

HS 912.2x

ISSN1016-6254

# Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik

Heft 12

## GLAZIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN IM SONNBLICKGEBIET: FORSCHUNGSPROGRAMM WURTENKEES

## GLACIOLOGICAL STUDIES IN THE REGION OF SONNBLICK (AUSTRIA): RESEARCH PROGRAMME WURTENKEES

I. Auer, R. Böhm, N. Hammer†, W. Schöner, T. Wiesinger, W. Winiwarter



HSZ 9

**GLAZIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN  
IM SONNBLICKGEBIET:  
FORSCHUNGSPROGRAMM WURTENKEES**

**GLACIOLOGICAL STUDIES IN THE  
REGION OF SONNBLICK (AUSTRIA):  
RESEARCH PROGRAMME WURTENKEES**

Ingeborg AUER<sup>1</sup> Wolfgang SCHÖNER<sup>2</sup>  
Reinhard BÖHM<sup>1</sup> Thomas WIESINGER<sup>2</sup>  
Norbert HAMMER †<sup>1</sup> Wilfried WINIWARTER<sup>3</sup>



- <sup>1</sup> Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien  
<sup>2</sup> Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Wien  
<sup>3</sup> Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf

**Wien 1995**

---

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Publ.Nr. 361

ISSN 1016-6254

## **I M P R E S S U M**

Herausgeber: Peter Steinhauser  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik  
Hohe Warte 38, 1190 Wien  
Austria (Österreich)

Redaktion: Ingeborg Auer, Reinhard Böhm

Graphik und Layout: Elisabeth Scharm, Gabriele Seifriedsberger

Druck: Moore-Multicopy Ges.m.b.H.  
Muthgasse 42-46, 1190 Wien  
Austria (Österreich)

Verlag: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Die dadurch begründeten Rechte bleiben vorbehalten.  
Auszugsweiser Abdruck des Textes mit Quellenangabe ist gestattet.

Dieses Heft ist gewidmet dem Gedenken an

Univ.-Prof. Dr. Ferdinand Steinhauser,

der unserem Projekt seine ideelle und - im Rahmen der von ihm geleiteten Geophysikalischen Kommission der Österreichischen Akademie der Wissenschaften - auch finanzielle Unterstützung zukommen ließ,

und

Dr. Norbert Hammer,

unserem Mitarbeiter und Freund, der das Projekt mitbegründete, und den wir durch einen tragischen Bergunfall im März 1995 verloren haben.

Wir werden die Arbeit in ihrem Sinne fortführen.

# ZUM PROJEKT WURTENKEES

## Koordination

Reinhard Böhm und Norbert Hammer † (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien)

## Klimatologische Betreuung

Ingeborg Auer (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien)

## Geodäsie

Harald Auer (KELAG)

## Schneechemie

Anne Kasper (Institut für Analytische Chemie, TU-Wien)

Hans Puxbaum (Institut für Analytische Chemie, TU-Wien)

Wolfgang Vitovec (Institut für Analytische Chemie, TU-Wien)

Wilfried Winiwarter (Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf)

Wolfgang Schöner (Institut für Meteorologie und Geophysik, Univ. Wien)

## Feldmessungen

Helga Kromp-Kolb (Institut für Meteorologie und Physik, Univ. f. Boku., Wien)

Herbert Formayer (Institut für Meteorologie und Geophysik, Univ. Wien)

Wolfgang Schöner (Institut für Meteorologie und Geophysik, Univ. Wien)

Thomas Wiesinger (Institut für Meteorologie und Geophysik, Univ. Wien)

Richard Werner (Umweltinstitut des Landes Vorarlberg)

Günther Clement (KELAG)

Albert Egger (KELAG)

Janes Kersic (KELAG)

Rund 500 Tonnen Schnee geschaufelt und vermessen haben 1981 bis 1993, neben den oben genannten Personen, die folgenden Mitarbeiter, hauptsächlich Studenten der Universität Wien, Universität für Bodenkultur, Wien, Technische Universität Wien, Universität Salzburg, Universität Karlsruhe und Universität München:

K.Auzinger, M.Bauer, K.Baumann, T.Beer, Ch.Bernhofer, G.Bissinger, N.Blaumoser, M.Bogner, K.Brandner, M.Breycha, B.Budil, O.Chitta, W.Cubert, H.Dollfuß, M.Ehrendorfer, H.Fritzl, K.Fussenegger, G.Gartner, B.Gmeiner, R.Gleiwitsch, Ch.Gnäm, P.Gugganig, T.Haiden, M.Hammer, M.Hantel, M.Hartl, A.Haslinger, E.Haslinger, S.Hofinger, Ch.Holzner, Ch.Hufnagl, T.Karseska, H.Kartas, R.Kerschbaum, W.Knauder, P.Köck, N.Köpl, D.Kreiter, R.Kromp, W.Kuzelnig, L.Lemmel, R.Lenger, S.Lughofer, G.Lumasegger, R.Manhart, M.Mattern, M.Mayerl, K.Meissl, A.Melichar, K.Motschka, W.Mursch-Radlgruber, B.Nadler, E.Petz, L.Prohaska, W.Rack, Ch.Retitzky, A.Römer, F.Rubel, M.Ruhsam, F.Scharm, H.Scheifinger, T.Schoenemeyer, I.Schwarzl, H.Seidl, T.Singer, W.Spangl, G.Spreitzhofer, K.Spruzina, J.Stibor, H.Stockinger, J. Strobl, A.Tiesner, A.Trieb, C.Ullreich, E.Waba, Ph.Weihls, Ch.Widhalm, F.Wölfelmaier, B.Zeiner.

## Unterstützt wurde das Projekt durch

Österreichische Akademie der Wissenschaften, Geophysikalische Kommission, Projekt Wurtenkees

Österreichischer Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Projekt P7807-Geo

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, im Rahmen der Teilrechtsfähigkeit, Projekt Wurtenkees

KELAG (Kärntner Elektrizitäts AG)

Institut für Meteorologie und Geophysik, Univ. Wien (Gletscherseminar)

# INHALT

## SUMMARY

1. EINLEITUNG	11
2. GLETSCHERENTWICKLUNG SEIT 1850	12
2.1 Fotovergleiche	13
2.2 Längenänderungen	16
2.3 Kartometrische Daten	21
2.3.1 Kartographische Grundlagen	21
2.3.1.1 Historisches Kartenmaterial	21
2.3.1.2 Gletscherneuaufnahme 1991	22
2.3.2 Flächenänderungen	27
2.3.3 Höhen- und Volumsänderungen	30
3. DIE INTENSIV-UNTERSUCHUNGSPERIODE SEIT 1982	35
3.1 Das Meßnetz im Wurtenkeesgebiet	39
3.1.1 Niederschlagssummen	43
3.1.2 Schneehöhen	51
3.2 Die Messungen in der Altschneedecke	64
3.2.1 Meßmethoden	64
3.2.1.1 Schneeschächte	64
3.2.1.2 Schneebohrer	65
3.2.2 Ergebnisse	71
3.2.2.1 Schneedichte	71
3.2.2.2 Schneetemperatur	76
3.2.2.3 Wasserwert	80
3.3 Ablation	81
3.3.1 Horizontal- und Vertikalbewegung der Eisoberfläche	82
3.4 Massenbilanz (Winter, Sommer, Jahr)	85
3.4.1 Karten der spezifischen Massenbilanz	85
3.4.2 Resultate der Auswertung der Massenbilanzkarten	96
4. MASSENBILANZ UND KLIMA	114
4.1 Die Temperatursummenmethode	114
4.2 Erfahrungen mit der Temperatursummenmethode auf Hintereis- u. Vernagtferner	115
4.3 Anwendungen der Temperatursummenmethode auf das Wurtenkees	117
4.4 Eine 100jährige Rückrechnung des Massenhaushaltes des Wurtenkeeses mit Hilfe von Klimadaten	122
4.5 Vergleich mit den mittels der geodätischen Methode bestimmten Massenbilanzen	124
5. SCHNEECHEMIE	126
5.1 Einleitung	126
5.2 Probennahme und Analytik	127
5.3 Kontrolle und Analysenqualität	128
5.4 Untersuchung möglicher Kontaminationen im Labor	130
5.5 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	130
5.6 Örtliche und zeitliche Repräsentativität	131
5.7 Beziehungen der analysierten Parameter untereinander	132
5.8 Jahreszeitliche Abhängigkeit der Konzentrationen	134
5.9 Langjähriger mittlerer Verlauf der Konzentrationen	136
5.10 Schlußfolgerungen	139
LITERATUR	140

# CONTENTS

## SUMMARY

1.	INTRODUCTION	11
2.	GLACIER DEVELOPMENT SINCE 1850	12
2.1	Comparison of photographs	13
2.2	Length changes	16
2.3	Data based on maps	21
2.3.1	Glacier maps of Wurtenkees	21
2.3.1.1	Historic maps	21
2.3.1.2	The new glacier map of 1991	22
2.3.2	Areal changes	27
2.3.3	Height and volume changes	30
3.	THE SPECIAL INVESTIGATION PERIOD SINCE 1982	35
3.1	The local meteorological network in the area of Wurtenkees	39
3.1.1	Precipitation amounts	43
3.1.2	Snowdepths	51
3.2	Measurements in the annual snowpack	64
3.2.1	Methods	64
3.2.1.1	Snow pits	64
3.2.1.2	Snow sampler	65
3.2.2	Results	71
3.2.2.1	Snow density	71
3.2.2.2	Snow temperature	76
3.2.2.3	Water equivalent	80
3.3	Ablation	81
3.3.1	Horizontal and vertical movements of the glacier surface	82
3.4	Mass balance (winter, summer, year)	85
3.4.1	Maps of specific mass balance	85
3.4.2	Results of mass balance map analysis	96
4.	MASS BALANCE AND CLIMATE	114
4.1	Method of temperature sums	114
4.2	Experiences with the method of temperature sums for Hintereisferner and Vernagtferner	115
4.3	Application of the method of temperature sums on Wurtenkees	117
4.4	A 100 years recalculation of Wurtenkees mass balance using climate data	122
4.5	Comparison with geodetic mass balances	124
5.	SNOW CHEMISTRY	126
5.1	Introduction	126
5.2	Sampling and analytical methods	127
5.3	Quality control of analyses	128
5.4	Possible contamination in the laboratory	130
5.5	Reproductiveness of results	130
5.6	Spatial and temporal representativeness	131
5.7	Correlation of the analysed parameters	132
5.8	Seasonal variation of concentrations	134
5.9	Time series of concentrations and depositions	136
5.10	Conclusions	139
	REFERENCES	140

## SUMMARY

This summary, together with chapter headings, table and figure legends in English should allow some understanding of the paper also for non German speaking readers.

The paper gives a synopsis of the glaciological research project Wurtenkees which has been carried out since 1982 in the Sonnblick region in the Austrian Alps. Wurtenkees is a small glacier south of the Alpine main ridge only a few kms away from Sonnblick observatory. It was chosen for intensive investigations because of its deviating retreat behaviour compared with that of adjacent glaciers, because of its vicinity to Sonnblick observatory with its more than 100 years long climatic time series on a mountain top of 3100 m asl and because of the urgent need of glaciological research for more glaciers with direct mass balance data. Because of the large amount of field work necessary for such investigations, the number of mass balance data sets is rather small - also in the Eastern Alps (the region with highest spatial density of mass balance studies) there are only seven glaciers (including Wurtenkees) with at least 10 years mass balance data sets. Wurtenkees is the easternmost of them, situated in a mountain group with only small areas above 3000 m and therefore with glaciers very sensitive for climate warming. Wurtenkees is an example for a glacier at the limit of its existence and therefore an interesting object of research in respect to recent climate change discussion, too.

The main topics of the project are the following:

To work up the historic data including photos, maps and length measurements (chapter 2), to carry out mass balance field measurements for winter, summer and annual balances (chapter 3), to model mass balance using the climatic data set of Sonnblick (chapter 4) and to analyze snow chemistry of the winter snowpack (chapter 5).

Processing of historic data shows a weak retreat of Wurtenkees during the period 1850 to 1920 (less than 200m length loss and 10% area loss), and after that a continuously accelerating retreat of all size parameters (length, area, volume) up to now. Since 1930 Wurtenkees has belonged to the strongest retreating East Alpine glaciers and didn't show the recovering during the 1960ies and 70ies which was typical for most of the other Alpine glaciers. Up to now Wurtenkees has retreated about 1400 m (western part) and 1900m (eastern part) from its maximum of 3500m around 1850. Now it covers 37% of its 1850 area, has lost about 50m of ice thickness (200m at the former terminus) and about 200 million tons of mass. During the 1970ies it has separated into two parts, one of which (the western one) is going to vanish completely in the near future under the actual climatic conditions.

On the eastern part of the glacier field measurements were carried out since 1982/83 in May and September to determine specific mass balance for winter, summer and the whole budget year using the glaciological method. Those data bring new information into glaciology because of the above mentioned special characteristics of Wurtenkees and because of the winter balancing for which very few data are available elsewhere (none in the Eastern Alps). Climatological information about the vertical structure of temperature and density of the winter snowpack has been gained. The evaluation of the mass balance maps underline the special characteristics of Wurtenkees, compared with other glaciers for which such data are available. Wurtenkees shows special features of vertical mass balance gradients with no continuous increase with height but a winter and summer maximum in an orographically shaded area in the central part of the glacier and minima in the lower and higher parts.

There are high correlations between mean specific mass balance and accumulation area ratio ( $S_c/S$ ) and the equilibrium line altitude as it is also known from other glaciers. Winter balance is not significantly correlated with summer and annual balance. This confirms the a priori assumption of Alpine glaciology that summer climate alone is responsible for the annual net balance. During the period of 1982 - 1993 the mean specific annual net balance of Wurtenkees was  $-800 \text{ kg/m}^2$ , resulting from a mean winter gain of  $1277 \text{ kg/m}^2$  and a mean summer loss of  $-2077 \text{ kg/m}^2$ . Compared with other Alpine glaciers with complete mass balance series in the period of investigation Wurtenkees balanced more negative than the average of East Alpine glaciers and approximately as negative as the average of West Alpine ones.

With regressive methods following the reduced temperature sum method developed for glaciers in the Ötztal (Austria) about 80% of the variance of mean specific mass balance of Wurtenkees could be explained by Sonnblick climate data. The four different models (using different combinations of positive temperature sums, precipitation, snow and two different lengths of ablation period) brought only slightly, not significantly different results. An ablation period length May to October had slightly better results for the period with direct mass balance measurements, which had strong positive temperature deviations from normal. The best fit for the long term modelled series (compared with geodetic data) on the other hand was that using only May to September as ablation period. The model mass balance series of Wurtenkees goes back until 1890, thus being more than 100 years long. It is in very good accordance to the geodetic data, shows the typical characteristics of an East Alpine glacier in the case of the recovering period around 1920, the ongoing retreat in the 1930ies to the 1950ies and again in the 1980ies and 90ies. It also simulates the Wurtenkees specific strong retreat during the 1960ies and 1970ies, when most of the other Alpine glaciers balanced positively. The accumulated mass balance model data show a total loss of about 50m of water equivalent for Wurtenkees since 1890.

The snow pits needed for winter balancing were also used to take samples for chemical analysis to obtain information about the deposition of acidic components on a high alpine site in background conditions without nearby sources of pollution. The chemical analyses were part of the EUROTRAC-ALPTRAC project, aiming at the long range transport of air pollution to and across the Alps. Samples were taken from 10 to 10 cm in complete vertical profiles of the winter snowpack and were analysed for electric conductivity, PH-value, chloride, nitrate and sulphate during the whole period of investigation, since 1985 also for sodium, ammonia and potash. Calculated were mean concentration and total deposition. Within the vertical profiles seasonal variations could be detected with maxima of pollution in spring and minima in winter, caused by the different vertical mixing processes which cut off the high Alpine site from the lowland sources under the stable winter conditions. The sodium/chloride ratio allowed some rough estimation of sources in maritime regions. An exact dating of the profiles to gain a better source information by calculated trajectories is still in the state of testing. The 11 years time series of the mean concentrations show a decrease of sulphate, a constancy of nitrate and an interesting increase of ammonia, for which up to now no emission estimates of European coverage are existing.

## 1. EINLEITUNG

### 1. INTRODUCTION

Seit 1896 werden in der Goldberggruppe in den Hohen Tauern Gletscheruntersuchungen durchgeführt. PENCK, 1897, berichtet über die Installierung von Gletschermeßmarken im Vorland der Zunge des Wurtenkeeses sowie vor vier weiteren Gletscherzungen der Goldberggruppe. In der Folge wurden die Längenänderungen des Wurtenkeeses laufend gemessen und auch genauere Beschreibungen und Untersuchungen der Veränderungen des Gletschers durchgeführt. Dabei sind vor allem die detaillierteren Arbeiten von KINZL, 1928, LICHTENECKER, 1935, TOLLNER, 1951 und BÖHM, 1984, hervorzuheben. 1981 wurde damit begonnen, die Meßtätigkeit auf dem Wurtenkees zu intensivieren. Der Arbeitsschwerpunkt des Projekts Wurtenkees wurde auf Massenbilanzbestimmungen nach der direkten glaziologischen Methode gelegt. Am Rande dieses zentralen Themas wurden einige ergänzende bzw. vervollständigende Untersuchungen durchgeführt, die, zusammen mit den Massenbilanzierungen und deren Verknüpfung mit den in unmittelbarer Nähe des Gletschers erhobenen meteorologischen Meßdaten des Sonnblick-Observatoriums, das Wurtenkees zu einem in seinem Verhalten gut beschreibbaren Gletscher machen.

Zur Durchführung der zum Teil aufwendigen und arbeitsintensiven Feldmessungen und anderer Teilprojekte konnte mit Hilfe von Prof. F. Steinhauser die Unterstützung der Akademie der Wissenschaften gewonnen werden. Ein großer Teil der Feldmessungen kann im Rahmen von Praktika des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien durchgeführt werden. Der Hochalpinendienst und die Vermessungsgruppe der KELAG (Kärntner Elektrizitäts AG) führen die Winterbetreuung des permanenten Gletschermeßnetzes sowie die notwendigen geodätischen Vermessungen durch. In den letzten Jahren übernahm die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik im Rahmen ihrer Teilrechtsfähigkeit die finanzielle Grundausstattung des Projekts. Ein Teil der chemischen Schneeanalysen wurde im Rahmen des ALPTRAC-Projects SNO SP vom österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung unterstützt. Allen Personen und Organisationen und vor allem den vielen Mitarbeitern bei den Feldmessungen, deren persönlicher Einsatz die arbeitsaufwendigen Massenbilanzierungen erst ermöglicht, sei an dieser Stelle herzlich gedankt und die Hoffnung ausgesprochen, den begonnenen Weg auch in Zukunft weiter erfolgreich beschreiten zu können.

Als Projektziele wurden folgende Schwerpunkte formuliert:

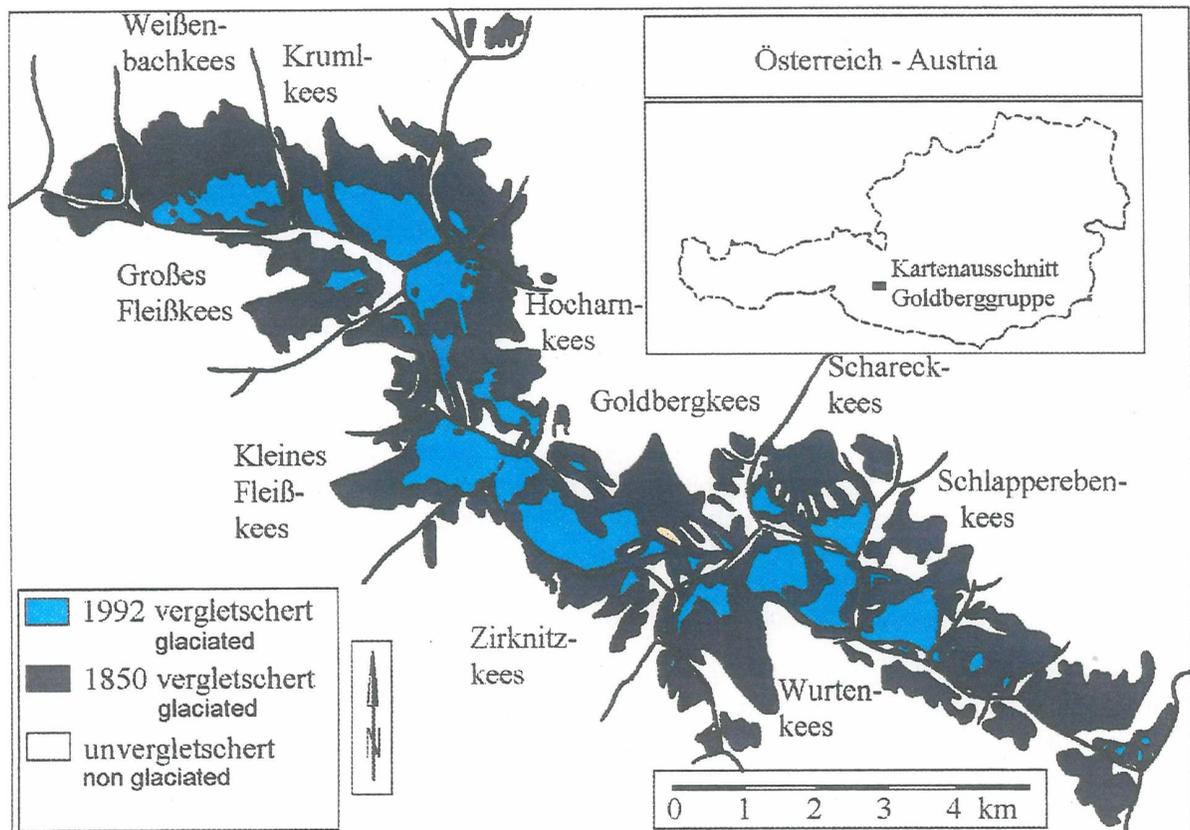
- Eine Aufarbeitung und einheitliche Darstellung des vor Projektbeginn bereits vorhandenen Datenmaterials (Längenmessungen, morphologische Beschreibungen, Fotos etc.).
- Eine einheitliche Bearbeitung der historischen Gletscherkarten sowie deren Ergänzung durch kartographische Neuaufnahmen bzw. durch nach bereits vorhandenen Luftbildern neu angefertigte Karten.
- Die kartometrische Auswertung des Kartenmaterials (geodätische Massenbilanzbestimmung).
- Die Erarbeitung von Massenbilanzen nach der glaziologischen Methode, getrennt für Winter- und Sommerbilanz.
- Die Verbindung der glaziologischen Massenbilanzdaten mit den meteorologischen Daten des Observatoriums auf dem Sonnblick.
- Parallel zu den glaziologischen Untersuchungen werden seit 1983 den Winterprofilen Schneeproben entnommen und diese am Institut für Analytische Chemie der TU-Wien auf Spuren der chemischen Hintergrundbelastung der akkumulierten Winterschneedecke untersucht.

Die vorliegende Veröffentlichung will alle im Rahmen oder in Verbindung mit dem Projekt Wurtenkees durchgeführten Teiluntersuchungen in einer zusammenfassenden Darstellung vorstellen, wobei auch auf schon veröffentlichte Arbeiten zurückgegriffen werden kann. Elf Jahre Massenbilanzen ermöglichen bereits erste Versuche, den Fragen der Zusammenhänge Klima - Gletscher nachzugehen, sind aber nur ein erster Schritt. Die Autoren hoffen, mit der zusammenfassenden Darstellung der Untersuchungstätigkeit auf dem Wurtenkees einen Beitrag für die glaziologische Forschung geliefert zu haben. Sie sind sich aber bewußt, daß eine Fortführung der Arbeiten notwendig ist, um die gewonnenen Ergebnisse weiter abzusichern.

## 2. GLETSCHERENTWICKLUNG SEIT 1850

### 2. GLACIER DEVELOPMENT SINCE 1850

In der Goldberggruppe in den Hohen Tauern, die Gipfelhöhen bis 3254 m erreicht, waren zur Zeit des letzten Gletscherhochstandes um 1850 34 km<sup>2</sup> vergletschert, bis 1992 ist diese Fläche auf etwa 1/4 (8,5 km<sup>2</sup>) zurückgegangen (BÖHM, 1994). Abbildung 2.1 gibt die Lage und Ausdehnung der Gletscher der Goldberggruppe um 1850 und 1992 wieder. Auch die Hauptgletscher der Gruppe sind nicht sehr groß. Ihre Flächen betragen zur Zeit des Maximalstandes um 1850 jeweils weniger als 4 km<sup>2</sup>, derzeit bereits weniger als 2 km<sup>2</sup>. Für glaziologische Untersuchungen sind sie vor allem durch ihre Nähe zum Standort Sonnblick-Observatorium interessant, für den lückenlose klimatologische Datensätze seit 1886 existieren (vergl. AUER et al., 1993a und 1993b).



**Abb. 2.1: Das vergletscherte Gebiet der Goldberggruppe 1850 und 1992**

**Fig. 2.1: The glaciated areas of Goldberggruppe 1850 and 1992**

Das Wurtenkees wurde aus zwei Gründen für Massenbilanzstudien ausgewählt:

Einerseits ermöglichen seine günstige Erreichbarkeit und seine relativ ungefährliche Begehbarkeit Feldarbeiten auch zur Zeit der maximalen Winterakkumulation, und andererseits zeigt dieser Gletscher im Vergleich mit der Mehrzahl der übrigen Ostalpengletscher in den letzten Dezennien abnorm starken Rückgang, dessen Ursachen nachzugehen interessant schien.

Im 19. Jahrhundert war das Wurtenkees der zweitgrößte Gletscher der Goldberggruppe und es entsprach damals mit einer Eisdicke von etwa 200 m im Zungenbereich als einziger am ehesten dem Typus des alpinen Talgletschers. Heute hingegen bietet es sich nach einer Teilung in zwei (1976), dann in drei Teile (1990) in einem Stadium weit fortgeschrittenen Zerfalls dar, der auch in der gletschergünstigen Zeitspanne von 1960 bis 1980 nicht aufhörte sondern sich noch verstärkte. Bis zu seiner Teilung handelte es sich beim Wurtenkees um einen Gletscher, dessen Zunge von zwei

getrennten Nährgebieten gespeist wurde: den Firnflächen unter dem Alteck und dem Gebiet unter dem Kamm Schareck - Baumbachspitze - Weinflaschenkopf. Eine deutlich sichtbare Mittelmoräne markierte die Nahtstelle zwischen den beiden Gletscherteilen, die seit 1976 nicht mehr zusammenhängen. Sie werden seither als "Alteck-Teilgletscher" oder "westliches Wurtenkees" bzw. als "Schareck-Teilgletscher" oder "östliches Wurtenkees" bezeichnet. Seit der neuerlichen Teilung, die im Jahr 1990 endgültig vollzogen war, muß nun auch von einem oberen- und unteren östlichen Wurtenkees gesprochen werden.

## 2.1 FOTOVERGLEICHE

### 2.1 COMPARISON OF PHOTOGRAPHS

Einen optischen Eindruck von den markanten landschaftlichen Veränderungen im oberen Wurtental durch das weitestgehende Verschwinden der Gletscherzunge des Wurtenkeeses vermittelt der Fotovergleich der Abbildung 2.1.1.

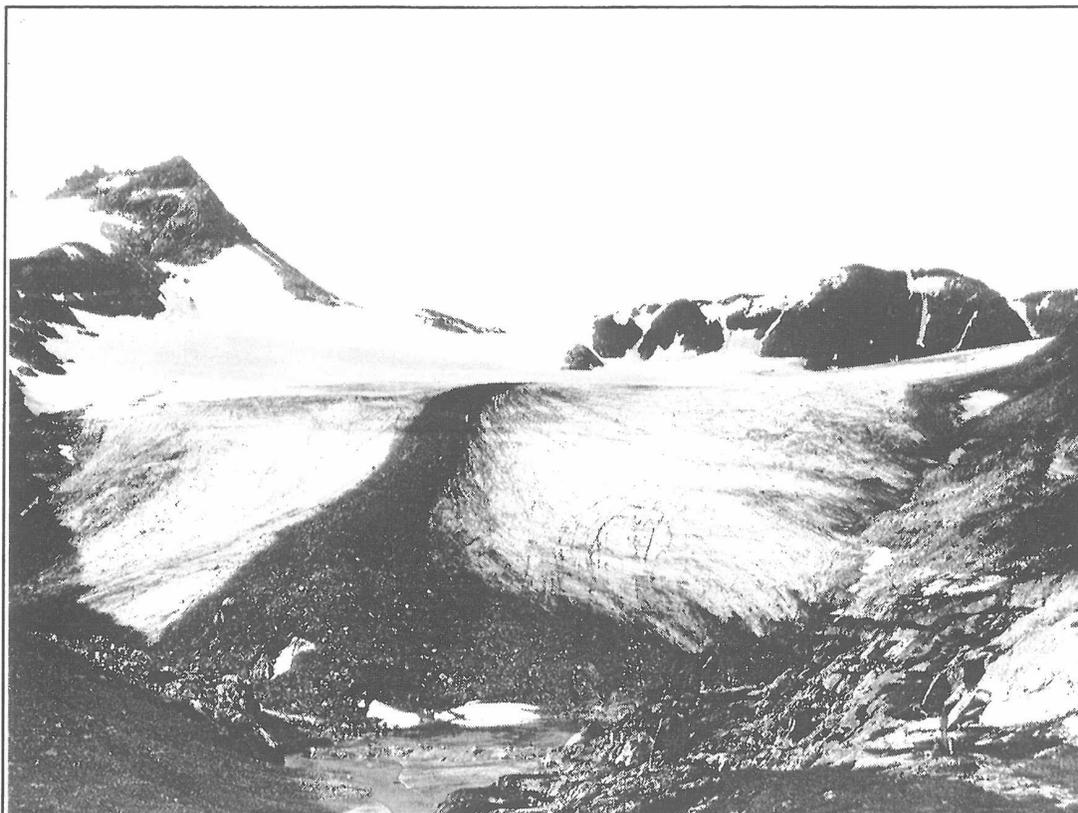
Das erste Foto dokumentiert die noch mächtig entwickelte Gletscherzunge, die 1896, also fast 50 Jahre nach dem Beginn des Gletscherrückzugs in den Alpen, nur sehr geringe Änderungen gegenüber dem Höchststand aufwies. Sie reicht noch beinahe bis zu der im Bildvordergrund sichtbaren 1850er-Endmoräne. Die Eisdicke ist noch sehr imposant, speziell wenn man sie mit der Höhe der "Niederer Scharte" im Bildhintergrund vergleicht, die den Eiskörper nur ganz schwach überragt. Der jetzt vollkommen freiliegende Felsriegel östlich (im Bild rechts) der Scharte war damals noch beinahe völlig im Eis untergetaucht, und an den Südhängen des Goldbergtauernkopfes (im Hintergrund rechts) ist noch kein Rückgang gegenüber dem Höchststand erkennbar. Die Mittelmoräne überragt das sie umgebende Blankeis nur unwesentlich, was ebenfalls ein Zeichen für einen noch sehr geringen Rückgang ist. Alles in allem kann das Foto von 1896 als gute Dokumentation des letzten Hochstandes des Gletschers bezeichnet werden, was gleichzeitig die erste Abweichung des Wurtenkeeses vom durchschnittlichen Rückzugsverhalten der Ostalpengletscher deutlich macht, die sich zu diesem Zeitpunkt bereits wesentlich weiter hinter ihre Maximalstände zurückgezogen hatten.

Das zweite Foto zeigt das Wurtenkees im Jahr 1949, also nach einem weiteren halben Jahrhundert. Es ist deutlich zu sehen, daß der Gletscherrückgang sich nun verstärkt hat. Die Zunge hat sich bereits weit zurückgezogen. Markant ist vor allem der Höhenverlust der Gletscherzunge, wenn man vergleicht, wie hoch die Niedere Scharte nun die Eisoberfläche überragt. Der Felsriegel und die Südhänge des Goldbergtauernkopfes sind gegenüber der Aufnahme von 1896 stark "gewachsen". Der Ablationsschutz, den das Eis unter dem Schutt der Mittelmoräne genießt, hat in dieser Zeit starken Gletscherrückgangs eine relative Erhöhung der Mittelmoräne gegenüber dem unbedeckten Eis rechts und links davon verursacht. Auch am Zungenende ragt aus diesem Grund ein schuttbedeckter Sporn als Fortsetzung der Mittelmoräne ins Vorland. Ansonsten bietet die Gletscherzunge trotz ihres Rückzuges noch immer das Bild eines zusammenhängenden Eiskörpers, der noch eine gewisse Aufwölbung zeigt.

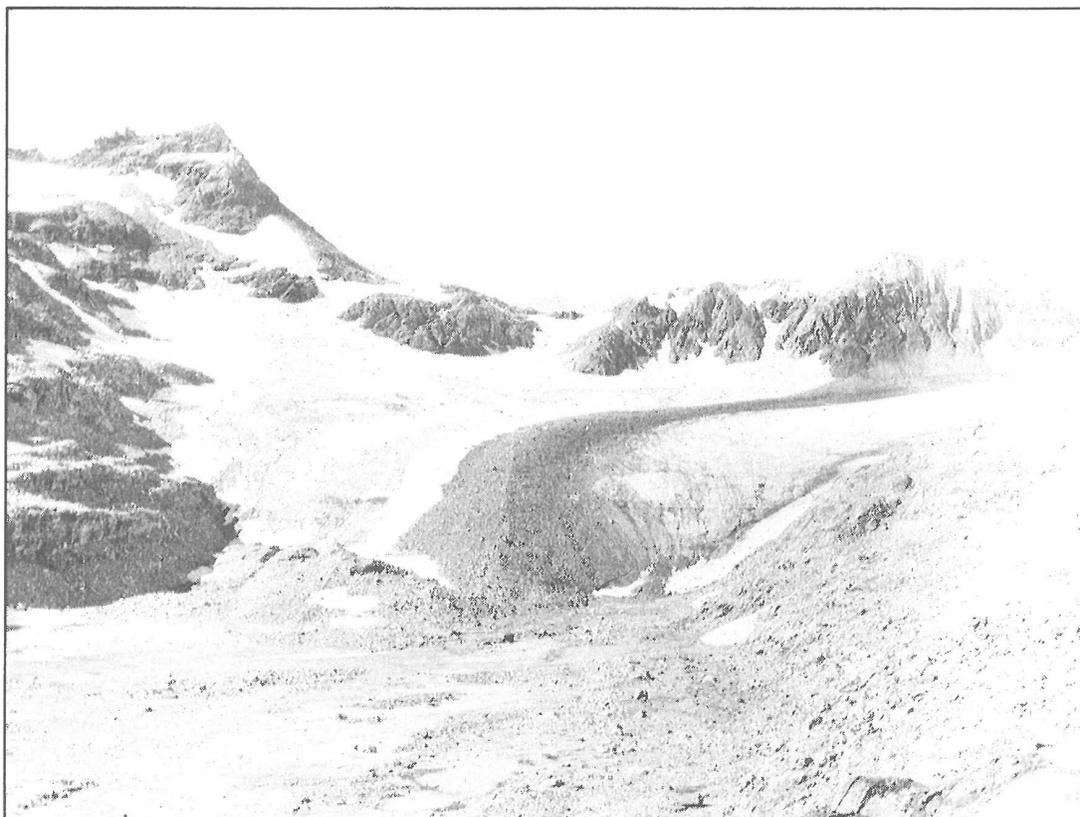
Gerade diesen Eindruck hat man beim dritten Foto nicht mehr, das nur zehn Jahre später aufgenommen worden ist. Die Gletscherzunge liegt nun, weitgehend bereits dem Untergrund angepaßt, flach und konkav im obersten Wurtental. Auch ohne Kenntnis des Untergrundes kann aufgrund dieses Fotos auf eine nur noch geringe Eisdicke im Zungenbereich geschlossen werden. Allerdings bildet die Gletscherzunge immer noch eine Einheit, von der bald darauf erfolgten Abtrennung des im Bild rechten Teils ist noch nichts zu bemerken.

Auf dem letzten der hier gezeigten Vergleichsfotos aus dem Jahr 1987 ist wieder eine - diesmal sprunghafte - Änderung zu sehen. Abgesehen von dem veränderten Vordergrund (Stausee Hochwurt) fällt das völlige Verschwinden des in den vorangegangenen Bildern rechts der Mittelmoräne zu sehenden Gletscherteils auf. Das nach der Teilung des Gletschers im Jahr 1976 neu entstandene Schareck-Zungenende hat sich zur Gänze aus dem Blickfeld zurückgezogen. Der Alteck-Gletscherteil endet mit einer Kalbungsfront in den Stausee, die größte Eisdicke besteht nach wie vor unter der ehemaligen Mittelmoräne.

1896



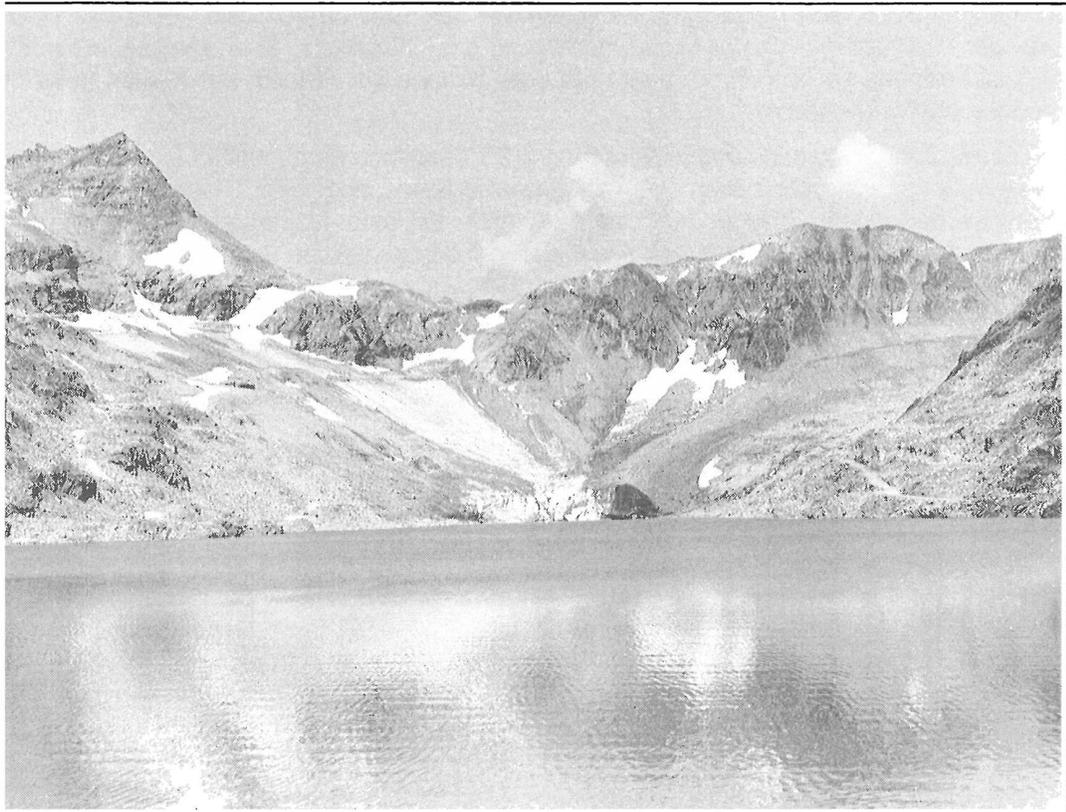
1949



**Abb. 2.1.1: Der Rückgang der Gletscherzunge des Wurtenkeeses, dokumentiert durch von gleichbleibendem Standort aus aufgenommenen Fotos aus den Jahren 1896, 1949, 1959 und 1987 (Fotos: 1896 von A. E. Forster, 1949, 1959 von H. Tollner, 1987 von R. Böhm)**



1959



1987

1.1: The retreat of the glacier terminus of Wurtenkees documented by photos taken from a fixed position in the years 1896, 1949, 1959 and 1987  
(Photos: 1896 by A. E. Forster, 1949, 1959 by H. Tollner, 1987 by R. Böhm)

Einen Eindruck von den starken Veränderungen des Wurtenkeeses vermittelt vor allem der Vergleich der Fotos von 1896 und 1987, die eine bedeutende Umgestaltung der Landschaft dieses Gebietes zeigen und auch ohne die in der Folge besprochenen quantitativen Analysen die Größenordnung des Gletscherrückgangs klarmachen.

## **2.2 LÄNGENÄNDERUNGEN**

### **2.2 LENGTH CHANGES**

Diese seit Ende des 19. Jahrhunderts auf Anregung von RICHTER, 1894 und FINSTERWALDER, 1891, für eine große Anzahl von Alpengletschern durchgeführten Messungen stellen eine erste Annäherung an das Problem der Quantifizierung der Gletscherschwankungen dar. Der Vorteil der Methode liegt in ihrer Einfachheit, die es erlaubt, eine große Zahl von Gletschern (in Österreich zur Zeit mehr als 100) unter Observanz zu halten und diese Messungen regelmäßig durchzuführen. Der Nachteil der Methode ist allerdings, daß das eindimensionale Verhalten der Gletscherzunge erst die Resultierende der im einzelnen komplizierten Wirkungskette vom Klima und Wetter über den Wärmehaushalt der Gletscheroberfläche, die Thermodynamik und den Massenhaushalt des Eiskörpers, die Topographie und Beschaffenheit des Untergrundes sowie die Fließbewegung ist, die zum schlußendlichen Vorstoß oder Rückzug des Zungenendes führt.

Im Sonnblickgebiet wurden die ersten Gletschermarken im Jahr 1896 angelegt (vergleiche PENCK, 1897) und seither für die drei Hauptgletscher, Goldbergkees, Kleines Fleißkees und Wurtenkees regelmäßig nachvermessen, betreut bzw. dem Gletscherrückgang entsprechend versetzt. Die Meßwerte wurden und werden in den Mitteilungen des Alpenvereins und den Jahresberichten des Sonnblickvereins publiziert, eine Zusammenstellung 1896 bis 1983 ist in BÖHM, 1984, enthalten.

Zur Aufstellung einer langjährigen Längenänderungskurve eines Gletschers können die Originalmeßdaten im allgemeinen nicht unkorrigiert verwendet werden. Gründe dafür sind etwa das Nichtübereinstimmen der Meßrichtung mit der Rückzugsrichtung des Gletschers, Schwierigkeiten der Erkennung des Gletscherrandes bei schuttbedecktem Eis oder Schnee im Vorland, die Neigung des Geländes, nicht repräsentative Meßpunkte, u.a.m.

Der in Tabelle 2.2.1 enthaltene und in Abbildung 2.2.1 graphisch dargestellte Längenänderungsverlauf des Wurtenkeeses wurde aus den Originalmeßdaten abgeleitet, wobei die vorhandenen Kartenaufnahmen (siehe Kapitel 2.3) als Fixpunkte für eine Korrektur verwendet wurden. Die Zahlenwerte der Tabelle verstehen sich somit als Horizontalprojektion der Längenänderungen entlang der in Abbildung 2.3.2.1 eingezeichneten Längsprofile, wobei die dadurch entstehenden Unterschiede zu den im geneigten Gelände gemessenen Werten im Fall der Zunge des Wurtenkeeses infolge der relativ geringen Geländeneigung nur klein sind.

Tab. 2.2.1: Längenänderungen des Wurtenkeeses, 1850-1994. Abgeleitet aus Messungen von Vorlandmarken, korrigiert nach den kartographischen Aufnahmen, projiziert auf horizontale Fläche, parallel zu den Längsprofilen aus Abb. 2.3.2.1

Tab. 2.2.1: Length changes of Wurtenkees, 1850-1994. Derived from distances to fixed marks, corrected according to glacier maps, projected to horizontal area, parallel to the length profiles in Fig. 2.3.2.1

Längenänderungen westliches Wurtenkees  
Length changes Western Wurtenkees

$\Delta l$ (m) zu 1850 to 1850	$\Delta l$ (m) zu Vorj. to previous year	$\Delta l$ (m) zu 1850 to 1850	$\Delta l$ (m) zu Vorj. to previous year	$\Delta l$ (m) zu 1850 to 1850	$\Delta l$ (m) zu Vorj. to previous year
1850	<b>0</b>	1899	<b>-70</b>	1948	<b>-577</b>
1851	0	1900	<b>-70</b>	1949	<b>-580</b>
1852	0	1901	-77	1950	-603
1853	0	1902	<b>-83</b>	1951	<b>-630</b>
1854	0	1903	-90	1952	-642
1855	0	1904	-97	1953	<b>-655</b>
1856	0	1905	<b>-103</b>	1954	<b>-668</b>
1857	0	1906	-112	1955	<b>-671</b>
1858	0	1907	-121	1956	<b>-670</b>
1859	0	1908	-130	1957	-700
1860	0	1909	-139	1958	<b>-731</b>
1861	0	1910	-148	1959	<b>-731</b>
1862	0	1911	-153	1960	<b>-748</b>
1863	0	1912	-158	1961	<b>-774</b>
1864	0	1913	-163	1962	<b>-775</b>
1865	0	1914	-168	1963	<b>-810</b>
1866	0	1915	-174	1964	<b>-850</b>
1867	0	1916	-172	1965	<b>-843</b>
1868	0	1917	-168	1966	<b>-844</b>
1869	0	1918	-159	1967	<b>-846</b>
1870	0	1919	-153	1968	<b>-853</b>
1871	<b>0</b>	1920	<b>-150</b>	1969	<b>-880</b>
1872	-1	1921	-152	1970	<b>-884</b>
1873	-2	1922	-163	1971	<b>-903</b>
1874	-4	1923	-174	1972	-908
1875	-6	1924	<b>-187</b>	1973	<b>-914</b>
1876	-8	1925	<b>-197</b>	1974	<b>-915</b>
1877	-10	1926	<b>-211</b>	1975	<b>-907</b>
1878	-11	1927	<b>-224</b>	1976	<b>-913</b>
1879	-13	1928	<b>-242</b>	1977	-938
1880	-14	1929	-252	1978	-963
1881	-16	1930	<b>-262</b>	1979	<b>-986</b>
1882	-19	1931	<b>-264</b>	1980	-1035
1883	-21	1932	<b>-271</b>	1981	<b>-1085</b>
1884	-24	1933	<b>-285</b>	1982	<b>-1098</b>
1885	-27	1934	-300	1983	<b>-1182</b>
1886	-30	1935	-325	1984	-1202
1887	-33	1936	-346	1985	-1222
1888	-36	1937	-367	1986	-1243
1889	-39	1938	-388	1987	-1263
1890	-42	1939	-408	1988	-1284
1891	-45	1940	-428	1989	-1304
1892	-48	1941	-449	1990	-1325
1893	-51	1942	-470	1991	<b>-1339</b>
1894	-55	1943	-491	1992	<b>-1366</b>
1895	-58	1944	-512		
1896	<b>-62</b>	1945	-532		
1897	<b>-65</b>	1946	-553		
1898	<b>-68</b>	1947	<b>-575</b>		

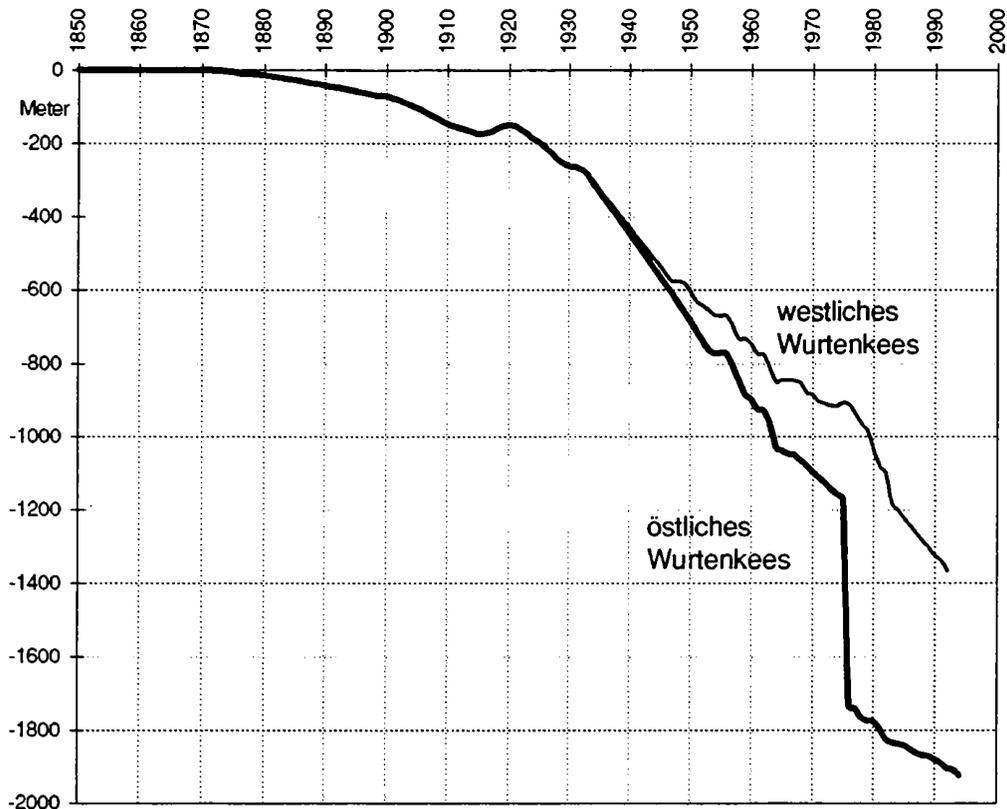
fett und kursiv gedruckt: Meßwerte (bold and italic: measured); normal: interpoliert (interpolated)

Fortsetzung Tab. 2.2.1

Längenänderungen östliches Wurtenkees  
Length changes Eastern Wurtenkees

	$\Delta l$ (m) zu 1850 to 1850	$\Delta l$ (m) zu Vorj. to previous year		$\Delta l$ (m) zu 1850 to 1850	$\Delta l$ (m) zu Vorj. to previous year		$\Delta l$ (m) zu 1850 to 1850	$\Delta l$ (m) zu Vorj. to previous
1850	<b>0</b>		1899	<b>-70</b>	-2	1948	-632	-26
1851	0	0	1900	<b>-70</b>	0	1949	-658	-26
1852	0	0	1901	-77	-7	1950	-684	-26
1853	0	0	1902	<b>-83</b>	-6	1951	-710	-26
1854	0	0	1903	-90	-7	1952	-736	-26
1855	0	0	1904	-97	-7	1953	<b>-761</b>	-25
1856	0	0	1905	<b>-103</b>	-6	1954	<b>-772</b>	-11
1857	0	0	1906	-112	-9	1955	<b>-770</b>	2
1858	0	0	1907	-121	-9	1956	<b>-773</b>	-3
1859	0	0	1908	-130	-9	1957	<b>-808</b>	-35
1860	0	0	1909	-139	-9	1958	<b>-843</b>	-35
1861	0	0	1910	-148	-9	1959	<b>-884</b>	-41
1862	0	0	1911	-153	-5	1960	<b>-898</b>	-14
1863	0	0	1912	-158	-5	1961	<b>-925</b>	-27
1864	0	0	1913	-163	-5	1962	<b>-930</b>	-5
1865	0	0	1914	-168	-5	1963	<b>-965</b>	-35
1866	0	0	1915	-174	-6	1964	<b>-1030</b>	-65
1867	0	0	1916	-172	2	1965	-1039	-9
1868	0	0	1917	-168	4	1966	<b>-1048</b>	-9
1869	0	0	1918	-159	9	1967	<b>-1050</b>	-2
1870	0	0	1919	-153	6	1968	-1065	-15
1871	<b>0</b>	0	1920	<b>-150</b>	3	1969	-1081	-16
1872	-1	-1	1921	-152	-2	1970	-1096	-15
1873	-2	-1	1922	-163	-11	1971	-1112	-16
1874	-4	-2	1923	-174	-11	1972	-1127	-15
1875	-6	-2	1924	<b>-187</b>	-13	1973	-1143	-16
1876	-8	-2	1925	<b>-197</b>	-10	1974	-1158	-15
1877	-10	-2	1926	<b>-211</b>	-14	1975	<b>-1174</b>	-16
1878	-11	-1	1927	<b>-224</b>	-13	1976	-1734	-560
1879	-13	-2	1928	<b>-242</b>	-18	1977	-1740	-6
1880	-14	-1	1929	<b>-252</b>	-10	1978	<b>-1765</b>	-25
1881	-16	-2	1930	<b>-262</b>	-10	1979	<b>-1773</b>	-8
1882	-19	-3	1931	<b>-264</b>	-2	1980	<b>-1776</b>	-3
1883	-21	-2	1932	<b>-271</b>	-7	1981	<b>-1795</b>	-19
1884	-24	-3	1933	<b>-285</b>	-14	1982	<b>-1823</b>	-28
1885	-27	-3	1934	-308	-23	1983	<b>-1833</b>	-10
1886	-30	-3	1935	-331	-23	1984	<b>-1836</b>	-3
1887	-33	-3	1936	-354	-23	1985	<b>-1841</b>	-5
1888	-36	-3	1937	-377	-23	1986	<b>-1850</b>	-9
1889	-39	-3	1938	-400	-23	1987	<b>-1862</b>	-12
1890	-42	-3	1939	-423	-23	1988	<b>-1869</b>	-7
1891	-45	-3	1940	-446	-23	1989	<b>-1870</b>	-1
1892	-48	-3	1941	-469	-23	1990	<b>-1879</b>	-9
1893	-51	-3	1942	-492	-23	1991	<b>-1889</b>	-10
1894	-55	-4	1943	-515	-23	1992	<b>-1904</b>	-15
1895	-58	-3	1944	-538	-23	1993	<b>-1909</b>	-5
1896	<b>-62</b>	-4	1945	-561	-23	1994	<b>-1924</b>	-15
1897	<b>-65</b>	-3	1946	-584	-23			
1898	<b>-68</b>	-3	1947	<b>-606</b>	-22			

fett und kursiv gedruckt: Meßwerte (bold and italic: measured); normal: interpoliert (interpolated)



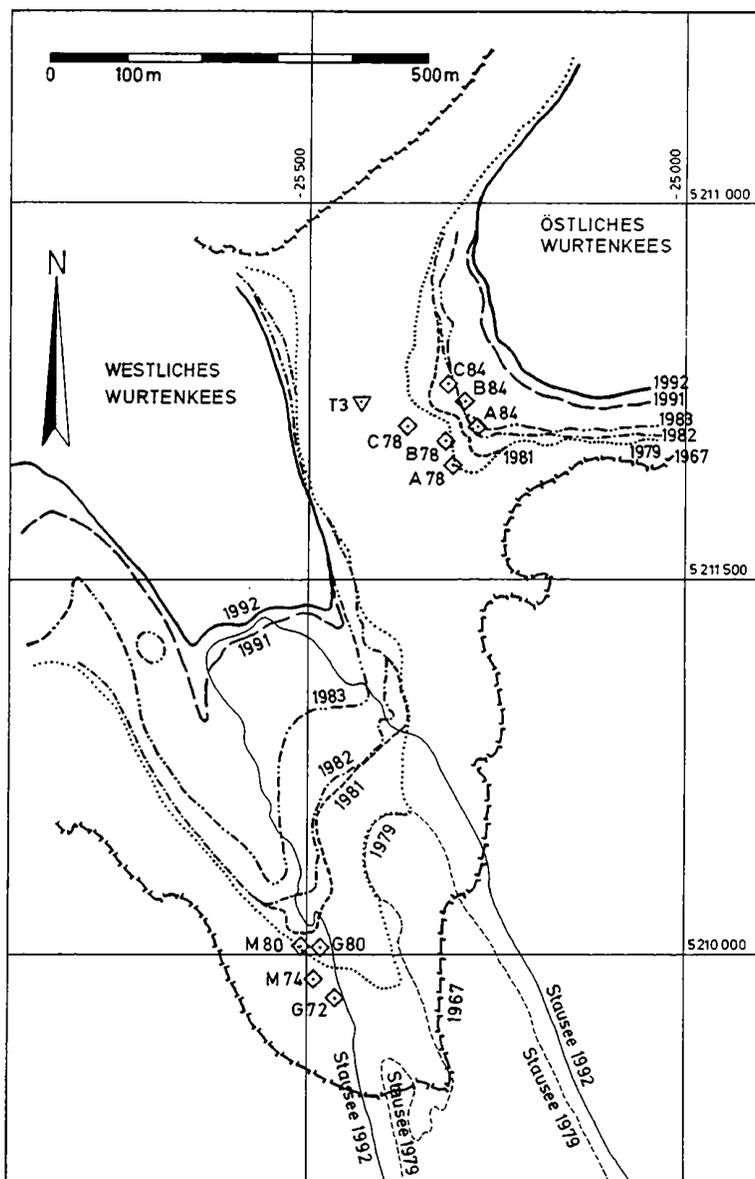
**Abb. 2.2.1: Der Längenrückgang des Wurtenkeeses seit dem Maximalstand um 1850**  
**Fig. 2.2.1: Length changes of Wurtenkees since the 1850 maximum**

Zunächst begann der Rückzug nach dem 1850er Hochstand nur sehr zögernd. 1871 - zum Zeitpunkt der ersten kartographischen Aufnahme - befand sich das Zungenende noch nahe der Endmoräne von 1850. Der gesamte Rückzug bis 1900 betrug nur 70 m. Im gleichen Zeitraum hatten die meisten anderen Alpengletscher bereits einen wesentlich stärkeren Rückzug hinter sich. Das benachbarte Goldbergkees hatte sich um 500 m zurückgezogen und das Kleine Fleißkees hatte schon 1871 etwa die Hälfte des gesamten Längenverlusts bis heute erlitten. Vor dem geringfügigen Vorstoß um 1920 hatte sich die Zunge um etwa 170 bis 180 m zurückgezogen, nach 1920 begann die zweite Rückzugsphase an einem Punkt, der etwa 150 m hinter der 1850er-Endmoräne liegt. Die Gesamtlänge des Gletschers, die 1850 3460 m betragen hatte, lag noch bei mehr als 3300m.

Während der nun folgenden, durch regelmäßige Messungen belegten Phase bis 1933 erfolgte ein relativ stetiger Rückzug um weitere 130 m. Bis etwa zu diesem Zeitpunkt kann man von einem einheitlichen Rückzugsverhalten beider Teile der Gletscherzunge sprechen. Nachdem ab etwa 1940 der Abreißprozeß des Schareck-Nährgebietes begonnen hatte, machte sich nun zunehmend ein unterschiedliches Verhalten der beiden Zungenteile rechts und links von der Mittelmoräne bemerkbar - 1930 bis 1953 war der Rückgang der Alteck-Zunge um etwa 100 m geringer als der der Schareck-Zunge. Diese Aufsplitterung ging in der Folge verstärkt weiter, die Differenz betrug bis 1967 bereits 200 m.

In den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts erfolgte die zweite abnorme Rückzugsphase des Wurtenkeeses. Während für die Zeitspanne 1930 bis 1960 die jährlichen Rückzugsbeträge mit 10 bis 25 m als im Rahmen des damals Üblichen bezeichnet werden konnten, erfolgte durch das großflächige Abschmelzen eines nur noch dünnen Gletscherbereichs zwischen 2450 und 2600 m ein sprunghafter Rückgang des Wurtenkeeses um mehr als 600 m in wenigen Jahren. Erst gegen Ende der 70er Jahre zeigte das (östliche) Wurtenkees an der nach der Teilung neu entstandenen Gletscherzunge wieder "normalen" Rückgang mit durchschnittlich 10 m pro Jahr.

An der Zunge des westlichen Wurttenkeeses sind herkömmliche Längenmessungen zur Zeit nicht möglich, da diese seit 1975 in den Stausee Hochwurtten mündet. Nur Kartenvergleiche erlauben den durch Kalbung künstlich hervorgerufenen Rückgang dieses Gletscherteils zu bestimmen. Die 1979, 1981, 1982, 1983, 1991 und 1992 erfolgten kartographischen Aufnahmen der Kalbungsfront zeigen dort in den 13 Jahren von 1979 bis 1992 einen starken Rückzug um 380 m (vergl. Abbildung 2.2.2).



**Abb. 2.2.2:** Kartographische Aufnahmen des Wurttenkees-Zungenbereichs von 1967 bis 1992 (Gauß-Krüger Koordinaten, Meridianstreifen M31)

**Fig. 2.2.2:** Maps of the Wurttenkees terminus region from 1967 to 1992 (Gauss-Krueger coordinates, meridian tract M31)

Das Wurttenkees hat somit zwar die in den Alpen allgemein beobachtbare Vorstoßperiode um 1920 mitgemacht, nicht aber die aktuelle mit dem Höhepunkt um 1980 (vergl. PATZELT, 1993), als dieser Gletscher gerade besonders starke Längenverluste hinnehmen mußte.

## 2.3 KARTOMETRISCHE DATEN

### 2.3 DATA BASED ON MAPS

#### 2.3.1 Kartographische Grundlagen

##### 2.3.1 Glacier maps of Wurtenkees

Die zweite und dritte Dimension der Gletscheränderungen erschließt sich durch den Vergleich von Karten, die in weiterer Folge auch zur Untersuchung der Volumsänderungen ausgewertet werden. Für das Wurtenkees stehen die in den Abschnitten 2.3.1.1 und 2.3.1.2 angegebenen kartographischen Darstellungen zur Verfügung.

##### 2.3.1.1 Historisches Kartenmaterial

##### 2.3.1.1 Historic maps

1. Karte von Illyrien, Section 1, Col. VIII, 1:28800, Aufnahmejahr 1807/08, CSYKANEK, K. u. k. militärgeograph. Inst., Wien
2. Originalaufnahme des Mölltales und Seitenwinkeltales, 1:25000, dz=100m, Aufnahmejahr 1871, DOMANSKY, K. u. k. militärgeograph. Inst., Wien
3. Karte der Sonnblickgletscher, 1:50000, dz=100m, Aufnahmejahr 1871, angefertigt nach Karte 2, RICHTER, 1888
4. Karte des Sonnblicks und Umgebung, 1:50000, dz=100m, Gletscherstand unklar, zwischen 1871 und 1892, FREYTAG, 1892
5. Karte des Wurtenkeeses, 1:10000, dz=50m, Gletscherstand 1871, vergrößert und Höhenlinien verdichtet unter Verwendung neuerer Aufnahmen, BÖHM, 1984
6. Karte des Wurtenkeeses, 1:10000, dz=10m, Gletscherstand 1896 (nur Gletscherzunge), PENCK, 1897
7. Kartenblatt 154/4 (Kolm Saigurn) der ÖK, 1:25000, dz=20m, Gletscherstand 1930, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien
8. Alpenvereinskarte Nr. 42 (Sonnblick), 1:25000, dz=20m, Gletscherstand 1930, Alpenvereinskartographie, Innsbruck, 1964
9. Karte des Wurtenkeeses 1:5000, dz=10m, Gletscherstand 1930, nach Karten 7. und 8., vergrößert, Höhenlinien verdichtet und nach neueren Aufnahmen korrigiert, Arbeitsgrundlage für das Wurtenkees-Projekt
10. Wie Karte 9, nur 1:10000, dz=20m, in BÖHM, 1984
11. Karte des Wurtenkeeses, 1:5000, dz=10m, Gletscherstand 1953, Fotogrammetrische Neuaufnahme nach Luftbildern am Inst. f. Fotogrammetrie der TU Wien, interne Arbeitsgrundlage für das Wurtenkees-Projekt
12. Wie Karte 11, nur 1:10000, dz=20m, in BÖHM, 1984
13. Karte des Wurtenkeeses, 1:5000, dz=10m, Gletscherstand 1967, interne Arbeitsgrundlage der KELAG, angefertigt von R.KOSTKA, Inst. f. Allg. Geod. u. Photogramm., TU Graz
14. Wie Karte 13, nur 1:10000, dz=20m, in BÖHM, 1984
15. Wie Karte 13, ergänzt durch Untergrundkarte nach seism. Eisdickemessungen des Inst. f. Met. u. Geophysik d. Univ. Wien, in BRÜCKL u. BITTMANN, 1977
16. Gesamtkarte der Gletscher des Sonnblickgebiets, 1:10000, dz=10m, Gletscherstand 1969, photogrammetr. Auswertung von Luftbildern der Gesamtbefliegung der österr. Gletscher, in PATZELT u. GROSZ, interne Arbeitsgrundlage am Inst. f. Hochalp. Forschung, Univ. Innsbruck

17. Karte des Wurtenkeeses, 1:5000, dz=10m, Gletscherstand 1979, fotogrammetr. Aufnahme nach Luftbildern am Inst. f. Fotogramm. d. TU Wien, angefertigt als Arbeitsgrundlage für das Wurtenkees-Projekt
18. Wie Karte 17, nur 1:10000, dz=20m, in BÖHM, 1984
19. Alpenvereinskarte Nr.42 (Sonnblick), 1:25000, dz=20m, Gletscherstand 1981, Alpenvereinskartographie, Innsbruck
20. Karte von Alteck- und Schareck-Zungenenden, 1:5000, 2-dimensional, Gletscherstand Sept. 1981, terrestrische Vermessung der KELAG (H. AUER) für das Wurtenkees-Projekt
21. Schneekartierung Östliches Wurtenkees, 1:5000, 2-dimensional, Gletscherstand Sept. 1982, fotogramm. Aufn. nach Luftbildern am Inst. f. Fotogramm.d.TU-Wien für das Wurtenkees-Projekt
22. Farorthophotokarte Nationalpark Hohe Tauern, Blätter 4322-100 und 4322-101, 1:10000, dz=10m, Gletscherstand 22./23.7.1983, FIBICH u. ZIRM, 1987
23. Schneekartierung Wurtenkees, 1:5000, 2-dimensional, Gletscherstand Sept.1983, terrestr. fotogrammetr. vermessen, (Diplomarb. am Inst. f. Fotogramm. d. TU-Wien), MEISSL, 1985
24. Kartenblatt 154/4 (Kolm Saigurn) der ÖK, 1:25000, dz=20m, Gletscherstand 1986, Bundesamt f. Eich-und Vermessungswesen, Wien
25. Karte des östlichen Wurtenkeeses, 1:5000, dz=10m, Gletscherstand Sept.1991, terrestrische Vermessung von W. SCHÖNER u. H. AUER, interne Arbeitsgrundlage für das Wurtenkees-Projekt
26. Österreichische Luftbildkarte, Blätter 4322-100 und 4322-101, 1:10000, 2-dimensional, Gletscherstand September 1992

### 2.3.1.2 Gletscherneuaufnahme 1991

#### 2.3.1.2 The new glacier map of 1991

Die Karten 11 (1953), 17 (1979) und 25 (1991) wurden für das Projekt Wurtenkees neu angefertigt, die Karten 11 und 17 stereophotogrammetrisch aufgrund von Luftbildern (siehe auch BÖHM et al., 1984), Karte 25 auf klassisch terrestrische Art, wie in der Folge beschrieben (W. SCHÖNER, 1992).

Im Oktober 1991 wurden die Topographie und der Gletscherumriß des östlichen Wurtenkeeses (Schareckteil) neu vermessen. Der Gletscher war zu diesem Zeitpunkt fast völlig ausgeapert und daher für eine Neuvermessung bestens geeignet. Ziel war die Erarbeitung einer neuen Arbeitskarte im Maßstab 1:5000 für die weiteren glaziologischen Untersuchungen, sowie die Fortsetzung der Messung der Massenbilanz nach der geodätischen Methode.

Die Feldarbeiten wurden in Zusammenarbeit zwischen der Vermessungsgruppe der KELAG (H. Auer) und der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (W. Schöner) durchgeführt. Die Geländeaufnahme erfolgte mittels elektronischem Theodolit mit automatischer Meßwertspeicherung. Insgesamt wurden 530 Punkte der Gletscheroberfläche und des Gletscherrandes lage- und höhenmäßig eingemessen, um die Topographie und den Umriß des Gletschers zu erfassen. Zusätzlich wurden alle Teile des Gletschers mit der Projektkamera (Mamiya RB67 pro S) photographiert, um die punkthafte Information der Theodolitvermessung besser in eine linienhafte Darstellung einer Karte umwandeln zu können.

Die Umwandlung der punkthafte Höheninformation in einen Isohypsenplan erfolgte mittels des Programmpaketes SCOP am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU-Wien. Dazu wurde zuerst ein digitales Höhenmodell errechnet, aus dem dann Höhenlinien interpoliert wurden. Die Konstruktion des Gletscherumrisses erfolgte händisch aus den vermessenen Umrißpunkten und den Fotos. Anschließend wurden Höheninformation, Gletscherumriß, Koordinatengitter, markante Punkte und Beschriftung zu einer Arbeitskarte 1:5000, Isohypsendistanz 10 m hochgezeichnet, die in Abbildung 2.3.1.1 verkleinert auf 1:10000 dargestellt ist.

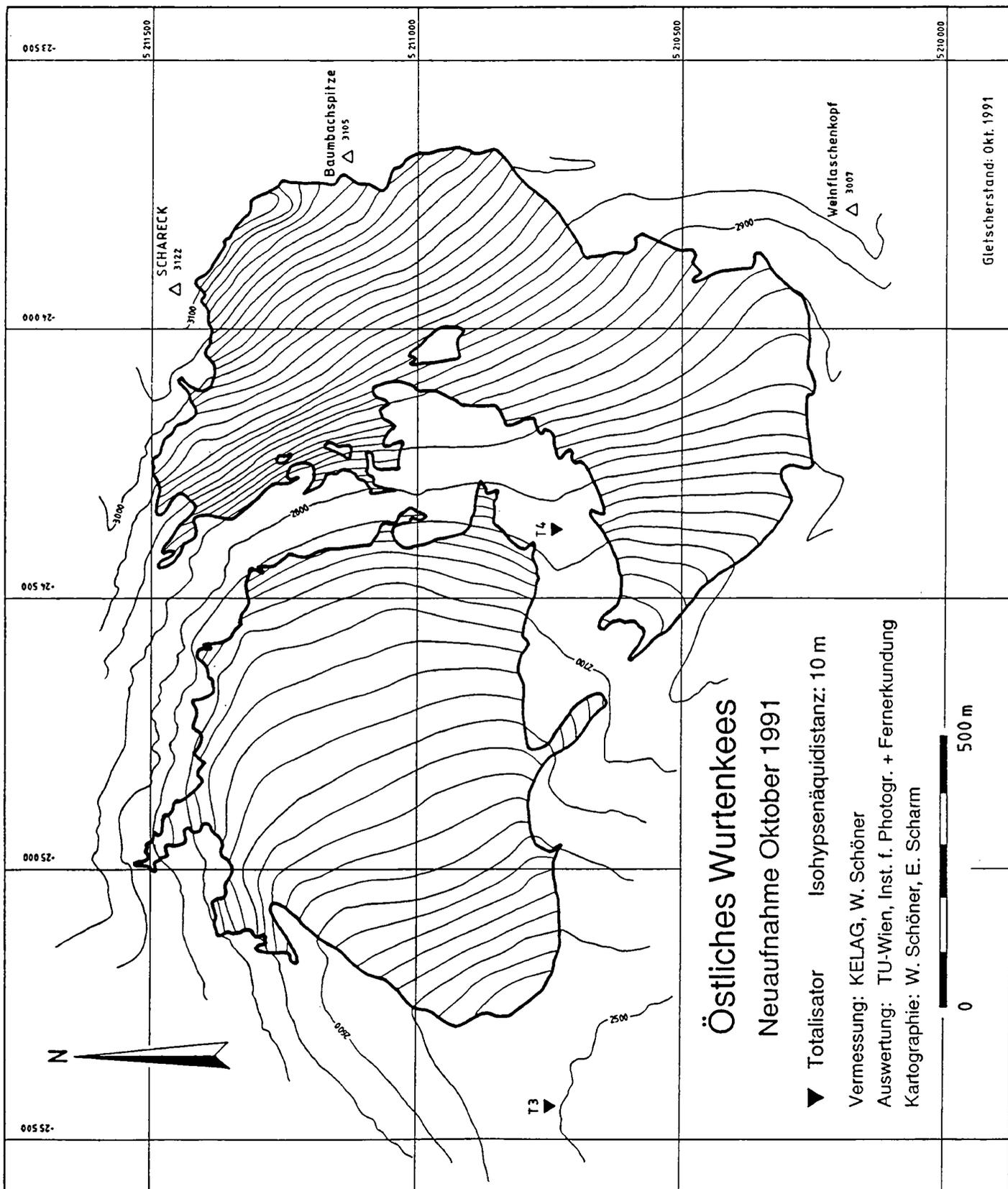


Abb. 2.3.1.1: Gletscherkarte 1:10000 des östlichen Wurtenkeeses im Oktober 1991  
 Fig. 2.3.1.1: Glacier map 1:10000 of Eastern Wurtenkees, October 1991

Zusätzlich zur Topographie und zum Umriß des östlichen Wurtenkeeses ist in der Arbeitskarte auch das Gletscherende des westlichen Wurtenkeeses (ehemalige Kalbungsfront in den Stausee) enthalten, um dessen Rückgang seit 1979 dokumentieren zu können.

Die nun vorliegende Karte erlaubt eine Bestimmung der Massenbilanz mittels der geodätischen Methode seit der letzten Aufnahme 1979. Dabei wurde, wie auch bei den kartometrischen Angaben in den folgenden Abschnitten, die Methode von Finsterwalder verwendet (beschrieben in FINSTERWALDER, 1953). Eine Berechnung des Volumensunterschiedes mittels digitalem Höhenmodell wurde nicht durchgeführt, da die Karte 1979 nicht in digitaler Form vorliegt. Eine derartige Berechnung ist im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU-Wien geplant.

In Tabelle 2.3.1.1 sind die mittlere Höhenänderung und die mittlere Volumsänderung des östlichen Wurtenkeeses, sowie die absoluten Flächen und die Flächenänderungen für die einzelnen Höhenstufen (dz=50 m) im Vergleich zu 1979 dargestellt. Die Abbildungen 2.3.1.2 und 2.3.1.3 zeigen die Werte der Tabelle ergänzt durch frühere kartographische Termine in graphischer Form.

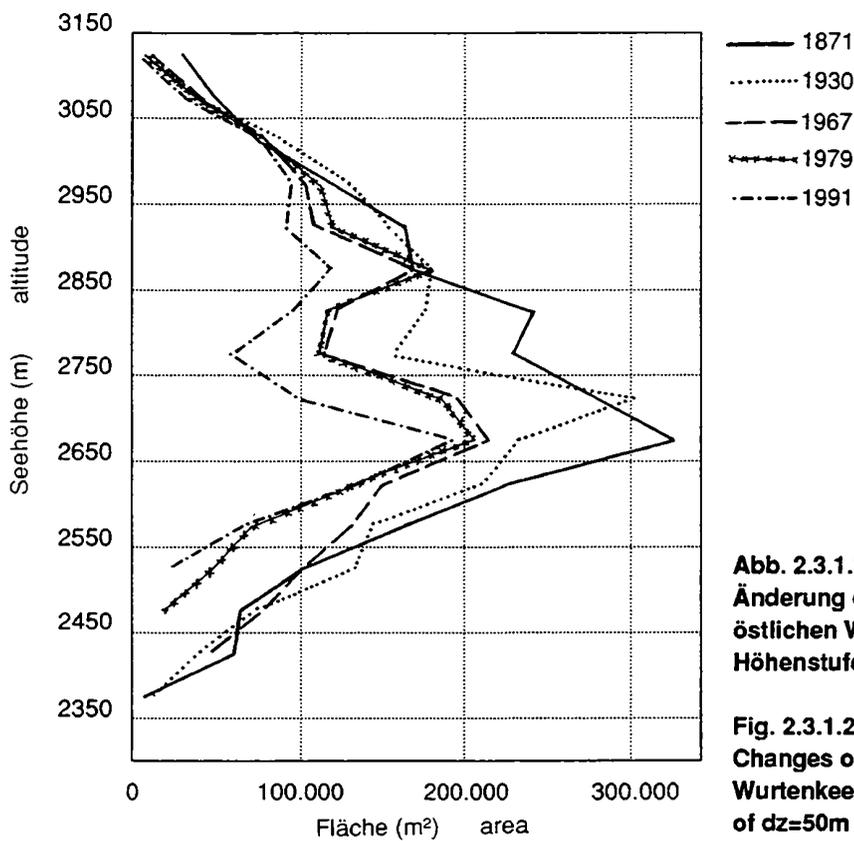
**Tab. 2.3.1.1: Flächen-, Höhen- und Volumsänderungen des östlichen Wurtenkeeses 1979-1991 in Höhenstufen von dz=50m**

**Tab.2.3.1.1: Changes of area, height and volume of Eastern Wurtenkees 1979-1991 in altitude steps of dz=50m**

Höhenstufe altitude (m)	Fläche area 1979 (m <sup>2</sup> )	Fläche area 1991 (m <sup>2</sup> )	Flächen- änderung change of area Δ 1979-91 (m <sup>2</sup> )	Flächen- änderung change of area Δ 1979-91 (%)	Volumenänderung change of volume 1979-91 (m <sup>3</sup> )	Höhenänderung change of height 1979-91 (m)	mittl. Höhenänderung (m/Jahr) mean change of height (m/year) 1979-91
-2450	19000		-19000	-100			
2450-2500	31000		-31000	-100			
2500-2550	49000	24200	-24800	-51	-266900	-22,06	-1,84
2550-2600	73000	66600	-6400	-9	-1038925	-15,20	-1,27
2600-2650	135000	137600	2600	2	-1608000	-11,45	-0,95
2650-2700	207000	194300	-12700	-6	-2306100	-11,44	-0,95
2700-2750	185000	99000	-86000	-46	-2091025	-14,35	-1,20
2750-2800	111000	59000	-52000	-47	-1234125	-12,81	-1,07
2800-2850	118000	95100	-22900	-19	-1154725	-9,89	-0,82
2850-2900	180000	114000	-65200	-36	-1250650	-9,75	-0,80
2900-2950	119000	91500	-27500	-23	-1105075	-11,62	-0,97
2950-3000	112000	95800	-16200	-14	-820525	-8,21	-0,68
3000-3050	82000	74600	-7400	-9	-496275	-6,54	-0,55
3050-3100	44000	35100	-8900	-20	-277925	-6,58	-0,55
3100-	8000	6100	-1900	-24	-29120	-2,86	-0,24
Gesamt total	1473000	1093700	-379300	-26	-13679370		

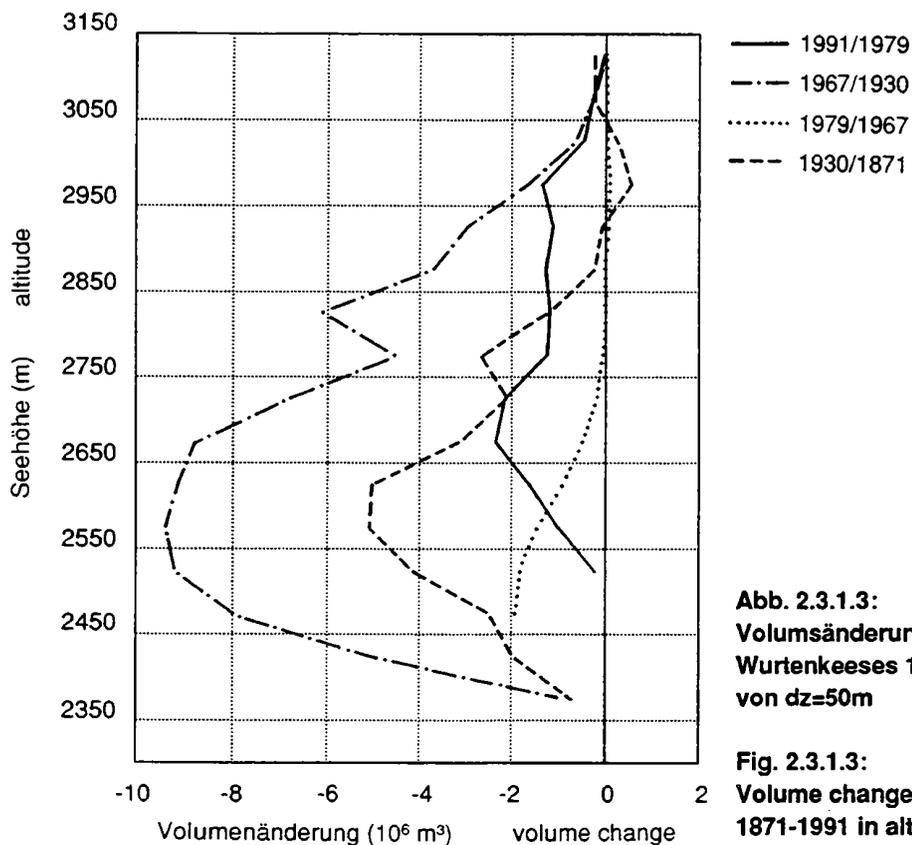
Deutlich ist in Abbildung 2.3.1.2 zu erkennen, daß sich der flächenmäßige Rückzug des Gletschers vorwiegend im mittleren Höhenbereich und im Zungenbereich vollzog. Im Bereich zwischen 2600 und 2700 m bzw. oberhalb von 3000m war nahezu kein Rückgang feststellbar, wobei jedoch beachtet werden muß, daß die Veränderung der Gletschertopographie ebenfalls einen Einfluß auf die Verteilung der Gletscherfläche je Höhenstufe hat. Während für den Bereich oberhalb 3000 m die Seehöhe und die damit verbundene geringere Ablation des Gletschers von Bedeutung ist, liegt die Begründung für den Bereich 2600 bis 2700 m in dessen günstigerer Akkumulationsituation durch Lawinen.

Im Gegensatz zur Flächenänderung war die Volumsänderung (Abbildung 2.3.1.3) im Bereich 2600 bis 2800 m am stärksten und zwar deshalb, weil sich hier die größte Flächenausdehnung des Gletschers befindet. Betrachtet man dagegen die mittlere Höhenänderung pro Jahr (Tabelle 2.3.1.1), so sieht man eine eindeutige Abhängigkeit von der Seehöhe. Die größten Werte wurden dabei im Zungenbereich ermittelt.



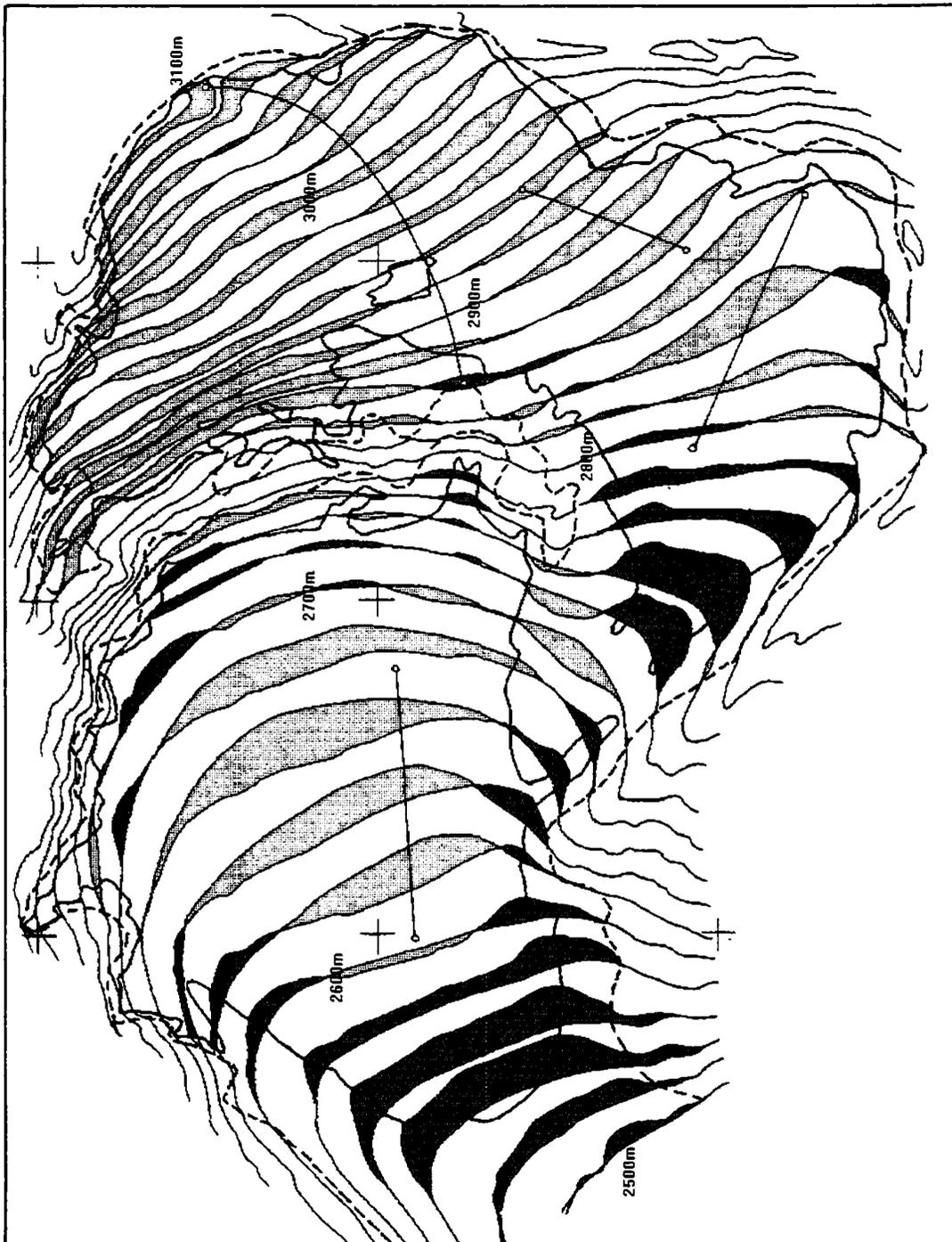
**Abb. 2.3.1.2:**  
**Änderung der Gletscherfläche des**  
**östlichen Wurtenkeeses 1871-1991 in**  
**Höhenstufen von dz=50m**

**Fig. 2.3.1.2:**  
**Changes of glacier area of Eastern**  
**Wurtenkees 1871-1991 in altitude steps**  
**of dz=50m**



**Abb. 2.3.1.3:**  
**Volumensänderungen des östlichen**  
**Wurtenkeeses 1871-1991 in Höhenstufen**  
**von dz=50m**

**Fig. 2.3.1.3:**  
**Volume changes of Eastern Wurtenkees**  
**1871-1991 in altitude steps of dz=50m**



**Abb.2.3.1.4:** Vergleich der Gletscherumrisse und der Höhensituation 1991 mit der Untergrundkarte von 1972

**dunkel:** Gletscheroberfläche 1991 unter Untergrund 1972

**hell:** Gletscheroberfläche 1991 über Untergrund 1972

———— Gletscherumriß 1991    - - - - Gletscherumriß 1967    ○ ———○ Meßprofile 1972

**Fig. 2.3.1.4:** Comparison of glacier area and altitude of the glacier maps 1991 with the glacier bottom map of 1972

**dark shaded:** surface 1991 below bottom of 1972

**light shaded:** surface 1991 above bottom of 1972

———— glacier extension 1991    - - - - glacier extension 1967

○ ———○ measuring profiles 1972

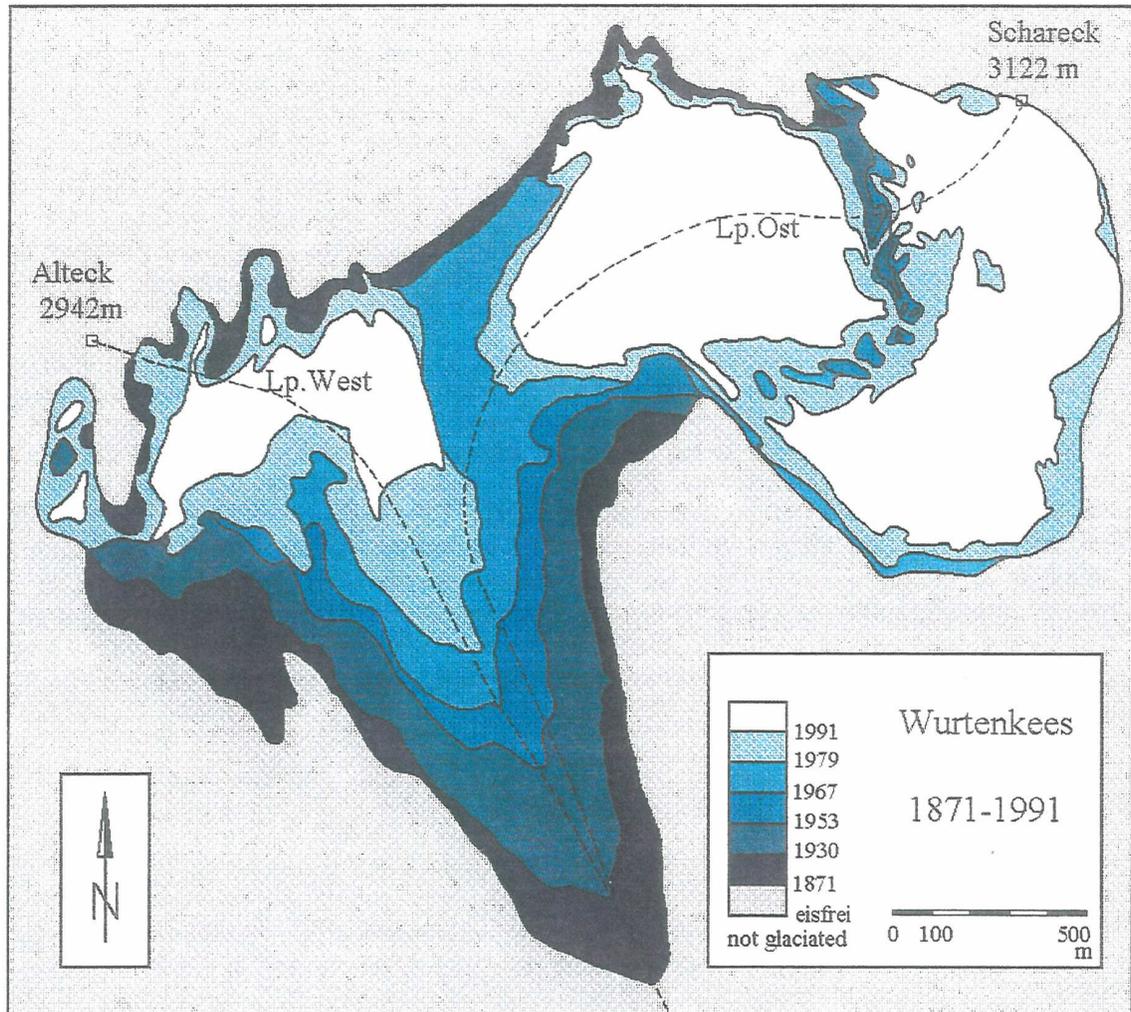
Flächen-, Höhen- und Volumsänderungen in Höhenstufen von  $dz=50$  m, wie in Tabelle 2.3.1.1 für das östliche Wurtenkees, sind in BÖHM, 1984, für das östliche und das westliche Wurtenkees für alle Kartentermine seit 1871 enthalten. Sowohl dort, als auch in einigen anderen früheren Publikationen finden sich außerdem Angaben über das Gesamtvolumen dieses Gletschers. Diese wurden aufgrund des Untergrundplans von BRÜCKL und BITTMANN, 1977, ermittelt. Dieser Untergrundplan (1:10000,  $dz=10$  m), anhand von spreng- und hammerschlagseismisch im Jahr 1972 gemessenen Eisdickprofilen angefertigt, wurde seither als Basis für alle Eisdicke- und Volumsangaben des Wurtenkeeses verwendet. Die Neuaufnahme 1991 und auch bereits die von 1979 mit den großen eisfrei gewordenen Flächen machten jedoch deutlich, daß der Gletscheruntergrund im Jahr 1972 systematisch zu hoch (das heißt die Eismächtigkeit zu gering) gemessen worden ist. Ein Höhenvergleich des nun tatsächlich zu Tage getretenen Untergrundes und auch der Eisoberfläche 1991 ergab Fehler des Untergrundes in der Größenordnung von bis zu 15 Metern. Teile der Gletscheroberfläche 1991 liegen sogar unterhalb der Untergrundhöhe von 1972. Abbildung 2.3.1.4 verdeutlicht das mittels eines Vergleichs der Höhensituation 1991 mit der der Gletscheruntergrundkarte von 1972.

Es scheinen somit die angewandten spreng- und hammerschlagseismischen Methoden speziell bei dem im Fall des Wurtenkeeses gegebenen nicht klar definierten Untergrund (Grundmoräne) Fehler zu haben, die, vor allem bei einem bereits relativ wenig mächtigen Gletscher, bereits in der Größenordnung der Eismächtigkeit selbst liegen. Ob darüber hinaus bei der Untergrundbestimmung des Wurtenkeeses spezifische Fehler vorliegen, und inwieweit die im Fall des beim Wurtenkees durch den hier überdurchschnittlich starken Gletscherrückgang zu Tage getretenen Mängel der seismischen Eisdickmessung auch für andere mit dieser Methode vermessenen Gletscher gegeben sind, kann hier nicht entschieden werden. Für das Wurtenkees jedenfalls ist die Untergrundkarte nicht verwendbar, und alle bisher für diesen Gletscher angegebenen Eisdicken- und Volumsangaben sind falsch und zwar systematisch zu gering. Absolutangaben sind lediglich für Länge und Fläche möglich, für Eisdicke (Höhe) und Volumen können nur die Änderungen von Vermessungstermin zu Vermessungstermin verwendet werden.

### 2.3.2 Flächenänderungen

#### 2.3.2 Areal changes

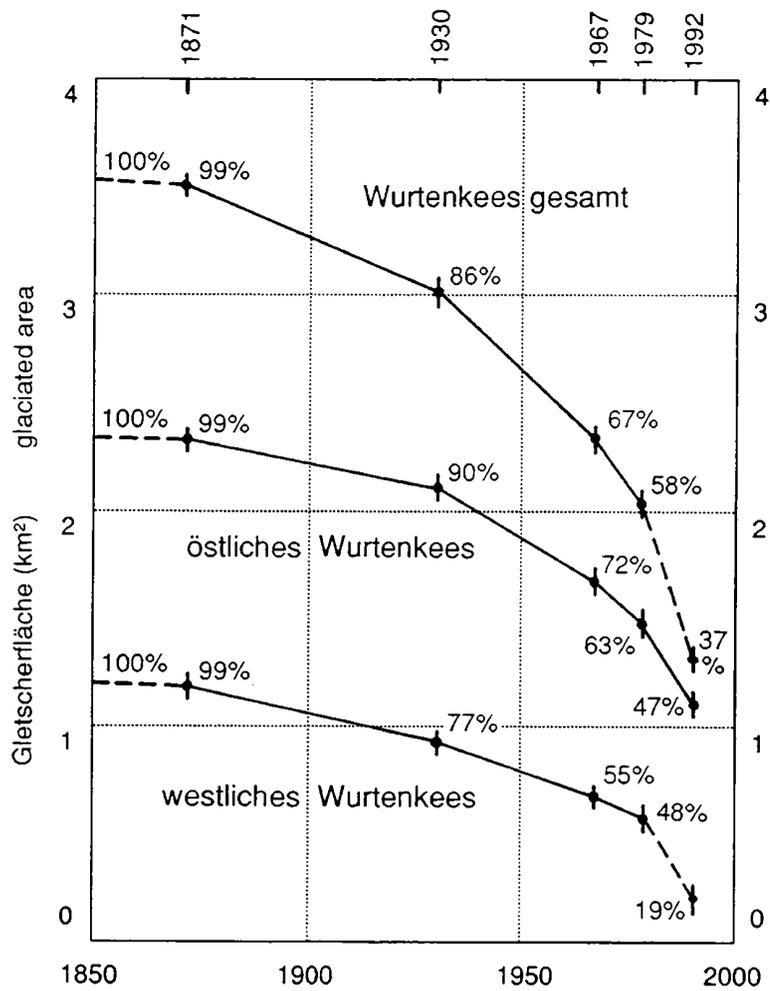
Abbildung 2.3.2.1 zeigt die Gletscherumrisse zu den kartographischen Hauptterminen, wobei die Änderungen in den hochgelegenen Gletscherteilen, wo der Gletscherrand bei der kartographischen Aufnahme oft von einer kurzzeitigen Schneebedeckung verfälscht ist und keine Aussage über den tatsächlichen Gletscherrand zuläßt, nur vereinfacht dargestellt sind. Der Rückzug der Gletscherzunge und die beiden Abschnürungsstellen sind gut zu erkennen. Die bereits bei den Längenänderungen erwähnten Besonderheiten des Wurtenkeeses - der geringe Rückgang bis zum Termin 1930 und der anhaltend starke Rückgang nach dem Termin 1967 - treten auch in der Kartendarstellung deutlich hervor. Die Linienzüge "Lp. West" und "Lp. Ost" sind jene Gletscherlängsprofile, auf die sich die Längenänderungen des Abschnitts 2.3.1 beziehen.



**Abb. 2.3.2.1: Die Gletscherfläche des Wurtenkeeses, 1871-1991**

**Fig. 2.3.2.1: The glaciated area of Wurtenkees 1871-1991**

Ein quantitatives Bild des Flächenrückganges gibt Abbildung 2.3.2.2, in der die Teilflächen des westlichen und des östlichen Wurtenkeeses sowie die Gesamtflächen zu den kartographischen Hauptterminen dargestellt sind. Tabelle 2.3.2.1 enthält die entsprechenden Zahlenwerte. Die Spezifika des Wurtenkeeses lassen sich nun in Zahlen fassen: Nur schwacher Flächenverlust von 10% erfolgte in den ersten 60 Jahren (bzw. beim östlichen Wurtenkees in den ersten 80 Jahren). Darauf folgte ein progressiv fortschreitender Flächenrückgang, der beim östlichen Wurtenkees in den 13 Jahren von 1979 bis 1992 einen Rückgang von 57% (von 1850) auf aktuell nur noch 37% ausmachte, beim noch rascher zerfallenden westlichen Wurtenkees von 47% (1979) auf nun 22% der ursprünglichen Fläche von 1850. Das westliche Wurtenkees, mit seinen nur noch unbedeutenden Firnflächen in Seehöhen bis maximal 2800m, muß seit seiner Abtrennung vom östlichen Wurtenkees in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts als Toteisrest angesehen werden, der weiterhin rasch zerfallen wird.



**Abb. 2.3.2.2: Der Flächenrückgang des Wurtenkeeses seit 1850**  
**Fig. 2.3.2.2: The areal retreat of Wurtenkees since 1850**

**Tab.2.3.2.1: Die Gletscherfläche von östlichem und westlichem Wurtenkees seit 1850**  
**Tab. 2.3.2.1: The glaciated area of Wurtenkees since 1850**

	Westliches Wurtenkees		Östliches Wurtenkees		Gesamtgletscher	
	Western Wurtenkees		Eastern Wurtenkees		total glaciated area	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
1850*	1,213	100,0	2,375	100,0	3,588	100,0
1871	1,174	96,8	2,317	97,6	3,491	97,3
1930	0,916	75,5	2,096	88,3	3,012	83,9
1967	0,658	54,2	1,676	70,6	2,334	62,7
1979	0,573	47,2	1,473	62,0	2,046	57,0
1991			1,095	46,1		
1992	0,262	21,6	1,059	44,6	1,321	36,8

\*) nach Moränen, Vegetationsgrenzen, Fotos (vergl. BÖHM, 1994)

\*) derived from moraines, vegetation frontiers, photos

### 2.3.3 Höhen- und Volumsänderungen

#### 2.3.3 Height and volume changes

Für die kartographischen Termine 1871, 1930, 1953, 1967, 1979 und 1991, zu denen auch die Höhensituation des Gletschers aufgenommen worden ist, sind Volums- bzw. Höhenvergleiche möglich. Diese stellen - zumindest für längere Zeitspannen von 10 Jahren und mehr - eine Möglichkeit zur Bestimmung der mittleren Massenbilanz eines Gletschers dar ("geodätische Methode"), wobei allerdings eine gewisse Schwierigkeit beim Ansetzen der Firn- bzw. Eisdichte besteht, die zur Umrechnung der geometrischen Veränderungen in solche der Gletschermasse benötigt wird. Ein Vergleich der geodätischen mit der direkten glaziologischen Methode wird für die 11jährigen Massenbilanzmessungen am östlichen Wurtenkees in Kapitel 4 unternommen, hier werden zunächst nur die geometrischen Verhältnisse der dritten Dimension des Gletscherrückganges besprochen.

Die kartometrischen Auswertungen wurden auf den (hier nicht veröffentlichten) Arbeitskarten 1:5000 nach der Methode von FINSTERWALDER, 1953, vorgenommen. Ausgewertet wurden "Differenzkarten", die Gletscherumrisse und Höhenlinien von jeweils zwei aufeinanderfolgenden kartographischen Aufnahmen enthalten. Derartige Differenzkarten geben auch schon ohne ihre quantitative Auswertung ein anschauliches Bild von den dreidimensionalen Veränderungen eines Gletschers. Abbildung 2.3.3.1 zeigt Differenzkarten des Wurtenkeeses von 1871 bis 1991 in einheitlichem Maßstab 1:20000 und Layout. Zusätzlich zu den bereits in Abbildung 2.3.2.1 dargestellten Flächenänderungen (Verlustflächen sind gelb, Gewinnflächen grün eingefärbt) stellen die Flächen zwischen den Höhenlinien gleicher Seehöhe (hier im Abstand von 50 m) die Höhenänderungen der Gletscheroberfläche dar. Rote Flächen bedeuten hier Rückzug der jeweiligen Höhenlinie und somit Einsinken bzw. Massenverlust des Gletschers, blaue Flächen stehen für Vorstoß der Höhenlinien und somit Aufwölbung bzw. Massengewinn.

In BÖHM, HAMMER und STROBL, 1983, sind bereits drei derartige Differenzkarten des Wurtenkeeses enthalten, sie wurden hier ergänzt durch die Karte 1871-1930 und die Karte 1979-1991. Die vollständige Höhensituation existiert für die Termine 1871, 1930, 1967 und 1979, 1953 nur bis zur Seehöhe 2850 m, 1991 nur für das östliche Wurtenkees.

Die fünf Differenzkarten unterstreichen die Besonderheiten des Wurtenkeeses gegenüber anderen Gletschern. Mit Ausnahme des Schareck-Firnfeldes, wo zeitweise geringe Massengewinne oder zumindest Stabilität auftrat, ist durchwegs mäßiger bis starker Massenverlust sichtbar. Auch die Zeitspannen 1953-1967 und 1967-1979, die für die Mehrzahl der Ostalpengletscher (vergl. FINSTERWALDER u. RENTSCH, 1976 und 1980) und auch für die unmittelbar benachbarten der Goldberggruppe (in BÖHM u. STROBL, 1987) positive Massenbilanzen vor allem in den höhergelegenen Gletscherteilen, aber zum Teil auch bis zu den Zungenenden brachten, verliefen für das Wurtenkees überwiegend negativ. Noch verstärkt hat sich der Massenverlust in der aktuellen Periode 1979-1991, in der wieder die gesamte Gletscherfläche des östlichen Wurtenkeeses bis zur Gipfelhöhe von 3100 m negativ bilanzierte, und auch die Massenbilanz des (nur zweidimensional aufgenommenen) westlichen Wurtenkeeses mit Sicherheit zur Gänze negativ war, wie der starke Flächenrückgang zeigt.

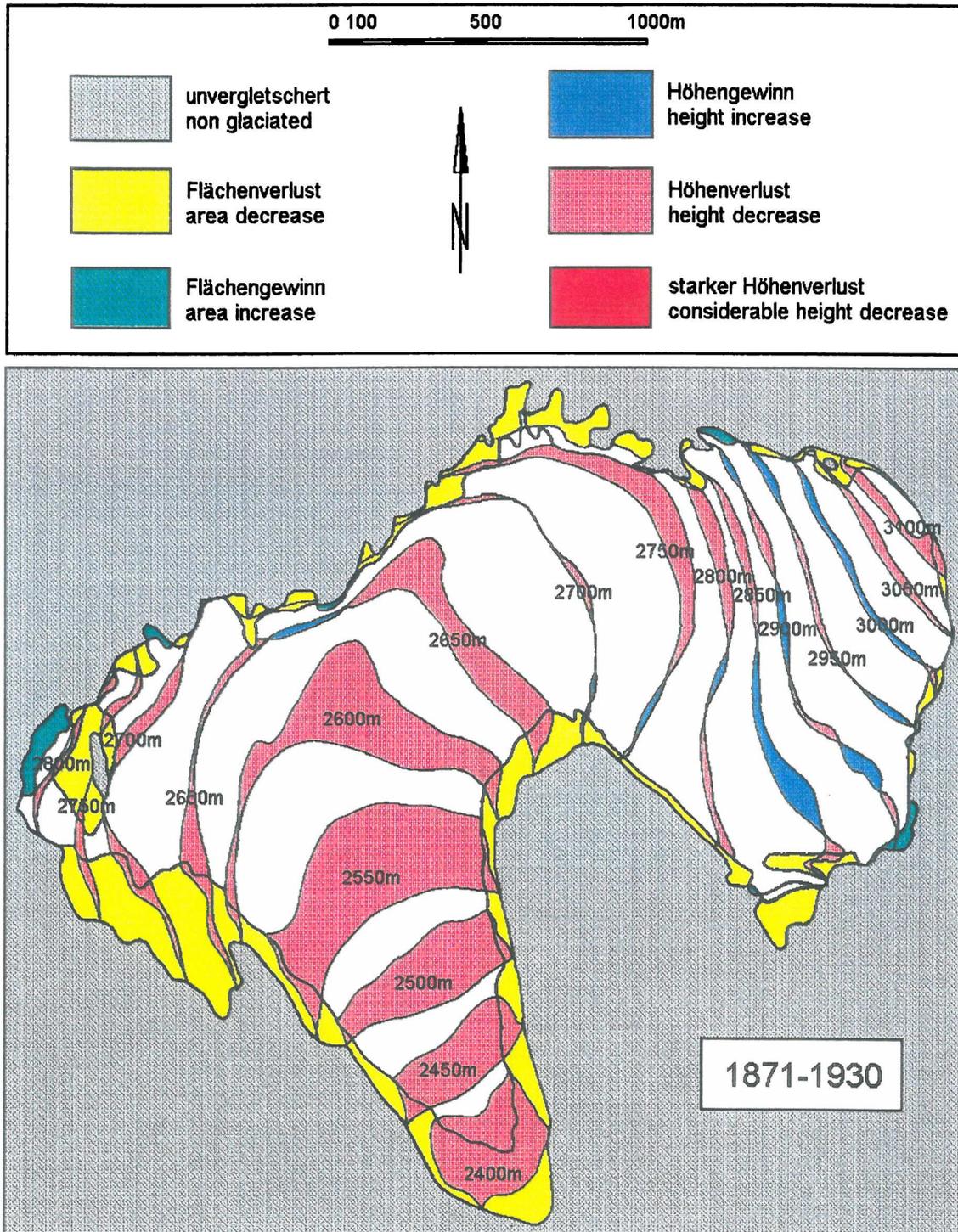
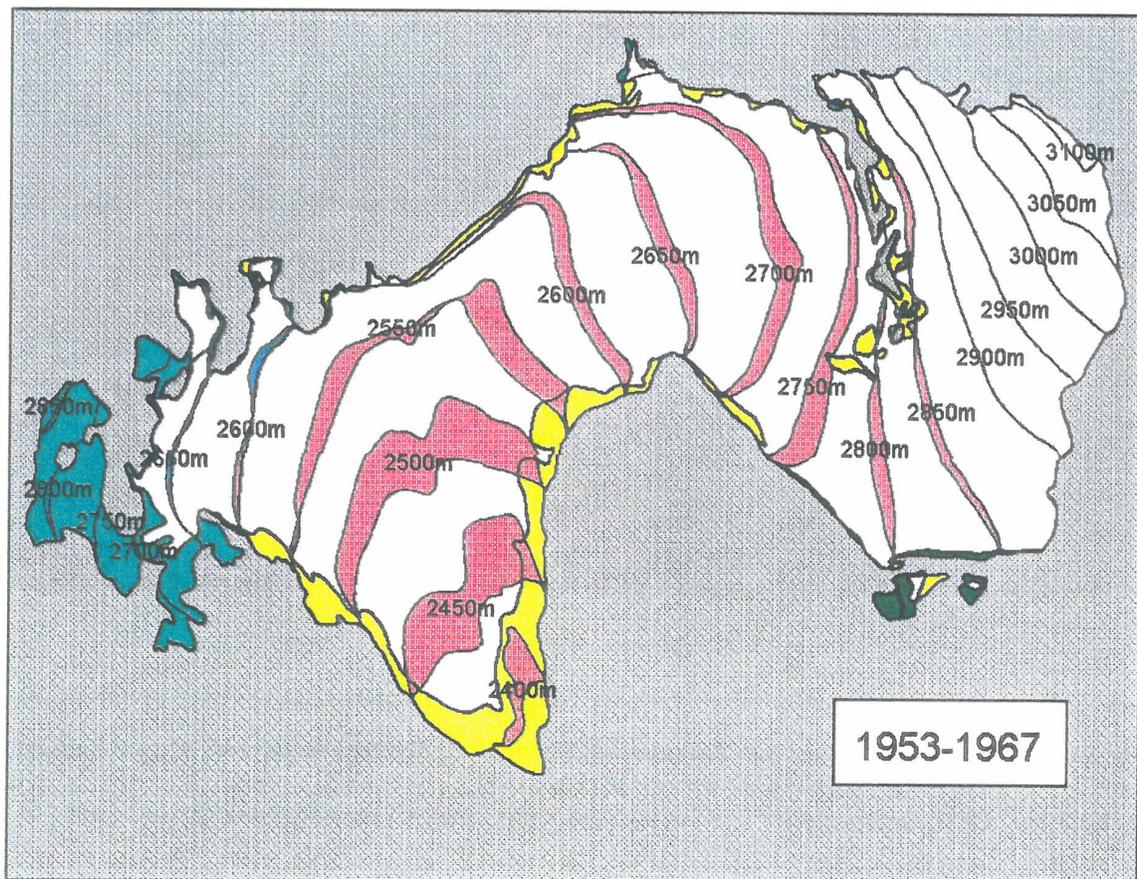
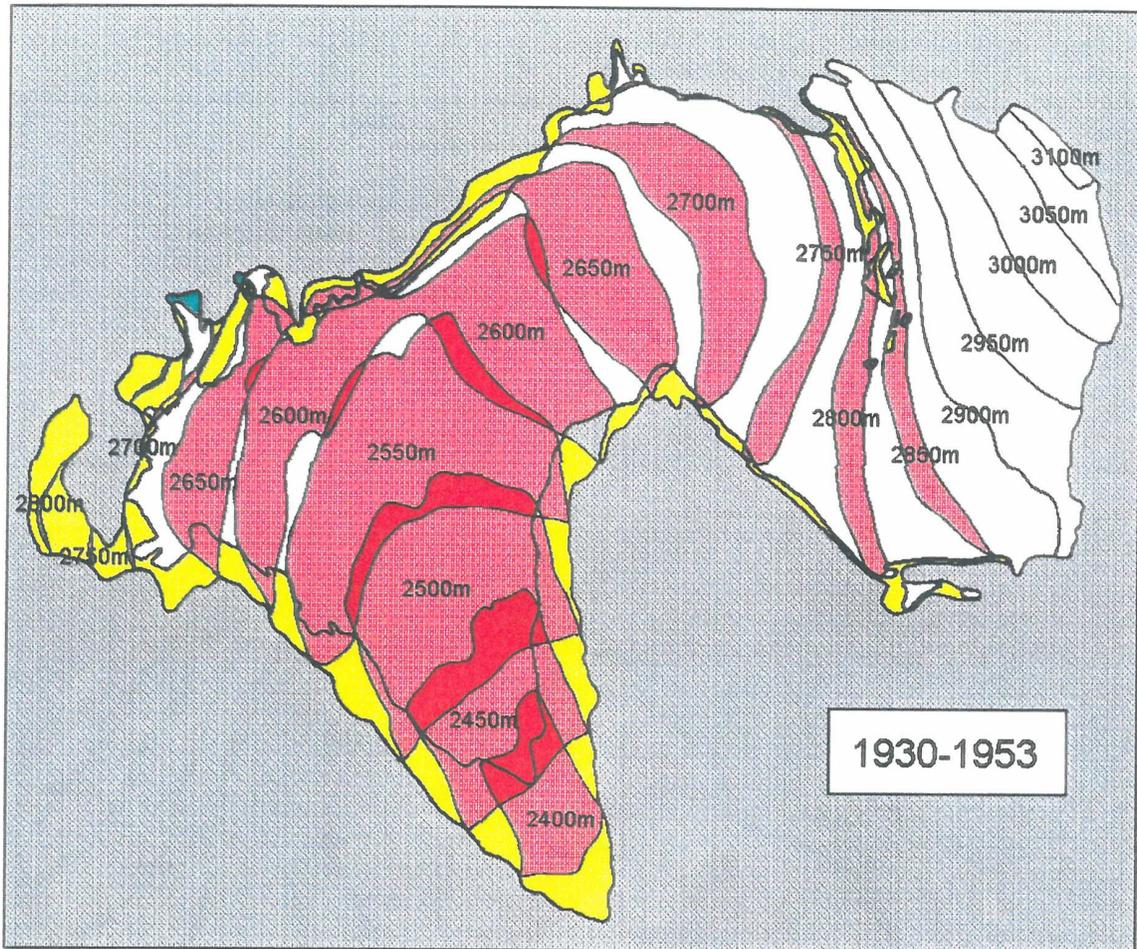
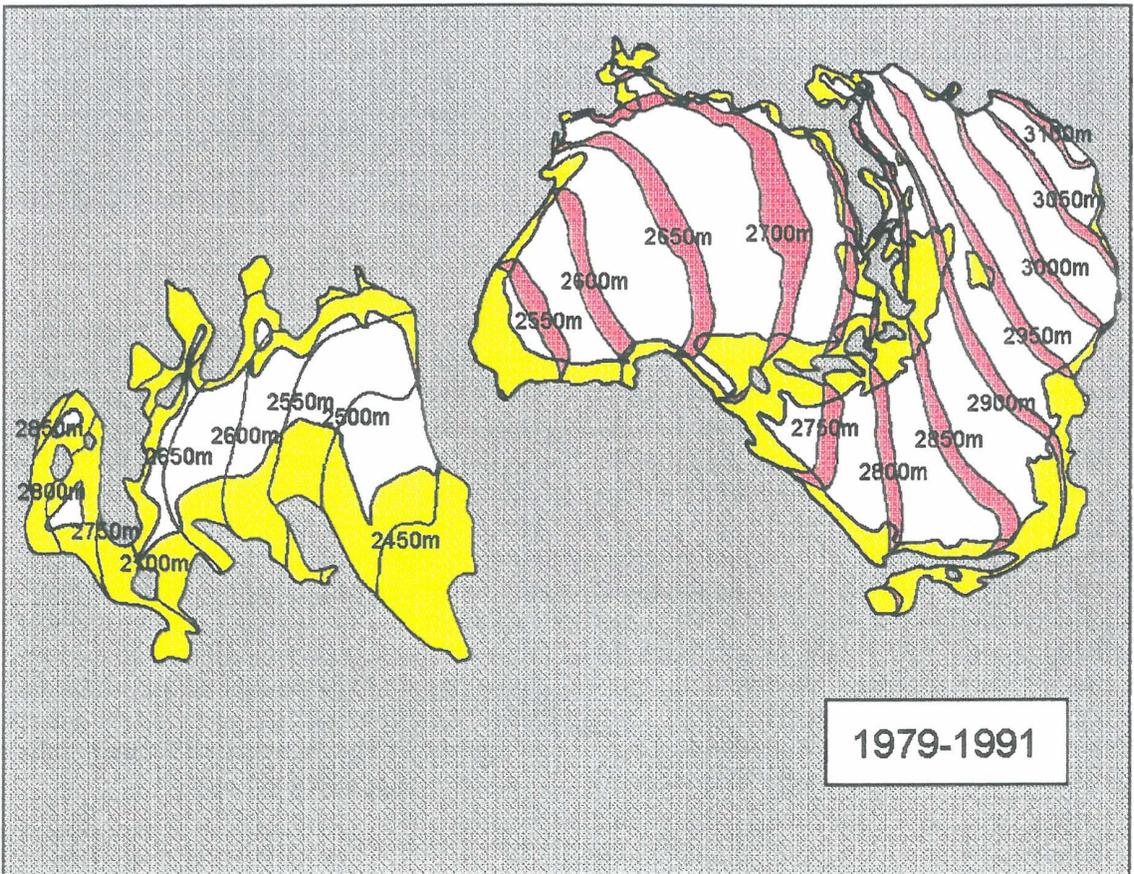
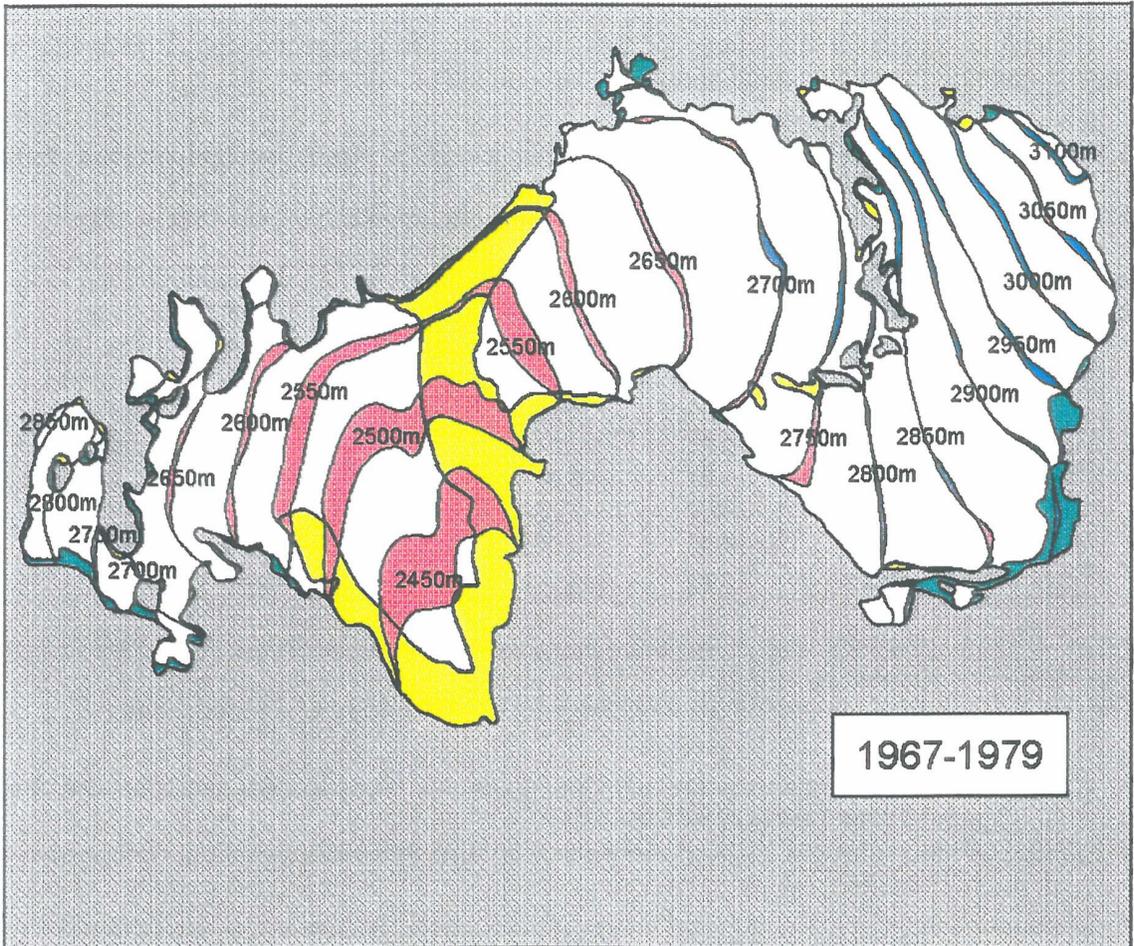


Abb. 2.3.3.1: Vergleichskarten der Gletscheroberflächen des Wurtenkeeses von je zwei aufeinanderfolgenden Kartenterminen von 1871 bis 1991

Fig. 2.3.3.1: Comparative glacier surface maps of Wurtenkees for consecutive map dates 1871 to 1991





Die kartometrische Auswertung ergab die in Tabelle 2.3.3.1 und Tabelle 2.3.3.2 enthaltenen Volums- bzw. Höhenänderungen im Mittel über die Gesamtflächen. Die entsprechenden Zahlenwerte aufgeschlüsselt nach Höhenzonen von 50 m sind in Abschnitt 2.3.1.2 enthalten.

**Tab. 2.3.3.1: Volumsänderungen des Wurtenkeeses zwischen den 6 kartographischen Terminen 1871 bis 1991**

**Tab. 2.3.3.1: Volume changes of Wurtenkees between the 6 cartographic dates 1871 to 1991**

	Westliches Wurtenkees*		Östliches Wurtenkees		Gesamtgletscher	
	Western Wurtenkees		Eastern Wurtenkees		Total Wurtenkees	
	Mio. m <sup>3</sup>	Mio. m <sup>3</sup>	Mio. m <sup>3</sup>	Mio. m <sup>3</sup>	Mio. m <sup>3</sup>	Mio. m <sup>3</sup>
	gesamt	pro Jahr	gesamt	pro Jahr	gesamt	pro Jahr
	total	per year	total	per year	total	per year
1871-1930	-15,34	-0,26	-28,04	-0,48	-43,38	-0,74
1930-1967	-37,29	-1,01	-76,28	-2,06	-113,57	-3,06
1967-1979	-6,84	-0,57	-7,75	-0,65	-14,59	-1,22
1979-1991	-13,00	-1,08	-13,68	-1,13	-26,68	-2,22
1871-1991	-72,47	-0,60	-125,75	-1,05	-198,22	-1,65

\* Westliches Wurtenkees 1992 nur 2-dimensional aufgenommen, Volumsänderung aus Flächenänderung und extrapolierter Höhenänderung geschätzt.

\* 1992 only 2-dimensional, volume changes estimated from area and extrapolated height changes.

**Tab. 2.3.3.2: Höhenänderungen der Gletscheroberfläche des Wurtenkeeses zwischen den 6 kartographischen Terminen 1871 bis 1991**

**Tab. 2.3.3.2: Altitude changes of the glacier surface of Wurtenkees between the 6 cartographic dates 1871 to 1991**

	Westliches Wurtenkees*		Östliches Wurtenkees		Gesamtgletscher	
	Western Wurtenkees		Eastern Wurtenkees		Total Wurtenkees	
	meter	meter	meter	meter	meter	meter
	gesamt	pro Jahr	gesamt	pro Jahr	gesamt	pro Jahr
	total	per year	total	per year	total	per year
1871-1930	-0,4	-0,01	-7,4	-0,13	-5,7	-0,1
1930-1967	-34,1	-0,92	-33,1	-0,89	-33,6	-0,91
1967-1979	-8,5	-0,71	-3,0	-0,25	-4,5	-0,38
1979-1991			-8,6	-0,72		

Stellen die Volumsänderungen Maßzahlen dar, die für den individuellen Gletscher selbst und seine Umgebung von Bedeutung sind (etwa als Gletscherspende zum sommerlichen Abfluß), so ist die Höhenänderung pro Jahr eine Maßzahl, die auch Vergleiche mit anderen gleichartig ausgewerteten Gletschern ermöglicht. Derartige Daten von 16 österreichischen Gletschern, darunter zwei unmittelbar benachbarte der Goldberggruppe, stehen dafür zur Verfügung. Das Wurtenkees läßt sich folgendermaßen einordnen: Sein Verlust von 10 cm/Jahr im Zeitraum 1871 bis 1930 liegt unter der unteren Grenze der für ähnlich frühe Zeiträume zur Verfügung stehenden fünf Vergleichsgletscher, deren Höhenverluste zwischen 21 und 88 cm/Jahr schwankten. Also, wie schon bei den Längen- und Flächenvariationen, ein zunächst unterdurchschnittliches Abschmelzen des Wurtenkeeses in der ersten Rückzugsphase nach dem Gletscherhochstand, auch im Vergleich zum benachbarten Goldbergkees mit 25 cm/Jahr. Dieser Aussage kann allerdings nicht dasselbe Gewicht beigemessen werden wie den folgenden Vergleichen neuerer Termine, da die Qualität der 1871er-Karte nicht mit der späterer Aufnahmen vergleichbar ist. Die qualitative Tatsache sehr geringer Höhenverluste des Wurtenkeeses zu dieser Zeit ist jedoch durch Fotovergleiche (vergl. Abschnitt 2.1) abgesichert und unterstreicht die Verwendbarkeit der korrigierten 1871er-Karte trotz aller Vorbehalte.

In der Periode 1930 bis 1967 liegt das Wurtenkees am anderen Ende der Skala und wiederum außerhalb des Schwankungsbereichs der Änderungsbeträge aller übrigen, in diesem Zeitabschnitt bereits zahlreicher kartometrisch ausgewerteter Vergleichsgletscher. Seine  $-91$  cm/Jahr stellen somit für Österreich einen negativen Rekordwert dar, speziell wenn man bedenkt, daß diese Periode schon die Dezennien 1950 bis 1960 und teilweise 1960 bis 1970 umfaßt, wo andere Gletscher bereits nur noch geringfügige Höhenverluste zeigen, in der Mehrzahl jedoch Aufhöhungen zwischen  $+8$  cm bis  $+67$  cm/Jahr aufwiesen. Nur zu Beginn dieser Zeitspanne, etwa 1930 bis 1950, lagen auch bei den österreichischen Vergleichsgletschern einheitlich Höhenverluste bis maximal  $-88$  cm/Jahr vor, in der Goldberggruppe  $-71$  bis  $-94$  cm/Jahr.

1967 bis 1979 verlangsamte sich beim Wurtenkees zwar das Einfallen der Gletscheroberfläche auf einen mittleren jährlichen Betrag von  $-38$  cm, in dieser Periode gibt es sonst jedoch überhaupt nur noch einen Gletscher, den großen und trägen Hintereisferner, der einen negativen Wert zeigt ( $-14$  cm/Jahr), alle anderen ausgewerteten Gletscher zeigen Höhenzuwachs zwischen  $+9$  und  $+32$  cm/Jahr. Das Wurtenkees verhält sich also auch hier wieder abnorm. Die benachbarten Gletscher der Goldberggruppe, Goldbergkees und Kleines Fleißkees, erzielten in dieser Periode flächengemittelte Eisdickengewinne von  $+40$  bzw.  $+45$  cm/Jahr.

Eine Zeitspanne überwiegend negativer Massenbilanzen stellen die 12 Jahre 1979 bis 1991 dar, in welcher der durchschnittliche Höhenverlust des östlichen Wurtenkeeses von  $25$  cm/Jahr (1967 bis 1979) auf  $72$  cm/Jahr anstieg. Die Höhensituation des westlichen Wurtenkeeses wurde 1991 nicht aufgenommen, der Höhen- und damit Volumsverlust dieses Teilgletschers lag jedoch, wie aus dem Flächenvergleich und aus einer Fotoserie ableitbar ist, mit großer Wahrscheinlichkeit ebenso hoch wie beim östlichen Wurtenkees.

Dieser verstärkte Höhen- und Volumsverlust der 1980er und beginnenden 1990er Jahre ist allerdings nun wieder ein allgemeines Charakteristikum der ostalpinen Gletscher. FINSTERWALDER und RENTSCH, 1993 geben für den Zeitraum 1979 bis 1989 bei neun kartometrisch ausgewerteten Gletschern eine mittlere Höhenänderung von  $-49$  cm/Jahr an mit einem Variationsbereich von  $-15$  cm/Jahr bis  $-77$  cm/Jahr.

Bei Betrachtung der gesamten Rückzugsphase seit dem letzten Gletscherhochstand um 1850 hat somit das Wurtenkees bis heute  $63\%$  seiner Fläche eingebüßt, ca. 200 Millionen  $m^3$  Volumen verloren, seine Oberfläche ist um  $50$  m eingesunken, und seine Zungenenden haben sich um  $1350$  m (westliche Zunge) bzw.  $1920$  m (östliche Zunge) zurückgezogen.

### **3. DIE INTENSIV-UNTERSUCHUNGSPERIODE SEIT 1982**

### **3. THE SPECIAL INVESTIGATION PERIOD SINCE 1982**

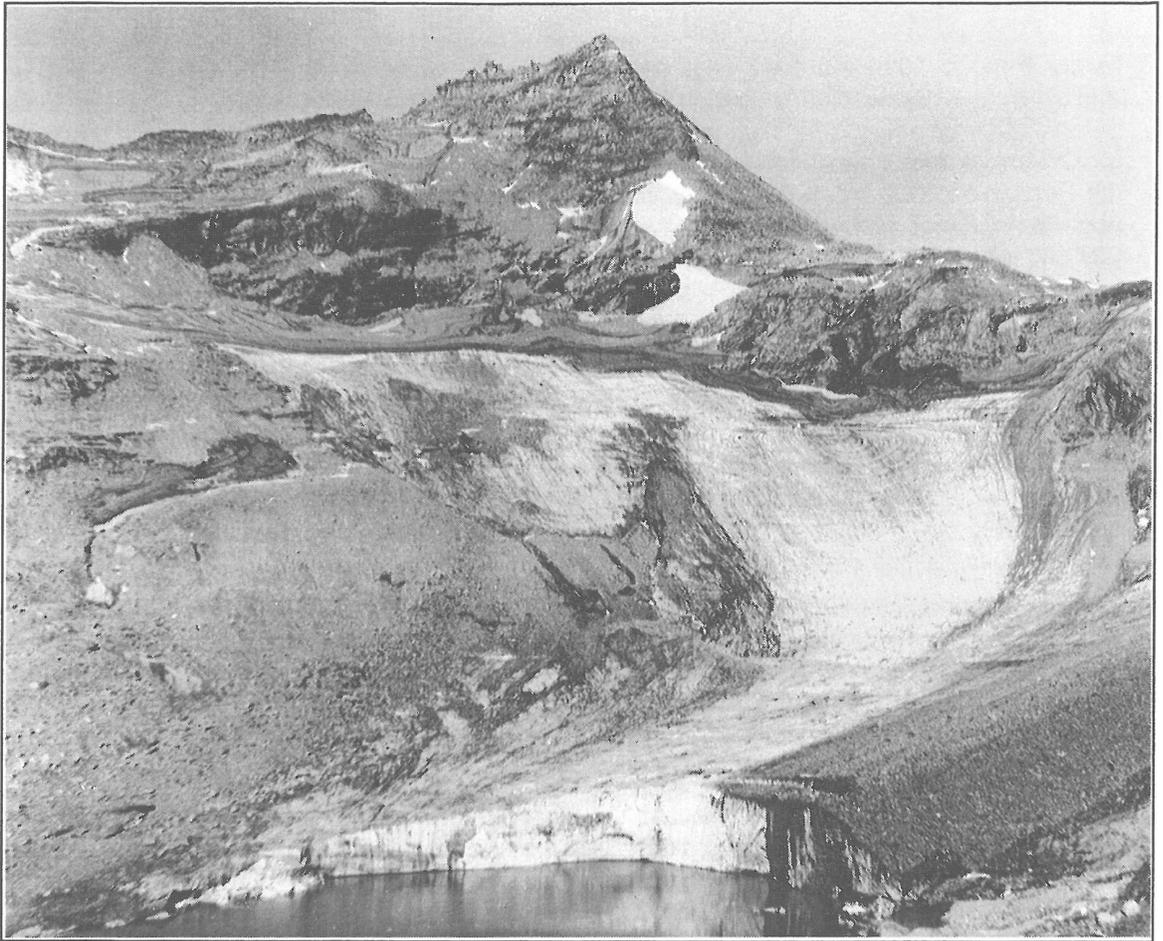
**Abb. 3.1:** Das westliche Wurtenkees mit Alteck und Speicher Hochwurten im September 1983 (oben) und im September 1994 (unten). Fotos: R. Böhm (siehe Seite 36)

**Fig. 3.1:** The Western Wurtenkees with Alteck and Hochwurten reservoir in September 1983 (above) and in September 1994 (below). Photos: R. Böhm (see page 36)

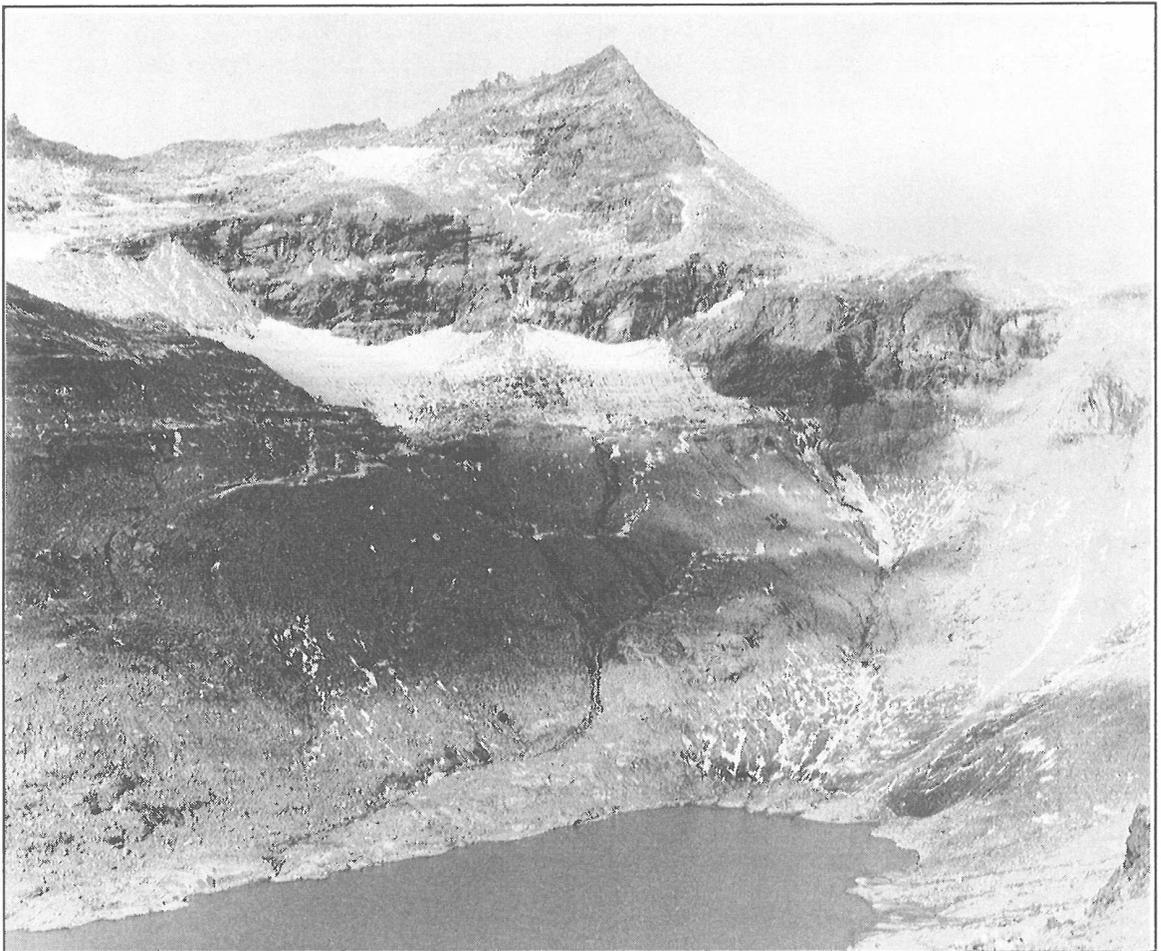
**Abb. 3.2:** Das östliche Wurtenkees mit dem Schareck im September 1983 (oben) und im September 1994 (unten). Fotos: R. Böhm (siehe Seite 37)

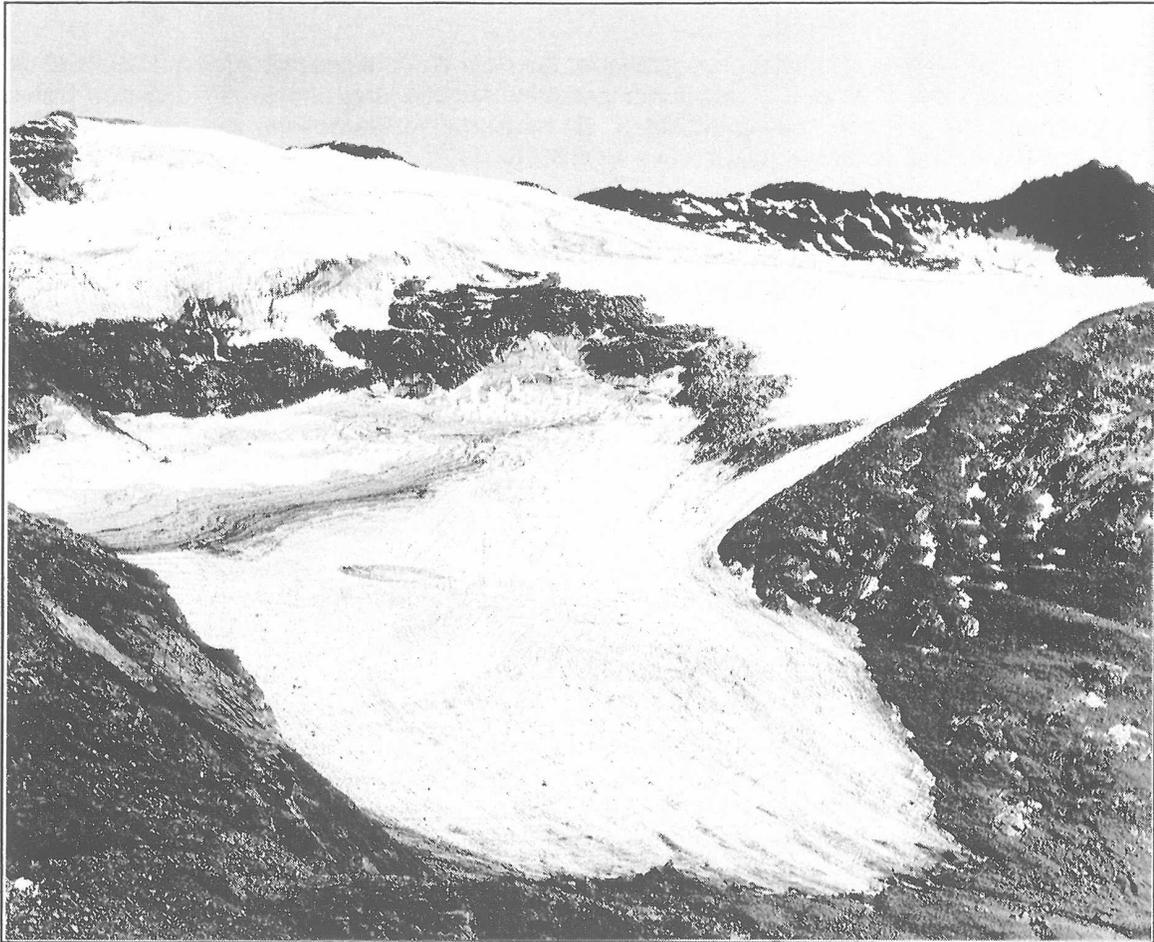
**Fig. 3.2:** The Eastern Wurtenkees with Schareck in September 1983 (above) and in September 1994 (below). Photos: R. Böhm (see page 37)

1983



1994





1983



1994

Seit 1982 wurde die Meß- und Untersuchungstätigkeit auf dem Wurtenkees intensiviert. Hauptziel des Projektes war, nach der in Kapitel 2 zusammengefaßten Aufarbeitung und Ergänzung des historischen Datenmaterials und der Kartengrundlagen, die regelmäßige Erarbeitung von Massenbilanzen nach der glaziologischen Methode (vergl. etwa HOINKES, 1970) für das östliche Wurtenkees. Das westliche Wurtenkees wurde vor allem aus zwei Gründen nicht bearbeitet. Erstens sind größere Teile seiner Fläche im Winter lawinengefährdet und damit einer Winterbilanzierung nicht zugänglich, und zweitens wird seine Massenbilanz für den größeren Teil seiner Zunge seit Mitte der 1970er Jahre nicht von natürlichen Faktoren, sondern von dem künstlichen Stausee Hochwurten beeinflusst.

Die günstige Erreichbarkeit sowie die relativ geringe Lawinengefährdung ermöglichten es, für das östliche Wurtenkees neben der für einige andere österreichische Gletscher schon seit längerem durchgeführten Bestimmung der Jahresbilanz auch eine Winterbilanzierung ins Auge zu fassen. Damit sollte der in der glaziologischen Forschung oft postulierte, durch direkte Messungen aber kaum belegte, geringe Einfluß der Winterakkumulation auf die Gesamtjahresbilanz eines alpinen Gletschers überprüft werden. Dieses Forschungsziel konnte für das östliche Wurtenkees erreicht werden, wie in der Folge gezeigt wird.

Der zweite Grund für die Nichtberücksichtigung des westlichen Wurtenkeeses ergab sich durch das zweite Forschungsziel der Intensivmeßperiode. Es sollte mit Hilfe der meteorologischen Meßdaten des nahegelegenen Sonnblick Observatoriums das natürliche Klimaforcing auf die Massenbilanz untersucht werden, wozu das westliche Wurtenkees, als stark kalbender Gletscher (vergl. Abbildung 3.1), im größten Teil der Untersuchungsperiode nicht geeignet war.

Um einen Eindruck von den Geländegegebenheiten zu vermitteln, zeigen die Fotos der Abbildung 3.1 das westliche, diejenigen der Abbildung 3.2 das östliche Wurtenkees jeweils zu Beginn und am Ende der Intensivmeßperiode. Das westliche Wurtenkees wurde dominiert von der Kalbungsfront des Gletschers in den Speicher Hochwurten (den höchstgelegenen Österreichs). Diese läßt im (oberen) Foto aus dem Jahr 1983 noch eine relativ mächtige Eisdicke (20 bis 30 m) erkennen. Im Jahr 1994 hat sich die Gletscherzunge erstmals hinter das obere Ende des Wurtenspeichers zurückgezogen, die beinahe 20 Jahre lang die Landschaft des oberen Wurtentals bestimmende Eismauer gibt es nicht mehr. Auch der starke Eisverlust in anderen Bereichen des westlichen Wurtenkeeses ist erkennbar. Er hat bis 1994 zu einem fast völligen Verschwinden dieses Teilgletschers geführt.

Beim östlichen Wurtenkees (Abbildung 3.2) fällt vor allem die Vergrößerung des quer durch das Bild ziehenden Felsriegels auf, der den Gletscher auf dem unteren Foto bereits vollkommen in zwei Teile geteilt hat. Diese stehen jedoch, wie später noch genauer ausgeführt wird, durch Lawinen- und Windverfrachtung von Schnee nach wie vor in Verbindung. Die Teilung ist zum größten Teil in steilem Gelände erfolgt, wodurch die beiden Gletscherteile auch nach ihrer vollständigen Trennung durch die erwähnten Schneetransportmechanismen immer noch als Einheit angesehen werden können. Ganz anders war die Situation um 1975, als die Teilung zwischen westlichem und östlichem Wurtenkees im flachen Gelände erfolgte. In diesem Fall wurde keine dynamische Verbindung zwischen den Gletscherteilen aufrecht erhalten.

Alle Fotos wurden gegen Ende der Ablationsperiode aufgenommen und präsentieren den Gletscher in einem für die warmen 1980er Jahre typischen Zustand: beinahe vollkommen ausgeapert, also praktisch ohne "Nährgebiet". Dieser Zustand, der in der Mehrzahl der untersuchten Haushaltsjahre im September und Oktober gegeben war, erleichtert zwar im darauffolgenden Mai das Auffinden des Vorjahreshorizonts, ist aber auf die Dauer für die Existenz des Gletschers fatal.

### 3.1 DAS MESSNETZ IM WURTENKEESGEBIET

### 3.1 THE METEOROLOGICAL NETWORK IN THE AREA OF WURTENKEES

In der Umgebung des Wurtenkeeses gibt es eine Klimastation in Gipfellage (Sonnblick, 3106 m, seit 1886) und zwei Talstationen des hydrographischen Dienstes in Innerfragant (1195 m) und Kleindorf (735 m). Zusätzlich können die Daten zweier weiter entfernter Klimastationen in Obervellach (820 m) und auf dem Dobratsch (2140 m) verwendet werden.

Aus den langjährigen Meßdaten der erwähnten meteorologischen Stationen konnten die in Tabelle 3.1.1 bis 3.1.8 enthaltenen Klimabasisdaten 1961 bis 1990 für das Wurtenkees in Seehöhen von 100 zu 100 m abgeleitet werden (HAMMER et al., 1992).

**Tab. 3.1.1: Mittlere Lufttemperaturen (in °C) im Wurtenkeesgebiet in Seehöhenstufen von dz=100m (Reihe 1961-1990)**

**Tab. 3.1.1: Mean air temperatures (deg. C) in the Wurtenkees region in altitude steps of dz=100m (Sample 1961-1990)**

Höhe altitude m	Jan Jan	Feb Feb	Mar Mar	Apr Apr	Mai May	Jun Jun	Jul Jul	Aug Aug	Sep Sep	Okt Oct	Nov Nov	Dez Dec	Jahr Year
3100	-12,5	-12,7	-11,4	-8,5	-3,9	-0,6	1,7	1,8	-0,1	-3,1	-8,0	-11,0	-5,7
3000	-11,9	-12,1	-10,8	-7,8	-3,3	-0,1	2,3	2,4	0,4	-2,5	-7,4	-10,4	-5,1
2900	-11,3	-11,5	-10,2	-7,1	-2,7	0,6	2,9	3,0	0,9	-1,9	-6,8	-9,8	-4,5
2800	-10,8	-10,9	-9,5	-6,4	-2,0	1,2	3,6	3,6	1,6	-1,3	-6,3	-9,3	-3,9
2700	-10,2	-10,3	-8,9	-5,8	-1,4	1,9	4,2	4,3	2,2	-0,7	-5,8	-8,8	-3,3
2600	-9,6	-9,7	-8,2	-5,2	-0,7	2,5	4,9	4,9	2,8	-0,2	-5,2	-8,3	-2,7
2500	-9,1	-9,1	-7,6	-4,5	-0,1	3,1	5,5	5,5	3,4	0,4	-4,7	-7,8	-2,1
2400	-8,5	-8,5	-6,9	-3,9	0,6	3,8	6,2	6,2	4,0	1,0	-4,2	-7,2	-1,5

**Tab. 3.1.2: Mittlere Zahl von Frosttagen im Wurtenkeesgebiet in Seehöhenstufen von dz=100m (Reihe 1961-1990)**

**Tab. 3.1.2: Mean number of frost days in the Wurtenkees region in altitude steps of dz=100m (Sample 1961-1990)**

Höhe altitude m	Jan Jan	Feb Feb	Mar Mar	Apr Apr	Mai May	Jun Jun	Jul Jul	Aug Aug	Sep Sep	Okt Oct	Nov Nov	Dez Dec	Jahr Year
3100	31,0	28,3	31,0	30,0	31,0	22,7	16,4	16,1	20,9	27,6	30,0	31,0	316,0
3000	31,0	28,3	31,0	30,0	29,6	20,9	14,9	14,6	19,3	26,2	30,0	31,0	306,8
2900	31,0	28,3	31,0	30,0	28,2	19,1	13,4	13,0	17,7	24,8	30,0	31,0	297,5
2800	31,0	28,3	31,0	30,0	26,8	17,4	11,9	11,5	16,2	23,4	30,0	31,0	288,5
2700	31,0	28,3	31,0	30,0	25,4	15,6	10,4	9,9	14,6	22,0	30,0	31,0	279,2
2600	31,0	28,3	31,0	28,7	24,0	13,8	8,9	8,4	13,0	20,6	28,6	31,0	267,3
2500	31,0	28,3	31,0	27,4	22,6	12,0	7,3	6,9	11,4	19,2	27,2	31,0	255,3
2400	31,0	28,3	31,0	26,1	21,2	10,2	5,8	5,3	9,8	17,8	25,8	31,0	243,3

**Tab. 3.1.3: Mittlere Zahl von frostfreien Tagen im Wurtenkeesgebiet in Seehöhenstufen von dz=100m (Reihe 1961-1990)**

**Tab. 3.1.3: Mean number of frostfree days in the Wurtenkees region in altitude steps of dz=100m (Sample 1961-1990)**

Höhe altitude m	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
3100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	14,6	14,9	9,1	3,4	0,0	0,0	49,3
3000	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	9,1	16,1	16,4	10,7	4,8	0,0	0,0	58,5
2900	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	10,9	17,6	18,0	12,3	6,2	0,0	0,0	67,8
2800	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	12,6	19,1	19,5	13,8	7,6	0,0	0,0	76,8
2700	0,0	0,0	0,0	0,0	5,6	14,4	20,6	21,1	15,4	9,0	0,0	0,0	86,1
2600	0,0	0,0	0,0	1,3	7,0	16,2	22,1	22,6	17,0	10,4	1,4	0,0	98,0
2500	0,0	0,0	0,0	2,6	8,4	18,0	23,7	24,1	18,6	11,8	2,8	0,0	110,0
2400	0,0	0,0	0,0	3,9	9,8	19,8	25,2	25,7	20,2	13,2	4,2	0,0	122,0

**Tab. 3.1.4: Mittlere Zahl von Eistagen im Wurtenkeesgebiet in Seehöhenstufen von dz=100m (Reihe 1961-1990)**

**Tab. 3.1.4: Mean number of ice days in the Wurtenkees region in altitude steps of dz=100m (Sample 1961-1990)**

Höhe altitude m	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
3100	31,0	28,0	30,6	28,9	21,6	10,1	4,3	4,4	8,9	18,7	27,4	30,6	244,5
3000	31,0	27,6	29,8	27,5	19,6	9,1	3,8	3,9	8,0	17,3	26,2	29,8	233,6
2900	30,5	27,2	29,0	26,1	17,7	8,1	3,4	3,5	7,2	15,8	24,9	29,0	222,4
2800	30,0	26,8	28,3	24,6	15,7	7,1	3,0	3,0	6,4	14,4	23,6	28,2	211,1
2700	29,5	26,4	27,5	23,2	13,8	6,1	2,5	2,6	5,5	13,0	22,3	27,5	199,9
2600	29,0	26,0	26,8	21,8	11,8	5,1	2,1	2,1	4,7	11,5	21,1	26,7	188,7
2500	28,4	25,6	26,0	20,3	9,9	4,1	1,7	1,6	3,9	10,1	19,8	25,9	177,3
2400	27,9	25,2	25,3	18,9	7,9	3,0	1,2	1,2	3,1	8,6	18,5	25,1	165,9

**Tab. 3.1.5: Höhe der Nullgradgrenze (in m) im Wurtenkeesgebiet (Reihe 1961-1990)**

**Tab. 3.1.5: Altitude of zero degree temperature (m) in the Wurtenkees region (Sample 1961-1990)**

	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
mittleres Tagesmax. mean daily max.	1420	1480	1830	2290	2860	3280	3620	3630	3380	2970	2150	1550
Mittel mean	u	u	1330	1800	2490	2990	3360	3380	3080	2570	1600	u
mittleres Tagesmin. mean daily min.	u	u	u	1320	2070	2580	2980	2980	2660	2120	u	u

*u: Nullgradgrenze unter der Talsohle des Mölltals*

*u: zero degree temperature below bottom of Mölltal*

**Tab. 3.1.6: Mittlere Zahl von Schneefalltagen im Wurtenkeesgebiet in Seehöhenstufen von dz=100m (Reihe 1961-1990)**

**Tab. 3.1.6: Mean number of snowfall days in the Wurtenkees region in altitude steps of dz=100m (Sample 1961-1990)**

Höhe altitude m	Jan Jan	Feb Feb	Mar Mar	Apr Apr	Mai May	Jun Jun	Jul Jul	Aug Aug	Sep Sep	Okt Oct	Nov Nov	Dez Dec	Jahr Year
3100	16,6	15,9	18,6	19,2	17,2	12,8	6,6	6,5	8,2	10,4	15,8	16,5	164,3
3000	16,3	15,6	18,2	18,7	16,1	11,7	5,9	5,8	7,5	9,7	15,2	16,1	156,8
2900	15,9	15,4	17,9	18,2	14,9	10,5	5,3	5,2	6,8	9,0	14,7	15,7	149,5
2800	15,6	15,1	17,6	17,7	13,7	9,4	4,6	4,5	6,1	8,4	14,2	15,3	142,2
2700	15,3	14,9	17,2	17,2	12,6	8,2	4,0	3,9	5,4	7,7	13,6	14,9	134,9
2600	15,0	14,6	16,9	16,7	11,4	7,1	3,4	3,3	4,7	7,1	13,1	14,5	127,8
2500	14,7	14,4	16,5	16,3	10,2	5,9	2,7	2,6	4,1	6,4	12,5	14,1	120,4
2400	14,3	14,1	16,2	15,8	9,0	4,8	2,1	2,0	3,4	5,7	12,0	13,7	113,1

**Tab. 3.1.7: Mittlerer Anteil des festen Niederschlages (in %) im Wurtenkeesgebiet in Seehöhenstufen von dz=100m (Reihe 1961-1990)**

**Tab. 3.1.7: Mean share of solid precipitation (%) in the Wurtenkees region in altitude steps of dz=100m (Sample 1961-1990)**

Höhe altitude m	Jan Jan	Feb Feb	Mar Mar	Apr Apr	Mai May	Jun Jun	Jul Jul	Aug Aug	Sep Sep	Okt Oct	Nov Nov	Dez Dec	Jahr Year
3100	100	100	100	100	96	83	59	57	74	94	100	10	88
3000	100	100	100	99	92	77	55	54	69	89	99	10	85
2900	100	100	100	98	88	71	51	50	64	84	97	10	83
2800	100	100	100	98	84	65	47	46	59	79	95	99	80
2700	100	100	99	97	79	60	43	42	55	74	94	99	78
2600	100	100	99	96	75	54	39	38	50	69	92	99	75
2500	100	100	99	96	71	48	35	34	45	64	91	99	73
2400	100	100	99	95	67	42	31	30	40	59	90	98	70

**Tab. 3.1.8: Mittlere relative Sonnenscheindauer (in %) im Wurtenkeesgebiet in Seehöhenstufen von dz=100m (Reihe 1961-1990)**

**Tab. 3.1.8: Mean relative sunshine duration (%) in the Wurtenkees region in altitude steps of dz=100m (Sample 1961-1990)**

Höhe altitude m	Jan Jan	Feb Feb	Mar Mar	Apr Apr	Mai May	Jun Jun	Jul Jul	Aug Aug	Sep Sep	Okt Oct	Nov Nov	Dez Dec	Jahr Year
3100	41	40	39	34	32	31	38	39	44	50	41	41	39
3000	42	41	39	34	32	32	39	40	45	50	42	41	39
2900	42	41	39	34	33	32	39	40	45	51	42	41	39
2800	42	42	39	35	33	33	40	41	45	51	42	42	40
2700	43	42	40	35	34	33	40	41	46	51	43	42	40
2600	43	43	40	35	34	34	41	42	46	51	43	42	40
2500	44	43	40	35	34	34	41	42	46	52	43	43	41
2400	44	43	41	36	35	34	42	43	47	52	43	43	41

Seit 1981 werden in Ergänzung dazu im unmittelbaren Gletschergebiet an drei Totalisatoren und einer variablen Zahl von Schneepegeln ständige Messungen von Niederschlag, Schneehöhe und Eisabschmelzung auch außerhalb der Frühjahrs- und Herbstmeßkampagnen vorgenommen. Abbildung 3.1.1 zeigt dieses Meßnetz im unmittelbaren Gletscherbereich.

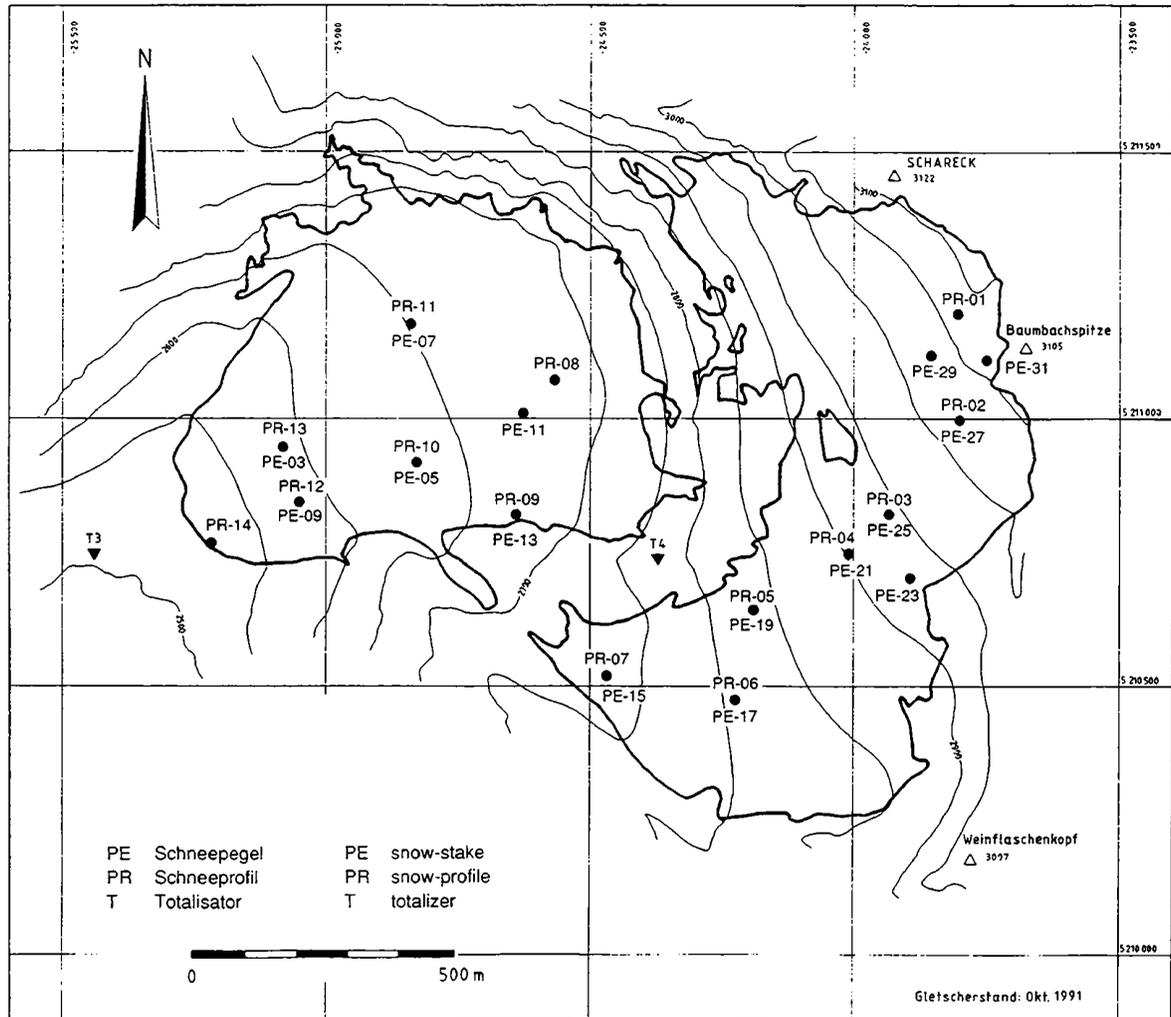


Abb. 3.1.1: Das Meßnetz im unmittelbaren Bereich des östlichen Wurtenkees

Fig. 3.1.1: The local network on and nearby Eastern Wurtenkees

### 3.1.1 Niederschlagssummen

#### 3.1.1 Precipitation amounts

Die Messung der Niederschläge im Hochgebirge ist ein bis heute noch nicht zufriedenstellend gelöstes Problem. Zu vielfältig sind die Fehlerquellen, denen das Meßgerät in der Hochgebirgsregion ausgesetzt ist; hinzu kommt noch die erschwerte Zugänglichkeit der Meßeinrichtungen zu gewissen Jahreszeiten. Am Wurtenkees wurden im Jahre 1981 zur Niederschlagsmessung Totalisatoren installiert, die den gefallenen Niederschlag längere Zeit speichern können. Deshalb sind dort neben den Fehlerquellen, die schon beim Auffangvorgang entstehen, speziell auch jene, die bei der notwendigen Speicherung zustande kommen, zu berücksichtigen. Der größte Fehler, der beim Auffangvorgang auftritt, ist jener der Abdrift, der sich durch die hohen Windgeschwindigkeiten in Gebirgslagen und dem hohen Schneeanteil am Gesamtniederschlag ergibt (VISCHER und SEVRUK, 1975). Durch Anbringung von Windschutzringen an den Meßgeräten auf dem Wurtenkees konnte dieser Fehler sicherlich verringert, aber dennoch nicht gänzlich ausgeschaltet werden. Ein Teil des im Sammelgefäß gespeicherten Niederschlages kann durch Verdunstung verlorengehen, weil gerade beim Totalisator die Meßfrequenz gering ist. Schutzschichten aus Öl, das über dem gespeicherten Wasser schwimmen soll, sind meist nur ein ungenügender Schutz und auch die beigesetzte Chlorcalciumlösung, die als Frostschutzmittel wirken soll, liefert einen unerwünschten Nebeneffekt, denn die Chlorcalciumlösung bindet einen Teil des Wassers und verringert damit dessen Volumen. Auf diese Weise können Meßfehler in der Größenordnung von 6 bis 30% der Monatsniederschläge entstehen (HEIGEL, 1960). Trotz aller dieser Probleme ist der Totalisator noch immer die beste Möglichkeit, die Niederschlagsverhältnisse im Hochgebirge zu erfassen (AUER, 1992b).

#### Datenmaterial

##### Data

Tabelle 3.1.1.1 gibt eine Übersicht der im Untersuchungsgebiet betriebenen Totalisatoren, ihrer Seehöhen sowie des vorhandenen Datenmaterials. Ergänzend dazu sind auch die Lageparameter dreier Ombrometerstationen der näheren Umgebung sowie des Sonnblick-Gipfeltotalisators angeführt. Für die weitere Bearbeitung wurde der Totalisator T2 wegen der Kürze der Meßperiode eliminiert.

Um wirklich vergleichbare Datensätze zu bekommen, wurden mit Hilfe der Quotientenmethode fehlende Monatssummen ergänzt. Dabei wurden aufgrund des korrelativen Zusammenhanges (s. u.) T3 und T4 wechselweise, und der Totalisator T1 mit Hilfe von T4 berechnet. Zur Datendokumentation sind die ergänzten Datensätze am Ende des Abschnittes in Tabelle 3.1.1.6 zusammengestellt.

**Tab. 3.1.1.1: Verzeichnis der Wurtenkeestotalisatoren sowie ausgewählter Niederschlagsmeßstellen.**

**Tab. 3.1.1.1: List of totalizers and rain gauges in the region of Wurtenkees**

Totalisator Totalizer	Seehöhe und Koordinaten altitude and coordinates	Originaldaten ab 1981 original data since 1981
T4	2791 m, $\lambda=13^{\circ}01'$ , $\varphi=47^{\circ}02'$	1981/07-1986/04, seit 1987/07- .
T3	2511 m, $\lambda=13^{\circ}00'$ , $\varphi=47^{\circ}02'$	1981/07-1991/09, seit 1992/12-.
T2	2460m, $\lambda=13^{\circ}00'$ , $\varphi=47^{\circ}02'$	1981/07-1982/03 (vom Eisdruck vernichtet/destroyed)
T1	*2420m, $\lambda=13^{\circ}01'$ , $\varphi=47^{\circ}01'$	1981/07-1988/09, 1989/03-1989/08, 1989/10-1992/11, seit 1993/04-
Sonnblick-horizontal	3076m, $\lambda=12^{\circ}57'$ , $\varphi=47^{\circ}03'$	vollständig (complete)
Ombrometer rain gauge	Seehöhe und Koordinaten altitude and coordinates	Originaldaten ab 1981 original data since 1981
Innerfragant	1195m, $\lambda=13^{\circ}03'$ , $\varphi=46^{\circ}58'$	vollständig (complete)
Kleindorf	735m, $\lambda=13^{\circ}06'$ , $\varphi=46^{\circ}55'$	vollständig (complete)
Obervellach	675m, $\lambda=13^{\circ}11'$ , $\varphi=46^{\circ}56'$	vollständig (complete)

\* verlegt im August 1982 (vorher 2432 m)

\* relocation in August 1982 (before 2432 m)

### Die räumliche Verteilung der Niederschlagssummen im Gebiet des Wurtenkees Spatial distribution of precipitation in the region of Wurtenkees

In Tabelle 3.1.1.2 sind die mittleren und extremen Niederschlagssummen, gewonnen aus den Totalisatorenmessungen, für die einzelnen Monate, das Winter- und Sommerhalbjahr sowie die sich daraus errechnete Jahressumme zusammengestellt. Dabei sei nochmals daran erinnert, daß diese Ergebnisse aufgrund der Meßfehler nicht in allen Belangen der Realität entsprechen müssen.

Tab. 3.1.1.2: Mittlere und extreme Niederschlagssummen (mm) am Wurtenkees, 1981/82 bis 1992/93

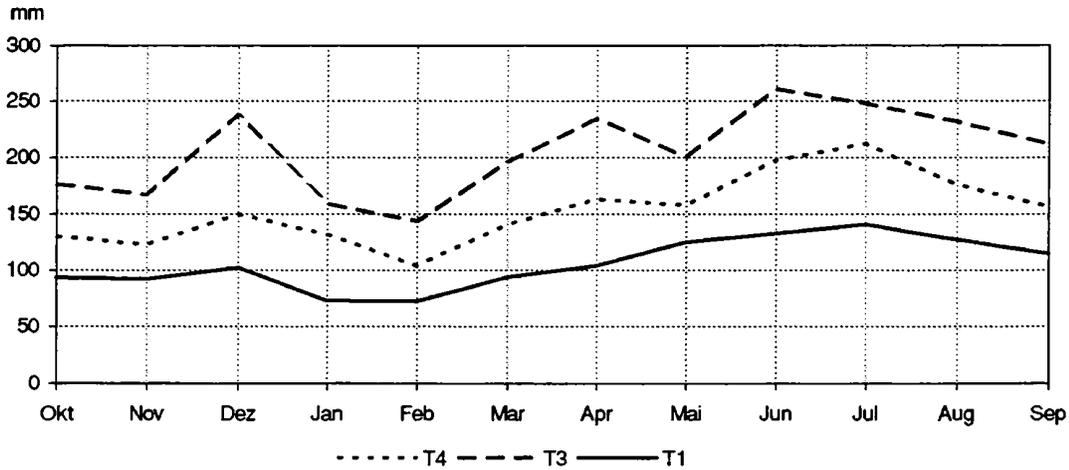
Tab. 3.1.1.2: Mean and extreme precipitation amounts (mm) for Wurtenkees, 1981/82 to 1992/93

	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Win*	Som*	Jahr*
	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Win	Sum	Year
<b>T4</b>															
Mittel	130	123	150	132	104	141	163	158	198	212	176	157	944	901	1845
mean															
Max	235	185	225	264	171	205	233	240	344	329	225	248	1263	1055	2069
Jahr	1992	1990	1988	1983	1984	1992	1985	1991	1985	1982	1989	1984	82/83	1989	86/87
year															
Min	52	12	35	60	35	55	99	64	135	98	109	51	615	663	1303
Jahr	1985	1983	1989	1991	1992	1986	1986	1986	1990	1983	1983	1985	85/86	1983	85/86
year															
<b>T3</b>															
Mittel	176	167	238	159	144	196	234	201	261	248	232	212	1313	1154	2467
mean															
Max	318	310	405	299	234	300	300	330	438	355	305	321	1586	1400	2805
Jahr	1992	1987	1988	1984	1984	1988	1990	1991	1985	1989	1988	1984	83/84	1989	88/89
year															
Min	99	33	40	35	48	110	151	80	137	85	152	95	950	667	1986
Jahr	1984	1983	1989	1990	1992	1991	1986	1986	1982	1983	1983	1983	89/90	1983	85/86
year															
<b>T1</b>															
Mittel	93	92	102	73	72	94	104	125	133	141	127	115	630	641	1270
mean															
Max	190	185	185	135	130	195	199	269	175	220	215	218	765	925	1571
Jahr	1992	1990	1990	1983	1987	1992	1986	1984	1991	1987	1987	1984	91/92	1986	86/87
year															
Min	30	4	15	32	30	30	55	30	65	73	72	31	305	474	810
Jahr	1989	1984	1989	1993	1992	1990	1993	1989	1989	1986	1983	1985	89/90	89	89/90
year															

\*) glaziologisches Jahr: Okt.-Sep., Winter: Okt.-Apr., Sommer: Mai - Sep.

\*) glaciological year: Oct.-Sep., winter: Oct.-Apr., summer: May-Sep.

Die Zuteilung der Niederschlagssummen auf die einzelnen Monate erfolgte aus den in unregelmäßigen Abständen erhobenen Niederschlagsmengen mit Hilfe linearer Interpolationen unter Berücksichtigung des Niederschlagsverlaufes am Sonnblickobservatorium. Der höchste monatliche Niederschlagseintrag wäre hiernach bei den Totalisatoren T1 und T4 dem Juli (wie auch bei den Talstationen Obervellach, Kleindorf und Innerfragant), beim Totalisator T3 dem Juni zuzuordnen; in jedem Fall aber einem Sommermonat. Ein sommerliches Niederschlagsmaximum ist auch auf dem Sonnblickgipfel durch die Meßdaten eines Totalisators mit hangparalleler Oberfläche repräsentiert (AUER, 1992c). Die synthetisch erhobenen Niederschlagsmonatssummen sollen aber hier nicht weiter bearbeitet werden, sondern es soll der jährliche Niederschlagseintrag lediglich nach Sommer und Winter unterschieden werden. Die unterschiedliche Zeitdauer dieser beiden Jahresabschnitte wird durch die Umwandlung in mittlere Niederschlagssummen pro Tag eliminiert.



**Abb. 3.1.1.1: Jahresgang des Niederschlages am Wurtenkees**  
**Datenbasis: Totalisatorenmessungen 1981 bis 1993**

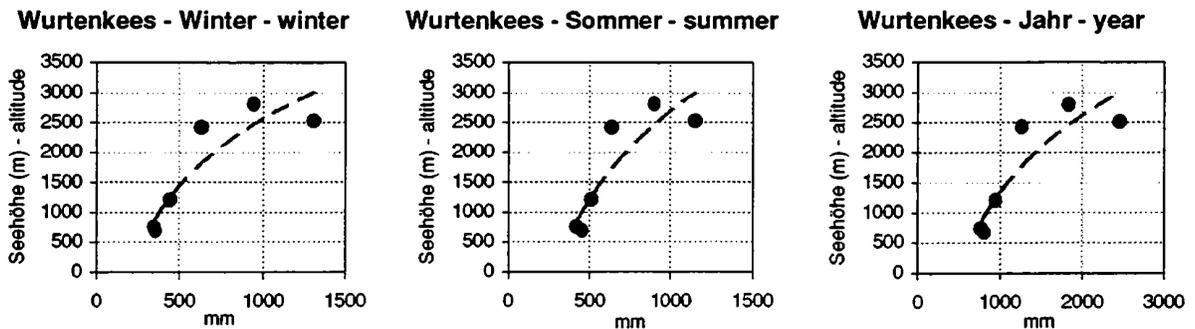
**Fig. 3.1.1.1: Annual course of precipitation totals on Wurtenkees measured by totalizers**

**Tab. 3.1.1.3: Mittlere Niederschlagssummen (mm) pro Tag im Gebiet des Wurtenkeeses.**

Station	Winter (Okt-Apr)	Sommer (Mai-Sep)
T4	4.45	5.89
T3	6.19	7.54
T1	2.97	4.18
Innerfragant	2.10	3.36
Kleindorf	1.67	2.76
Obervellach	1.69	2.99

**Tab. 3.1.1.3: Mean precipitation sums per day in the region of Wurtenkees**

An allen Meßstellen fällt im Sommer bezogen auf einen Tag mehr Niederschlag als im Winter, die allgemeine Niederschlagszunahme mit der Höhe ist in beiden Jahresabschnitten gegeben, wenn auch der Totalisator T4 durch die große Windabdrift zu niedrige Meßergebnisse liefert. Die beste mathematische Anpassung für die Abhängigkeit der Niederschlagshöhe von der Seehöhe ist durch eine exponentielle Annäherung gegeben. Die für Winter- und Sommer sowie für das glaziologische Jahr errechneten Beziehungen sind in Abbildung 3.1.1.2 dargestellt.



**Abb. 3.1.1.2: Zusammenhänge zwischen Niederschlagshöhe und Seehöhe am Wurtenkees im Winter, Sommer und im glaziologischen Haushaltsjahr.**

**Fig. 3.1.1.2: Relationship between precipitation amount and altitude on Wurtenkees in winter, summer and in the glaciological year**

Die Bestimmtheitsmaße dieser Anpassungen liegen sowohl für die Jahresabschnitte als auch für das Gesamtjahr um 0,8. Dieser Wert ist geringer als er an anderen Gletschern des Sonnblickgebietes zu finden ist (AUER, 1995).

Als Maß für die räumlichen Zusammenhänge der einzelnen Niederschlagsmeßpunkte werden in Tabelle 3.1.1.4 Korrelationskoeffizienten ausgewählter Stationspaare zusammengestellt.

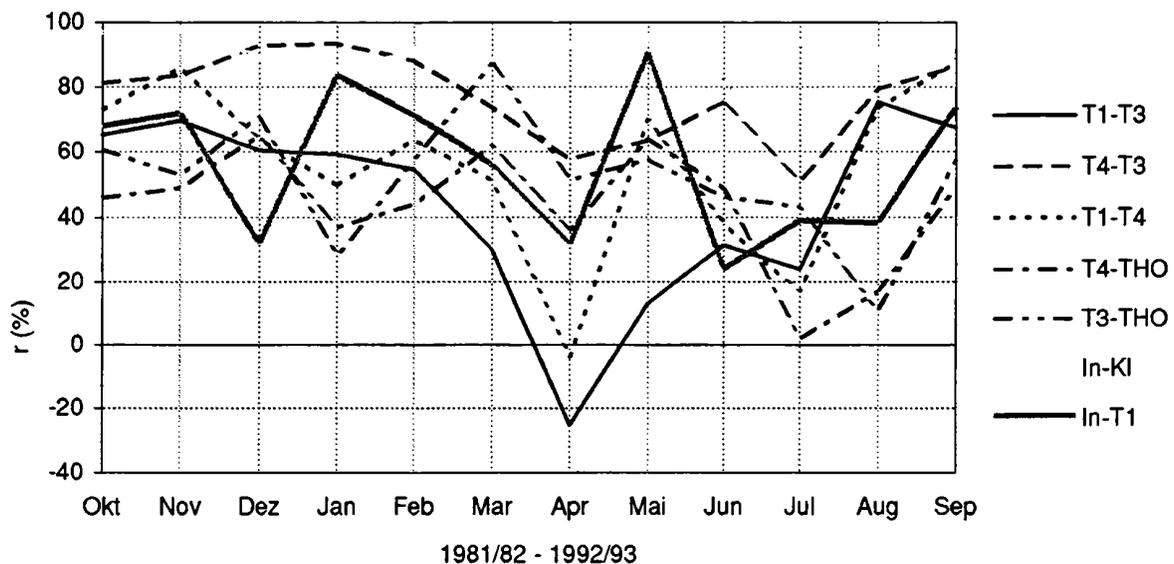
**Tab. 3.1.1.4: Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten der Niederschlagssummen ausgewählter Stationspaare im Gebiet des Wurtenkeeses**

Station	Winter	Sommer	Jahr
	Winter	Summer	Year
T4/T3	0,86	0,52	0,74
T4/Sonnblick	0,59	0,36	0,65
T3/Sonnblick	0,56	0,60	0,69
T1/T3	0,36	0,17	0,21
T1/Innerfragant	0,33	0,73	0,33
Innerfragant/Kleindorf	0,81	0,84	0,85

**Tab. 3.1.1.4: Product moment correlation coefficients for precipitation totals of selected stations in the region of Wurtenkees**

Den besten räumlichen Zusammenhang zeigen die Ombrometer der Talstationen Innerfragant und Kleindorf und zwar das ganze Jahr hindurch. Bei den Totalisatoren beträgt der höchste Korrelationskoeffizient 0,86 im Winter zwischen T3 und T4, für die Jahressummen immerhin noch 0,74. Normalerweise nimmt mit wachsender räumlicher Entfernung die Korrelation rasch ab, was sich schon beim Vergleich T1/T3 zeigt. Hier im Gebiet des Wurtenkeeses spielt aber die die Niederschlagsmessung beeinflussende nächste Umgebung die größte Rolle. Im Sommer, wenn bei T1 vermehrt flüssiger Niederschlag auftritt, finden sich auch zu den Ombrometermessungen der Talstationen akzeptable Zusammenhänge, im Winter geht die Korrelation markant zurück. Der Sonnblickgipfeltotalisator ist mit 0,69 bei den Jahressummen am besten mit dem Totalisator T3 korreliert. Damit ist der korrelative Zusammenhang zwischen T3 und dem Sonnblick Gipfel etwa ebenso groß wie zwischen Sonnblick und dem Totalisator in Kolm-Saigurn am Fuße des Sonnblicks (AUER, 1992a), aber immerhin höher als beispielsweise zwischen dem Sonnblick und dem stark windbeeinflussten Meßpunkt Totalisator Radhaus am Sonnblick in 2117 m.

Einzelne Monate können noch schlechter korreliert sein (siehe Abbildung 3.1.1.3).



**Abb. 3.1.1.3: Jahresgang der räumlichen Korrelation einzelner Niederschlagsmeßpunkte im Gebiet des Wurtenkeeses**

**Fig. 3.1.1.3: Annual course of the spatial correlation coefficients between the precipitation measuring points in the region of Wurtenkees**

Zur Abschätzung des Niederschlagsdefizits, welches sich aufgrund der bereits erwähnten Meßproblematik im Hochgebirge ergibt, erscheint es sinnvoll, die Niederschlagshöhen, die mit dem Totalisator gemessen wurden, mit jenen, die sich aus den aus den Schneeprofilen berechneten Wasserwerten ergeben, zu vergleichen. Dabei muß bei den Profilwerten der Regenanteil, der eventuell zu Winterbeginn noch ohne Speicherung abfließt, eliminiert werden (vergl. Tabelle 3.1.7). Sinnvollerweise wurden die Totalisatoren T3 und T4 mit den nächstgelegenen Schneeprofilpunkten verglichen. Ergebnisse sind in Tabelle 3.1.1.5 zu finden.

**Tab. 3.1.1.5: Korrelationskoeffizienten zwischen Niederschlagssummen bestimmt nach Totalisatoren und nach aus Schneeprofilen berechneten Wasserwerten über den hydrologischen Winter auf dem Wurtenkees**

**Tab. 3.1.1.5: Correlation coefficients between precipitation sums estimated by totalizers and by water content from nearest snow profiles during hydrological winter season on Wurtenkees**

Totalisator/Schneeprofil Totalizer/Snow Profile	Dh (m) <sup>*1</sup>	Dv (m) <sup>*2</sup>	r	T/PR (%)
T3/ PR 14	220	22	0,48	96
T3/ PR 12	400	81	-0,08	102
T3/ PR 13	420	82	0,05	138
T4/ PR 05	200	49	0,68	79
T4/ PR 06	280	22	0,53	75
*1) Distanz horizontal distance horizontal Totalisator/Seehöhenstufe Totalizer/ altitude	*2) Distanz vertikal distance vertical		r	T/PR (%)
T4/ 2750 - 2800			0,43	76
T4/ 2800 - 2850			0,46	80
T3/ 2500 - 2550			0,12	98

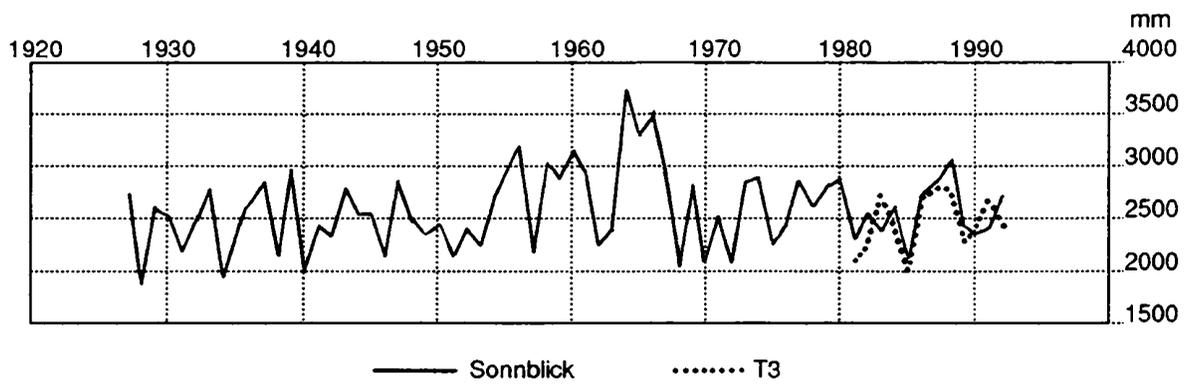
Die Korrelation zwischen den Ergebnissen der Totalisatoren und Schneeprofilwerten ist insgesamt niedriger als zwischen den Totalisatoren untereinander. Auch der Übergang von Einzelprofilen zu Seehöhenstufen bringt keine weitere Verbesserung.

Tabelle 3.1.1.5 enthält auch das prozentuale Verhältnis der nach beiden Methoden bestimmten mittleren Niederschlagssummen. Diese Zahlenwerte bestätigen die vorhin getroffenen Aussagen über die Güte der Niederschlagsmessung im Hochgebirge. Der offensichtlich windgeschützt aufgestellte Totalisator T3 empfängt auf lange Sicht gesehen nur geringfügig weniger Niederschlag als Berechnungen aus den Wasserwerten für die Seehöhenstufen 2500 bis 2550 m ergeben ( $P_{m(tot)} = 1240$  mm,  $P_{m(prof)} = 1260$  mm). Der stark dem Wind ausgesetzte Totalisator T4 hingegen zeigt ein Defizit von 290 mm gegenüber der mittleren Winterbilanz bestimmt aus Schneeprofilen der Seehöhenstufe 2750 bis 2800 m.

### Die zeitlichen Änderungen der Niederschlagsmengen im Gebiet des Wurtenkees Temporal changes of precipitation in the region of Wurtenkees

Wie schon aus Tabelle 3.1.1.2 hervorging, können in Einzeljahren erhebliche Abweichungen zu den berechneten Mittelwerten auftreten. So empfing der Totalisator 3 im Bilanzjahr 1988/89 einen Niederschlagseintrag von ca. 2800 mm, wogegen das Bilanzjahr 1985/86 um etwa 800 mm weniger Niederschlag brachte. Beim Totalisator 4 bewegten sich die Mengen zwischen 2069 mm (1986/87) und 1303 mm (1985/86), bei T1 zwischen 1571 mm (1986/87) und 810 mm (1989/90).

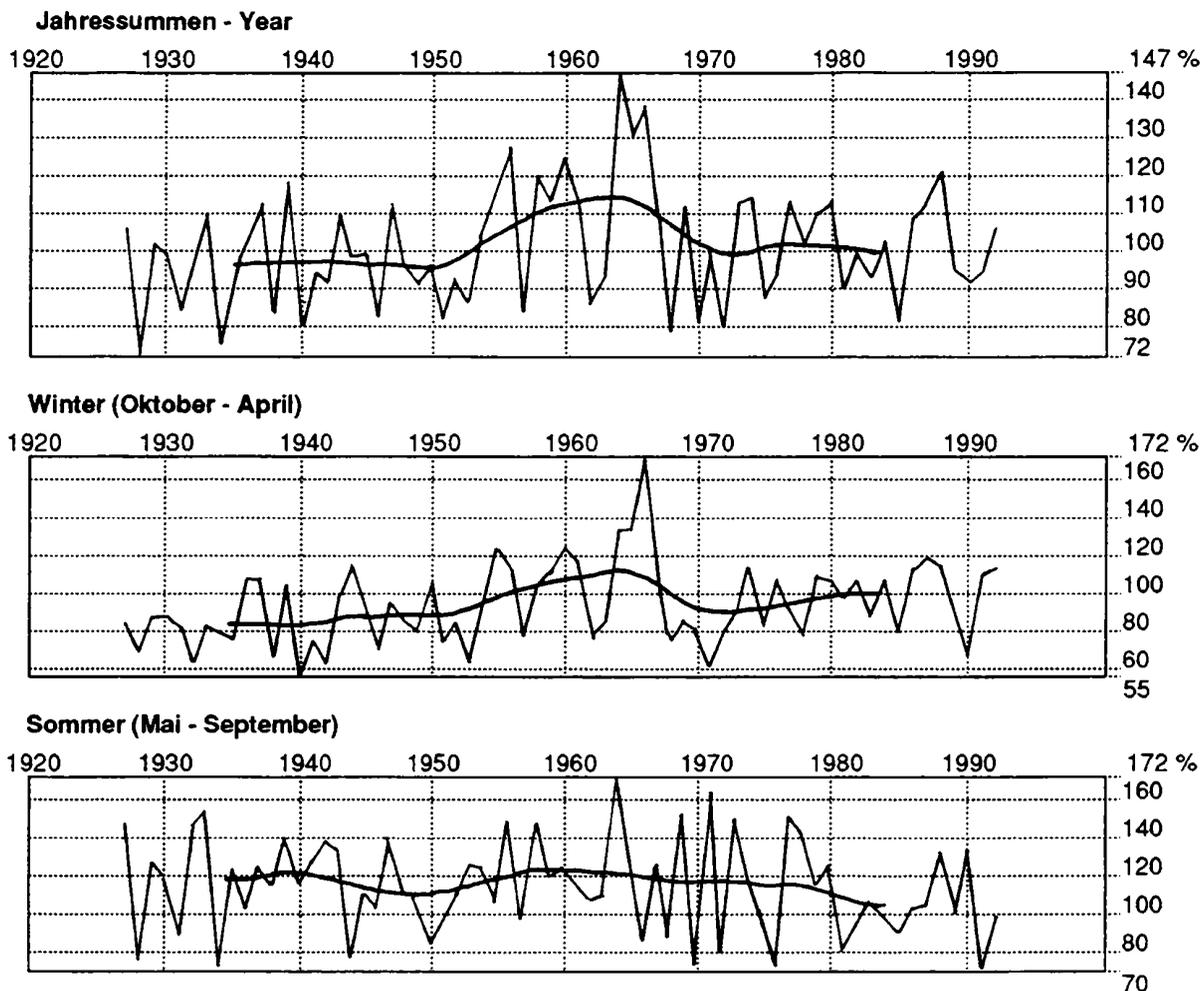
Die Meßperiode 1981/82 bis 1992/93 stellt natürlich eine insgesamt zu kleine Stichprobe dar, um über das langfristige Verhalten der Niederschlagseinträge Aussagen zu treffen. Auf Grund der relativ guten Zusammenhänge zwischen dem Totalisator T3 und dem Sonnblick Totalisator (Abbildung 3.1.1.4) dürfte auch auf dem Wurtenkees folgende Niederschlagsentwicklung stattgefunden haben.



**Abb. 3.1.1.4:** Jahresniederschlagssummen gemessen mit dem Totalisator T3 auf dem Wurtenkees und dem Totalisator Sonnblick-horizontal

**Fig. 3.1.1.4:** Annual precipitation sums measured at T3 on Wurtenkees and on Sonnblick

Gegenüber dem mittleren Zustand der Jahre 1981/82 bis 1992/93 kam es speziell Mitte der 60er Jahre zu bis zu 50% vermehrten Niederschlagseinträgen um das Bilanzjahr 1964/65. Danach allerdings nahmen die Niederschlagssummen sehr rasch bis Anfang der 70er Jahre wieder ab. Eine lineare Trendabschätzung zwischen 1964/65 und 1992/93 ergibt eine Niederschlagsabnahme um ca. 15%. Einen ähnlichen Verlauf zeigt die zeitliche Darstellung der Wintersummen in Abbildung 3.1.1.5. Als niederschlagsreichster Winter scheint das Jahr 1966/67 mit 70% Überschuß gegenüber der Beobachtungsperiode 1981-1993. Den niederschlagsreichsten Sommer brachte das Jahr 1965. Seit dieser Zeit haben die sommerlichen Niederschlagseinträge allmählich um ca. 10% abgenommen.



**Abb. 3.1.1.5:** Relative Niederschlagssummen (%) für das Jahr, Winter und Sommer gemessen beim Gipfeltotalisator Sonnblick bezogen auf das Mittel 1981-1992 (= Wurtenkees Meßperiode)

**Fig. 3.1.1.5:** Annual and seasonal precipitation totals at Sonnblick top, relative values to Wurtenkees measuring period 1981-1992

**Tab. 3.1.1.6: Niederschlagssummen (mm) berechnet aus Totalisatoren auf dem Wurtenkees, Lücken ergänzt mit Nachbartotalisatoren**

**Tab. 3.1.1.6: Precipitation totals measured by totalizers on Wurtenkees, gaps completed with neighbouring totalizers**

Jahr Year	Okt Oct	Nov Nov	Dez Dec	Jan Jan	Feb Feb	Mar Mar	Apr Apr	Mai May	Jun Jun	Jul Jul	Aug Aug	Sep Sep	Win Win	Som Sum	Year
<b>T1</b>															
1981/82	123	106	115	132	64	99	121	135	131	143	96	96	760	601	1361
1982/83	90	87	103	135	77	93	99	162	129	94	72	70	684	527	1211
1983/84	98	18	147	87	98	113	75	269	103	132	135	218	636	857	1493
1984/85	66	4	63	64	41	140	128	107	168	182	171	31	506	659	1165
1985/86	35	92	115	117	93	61	199	101	151	73	85	86	712	496	1208
1986/87	56	85	80	65	130	150	80	190	160	220	215	140	646	925	1571
1987/88	140	100	50	70	60	40	80	80	90	110	150	100	540	530	1070
1988/89	72	96	173	34	105	65	100	30	65	130	105	144	645	474	1119
1989/90	30	60	15	50	60	30	60	90	130	130	85	70	305	505	810
1990/91	75	185	185	40	35	70	130	170	175	145	135	95	720	720	1440
1991/92	145	135	90	45	30	195	125	95	140	160	130	150	765	675	1440
1992/93	190	130	86	32	70	72	55	75	150	170	150	175	635	720	1355
<b>T3</b>															
1981/82	193	189	229	169	81	148	191	162	137	219	178	167	1200	863	2063
1982/83	170	208	279	267	138	239	275	194	141	85	152	95	1576	667	2243
1983/84	165	33	403	299	234	224	228	182	189	233	244	321	1586	1169	2755
1984/85	99	70	123	119	224	160	297	193	438	307	290	122	1092	1350	2442
1985/86	127	181	200	193	93	128	151	80	244	229	168	174	1073	895	1968
1986/87	110	185	275	240	215	250	250	260	255	230	290	180	1525	1215	2740
1987/88	180	310	190	130	210	300	185	205	245	265	305	275	1505	1295	2800
1988/89	135	175	405	75	210	140	265	235	290	355	255	265	1405	1400	2805
1989/90	240	35	40	35	80	220	300	260	310	310	200	255	950	1335	2285
1990/91	155	205	170	80	50	110	255	330	300	285	285	165	1025	1365	2390
1991/92	216	197	340	228	48	285	244	102	318	187	223	309	1558	1139	2697
1992/93	318	218	200	70	140	150	170	210	270	270	190	210	1266	1150	2416
<b>T4</b>															
1981/82	168	145	120	115	89	96	149	173	168	329	133	148	882	951	1833
1982/83	201	165	204	264	62	188	179	195	169	98	109	92	1263	663	1926
1983/84	86	12	218	226	171	123	144	236	144	201	204	248	980	1033	2013
1984/85	76	25	93	94	117	182	233	138	344	196	177	51	820	906	1726
1985/86	52	92	110	114	93	55	99	64	183	194	124	123	615	688	1303
1986/87	81	136	170	198	153	180	171	208	192	215	225	140	1089	980	2069
1987/88	140	180	105	100	155	185	155	175	165	260	220	185	1020	1005	2025
1988/89	100	125	225	90	125	150	190	145	215	290	225	180	1005	1055	2060
1989/90	136	104	35	65	80	125	120	110	135	165	145	155	665	710	1375
1990/91	125	185	150	60	45	100	200	240	200	190	185	105	865	920	1785
1991/92	160	145	215	190	35	205	170	80	240	160	170	230	1120	880	2000
1992/93	235	160	160	70	120	105	150	135	215	245	200	230	1000	1025	2025

Die Wurtenkees-Meßperiode 1981/82 bis 1992/93 stellt sich somit bezüglich des Niederschlages als für den größten Teil der letzten 65 Jahre repräsentative Stichprobe dar. Nur der Zeitabschnitt 1955 bis 1967 zeigt, daß die Klimavariabilität im Wurtenkeesgebiet auch über längere Zeitabschnitte deutlich höhere Niederschläge zuläßt, als sie während der Intensivmeßperiode aufgetreten sind.

### 3.1.2 Schneehöhen

### 3.1.2 Snowdepths

Deuteten schon die Meßergebnisse der Totalisatoren, trotz der beschriebenen anzunehmenden Verfälschung durch Windeinfluß, auf ein stärkeres kleinräumiges Abweichen von der großräumig gegebenen Zunahme des Niederschlages mit der Höhe hin, so zeigt das dichtere Schneepelmeßnetz, daß auch der abgelagerte Winterschnee auf dem Wurtenkees geländebedingt deutlich modifiziert wird.

Tab. 3.1.2.1: Verzeichnisse der Schneepegel im Sonnblickgebiet

Tab. 3.1.2.1: Catalog of snow gauges in Sonnblick region

Pegel snow-gauge	Name im Gelände	Gauss-Krueger Koordinaten			Gletscher glacier	seit since
		Meridianstreifen M 41				
		X	Y	Z		
WUK-01	PE-03	210951	-25081	2593	WUK	1984
WUK-02	PE-09	210848	-25048	2592	WUK	1985
WUK-03	PE-05	210921	-24836	2647	WUK	1984
WUK-04	PE-07	211175	-24842	2655	WUK	1984
WUK-05	PE-11	211020	-24620	2675	WUK	1982
WUK-06	PE-13	210817	-24642	2677	WUK	1984
WUK-07	PE-15	210521	-24469	2743	WUK	1981
WUK-08	PE-17	210486	-24227	2813	WUK	1984
WUK-09	PE-19	210653	-24195	2840	WUK	1981
WUK-10	PE-21	210751	-24044	2898	WUK	1981
WUK-11	PE-23	210705	-23891	2920	WUK	1984
WUK-12	PE-25	210824	-23934	2946	WUK	1981
WUK-13	PE-27	211001	-23810	3023	WUK	1981
WUK-14	PE-29	211125	-23860	3035	WUK	1984
WUK-15	PE-31	211162	-23750	3080	WUK	1982
GOK-01	Unterer Keesboden			2480	GOK	1927
GOK-02	Oberer Keesboden			2710	GOK	1927
GOK-03	Oberer Steilhang			2850	GOK	1948
GOK-04	Brettscharte unten			2890	GOK	1970
GOK-05	Brettscharte oben			2920	GOK	1970
GOK-06	Fleißscharte			2990	GOK	1927
FLK-01	Zunge			2780	FLK	1975
FLK-02	Mitte unten			2780	FLK	1975
FLK-03	Pilatusscharte			2880	FLK	1927
FLK-04	Mitte oben			2920	FLK	1970

WUK...Wurtenkees, GOK...Goldbergkees, FLK...Kleinfleißkees  
 Gauß-Krüger Koordinaten nur für WUK, nicht für GOK und FLK  
 Gauss-Krueger coordinates for WUK only, not for GOK and FLK

Tabelle 3.1.2.1 enthält die Lageparameter und Meßperioden des Schneepelmeßnetzes auf dem Wurtenkees. Aus Vergleichsgründen wurden auch die Pegel der benachbarten Gletscher des Sonnblickgebiets herangezogen, die in der Untersuchungsperiode in Betrieb waren. Im unmittelbaren Untersuchungsgebiet, dem östlichen Wurtenkees, wurden zunächst sieben, ab 1984/85 fünfzehn Schneepegel ganzjährig betrieben. Die monatlichen Einzelmeßwerte sind in Tabelle 3.1.2.2 enthalten.

**Tab. 3.1.2.2: Monatliche Schneehöhen (cm) an den Wurtenkees Schneepiegeln 1981/82 bis 1992/93 im Verlauf des Glazialjahres (am 1. Oktober auf Null gesetzt)**

**Tab. 3.1.2.2: Monthly snowdepths (cm) measured at the Wurtenkees gauges in the glaciological years 1981/82 to 1992/93 (Gauges set to zero at October 1st)**

<b>WUK-01</b> (2590 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82												
1982/83												
1983/84												
1984/85	62	80	112	142	144	204	255	190	175	35	0	0
1985/86	0	40	90	135	160	210	280	110	35	0	0	0
1986/87	25	75	130	185	225	270	295	325	250	0	0	0
1987/88	10	75	100	145	205	225	240	140	85	0	0	0
1988/89	0	0	0	0	65	100	135	145	75	0	0	0
1989/90	40	85	110	130	210	210	220	185	105	0	0	0
1990/91	105	210	230	210	225	245	274	298	170	12	0	0
1991/92	72	105	160	185	200	225	250	185	90	20	0	0
1992/93	107	244	230	230	294	332	321	255	150	30	5	30

<b>WUK-02</b> (2595 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82												
1982/83												
1983/84												
1984/85												
1985/86	0	75	160	240	250	290	360	190	60	0	0	0
1986/87	25	75	155	230	280	330	355	405	280	80	0	0
1987/88	15	85	130	180	260	320	320	245	160	10	0	0
1988/89	10	70	180	160	220	235	290	300	215	100	0	0
1989/90	35	75	100	120	185	185	290	145	65	0	0	0
1990/91	80	165	195	190	200	220	210	285	165	160	0	0
1991/92	60	114	134	153	172	192	185	91	12	0	0	0
1992/93	107	175	210	210	204	213	225	168	75	4	5	30

<b>WUK-03</b> (2650 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82												
1982/83												
1983/84												
1984/85	67	77	119	160	170	248	293	225	239	0	0	0
1985/86	0	70	160	235	235	260	320	180	60	0	0	0
1986/87	25	75	145	210	255	305	325	360	280	85	0	0
1987/88	10	120	170	220	300	370	370	275	195	40	0	0
1988/89	0	70	190	180	245	290	350	370	300	170	15	0
1989/90	60	110	155	175	280	280	275	240	165	25	0	0
1990/91	105	210	230	210	215	250	300	370	296	98	0	0
1991/92	78	145	180	195	230	285	337	300	110	55	0	0
1992/93	135	230	295	310	335	360	398	245	171	97	5	50

## Fortsetzung Tab. 3.1.2.2

<b>WUK-04</b> (2660 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82												
1982/83												
1983/84												
1984/85	94	102	161	217	172	254	308	246	269	0	0	0
1985/86	0	70	160	235	245	280	340	210	105	0	0	0
1986/87	25	75	130	195	250	310	340	350	280	80	0	0
1987/88	10	110	165	220	310	370	375	290	220	80	0	0
1988/89	0	85	162	77	150	205	284	350	312	252	0	0
1989/90	60	115	150	170	290	290	320	290	210	60	0	0
1990/91	135	270	310	290	305	340	378	473	333	144	0	0
1991/92	84	140	165	180	220	255	318	280	115	10	0	0
1992/93	140	227	284	290	305	340	351	298	216	115	40	50

<b>WUK-05</b> (2675 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82												
1982/83	70	115	180	260	265	310	350	310	205	15	0	0
1983/84	65	75	130	170	200	250	320	335	285	145	0	0
1984/85	90	86	128	168	209	290	314	261	315	4	0	0
1985/86	0	65	140	210	230	270	340	170	50	0	0	0
1986/87	30	75	140	223	279	340	365	427	402	189	0	0
1987/88	15	120	165	220	300	355	360	310	220	80	0	0
1988/89	0	53	132	122	215	243	285	317	285	303	0	0
1989/90	160	195	230	250	350	350	360	335	275	120	0	0
1990/91	110	225	260	240	265	310	370	470	360	195	50	0
1991/92	76	150	170	180	200	295	355	260	160	60	0	0
1992/93	135	185	295	350	385	445	500	420	300	125	45	0

<b>WUK-06</b> (2680 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82												
1982/83												
1983/84												
1984/85	62	68	110	151	190	248	294	234	225	0	0	0
1985/86	0	65	140	210	220	265	345	170	50	0	0	0
1986/87	30	75	140	200	250	300	315	345	270	85	0	0
1987/88	19	92	124	161	229	319	382	311	170	0	0	0
1988/89	0	65	110	110	170	195	230	245	180	85	10	0
1989/90	68	110	136	161	235	236	268	257	183	23	0	0
1990/91	80	165	200	200	215	250	310	405	300	130	0	0
1991/92	72	144	158	176	190	270	315	245	145	40	0	0
1992/93	125	190	210	233	253	278	295	243	166	53	20	55

Fortsetzung Tab. 3.1.2.2

<b>WUK-07</b> (2745 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82	45	100	130	165	165	265	285	230	130	0	0	0
1982/83	67	119	172	248	242	280	271	249	153	0	0	0
1983/84	60	70	90	115	145	200	250	260	215	130	50	35
1984/85	28	42	79	116	146	209	237	189	188	0	0	0
1985/86	0	60	130	195	210	235	270	140	45	0	0	0
1986/87	30	55	105	155	195	245	275	310	240	50	0	0
1987/88	15	75	105	135	195	270	320	260	135	0	0	0
1988/89	0	35	90	85	150	175	215	230	170	80	0	0
1989/90	55	90	115	135	200	200	225	215	145	10	0	0
1990/91	80	165	190	180	190	200	255	300	170	0	0	0
1991/92	40	80	125	165	200	240	265	200	110	30	0	0
1992/93	112	170	212	224	250	270	277	230	145	30	10	55

<b>WUK-08</b> (2810 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82												
1982/83												
1983/84												
1984/85	29	30	65	100	126	186	244	190	190	0	0	0
1985/86	0	55	115	170	195	225	260	155	75	0	0	0
1986/87	35	30	100	155	200	240	280	295	220	65	0	0
1987/88	20	105	135	165	205	250	300	205	130	0	0	0
1988/89	0	60	115	55	110	150	225	270	220	105	0	0
1989/90	45	115	130	150	205	205	250	225	150	25	0	0
1990/91	100	190	220	210	220	245	300	365	235	60	0	0
1991/92	45	86	170	204	220	296	340	272	196	60	0	0
1992/93	114	157	190	190	245	265	275	235	164	68	10	40

<b>WUK-09</b> (2835 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82	60	110	155	190	185	245	285	235	125	0	0	0
1982/83	70	120	170	225	225	265	275	250	165	0	0	0
1983/84	30	55	110	160	210	270	305	345	290	200	125	100
1984/85	20	22	51	80	94	160	205	161	165	80	15	0
1985/86	5	65	110	160	185	220	260	155	75	0	0	0
1986/87	35	30	60	100	150	210	270	295	220	85	0	0
1987/88	30	80	95	120	170	225	290	145	90	5	0	0
1988/89	0	70	130	60	120	160	220	245	210	130	10	0
1989/90	45	110	111	121	175	210	215	190	120	0	0	0
1990/91	90	175	195	170	185	210	300	345	220	50	0	0
1991/92	55	110	164	200	210	288	344	280	190	56	0	0
1992/93	130	190	228	225	258	295	298	250	175	55	5	52

## Fortsetzung Tab. 3.1.2.2

<b>WUK-10</b> (2895 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82	70	130	175	210	205	265	310	255	145	40	0	0
1982/83	60	110	175	255	255	305	335	315	255	70	0	0
1983/84	40	65	130	180	225	275	320	360	315	240	175	115
1984/85	58	71	116	160	162	231	301	240	255	170	0	0
1985/86	10	80	140	190	210	255	340	190	95	0	0	0
1986/87	40	40	100	165	210	260	290	350	270	85	0	0
1987/88	30	80	100	130	185	230	255	205	145	25	0	0
1988/89	0	80	165	140	200	230	290	310	265	160	35	0
1989/90	70	95	120	140	230	230	230	220	180	45	0	0
1990/91	100	200	220	190	210	210	290	352	254	91	0	0
1991/92	55	110	180	218	240	302	364	308	234	74	0	0
1992/93	138	185	230	230	295	315	325	283	218	122	15	40

<b>WUK-11</b> (2920 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82												
1982/83												
1983/84												
1984/85	29	42	80	117	160	221	272	220	240	160	0	0
1985/86	11	91	156	212	241	298	398	210	108	0	0	0
1986/87	40	46	112	184	241	304	332	388	308	113	0	0
1987/88	35	100	130	160	225	315	360	260	215	110	0	0
1988/89	0	80	185	175	225	260	305	315	280	170	25	0
1989/90	110	150	165	185	280	280	295	285	230	90	0	0
1990/91	90	175	190	160	170	200	270	390	290	120	0	0
1991/92	50	104	200	224	220	280	325	275	210	70	0	0
1992/93	105	152	185	207	268	290	297	265	195	110	20	55

<b>WUK-12</b> (2935 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82	65	135	180	220	215	290	335	270	180	55	0	0
1982/83	55	105	175	265	265	310	340	325	280	80	0	0
1983/84	40	65	130	185	220	250	325	365	340	265	190	145
1984/85	50	62	97	131	166	226	287	240	250	170	28	0
1985/86	10	85	140	195	215	260	340	165	85	0	0	0
1986/87	40	60	98	161	205	258	290	346	278	93	0	0
1987/88	35	95	120	160	215	275	315	245	190	70	0	0
1988/89	0	70	130	40	90	120	190	220	185	120	25	0
1989/90	70	96	117	136	225	235	250	240	195	60	0	0
1990/91	80	165	185	160	165	245	348	414	303	99	0	0
1991/92	44	90	160	188	200	264	306	256	208	68	0	0
1992/93	115	166	225	193	250	265	282	247	190	105	20	55

Fortsetzung Tab. 3.1.2.2

<b>WUK-13</b> (3025 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82	80	140	205	255	245	295	335	275	195	95	0	0
1982/83	50	85	120	235	230	270	300	295	235	75	0	0
1983/84	40	50	80	75	90	130	155	220	210	140	75	85
1984/85	53	46	67	90	138	186	245	200	235	155	21	0
1985/86	11	74	121	169	189	231	296	148	78	0	0	0
1986/87	45	60	105	160	210	270	230	375	270	85	0	0
1987/88	40	80	115	155	215	275	320	270	215	110	0	0
1988/89	0	65	135	60	110	150	205	235	210	150	75	40
1989/90	90	105	135	155	265	265	285	280	250	140	15	0
1990/91	100	200	225	210	230	255	250	350	245	65	0	0
1991/92	44	86	138	144	160	268	332	294	220	68	0	0
1992/93	118	182	222	230	265	260	290	260	213	133	20	60

<b>WUK-14</b> (3035 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82												
1982/83												
1983/84												
1984/85	31	36	68	99	136	210	258	214	230	150	50	0
1985/86	8	111	193	291	302	345	422	206	111	0	0	0
1986/87	45	40	110	165	185	205	240	375	275	85	0	0
1987/88	40	130	165	185	245	320	375	285	245	130	0	0
1988/89	0	130	245	210	280	295	350	380	340	275	180	165
1989/90	210	245	270	290	410	410	430	410	365	245	115	85
1990/91	210	340	365	330	360	390	450	680	535	295	155	100
1991/92	156	216	320	372	400	478	548	512	416	220	64	0
1992/93	122	175	220	220	290	340	377	360	307	200	70	125

<b>WUK-15</b> (3080 m)	1.Nov Nov 1	1.Dez Dec 1	1.Jan Jan 1	1.Feb Feb 1	1.Mar Mar 1	1.Apr Apr 1	1.Mai May 1	1.Jun Jun 1	1.Jul Jul 1	1.Aug Aug 1	1.Sep Sep 1	1.Okt Oct 1
1981/82												
1982/83	50	85	120	190	205	275	340	340	280	135	30	0
1983/84	15	10	5	40	75	100	95	195	200	140	75	65
1984/85	63	121	132	146	263	256	282	240	237	167	25	0
1985/86	9	79	90	126	179	209	256	138	66	0	0	0
1986/87	50	40	85	130	165	200	230	375	265	85	0	0
1987/88	37	80	110	148	220	265	319	280	202	119	0	0
1988/89	0	65	129	57	112	145	204	244	197	162	87	31
1989/90	85	105	135	155	250	250	265	270	230	115	0	0
1990/91	90	185	220	220	230	245	249	363	160	70	0	0
1991/92	44	80	68	80	100	290	282	246	206	68	0	0
1992/93	177	298	308	355	368	355	410	398	335	233	100	155

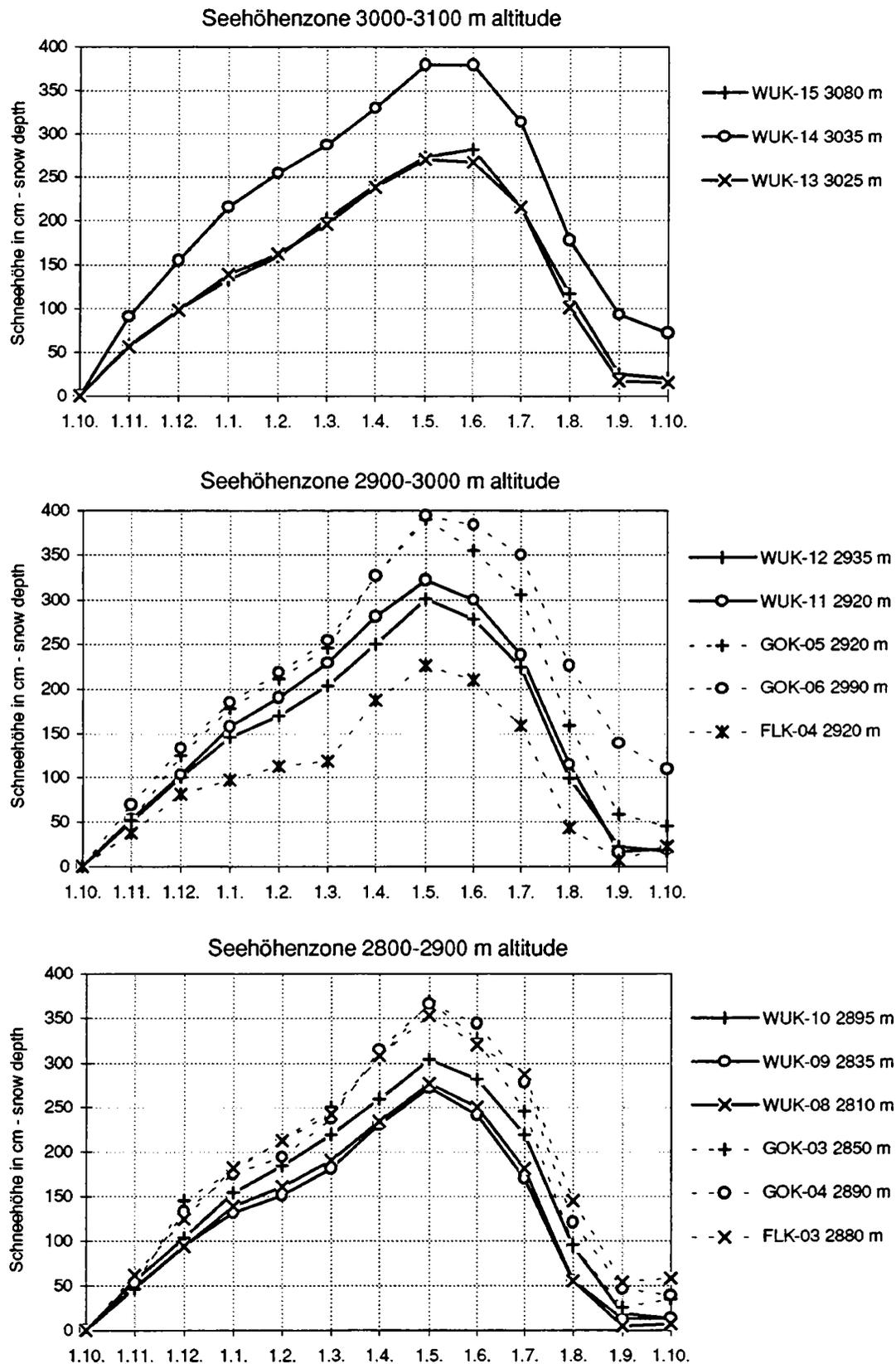
Wie bei hochalpinen Schneemessungen üblich, werden die Schneehöhen am 1. Oktober für das neue Bilanzjahr auf Null gesetzt, unabhängig davon, ob zu diesem Zeitpunkt noch ein „Firnrest“ auf dem Gletscher verblieben ist.

Bereits aus der Tabelle der Einzelmeßdaten wird klar, daß während der Meßperiode auf dem Wurtenkees nur sehr selten Firnreste aufgetreten sind. In der Mehrzahl der Bilanzjahre war die verbleibende Schneehöhe am 1. Oktober bereits Null. Die maximalen Schneehöhen wurden im unteren Gletscherteil mit 500 cm, im oberen mit 548 cm gemessen. Beide Maximalwerte wurden an Pegeln gemessen, die als untypisch für den Gesamtgletscher anzusehen sind. Pegel WUK-14 liegt unmittelbar unter dem Gipfelgrat des Scharecks in zeitweise überwachteter Lage, und Pegel WUK-05 ist ebenfalls sehr windgeschützt und wird zusätzlich durch Tribschnee und fallweise durch Lawinen indirekt ernährt. In schneearmen Wintern gibt es Bereiche auf dem Gletscher, auf denen maximal weniger als 200 cm Schnee abgelagert wird.

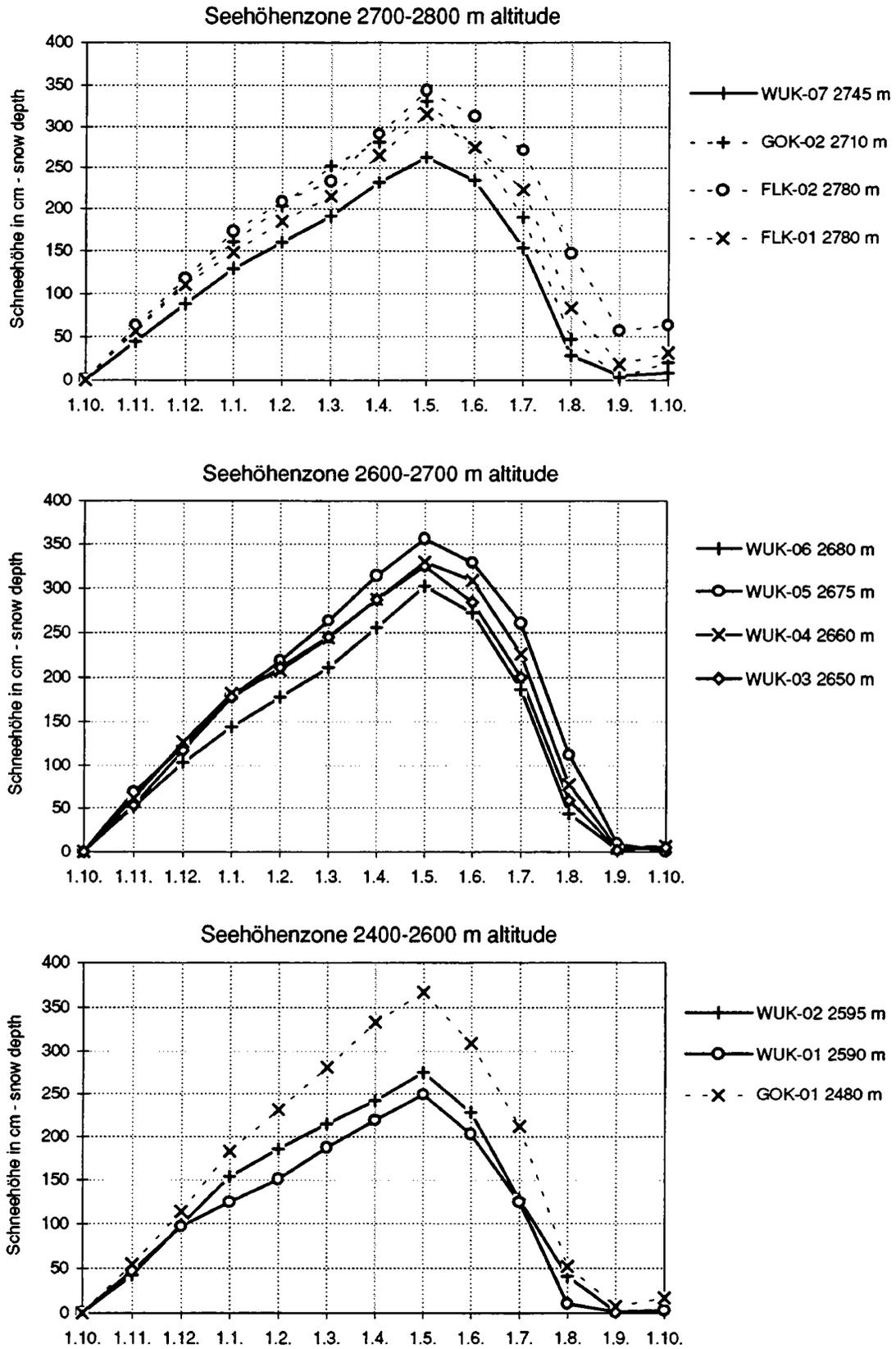
**Tab. 3.1.2.3: Mittlere monatliche Schneehöhen an den Wurtenkees Schneepegeln und an Vergleichspegeln auf benachbarten Gletschern des Sonnblickgebiets. Reihe: 1981/82 bis 1992/93 (nicht vollständige Reihen auf die einheitliche Zeitspanne reduziert)**

**Tab. 3.1.2.3: Mean monthly snowdepths at the Wurtenkees gauges and at others on neighbouring glaciers of Sonnblick region. Sample: 1981/82 to 1992/93 (incomplete datasets adjusted to the total sample length)**

Pegel snow gauge	Sh (m) alt. (m)	1.10.	1.11.	1.12.	1.1.	1.2.	1.3.	1.4.	1.5.	1.6.	1.7.	1.8.	1.9.	1.10.
<b>Wurtenkees</b>														
WUK-15	3080	0	58	99	133	159	202	240	273	282	215	117	25	20
WUK-14	3035	0	91	155	215	254	287	330	379	379	314	178	93	72
WUK-13	3025	0	56	98	139	162	196	238	270	267	215	101	17	15
WUK-12	2935	0	50	100	146	170	203	250	301	278	224	99	22	17
WUK-11	2920	0	52	103	158	190	229	281	322	300	238	115	16	20
WUK-10	2895	0	56	104	154	184	219	259	304	282	219	94	19	13
WUK-09	2835	0	48	95	132	151	181	230	272	241	170	55	13	13
WUK-08	2810	0	47	94	139	161	190	234	277	250	181	55	5	7
WUK-07	2745	0	44	88	129	160	191	232	262	234	154	28	5	8
WUK-06	2680	0	51	103	144	178	211	255	302	272	186	43	2	5
WUK-05	2675	0	68	122	179	218	263	314	356	329	260	112	9	0
WUK-04	2660	0	61	127	182	208	244	287	330	309	226	77	4	6
WUK-03	2650	0	53	117	178	211	245	287	325	284	200	59	2	5
WUK-02	2595	0	42	99	154	185	215	242	275	228	128	41	1	3
WUK-01	2590	0	47	97	125	151	187	219	249	203	125	10	1	3
<b>Goldbergkees</b>														
GOK-01	2480	0	54	114	183	231	281	333	367	309	212	52	7	17
GOK-02	2710	0	58	114	161	203	252	281	331	275	190	47	3	20
GOK-03	2850	0	46	145	179	213	250	305	369	327	245	96	26	35
GOK-04	2890	0	53	133	175	194	237	315	366	344	278	121	47	39
GOK-05	2920	0	51	125	178	211	246	327	390	355	306	159	58	45
GOK-06	2990	0	69	133	185	218	254	327	394	384	350	226	139	110
<b>Kleines Fleißkees</b>														
FLK-04	2920	0	37	81	97	113	119	187	226	210	159	43	7	22
FLK-03	2880	0	62	125	182	212	242	308	353	320	287	145	54	58
FLK-02	2780	0	62	118	173	208	233	291	344	313	271	147	57	63
FLK-01	2780	0	56	110	148	185	215	265	315	275	223	83	18	31



**Abb. 3.1.2.1: Mittlerer Verlauf der Schneehöhe während des Glazialjahres an den Wurteneespegeln und an Vergleichspiegeln auf benachbarten Gletschern des Sonnblickgebiets Reihe: Wie Tab. 3.1.2.3**



**Fig. 3.1.2.1: Mean snowdepth during glaciological year at the Wurtenees gauges and at others on neighbouring glaciers of Sonnblick region. Sample: As tab. 3.1.2.3**

Die mittleren monatlichen Schneehöhen auf dem Wurtenkees, Goldbergkees und Kleinem Fleißkees sind in Tabelle 3.1.2.3 enthalten. Alle Mittel beziehen sich auf die einheitliche Periode 1981/82 bis 1992/93. Die zum Teil wesentlich längeren Meßreihen auf den beiden Vergleichsgletschern wurden gekürzt, einige kürzere Reihen von Wurtenkees-Pegeln wurden mittels benachbarter Pegel auf die einheitliche Periode reduziert. Graphisch dargestellt sind die Zahlenwerte der Tabelle in Abbildung 3.1.2.1. Zur besseren Vergleichbarkeit sind jeweils die Pegel in Seehöhenstufen von 100 zu 100 m zusammengefaßt. In allen Seehöhenstufen, in denen sowohl auf dem Wurtenkees als auch auf den beiden Vergleichsgletschern Pegel existieren, liegen die Schneehöhen auf dem Wurtenkees zum Teil deutlich niedriger als auf dem nördlich des Alpenhauptkammes gelegenen Goldbergkees (vergl. Abbildung 2.1). Stellenweise beträgt die Differenz bis zu einem Meter. Mit einer Ausnahme (FLK-04 in sehr exponierter Lage) werden auch an den Pegeln des westorientierten Kleinen Fleißkees höhere Schneehöhen gemessen als auf dem Wurtenkees.

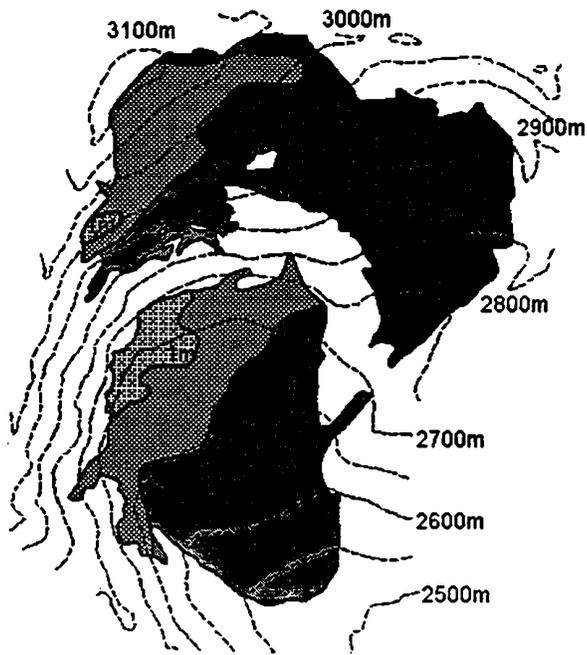
Insgesamt ist - mit Ausnahme der Termine 1. September und 1. Oktober - keine positive Abhängigkeit der Schneehöhen von der Seehöhe zu erkennen. Die Maxima im Mai streuen innerhalb der 100 m-Seehöhenzonen ebenso stark wie zwischen unterschiedlichen Seehöhen. Gut zu sehen ist diese Tatsache beispielsweise an den drei Wurtenkeespegeln oberhalb 3000m. Zwei von ihnen (WUK-13 und WUK-15) erreichen im Mittel am 1. Mai nur 270 cm bzw. 280 cm Schneehöhe, während der nur etwa 100 m entfernte Pegel WUK-14 im Mittel eine maximale Schneehöhe von 380 cm anzeigt. Andererseits werden Schneehöhen von mehr als 350 cm auch 400 m tiefer erreicht.

Die Tatsache, daß das Wurtenkees im Spätsommer und Frühherbst sehr stark ausapert, ist ebenfalls an den mittleren Jahresgängen zu erkennen. Nur die Pegel WUK-05 und WUK-14, beide in bereits besprochener spezieller Lage, besitzen zu Ende des Gletscherhaushaltsjahres im Mittel noch nennenswerte Firnreste von 50 bis 70 cm Höhe.

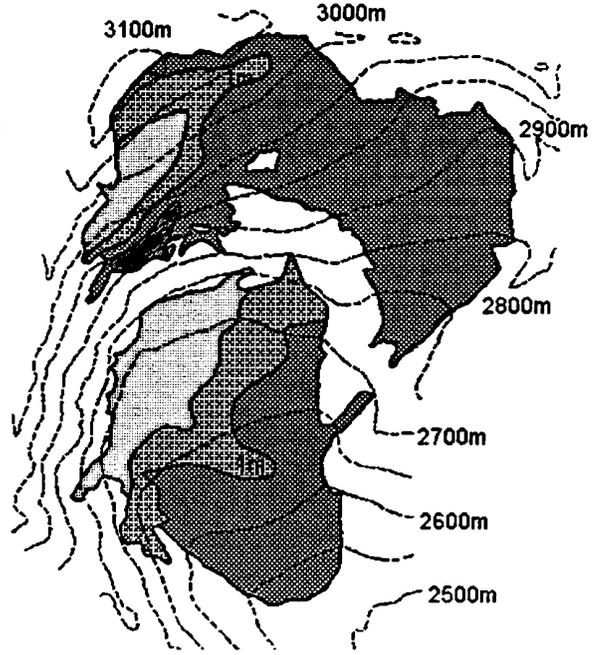
Das relativ dichte Schneepegelmeßnetz, ergänzt durch Schneehöhensondierungen an etwa 100 Punkten zum jeweiligen Zeitpunkt der Winterbilanzmessungen (vergl. Abschnitt 3.2), sowie unterstützt durch zahlreich vorliegende terrestrische- und Luftbilder mit den für das Wurtenkees typischen Ausaperungsmustern erlaubte die Konstruktion von flächendeckenden Schneehöhenkarten des Gletschers. Abbildung 3.1.2.2 zeigt die Karten der mittleren Schneehöhenverteilung auf dem östlichen Wurtenkees zu jedem Monatsersten. Die Karten verdeutlichen noch stärker als Abbildung 3.1.2.1 die Tatsache, daß auf diesem Gletscher bei weitem keine regelmäßige Zunahme der Schneehöhe mit der Seehöhe beobachtbar ist. Wesentlich bedeutender für die Verteilung der Schneehöhe auf dem Gletscher ist hier offensichtlich die Windexposition. Das Maximum der winterlichen Akkumulation ist im nordöstlichen Teil der Gletscherzunge zu beobachten, die seit einigen Jahren keine direkte Verbindung mit den exponierteren, höheren Gletscherteilen mehr hat. Diese verlieren durch Tribschnee und durch Lawinenabgänge große Teile der Winterakkumulation an die Gletscherzunge, die dadurch während der gesamten Akkumulationsperiode im Flächenmittel größere Schneehöhen aufweist, als die in der üblichen Terminologie als „Nährgebiet“ bezeichneten höhergelegenen Gletscherteile. Im Lauf des Sommers ist allerdings auf den im Winter begünstigten Gletscherflächen unterhalb 2750 m die Abschmelzung besonders stark, sodaß zu Ende der Ablationsperiode im Mittel sowohl hier, als auch auf den im Winter zu wenig Schnee erhaltenden höheren Gletscherteilen weitestgehend kein Schnee mehr übrigbleibt. Nur in Höhen über 3000 m und in Teilen des Lawinenkessels gibt es im Mittel am 1. Oktober noch Flächen mit etwas mehr als 50 cm Altschnee. Das reicht zu einer ausgeglichenen Gletscherbilanz bei weitem nicht aus, wie in der Folge noch näher gezeigt werden wird.

**Abb. 3.1.2.2: Monatliche Karten der mittleren Schneehöhe auf dem östlichen Wurtenkees.**  
Datenbasis: Monatliche Schneehöhenmessungen 1981/82 bis 1992/93, verdichtende Sondierungen Anfang Mai, Luft- und terrestrische Bilder der Ausaperungsmuster

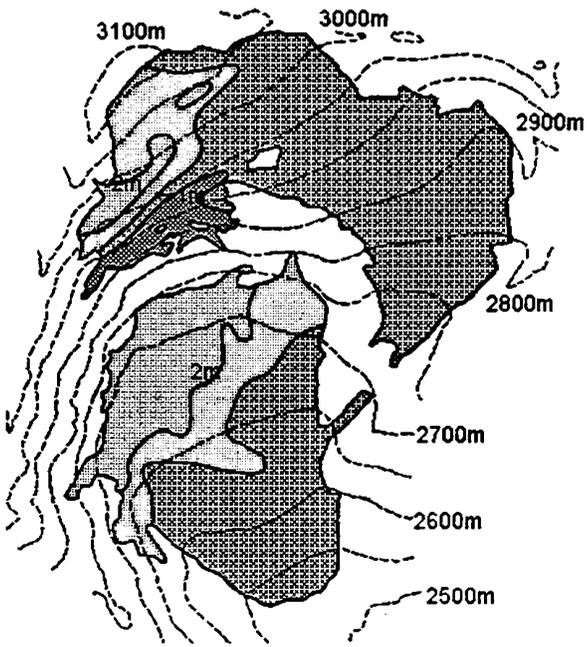
**Fig. 3.1.2.2: Monthly maps of mean snowdepths on Eastern Wurtenkees.**  
Based on: Monthly snowdepths measurements 1981/82 to 1992/93, high density depth soundings in May, airborne and terrestrial photos during ablation season



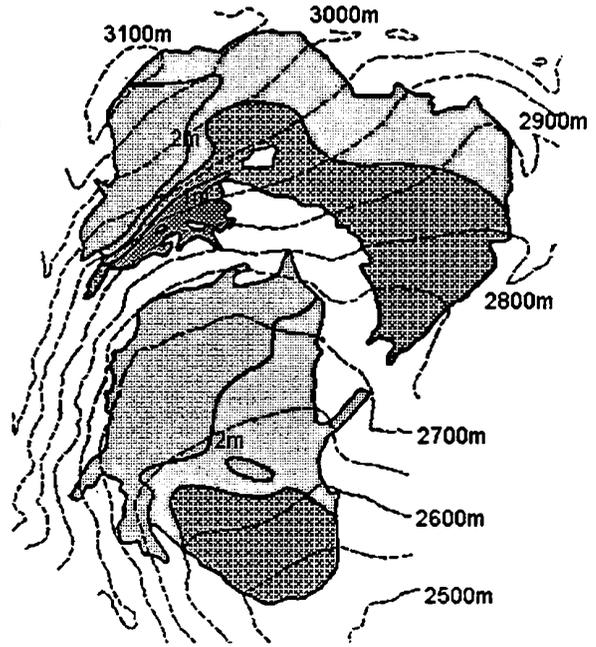
Schneehöhe am 1.11.  
snow depth



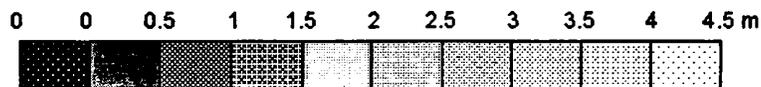
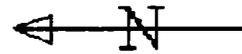
Schneehöhe am 1.12.  
snow depth

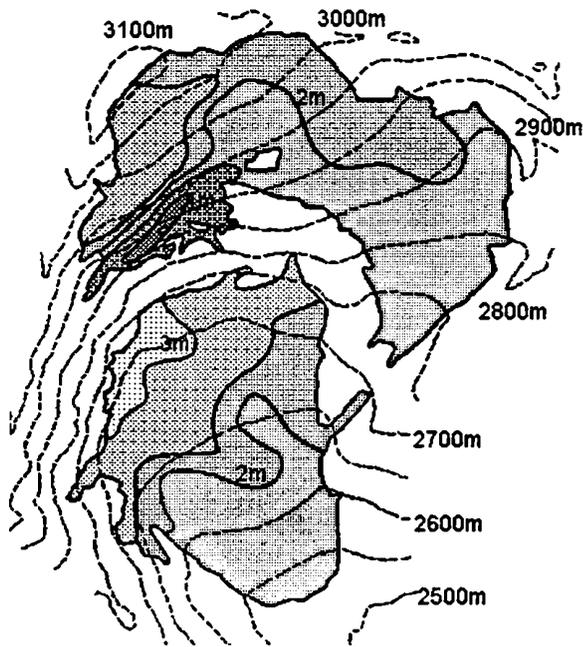


Schneehöhe am 1.1.  
snow depth

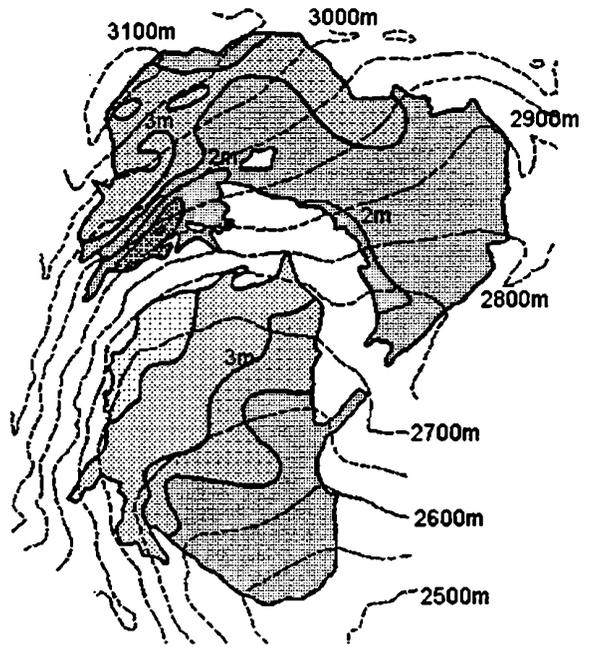


Schneehöhe am 1.2.  
snow depth

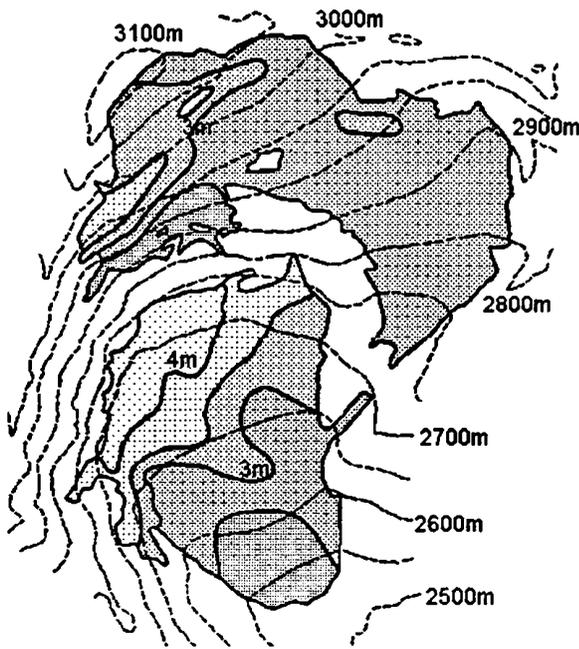




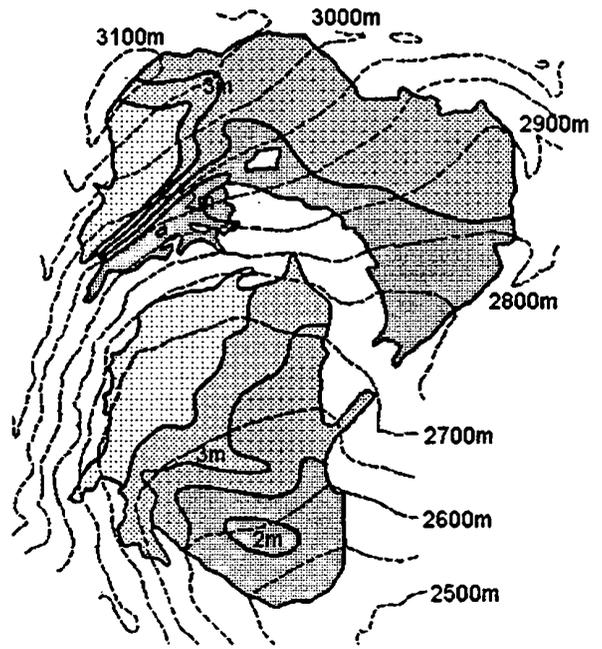
Schneehöhe am 1.3.  
snow depth



Schneehöhe am 1.4.  
snow depth

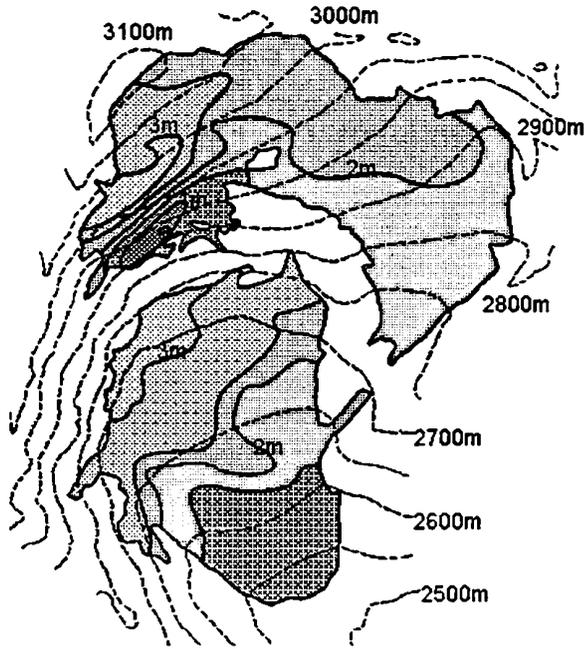


Schneehöhe am 1.5.  
snow depth

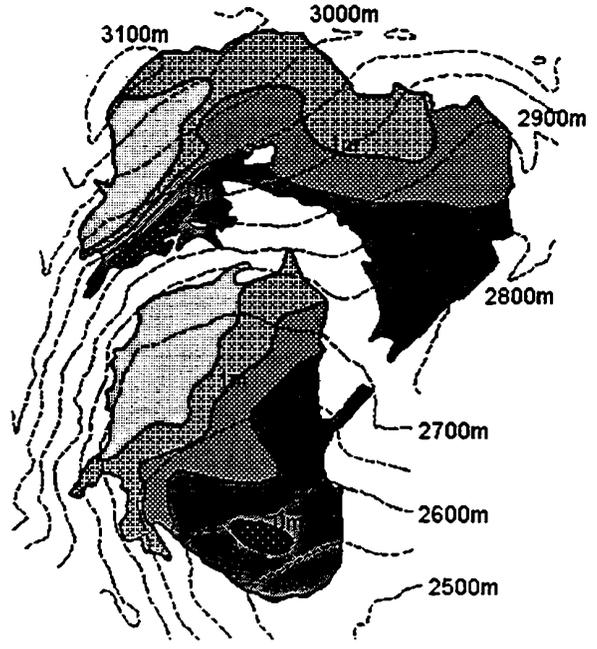


Schneehöhe am 1.6.  
snow depth

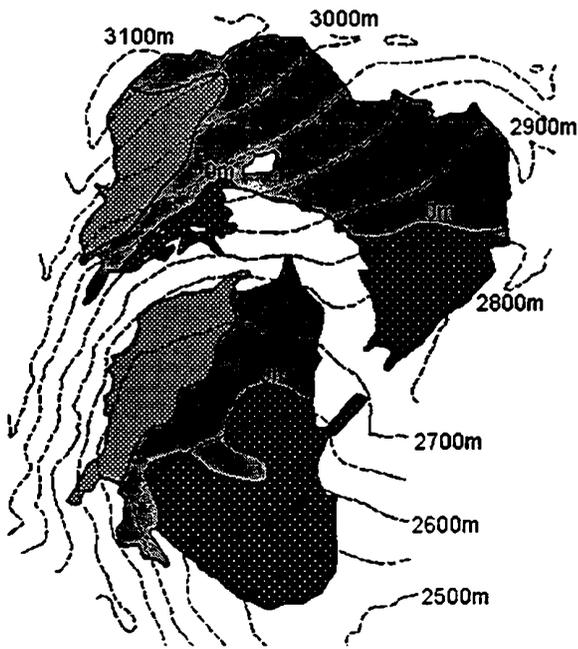




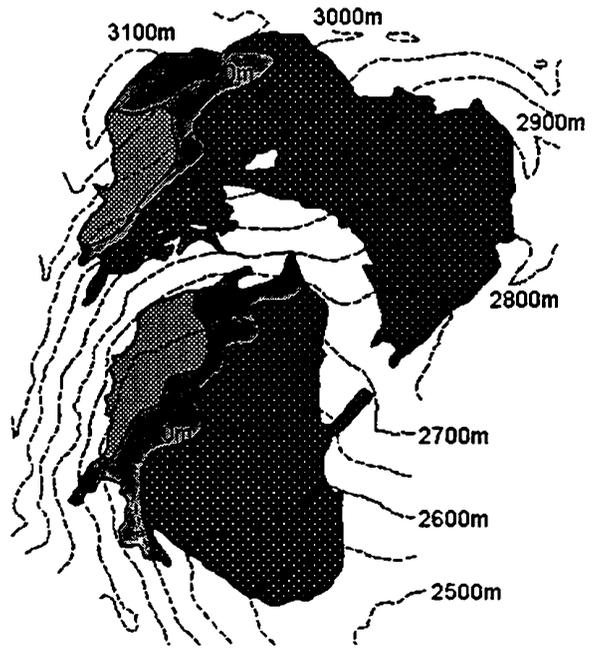
Schneehöhe am 1.7.  
snow depth



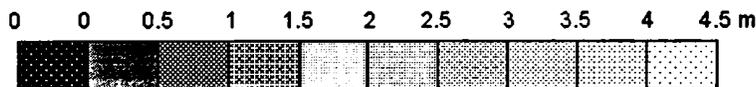
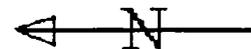
Schneehöhe am 1.8.  
snow depth



Schneehöhe am 1.9.  
snow depth



Schneehöhe am 1.10.  
snow depth



## **3.2 DIE MESSUNGEN IN DER ALTSCHNEEDECKE**

### **3.2 MEASUREMENTS IN THE ANNUAL SNOW PACK**

Eines der Hauptziele des Projekts ist die Bestimmung der Massenbilanz des Gletschers nach der glaziologischen Methode - getrennt nach Winter- und Sommerbilanz. Dazu ist eine Analyse der Altschneedecke zu den beiden Bilanzierungszeitpunkten, sowie die Messung der Ablation nötig. Die Analyse der Winterschneedecke wird auf dem Wurtenkees Anfang Mai durchgeführt, was auf diesem Gletscher im Mittel gut dem winterlichen Akkumulationsmaximum entspricht (vergl. Abbildung 3.1.2.2). Die Schneedecke wird zu diesem Zeitpunkt auf ihre vertikale Dichte- und Temperaturschichtung analysiert.

Die Messung von Temperaturprofilen in der Altschneesicht wird vor allem als Hinweis verwendet, ob zum Zeitpunkt der Winterbilanz-Feldmessungen im Zuge der Frühjahrserwärmung die Nullgradgrenze bereits bis zum Vorjahreshorizont vorgedrungen ist. In diesem Fall könnten bereits Massenverluste gegeben und somit der Zeitpunkt des Akkumulationsmaximums überschritten sein. Für einzelne Profile war das in einzelnen Jahren im unteren Zungenbereich der Fall. Da jedoch umgekehrt im Lauf der Monate April und Mai zum Teil noch beträchtliche Massenzuwächse in allen Höhenstufen, vor allem natürlich in den höhergelegenen Gletscherteilen, auftreten können, ist die exakte Erfassung des Winterakkumulationsmaximums auf einem Gletscher mit seinen Seehöhengradienten der Bilanzparameter ohnehin so gut wie unmöglich. Für das Wurtenkees wurde die Methode des fixen Bilanzierungszeitpunktes gewählt. Die Feldmessungen zur Winterbilanzierung werden jeweils in der ersten Maiwoche durchgeführt. Nur einmal mußten sie wetterbedingt verschoben werden.

Winterbilanzierungen nach der direkten glaziologischen Methode werden äußerst selten durchgeführt. Die günstige logistische und geländemäßige Situation ermöglichen sie im Fall des Wurtenkeeses, wodurch ein sonst selten vorhandenes Datenmaterial erarbeitet werden konnte.

Am Ende der Ablationsperiode (hier wieder fix mit dem 30. September festgesetzt) wird die Massenbilanz aus den kombinierten Ergebnissen des Ablationspegelnetzes und - im Gebiet mit Firnresten - wieder aus der Schneedichteanalyse bestimmt. Im Fall des Wurtenkeeses mußten Schneeanalysen im herbstlichen Firnrest nur fallweise durchgeführt werden, da der größte Teil des Gletschers sich in den Haushaltsjahren seit 1982/83 weitgehend altschneefrei präsentierte. Somit waren die Sommerbilanzierungen praktisch auf die Vermessung des Ablationspegelnetzes beschränkt.

Für den Zeitpunkt Anfang Mai hingegen konnte ein geschlossener Datensatz über Vertikalprofile von Schneedichte und Schneetemperatur zum Zeitpunkt des Akkumulationsmaximums eines Alpengletschers erarbeitet werden, der auch über seine Verwendung für die Massenbilanzierung hinaus Bedeutung besitzt.

#### **3.2.1 Meßmethoden**

##### **3.2.1 Methods**

###### **3.2.1.1 Schneeschächte**

###### **3.2.1.1 Snow pits**

Die für die Massenbilanzierung benötigten Werte der spezifischen Bilanzen (im Fall der Winterakkumulation ist das der Wasserwert der Schneedecke über dem Vorjahreshorizont) werden im Projekt Wurtenkees in 15 bis 20 Schneeschächten bestimmt, die „synchron“ zur Messung gegraben werden. Das heißt, es wird maximal 1,5 m vertikal gegraben, dann sofort gemessen und erst danach die nächsttiefere Sektion gegraben. Diese Arbeitsweise bringt Vorteile bezüglich der „Begehbarkeit“ der Meßschicht (keine „Kaminkletterei“ bei großer Schneetiefe erforderlich) und stellt exakte Temperaturmessungen sicher, da die Zeitspanne zwischen dem Freilegen der Meßwand und der Temperaturmessung nicht zu groß wird.

Alljährlich werden zumindest an den Stellen der das ganze Jahr hindurch betreuten Schneepegel (vergl. Abschnitt 3.1.2) Schneeschächte gegraben und in ihnen vertikale Temperatur- und Dichteprofile gemessen. Für diese Geländepunkte können in der Folge Statistiken der vertikalen Verteilung von Temperatur und Schneedichte gezeigt werden (Abschnitt 3.2.2). Darüber hinaus werden an

variablen Stellen Zusatzschneeschächte gegraben und an etwa 100 Geländepunkten Schneetiefensondierungen mit Lawinensonden durchgeführt. Dieses Datenmaterial geht lediglich in die graphische Analyse der Massenbilanzkarten ein und erlaubt eine bessere Interpolation der Bilanzwerte.

Die Messung der Schneedichte wird in durchgehenden Vertikalschächten mit 20 cm hohen Stechzylindern von 25 cm<sup>2</sup> Querschnitt sowie auf das Leergewicht der Stechzylinder geeichten Federwaagen vorgenommen. Anfängliche Versuche (es wurde eine „Probewinterbilanz“ 1981/82 gemessen, die aber nicht in die statistische Bearbeitung aufgenommen wurde) mit längeren Zylindern von geringerem Querschnitt (15 cm<sup>2</sup>) haben sich als weniger brauchbar erwiesen. Die Schneereste waren schlecht entfernbar und die dickwandigeren Stechzylinder waren weniger gut in die Schneesicht eindrückbar. Die Schneetemperatur wird meist mit Flüssigkeits-Glasthermometern bestimmt, die in die im Schatten liegende Meßwand des Schneeschafts eingedrückt werden.

Die auf dem Wurtenkees bisher ausschließlich verwendete sehr arbeitsaufwendige Meßmethode in Schneeschächten liefert zusätzlich zum Gesamtwasserwert der Schneedecke auch Vertikalprofile der gemessenen Größen. Zusätzlich werden den gipfelnahen Schneeschächten auf dem Wurtenkees und auf dem Goldbergkees regelmäßig Schneeproben in hoher vertikaler Auflösung (dz=10 cm) entnommen und an der TU-Wien chemisch analysiert. Die Ergebnisse dieser Analysen werden in Abschnitt 5 besprochen.

Als eventuelle Alternative zur Schneeschaftmethode wurde von einem Mitglied der Projektgruppe, Thomas Wiesinger, ein Schneeborner entwickelt, gebaut und getestet, der im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

### 3.2.1.2 Schneeborner

#### 3.2.1.2 Snowsampler

Die Ermittlung der Wintermassenbilanz eines Gletschers nach der glaziologischen Methode ist sehr arbeitsintensiv, da große Schneehöhen, Lawinenkegel und Eisschichten zu langwierigen, personalintensiven Grabarbeiten zwingen. Aus diesem Grund hat T. WIESINGER 1989 einen Schneeborner entwickelt, der es ermöglichen sollte, die Winterbilanz mit bisher üblicher Genauigkeit (oder genauer) rasch und mit wenig Personal durchführen zu können.

Ein Schneeborner ist ein Rohr (Durchmesser ca. 3-10 cm) mit einer Schneide an einem Ende. Das Rohr wird in die Schneedecke gestoßen, wodurch ein Bohrkern aus der Schneedecke geschnitten wird, der danach mit dem Rohr aus der Schneedecke entfernt wird. Das langwierige Graben eines Schneeprofiles ist nicht mehr notwendig, und der Zeitaufwand reduziert sich auf 20 bis 25%. Durch Wägen des definierten Volumens (Querschnittsfläche mal gemessene Bohrlochtiefe) können der Wasserwert und die durchschnittliche Dichte berechnet werden.

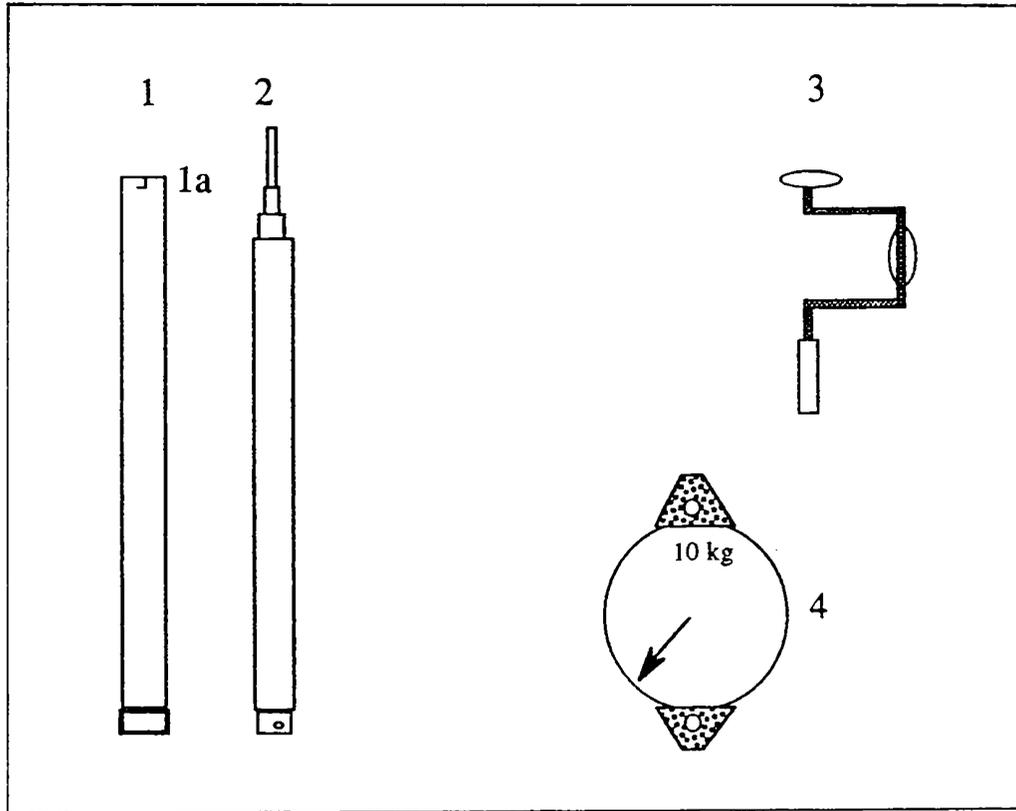
$$HSW = \frac{m}{A \cdot r_{H_2O}}$$

HSW	=	Wasserwert der Schneedecke (mm) water equivalent of snow pack
m	=	Masse des Bohrkerns (g) mass of drilling core
A	=	Querschnittsfläche der Bohrkronen des Schneebobners (cm <sup>2</sup> ) cross-cut area of drilling head
r <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	=	Dichte von Wasser (= 1g/cm <sup>3</sup> )/density of water

$$r = \frac{m}{A \cdot HS}$$

r	=	Schneedichte snow density
HS	=	Gesamtschneehöhe (cm) total snow depth

Der Wiesinger-Schneebohrer, wie er am Wurtenkees und am Goldbergkees verwendet wurde, besteht aus einem 135 cm langen INOX Stahlrohr (= Bohrrohr mit 70 mm Durchmesser, 1 mm Wandstärke und Bohrkronen), das zur Bohrkernentnahme dient. Bei größeren Schneehöhen wird das Bohrrohr mit einem Vierkant-Teleskop verlängert, wodurch Bohrtiefen von 5,5 m erreicht werden können. Bohrrohr und Teleskop sind mit einer Mitnehmerscheibe verbunden. Der Bohrer wird durch Drehen an einer Kurbel mit einem 45 cm Hebelarm angetrieben. Bohren ohne Drehen ist nicht möglich.



**Abb. 3.2.1.2.1:** Schema des Wiesinger-Schneebohrers: (1) ist das Bohrrohr, 1350 mm lang und 70 mm im Durchmesser. (1a) ist ein Bajonettverschluß als Verbindung zwischen Bohrrohr und Teleskopantrieb. Am unteren Ende befindet sich die Bohrkronen aus gehärtetem Stahl, am oberen Ende die Ausnehmungen für die Mitnehmerscheibe. (2) ist die Teleskopverlängerung aus Vierkant-Dur-Aluminium Formrohren. (3) ist ein Wendelbohrer für den Handantrieb und (4) eine Federwaage mit 10 kg max. Belastung zum Wägen des Bohrkernes

**Fig. 3.2.1.2.1:** Sketch of the Wiesinger-sampler: (1) is the sampling tube, 1350 mm long and 70 mm in diameter. (1a) is a bayonet joint to connect the sampling tube with the telescope. To the end of the tube a cutter of tempered steel is welded, at the other end a joint can be fastened. (2) is the telescope, consisting of four 4-edge-tubes from extra strong aluminum. (3) is the long arm driller which is connected to the sampler to turn it while drilling and (4) is a spring scale with a max. load of 10 kg to weigh the sample and the tube

Schneeböhrer werden seit den 50er Jahren in Nordamerika (GOODISON et al. 1981, FREEMAN, 1965) und in Japan ONUMA, 1958, in verschiedenen Ausführungen verwendet. Diese "snow sampler" haben allerdings für die Messung sehr dichter und harter Schneedecken konstruktionsbedingte Nachteile (z.B. vorstehende Verbindungsmuffen, zu weiche Alu-Fräsköpfe), sodaß ein Gerät speziell für die Anforderungen der Winterbilanzmessung alpiner Gletscher entwickelt wurde (WIESINGER, 1991). Diese Anforderungen an den Wiesinger-Schneeböhrer sind: mäßiges Gewicht bei enormer Stabilität des Instruments und Transportierbarkeit im Rucksack, einfache Bedienung, einfriersichere Konstruktion, Meßgenauigkeit, Fähigkeit Eislamellen zu durchschneiden und akzeptabler Preis.

Die Vorgangsweise bei der Messung ist der folgende:

Vorerst wird die Schneetiefe sondiert, um die Lage und Dicke der Eislamellen zu lokalisieren. Dicke Eislamellen können sowohl beim Sondieren als auch beim Bohren zu einer falschen Bestimmung des Wasserwertes führen. Die Erfahrung hat aber gezeigt, daß fast immer ein etwa 2 bis 3 cm langer Bohrkern aus Firn oder porösem Oberflächeneis ausgebohrt wird und der Vorjahreshorizont unmißverständlich identifizierbar ist.

Die Bohrung selbst erfolgt in mehreren Etappen mit Bohrtiefen von maximal 130 cm. Bei sehr nassem Schnee bildet das freie Wasser einen Schmierfilm am Rohr und es kann vorkommen, daß der Bohrkern aus dem Rohr gleitet. In diesem Fall sollte ein neues Profil gebohrt werden. Nach dem Bohren wird das volle Bohrröhr waagerecht gewogen und die Bohrlochtiefe gemessen. Beim Wiedereinführen des Böhrers in das bereits bestehende Loch ist darauf zu achten, keinen Schnee von der Außenwand des Bohrloches abzuscheren, da dieser in das Bohrloch fällt und bei der nächsten Messung mitgewogen würde, was den Wasserwert in Richtung zu hoher Werte verfälschte. Bei sehr hohen Dichten wird die Reibung des Rohres am Schnee sehr hoch und es sind Drehmomente bis zu 30 Nm aufzuwenden, um den Böhrer zu drehen.

Vergleiche zwischen Schneeböhrermessungen und Stechzylindermessungen lieferten folgende Ergebnisse:

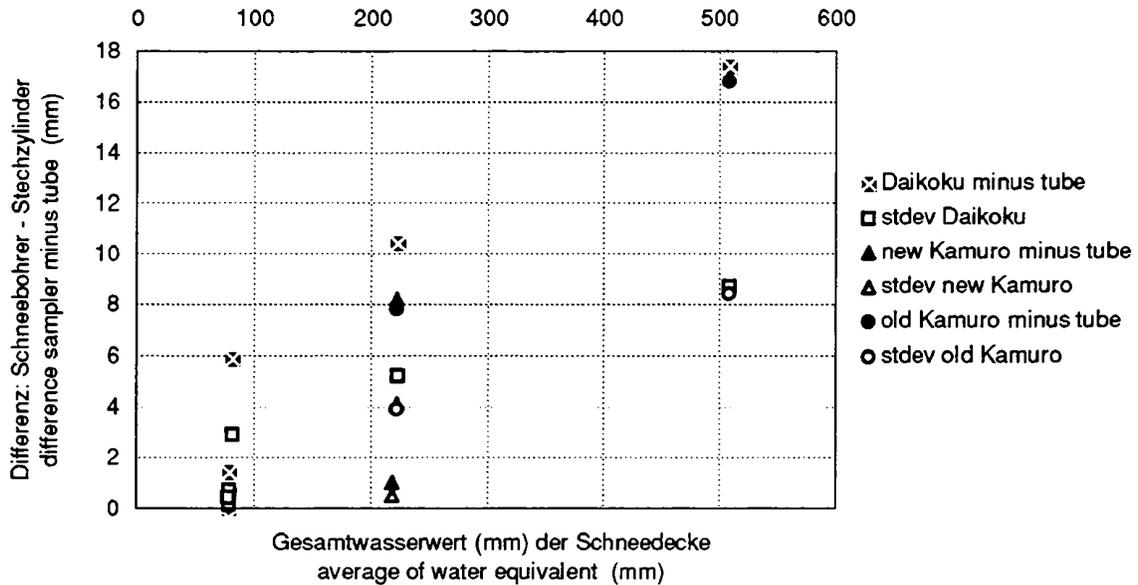
Es ist bekannt, daß Schneeböhrermessungen Wasserwerte liefern die meistens größer sind als der tatsächliche Wasserwert. WIESINGER, 1993, untersuchte die systematischen Fehler zweier Schneeböhrer und ermittelte Fehler von ca. +3,5% bei einem Gesamtwasserwert von 500 mm (Standardabweichung 2,7 mm, bzw. 12,9 mm). Als Referenz diente ein Schneeböhrer mit 594 mm Innendurchmesser.

Bohrkerne werden durch die Reibung an der Bohrerinnenwand komprimiert. Das heißt, daß eine Stratigraphie des Bohrkerns zwar möglich ist, wenn der Kern vorsichtig auf der Schneeoberfläche ausgelegt wird, die Zuordnung der Tiefe ist aber ungenau.

Die in Europa gängige Methode, den Wasserwert einer Schneedecke zu bestimmen, gliedert sich in folgende Schritte:

- 1) Graben eines Schneeprofiles bis zum Vorjahreshorizont (bei größeren Schneetiefen in mehreren Etappen, um die Probennahme zu erleichtern)
- 2) Abstechen von vertikalen Schichten (10 bis 50 cm, je nach Stechzylinder, am Wurtenkees einheitlich 20 cm), wobei der untere Rand des Abstichs durch eine Metallplatte markiert wird die verhindert, daß sich ein Schneekil bildet, der in der Folge der falschen Schicht zugeordnet wird
- 3) Entnehmen des gefüllten Rohres und wägen mit einer Federwaage (Anzeige in 5 g; oder in kg/m<sup>3</sup>, wobei der Zylinder dann immer voll sein muß)

Die folgenden Vergleiche von Schneeböhrern beziehen sich jeweils auf Stechzylindermessungen.

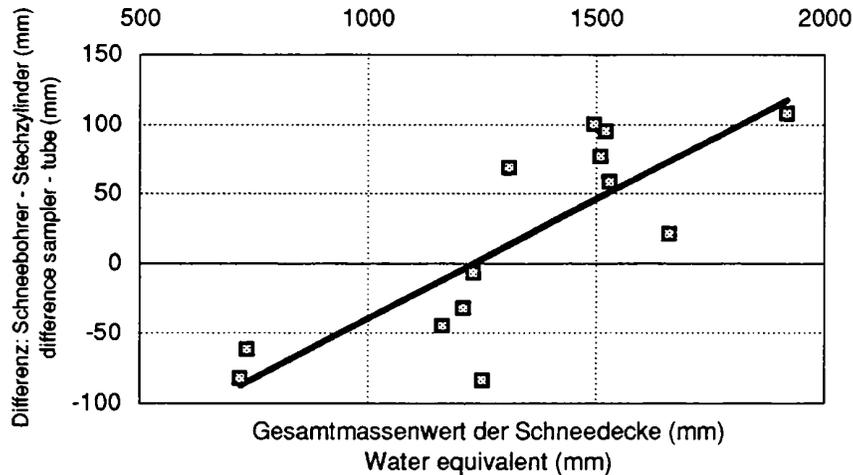


**Abb. 3.2.1.2.2:** Unterschied zwischen Schneeböhrermessung und Stechzylindermessung (erstes minus zweites) in Beziehung zum Gesamtwasserwert der Schneedecke. Die untersuchten "Snow Sampler" japanischer Bauart zeigen systematische Fehler zwischen 0,5 und 4% in Richtung zu hoher Wasserwerte, in bezug auf die Messung mit einem Stechzylinder mit 97,8 mm Innendurchmesser. Die Snow Sampler haben alle ähnliches Design und einen Innendurchmesser von 50 mm

**Fig. 3.2.1.2.2:** Difference of measured water equivalent of the snow cover (snow sampler minus short sampling tube) versus the average of water equivalent of the surveyed snow cover. The snow samplers overestimate the water equivalent by 0.5 to 4% compared to the measurements with the short sampling tube (which has a diameter of 97.8 mm). All samplers feature similar design and a diameter of 50 mm

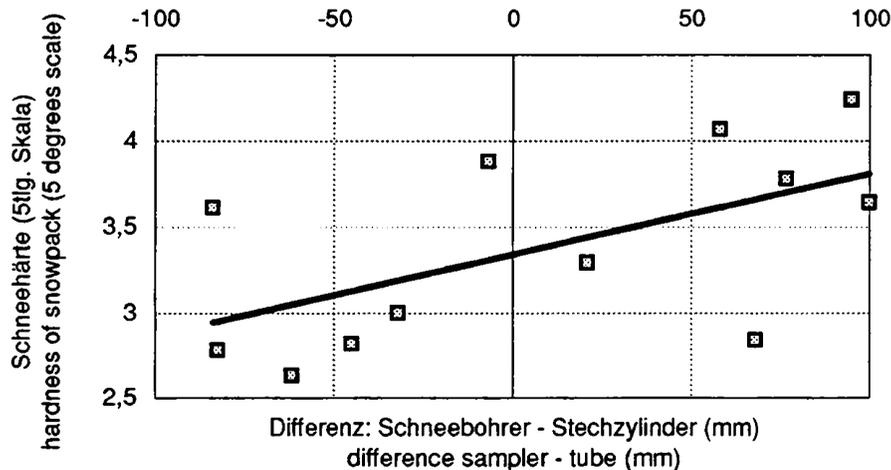
Der "Daikoku Sampler" mißt im Durchschnitt 1.5% mehr als der Stechzylinder und 3.4% mehr als die Referenz (siehe oben). Das heißt, daß auch Stechzylindermessungen im Durchschnitt zu hohe Wasserwerte liefern, wenn auch mit kleineren Fehlern als Schneeböhrer.

Messungen mit dem Wiesinger-Schneeböhrer liefern zu geringe Wasserwerte bei Schneedecken mit Wasserwerten bis 1200 mm und zu hohe Wasserwerte bei Schneedecken mit Wasserwerten über 1200 mm. Letztere Fehler korrelieren mit der Härte des untersuchten Schnees (siehe Abbildung 3.2.1.2.4.; höherer Wasserwert bedeutet, daß mehr Masse pro Flächeneinheit abgelagert ist, die Druck auf darunterliegende Schichten ausübt, was die Versinterung beschleunigt und die Härte des Schnees erhöht). Die Unterschiede zwischen Schneeböhrermessung und Stechzylindermessung liegen im Bereich von -10% bis +17%. Ein Vergleich zwischen dem Wiesinger-Schneeböhrer und einer Referenz ist leider nicht verfügbar.



**Abb. 3.2.1.2.3:** Wasserwertmessung mit dem Wiesinger-Schneeböhrer und Stechzylindern. Der Schneeböhrer mißt zu kleine Wasserwerte bei dünneren Schneedecken und zu hohe Wasserwerte bei Schneedecken über 1250 mm Wasserwert. Eine lineare Regression zu Korrekturzwecken wurde berechnet und geplottet (die voraussetzt, daß die Stechzylindermessung korrekt ist). Die Standardabweichungen liegen innerhalb von 3,5% des mittleren Wasserwertes

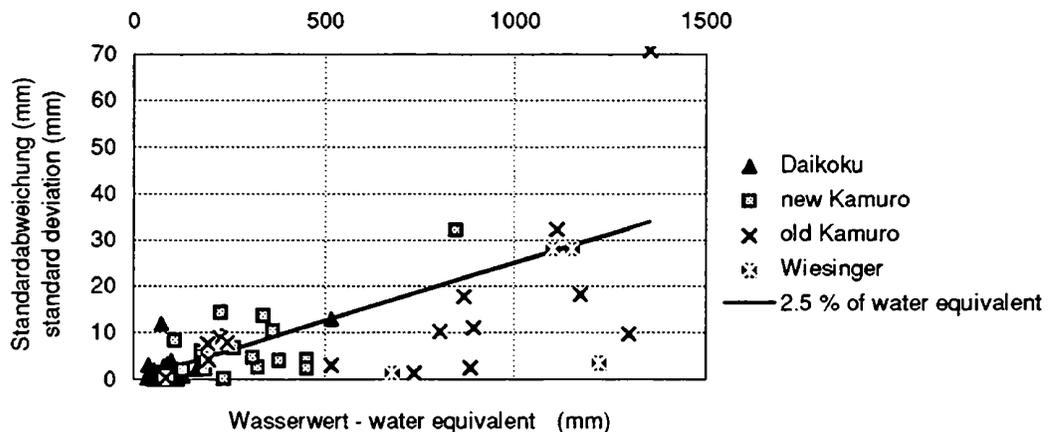
**Fig. 3.2.1.2.3:** Water equivalent measurement with the Wiesinger snow sampler and a short sampling tube. The sampler underestimates the water equivalent of thinner snow packs and yields overestimated values at water equivalents above 1250 mm. A linear regression was calculated and plotted which can be used for a compensation of systematic errors (if the tube measurement is regarded as accurate). Standard deviations are within 3.5% of the measured mean of water equivalent



**Abb. 3.2.1.2.4:** Meßfehler des Wiesinger-Schneeböhrers gegen das gewichtete Mittel der Schneehärte. Der Fehler ist gleich der Differenz zwischen Schneeböhrer- und Stechzylindermessung (wieder unter der Annahme die Stechzylindermessung sei korrekt). Die Härte wurde definiert als: Summe aus (Härte einer Schicht mal Schichtdicke) durch Gesamt-schneehöhe

**Fig. 3.2.1.2.4:** Measurement error of the Wiesinger sampler versus the weighted mean of the hardness of the snow pack. The error is the difference between snow sampler and tube (again this is true if the tube measurement is regarded as accurate). The hardness was defined as sum of (hardness of layer times thickness of layer), divided by the thickness of snow cover

Neben der Frage der absoluten Genauigkeit der Messung wurde auch die Reproduzierbarkeit der Messungen untersucht. Die Frage war, wie groß die Streuung sein würde, wenn drei oder mehr Messungen "am selben Ort" durchgeführt würden. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.2.1.2.5 zu sehen.



**Abb. 3.2.1.2.5:** Streuung von Mehrfachmessungen an einem Ort, zusammengestellt für verschiedene Schneebohrer und verschiedenste Wasserwerte. Zwischen 3 und 57 Messungen wurden an einem Ort durchgeführt und die Standardabweichungen berechnet (y-Achse) und gegen die unkorrigierten Meßwerte auf der x-Achse aufgetragen. Die Linie markiert 2,5% Abweichung eines Einzelergebnisses vom Mittel. 70% der Messungen liegen im Bereich von Abweichungen vom Mittel von 2,5% oder kleiner

**Fig. 3.2.1.2.5:** Scattering of multiple measurements at a site, compiled for several water equivalents and different snow samplers. Between 3 and 57 samples were taken and the standard deviations were calculated (y-axis) and plotted versus the uncorrected measurements on the x-axis. The line shows a 2.5% deviation between a single measurement and the average. 70% of the measurements yield a result within 2.5% of average

Zusammenfassend kann über die Anwendung von Schneebohrern folgendes gesagt werden:

Schneebohrer ermöglichen die rasche Messung von Wasserwerten dicker Schneedecken, ohne Schneeprofile zu graben. Eine Information über die Stratigraphie kann durch Untersuchung des komprimierten Bohrkernes erhalten werden, wobei die Zuordnung der Tiefe von Schichten ungenau ist.

Schneebohrermessungen sind üblicherweise durch systematische Fehler verfälscht und führen meist zu einer Überbestimmung des Wasserwertes. Beim Wiesinger-Schneebohrer werden Schneedecken bis 1200 mm unterbestimmt und dickere Schneedecken überbestimmt (jeweils im Vergleich zu herkömmlichen Stechzylindermessungen). Der Fehler ist direkt proportional zur Härte des Schnees. Schneebohrermessungen sind gut reproduzierbar, 70% der Messungen liegen in einem Bereich von 0 bis 2,5% vom Mittelwert entfernt. Diese Abweichung kann durch eine inhomogene Schneedecke, ungleiche Schneetiefe "an einem Ort", instrumentelle Fehler oder Meßfehler bedingt sein. Im allgemeinen sind mehrere Messungen an einem Ort konsistent und das Mittel aus drei Messungen repräsentiert relativ genau den Wasserwert der Schneedecke, nachdem die systematischen Fehler korrigiert wurden. Am Gletscher begnügt man sich wegen des enormen Arbeitsaufwandes üblicherweise mit einer Messung pro Pegel.

In Zukunft wird es notwendig sein, den Wiesinger-Bohrer so umzubauen, daß die Reibung geringer wird und somit die Bedienung einfacher. Weiters sollte durch Versuchsbohrungen mit einer Referenz (z.B. Schnee auf einer Brückenwaage) die systematischen Fehler genauer definiert werden.

Der große Vorteil von Schneebohrern ist die Arbeits- und Zeitersparnis und damit die Reduzierung der Winterbilanzmessung auf einen Meßtag. Somit können Massenbilanzmessung und terrestrische Vermessung gleichzeitig erfolgen und logistische Probleme durch Wetterveränderung (Nebel bedingt Orientierungsschwierigkeiten, Wind bedingt Einstellung des Seilbahnverkehrs am Sonnblick etc.) klein gehalten werden.

### 3.2.2 Ergebnisse

#### 3.2.2 Results

Seit Beginn der Intensivuntersuchungsperiode wurden auf dem Wurtenkees die Winterbilanzierungen aufgrund von Messungen in Schneeschächten durchgeführt. Dadurch können in der Folge nicht nur Ergebnisse der vertikal aufsummierten Gesamtwasserwerte, sondern auch solche von vertikalen Profilen der Schneedichte und der Schneetemperatur gezeigt werden.

Tabelle 3.2.2.1 enthält die Lageparameter von 14 Geländepunkten, in deren unmittelbarer Umgebung in allen 11 Bilanzjahren Schneeschächte gegraben und gemessen wurden. Abbildung 3.1.1 zeigt bereits die Lage dieser Profilstandorte auf einer Karte des Wurtenkeeses, zusammen mit den Schneepegeln und Totalisatoren. 11 dieser 14 Profilpunkte stimmen mit solchen von dauernd betriebenen Schneepegeln überein, an drei Profilstandorten gibt es keinen Schneepegel. PR-01 dient auch zur Schneechemiemessung und sollte möglichst wenig betreten werden, weswegen auf den Betrieb eines Schneepegels bewußt verzichtet wurde, PR-08 liegt im Einzugsgebiet häufiger Lawinenabgänge, was einen dauernd betriebenen Schneepegel unmöglich macht, und der Datensatz des Schneepegels an der Stelle PR-14 war zu lückenhaft, um in die Schneepegelstatistik aufgenommen zu werden.

**Tab. 3.2.2.1: Lageparameter der Schneeschächte auf dem östlichen Wurtenkees**

**Tab. 3.2.2.1: Locations of the snowpits on Eastern Wurtenkees**

Profil	Gauß-Krüger (M-41)		
	X	Y	Z (m)
PR-01	211199	-23812	3061
PR-02	211001	-23801	3023
PR-03	210824	-23934	2946
PR-04	210751	-24044	2898
PR-05	210653	-24195	2840
PR-06	210486	-24227	2813
PR-07	210521	-24469	2743
PR-08	211073	-24568	2683
PR-09	210817	-24642	2677
PR-10	210921	-24836	2647
PR-11	211175	-24842	2655
PR-12	210848	-25048	2592
PR-13	210954	-25081	2593
PR-14	210778	-25228	2533

#### 3.2.2.1 Schneedichte

#### 3.2.2.1 Snow density

Einen ersten Überblick über die in der maximalen winterlichen Schneedecke Anfang Mai auftretenden Schneedichten geben die über die gesamte Schneehöhe gemittelten Werte, die für die einzelnen Bilanzjahre und für 10 bzw. 11jährige Mittel in Tabelle 3.2.2.1.1 enthalten sind. Bei den 10jährigen Mittelwerten ist die Saison 1984/85 ausgenommen, da in diesem Jahr eine Bilanzierung Anfang Mai durch Schlechtwetter und hohe Lawinengefahr nicht möglich war (die Feldmessungen wurden erst Ende Mai nachgeholt).

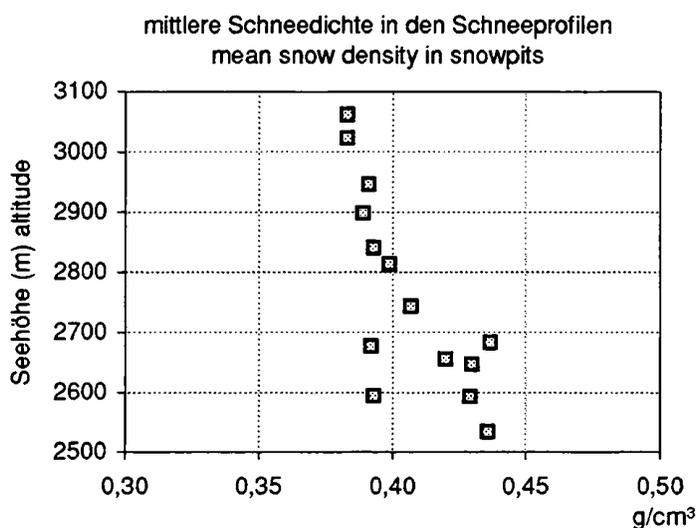
**Tab. 3.2.2.1.1: Vertikal gemittelte Schneedichtemittel (in  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) der Winterschneedecke an den 14 Schneeschacht Standorten**

**Tab. 3.2.2.1.1: Snow density means ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) of the total winter snowpack for the 14 snowpit locations**

Profil	1982/83	1983/84	1984/85	1985/86	1986/87	1987/88	1988/89	1989/90	1990/91	1991/92	1992/93	11j. Mittel 11y. mean	10j. Mittel* 10y. mean
PR-01	0,40	0,31	0,50	0,41	0,34	0,42	0,38	0,42	0,32	0,41	0,42	0,39	0,38
PR-02	0,40	0,28	0,43	0,40	0,39	0,42	0,36	0,39	0,39	0,40	0,40	0,39	0,38
PR-03	0,40	0,36	0,44	0,35	0,41	0,44	0,38	0,40	0,36	0,38	0,43	0,40	0,39
PR-04	0,38	0,35	0,48	0,45	0,36	0,41	0,36	0,42	0,36	0,40	0,40	0,40	0,39
PR-05	0,41	0,33	0,48	0,39	0,40	0,41	0,36	0,41	0,37	0,43	0,42	0,40	0,39
PR-06	0,40	0,37	0,44	0,42	0,39	0,32	0,37	0,42	0,40	0,43	0,47	0,40	0,40
PR-07	0,43	0,30	0,50	0,45	0,44	0,40	0,38	0,43	0,37	0,44	0,43	0,42	0,41
PR-08	0,47	0,48	0,46	0,40	0,43	0,44	0,39	0,41	0,44	0,46	0,45	0,44	0,44
PR-09	0,44	0,33	0,44	0,39	0,38	0,40	0,39	0,38	0,35	0,44	0,42	0,40	0,39
PR-10	0,43	0,34	0,43	0,45	0,41	0,42	0,40	0,45	0,46	0,45	0,49	0,43	0,43
PR-11	0,42	0,39	0,47	0,49	0,40	0,43	0,39	0,48	0,35	0,41	0,44	0,42	0,42
PR-12	0,40	0,36	0,46	0,45	0,43	0,42	0,43	0,38	0,48	0,45	0,48	0,43	0,43
PR-13	0,44	0,28	0,47	0,42	0,40	0,39	0,35	0,40	0,38	0,45	0,42	0,40	0,39
PR-14	0,46	0,42	0,48	0,42	0,42	0,42	0,41	0,44	0,45	0,46	0,46	0,44	0,44
Mittel Mean	0,42	0,35	0,46	0,42	0,40	0,41	0,38	0,42	0,39	0,43	0,44	0,41	0,41

*\*) 1984/85 Winterbilanz erst Ende Mai erhoben, daher auch 10jähriges Mittel berechnet*

*\*) 1984/85 winter budget was measured end of May, therefore calculation of a ten years mean as well*



**Abb. 3.2.2.1.1: Abhängigkeit der mittleren Schneedichte der Winterschneedecke von der Seehöhe**

**Fig. 3.2.2.1.1: Scatter diagram of mean snow density versus altitude**

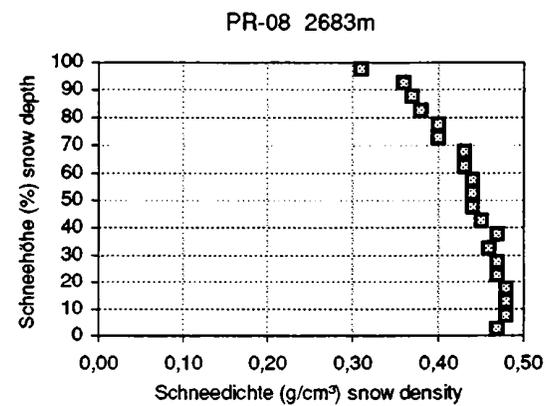
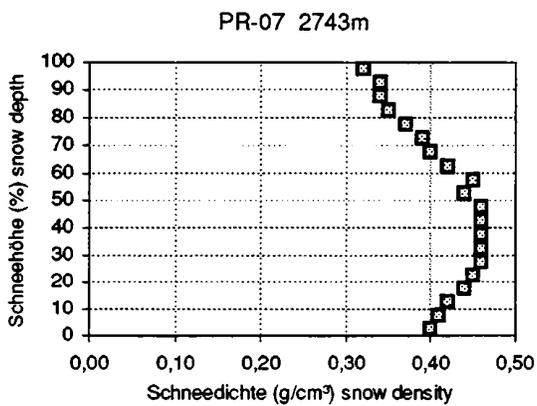
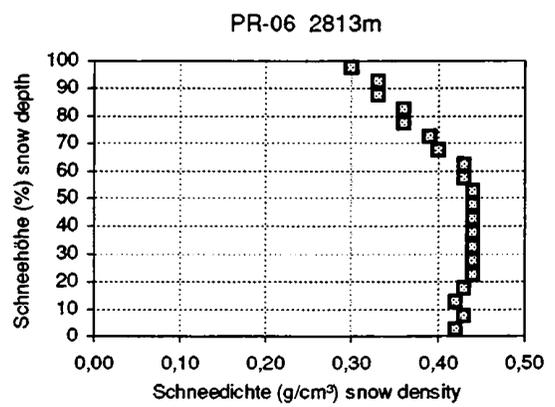
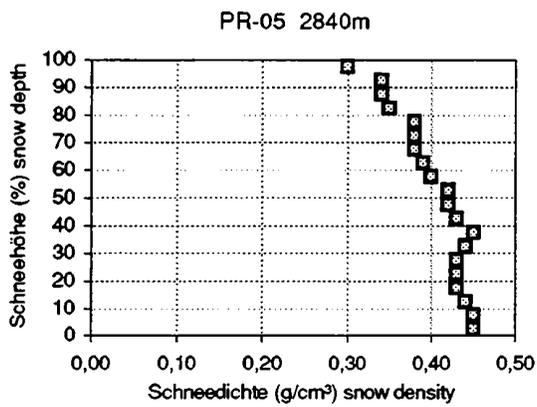
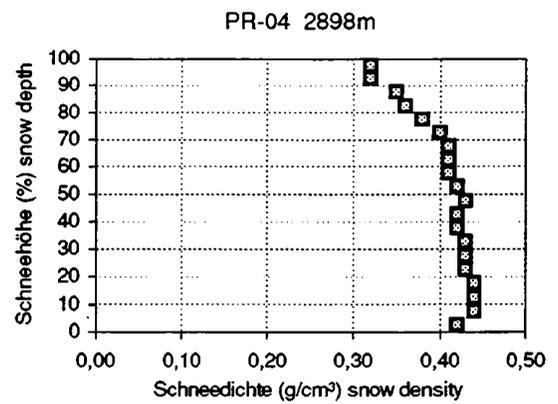
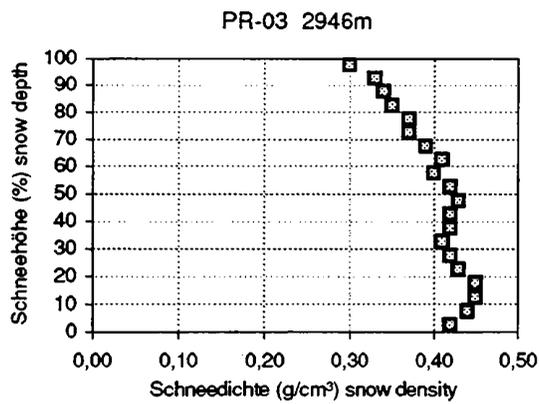
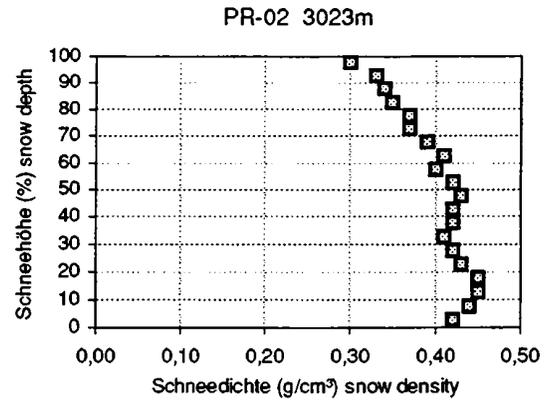
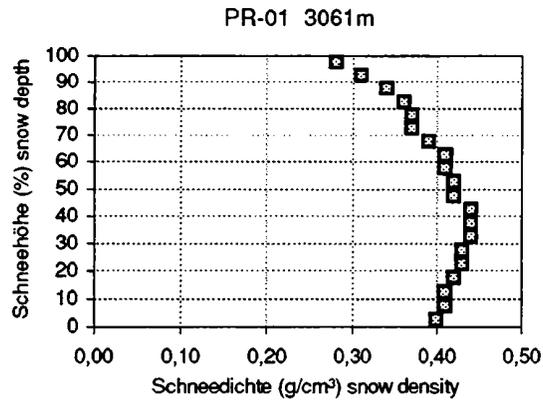
Insgesamt stellen sich die Dichteverhältnisse in der winterlichen Schneedecke Anfang Mai sehr einheitlich dar. Die Schwankungen von Jahr zu Jahr sind gering. Sie liegen im Mittel aller 14 Profile zwischen 0,35 und 0,44 g/cm<sup>3</sup> (ausgenommen der späte Termin 1984/85, der aber auch nur einen geringfügig erhöhten Wert von 0,46 g/cm<sup>3</sup> aufwies). Eine gewisse Seehöhenabhängigkeit zeigt sich bei den zeitlich gemittelten Profilwerten, die in Abbildung 3.2.2.1.1 dargestellt sind. Über den gesamten Seehöhenbereich des Gletschers von etwa 2500 bis 3100 m nimmt die mittlere Schneedichte von rund 0,44 g/cm<sup>3</sup> am Zungenende auf etwa 0,38 g/cm<sup>3</sup> in den obersten Zonen ab. Diese regelmäßige Verteilung der Schneedichte erwies sich als vorteilhaft bei der (später besprochenen) Interpolation bei der Konstruktion der Bilanzkarten.

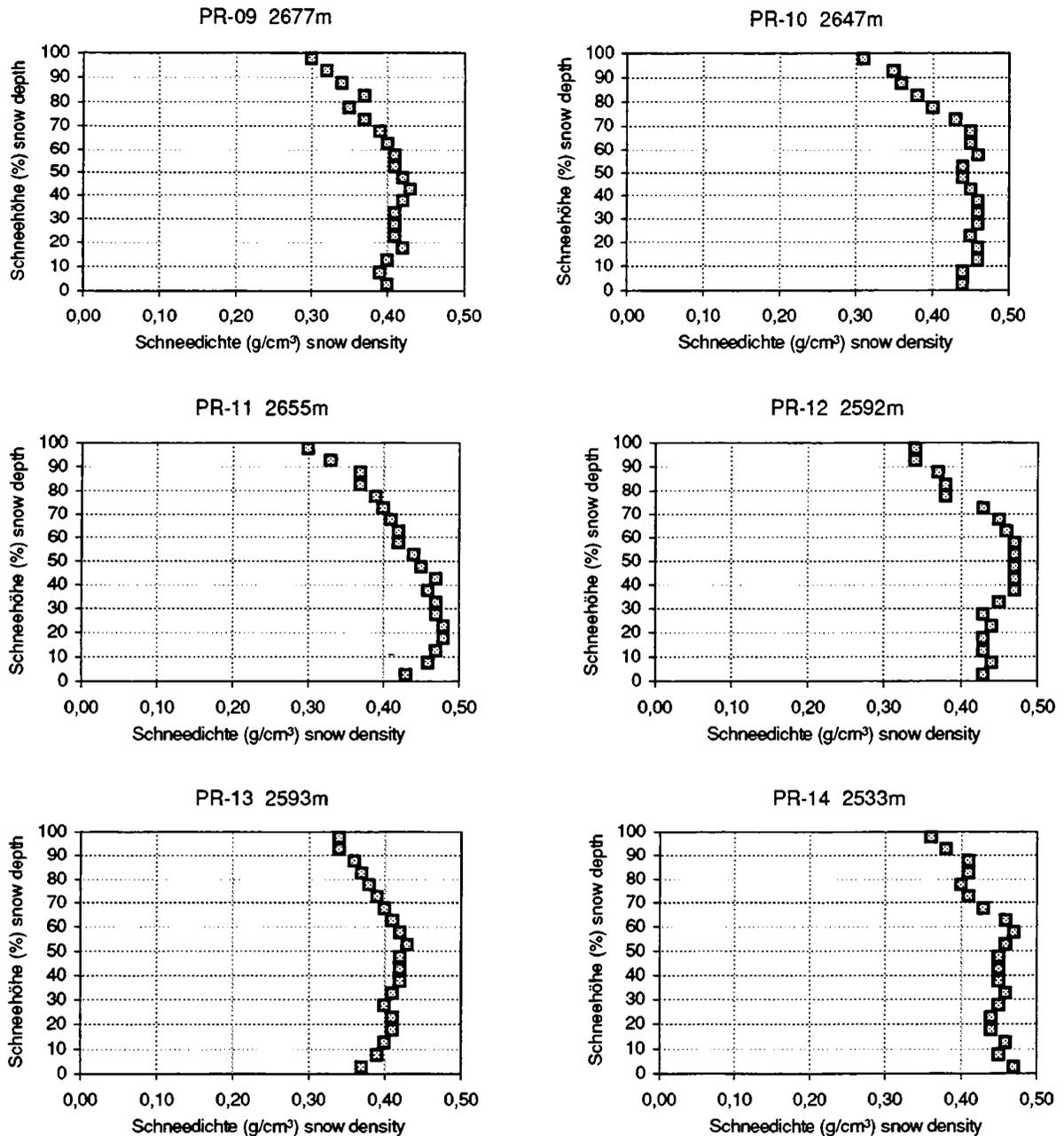
Eine vergleichende Bearbeitung des vertikalen Verlaufs der Schneedichte in den Schneeschächten gestaltet sich durch die von Jahr zu Jahr variierende Tiefe der Schächte problematisch. Mittelt man nur bis zu der jedes Jahr vorhandenen Tiefe der Winterschneedecke, gehen die bodennahen Schichten aller tieferen Profile verloren, deren Dichteverlauf aber infolge der dort stattfindenden Umwandlungsvorgänge von Interesse ist. Es wurde deshalb jedes Einzelprofil vor der Mittelung in relative vertikale Schichten umgerechnet und zwar in Schichtelemente von 5 zu 5% der Gesamttiefe des Profils. Die Dichtewerte dieser Schichtelemente wurden dann über die Länge der Intensivmeßperiode gemittelt, wodurch vergleichbare Vertikalprofile des Schneedichteverlaufs erzeugt wurden. Die Zahlenwerte dieser mittleren Schneedichteprofile sind in Tabelle 3.2.2.1.2 enthalten und in Abbildung 3.2.2.1.2 graphisch dargestellt.

**Tab. 3.2.2.1.2: Mittlere vertikale Schneedichteprofile (in g/cm<sup>3</sup>) an den 14 Schneeschacht-Standorten auf dem Wurtenkees. Schichtdicke relativ zur Gesamttiefe des jeweiligen Einzelprofils (0%=Vorjahreshorizont, 100%=Schneeoberfläche)**

**Tab. 3.2.2.1.2: Mean vertical snow density profiles (g/cm<sup>3</sup>) for the 14 snow pit locations on Wurtenkees. Snow depths relative to the total snowdepth of the single profiles (0%=bottom, 100%=snow surface)**

Schnee höhe (%) Snow depth	PR-01 3061m	PR-02 3023m	PR-03 2946m	PR-04 2898m	PR-05 2840m	PR-06 2813m	PR-07 2743m	PR-08 2683m	PR-09 2677m	PR-10 2647m	PR-11 2655m	PR-12 2592m	PR-13 2593m	PR-14 2533m
97,5	0,28	0,26	0,30	0,32	0,30	0,30	0,32	0,31	0,30	0,31	0,30	0,34	0,34	0,36
92,5	0,31	0,31	0,33	0,32	0,34	0,33	0,34	0,36	0,32	0,35	0,33	0,34	0,34	0,38
87,5	0,34	0,34	0,34	0,35	0,34	0,33	0,34	0,37	0,34	0,36	0,37	0,37	0,36	0,41
82,5	0,36	0,34	0,35	0,36	0,35	0,36	0,35	0,38	0,37	0,38	0,37	0,38	0,37	0,41
77,5	0,37	0,36	0,37	0,38	0,38	0,36	0,37	0,40	0,35	0,40	0,39	0,38	0,38	0,40
72,5	0,37	0,37	0,37	0,40	0,38	0,39	0,39	0,40	0,37	0,43	0,40	0,43	0,39	0,41
67,5	0,39	0,38	0,39	0,41	0,38	0,40	0,40	0,43	0,39	0,45	0,41	0,45	0,40	0,43
62,5	0,41	0,39	0,41	0,41	0,39	0,43	0,42	0,43	0,40	0,45	0,42	0,46	0,41	0,46
57,5	0,41	0,40	0,40	0,41	0,40	0,43	0,45	0,44	0,41	0,46	0,42	0,47	0,42	0,47
52,5	0,42	0,41	0,42	0,42	0,42	0,44	0,44	0,44	0,41	0,44	0,44	0,47	0,43	0,46
47,5	0,42	0,42	0,43	0,43	0,42	0,44	0,46	0,44	0,42	0,44	0,45	0,47	0,42	0,45
42,5	0,44	0,43	0,42	0,42	0,43	0,44	0,46	0,45	0,43	0,45	0,47	0,47	0,42	0,45
37,5	0,44	0,42	0,42	0,42	0,45	0,44	0,46	0,47	0,42	0,46	0,46	0,47	0,42	0,45
32,5	0,44	0,41	0,41	0,43	0,44	0,44	0,46	0,46	0,41	0,46	0,47	0,45	0,41	0,46
27,5	0,43	0,41	0,42	0,43	0,43	0,44	0,46	0,47	0,41	0,46	0,47	0,43	0,40	0,45
22,5	0,43	0,41	0,43	0,43	0,43	0,44	0,45	0,47	0,41	0,45	0,48	0,44	0,41	0,44
17,5	0,42	0,41	0,45	0,44	0,43	0,43	0,44	0,48	0,42	0,46	0,48	0,43	0,41	0,44
12,5	0,41	0,42	0,45	0,44	0,44	0,42	0,42	0,48	0,40	0,46	0,47	0,43	0,40	0,46
7,5	0,41	0,41	0,44	0,44	0,45	0,43	0,41	0,48	0,39	0,44	0,46	0,44	0,39	0,45
2,5	0,40	0,39	0,42	0,42	0,45	0,42	0,40	0,47	0,40	0,44	0,43	0,43	0,37	0,47





**Abb. 3.2.2.1.2: Mittlere vertikale Schneedichteprofile an den 14 Schneeschacht-Standorten auf dem Wurtenees. Schichtdicke relativ zur Gesamttiefe des jeweiligen Einzelprofils (0%=Vorjahreshorizont, 100%=Schneeoberfläche)**

**Fig. 3.2.2.1.2: Mean vertical snow density profiles for the 14 snow pit locations on Wurtenees. Snow depths relative to the total snowdepth of the single profiles (0%=bottom, 100%=snow surface)**

Abgesehen von den Ausnahmeprofilen PR-08 (Lawinenprofil) und PR-14 (das Anfang Mai auch in tieferen Schneeschichten bereits oft Schmelzvorgängen unterworfen ist) sind die vertikalen Dichteschichtungen sehr ähnlich. In allen Seehöhenzonen nimmt die Schneedichte von den geringsten Werten in Oberflächennähe ( $0,25 \text{ g/cm}^3$  in Gipfelnähe,  $0,35 \text{ g/cm}^3$  in Zungennähe) zunächst bis zu einem Dichtemaximum zu, das sich zwischen der Hälfte und den unteren 10 bis 30% der Gesamttiefe befindet. Die Maximaldichten liegen zwischen  $0,43$  und  $0,48 \text{ g/cm}^3$ . Darunter findet infolge von Schneeuwandlungsprozessen in den alten und unter größerem Druck liegenden Schichten gegen den Vorjahreshorizont zu wieder eine gewisse Abnahme der Schneedichte statt bis zu Werten zwischen  $0,37$  und  $0,42 \text{ g/cm}^3$ . Eine systematische Abhängigkeit der Tiefe des Dichtemaximums von der Seehöhe ist nicht zu erkennen.

### 3.2.2.2 Schneetemperatur

#### 3.2.2.2 Snow temperature

In den Schneeschächten wird jeweils die Schneetemperatur in gleichbleibenden Schneetiefen von 10, 20, 30, 40, 50 cm und darunter von 50 zu 50 cm gemessen. Die mittleren Temperaturen der Einzelprofile wurden mit dem Mittel aus den Temperaturen zwischen 50 und 250 cm definiert und sind in Tabelle 3.2.2.2.1 enthalten. Bei der Mittelung über die gesamte Intensivperiode wurden wieder, aus den bereits erwähnten Gründen, sowohl 11- als auch 10jährige Mittel gebildet. Die 10jährigen Mitteltemperaturen sind in ihrer Seehöhenabhängigkeit in Abbildung 3.2.2.2.1 dargestellt.

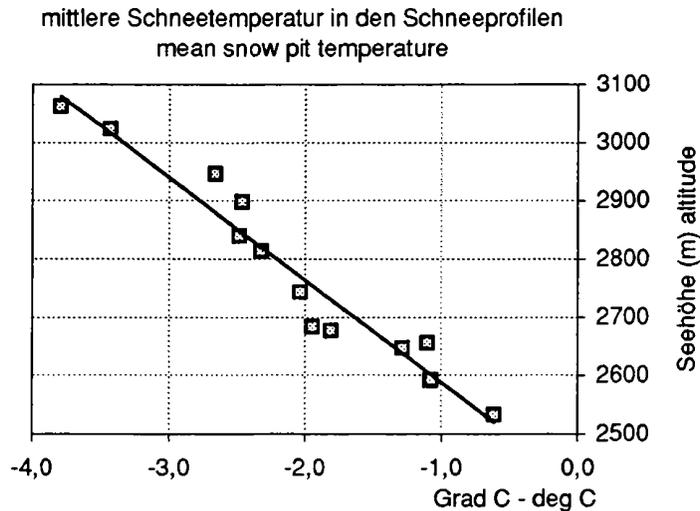
**Tab. 3.2.2.2.1: Mittlere Schneetemperaturen (Grad C) Anfang Mai\* an den 14 Schneeprofilstandorten auf dem Wurtenkees in den Jahren 1983 bis 1993 (Mittel aus 50 bis 250 cm)**

**Tab. 3.2.2.2.1: Mean snow temperatures (deg. C) around Mai 1st\* for the 14 snow pit locations on Wurtenkees in the years 1983 to 1993 (mean from 50 to 250 cm)**

Profil	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	11j. Mittel 11y. mean	10j. Mittel* 10y. mean
PR-01	-5,7	-7,0	0,0	-4,1	-1,0	-3,0	-3,9	-4,1	-3,1	-3,0	-3,0	-3,4	-3,8
PR-02	-3,6	-4,8	0,0	-2,1	-1,0	-4,3	-3,6	-2,3	-8,0	-2,3	-2,3	-3,1	-3,4
PR-03	-3,0	-5,2	-0,2	-1,5	-0,8	-2,5	-3,1	-1,0	-4,4	-3,2	-1,9	-2,4	-2,7
PR-04	-3,1	-5,5	-0,1	-1,0	-0,4	-2,2	-3,0	-1,5	-4,3	-2,0	-1,6	-2,2	-2,5
PR-05	-2,9	-5,6	-0,1	-1,2	-0,9	-2,0	-2,9	-1,2	-4,6	-2,1	-1,4	-2,3	-2,5
PR-06	-3,7	-5,0	-0,3	-0,2	-0,5	-2,0	-2,9	-1,2	-4,2	-2,4	-1,1	-2,1	-2,3
PR-07	-2,6	-4,8	0,0	-0,2	-0,3	-1,7	-2,8	-0,9	-3,8	-2,2	-1,0	-1,8	-2,0
PR-08	-2,0	-4,5	-0,1	-2,3	-0,5	-0,9	-2,0	0,0	-2,5	-2,0	-2,7	-1,8	-1,9
PR-09	-2,1	-5,0	-0,1	-1,0	-0,6	-0,8	-1,8	-0,7	-2,7	-1,5	-1,8	-1,6	-1,8
PR-10	-2,0	-3,4	0,0	-1,0	-1,0	-0,6	-1,5	-0,3	-1,5	-1,1	-0,4	-1,2	-1,3
PR-11	-0,9	-5,2	0,0	-0,5	-0,9	-0,3	-1,3	0,0	-0,7	-1,2	0,0	-1,0	-1,1
PR-12	-1,6	-4,0	0,0	-0,2	-0,6	-0,1	-1,6	-0,3	-1,2	-0,9	-0,3	-1,0	-1,1
PR-13	-1,1	-3,5	0,0	-1,7	-0,4	-0,5	-0,2	-0,8	-1,3	-1,0	-0,2	-1,0	-1,1
PR-14	-0,5	-3,0	0,0	-0,6	-0,2	-0,1	-0,3	0,0	-0,6	-0,8	0,0	-0,6	-0,6
Mittel Mean	-2,5	-4,8	-0,1	-1,3	-0,7	-1,5	-2,2	-1,0	-2,8	-1,8	-1,3	-1,8	-2,0

*\*) 1984/85 Winterbilanz erst Ende Mai erhoben, daher auch 10jähriges Mittel berechnet*

*\*) 1984/85 winter budget was measured end of May, therefore calculation of a ten years mean as well*



**Abb. 3.2.2.2.1: Mittlere Seehöhenabhängigkeit der mittleren Schneetemperatur Anfang Mai auf dem Wurtenkees**

**Fig. 3.2.2.2.1: Mean snow temperature versus altitude around Mai 1st on Wurtenkees**

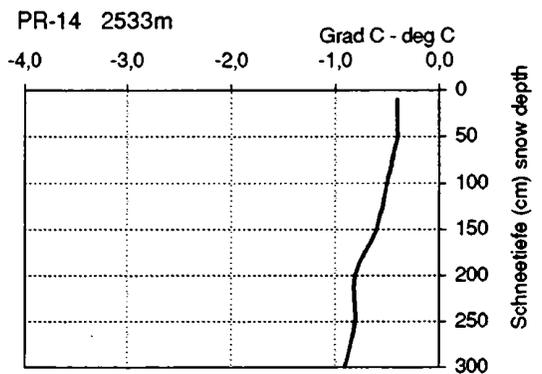
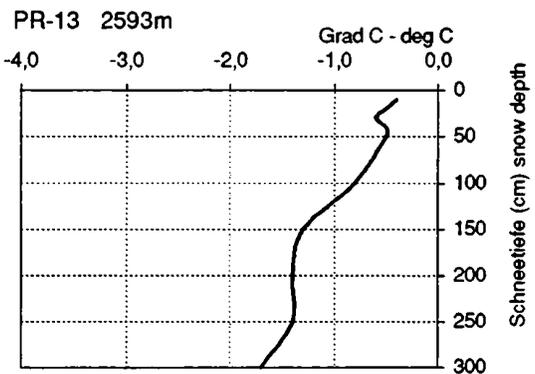
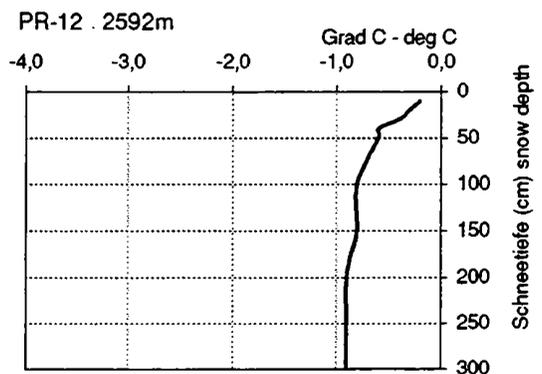
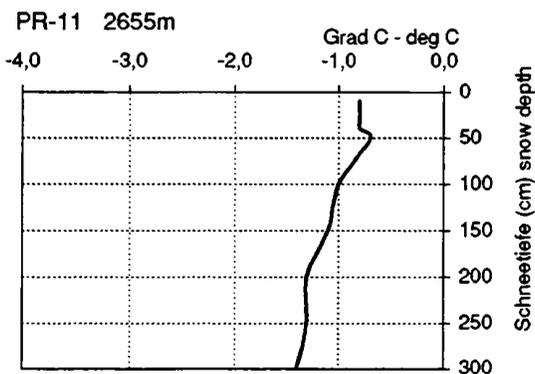
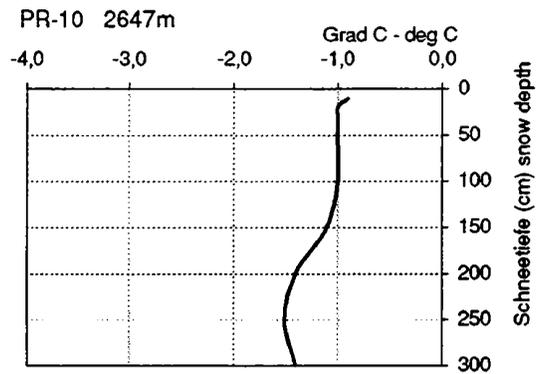
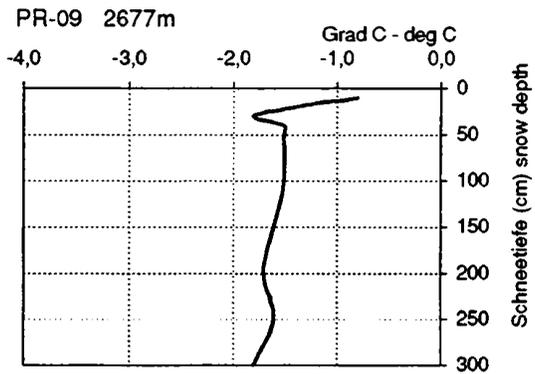
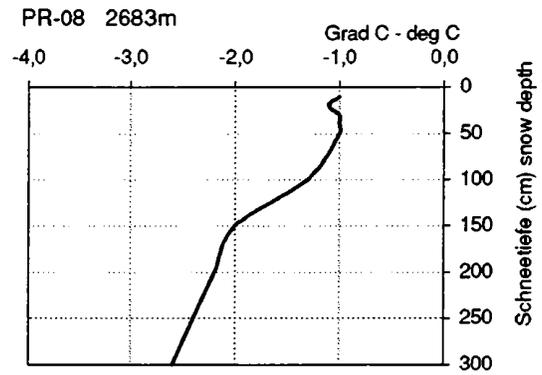
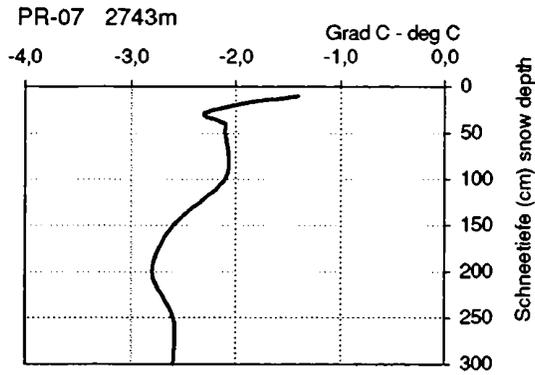
Abgesehen von den zu erwartenden Schwankungen von Winter zu Winter ist die Verteilung der Schneetemperatur in der Winterschneedecke auf dem Gletscher wie von der Theorie her zu erwarten. Sie nimmt relativ regelmäßig linear mit der Seehöhe ab. Der vertikale Gradient entspricht mit durchschnittlich  $-0,6$  Grad pro 100 m gut dem dort auch bei der Lufttemperatur im glaziologischen Winter auftretenden (vergl. Tabelle 3.1.1). Im Mittel ist Anfang Mai auch in den tiefstgelegenen Profilen die Schneetemperatur noch unter 0 Grad C, was zeigt, daß der Termin der Winterbilanzierung günstig gewählt ist. Daß relativ kurz danach der Abschmelzvorgang des Winterschnees bereits voll im Gang ist, zeigen die Temperaturen Ende Mai 1985, als die mittleren Schneetemperaturen bis hinauf ins Gipfelniveau bereits bei 0 Grad C lagen (vergl. Tabelle 3.2.2.1).

**Tab. 3.2.2.2.2: Mittlere vertikale Temperaturprofile (in Grad C) in der Winterschneedecke für Anfang Mai an den 14 Schneeschartstandorten auf dem Wurtenkees**

**Tab. 3.2.2.2.2: Mean vertical temperature profiles (deg. C) in the winter snow pack around Mai 1st for the 14 snow pit locations on Wurtenkees**

Tiefe (cm) Depth	PR-01 3061m	PR-02 3023m	PR-03 2946m	PR-04 2898m	PR-05 2840m	PR-06 2813m	PR-07 2743m	PR-08 2683m	PR-09 2677m	PR-10 2647m	PR-11 2655m	PR-12 2592m	PR-13 2593m	PR-14 2533m
10	-3,6	-2,1	-1,6	-1,6	-1,9	-1,8	-1,4	-1,0	-0,8	-0,9	-0,8	-0,2	-0,4	-0,4
20	-3,8	-2,3	-1,8	-1,5	-1,5	-1,7	-2,0	-1,1	-1,4	-1,0	-0,8	-0,3	-0,5	-0,4
30	-3,8	-2,4	-1,8	-1,5	-1,5	-1,7	-2,3	-1,0	-1,8	-1,0	-0,8	-0,4	-0,6	-0,4
40	-3,8	-2,4	-1,7	-1,5	-1,6	-1,6	-2,1	-1,0	-1,5	-1,0	-0,8	-0,6	-0,5	-0,4
50	-3,4	-2,2	-1,8	-1,6	-1,6	-1,6	-2,1	-1,0	-1,5	-1,0	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4
100	-3,0	-2,2	-2,1	-1,7	-1,7	-1,8	-2,1	-1,3	-1,5	-1,0	-1,0	-0,8	-0,8	-0,5
150	-3,0	-2,7	-2,5	-2,3	-2,2	-2,2	-2,6	-2,0	-1,6	-1,1	-1,1	-0,8	-1,3	-0,6
200	-3,1	-2,9	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,8	-2,2	-1,7	-1,4	-1,3	-0,9	-1,4	-0,8
250	-3,0	-3,0	-3,0	-2,6	-2,5	-2,8	-2,6	-2,4	-1,6	-1,5	-1,3	-0,9	-1,4	-0,8
300	-2,8	-3,1	-3,3	-2,7	-2,4	-2,9	-2,6	-2,6	-1,8	-1,4	-1,4	-0,9	-1,7	-0,9
Mittel Mean	-3,1	-2,7	-2,5	-2,2	-2,2	-2,3	-2,5	-1,9	-1,6	-1,2	-1,1	-0,8	-1,2	-0,7





Unterschiedlich zu den Profilen der Schneedichte ist bei den Temperaturverläufen weniger Regelmäßigkeit zu beobachten. In der obersten Schneeschicht (im Abstand von 10 cm vermessenen) macht sich die von Jahr zu Jahr sehr unterschiedliche Witterung unmittelbar vor dem Meßtermin bemerkbar, und der Temperaturverlauf ist hier von Profil zu Profil sehr variabel. In größeren Tiefen wäre von der Theorie her Anfang Mai, durch die von oben her in die Schneedecke eindringende Frühjahrserwärmung eine Abnahme der Temperatur zu erwarten, die sich in Nähe des Vorjahresuntergrundes in eine Zunahme umkehren sollte, da sich hier noch die Wärme der vorjährigen Ablationssaison bemerkbar machen sollte. Qualitativ ist diese Temperaturabnahme mit der Schneeschiefe in den Profilen zu sehen, quantitativ gibt es jedoch größere Unterschiede, die keine Regelmäßigkeit bezüglich der Seehöhe zeigen. Die erwähnte Temperaturumkehr in den tiefen Schichten ist auch nicht in allen Profilen vorhanden. Hier macht sich wahrscheinlich die Tatsache bemerkbar, daß in 300 cm Tiefe nicht immer bereits die Vorjahresschicht nahe genug ist, um diesen Effekt darstellen zu können. Wichtig für die Massenbilanzierung sind die Profile im unteren Gletscherbereich, wo die mittlere Temperatur in den oberflächennahen Schichten zwar schon sehr nahe bei 0 Grad C liegen kann, in den tiefen Schichten jedoch noch keine Durchschmelzung der Schneeschicht gegeben ist, und somit zum Zeitpunkt Anfang Mai im Mittel noch keine Ablationsverluste der Gesamtschicht stattfinden.

### 3.2.2.3 Wasserwert

#### 3.2.2.3 Water equivalent

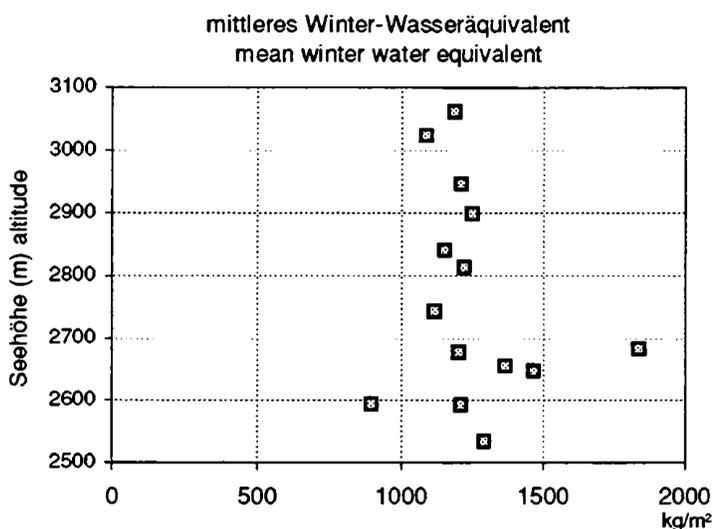
Die Aufsummierung der in einem ununterbrochenen vertikalen Schacht gemessenen Schneegewichte (Einzelabstichhöhe zwischen 10 und 20 cm) ergibt - nach Umrechnung auf einen Einheitsquerschnitt - das Gesamtwasseräquivalent am jeweiligen Standort der Schneeschächte. Die Werte für die 11 Bilanzjahre der 14 Schneeprofilstandorte sind in Tabelle 3.2.2.3.1 enthalten. Auf eine Mittelung über die 14 Profile wurde bewußt verzichtet, da diese keine guten Zahlenwerte für das Mittel des Gletschers ergibt. Dazu werden später (Abschnitt 3.4) Kartenanalysen herangezogen.

**Tab. 3.2.2.3.1: Wasserwert der Winterschneedecke (Oktober-April) in den 11 Bilanzjahren an den 14 Schneeprofilstandorten auf dem Wurtenkees (in mm=kg/m<sup>2</sup>)**

**Tab. 3.2.2.3.1: Water equivalent of winter snow pack (October-April) for the 11 budget years of 14 snow profile locations on Wurtenkees (mm=kg/m<sup>2</sup>)**

Profil	Wasseräquivalent in mm (=kg/m <sup>2</sup> ) water equivalent: mm (kg/m <sup>2</sup> )											11j. Mittel 11y.mean
	1982/83	1983/84	1984/85	1985/86	1986/87	1987/88	1988/89	1989/90	1990/91	1991/92	1992/93	
PR-01	1286	296	1189	858	1079	1314	1558	1109	1020	1570	1782	1187
PR-02	1238	430	995	837	1333	1374	1150	1150	900	1290	1246	1086
PR-03	1382	1198	1120	891	1468	1389	1273	980	1040	1200	1371	1210
PR-04	1299	1166	1340	1352	1332	1076	1220	924	1150	1480	1408	1250
PR-05	1164	1092	986	988	1248	1204	1138	849	1250	1450	1293	1151
PR-06	1404	1177	1136	1108	1201	983	1154	1109	1280	1480	1400	1221
PR-07	1228	729	1100	1064	1426	1200	912	1012	1020	1340	1250	1116
PR-08	1796	1979	1550	1158	2952	1946	2100	1683	1560	1170	2334	1839
PR-09	1400	917	1226	1142	1348	1150	1060	892	1140	1550	1395	1202
PR-10	1492	1094	1540	1307	1500	1572	1500	1199	1450	1520	1967	1467
PR-11	1204	1642	1399	1562	1427	1616	1439	1545	730	1300	1183	1368
PR-12	920	748	1105	1371	1840	1346	588	848	1490	1400	1670	1211
PR-13	950	241	898	856	1374	927	1445	731	900	720	827	897
PR-14	1469	1105	1159	1211	1669	1350	1041	961	1450	1650	1150	1292

Die Abbildung 3.2.2.3.1 zeigt die Abhängigkeit der mittleren Winter-Wasserwerte von der Seehöhe. Wie schon aufgrund der Schneehöhendaten zu vermuten war, liegt auf dem Wurtenkees nicht ein aus den großräumigen Niederschlagseinträgen her zu erwartender Anstieg mit der Seehöhe vor. Die höchsten Werte werden im Mittel in tiefergelegenen Gletscherteilen in der windgeschützten und durch indirekte Ernährung durch Lawinen zusätzlich gespeisten Zone unterhalb des Steilhanges erreicht. Im windexponierteren Oberteil des Gletschers und in solchen der Zunge steht für die Massenbilanz des Gletschers nur ein deutlich geringerer Winter-Wasserwert zur Verfügung. Dieses Phänomen dürfte speziell beim Wurtenkees mit seinen sehr exponiert liegenden oberen Gletscherzonen (nur geringfügige Abschirmung durch Gratumrandung) stärker ausgeprägt sein, als bei anderen Gletschern. Ein Vergleich ist jedoch nicht möglich, da eine Winterbilanzierung an anderen Gletschern Österreichs nicht durchgeführt wird. Näher eingegangen wird auf diesen Effekt in Abschnitt 3.4, bei der Besprechung der Massenbilanzkarten.



**Abb. 3.2.2.3.1:**

**Die Seehöhenabhängigkeit des Winter-Wasserwertes in den Schneeschächten auf dem Wurtenkees**

**Fig. 3.2.2.3.1:**

**Scatter diagram of winter water equivalent in snow pits versus altitude on Wurtenkees**

### 3.3 ABLATION

Zur Messung der Ablationsvorgänge wird auf dem östlichen Wurtenkees seit dem Haushaltsjahr 1982/83 ein Meßnetz von 10 bis 15 Ablationspegeln betrieben. Es handelt sich um die üblichen weißen Holzstangen von 2 cm Durchmesser in Segmenten von je 2 m Länge. Die Pegel werden im Sommer nachgebohrt und Ende September - Anfang Oktober geodätisch neu vermessen. Die Pegelablesungen erfolgen bei der Nachbohrung, im Lauf der Ablationssaison in unregelmäßigen Abständen, jedenfalls jedoch um den Monatswechsel September/Oktober. Im Unterschied zu den deutlich sichtbareren Schneepegeln, gibt es beim Ablationspegelnetz seit der Inbetriebnahme des Sommerskigebietes auf dem Gletscher immer wieder Schwierigkeiten durch die Zerstörung von Ablationsstangen durch Pistenfahrzeuge oder Skifahrer. Es konnte zwar ein ausreichend dichtes Pegelnetz zur Konstruktion der Massenbilanzkarten über jede Sommersaison hinübergerettet werden, eine systematische Aufrechterhaltung einer bestimmten Anzahl von Pegeln an gleichbleibenden Stellen - wie bei den Schneepegeln - war jedoch nicht möglich. So ist zwar die Grundfunktion der Ablationspegeldaten für die Massenbilanzierung gegeben, andere Auswertungen in Richtung Fließgeschwindigkeit und vertikale Eisbewegung können nicht für die gesamte Untersuchungsperiode vorgenommen werden.

Die sommerlichen Ablationswerte werden in Abschnitt 3.4 aufgrund der Analysen der Bilanzkarten besprochen. Von den erwähnten anderen Auswertemöglichkeiten der Pegelmessungen kann nur als Beispiel das Bilanzjahr 1982/83 - vor Errichtung des Skigebietes - gezeigt werden.

### 3.3.1 Horizontal- und Vertikalbewegung der Eisoberfläche

#### 3.3.1 Horizontal and vertical movement of the glacier surface

Die Messung der Horizontal- und Vertikalbewegung (Emergenz oder Submergenz) der Eisoberfläche konnte aus den oben erwähnten Gründen nicht dauernder Bestandteil des Meßprogramms auf dem Wurtenkees sein. Mit der im Bilanzjahr 1982/83 durchgeführten Vermessung der Ablationspegel liegen jedoch eine Anzahl von Daten vor, die am Beispiel eines Bilanzjahres die an der Gletscheroberfläche beobachteten Eisbewegungen zu bestimmen erlauben.

Um eine Vorstellung über die Qualität der Bewegungsmessung zu erhalten, soll am Anfang kurz eine Fehlerabschätzung stehen (Fehlerfortpflanzungsgesetz), wobei die gemessenen Größen als voneinander unabhängig betrachtet werden. Dies stellt eine Vereinfachung dar, da die Fehler bei der Theodolitvermessung i.a. miteinander korreliert sind. Grundlegendes über die Bewegungen der Gletscheroberfläche kann in PATERSON, 1994, nachgelesen werden.

Abbildung 3.3.1.1 zeigt schematisch die Situation für die Bestimmung der Bewegungskomponenten unter Verwendung von Ablationspegeln. Angenommen ist dabei, daß sich der Pegel parallel zu seiner Ausgangslage bewegt, eine Voraussetzung, die in der Natur nicht völlig erfüllt ist.

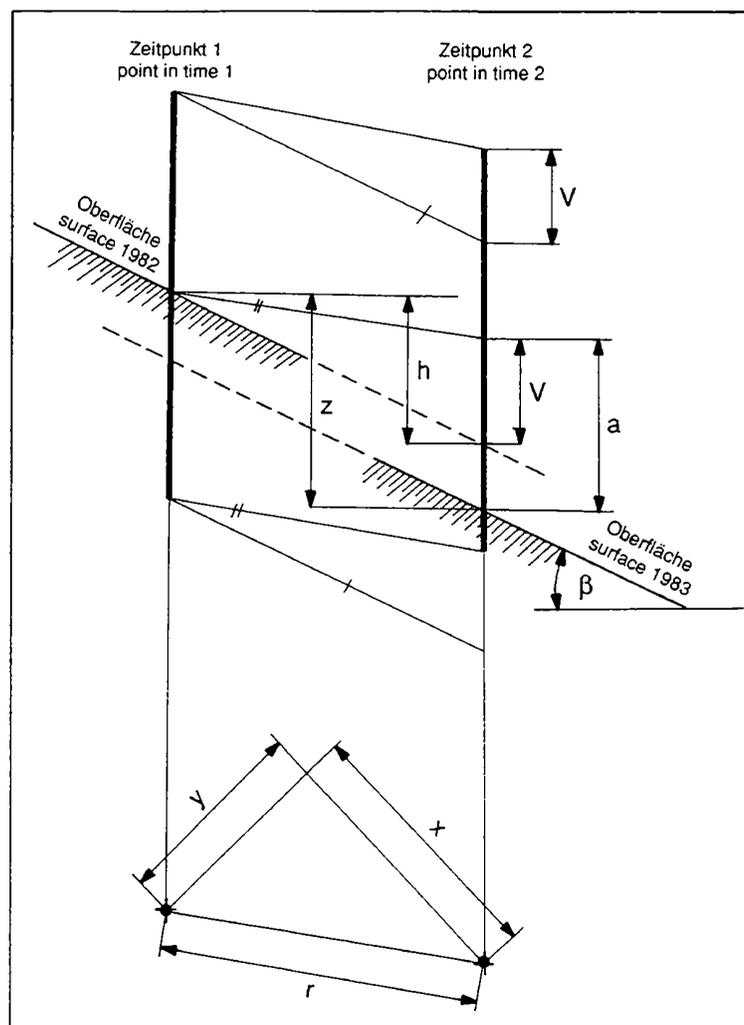


Abb. 3.3.1.1: Bestimmung der Bewegungskomponenten der Gletscheroberfläche durch Pegelmessung

Fig. 3.3.1.1: Calculation of the spatial components of the ice surface movement using stake measurements

Da nicht die Stangenspitzen der Pegel eingemessen werden, muß für die Berechnung der Vertikalbewegung die Ablationsmessung mitverwendet werden. Für die Vertikalkomponente gilt:

$$V(t) = a(t) - (z(t) - h(t)) \quad (1)$$

V(t) Vertikalbewegung in der Zeit t  
vertical movement during time t

a(t) Ablation in der Zeit t  
ablation during time t

z(t) Höhenunterschied der Eisoberfläche beim Pegel in der Zeit t  
difference in altitude of the ice surface at stake location during time t

h(t) Versetzung des Pegels in z-Richtung in Folge der Hangneigung in der Zeit t  
stake movement into the direction of z caused by slope during time t

mit: 
$$h(t) = r(t) \cdot \tan \beta \quad (2)$$

$\beta$  Hangneigung  
slope

r(t) Resultierende der Horizontalbewegung des Pegels in der Zeit t  
resultant of horizontal movement of stake during time t

da: 
$$r(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (3)$$

x Horizontalbewegung in x-Richtung (Gauß-Krüger) in der Zeit t  
horizontal movement in x-direction (Gauss-Krueger) during time t

y Horizontalbewegung in y-Richtung (Gauß-Krüger) in der Zeit t  
horizontal movement in y-direction (Gauss-Krueger) during time t

folgt somit: 
$$V(t) = a(t) - z(t) + \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \cdot \tan \beta$$

Die Werte x, y und z können durch die geodätische Vermessung der Pegel bestimmt werden, a ist die gemessene Ablation an den Pegeln. Wichtig ist, daß die Messungen sich auf denselben Zeitabschnitt beziehen. Andernfalls muß man die Ablationsmessung auf die Zeit der geodätischen Messung interpolieren, was natürlich den Fehler erhöht. Auf dem Wurtenkees werden Ablationsmessung und geodätische Messung der Pegel gleichzeitig durchgeführt. Die Hangneigung wurde für die vorliegende Auswertung der Arbeitskarte 1:5000 von 1979 entnommen.

Folgende Fehler wurden für die einzelnen Meßkomponenten angenommen:

Die Bewegungskomponenten des Pegels x, y und z werden auf 10 cm genau vermessen. Die Werte von  $\beta$  werden für  $\beta$  von 0 bis 7 Grad exakt, für  $\beta$  von 7 bis 14 Grad auf 1 Grad, für  $\beta$  von 14 bis 19 Grad auf 2 Grad und für  $\beta$  von 19 bis 25 Grad auf 3 Grad genau auf der Karte ausgewertet. Die Ablation a wird auf 5 cm genau gemessen.

Für den mittleren Fehler der Vertikalbewegung ergibt sich daraus nach den Formeln des Fehlerfortpflanzungsgesetzes beispielsweise für  $x = y = 4$  m und  $\beta = 25$  Grad ein Fehler von 0,39 m, oder für  $x = y = 3$  und  $\beta = 10$  Grad ein Fehler von 0,11 m bei der vertikalen Komponente z. Man sieht, daß die Bestimmung der Hangneigung einen starken Einfluß auf die Genauigkeit der Messung hat. Je flacher das Gelände ist, desto geringer wird dieser Fehler, da dann die Ablesung aus der Karte genauer möglich ist.

In der Tabelle 3.3.1.1 sind die Vertikalbewegung und die resultierende Horizontalbewegung sowie der mittlere Fehler der Vertikalbewegung für die im Haushaltsjahr 1982/83 zur Verfügung stehenden Ablationspegel enthalten.

**Tab. 3.3.1.1:** Horizontale und vertikale Bewegung der Eisoberfläche an 12 Ablationspegeln am Wurtenkees im Bilanzjahr 1982/83

**Tab. 3.3.1.1:** Horizontal and vertical movement of the ice surface at 12 ablation stakes on Wurtenkees during the budget year 1982/83

Pegel stake	Sh*(m) alt.*(m)	a(cm)	z(cm)	r(cm)	$\beta$ (°)	V(cm)	E(cm)	E(%)
A 1	2537	302	306	224	16	60	15	25
A 2	2579	293	378	488	22	112	33	29
A 3	2613	297	333	603	14	114	20	18
A 4	2649	153	230	471	11	15	15	97
A 5	2678	127	131	30	14	3	12	410
A 6	2734	186	208	7	16	-20	13	63
A 7	2863	163	180	101	22	24	15	63
A 8	2834	182	139	71	22	72	15	20
A 9	2789	161	178	17	25	-8	15	162
A10	2604	264	213	358	14	140	18	13
A11	2571	361	369	509	14	119	23	19
A12	2571	281	255	284	22	141	22	16

\* die Seehöhenangaben Sh beziehen sich auf September 1982

\* altitude alt. from September 1982

a Ablation

ablation

z Höhenunterschied der Eisoberfläche beim Pegel

difference in altitude of the ice surface at stake location

r Resultierende der Horizontalbewegung des Pegels

resulting horizontal movement of stake

$\beta$  Hangneigung beim Pegel

slope at the stake location

V Vertikalbewegung

vertical movement

E mittlerer Fehler der Vertikalbewegungsmessung

mean error of the vertical movement measurements

Man erkennt, daß bei den gegebenen Fehlern Vertikalbewegungen kleiner etwa 0,6 m nicht signifikant sind, wobei allerdings auch die Größe der angenommenen Einzelfehler noch diskutabel ist. Man erkennt als durchgehendes Merkmal, daß an allen Meßpunkten, im oberen und unteren Gletscherbereich, die Ablation im Bilanzjahr 1982/83 deutlich größer als die Vertikalbewegung ist - typisch für einen Gletscher im Rückzugsstadium. Im Fall eines stationären Gletschers müßten Ablation und Emergenz im Ablationsgebiet bzw. Akkumulation und Submergenz im Akkumulationsgebiet gleich groß sein.

Die horizontalen Eisbewegungen sind im Zungenbereich mit 2 bis 6 m/Jahr in der typischen Größenordnung für einen Gletscher mit nur noch geringer Eismächtigkeit. Im oberen (steileren) Gletscherteil liegen sie im Bereich 0 bis 1 m/Jahr, was auf eine dort noch geringere Eisdicke schließen läßt.

Die stichprobenartige Eisbewegungsbestimmung für ein Bilanzjahr weist das östliche Wurtenkees als einen Gletscher mit nur noch geringer Bewegungsaktivität aus, der in starkem Rückzug begriffen ist. Diese Tendenz dürfte seither (vergl. die Gletscherneuaufnahme 1991) noch stärker geworden sein.

### **3.4 MASSENBILANZ (WINTER, SOMMER, JAHR)**

#### **3.4 MASS BALANCE (WINTER, SUMMER, YEAR)**

Die in 3.2 und 3.3 beschriebenen Messungen der Bilanzen an zahlreichen Punkten des Gletschers, sowie die in 3.1 enthaltenen Daten, deren zeitlicher Verlauf für eine Interpolation von den Zeiten der Feldmeßkampagnen zu den Bilanzierungszeitpunkten 1. Mai und 1. Oktober verwendet wird, bilden das Basismaterial zur Erstellung von Karten der Verteilung der spezifischen Massenbilanz auf dem Gletscher.

#### **3.4.1 Karten der spezifischen Massenbilanz**

##### **3.4.1 Maps of specific mass balance**

Zusätzliche Informationen zur Interpolation bieten bei der Winterbilanz die verdichtenden Schneehöhensondierungen, die zusätzlich zu den 15 bis 20 Werten aus den Schneeschächten etwa 100 weitere Meßpunkte der Schneehöhe liefern. Durch die gezeigte sehr homogene Verteilung der Schneedichte auf dem Gletscher bedeuten diese Schneehöhen gute Schätzwerte der Winterbilanz.

Die Karten der spezifischen Nettojahresbilanz werden aus den Ablesungen der Ablationspegel und aus Wasserwertbestimmungen in Schneeprofilen des Firnrestes konstruiert. Die hier notwendigen Interpolationen werden analog zum Verlauf der Schichtogiven, der Altschnee- und Firnlinien durchgeführt. Für diese von der Geländeform geprägten und auf einem Gletscher lange Zeit sehr konstant auftretenden Muster liegen im Fall des östlichen Wurtenkeeses zahlreiche terrestrische Fotos (als Beispiel ist die Abbildung 3.4.1.1 gezeigt), terrestrische Stereofotopaare und Luftmeßfotos vor. MEISSL, 1985, hat aus den terrestrischen Stereofotos Karten des Meßgebietes im Herbst 1983 angefertigt, die auch die Schneelinien zeigen, ebenso wurden Luftbilder zu Karten verarbeitet, die die Schneesituation im September 1979 und im August 1982 beinhalten. Abbildung 3.4.1.2 zeigt eine Zusammenschau aller drei Schneekartierungen. Diese Karte bildet die Grundlage für Interpolationen der Verteilung der spezifischen Massenbilanz.

Die beiden Karten der Abbildungen 3.4.1.3 und 3.4.1.4 zeigen am Beispiel des Bilanzjahres 1992/93 die für die Analyse zur Verfügung stehenden Meßpunkte auf dem Gletscher. Das beschriebene Verfahren zur Kartenanalyse wurde in analoger Form seit dem Bilanzjahr 1981/82 angewendet. Das erste Bilanzjahr wurde allerdings nachträglich als „Probabilanz“ aus der Datenreihe ausgeschieden. Die Winterfeldmessungen wurden mit zu wenig Personal und bei sehr widrigen äußeren Bedingungen durchgeführt und erbrachten eine zu geringe Meßnetzdicke. Die Ablationspegel wiederum wurden nur auf die Gletscherzungen verteilt. Zu diesem Zeitpunkt wurde das starke Ausapern bis in die Gipfelregion dieses Gletschers, das auch im Sommer 1982 stattfand, unterschätzt, wodurch im Herbst für den gesamten oberen Gletscherteil keine Meßdaten der Ablation vorhanden waren.

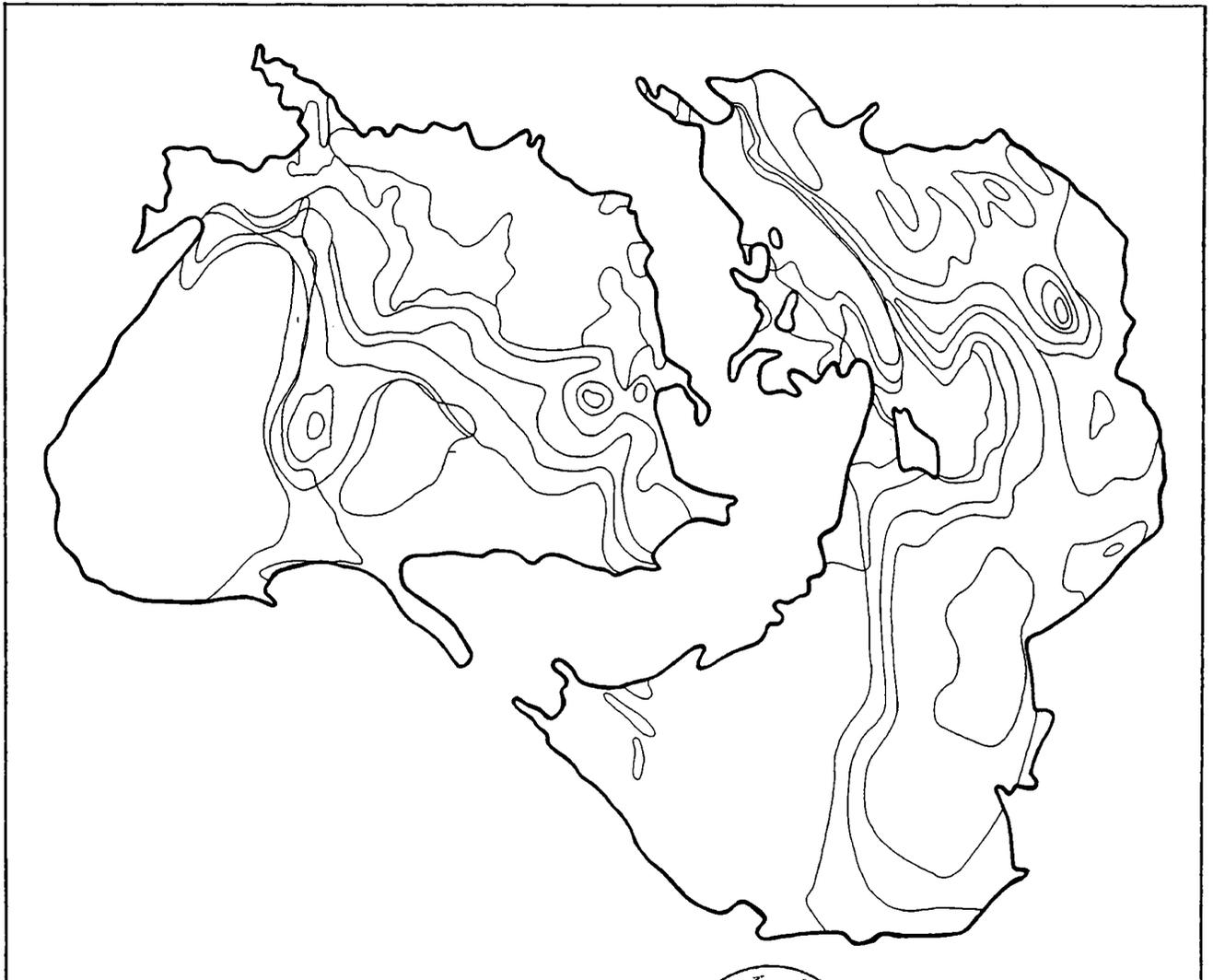
Seit dem Bilanzjahr 1982/83 ist ein funktionierendes System der Massenbilanzierung vorhanden. Es wurden 22 Karten der Winter- und der Jahresbilanzen im Maßstab 1:5000 wie die in Abbildung 3.4.1.3 und 3.4.1.4 gezeigten analysiert und kartometrisch ausgewertet. Abbildung 3.4.1.5 zeigt alle Massenbilanzkarten 1982/83 bis 1992/93 verkleinert und mit vereinheitlichter Isoliniendistanz von  $50 \text{ g/cm}^2$ . (Die Originalkarten wurden für die Winterbilanz von 20 zu  $20 \text{ g/cm}^2$  analysiert. In der Folge werden Massenbilanzdaten für Winter, Sommer und das Jahr gezeigt. Die Sommerdaten ergeben sich aus der Differenz (in Seehöhenstufen von 50 m) der Jahres- und der Winterwerte.

Für die Jahresbilanzkarten gibt es in Österreich einige nach derselben Methode bearbeitete Gletscher im Ötztal, Stubaital und in der Silvretta, die Winterbilanzkarten des Wurtenkeeses stellen eine Novität dar.



**Abb. 3.4.1.1: Schichtogiven, Altschnee- und Firnlinien im Mittelteil des östlichen Wurtenkees  
(Foto: R. Böhm, Sept. 1989)**

**Fig. 3.4.1.1: Ogives, snow and firnlines in the central part of Eastern Wurtenkees  
(Photo: R. Böhm, Sept. 1989)**



**Abb. 3.4.1.2:** Karte der Muster der Schichtogiven, Firn- und Altschneelinien auf dem östlichen Wurtenkees (zusammengesetzt aus Schneekartierungen aus den Jahren 1979, 1982 und 1983)

**Fig. 3.4.1.2:** Map of the patterns of ogives and snow lines on Eastern Wurtenkees (combined of snow maps of 1979, 1982 and 1983)



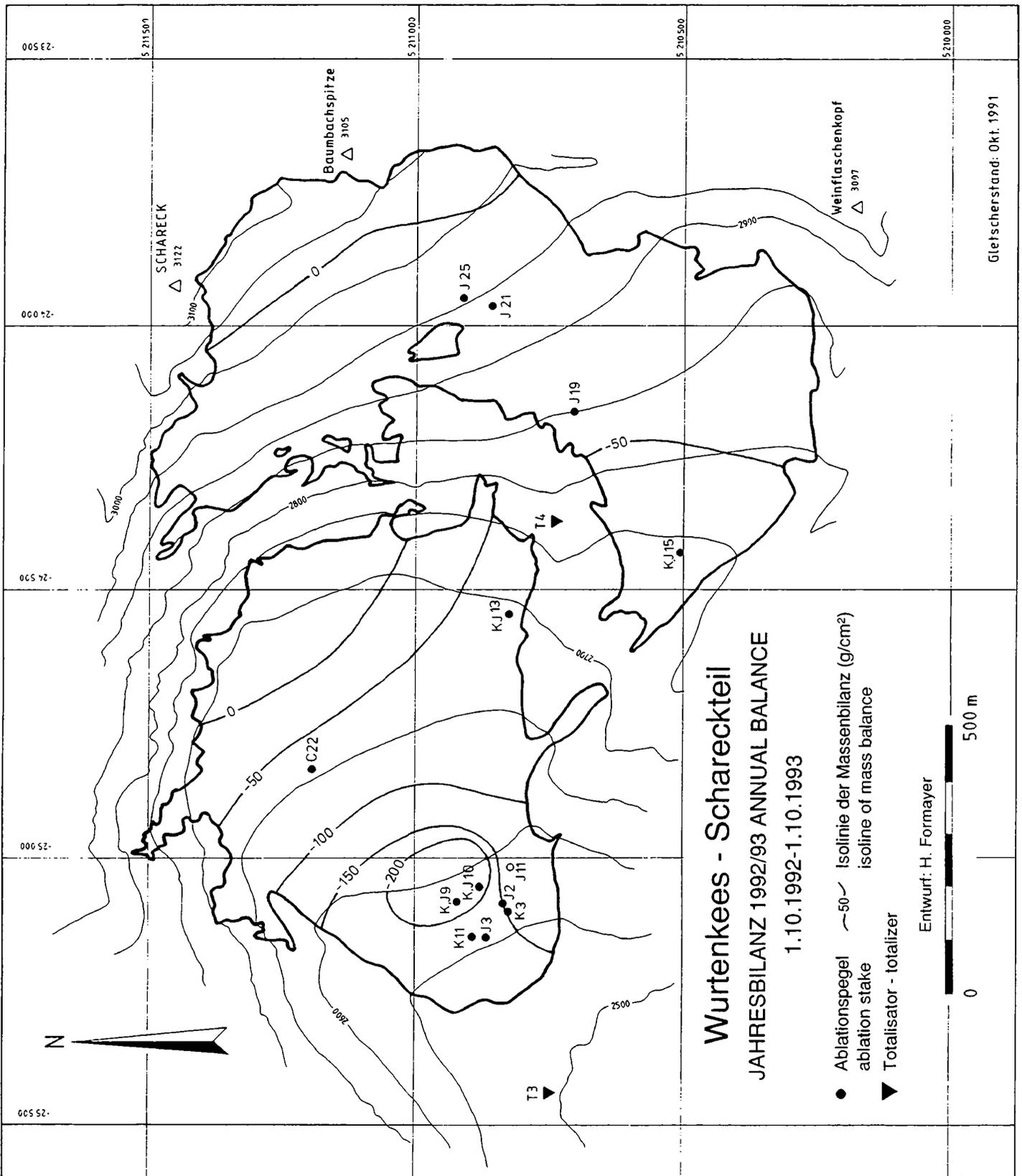


Abb. 3.4.1.4: Nettojahresbilanzanalyse 1992/93 mit Isolinien der spezifischen Nettojahresbilanz und Meßpunkten (verkleinert aus der Originalkarte im Maßstab 1:5000)

Fig. 3.4.1.4: Analysis of annual net balance 1992/93 with isolines of specific annual net balance and the points of the measuring network (scaled down from the original in 1:5000)

Die Karten der spezifischen Jahresbilanz bestätigen zunächst die von den anderen erwähnten Gletschern her bekannte Tatsache, daß zwar die Absolutwerte der Bilanzen von Jahr zu Jahr deutlich variieren, daß die Muster der Verteilung der spezifischen Bilanz auf der Gletscherfläche hingegen von Jahr zu Jahr sehr ähnlich ist. Daraus leiten sich die bekannten Möglichkeiten ab, die Massenbilanz eines Gletschers regressiv aus räumlichen Kenngrößen wie dem Flächenverhältnis der Akkumulations- zur Gesamtfläche oder der Höhe der Gleichgewichtslinie zu bestimmen. Als neue Information zeigen die Wurtenkees-Winterbilanzkarten, daß auch bei diesen die räumlichen Muster zeitlich weitgehend konstant sind. Dieses Ergebnis war a priori nicht selbstverständlich, wenn man etwa die Wichtigkeit der zeitlich stark variablen Schneeverfrachtung durch Wind und Lawinen bedenkt. Offensichtlich sind auch sie so stark von der Topographie geprägt, daß diese auch im Winter für Konstanz der Verteilungsmuster sorgen kann.

Wie bereits bei den Schneehöhenkarten fällt auch bei denen der spezifischen Winterbilanz eine starke Abweichung von der großräumig vorhandenen Niederschlagszunahme mit der Höhe auf (vergl. Abschnitt 3.1.1 bzw. AUER, 1995). Nicht die höchstgelegenen Gletscherteile besitzen die höchste Winterbilanz, sondern das relativ tiefgelegene Gebiet im „Lawinenkessel“ unterhalb des großen Steilhangs. Dort werden infolge der Windgeschützttheit größere Mengen Trieb Schnee abgelagert und auch durch Lawinen wird Masse vom oberen Gletscherteil über den Steilhang auf den unteren verlagert. Im Winter 1986/87 wurde in dieser Maximalzone bis zu 3500 bis 4000 kg/m<sup>2</sup> Masse akkumuliert. Die beiden Transportmechanismen durch Lawinen und Wind verbinden nach wie vor die seit 1990 vollkommen voneinander getrennten Gletscherteile des östlichen Wurtenkeeses, sodaß von der Ernährungssituation her der untersuchte Gletscher nach wie vor als Einheit gesehen werden kann.

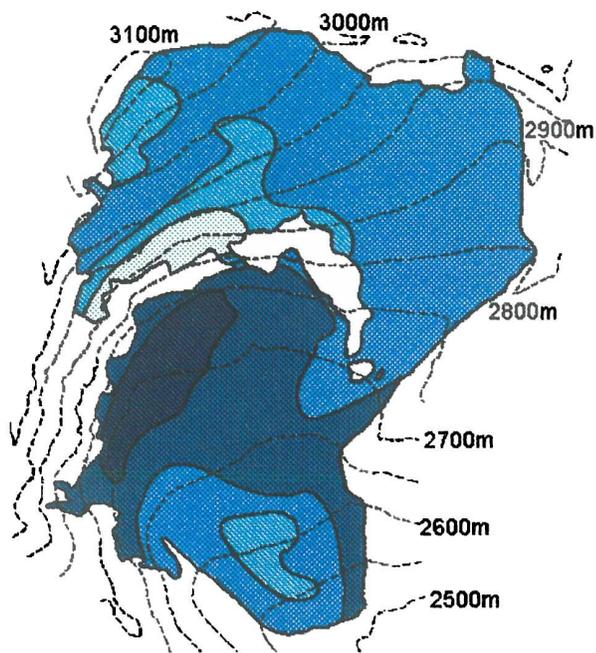
Der obere Gletscherteil hat eine für einen alpinen Kargletscher untypische Topographie. Im Normalfall ist das Nährgebiet eher in einer von Graten gesäumten konkaven Lage situiert. Diese Geländeform trägt stark zur Existenz und Ernährung alpiner Gletscher bei, da sie den Niederschlagseintrag erhöht und die Einstrahlung vermindert. Beim Wurtenkees hingegen sind die oberen Gletscherteile eher konvex geformt und nur sehr schwach von Graten und Kämmen geschützt. Das „Nährgebiet“ ist dadurch beim Wurtenkees nicht die Zone maximaler Akkumulation. Insgesamt wird auf der Gletscherzunge in Seehöhen unter 2800 m in der Akkumulationsperiode mehr Schnee abgelagert als in den höheren Gletscherteilen.

Im Lauf der Ablationsperiode wirkt sich dieser winterliche Massentransport in tiefere Lagen negativ für die Massenbilanz aus. Die relativ hohen spezifischen Winterbilanzwerte auf der Zunge gehen im Sommer für die Jahresbilanz zu einem Großteil verloren, während die Gebiete geringerer Ablation im oberen Gletscherteil bereits im Winter weniger Schnee empfangen.

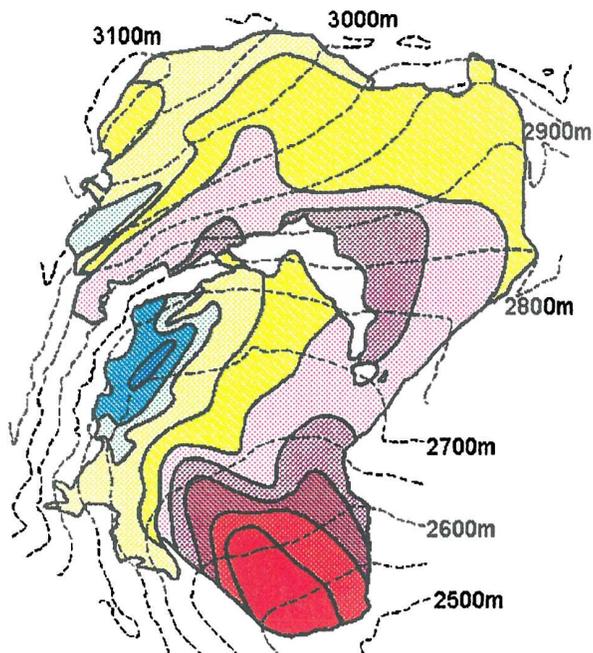
Die beschriebenen Prozesse bewirken beim Wurtenkees auch atypische Verteilungsmuster der spezifischen Nettojahresbilanz mit der positivsten Zone auf der Gletscherzunge im Lawinenkessel und erst einem geringeren sekundären Maximum im orographisch rechten oberen Gletscherteil. Insgesamt waren in 10 von 11 der untersuchten Haushaltsjahre die Gebiete mit positiver spezifischer Jahresbilanz auf sehr geringe Flächenanteile in den erwähnten beiden Gletscherarealen beschränkt. Der größte Teil der Gletscherfläche bilanzierte negativ. Das Hauptminimum befindet sich im orographisch rechten unteren Zungenteil und in manchen Jahren bildet sich auch in der Mitte des oberen Gletscherteils ein starkes sekundäres Minimum aus, das auch hier zu bedeutenden Masseverlusten von mehr als 2000 mm Wasseräquivalent führen kann. In den Zonen des Hauptminimums wurden in den negativsten Bilanzjahren (1985/86 und 1991/92) spezifische Jahresbilanzen bis zu -3500 bis -4000 mm analysiert.

**Abb. 3.4.1.5:** 22 Karten der spezifischen Winter- und Nettojahresbilanz auf dem östlichen Wurtenkees von 1982/83 bis 1992/93 (verkleinert und vereinheitlichtes Layout)

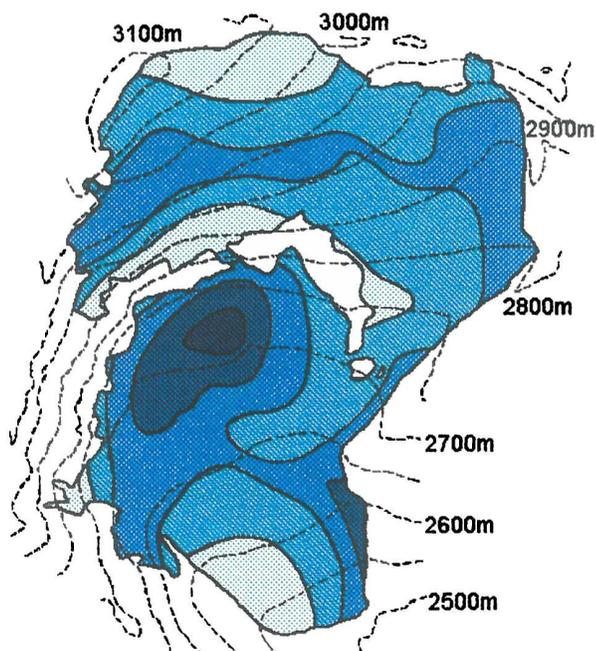
**Fig. 3.4.1.5:** 22 maps of specific winter and annual net balance of Eastern Wurtenkees 1982/83 to 1992/93 (scaled down and in uniform layout)



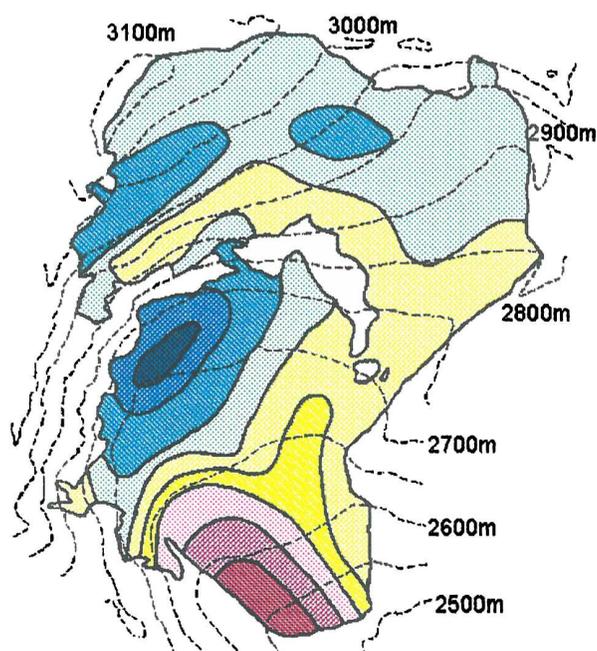
Winterbilanz 1982/83  
winter balance



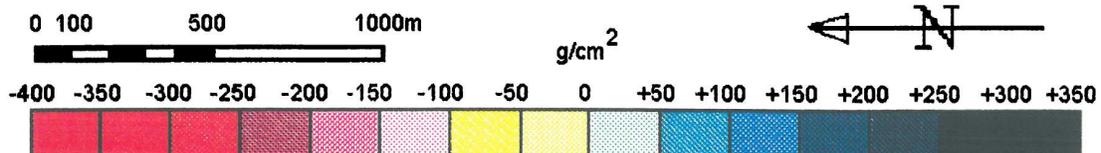
Jahresbilanz 1982/83  
annual balance

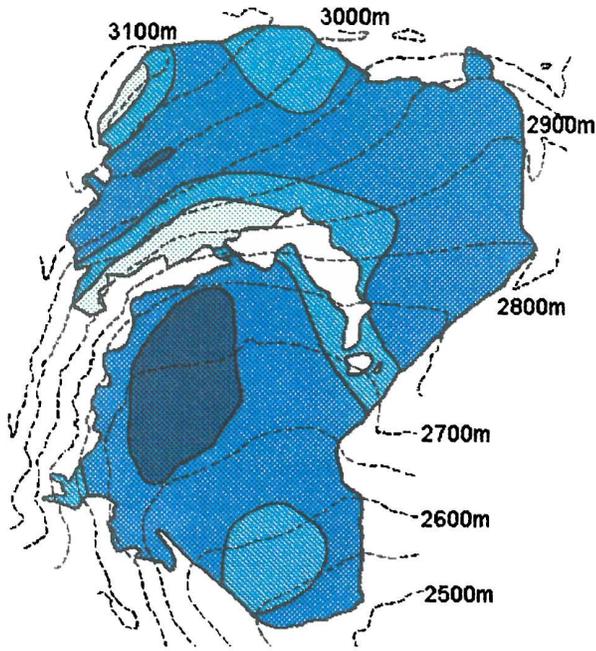


Winterbilanz 1983/84  
winter balance

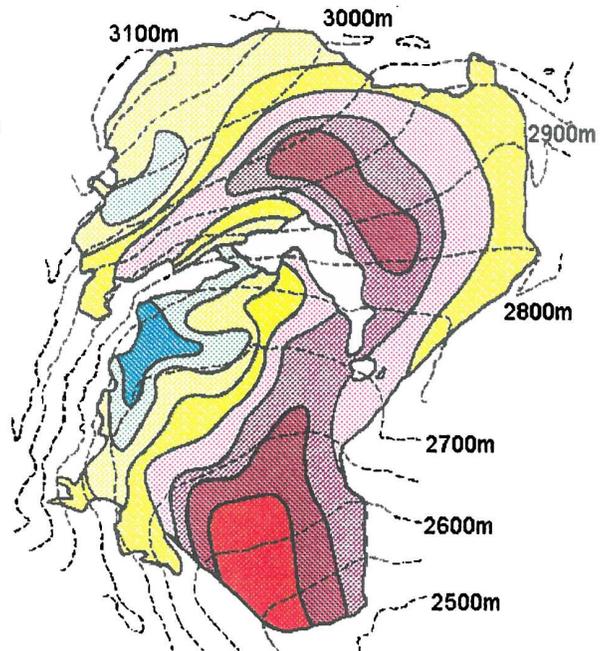


Jahresbilanz 1983/84  
annual balance

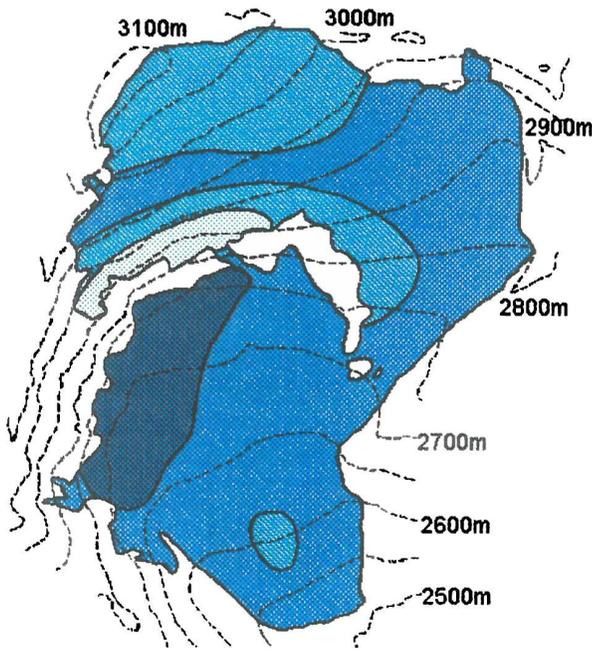




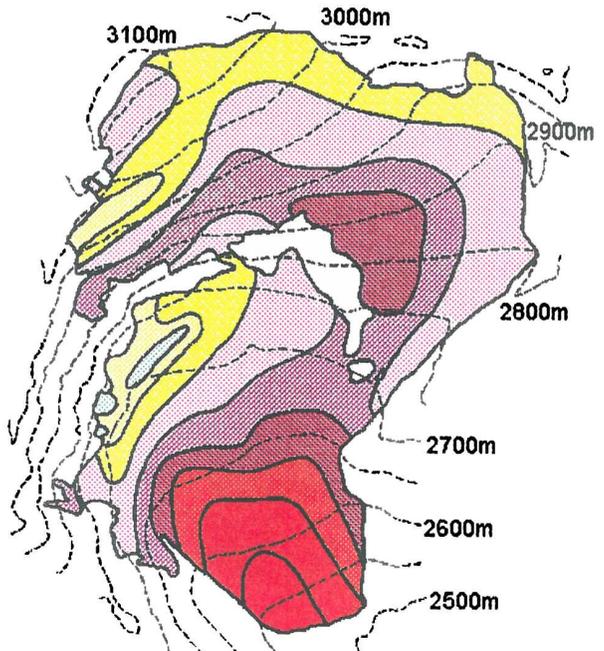
Winterbilanz 1984/85  
winter balance



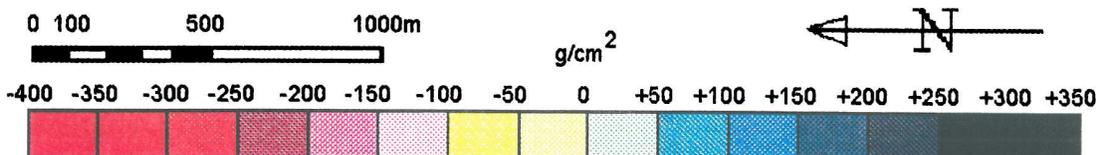
Jahresbilanz 1984/85  
annual balance

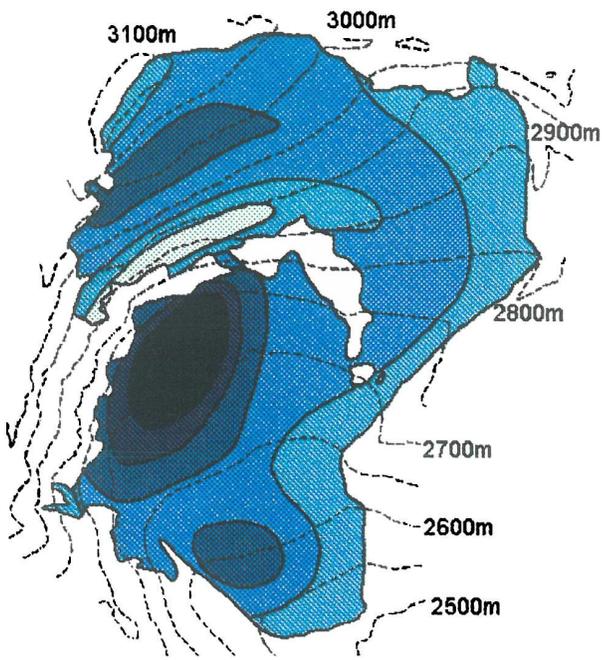


Winterbilanz 1985/86  
winter balance

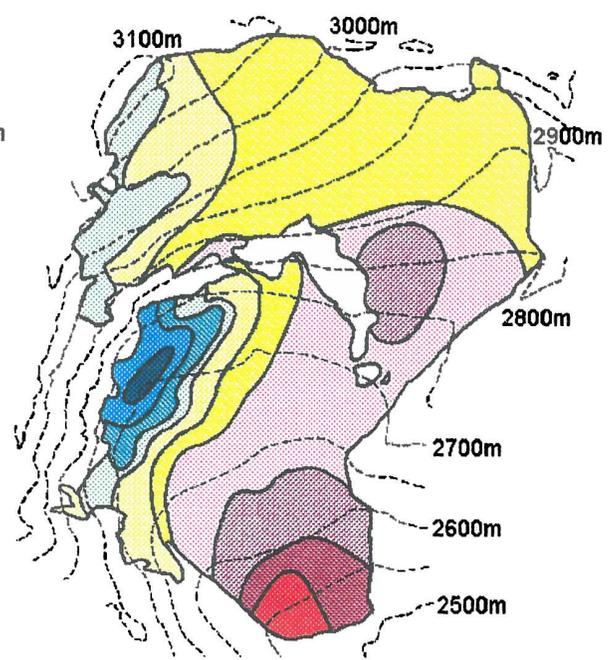


Jahresbilanz 1985/86  
annual balance

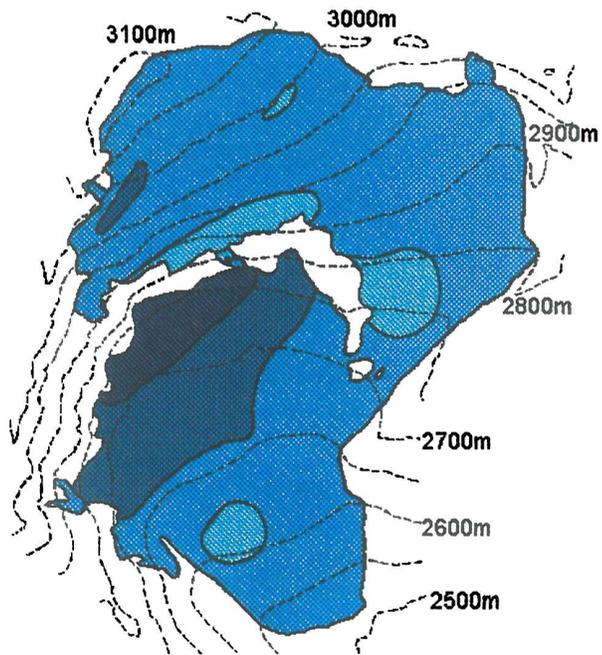




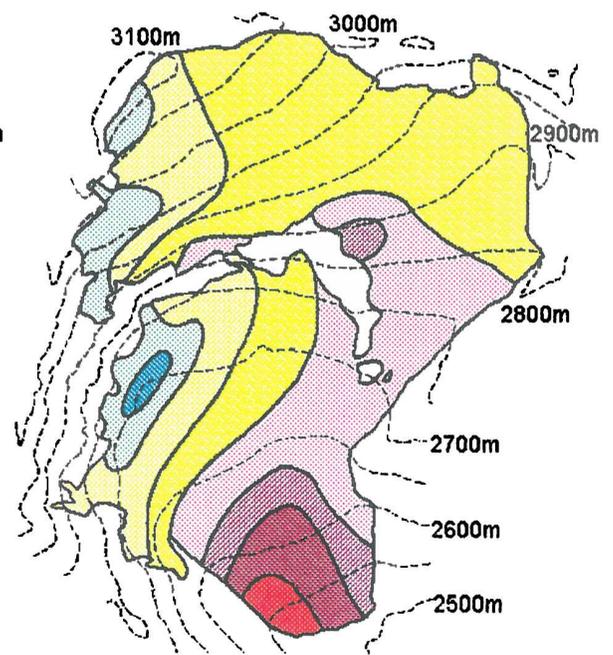
Winterbilanz 1986/87  
winter balance



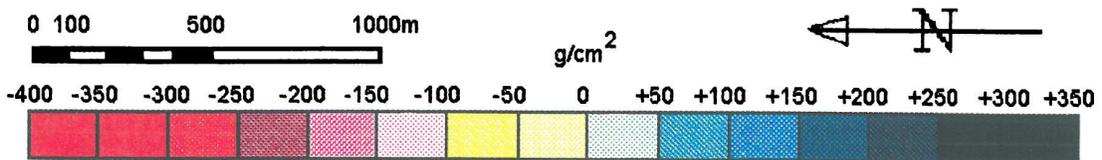
Jahresbilanz 1986/87  
annual balance

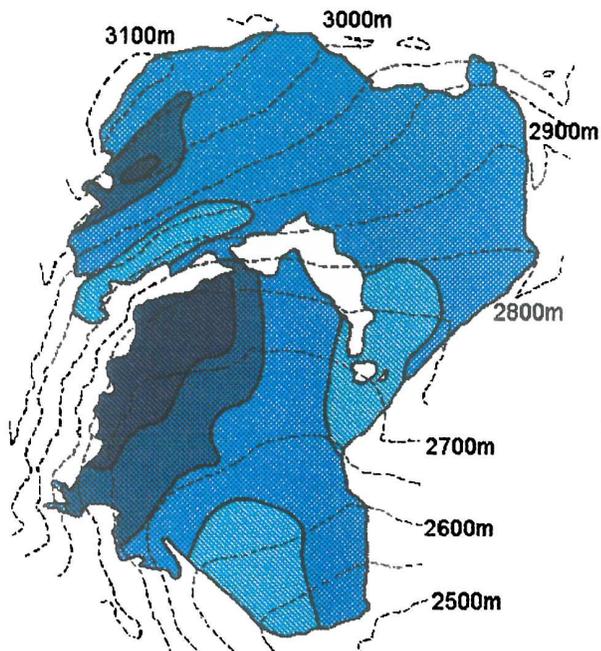


Winterbilanz 1987/88  
winter balance

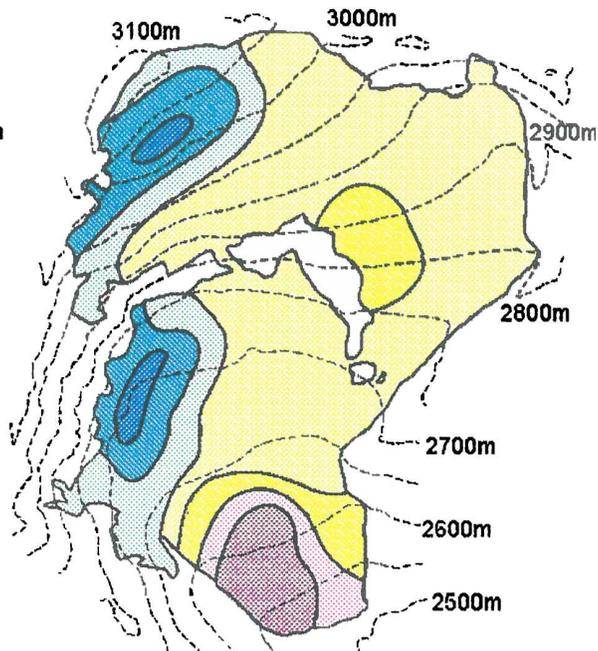


Jahresbilanz 1987/88  
annual balance

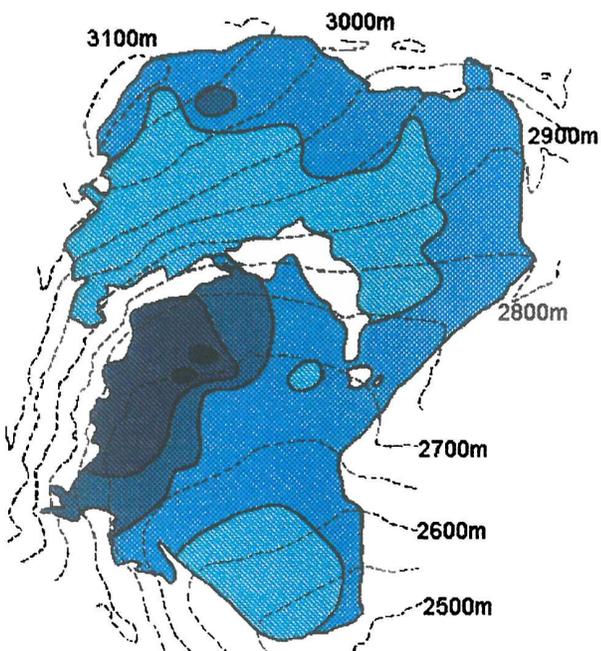




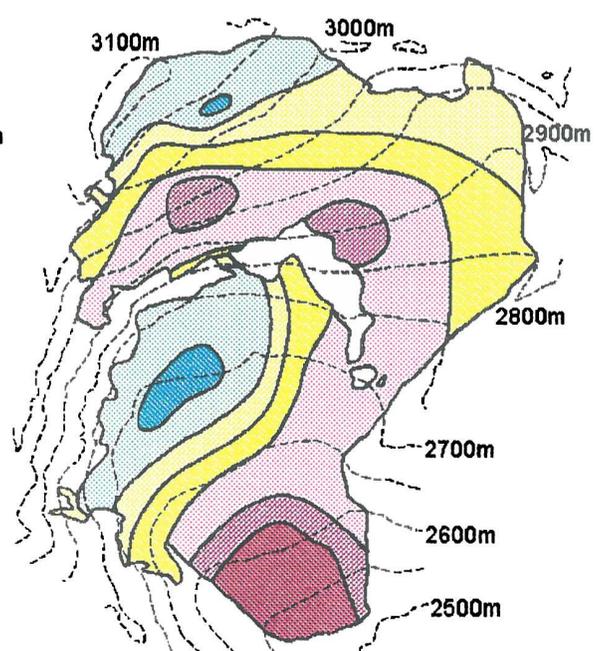
Winterbilanz 1988/89  
winter balance



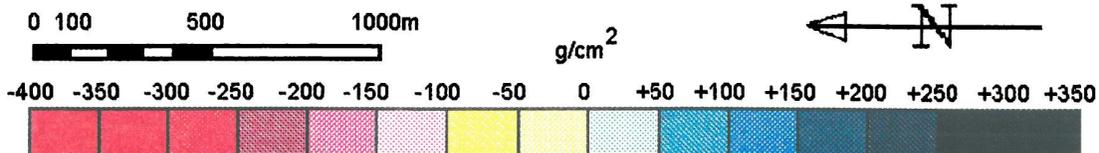
Jahresbilanz 1988/89  
annual balance

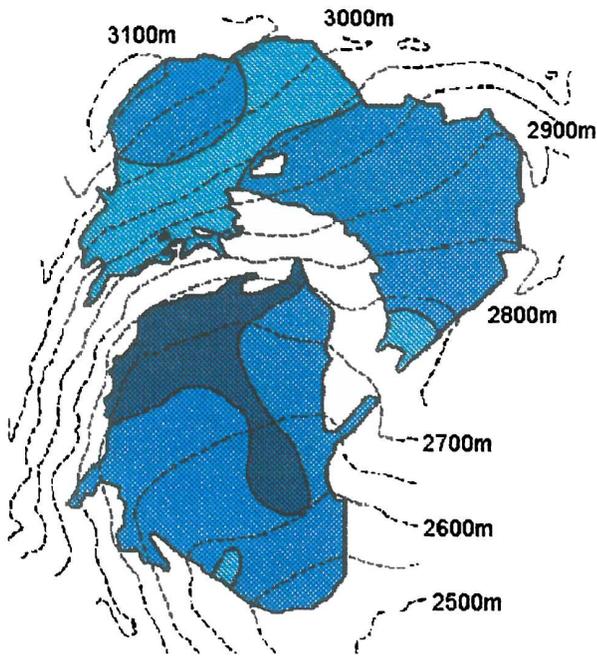


Winterbilanz 1989/90  
winter balance

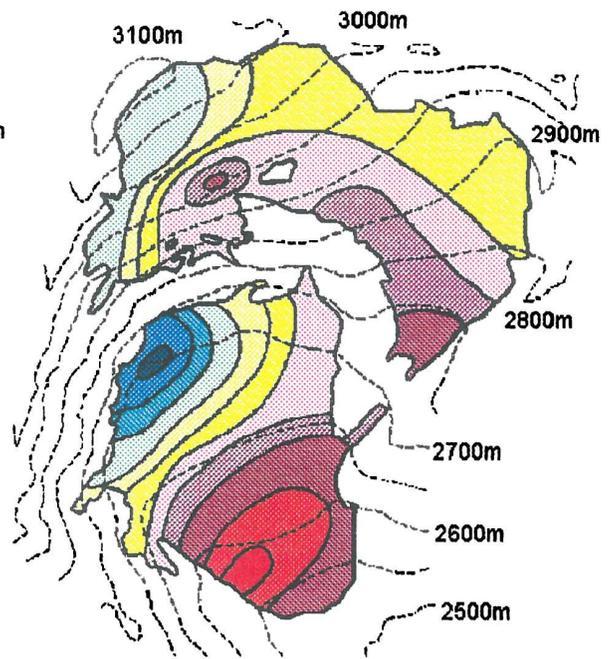


Jahresbilanz 1989/90  
annual balance

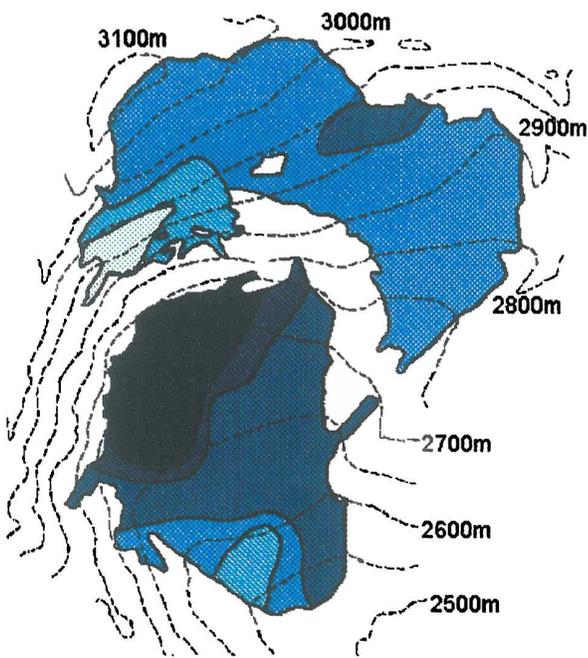




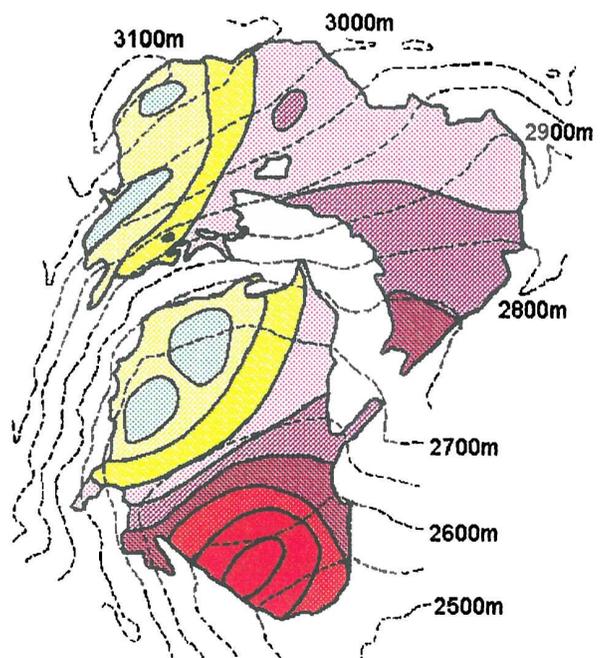
Winterbilanz 1990/91  
winter balance



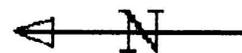
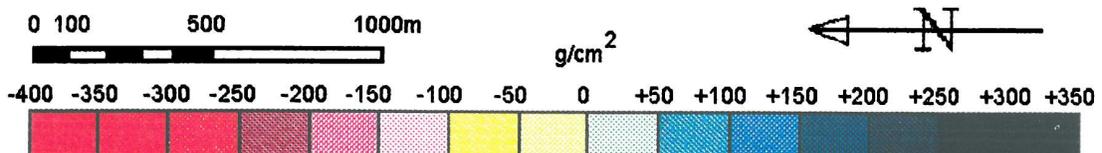
Jahresbilanz 1990/91  
annual balance

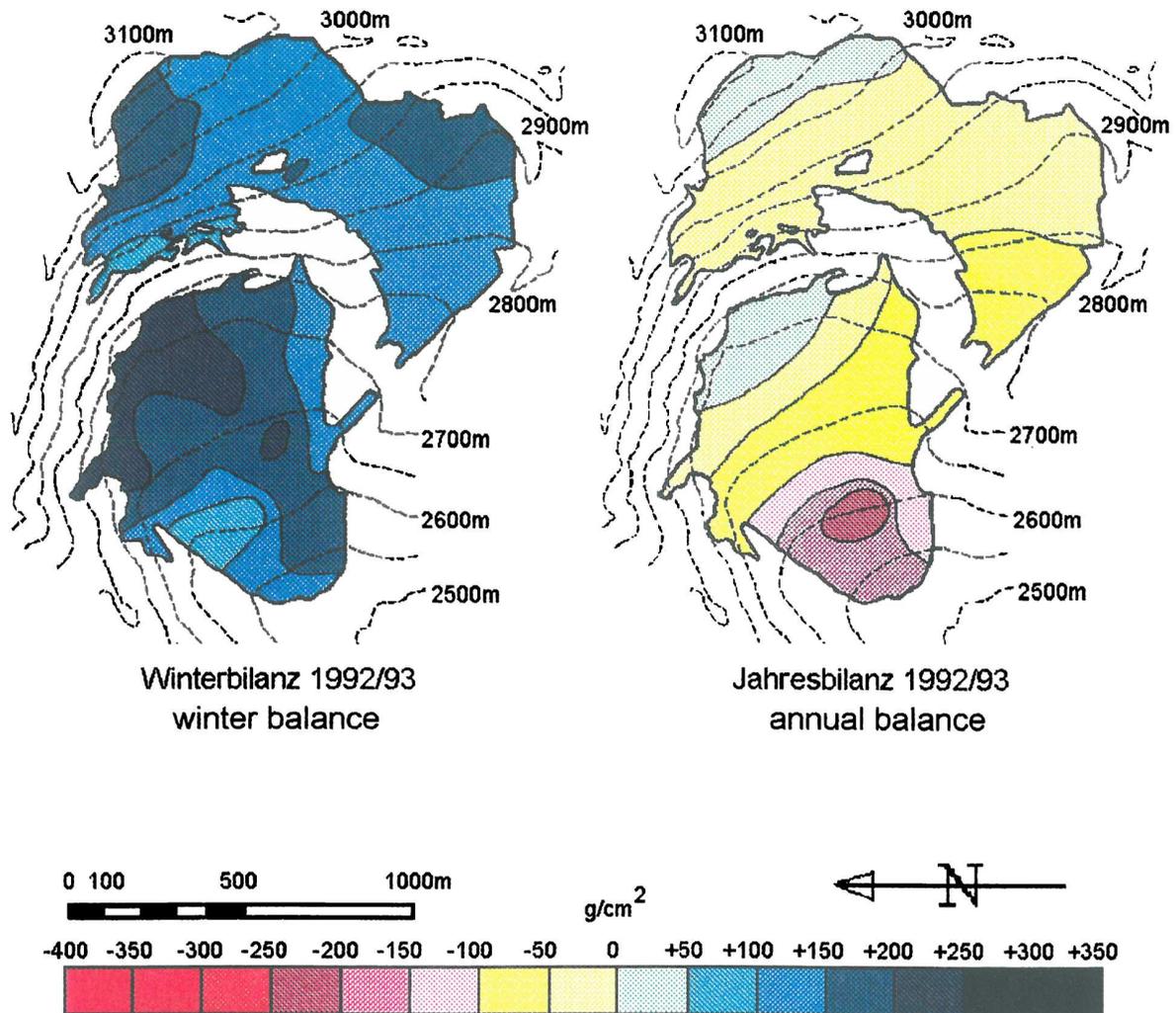


Winterbilanz 1991/92  
winter balance



Jahresbilanz 1991/92  
annual balance





### 3.4.2 Resultate der Auswertung der Massenbilanzkarten 3.4.2 Results of mass balance map analysis

Die Auswertung der Karten der spezifischen Bilanzen erfolgte analog zu denen in den Abschnitten 2.3.1.2 und 2.3.3. Ausgewertet wurde in einheitlichen Höhenstufen von 50 m. Tabelle 3.4.2.1 enthält die Höhenstufenmittel der spezifischen Bilanz ( $\text{kg/m}^2 = \text{mm Wasseräquivalent}$ ) für Winter und Sommer (bw und bs), Tabelle 3.4.2.2 die analogen Nettowerte für das gesamte Haushaltsjahr (b). Unter Verwendung der Höhenstufen-Flächenwerte der Tabelle 3.4.2.3, die für die Einzeljahre mit einem gewichteten Interpolationsverfahren aus den Kartenterminen 1979, 1983 und 1991 berechnet worden sind, wurden aus den spezifischen Massenbilanzen b die Bilanzvolumswerte B (in 1000 t) der Tabelle 3.4.2.4 (Bw, Winter und Bs, Sommer) und 3.4.2.5 (B, Gesamtjahr) berechnet. Bis zum Vorliegen einer neuen Gletscherkarte müssen die Bilanzvolumswerte ab der Saison 1991/92 als vorläufig bezeichnet werden, die erst an die tatsächlichen Flächen einer Neuaufnahme angepaßt werden müssen.

**Tab. 3.4.2.1: Spezifische Winter- und Sommerbilanz (in kg/m<sup>2</sup>) bw und bs (Oktober bis April bzw. Mai bis September) für Höhenstufen von 50 m auf dem östlichen Wurtenkees 1982/83 bis 1992/93**

**Tab. 3.4.2.1: Specific winter and summer balance (kg/m<sup>2</sup>) bw and bs (October to April, May to September) for altitude steps of 50 m on Eastern Wurtenkees 1982/83 to 1992/93**

## bw

Seehöhe(m) altitude(m)												Mittel Mean
	1982/83	1983/84	1984/85	1985/86	1986/87	1987/88	1988/89	1989/90	1990/91	1991/92	1992/93	1982-93
3100-3150	937	476	748	946	920	1300	1200	1110	1300	1200	1534	1061
3050-3100	1077	439	887	944	1220	1332	1322	1109	1294	1327	1521	1134
3000-3050	1231	675	1182	941	1467	1295	1388	1108	1072	1244	1439	1186
2950-3000	1247	861	1121	926	1480	1292	1304	929	917	1060	1404	1140
2900-2950	1105	801	1025	987	1192	1308	1112	884	1062	1085	1314	1080
2850-2900	1104	828	970	993	1121	1226	1048	897	1220	1274	1330	1092
2800-2850	1169	930	999	1028	1350	1182	1004	959	1299	1272	1363	1141
2750-2800	1442	823	910	1175	1455	1346	1193	1177	1169	1218	1304	1201
2700-2750	1790	1271	1262	1395	1939	1674	1604	1714	1379	2034	1683	1613
2650-2700	1674	1185	1420	1449	1803	1522	1501	1550	1446	2318	1917	1617
2600-2650	1330	829	1183	1294	1381	1205	1147	1104	1382	1751	1507	1283
2550-2600	1207	640	968	1193	1321	1208	920	787	1260	1233	1341	1098
2500-2550	1281	774	1216	1274	1797	1351	1017	906	1396	1407	1440	1260
Mittel* Mean*	1363	913	1123	1167	1482	1259	1255	1168	1258	1550	1513	1277

## bs

Seehöhe(m) altitude(m)												Mittel Mean
	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1982-93
3100-3150	-1458	-177	-888	-2050	-806	-1350	-921	-910	-1050	-1250	-1384	-1113
3050-3100	-1484	-89	-1033	-1922	-1489	-1661	-853	-936	-1243	-1589	-1371	-1243
3000-3050	-1714	-188	-1415	-1825	-1952	-1734	-899	-1217	-1360	-1907	-1401	-1419
2950-3000	-1855	-326	-1841	-1909	-1863	-1653	-1137	-1630	-1781	-1915	-1503	-1583
2900-2950	-2012	-590	-2510	-2271	-1805	-1780	-1205	-1814	-2058	-2117	-1514	-1789
2850-2900	-2090	-646	-2251	-2484	-1836	-1930	-1322	-1844	-2305	-2639	-1580	-1902
2800-2850	-2354	-878	-2277	-2651	-2503	-2236	-1330	-1935	-2744	-2803	-1766	-2134
2750-2800	-2296	-699	-1667	-2633	-2516	-2106	-1406	-1940	-2614	-2932	-1916	-2066
2700-2750	-2194	-728	-1730	-2344	-2160	-1985	-1422	-1952	-1939	-2917	-1980	-1941
2650-2700	-2442	-1062	-2338	-2991	-2497	-2139	-1338	-1922	-1845	-2952	-2264	-2163
2600-2650	-3348	-1818	-3323	-4017	-2811	-2702	-1854	-2502	-3475	-3930	-2650	-2948
2550-2600	-4049	-2009	-3341	-4416	-3469	-3280	-2262	-2835	-3971	-4416	-3042	-3372
2500-2550	-4260	-2247	-3544	-4700	-4251	-3515	-2287	-2908	-3857	-4332	-3093	-3545
Mittel* Mean*	-2392	-883	-2218	-2739	-2307	-2037	-1398	-1928	-2152	-2798	-1997	-2077

\* aus kartometrischer Auswertung

\* analysis from maps

**Tab. 3.4.2.2: Spezifische Nettojahresbilanz b (in kg/m<sup>2</sup>) (Oktober bis September) für Höhenstufen von 50 m auf dem östlichen Wurtenkees 1982/83 bis 1992/93**

**Tab. 3.4.2.2: Specific annual balance b (kg/m<sup>2</sup>) (October to September) for altitude steps of 50 m on Eastern Wurtenkees 1982/83 to 1992/93**

b

Seehöhe(m) altitude(m)	1982/83	1983/84	1984/85	1985/86	1986/87	1987/88	1988/89	1989/90	1990/91	1991/92	1992/93	Mittel Mean 1982-93
3100-3150	-523	299	-140	-1104	114	-69	281	200	250	-50	150	-54
3050-3100	-407	350	-146	-978	-269	-314	469	173	49	-262	150	-108
3000-3050	-490	491	-233	-884	-485	-433	489	-109	-288	-663	38	-233
2950-3000	-608	535	-721	-983	-383	-357	167	-701	-864	-855	-99	-443
2900-2950	-907	211	-1485	-1284	-613	-487	-93	-930	-996	-1032	-200	-711
2850-2900	-986	182	-1281	-1491	-715	-698	-274	-947	-1085	-1365	-250	-810
2800-2850	-1185	-51	-1238	-1623	-1153	-1075	-326	-976	-1145	-1531	-403	-973
2750-2800	-855	124	-752	-1458	-1061	-837	-213	-763	-1445	-1714	-612	-871
2700-2750	-404	543	-468	-949	-221	-304	182	-238	-560	-883	-297	-327
2650-2700	-766	122	-918	-1542	-694	-617	163	-372	-399	-634	-347	-546
2600-2650	-2016	-988	-2140	-2723	-1490	-1496	-707	-1398	-2093	-2179	-1143	-1670
2550-2600	-2843	-1368	-2373	-3223	-2148	-2105	-1342	-2048	-2711	-3183	-1701	-2277
2500-2550	-2973	-1473	-2328	-3426	-2454	-2241	-1270	-2002	-2461	-2925	-1653	-2291
Mittel* Mean*	-1029	30	-1095	-1572	-825	-785	-143	-760	-894	-1248	-484	-800

\* aus kartometrischer Auswertung

\* analysis from maps

**Tab. 3.4.2.3: Gletscherflächen des östlichen Wurtenkeeses der Höhenstufen von 50 m für die einzelnen Bilanzjahre 1982/83 bis 1992/93**

**Tab. 3.4.2.3: Glaciated areas of Eastern Wurtenkees of altitude steps of 50 m for the single budget years 1982/83 to 1992/93**

Seehöhe(m) altitude(m)	1982/83	1983/84	1984/85	1985/86	1986/87	1987/88	1988/89	1989/90	1990/91	1991/92	1992/93	
3100-3150	10,0	9,4	9,2	7,7	6,3	6,2	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	1000 m <sup>2</sup>
3050-3100	45,0	43,9	43,5	40,6	37,4	35,9	25,1	35,1	35,1	35,1	35,1	1000 m <sup>2</sup>
3000-3050	81,1	80,5	80,2	78,9	77,2	76,1	75,6	75,4	75,0	74,6	74,6	1000 m <sup>2</sup>
2950-3000	109,3	108,4	107,3	104,5	102,4	101,3	100,7	99,6	97,2	95,8	95,8	1000 m <sup>2</sup>
2900-2950	108,7	105,6	103,8	100,5	98,2	96,9	96,2	95,0	92,7	91,5	91,5	1000 m <sup>2</sup>
2850-2900	158,9	155,8	151,7	143,0	136,0	131,6	128,5	124,6	118,2	114,8	114,8	1000 m <sup>2</sup>
2800-2850	110,0	108,9	107,7	105,1	102,6	100,5	99,3	98,1	96,1	95,1	95,1	1000 m <sup>2</sup>
2750-2800	120,7	116,9	113,6	103,8	92,6	84,2	79,5	75,2	65,4	59,0	59,0	1000 m <sup>2</sup>
2700-2750	169,6	157,2	143,9	125,3	109,9	103,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	1000 m <sup>2</sup>
2650-2700	206,5	205,6	204,5	201,4	198,6	196,9	196,2	195,8	194,8	194,3	194,3	1000 m <sup>2</sup>
2600-2650	132,7	133,3	133,8	134,6	135,4	135,9	136,3	136,6	137,2	137,6	137,6	1000 m <sup>2</sup>
2550-2600	68,6	68,3	68,1	67,8	67,6	67,3	67,2	67,0	66,7	66,6	66,6	1000 m <sup>2</sup>
2500-2550	29,2	28,6	28,1	27,4	26,6	26,0	25,5	25,1	24,5	24,2	24,2	1000 m <sup>2</sup>
Gesamt Total	1350,3	1322,4	1295,4	1240,6	1190,8	1161,8	1135,2	1132,6	1108,0	1093,7	1093,7	1000 m <sup>2</sup>

**Tab. 3.4.2.4: Winter- und Sommerbilanzvolumen (in 1000 t) (Bw, Bs) für Höhenstufen von 50 m auf dem östlichen Wurtenkees 1982/83 bis 1992/93**

**Tab. 3.4.2.4: Winter and summer balance volumes (1000 t) (Bw and Bs) for altitude steps of 50 m on Eastern Wurtenkees 1982/83 to 1992/93**

**Bw (1000 t), flächenkorrigiert**

**Bw (1000 t), area corrected**

Seehöhe(m) altitude(m)	1982/83	1983/84	1984/85	1985/86	1986/87	1987/88	1988/89	1989/90	1990/91	1991/92	1992/93	Mittel Mean 1982-93
3100-3150	9,37	4,47	6,88	7,28	5,80	8,06	7,32	6,77	7,93	7,32	9,36	7,32
3050-3100	48,47	19,27	38,58	38,33	45,63	47,82	33,18	38,93	45,42	46,58	53,39	41,42
3000-3050	99,83	54,34	94,80	74,24	113,25	98,55	104,93	83,54	80,40	92,80	107,35	91,28
2950-3000	136,30	93,33	120,28	96,77	151,55	130,88	131,31	92,53	89,13	101,55	134,50	116,19
2900-2950	120,11	84,59	106,40	99,19	117,05	126,75	106,97	83,98	98,45	99,28	120,23	105,73
2850-2900	175,43	129,00	147,15	142,00	152,46	161,34	134,67	111,77	144,20	146,26	152,68	145,18
2800-2850	128,59	101,28	107,59	108,04	138,51	118,79	99,70	94,08	124,83	120,97	129,62	115,64
2750-2800	174,05	96,21	103,38	121,97	134,73	113,33	94,84	88,51	76,45	71,86	76,94	104,75
2700-2750	303,58	199,80	181,60	174,79	213,10	172,42	158,80	169,69	136,52	201,37	166,62	188,93
2650-2700	345,68	243,64	290,39	291,83	358,08	299,68	294,50	303,49	281,68	450,39	372,47	321,07
2600-2650	176,49	110,51	158,29	174,17	186,99	163,76	156,34	150,81	189,61	240,94	207,36	174,11
2550-2600	82,80	43,71	65,92	80,89	89,30	81,30	61,82	52,73	84,04	82,12	89,31	73,99
2500-2550	37,41	22,14	34,17	34,91	47,80	35,13	25,93	22,74	34,20	34,05	34,85	33,03
Gesamt Total	1838,1	1202,3	1455,4	1444,4	1754,2	1557,8	1410,3	1299,6	1392,9	1695,5	1654,7	1518,7

**Bs (1000 t), flächenkorrigiert**

**Bs (1000 t), area corrected**

Seehöhe(m) altitude(m)	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1980	1991	1992	1993	Mittel Mean 1982-93
3100-3150	-14,6	-1,7	-8,2	-15,8	-5,1	-8,4	-5,6	-5,6	-6,4	-7,6	-8,4	-7,9
3050-3100	-66,8	-3,9	-44,9	-78,0	-55,7	-59,6	-21,4	-32,9	-43,6	-55,8	-48,1	-46,4
3000-3050	-139,0	-15,1	-113,5	-144,0	-150,7	-132,0	-68,0	-91,8	-102,0	-142,3	-104,5	-109,3
2950-3000	-202,8	-35,3	-197,5	-199,5	-190,8	-167,4	-114,5	-162,3	-173,1	-183,5	-144,0	-161,0
2900-2950	-218,7	-62,3	-260,5	-228,2	-177,3	-172,5	-115,9	-172,3	-190,8	-193,7	-138,5	-175,5
2850-2900	-332,1	-100,6	-341,5	-355,2	-249,7	-254,0	-169,9	-229,8	-272,5	-303,0	-181,4	-253,6
2800-2850	-258,9	-95,6	-245,2	-278,6	-256,8	-224,7	-132,1	-189,8	-263,7	-266,6	-167,9	-216,4
2750-2800	-277,1	-81,7	-189,4	-273,3	-233,0	-177,3	-111,8	-145,9	-171,0	-173,0	-113,0	-177,0
2700-2750	-372,1	-114,4	-248,9	-293,7	-237,4	-204,5	-140,8	-193,2	-192,0	-288,8	-196,0	-225,6
2650-2700	-504,3	-218,3	-478,1	-602,4	-495,9	-421,2	-262,5	-376,3	-359,4	-573,6	-439,9	-430,2
2600-2650	-444,3	-242,3	-444,6	-540,7	-380,6	-367,2	-252,7	-341,8	-476,8	-540,8	-364,6	-399,7
2550-2600	-277,8	-137,2	-227,5	-299,4	-234,5	-220,7	-152,0	-189,9	-264,9	-294,1	-202,6	-227,3
2500-2550	-124,4	-64,3	-99,6	-128,8	-113,1	-91,4	-58,3	-73,0	-94,5	-104,8	-74,9	-93,4
Gesamt Total	-3233	-1173	-2900	-3438	-2780	-2501	-1605	-2205	-2611	-3127	-2184	-2523

**Tab. 3.4.2.5: Jahresbilanzvolumen (B) für Höhenstufen von 50 m auf dem östlichen Wurtenkees 1982/83 bis 1992/93**

**Tab. 3.4.2.5: Annual balance volumes (B) for altitude steps of 50 m on Eastern Wurtenkees 1982/83 to 1992/93**

**Jahresbilanzvolumen (1000 t), flächenkorrigiert  
annual balance volume (1000 t), area corrected**

Seehöhe(m) altitude(m)	1982/83	1983/84	1984/85	1985/86	1986/87	1987/88	1988/89	1989/90	1990/91	1991/92	1992/93	Mittel Mean 1982-93
3100-3150	-5,2	2,8	-1,3	-8,5	0,7	-0,4	1,7	1,2	1,5	-0,3	0,9	-0,6
3050-3100	-18,3	15,4	-6,4	-39,7	-10,1	-11,3	11,8	6,1	1,7	-9,2	5,3	-5,0
3000-3050	-39,7	39,5	-18,7	-69,7	-37,4	-33,0	37,0	-8,2	-21,6	-49,5	2,8	-18,0
2950-3000	-66,5	58,0	-77,4	-102,7	-39,2	-36,2	16,8	-69,8	-84,0	-81,9	-9,5	-44,8
2900-2950	-98,6	22,3	-154,1	-129,0	-60,2	-47,2	-8,9	-88,4	-92,3	-94,4	-18,3	-69,9
2850-2900	-156,7	28,4	-194,3	-213,2	-97,2	-91,9	-35,2	-118,0	-128,2	-156,7	-28,7	-108,3
2800-2850	-130,4	-5,6	-133,3	-170,6	-118,3	-108,0	-32,4	-95,7	-110,0	-145,6	-38,3	-98,9
2750-2800	-103,2	14,5	-85,4	-151,3	-98,2	-70,5	-16,9	-57,4	-94,5	-101,1	-36,1	-72,7
2700-2750	-68,5	85,4	-67,3	-118,9	-24,3	-31,3	18,0	-23,6	-55,4	-87,4	-29,4	-36,6
2650-2700	-158,2	25,1	-187,7	-310,6	-137,8	-121,5	32,0	-72,8	-77,7	-123,2	-67,4	-109,1
2600-2650	-267,5	-131,7	-286,3	-366,5	-201,7	-203,3	-96,4	-191,0	-287,2	-299,8	-157,3	-226,2
2550-2600	-195,0	-93,4	-161,6	-218,5	-145,2	-141,7	-90,2	-137,2	-180,8	-212,0	-113,3	-153,5
2500-2550	-86,8	-42,1	-65,4	-93,9	-65,3	-58,3	-32,4	-50,3	-60,3	-70,8	-40,0	-60,5
Gesamt Total	-1395	18	-1439	-1993	-1034	-954	-195	-905	-1078	-1432	-529	-1004
kumulativ cumulativ	-1395	-1376	-2816	-4809	-5843	-6797	-6993	-7898	-9087	-10518	-11048	

Die klimatologisch interessantere Größe ist die spezifische Massenbilanz, die für die Massenänderung pro Flächeneinheit steht. Sie kann unmittelbar als differentielle oder über Höhenstufen oder den Gesamtgletscher gemittelte Maßzahl verwendet werden, die sich mit meteorologisch-klimatologischen Größen wie Niederschlag, Temperatur, Strahlungsbilanz, Wärmehaushalt der Gletscheroberfläche, etc. verbinden läßt.

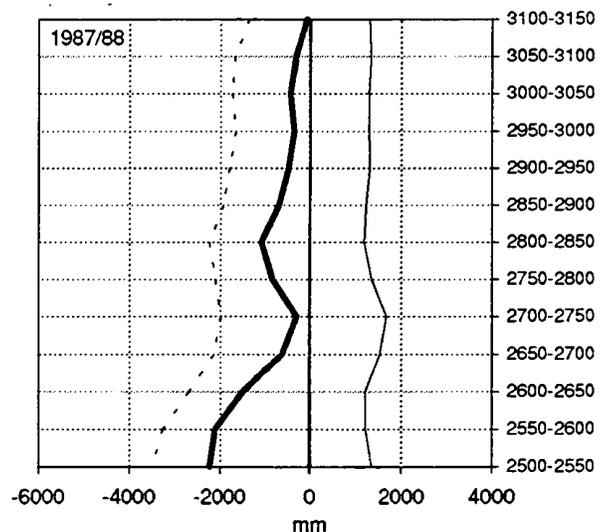
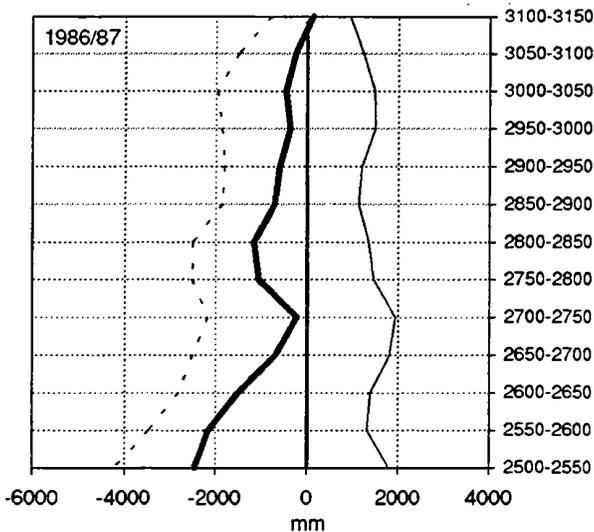
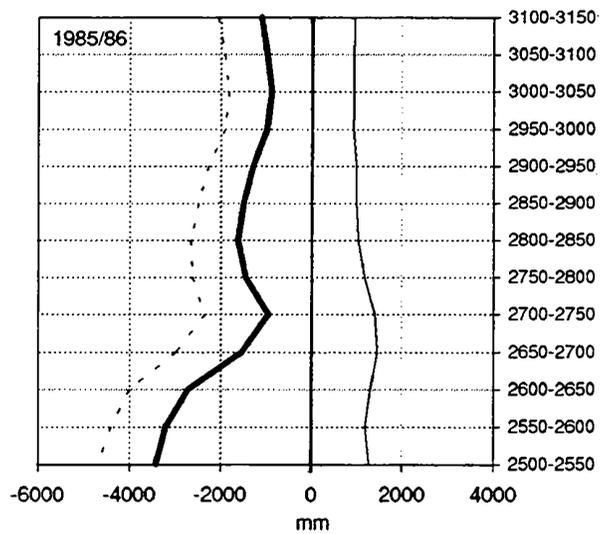
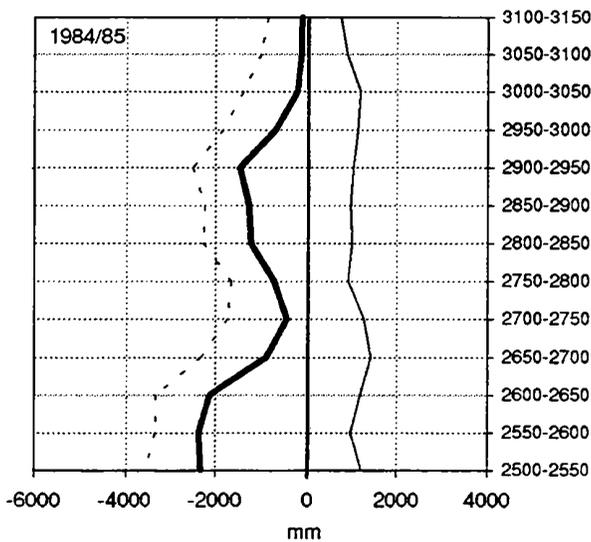
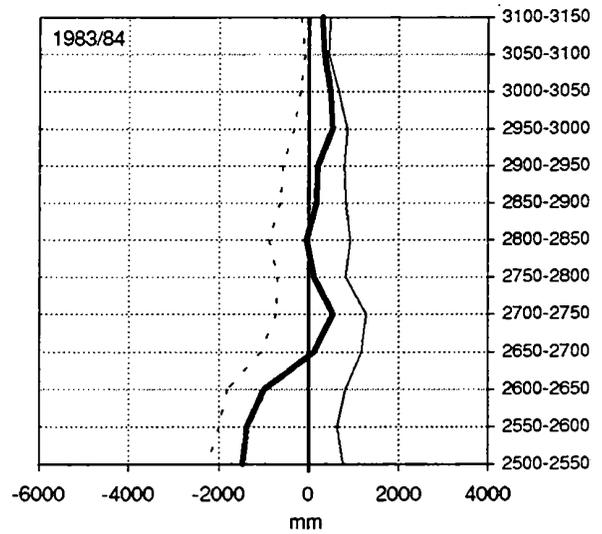
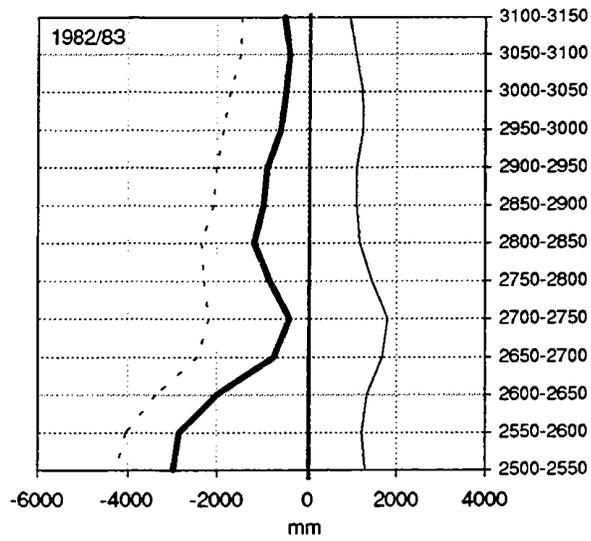
Das Bilanzvolumen B eines Gletschers ist das Produkt aus der Fläche (oder dem differentiellen Flächenelement) mit der spezifischen Massenbilanz (gemittelt über die Gesamtfläche oder das Flächenelement). Sie ist von der Form des Gletschers im Gelände abhängig und liefert vor allem für den Wasserhaushalt hochalpiner Lagen wichtige Daten.

Manche Fragestellungen benötigen beide Haushaltsgrößen. So wirkt sich z.B. eine lange anhaltende Rückzugsperiode zunächst günstig auf die sommerliche Wasserführung von Gebirgsflüssen aus ("Gletscherspende" durch Ablation). Bei anhaltend negativen spezifischen Netto-Bilanzen nehmen aber im Lauf der Jahre die Gletscherfläche und damit auch der Volumsverlust des Gletschers ab, was auch bei konstanter spezifischer Nettobilanz die Abflüsse langfristig reduziert.

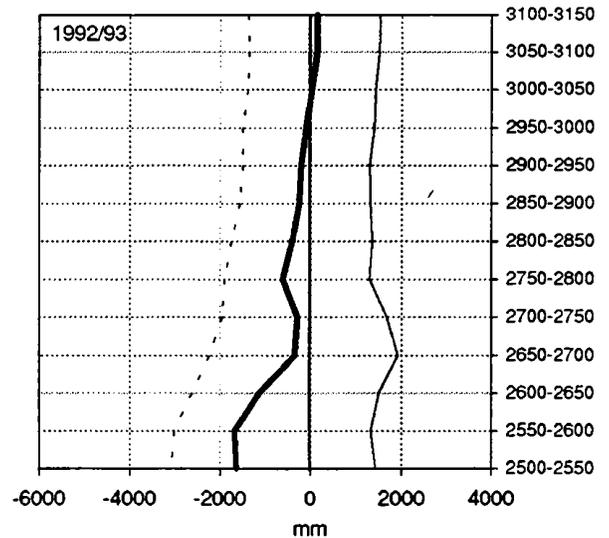
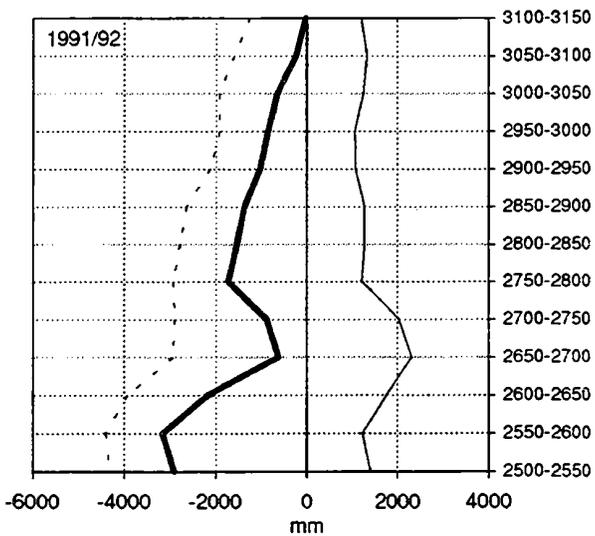
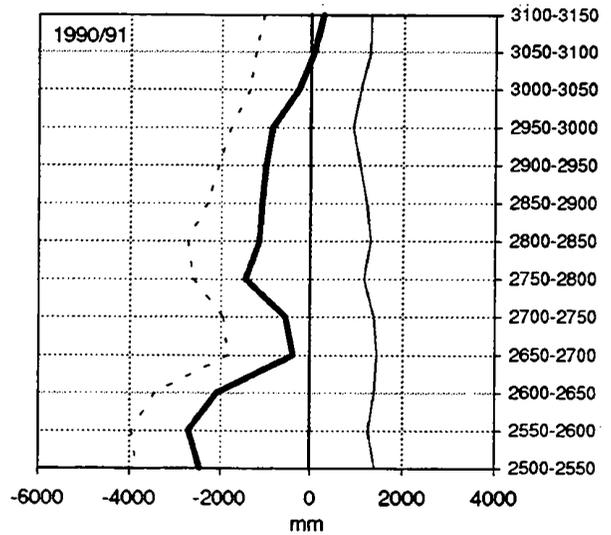
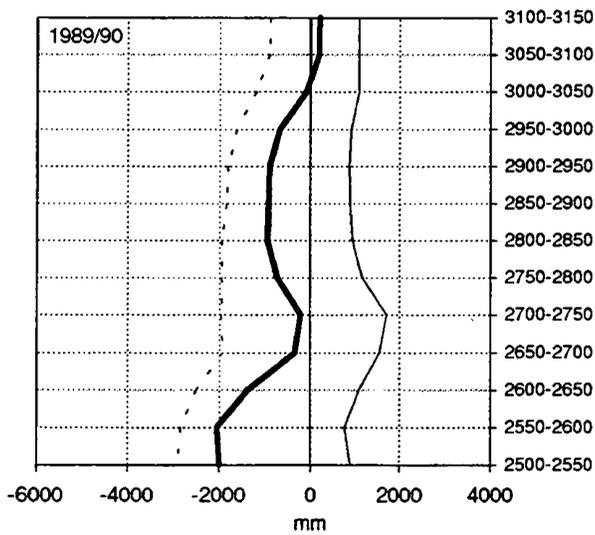
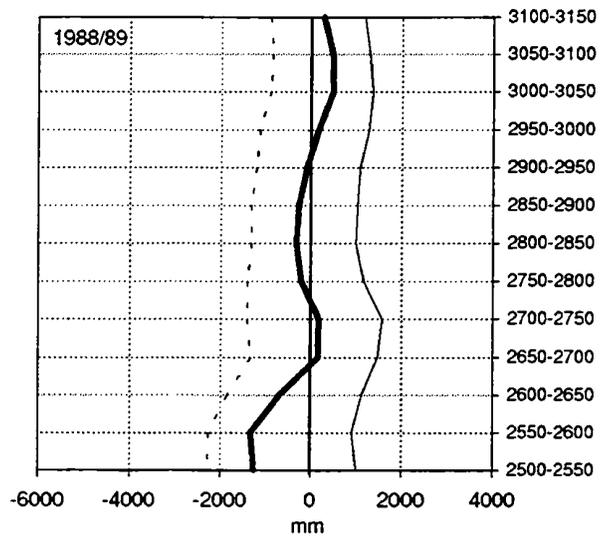
Die in Abbildung 3.4.2.1 für die einzelnen Bilanzjahre dargestellte Höhenabhängigkeit der spezifischen Winter-, Sommer- und Nettojahresbilanz (in Abbildung 3.4.2.2 die 11jährigen Mittel) zeigt die zu erwartenden Charakteristika.

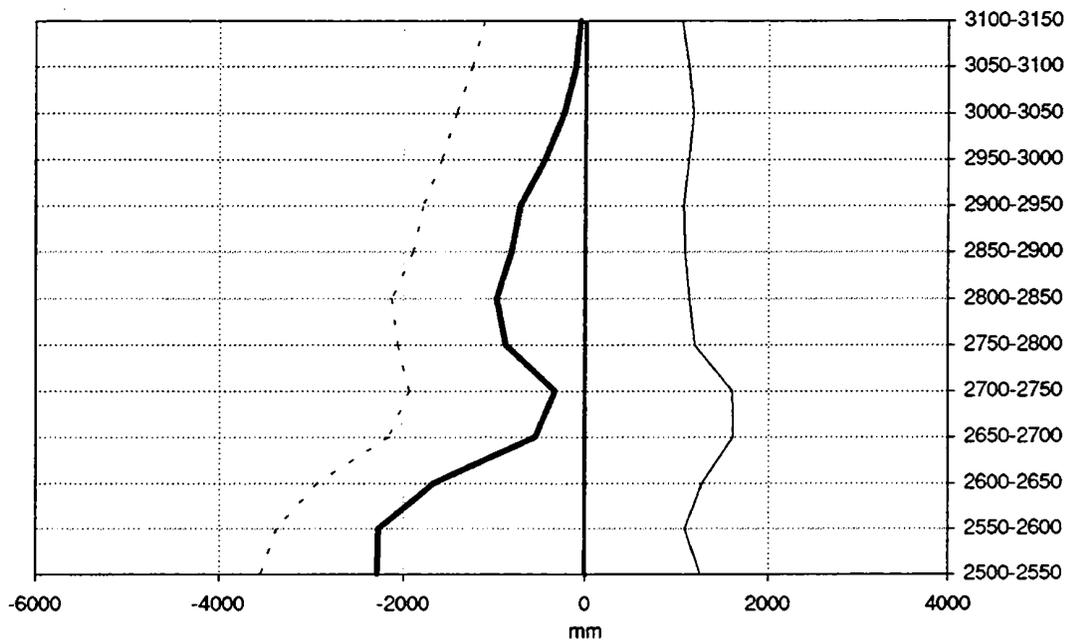
**Abb. 3.4.2.1: Höhenabhängigkeit der spezifischen Winter-, Sommer- und Nettojahresbilanz für die einzelnen Bilanzjahre 1982/83 bis 1992/93 auf dem östlichen Wurtenkees**  
 — Winter - - - Sommer — Jahr

**Fig. 3.4.2.1: Specific winter, summer and annual net balance versus altitude for the single balance years 1982/83 to 1992/93 on Eastern Wurtenkees**  
 — Winter - - - Summer — Year



Fortsetzung Abb. 3.4.2.1





**Abb. 3.4.2.2:** Mittlere Höhenabhängigkeit der spezifischen Winter-, Sommer- und Nettojahresbilanz auf dem östlichen Wurtenkees, — Winter - - - Sommer — Jahr

**Fig. 3.4.2.2:** Mean specific winter, summer and annual net balance versus altitude on Eastern Wurtenkees, — Winter - - - Summer — Year

In allen Einzeljahren ist die Form der Kurven sehr ähnlich. Die Werte der spezifischen Winterbilanz sind auf dem unteren Teil der Gletscherzunge etwa gleich hoch wie in den hochgelegenen Zonen, die höchsten Winterbilanzwerte (etwa 20 bis 30% höher) findet man im oberen Zungenbereich zwischen 2650 und 2750 m Seehöhe. Noch verstärkt durch den albedobedingten Strahlungsschutz der dort länger andauernden Schneedecke bewirkt diese Anomalie der Höhenverteilung im Winter auch eine solche der spezifischen Sommerverluste. Diese nehmen vom Gipfel her zunächst mit einem Gradienten von 300 mm pro 100 m Seehöhe zu. Dann erfolgt zwischen 2850 und 2750 m die beschriebene albedobedingte "Inversion" des Sommerbilanz-Gradienten. Erst unterhalb 2700 m ist wieder eine verstärkte Zunahme des Gradienten der sommerlichen Eisverluste gegeben und zwar um durchschnittlich 800 mm pro 100 m.

Die Summe der Winter- und Sommerbilanz, die spezifische Nettojahresbilanz, war auf dem östlichen Wurtenkees im Mittel der 11 Beobachtungsjahre in allen Höhenstufen negativ. Von im Mittel -54 mm im Gipfelniveau nimmt der spezifische Nettomassenverlust bis zur Seehöhe 2800 m um 300 mm pro 100 Höhenmeter zu, in den nächsten 100 Metern kehrt sich der Gradient um. Der Massenverlust wird hier um 350 mm/100 m geringer. Es werden aber auch hier, in der Maximalzone der Winterbilanz, im Mittel keine positiven Höhenstufenmittel der mittleren spezifischen Nettobilanz erreicht. Auf der Gletscherzunge unterhalb 2700 m steigt der mittlere Verlust des Gletschers wieder stark an und zwar (im Mittel der Höhenzone 2500 bis 2700 m) um 1000 mm pro 100 Höhenmeter auf maximale mittlere spezifische Verluste von 2200 bis 2300 mm/Jahr.

Das auffälligste Merkmal der 11 untersuchten Bilanzjahre auf dem östlichen Wurtenkees ist die Tatsache, daß 10 von den 11 mittleren spezifischen Nettojahresbilanzen negativ waren und nur eine (1983/84) ausgeglichen. Abbildung 3.4.2.3 zeigt die Zeitreihen der mittleren spezifischen Winter-, Sommer- und Nettojahresbilanzen im Untersuchungszeitraum. In dieser Periode fand ein scheinbar periodischer Verlauf der Sommer- und der Nettojahresbilanzen statt, mit zwei relativ gletschergünstigen Maxima 1983/84 und 1989/90 und dazwischen den beiden Minima der sehr gletscherungünstigen Bilanzjahre 1985/86 und 1991/92. Die anscheinend vorhandene Periodizität von sechs Jahren kann aufgrund der Kürze der Stichprobe nicht auf Signifikanz getestet werden. Sie findet sich auch nicht in anderen, längeren Massenbilanzreihen der Alpen. Es handelt sich dabei mit größter Wahrscheinlichkeit um einen Zufall.

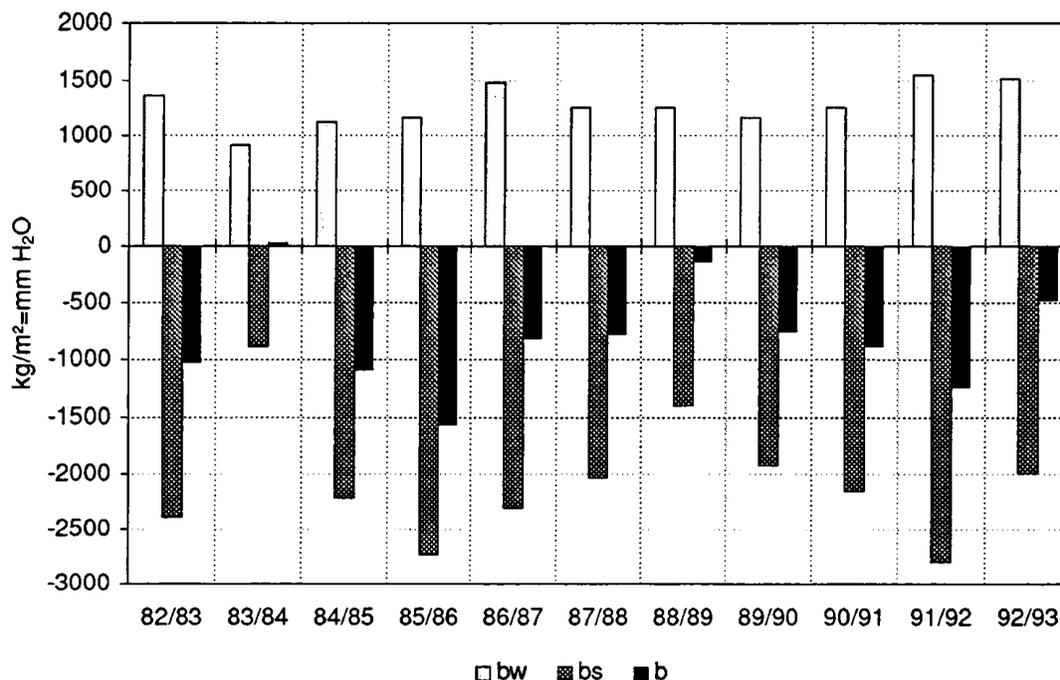


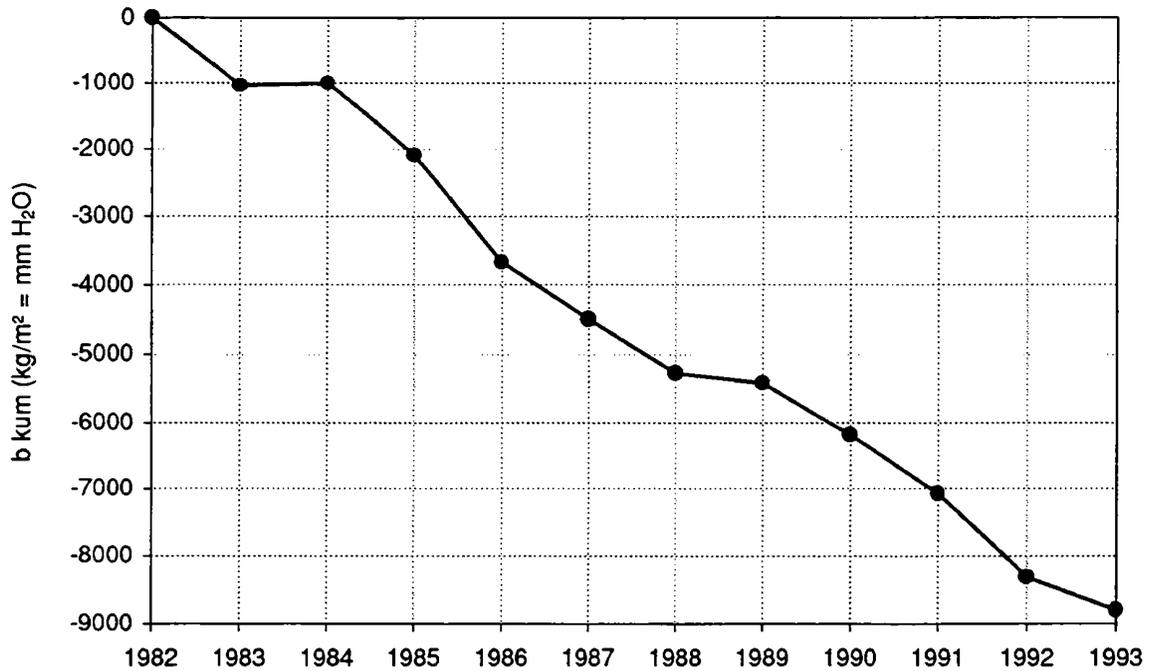
Abb. 3.4.2.3: Zeitreihe der mittleren spezifischen Winter-, Sommer- und Nettojahresbilanzen des östlichen Wurtenkeeses 1982 bis 1993

Fig. 3.4.2.3: Time series of the mean specific winter, summer and annual net balances of Eastern Wurtenkees 1982 to 1993

Die zeitliche Variabilität der spezifischen Winterbilanz ist geringer als die der Sommer- und Jahresbilanz, und sie zeigt auch keine Ähnlichkeit im zeitlichen Verlauf. Bemerkenswert ist, daß die einzige ausgeglichene Nettojahresbilanz 1983/84 auf die insgesamt geringste Winterbilanz folgte, und daß die größte Winterbilanz 1991/92 von der negativsten Sommerbilanz und der zweitnegativsten Nettojahresbilanz gefolgt wurde. Es besteht aber auch keine strenge Gegenläufigkeit der Winter- und Sommerkurven, wie später statistisch gezeigt wird.

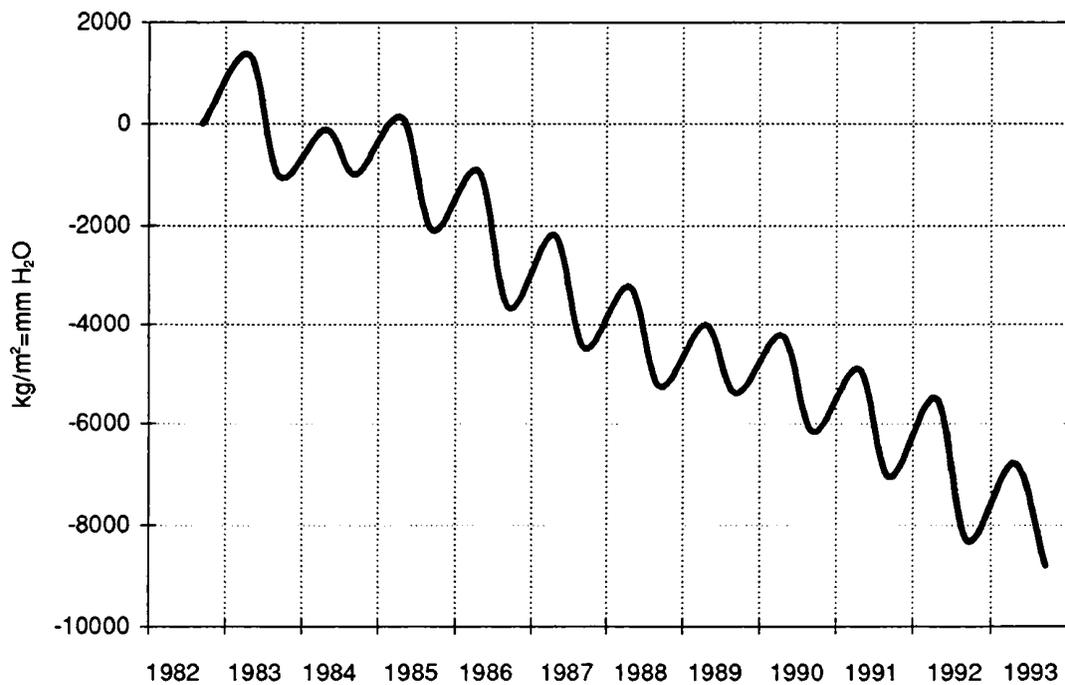
Werden die mittleren spezifischen Nettobilanzen von Jahr zu Jahr aufsummiert, entsteht die kumulative Kurve der Abbildung 3.4.2.4. Sie ist beinahe monoton fallend und hat 1993 ein Niveau erreicht, das annähernd 9 Meter (Wasseräquivalent), also etwa 10 m topographisch unter dem von 1982 liegt. Im Jahresmittel beträgt der spezifische Verlust 800 mm/a.

Abbildung 3.4.2.5 bringt als Zusatzinformation auch die jährliche Oszillation der spezifischen Massenbilanz, die in einzelnen Jahren bis zu 3000 mm betragen kann.



**Abb. 3.4.2.4: Kumulative mittlere spezifische Nettojahresbilanzen des östlichen Wurtenkees 1982 bis 1993**

**Fig. 3.4.2.4: Accumulated mean specific net balances of Eastern Wurtenkees 1982 to 1993**

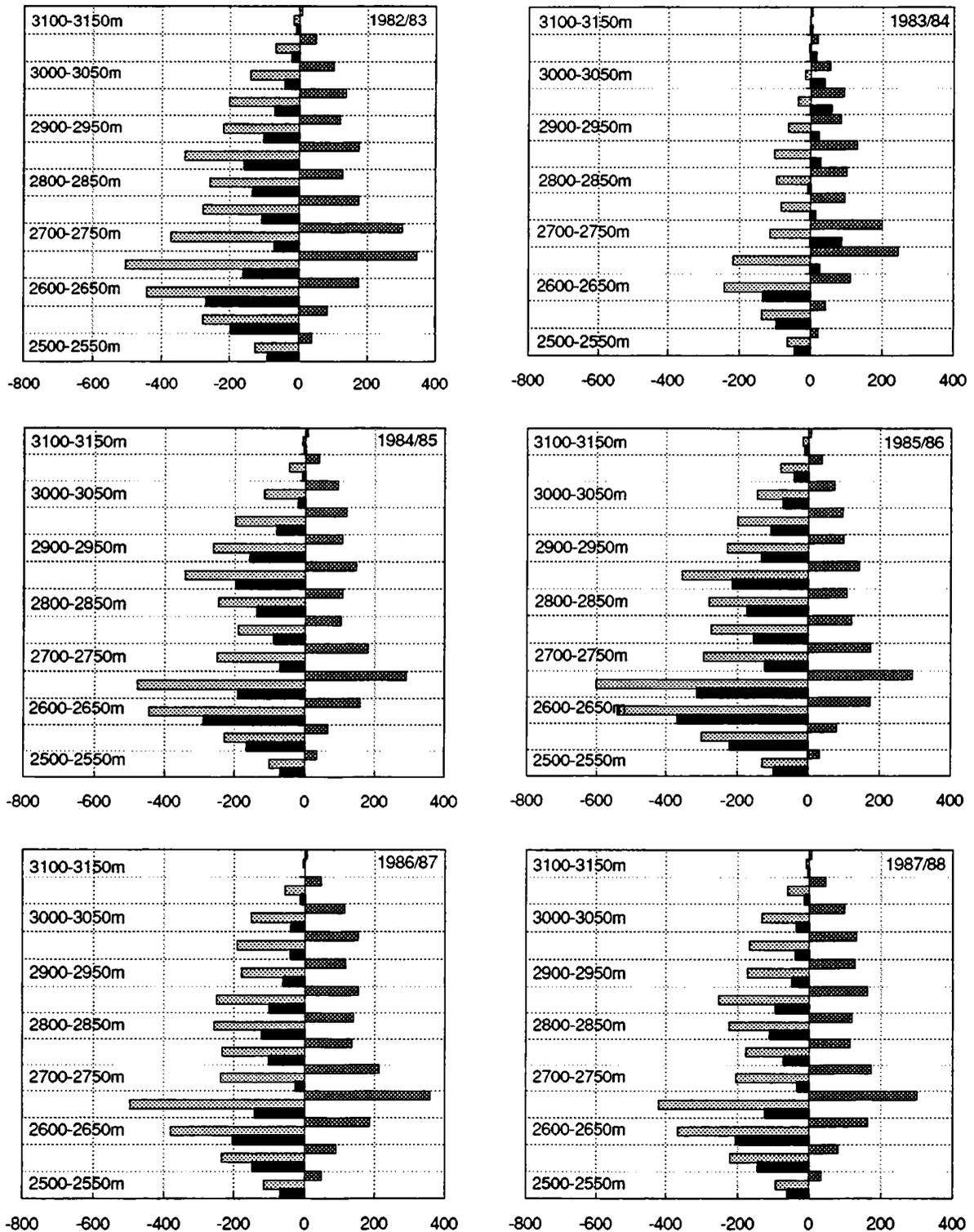


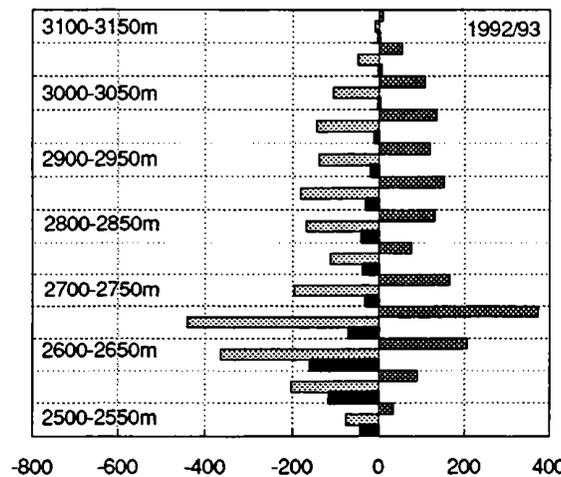
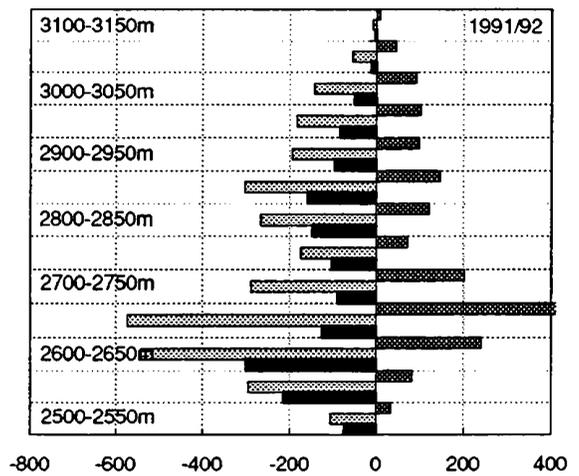
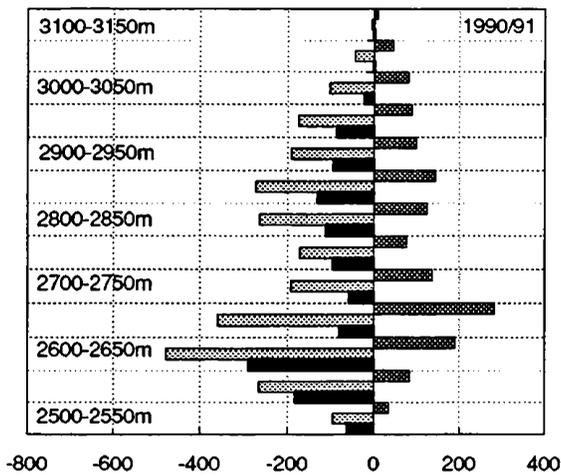
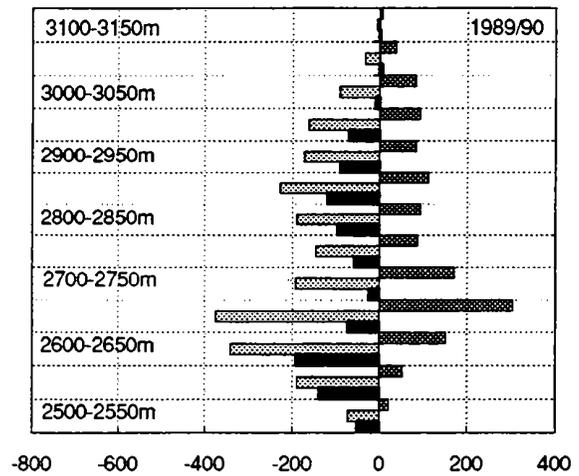
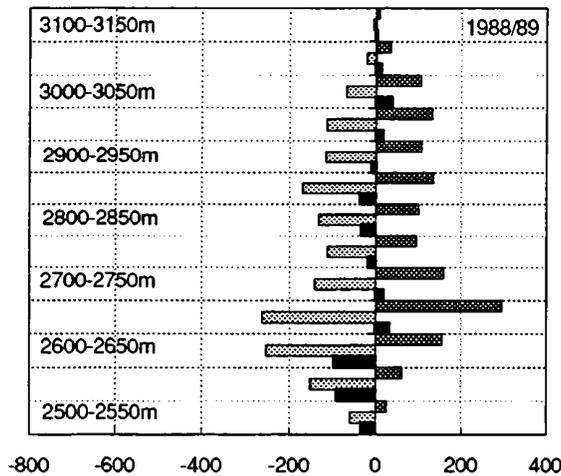
**Abb. 3.4.2.5: Kumulative mittlere Winter-Sommer Bilanzkurve des östlichen Wurtenkees 1982 bis 1993**

**Fig. 3.4.2.5: Accumulated mean winter-summer balance curve of Eastern Wurtenkees 1982 to 1993**

**Abb. 3.4.2.6: Höhenabhängigkeit des Winter-, Sommer- und Nettojahresbilanzvolumens (in 1000 t) für die einzelnen Bilanzjahre 1982/83 bis 1992/93 auf dem östlichen Wurtenkees**  
 ■ Winter ■ Sommer ■ Jahr

**Fig. 3.4.2.6: Winter, summer and annual net balance volume (1000 t) versus altitude for the single budget years 1982/83 to 1992/93 on Eastern Wurtenkees**  
 ■ Winter ■ Summer ■ Year





Werden die spezifischen Bilanzwerte mit dem jeweiligen Flächenelement der Höhenstufe bzw. der Gesamtfläche des Gletschers multipliziert, erhält man das Bilanzvolumen der Höhenstufe bzw. das Gesamtbilanzvolumen des Gletschers. Diese Größe kann in Kubikmeter Wasser oder, wie hier, in Tonnen angegeben werden. Streng genommen handelt es sich nur im ersten Fall um ein Volumen, im zweiten um die Masse, sodaß eigentlich von der "Massenbilanz" gesprochen werden müßte. Um Verwechslungen mit dem Ausdruck "spezifische Massenbilanz" zu vermeiden, wird in der Glaziologie jedoch meist auch dann der Ausdruck "Bilanzvolumen" verwendet, wenn diese Größe wie hier in Tonnen, also als Masse und nicht als Volumen angegeben wird.

Analoge Darstellungen sind wie oben für das Bilanzvolumen  $B$  in Abbildung 3.4.2.6 und Abbildung 3.4.2.7 (für die Höhenabhängigkeit von  $B$ ) und in Abbildung 3.4.2.8 (für die Zeitreihe des kumulativen Gesamtbilanzvolumens) enthalten. Der Gletscher hat in diesen 11 Jahren insgesamt rund 11 Millionen Tonnen an Masse verloren, also im Mittel eine Million Tonnen pro Jahr.

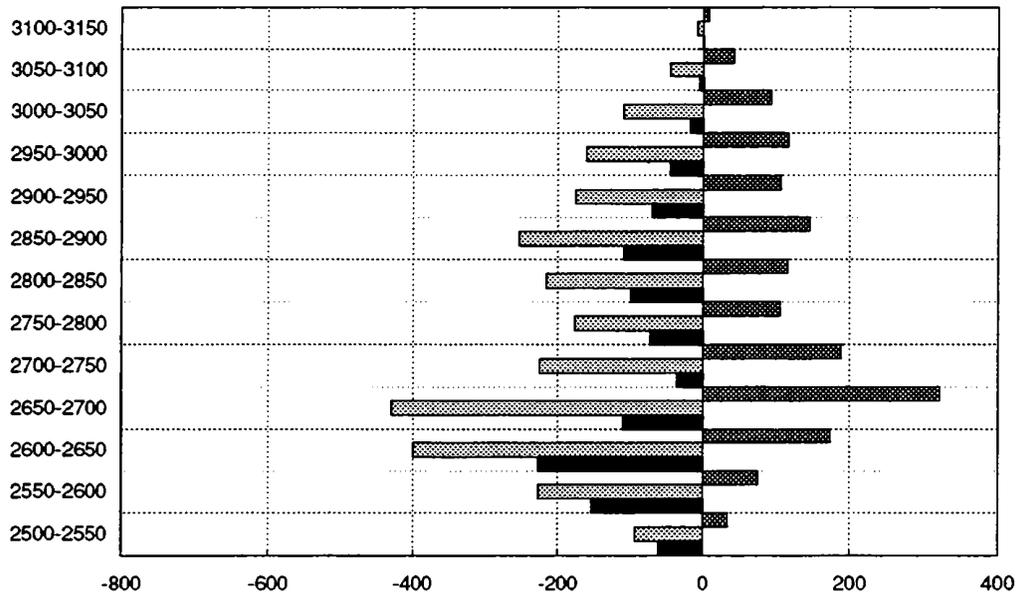


Abb. 3.4.2.7: Mittlere Höhenabhängigkeit des Winter-, Sommer- und Nettojahresbilanzvolumens (in 1000 t) auf dem östlichen Wurtenkees

■ Winter ■ Sommer ■ Jahr

Fig. 3.4.2.7: Mean Winter, summer and annual net balance volume (1000 t) versus altitude on Eastern Wurtenkees

■ Winter ■ Summer ■ Year

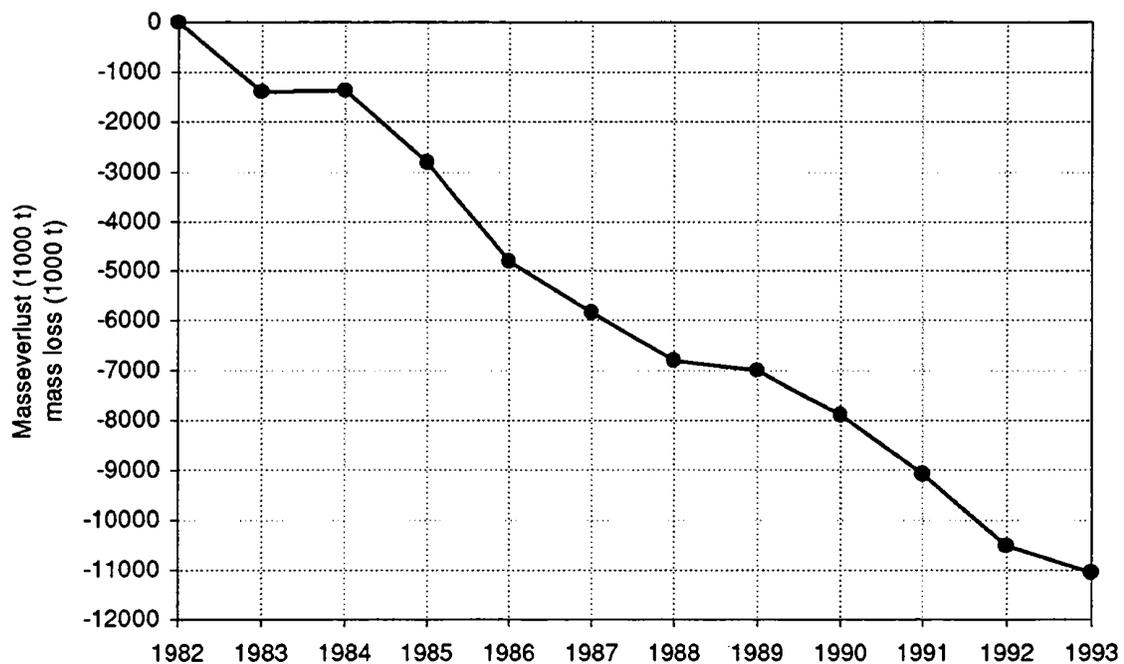


Abb. 3.4.2.8: Kumulatives mittleres Nettojahresbilanzvolumen des östlichen Wurtenkeeses 1982-1993

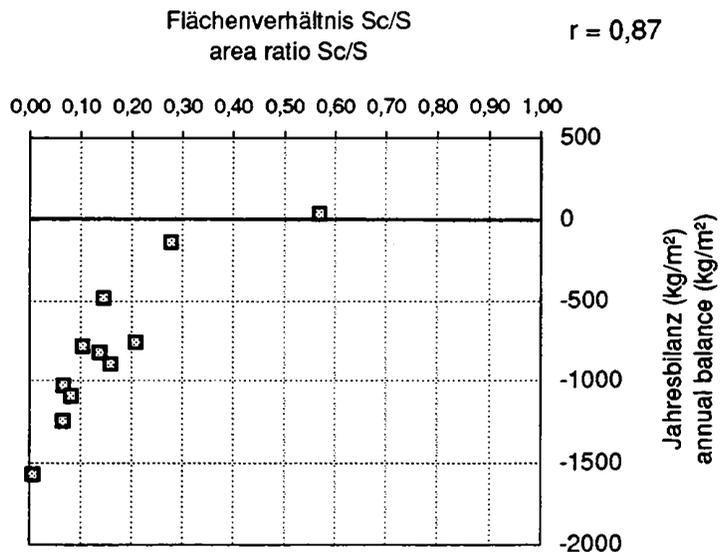
Fig. 3.4.2.8: Accumulated mean net balance volume of Eastern Wurtenkees 1982 to 1993

Neben den bisher gezeigten Bilanzauswertungen wurden die Massenbilanzkarten des Wurtenkees auch bezüglich der Akkumulations- und Ablationsflächen ( $S_c$  und  $S_a$ ) und auf die mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie zum Zeitpunkt 1. Oktober ausgewertet. Die Flächen wurden in den Jahresbilanzkarten planimetrisch bestimmt, die mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie aus dem Verlauf der Bilanz-Höhenkurve. Die Auswertungen der Gleichgewichtslinie war nicht in jedem Bilanzjahr möglich, da sie in drei Bilanzjahren so hoch über dem Gipfelniveau zu liegen kam, daß auch eine Extrapolation (die bis 3200 m vorgenommen wurde) nicht mehr zulässig schien.

Wie bei anderen Alpengletschern ist auch beim Wurtenkees die Korrelation dieser beiden Formparameter mit der mittleren spezifischen Nettojahresbilanz hoch. Das Flächenverhältnis  $S_c/S$  (Akkumulationsfläche zu Gesamtfläche) ist mit  $r=0,87$ , die mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie mit  $r=0,91$  mit der mittleren spezifischen Nettobilanz korreliert. Die in den Abbildung 3.4.2.9 und 3.4.2.10 gezeigten Korrelogramme machen zwar die jeweils engen Zusammenhänge deutlich, es scheinen aber nicht unbedingt lineare Abhängigkeiten zu bestehen. Eine endgültige Abklärung der Art der bestmöglichen Regression ist zur Zeit für das Wurtenkees noch nicht möglich, dazu müssen in Zukunft noch mehr Wertepaare erarbeitet werden. Vor allem der Bereich positiver Massenbilanzen konnte mit der Stichprobe 1982 bis 1993 noch nicht abgedeckt werden.

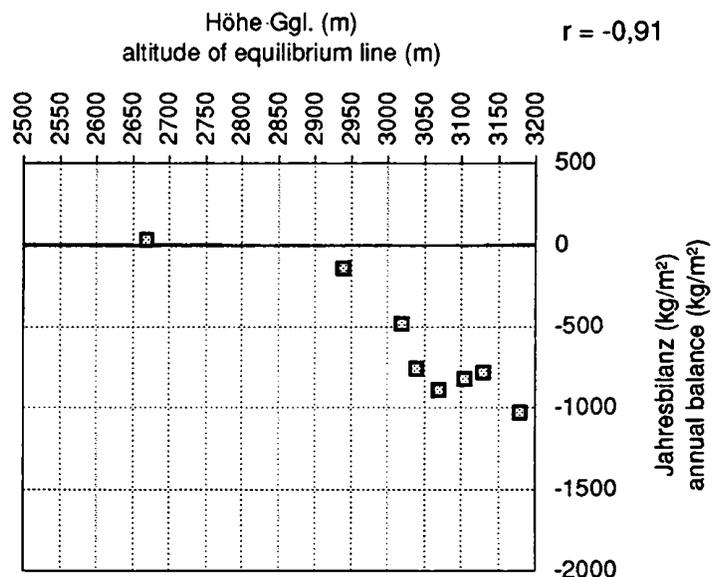
**Abb. 3.4.2.9:**  
Korrelogramm von  $S_c/S$  mit der mittleren spezifischen Nettojahresbilanz des östlichen Wurtenkees

**Fig. 3.4.2.9:**  
Scatter diagram of  $S_c/S$  versus mean specific net balance of Eastern Wurtenkees



**Abb. 3.4.2.10:**  
Korrelogramm der mittleren Höhe der Gleichgewichtslinie mit der mittleren spezifischen Nettojahresbilanz des östlichen Wurtenkees

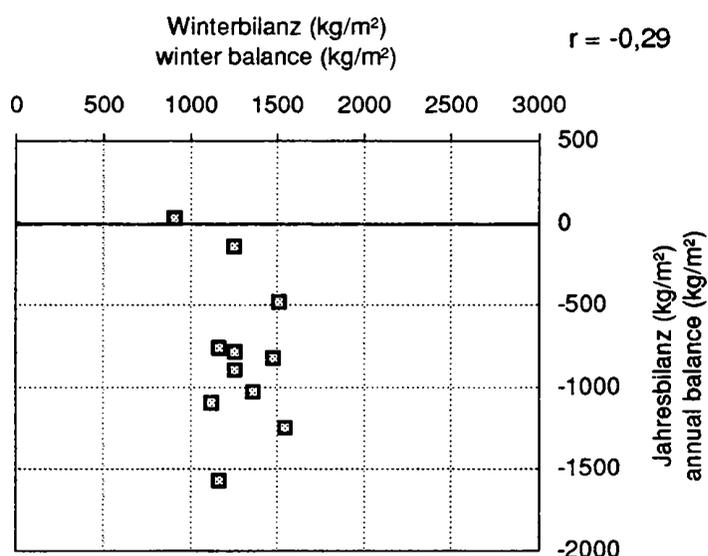
**Fig. 3.4.2.10:**  
Scatter diagram of equilibrium line altitude versus mean specific net balance of Eastern Wurtenkees



Einen interessanten neuen Vergleich erlauben die Winterbilanzierungen des Wurtenkeeses. Es kann für diesen Gletscher der in der alpinen Glaziologie oftmals postulierten alleinigen Relevanz der Sommerwitterung für die Nettomassenbilanz von Alpengletschern quantitativ nachgegangen werden. Infolge des Mangels an Winterbilanzdaten konnte dieses theoretische Postulat für andere Ostalpengletscher mit glaziologisch erzeugten Massenbilanzdaten noch nicht nachgeprüft werden. Für das Sonnblickgebiet ergab bereits eine von BÖHM und MOHNL 1987 durchgeführte Analyse der langjährigen monatlichen Schneehöhendaten an zahlreichen Pegeln in der Umgebung des Sonnblick Observatoriums, daß die winterlichen Schneehöhenmaxima (1. Mai) nur einen sehr geringen Anteil der Varianz der Firnreste am 1. Oktober erklären können. Es konnte sogar eine gewisse Gegenläufigkeit festgestellt werden, wie etwa ein Zeitraum maximaler Winterakkumulationen in den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts, der gleichzeitig von besonders starkem Gletscherrückzug und von minimalen Firnresten gekennzeichnet war.

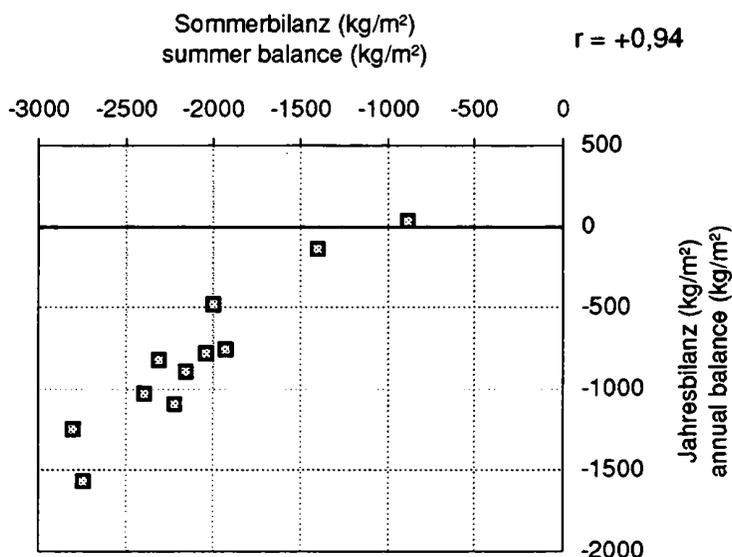
**Abb. 3.4.2.11:**  
Korrelogramm von mittlerer spezifischer Winter- und Nettojahresbilanz am östlichen Wurtenkees

**Fig. 3.4.2.9:**  
Scatter diagram of specific winter-balance versus annual net balance of Eastern Wurtenkees



**Abb. 3.4.2.12:**  
Korrelogramm von mittlerer spezifischer Sommer- und Nettojahresbilanz am östlichen Wurtenkees

**Fig. 3.4.2.10:**  
Scatter diagram of specific summer balance versus annual net balance of Eastern Wurtenkees



Das Korrelogramm der Abbildung 3.4.2.11 bestätigt durch eine praktisch nicht vorhandene, sogar leicht negative Korrelation ( $r = -0,29$ ) der mittleren spezifischen Winterbilanzen mit den Nettojahresbilanzen die tatsächlich vorhandene weitestgehende Unwirksamkeit der Winterwitterung für den Nettomassenhaushalt dieses Gletschers in einem Zeitabschnitt mit überwiegend negativer Massenbilanz. Ob die schwach negative Korrelation bei künftigem Vorliegen einer größeren Anzahl von Wertepaaren sich als signifikant erweisen wird, also hohe Winterbilanzen eher negative Nettojahresbilanzen bedeuten, ist wegen der Kleinheit der Stichprobe noch offen.

Im Gegensatz zur Winterbilanz ist die Sommerbilanz mit  $r = 0,94$  sehr eng mit der Nettojahresbilanz korreliert (Abbildung 3.4.2.12). Es konnte somit für das Wurtenkees das a priori Postulat der alpinen Glaziologie quantitativ bestätigt werden, daß für die Nettojahresbilanz eines Alpengletschers praktisch nur die Sommerwitterung ausschlaggebend ist, die während des Winters akkumulierten Schneemassen hingegen fast keinen Einfluß haben. Auf diese Annahme gründen sich verschiedene regressive Berechnungsmethoden der Nettomassenbilanz aus Klimadaten, wie sie auch für das Wurtenkees mit Hilfe des Klimadatensatzes des Sonnblick Observatoriums durchgeführt wurde (Siehe Kapitel 4).

An verschiedenen Stellen wurde bereits darauf hingewiesen, daß das Wurtenkees in mancher Beziehung eine Sonderstellung gegenüber anderen Gletschern einnimmt. Einen quantitativen Vergleich der Massenbilanzergebnisse dieses Gletschers mit anderen ermöglichen die in HAEBERLI et al., 1994 publizierten Daten. Die kumulative mittlere spezifische Nettobilanz des Wurtenkeeses kann mit neun Alpengletschern und 11 skandinavischen Gletschern verglichen werden, für die im Zeitabschnitt 1982/83 bis 1992/93 vollständige Massenbilanzreihen vorhanden sind. Ein Vergleich der Einzelreihen legte eine Zusammenfassung nach geographischen Regionen nahe, innerhalb derer die untersuchten Gletscher sehr ähnliches Verhalten zeigen. Es konnten die folgenden fünf Gruppen mit voneinander signifikant abweichenden kumulativen Massenbilanzkurven isoliert werden: Spitzbergen (Austre Broggerbreen, Midtre Lovénbreen), Skandinavische Westküste (Engabreen, Älfotbreen, Hardangerjøkulen, Nigardsbreen), Skandinavien kontinental (Rabots glaciär, Storglaciären, Storbreen, Hellstugubreen, Gråsubreen), Westalpen (Sarennes, Saint Sorlain, Gries) und Ostalpen (Silvretta, Careser, Hintereisferner, Kesselwandferner, Vernagtferner, Sonnblickkees, Wurtenkees). Abbildung 3.4.2.13 zeigt die mittleren kumulativen Nettobilanzkurven dieser Gletscherguppen im Vergleich zu der des Wurtenkeeses in der Periode 1982 bis 1993. Das Wurtenkees bilanzierte innerhalb der Untersuchungsperiode negativer als das Gruppenmittel der Ostalpengletscher. Von den sieben Ostalpengletschern mit Massenbilanzreihen war nur der südlichste (Careser im Ortlergebiet) noch stärker negativ als das Wurtenkees. Die Westalpengletscher zeigen in den 11 Jahren ebenfalls negativere Bilanzen als die Ostalpengletscher und liegen noch unter der Wurtenkeeskurve. Ganz anders verhielten sich die Skandinavischen Gletscher. Die fünf Gletscher mit Massenbilanzreihen in eher kontinentaler Lage, im Lee des Küstengebirges bilanzierten in den 11 Jahren ausgeglichen, während die vier Gletscher im Luv des Skandinavischen Gebirges, in Küstennähe des Atlantiks, bis 1988 schwach, seither stark positive Massenbilanzen zeigen. In den 11 Untersuchungsjahren haben sie um durchschnittlich 10 m Wasseräquivalent zugenommen, während (als anderes Extrem) die Westalpengletscher im Mittel um 12 m abgenommen haben. Eine gesonderte Stellung nehmen die beiden nördlichsten Gletscher auf Spitzbergen ein. Sie verloren in den 11 Jahren im Mittel 4 m.

Die Sonderstellung des Wurtenkeeses hat sich also im Vergleich zu den vorhandenen Daten von Gletschern mit vollständigen Massenbilanzreihen nach der glaziologischen Methode bestätigt: Es bilanzierte im Untersuchungszeitraum im Vergleich mit den anderen Ostalpengletschern zu negativ. Seine Daten stellen somit eine Ergänzung zum bisher vorhandenen Material dar. Gleichzeitig machen die Wurtenkeesdaten wieder deutlich, daß mit der relativ geringen Anzahl von Gletschern, auf denen die arbeitsaufwendigen Massenbilanzierungen durchgeführt werden, zwar für regionale Trends bereits erste Hinweise gegeben, daß die Gesamtvariabilität aber noch nicht adäquat erfaßt werden kann. Neue Aktivitäten und Meßprogramme an bisher nicht erfaßten Gletschern, wie sie in den letzten Jahren in den Alpen und auch in anderen Gebirgen der Erde begonnen wurden, werden neue Erkenntnisse und notwendige Ergänzungen des Wissens über die Massenbilanz von Gletschern bringen.

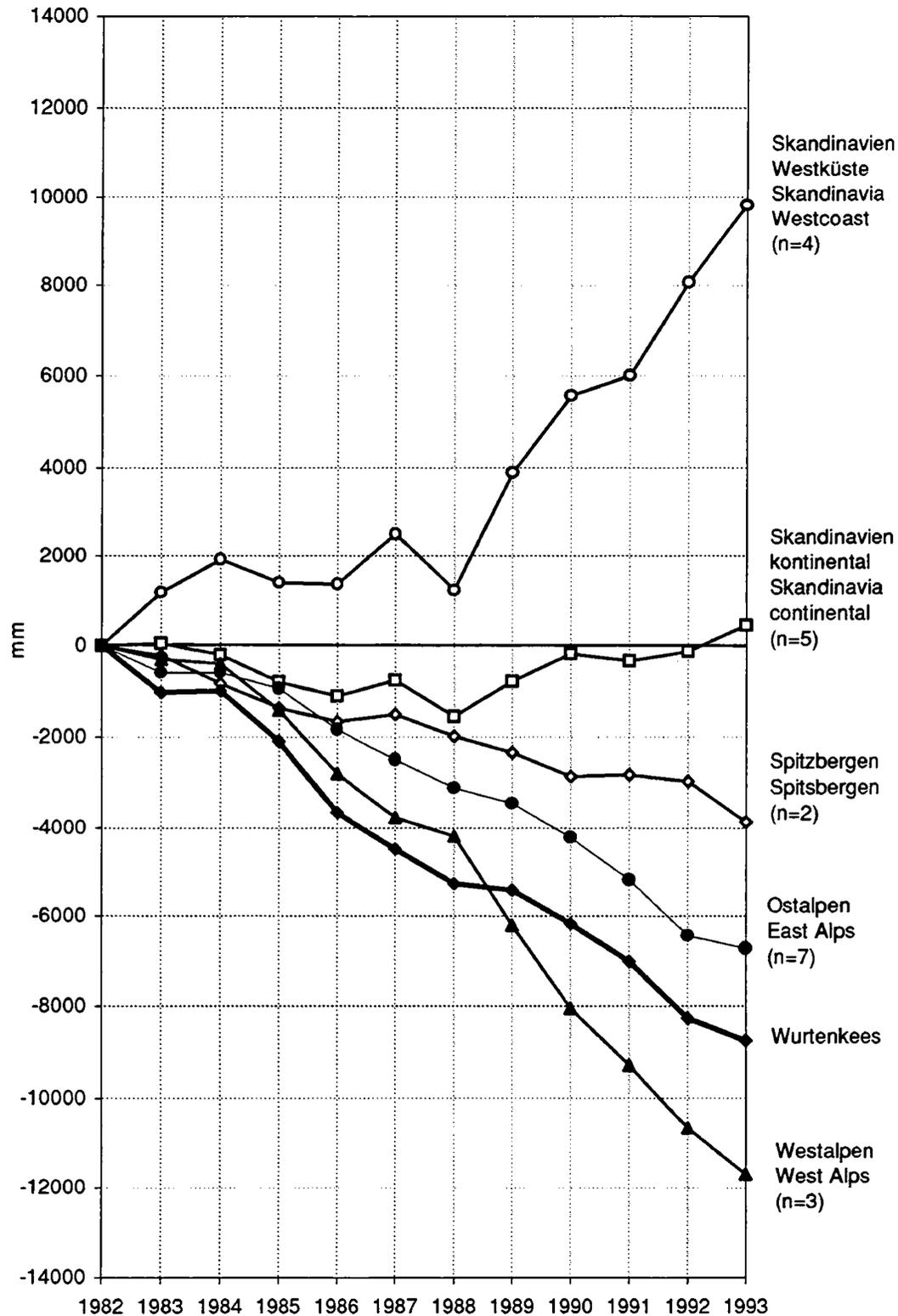


Abb. 3.4.2.13: Regionale Gruppenmittel der kumulativen spezifischen Nettobilanzen von Gletschern Skandinaviens und der Alpen im Zeitabschnitt 1982/83 bis 1992/93

Fig. 3.4.2.13: Mean cumulative specific net balances of different regional groups of glaciers in Scandinavia and the Alps 1982/83 to 1992/93

Zum Abschluß dieses Kapitels faßt die Tabelle 3.4.2.6 die über den Gesamtgletscher gemittelten bzw. aufsummierten glaziologischen Maßzahlen der 11 Bilanzjahre 1982/83 bis 1992/93 zusammen.

**Tab. 3.4.2.6: Glaziologische Massenbilanzzahlen der 11 Bilanzjahre 1982/83 bis 1992/93 auf dem östlichen Wurtenkees**

**Tab. 3.4.2.6: Glaciological key parameters of the 11 balance years 1982/83 to 1992/93 of Eastern Wurtenkees**

	1982/83	1983/84	1984/85	1985/86	1986/87	1987/88	1988/89	1989/90	1990/91	1991/92	1992/93	Mittel Mean 1982-93	
Sc	91	754	106	10	165	122	317	237	176	72	160	201	1000m <sup>2</sup>
Sa	1259	568	1189	1231	1026	1040	818	896	932	1022	934	992	1000m <sup>2</sup>
S	1350	1322	1295	1241	1191	1162	1135	1133	1108	1094	1094	1193	1000m <sup>2</sup>
Sc/S	0,07	0,57	0,08	0,01	0,14	0,11	0,28	0,21	0,16	0,07	0,15	0,17	
bw	1363	913	1123	1167	1482	1259	1255	1168	1258	1550	1513	1277	kg/m <sup>2</sup>
bs	-2392	-883	-2218	-2739	-2307	-2037	-1398	-1928	-2152	-2798	-1997	-2077	kg/m <sup>2</sup>
b	-1029	30	-1095	-1572	-825	-785	-143	-760	-894	-1248	-484	-800	kg/m <sup>2</sup>
b kum	-1029	-999	-2094	-3666	-4491	-5276	-5419	-6179	-7073	-8321	-8805		kg/m <sup>2</sup>
Ggl.	3180	2670	>3200	>3200	3105	3130	2940	3040	3070	>3200	3020		m
Bw	1838	1202	1455	1444	1754	1558	1410	1300	1393	1695	1655	1519	1000t
Bs	-3233	-1173	-2900	-3438	-2780	-2501	-1605	-2205	-2611	-3127	-2184	-2523	1000t
B	-1395	18	-1439	-1993	-1034	-954	-195	-905	-1189	-1432	-529	-1004	1000t
B kum	-1395	-1376	-2816	-4809	-5843	-6797	-6993	-7698	-9087	-10518	-11048		1000t

*Die Flächen- und Volumswerte von 1991/92 und 1992/93 sind vorläufige Werte auf Basis der Gletscherkarte 1991. Sie werden nach Vorliegen einer neuen Karte nachträglich auf interpolierte Flächen korrigiert.*

*Area and volumes 1991/92 and 1992/93 are provisional, based on the glacier map 1991. They will be adjusted when a new glacier map will be available.*

## **4. MASSENBILANZ UND KLIMA**

### **4. MASS BALANCE AND CLIMATE**

Da die spezifische Massenbilanz eines Gletscher diejenige Größe ist, die über die Wärmebilanz der Gletscheroberfläche direkt an Witterung und Klima gebunden ist, ist sie am besten geeignet, die Beziehung Klima - Gletscher zu untersuchen. HAMMER, 1993, hat eine Parametrisierung der Abhängigkeit der spezifischen Massenbilanz des Wurtenkeeses vom Klima mit Hilfe der Meßdaten der nur wenige Kilometer entfernten meteorologischen Station Sonnblick unternommen, die hier verkürzt wiedergegeben wird.

Der hier gewählte Modellansatz wurde bereits für den Hintereis- und Vernagtferner in den Öztaler Alpen mit Erfolg angewendet (HOINKES, 1970, HOINKES et al., 1975a und b, STEINACKER, 1979, KUHN et al., 1979, KRAUL, 1992, ESCHER-VETTER, 1992).

#### **4.1 DIE TEMPERATURSUMMENMETHODE**

##### **4.1 METHOD OF TEMPERATURE SUMS**

Diese Methode ist in (HOINKES et al., 1975a) genau beschrieben und wird hier nur kurz skizziert.

Zur Abschätzung des jährlichen Massenhaushaltes eines Gletschers nach der Temperatursummenmethode werden die Klimadaten einer möglichst nahegelegenen und für den Gletscher repräsentativen meteorologischen Beobachtungsstation verwendet. Dabei wird nach folgenden Schritten vorgegangen:

##### **Positive Temperatursummen (T-Sum)**

Die an der meteorologischen Beobachtungsstation während der Ablationsperiode gemessenen Tagesmitteltemperaturen werden mit dem für diesen Zeitraum geltenden mittleren Temperaturgradienten auf die Höhe der Gletscherzunge reduziert. Anschließend werden die positiven Temperatursummen (Gradtage) aufsummiert. Letztere stellen einen Schätzwert für die Wirkung der kurzwelligen Strahlung und den Strom fühlbarer Wärme, welche im wesentlichen die Ablation verursachen, dar.

##### **Reduzierte Gewichtung der Temperatursummen (RT-Sum)**

Da die Ablationsperiode in den höhergelegenen Gletscherteilen später beginnt und früher endet, werden die positiven Temperatursummen vom 1. bis 15. des ersten sowie vom 16. bis 30. (31.) des letzten Monats der Ablationsperiode mit 1/3 gewichtet, diejenigen vom 16. bis 30. (31.) des ersten und des 1. bis 15. des letzten Ablationsmonats mit 2/3. Über die Temperatur, welche zur Parametrisierung für die Strahlungsbilanz dient, wird dadurch die höhere Albedo in diesem Zeitraum berücksichtigt.

##### **Neuschneekorrektur (NS)**

Es wird eine Beziehung (Regression) zwischen den an der Station gemessenen und den auf dem Gletscher fallenden Tagesniederschlagsmengen hergestellt. Unter der Voraussetzung, daß die auf die Höhe der Gletscherzunge reduzierte Tagesmitteltemperatur nicht über 0 Grad C liegt, wird bei den österreichischen Alpengletschern davon ausgegangen, daß dann Niederschlag auf dem gesamten Gletscher als Schnee fällt. Für den Fall, daß die Lufttemperaturen erst im mittleren Gletscherbereich die 0-Grad-Grenze unterschreiten, wird nur rund die Hälfte der Gletscherfläche mit Neuschnee bedeckt sein, bei 0 Grad C im Gipfelbereich nur dieser selbst.

Je 5 mm Niederschlag, welche im Zungenbereich bei Mitteltemperaturen unter 0 Grad C fallen, werden von der positiven Temperatursumme zwei Gradtage abgezogen. Für den Fall, daß der Gefrierpunkt erst im mittleren Gletschergebiet unterschritten wird, kommt es zum Abzug von einem Gradtag; bei 0 Grad C im Gipfelbereich wird pro 5 mm Niederschlag ein halber Gradtag von der positiven Temperatursumme der Ablationsperiode abgezogen.

### **Winterschneekorrektur (WS)**

Um die unterschiedliche Höhe der Winterschneedecke zu Beginn der Ablationsperiode zu berücksichtigen, zu deren Abbau ein entsprechender Energieaufwand notwendig ist, muß bei einer überdurchschnittlichen Schneehöhe ein Abzug an positiven Gradtagen angebracht werden, bei einer unterdurchschnittlichen Schneehöhe ein Zuschlag. Darauf wird später noch genauer eingegangen.

Im Laufe der weiteren Ausführungen sind folgende für die Ablationsperiode berechneten positiven Temperatursummen zu unterscheiden:

T-Sum	auf die Höhe der Gletscherzunge reduzierte positive Temperatursumme
RT-Sum	auf die Höhe der Gletscherzunge reduzierte positive Temperatursumme; geringere Gewichtung des ersten und letzten Monats der Ablationsperiode
RT(NS)-Sum	auf die Höhe der Gletscherzunge reduzierte positive Temperatursumme; geringere Gewichtung des ersten und letzten Monats der Ablationsperiode; Neuschnee korrektur
RT(NS,WS)-Sum	auf die Höhe der Gletscherzunge reduzierte positive Temperatursumme; geringere Gewichtung des ersten und letzten Monats der Ablationsperiode; Neuschneekorrektur; Winterschneekorrektur
T(NS)-Sum	auf die Höhe der Gletscherzunge reduzierte positive Temperatursumme; Neuschneekorrektur

### **Korrelations- und Regressionsanalyse**

Unter der Voraussetzung, daß der Massenhaushalt eines Gletschers mittels der direkten glaziologischen Methode (HOINKES, 1970) über einen hinreichend langen Zeitraum bestimmt wurde, ist es möglich, zwischen den positiven Temperatursummen und den mittleren spezifischen Massenbilanzen eine Korrelations- und Regressionsanalyse durchzuführen.

## **4.2 ERFahrungen mit der Temperatursummenmethode auf Hintereis- und Vernagtferner**

### **4.2 EXPERIENCES WITH THE METHOD OF TEMPERATURE SUMS FOR HINTEREISFERNER AND VERNAGTFERNER**

Sowohl beim Hintereis- als auch beim Vernagtferner werden die Klimadaten der meteorologischen Beobachtungsstation Vent verwendet. Als Ablationsperiode gilt jeweils Mai bis September.

#### **Positive Temperatursummen (T-Sum)**

Beim Hintereisferner werden für die Ablationsperiode von den Tagesmitteltemperaturen in Vent, welche größer als 3 Grad C sind, 3 K subtrahiert und die Reste addiert. Dies entspricht einem mittleren Temperaturgradienten von -0,6 K/100 m von der Talsohle bis zur Gletscherzunge.

Wegen der höhergelegenen Gletscherzunge des Vernagtfernens wird bei diesem Gletscher die Schranke für die Tagesmitteltemperaturwerte von Vent auf 6 Grad C erhöht.

### Reduzierte Gewichtung der Temperatursummen (RT-Sum)

Für beide Gletscher werden die positiven Temperatursummen vom 1. bis 15. Mai sowie vom 16. bis 30. September mit 1/3 gewichtet, diejenigen vom 16. bis 31. Mai und vom 1. bis 15. September mit 2/3.

### Neuschneekorrektur (NS)

Unter der Voraussetzung, daß die Tagesmitteltemperatur in Vent nicht über 3 Grad C liegt, kann angenommen werden, daß Niederschlag auf dem gesamten Hintereisferner als Schnee fällt. Zwischen 3 und 6 Grad C wird es sich im Zungenbereich wahrscheinlich bereits um flüssigen Niederschlag handeln; zwischen 6 und 9 Grad C dürfte nur noch im höhergelegenen Gletscherbereich Schnee fallen.

Aus Totalisatorbeobachtungen ergibt sich, daß im Mittel der Ablationsperiode 3 mm Niederschlag in Vent, gefallen bei einer Tagesmitteltemperatur von unter 3 Grad C, auf der Zunge des Hintereisferners zu etwa 5 mm Niederschlag, entsprechend 5 cm Neuschnee, führen.

Je 3 mm Niederschlag, welche in Vent bei maximal 3 Grad C gefallen sind, werden zwei positive Gradtagzahlen abgezogen, bei Temperaturen von 3 bis 6 Grad C ein positiver Gradtag und zwischen 6 und 9 Grad C ein halber.

Beim Vernagtferner werden für eine Niederschlagsschwelle von 3 mm als Temperaturgrenzen 6 Grad C (Abzug von zwei Gradtagen), 7,5 Grad C (Abzug von einem Gradtag) und 9 Grad C (Abzug von einem halben Gradtag) angesetzt.

### Winterschneekorrektur (WS)

Beim Hintereisferner werden 2/3 der Differenz Mittelwert minus aktueller Wert der Niederschlags-summe (in mm) während der Akkumulationsperiode zur Temperatursumme des jeweiligen Jahres addiert, beim Vernagtferner 2/5. Dies stellt eine Nullpunktverschiebung der positiven Temperatursummen dar.

### Korrelations- und Regressionsanalyse

Unterzieht man nun die positiven Temperatursummen (unabhängige Variable) und die mittleren spezifischen Massenbilanzen MSB (abhängige Variable) für die einzelnen Jahre einer linearen Korrelationsanalyse, so erhält man folgende Ergebnisse:

**Tab. 4.2.1: Zusammenhang zwischen positiven Temperatursummen und mittleren spezifischen Massenbilanzen auf Hintereis- und Vernagtferner**

**Tab. 4.2.1: Relation between positive temperature sums and mean specific mass balance for Hintereisferner and Vernagtferner**

unabhängige Variable independent variable	abhängige Variable dependent variable	Korrelationskoeffizient correlation coefficient	
		Hintereisferner	Vernagtferner
T-Sum	MSB	-0,74	-0,79
RT-Sum	MSB	-0,81	-0,80
RT(NS)-Sum	MSB	-0,87	-0,90
RT(NS,WS)-Sum	MSB	-0,94	-0,93

Varianzerklärungen von 88 bzw. 86 Prozent (entsprechend den Korrelationskoeffizienten von -0,94 bzw. -0,93) liefern einen Hinweis auf die hohe Qualität der nach der genannten Methode gewonnenen Ergebnisse.

### 4.3 ANWENDUNG DER TEMPERATURSUMMENMETHODE AUF DAS WURTENKEES

### 4.3 APPLICATION OF THE METHOD OF TEMPERATURE SUMS ON WURTENKEES

Von besonderem Interesse im Fall Wurtenkees ist dabei die Frage, wie gut die Parameterisierung Klima - Gletscher anhand einer nahegelegenen Station, welche über dem Niveau der Gletscherzunge liegt (Sonnblick), durchzuführen ist. Anschließend wird versucht, die jährlichen mittleren spezifischen Massenbilanzen unter Zugrundelegung der langjährigen Beobachtungsdaten, welche vom Sonnblick vorhanden sind, rückzurechnen.

Folgende Punkte können von vornherein als günstig angesehen werden:

- Die meteorologische Beobachtungsstation auf dem Hohen Sonnblick (3106 m) befindet sich nur in geringer horizontaler Entfernung vom Wurtenkees.
- Von der Station Sonnblick liegt eine mehr als 100jährige Beobachtungsreihe vor, was eine langjährige Rückrechnung der Massenbilanzen des Wurtenkeeses mit Hilfe der Klimadaten ermöglicht.
- Das Wurtenkees weist seit 1871 mit nur kurzzeitigen Unterbrechungen (um 1920) eine starke Rückzugstendenz auf. Deshalb ist zu erwarten, daß die zwischen den positiven Temperatursummen und den mittleren spezifischen Massenbilanzen ermittelten Korrelationen und Regressionen recht gut auf eine entsprechend lange Zeitreihe rückrechenbar sind.
- Vom Wurtenkees existieren mehrere Gletscherkarten (1871, 1930, 1967, 1979, 1991), anhand derer die Güte der Rückrechnung der Massenbilanzen überprüft bzw. abgeschätzt werden kann.

Die nachfolgenden Punkte werfen eine gewisse Problematik auf:

- Die Reihe der Massenbilanzen des Wurtenkeeses ist für eine statistische Bearbeitung zu kurz.
- Die Niederschlagsmessung im Hochgebirge ist mit großen Schwierigkeiten verbunden (AUER, 1992a und b); ein Rückschluß von den täglichen Niederschlagsmessungen auf dem Sonnblick auf diejenigen des Wurtenkeeses dürfte nur mit Einschränkungen zulässig sein.
- Das Wurtenkees liegt sehr windexponiert. Es weist dadurch mit zunehmender Seehöhe eine gegenüber anderen Gletschern abweichende Niederschlags- und Schneehöhenverteilung auf (HAMMER et al., 1992).

Entsprechend der oben dargelegten Methode wurden die positiven Temperatursummen für das Wurtenkees optimiert. So wurden etwa die Temperatursummen für unterschiedliche Ablationsperioden ermittelt, die Temperaturen des Sonnblicks auf verschiedene Seehöhen rückgerechnet, eine reduzierte Gewichtung der Temperatursummen für unterschiedliche Monate durchgeführt, die Neuschneekorrektur für variable Niederschlagsschwellen untersucht und anderes mehr. Im folgenden ist nur diejenige Vorgangsweise dargelegt, welche die besten Ergebnisse liefert.

Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, daß die Anwendung der Temperatursummenmethode auf das Wurtenkees für die Zeitreihe 1983 bis 1992 bereits veröffentlicht wurde (HAMMER, 1993). Durch einen Irrtum bei der Bearbeitung der mittleren spezifischen Massenbilanzen für die Glazialjahre 1990/91 und 1991/92 wurden bei der letztgenannten Publikation Werte verwendet, welche in diesen beiden Haushaltsjahren um 16 bzw. 5% von den tatsächlichen abweichen. Dieser Fehler wurde bei vorliegender Arbeit eliminiert.

#### Positive Temperatursummen (T-Sum)

Die Gletscherzunge des Wurtenkeeses befindet sich derzeit in einer Seehöhe von etwa 2500 m, also 600 m tiefer als die Station Sonnblick. Die Tagesmitteltemperaturen auf dem Hohen Sonnblick wurden mit dem in den Monaten Mai bis Oktober geltenden mittleren Temperaturgradienten von  $-0.62 \text{ K}/100 \text{ m}$  (HAMMER et al., 1992) auf die Höhe der Gletscherzunge reduziert und aufsummiert.

In Tabelle 4.3.1 sind die Temperatursummen für die Ablationsperioden der Jahre 1983 bis 1992 angeführt. Als Ablationsperiode wurden einerseits die Monate Mai bis September, andererseits Mai bis Oktober angesetzt.

**Tab. 4.3.1: Auf die Gletscherzunge des Wurtenkeeses reduzierte positive Temperatursummen****Tab. 4.3.1: Positive temperature sums adjusted to Wurtenkees glacier terminus**

	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
T-Sum										
a	787	476	700	719	657	676	549	592	701	837
b	839	520	769	826	719	758	611	674	744	855
RT-Sum										
a	708	442	598	606	556	594	475	535	621	739
b	806	492	721	740	678	684	558	614	729	817
RT(NS)-Sum										
a	632	282	512	545	449	528	366	467	457	710
b	698	307	632	654	563	612	420	518	539	735
T(NS)-Sum										
a	710	317	614	659	50	611	440	524	537	809
b	730	336	680	741	605	686	473	578	553	772

a Ablationsperiode Mai bis September  
ablation period May to September

b Ablationsperiode Mai bis Oktober  
ablation period May to October

Die Korrelationsanalyse (Tabelle 4.3.2) führt dann zu den besten Ergebnissen, wenn als Ablationsperiode die Monate Mai bis einschließlich Oktober zugrundegelegt werden, und dies, obwohl die Bestimmung der mittleren spezifischen Massenbilanz zum Stichtag 1. Oktober erfolgt. Das Resultat entspricht deshalb den Erwartungen, weil das Wurtenkees nach Südwesten orientiert ist (STROBL, 1983), und die Ablationsperiode dort während der besonders gletscherungünstigen Jahre 1983 bis 1992 häufig bis in den Oktober hinein angedauert hat.

**Tab. 4.3.2: Zusammenhang zwischen den Temperatursummen und den mittleren spezifischen Massenbilanzen MSB (in kg/m<sup>2</sup>) für das Wurtenkees: Korrelationskoeffizient r, 95%-Mutungsbereich Mu95 von r, Regressionsgleichung****Tab. 4.3.2: Relation between temperature sums and mean specific mass balances MSB (kg/m<sup>2</sup>) for Wurtenkees: Correlation coefficient r, 95% confidence interval of r, regression equation**

	r	Mu95	Regressionsgleichung regression equation
T-Sum			
a	-0,864	-0,698 bis -1,0	MSB = 1777 - 3,933 * T-Sum
b	-0,925	-0,831 bis -1,0	MSB = 2278 - 4,285 * T-Sum
RT-Sum			
a	-0,803	-0,571 bis -1,0	MSB = 1650 - 4,267 * RT-Sum
b	-0,889	-0,752 bis -1,0	MSB = 2013 - 4,195 * RT-Sum
RT(NS)-Sum			
a	-0,805	-0,575 bis -1,0	MSB = 736 - 3,216 * RT(NS)-Sum
b	-0,886	-0,746 bis -1,0	MSB = 1045 - 3,347 * RT(NS)-Sum
T(NS)-Sum			
a	-0,850	-0,669 bis -1,0	MSB = 879 - 3,006 * T(NS)-Sum
b	-0,885	-0,743 bis -1,0	MSB = 1106 - 3,188 * T(NS)-Sum

a Ablationsperiode Mai bis September  
ablation period May to September

b Ablationsperiode Mai bis Oktober  
ablation period May to October

Eine Überraschung stellt die Höhe des Korrelationskoeffizienten dar. Die Varianzerklärung liegt unter Verwendung von T-Sum für die Ablationsperiode Mai bis September bei 75%, gegenüber 55% beim Hintereisferner und 62% beim Vernagtferner. Setzt man als Ablationsperiode die Monate Mai bis Oktober an, so ergibt sich sogar eine Varianzerklärung von 86%. Damit ist der Korrelationskoeffizient bereits annähernd gleich hoch wie beim Hintereis- und Vernagtferner nach Berücksichtigung sämtlicher Abzugsglieder, also bei RT(NS, WS)-Sum.

### **Reduzierte Gewichtung der Temperatursummen (RT-Sum)**

Entsprechend der Annahme, daß die Ablationsperiode in den höhergelegenen Gletscherteilen später beginnt und früher endet, wurden die positiven Temperatursummen vom 1. bis 15. Mai und vom 16. bis 30. September (31. Oktober) mit 1/3 gewichtet, diejenigen vom 16. bis 31. Mai und vom 1. bis 15. September (Oktober) mit 2/3. Die so berechneten Temperatursummen (RT-Sum) finden sich ebenfalls in Tabelle 4.3.1.

Während es sowohl beim Hintereis- als auch beim Vernagtferner durch die reduzierte Gewichtung der Temperatursummen im jeweils ersten und letzten Monat der Ablationsperiode zu einer weiteren Verbesserung der Korrelation kommt (Tabelle 4.3.2), ist beim Wurtenkees das Gegenteil der Fall (Tabelle 4.2.1). Bei letzterem Gletscher hat sich dadurch der Korrelationskoeffizient von -0,864 auf -0,803 (Reduktion im Mai und September) bzw. von -0,925 auf -0,889 (Reduktion im Mai und Oktober) verschlechtert. Die Lufttemperatur auf dem Hohen Sonnblick wird sicherlich durch eine höhere Albedo beeinflusst, und zwar in Richtung auf tiefere Werte hin. Die Abnahme der Korrelation nach Reduzierung der Temperatursummen könnte ihre Ursache darin haben, daß bei der Gipfelstation Sonnblick die höhere Albedo zu Beginn und Ende der Ablationsperiode schon durch die gewöhnlichen Temperatursummen (T-Sum) recht gut parameterisiert wird.

### **Neuschneekorrektur (NS)**

Es wurde davon ausgegangen, daß Niederschläge, die auf dem Hohen Sonnblick bei maximal -3 Grad C fallen, das Wurtenkees zur Gänze mit Schnee bedecken, weiters, daß bei -1,5 Grad auf dem Sonnblick der Niederschlag im Zungenbereich des Wurtenkeeses in flüssiger Form fällt, und bei 0 Grad nur noch das höhergelegene Gletschergebiet schneebedeckt sein wird.

Während bei der Neuschneekorrektur für den Hintereis- und Vernagtferner eine Niederschlagschwelle von 3 mm, gemessen in Vent, verwendet wurde, werden für das Wurtenkees dann die besten Ergebnisse erzielt, wenn für die Beobachtungsstation Sonnblick 5 mm Niederschlag als Grenzwert zugrundegelegt werden.

Aber auch unter diesen Annahmen (RT(NS)-Sum; Tabelle 4.3.1, Tabelle 4.3.2) ist der Korrelationskoeffizient gleich hoch wie bei RT-Sum.

Wird bei der Bildung der positiven Temperatursummen nur eine Neuschneekorrektur durchgeführt, jedoch keine Reduktion für den ersten und letzten Monat der Ablationsperiode (T(NS)-Sum), so sind die Ergebnisse gegenüber RT-Sum und RT(NS)-Sum zwar besser, jedoch noch immer schlechtere Ergebnisse als mit T-Sum allein.

Dieses Ergebnis könnte wiederum als Hinweis darauf interpretiert werden, daß bei Anwendung der Temperatursummenmethode unter Zugrundelegung von Beobachtungsdaten von Stationen, die höher als die Zunge des zu untersuchenden Gletschers liegen, Abzugsglieder für die Verringerung der kurzweiligen Strahlungsbilanz, welche durch eine höhere Albedo hervorgerufen wird, nicht von so großer Bedeutung sind, wie dies bei Talstationen der Fall ist, daß also höhere Albedowerte durch die einfachen Temperatursummen (T-Sum) bereits gut parameterisiert werden.

### Winterschneekorrektur (WS)

Die Winterschneekorrekturen schließlich, welche anhand der Sonnblickbeobachtungen für das Wurtenkees durchgeführt wurden, führen zu extremen Verschlechterungen des Korrelationskoeffizienten. Dies resultiert daraus, daß zwischen den Schneehöhen auf dem Hohen Sonnblick und denen im Wurtenkeesbereich kaum Korrelationen bestehen, worauf in (HAMMER et al., 1992) und (BÖHM et al., 1987) schon ausführlich hingewiesen wurde. Deshalb wurde bei der Berechnung der Temperatursummen von einer Winterschneekorrektur unter Zugrundelegung der Sonnblickbeobachtungen Abstand genommen.

In Tabelle 4.3.2 sind die Regressionsgleichungen, die Korrelationskoeffizienten und deren 95%-Mutungsbereiche, die sich aus den unterschiedlich berechneten positiven Temperatursummen und den mittleren spezifischen Massenbilanzen aus den Gletscherhaushaltsjahren 1982/83 bis 1991/92 ergeben, zusammengefaßt dargestellt.

Vor allem wegen der kurzen Zeitreihe von Massenbilanzmessungen ist es sinnvoll, die Korrelationskoeffizienten der Grundgesamtheit des zweidimensionalen linearen Regressionsmodells abzuschätzen. Die Mutungsbereiche wurden für eine statistische Sicherheit von 95% ermittelt. Da zwischen den mittleren spezifischen Massenbilanzen keine Autokorrelation besteht - bei einer Zeitverschiebung von einem Jahr beträgt der Autokorrelationskoeffizient -0,058 - wurden die 95%-Mutungsbereiche nach folgender Formel abgeschätzt (SCHÖNWIESE, 1985):

$$\text{Mu}_{95} = \frac{\pm 1,96(1-r^2)}{\sqrt{(n-1)}}$$

Das Ergebnis zeigt ebenfalls, wie stark die mittlere spezifische Massenbilanz des Wurtenkeeses im Zeitraum 1983 bis 1992 an die auf Grund der Sonnblickbeobachtungen gewonnenen positiven Temperatursummen (T-Sum) während der Ablationsperiode Mai bis Oktober gekoppelt ist.

**Tab. 4.3.3: Mittlere quadratische Abweichung zwischen den gemessenen und den anhand der unterschiedlichen Temperatursummen berechneten Werten der mittleren spezifischen Massenbilanz MSB des Wurtenkeeses (in kg/m<sup>2</sup>)**

**Tab. 4.3.3 Mean square deviation between measured and calculated MSB of Wurtenkees (kg/m<sup>2</sup>)**

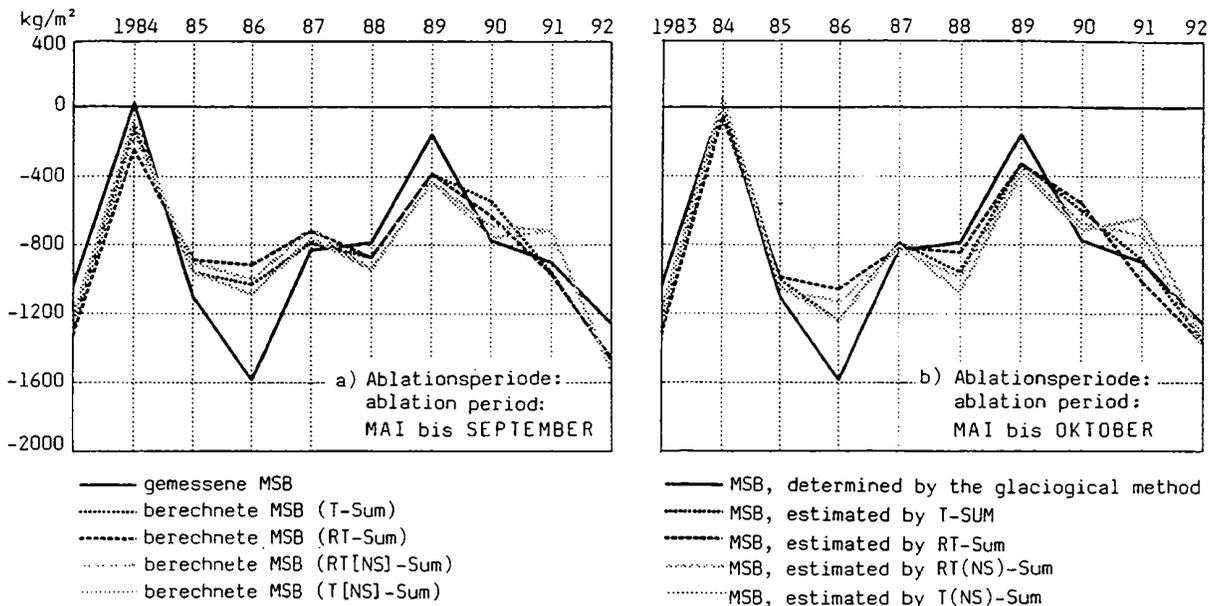
MSB, berechnet mit MSB, calculated with	T-Sum	RT-Sum	RT(NS)-Sum	T(NS)-Sum
a	237,9	281,2	264,2	232,2
b	171,1	219,5	198,2	188,5

*a Ablationsperiode Mai bis September  
ablation period May to September*

*b Ablationsperiode Mai bis Oktober  
ablation period May to October*

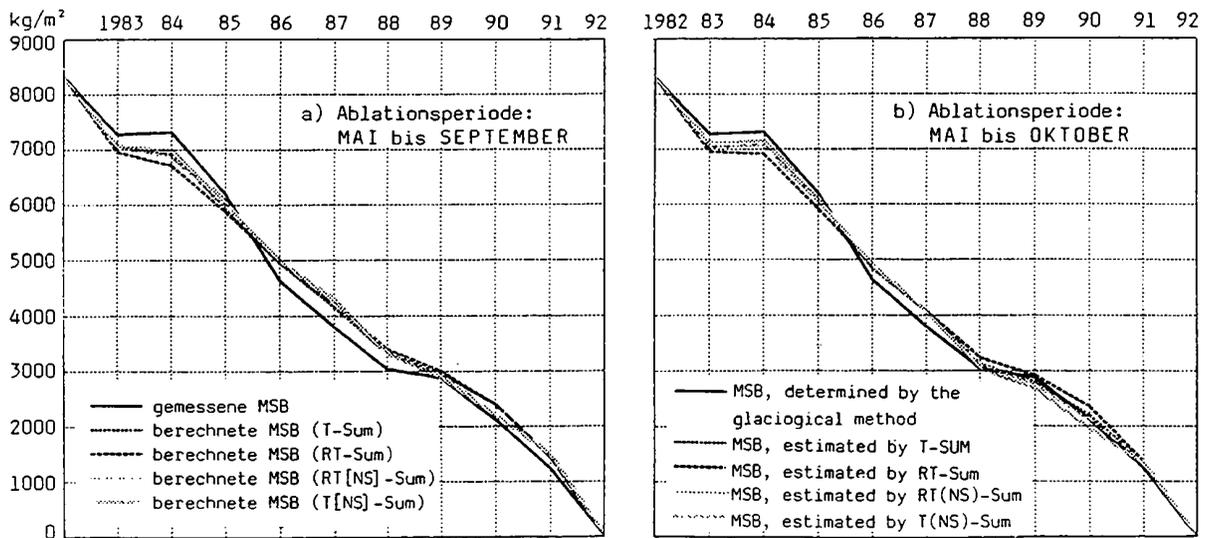
In Tabelle 4.3.3 sind die mittleren quadratischen Abweichungen der berechneten von den nach der direkten glaziologischen Methode bestimmten Massenbilanzwerten angeführt. Für die Ablationsperiode Mai bis September entsprechen diese Abweichungen 14,9%, 17,6%, 16,5% und 14,5% der Schwankungswerte der Extremwerte (1602 kg/m<sup>2</sup>), für Mai bis Oktober 10,7%, 13,7%, 12,4% und 11,8%.

Im Zeitraum 1982/83 bis 1991/92 ist es einmal, und zwar im Haushaltsjahr 1985/86, zu einer deutlichen Abweichung der berechneten von der gemessenen mittleren spezifischen Massenbilanz des Wurtenkeeses gekommen (siehe auch Abbildung 4.3.1a und b). Eine mögliche Erklärung könnte in diesem Fall zum Teil in höheren Schneetemperaturen Anfang Mai 1986 liegen (BÖHM et al., 1988), eventuell auch in einem vom Durchschnittswert abweichenden Temperaturgradienten.



**Abb. 4.3.1:** Gemessene und mittels T-Sum, RT-Sum, RT(NS)-Sum und T(NS)-Sum berechnete mittlere spezifische Massenbilanzen MSB (in  $\text{kg/m}^2$ ) des Wurtenkeeses für 1982/83 bis 1991/92

**Fig. 4.3.1:** Measured and calculated (T-Sum, RT-Sum, RT(NS)-Sum and T(NS)-Sum method) mean specific mass balances of MSB ( $\text{kg/m}^2$ ) of Wurtenkees 1982/83 to 1991/92



**Abb. 4.3.2:** Aufsummierte gemessene und mittels T-Sum, RT-Sum, RT(NS)-Sum und T(NS)-Sum berechnete mittlere spezifische Massenbilanzen MSB (in  $\text{kg/m}^2$ ) des Wurtenkeeses für 1982/83 bis 1991/92

**Fig. 4.3.2:** Accumulated measured and calculated (T-Sum, RT-Sum, RT(NS)-Sum and T(NS)-Sum method) mean specific mass balances MSB ( $\text{kg/m}^2$ ) of Wurtenkees 1982/83 to 1991/92

#### 4.4 RÜCKRECHNUNG DES MASSENHAUSHALTES DES WURTENKEESES MIT HILFE VON KLIMADATEN

#### 4.4 RECALCULATION OF WURTENKEES MASS BALANCE USING CLIMATE DATA

Die Temperatursummenmethode bietet die Möglichkeit, die mittleren spezifischen Massenbilanzen des Wurtenkeeses mit Hilfe der auf dem Hohen Sonnblick angestellten langjährigen Beobachtungen in die Vergangenheit rückzurechnen, wie dies bereits beim Hintereis- und Vernagtferner versucht wurde (STEINACKER, 1979, KRAUL, 1992, ESCHER-VETTER, 1992). Die Rückrechnung erfolgte gemäß den Regressionsgleichungen aus Tabelle 4.3.2 und bezieht sich auf den Gletscherbereich oberhalb von 2500 m Seehöhe. In Tabelle 4.4.1 finden sich die 1890 auf Grund der T(NS)-Sum bis 1890/91 extrapolierten mittleren spezifischen Massenbilanzen des Wurtenkeeses sowie deren aufsummierte Werte. Die Abbildung 4.4.1 zeigt für die Reihe 1890/91 bis 1991/92 neben den Einzelwerten auch geglättete Kurvenverläufe (Gauß-Tiefpaßfilterung mit einer Filterweite von 20 Jahren). Die T(NS)-Sum-Methode mit einer Ablationsperiode von Mai bis September hat sich im Vergleich mit den Werten der gedächlichen Methode (vergl. Abschnitt 4.5) als die bestangepaßte herausgestellt. Die Vergleiche mit den anderen drei Methoden, sowie mit der verlängerten Ablationsmethode von Mai bis Oktober sind detailliert in HAMMER, 1993, enthalten.

In der Abbildung 4.5.1 sind die aufsummierten mittleren spezifischen Massenbilanzen, rückgerechnet bis 1890/91, graphisch aufbereitet. Sehr gut ist der relativ geringe Massenverlust zwischen 1890 und 1910 zu erkennen, ebenso der Gletschervorstoß um 1920 und die anschließend starke Massenabnahme von 1920 bis heute. Dabei war die stärkste Massenabnahme neben der Periode 1980/81 bis 1991/92 im Zeitraum 1940/41 bis 1952/53 zu verzeichnen. Beim Wurtenkees zeigt sich um 1940 - wenn auch nicht besonders ausgeprägt - eine kurzfristig gleichbleibende Massenbilanz sowie ein starker Massenverlust im folgenden Jahrzehnt. Eine Massenzunahme zwischen 1965 und 1980, welche bei anderen Alpengletscher beobachtet wurde, war bei diesem Gletscher aber nicht zu verzeichnen.

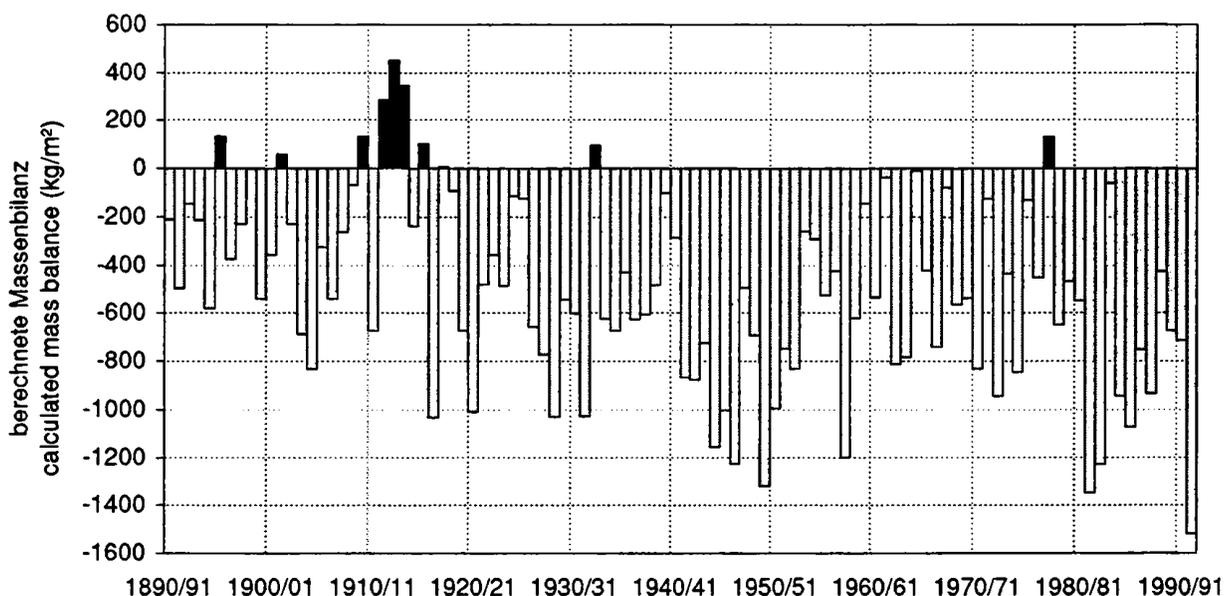


Abb. 4.4.1: Zeitreihen der mittleren spezifischen Massenbilanzen MSB (in  $\text{kg/m}^2$ ) des Wurtenkeeses, rückgerechnet mittels T(NS)-Sum, Ablationsperiode: Mai bis September

Fig. 4.4.1: Time series of mean specific mass balances MSB ( $\text{kg/m}^2$ ) of Wurtenkees, calculated with T(NS)-Sum, Ablation period May to September

**4.4.1: Mittlere spezifische Massenbilanz MSB (in kg/m<sup>2</sup>), gültig für den Gletscherbereich oberhalb von 2500 m Seehöhe, Ablationsperiode Mai bis September, berechnet mit T(NS)-Sum, MSB jährliche Werte, MSB-kum aufsummierte Werte**

**4.4.1: Recalculated mean specific mass balance of Wurtenkees (above 2500 m asl.), calculation method: T(NS)-Sum, MSB annual values, MSB-kum accumulated annual values**

Jahr Year	MSB	MSB-kum	Jahr Year	MSB	MSB-kum	Jahr Year	MSB	MSB-kum
1890		0	1924/1925	-114	-9743	1959/1960	-143	-32634
1890/1891	-211	-211	1925/1926	-124	-9867	1960/1961	-536	-33170
1891/1892	-498	-709	1926/1927	-657	-10524	1961/1962	-36	-33206
1892/1893	-148	-857	1927/1928	-774	-11298	1962/1963	-814	-34020
1893/1894	-214	-1071	1928/1929	-1031	-12329	1963/1964	-783	-34803
1894/1895	-579	-1650	1929/1930	-544	-12873	1964/1965	-9	-34812
1895/1896	133	-1517	1930/1931	-601	-13474	1965/1966	-423	-35235
1896/1897	-375	-1892	1931/1932	-1028	-14502	1966/1967	-741	-35976
1897/1898	-229	-2121	1932/1933	98	-14404	1967/1968	-81	-36057
1898/1899	-3	-2124	1933/1934	-623	-15027	1968/1969	-564	-36621
1899/1900	-540	-2664	1934/1935	-675	-15702	1969/1970	-537	-37158
1900/1901	-359	-3023	1935/1936	-431	-16133	1970/1971	-831	-37989
1901/1902	59	-2964	1936/1937	-625	-16758	1971/1972	-125	-38114
1902/1903	-231	-3195	1937/1938	-608	-17366	1972/1973	-944	-39058
1903/1904	-688	-3883	1938/1939	-484	-17850	1973/1974	-437	-39495
1904/1905	-831	-4714	1939/1940	-101	-17951	1974/1975	-846	-40341
1905/1906	-325	-5039	1940/1941	-285	-18236	1975/1976	-131	-40472
1906/1907	-539	-5578	1941/1942	-867	-19103	1976/1977	-451	-40923
1907/1908	-261	-5839	1942/1943	-877	-19980	1977/1978	131	-40792
1908/1909	-70	-5909	1943/1944	-726	-20706	1978/1979	-650	-41442
1909/1910	135	-5774	1944/1945	-1156	-21862	1979/1980	-467	-41909
1910/1911	-674	-6448	1945/1946	-1003	-22865	1980/1981	-547	-42456
1911/1912	287	-6161	1946/1947	-1225	-24090	1981/1982	-1349	-43805
1912/1913	452	-5709	1947/1948	-495	-24585	1982/1983	-1228	-45033
1913/1914	346	-5363	1948/1949	-693	-25278	1983/1984	-60	-45093
1914/1915	-237	-5600	1949/1950	-1319	-26597	1984/1985	-943	-46036
1915/1916	103	-5497	1950/1951	-995	-27592	1985/1986	-1074	-47110
1916/1917	-1033	-6530	1951/1952	-748	-28340	1986/1987	-751	-47861
1917/1918	5	-6525	1952/1953	-832	-29172	1987/1988	-933	-48794
1918/1919	-94	-6619	1953/1954	-258	-29430	1988/1989	-426	-49220
1919/1920	-675	-7294	1954/1955	-290	-29720	1989/1990	-674	-49894
1920/1921	-1008	-8302	1955/1956	-527	-30247	1990/1991	-713	-50607
1921/1922	-481	-8783	1956/1957	-424	-30671	1991/1992	-1521	-52128
1922/1923	-359	-9142	1957/1958	-1199	-31870			
1923/1924	-487	-9629	1958/1959	-621	-32491			

## 4.5 VERGLEICH MIT DEN MITTELS DER GEODÄTISCHEN METHODE BESTIMMTEN MASSENILANZEN

### 4.5 COMPARISON WITH GEODETIC MASS BALANCES

Von den Jahren 1871, 1930, 1967, 1979 und 1991 existieren Gletscherkarten, welche die gesamte Fläche des derzeit noch vorhandenen östlichen Wurtenkeeses beinhalten (BÖHM, 1984, bzw. Abschnitt 2.3 der vorliegenden Arbeit). Dort sind auch die Höhenänderungen der Gletscheroberfläche für 50 m-Höhenstufen analysiert. Damit kann eine Abschätzung der mittleren spezifischen Massenbilanz zwischen den einzelnen Terminen vorgenommen werden. Allerdings ist bei den Auswertungen nach der geodätischen Methode zu beachten, dass diese nur die geometrische Höhenänderung zwischen den Zeitpunkten der photogrammetrischen Aufnahmen beschreiben. Diese Zeitpunkte sind nicht mit dem Ende des jeweiligen Haushaltsjahres identisch. Außerdem ist eine Umrechnung der Höhenänderung in den Wasserwert nicht eindeutig möglich, weil die Dichteverteilung der abgeschmolzenen Eis-, Firn- und Schneemassen unbekannt ist.

Für die Bestimmung der aufsummierten mittleren spezifischen Massenbilanzen des Wurtenkeeses durch Kartenvergleich wurde nur der Gletscherbereich von 2500 m aufwärts berücksichtigt, weil sich die Massenbilanzwerte zwischen 1982/83 und 1991/92 auf den Gletscher von 2500 m bis zum Schareckgipfel beziehen. Die zwischen den Terminen der kartographischen Aufnahmen festgestellten Massenänderungen wurden entsprechend ihrem Flächenanteil pro 50 m-Höhenstufe gewichtet. Dabei wurden nur diejenigen Flächenanteile berücksichtigt, welche zu zwei aufeinanderfolgenden Aufnahme-terminen vom Gletscher bedeckt waren.

In Tabelle 4.5.1 ist die mittlere Höhenänderung des Wurtenkeeses für den Bereich oberhalb von 2500 m angegeben. Die dort ebenfalls angeführten Wasserwerte errechnen sich, indem man die mittleren Höhenänderungen des Gletschers mit der Eisdichte von  $0,917 \text{ g/cm}^3$  multipliziert. Diese so ermittelten Wasserwerte entsprechen, wie schon erwähnt, sicherlich nicht exakt den tatsächlichen Massenbilanzwerten, Trotz der Unsicherheiten, die sich bezüglich der Abschätzung der mittleren spezifischen Massenbilanzen anhand von Gletscherkarten ergeben, bietet sich hier aber doch eine gute Möglichkeit. Schlüsse auf die Güte der nach der Temperatursummenmethode rückgerechneten Massenbilanzen zu ziehen. Einzig der Vergleich mit den nach der geodätischen Methode bestimmten Massenbilanzen erlaubt eine Aussage darüber, mit welchen Temperatursummen die Rückrechnung der mittleren spezifischen Massenbilanzen in die Vergangenheit am genauesten ist.

**Tab. 4.5.1: Mittlere Höhenänderung  $h$  (in mm) der Gletscheroberfläche des Wurtenkeeses im heutigen Höhenbereich oberhalb 2500 m Seehöhe und abgeschätzte Änderung des Wasserwertes  $W$  (in mm) zwischen den kartographischen Terminen**

**Tab. 4.5.1: Mean height changes  $h$  (mm) of glacier surface of Wurtenkees above 2500 m and estimated changes of water equivalent (mm) between the cartographic dates**

	1871	1930	1967	1979	1991
$h$	-10703	-32822	-2202	-10955	
$W$	-9815	-30098	-2020	-10046	

Die Abbildung 4.5.1 zeigt neben den anhand der Temperatursummenmethode bestimmten Massenbilanzverlusten auch die nach der geodätischen Methode ermittelten Änderungen. Letztere wurden zwischen den Terminen der kartographischen Aufnahmen linear interpoliert.

Beim Vernagtferner wurden erstmals die aufsummierten Massenbilanzen mit den aus photogrammetrischen Aufnahmen abgeleiteten Volumenänderungen des Gletschers verglichen und über den Beobachtungszeitraum hinaus, von welchem Messungen nach der direkten glaziologischen Methode vorhanden waren, rückgerechnet (KRAUL, 1992a und b, ESCHER-VETTER, 1992). Für diesen Gletscher stimmten die Vergleichswerte jedoch nicht zufriedenstellend überein.

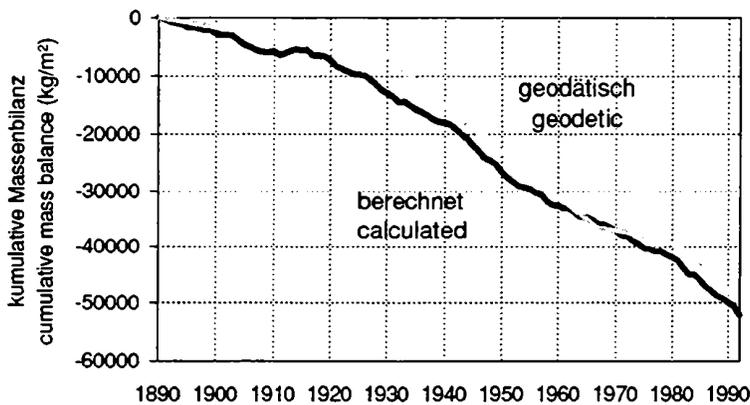


Abb. 4.5.1: Vergleich zwischen den aufsummierten mittleren spezifischen Massenbilanzen MSB (in  $\text{kg/m}^2$ ) des Wurtenkeeses, berechnet nach T(NS)-Sum bzw. nach der geodätischen Methode, 1891-1991

Fig. 4.5.1: Comparison of accumulated mean specific mass balances ( $\text{kg/m}^2$ ) of Wurtenkees, calculated (T(NS)-Sum) and geodetic, 1891-1991

Ganz anders stellt sich die Situation beim Wurtenkees dar, wo eine sehr gute Übereinstimmung erzielt wird. Bei der Rückrechnung des Massenhaushaltes kommt es zu den besten Ergebnissen, wenn die Temperatursummen für die Ablationsperiode Mai bis September verwendet werden. Die Begründung liegt darin, daß es sich bei dem Zeitraum 1982/83 bis 1991/92, für den die Regressionsanalyse durchgeführt wurde, um eine Periode gehandelt hat, in welcher das Wurtenkees im Vergleich zu früheren Jahren öfter bis in höhere Regionen schneefrei war. Außerdem trat beim Wurtenkees in den Oktobermonaten 1983 bis 1991 eine unterdurchschnittliche Zahl der Tage mit ergiebigeren Schneefällen auf. Dadurch war im Jahrzehnt, in welchem die Massenbilanz nach der direkten glaziologischen Methode bestimmt wurde, eine gegenüber früher verlängerte Ablationsperiode zu verzeichnen. Dies bedeutet, daß bei einer Rückrechnung der Massenbilanzen nach der Temperatursummenmethode als Abschmelzperiode die Monate Mai bis September heranzuziehen sind, wohingegen bei Extrapolation in die Zukunft unter der Annahme einer Temperaturerhöhung dafür eher die Monate Mai bis Oktober zu verwenden wären.

Werden als Ablationsperiode die Monate Mai bis Oktober herangezogen, so zeigen die nach der Temperatursummenmethode rückgerechneten aufsummierten Massenbilanzen zu niedrige Werte an. Dagegen ergeben sich unter Zugrundelegung der Monate Mai bis September als Abschmelzperiode Massenverluste, die bis 1891 zurück ausgezeichnet mit den nach der geodätischen Methode berechneten Werten übereinstimmen.

Die Ergebnisse, welche bei der Ableitung der mittleren spezifischen Massenbilanzen des Wurtenkees anhand der Klimadaten der nahegelegenen Gipfelstation Sonnblick mittels einer Temperatursummenmethode erzielt wurden, zeigen - gestützt auf die geodätische Methode - daß es sich dabei um eine Vorgangsweise handelt, die für die Rückrechnung der Massenbilanzwerte dieses Gletschers bestens geeignet ist. Aller Voraussicht nach dürfte sich diese Methode unter Annahme einer Klimaerwärmung auch zu einer brauchbaren Abschätzung der zukünftigen Gletscherentwicklung heranziehen lassen. Die Güte der rückgerechneten sowie der in die Zukunft extrapolierten Massenbilanzwerte wird wahrscheinlich aus der Wahl der richtigen Ablationsperiode resultieren.

Die Regressionsanalysen deuten darauf hin, dass erhöhte Albedowerte, wie sie zu Beginn und Ende der Ablationsperiode und nach sommerlichen Neuschneefällen auftreten, bereits implizit in den Temperaturregistrierungen von für den Gletscher repräsentativen Stationen enthalten sind, welche höher als die Gletscherzunge liegen.

Mit Interesse dürfen die mittels der Temperatursummenmethode erzielbaren Ergebnisse für den nahegelegenen Goldberggletscher erwartet werden, wenn für diesen in einigen Jahren eine hinreichend lange Zeitreihe der Massenbilanzbestimmung nach der direkten glaziologischen Methode vorhanden ist.

## 5. SCHNEECHEMIE

### 5. SNOW CHEMISTRY

#### 5.1 EINLEITUNG

#### 5.1 INTRODUCTION

Die Eintrag von Luftschadstoffen durch Deposition stellt im hochalpinen Raum eine Gefährdung der gerade in diesem Bereich sehr sensitiven Ökosysteme dar. Insbesondere die Substanzen des "Sauren Regens", konkret anorganische Anionen und deren Neutralisation durch Kationen, sind von besonderer Bedeutung. Beim Abschmelzen der Winterakkumulation können gerade im ersten Schmelzwasser hohe Ionenladungen auftreten (Schneekristalle mit höherem Salzgehalt haben einen niedrigeren Schmelzpunkt und werden daher bevorzugt ausgewaschen). Dies wiederum kann zur Versauerung im Einzugsbereich des Gletscherabflusses führen. Eine umfassende Beobachtung der Schadstoffe ist jedoch aufgrund der schweren Zugänglichkeit der entsprechenden Region nur mit Schwierigkeiten möglich.

Während umfangreiche Daten zur sauren Deposition an Meßstellen niedriger Höhe vorliegen, sind im hochalpinen Raum nur wenig Daten vorhanden. Abgesehen von der extremen Lage liegt ein zusätzliches Problem darin, daß auf Seehöhen von 3000 m die Deposition vorwiegend in Form von Schnee erfolgt. Übliche Sammelgeräte zur Erfassung von Regen können da ungeeignet sein, insbesondere wenn sie auf geringen Betreuungsaufwand ausgelegt sind, da der Schnee oft sofort nach Deposition wieder ausgeblasen wird.

Eine einfache Möglichkeit der Probenahme ist, am Ende der Akkumulationsperiode und vor Eintritt der ersten Schneeschmelze (die selektiv ionische Bestandteile auswaschen würde) aus der Akkumulationsschicht eines Gletschers schichtweise Proben zu ziehen und entsprechend auf Ionen zu analysieren. Im Gegensatz zu Proben, die als Bohrkern von polaren Gletschern oder bedeutend höher gelegenen Gletschern des Alpenraumes (ca. 4500 m, vgl. WAGENBACH et al., 1988) gewonnen werden, ist aufgrund des Schmelzvorganges hier lediglich die Untersuchung des vorangegangenen Winterhalbjahres möglich. Im Idealfall erhält man dabei ein Schichtprofil, das von unten nach oben die einzelnen Niederschlagsereignisse, also die nasse Deposition, aber auch dazwischen die trockene Deposition über das Winterhalbjahr widerspiegelt. Dies entspricht genau dem Bereich, der insbesondere durch die erste Schneeschmelze des Frühjahres ausgewaschen wird und zum erwähnten Ionenschub führt. Voraussetzung für die Auswertbarkeit des Schichtprofils ist jedoch die stratigraphisch konsistente Speicherung des deponierten Schnees. In der Praxis finden jedoch auch starke Verfrachtungen statt, also Ab- und Anwehungen von Schnee, die zu Umlagerungen innerhalb eines derartigen Profils führen können. Die Auswahl eines geeigneten, repräsentativen Meßortes ist also essentiell, wo Verfrachtungen nur in verhältnismäßig geringem Maße auftreten. Die Tatsache, daß derartige Profile über mehrere Monate erhalten bleiben können, wurde bereits gezeigt (BALTENSBERGER et al., 1993, SCHÖNER et al., 1993).

Der Transport der Luftschadstoffe in die hochalpinen Regionen (über 3000 m Seehöhe) kann prinzipiell sowohl durch Einmischung von Luftmassen aus niedrigeren Luftschichten (lokale Belastung) als auch aus Ferntransport erfolgen. Mit Hilfe der Untersuchung der sauren Komponenten im Schnee können Hinweise sowohl auf die Bedeutung von Transportvorgängen und chemischen Reaktionen gefunden als auch Informationen über Bildungsmechanismen und Ursachen der anthropogenen Belastungen in den hochalpinen Regionen gesammelt werden.

Ähnliche Studien von Tiefenprofilen von Gletschern wurden im Alpenraum von DELMAS et al., 1988, von BALTENSBERGER et al., 1993, sowie von PSENNER und NICKUS, 1986, bereits durchgeführt. Ergebnisse von WAGENBACH et al., 1988, sowie von SCHOTTERER et al., 1985, zeigen, daß die Konzentrationen von Anionen im Laufe der letzten 30 Jahre im Monte Rosa-Massiv, Westalpen, in 4500 m Höhe angestiegen sind. In den vergangenen Jahren wurde die Probenahme im Rahmen des internationalen Projektes ALPTRAC alpenweit koordiniert durchgeführt, um direkte Vergleiche zwischen verschiedenen Standorten ziehen zu können. Während in bisherigen Arbeiten mehr oder weniger die Einzelsituation ausgesuchter Winter behandelt wird, soll im folgenden erstmals eine längere Zeitserie von Gletscher-Tiefenprofilen behandelt werden.

## 5.2 PROBENAHME UND ANALYTIK

### 5.2 SAMPLING AND ANALYTICAL METHODS

Im Rahmen des Projektes Wurtenkees wird die Massenbilanz dieses Gletschers seit 1982 nach der glaziologischen Methode untersucht, wobei in Meßschächten die physikalischen Parameter des Schnees bestimmt wurden. Die Auswahl von einzelnen Schächten für die Probenahme von Schnee zur chemischen Analyse erfolgte anhand der Daten aus der Massenbilanz. Für die Bilanz der chemischen Komponenten ist die Auswahl repräsentativer Meßpunkte, die wenig von Schneeverfrachtungen beeinflusst sind, von außerordentlicher Bedeutung.

Konkret wurde aus Schächten, die für die Massenbilanz bis zum Vorjahreshorizont gegraben wurden, Proben im Abstand von 10 cm gezogen (Ausnahme: für 1983 erfolgte die Probenahme im Abstand von 50 cm). Der Vorjahreshorizont ist eine deutlich erkennbare Eisschicht, an der sich die trockene Deposition von Staub im Sommer des Vorjahres akkumuliert hat und die daher auch von einer Schmutzschicht angezeigt wird. Für jedes Jahr wurden aus mindestens einem Schacht Proben analysiert, bis 1986 wurden Proben aus mehreren Schächten des Gletschers bestimmt.

Als Zeitraum für die Probenahme wurde jeweils Anfang Mai gewählt, die für die Massenbilanz notwendigen Arbeiten waren jeweils innerhalb weniger Tage abgeschlossen. Im Mai findet sich jeweils das Maximum der winterlichen Schneeakkumulation, und auf 3000 m Seehöhe ist üblicherweise noch kein Schmelzereignis zu verzeichnen. Der Zeitraum, der also mit einer Probenahme abgedeckt werden kann, umfaßt die Akkumulationsperiode von etwa Oktober bis Mai. Alle Jahresangaben beziehen sich hier auf das Jahr der Probenahme, auch wenn die Akkumulation bereits im jeweiligen Vorjahr beginnt.

Um Kontaminationen zu vermeiden, erfolgte die Probenahme unter Verwendung von Atemschutz und Schutzhandschuhen und einer mit destilliertem Wasser gespülten Spachtel oder eines ebenso gereinigten Stecheisens. Die Proben wurden in saubere (unverwendete) PE-Kunststoffsäckchen bzw. PE-Fläschchen eingefüllt und ohne Unterbrechung der Kühlkette gefroren nach Wien transportiert. Die Lagerung der Proben bis zur Analyse erfolgte in Tiefkühltruhen.

Alle Proben wurden im gleichen Labor an der TU Wien analysiert. Die eigentliche Analyse erfolgte möglichst umgehend nach dem Auftauen der Proben, also innerhalb längstens 24 Stunden. Die Proben wurden für verschiedene Analysenstraßen abgefüllt. Aufgrund der langen Dauer der Untersuchungsserie wechselten die für die Probenahme und Analytik verantwortlichen Personen. Wegen gerätetechnischer Verbesserungen wurden im Laufe der Zeit auch verschiedene Methoden eingesetzt und eine unterschiedliche Anzahl an Parametern bestimmt. Daten für anorganische Anionen (Chlorid, Nitrat, Sulfat) sowie für pH und Leitfähigkeit sind für alle Jahre vorhanden. Einwertige anorganische Kationen (Natrium, Ammonium, Kalium) wurden ab 1985 bestimmt, Calcium und Magnesium nur 1987, 1992 und 1993.

Die Bestimmung des pH erfolgte mittels einer Einstab-Glaselektrode (INGOLD) und einem pH-Meter (SEIBOLD). Die Leitfähigkeit wurde mit einer Leitfähigkeits-Meßzelle (PHILIPS) gemessen. Ab 1991 wurden beide Parameter automatisiert in einem Flow-Injection Analysator (FIA, Mursch-Radlgruber 1990) bestimmt, dessen Meßanordnung ebenfalls eine Leitfähigkeitszelle und eine Glaselektrode enthält. Vorteil dieser automatisierten Methode sind neben der kürzeren Analysenzeit die bessere Reproduzierbarkeit und geringere Kontaminationsanfälligkeit infolge der geringeren Anzahl von Manipulationsschritten.

Anionen wurden mittels konventioneller suppressierter Anionenchromatographie (Dionex D10 mit Säule AS 1 bzw. Dionex QIC mit Säule AS 3, Eluent in jedem Fall  $\text{NaHCO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$  Pufferlösung) bestimmt, einwertige Kationen mit Kationenchromatographie in der Säulentechnik (System WESCAN,  $\text{HNO}_3$  als Eluent), zweiwertige Kationen mittels Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie (AAS, Perkin-Elmer). Sowohl Ionenchromatographie als auch AAS und FIA waren mit automatischen Probewechsler ausgerüstet, um die Kontaminationsgefahr zu minimieren. Die Nachweisgrenzen für die jeweiligen Ionen sind in Tabelle 5.2.1 angegeben.

Tab. 5.2.1: Nachweisgrenzen der Analyseverfahren (in  $\mu\text{eq/l}$ )Tab. 5.2.1: Threshold values of the analytical methods ( $\mu\text{eq/l}$ )

Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Na	NH <sub>4</sub>	K	Ca	Mg
0.6	0.3	0.6	0.9	1.1	0.8	0.1	0.28

Alle verwendeten Methoden sind als Standardmethoden zu bezeichnen, und werden (mit Ausnahme der FIA) im gleichen Labor u.a. routinemäßig zur Analyse von Regenproben eingesetzt.

### 5.3 KONTROLLE DER ANALYSENQUALITÄT

#### 5.3 QUALITY CONTROL OF ANALYSES

In allen Proben, wo sowohl Anionen als auch Kationen bestimmt wurden, kann die Ionenbilanz überprüft werden. Die Elektroneutralitätsbedingung verlangt, daß die Summe der Anionen gleich der Summe der Kationen ist. Bei sauren Proben wird die Kationensumme von der Konzentration an H<sup>+</sup>-Ionen dominiert, d.h. daß die pH Bestimmung einen großen Anteil an der Analysenqualität nimmt.

Als Kationen wurden H<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> und Mg<sup>2+</sup> in Betracht gezogen. Das Fehlen von Analysendaten für Calcium und Magnesium wirkt sich nur beschränkt auf die Bilanz aus, da diese Ionen im allgemeinen nur einen geringen Beitrag zur Kationensumme liefern. Lediglich bei Ereignissen mit stark erhöhter Staubbelastung (Saharastaub: MAUPETIT et al., 1992) wäre ein nicht unerheblicher Anteil dieser zwei Ionen zu erwarten. Bei den Anionen wurden Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, OH<sup>-</sup> und HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> berücksichtigt, wobei OH<sup>-</sup> über den pH-Wert und das Ionenprodukt des Wassers berechnet wird, und Hydrogencarbonat aus dem pH-Wert, der atmosphärischen CO<sub>2</sub> Konzentration und den entsprechenden Gleichgewichtskonstanten. Die Berechnung zeigt, daß die beiden Ionen, wo vorhanden, nur vernachlässigbar kleine Beiträge zur Anionensumme liefern.

Abweichungen der Ionenbilanz können nur zum Teil durch nicht gemessene Komponenten erklärt werden, was z.B. zur Unverwendbarkeit der Methode bei den Daten vor 1986 führt, wo ja keine Kationen bestimmt wurden. Für die wenigen Fälle, wo Saharastaub eine Rolle gespielt haben mag, wird sicher ein Defizit an Kationen zu beobachten sein. Weitere, nicht bestimmte Komponenten sind die Anionen Formiat und Acetat, die etwa von MAUPETIT, 1992, in Gletscherproben der Alpen nachgewiesen werden konnten. Durchgeführte Stichproben der hier behandelten Proben zeigten jedoch durchwegs Konzentrationen von Formiat und Acetat unter der Nachweisgrenze.

Für den Fall von präzise durchgeführten Analysen müßten also Summe der Kationen und Summe der Anionen übereinstimmen. Wo dies nicht der Fall ist, muß ein Fehler vorliegen. Die stärkste Auswirkung hat dabei ein Fehler der pH-Bestimmung, insbesondere bei stark sauren Proben, wo ein Großteil der Kationen durch die H<sup>+</sup>-Ionen geliefert wird.

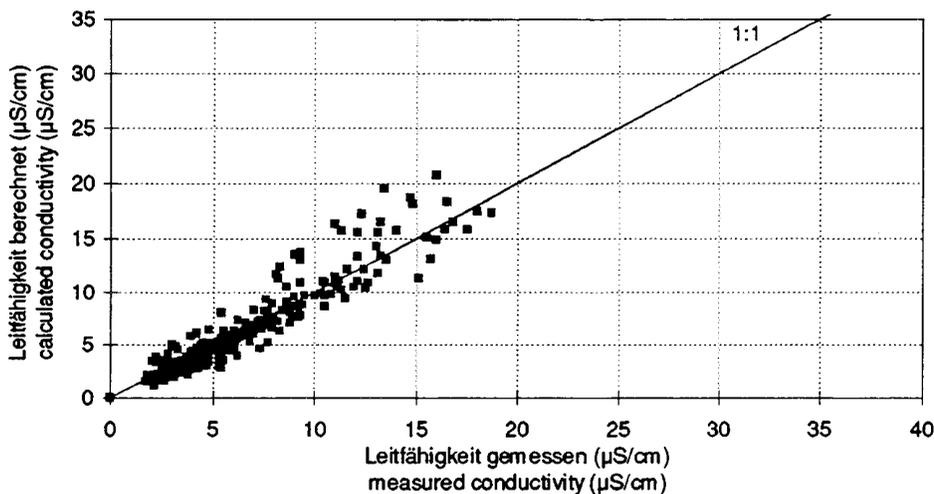
Analog zur Ionenbilanz kann auch die gemessene und die berechnete Leitfähigkeit verglichen werden. In wäßrigen ionischen Lösungen ergibt sich die Gesamtleitfähigkeit aus den Beiträgen der einzelnen Ionen. Die Äquivalentleitfähigkeiten der einzelnen Ionen sind Stoffkonstanten, die multipliziert mit der jeweiligen Konzentration eben den spezifischen Beitrag eines Ions ergeben. Alle diese Beiträge summiert müssen der gemessenen Leitfähigkeit entsprechen.

Für die Berechnung der Leitfähigkeit wurden die gleichen Ionen herangezogen wie für die Ionenbilanz. Genauso wie dort fallen die fehlenden Kationen Calcium und Magnesium im allgemeinen nicht ins Gewicht. Noch stärker von Bedeutung ist jedoch die Konzentration der H<sup>+</sup>-Ionen, da deren Äquivalentleitfähigkeit bedeutend höher als die der anderen Ionen ist. Besonders bei sauren Proben kann der Beitrag der H<sup>+</sup>-Ionen für die Leitfähigkeit 90% übersteigen.

Die Auswertung der Abweichungen wurde folgendermaßen durchgeführt: Abweichungen in der Leitfähigkeit, nicht aber bei der Ionenbilanz deuten auf Fehler der Leitfähigkeitsbestimmung hin - der Wert wurde gestrichen. Abweichungen bei beiden Vergleichen in die gleiche Richtung bedeuten, daß die pH-Messung fehlerhaft ist. In allen anderen Fällen von Abweichungen wurden die einzelnen Meßdaten überprüft. Bei Auffälligkeiten (z.B. Nitrat zehnmal so hoch wie in Vergleichsproben, alle anderen Konzentrationen im üblichen Bereich) wurde dieser eine Wert gestrichen, sonst alle Daten. Als abweichend wurde bei der Leitfähigkeit ein Abweichung von mehr als 50% des berechneten Wertes vom gemessenen betrachtet, falls diese Differenz größer 2 mS war. Für die Ionenbilanz galt, bezogen auf die Ionensumme, eine Differenz größer als 30% und mindestens 10 mmol als Kriterium.

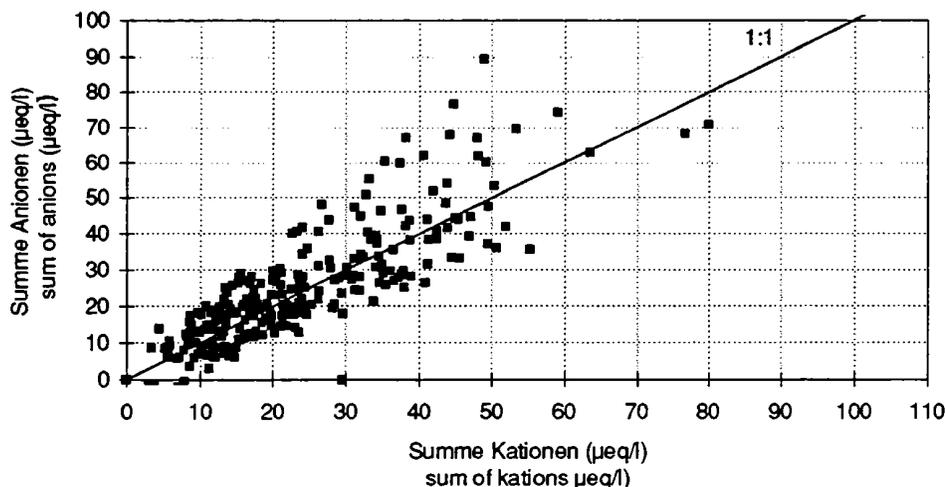
Durch die so angelegten Kriterien wurden von ursprünglich 679 Datensätzen 27 pH-Bestimmungen, 34 Leitfähigkeitsmessungen und 47 Gesamtproben aus der weiteren Berechnung eliminiert. Die Elimination der Gesamtproben konnte jedoch nur aus den statistischen Auswertungen erfolgen. Für die Summenberechnungen (insbesondere Depositionssummen) war der Ausschluß nicht gerechtfertigt, um nicht eine systematische Abweichung der jahresweisen Vergleiche zu verursachen, da über einige Jahre keine derartige Bilanzierung möglich war.

Abbildung 5.3.1 und 5.3.2 zeigen Ionenbilanz und Leitfähigkeitsbilanz nach Bereinigung der Daten. Die erzielte Übereinstimmung kann als zufriedenstellend bewertet werden. Auch die Anzahl der aufgrund der Bilanzen eliminierten Datenpunkte liegt im angemessenen Bereich, betrachtet man die niedrigen Konzentrationen in den Proben.



**Abb. 5.3.1:**  
Qualitätskontrolle -  
Leitfähigkeitsbilanz

**Fig. 5.3.1:**  
Quality control -  
conductivity balance



**Abb. 5.3.2:**  
Qualitätskontrolle -  
Ionenbilanz

**Fig. 5.3.2:**  
Quality control -  
ionic balance

Es muß betont werden, daß auf die hier beschriebene Weise lediglich Fehler und Kontaminationen nach der Auftrennung der Probe für die verschiedenen Analysensysteme aufgefunden werden können. Artefakte, die bei der Sammlung, beim Transport und bei der Lagerung auftreten, führen lediglich zu einer Neueinstellung der Gleichgewichte und einer den Bilanzen vollkommen entsprechenden Änderung der Konzentrationen, wären daher unauffällig. Das betrifft auch die Möglichkeit eventuell in den Gletscherproben ursprünglich vorhandener organischer Anionen (siehe MAUPETIT, 1992). Falls diese Ionen, die in den Proben nicht gefunden werden konnten, im Laufe des Transportes und der Lagerung zerfallen sind, würde sich keine Spur in Ionen- und Leitfähigkeitsbilanz zeigen. Der Anionenmangel in der Ionenbilanz kann daher keinesfalls als Hinweis auf das ursprüngliche Vorhandensein dieser Ionen verwendet werden.

#### **5.4 UNTERSUCHUNG MÖGLICHER KONTAMINATIONEN IM LABOR**

#### **5.4 POSSIBLE CONTAMINATIONS IN THE LABORATORY**

Die Luft im Labor enthält gewöhnlich eine wesentlich größere Menge an Spurenstoffen als die reine Atmosphäre in den hochalpinen Regionen. Auch bei relativ geringen Expositionszeiten im Labor besteht die Gefahr, daß insbesondere Ammoniak die Proben kontaminieren kann. Derartige Effekte wurden von SAIGNE et al., 1987, für Polareisproben auch schon beschrieben.

Die für derartige Kontaminationen kritische Periode ist das Aufschmelzen der Probe bis zum Einbringen in ein verschlossenes Analysengefäß. Zwei Arten von Untersuchungen wurden angestellt.

Im ersten Versuch wurde destilliertes Wasser sowie verdünnte Salzsäure sowie verdünnte Ameisensäure mit pH-Werten zwischen 3 und 5 in PE-Säckchen abgefüllt, zu den auftauenden Gletscherproben gestellt und analog zu diesen weiterbehandelt. Alle Säckchen waren verschlossen, um den Luftaustausch mit der Umgebung auf ein Minimum zu beschränken. Die Analyse dieser Blindproben auf Kationen, seit 1988 in dieser Form durchgeführt, wies keine Kontamination mit Ammoniak auf.

In einem weiteren Experiment wurden destilliertes Wasser und verdünnte Schwefelsäure (pH 4 bis 5) offen der Laborluft ausgesetzt. In den angesäuerten Proben konnten bereits nach sechs Stunden Ammoniakkonzentrationen von knapp 1 m festgestellt werden. Während hier die Konzentrationen bei allen Proben etwa gleich hoch waren, kam es bei weiterer Exposition von insgesamt 24 Stunden zu Zunahmen, die für die sauren Proben am stärksten war und 1,5 bis 5 m erreichten. Dies deutet auf eine allerdings zu erwartende pH Abhängigkeit der untersuchten Kontamination hin. Die Größe der Kontamination nach 6 Stunden bzw. bei pH 5, was dem pH der Mehrzahl der Gletscherproben entspricht, liegt im Bereich der niedrigen gefundenen Ammoniakwerte für Gletscherproben, aber bei nur etwa 20 % der Durchschnittswerte.

Für den Fall der offenen Exposition der Proben, die allerdings weitgehend vermieden wurde, besteht tatsächlich die Gefahr einer Kontamination, und zwar abhängig vom pH dieser Probe: je saurer die Probe, desto eher Kontamination. Während der dadurch verursachte Fehler in Einzelfällen niedriger Ionenladung von Bedeutung sein könnte, kann der Effekt für die große Anzahl der hier behandelten Proben sicher vernachlässigt werden. Die Kontamination im Labor dürfte also keine Effekte auf die Ergebnisse haben.

#### **5.5 REPRODUZIERBARKEIT DER ERGEBNISSE**

#### **5.5 REPRODUCTIVENESS OF RESULTS**

Einen guten Überblick über die Qualität der Probenbehandlung von der Probenahme bis zur Analytik gibt die Verwendung von Doppel- und Mehrfachbestimmungen. Für die Jahre 1983 - 1986 wurden in unregelmäßigen Abfolgen aus einem Schacht aus bestimmten Schichten Drei- Vier- oder sogar Fünffachproben gezogen. In diesen Fällen konnte jeweils Mittelwert und Standardabweichung bestimmt

werden, die durchschnittliche relative Standardabweichung der Proben ist in Tabelle 5.5.1 angeführt. Für 1987 existieren für alle Proben Doppelbestimmungen. Die Abweichung wurde hier als mittlere Differenz vom Mittelwert jedes Datenpaares bestimmt, was nicht ganz ident zur Standardabweichung ist. In den Jahren nach 1987 erfolgten Mehrfachbestimmungen lediglich für den nahegelegenen Goldberggletscher/Sonnblick (siehe auch WINIWARTER et al., 1992). Der Vergleich der Doppelbestimmungen und der Mehrfachbestimmungen deutet im Zusammenhang mit den erwähnten neueren Daten darauf hin, daß die relativ großen Unterschiede bei der Mehrfachbestimmung zum Teil auf ungenaue Probenahme erfolgt ist. Erst in den neueren Proben wurde nicht nur auf die Tiefe in cm Rücksicht genommen, sondern verstärkt auch auf den Verlauf der Schichten geachtet. Da diese Schichten nicht völlig eben verlaufen, dürften bei den alten Mehrfachbestimmungen zum Teil verschiedenartige Proben genommen worden sein.

**Tab. 5.5.1: Reproduzierbarkeit der Probenahmen (Abweichungen in %)**

**Tab. 5.5.1: Reproductiveness of sampling (deviations in %)**

	H	Leitf. conduc.	Na	NH <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>
Mehrfachbestimmungen multiple analyses	26	23	N.A.	N.A.	38	24	28
Doppelbestimmungen double analyses	15	8	29	27	25	14	9

## 5.6 ÖRTLICHE UND ZEITLICHE REPRÄSENTATIVITÄT 5.6 SPATIAL AND TEMPORAL REPRESENTATIVENESS

Wie bereits erwähnt, kommt der richtigen Auswahl der Meßschächte am Gletscher große Bedeutung zu. Wie sehr nun ein einzelner Meßpunkt repräsentativ für das ganze Gebiet ist, oder anders formuliert, wie variabel die Schneeeinhaltsstoffe über den Gletscher verteilt sind, kann durch Vergleich verschiedener Schächte abgeschätzt werden. Dazu herangezogen wurden die Daten der Jahre 1983 bis 1986, wo jeweils mehrere Schächte beprobt wurden.

Nun wirken sich aber einzelne Depositionereignisse ungleich stark auf verschiedene Stellen des Gletschers aus. Eine einzige Ungleichmäßigkeit kann dazu führen, daß zwei Schächte versetzt miteinander verglichen werden, d.h. daß womöglich überhaupt keine Übereinstimmung gefunden wird, wenngleich sie in Wirklichkeit vorhanden ist. Aus diesem Grund wurden die Tiefenprofile nicht schichtweise, aber auch nicht normiert miteinander verglichen, sondern es wurde von jedem Schacht der Mittelwert des oberen, des mittleren und des unteren Drittels gebildet. Diese Drittelwerte wurden dann miteinander verglichen und wieder eine mittlere relative Standardabweichung bestimmt (siehe Tabelle 5.6.1). Die hier gefundenen Abweichungen von 30 bis 40 %, bezogen auf Schachtdrittel, beruhen auf der natürlichen Variabilität und stellen keine Meßfehler dar. Werden jedoch die Gesamtdositionen einer Akkumulationsperiode miteinander verglichen, können sich Abweichungen teilweise aufheben und der relative Fehler verringert sich. Hier war allerdings die Zahl vergleichbarer Schächte zu gering, um eine derartige Auswertung sinnvoll erscheinen zu lassen.

**Tab. 5.6.1: Örtliche Repräsentativität der Probenahmen (Abweichungen in %) bezogen auf Schachtdrittel**

**Tab. 5.6.1: Spatial representativeness of sampling (deviations in %) in relation to pit-thirds**

H	Leitf. conduc.	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>
34	30	35	43

Ebenso wie die Frage nach der räumlichen Verteilung der Schneehaltsstoffe stellt sich die Frage nach der Relation der hier gesammelten Winterdeposition zur jährlichen Deposition. Die Winterdeposition, wie sie hier bestimmt wird, ist von Bedeutung für den Ionenschub bei Schneeschmelze im Frühjahr. Für die Jahresdeposition muß dagegen noch der sommerliche Niederschlag in Betracht gezogen werden. Da die Daten aus dem Regensammler des Sonnblickobservatoriums (PUXBAUM und KOVAR, 1990) nicht direkt vergleichbar sind, können nur Niederschlagsdaten zur ersten Abschätzung herangezogen werden. Tab 5.6.2 zeigt die Mittelwerte der Niederschlagsmengen Sommer/Winter der Jahre 1988-1991 sowie des 30jährigen Mittels für die Stationen Sonnblick (SOB) und Villacher Alpe (VIA). Als Winter wird hier die Periode 1. Oktober des Vorjahres bis 30. April verstanden, was etwa der verwendeten Akkumulationsperiode entspricht, Sommer ist dann die Zeit von 1. Mai bis 30. September. Die Daten zeigen, daß der sommerliche Niederschlag im Durchschnitt nicht ganz die winterlichen Niederschlagsmengen erreicht. Nachdem durch größere atmosphärische Durchmischung im Sommer eher etwas höhere Konzentrationen zu erwarten sind, kann für die Jahressumme der Deposition an ionischen Bestandteilen größenordnungsmäßig etwa eine Verdopplung der Winterdepositionen angenommen werden.

**Tab. 5.6.2: Niederschlag während der Ablationsperiode (Mai bis September) im Verhältnis zum Niederschlag während der Akkumulationsperiode (Oktober bis April)**

**Tab. 5.6.2: Ratio of ablation period precipitation (May to September) to accumulation period precipitation (October to April)**

	Sonnblick (SOB)	Villacher Alpe (VIA)
Mittelwert 1988-1992 mean 1988-1992	0,89	1,01
langj. Mittelwert (30 Jahre) long term mean (30 years)	0,79	0,69

## 5.7 BEZIEHUNGEN DER ANALYSIERTEN PARAMETER UNTEREINANDER 5.7 CORRELATION OF THE ANALYSED PARAMETERS

Ein schneller Überblick über das gekoppelte und entkoppelte Auftreten von je zwei Komponenten im Niederschlag kann mit Hilfe einer Korrelationsmatrix gewonnen werden. Da die Korrelationskoeffizienten wie sie üblicherweise berechnet werden (Pearson'scher Korrelationskoeffizient) stark von Extremwerten abhängen und dadurch die Ergebnisse verzerrt werden können, wurde hier der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman (BAHRENBERG et al., 1985) verwendet. Dabei werden alle vorhandenen Konzentrationen eines Ions der Größe nach geordnet, und damit jeder Probe ein Rang zugeteilt. Die Korrelation erfolgt aus den Zahlenwerten der Ränge der beteiligten Ionen.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.7.1 wiedergegeben. Auffällig hoch sind die Korrelationen zwischen Calcium und Magnesium zu Sulfat wie auch Nitrat. Dabei ist jedoch die Zahl der Datenpaare nur relativ gering. Ebenso fällt die deutliche Korrelation zwischen Ammonium und Sulfat auf, wie auch die etwas schwächere zwischen Ammonium und Nitrat bzw. Nitrat und Sulfat. Diese Komponenten sind die Hauptträger der ionischen Belastung. Ihr gemeinsames Auftreten deutet darauf hin, daß man zwischen "Reinluftereignissen" und "verschmutzten Ereignissen" deutliche Unterschiede wahrnimmt, was auf eine je nach Ereignis verschiedene Durchmischung der Luftmassen zurückzuführen sein könnte.

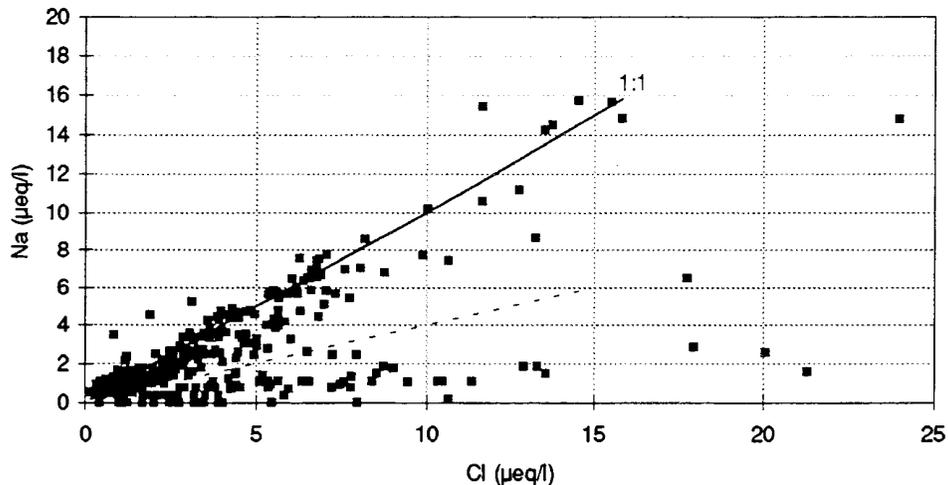
Erwartungsgemäß weist der pH-Wert einen negativen Korrelationskoeffizienten mit den Anionen, überraschenderweise auch mit Ammonium auf (negativ, da niedriger pH bei hohen Ionenkonzentrationen auftritt). Dies bedeutet, daß hohe Ammoniakkonzentrationen verstärkt bei sauren Proben zu finden sind. Als Erklärung dient wahrscheinlich die Argumentation, daß die verschmutzten Ereignisse, die viel Ammonium herantragen, gleichzeitig auch aufgrund ihrer anderen Bestandteile einen höheren Säuregrad besitzen als die Reinaltproben. Es sei allerdings angemerkt, daß die entsprechende Korrelation nur schwach, der Zusammenhang also nicht sehr ausgeprägt ist.

**Tab. 5.7.1: Rangkorrelationskoeffizienten der analysierten Ionen untereinander. Bei insgesamt 632 Proben gibt die Zahl unter dem Koeffizienten die Anzahl der Fälle wieder, bei denen aus beiden betrachteten Ionen gültige Meßwerte erzielt wurden**

**Tab. 5.7.1: Rank correlation coefficients between the analyzed ions. The number below the correlation coefficients shows those cases (out of 632) in which valid measurements of both ions were possible**

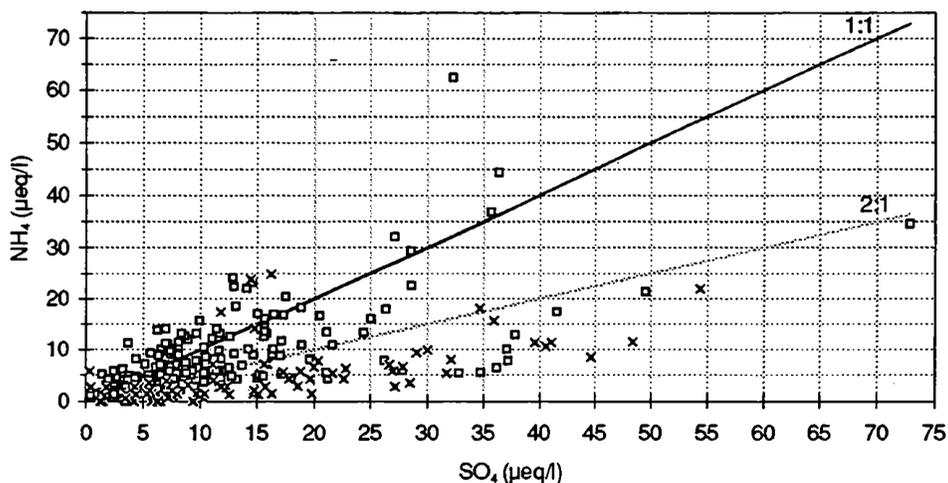
	Na	K	NH <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg
pH	0,31 281	0,31 183	-0,15 292	-0,07 598	-0,42 593	-0,51 596	-0,18 108	0,02 104
Na		0,72 205	0,1 301	0,63 308	0,06 307	-0,09 308	0,21 108	-0,03 104
K			-0,11 206	0,68 205	-0,16 205	-0,14 205	-0,01 59	-0,21 58
NH <sub>4</sub>				0,1 318	0,56 318	0,65 318	0,42 108	0,44 104
Cl					0,18 620	0,28 623	0,3 109	0,12 105
NO <sub>3</sub>						0,57 619	0,53 109	0,3 105
SO <sub>4</sub>							0,59 109	0,4 105
Ca								0,61 105

Eine zweite Überprüfung verdient der Zusammenhang zwischen Chlorid und Natrium (Abbildung 5.7.1). Hier ist eine deutliche Trennung von zwei Gruppen von Ereignissen wahrzunehmen. In einem Fall entsprechen die molaren Konzentrationen beider Ionen einander, im anderen ist die Chloridkonzentration deutlich höher (Chloridüberschuß). Die Korrelation der beiden Gruppen untereinander scheint sehr gut sein. Es scheinen also zwei Quellgruppen mit jeweils eigener Signatur vorhanden zu sein. Verstärkt wird dieses Bild durch eine Betrachtung des Sulfat-Ammonium Zusammenhanges (Abbildung 5.7.2). In der hier gezeigten Darstellung wird unterschieden zwischen den Fällen, die einem äquimolaren Natrium zu Chlorid Verhältnis entsprechen, und den Fällen mit Chloridüberschuß. Tatsächlich zeigt sich für die Fälle mit neutralem Natriumchlorid auch vorwiegend neutrales Ammonsulfat, während bei Chloridüberschuß vor allem saures Ammonsulfat (äquivalentes Sulfat:Ammonium Verhältnis 2:1) vorliegt. Eine genaue Charakterisierung der Quellgruppen ist derzeit nicht möglich. Die neutralen Fälle auf Seesalzaerosol zurückzuführen ist sicher eine unzulässige Vereinfachung, jedoch könnte Seesalz dabei eine Rolle spielen.



**Abb. 5.7.1:** Beziehung zwischen Natrium- und Chloridionen in den Einzelproben. Die Proben unter der gestrichelten Linie wurden der Gruppe mit Chloridüberschuß zugeordnet

**Fig. 5.7.1:** Relation between sodium and chloride ions of the individual samples. The samples below the dashed line were associated to the group with chloride surplus



**Abb. 5.7.2:** Beziehung zwischen Ammonium- und Sulfationen in den Einzelproben. Die mit X gekennzeichneten Daten entsprechen einem Cl/Na-Verhältnis von mehr als 2,5

**Fig. 5.7.2:** Relation between ammonia and sulphate ions of the individual samples. The samples indicated as X are associated to a Cl/Na ratio of more than 2,5

## 5.8 JAHRESZEITLICHE ABHÄNGIGKEIT DER KONZENTRATIONEN 5.8 SEASONAL VARIATION OF CONCENTRATIONS

Über die grundsätzliche Information eines Tiefenprofils wurde hier bereits gesprochen. Im Idealfall gibt ein Tiefenprofil den Verlauf der Konzentrationen über die winterliche Akkumulationsperiode wieder. Dabei befinden sich ganz unten die Niederschläge vom Herbst (ab Oktober), und ganz oben die Niederschläge des Frühjahrs (bis etwa Mai). Abbildung 5.8.1 zeigt einen typischen derartigen Verlauf. Erkennbar sind die niedrigen Konzentrationen im mittleren Bereich, während nach unten hin und

besonders im oberen Teil des Profiles höhere Konzentrationen auftreten. Gelegentlich kann die unterste Schicht die absolut höchsten Konzentrationen aufweisen, das liegt aber dann möglicherweise an Kontaminationen aus dem Bereich des Vorjahreshorizontes.

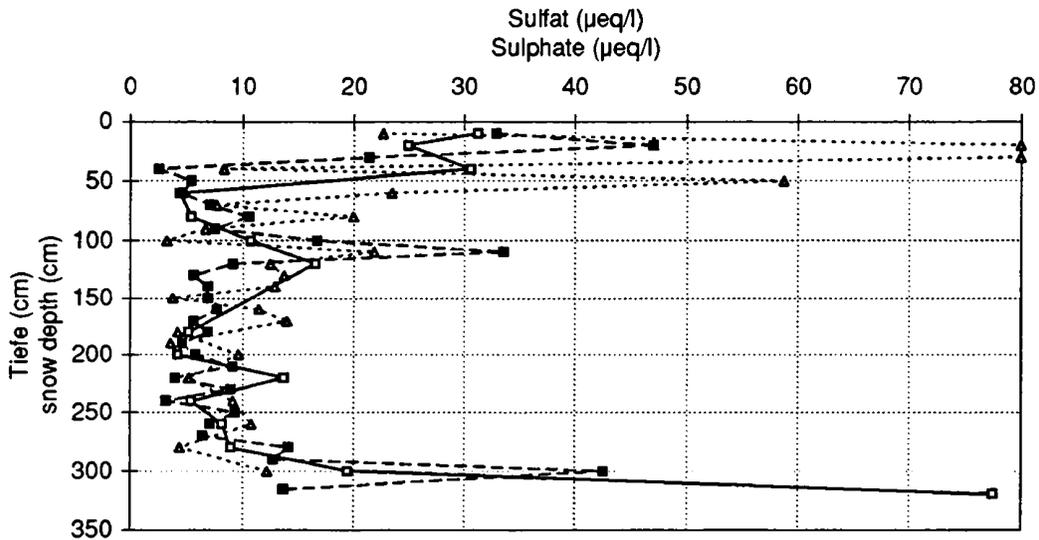


Abb. 5.8.1: Sulfatkonzentrationen in drei Tiefenprofilen der Winterschneedecke 1983/84

Fig. 5.8.1: Sulphate concentrations for three profiles of the winter snowpack of 1983/84

Um zu untersuchen, wie weit dieses Bild allgemein auftritt, wurden sämtliche Tiefenprofile der elfjährigen Periode mit Ausnahme von 1983 betrachtet. Nachdem kein Hinweis vorliegt, wo die Trennung zwischen Herbst und Winter bzw. Winter und Frühling zu ziehen ist, wurde der Schacht in drei gleiche Teile eingeteilt. Das unterste Drittel wurde jeweils als "Herbst" definiert, das mittlere als "Winter" und das oberste als "Frühjahr". Für jeden Schacht wurden die Mittelwerte für die drei Jahreszeiten gebildet, dann wiederum erfolgte die Mittelung der Konzentration in allen Schächten zu einer bestimmten Jahreszeit (Tabelle 6).

Tab. 5.8.1: Durchschnittliche Konzentrationen der einzelnen Schachtdrittel (ohne 1983) in µeq/l oder µS/cm

Tab. 5.8.1: Average concentrations of the snowpit-thirds (1983 excluded) in µeq/l or µS/cm

	Leitf.				
	H	conduc.	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>
oberstes Drittel (upper third)	13,22	8,66	8,24	11,83	14,91
mittleres Drittel (central third)	11,13	6,84	6,18	8,84	10,12
unteres Drittel (lower third)	11,61	6,62	6,12	7,41	11,03

Tatsächlich zeigt sich der erwartete Trend von niedrigsten Konzentrationen aller Ionen im Herbst und Winter, und den höchsten im Frühjahr. Dieser Trend stützt die bereits früher (s.o.) geäußerte Vermutung, daß wegen geringerer atmosphärischer Durchmischung im Winter weniger Luftinhalstoffe aus tiefen Lagen an die hochalpinen Gletscher herangetragen werden können. Nicht nur der Mittelwert, auch die Auswertung der einzelnen Jahre bestätigt diese Beobachtungen. In sieben der hier untersuchten zehn Jahre treten die höchsten Konzentrationen im Frühjahr auf, die niedrigsten Konzentrationen findet man fast gleichmäßig im Herbst und Winter.

## 5.9 LANGJÄHRIGER MITTLERER VERLAUF DER KONZENTRATIONEN UND DEPOSITIONEN

### 5.9 TIME SERIES OF CONCENTRATIONS AND DEPOSITIONS

Die hier vorliegende elfjährige Serie kann es ermöglichen, Aussagen über die Auswirkungen von Emissionsreduktionsmaßnahmen zu treffen. Generell haben sich im betrachteten Zeitraum die Emissionen von Schwefeldioxid als Vorläufer von Sulfat in Westeuropa drastisch verringert, während sie in Osteuropa im wesentlichen konstant blieben. Für Stickoxide, die für die Bildung von Nitrat verantwortlich sind, kann man in erster Näherung von konstanten Emissionen in ganz Europa ausgehen (UN-ECE, 1993).

Für den hier gezeigten Vergleich wurde alle Proben jedes Jahres einbezogen, also auch Proben mit schlechter Ionen- und Leitfähigkeitsbilanz. Eventuelle Analysenfehler sollten sich bei der großen Zahl an verwendeten Daten nur mehr geringfügig auswirken. Um den Einfluß der Extremwerte zu zeigen, wurden von den Konzentrationen sowohl die Mediane als auch die Mittelwerte berechnet (Abbildung 5.9.1 bis 5.9.3). Wenn man davon ausgeht daß die Menge an Niederschlag an einem Standort zufällig ist, müßte sich eine Änderung der Emissionen in den Konzentrationen auswirken. Tatsächlich findet man für Nitrat relativ konstante mittlere Konzentrationen im Schnee, der Höchstwert von 1984 dürfte auf wenige Extremwerte zurückzuführen sein. Bei Sulfat treten die hohen Konzentrationen, wie sie zu Beginn der Dekade zu beobachten waren, in den letzten Jahren nicht mehr auf. Deutlich sind die starken Schwankungen zu erkennen. Generell deuten die Daten aber doch auf eine kontinuierliche Abnahme hin. Für Ammonium dagegen bietet sich das umgekehrte Bild. Auch abgesehen von einem Höchstwert 1990 steigen die Konzentrationen an. Alle hier bezeichneten Unterschiede sind so deutlich, daß sie über die oben erwähnte Unsicherheit aufgrund der ungleichen Verteilung der Konzentration über den Gletscher (räumliche Repräsentativität) hinausgehen.

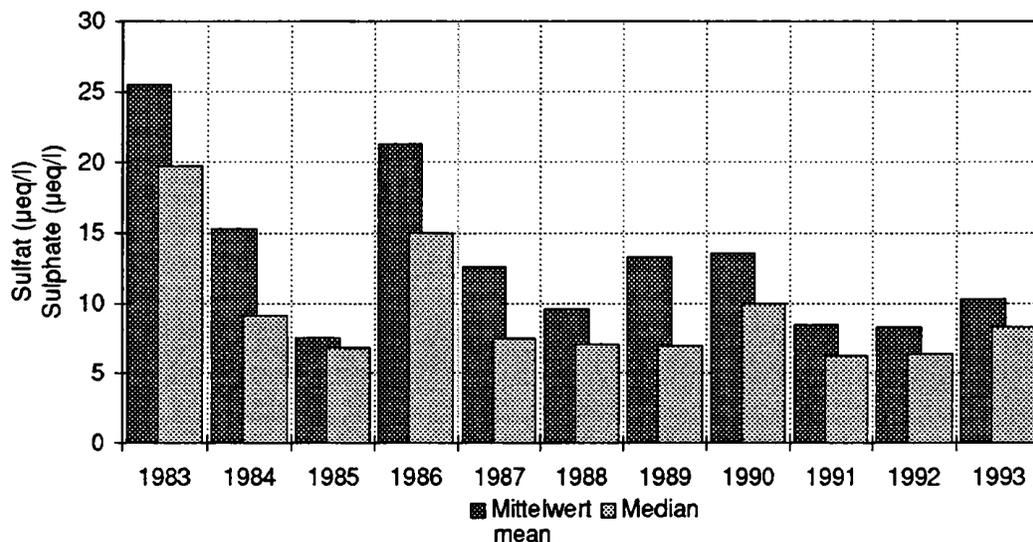
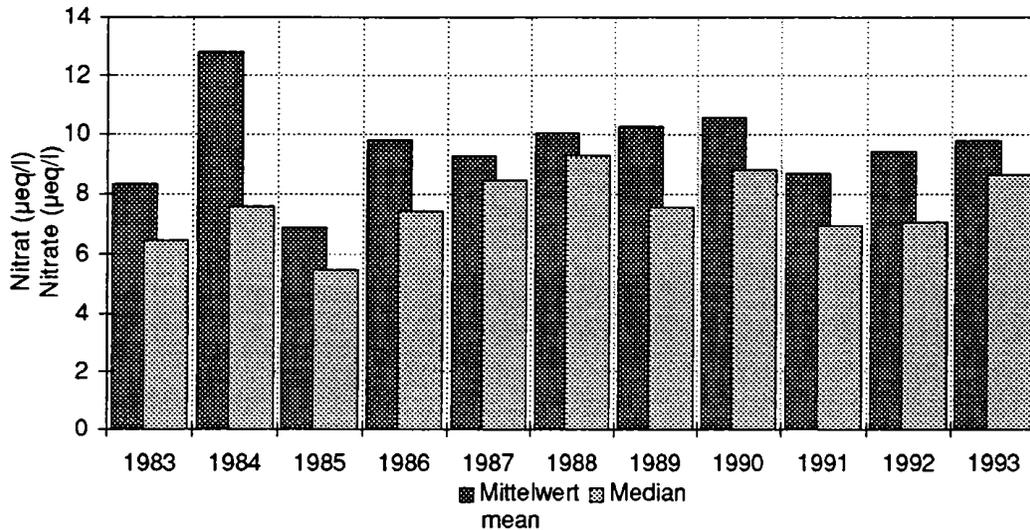


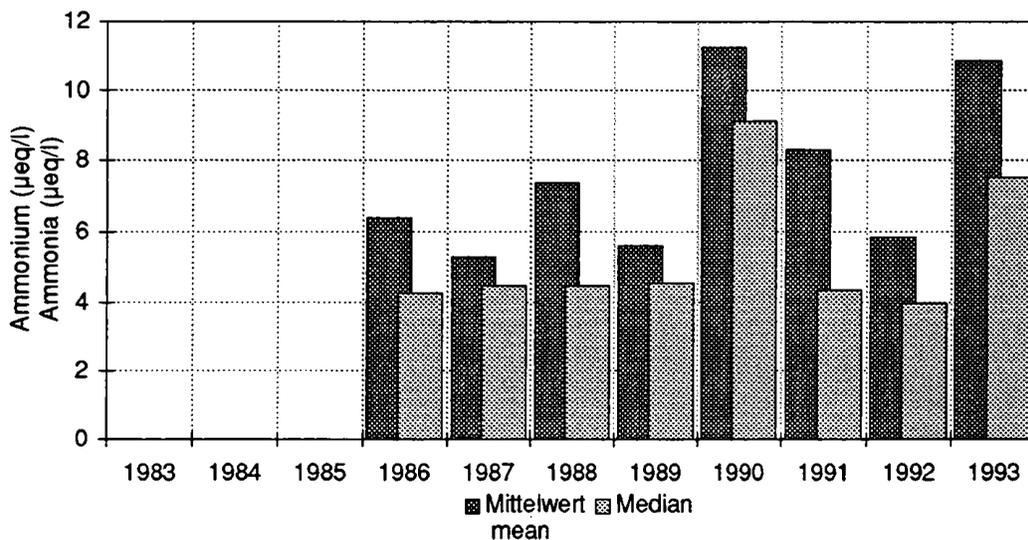
Abb. 5.9.1: Jährliche Mittel und Mediane der Sulfatkonzentration 1983-1993

Fig. 5.9.1: Annual means and medians of sulphate concentration 1983-1993



**Abb. 5.9.2: Jährliche Mittel und Mediane der Nitratkonzentration 1983-1993**

**Fig. 5.9.2: Annual means and medians of nitrate concentration 1983-1990**



**Abb. 5.9.3: Jährliche Mittel und Mediane der Ammoniumkonzentration 1986-1993**

**Fig. 5.9.3: Annual means and medians of ammonium concentration 1986-1993**

Die Deposition an Ionen wurde aus den mittleren Konzentrationen und den jährlichen Winterakkumulationen (HAMMER et al., 1992) ermittelt (Abbildung 5.9.4 bis 5.9.5). Diese Daten - hier lediglich die Deposition des Winterhalbjahres - sind für jede Art von Wirkungsforschung auf Böden und auf Pflanzen von Bedeutung. Eine Auswertung der Daten im direkten Vergleich mit europäischen Emissionen (WINIWARTER et al., 1994) weist im Rahmen der gegebenen Unsicherheiten gute Übereinstimmung des langjährigen Trends auf.

Die Deposition von Sulfat im Winter - in der Größenordnung von  $17 \text{ meq/m}^2$  oder ca.  $2,7 \text{ kg/ha S}$  - schwankt noch stärker als die Konzentration. Der Eintrag von freier Säure ( $\text{H}^+$ -Ionen) wird vor allem durch das Sulfat bedingt und folgt weitgehend dessen Verlauf. Die winterliche Gesamtstickstoff-Deposition (etwa im Bereich von  $12 \text{ meq/m}^2$  Nitrat und  $10 \text{ meq/m}^2$  Ammonium, also insgesamt ebenso etwa  $3 \text{ kg/ha N}$ ) scheint im Verlauf der Jahre leicht zunehmend, was jedoch nicht signifikant sein dürfte. Um ein Bild der Jahresdeposition zu erhalten, können diese Werte in erster Näherung verdoppelt werden. Dies entspricht dann etwa 10 bis 20% der durchschnittlichen (auf die Fläche bezogenen) Emissionen in Mitteleuropa (siehe WINIWARTER et al., 1994), was auf die Abgelegenheit des Meßortes zurückzuführen ist.

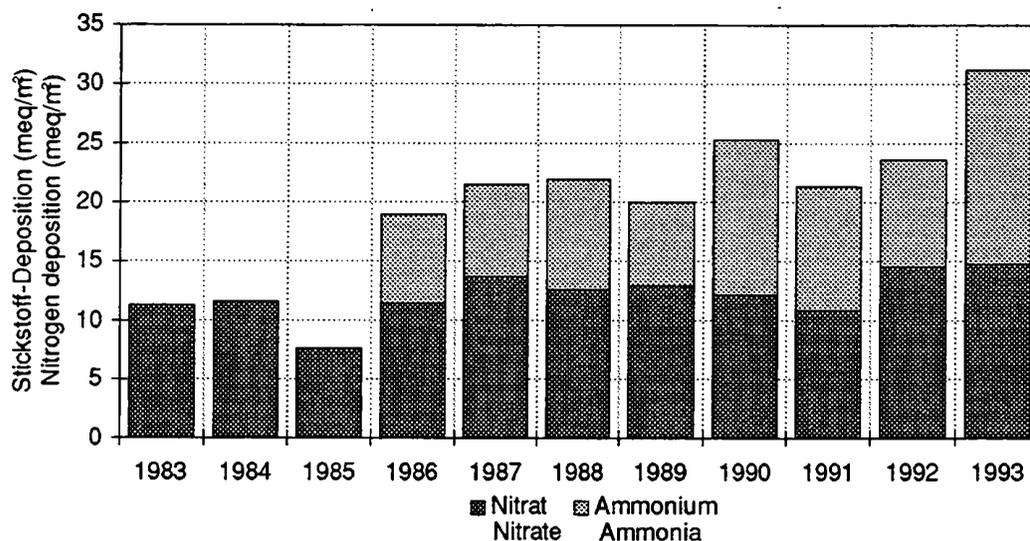


Abb. 5.9.4: Zeitreihen der winterlichen Deposition von Stickstoffkomponenten 1983-1993

Fig. 5.9.4: Time series of the winter deposition of nitrogen components 1983-1993

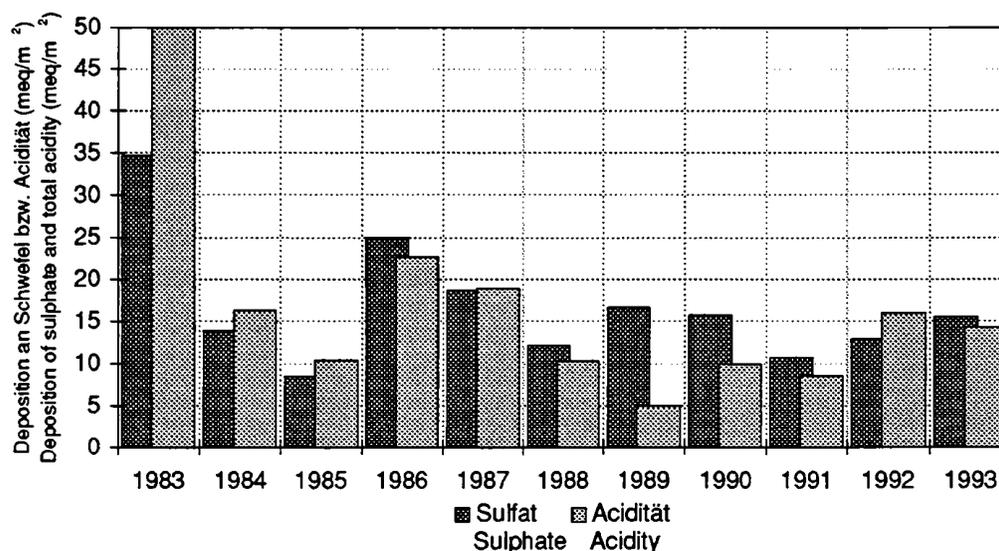


Abb. 5.9.5: Zeitreihen der winterlichen Deposition von Sulfat sowie von Gesamtacidität 1983-1993

Fig. 5.9.5: Time series of the winter deposition of sulphate and of total acidity 1983-1993

## **5.10 SCHLUSSFOLGERUNGEN**

### **5.10 CONCLUSIONS**

Die im Verlauf von zehn Jahren gesammelten Daten von ionischen Bestandteilen in Schneeproben erlauben die Charakterisierung der Proben einerseits in stark belastete und wenig belastete Ereignisse, andererseits in neutrale und saure Proben. Die Belastung der Proben läßt sich vor allem auf meteorologische Effekte (atmosphärische Durchmischung) zurückführen, die auch jahreszeitlich verschiedene Konzentration bedingt. In Übereinstimmung mit dem von RODHE und GRANAT, 1984, gezeigten Frühjahrsmaximum bei Sulfat im Regenwasser findet man die höchsten Konzentrationen im Frühjahr, die niedrigsten im Winter.

Die Azidität der Proben dürfte Rückschlüsse auf verschiedene Quellgruppen zulassen. Eine deutliche Signatur der Proben zeigt sich insbesondere beim Natrium:Chlorid-Verhältnis, was im Fall der Äquivalenz auf maritime Einflüsse deutet. Eine Zuordnung zu Quellen läßt sich derzeit aber nicht durchführen. Dazu ist eine Datierung der Deposition erforderlich, wie sie STAUDINGER et al., 1992, beschreiben.

Der langjährige Verlauf der mittleren Konzentrationen in der Winterdeposition weist in Übereinstimmung mit Emissionsdaten von Luftschadstoffen eine Abnahme von Sulfat auf, während Nitrat weitgehend konstant bleibt. Interessant ist die anscheinende Zunahme von Ammonium, für das es derzeit keine längerfristige europaweite Emissionsabschätzung gibt.

### **Danksagung**

Folgende Personen haben im Laufe der Zeit an den analytischen Bestimmungen mitgewirkt, die hier behandelt werden: Philipp Krobath, Sabina Marischka, Susi Paleczek, Michael Pimminger, Thomas Stendahl, Werner Tscherwenka, Verena Winiwarer. Dank soll auch den Studenten des Instituts für Meteorologie und Geophysik, Universität Wien, ausgesprochen werden, die sich tatkräftig an der Probenahme beteiligten. Diese Arbeit wurde zum Teil vom österreichischen Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung unterstützt (FWF-Projekt P7807 GEO) und ist ein Beitrag zum EUROTRAC-Subproject ALPTRAC.

## LITERATUR

- AUER, I., R. BÖHM und H. MOHNL, 1989: Die troposphärische Erwärmungsphase des 20. Jahrhunderts im Spiegel der 100jährigen Meßreihe des alpinen Gipfelobservatoriums auf dem Sonnblick. CIMA-88, Tagungsber., Sestola, It. (ohne Paginierung)
- AUER, I., 1991: An investigation of precipitation trends based on a raingauge and totalizer network in the Sonnblick region (950-3100 m asl.). Proceed. internat. conf. on mountainous meteorology, climatology and aerology of the lower layers of the troposphere, Stara Lesna, SK, 43-48
- AUER, I., 1992a: Die Niederschlagsverhältnisse seit 1927 im Sonnblickgebiet nach Totalisatorenmessungen, ergänzt durch Meßergebnisse von Talstationen nördlich und südlich des Alpenhauptkammes. 86.-87. Jber. d. Sonnblickver., 3-31
- AUER, I., 1992b: Ergebnisse von Niederschlagsmessungen am Sonnblick-Observatorium - ein Vergleich verschiedener Meßmethoden. 88.-89. Jber. d. Sonnblickver., 49-53
- AUER, I., 1992c: Precipitation measurements in a high Alpine region - intercomparison of different measuring systems. TECO 92, WMO/TD No. 462, 251-256, Vienna
- AUER, I., R. BÖHM und H. MOHNL, 1993a: Climatic change on Sonnblick - A multi elemental approach to describe climatic change using a centennial data set. Proc. 73rd AMS Annual Meeting, 8th Conf. Appl. Climat., Anaheim, Cal., 249-252
- AUER, I., R. BÖHM und H. MOHNL, 1993b: Die hochalpinen Klimaschwankungen der letzten 105 Jahre - beschrieben durch Zeitreihenanalysen der auf dem Sonnblick gemessenen Klimaelemente. 88.-89. Jber. d. Sonnblickver., 3-36
- AUER, I., 1995: Results of the precipitation and snow-stake network in the glacier region of Sonnblick. Proc. Symp. on Glacier Mass Balance Measurements and Reconstructions. To be published as special issue of Zeitschr. f. Gletscherk. u. Glazialgeol., Vol. 31
- AUER, I. und R. BÖHM, 1994: Combined temperature-precipitation variations in Austria during the instrumental period. Theoret. and Appl. Climat, 1994, 1-14
- BAHRENBERG, G., E. GIESE, J. NIPPER, 1985: Statistische Methoden in der Geographie, Band 1: Univariate und bivariate Statistik. Teubner Verlag, Stuttgart
- BALTENSPERGER, U., M. SCHWIKOWSKI, H. W. GÄGgeler, D. T. JOST, J. BEER, U. SIEGENTHALER, D. WAGENBACH, H. J. HOFMANN, H. A. SYNAL, 1993: Transfer of atmospheric constituents into an alpine snow field. Atmos. Environ. 27A, 1881-1890
- BÖHM, R., 1982: Das Wurtenkees in der Goldberggruppe (Hohe Tauern) - Ein Gletscher mit "anomallem" Verhalten. Ann. d. Met., N.F., 19, 270-272
- BÖHM, R., 1983: Massenhaushalt Wurtenkees - Jahresbilanz 1982/83. Wetter u. Leben, 35, H.4, 208-229
- BÖHM, R., N. HAMMER und J. STROBL, 1983: Analyse der Veränderungen von drei benachbarten alpinen Gletschern in der Goldberggruppe der Hohen Tauern seit 1930. Mitt. d. Österr. Geograph. Ges., 125, 116-151
- BÖHM, R., 1984: Monographie der Gletscher der Goldberggruppe in den Hohen Tauern, Teil 1: Das Wurtenkees, Entwicklung des Gletschers seit 1850. 79.-81. Jber. d. Sonnblickver., 3-59
- BÖHM, R., H. HAITZMANN, N. HAMMER und J. STROBL, 1984: Die Kartographie im Dienst der Gletscherforschung am Beispiel der Goldberggruppe in den Hohen Tauern. In: Kartographie der Gegenwart in Österreich, E. Arnberger (Ed.), Inst. f. Kartographie d. Österr. Akad. d. Wiss., 236-262
- BÖHM, R., N. HAMMER und J. STROBL, 1985: Massenhaushalt Wurtenkees - Jahresbilanz 1983/84. Teil A: Wetter u. Leben, 37, H.1, 37-51, Teil B: Wetter u. Leben, 37, H.2, 88-96
- BÖHM, R., N. HAMMER und J. STROBL, 1986: Massenhaushalt Wurtenkees - Jahresbilanz 1984/85. Wetter u. Leben, 38, H.4, 202-220
- BÖHM, R., 1987: Massenbilanzmessungen auf dem Wurtenkees im Sonnblickgebiet. Tagungsber. ITAM-86 in Rauris, Österr. Ges. f. Met., 61-65
- BÖHM, R. und H. MOHNL, 1987: Statistische Analysen der Schneehöhen im Gebiet des Hohen Sonnblicks. Zeitschr. f. Gletscherk. u. Glazialgeol., 23, H.1, 47-63
- BÖHM, R. u. J. STROBL, 1987: Monographie der Gletscher der Goldberggruppe in den Hohen Tauern, Teil 2: Goldberggletscher und Kleines Fleißkees. Entwicklung der Gletscher seit 1850. 82.-83. Jber. d. Sonnblickver., 3-44
- BÖHM, R., N. HAMMER und J. STROBL, 1988: Massenhaushalt Wurtenkees - Jahresbilanz 1985/86. Wetter u. Leben, 40, H.1, 43-56

- BÖHM, R., N. HAMMER u. J. STROBL, 1988: Massenhaushalt Wurtenkees - Jahresbilanz 1986/87. *Wetter u. Leben*, 40, H.4, 235-251
- BÖHM, R. und N. HAMMER, 1991: Glacier mass balance investigations in Sonnblick region, Austria. *Proc. of the intern. conf. on mountainous meteorology, climatology and aerology of the lower layers of the troposphere*, Stara Lesna SK, 49-55
- BÖHM, R., 1994: Kartometrische Daten der Vergletscherung der Goldberggruppe in den Hohen Tauern 1850-1992. *Z. f. Gletscherk. u. Glazialgeol.*, 29, H.2, 133-152
- BÖHM, R., 1994: Long term changes of glaciers in Sonnblick region in the Austrian Alps. *Proc. Symp. on Glacier Mass Balance Measurements and Reconstruction*. To be published as special issue of ZGG, Vol. 31
- BRÜCKL, E. und O. BITTMANN, 1977: Die Ergebnisse der seismischen Gletschervermessungen im Bereich der Goldberggruppe (Hohe Tauern) in den Jahren 1971 und 1972. *Arb. aus der ZAMG*, H.25, 30pp
- DELMAS, V., F. RONSEAU, R. DELMAS (1988). Chemical composition of the seasonal snowcover at a Southern French Alps Site. *Proc. of the NATO ARW "Acid deposition at elevated sites"*, Edinburgh Sept 1986, M.H.Unsworth and D.Fowler Eds., Kluwer Academic Publ., 511-516
- ESCHER-VETTER, H., 1992: pers. Mitt.
- FIBICH, F. und K. ZIRM, 1987: Nationalpark Hohe Tauern - Infrarotorthophotokarte und Bildanalyse für die Landschaftsplanung. ÖBIG, Verl. Fric u. Manz, Wien, 108pp
- FINSTERWALDER, S. u.a., 1891: *Aufruf. Mitt. d. D. u. Ö. AV.*, 8, 106-107
- FINSTERWALDER, R., 1953: Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückganges an Ostalpengletschern. *Z. f. Gletscherk. u. Glazialgeol.*, 2, 189-239
- FINSTERWALDER, R. und H. RENTSCH, 1976: Die Erfassung der Höhenänderung von Ostalpengletschern in den Zeiträumen 1950-1959-1969. *Z. f. Gletscherk. u. Glazialgeol.*, 12, 29-35
- FINSTERWALDER, R. und H. RENTSCH, 1980: Zur Höhenänderung von Ostalpengletschern im Zeitraum 1969-1979. *Z. F. Gletscherk. u. Glazialgeol.*, 16, H.1
- FINSTERWALDER, R. und H. RENTSCH, 1993: Zur Höhenänderung von Ostalpengletschern im Zeitraum 1979-1989. *Z. f. Gletscherk. u. Glazialgeol.*, Bd. 27/28, 165-172, Innsbruck
- FORMAYER, H., M. RUHSAM und W. SCHÖNER, 1994: Massenhaushalt Wurtenkees - Jahresbilanzen 1990/91 bis 1992/93. 90.-91. *Jber. d. Sonnblickver.*, 1-25
- FREEMAN, T.G., 1965: Snow survey samplers and their accuracy. *Proc. of the Annual Meeting Eastern Snow Conference*, 1-10
- GOODISON, B. E., FERGUSON, H. L. and MCKAY, G. A., 1981: Measurements and data analysis. in: *Handbook of Snow* (Gray, D.M.+ Male, D.H. eds.) Pergamon Press, Toronto, 220-235
- GRENGG, H., 1976: Wurtenkees und Hochwurtenspeicher. *Z. f. Gletscherk. u. Glazialgeol.*, 12, 105-107
- HAEBERLI, W., M. HOELZLE and H. BÖSCH, (ed.), 1994: Glacier mass balance bulletin. *Bulletin no. 3* (1992-1993). IAHS (ICSU)-UNEP-UNESCO, 80pp
- HAMMER, N., 1978-1994: Der Zustand der Gletscher im Sonnblickgebiet in den Gletscherhaushaltsjahren 1978/79 bis 1993/94. *Regelm. Publ. in: Jber. d. Sonnblickver.*
- HAMMER, N., R. BÖHM und W. SCHÖNER, 1992: Umweltverträglichkeitsprüfung Wurtenkees, Untersuchungsbereiche Klimatologie und Glaziologie. *Eigenverl. d. ZAMG*, Wien, 113pp
- HAMMER, N., 1993: Wurtenkees: Rekonstruktion einer 100 jährigen Reihe der Gletschermassenbilanz. *Z. f. Gletscherk. u. Glazialgeol.*, 29, H.1, 15-37
- HEIGEL, K., 1960: Über die Korrektur des Niederschlagsdefizits bei Verwendung von Chlorcalciumlösung in Monatstotalisatoren. *Wetter und Leben* 12, 11-12: 375-377.
- HOINKES, H., 1970: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. *Zeitschr. f. Gletscherk. u. Glazialgeol.*, 6, 37-90
- HOINKES, H. und R. STEINACKER, 1975a: Zur Parametrisierung der Beziehung Klima-Gletscher. *Rivista Italiana Geofisica*, 1, 97-104
- HOINKES, H. und R. STEINACKER, 1975b: Hydrometeorological implications of the mass balance of Hintereisferner, 1952-53 to 1968-69. *Int. Assoc. Scient. Hydrol.*, Publ. No. 104, 144-149
- KINZL, H., 1928: Die Gletscher der Sonnblickgruppe in den Jahren 1896-1928. 37. *Jber. d. Sonnblickver.*, 12-18
- KRAUL, Ch., 1992: Die Anwendung der TS-Methode auf den Vernagtferner, Klimatologische Massenhaushaltsstudie an einem Alpengletscher. *Diplomarb. für Met.*, Ludwig-Maximilians Universität München, 53pp

- KRAUL, Ch., O. REINWARTH und H. ESCHER-VETTER, 1992: Mass balance of Vernagferner/Ötztal Alps: Measured and modelled data for the period 1934/35 - 1990/91. CIMA-92, 152-155
- KRAUSGRUBER, I., 1985: Massenhaushaltsuntersuchungen mit praktischer Anwendung der geodätischen Methode auf zwei Hauptgletschern der Goldberggruppe. Diplomarbeit, Univ. Wien, Inst. f. Geographie u. Wirtschaftskunsten, 120pp, Wien
- KUHN, M. (ed.), 1979: Hintereisferner - 25 Jahre Massenhaushalt. Inst. für Met. u. Geophys. d. Uni. Innsbruck, 80pp
- LICHTENECKER, N., 1935: Neue Gletscherstudien in der Sonnblickgruppe. 44. Jber. d. Sonnblickver., 13-37
- MAUPETIT, F., 1992: Chimie de la neige de très haute altitude dans les Alpes Francaises. Dissertation, Université Paris 7
- MAUPETIT, F., R. J. DELMAS, D. WAGENBACH, K. GEIS, M. SCHWIKOWSKI, U. BALTENSBERGER, H. W. GÄGGLER, A. NOVO, G. C. ROSSI, G. BENDETTA, V. TROCKNER, U. NICKUS, M. KUHN, W. WINI-WARTER, H. PUXBAUM; 1993: Chemical Composition of Alpine Glacier Snow during 1991 SNOSP Campaign: An Overview of its Spatial Variability. In: P.M. Borrell et al. (eds.), Photo-oxidants: Precursors and Products. Proceedings of the EUROTRAC Symposium '92, pp. 757-759. SPB Academic Publishing bv, The Hague, The Netherlands
- MEISSL, K., 1985: Geodätische Einrichtung und Erstnutzung photogrammetrischer Standlinien für periodische glaziologische Untersuchungen. Diplomarbeit, TU-Wien, 83pp
- MURSCH-RADLGRUBER, G., 1990: Entwicklung eines Fließinjektionsanalysators zur Messung der Leitfähigkeit und des pH-Wertes von Hydrometeoren. Diplomarbeit, TU Wien
- ONUMA, T., 1958: On the resistance in penetrating the snow sampler 53 Kamuro type snow sampler. (in Japanese with English Abstract) Seppyo (Journal of the Japanese Society of Snow and Ice). Vol.20, No.3, 1-6
- ØSTRAN G. und M. BRUGMAN, 1991: Glacier Mass Balance Measurements, A Manual for Field and Office Work. National Hydrology Research Institute, Science Report No. 4
- PATERSON, W. S. B., 1994: Physics of Glaciers. 3rd ed., Pergamon, 480pp
- PATZELT, G., 1993: Die Gletscher der österreichischen Alpen. Zeitschrift f. Gletscherk. u. Glazialgeol., Bd. 29, H. 2, 179-193
- PENCK, A., 1897: Gletscherstudien im Sonnblickgebiete. Z. d. D. u. Ö. AV., 28, 52-71
- PSENNER, R., U. NICKUS, 1986: Snow Chemistry of a Glacier in the Central Eastern Alps (Hintereisferner, Tyrol, Austria). Zeitschr. Gletscherkunde und Glazialgeol. 22, 1-18
- PUXBAUM, H., A. KOVAR, 1990: Seasonal trend of snowfall composition at the High Alpine Observatory Sonnblick (3106 m a.s.l.). In: The EUROTRAC Annual report 1989, part 3, EUROTRAC ISS, Garmisch-Partenkirchen
- RICHTER, E., 1888: Die Gletscher der Ostalpen. Verl. Engelhorn, Stuttgart, 306pp
- RICHTER, E., 1894: Die wissenschaftliche Erforschung der Ostalpen. Z. d. DÖAV, 25, 1-94
- RODHE, H., L. GRANAT, 1984: An evaluation of sulfate in European precipitation. Atmos Environ 18, 2627-2639
- SAIGNE, C., S. KIRCHNER, M. R. LEGRAND, 1987: Ion chromatographic measurements of ammonium, fluoride, acetate, formate and methanesulfonate ions at very low levels in Antarctic ice. Anal.Chim.Acta 203, 11-21
- SCHOTTERER, U., H. OESCHGER, D. WAGENBACH, K. O. MÜNNICH, 1985: Information on paleo-precipitation on a high-altitude glacier, Monte Rosa, Switzerland. Zeitschr. Gletscherkunde und Glazialgeol. 21, 379-388
- SCHÖNER, W., 1989: Ermittlung der kurzweiligen Strahlungsbilanz des Goldberggletschers (Hoher Sonnblick) mittels digitalem Geländemodell und Stereoauswertung terrestrischer Amateuraufnahmen. Diplomarbeit Uni. Wien
- SCHÖNER, W., 1990: Massenhaushalt Wurtenkees - Jahresbilanz 1987/88. Wetter u. Leben, 42, H.2, 85-102
- SCHÖNER, W., 1991: Massenhaushalt Wurtenkees - Jahresbilanz 1988/89. 86.-87. Jber. d. Sonnblickver., 40-51
- SCHÖNER, W., 1992: Massenhaushaltsbestimmung alpiner Gletscher. Skriptum zum Gletscherpraktikum des Inst. f. Meteorologie und Geophysik, Univ. Wien, 21

- SCHÖNER, W., 1992a: Massenhaushalt Wurtenkees - Jahresbilanz 1989/90. 88.-89. Jber. d. Sonnblickver., 54-67
- SCHÖNER, W., 1992b: Ausaperungs bzw. Albedooberflächenkartierung mittels terrestrischer Photogrammetrie am Beispiel des Goldberggletschers. 86.-87. Jber. d. Sonnblickver., 32-39
- SCHÖNER, W., 1995: Schadstoffdeposition in einer hochalpinen Schneedecke am Beispiel von Wurtenkees und Goldbergkees (Hohe Tauern) Diss. am Inst. f. Geographie, Univ. Salzburg, 161pp
- SCHÖNER, W., M. STAUDINGER, W. WINIWARTER, F. PICHLMAYER, 1993: Dating of Snow Samples from Snow Pits at Sonnblick, Austrian Alps, as a Tool for Interpretation of Chemical Analysis. In: P.M. Borrell et al. (eds.), Photo-oxidants: Precursors and Products. Proceedings of the EUROTRAC Symposium '92, 753-756. SPB Academic Publishing bv, The Hague, The Netherlands
- STAUDINGER, M., W. SCHÖNER, W. WINIWARTER, A. KOVAR, 1992: Creation of a Snow Calendar and the Interpretation of the Chemical Composition in an Alpine Snow Pit. In: Proc. 22nd International Conference on Alpine Meteorology, 7-11 Sept. 1992, Toulouse, 161-164, Toulouse, France
- STEINACKER, R., 1979: Rückrechnung des Massenhaushaltes des Hintereisferners mit Hilfe von Klimadaten. Zeitschr. f. Gletscherk. u. Glazialgeol., 15, H.1, 101-104
- STROBL, J., 1983: Erfassung der Einstrahlung mit Geländemodellen. Zur Berechnung der Verteilung topographisch gesteuerter Haushaltsgrößen mittels digitaler Geländemodelle am Beispiel der Hauptgletscher der Goldberggruppe. Dissertation, Univ. Wien, 110pp
- TOLLNER, H., 1951: Die Sonnblickgletscher in den Jahren 1938-1951. 48. Jber. d. Sonnblickver., 6-18
- UN-ECE, 1993: Paper EB.AIR/R. 76
- VISCHER, D., SEVRUK, B., 1975: Die Fehler der Niederschlagsmessung. Mitt. Eidgenöss. Anst. f. d. forstl. Versuchswesen, Bd.51, H. 1, S 151-170.
- VITOVEC, W., 1988: Untersuchungen zur Schneechemie des Wurtenkeesgletschers, Diplomarbeit, TU Wien
- WAGENBACH, D., K. O. MÜNNICH, U. SCHOTTERER, H. OESCHGER, 1988: The anthropogenic impact on snow chemistry at Colle Gnifetti, Swiss Alps. Ann. Glaciol. 10, 183-187
- WEITSCHACHER, H., 1987: Die fremdenverkehrsmäßige Erschließung des Wurtenkeeses aus Sicht der Raumplanung und Wasserwirtschaft. Diplomarbeit, TU-Wien, Inst. f. Hydraulik, Gewässerkunde u. Wasserwirtschaft, 109pp, Wien
- WERNER, R., H. PUXBAUM, 1987: Variabilität von Schneehaltsstoffen auf dem Wurtenkees (Goldberggruppe) im Winter 1982/83. Wetter und Leben 39, 125-131
- WIESINGER, T., 1988: Schneetemperaturprofile in einer winterlichen Schneedecke. Diplomarbeit, Inst. f. Meteorologie, Univ. Wien, 157pp
- WIESINGER, T., 1991: Ein Schneebohrer zur Ermittlung der Wintermassenbilanz alpiner Gletscher. (a snow-sampler for winter mass-balance measurements on alpine glaciers). Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 27/28 (1991/1992), 173-178
- WIESINGER, T., 1993: Accurate measurement of snowfall - development of two innovative precipitation gages based on the analysis of existing errors. Dissertation am Inst. f. Meteorologie und Geophysik der Universität Wien. 230pp
- WIESINGER, T., 1993: Grundlagen der Schneebildung, der physikalischen Eigenschaften von Schnee, seiner Metamorphose und der Stabilität von Schneedecken. Skriptum zum Gletscherpraktikum des Inst. f. Met. u. Geophys., Univ. Wien
- WIESINGER, T., 1995: Schneephysik. Skriptum zum Gletscherpraktikum des Inst. f. Meteorologie u. Geophysik, Univ. Wien, 3. überarbeitete Auflage, 41pp
- WINIWARTER, W., W. SCHÖNER, M. STAUDINGER, H. PUXBAUM, R. BÖHM, 1992: Accumulation of Acidic Components in Snowfields in the Austrian "Hohe Tauern" region. In: The EUROTRAC Annual report 1991, part 3: ACE/GCE pp. 22-26, EUROTRAC ISS, Garmisch-Partenkirchen
- WINIWARTER, W., W. SCHÖNER, H. PUXBAUM, 1994: Ionic Contents of Wintertime deposition at an alpine glacier - results from a decade of sampling. In: Proceedings of the EUROTRAC-Symposium 1994, SPB Academic Publishing bv, The Hague, The Netherlands

# Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

bisher erschienen:

Heft	Publ.Nr	Fachgebiet	Autor	Titel und Umfang	Preis in öS
1	184	Geophysik	ECKEL, O.:	<i>Über die vertikale Temperaturverteilung im Traunsee.</i> Wien 1967, 42 S., 4 Tab., 24 Abb.	80,--
2	186	Meteorologie	STEINHAUSER, F.:	<i>Ergebnisse von Pilotballon - Höhenwindmessungen in Österreich,</i> Wien 1967, 44 S., 16 S. Tab., 28 Abb.	70,--
3	487	Geophysik	TOPERCZER, M.:	<i>Die Verteilung der erdmagnetischen Elemente in Österreich zur Epoche 1960.0.</i> Wien 1968, 18 S., 3 Tab., 10 Kartenbeilagen	vergriffen
4	190	Geophysik	BRÜCKL, E., G. GANGL und P. STEINHAUSER:	<i>Die Ergebnisse der seismischen Gletschermessungen am Dachstein im Jahre 1967.</i> Wien 1969, 24 S., 11 Abb.	50,--
5	191	Meteorologie	HADER, F.:	<i>Durchschnittliche extreme Niederschlagshöhen in Österreich.</i> Wien 1969, 19 S., 6 Tab., 1 Kartenbeilage	50,--
6	192	Meteorologie	STEINHAUSER, F.:	<i>Der Tagesgang der Bewölkung und Nebelhäufigkeit in Österreich.</i> Wien 1969, 22 S., 4 Tab., 16 Abb.	50,--
7	193	Geophysik	GANGL, G.:	<i>Die Erdbebentätigkeit in Österreich 1901-1968.</i> Wien 1970, 36 S., 11 Abb., 1 Kartenbeilage	vergriffen
8	195	Meteorologie	STEINHAUSER, F.:	<i>Die Windverhältnisse im Stadtgebiet von Wien.</i> Wien 1970, 17 S., 52 Tab., 47 Abb.	120,--
9	196	Geophysik	BRÜCKL, E., G. GANGL und P. STEINHAUSER:	<i>Die Ergebnisse der seismischen Gletschermessungen am Dachstein im Jahre 1968.</i> Wien 1971, 31 S., 7 Tab., 13 Abb.	vergriffen
10	198	Geophysik	BRÜCKL, E., G. GANGL:	<i>Die Ergebnisse der seismischen Gletschermessungen am Gefrorne Wand Kees im Jahre 1969.</i> Wien 1972, 13 S., 8 Abb., 3 Karten	50,--
11	201	Geophysik	BITTMANN, O., E. BRÜCKL, G. GANGL und F. J. WALLNER:	<i>Die Ergebnisse der seismischen Gletschermessungen am Obersten Pasterzenboden (Glocknergruppe) im Jahre 1970.</i> Wien 1973, 21 S., 9 Abb., 3 Karten	60,--
12	202	Meteorologie	STEINHAUSER, F.:	<i>Tages- und Jahresgang der Sonnenscheindauer in Österreich 1929-1968.</i> Wien 1973, 12 S., 98 Tab., 5 Abb.	110,--
13	203	Meteorologie		<i>Klimadaten des Neusiedlerseegebietes, I. Teil. Tabellen der Stundenwerte der Lufttemperatur, 1966-1970,</i> 105 Tab.	90,--
14	205	Geophysik	PÜHRINGER, A., W. SEIBERL, E. TRAPP und F. PAUSWEG:	<i>Die Verteilung der erdmagnetischen Elemente in Österreich zur Epoche 1970.0.</i> Wien 1975, 18 S., 3 Tab., 9 Kartenbeilagen	90,--
15	206	Meteorologie		<i>Klimadaten des Neusiedlerseegebietes, II. Teil. Tabellen der Stundenwerte der Relativen Feuchte, 1966-1970,</i> 105 Tab.	100,--
16	207	Meteorologie		<i>Hundert Jahre Meteorologische Weltorganisation und die Entwicklung der Meteorologie in Österreich.</i> Wien 1975, 50 S.	100,--

Heft	Publ.Nr	Fachgebiet	Autor	Titel und Umfang	Preis in öS
17	208	Geophysik	TORPERCZER, M.:	<i>Die Geschichte der Geophysik an der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.</i> Wien 1975, 24 S.	50,--
18	209	Meteorologie	CHALUPA, K.:	<i>Ergebnisse der Registrierung der Schwefeloxid-Immission in Wien - Hohe Warte, Okt. 1967-Dez. 1974.</i> Wien 1976, 62 S., 19 Tab., 24 Abb.	80,--
19	210	Geophysik	GUTDEUTSCH, R. und K. ARIC:	<i>Erdbeben im ostalpinen Raum.</i> Wien 1976, 23 S., 3 Karten	80,--
20	211	Meteorologie	TOLLNER, H., W. MAHRINGER und F. SÖBERL:	<i>Klima und Witterung der Stadt Salzburg.</i> Wien 1976, 176 S., 29 Abb.	220,--
21	214	Geophysik	SEIBERL, W.:	<i>Das Restfeld der erdmagnetischen Totalintensität in Österreich zur Epoche 1970.0.</i> Wien 1977, 8 S., 1 Kartenbeilage	vergriffen
22	216	Meteorologie	SABO, P.:	<i>Ein Vergleich deutscher und amerikanischer Höhenvorhersagekarten für den Alpenraum.</i> Wien 1977, 34 S., 11 Tab., 5 Abb.	60,--
23	217	Meteorologie	CEHAK, K.:	<i>Die Zahl der Tage mit Tau und Reif in Österreich.</i> Wien 1977, 17 S., 6 Tab., 1 Abb., 6 Karten	80,--
24	218	Meteorologie	CHALUPA, K.:	<i>Ergebnisse der Registrierung der Schwefeloxid- und Summenkohlenwasserstoff - Immission in Wien - Hohe Warte 1975.</i> Wien 1977, 40 S., 13 Tab., 12 Abb.	70,--
25	219	Geophysik	BRÜCKL, E. und O. BITTMANN:	<i>Die Ergebnisse der seismischen Gletschermessungen im Bereich der Goldberggruppe (Hohe Tauern) in den Jahren 1971 und 1972.</i> Wien 1977, 30 S., 2 Tab., 34 Abb., 2 Karten	80,--
26	222	Geophysik	FIEGWEIL, E.:	<i>Die Nachbebenserie der Friauler Beben vom 6. Mai und 15. September 1976.</i> Wien 1977, 20 S., 7 Tab., 5 Abb.	60,--
27	223	Meteorologie	MACHALEK, A.:	<i>Prognosenprüfung im Österreichischen Wetterdienst.</i> Wien 1977, 55 S., 4 Tab., 5 Abb.	80,--
28	224	Meteorologie	SKODA, G.:	<i>Kinematisch-Klimatologische Verlagerung von Kaltfronten und Troglinien.</i> Wien 1977, 32 S., 7 Tab., 10 Abb.	70,--
29	225	Geophysik	TRAPP, E. und D. ZYCH:	<i>Verteilung der Vertikalintensität im Raum Wien - Salzburg nach Meßergebnissen der Zentralanstalt und der ÖMV-AG.</i> Wien 1977, 15 S., 3 Tab., 1 Karte, 2 Kartenbeilagen	50,--
30	226	Meteorologie		<i>Klimadaten des Glocknergebietes, I. Teil: Tabellen und Stundenwerte der Lufttemperatur und der Relativen Luftfeuchte 1974-1976 (Wallack-Haus, Hochtorn-Süd, Hochtorn-Nord, Fuscher-Lacke).</i> 117 Tab.	150,--
31	227	Meteorologie		<i>Bericht über die 14. Internationale Tagung für Alpine Meteorologie vom 15.-17. Sept. 1976 in Rauris, Salzburg, 1. Teil.</i> Wien 1978, 323 S.	250,--
32	228	Meteorologie		<i>Bericht über die 14. Internationale Tagung für Alpine Meteorologie vom 15.-17. Sept. 1976 in Rauris, Salzburg, 2. Teil.</i> Wien 1978, 347 S.	250,--
33	229	Meteorologie	CHALUPA, K.:	<i>Ergebnisse der Registrierung der Schwefeloxid-, Summenkohlenwasserstoff- und Ozon-Immission in Wien - Hohe Warte, 1976.</i> Wien 1978, 53 S., 20 Tab., 17 Abb.	90,--

Heft	Publ.Nr	Fachgebiet	Autor	Titel und Umfang	Preis in öS
34	231	Meteorologie		<i>Klimadaten des Glocknergebietes, II. Teil: Tabellen der Stundenwerte der Lufttemperatur und der Relativen Luftfeuchte 1974-1976 (Fusch, Ferleiten, Pifflkaralm). Wien 1978, 62 Tab.</i>	80,--
35	233	Meteorologie		<i>Klimadaten des Glocknergebietes, III. Teil: Tabellen der Stundenwerte der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte 1974-1976 (Guttal, Seppenbauer, Margaritze, Glocknerhaus, Schneetälchen, Polsterpflanzenstufe). Wien 1978, 100 Tab.</i>	130,--
36	234	Meteorologie	CHALUPA, K.:	<i>Ergebnisse der Registrierung der Immission von Stickoxiden, Summenkohlenwasserstoffen, Ozon und Schwefeldioxid in Wien - Hohe Warte, 1977. Wien 1979, 74 S., 31 Tab., 24 Abb.</i>	115,--
37	235	Meteorologie	MACHALEK, A.:	<i>Analyse von Fehlprognosen im Österreichischen Wetterdienst und Diskussion ihrer potentiellen Entstehungskriterien. Wien 1979, 45 S., 2 Tab., 35 Abb.</i>	100,--
38	236	Geophysik	DRIMMEL, J., E. FIEGWEIL und G. LUKESCHITZ:	<i>Die Auswirkung der Friauler Beben in Österreich. Makroseismische Bearbeitung der Starkbeben der Jahre 1976/77 samt historischem Rückblick. Wien 1979, 83 S., 47 Abb., 3 Karten</i>	150,--
39	238	Geophysik	FIEGWEIL, E.:	<i>Über die Vorkommen von Wiederholungsbeben in Mitteleuropa. Wien 1979, 20 S., 9 Abb.</i>	50,--
40	239	Meteorologie		<i>Klimadaten des Glocknergebietes, IV. Teil: Tabellen der Stundenwerte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung 1973-1976 (Fusch, Wallack-Haus, Guttal, Glocknerhaus, Margaritze, Fuscher-Lacke). Wien 1979, 94 Tab.</i>	120,--
41	242	Meteorologie	CHALUPA, K.:	<i>Ergebnisse der Registrierung der Immission von Stickoxiden, Ozon und Schwefeloxid in Wien - Hohe Warte, 1978. Wien 1980, 58 S., 30 Tab., 15 Abb.</i>	130,--
42	241	Meteorologie	CHALUPA, K.:	<i>Ergebnisse der Registrierung der Immission von Stickoxiden, Ozon und Schwefeloxid in Wien - Hohe Warte, 1979. Wien 1980, 65 S., 32 Tab., 20 Abb.</i>	130,--
43	246	Meteorologie	RAGETTE, G.:	<i>Methoden zur Berechnung großräumigen Niederschlages. Wien 1980, 47 S., 1 Tab., 2 Abb.</i>	70,--
44	247	Meteorologie		<i>Klimadaten des Glocknergebietes, V. Teil: Tabellen der Stundenwerte der Lufttemperatur und der Relativen Luftfeuchte, 1977-1979 (Wallack-Haus, Hochtorsüd, Hochtornord, Fuscher-Lacke). Wien 1980, 135 Tab.</i>	vergriffen
45	248	Geophysik	BRÜCKL, E., G. GANGL, W. SEIBERL und Chr. GNAM:	<i>Seismische Eisdickenmessungen auf dem Ober- und Untersulzbachkees in den Sommern der Jahre 1973 und 1974. Wien 1980, 23 S., 2 Tab.</i>	50,--
46	249	Meteorologie		<i>Klimadaten des Glocknergebietes, IV. Teil: Tabellen der Stundenwerte der Lufttemperatur und der Relativen Luftfeuchte, 1977-1979 (Fusch, Pifflkaralm, Guttal, Seppenbauer, Margaritze, Glocknerhaus, Schneetälchen, Obere Grasheide, Polsterpflanzenstufe). Wien 1981, 110 Tab.</i>	120,--

Heft	Publ.Nr	Fachgebiet	Autor	Titel und Umfang	Preis in öS
47	251	Meteorologie	CHALUPA, K.:	<i>Ergebnisse der Registrierung der Schwefeloxid-Immission in Wien - Stephansplatz, 1975-1979.</i> Wien 1981, 50 S., 13 Tab., 21 Abb.	vergriffen
48	252	Meteorologie	LAUSCHER, F.:	<i>Säkulare Schwankungen der Dezennienmittel und extreme Jahreswerte der Temperatur in allen Erdteilen.</i> Wien 1981, 42 S., 8 Tab.	50,--
49	254	Meteorologie	CHALUPA, K.:	<i>Ergebnisse der Registrierung der Schwefeloxid-Immission in Wien - Hohe Warte und in Wien - Stephansplatz, 1980.</i> Wien 1981, 46 S., 24 Tab., 13 Abb.	100,--
50	255	Geophysik	MELICHAR, P.:	<i>Ergebnisse der vergleichenden geomagnetischen Absolutmessungen an den Observatorien Tihany - Ungarn und Wien - Kobenzl.</i> Wien 1981, 35 S.	50,--
51	256	Geophysik	BRÜCKL, E. und K. ARIC:	<i>Die Ergebnisse der seismischen Gletschermessungen am Hornkees in den Zillertaler Alpen im Jahre 1975.</i> Wien 1981, 20 S., 5 Tab., 5 Abb., 1 Karte	vergriffen
52	257	Meteorologie		<i>Klimadaten des Glocknergebietes, VII. Teil: Tabellen der Stundenwerte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung 1977-1979 (Fusch, Fuscher Lacke, Wallack-Haus, Guttal).</i> Wien 1982, 82 Tab.	120,--
53	260	Meteorologie	STEINHAUSER, F.:	<i>Verteilung der Häufigkeiten der Windrichtungen und der Windstärken in Österreich zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten.</i> Wien 1982, 140 S., 131 Tab., 4 Kartenbeilagen	120,--
54	261	Meteorologie	DOBESCH, H. und F. NEUWIRTH:	<i>Wind in Niederösterreich, insbesondere im Wiener Becken und im Donautal.</i> Wien 1982, 212 S., 183 Abb.	vergriffen
55	266	Meteorologie		<i>Klimadaten des Glocknergebietes, VIII. Teil: Tabellen der Stundenwerte der Globalstrahlung 1975-1980 (Fuscher-Lacke und Wallack-Haus).</i> Wien 1983, 39 S.	50,--
56	268	Geophysik	WEBER, F. und R. WÜSTRICH:	<i>Ergebnisse der refraktionsseismischen Messungen am Hochkönigsgletscher.</i> Wien 1983, 50 S., 3 Tab., 7 Abb., 11 Beilagen	100,--
57	278	Meteorologie		<i>Klimadaten des Glocknergebietes, IX. Teil: Tabellen der Niederschlagsmeßergebnisse 1974-1980.</i> 48 S., 41 Tab.	70,--
59	283	Meteorologie	KAISER, A.:	<i>Inversionen in der bodennahen Atmosphäre über Klagenfurt.</i> Wien 1984, 79 S., 13 Tab., 22 Abb.	80,--
60	284	Meteorologie	LAUSCHER, F.:	<i>Ozonbeobachtungen in Wien von 1853-1981. Zusammenhänge zwischen Ozon und Wetterlagen.</i> Wien 1984, 29 S., 13 Tab. 3 Abb.	40,--
61	289	Meteorologie		<i>Klimadaten von Österreich Mittelwerte 1971-1980. Teil I (Vorarlberg) und Teil II (Tirol).</i> 71 S.	60,--
62	299	Geophysik	DRIMMEL, J.:	<i>Seismische Intensitätsskala 1985 (SIS-85). Vorschlag einer Neufassung der Intensitätsskala MSK-64.</i> 28 S., 8 Tab., 2 Abb.	40,--
63	300	Meteorologie		<i>Klimadaten von Österreich Mittelwerte 1971-1980. Teil III (Salzburg) und Teil IV (Oberösterreich).</i> 107 S.	80,--
64	302	Meteorologie	LAUSCHER, F.:	<i>Klimatologische Synoptik Österreichs mittels der ostalpinen Wetterklassifikation.</i> Wien 1985, 65 S., 32 Tab., 5 Abb.	90,--

Heft	Publ.Nr	Fachgebiet	Autor	Titel und Umfang	Preis in öS
65	303	Geophysik	ZYCH, D.:	<i>Messungen der erdmagnetischen Vertikalintensität und Suszeptibilitätsuntersuchungen durch die ÖMV-AG als Beitrag zur Kohlenwasserstoffexploration in Österreich.</i> Wien 1985, 14 S., 2 Tab., 2 Abb., 3 Kartenbeilagen	60,--
66	304	Meteorologie	HOJESKY, H.:	<i>Langjährige Radiosonden- und Höhenwindmessungen über Wien 1952-1984.</i> Wien 1985, 219 S., 64 Tab., 13 Abb.	120,--
67	306	Geophysik		<i>Results of the Austrian Investigations in the International Lithosphere Program from 1981-1985.</i> Wien 1986, 79 S., 4 Tab., 28 Abb.	80,--
68	308	Hydrometeorologie	ECKEL, O. und H. DOBESCH:	<i>Mittelwerte der Wassertemperatur von Traunsee und Millstätter See nach mehrjährigen Registrierungen in verschiedenen Tiefen.</i> Wien 1986, 87 S., 74 Tab.	70,--
69	309	Meteorologie	KOLB, H., G. MAHRINGER, P. SEIBERT, W. SOBITSCHKA, P. STEINHAUSER und V. ZWATZ-MEISE:	<i>Diskussion meteorologischer Aspekte der radioaktiven Belastung in Österreich durch den Reaktorunfall in Tschernobyl.</i> Wien 1986, 63 S., 4 Tab., 20 Abb.	vergriffen
70	312	Geophysik	ARIC, K., E. BRÜCKL:	<i>Ergebnisse der seismischen Eisdickenmessungen im Gebiet der Stubai Alpen (Daunkogelferner), der Venedigergruppe (Schlatenkees und Untersulzbachkees) und der Silvretta-gruppe (Vermunt-Gletscher).</i> Wien 1987, 18 S., 4 Tab., 10 Abb., 4 Kartenbeilagen	80,--
71	314	Meteorologie	CHALUPA, K.:	<i>Ergebnisse der Registrierung der Schwefeloxid-Immission in Wien - Hohe Warte und in Wien - Stephansplatz, 1981.</i> Wien 1987, 67 S., 41 Tab., 11 Abb.	100,--
72	315	Meteorologie	CHALUPA, K.:	<i>Ergebnisse der Registrierung der Schwefeloxid-Immission in Wien - Hohe Warte und in Wien - Stephansplatz, 1982-1985.</i> Wien 1987, 76 S., 27 Tab., 15 Abb.	100,--
73	317	Geophysik	ARIC, K. et al:	<i>Structure of the Lithosphere in the Eastern Alps Derived from P-residual Analysis.</i> Wien 1988, 35 S., 3 Tab., 17 Abb.	60,--
74	322	Meteorologie	CHALUPA, K.:	<i>Ergebnisse der Registrierung der Schwefeloxid-Immission in Wien - Hohe Warte und in Wien - Stephansplatz 1986-1987 sowie eine Übersicht der 20jährigen Reihe 1968-1987.</i> Wien 1988, 80 S., 38 Tab., 20 Abb.	100,--

# Berichte über den Tiefbau der Ostalpen

Herausgegeben von H. W. FLÜGEL und P. STEINHAUSER

bisher erschienen:

Heft	Publ.Nr	Fachgebiet	Autor	Titel und Umfang	Preis in öS
1				<i>Jahresbericht 1973.</i> Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt. Jahrgang 1974, H. 4, S. A138-A148	
2				<i>Jahresbericht 1974.</i> Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien 1975, 21 S., 5 Abb.	vergriffen
3				<i>Jahresbericht 1975.</i> Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien 1976, 74 S., 14 Abb.	115,--
4	215		WALACH, G.:	<i>Geophysikalische Arbeiten im Gebiet des Nordsporns der Zentralalpen I: Magnetische Traverse 1 (Neunkirchen-Hochwechsel-Pöllauer Bucht).</i> Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 22 S., 5 Abb., 4 Beilagen	40,--
5	221			<i>Jahresbericht 1976.</i> Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien 1977, 101 S., 21 Abb.	130,--
6	230			<i>Jahresbericht 1977, Teil 1.</i> Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien 1978, 54 S., 9 Abb.	85,--
7	240			<i>Jahresbericht 1977, Teil 2.</i> Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien 1979, 60 S., 19 Abb.	90,--
8	244			<i>Tagungsbericht über das 1. Alpengravimetrie Kolloquium - Wien 1977.</i> Herausgeber: P. STEINHAUSER, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien 1980, 129 S., 35 Abb.	90,--
9	245		GÖTZE, H. J., O. ROSENBACH und P. STEINHAUSER:	<i>Die Bestimmung der mittleren Geländehöhen im Hochgebirge für die topographische Reduktion von Schweremessungen.</i> Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien 1980, 16 S., 2 Tab., 5 Abb.	25,--
10	264		ROSENBACH, O., P. STEINHAUSER, W. EHRISMANN, H. J. GÖTZE, O. LETTAU, D. RUESS und W. SCHÖLER:	<i>Tabellen der mittleren Geländehöhen der Ostalpen und ihrer Umgebung für Rasterelemente <math>\Delta\varphi = 0.75'</math>. <math>\Delta\lambda = 1.25'</math>.</i> 1. Lieferung. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien 1982, 23 S., 20 Tab.	100,--
11	273			<i>Tagungsbericht über das 2. Internationale Alpengravimetrie Kolloquium - Wien 1980.</i> Herausgeber: B. MEURERS und P. STEINHAUSER, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien 1983, 168 S., 85 Abb.	200,--
12	288			<i>Tagungsbericht über das 3. Internationale Alpengravimetrie Kolloquium - Leoben 1983.</i> Herausgeber: B. MEURERS, P. STEINHAUSER und G. WALACH, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien 1985, 222 S.	270,--
13	323			<i>Tagungsbericht über das 4. Internationale Alpengravimetrie Kolloquium - Wien 1986.</i> Herausgeber: B. MEURERS und P. STEINHAUSER, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien 1988, 200 S., 77 Abb.	250,--

# Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik

bisher erschienen:

Heft	Publ.Nr.	Fachgebiet	Autor	Titel und Umfang	Preis in öS
1	329	Meteorologie		<i>Tagungsbericht EURASAP, Wien, 14.-16. Nov. 1988, Evaluation of Atmospheric Dispersion Models Applied to the Release from Chernobyl.</i> Wien 1989, 20 Beiträge, 198 S., 100 Abb., 17 Tab.	200,--
2	332	Geophysik		<i>Tagungsbericht über das 5. Internationale Alpengravimetrie Kolloquium - Graz 1989.</i> Herausgeber: H. LICHTENEGGER, P. STEINHAUSER und H. SÜNKEL, Wien 1989, 256 S., 100 Abb., 17 Tab.	vergriffen
3	336	Geophysik		<i>Schwerpunktprojekt S47-GEO: Präalpidische Kruste in Österreich, Erster Bericht.</i> Herausgeber: V. HÖCK und P. STEINHAUSER, Wien 1990, 15 Beiträge, 257 S., 104 Abb., 17 Tab., 23 Fotos	280,--
4	338	Meteorologie	LANZINGER, A. et al:	<i>Alpex-Atlas.</i> FWF-Projekt P6302 GEO, Wien 1991, 234 S., 23 Abb., 2 Tab., 200 Karten	250,--
5	341	Meteorologie	BÖHM, R.:	<i>Lufttemperaturschwankungen in Österreich seit 1775.</i> Wien 1992, 95 S., 34 Abb., 24 Tab.	vergriffen
6	343	Geophysik	MEURERS, B.:	<i>Untersuchungen zur Bestimmung und Analyse des Schwerefeldes im Hochgebirge am Beispiel der Ostalpen.</i> Wien 1992, 146 S., 72 Abb., 9 Tab.	160,--
7	351	Meteorologie	AUER, I.:	<i>Niederschlagsschwankungen in Österreich seit Beginn der instrumentellen Beobachtungen durch die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.</i> Wien 1993, 73 S., 18 Abb., 5 Tab., 6 Farbkarten	330,--
8	353	Meteorologie	STOHL, A., H. KROMP-KOLB:	<i>Analyse der Ozonsituation im Großraum Wien.</i> Wien 1994, 135 S., 73 Abb., 8 Tab.	330,--
9	356	Geophysik		<i>Tagungsbericht über das 6. Internationale Alpengravimetrie-Kolloquium, Leoben 1993.</i> Herausgeber: P. STEINHAUSER und G. WALACH, Wien 1993, 251 S., 146 Abb. [Korrektur der irrtümlichen Nummerierung Heft 8/Publ. 353]	330,--
10	357	Meteorologie	ZWATZ-MEISE, V.:	<i>Contributions to Satellite and Radar Meteorology in Central Europe.</i> Wien 1994, 169 S., 25 Farbabb., 42 SW-Abb., 13 Tab.	330,--
11	359	Geophysik	LENHARDT W. A.:	<i>Induzierte Seismizität unter besonderer Berücksichtigung des tiefen Bergbaus.</i> Wien 1995, 91 S., 53 Abb.	330,--
12	361	Meteorologie	AUER, I., R. BÖHM, N. HAMMER, W. SCHÖNER, T. WIESINGER, W. WINIWARTER:	<i>Glaziologische Untersuchungen im Sonnblickgebiet: Forschungsprogramm Wurtenkees. Glaciological Studies in the Region of Sonnblick (Austria): Research Programme Wurtenkees.</i> Wien 1995, S., 59 SW-Abb., 13 Farbabb., 9 SW-Fotos, 47 Tab.	330,--

