bei $0,5$ g/cm^3 liegen.

Teufelseck, 26.09.1968

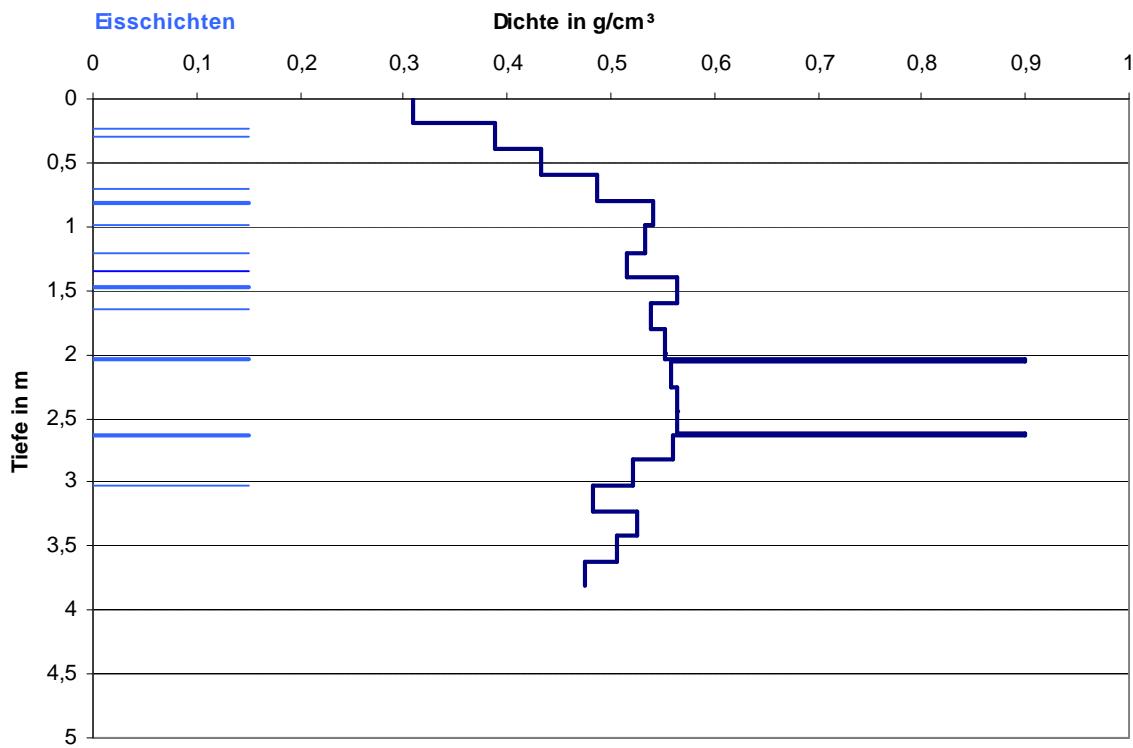


Abb. 7.7: Beispiel für ein Dichteprofil im Herbst, Teufelseck, 3065 m

7.4 Profilzeichnungen mit normierter Tiefe

Da alle Schächte unterschiedliche Tiefe haben, musste ein Modus gefunden werden, um alle Profile besser miteinander vergleichen zu können. Dazu wurden die Profile alle mit normierter Tiefe gezeichnet. Dazu nahm ich die jeweilige Tiefe des Schachtes als 100 Prozent an, sodass jedes Profil das Diagramm ausfüllt.

8. Gemittelte Dichteprofile

8.1 Typische Dichteprofile von 1964 bis 2002

In weiterer Folge wurden die Profilzeichnungen mit normierter Tiefe gemittelt. Die verschiedenen Profile der einzelnen Standpunkte wurden in 10 Prozent Schichten gemittelt und in einem neuen Diagramm aufgetragen. Mit in das Diagramm wurde auch die Standardabweichung eingetragen.

Die Dichte nimmt in diesen Diagrammen regelmäßig mit der Tiefe zu und in den untersten ein bis zwei Schichten meist leicht ab.

Die Standardabweichung ist in den obersten Schichten am größten, erreicht zwischen 50 und 80 Prozent ein Minimum und nimmt in der untersten Schicht wieder etwas zu.

So entstanden die typischen Dichteprofile der einzelnen Standpunkte gemittelt über 38 Jahre. Diese typischen Dichteprofile wurden alle zusammen in ein Diagramm gezeichnet, um zu sehen, wie sie sich voneinander unterscheiden. Ich erwartete mir, dass jeder Standpunkt sein eigenes typisches Profil besitzt, welches sich von den anderen deutlich unterscheidet, z. B. glaubte ich, das Profil Badeeis würde die größte Dichte besitzen.

Die so entstandene Abb. 8.10 überraschte mich. Die typischen Profile unterscheiden sich kaum voneinander, einzig und allein das Profil IA hat eine etwas geringere Dichte als alle anderen. Der Schacht IA ist der am höchsten gelegene Schacht, dies dürfte bei der Setzung des Schnees, der Verfrachtung durch den Wind und der Schneefallgrenze eine Rolle spielen. Außerdem ist er in seiner Lage der Sonneneinstrahlung und dem Wind besonders ausgesetzt. Die anderen Standorte hingegen befinden sich fast ausschließlich in Mulden.

Stichproben, die ich für einige einzelne Jahre gezeichnet habe, ergeben das gleiche Muster. Immer ist der Schacht IA deutlich weniger dicht als alle anderen.

Überraschend war auch das Ergebnis des Schachtes am Langtaufererjoch. Dieser Schacht liegt etwas entfernt von den anderen Schächten auf einem eigenen Gletscher. Trotzdem fügen sich seine Profile genau in das Muster der anderen Schächte ein, unterscheiden sich also praktisch gar nicht.

Abb. 8.1: Typisches Herbstprofil und Standardabweichung, Badeeis

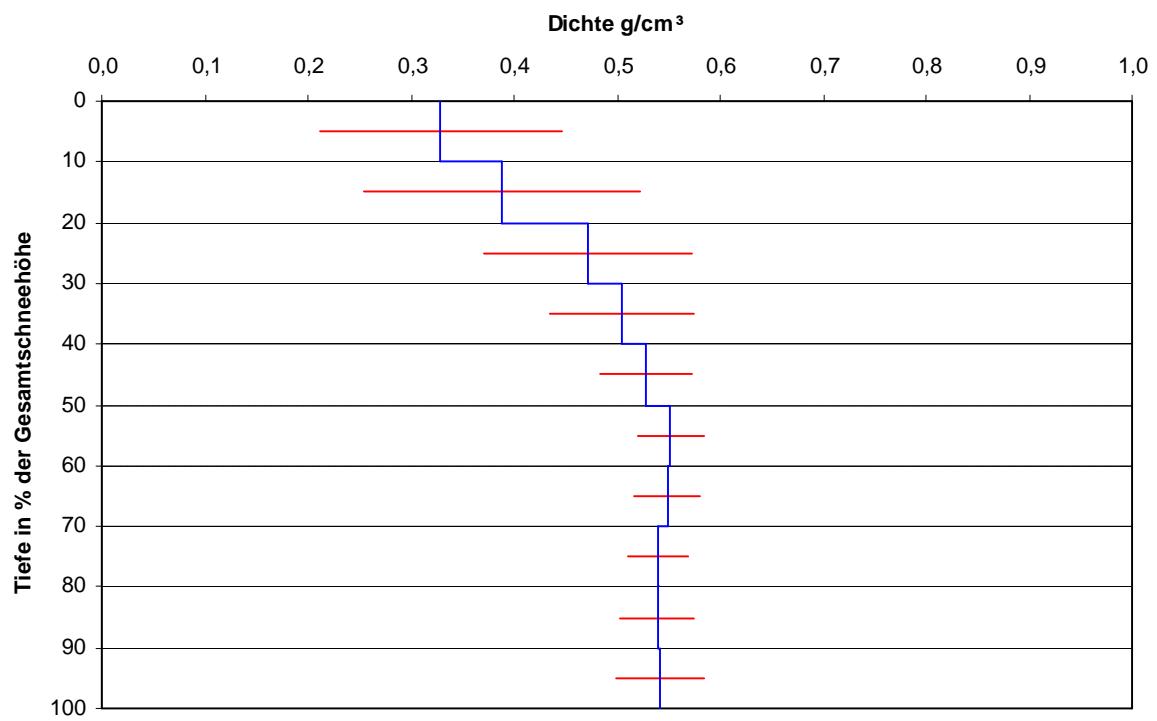


Abb. 8.2: Typisches Herbstprofil und Standardabweichung, Hintereisjoch

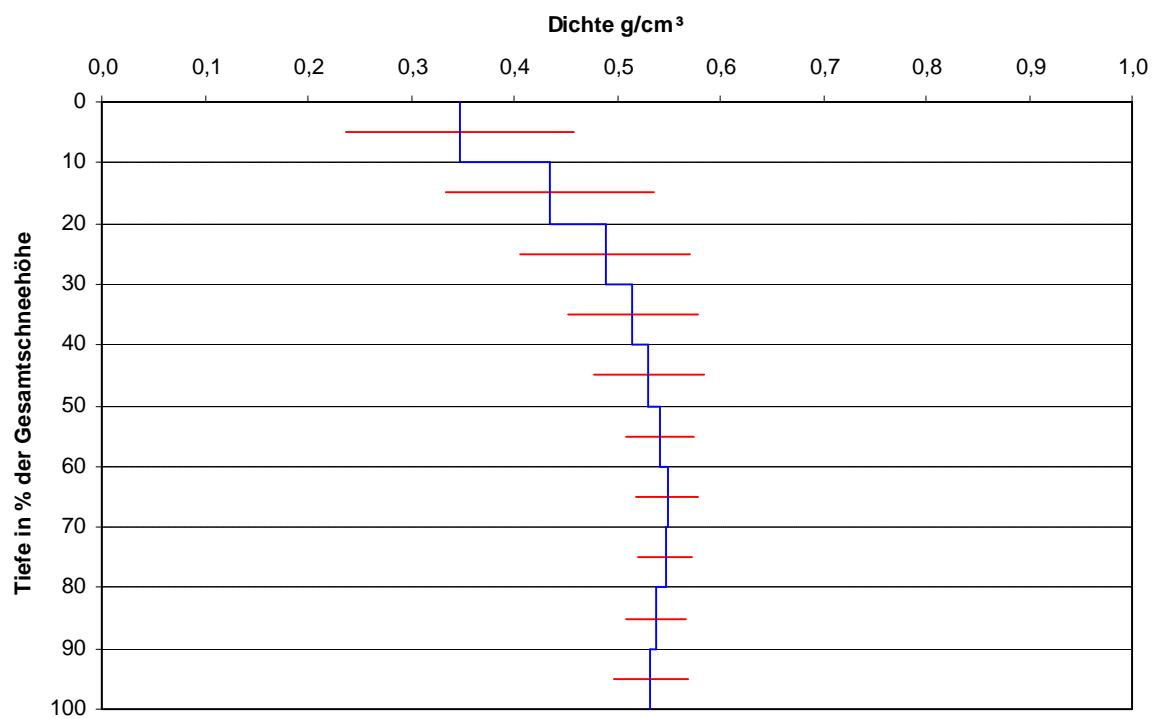


Abb. 8.3: Typisches Herbstprofil und Standardabweichung, IA

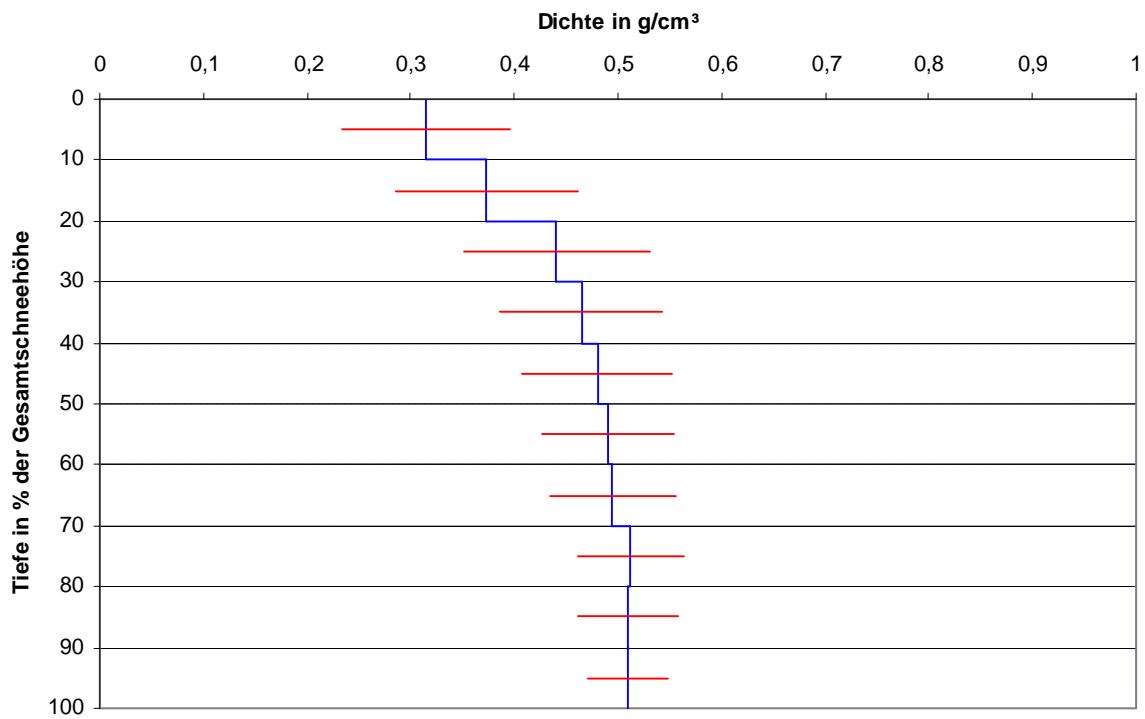


Abb. 8.4: Typisches Herbstprofil und Standardabweichung, Langtaufererjoch

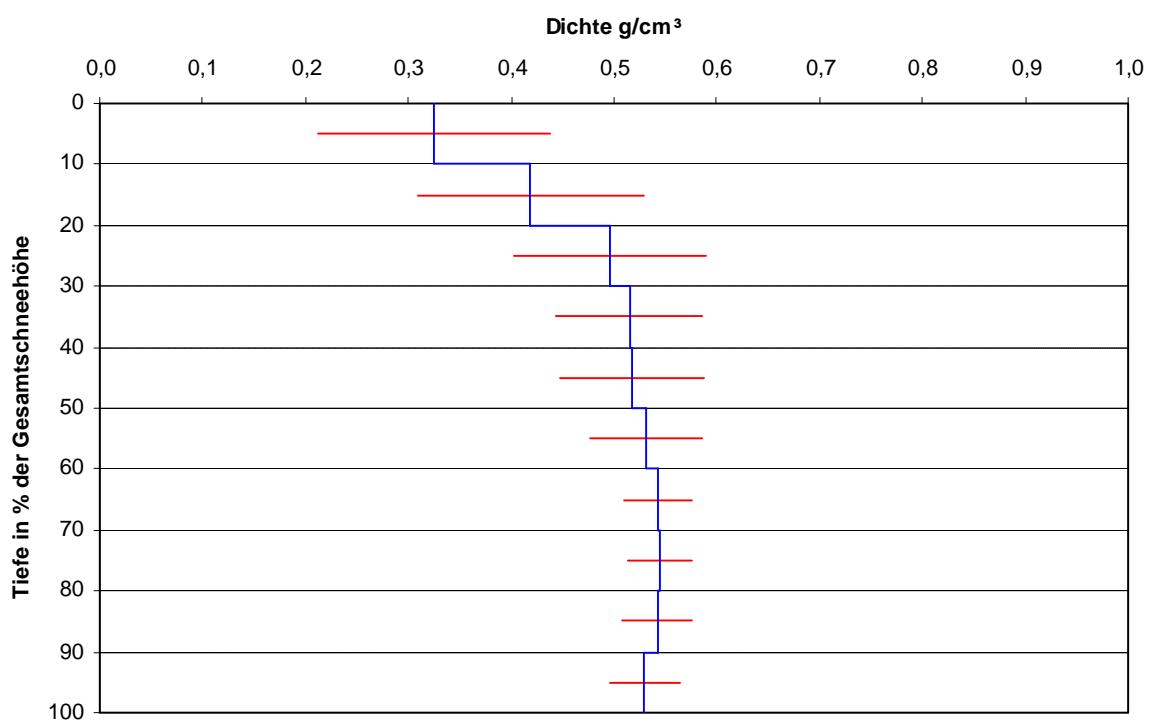


Abb. 8.5: Typisches Herbstprofil und Standardabweichung, LS

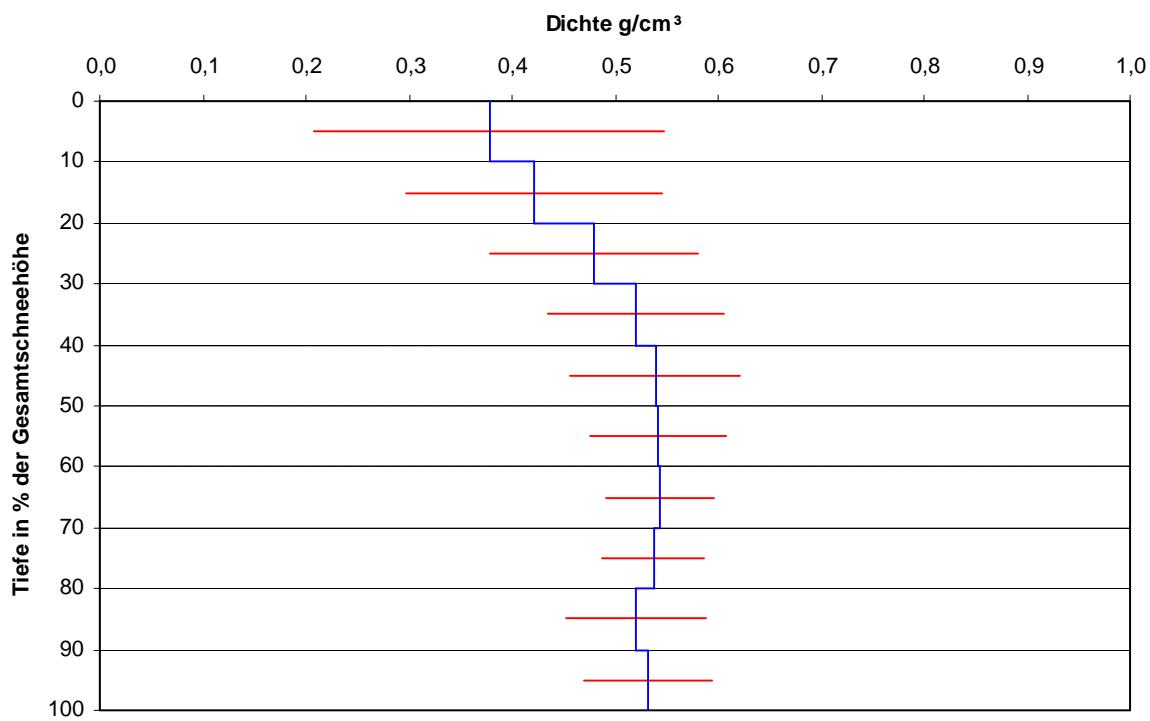


Abb. 8.6: Typisches Herbstprofil und Standardabweichung, Schimppstollen

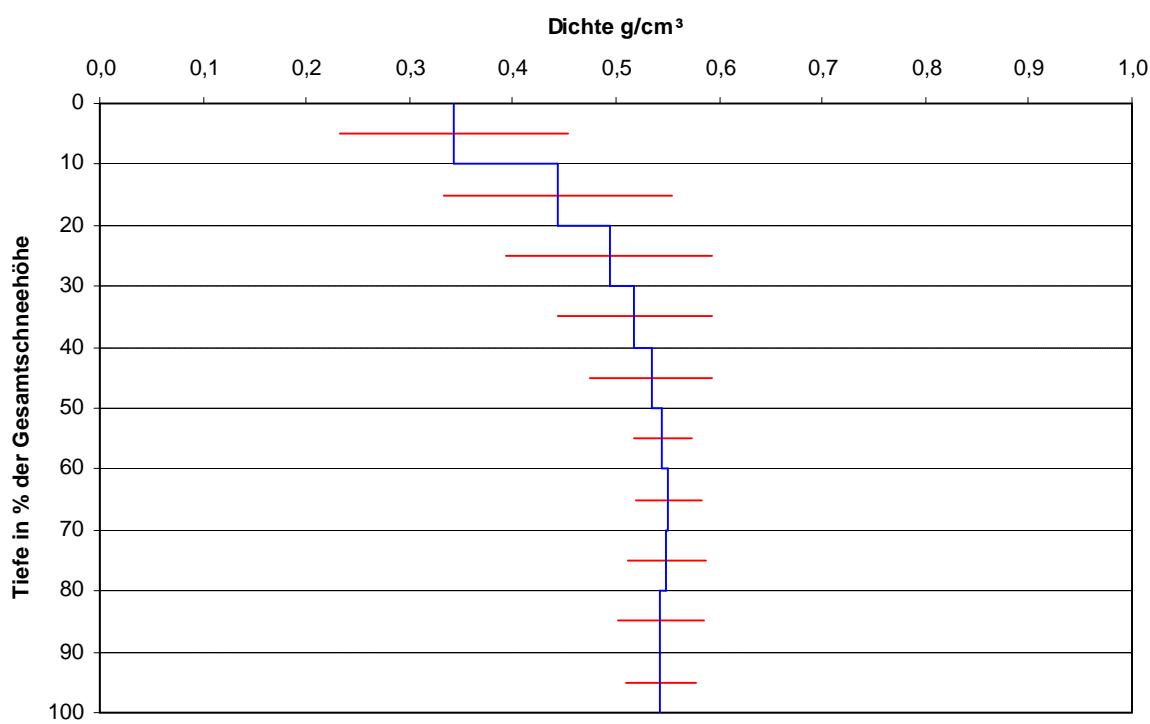


Abb. 8.7: Typisches Herbstprofil und Standardabweichung, Steinschlagjoch

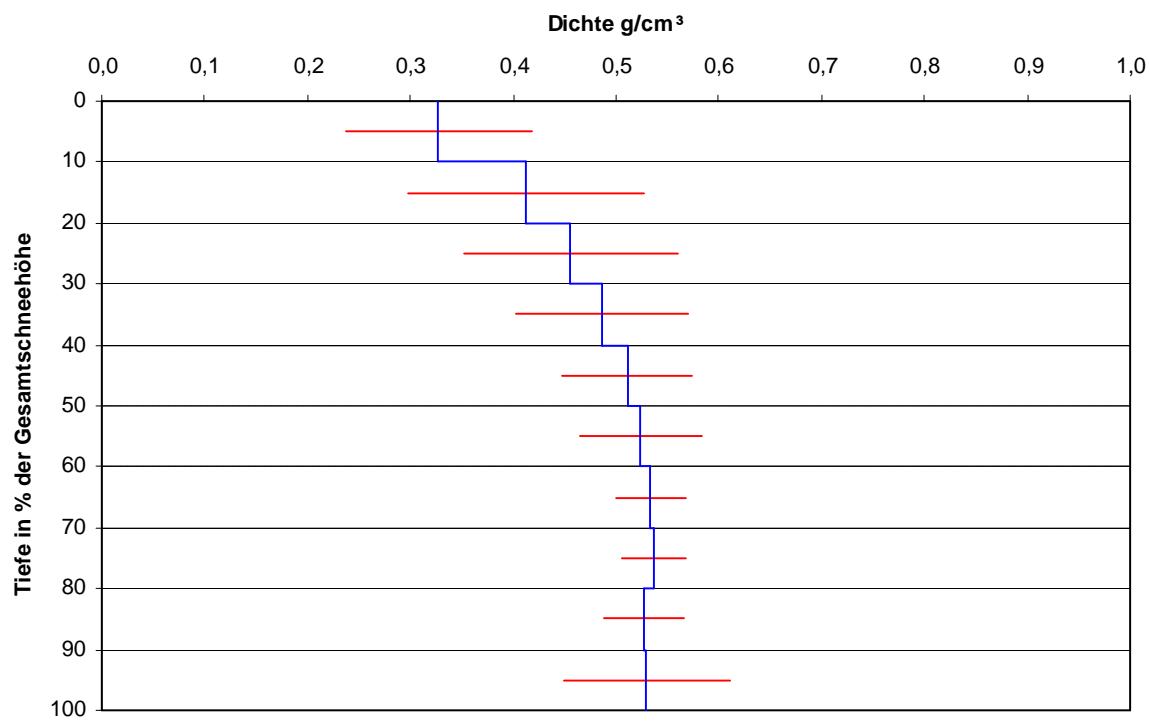


Abb. 8.8: Typisches Herbstprofil und Standardabweichung, Teufelseck

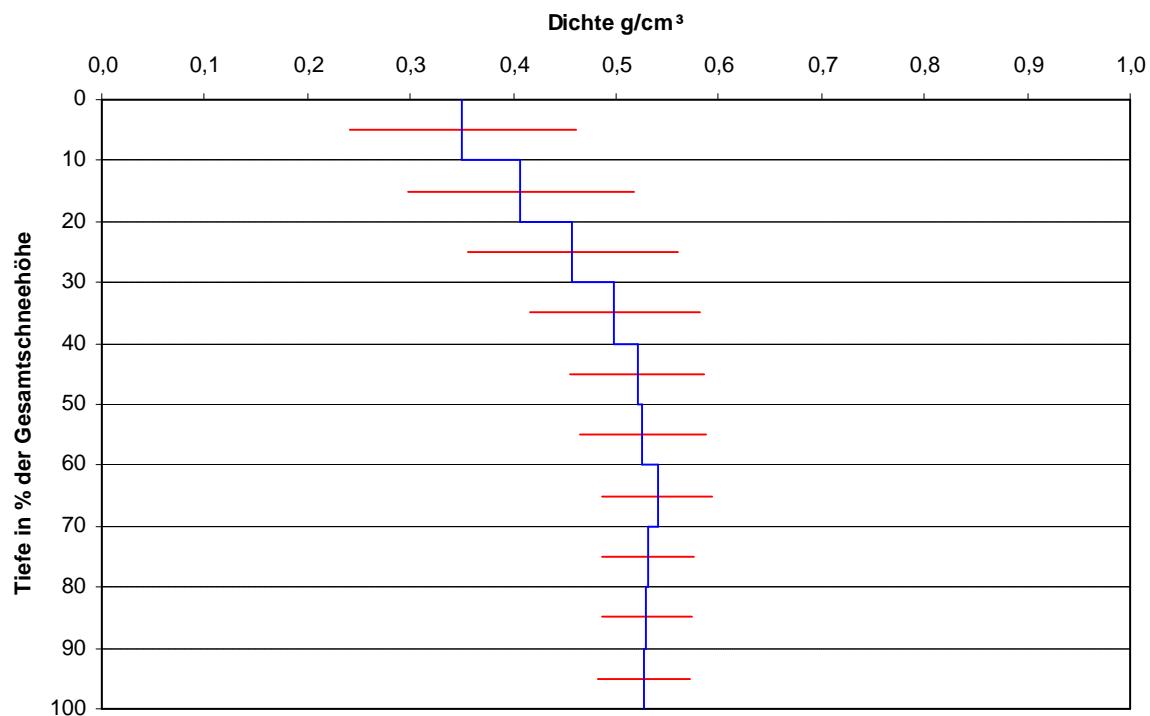


Abb. 8.9: Typisches Herbstprofil und Standardabweichung, Weißkugeljoch

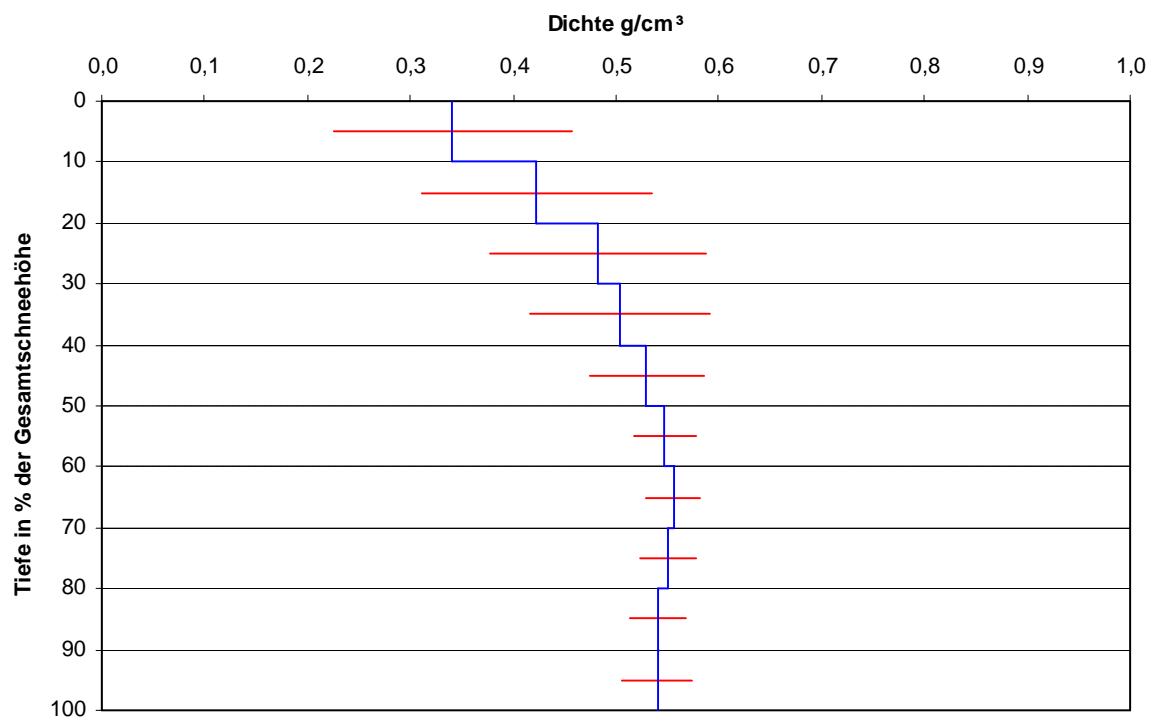


Abb. 8.10: Typische Profile, Herbst, gemittelt von 1964-2002

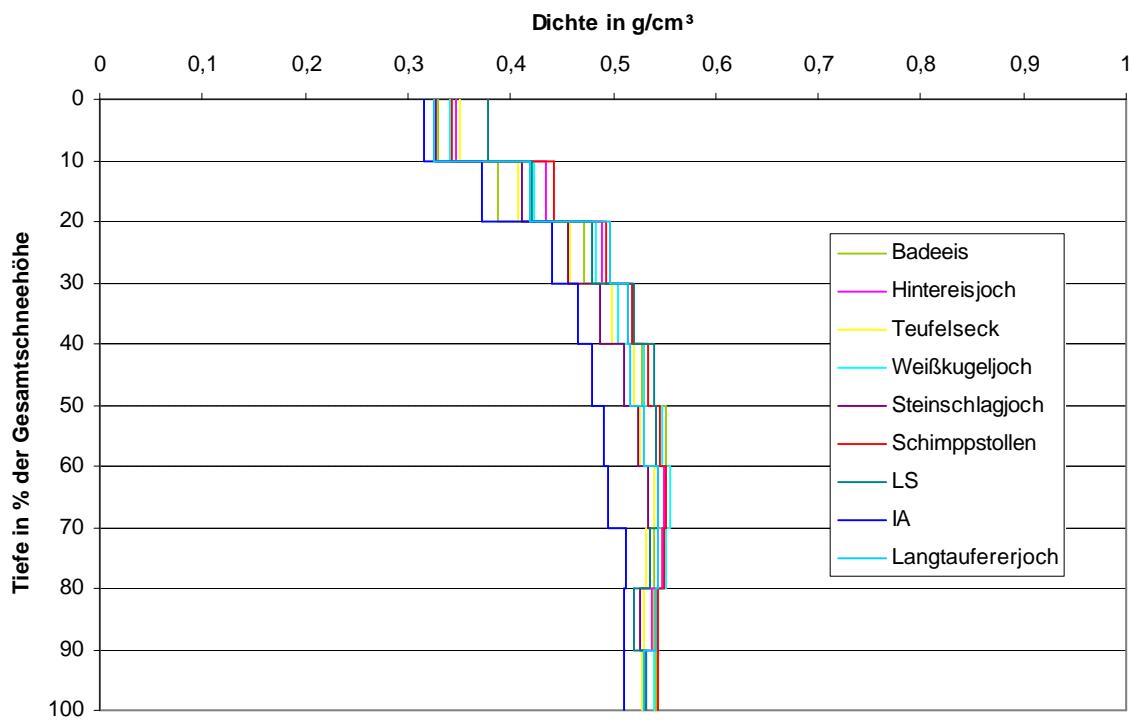
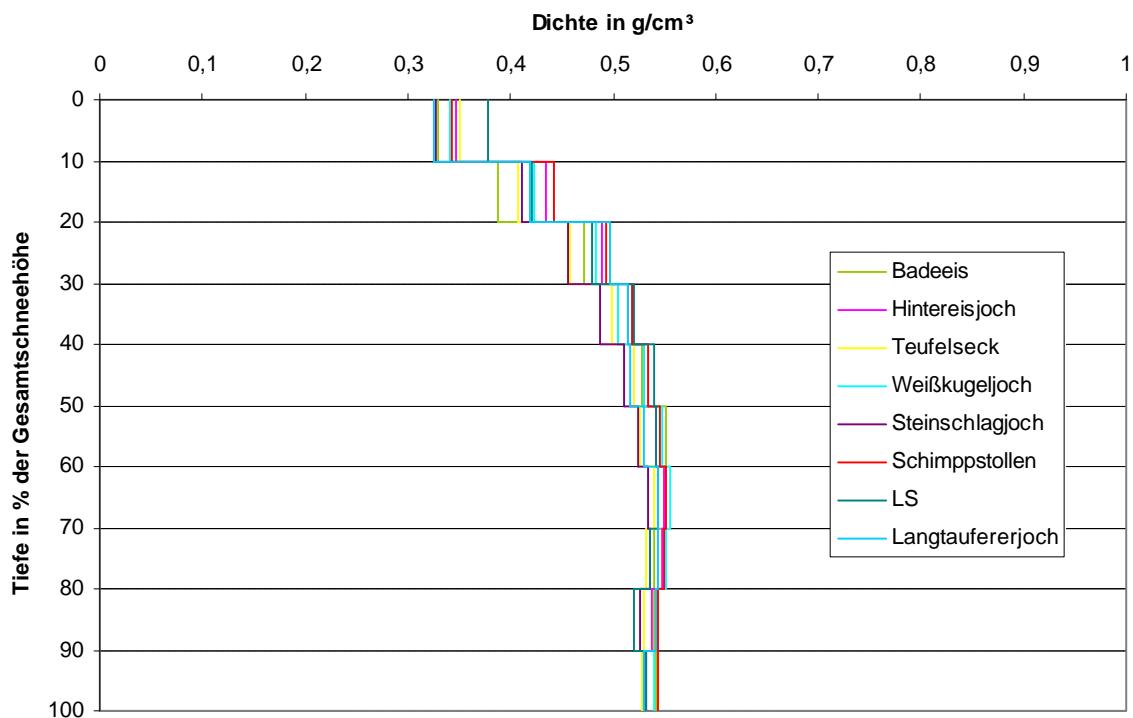


Abb. 8.11: Typische Profile ohne IA, Herbst, gemittelt von 1964-2002



8.2 Gemittelte Dichteprofile seit 1990

Da das Ergebnis der typischen Profile, die aus der Mittelung über alle Jahre von 1964 bis 2002 entstanden sind so überraschend war, entschied ich mich dafür, eine Mittelung über die letzten 12 Jahre zu machen (Abb. 8.12 – 8.21). Vielleicht hat sich ja die Dichte in den letzten Jahren anders verhalten als zuvor. So wurden die gemittelten Profile zwischen 1990 und 2002 für die einzelnen Schächte gezeichnet. Gleich wie bei den Profilen, die die gesamte Zeitspanne betrachten, wurde auch hier die Standardabweichung zusätzlich eingetragen.

Im Allgemeinen sieht man sofort, dass das über die letzten Jahre gemittelte Profil eine geringere Dichte hat, als das über die gesamte Zeit gemittelte Profil.

Bei den Profilen Badeeis, Hintereisjoch, LS, Steinschlagjoch und Weißkugeljoch weichen die Profile im oberen Bereich stark voneinander ab, sobald ca. 50 % der Tiefe erreicht sind, haben die Profile eine ähnliche Dichte.

Die Profile IA und Teufelseck sind in der gesamten Höhe viel weniger dicht als das langjährige Mittel. Auch in den unteren Schichten bleiben die Abweichungen groß.

Auch bei den Profilen Langtaufererjoch und Steinschlagjoch sind die größten Abweichungen im oberen Bereich, die Profile nähern sich zwar im unteren Bereich etwas, das langjährige Mittel besitzt aber weiterhin deutlich die höhere Dichte.

Die Standardabweichung verhält sich bei beiden Profilen in etwa gleich. Sie ist am höchsten in den obersten Schichten, erreicht ihr Minimum zwischen 50 und 70 % der Gesamttiefe und nimmt in den untersten Schichten oft wieder leicht zu.

Trägt man alle Profile in ein Diagramm (Abb. 8.21) ein, kann man feststellen, dass die Profile wiederum alle sehr nahe beieinander liegen, wenn auch nicht ganz so nahe wie die von 1964 bis 2002 gemittelten Profile. Gleich verhält sich das Profil IA gegenüber den anderen Profilen, es ist auch hier wesentlich weniger dicht als der Rest.

Außerdem ist auch das Profil Teufelseck im unteren Teil weniger dicht als die anderen Profile (Abb. 8.19 und 8.21). Dieses Profil ist in den letzten Jahren ins Ablationsgebiet gerutscht, wo starkes Abschmelzen herrscht. So ist die geringere Dichte im gesamten Verlauf des Profils erklärbar.

Abb. 8.12: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1990-2002, Badeeis 1990-2002 (strichliert 64-02)

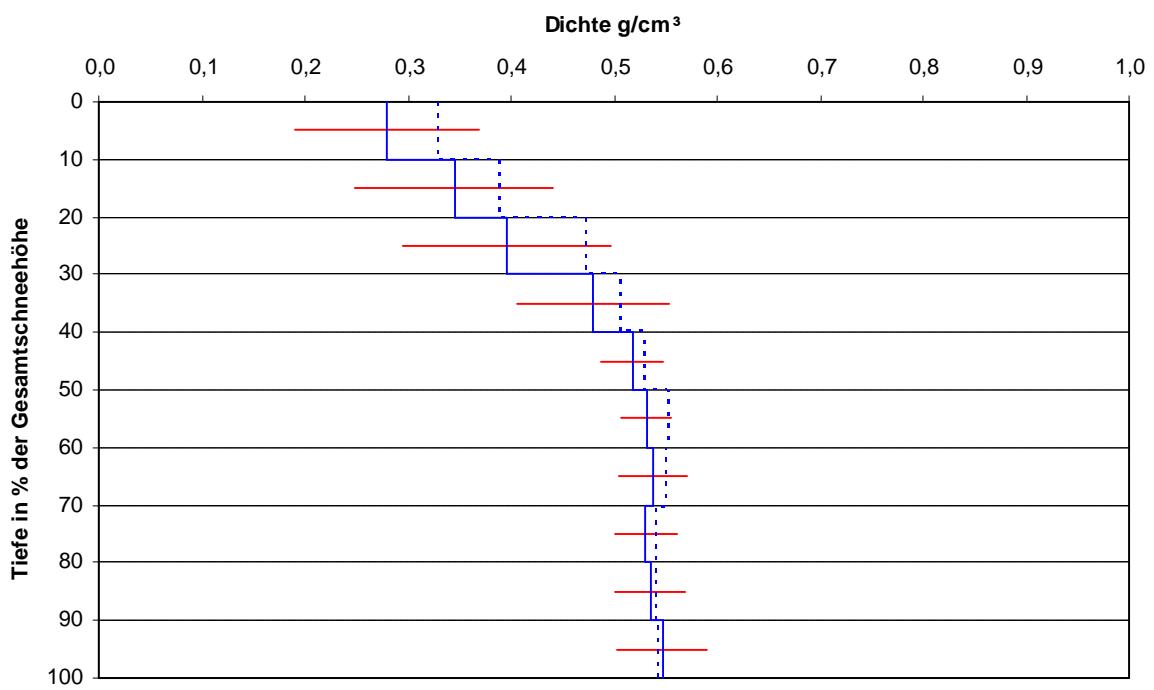


Abb. 8.13: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1990-2002, Hintereisjoch, (strichliert: 64-02)

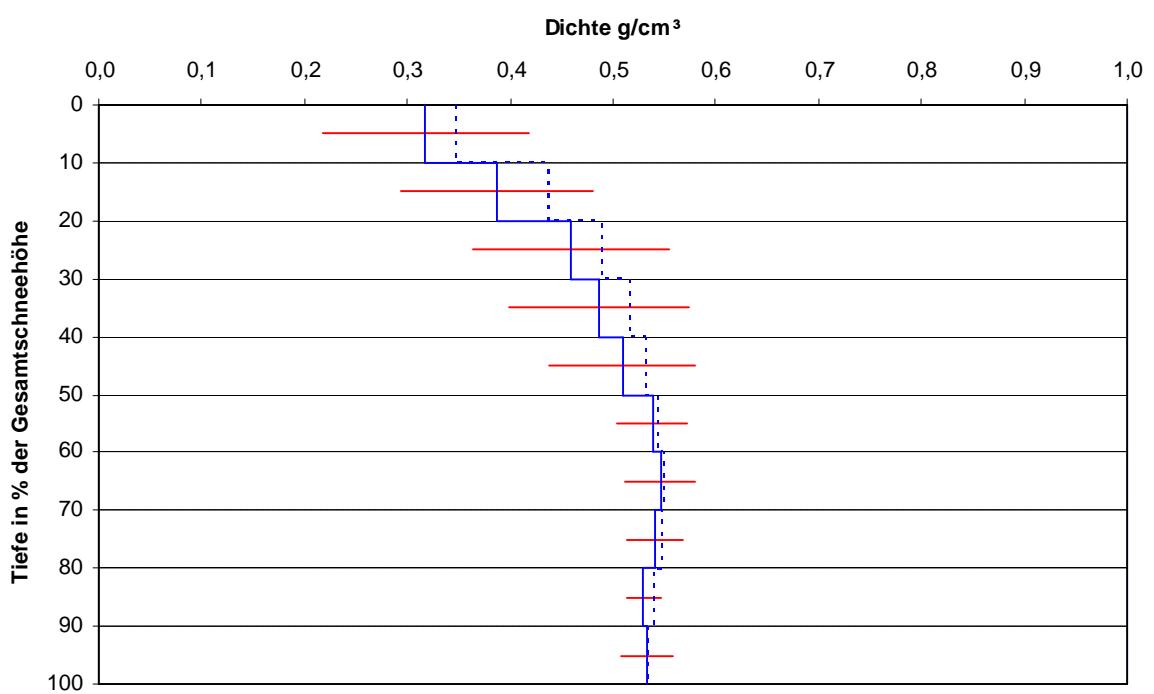


Abb. 8.14: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1990-2002, IA (strichliert: 64-02)

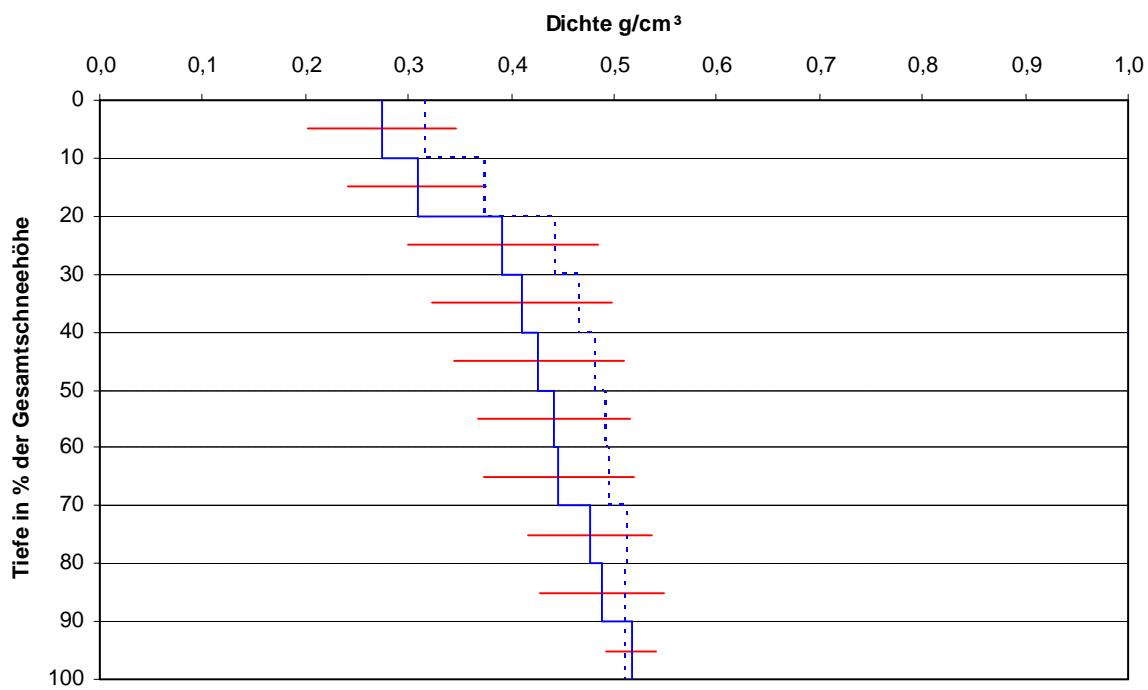


Abb. 8.15: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1990-2002, Langtaufererjoch (strichliert: 64-02)

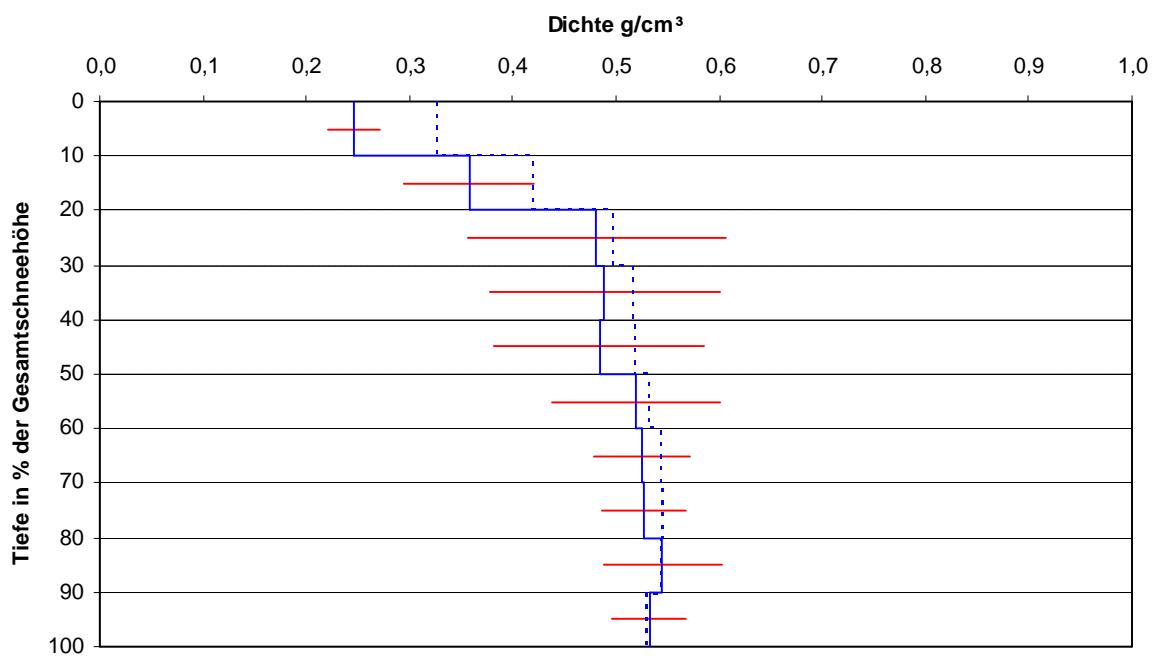


Abb. 8.16: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1990-2002, LS (strichliert: 64-02)

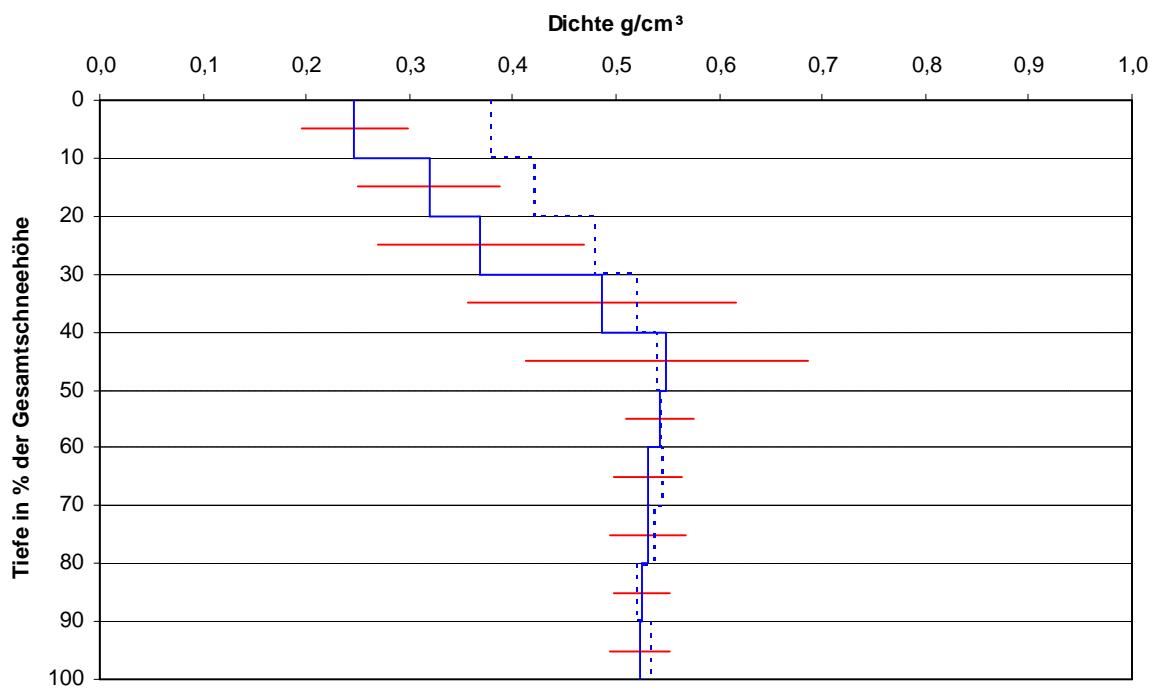
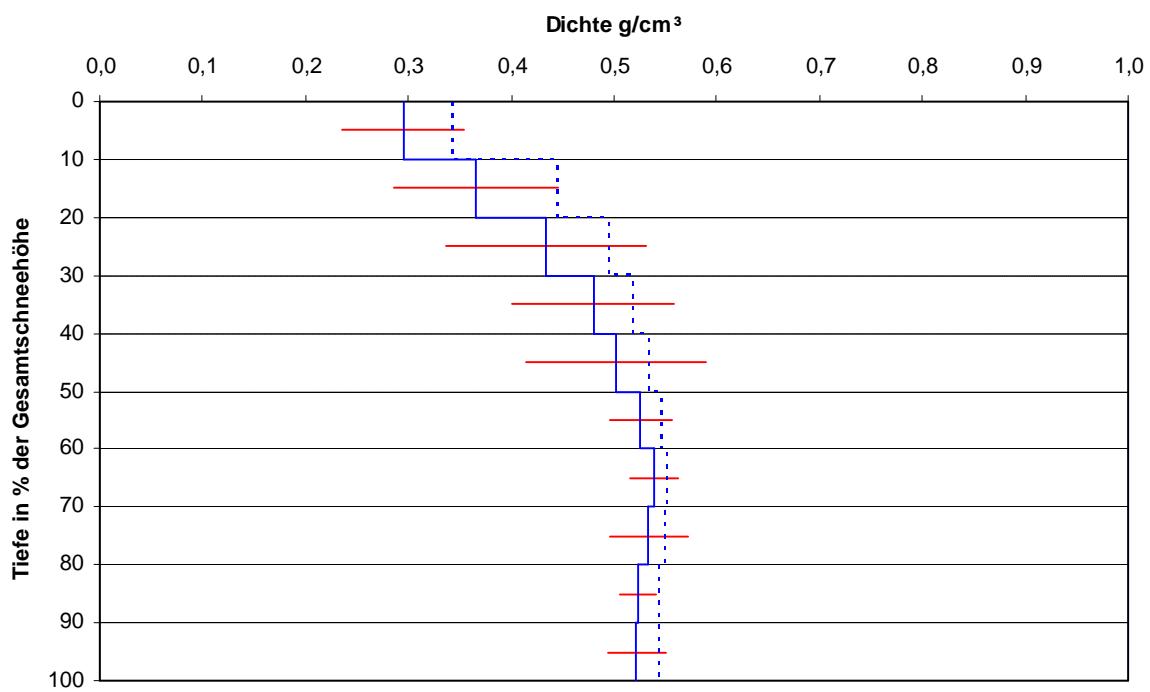
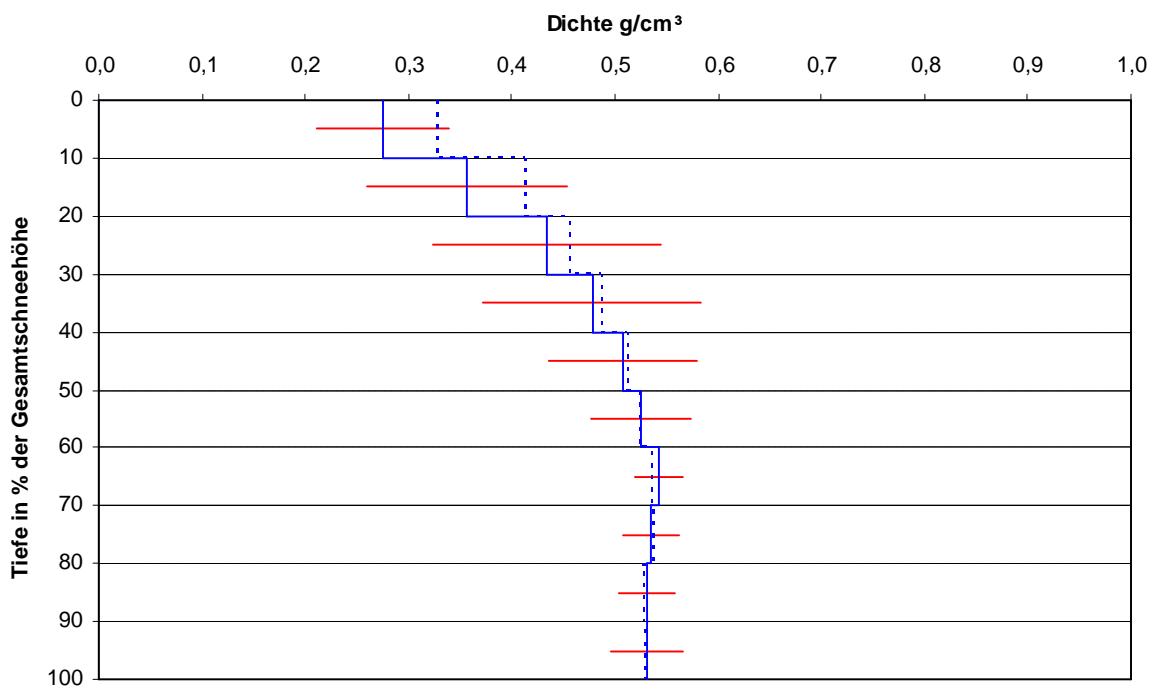


Abb. 8.17: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1990-2002, Schimppstollen (strichliert:64-02)



**Abb. 8.18: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1990-2002, Steinschlagjoch
(strichliert: 64-02)**



**Abb. 8.19: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1990-2002, Teufelseck
(strichliert: 64-02)**

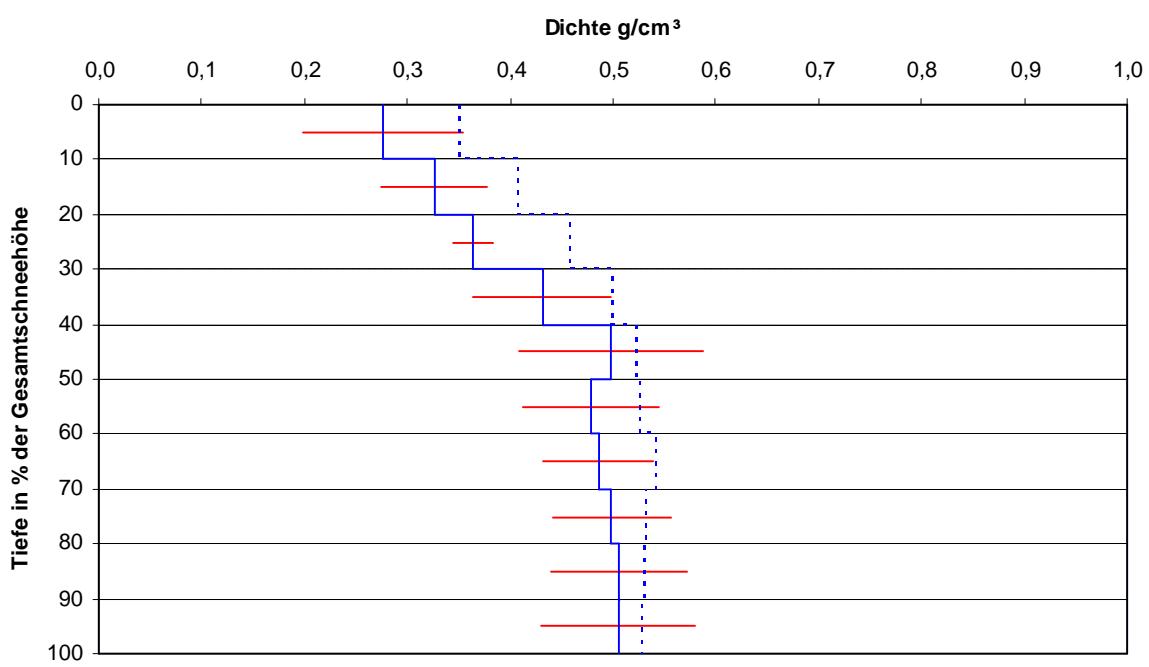


Abb. 8.20: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1990-2002, Weißkugeljoch
(strichliert: 64-02)

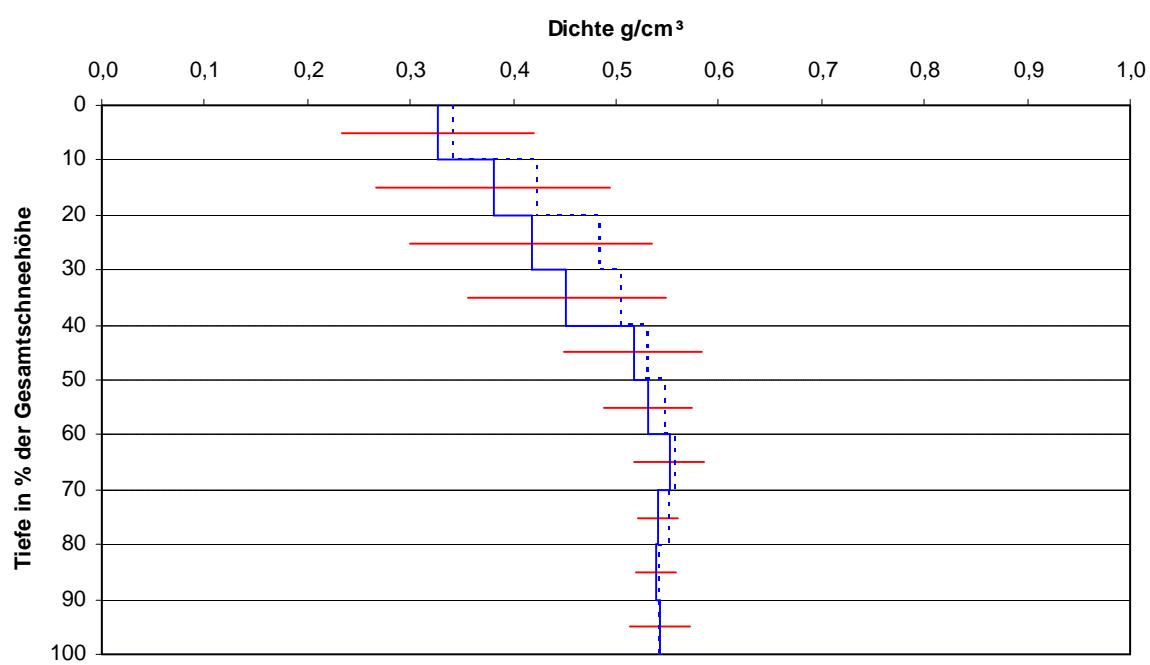


Abb. 8.21: Alle Profile, Herbst 1990-2002

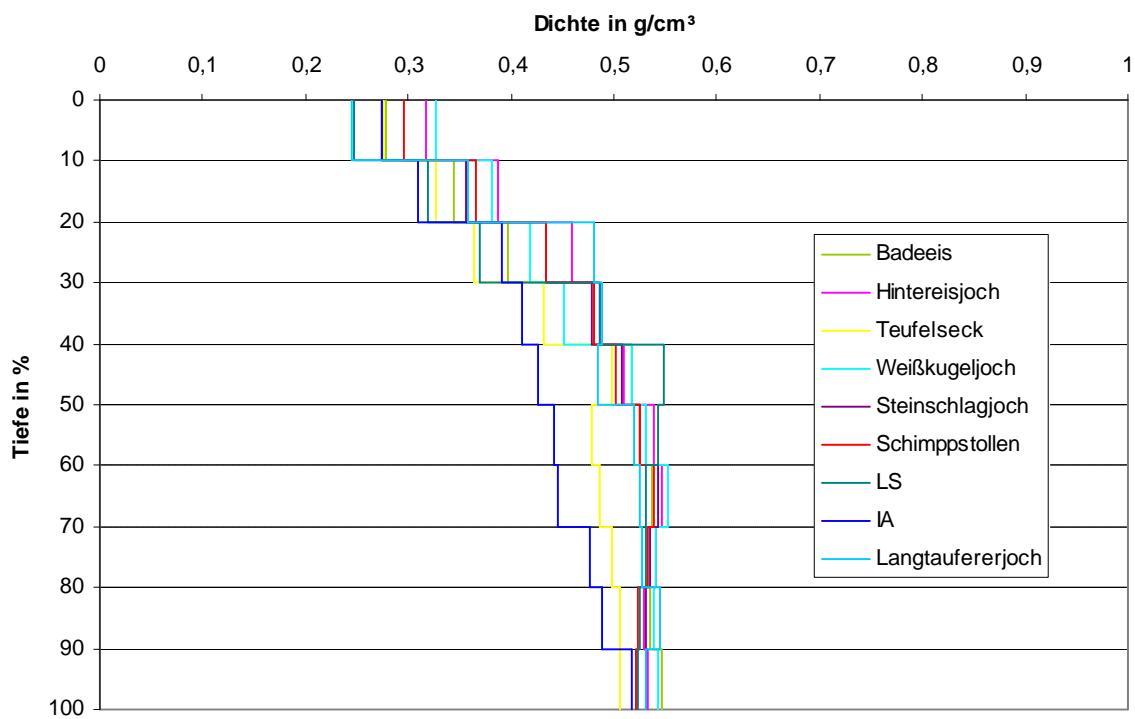
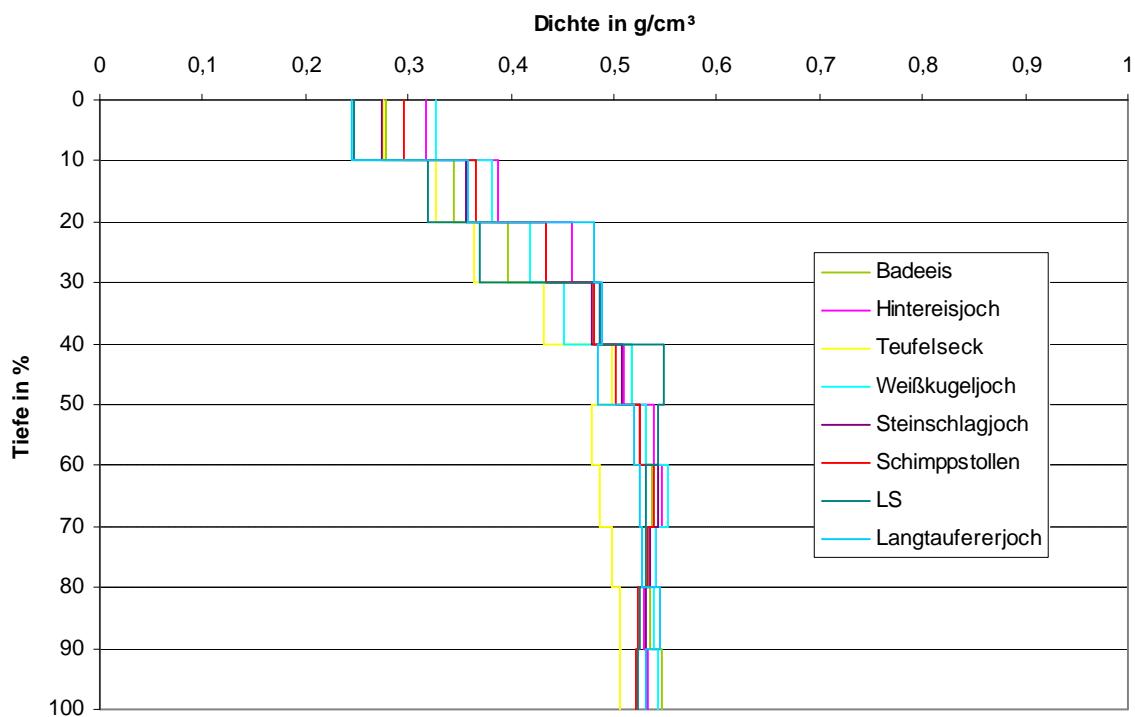


Abb. 8.22: Alle Profile ohne IA, Herbst 1990-2002



Um die geringere Dichte erklären zu können, habe ich die Daten auf Aufzeichnungen des seit dem Sommer gefallenen Neuschnees durchsucht. Bei vielen Profilen gibt es genaue Angaben über die Höhe des Neuschnees. Wenn es in den letzten Jahren insgesamt mehr Neuschnee gegeben hätte, wäre die geringere Dichte im oberen Bereich leicht erklärbar. Leider sind die Aufzeichnungen der Neuschneehöhe schwer miteinander vergleichbar, da bei manchen Profilen nur die Neuschneehöhe des letzten Schneefalls, bei anderen wiederum aber der gesamte seit dem Sommer gefallene Neuschnee vermessen wurde. Der Sommerhorizont ist hier durch Verfärbungen im Schnee, also durch eine spätsommerliche Schmutzschicht zu erkennen, dies ist oft nicht ganz eindeutig. Auch bei gleicher Messung ist der Vergleich schwierig, da die Messungen manchmal am Tag nach einem großen Schneefall gemacht wurden, manchmal aber vielleicht genau einen Tag vor dem nächsten großen Schneefall. In einzelnen Jahren gibt es auch überhaupt keine Angaben über die Neuschneemenge oder nur so wenige, dass keine Mittelung gemacht werden konnte.

Trotzdem kann man sehen, dass es in den letzten Jahren höhere Neuschneemengen gegeben hat. Ob das darauf zurück zu führen ist, dass in den letzten Jahren relativ genaue Messungen bis zum Sommerhorizont gemacht wurden, ist nicht nachvollziehbar. Die Beobachtung von Gerhard Markl, dass in den letzten Jahren bei der Herbstbegehung vermehrt schon Schnee gelegen ist und deshalb die Gleichgewichtslinie nicht mehr so wie in früheren Jahren gut erkennbar war, bestätigt mein Ergebnis. Ob der erste Schnee einfach nur früher gefallen ist oder ob es insgesamt mehr Schnee gegeben hat, geht aus den Messungen nicht hervor.

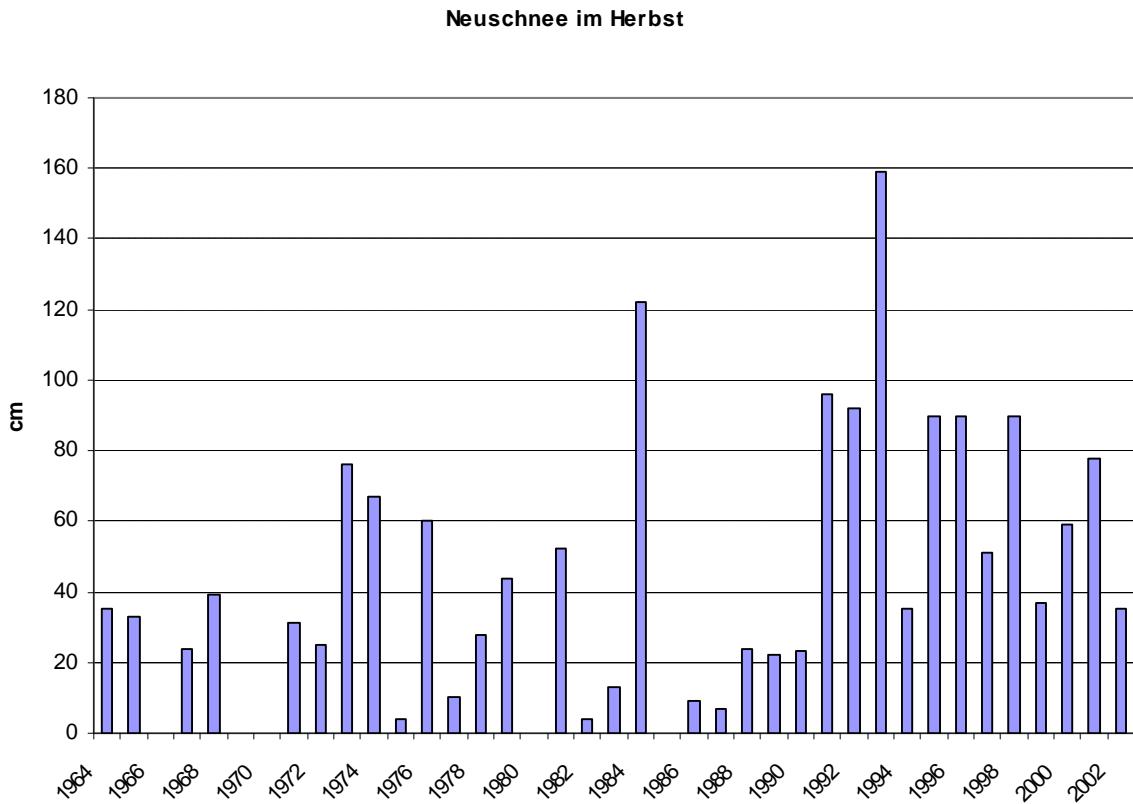


Abb. 8.23: Messungen des bis zum 1. Oktober gefallenen Neuschnees in cm Schneehöhe, 1964 bis 2002

Eine zweite Erklärung: Durch die höheren Temperaturen in den letzten Sommern ist es durch die Entstehung von größeren Mengen an Schmelzwasser zu einem vermehrten Auswaschen der Schneedecke gekommen. Dadurch nimmt die Korngröße zu und die Dichte ab. Die in diesen Jahren durchwegs stark negativen Massenbilanzen unterstützen diese Erklärung.

8.3 Gemittelte Dichteprofile von 1964 bis 1983

In einem nächsten Arbeitsschritt wurden die Profile von 1964 bis 1983 gemittelt. Dies galt als Vervollständigung der vorher gemachten Mittelungen. Die ersten 9 Jahre waren im Vergleich zu den weiteren relativ neuschneearm. Das Jahr 1984 habe ich absichtlich nicht mehr in die Mittelung mit hinein genommen, weil es in diesem Jahr bereits vor dem ersten Oktober große Neuschneemengen gegeben hat.

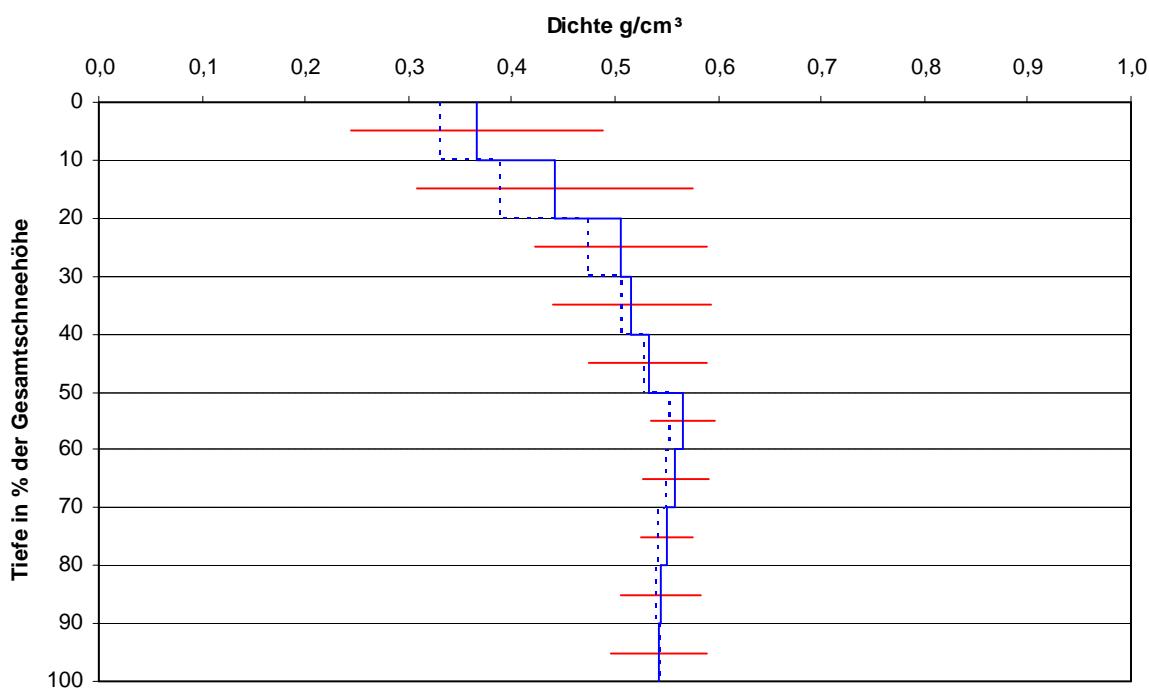
Es wurde wie bei den zuvor gemachten Mittelungen vorgegangen. Die Mittelung fand in 10 % Schichten statt, und die Standardabweichung wurde zusätzlich berechnet und eingetragen. Außerdem wurde auch hier wieder in jedes Profil das über alle Jahre gemittelte Profil strichliert eingetragen.

Wie erwartet sind die Profile der ersten Jahre im Allgemeinen dichter als die über alle Jahre gemittelten Profile. Auch hier ist besonders der oberste Teil betroffen.

Bei den Profilen Badeeis und Teufelseck betrifft die Abweichung am deutlichsten die obersten Schichten. Weiter unten gleichen sich die beiden Kurven mehr und mehr an. Die Profile IA und Schimppstollen sind im gesamten Verlauf dichter als das langjährige Mittel. Die übrigen Profile unterscheiden sich kaum vom Mittel.

Zu berücksichtigen ist dabei aber, dass bei den immer weniger tief werdenden Schächten der letzten Jahre eine größere Neuschneemenge durch die prozentuelle Angabe der Tiefe in den normierten Profilen einen noch größeren Einfluss hat.

Abb. 8.24: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1964-1983, Badeeis
(strichliert: 64-02)



**Abb. 8.25: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1964-1983, Hintereisjoch
(strichliert: 64-02)**

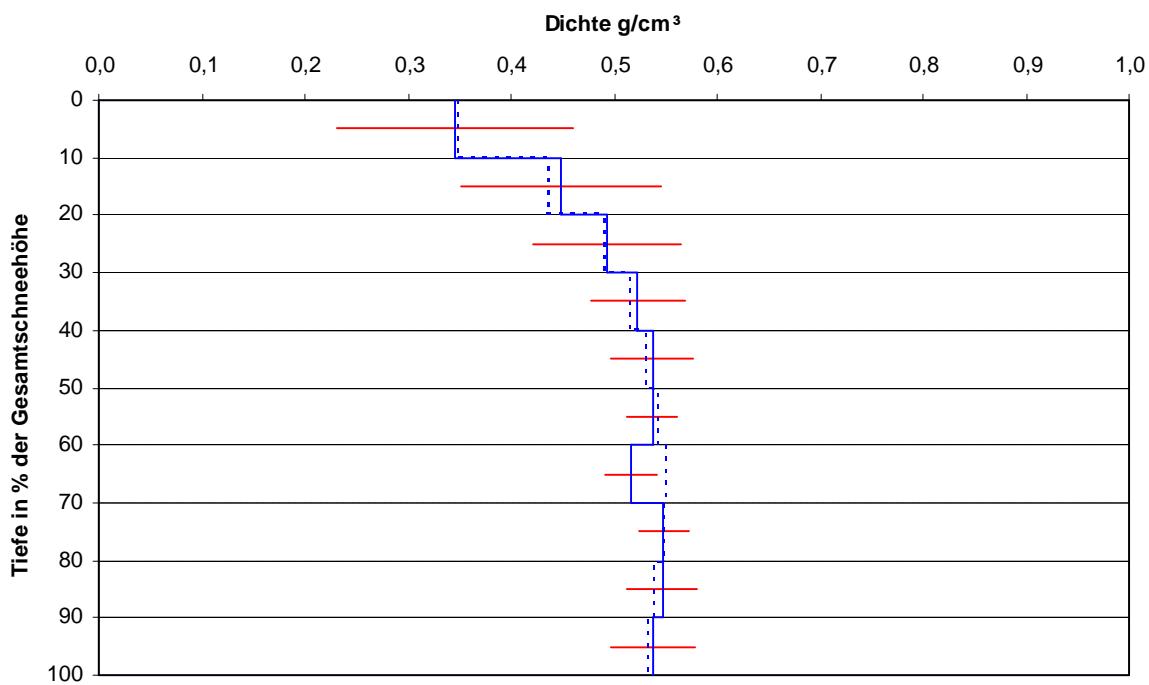
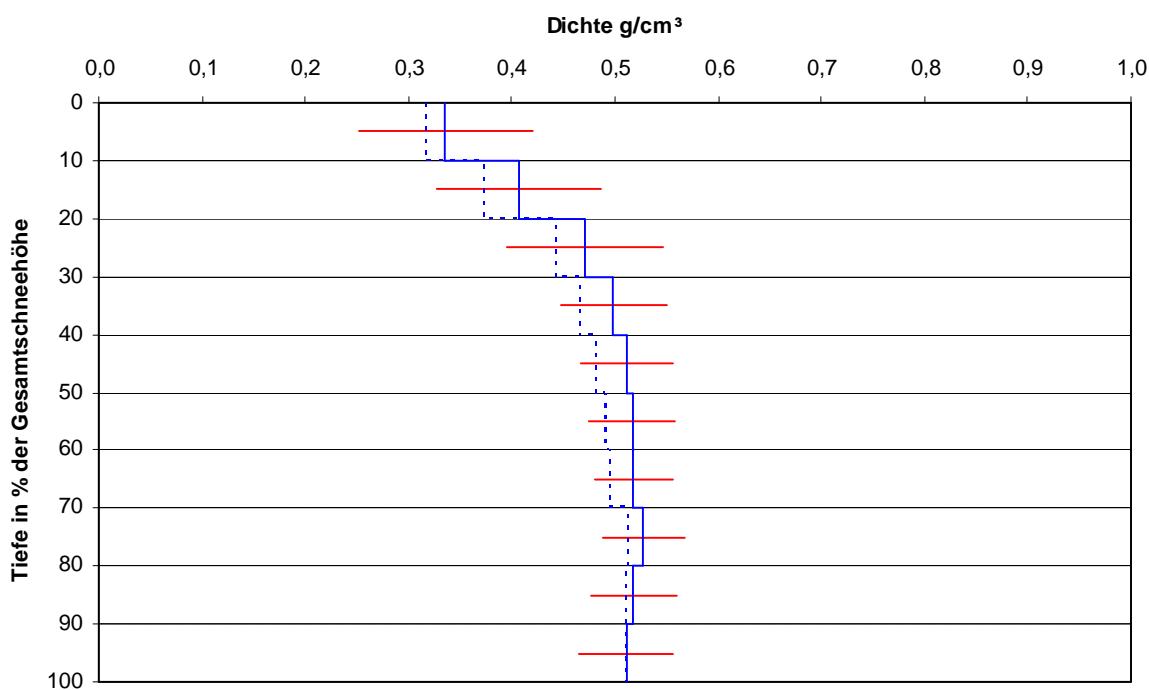
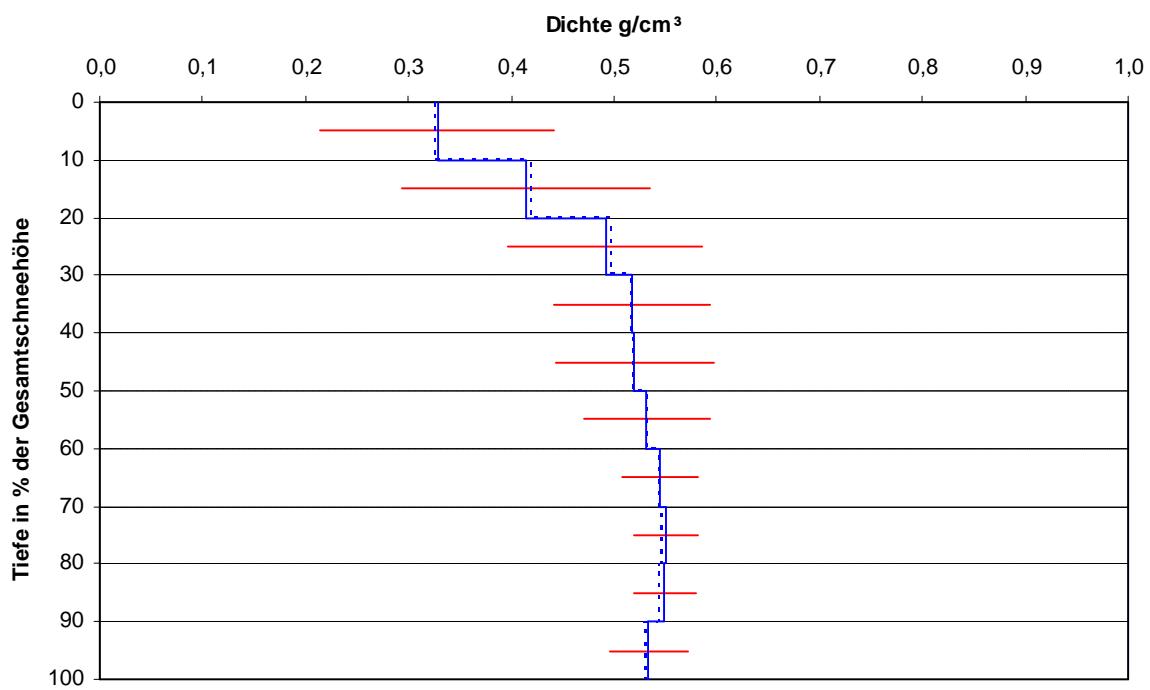


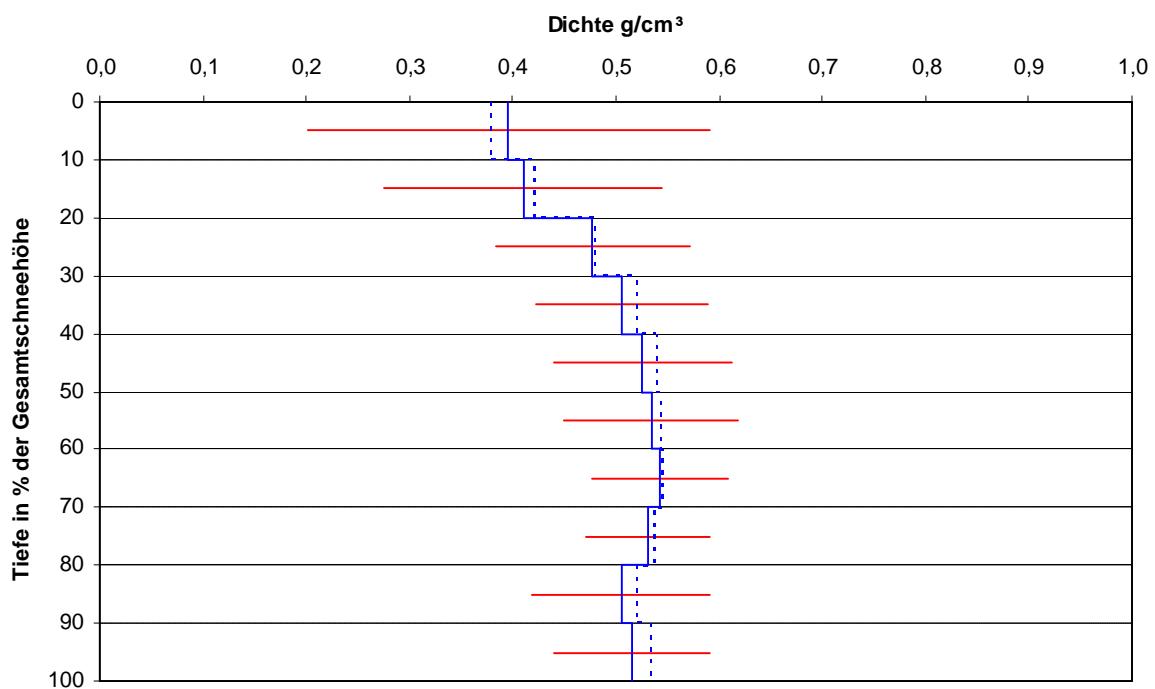
Abb. 8.26: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1964-1983, IA (strichliert: 1964-2002)



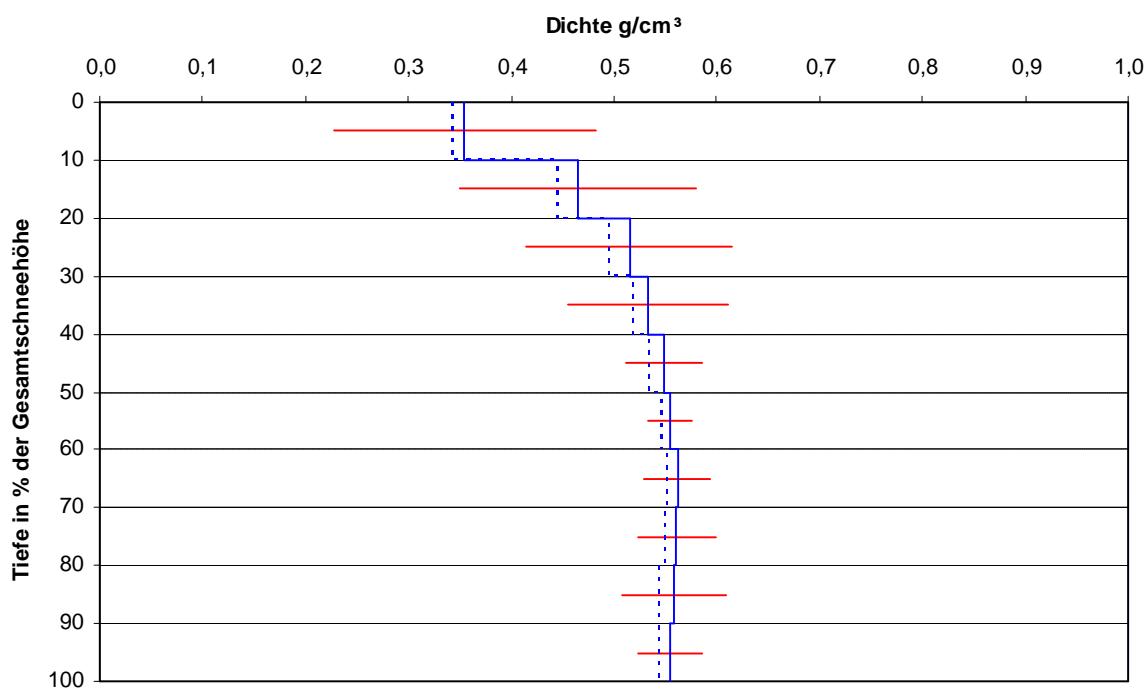
**Abb. 8.27: Gemittelte Profile und Standardabweichung, Herbst 1964-1983,
Langtaufererjoch (strichliert: 64-02)**



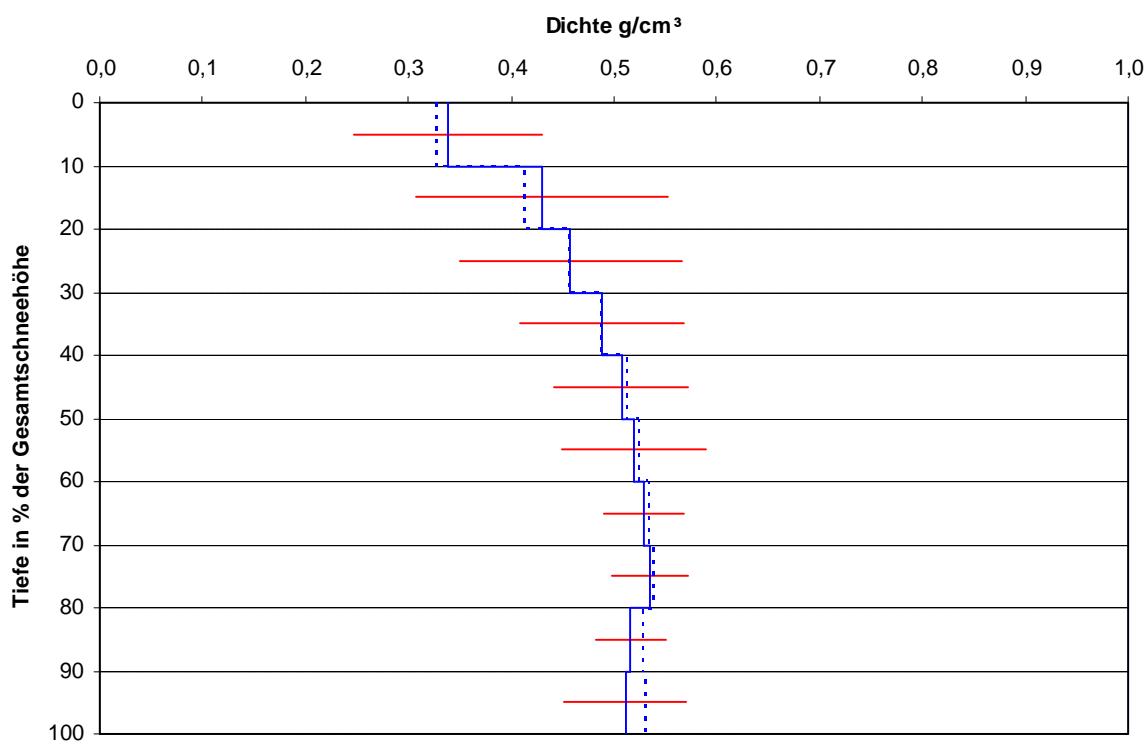
**Abb. 8.28: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1964-1983, LS (strichliert:
1964-2002)**



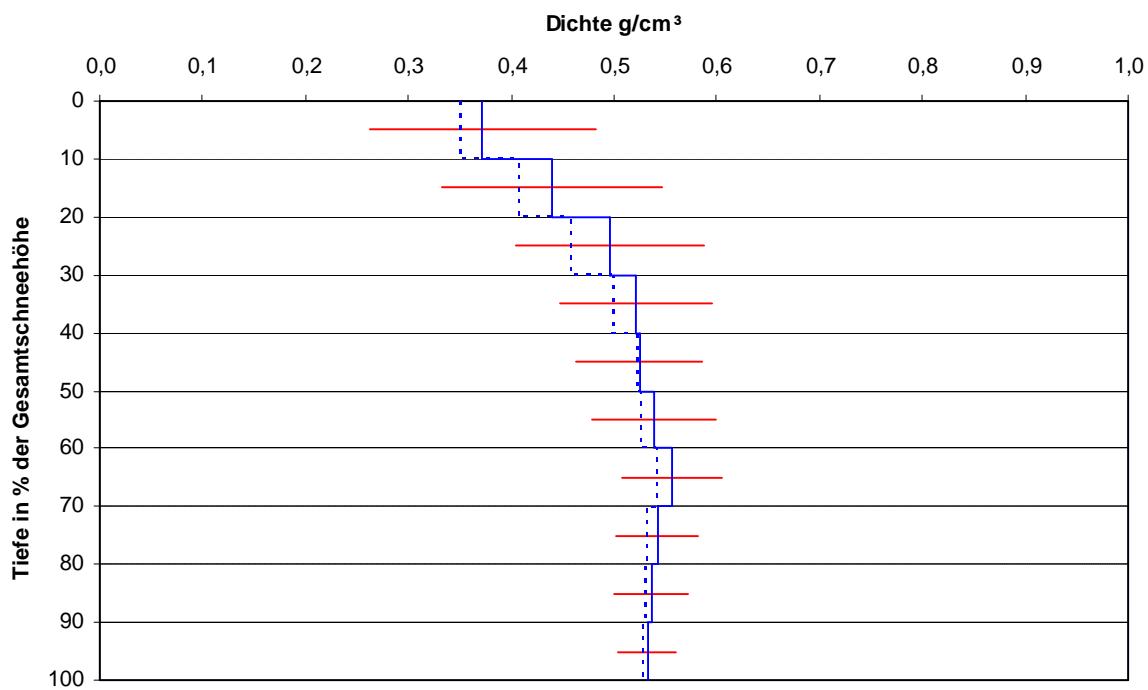
**Abb. 8.29: Gemittelte Profile und Standardabw., Herbst 1964-1983, Schimppstollen
(strichliert: 64-02)**



**Abb. 8.30: Typisches Profil und Standardabweichung, Steinschlagjoch 1964-1983
(strichliert: 64-02)**



**Abb. 8.31: Typisches Profil und Standardabweichung, Teufelseck 1964-1983
(strichliert: 64-02)**



**Abb. 8.32: Typisches Profil und Standardabweichung, Weißkugeljoch 1964-1983
(strichliert: 64-02)**

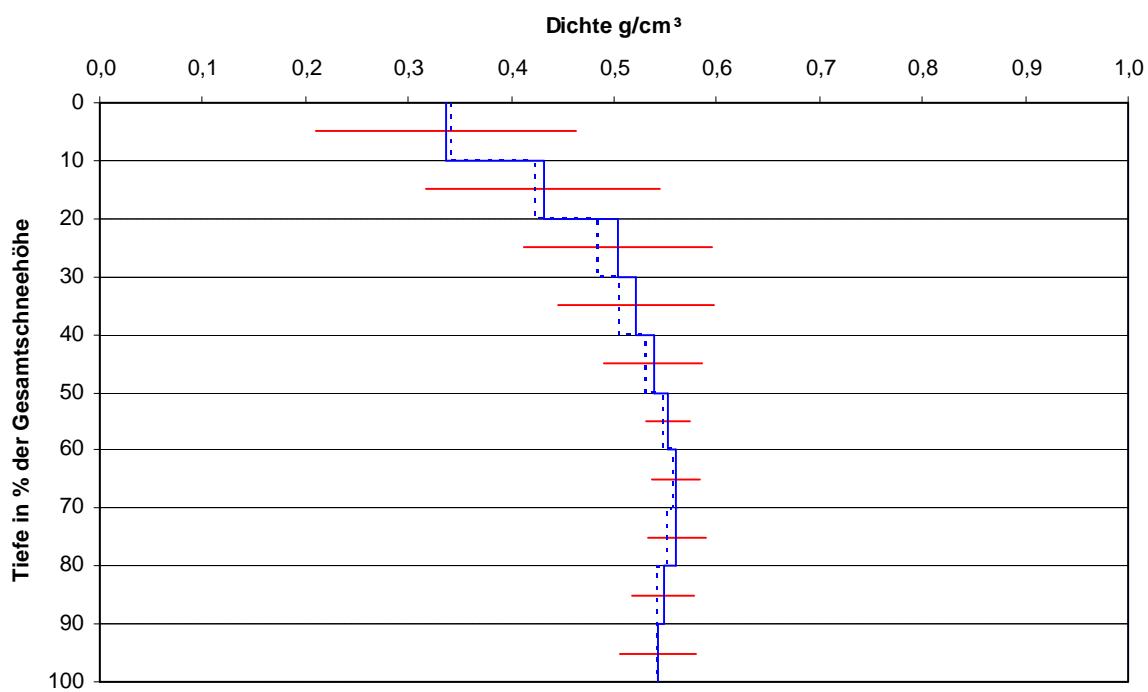
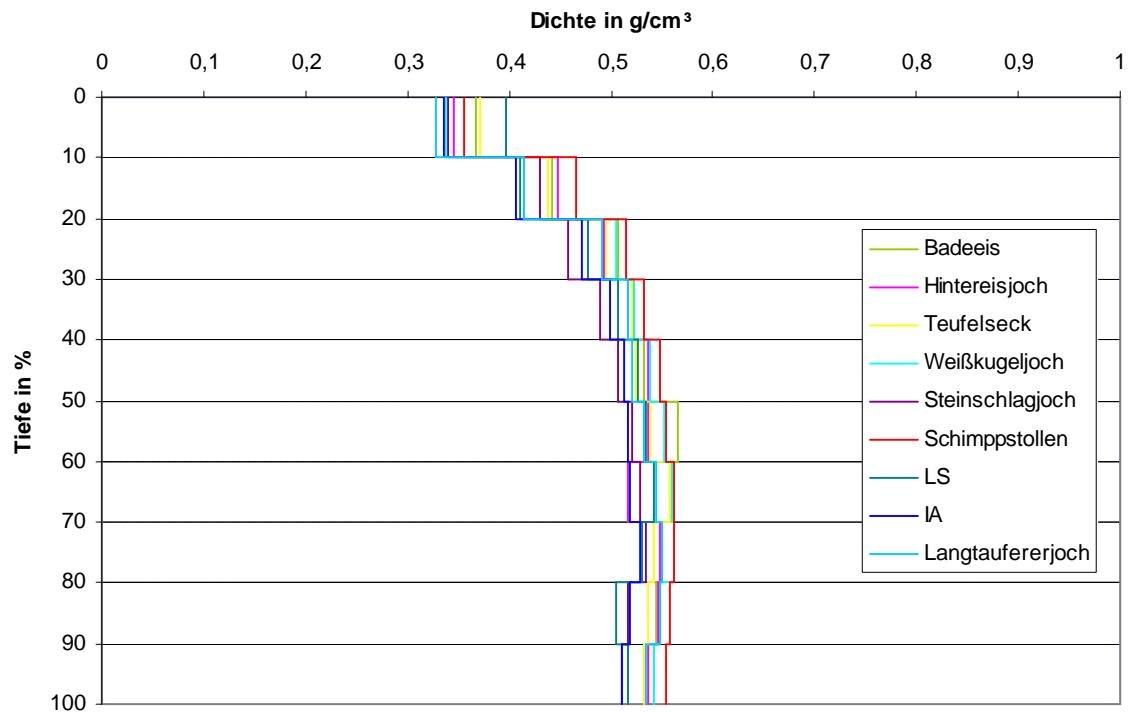


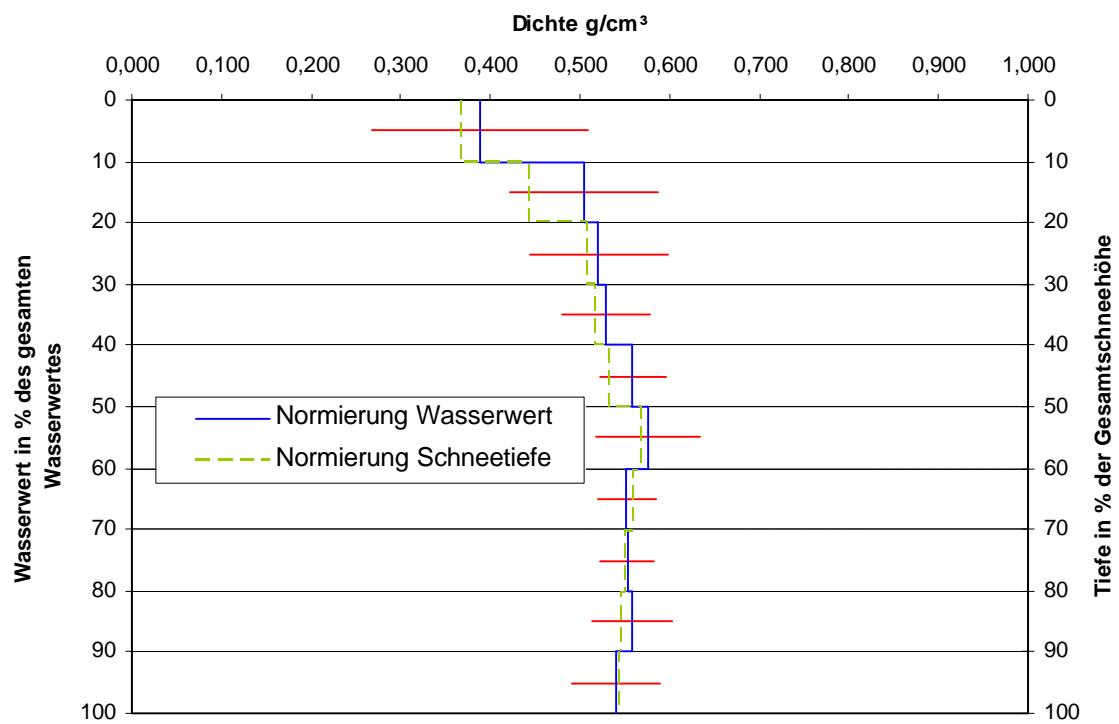
Abb. 8.33: Alle Profile, Herbst 1964-1983



Um den Einfluß des Schnees an der Oberfläche, der eine wesentlich geringere Dichte hat als der Schnee darunter, herauszufiltern, habe ich in einem Beispieldiagramm (Abb. 8.34) den Wasserwert statt der Schneehöhe normiert. Wenn man die mit der Gesamtschneehöhe normierte Kurve ins gleiche Diagramm zeichnet, kann man sehen, dass die beiden Kurven sich im oberen Teil voneinander unterscheiden, im unteren Teil beinahe gleich sind. Dies war auch zu erwarten. Im oberen Teil entsprechen 10 % des Wasserwerts nicht der gleichen Schneehöhe wie unten, da die Dichte eine andere ist.

Ein Beispiel: Der im Herbst 1977 gegrabene Schacht am Standort Badeeis war 460 cm tief und besaß einen Wasserwert von 245 cm. Die erste 10 % Schicht des normierten Wasserwerts entspricht einer Schneetiefe von knapp 60 cm, die letzte 10 % Schicht des Wasserwerts entspricht einer Schneetiefe von nur 45 cm.

Abb. 8.34: Gemitteltes Profil und Standardabweichung, Herbst 1964-1983, Badeeis



9. Zeitreihen zur Dichteentwicklung

Vom Schacht St 28 gibt es in den Jahren 1971, 1972 und 1973 besonders viele Messungen. Der Schacht wurde von Wolfgang Nairz in kurzen Abständen gegraben, im Zeitraum von März bis Oktober liegen teilweise sogar wöchentliche Messungen vor. Dank dieser Aufzeichnungen kann man die Entwicklung des Dichteprofils besonders gut verfolgen.

So beginnt die Messreihe im März 1971 (Abb. 9.1) mit einem regelmäßigen Dichteprofil ohne Eislamellen. Bis Anfang Mai nimmt die Schneehöhe noch zu, und die oberste Schicht weist eine besonders geringe Dichte auf. Es ist noch Neuschnee dazu gekommen. Außer in der obersten Schicht hat die Dichte im gesamten Profil gegenüber dem Märzprofil zugenommen. Nun nimmt die Schneehöhe ab, die Dichte immer weiter zu. Anfang Juni erreicht die Schneehöhe nicht mehr den Wert vom März, und die erste Eisschicht ist im Profil erkennbar. Bis Ende Juni ändert sich in der Dichte nicht viel, sie liegt bei ungefähr $0,5 \text{ g/cm}^3$. Die Schneehöhe nimmt weiter ab. Im Profil vom 13. Juli kann man erkennen, dass die Dichte in der untersten Schicht wieder etwas abnimmt. Dieser Trend bleibt bis zum Schluss erhalten. Die Schneehöhe hat von über 2,5 m im Mai auf 0,6 m Ende Juli abgenommen.

Die Zeitreihen aus den Jahren 1972 und 1973 sind sehr ähnlich (Abb. 9.2 und 9.3).

Abb. 9.1: Dichteentwicklung 1971, St 28

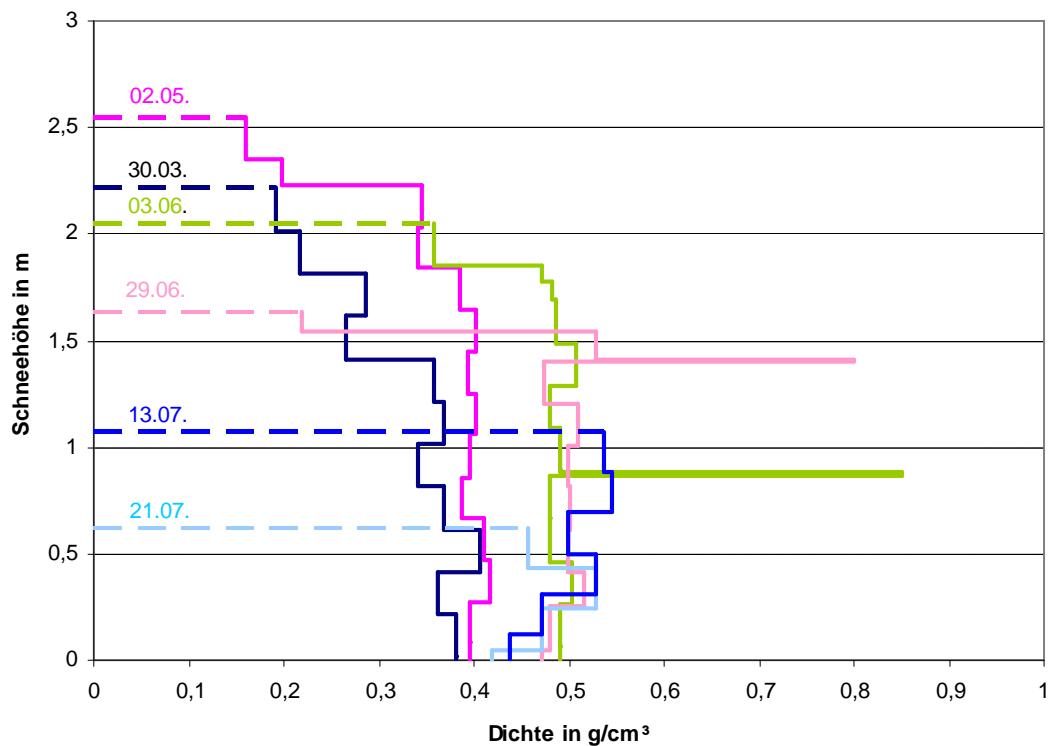


Abb. 9.2: Dichteentwicklung 1972, St 28

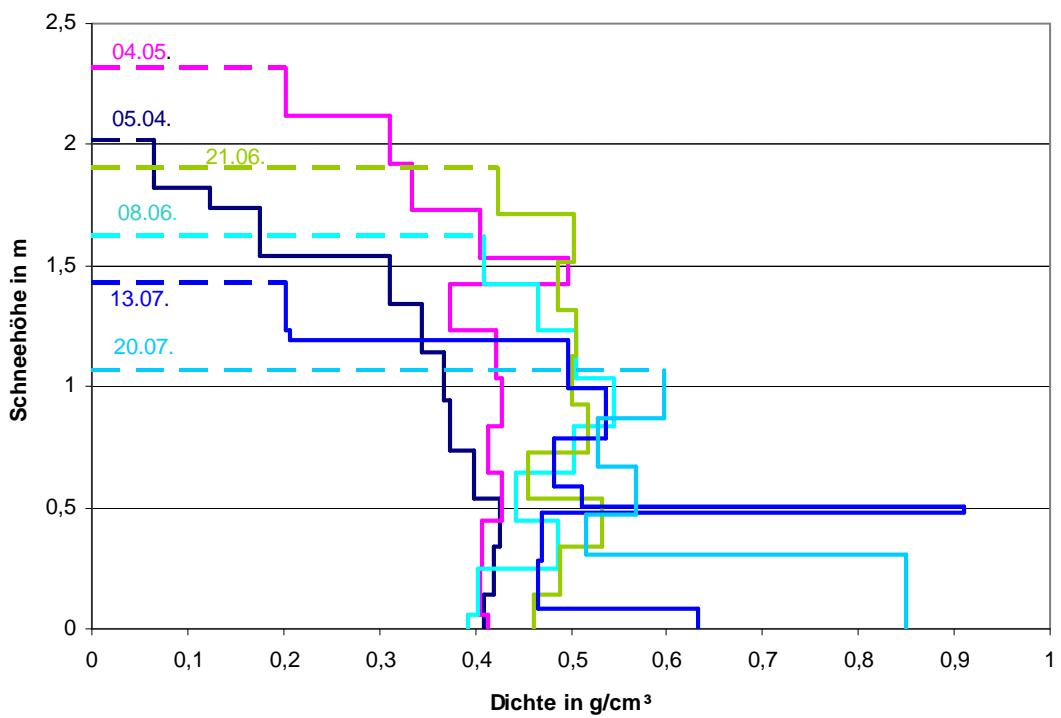
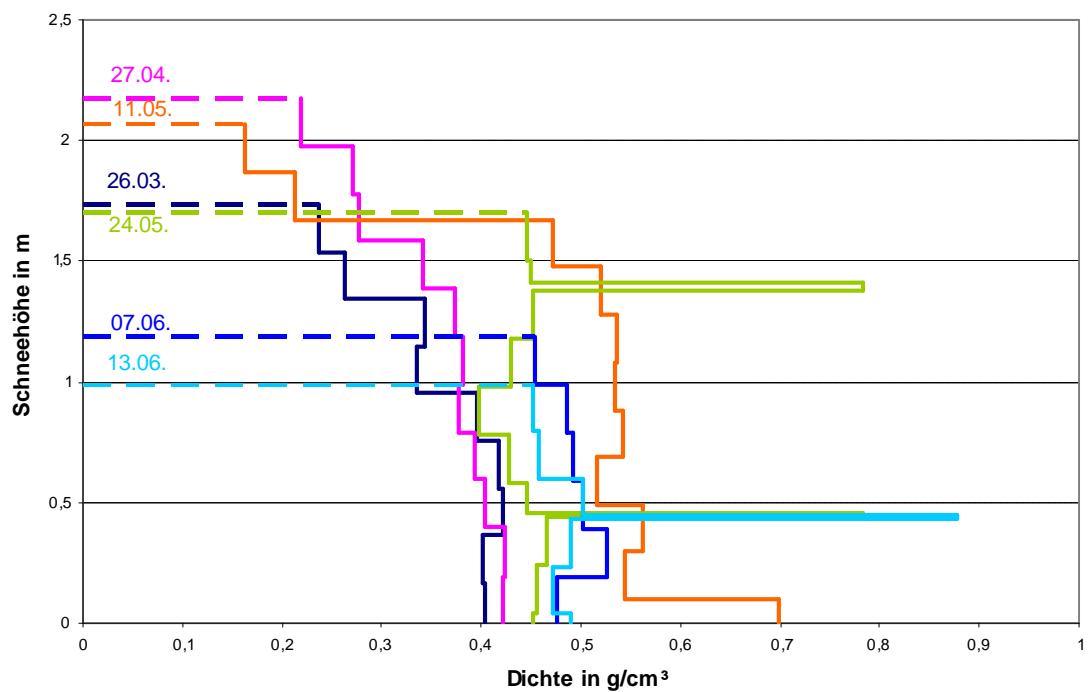


Abb. 9.3: Dichteentwicklung 1973, St 28



10. Dichtemessung auf anderen Gletschern

Neben den schon erwähnten Messungen der Massenbilanz und Dichte auf dem Kesselwandferner in den Ötztaler Alpen nahe dem Hintereisferner durch Queck (1966) gibt es noch viele andere Gletscher, auf denen regelmäßig Untersuchungen bezüglich Dichte und Massenbilanz durchgeführt werden. Teils wird mit der gleichen Methode gearbeitet wie im Ötztal, teils bedient man sich auch anderer zum Teil modernerer Methoden.

10.1 Das Wurtenkees

Auf dem Wurtenkees in der Goldberggruppe in den Hohen Tauern wird auch mit der glaziologischen Methode die Massenbilanz bestimmt und zwar getrennt nach Winter- und Sommerbilanz (Auer et al 1995). Die Analyse der Winterschneedecke wird Anfang Mai durchgeführt, an diesem Zeitpunkt ist das Akkumulationsmaximum erreicht. Die nächste Messung erfolgt am 30. September. Die Dichteprofile werden so wie am Hintereisferner mit einem Stechzylinder in den Schneeschächten bestimmt, es werden 15 bis 20 Schächte gegraben. Zusätzlich wird ein Schneeborhrer verwendet, der die aufwendige Arbeitsmethode des Schächtegrabens erleichtert.

Ergebnisse liegen aus einer 11jährigen Intensivmessperiode von 1982 bis 1993 vor, sie beziehen sich auf 14 Schneeschacht-Standorte in einer Höhe von 2500 bis 3100 m, die jeweils Anfang Mai gegraben wurden. Ähnlich wie am Hintereisferner stellen sich auch am Wurtenkees die Dichteverhältnisse sehr einheitlich dar, die Schwankungen von Jahr zu Jahr sind gering. Die Dichte liegt im Mittel zwischen 0,35 und 0,44 g/cm³. Ein direkter Vergleich mit der mittleren Dichte der Profile am Hintereisferner ist schwer, da dort die Schächte schon Anfang April und dann erst wieder Ende Mai gegraben werden. Die mittlere Dichte der Frühjahrsbegehungen liegt etwas unter, die Werte der Pfingstbegehungen etwas über den Werten des Wurtenkees. Vereinzelt wurde auch am Hintereisferner ein Schacht Anfang Mai gegraben, meistens am Teufelseck. Die mittlere Dichte lag dort immer bei ungefähr 0,4 g/cm³, passt also gut mit den Ergebnissen des Wurtenkees zusammen.

Anders als am Hintereisferner nimmt die mittlere Dichte in den Schneeprofilen mit der Seehöhe ab (Abb. 10.1).

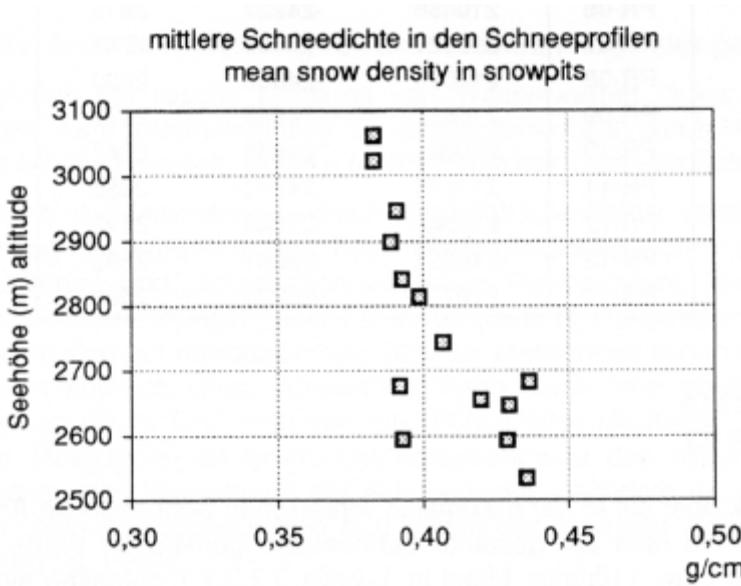


Abb. 10.1: Abhängigkeit der mittleren Schneedichte der Winterschneedecke von der Seehöhe (Auer et al. 1995)

Auch der Wasserwert steigt nicht wie erwartet mit der Seehöhe an (Abb. 10.2). Das liegt daran, dass der Wurtenkees im oberen Teil sehr windexponiert ist, der untere Teil jedoch zusätzlich durch Lawinen gespeist wird.

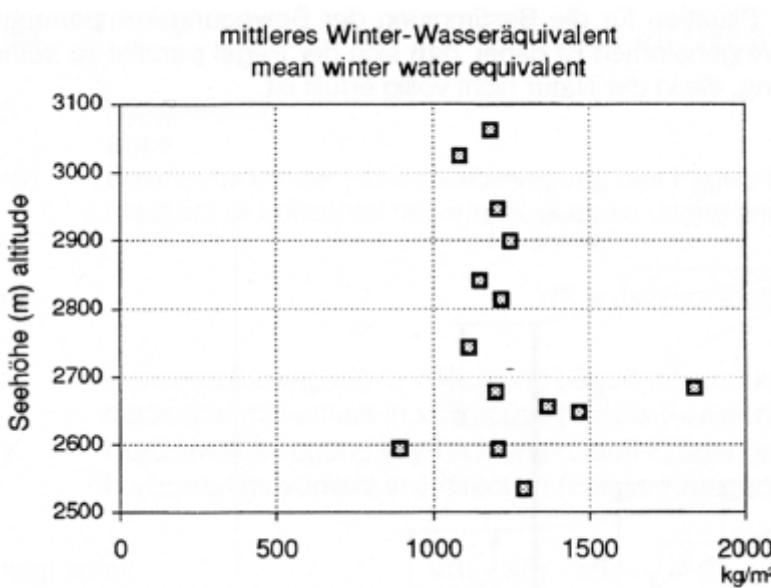
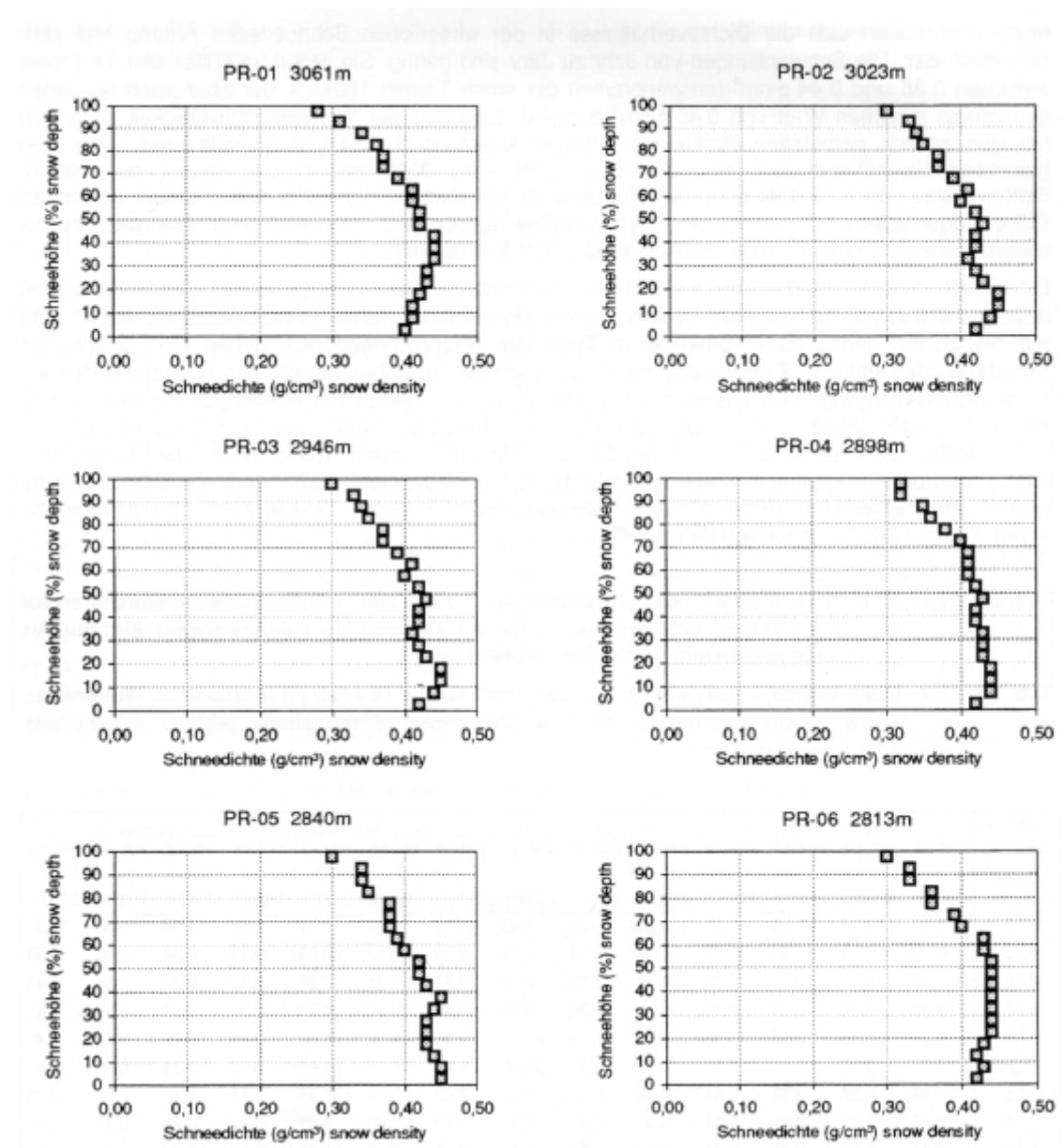


Abb. 10.2: Die Seehöhenabhängigkeit des Winter-Wasserwertes in den Schneeschächten auf dem Wurtenkees (Auer et al. 1995)

Der vertikale Verlauf der Dichteprofile gestaltet sich ähnlich wie am Hintereisferner. Alle 14 Profile sind sich bis auf wenige Ausnahmen sehr ähnlich. Die Dichte nimmt beginnend bei den geringsten Werten an der Oberfläche mit der Tiefe zu, das Dichtemaximum wird zwischen der Hälfte und den unteren 10 bis 30 % erreicht, darunter findet wieder eine Abnahme der Dichte statt (Abb. 10.3). Auch in diesen Diagrammen wird eine normierte Dichte verwendet, 100 % bezieht sich hier jedoch auf die Schneeoberfläche (Auer et al. 1995).



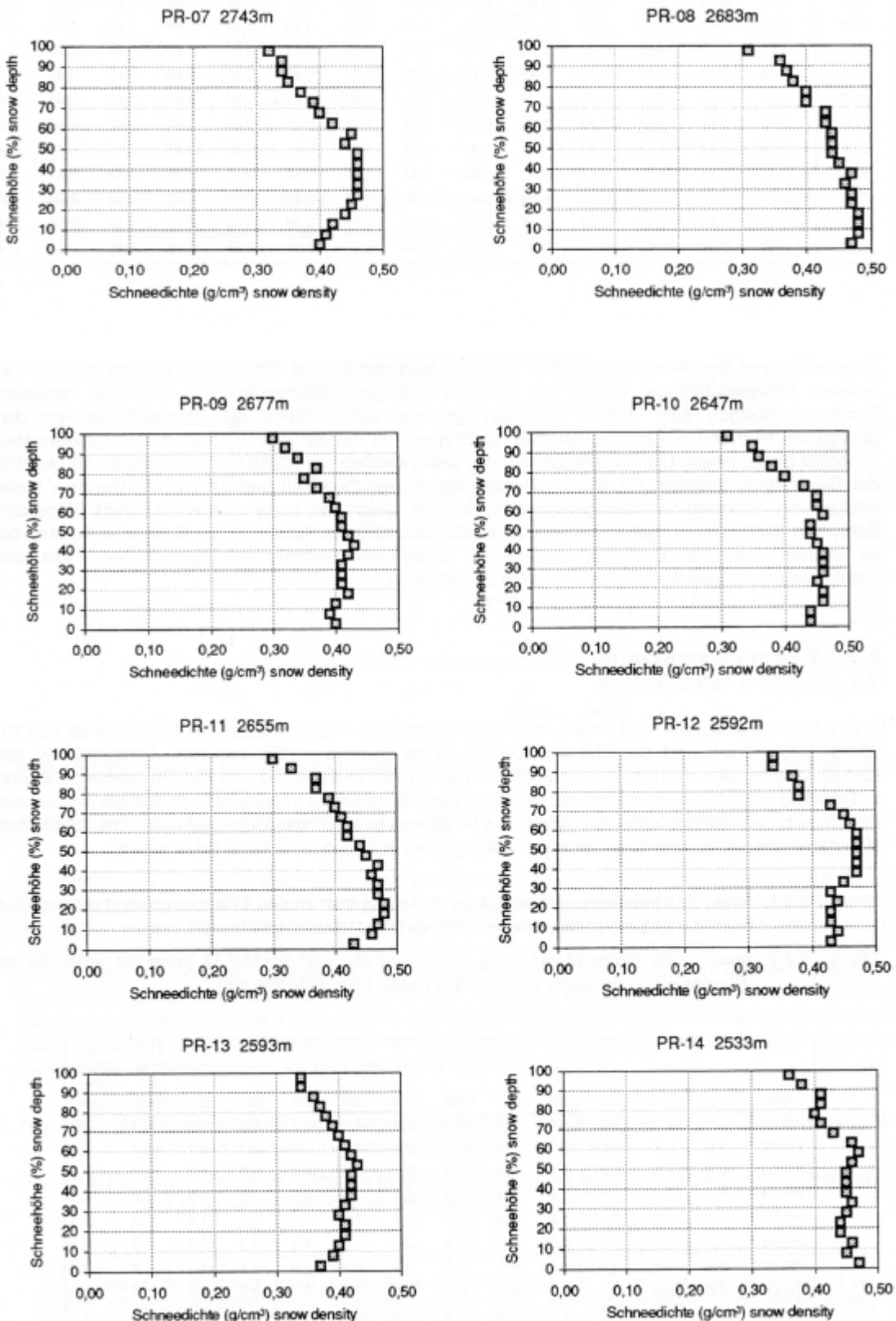


Abb. 10.3: Mittlere vertikale Schneedichtheprofile Anfang Mai 1982-1993 an den 14 Schneeschacht-Standorten auf dem Wurtenkees, 0% = Vorjahreshorizont, 100% = Schneeoberfläche (Auer et al. 1995)

10.2 Der Schwarzmilzferner

In den Jahren 1982 bis 1985 wurde mit der direkten glaziologischen Methode der Massenhaushalt des Schwarzmilzferners in den Allgäuer Alpen bestimmt.

Die Anfang Juni an der selben Stelle in der Mitte des Gletschergebietes auf 2450 m gegrabenen Profile zeigen eine wenig variable Dichte zwischen 0,5 und 0,6 g/cm³ und eine typische Abnahme in den untersten Bereichen. Die mittlere Dichte der Pfingstschräfte am Hintereisferner, die in etwa zur gleichen Zeit ge graben werden, ist mit 0,42 bis 0,54 g/cm³ deutlich geringer als am Schwarzmilzferner.

Die zeitliche Entwicklung der DichteVerteilung unterscheidet sich nicht sehr von der am Hintereisferner. Die Dichte nimmt, wie in Abb. 10.4 ersichtlich, anfangs zu, bevor sie im September besonders im untersten Teil wieder abnimmt (Schug 1987).

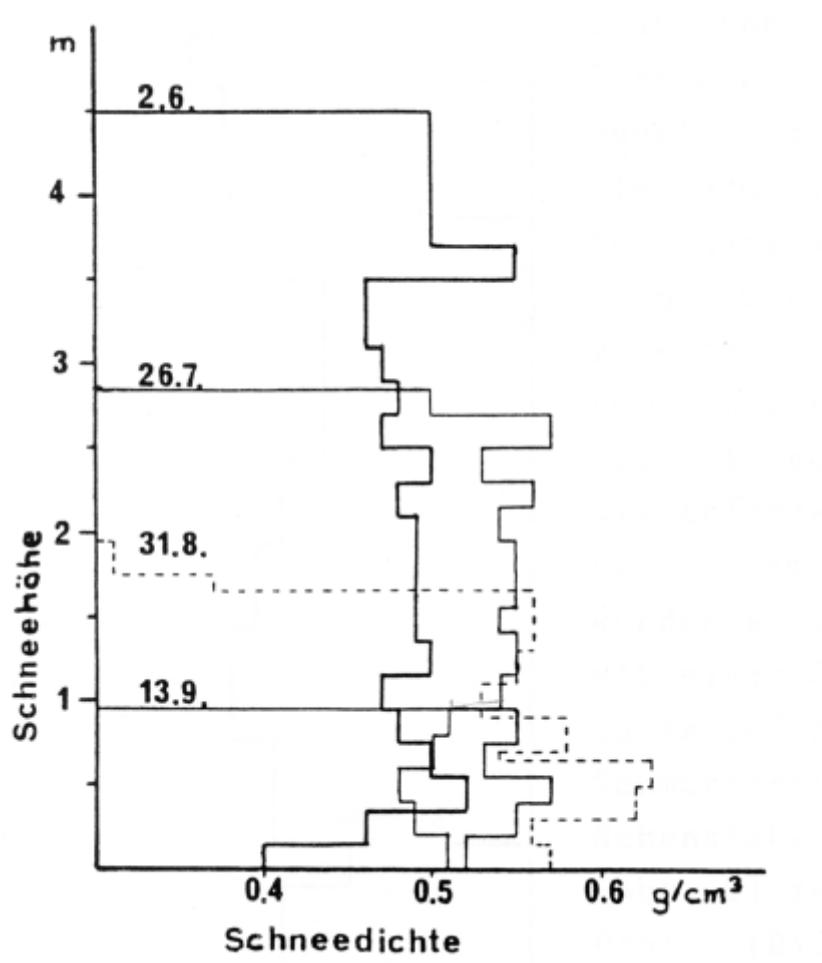


Abb. 10.4: Zeitlicher Verlauf der Dichteentwicklung am Schwarzmilzferner (2450 m) im Jahr 1985 (Schug 1987)

10.3 Der Claridenfirn

Auf dem Claridenfirn in den Glarner Alpen in der Schweiz werden seit dem Jahr 1914 glaziologisch-klimatologische Messungen durchgeführt. Anfangs bestimmte man die Dicke der Schicht mit dem Church'schen Bohrer. Seit dem Jahr 1957 werden regelmäßige Frühjahrs- und Herbstbegehungen durchgeführt, die Dichtemessung erfolgt mit Zylindern.

Die mittleren Dichten bei der Herbstbegehung liegen zwischen $0,545 \text{ g/cm}^3$ am unteren Pegel und $0,549 \text{ g/cm}^3$ am oberen Pegel (Müller 1991). Damit sind die Ergebnisse denen am Hintereisferner sehr ähnlich, wo die meisten Werte der Herbstbegehung bei $0,5 \text{ g/cm}^3$ liegen.

10.4 Der Storglaciären

Auf dem Gletscher Storglaciären in Nordschweden werden seit dem Jahr 1945 Massenbilanzmessungen durchgeführt. Die Messungen stellen die längste kontinuierliche noch bestehende Reihe dar. Seit 1965 werden die Akkumulationsmessungen mit einem fixen System anhand von 300 Punkten, die in einem $100*100 \text{ m}$ Netz über den ganzen Gletscher verteilt sind, gemessen (Jansson 1999).

Die Unterschiede der Massenbilanz in Nordschweden sind vom Konzept her so aufgebaut, dass die Winterbilanz und die Sommerbilanz mit viel Aufwand getrennt bestimmt werden. Daraus ist verständlich, dass der Untersuchung dieser beiden aufwendigen Themen besonderes Augenmerk auch in Richtung Reduktion des Aufwandes immer schon entgegengebracht wurde.

In der Arbeit von Hock und Jensen (1999) wird ausführlich dargestellt, wie sich die zahllosen tatsächlich beobachteten winterlichen Akkumulationsbeträge durch Modellrechnung annähern lassen. Die Übereinstimmung ist sehr gut.

Zwei weitere Methoden, diesem arbeitsintensiven Messproblem zu begegnen, sind einerseits die Verwendung von Radarsondierungen zur Bestimmung der Schneetiefe (Holmlund u. Jansson 1999) und andererseits die Verwendung eines kinematischen GPS Systems (Theakstone 1999) auf Spitzbergen.

Insgesamt kann auch in Nordschweden eine Zunahme der Dichte mit der Tiefe, so wie sie in polaren und alpinen Regionen beschrieben ist, angenommen werden, auch wenn sich die Verdichtung durch den Wind während Stürmen ändern kann: Einerseits kann die Dichte durch einen Sturm schneller zunehmen, andererseits bringt ein Sturm Störungen in die Dichte-Tiefe Beziehung, denn es werden oft dichtere Schichten vergraben. Am Ende der Jahresschicht, beim Sommerhorizont findet sich ähnlich wie am Hintereisferner eine Schwimmschneeschicht.

Die Dichte-Tiefe Beziehung kann mit einer logarithmischen Funktion beschrieben werden, wie Abb. 10.5 mit Daten des Storglaciären zeigt.

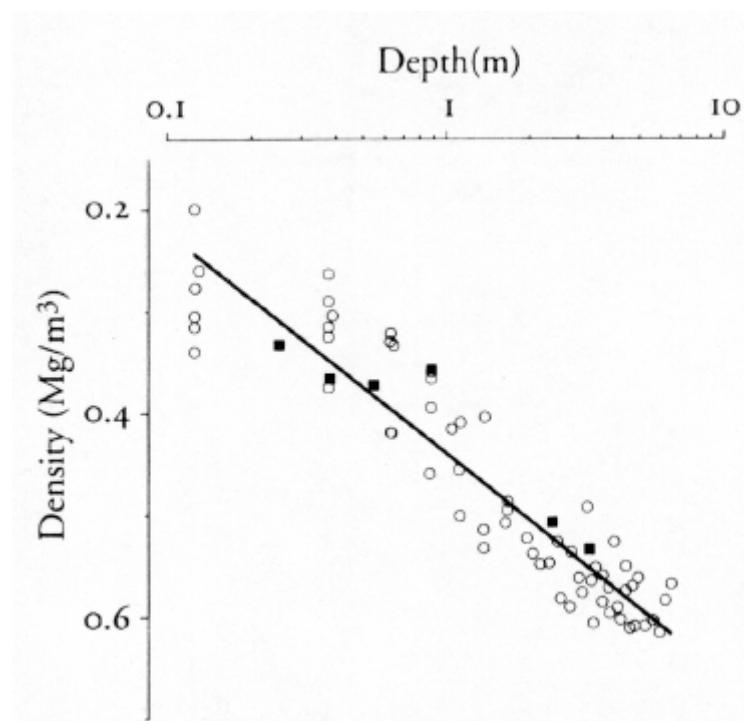


Abb. 10.5: Dichte als Funktion der Tiefe am Storglaciären mit Daten aus dem Jahr 1996 (Jansson 1999)

11. Zusammenfassung

Die Dichte des Schnees ist eine der wichtigsten Größen, die auf dem Gletscher gemessen wird. Sie gibt Auskunft über die Beschaffenheit des Schnees, über sein Alter und den Grad seiner Setzung. Die Dichte von frisch gefallenem Neuschnee ist sehr gering, mit der Setzung, also mit zunehmender Metamorphose, auf einem temperierten Gletscher besonders mit der Schmelzmetamorphose, nimmt die Dichte zu, bis sie schließlich die Dichte von Eis erreicht.

Die Messung der Dichte ist ein wichtiger Bestandteil der Massenhaushaltmessung auf einem Gletscher. Am Ende eines Haushaltsjahres, also Ende September, wird mit Hilfe der Messungen an Pegeln und Schächten auf dem Gletscher die Massenbilanz berechnet. Dies geschieht mit der direkten glaziologischen Methode. Neben dieser Methode gibt es auch noch die geodätische und die hydrologisch-meteorologische Methode.

Die Massenbilanz des Hintereisferners, eines der größten Gletscher in den Ötztaler Alpen, wird seit dem Jahr 1952 gemessen und war in dieser Zeit 41 mal negativ und 10 mal positiv. Diese Arbeit befasst sich mit den Daten von 1964 bis 2002.

Im oberen Teil des Gletschers, dem Akkumulationsbereich, werden immer an den gleichen Standorten Schächte geegraben, im unteren Teil, dem Ablationsbereich werden Pegel abgelesen.

Die Änderung des Wasseräquivalents verläuft auch in den einzelnen Schächten nach dem gleichen Muster wie am gesamten Gletscher. Bei der Untersuchung der im Herbst getätigten Messungen zwischen 1964 und 2002 findet man dieselben Maxima im Wasseräquivalent wieder. Die Jahre 1965 und 1977 bilden die auffälligsten Maxima sowohl in der Bilanz des Gletschers als auch in den meisten Standorten im oberen Teil des Gletschers. Die Minima des Wasseräquivalents findet man nicht überall im gleichen Jahr. Oft stellt das Jahr 1964 das absolute Minimum dar, es gibt aber viele andere Jahre, die in den einzelnen Schächten ein absolutes Minimum erreichen.

Im Schneeschacht werden neben der Dichte auch die Stratigraphie, die Korngröße und die Schneetemperatur gemessen. Die Korngröße nimmt wie die Dichte mit der Tiefe zu, die Temperatur ändert sich in den obersten Metern des Schachtes mit der Jahreszeit, weiter unten liegt sie in einem temperierten Gletscher bei ca. 0 Grad.

Die Schächte können nach ihrem Entstehungszeitpunkt in Frühjahrs-, Pfingst- und Herbstschächte unterteilt werden. Die Frühjahrsprofile fallen durch eine sehr gleichmäßige Zunahme der Dichte mit der Tiefe auf, bis Pfingsten und im Herbst gibt es meist viele Eislinsen. Im Frühjahr nehmen die Dichte und der Wasserwert mit der Höhe zu, im Herbst erreicht die Dichte fast überall ähnliche Werte und ändert sich nicht mit der Höhe.

Bei der Mittelung der mit normierter Tiefe dargestellten Dichteprofile an den einzelnen Standpunkten über den Zeitraum von 1964 bis 2002 kommt man zu einem erstaunlichen Ergebnis: Alle Profile sind beinahe deckungsgleich.

Eine Mittelung über die letzten 12 Jahre zeigt, dass sich auch hier die Dichteprofile der einzelnen Standpunkte sehr ähnlich sind. Insgesamt sind die Profile zwischen 1990 und 2002 aber weniger dicht als die von 1964 bis 2002 gemittelten Profile.

Die Betrachtung der Dichteprofile der ersten Jahre des betrachteten Zeitraums, und zwar von 1964 bis 1983, zeigt, dass diese Profile im Mittel dichter sind als die über den gesamten Zeitraum gemittelten Profile.

Die Ursache dafür ist wahrscheinlich, dass zum Zeitpunkt der Herbstmessungen in den letzten Jahren deutlich mehr Neuschnee gelegen ist.

Die Untersuchung der Dichteprofile und der Vergleich der verschiedenen Schächte hat ergeben, dass es in Zukunft nicht mehr nötig sein wird, alle Schächte zu graben. Eventuell genügt es, die Schneehöhe an Firnpegeln im Akkumulationsgebiet abzulesen und nur einen Schacht zu graben.

LITERATURVERZEICHNIS

AUER, I., R. BÖHM, N. HAMMER, W. SCHÖNER, T. WIESINGER und W. WINIWARTER, 1995: Glaziologische Untersuchungen im Sonnblickgebiet: Forschungsprogramm Wurtenkees. Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, Heft 12, 64 – 77.

BADER, H., 1954: Sorge's Law of Densification of High Polar Glaciers. *Journal of Glaciology*, vol. 2, no. 15, 319.

BERICHT über die Arbeiten im IHP-Projekt: Eis-, Wasser- und Wärmehaushalt des Hintereisferners im Rofental bei Vent in Tirol während der Jahre 1975-1980. Institut für Meteorologie und Geophysik, Innsbruck, 43 S.

BLÜMCKE, A. und H. HESS, 1899: Untersuchungen am Hintereisferner. Wissenschaftl. Ergänzungsheft 2, Zeitschrift d. Du. ÖAV.

BLÜMCKE, A. und S. FINSTERWALDER, 1905: Zeitliche Änderungen in der Geschwindigkeit der Gletscherbewegung. Sitzungsbericht der Bayrischen Akademie der Wissenschaft, Band 25, 109 – 131.

COLBECK, S., E. AKITAYA, R. ARMSTRONG, H. GUBLER, J. LAFEUILLE, K. LIED, D. McCLUNG und E. MORRIS, 1990: The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. Int. Comm. Snow and Ice (IAHS), World Data Center A for Glaciology, U. of Colorado, Boulder, CO, USA.

HAID, H., 1994: Ötztalerisch – Schnalserische Fernergeschichten. Riviselchu, Arunda Kulturzeitschrift, Schlanders, 5 – 29.

HOCK, R. und H. JENSEN, 1999: Application of kriging interpolation for glacier mass balance computations. *Geogr. Ann.*, 81 A (4), 611 – 619.

HOINKES, H., 1957: Zur Bestimmung der Jahresgrenzen in mehrjährigen Schneeansammlungen. Archiv für Met., Geophysik und Bioklimat., Serie B, Band 8, 1. Heft, 56 – 60.

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

HOLMLUND, P. und P. JANSSON, 1999: The Tarfala mass balance programme. Geogr. Ann., 81 A (4), 621 – 631.

JANSSON, P., 1999: Effect of uncertainties in measured variables on the calculates mass balance of Storglaciären. Geogr. Ann., 81 A (4), 633 – 642.

KUHN, M., E. DREISEITL, S. HOFINGER, G. MARKL, N. SPAN und G. KASER, 1999: Measurements and models of the mass balance of Hintereisferner. Geogr. Ann., 81 A (4), 659 – 670.

KUHN, M. und A. HERRMANN, 1990: Schnee und Eis. Lehrbuch der Hydrologie, Band 1, Gebrüder Borntraeger / Berlin / Stuttgart, 271 – 312.

LACKINGER, B. 1996: Schneekunde. Lawinenhandbuch, Hrsg. Land Tirol, Athesia-Tyrolia Druck GmbH, Innsbruck, 43 – 79.

MARKL, G. und H. P. WAGNER, 1977: Messungen von Eis- und Firntemperaturen am Hintereisferner (Ötztaler Alpen), Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 13, 261 – 265.

MELLOR, M., 1977: Engineering properties of snow. J. of Glaciol. 19 (81): 15 – 65; Cambridge.

MOTHEIS, H., 1927: Seismische Dickenmessung von Gletschereis. Z. f. Geophys., 3, 121 – 134.

MÜLLER, H. und G. KAPPENBERGER, 1991: Claridenfirn-Messungen 1914 – 1984. Daten und Ergebnisse des gemeinschaftlichen Forschungsprojektes. Geographisches Institut Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürcher Geographische Schriften, Heft 40, 21 – 49.

PATERSON, W.S.B., 1994: The Physics of Glaciers. Third edition. Pergamon, Oxford, 480 pp.

QUECK, H., 1966: Massenhaushaltsstudien am Kesselwandferner (Ötztaler Alpen) Eine Untersuchung über Gesetzmäßigkeiten in der Rücklagenstruktur und Rücklagenverteilung. Dissertation, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, 124 S.

QUERVAIN M. de, 1948: Über den Abbau der alpinen Schneedecke. Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Assemblee Generale d'Oslo 1948 Tome II, 55 – 68.

RUDOLPH, R., 1962: Abflussstudien an Gletscherbächen. Methoden und Ergebnisse hydrologischer Untersuchungen in den zentralen Ötztaler Alpen in den Jahren 1953 – 1955. Dissertation, Universität Innsbruck 1961. veröff. Museum Ferdinandeum Innsbruck, Band 41, 117 – 266.

SCHIMPP, O., 1959: Der Haushalt des Hintereisferners (Ötztal). Akkumulation, Ablation und Gletscherbewegung in den Jahren 1952/53, 1953/54. Dissertation, Universität Innsbruck 1957, Veröff. Museum Ferdinandeum Innsbruck, Band 39, 66 – 138.

SCHLAGINTWEIT, H. und A., 1850: Untersuchungen über die physikalische Geographie der Alpen, Verlag Ambrosius Barth, Leipzig.

SCHUG, H.J., 1987: Der Schwarzmilzferner. Meteorologisch-glaziologische Untersuchung an einem Kleingletscher in den Allgäuer Alpen. Diplomarbeit, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, 11 – 21.

SCHYTT, V., 1958: Glaciology II, Norwegian-British-Swedish Antarctic Expedition 1949 – 52, Scientific Results, vol. 4.

SELIGMANN, G. 1941: The Structure of the Temperate Glacier. Geogr. Journ., vol. XCVII, no. 5, 295 – 317.

THEAKSTONE W. H., F. M. JACOBSEN und N. T. KNUDSEN, 1999: Changes of snow cover thickness measured by conventional mass balance methods and by global positioning system surveying. Geogr. Ann., 81 A (4), 767 – 776.

TOLLNER, H. 1951: Über Schwankungen von Mächtigkeit und Dichte ostalpiner Firnfelder. Archiv für Met. und Geophysik und Bioklimat., Serie B, Band 3, 189 – 208.

ANHANG:

TABELLE 1: SCHNEESCHÄCHTE (Beispiele)

JAHR	TAG	MONAT	MEßSTELLE	HÖHE	SCHNEEHÖHE	DICHTE_	WASSERWERT
55	4	8	WJ	3150	251	0,588	148
55	25	7	L55	2950	127	0,576	73
55	30	7	L 55	2950	116	0,570	66
55	29	5	L 55	2950	245	0,479	117
55	7	8	L 55	2950	103	0,580	60
55	7	4	L 55	2950	232	0,437	101
56	20	3	PROFIL	2580	107	0,268	29
56	5	10	L 55	2950	14	0,443	6
56	5	10	WJ	3150	158	0,508	80
56	29	6	PROFIL	2700	143	0,467	67
56	1	6	PROFIL	2700	153	0,485	74
56	1	6	PROFIL	2580	82	0,432	35
56	30	8	L 55	2950	47	0,471	22
56	28	3	L 55	2950	198	0,374	74
56	2	6	L 55	2950	251	0,510	128
56	28	7	L 55	2950	166	0,570	94
57	18	3	PROFIL	2480	64	0,325	21
57	18	3	PROFIL	2700	153	0,345	83
57	18	3	L 55	2950	168	0,371	62
57	13	7	L 55	2950	138	0,539	74
57	14	6	L 55	2950	299	0,538	161
58	24	4	L 55	2950	240	0,377	91
58	31	3	L 55	2950	248	0,403	100
58	25	5	L 55	2950	200	0,515	103
58	31	3	PROFIL		212	0,402	85
58	31	3	PROFIL	270	188	0,381	72
59	2	10	ST	3250	131	0,613	80
59	18	8	ST	3250	245	0,558	139
59	2	10	HJ	3330	219		
59	21	8	HJ	3330	293	0,585	171
59	29	5	L 55	2930	171	0,523	91
59	2	4	L 55	2930	250	0,398	99
59	2	4	HEF m	2500	187	0,354	66
60	27	3	L 55	2930	200		79
60			L 55	2930	76	0,589	45
61	28	3	L 55	2930	313	0,463	145
61	3	10	HJ	3330	287	0,627	180
61	2	10	L 55	2930	71	0,578	41
61	2	6	L 55	2930	348	0,511	178
62	9	6	P 23 a		240	0,462	113
62	10	6	L 55	2930	337	0,526	177
62	18	7	P 23		85	0,460	43
62	1	10	LJ 1	3120	113	0,559	63
62	30	9	SJ	3220	120	0,513	62
63	5	4	HEF m	2500	162	0,289	47
63	29	9	LJ 1	3100	156	0,529	83
63	29	9	LS	3200	144	0,473	68
63	28	9	SJ	3280	113	0,563	63
63	28	9	HJ	3330	316	0,588	186
63	28	9	WJ	3180	242	0,540	131

63	29	9	HEF m	3090	102	0,512	52
63	5	4	L 55	2930	230	0,344	79
63	28	9	BE	3150	172	0,534	92
63	28	9	TE	3065	103	0,517	53
64	7	6	P 35	2780	105	0,529	56
64	22	3	P 35	2780	150	0,334	51
64	22	3	P II6	2630	115	0,340	35
64	22	3	HEF m	2650	129	0,358	46
64	29	3	HEF m	2810	218	0,342	75
64	27	9	WJ	3185	140	0,526	74
64	23	3	WJ	3185	250	0,345	86
64	7	6	L 55	2950	175	0,559	99
64	29	3	L 55	2950	219	0,345	74
64	3	18	BE	3150	67	0,573	38
64	30	9	LS	3200	59	0,517	31
64	27	9	TE	3065	61	0,510	31
64	29	9	LJ 2	3180	69	0,450	31
64	3	10	ST	3250	155	0,529	82
64	22	3	HEF m	2450	80	0,315	25
64	29	3	P 7	2490	110	0,288	32
64	27	9	SJ	3270	142	0,503	72
64	27	9	HJ	3330	140	0,506	71
65	7	10	HEF I	2980	259	0,491	127
65	4	10	HJ	3320	574	0,510	293
65	7	10	HEF r	2950	220	0,504	111
65	7	10	HEF m	2840	145	0,508	74
65	7	10	HEF r	2905	204	0,484	99
65	3	10	SJ	3260	509	0,507	258
65	20	8	L 55	2970	116	0,531	62
65	7	10	HEF r	3010	321	0,490	157
65	2	8	L 55	2970	183	0,488	89
65	6	6	P 15	2640	169	0,469	79
65	6	6	P 3	2430	94	0,538	51
65	6	10	HEF m	2900	175	0,499	87
65	6	10	HEF r	2790	128	0,498	64
65	6	10	HEF m	2785	110	0,527	58
65	6	10	HEF m	2810	126	0,510	64
65	6	10	HEF r	2880	172	0,473	81
65	6	10	HEF m	2800	125	0,538	67
65	29	5	P 3	2430	134	0,440	59
65	4	10	BE	3150	464	0,507	235
65	6	10	LJ 1	3100	483	0,494	238
65	20	3	BE	3150	234	0,432	101
65	6	10	LS	3200	530	0,540	287
65	5	10	WJ	3165	469	0,512	240
65	4	10	TE	3065	422	0,418	219
65	20	3	HEF m	2450	140	0,341	48
65	29	5	P 15	2640	206	0,415	86
65	20	3	HEF m	2660	160	0,341	55
65	20	3	P 35	2770	221	0,375	83
65	22	3	P 27	2760	218	0,361	79
66	30	9	LS	3200	278	0,529	147
66	26	9	ST	3250	309	0,565	175

66	24	3	LJ 5	3140	279	0,365	99
66	28	9	WJ	3145	242	0,538	130
66	26	9	SJ	3270	290	0,510	150
66	24	3	HJ	3330	266	0,399	106
66	30	9	IA	3450	252	0,494	124
66	29	9	HJ	3330	331	0,519	172
66	2	6	HJ	3330	310	0,475	147
66	2	6	LJ 5	3140	281	0,452	127
66	26	9	HEF m	2825	19	0,800	15
66	28	9	HEF m	2970	133	0,530	70
66	26	9	HEF m	2850	64	0,616	40
66	28	9	HEF r	2815	53	0,658	35
66	25	3	HEF m	2710	83	0,346	29
66	25	3	HEF m	2810	174	0,378	66
66	29	9	BV 6	2880	83	0,580	48
66	28	9	HEF r	2940	88	0,519	46
66	28	9	HEF r	2950	111	0,518	57
66	28	9	HEF I	2970	85	0,522	44
66	28	9	HEF r	2920	59	0,564	33
66	28	9	HEF r	2855	16	0,500	8
66	28	9	HEF m	2885	65	0,611	40
66	28	9	HEF r	2895	73	0,592	43
66	25	3	HEF m	2600	50	0,332	17
66	2	6	BE	3135	300	0,464	139
66	27	9	BE	3135	242	0,538	130
66	24	3	TE	3065	234	0,430	101
66	24	3	BE	3135	272	0,365	99
66	29	9	LJ 1	3100	310	0,583	180
66	29	9	BV 1	3130	203	0,533	108
66	29	9	HS 2	3100	273	0,550	150
66	3	6	HEF m	2700	127	0,497	63
66	25	3	HEF m	2430	50	0,365	17
66	25	3	HEF P 7	2480	47	0,283	13
66	3	6	HEF P 1	2640	61	0,489	30
66	2	6	TE	3065	302	0,472	143
66	28	9	TE	3065	188	0,533	100
66	28	9	HEF I	3000	145	0,550	80
67	30	5	WJ	3165	461	0,541	249
67	4	4	WJ	3165	400	0,378	151
67	4	4	LS	3200	431	0,384	166
67	28	9	LJ 5	3130	249	0,553	138
67	27	9	BE	3135	216	0,564	122
67	30	9	WJ	3165	197	0,571	125
67	27	9	SJ	3230	260	0,530	138
67	27	9	HJ	3340	286	0,547	156
67	28	9	IA	3450	216	0,518	112
67	1	6	LS	3200	494	0,456	225
67	29	9	LS	3200	233	0,563	131
67	27	9	F 1,ST	3250	266	0,620	165
67	30	9	BV 1	3130	187	0,525	98
67	31	3	HEF m	2800	266	0,362	96
67	31	5	HEF m	2700	266	0,466	124
67	1	4	HEF m	2700	221	0,336	74

TABELLE 2: WANN WURDE WELCHER SCHACHT GEGRABEN?

P 59	L 3	HS	VIET	TE	BV 2	F 3	LJ	HOI	BV 1	BE	WJ	LS	ST	SJ	HJ	IA	
																	1964
										X							März
				X		X				X	X	X	X	X	X		Juni
																	September
																	Oktober
																	1965
										X							März
																	Mai
																	Juni
																	August
				X		X				X	X	X	X	X	X		Oktober
																	1966
				X		X				X							März
				X		X				X							Juni
				X		X				X							September
																	1967
				X													Februar
																	März
				X						X	X						April
				X						X	X	X					Mai
																	Juni
				X		X		X	X	X	X	X	X	X	X		September
																	1968
				X						X	X	X					März
										X	X	X					April
				X		X		X	X	X	X	X	X	X	X		Juni
																	September
				X													Oktober
																	1969
				X		X				X	X	X					März
						X	X	X		X	X	X					Mai
							X			X	X	X					Juli
										X	X	X					August
																	September
				X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		1970
																	April
				X						X	X	X					Mai
										X							Juli
																	August
				X						X							September
						X		X	X	X	X	X	X	X	X		Oktober

P 59	L 3	HS	VIET	TE	BV 2	F 3	LJ	HOI	BV 1	BE	WJ	LS	ST	SJ	HJ	IA	
				X						X				X	X		1971
	X			X						X	X	X					März
X	X			X						X	X	X					Mai
																	Juni
																	Juli
																	August
																	September
																	Oktober
																	1972
	X			X						X	X						April
X	X			X						X	X						Mai
																	Juni
																	Juli
																	August
										X	X	X	X	X	X		September
										X	X	X	X	X	X		Oktober
																	1973
	X			X						X	X	X					März
X	X			X						X	X	X					April
																	Mai
																	Juni
																	Juli
										X	X	X	X	X	X		Oktober
																	1974
										X	X						März
										X	X						April
										X	X	X					Mai
										X	X	X					Juni
																	Juli
																	August
										X	X	X	X	X	X		Oktober
																	1975
										X	X	X					April
										X	X	X					Juni
											X	X					Juli
																	September
	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Oktober
																	1976
										X	X	X					März
	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					April
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					Mai
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					September
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					Oktober

DANKSAGUNG

Am Ende meiner Diplomarbeit angelangt, möchte ich noch einigen Menschen danken, die mir im Laufe der letzten Jahre und besonders während der Entstehung der Diplomarbeit geholfen haben:

Univ. Prof. Dr. Michael Kuhn, der diese Arbeit betreut hat und mir immer das Gefühl gegeben hat, dass sie für die weiteren Messungen am Hintereisferner einen Sinn hat,

Doz. Dr. E. Dreiseitl und Gerhard Markl für die guten Ratschläge, die sie anhand ihrer Erfahrung mit dem Hintereisferner immer leicht geben konnten,

Fritz Pellet, Markus, Florian für ihre Hilfe am Computer,

Dr. Elisabeth Schlosser dafür, dass sie mich und später dann auch Karolin so nett in ihrem Zimmer aufgenommen hat,

allen Mitgliedern des Institutes für Meteorologie und Geophysik, sowie allen Studenten, die für mich aus dem Arbeitsplatz Uni meine zweite Heimat machten,

meinen Eltern für die nicht nur finanzielle Unterstützung,

Tom dafür, dass er nie an mir gezweifelt hat

und natürlich Karolin für ihr Lächeln, das ich immer dann, wenn ich mich müde vom Computer abwendete, erblickte.

LEBENSLAUF

Name: **Matzi**

Vorname: **Elisabeth**

Adresse: **Exlgasse 43,
6020 Innsbruck**

Geburtsdatum: **06.05.1979**

Geburtsort: **Innsbruck**

Vater: **Robert Matzi, pensionierter Kaufmann**

Mutter: **Irmgard Matzi, geb. Hartl, Apothekerin**

Ausbildung:

1985 – 1990	Volkschule in Feldthurns, Südtirol
1990 – 1993	Mittelschule „Michael Pacher“ in Brixen
1993 – 1998	Realgymnasium „J. Ph. Fallmerayer“ in Brixen
1998 – 2004	Studium der Meteorologie an der Universität Innsbruck

September 2003 Geburt meiner Tochter Karolin

