

**Beiträge aus geophysikalischen Messungen in
Dronning Maud Land, Antarktis, zur Auffindung eines
optimalen Bohrpunktes für eine Eiskerntiefbohrung**

**Contributions of geophysical measurements in
Dronning Maud Land, Antarctica, locating an optimal
drill site for a deep ice core drilling**

Daniel Steinhage

**Ber. Polarforsch. Meeresforsch. 384 (2001)
ISSN 0176-5027**

Daniel Steinhage

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
Columbusstraße
27568 Bremerhaven

Die vorliegende Arbeit ist die inhaltlich unveränderte Fassung einer
Dissertation, die Oktober 2000 im Fachbereich Geowissenschaften
der Universität Bremen vorgelegt wurde.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Kurzfassung	vi
Abstract	viii
1 Einleitung	1
2 Physikalische und technische Grundlagen	5
2.1 Physikalische Grundlagen	5
2.2 Apparatur	10
2.3 Bearbeitung und Auswertung der Sektionen	12
2.4 Ausbreitungsgeschwindigkeiten und Firnkorrektur	16
2.5 Geokodierung	19
3 Meßgebiet Dronning Maud Land	21
3.1 Eismächtigkeitsverteilung	23
3.2 Oberflächen- und subglaziale Topographie	29
3.3 Innere Struktur des Eiskörpers	36
4 Anwendungen	41
4.1 Gleichgewichtsgeschwindigkeiten	42
4.2 Alterstiefenberechnung	46
4.3 Isostatische Reaktionen	51
5 Wahl eines optimalen Bohrpunktes in DML aus geophysikalischer Sicht	52

INHALTSVERZEICHNIS

6 Zusammenfassung und Ausblick	59
Literaturverzeichnis	64
Danksagung	71
A Profil Inlandeis-Schelfeis	72
B Profil Inlandeis	82

Abbildungsverzeichnis

1.1	Eiskerntiefbohrungen in der Antarktis	2
1.2	Lage des Meßgebietes	3
2.1	Brechungsgewinn bei Aero-EMR-Messungen	8
2.2	Maximale Eindringtiefen für EMR-Apparatur	9
2.3	Aero-EMR-Apparatur	11
2.4	Beispielsektion für 600 ns Puls	14
2.5	Beispielsektion für 60 ns Puls	15
2.6	Lokation der 100-150 m Eiskernbohrungen in DML	16
2.7	Intervallgeschwindigkeiten aus DEP-Messungen	18
2.8	Vergleich Teufenberechnung mittels v_{RMS} und Firnkorrektur	18
2.9	Vergleich von GPS-, GNS- und INS-Koordinaten	19
2.10	Radiale Verzerrung der Lambertprojektion	20
3.1	Eismächtigkeitsmessungen in der Antarktis	22
3.2	EMR-Flüge in DML 1994-1999	24
3.3	Aero-EMR Profillängen und Anteil der Untergrundreflexionen	26
3.4	Kreuzungspunktanalyse	27
3.5	Eismächtigkeitsdatenpunktdichte in DML	28
3.6	Eismächtigkeitsverteilung in DML	30
3.7	Vergleich Profil mit Karte	31
3.8	Subglaziales Relief in DML	32
3.9	Isometrische Ansicht der Oberflächen- und der subglazialen Topographie in DML	33
3.10	Orientierungskarte zu Abb. 3.11 und 3.12	34
3.11	Beispielsektion vom Schelfeis bis auf das Inlandplateau	35
3.12	Beispielsektion vom Plateau des Inlandeises	35
3.13	Ausschnitt des Profils 993136	38

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

3.14	Isolinienkarte eines tiefliegenden internen Reflektors	39
3.15	Isometrische Ansicht interner Horizonte um B32	40
4.1	Eingangsdatensätze zur Berechnung von Gleichgewichtsgeschwindigkeiten	44
4.2	Gleichgewichtsgeschwindigkeiten in DML	45
4.3	Fließrichtungen in DML	45
4.4	Akkumulationsrate gegen Tiefe für Dome Fuji	48
4.5	Alterstiefenverteilung für Dome Fuji	48
4.6	Orientierungskarte Profil 993136	48
4.7	Oberfläche, interne Horizonte und Felsrelief des Profils 993136	49
4.8	Berechnete Alterstiefenverteilung für Profil 993136	50
4.9	Vergleich von berechneter Isochrone mit internem Horizont	50
4.10	Subglaziales Relief in DML nach vollständiger Entlastung	51
5.1	Topographie in der Umgebung von B32	54
5.2	Gleichgewichtsgeschwindigkeiten in der Umgebung von B32	54
5.3	Eismächtigkeiten in der Umgebung von B32	55
5.4	Subglaziales Relief in der Umgebung von B32	55
5.5	Süd-Nord streichende Sektion an B32	56
5.6	Sektion östlich von B32 entlang der Eisscheide	57
5.7	Berechnete Isochronen in der Umgebung von B32	58
6.1	Isometrische Ansicht von Eistopographie und subglazialen Relief nahe der vorgeschlagenen Bohrlokation	62
A.1	Orientierungskarte Profil Inlandeis-Schelfeis	72
A.2	(a)-(i) Profil Inlandeis-Schelfeis	73
B.1	Orientierungskarte Profil Inlandeis	82
B.2	(a)-(i) Profil Inlandeis	83

Tabellenverzeichnis

2.1	DK, Absorption etc. für einige Beispiele	7
2.2	Technische Parameter der EMR-Apparatur	12
3.1	Aero-EMR-Meßflüge in DML zwischen 1994-1999	23
3.2	Eismächtigkeiten an Lokalitäten einiger Eiskernbohrungen	29

Kurzfassung

Zur Beurteilung der künftigen Klimaentwicklung auf der Erde ist das Verständnis des Paläoklimas von großem Interesse. Klimainformationen werden mit dem jährlichen Niederschlag in die großen Eisschilde Grönlands und der Antarktis eingebracht und dort konserviert. Bei der Transformation des Schnees zu festem Eis wird die im Schnee noch zirkulierende Luft in kleinen Bläschen im Eis eingeschlossen und erhalten. Dies macht das Eis zu einem einzigartigem Klimaarchiv, da es als einziges zusätzlich zu den im Eis archivierten Klimainformationen auch Proben der Paläoatmosphäre enthält. Mittels physikalischer und chemischer Untersuchungen an Eisbohrkernen können Proxyparameter bestimmt werden, aus denen das Klima der Vergangenheit rekonstruiert werden kann. Dazu ist es unabdingbar, daß die ursprüngliche Ablagerungsfolge erhalten ist und nicht etwa durch dynamische Prozesse innerhalb des Eisschilds zerstört wurde. Eine optimale Lokation für eine Eiskerntiefbohrung liegt somit in einem Bereich, der keine oder nur äußerst geringe Horizontalbewegungen und kein basales Schmelzen aufweist, in dem die Schichtung des Eises ungestört und die Eismächtigkeit ausreichend groß ist. Weitere Randbedingungen können durch die Quellgebiete der Niederschläge und durch die Akkumulationsrate, die die zeitliche Auflösung eines Eiskerns bestimmt, vorgegeben sein.

Ein Vergleich von Eiskernen aus Grönland und der Antarktis hat gezeigt, daß schnelle Klimaschwankungen (Dansgaard-Oeschger-Events) sich nicht in den Eiskernen der Nord- und Südhemisphäre gleichermaßen widerspiegeln. Auch die zeitliche Kopplung zwischen den Hemisphären konnte nicht eindeutig geklärt werden. Dies sind zwei der paläoklimatische Fragestellungen, die in dem 'European Project for Ice Coring in Antarctica' (EPICA) anhand von zwei Eiskernen studiert werden sollen. Eine dieser Bohrungen wird bereits an Dome Concordia (123,1°Ost/75,15°Süd) abgeteuft. Die zweite soll an einer noch zu bestimmenden Lokation in Dronning Maud Land (DML) liegen, da dort wie auch in Grönland Niederschläge atlantischen Ursprungs deponiert werden. Zur genaueren Bestimmung der Bohrlokation wurde daher ein umfangreiches aero-geophysikalisches Meßprogramm im Rahmen der Vorerkundung des DML durchgeführt, welches in dieser Arbeit vorgestellt wird.

In der Vergangenheit hat es sich gezeigt, daß mit dem elektromagnetischen Reflexionsverfahren (EMR) sowohl Eismächtigkeiten als auch innere Strukturen von Eisschilden, Schelfeisen und Gletschern hochauflösend kartiert werden können. Der Einsatz von Flugzeugen erlaubt es, große Flächen in kurzer Zeit zu kartieren. In

KURZFASSUNG

Kapitel 2 der vorliegenden Arbeit wird daher auf die physikalischen und technischen Grundlagen des EMR und der Datenauswertung eingegangen.

Die Auswertung der in den Südsommern zwischen 1994-99 in DML durchgeführten EMR-Meßflüge mit einer Gesamtlänge von 91 500 km wird in Kapitel 3 vorgestellt und diskutiert. Neben der Eismächtigkeitsverteilung und dem daraus abgeleiteten subglazialen Relief wurden auch die interne Struktur des Eisschildes kartiert. Die in DML bearbeitete Fläche ist 1 040 000 km² groß, dies entspricht 7,5 % des ganzen Kontinents. Die durchschnittliche Eismächtigkeit beträgt 1678 m. Dies sind 288 m mehr als bislang für dieses Gebiet auf Basis früherer Arbeiten anhand weniger seismischer und Aero-EMR-Messungen ermittelt wurde. Weite Teile im Westen des Meßgebietes, wie auch nördlich der Randgebirge, liegen unterhalb des heutigen Meeresspiegels. In der weiteren Umgebung von B32 ($\pm 0^\circ/75^\circ$ Süd) konnten mehrere interne Horizonte kartiert werden. Sie zeigen eine ungestörte Schichtung.

Mittels einfacher, aus der Literatur bekannter, Modelle und der Kenntnis der Akkumulationsverteilung sowie der Oberflächentopographie können weitere wichtige Parameter, nämlich die Gleichgewichtsgeschwindigkeit und die Tiefenlage von Isochronen, berechnet werden. Aus der Gleichgewichtsgeschwindigkeit des Eisschildes wurde die Oberflächengeschwindigkeit des Eisschildes abgeschätzt. Wie zu erwarten war, sind die geringsten Geschwindigkeiten entlang der Eisscheiden zu beobachten, nur vereinzelt werden dort auch Werte über 2 m a^{-1} erreicht. Die Übereinstimmung von Isochronen und internen Horizonten läßt darauf schließen, daß kein basales Schmelzen entlang des zum Vergleich herangezogenen Profils auftritt.

Unter Beachtung der an die in DML beabsichtigte Eiskerntiefbohrung gestellten Anforderungen konnte die am besten geeignete Lokation in DML bestimmt werden. Die Auswahl basiert auf der aus den EMR-Messungen bestimmten Eismächtigkeitsverteilung, der herangezogenen Oberflächentopographie und Akkumulationsverteilung sowie den modellierten Gleichgewichtsgeschwindigkeiten und Isochronen. In der näheren Umgebung der Eiskernbohrung B32 bei $\pm 0^\circ$ und 75° Süd ist die Eismächtigkeit mit 2750 m ausreichend groß, um dort einen Eiskern zu bohren, der Eis mindestens des letzten glazialen Zyklus enthält, und der eine hohe zeitliche Auflösung aufweist. Die Akkumulationsrate beträgt dort $0,065 \text{ m Eisäquivalent a}^{-1}$, dies ist das dreifache der Zutragsrate an Dome Concordia, und die Oberflächengeschwindigkeit, abgeleitet aus der modellierten Gleichgewichtsgeschwindigkeit, erreicht dort nur $1,5 \text{ m a}^{-1}$. Basierend auf den hier präsentierten Daten und dem Nye-Ansatz, ist die 110 000 Jahres Isochrone 475 m über dem Untergrund, der dort nur geringe Reliefunterschiede hat, zu erwarten. Damit ist die Möglichkeit gegeben, in der näheren Umgebung von B32 in DML einen ungestörten Eiskern zu erbohren, der den letzten glazialen Zyklus vollständig umfaßt.

Abstract

For the assessment of the future climate evolution of the earth a detailed knowledge of the climate system in the past is most important. Paleoclimatic information is incorporated into the large ice sheets of Greenland and Antarctica together with the annual deposition of snow. The air circulating in the snow cover is enclosed and preserved within small bubbles in the ice during the transformation of firn to ice. This paleoatmospheric archive is an unique feature of ice cores compared to any other paleoclimatic archive. Using physical and chemical analyses on the ice and the enclosed air various proxy parameters can be measured to reconstruct paleoclimatic information. To gain a reliable record, however, it is necessary that the original sequence of the ice layers is preserved and is not disturbed by any dynamic process within the ice sheet. An optimum site for a deep ice core drilling should be located in an area with no or nearly negligible lateral movement and absence of any basal melting as well as an undisturbed stratification and a sufficient large ice thickness. Another criterion is given by the source regions of air masses influencing the drill site and the annual accumulation rate, determining to large parts the temporal resolution to be achieved in an ice core record.

The comparison of ice cores from Greenland and Antarctica revealed that rapid climatic changes during the last glacial period (Dansgaard-Oeschger events) are not reflected the same way in the northern and southern hemisphere. Also the temporal coupling between the two hemispheres during climatic changes is still insufficiently known. These are two of the most important questions to be answered by two new ice cores to be drilled within the European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA). The first of these ice core drillings is currently carried out at Dome Concordia (123.1°East/75.15°South). The second will be in Dronning Maud Land (DML), which due to the influence of air masses originating over the South Atlantic, is expected to be a direct Antarctic counterpart to the well known ice core records from central Greenland. In order to determine the actual drill location in DML an extensive airborne geophysical programme has been carried out. In the following the results of this reconnaissance study will be presented.

It has been shown in the past that radio echo sounding (RES) is capable of mapping ice thicknesses as well as the internal structure of ice sheets, ice shelves and glaciers with very high resolution. Using airborne RES it is possible to cover large areas in a short period. In chapter 2 the physical and technical principles of RES and data

ABSTRACT

evaluation will be introduced.

The data analysis includes all profiles with a total length of 91,500 km flown during the austral summer 1995-99 in DML. Maps of the ice thickness, internal structure of the ice sheet and the subglacial topography were derived and are presented and discussed in chapter 3. The area covered in DML contains 1,040,000 km², which is equal to 7.5 % of the continent. The average ice thickness is 1678 m. This is 288 m more than previously computed based on earlier sparse seismic and airborne RES measurements. The subglacial topography of large areas in the western part as well as north of the coastal mountains of the investigated region are below present sea level. Several internal horizons could be mapped in the vicinity of shallow ice core drilling B32 ($\pm 0^\circ/75^\circ$ South), showing an undisturbed stratification of the ice.

Using simple model conceptions, known in the literature, as well as new data on snow accumulation and surface topography further glaciological parameters relevant for the selection of the drill site could be derived such as the balance velocity and isochrones. Surface velocities of the ice have been estimated from the balance velocities. The lowest velocities are observed along the ice divides. Usually they do not exceed 2 m a⁻¹. Based on the good correlation of modelled isochrones and internal horizons it can be concluded that basal melting does not occur along the profile chosen for the comparison.

Based on all the information gained during this presite survey (ice thickness map derived from the airborne RES measurements, given surface topography and accumulation distribution, modelled balance velocities and isochrones) the best drill site in DML has been determined to be in the vicinity of B32 at $\pm 0^\circ$ and 75° South. The ice thickness in that area is 2750 m, which is sufficiently large to drill an ice core covering the last glacial cycle. The accumulation rate is 0.065 m ice equivalent a⁻¹, which is three times higher than at Dome Concordia. The estimated surface velocities is lower than 1.5 m a⁻¹. Based on the presented data and the age model by Nye the height of the 110,000 a isochrone is 475 m above the relatively smooth bedrock. Therefore it should be possible to achieve an undisturbed high-resolution ice core record over the full last glacial cycle in DML in the vicinity of B32.

Kapitel 1

Einleitung

Die Antarktis mit ihren rund 14 Millionen km² Ausdehnung (Huybrechts et al., 2000) wurde im Vergleich zu anderen Kontinenten erst relativ spät entdeckt. Mit den Robbenjägern zu Beginn des 19. Jahrhunderts kamen die ersten Forscher in den Süden. Die Suche nach dem magnetischen Südpol um 1840 gab Anlaß zu ersten wissenschaftlichen Expeditionen. Mit dem aufkommenden Walfang vor der Küste wurde immer mehr vom Kontinent bekannt. Spätestens der Wettlauf von Roald E.G. Amundsen und Robert F. Scott 1911/12 rückte das von einem mächtigen Eisschild bedeckte Land in den Mittelpunkt des öffentlichen Interesses. Die technische Entwicklung hatte schon zu diesem Zeitpunkt Zugang zur Antarktis in Form von Motorschlitten gefunden, so daß es nicht verwunderlich ist, daß schon 1928 von G. Hubert Wilkins und Richard E. Byrd erstmalig Flugzeuge zur Erkundung eingesetzt wurden. Einige Jahre später, 1935, gelang Lincoln Ellsworth die erste Antarktisdurchquerung per Flugzeug. Während der Schwabenland-Expedition 1938/39 konnte mit zwei Dornier Flugzeugen vom Typ Wal ein etwa 350 000 km² großes Gebiet in Dronning Maud Land zwischen 10° West und 15° Ost mit Luftbildfotografie kartiert werden (Kohnen, 1981). Das Internationale Geophysikalische Jahr (IGJ), es dauerte vom 1. Juli 1957 bis zum 31. Dezember 1958, war ein weiterer Meilenstein in der Forschungsgeschichte der Antarktis. Mit ihm begann die international koordinierte Erforschung des Kontinents. Es wurden mehrere Traversen auf das Inlandeis durchgeführt und zahlreiche Stationen errichtet und während des IGJ betrieben (Kohnen, 1981).

Am Anfang der Forschungsarbeiten in der Antarktis stand eine erste Bestandsaufnahme der dort angetroffenen Flora und Fauna sowie die geographische Aufnahme der Küstenregionen. Mit dem Einsatz motorisierter Fahrzeuge und Flugzeuge wurde es möglich, größere Lasten über lange Strecken zu transportieren und somit die küstennahe Forschung auf das Inlandeis auszudehnen. Da die Oberfläche des Kontinents zu mehr als 99 % von einem mächtigen Eisschild bedeckt ist (Huybrechts et al., 2000), sind geophysikalische Methoden ein unverzichtbares Werkzeug, um das Wissen über die Antarktis zu erweitern. Der Einsatz von Isotopenmethoden bei der Analyse von Eiskernen ließ auf das Klima zur Zeit der Ablagerung zurückschließen. Als einziges Klimaarchiv enthält Eis in den eingeschlossenen Bläschen Proben der Paläoatmosphäre, an denen die Zusammensetzung der eingeschlossenen Luft direkt

studiert werden kann (Stauffer et al., 1998). Die erste Bohrung in der Antarktis, die Eis für Paläoklimauntersuchungen lieferte, wurde 1968 an der U.S. amerikanischen Byrd Station abgeteuft (Epstein et al., 1970). Weitere Bohrungen, zum Beispiel an Vostok, Dome C und Dome Fuji, folgten, siehe auch Abbildung 1.1. Auch in Grönland, wo die erste Eiskerntiefbohrung (Camp Century) niedergebracht wurde (Lorius et al., 1985), ist das Klimaarchiv Eis durch weitere Tiefbohrungen (Dye 3, GISP2, GRIP) erschlossen worden (Jouzel et al., 1996). Für das Holozän, das heißt für die letzten 11000 Jahre vor heute, ist in allen Bohrungen eine stabile Warmzeit zu beobachten. Für weiter zurückreichende Zeiträume, etwa ab 100 000 Jahre, ergeben die bislang vorhandenen Datenreihen Grönlands kein eindeutiges Bild. Eine Ursache kann in Störungen der Stratigraphie aufgrund von Bewegungen des Eises über den Untergrund liegen. In Grönland wurde, da die Eiskerne der Bohrungen GRIP und GISP2 in den untersten Abschnitten nicht mehr übereinstimmen (Alley et al., 1998), mit NGRIP eine weitere Eiskerntiefbohrung niedergebracht, um Klarheit über das Klima im Eem, dem letzten Interglazial, etwa 110 000-130 000 Jahre vor heute, zu erhalten (Dahl-Jensen et al., 1997).

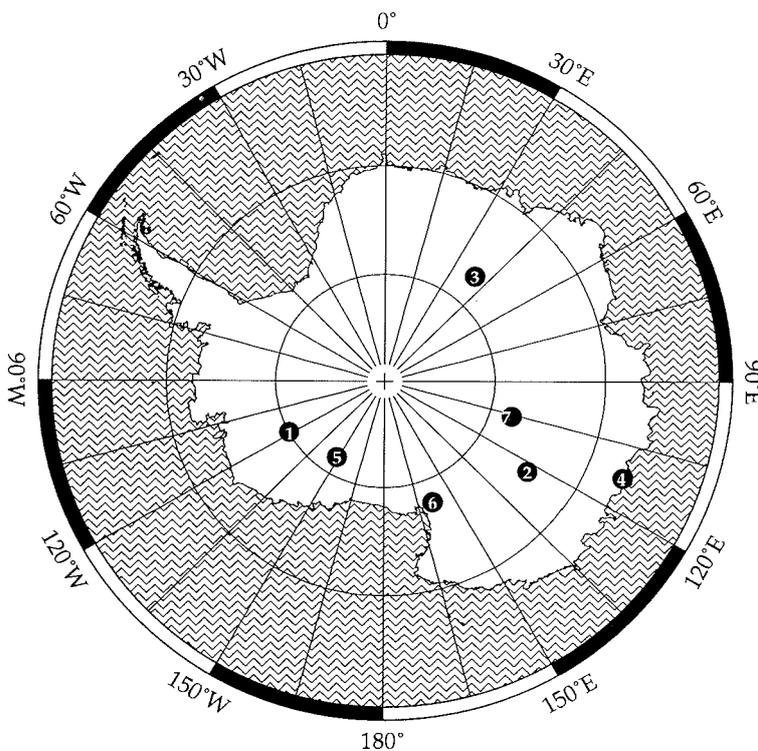


Abbildung 1.1: Lokationen wichtiger Eiskerntiefbohrungen in der Antarktis.
 1 Byrd, 2 Dome C, 3 Dome Fuji, 4 Law Dome, 5 Siple Dome, 6 Taylor Dome, 7 Vostok

Mit dem „European Project for Ice Coring in Antarctica“ wurde ein europäisches

Eiskerntiefbohrprojekt initiiert, um paläoklimatische Fragestellungen zu bearbeiten (Jouzel et al., 1996). Insbesondere stehen folgende Fragen im Vordergrund:

- Erfolgt der Übergang Glazial/Interglazial immer nach demselben Muster?
- Ist das stabile Klima des Holozäns eine Ausnahmeerscheinung?
- Gab es schnelle Klimaschwankungen auch in früheren glazialen Zyklen?
- Sind schnelle Klimaschwankungen nur auf die Nordhemisphäre beschränkt?
- Wie sind Klimawechsel zwischen Nord- und Südhalbkugel gekoppelt?
- Gehen globale Klimaänderungen immer nur von der Nordhemisphäre aus?

Die Antworten zu diesen Fragen sollen mit Hilfe zweier langer Eiskerne erarbeitet werden. Ein Kern, der einen Zeitraum von 500 000 Jahren umfassen soll, wird seit 1997 an Dome Concordia, siehe auch Abbildung 1.2, gebohrt. Der zweite soll von einem noch zu bestimmenden Ort in Dronning Maud Land (DML) stammen. Da das DML bis Mitte der neunziger Jahre des 20. Jahrhunderts kaum Gegenstand geophysikalisch/glaziologischer Forschungen war, ist zur Festlegung des Standortes der Eiskerntiefbohrung ein ausgedehntes Vorerkundungsprogramm notwendig geworden.

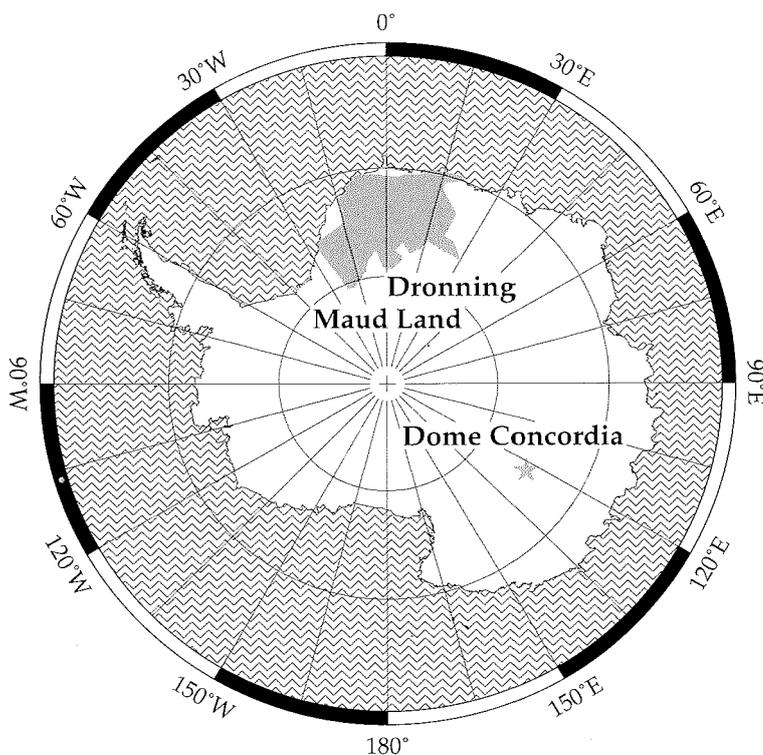


Abbildung 1.2: Übersichtskarte Antarktis; das Untersuchungsgebiet in Dronning Maud Land ist grau unterlegt, Dome Concordia mit einem Stern gekennzeichnet.

Ein wesentlicher Bestandteil des Vorerkundungsprogramms waren ausgedehnte Eis-

mächtigkeitmessungen. Aufgrund der großen zu bearbeitenden Fläche wurde das flugzeuggestützte elektromagnetische Reflexionsverfahren (EMR) eingesetzt. Es erlaubt einen sehr hohen Meßfortschritt und ist im Vergleich zu anderen Methoden relativ preiswert. Zudem können aus den Messungen auch Aussagen über die innere Struktur des Eises abgeleitet werden.

Im folgenden wird daher auf die physikalisch-technischen Grundlagen des eingesetzten Meßsystems eingegangen. Die Ergebnisse der Aero-EMR-Messungen werden diskutiert und in Karten zusammengestellt. Weiterhin werden Modelle vorgestellt, die unter Einsatz der neu erarbeiteten Datensätze weitere Hinweise für die Auswahl einer Lokation für eine Eiskerntiefbohrung liefern. Zum Abschluß wird die geeignetste Lokation in DML unter Berücksichtigung der Anforderungen an den Eiskern sowie den in DML angetroffenen Gegebenheiten aus geophysikalisch/glaziologischer erarbeitet.

Kapitel 2

Physikalische und technische Grundlagen

Für die Wahl einer Bohrlokation für einen tiefreichenden Eisbohrkern ist die Eismächtigkeitsverteilung in der näheren und weiteren Umgebung der geplanten Bohrung von großer Bedeutung. Denn tiefe Eiskerne können in größeren Tiefen, im Gegensatz zu den obersten Abschnitten, nicht mehr durch Abzählen von Extrema der am Eiskern gemessenen Parametern, wie z.B. $\delta^{18}\text{O}$, Cl oder Dichte, datiert werden, sondern nur noch durch Modellierung (Dansgaard et al., 1993). Dazu ist eine ungestörte Lagerung unabdingbar, ebenso wie die Kenntnis der Fließgeschichte des Eises. Somit wird ein Meßverfahren benötigt, das erlaubt, die wichtigsten Parameter im Hinblick sowohl für die Auswahl einer Bohrlokation wie auch für eisdynamische Modellierung, einer mehrere 100 000 km² großen Fläche in nur wenigen Wochen, beziehungsweise Monaten mit vertretbarem logistischen Aufwand zu kartieren. Diese Parameter sind die Eismächtigkeit und innere Struktur eines Eisschildes.

Das flugzeuggestützte elektromagnetische Reflexionsverfahren (EMR), englisch radio echo sounding (RES), erfüllt diese Anforderungen. Es ist eine preiswerte und schnelle Methode, besonders im Vergleich zur Seismik, um Eismächtigkeiten und die innere Struktur von Eisschilden, Schelfeisen und Gletschern zu erforschen. Da es somit das Arbeitsverfahren der Wahl war für die Kartierung des zentralen und westlichen Dronning Maud Landes (DML), soll in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels auf die Grundlagen des Meßverfahrens, die eingesetzte Apparatur sowie die nötigen Schritte zur Umrechnung der gemessenen Laufzeiten in eine Tiefenskala gegeben werden. Zum Abschluß wird noch auf die Bearbeitungsschritte zur Geokodierung und Interpolation der Daten auf die Fläche eingegangen.

2.1 Physikalische Grundlagen

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen kann unter Annahme harmonischer Felder mit der sogenannten Wellengleichung, Gleichung 2.1, einer Kombination der Maxwellgleichungen, die die Grundlage der Elektrodynamik bilden, beschrieben wer-

den. Gleichung 2.1 enthält die Formulierung für das elektrische Feld \underline{E}^* . Das magnetische Feld \underline{H}^* erfüllt dieselbe Gleichung. Zur Kennzeichnung von Vektoren wird im folgenden der Unterstrich ($\underline{\quad}$) benutzt, $\underline{x} = (x, y, z)$, komplexe Größen sind mit $*$ gekennzeichnet.

$$\left(\frac{d^2}{d\underline{x}^2} + k^{*2} \frac{d^2}{dt^2} \right) \underline{E}^* = 0 \quad (2.1)$$

Unter Berücksichtigung der Maxwellgleichungen ergibt sich die komplexe Wellenzahl ik^* wie folgt:

$$ik^* = \sqrt{i\mu^*\omega(\sigma + i\epsilon^*\omega)} = \alpha + i\beta \quad (2.2)$$

Mit: σ elektrische Leitfähigkeit in Siemens pro Meter

ω Kreisfrequenz in Hertz

$\mu^* = \mu_0\mu_r^*$ komplexe Permeabilität in Henry pro Meter

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$

μ_r^* komplexe relative Permeabilität, für nicht ferromagnetische Stoffe,

wie z.B. Vakuum und Eis, gilt $\mu_r^* = 1$

$\epsilon^* = \epsilon_0\epsilon_r^*$ die Permittivität in Farad pro Meter

$\epsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1} \approx \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ F m}^{-1}$

ϵ_r^* komplexe relative Permittivität, für Vakuum = 1

$i = \sqrt{-1}$

Für homogene ebene Wellen kann Gleichung 2.2 in einen Dämpfungsfaktor α und einen Phasenfaktor β gegliedert werden. Die komplexe Permittivität kann weiter in Real- und Imaginärteil gemäß Gleichung 2.3 gegliedert werden. ϵ_r' ist dabei der Realteil der Dielektrizitätskonstanten (DK).

$$\epsilon^* = \epsilon_0\epsilon_r^* = \epsilon' - i\epsilon'' = \epsilon_0 \left(\epsilon_r' - i \frac{\sigma}{\epsilon_0\omega} \right) \quad (2.3)$$

Der in der Literatur oft aufgeführte Tangens des Verlustwinkels $\tan \delta$, Gleichung 2.4, ist ein materialabhängiges Maß für die Absorption elektromagnetischer Wellen. In Tabelle 2.1 sind einige Werte für Eis und Wasser bei verschiedenen Temperaturen und Frequenzen zusammengefaßt.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0\epsilon_r'} \quad (2.4)$$

Mit Gleichung 2.4 lassen sich der in Gleichung 2.2 aufgeführte Dämpfungsfaktor α und der Phasenfaktor β übersichtlicher formulieren:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu^*\epsilon^*}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)} \quad (2.5)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu^*\epsilon^*}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1)} \quad (2.6)$$

Wobei α die Einheit Neper pro Meter hat. Die Umrechnung in die heute gebräuchliche Einheit Dezibel pro Meter erfordert lediglich die Multiplikation mit einer Konstanten: $\alpha' = 8,685890 \alpha$. Im Strahlungsfall, d.h. $\tan \delta \ll 1$, gilt nach Gleichung 2.5 $\alpha \approx 0$ und Gleichung 2.6 kann unter Berücksichtigung von $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ zur Berechnung der Phasenausbreitungsgeschwindigkeit herangezogen werden:

$$v = \frac{\omega}{\beta} \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon'_r}} \quad (2.7)$$

Tabelle 2.1: Realteil der relativen DK, Verlustwinkel, Ausbreitungsgeschwindigkeit und Absorptionskoeffizienten für Luft, Wasser und Eis bei unterschiedlichen Frequenzen und Temperaturen. Aus: ¹=Johari und Charette (1975), ²=Jezek (1980), ³=Hippel (1958).

Medium	f in MHz	ϵ'_r	$\tan(\delta)$	v in $\text{m } \mu\text{s}^{-1}$	α' in dB m^{-1}
Vakuum(\approx Luft) ³	0- ∞	1	0	299,8	0
Eis (-20°C) ¹	35	3,180	0,002303	168,1	0,012
Eis (-1°C) ¹	35	3,208	0,0108	167,4	0,062
Eis (-20°C) ¹	60	3,168	0,00115	168,4	0,007
Eis (-1°C) ¹	60	3,200	0,00646	167,6	0,037
Meereis (-3°C) ²	35	3,340	0,200	164,0	0,116
Wasser (1,5°C) ³	35	81	0,004	32,1	0,119
Meerwasser (1,5°C) ^{2,3}	35	81	18,290	10,3	174,9

Reflexion und Transmission können analog zur Optik beschrieben werden. Da der Abstand der Antennen von 13 m zueinander im Vergleich zur Flughöhe, in der Regel zwischen 300 m und 600 m, klein ist, genügt die Betrachtung des senkrechten Einfalls. Für Eis gilt, wie bereits erwähnt, $\mu_r^* \equiv 1$ und mit $z = \sqrt{\frac{\epsilon'_{r1}}{\epsilon'_{r2}}}$ ergibt sich der Amplitudenreflexionskoeffizient R^2 zu:

$$R^2 = \left(\frac{z-1}{z+1} \right)^2 \quad (2.8)$$

und der Amplitudentransmissionskoeffizient T^2 zu:

$$T^2 = 1 - R^2 = \left(\frac{2}{z+1} \right)^2 \quad (2.9)$$

Aero-EMR-Messungen profitieren vom sogenannten Brechungsgewinn N_f . Er resultiert aus der Tatsache, daß elektromagnetische Wellen bei Transmission in ein optisch dichteres Medium, hier Luft-Eis, zum Lot hin gebrochen werden. Das Verhältnis zwischen dem Radius der beleuchteten Fläche des ungebrochenen Strahls R zum gebrochenen Strahl r wird als Brechungsgewinn definiert, siehe Skizze in Abbildung 2.1(a). Mit Flughöhe H und Eismächtigkeit h ergibt sich folgende Gleichung:

$$N_f = 20 \log \frac{R}{r} = 20 \log \frac{\frac{H}{h} + 1}{\frac{H}{h} + \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r E_{is}}}} \quad (2.10)$$

Für typische Flughöhen von 300 m, Eismächtigkeiten von 2000 m und $\epsilon_r E_{is}$ ergibt sich ein Brechungsgewinn von $N_f = 4,2$ dB (Bogorodsky et al., 1985). Wie aus Abbildung 2.1(b) ersichtlich, ist der Brechungsgewinn asymptotisch nach oben begrenzt.

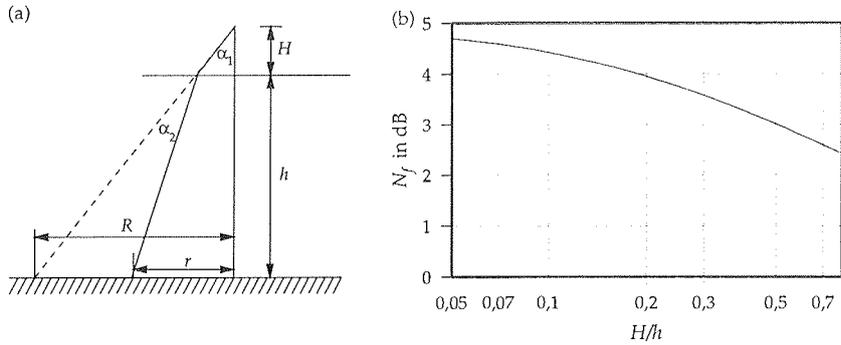


Abbildung 2.1: (a) Skizze zum Brechungsgewinn; (b) Brechungsgewinn als Funktion des Quotienten Flughöhe zu Eismächtigkeit (H/h) (nach Bogorodsky et al. (1985))

Die theoretisch mögliche Eindringtiefe kann mittels der sogenannten Radargleichung (2.11) bestimmt werden (Bogorodsky et al., 1985):

$$P_r = P_t \frac{G^2 A q \frac{1}{L}}{(4\pi)^2 [2(H+h)]^2} \quad (2.11)$$

Dabei ist P_r die empfangene, P_t die abgestrahlte Leistung, L die Summe aller Verluste, G der Antennengewinn, A die wirksame Antennenfläche, q Brechungsgewinn (siehe auch Abbildung 2.1), H Höhe der Antennen über der Eisoberfläche und h die Eismächtigkeit. Die Verluste L können wie in Gleichung 2.12 weiter gegliedert werden in Kabel- L_K , Transmissionsverluste an der Oberfläche L'_T , Absorption im Eis L_A und Reflexionsverluste am Eis-Felsübergang L''_R :

$$L = L_K^2 L_T'^2 L_A L_R'' \quad (2.12)$$

Um die maximal erreichbare Eindringtiefe in Abhängigkeit der im allgemeinen unbekanntenen Absorption und des Reflexionsverlustes ausdrücken zu können, wird die Radargleichung, Gleichung 2.11, nach L umgestellt, in Gleichung 2.12 eingesetzt und nach $L_A L_R''$ aufgelöst. Alle systemabhängigen Parameter, wobei für die Empfangsleistung die kleinste detektierbare Leistung eingesetzt wird, können der Übersicht halber zusammengefasst werden:

$$L_A L_R'' = \frac{C_2 \tau_t}{(H + h)^2} \quad (2.13)$$

$$\text{mit } C_2 = \frac{P_t A^2 q g}{4 \lambda^2 (L_T)^2 L_K^2 k_B T}$$

Dabei ist τ_t die Pulslänge in Nanosekunden, λ in die Wellenlänge in Luft in Meter, g der Stapelgewinn, L_T die Wellenlänge, T die Rauschtemperatur in Kelvin und k_B die Boltzmannkonstante ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$). Abbildung 2.2 zeigt die nach Gleichung 2.13 berechnete Eindringtiefe für das kleinste noch detektierbare Signal in Abhängigkeit der maximal möglichen Absorption L_r und des Reflexionsverlustes L_R'' für zwei unterschiedlich lange Pulse (60 ns, bzw. 600 ns) unter Berücksichtigung der für die AWI-Apparatur geltenden Systemparameter. So kann zum Beispiel die Apparatur noch ein Signal des 600 ns Pulses aus 3100 m Tiefe detektieren, wenn die Absorption im Eis und die Reflexionsverluste am Eis-Fels-Übergang zusammen nicht mehr als 160 dB betragen. Wird der 60 ns Puls eingesetzt, so dürfen Absorption und Reflexionsverlust nicht mehr als 150 dB erreichen.

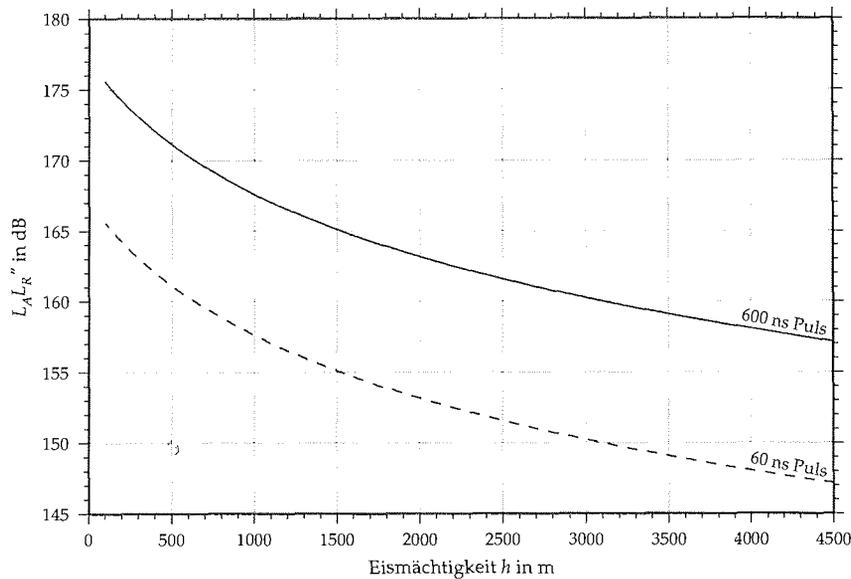


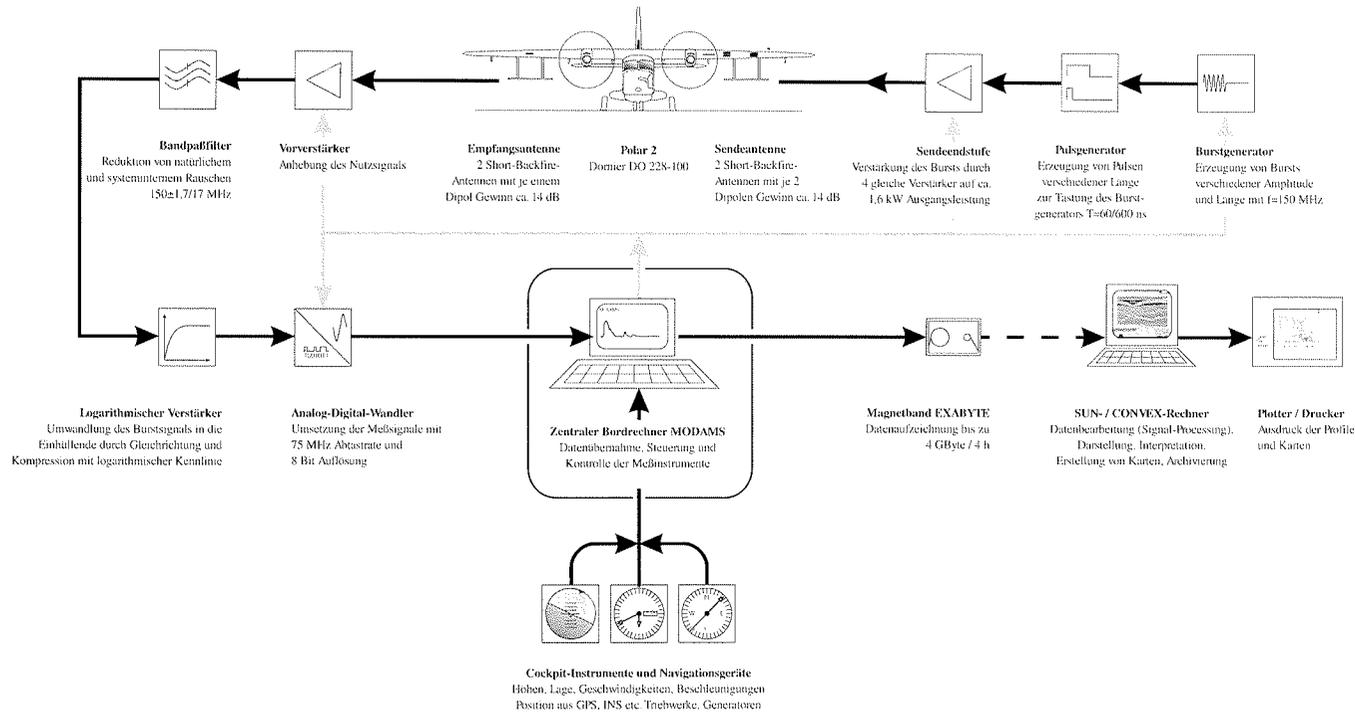
Abbildung 2.2: Größtmögliche Eindringtiefen für den 60 ns (gestrichelte Kurve) und den 600 ns (durchgezogene Kurve) Puls bei einer Flughöhe vom 500 m in Abhängigkeit von Reflexionsverlust und Absorption für die AWI-EMR-Apparatur. D.h., wenn Absorption und Reflexionsverlust am Eis-Fels-Übergang bei gewählter Tiefe und Pulslänge kleiner oder gleich dem durch die entsprechende Kurve gegebenen Wert sind, so wird das reflektierte Signal von der Apparatur detektiert.

2.2 Apparatur

Die eingesetzte Aero-EMR-Apparatur wurde speziell für den Einsatz in polaren Regionen mit dem Polarflugzeug *Polar2* vom Institut für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) in Zusammenarbeit mit Aero-data Flugmeßtechnik GmbH, Braunschweig, nach Vorgaben von Prof. Dr. H. Miller, AWI (pers. Mitt.) angefertigt. Sie wurde 1994 in Grönland erfolgreich getestet und erstmalig eingesetzt (Hempel und Miller, 1996). In der Antarktis kam sie in dem darauffolgenden Südsommer 1994/95 zum Einsatz (Eckstaller, 1997). 1997 wurde der bis dahin zweikanalige Empfangsteil um einen dritten Kanal mit dem Ziel erweitert, das Auflösungsvermögen weiter zu steigern. Abbildung 2.3 zeigt den schematischen Aufbau der EMR-Apparatur. Die schwarzen Pfeile kennzeichnen den Datenfluß, die grauen die Steuerungsmöglichkeiten durch den zentralen Bordrechner.

Die Apparatur erzeugt wahlweise 60 ns, bzw. 600 ns lange Pulse mit einer Mittenfrequenz von 150 MHz und einer maximalen Sendeleistung von 1,585 kW. Bei den eingesetzten Antennen handelt es sich um „short-backfire“-Antennen mit jeweils 14,2 dB Antennengewinn, wobei die Tragfläche als Reflektor genutzt wird. Das empfangene Signal durchläuft einen Vorverstärker, einen per Bordcomputer auswählbaren Bandpaßfilter und wird zur Analog-Digitalwandlung in drei Signalstränge mit unterschiedlicher Verstärkung aufgeteilt und diskretisiert. Dabei erfolgt eine logarithmische Signalkompression unter Verlust der Phaseninformation. Dies ermöglicht eine sehr schnelle weitere Signalbearbeitung, so daß die Apparatur eine Meßrate von 20 Hz bei für das bereits 200fach gestapelte Signal erreicht. Den Kanälen wird in Abhängigkeit ihrer Vorverstärkung ein Offset zugeordnet, so daß das diskretisierte Signal eindeutig aus den drei Kanälen zusammengesetzt werden kann. Dabei wird solange der jeweils unempfindlichere Kanal ausgelesen, bis der Übergang zum nächst empfindlicheren erreicht wird. Somit können an der Empfangsantenne anliegende Eingangsleistungen von +10 dBm bis -110 dBm mit einer Auflösung von 24-Bit digitalisiert werden. Bei einer typischen Geschwindigkeit über Grund von 240 km h^{-1} beträgt der Spurabstand 3,35 m. Die empfangenen Signale werden mit einem Abtastintervall von 13,33 ns diskretisiert. Die durch die Pulslänge begrenzte vertikale Auflösung beträgt somit etwa 50 m in Eis für den 600 ns Puls und 5,6 m für den 60 ns Puls, da 60 ns kein ganzzahliges Vielfaches des Abtastintervalls ist.

Der zentrale Bordrechner speichert das empfangene Signal zusammen mit weiteren, für die spätere Interpretation der Daten wichtigen Parametern, wie z.B. GPS-Position, barometrische Höhe, INS-Daten (inertial navigation system), Fluggeschwindigkeit, etc., auf Magnetbändern ab. Bei einer Meßrate von 20 Hz werden circa 1 GB Daten pro Meßstunde erzeugt. Tabelle 2.2 enthält die wichtigsten Parameter der EMR-Apparatur. Eine detaillierte Beschreibung der Apparatur findet sich in Nixdorf et al. (1999).



11

Abbildung 2.3: Schemaskizze der Aero-EMR-Apparatur. Mit schwarzen Pfeilen ist der Signalfluß gekennzeichnet, mit grauen die Steuerungsmöglichkeiten durch den zentralen Bordrechner MODAMS (nach Nixdorf et al. (1999))

Tabelle 2.2: Technische Daten der EMR-Apparatur.

Mittelfrequenz	150 MHz
Pulslänge	60 ns, 600 ns
maximale Sendeleistung	1585 W
Antennengewinn	je 14,2 dB
Meßrate	20 Hz
Meßpunktabstand ($v = 240 \text{ km h}^{-1}$)	3,35 m
Registrierzeitfenster	50 μs
Abtastintervall	13,33 ns

2.3 Bearbeitung und Auswertung der Sektionen

Die Bearbeitung der im Flugzeug aufgezeichneten Daten erfolgt im AWI mit dem seismischen Programmpaket FOCUS/DISCO. Dies ist möglich, da sich seismische Daten und die des EMR sowohl in den typischen Geschwindigkeiten und Frequenzen, als auch in den Abtastintervallen um einen Faktor von 10^{-6} unterscheiden ($\text{m s}^{-1} \Leftrightarrow \mu\text{s}^{-1}$, $\text{Hz} \Leftrightarrow \text{MHz}$, $\text{ms} \Leftrightarrow \text{ns}$). Da das Aufzeichnungsformat aufgrund der hohen Datenrate keinem seismischen entspricht, werden die Daten vor Beginn der weiteren Bearbeitung in das DISCO-Format gewandelt und in der Regel auch gleichzeitig horizontal gestapelt. Letzteres wird aus zwei praktischen Erwägungen heraus getan. Zum einen wird dadurch der Datenumfang erheblich reduziert, zum anderen wird der Rausch-Signal-Abstand, unter Annahme statistisch verteilten Rauschens, gemäß dem \sqrt{n} -Gesetz verbessert. Tests haben ergeben, daß im „toggle“-Mode bis zu 10 Spuren aufaddiert werden können, bevor es zu einer Zerstackelung des Signals kommt (Göktas, 1999).

Ein weiterer grundlegender Bearbeitungsschritt ist die Differentiation der Spuren. Dieses schnelle Verfahren, es entspricht einer Hochpaßfilterung und hebt die Signalfanken hervor, ist notwendig, um eine genauere Bestimmung der Einsätze zu ermöglichen, da das System nur die Einhüllende des Signals registriert. Die so entstandene Zeitreihe kann mit klassischen seismischen Methoden weiterbearbeitet werden. Im vorliegenden Fall sind dies eine Kombination von Hochpaßfiltern und Bandpaßfiltern zur Unterdrückung von Störsignalen, eine Amplitudenregelung zur weiteren Signalkompression und eine statische Korrektur der Sektionen. Letzteres führt zur geometrisch richtigen Lage der Sektionen und erleichtert im weiteren Verlauf der Datenbearbeitung die Bestimmung der verschiedenen Reflexionseinsätze.

Die Abbildungen 2.4 und 2.5 zeigen exemplarisch denselben Abschnitt eines Profils. In Abbildung 2.4 ist die Registrierung des langen 600 ns Pulses abgebildet und in Abbildung 2.5 die des kurzen 60 ns Pulses. Sie wurden gleichzeitig während eines Fluges mit dem „toggle“-Mode registriert. Im „toggle“-Mode (to toggle (engl.) - umschalten) schaltet die Apparatur jedesmal nach Registrierung einer Spur das Sendesignal um, so daß abwechselnd immer eine 600 ns und eine 60 ns Spur registriert werden. Dabei kommt es zu einem Versatz der einzelnen Spuren gemäß Tabelle 2.2 von 3,35 m.

Der Vorteil dieses Modus liegt auf der Hand: Es wird simultan mit höchstmöglicher Auflösung und maximaler Leistung, entsprechend maximaler Eindringtiefe, auf einem Profil gemessen und somit ein maximaler Informationsgewinn auf einem Flug erreicht. Auch der Nachteil ist offensichtlich: Das horizontale Auflösungsvermögen wird um den Faktor zwei schlechter, der Spurabstand zweier Registrierungen derselben Pulslänge beträgt somit 6,70 m. Dies ist das Doppelte des in Tabelle 2.2 angegebenen Wertes. Jedoch sind die zusätzlich erhaltenen Informationen höher zu bewerten als der Verlust an horizontalem Auflösungsvermögen.

Die Eismächtigkeiten werden aus dem Produkt der Laufzeitdifferenz der Reflexionen an Eisober- und Eisunterseite und der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Eis bestimmt. Die Reflexionseinsätze werden jeweils mit Hilfe eines „mute“-Moduls von Focus interaktiv am Bildschirm bestimmt. Jeder Punkt wird dabei einzeln per Mausklick markiert. Liegt für eine Reflexion an der Eisunterseite keine an der Eisoberseite vor, so wird diese mittels linearer Interpolation aus den Einsätzen der benachbarten Spuren bestimmt. Dieses ist möglich ohne größere Ungenauigkeiten hinnehmen zu müssen, da die Topographie der Eisoberfläche nur geringe kleinräumige Variationen aufweist, wie in Abbildung 2.4 und 2.5 ersichtlich ist. Somit kann recht einfach und zuverlässig die Mächtigkeit Eises bestimmt werden.

Interne Horizonte wurden mit dem seismischen Interpretationspaket LANDMARK kartiert. Das Programm kann im Gegensatz zu FOCUS zwei Profile an ihren Kreuzungspunkten nebeneinander darstellen, so daß ein Horizont von einem Profil auf das nächste übertragen werden kann. Desweiteren wird, auch ohne diese Option einzusetzen, die Lage der Schnittpunkte der bereits in anderen Sektionen markierten Horizonte angezeigt. Damit wird sicher gestellt, daß in allen Sektionen derselbe Horizont verfolgt wird. Eine Kontrolle erfolgt implizit, wenn mehrere Sektionen ein geschlossenes Polygon bilden. Zusätzlich können die angerissenen Horizonte in einer Karte dargestellt und somit Unstimmigkeiten frühzeitig erkannt werden. Erleichtert wird das Anreißen durch semi-automatische Pickroutinen. Aufgrund des unregelmäßigen Untergrundreliefs und der in der Regel nicht durchgängig verfolgbareren Reflexionen an der Eisunterseite wurde LANDMARK nur zum Kartieren der internen Horizonte eingesetzt.

Die Einsätze der Oberflächenreflexionen können mit hoher Genauigkeit, etwa auf ± 3 Abtastpunkte, entsprechend circa $\pm 3,3$ m, bestimmt werden. Die der Eisunterseite sind weniger gut bestimmbar, aber immer noch auf etwa auf ± 12 Abtastpunkte, entsprechend $\pm 13,4$ m. Hinzu kommt die Ungenauigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Größenordnung von etwa 0,5%, so daß sich für die Eismächtigkeit eine Genauigkeit von ± 20 m ergibt. Interne Strukturen hingegen, wie sie zahlreich in Abbildung 2.5 zu sehen sind, können auf etwa ± 15 m bestimmt werden.

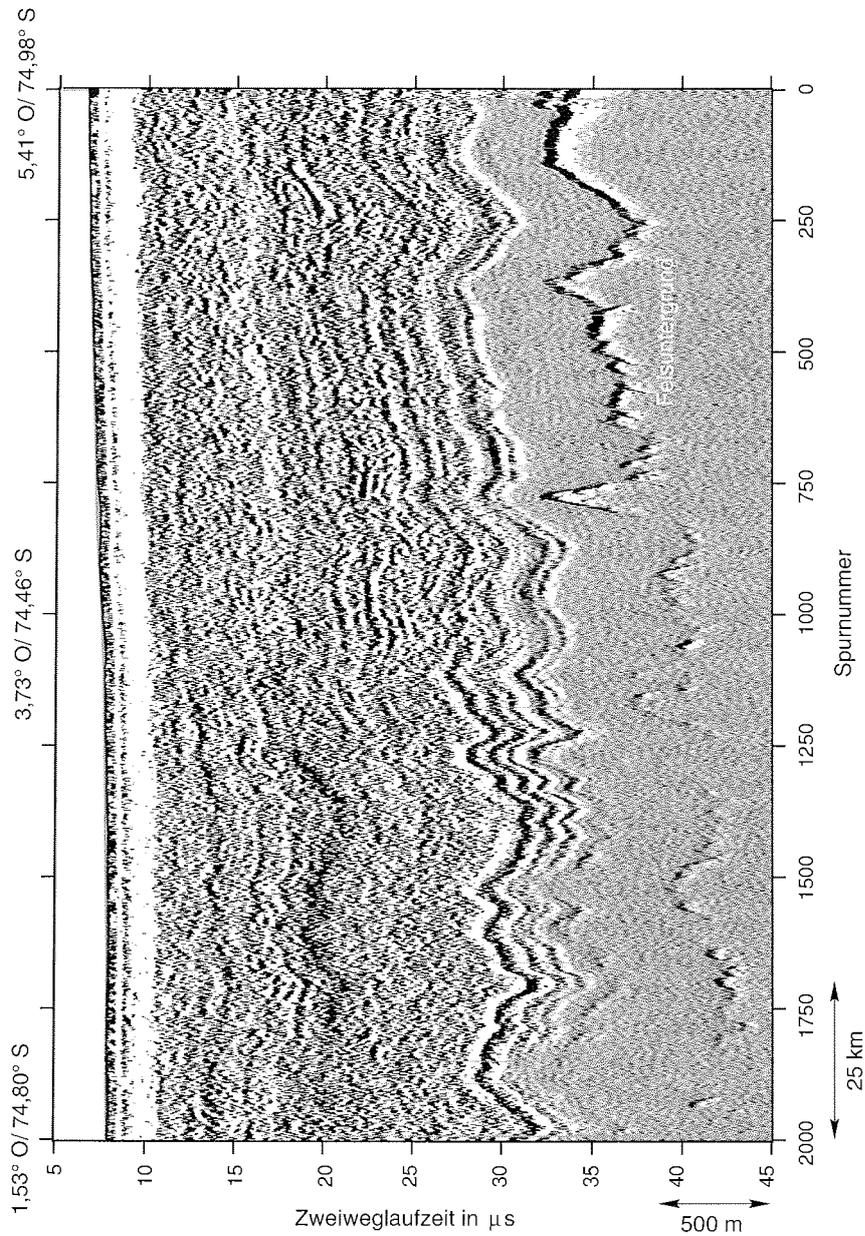


Abbildung 2.4: Beispiel für eine mit dem 600 ns Puls gemessene Sektion, zur Lage des Profils siehe Abb. 2.6. Die 175 km lange Sektion ist differenziert, statisch korrigiert sowie mit Bandpaßfiltern und Amplitudenregelung bearbeitet. Die Eismächtigkeiten variieren zwischen 2075 m und 2990 m, die Überhöhung ist 35fach.

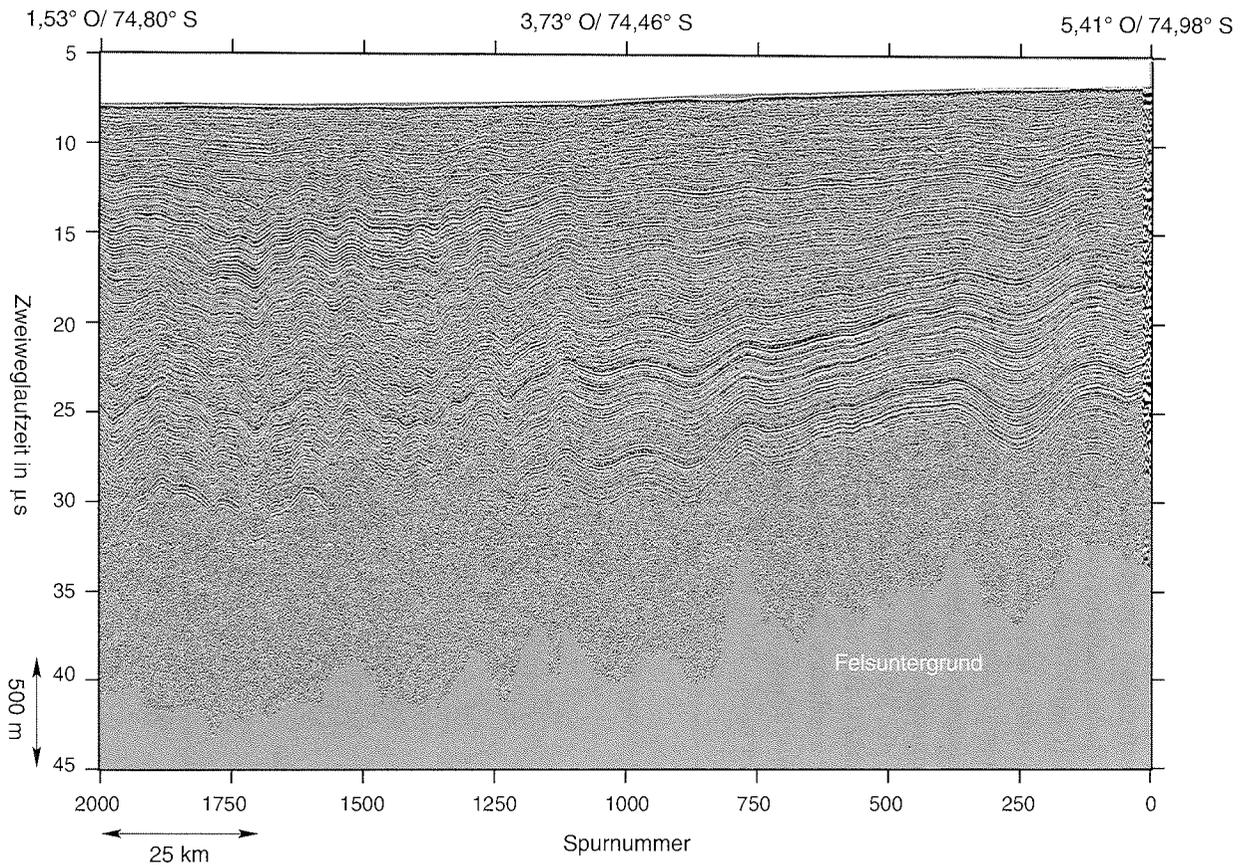


Abbildung 2.5: Beispiel für eine mit dem 60 ns Puls gemessene Sektion, zur Lage des Profils siehe Abb. 2.6. Die 175 km Sektion ist differenziert, statisch korrigiert sowie mit Bandpassfiltern und Amplitudenregelung bearbeitet. Der Untergrund ist entlang der in Abb. 2.4 deutlich erkennbaren Reflexionen am Übergang Eis-Fels einheitlich grau eingefärbt, die Überhöhung ist 35fach.

2.4 Ausbreitungsgeschwindigkeiten und Firnkorrektur

Um die gemessenen Laufzeiten in Teufen umrechnen zu können, muß die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen bestimmt werden. Bei Messungen am Boden geschieht dies im allgemeinen mit sogenannten „common midpoint“-Messungen (CMP) (Telford et al., 1990). Bei der CMP-Messung werden Sendee- und Empfangsantenne mit konstantem Inkrement vom gemeinsamen Mittelpunkt auseinander bewegt. Diese Meßanordnung erlaubt die tiefenabhängige Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit (Garotta und Michon, 1967). Dieses Verfahren steht für flugzeuggestützte Messungen aus praktischen Gründen nicht zur Verfügung. Jedoch kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit unter Ausnutzung von Gleichung 2.7 (siehe Abschnitt 2.1) bestimmt werden, sofern die relative DK bekannt ist. Im zentralen und westlichen Dronning Maud Land stehen fünf 100-150 m lange Eiskerne, siehe Abbildung 2.6, zur Bestimmung der DK zur Verfügung (Oerter et al., 1999; Oerter et al., 2000; Karlöf et al., 2000; Holmlund et al., 2000).

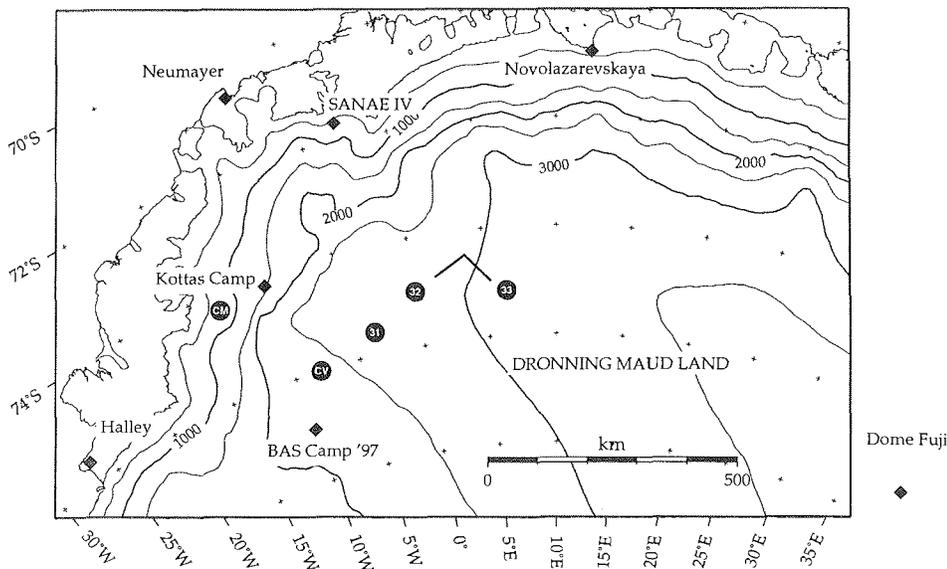


Abbildung 2.6: Lage der fünf 100-150 m Eiskernbohrungen in DML. Zur Orientierung sind einige Stationen und Sommerlager eingetragen, die fette Linie kennzeichnet die Lage der in Abb. 2.4 und 2.5 dargestellten Sektion. Das Konturintervall der Isohypsen beträgt 500 m.

Die DK wurde mit DEP-Messungen (dielectric profiling, Messungen der elektrischen Leitfähigkeit und der komplexen Permeabilität) (Wilhelms et al., 1998) an den Eiskernen in 5 mm Abständen gemessen (Wilhelms, 2000). Die mit den so bestimmten DK-Werten errechneten Ausbreitungsgeschwindigkeiten sind somit Intervallge-

schwindigkeiten. Mit Hilfe von Gleichung 2.14 kann daraus die laufzeitabhängige RMS-Geschwindigkeit (root mean square) errechnet werden (Dix, 1955), die zur Teufenumrechnung für die jeweilige Laufzeit eingesetzt werden kann:

$$v_{RMS_n} = \sqrt{\frac{v_{Int_n}^2 * (t_n - t_{n-1}) + v_{RMS_{n-1}}^2 * t_{n-1}}{t_n}} \quad (2.14)$$

mit $t_n = \frac{z_n}{v_{Int_n}}$

Dabei ist v_{RMS_n} die RMS-Geschwindigkeit bis zur n -ten Schicht in Meter pro Mikrosekunde, v_{Int_n} die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der n -ten Schicht in Meter pro Mikrosekunde, t_n die Laufzeit bis zur Unterseite der n -ten Schicht in Mikrosekunden. Da die DK im Falle von Eis proportional zur Dichte ist und diese in Teufen von circa 100-250 m ihren maximal Wert von 917 kg m^{-3} erreicht, ist unterhalb dieser Grenze die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen nahezu konstant. In Abbildung 2.7 sind die aus den DEP-Messungen berechneten Intervallgeschwindigkeiten der fünf in DML gebohrten flachen Eiskerne dargestellt. Es ist lediglich eine geringe Temperaturabhängigkeit zu beobachten. So geben Glen und Paren (1975) für 0°C eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von $167,7 \text{ m } \mu\text{s}^{-1}$ an und für -60°C $168,7 \text{ m } \mu\text{s}^{-1}$. Für Eis mit der Dichte 917 kg m^{-3} und einer Temperatur von -20°C beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit $v_{Eis} = 168 \text{ m } \mu\text{s}^{-1}$ (Bogorodsky et al., 1985). Die Teufenumrechnung kann für Zweiweglaufzeiten größer der Laufzeit t_0 durch Anbringen eines Korrekturterms h_{Firn} für den Bereich des Firns im oberen Abschnitt eines Eisschildes durch eine einfache lineare Gleichung beschrieben werden:

$$z = \frac{v_{Eis} * t}{2} + h_{Firn} \quad \text{für } t > t_0 \quad (2.15)$$

Aufgrund der DK-Messungen an den fünf 100-150 m langen Eiskernen aus dem zentralen und westlichen DML konnte der Firnkorrekturterm $h_{Firn} = 13 \text{ m}$ und die Laufzeitgrenze mit $t_0 = 1,35 \text{ } \mu\text{s}$ bestimmt werden. Dies bedeutet, daß für die Umrechnung der Laufzeiten in Teufen für Zweiweglaufzeiten größer $1,35 \text{ } \mu\text{s}$ mit der nachfolgenden einfachen Gleichung ausgeführt werden kann:

$$z = \frac{168 * t}{2} + 13 \text{ m} \quad \text{für } t > 1,35 \text{ } \mu\text{s} \quad (2.16)$$

Für das Filchner-Ronne-Schelfeis, Antarktis, hat Blindow (1994) eine Firnkorrektur $h_{Firn} = 8,8 \text{ m}$ ermittelt, für Berkner Island, einem Eishöcker mit nahezu 1000 m Mächtigkeit im Filchner-Ronne-Schelfeis, wurde $h_{Firn} = 12,3 \text{ m}$ errechnet (Steinhage und Blindow, 1996, unpubliziert) und für die Umgebung des Summits in Grönland von Hodge et al. (1990) $h_{Firn} = 10 \text{ m}$ bestimmt.

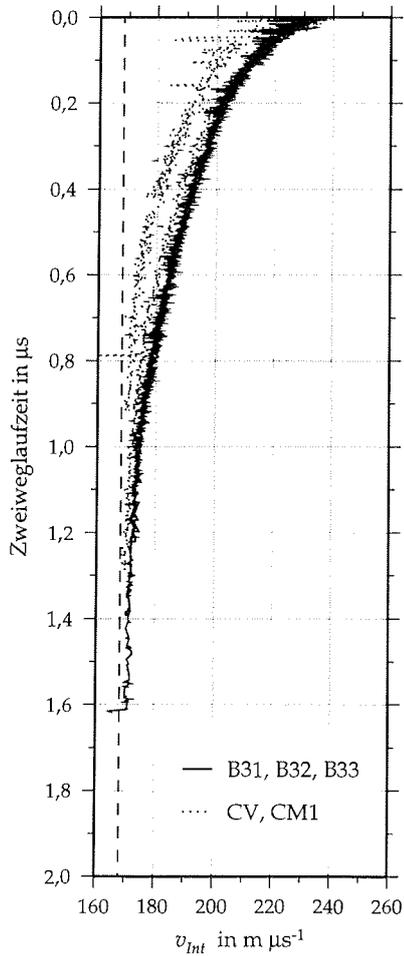


Abbildung 2.7: Intervallgeschwindigkeiten in $\text{m } \mu\text{s}^{-1}$ aus DEP-Messungen, die Intervallgeschwindigkeit für Eis der Dichte 917 kg m^{-3} ist als gestrichelte Gerade eingetragen. Zur Lage der Eiskernbohrungen s. Abb. 2.6.

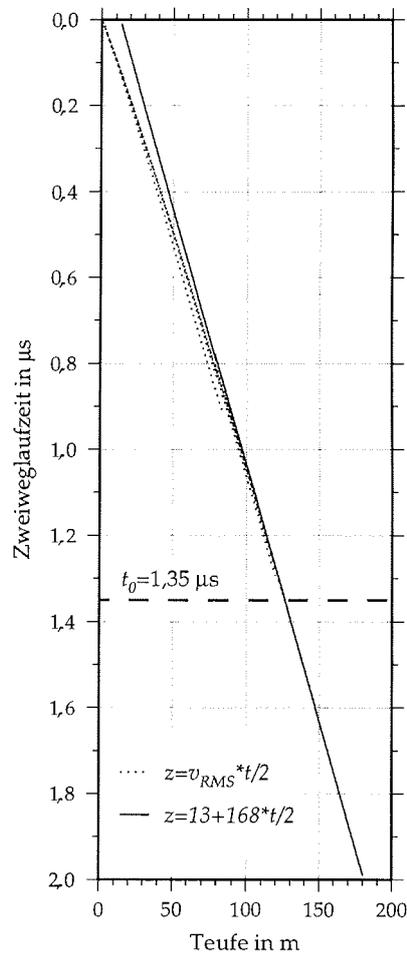


Abbildung 2.8: Vergleich der berechneten Teufe unter Anwendung von v_{RMS} , Gl. 2.14, punktierte Linien, und mittels Firnkorrektur, Gl. 2.15 mit $h_{Firn} = 13 \text{ m}$, durchgezogene Linie. Die gestrichelte Linie kennzeichnet t_0 .

2.5 Geokodierung

Die entlang der einzelnen Profile in Abhängigkeit der Spurnummer bestimmten Reflexionseinsätze, wurden mittels einfacher Hilfsroutinen mit den parallel zu den EMR-Daten abgespeicherten GPS-Koordinaten („global positioning system“) eines geodätischen SSI 4000 Trimble GPS-Empfänger verknüpft. Die ebenfalls mit abgespeicherten GNS- und INS-Daten („global navigation system“, bzw. „inertial navigation system“) des Flugzeugnavigationssystems haben sich als ungenauer erwiesen als die des Trimble-Empfängers. Dies hat sich bei der Detailbetrachtung einer kleinräumigen Befliegung gezeigt. In Abbildung 2.9 sind die Flugwege, wie sie sich aus GPS-, GNS- und INS-Daten ergeben, dargestellt. Nur unter Verwendung der GPS-Koordinaten stimmten an den Schnittpunkten die Eismächtigkeiten sowie die internen Horizonte darüber überein. Maßgebliche Quelle der Ungenauigkeiten ist das INS, ein auf einer Kreiselplattform und Beschleunigungssensoren basierendes System. Es berechnet die aktuelle Position aus der vorhergehenden sowie den dazwischen gemessenen Beschleunigungen. Ungenauigkeiten werden daher mit zunehmender Flugdauer aufaddiert, verstärkt wird dies durch eine systembedingte Drift aufgrund der Trägheit der Kreisel. Zudem sind die Rückstellkräfte in polnähe klein. Die GNS-Daten werden aus INS- und GPS-Messungen zusammengesetzt, um den systembedingten Fehler des INS zu unterdrücken. Jedoch gelingt dies nicht vollständig, wie in Abbildung 2.9 zu erkennen ist. Ein Vorteil des INS ist, daß es auch im Falle eines vollständigen Ausfalls des GPS-Systems die Position des Flugzeugs, wenn auch nicht ganz exakt, bestimmen kann. Dies ist aus Gründen der Flugsicherheit unerlässlich.

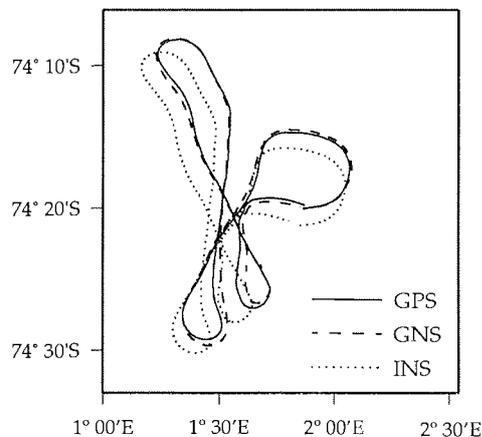


Abbildung 2.9: Vergleich von GPS-, GNS- und INS-Koordinaten anhand eines Profilausschnittes aus dem zentralen DML.

Zur Interpolation der linienhaften Messungen in die Fläche wurden die Punktdaten auf ein rechtwinkliges Raster, zentriert auf $\lambda_0 = \pm 0^\circ$ und $\phi_1 = 74^\circ$ Süd mittels der azimuthalen Lamberttransformation projiziert. Die Flächentreue der Projektion im-

pliziert, daß das Produkt aus Skalierungsfaktor h' und Verzerrungsfaktor k' konstant ist (Snyder, 1987):

$$h' * k' = 1 \quad (2.17)$$

$$k' = \left[\frac{2}{1 + \sin \phi_1 \sin \phi + \cos \phi_1 \cos \phi \cos(\lambda - \lambda_0)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

Dabei sind λ und ϕ geographische Koordinaten sowie λ_0 und ϕ_1 die Koordinaten des Projektionszentrums. Auf Basis der Gleichungen 2.17 und 2.18 kann somit die radiale Verzerrung vom gewählten Mittelpunkt für das Meßgebiet ermittelt werden. In Abbildung 2.10 ist das Ergebnis in 0,1% Abständen dargestellt.

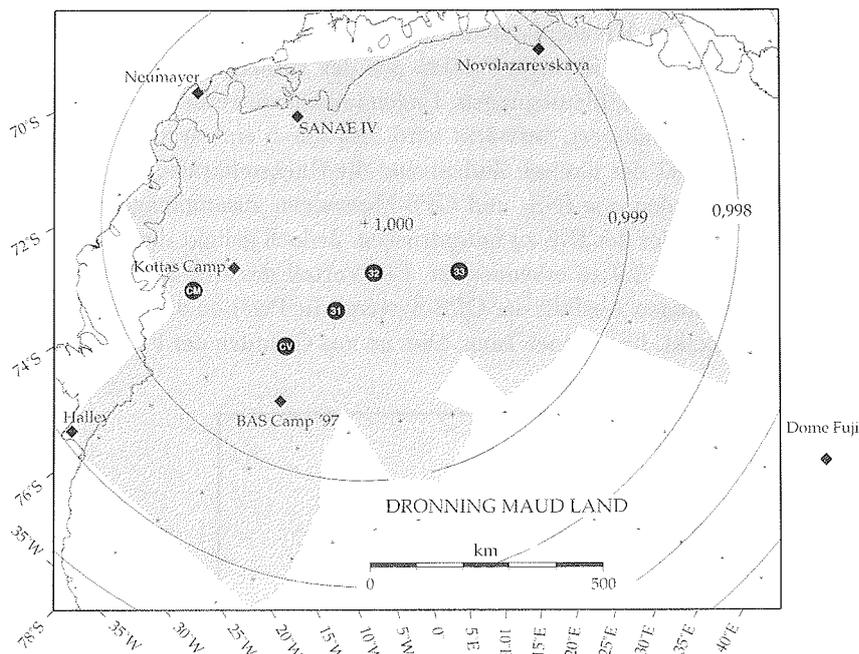


Abbildung 2.10: Radiale Verzerrung der schiefachsigen, azimutalen, flächentreuen Lambertprojektion für $\lambda_0 = \pm 0^\circ$ und $\phi_1 = 74^\circ$ Süd. Die unterlegte grau schattierte Fläche gibt die Ausdehnung des Meßgebietes wieder.

Der Interpolation der geokodierten Daten in die Fläche, mit einem „minimum curvature“ Algorithmus (Smith und Wessel, 1990), geht eine rasterorientierte Filterung voraus, um einen zur Interpolation geeigneten Datensatz zu erhalten. Dies so berechnete Raster spannt die Fläche mit der geringsten Oberflächenkrümmung durch die Eingangsdaten auf. Für die Kartendarstellung wurden die Datensätze anschließend wieder in das geographische Koordinatensystem zurücktransformiert.

Kapitel 3

Meßgebiet Dronning Maud Land

Dronning Maud Land (DML) liegt im atlantischen Sektor der Antarktis zu beiden Seiten des Greenwich-Meridians (Abbildung 1.2) und war in der Vergangenheit, vor Beginn der EPICA-Vorerkundungsexpeditionen durch Mitgliedsorganisationen des EPICA-Konsortiums (AWI, British Antarctic Survey, Norsk Polar Institute, etc.), nahezu unerforscht. Zwischen 1964-1968 näherte sich die U.S.-amerikanische South Pole-Queen (Dronning) Maud Land (SPQML) Traverse vom Südpol kommend DML (Beitzel, 1971; Clough et al., 1968) dem südlichen Abschnitt des Meßgebietes in DML. In den achtziger Jahren des 20. Jahrhunderts war der Bereich zwischen Eisfront und Randgebirge Ziel sowjetischer Flugzeug-EMR-Messungen (S. Popov, pers. Mitt., 1997). Weitere Befliegungen wurden vom Institut für Geophysik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster im Bereich des Ekströmisen (Thyssen und Grosfeld, 1988) und der Heimefrontfjella (Hoppe und Thyssen, 1988) durchgeführt. Abbildung 3.1 zeigt den Stand der 1997 in das BEDMAP Projekt eingebrachten Eismächtigkeitsmessungen in der Antarktis. Innerhalb des BEDMAP Projektes sollen neue, aktuelle Datensätze der Eismächtigkeit und des Untergrundes der Antarktis zusammengestellt werden (Lythe et al., eingereicht). Die darauf beruhenden Karten sollen auch digital für Modellierungszwecke zur Verfügung gestellt werden. Das Projekt wird von der European Ice Sheet Modelling Initiative (EISMINT) und dem Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) unterstützt.

Seit der Aufnahme der Befliegung des westlichen und zentralen DML im Rahmen der EPICA-Vorerkundung fanden, meist regional beschränkt, auch Eisdickenmessungen anderer Forschungseinrichtungen statt. So war zum Beispiel eine helikopter-gestützte EMR-Befliegung des Nivlisen und der angrenzenden Gebirgszüge von der russischen Überwinterungsstation Novolazarevskaya aus Teil des geophysikalischen Arbeitsprogrammes der GeoMaud Expedition 1995/96 der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Damm und Eisenburger, im Druck; Damm et al., 1998). Eisdickenmessungen entlang des Jutulstraumen wurden während der norwegischen Antarktisexpedition (NARE) 1996/97 durchgeführt (Näslund, 1997). In derselben Saison hat auch der British Antarctic Survey (BAS) mehrere Meßflüge vom BAS Camp'97, südlich des Kottas Lagers, durchgeführt (Walden und Corr, 1997). Die Auswertung bezüglich der Eismächtigkeiten wurde vom BAS dem AWI

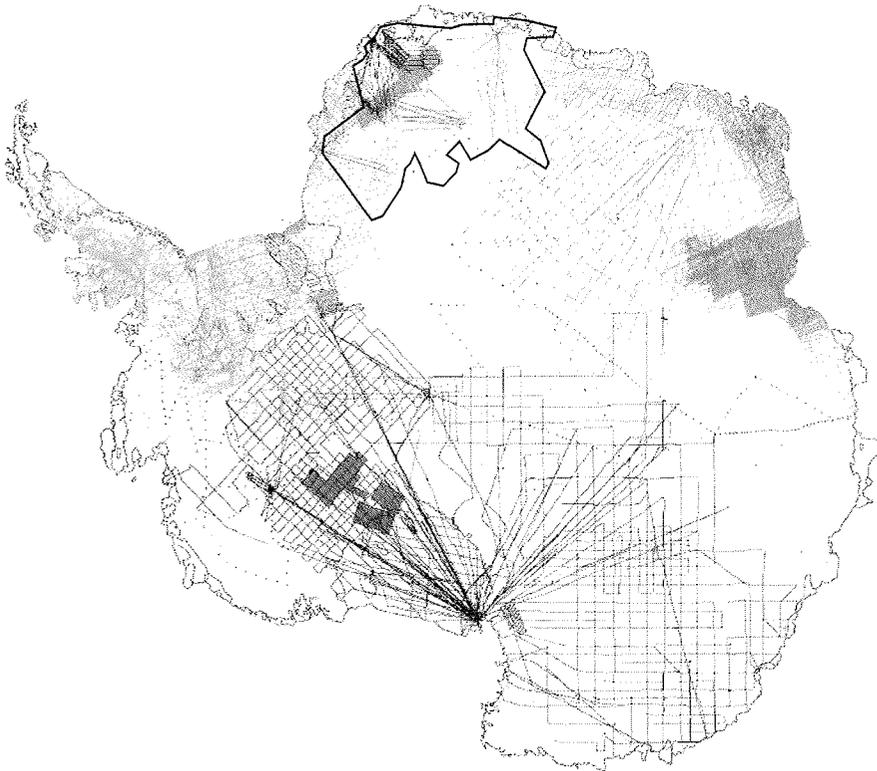


Abbildung 3.1: Verteilung von Eismächtigkeitsmessungen in der Antarktis, Stand 1997. Das Meßgebiet im zentralen und westlichen DML ist fett umrahmt, darin sind bereits die AWI-EMR-Meßflüge von 1994-97 verzeichnet. Entnommen dem auf dem „Symposium on Antarctica and Global Change“ in Hobart 1997 ausgestellten Poster, siehe auch <http://www.nerc-bas.ac.uk/public/aedc/bedmap/images/poster.jpg> (April 2000).

als Ergänzung der eigenen EPICA Vorerkundungsarbeiten zur Verfügung gestellt. Da sie in einigen Bereichen Lücken im AWI Flugmuster füllen, sind sie in den hier vorgestellten Datensätzen integriert.

In Abbildung 3.2 sind die EMR-Meßflüge des AWI zwischen 1994 und 1999 in DML zusammengefaßt. Es wurden in den fünf Südsommern Profile mit einer Gesamtlänge von 91500 km gemessen. Vervollständigt wird die Karte durch sechs Flüge des BAS mit einer Gesamtlänge von 5000 km. Die Flüge wurden von verschiedenen Stützpunkten in DML ausgeführt, hauptsächlich gingen sie vom Kottas Sommerlager aus. In der Saison 1994/95 wurde der westliche Abschnitt des Meßgebietes von der britischen Überwinterungsstation Halley aus befliegen. In der darauffolgenden Kampagne fanden Meßflüge von der Landepiste südlich der Schirmacher Oase, nahe der russischen Überwinterungsstation Novolazarevskaya im Osten des bearbeiteten Gebietes, und vom Kottas Sommerlager, etwa 400 km südlich der Neu-

mayer Station, statt. Die Neumayer Überwinterungsstation konnte für diese sowie die nachfolgenden Kampagnen als logistische Basis für die Flugzeugoperationen genutzt werden. 1996/97 wurde das bis dahin aufgespannte Netz von Fluglinien vom Kottas Sommerlager weiter verdichtet. Aufgrund der schwierigen Meereisbedingungen zu Beginn des Südsommers 1997/98 vor Neumayer mußte das gesamte für die Expedition benötigte Material per Helikopter vom Schiff entladen werden, so daß nur ein eingeschränktes Flugprogramm durchgeführt werden konnte. In der Saison 1998/99 konnte die Boden-EMR-Traverse des AWI in DML als wandernder Flughafen, inklusive Tankstelle, genutzt und somit die Datenpunktdichte im Südosten erweitert werden. Die Karte zeigt neben den Fluglinien zur besseren Orientierung einige Forschungsstationen, Feldlager sowie markante geographische Einheiten wie Gebirge und Gletscher. Die Oberflächentopographie beruht auf der Auswertung von Satellitendaten ergänzt durch terrestrische Messungen und wurde von J.L. Bamber zur Verfügung gestellt (Bamber und Huybrechts, 1996). Einen Überblick der AWI Flugzeug-EMR-Messungen ist in Tabelle 3.1 gegeben. Aus praktischen Erwägungen heraus wird hier auf die graphische Darstellung aller EMR-Profile verzichtet. Im Anhang A.2 und B.2 sind jedoch zwei ausgewählte Profilbeispiele für den 60 ns und den 600 ns Puls von 585 km, beziehungsweise 555 km Länge gegeben. Ausdrücke aller Profile liegen zusammen mit den original Datenbänder im Aero-Datenarchiv des AWI zur Ansicht vor.

Tabelle 3.1: Aero-EMR-Meßflüge in DML zwischen 1994-1999.

Neu - Neumayer, Novo - Novolazarevakaya, KC - Kottas Camp, Traverse - DML-Traverse.

* inklusive Kompensations- und Testflüge

Saison	Region	Basis	Flugstunden*	Meßflüge	Σ km
1994/95	westl. DML	Halley	97 h 50'	15	20013
1995/96	zentr. DML	Neu, Novo, KC	87 h 40'	20	25387
1996/97	zentr. DML	Neu, KC	65 h 10'	13	14148
1997/98	zentr. DML	Neu, KC	73 h 10'	19	16588
1998/99	zentr. DML	Neu, KC, Traverse	72 h 40'	22	15365
1994-99	westliches	und zentrales DML	396 h 30'	89	91501

3.1 Eismächtigkeitsverteilung

Zur Auswertung der Kampagnen von 1997/98 und 1998/99 konnte auf den tiefer eindringenden 600 ns Puls zurückgegriffen werden, da seit 1997 der sogenannte „toggle“-Mode zur Verfügung stand. In den Jahren zuvor wurde vom Meßtechniker während des Fluges anhand eines Analogausdruckes der eingesetzte Puls gewählt, wobei möglichst lange der höher auflösende 60 ns Puls zum Einsatz kam und erst bei schwächer werdenden, beziehungsweise verschwindenden Untergrundsreflexionen umgeschaltet

KAPITEL 3. MESSGEBIET DRONNING MAUD LAND

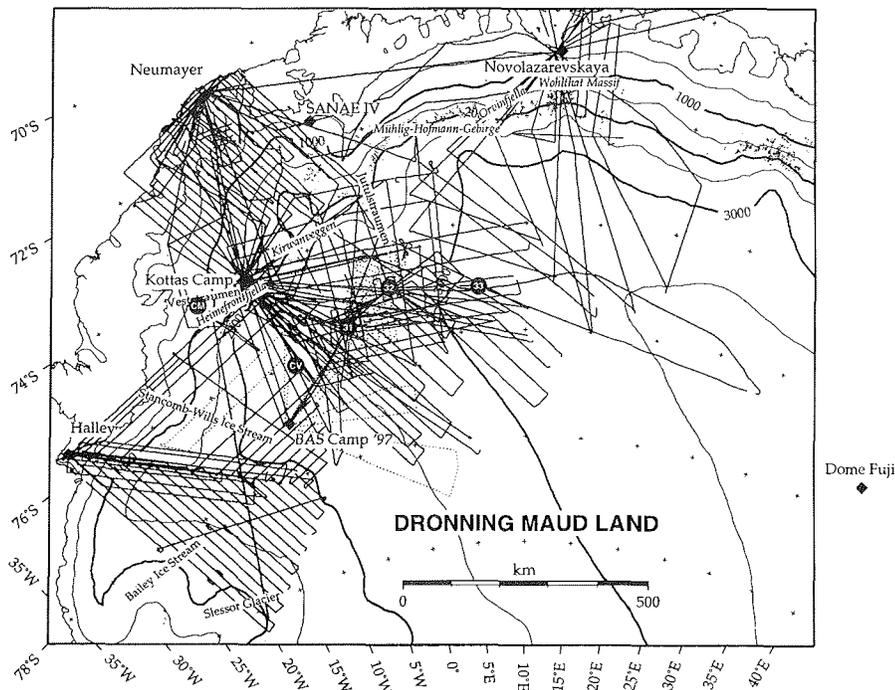


Abbildung 3.2: EMR-Flüge in Dronning Maud Land 1994-1999, die Meßflüge des BAS sind als punktierte Linien eingetragen. Oberflächentopographie nach Bamber und Huybrechts (1996), Isohypsensabstand 500 m. Ausgewählte Forschungsstationen und Feldlager sind mit Rauten, mitteltiefe Eiskernbohrungen mit gefüllten Kreisen gekennzeichnet. Gebirgsnamen sind in *kursiver*, Eisströme und Ausläßgletscher in normaler Schrift eingetragen.

wurde. Dieses Verfahren führte üblicherweise zu mehrfachem Umschalten der Pulslänge auf einem Profil und aufgrund der technisch bedingten Reaktionszeiten zu einem, wenn auch geringen, Informationsverlust.

In Abbildung 3.3 sind die geflogenen Profilstrecken und der prozentuale Anteil der Strecken mit Untergrundsreflexionen pro Kampagne sowie insgesamt dargestellt. Die vom BAS durchgeführten Flüge sind hierbei nicht berücksichtigt worden. Ein Profilabschnitt gilt hierbei als mit Untergrundsreflexionen überdeckt, wenn der Abstand zwischen zwei erkennbaren Reflexionen eines Horizonts weniger als 1000 m beträgt. Dabei fällt auf, daß in der Saison 1996/97 deutlich weniger Strecken mit Untergrundsreflexionen herausgearbeitet werden konnten als zuvor, obwohl in der Saison zuvor eine gute Überdeckung mit Datenpunkten im selben Gebiet erzielt wurde. Insbesondere wurde an den Daten ein deutlich höherer Rauschanteil im Vergleich zu früheren Kampagnen festgestellt. Bei einer späteren intensiven Fehlersuche konnten offene und schlecht abgeschirmte Kabelverbindungen sowie verunreinigte Steckverbindungen als Ursachen identifiziert werden. Aufgrund der notwendigen Überarbeitung des Massekonzeptes und einer zu ändernden Kabelführung wurde die Gelegen-

heit genutzt, die Empfangselektronik um einen dritten Analogkanal zu erweitern und damit im Bereich kleiner Amplituden eine bessere Auflösung zu erzielen.

Insgesamt gibt es nach obiger Definition mehr als 1250 Kreuzungspunkte im Meßgebiet. Bei Berücksichtigung der Flüge des BAS kommen weitere 170 hinzu. Die Differenz der Eismächtigkeiten an allen Kreuzungen beträgt im Mittel ca. 20,5 m. Dies sowie die Tatsache, daß 50 % aller Abweichungen in der Eismächtigkeit geringer als 10 m sind, zeigt deutlich, daß der in Abschnitt 2.2 abgeschätzte Fehler von ± 20 m geringer ist, als zuvor vermutet. Abbildung 3.4 zeigt die prozentuale Verteilung der Abweichungen an den Kreuzungspunkten als Histogramm mit einer Klassenbreite von 10 m. Die gleiche Betrachtung auf Basis der AWI Messungen alleine, ohne die BAS Daten, führt zu einer geringeren mittleren Abweichung an den Schnittpunkten von nur 17,7 m. Dies entspricht 10,5 % der mittleren Eismächtigkeit im Meßgebiet. 54 % aller Differenzen sind kleiner 10 m. Eine mögliche Ursache für den etwas größeren Fehler bei Berücksichtigung der britischen Daten kann mit dem dort eingesetzten 'chirp' EMR-System zusammenhängen. Solche Systeme erfordern aufgrund der Signalkompression eine sehr aufwendige Datenaufbereitung. Die größten Differenzen treten im Bereich des Randgebirges auf und werden durch Seitenreflexionen vom Felsuntergrund oder -wänden verursacht. Die Differenzen innerhalb der AWI Daten sind jedoch kleiner als 150 m. An einigen wenigen Schnittpunkten mit BAS-Flügen ergeben sich etwas größere Abweichungen, deren Ursache jedoch nicht ermittelt werden konnte, da hier nur das Ergebnis der britischen Auswertung vorliegt.

Das gute Ergebnis der Kreuzungspunktanalyse rechtfertigt angesichts der wenigen Differenzen über 50 m nicht nur den Verzicht auf die aufwendige differentielle GPS-Nachbearbeitung, sondern auch den Verzicht auf den Bearbeitungsschritt der Migration, wie er in der konventionellen Reflexionsseismik üblich ist. Hinzu kommt, daß die Neigungen des Untergrundreliefs mit Ausnahmen der Passagen, die die küstennahen Randgebirge queren, gering sind, typischerweise sind sie kleiner als 10° , so daß die Migration keine nennenswerten Korrekturen zur Folge hätte. Deweiteren sind im Meßgebiet nur vereinzelt in den Gebirgsketten sowie an Schelfeiskanten und Spaltenfeldern in der Nähe der Aufsetzzone Diffraktionshyperbeln zu beobachten. Letztere sind aber, da keine Phaseninformationen zum Signal vorliegen - es wird nur die Einhüllende registriert -, im vorliegendem Fall nur begrenzt zu eliminieren.

Neben den Abweichungen an den Kreuzungspunkten ist die Kenntnis der ursprünglichen Verteilung der Datenpunkte notwendig für die Interpretation der Eismächtigkeitsverteilung. Diese ist mit pseudologarithmischer Graustufenkodierung in der Karte der Abbildung 3.5 für das verwendete $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ Raster dargestellt. Dabei wird deutlich, daß keine Daten im Bereich des Randgebirges zwischen SANAE IV und Novolazarevskaya im Osten vorliegen. Jedoch sind dort nur geringe Eismächtigkeiten zu erwarten, da die „Antarctic Digital Database 2“ (ADD2) (British Antarctic Survey, 1998), eine aktualisierte Fassung des von Thomson und Cooper (1993) vorgestellten Datensatzes, in diesem Bereich zahlreiche, dicht nebeneinander liegende eisfreie Gebiete ausweist, siehe auch Abbildung 3.6. Südöstlich von Novolazarevskaya kann ein größeres Gebiet nicht mit Daten belegt werden, ebenso südlich vom BAS

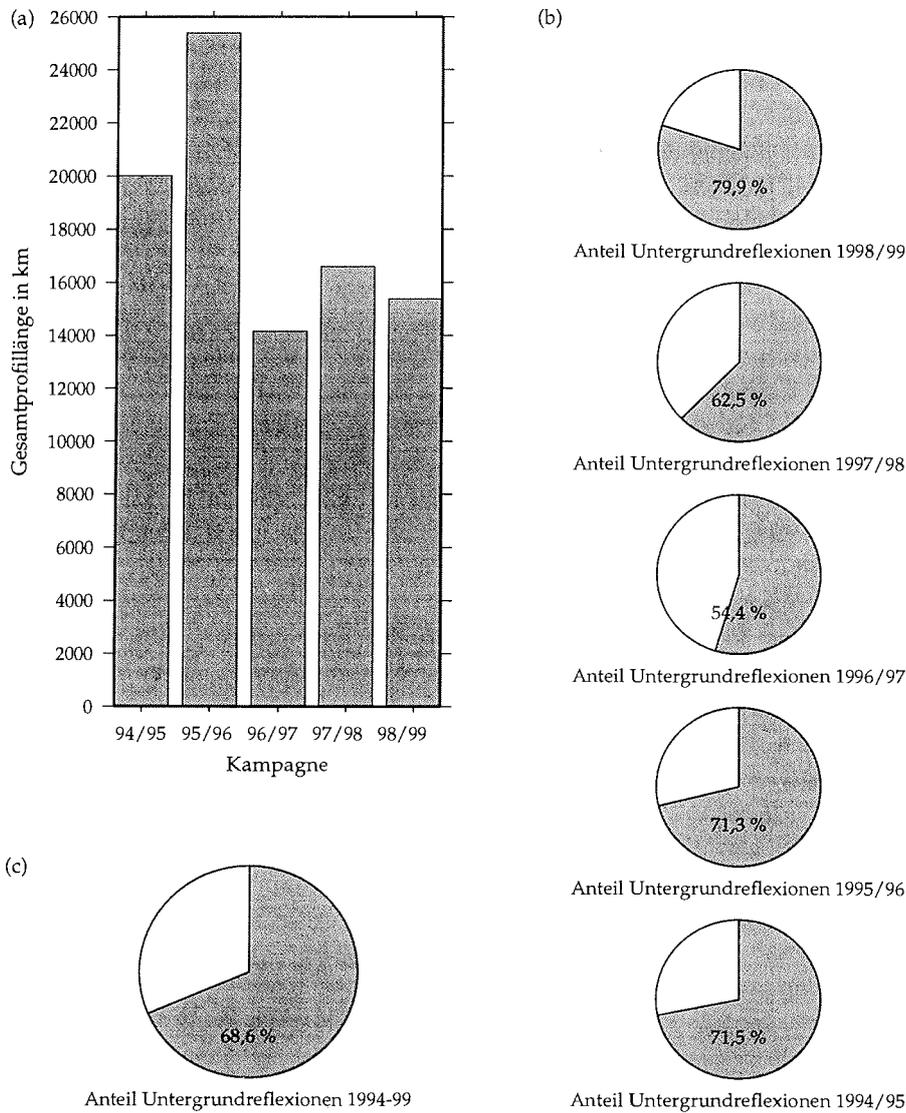


Abbildung 3.3: Links oben (a) Histogramm der Profilkilometer pro EMR-Kampagne; rechts (b) von unten nach oben saisonale prozentuale Verteilung der Abschnitte mit Untergrundreflexionen; links unten (c) Anteil der Profilabschnitte mit Untergrundreflexionen bezogen auf die Gesamtprofillänge von 91 500 km aller 5 Flugkampagnen. Ein Profil gilt bei einem maximalen Punktabstand von 1000 m als überdeckt, bei einem größerem Abstand wurde ein neuer Abschnitt definiert.

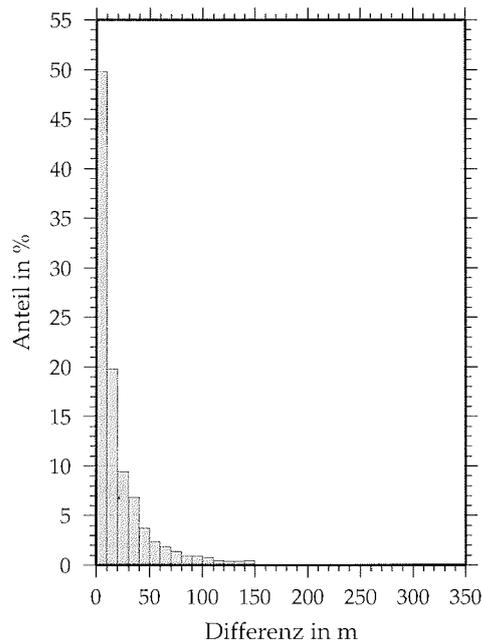


Abbildung 3.4: Histogramm der Abweichungen der Eismächtigkeiten an den Kreuzungspunkten. Die Klassenbreite beträgt 10 m, die Besetzung ist prozentual angegeben.

Camp '97. Bemerkenswert ist die kleine Datenlücke, beziehungsweise geringe -dichte im Westen am Bailey Ice Stream. Diese ist im Gegensatz zu den vorher genannten Datenlücken nicht durch die Lage der Profile (vgl. Abb. 3.2) verursacht, sondern durch Eigenschaften des Meßgebietes. Es handelt sich hier um einen Eisstrom. Ob es aufgrund des Eisflusses am Untergrund zu einer Gradientenschicht aus Material der Grundmoräne und des Eises kommt oder die Schichtung des Eises zerstört wird und somit die Signale eher gestreut als reflektiert werden, kann anhand der vorliegenden EMR-Messungen nicht unterschieden werden.

Auf Grundlage der Aero-EMR-Messungen auf den in Abbildung 3.2 gezeigten Meßflügen und der von Clough et al. (1968) entlang des dritten Abschnittes der U.S. amerikanischen SPQML Traverse durchgeführten Messungen sowie den aus dem ADD2 bekannten eisfreien Flächen wurde eine neue, in Abbildung 3.6 gezeigte Eismächtigkeitskarte des zentralen und westlichen DML erstellt. Die größten Eismächtigkeiten mit fast 4000 m im Profil sind im Süden und Südosten des Meßgebietes anzutreffen. Da jedoch die Interpolation der einzelnen Datenpunkte in die Fläche einer Tiefpaßfilterung nahe kommt, wird dieses Maximum im Raster nicht erreicht. Abbildung 3.7 verdeutlicht den Glättungseffekt durch die Interpolation. Die Karte beruht auf einem orthogonalem Raster mit einem Gitterlinienabstand von $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, auf das die Daten mit einer flächentreuen Koordinatentransformation nach Lambert (Snyder, 1987) projiziert wurden. Für die Kartendarstellung wurde das interpolierte Raster in geographische Koordinaten zurücktransformiert. Die geringsten Eismächtigkeiten sind an der Küste sowie im Randgebirge zu verzeichnen, bis hin zu eisfreien

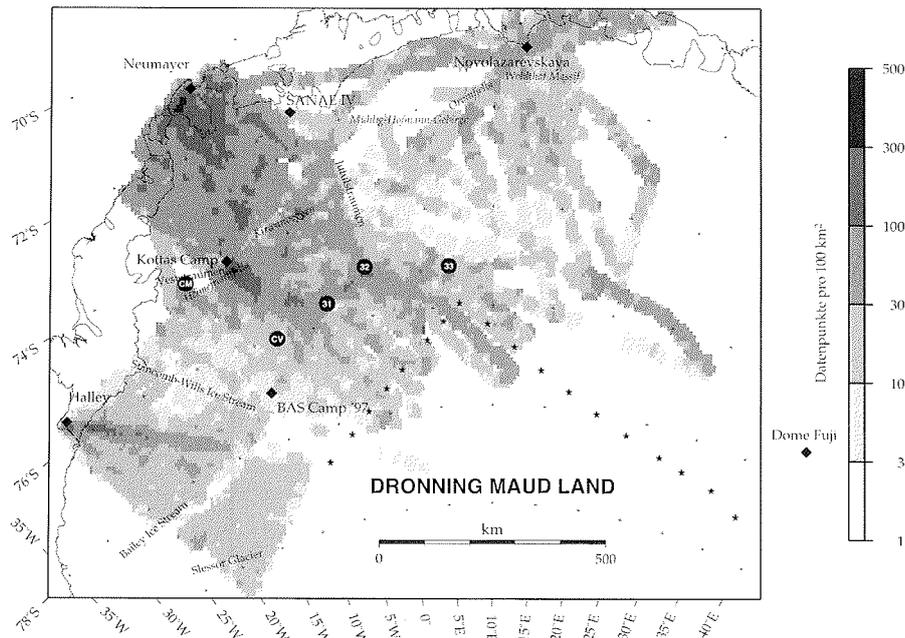


Abbildung 3.5: Eismächtigkeitsdatenpunktdichte in DML in pseudologarithmischer Graustufenkodierung. Zusätzlich sind mit schwarzen Sternen Lokationen der Messungen der SPQML Traverse III (Clough et al., 1968) verzeichnet.

Abschnitten im Gebirge. Der Anteil der eisfreien Gebiete in DML beträgt 1,5‰, dies entspricht einer Fläche von 1534 km². Betrachtet man den ganzen Kontinent, so sind nur etwa 0,4‰, gleich 52 000 km², nicht eisbedeckt.

Der Jutulstraumen, etwa bei 3° West, sowie Bailey Ice Stream und Slessor Glacier im Westen zeichnen sich im Vergleich zu ihrer Umgebung durch höhere Eismächtigkeiten deutlich ab. Desweiteren weist die Eisdickenverteilung deutlich mehr kurzwellige Variationen auf als die von Drewry (1983) publizierte. Letztere beruht allerdings lediglich auf den wenigen Datenpunkten der SPQML Traverse. Entlang der Traverse vom Südpol in das DML wurden in regelmäßigen Abstand zahlreiche geophysikalische und glaziologische Messungen vorgenommen (Beitzel, 1971; Picciotto et al., 1971; Clough et al., 1968). In Abbildung 3.5 sind die Positionen der 18 Hauptstandorte der Messungen während des dritten und letzten Abschnittes der Traverse mit Sternen gekennzeichnet. Die durchschnittliche Eismächtigkeit im Meßgebiet beträgt etwa 1678 m, in dem Teil des kartierten Gebietes südlich des Randgebirges wird eine Mittelwert von 2306 m erreicht. Als Grenze wurde hierfür ein Bogen von 72° Süd im Osten bis 76° Süd im Westen herangezogen. Die auf Grundlage des neu erstellten Datensatzes ermittelten Durchschnittswerte sind 300 m größer als jene (1390 m, bzw. 2012 m), die auf Basis des von Budd et al. (1984) erstellten Datensatzes berechnet wurden. Letzterer liegt auf einem 20 km × 20 km Raster vor und ist eine re-digitalisierte Version der Eismächtigkeitskarte von Drewry (1983). Huybrechts et

al. (2000) geben als neuesten Wert der durchschnittlichen Eismächtigkeit unter Verwendung eines neu kompilierten Datensatzes, dessen Neuerungen in weiten Teilen auf dem hier vorgestellten Datensatz beruhen, für den auf Fels aufliegenden Teil 2079 m und für die ganze Antarktis, das heißt zuzüglich der Schelfeise, 1903 m an.

In DML wurden bislang im Rahmen von EPICA fünf 100-150 m tiefe Eiskernbohrungen abgeteuft. Die Eismächtigkeiten an diesen Bohrpositionen sowie die an Dome Fuji, wo eine tiefe Eiskernbohrung niedergebracht wurde (Dome-F Deep Coring Group, 1998), sind in Tabelle 3.2 zusammengefaßt. Mit h_{\max}^{Karte} ist der Wert aus der Karte (Abb. 3.6) und mit h_{\max}^{Profil} ist, sofern die Bohrlokation auf einem Profil lag, der direkt am Ort bestimmte Wert bezeichnet. Beide sind zum Vergleich in der Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.2: Eismächtigkeiten in Meter an Lokalitäten einiger Eiskernbohrungen in DML (s.a. Abb. 3.6). * aus: Dome-F Deep Coring Group (1998).

	B31	B32	B33	CM	CV	Dome Fuji
h_{\max}^{Profil}	3200	2754	-	-	-	3090*
h_{\max}^{Karte}	2920	2747	2685	1346	2282	-

Wie bereits in Tabelle 3.2 zu sehen ist, kommt es aufgrund der Interpolation bei der Erstellung der Karte zu größeren Abweichungen der Eismächtigkeiten im Vergleich zu den an Profilen bestimmten Werten. Die Tiefpaßfilterwirkung der Interpolation ist in Abbildung 3.7 anhand des bereits in den Abbildungen 2.4 und 2.5 vorgestellten Profils deutlich zu erkennen. Im Profil variiert die Eismächtigkeit zwischen 2073 m und 2979 m mit Wellenlängen in der Größenordnung um 10 km, im Schnitt durch die Karte hingegen lediglich zwischen 2273 m und 2845 m. In der Karte können jedoch unter Berücksichtigung des - hier räumlich angewandten - Nyquist-Theorems nur Wellenlängen ab 40 km aufgelöst werden.

3.2 Oberflächen- und subglaziale Topographie

Unter Zuhilfenahme der von Bamber und Huybrechts (1996) zur Verfügung gestellten Oberflächentopographie und des neuen Eismächtigkeitsdatensatzes wurde das zugehörige subglaziale Relief für den gegründeten Teil des Eisschildes berechnet. Dieser Datensatz wurde im daran anschließenden marinen Bereich, das heißt nördlich der Aufsetzlinie, mit Daten aus dem „TerrainBase Global Terrain Model“ des National Geophysical Data Center and World Data Center-A for Solid Earth Geophysics, Boulder, Colorado, U.S.A. ergänzt. Die Daten liegen auf einem $5' \times 5'$ Raster vor. Dies entspricht im Meßgebiet etwa 9,25 km in Nord-Süd-Richtung und circa 3,5 km in Ost-West-Richtung. Unter der Aufsetzlinie (engl. grounding line) versteht man die Grenzlinie, ab der das Eis nicht mehr auf dem Untergrund aufliegt, sondern auf dem Meer aufschwimmt. Aufgrund der Gezeiten handelt es sich dabei

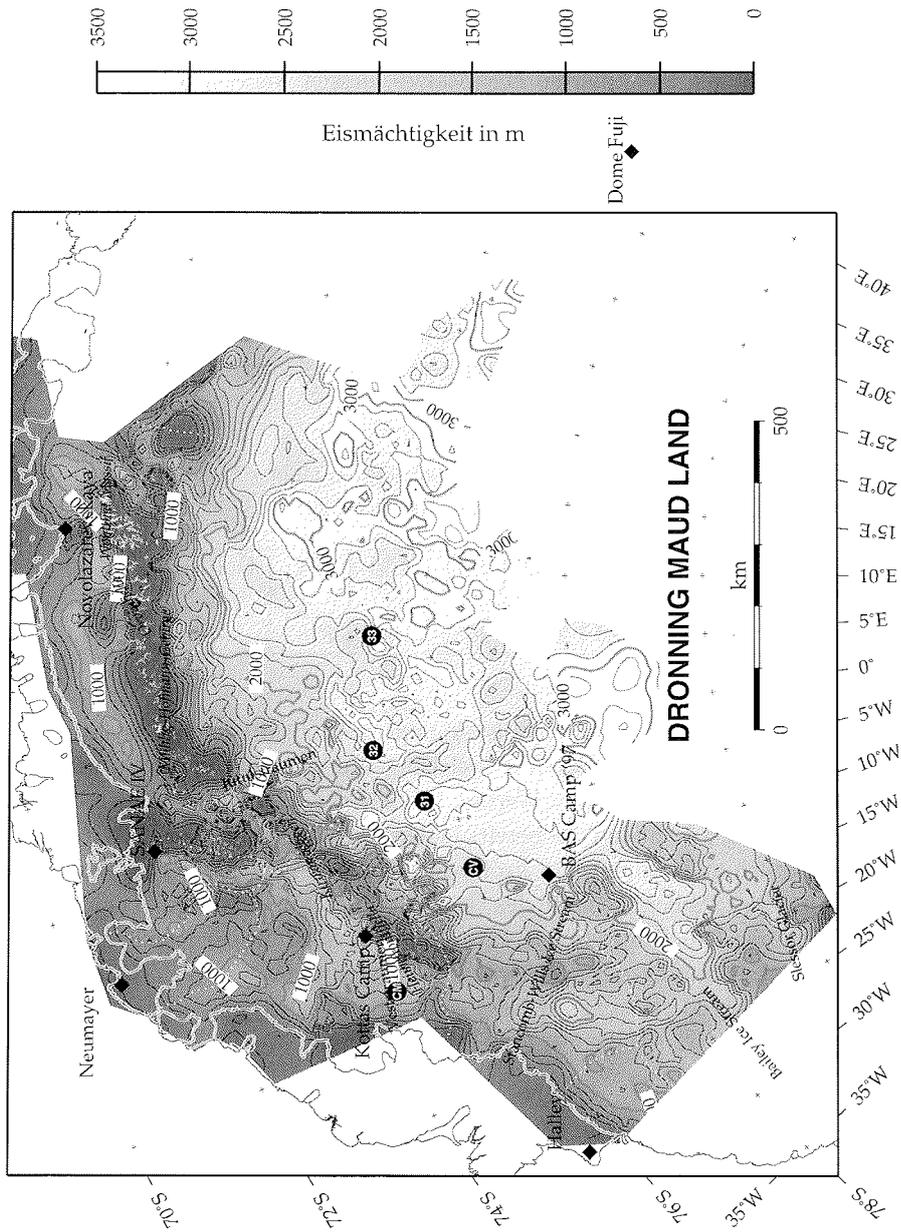


Abbildung 3.6: Eismächtigkeitsverteilung in DML basierend auf der Auswertung, der in Abbildung 3.2 gezeigten Profile, Isolinienabstand 200 m. Die weißen punktierten Linien zeigen den Verlauf der heutigen Eisscheiden (H. Bennat, pers. Mitt., 1998), eisfreie Gebiete (British Antarctic Survey, 1998) sind hellgrau unterlegt.

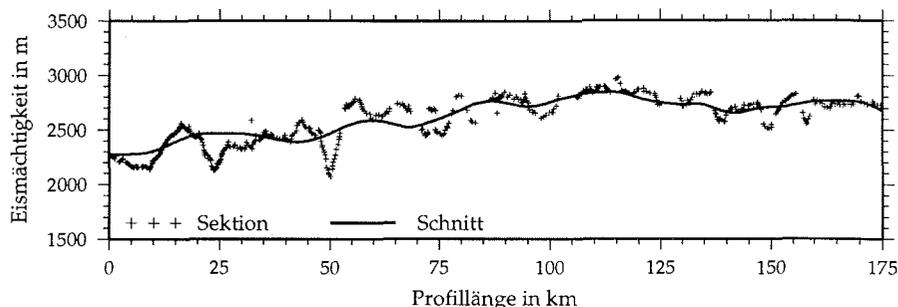


Abbildung 3.7: Vergleich der Eismächtigkeiten des in Abb. 2.4 gezeigten Profils mit einem Schnitt durch die Eismächtigkeitskarte an gleicher Stelle. Die Darstellung ist 25fach überhöht.

um eine ausgedehntere Zone, so daß man hier korrekterweise von einer Aufsetzzone sprechen müßte.

Da das bislang in DML bekannte subglaziale Relief (Drewry, 1983) unter Verwendung einer anderen, von Bamber und Huybrechts (1996) stark abweichenden Topographie bestimmt wurde, wird auf einen Vergleich des alten subglazialen Reliefs mit dem hier neu bestimmten verzichtet. Hinzu kommt noch, daß sich die Karte südlich der Gebirgsketten nur auf Daten entlang des dritten Abschnitts der U.S. amerikanischen SPQML Traverse (Clough et al., 1968) stützt (Drewry, 1983). Die Stationen der seismischen Messungen sind auch in Abbildung 3.5 verzeichnet.

In Abbildung 3.8 ist die Karte des subglazialen Reliefs dargestellt. Die dunklen Grautöne kennzeichnen die unter Normalnull (NN) liegenden Gebiete, die über NN befindlichen sind mit ansteigender Höhe von Mittelgrau nach Hellgrau eingefärbt. Deutlicher als bereits in der Eismächtigkeitsverteilung ist die Lage des Randgebirges und dessen Ausdehnung nach Süden zu erkennen. Die großen Auslaßgletscher und Eisströme sind auch an Einschnitten und Vertiefungen in den Gebirgszügen leicht auszumachen. Südlich der eisbedeckten Ausläufer der Randgebirge sind unter dem Inlandeis keine großen Reliefunterschiede vorhanden. Im östlichen Teil ist ein generelles Ansteigen des subglazialen Reliefs zu beobachten, im Westen ein relativ großes Gebiet unter NN südlich von B31 und CV. Desweiteren zeigt die Karte deutlich, daß noch große Bereiche südlich der Aufsetzzone bis an den Fuß des Randgebirges unter dem heutigen Meeresniveau liegen. Die Mulde unter NN bei etwa 12° Ost/76,25° Süd ist durch ein Profil sowie durch Messungen der SPQML III Traverse (Clough et al., 1968) belegt und ist kein Interpolationsartefakt.

Abbildung 3.9 zeigt eine isometrische Ansicht des DML in flächentreuer Lambertprojektion mit Blickrichtung aus Nordosten. Das Isohypsenintervall beträgt bei beiden Flächen 500 m. Daher sind in dieser Darstellung keine kleinräumigen Details mehr aufgelöst, auch sind die eisfreien Regionen im Meßgebiet, sie nehmen gerade 1,5 ‰ der gesamten bearbeiteten Region ein, nicht explizit verzeichnet. Zum besseren Einblick ist die Oberflächentopographie angehoben worden und ermöglicht somit

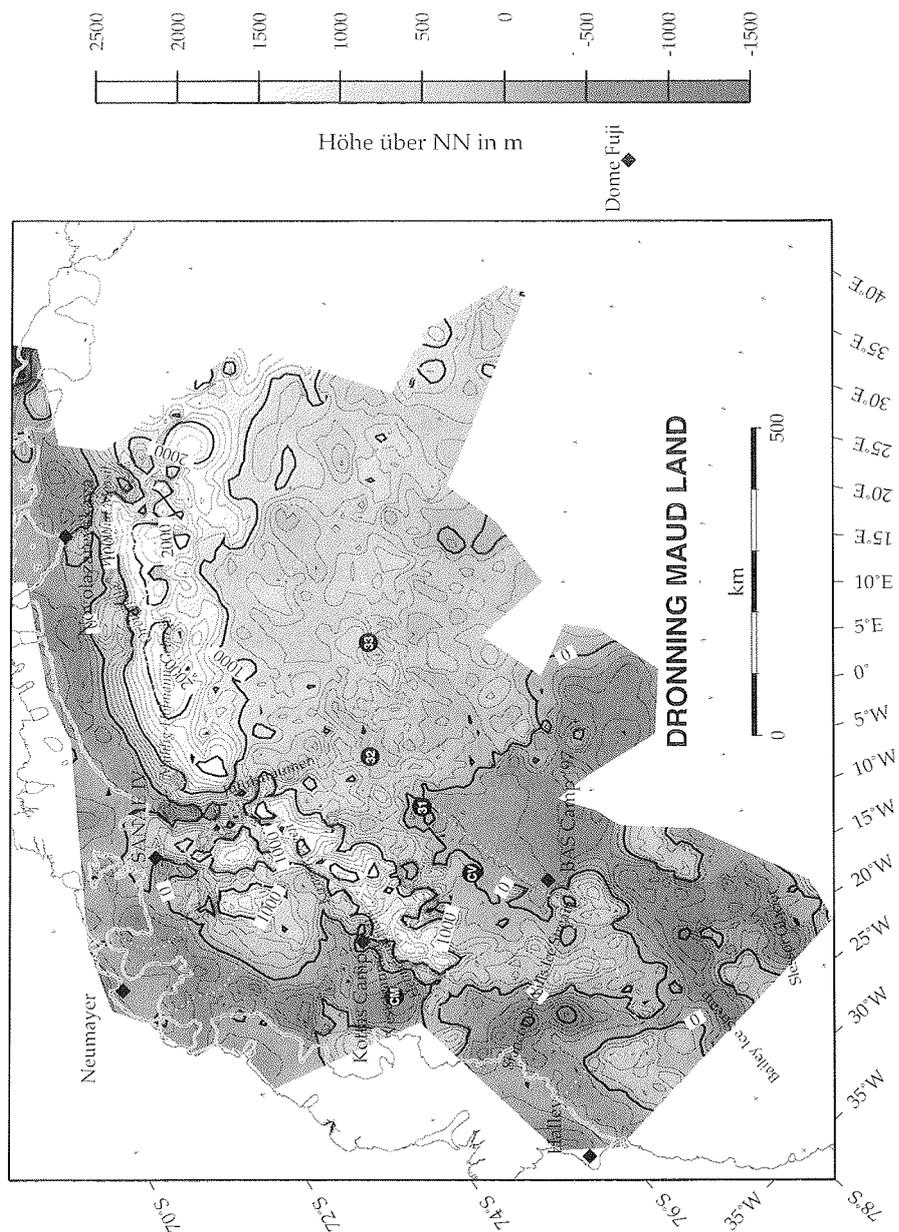


Abbildung 3.8: Subglaziales Relief in DML basierend auf der Auswertung, der in Abb. 3.6 gezeigten Eismächtigkeitkarte und der Oberflächentopographie nach Barnber und Huybrechts (1996), Isohypsenabstand 200 m. Die weißen punktierten Linien zeigen den Verlauf der heutigen Eisscheiden.

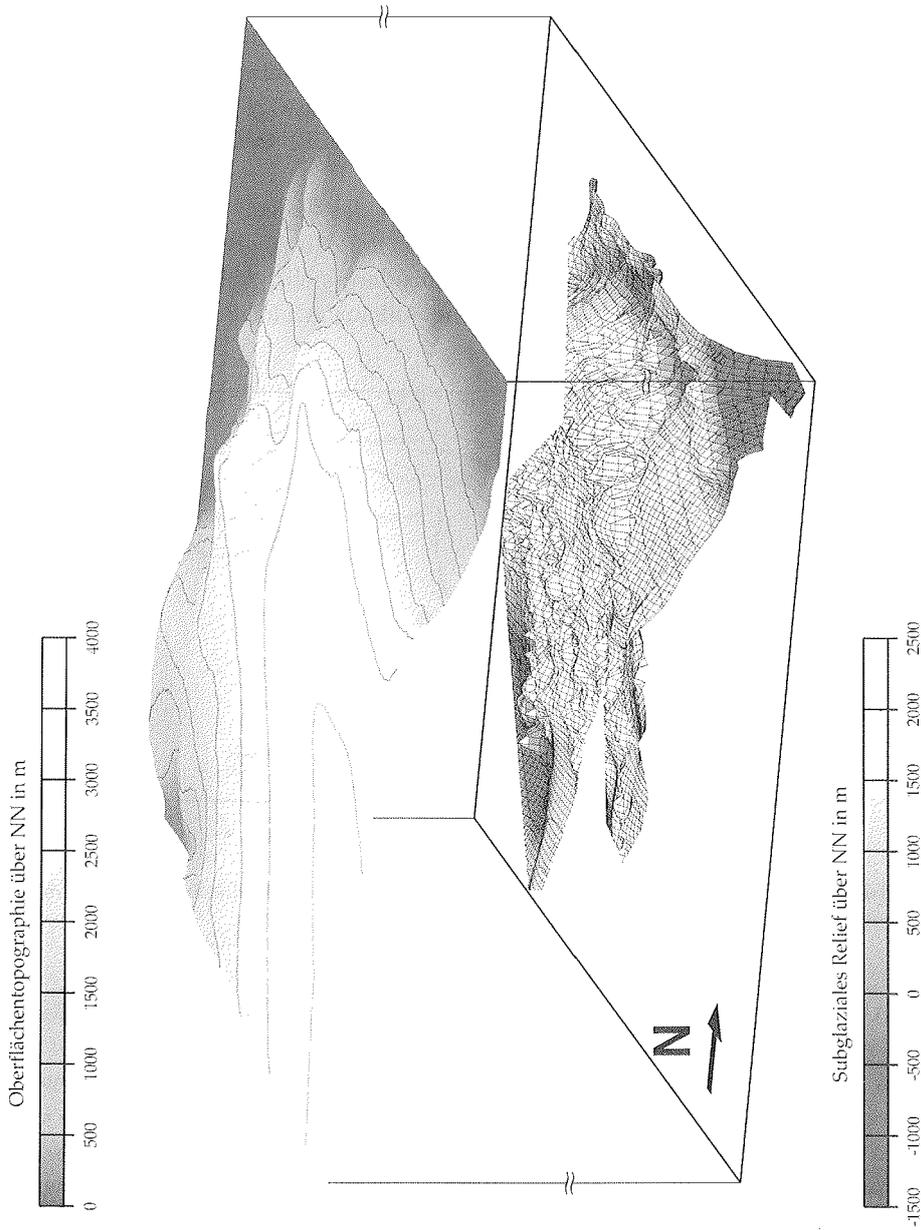


Abbildung 3.9: Isometrische Ansicht der Oberflächen- und der subglazialen Topographie in DML mit Blick aus nordöstlicher Richtung. Das Raster im unteren Teil der Graphik hat einen Abstand von je 100 km, der Isohypsenabstand beträgt 500 m, die Überhöhung ist 1:25000. Überdies wurde die Oberflächentopographie (Bamber und Huybrechts, 1996) abgehoben.

den Blick auf den Untergrund. Die Eisoberfläche steigt von Meeresniveau im Norden und Nordwesten bis auf über 3600 m über NN im Südwesten an. Aufgrund des Blickwinkels wird der Jutulstraumen durch die Gebirgszüge des Mühlig-Hoffmann-Gebirges verdeckt, ebenso ist die Mulde unter NN bei 12° Ost/ 76,25° Süd wegen der vorstehenden Erhebungen nicht zu sehen.

Um einen besseren, deutlicheren Eindruck über den Verlauf von Oberflächentopographie und subglazialen Relief des Eisschildes in DML zu geben, sind im folgenden zwei mehrere hundert Kilometer lange Profile dargestellt. Abbildung 3.10 zeigt die Lage der ausgewählten Profile. Sie sind im Anhang A und B noch mal in höherer Auflösung abgebildet.

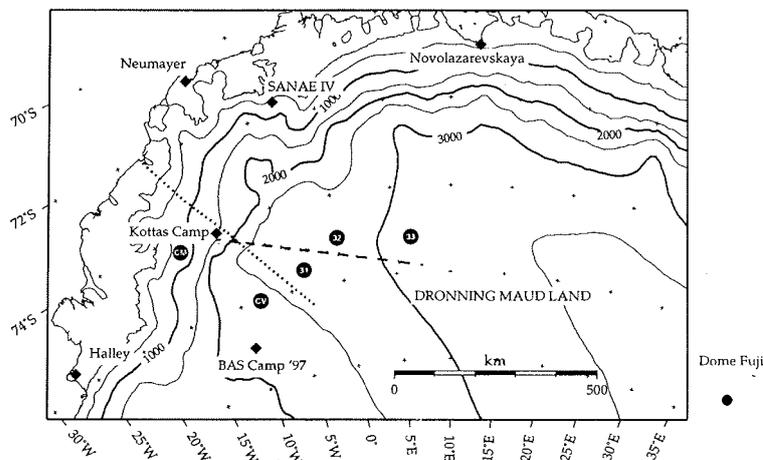
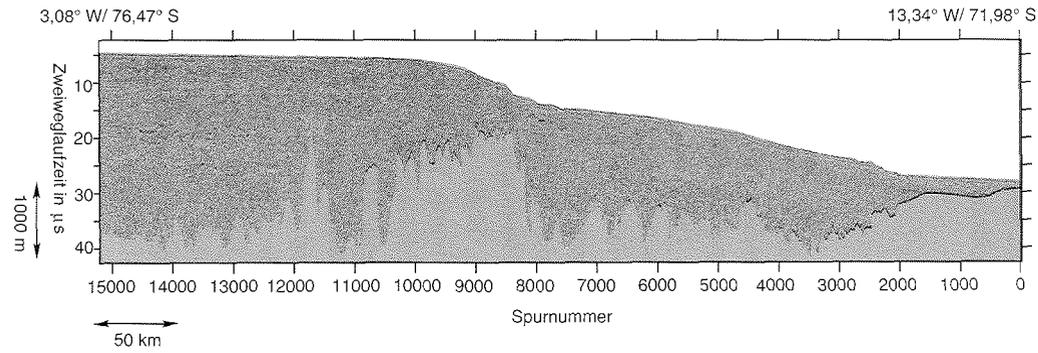


Abbildung 3.10: Lage der Sektionen in Abb. 3.11, punktierte Linie, und in Abb. 3.12, gestrichelte Linie.

In Abbildung 3.11 ist eine 585 km lange Sektion beginnend etwa 100 km südlich der Eiskernflachbohrung B31 bis zum Riiser-Larsenisen im Norden dargestellt. Im Süden sind unter dem rund 2500 m mächtigen Inlandeis nur geringe Höhenvariationen des Untergrundes zu erkennen. Zwischen Spurnummer 11 500 und 8000 erstreckt sich die eisbedeckte Heimefrontfjella mit Reliefunterschieden bis zu 1000 m. Nördlich davon erstreckt sich die Ritscherflya bis zur Aufsetzlinie bei etwa Spurnummer 2000 mit deutlich geringeren Höhenunterschieden unter dem Eis. Daran schließt sich das Riiser-Larsenisen an. Das Schelfeis bildet, wie auch das Inlandeis südlich der eisbedeckten Gebirge, eine flache, nur gering ansteigende Oberfläche aus, jedoch ist bei Schelfeis auch die Eisunterseite durch einen glatten Verlauf gekennzeichnet. Die Position der Aufsetzlinie ist in der Regel daher durch eine markante Änderung der Oberflächenneigung und einer veränderten Signatur der Eisunterseitenreflexionen zu erkennen.

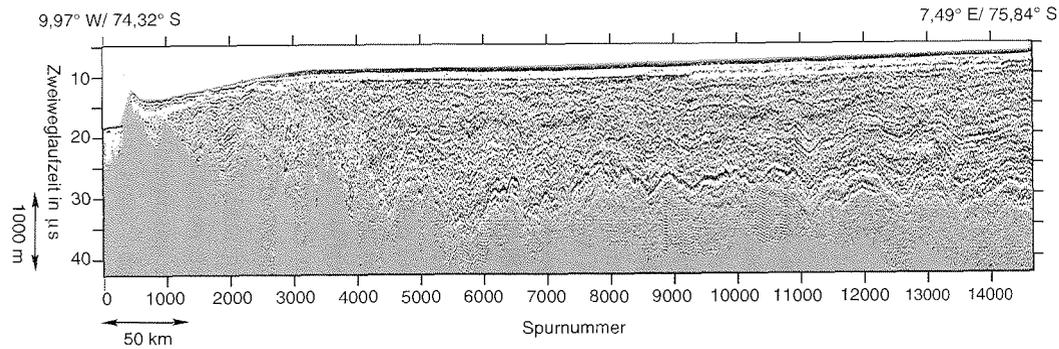
Die darunterstehende Abbildung 3.12 zeigt einen 555 km langen West-Ost-Schnitt, beginnend in der Nähe des Kottas Sommerlagers, durch das Inlandeis. Im Westen sind auf den ersten 260 km, bis etwa Spurnummer 5500, noch die Einflüsse von Hei-

Abbildung 3.11: 585 km lange Beispielsektion vom Inlandplateau etwa 100 km südlich der Eiskernflachbohrung B31 bis zum Riiser-Larsenisen westlich des Eishöckers Skjöldet, kartiert mit dem 60 ns Puls, zum Verlauf der Sektion s.a. Abb. 3.10. Die Darstellung ist 50fach überhöht.



35

Abbildung 3.12: 555 km lange Beispielsektion aus der Nähe des Kottas Sommerlagers nach Osten weiter auf das Inlandplateau hinauf mit dem 600 ns Puls kartiert, zum Verlauf der Sektion s.a. Abb. 3.10. Die Darstellung ist 50fach überhöht.



mefrontfjella und Kirwanveggen zu erkennen. In diesem Bereich weisen die Gebirge Taleinschnitte von einigen hundert Metern auf nur wenigen zehner Kilometern auf. Daran anschließend sind im Untergrund keine bemerkenswerten Erhebungen oder Täler mehr erkennbar. Am Verlauf der Oberfläche sind diese Gebirge unter dem Eis kaum zu erkennen. Neben einer eisfreien Gipfelregion bei etwa Spurnummer 500, weist nur das Einfallen der Oberfläche nach Westen auf die Gebirgszüge hin.

3.3 Innere Struktur des Eiskörpers

Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, ist das EMR-Verfahren von der elektrischen Leitfähigkeit und der Permittivität abhängig. Reflexionen elektromagnetischer Wellen werden durch die diskontinuierliche Änderung der Dielektrizitätskonstanten (DK) zwischen zwei benachbarten Ablagerungen verursacht (Paren, 1981). Als mögliche Ursachen für Änderungen der DK kommen unter anderem saisonale Dichteschwankungen des akkumulierten Eises, Einschlüsse von Fremdmaterialien (Staub, vulkanische Aschen und Säuren) sowie unterschiedliche Ausrichtungen der c-Achsen der Eiskristalle in Frage (Harrison, 1973; Millar, 1982; Robin et al., 1969). Sowohl die Leitfähigkeit wie auch die DK können mit sogenannten DEP-Messungen (dielectric profiling) direkt am Eiskern gemessen werden (Wilhelms et al., 1998). Dies erlaubt das Einhängen von EMR-Messungen an die an Eiskernen bestimmte Stratigraphie. Hempel und Thyssen (1992(erschienen 1993)) haben im Vergleich einer Boden-EMR Sektion mit elektrischen Leitfähigkeitsmessungen (ECM), da keine DEP-Messungen zur Verfügung standen, am GRIP-Eiskern eine gute Übereinstimmung zahlreicher innerer Horizonte mit Zonen erhöhter Leitfähigkeit erzielen und somit die in ihren Messungen enthaltenen Horizonte am Eiskern einhängen können. In jüngerer Zeit wurden auch flugzeuggestützte Messungen zur unabhängigen Kontrolle der Stratigraphie zwischen den antarktischen Eiskerntiefbohrungen Vostok und Dome Concordia durchgeführt (Siegert et al., 1998). Diese Vorgehensweise ist in der Seismik gängige Praxis und erlaubt die Interpretation der seismischen Registrierung im Hinblick auf die nur punktuell aufgeschlossene Geologie des Untergrundes. Insbesondere haben sowohl die Kartierungen wie auch die Bohrungen einen erheblich höheren Informationsgehalt, wenn durch Kartierungen mehrere Bohrungen durch Verfolgen von Horizonten miteinander korreliert werden können.

Die flächendeckende Auswertung interner Horizonte ist erst mit dem Einsatz des „toggle“-Mode 1996/97 möglich geworden. Denn in vorherigen Kampagnen war eine durchgängige Verfolgung der Reflektoren, wegen des Umschaltens des Sendesignals aufgrund schwächer werdender Reflexionen vom Untergrund, nicht möglich, da die Bestimmung der Eismächtigkeiten Vorrang hatte. Interne Reflexionen in Eisschilden zeugen vom schichtweisen Aufbau des Eiskörpers (Siegert, 1999) und können im ungestörten Fall als Paläooberflächen betrachtet werden. Die Akkumulationsrate in der Antarktis beträgt im allgemeinen nur wenige Zentimeter Eis pro Jahr (Giovinetto et al., 1990). An B32, um nur einen Meßwert anzuführen, wurde die Akkumulationsrate von Oerter et al. (2000) mit $62 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ bestimmt, dieses entspricht

0,068 m Eisäquivalent a^{-1} . Da die Wellenlänge der AWI-Aero-EMR-Apparatur in Eis circa 1,12 m beträgt, kann somit eine einzelne Jahresschicht nicht mit dieser Apparatur aufgelöst werden. Nach Clough (1977) jedoch erzeugt eine Folge vieler dünner Schichten ein vergleichbares Reflexionssignal wie eine Schicht gleicher Mächtigkeit mit mittleren dielektrischen Eigenschaften der Schichtfolge. Daher kann die Annahme aufrecht erhalten werden, daß die mit der eingesetzten EMR-Apparatur detektierten internen Schichten Horizonte gleichen Alters sind.

Abbildung 3.13 zeigt eine EMR-Sektion der ersten Kilometer des Profils 993136 des kurzen 60 ns Pulses. In der Abbildung sind vier willkürlich ausgewählte interne Horizonte sowie der Untergrund eingetragen. Deutlich erkennbar ist der mit zunehmenden Abstand über Grund der zunehmend glattere Verlauf der Horizonte.

In Abbildung 3.14 ist die relative Tiefenlage eines tiefliegenden über weite Teile des Meßgebietes durchgängig verfolgbaren internen Reflektors, in Abbildung 3.13 der unterste schwarz-weiß gestrichelt nachgezogene Horizont, in Form einer Isolinenkarte dargestellt. Aufgrund des Vorgehens beim Anreißen der Horizonte mit dem LANDMARK Programmpaket kann hier auf eine Kreuzungspunktanalyse verzichtet werden. Sie geschieht praktisch beim Verfolgen der Horizonte von einem Profil zum nächsten, da an den Schnittpunkten die Horizonte von einem Profil zum nächsten übertragen werden. Da die Tiefe auf die Eismächtigkeit bezogen ist, sind Veränderungen der Tiefenlage des Horizontes auf Variationen der Akkumulationsrate und des Fließregimes des Eisschildes zurückzuführen.

Aufgrund des plastischen Verhaltens von Eis sinkt eine ehemalige Oberfläche nicht nur mit zunehmenden Alter ab, sondern wird auch durch horizontales Fließen des Eises in ihrer räumlichen Lage verändert. Faßt man das Alter des Eises als eine Partikel gebundene Eigenschaft auf, so kann man es durch Integration der Bewegungsgleichung über die Zeit beschreiben. Im übersichtlicherem zweidimensionalen Fall ergibt sich folgende Bewegungsgleichung (Paterson, 1994; Huybrechts, 1994):

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -u \frac{\partial A}{\partial x} - w \frac{\partial A}{\partial z} \quad (3.1)$$

Dabei ist A das Alter, u die Horizontal- und w die Vertikalgeschwindigkeit. Letztere ist eine Funktion der Akkumulationsrate, dies bedeutet, das in Zonen mit hoher Akkumulationsrate Schichten gleichen Alters tiefer unter der Oberfläche anzutreffen sind, als in Zonen mit niedrigerem Zutrag. u beschreibt die Advektion, d.h. den horizontalen Transport des Partikels, und ist von Untergrunds- und Oberflächenneigung abhängig.

Der in Abbildung 3.14 deutlich erkennbare Trend der abnehmenden Tiefenlage des Reflektors nach Südosten wird überwiegend von der ebenfalls in diese Richtung abnehmende Akkumulationsraten (Oerter et al., 2000; Huybrechts et al., 2000) verursacht. Das rapide Abtauchen im Bereich um 1-2° West und 74° Süd jedoch wird durch die in diesem Bereich große Advektion, bedingt durch den dortigen Eisstrom, dem Jutulstraumen, erzeugt. Somit kann aus der Variation der Tiefenlage interner Horizonte in Abwesenheit von Advektion auf Änderungen der Akkumulationsrate

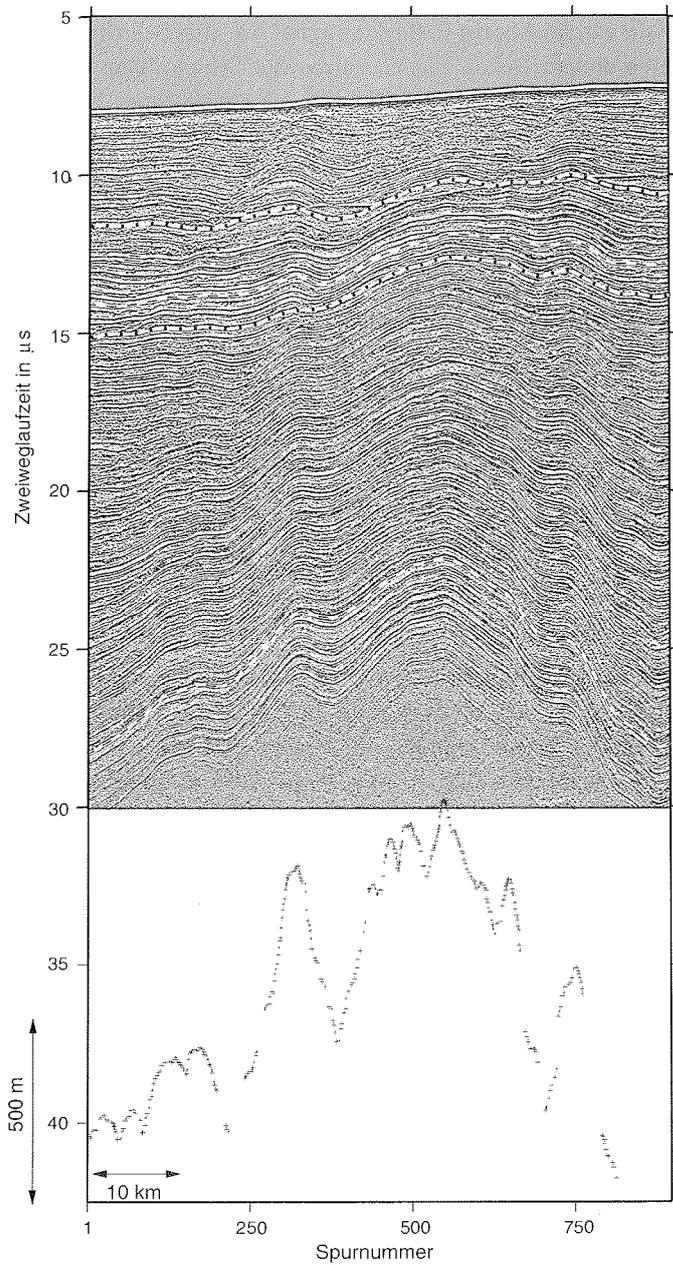


Abbildung 3.13: Die ersten 67 km des Profils 993136 in 44facher Überhöhung. Deutlich sind in dieser Darstellung die internen Horizonte zu erkennen und gut zu verfolgen. Exemplarisch sind vier interne Horizonte, die über die gesamte Sektion gut verfolgbar sind, sowie der dazugehörige Untergrund in die Sektion eingetragen. Der oberste interne Horizont ist von der Multiplen zwischen Flugzeug und Eisoberfläche überlagert.

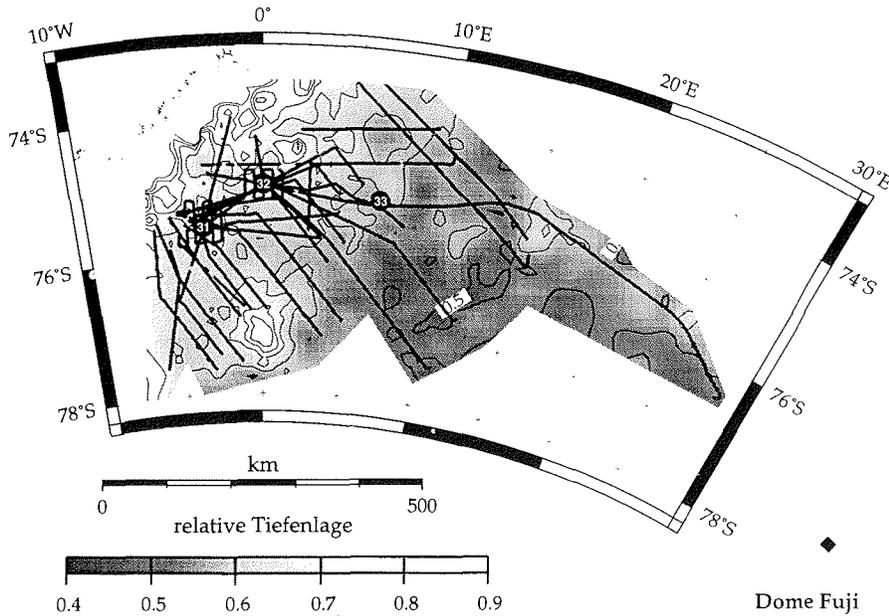


Abbildung 3.14: Isolinienkarte der relativen Tiefenlage eines tiefliegenden, über weite Teile des Meßgebietes durchgängig verfolgbaren internen Reflektors. Die Tiefe ist bezogen auf die am Gitterpunkt vorhandene Eismächtigkeit. Neben den Profilen sind im Nordosten Teile des Randgebirges, die eisfreien Regionen des Kirvanveggen, mit in der Karte eingetragen.

geschlossen werden.

Eine genauere Betrachtung der internen Horizonte um B32, wobei die Tiefe auf NN bezogen ist, wird in Abbildung 3.15 gegeben. Von unten nach oben sind hier das subglaziale Relief, der in Abbildung 3.14 vorgestellte Horizont sowie weitere darüber befindliche Horizonte und schließlich die Eisoberflächen Topographie in einer isometrischen Darstellung abgebildet. Dabei ist besonders markant, daß die Höhenunterschiede innerhalb einer Fläche von unten nach oben, vom Fels über die einzelnen internen Schichten bis hin zur Oberfläche, abnehmen. Die internen Horizonte weisen jedoch in allen Fällen in der engeren Umgebung um B32, in der Abbildung durch die schwarzen Punkte gekennzeichnet, nur geringe Höhenänderungen auf.

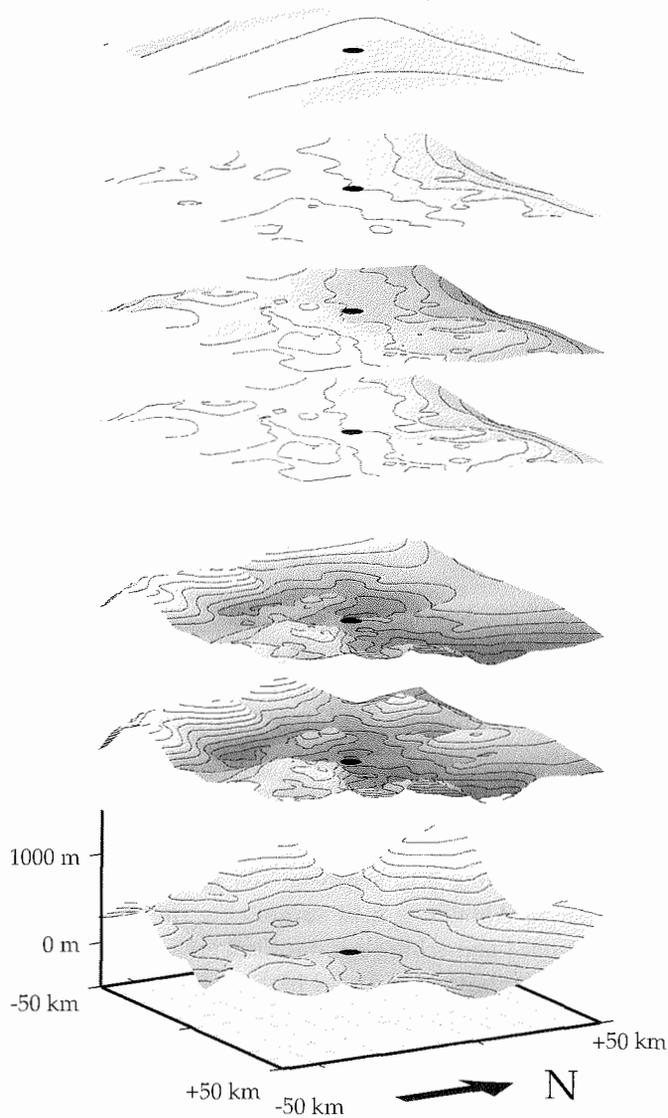


Abbildung 3.15: Isometrische Ansicht interner Horizonte sowie der Oberfläche und des Untergrundes um B32 aus südöstlicher Richtung. Die Abbildung zeigt deutlich die mit zunehmenden Abstand vom Untergrundrelief abnehmenden Höhenunterschiede innerhalb der internen Horizonte bis hin zur glatten Oberfläche des Eises. Zur besseren Übersicht sind die einzelnen Schichten willkürlich angehoben. Die Kantenlänge beträgt jeweils 100 km, B32 ist exakt in der Mitte und mit einem schwarzen Punkt gekennzeichnet, die Überhöhung ist 25fach. Der Isolinienabstand beträgt 50 m, mit Ausnahme für das subglaziale Relief, dort beträgt er 100 m. Die Grauskalierung der internen Horizonte weist identische Intervallabstufungen auf, jedoch sind die Höhen für jede Fläche unterschiedlich!

Kapitel 4

Anwendungen

Die genaue Kenntnis der Eismächtigkeitsverteilung in DML, beziehungsweise der gesamten Antarktis, dient nicht nur der reinen Bestandsaufnahme, sondern ist auch zur Vorbereitung und Auswertung glaziologischer, klimatologischer und geophysikalischer Messungen notwendig. So wird zum Beispiel die Eismächtigkeit zur Feldfortsetzung bei Schwere- und Magnetikmessungen benötigt. Unter Einbeziehung der Oberflächentopographie kann nicht nur die Untergrundstopographie abgeleitet werden (Drewry, 1975), sondern auch Hebungsraten der Kruste bei weiterer Be- oder Entlastung durch Eisauflasten. Kommt zu dem bereits angeführten noch die Niederschlagsverteilung, so können auch eisdynamische Parameter, wie zum Beispiel Gleichgewichtsgeschwindigkeiten und Fließrichtungen des Eises bestimmt werden.

Aufgrund der Komplexität, die heutige Modelle erreicht haben, wird im folgenden auf bestehende, publizierte Modelle zurückgegriffen. In der Regel sind dazu Datensätze notwendig, die den gesamten Kontinent umfassen. Jedoch wird sich die Diskussion der erzielten Ergebnisse auf DML beschränken. Denn dies ist ein Bereich, in dem bislang nur weniger detaillierte Datensätze zur Verfügung standen. Die benutzten Modelle wurden unter dem Aspekt ausgewählt, die Grundlage für die Auswahl einer Bohrlokation für eine Eiskerntiefbohrung zu erweitern. So wird zunächst auf das Modell von Budd und Warner (1996) zur Berechnung der Gleichgewichtsgeschwindigkeiten zurückgegriffen. Von der Gleichgewichtsgeschwindigkeit kann auf die Oberflächengeschwindigkeit des Eisschildes zurückgeschlossen werden. Letztere kann und wird auch direkt vor Ort anhand von geodätischen Vermarkungen bestimmt. Es liegen erste Ergebnisse für B32 sowie für zwei weitere Punkte, DML01 und DML02, vor (H. Oerter, pers. Mitt., 2000). Eine erste Alterstiefenabschätzung wird auf der Basis der Nye-Alterskala abgeleitet. Die dabei berechneten Isochronen werden mit internen Horizonten aus Aero-EMR-Messungen verglichen und diskutiert. Schließlich wird auch die Topographie des Untergrundes nach Hebung des Kontinents bei vollständigem Abschmelzen des Eisschildes bestimmt.

4.1 Gleichgewichtsgeschwindigkeiten

Befindet sich ein Eisschild im stationären Zustand und gibt es kein Schmelzen an Ober- oder Unterseite, so folgt aus der Kontinuitätsbedingung, daß der darauf fallende Niederschlag das Eisschild in Form von Eisbergen verlassen muß. Unter dieser Bedingung kann eine Größe, die sogenannte Gleichgewichtsgeschwindigkeit, bestimmt werden. Damit wird die Geschwindigkeit bezeichnet, mit der sich eine Eissäule im Mittel bewegen muß, um einen Eisfluß zu generieren, dem die Akkumulation im selben Zeitintervall auf die Oberfläche des Eises entspricht (Budd und Warner, 1996):

$$m = \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} \quad (4.1)$$

Dabei ist m die Akkumulationsrate in Meter Eisäquivalent pro Jahr, u und v die Gleichgewichtsgeschwindigkeitskomponenten in x- bzw. y-Richtung in Meter pro Jahr und h die Eismächtigkeit in Meter. Die Gleichgewichtsgeschwindigkeit erreicht, bei Eisschilden ohne Gleiten an der Basis, nach Paterson (1994) etwa 80 % bis 90 % der Oberflächengeschwindigkeit. Hamley et al. (1985) haben für das Wilkes Land ein Verhältnis von 0,89 ermittelt.

Die Berechnung der Gleichgewichtsgeschwindigkeit erfolgte mit einem von R. Warner zur Verfügung gestellten Programm (Budd und Warner, 1996). Es benötigt zur Berechnung drei die gesamte Antarktis umfassende Datensätze auf einem rechtwinkligem 20 km × 20 km Raster, nämlich Oberflächentopographie, Eismächtigkeitsverteilung und Akkumulationsverteilung. Das Programm bestimmt aufgrund der Topographie zunächst die einzelnen Eisscheiden und Fließvektoren unter der Annahme, daß die Oberflächenneigung den Eisabfluß maßgeblich bestimmt. Dazu werden gegebenenfalls vorhandene Senken verfüllt. Aus Fließrichtung und Akkumulationsrate wird dann der Massenfluß bestimmt. Die Gleichgewichtsgeschwindigkeit ergibt sich schließlich aus der Mittelung des Massenflusses über die Eismächtigkeit.

Bei der Topographie handelt es sich um die Daten von Bamber und Huybrechts (1996) mit einigen Änderungen entlang der Antarktischen Halbinsel. Nördlich von 69° Süd, an der Grenze zwischen Graham und Palmer Land, wurden Daten von Budd und Carter (1971) eingearbeitet. Da sich der Übergang auf weniger als 20 km erstreckt und somit innerhalb der Maschenweite der Datenraaster liegt, konnten die Daten direkt aneinandergesetzt werden.

Die Eismächtigkeiten außerhalb von DML und dem Filchner-Ronne-Ice Shelf (FRIS) wurden dem entsprechenden Datensatz von Bamber und Huybrechts (1996) entnommen. Jedoch ist in diesem Datensatz die Halbinsel nicht vollständig enthalten. Es fehlt der nördlichste Abschnitt, das Palmer Land mit dem angrenzenden Larsen Ice Shelf sowie Teile von Alexander Island. Diese Lücken wurden mit Eismächtigkeitsdaten aus der Kompilation von Budd und Carter (1971) ohne weitere Bearbeitungsschritte geschlossen. Beim Einpassen neuer Daten in DML und am FRIS wurde ein 60 km breiter Überlappungsbereich mit Abstandsgewichtung berücksichtigt, um Stufen im zusammengesetzten Datensatz zu vermeiden. Dieser Schritt war notwen-

dig, da die zu ergänzenden Daten nur in gerasterter Form vorlagen. In DML wurden die in Abschnitt 3.1. diskutierten Eismächtigkeitsdaten des AWI, ergänzt durch einige BAS Flüge, eingefügt. Im Bereich des FRIS wurden Daten von Vaughan et al. (1994; <http://www.nerc-bas.ac.uk/public/icd/dgv>) eingearbeitet, die in Form von Felstopographie und Wassersäule gegeben waren. Die Eismächtigkeit wurde daraus unter Anwendung des archimedischen Prinzips mit Dichten von 910 kg m^{-3} und 1028 kg m^{-3} für Eis, bzw. Meerwasser berechnet. Zur Interpolation der Datensätze auf ein $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ Raster wurde wie bei der Generierung der Datensätze zuvor ein „minimum curvature“ Algorithmus (Smith und Wessel, 1990) eingesetzt.

Die Akkumulationsverteilung basiert auf einem aktualisierten, auf $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ gerasterten Datensatz von Giovinetto und Bentley (1985), ergänzt durch Akkumulationsraten entlang der Traversenroute Neumayer-Kottas-Sommerlager und auf dem Amundsenisen (Oerter et al., 1999; Oerter et al., 2000) sowie entlang der Traverse der norwegischen Antarktisexpedition 1996/97 südöstlich der Sommerstation Troll (Broeke et al., 1999). Weitere Werte wurden entlang der Halbinsel eingefügt (Vaughan et al., 1999). Zur Verfeinerung des vorliegenden Rasters und Integration der neuen Daten, letztere wurden gegenüber den Rasterdaten von Giovinetto und Bentley (1985) zehnfach stärker gewichtet, wurden diese mit einem „minimum curvature“ Verfahren (Smith und Wessel, 1990) auf ein $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ Raster interpoliert. Dabei wurde entlang des Rasterrandes eine Akkumulationsrate von $0,56 \text{ m Eisäquivalent a}^{-1}$ berücksichtigt, um einen Anstieg der Zutragraten in den küstennahen Regionen nach Norden zu erreichen.

In Abbildung 4.1 sind die Eingangsdatensätze, von oben nach unten (a) Eismächtigkeitsverteilung, (b) Oberflächentopographie und (c) Akkumulationsverteilung, in Form von Isolinienkarten dargestellt. Eine ausführlichere Beschreibung, wobei die in den Eismächtigkeitsdatensatz integrierten AWI Daten nur die der Flugkampagnen 1994-1997 umfassen, ist in Huybrechts et al. (2000) zu finden.

Die mit dem Programm von Budd und Warner (1996) und den in Abbildung 4.1 gezeigten Datensätzen berechneten Gleichgewichtsgeschwindigkeiten und deren Richtungen sind in den Abbildungen 4.2 und 4.3 für den gegründeten Teil des Eisschildes in DML dargestellt. Die Beschränkung auf das aufliegende Eisschild wird durch die weitestgehend unbekanntesten Abschmelz- und Anfrierraten an der Unterseite der Schelfeise erzwungen. Deutlich sind stagnierende, bzw. Bereiche mit äußerst geringen Geschwindigkeiten anhand der dunklen Grautöne entlang der Eisscheiden, die jeweils punktiert in die Karten eingetragen sind, zu erkennen. Auch die schnell fließenden Eisströme und Auslaßgletscher, insbesondere der Jutulstraumen bei etwa 3° West sowie im Südwesten der Slessor Glacier und der Recovery Glacier, sind deutlich in beiden Karten an der hellgrauen Flächen zu erkennen. Getrennt werden die beiden Gletscher durch die Gebirgszüge der Shackleton Range. Die Theron Mountains nördlich des Slessor Gletschers trennen diesen vom Bailey Ice Stream, der als deutliche Konfluenzzone in Abbildung 4.3 hervortritt, jedoch erreicht der Eisstrom nur vergleichsweise geringe Geschwindigkeiten und ist daher nicht so gut in Abbildung 4.2 zu erkennen wie die benachbarten Auslaßgletscher. Desweiteren zeichnen sich auch die Einzugsgebiete in den Karten deutlich ab, sowohl im Westen

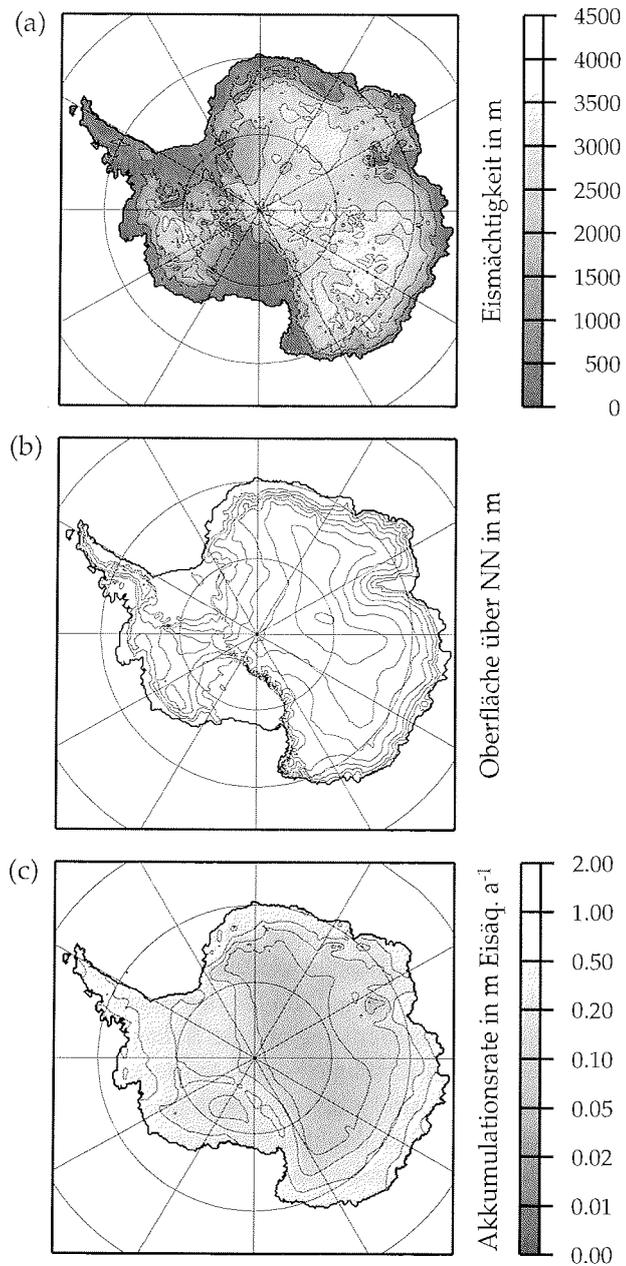


Abbildung 4.1: Eingangsdatensätze zur Berechnung von Gleichgewichtsgeschwindigkeiten in DML, bzw. der Antarktis. Von oben nach unten: (a) Eismächtigkeitsverteilung, (b) Oberflächentopographie, Konturintervall jeweils 500 m, und (c) Akkumulationsverteilung, Konturintervall wie nebenstehende Grauskala. Eine nähere Beschreibung und Quellen der Datensätze wird im Text gegeben.

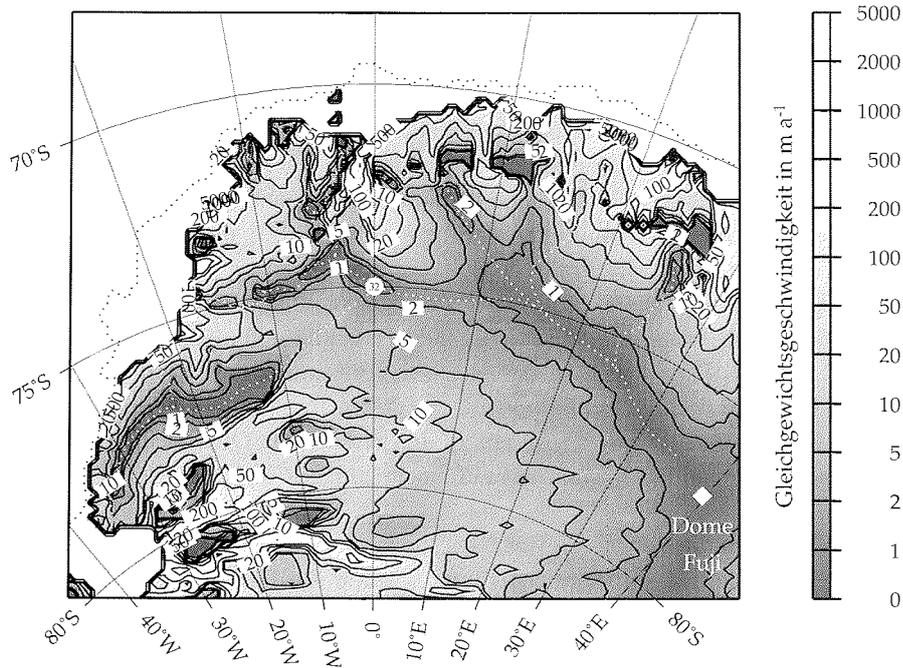


Abbildung 4.2: Pseudologarithmisch skalierte Verteilung der Gleichgewichtsgeschwindigkeiten in DML basierend auf den in Abb. 4.1 vorgestellten Daten und dem Algorithmus von Budd und Warner (1996). Das Isolinenintervall entspricht dem Graukeil.

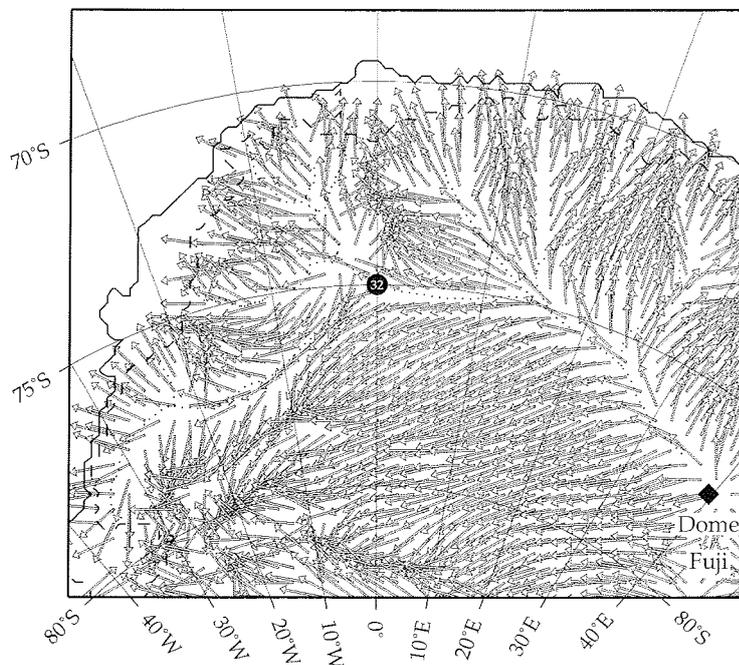


Abbildung 4.3: Fließrichtungen in DML zu den in Abb. 4.2 dargestellten Geschwindigkeiten. Aus Übersichtlichkeitsgründen ist hier nur jeder vierte Wert verzeichnet.

wie auch beim Jutulstraumen. Sehr deutlich wird die Lage von Dome Fuji, einer gipfelartigen Erhebung im östlichen DML, durch die radial vom Dom wegdeutenden Fließvektoren hervorgehoben.

An den Punkten DML01, 2,55° West/74,86° Süd, und DML02, 3,92° Ost/74,97° Süd, sowie an B32 wurden Messungen zur Bestimmung der Oberflächengeschwindigkeit durchgeführt. Dabei wurde für B32 eine Geschwindigkeit von 0,6 m a⁻¹ als Mittelwert über einen 3 Jahreszeitraum errechnet sowie für DML01 und DML02, jedoch nur über 1 Jahr gemittelt, 3,2 m a⁻¹, beziehungsweise 10,1 m a⁻¹ (H. Oerter, pers. Mitt., 2000). Die Fehler dieser Messungen sind aufgrund der mehrere hundert Kilometer langen Basislinien, die nächstgelegenen Festpunkte sind nahe dem Kottas Camp und SANAE IV gelegen, in der gleichen Größenordnung wie der Meßwert selbst. Die Gleichgewichtsgeschwindigkeiten an diesen Punkten passen mit Werten zwischen 1,3 m a⁻¹ und 1,7 m a⁻¹ sehr gut zu den gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten, zumal die modellierten Werte auf einem 20 km × 20 km Raster berechnet wurden.

Mit dem Wissen um die Verteilung von Gleichgewichtsgeschwindigkeiten und Fließrichtungen kann die Trajektorie eines Punktes sowie die Dauer seiner Reise von einem beliebigen Startort bis hin zur Aufsetzlinie bestimmt werden. Dabei muß das Courant-Friedrichs-Lewy-Stabilitätskriterium ($\Delta t \leq \frac{\Delta x}{|v_{max}|}$) beachtet werden (Press et al., 1986). Das Kriterium gibt eine obere Grenze für den maximal erlaubten Zeitschritt Δt durch die größte im Datensatz auftretenden Geschwindigkeit v_{max} . bei vorgewähltem Rasterabstand Δx . Im vorliegenden Fall resultiert daraus ein maximaler Zeitschritt von 1,75 Jahren. Werden größere Zeitschritte gewählt, so kann bei der iterativen Berechnung der Trajektorie eine Rasterzelle übersprungen werden und somit zu einem falschen Ergebnis führen. Ein 50 km nördlich von B32 startender Punkt zum Beispiel, der immer an der Eisoberfläche „schwimmt“ und unter der Annahme, daß die Gleichgewichtsgeschwindigkeit 90 % der Oberflächengeschwindigkeit entspricht, benötigt nahezu 17000 Jahre bis zur Aufsetzlinie bei 0,3° West/71,3° Süd. Die Trajektorie verläuft zunächst nach Nordosten bis der Zentralteil des Jutulstraumen erreicht wird und dann mit dem Eisstrom nach Norden.

4.2 Alterstiefenberechnung

Da, wie schon in der Einleitung diskutiert, tiefe Eiskerne in größeren Tiefen nicht durch Abzählen von Extrema einzelner Proxy-Parameter mit Jahresgang datiert werden können, ist die Berechnung einer Alterstiefenverteilung von großem Interesse für Glaziologen und Klimaforscher. Einen einfachen Ansatz dazu bietet im Vorfeld einer Eiskernbohrung die Nye-Altersskala (Paterson, 1994):

$$t(z) = -\frac{h}{m} \ln \frac{z}{h} \quad (4.2)$$

Dabei ist $t(z)$ das Alter des Eises in Jahren, z die Höhe über dem Untergrund, in Meter, h die Eismächtigkeit in Meter und m die jährliche Akkumulation in Meter

Eisäquivalent pro Jahr. Der Nye-Ansatz basiert nur auf den Annahmen, daß es kein basales Schmelzen gibt und die Ausdünnungsrate in der Vertikalen, entsprechend in einer beliebigen Eissäule, konstant ist. Dies bedeutet, daß keine Horizontalkomponente der Eisbewegung vorhanden ist. Letzteres kann für Erhebungen, also Dome, eines Eisschildes angenommen werden. Gleichung 4.2 erfordert zusätzlich noch zwei weitere Annahmen, nämlich die Stationarität der Eismächtigkeit h und eine über die Zeit konstante Akkumulationsrate m . Andere Ansätze zur Berechnung einer Alterstiefenverteilung, wie zum Beispiel der von Dansgaard und Johnson (1969), benötigen darüber hinaus noch weitere Parameter, die oft erst am Eiskern bestimmt werden können. So hat das Dansgaard-Johnsen-Modell eine weitere Variable, die aus der Ausdünnung der jährlich akkumulierten Schichten bestimmt wird. Diese ist in DML noch nicht bekannt und Versuche mit dem am Dome Fuji Eiskern bestimmten Wert haben kein verwertbares Ergebnis gebracht. Als eine der möglichen Ursachen hierfür kommen die temperaturabhängigen mechanischen Eigenschaften des Eises in Betracht. Die Firntemperatur in 10 m, sie entspricht der mittleren Jahrestemperatur, an Dome Fuji beträgt $-58,0^{\circ}\text{C}$ (Dome-F Deep Coring Group, 1998), an B32 wurden $-44,5^{\circ}\text{C}$ gemessen (Oerter et al., 1999). Daher wurde auf die einfache Nye-Altersskala zurückgegriffen, auch wenn diese in größeren Tiefen das Alter des Eises unterschätzt (Paterson, 1994).

Die Auswertung tiefer Eiskerne, wie beispielsweise GRIP und GISP2 aus Grönland oder Dome Fuji und Vostok aus der Antarktis, hat gezeigt, daß die Akkumulationsrate nur für die letzten circa 10 000 Jahre, dem Holozän, näherungsweise als konstant angenommen werden kann (Watanabe et al., 1999; Jouzel et al., 1990). In Abbildung 4.4 sind exemplarisch Akkumulationsrate, Temperaturänderungen gegenüber heute sowie die Änderungen der Isotopenkonzentration $\delta^{18}\text{O}$ gegen die Tiefe, bzw. die Zeit für die tiefe Eiskernbohrung an Dome Fuji, östliches DML, dargestellt (Watanabe et al., 1999).

Eine grobe Abschätzung anhand Abbildung 4.4 ergibt, daß die Akkumulationsrate über den letzten glazialen Zyklus (circa 110 000 Jahre) betrachtet etwa das 0,7-fache der heutigen beträgt. In Abbildung 4.5 ist die mit der Gleichung 4.2 bestimmte Alterstiefenverteilung für die rezente Akkumulationsrate an Dome Fuji von $0,033 \text{ m Eisäquivalent a}^{-1}$ (Watanabe et al., 1997) sowie eine um 30 % geringere dargestellt.

Neben den gipfelartigen Erhebungen kann auch entlang von Eisscheiden, wenn auch nur eingeschränkt, angenommen werden, daß die Ausdünnungsraten innerhalb der Eissäulen konstant ist. Voraussetzung dazu ist, daß die horizontal Bewegung des Eises klein ist (Dahl-Jensen et al., 1997). Dies trifft, wie aus Abbildung 4.2 ersichtlich ist, für die überwiegenden Teile der Eisscheiden, insbesondere östlich von B32, zu. Das Profil 993136 der Kampagne 1998/99 verläuft entlang der Eisscheide östlich von B32, siehe auch Abbildung 4.6. Aus Abbildung 4.7 (b) ist ersichtlich, daß das Oberflächengefälle entlang des Profils nur 675 m auf 750 km, entsprechend $0,9 \times 10^{-3}$ beträgt. Es wird im allgemeinen angenommen, daß die Oberflächenneigung die Horizontalgeschwindigkeit in Neigungsrichtung maßgeblich beeinflusst. Neben der gering nach Westen abfallenden Oberfläche sind auch vier ausgewählte interne Horizonte

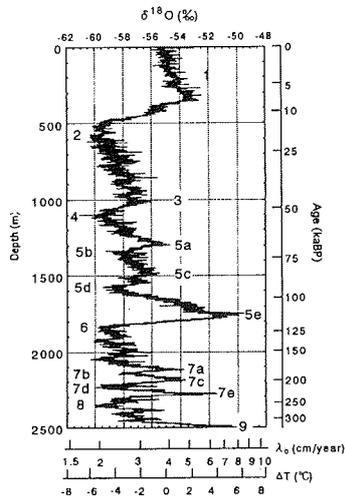


Abbildung 4.4: $\delta^{18}\text{O}$ gegen Tiefe des Dome Fuji Eiskerns. Daraus abgeleitete Parameter wie Akkumulationsrate λ_0 , Temperaturschwankungen ΔT und Alterstiefenverteilung sind durch zusätzliche Achsen der Graphik zugefügt worden. Die Zahlen innerhalb der Abbildung kennzeichnen marine Isotopenstadien der SPECMAP Zeitskala (Imbrie et al., 1984). Unverändert übernommen aus Watanabe et al. (1999).

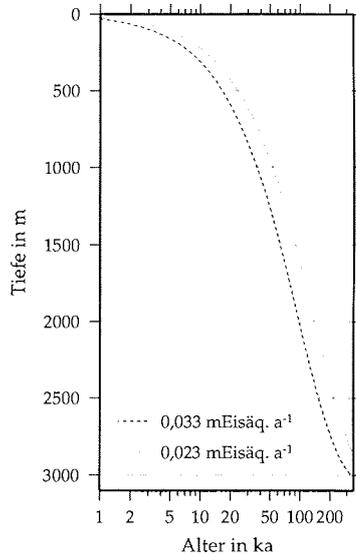


Abbildung 4.5: Alterstiefenverteilung für Dome Fuji nach Gl. 4.2 mit $h = 3090$ m (vgl. Tab. 3.2) und heutiger (gestrichelt) sowie reduzierter (punktirt) Akkumulationsrate.

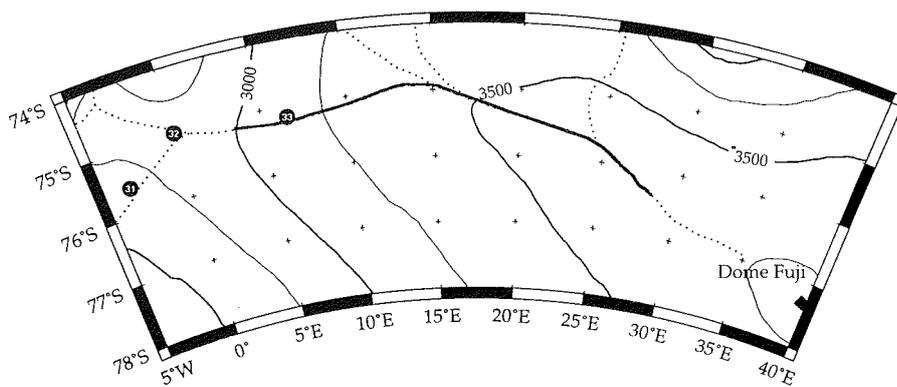


Abbildung 4.6: Karte zur Lage des Profils 993136, fette Linie, östlich von B32, Isohypsenintervall 250 m. Eisscheiden sind punktiert gezeichnet.

sowie der Verlauf des Felsreliefs, ergänzt durch die Position der Punkte, an denen er bestimmt werden konnte, in Abbildung 4.7 (b) dargestellt. Darüber ist die Variation der Akkumulationsverteilung entlang des Profils abgebildet, wie es sich nach einem Schnitt durch die Akkumulationskarte von Ühlein (1999) ergibt. Die auf einem $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ Raster basierende Karte enthält zahlreiche Akkumulationsdaten, die im Rahmen der EPICA-Vorerkundung von zum Beispiel Oerter et al. (2000), Broeke et al. (1999), J.G. Winther (pers. Mitt., 1999) und R. Mulvaney (pers. Mitt., 1999) erarbeitet wurden sowie auch ältere Daten, zum Beispiel Isaksson (1994) und Picciotto et al. (1971).

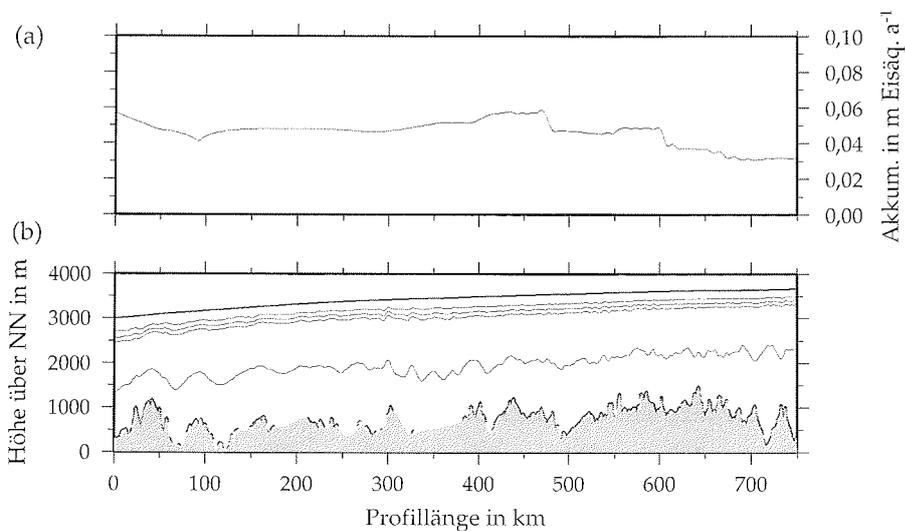


Abbildung 4.7: Die obere Graphik (a) zeigt die Akkumulationsrate entlang des Profils nach der Akkumulationsverteilung von Ühlein (1999). Darunter sind in (b) Oberfläche, interne Horizonte und Felsrelief des Profils 993136 in Metern über NN dargestellt. Das Profil ist 50fach überhöht. Punkte, an denen die Eismächtigkeit bestimmt werden konnte, sind entlang des Felsreliefs grau gefärbt eingetragen.

Mit diesen Eingangs- und Vergleichsdaten wurde für zwei verschiedene Akkumulationsraten, der rezenten sowie einer um 30% verringerten, Altershorizonte berechnet. In Abbildung 4.8 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Aufgrund der in Abbildung 4.4 gezeigten zeitlichen Änderungen der Akkumulationsraten sind für die rezenten Zuträge nur die ersten 10 000 Jahre gezeigt und für die über den letzten glazialen Zyklus gemittelten beginnend mit Alter ab 50 000 Jahren. Somit bleibt die zeitliche Entwicklung der Akkumulationsraten nicht gänzlich unberücksichtigt.

Der Vergleich der Abbildungen 4.7 und 4.8 zeigt, daß sowohl die an der Sektion bestimmten Horizonte als auch die berechneten Isochronen denselben großräumigen Trend bei allen Horizonten aufweisen. Jedoch ist der Verlauf der berechneten Isochronen wesentlich weniger von kleinräumigen Variationen überlagert und sie weisen auch nicht so große Schwankungen in ihrer Tiefenlage auf, wie die gemess-

senen. Dieses ist auf die Interpolation der Akkumulationsraten auf das Profil mit einem Punktabstand von nur 1 km zurückzuführen. Insbesondere scheint zwischen etwa Profilkilometer 400-470 die aus der Karte extrahierte Akkumulationsrate zu hoch zu sein, während sie gegen Ende des Profils, ab etwa Kilometer 660 zu niedrig ist. Das wird besonders im Vergleich der 5000 Jahres Isochrone mit dem obersten Horizont des Profils in Abbildung 4.9 deutlich. Die außerordentlich gute Übereinstimmung des hier präsentierten internen Horizontes mit der Isochrone rechtfertigt die Ansprache der internen Horizonte in den EMR-Sektionen als Isochronen. Jedoch ist das Alter der aus der Sektion extrahierten Isochronen nur anhaltsweise aus Gleichung 4.2 berechenbar, da aufgrund des logarithmischen Gesetzes in der Formel sich auch geringe Fehler stark auswirken. Solange keine der vorhandenen EMR-Sektionen an einen datierten Eiskern angehängt werden kann, müssen die hier diskutierten Altersbetrachtungen allesamt bezüglich eines absoluten Alters als vorläufig angesehen werden. Sie geben aber einen vorläufigen Anhaltspunkt über die Alterstiefenverteilung.

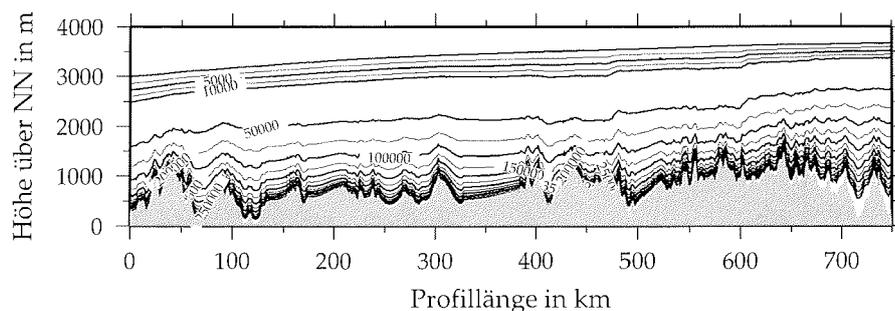


Abbildung 4.8: Berechnete Alterstiefenverteilung für Profil 993136. Für die Berechnung der Alter bis 10 000 Jahre wurde die rezente Akkumulationsrate benutzt, die Berechnung der höheren Alter geht von einer 30 % geringeren aus. Das Isochronenintervall ist 2500 Jahre für Alter bis 10 000 Jahre und 25 000 Jahre für höhere Alter, die Überhöhung ist 50fach.

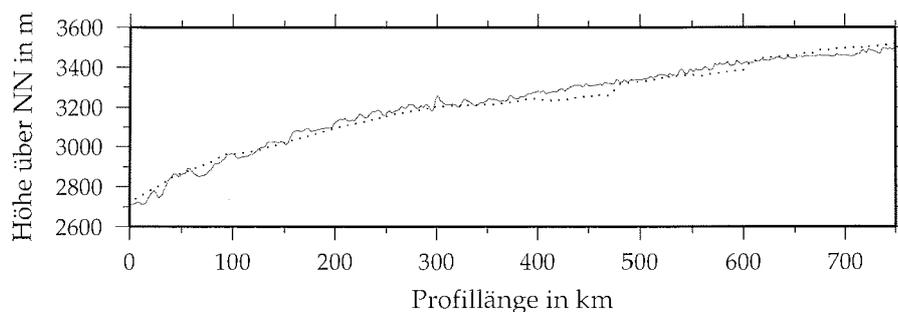


Abbildung 4.9: Vergleich von berechneter 5000 Jahres Isochrone, punktierte Linie, mit dem obersten internen Horizont in Abb. 4.7 (b), durchgezogene Linie, am Profil 993136, die Überhöhung ist 200fach.

4.3 Isostatische Reaktionen

Das Eisschild der Antarktis führt, im Vergleich zum unbelasteten Kontinent, zu einer Auslenkung der inkompressiblen Lithosphäre zum Erdinneren hin. Dies kann zum Beispiel mit dem Modell von Airy beschrieben werden. Im Falle einer rein elastisch verformbaren lokalen Lithosphäre und einer viskosen Asthenosphäre ist die Auslenkung proportional zum Verhältnis des Produkts aus Mächtigkeit und Dichte der Auflast zu der des verdrängten Materials der Asthenosphäre:

$$w = \frac{\rho_{Eis}}{\rho_A} h_{Eis} \quad (4.3)$$

Mit einer Dichte von 3300 kg m^{-3} der Asthenosphäre und 910 kg m^{-3} für Eis ist in Abbildung 4.10 das Felsrelief wiedergegeben, wie es sich ohne Eisauflast gestalten würde, d.h. wenn das Eis der Antarktis vollständig abschmelzen würde. Der zu erwartende Meeresspiegelanstieg im Falle des vollständig abschmelzenden antarktischen Eisschildes beträgt etwa 61 m (Huybrechts et al., 2000). In diesem Fall hebt sich der Untergrund des südwestlich von B31 gelegenen Beckens deutlich und nahezu vollständig über das Meeresniveau. Lediglich im Bereich des Bailey Ice Stream und des Slessor Glaciers bleiben einige kleinere Gebiete darunter. Im Vergleich zu Abbildung 3.8 sind wesentlich weniger kleinräumige Variationen der Untergrundtopographie zu erkennen. Die mittlere Hebung im betrachteten Gebiet beträgt etwa 460 m.

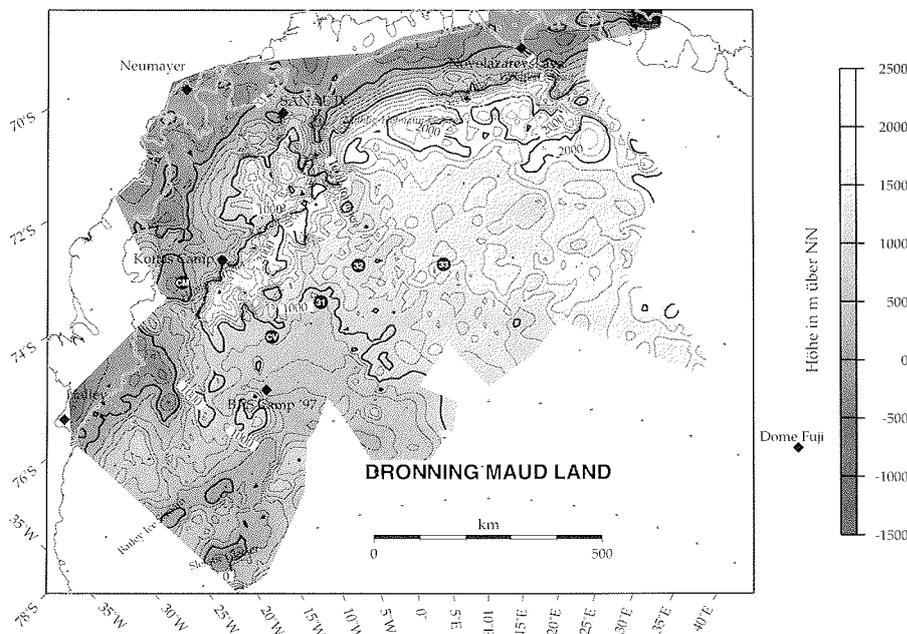


Abbildung 4.10: Subglaziales Relief in DML nach vollständigem Abschmelzen des Eisschildes.

Kapitel 5

Wahl eines optimalen Bohrpunktes in DML aus geophysikalischer Sicht

Im folgenden wird gezeigt, inwiefern EMR geeignet ist, zur Standortauswahl einer Eiskerntiefbohrung beizutragen. Dabei werden Argumente für die Lokation im Rahmen des „European Project for Ice Coring in Antarctica“ (EPICA) aus geophysikalischer Sicht gesammelt und diskutiert. Dazu wird auf die in den vorangehenden Abschnitten erarbeiteten Ergebnisse, ergänzt durch weitere Aspekte, zurückgegriffen. Zuvor jedoch noch ein kurzer Abriss der Ziele EPICAs.

Das Ziel von EPICA ist es, Antworten auf paläoklimatische Fragestellungen auf der Basis von Untersuchungen an tiefen Eiskernen zu geben, um somit die Entwicklung des heutigen Klimas besser zu verstehen und die künftige Entwicklung besser abschätzen zu können. Im Vordergrund stehen dabei, wie bereits in Abschnitt 1 aufgeführt, Fragen wie zum Beispiel (Jouzel et al., 1996; European Science Foundation, 1998):

- Gehen globale Klimaänderungen immer von der Nordhemisphäre aus oder ist auch der umgekehrte Fall möglich?
- Wie sind Klimawechsel zwischen Nord- und Südhemisphäre miteinander gekoppelt?
- Sind schnelle Klimaschwankungen des letzten glazialen Zyklus nur auf die Nordhemisphäre beschränkt?
- Gab es schnelle Klimaschwankungen auch in früheren Zyklen?
- Ist das warme, relativ stabile Klima der letzten 10 000 Jahre eine Ausnahmeerscheinung oder gab es solche Perioden auch früher?
- Folgt der Übergang von Glazial zu Interglazial immer demselben Muster?

Antworten auf die letzten drei Fragestellungen sollen anhand eines circa 3300 m langen Eiskerns von Dome Concordia, 123,1° Ost/ 75,15° Süd, siehe auch Abbildung 1.2, erarbeitet werden. An der Bohrung wird seit dem Südsommer 1997/98 gearbeitet.

Zur Beantwortung der drei ersten Fragen ist es geplant, einen Eiskern in einem Sektor der Antarktis mit Niederschlägen überwiegend atlantischen Ursprungs zu erbohren. Dieser soll mindestens einen vollständigen glazialen Zyklus, dies entspricht

etwa 110 000 Jahre, mit möglichst hoher zeitlicher, das heißt vertikaler, Auflösung enthalten. Generelle Anforderungen an tiefe Eisbohrkernlokationen sind, daß es kein basales Schmelzen in der näheren Umgebung gibt und die Schichtung des Eises ungestört ist. Um eine Datierung des Eiskerns auch in größeren Tiefen zu ermöglichen, muß auch die Fließgeschichte des Eises bekannt sein.

Die Forderung, daß die Niederschläge überwiegend aus atlantischen Quellen stammen sollen, stellt eine erste geographische Einschränkung dar und deutet auf das DML hin, da die Antarktis von ostwärts ziehenden Tiefdruckgebieten umgeben ist. Zurückverfolgte Trajektorien des im zentralen DML deponierten Niederschlages, die in der Regel ihren Anfang im Südatlantik haben (Noone et al., 1999), belegen dies. Die zeitliche Auflösung des Eiskerns wird durch die Akkumulationsrate bestimmt, wobei eine größere Akkumulationsrate eine höhere Auflösung bedeutet. Im südlichen DML wurden entlang des dritten Abschnittes der U.S. amerikanischen SPQML Traverse Akkumulationsraten bis zu $0,057 \text{ m Eisäquivalent a}^{-1}$ bestimmt (Picciotto et al., 1971). Die Eismächtigkeiten in derselben Region variieren um einen mittleren Wert von etwa 2750 m (Drewry, 1983). Eine vorsichtige Abschätzung basierend auf der Nye-Altersskala (siehe auch Gleichung 4.2) und diesen Werten ergibt, unter Berücksichtigung, daß die Akkumulationsrate über den letzten glazialen Zyklus gemittelt etwa 70 % der heutigem entspricht, daß der Übergang zum jüngsten glazialen Zyklus etwa 550 m über dem Felsuntergrund zu erwarten ist. Somit kann in DML prinzipiell ein Eiskern erbohrt werden, der den Anforderungen des EPICA Projektes genügt. Zur Bestimmung der genauen Position der Bohrung jedoch ist ein ausgedehntes glaziologisch-geophysikalisches Vorerkundungsprogramm notwendig. Im folgenden werden daher Ergebnisse der EPICA-Vorerkundung, fokussiert auf die weitere Umgebung der schließlich herausgearbeiteten Lokation einer Eiskerntiefbohrung vorgestellt und diskutiert.

Da zur Datierung und somit auch zur Interpretation eines Eiskerns eine ungestörte Schichtung von größter Bedeutung ist, muß die Bohrlokation in einer Region mit möglichst geringer horizontaler Bewegung plaziert werden. In Frage kommen daher Gipfelregionen und Eisscheiden des Eisschildes, wie sie sich aus der Betrachtung der Oberflächentopographie ergeben. In Abbildung 5.1 sind neben den Isohypsen und ausgewählten EMR-Profilen die Lage der Eisscheiden verzeichnet. Herausragende isolierte Hochlagen des Eisschildes sind im westlichen und zentralen DML nicht vorhanden. Ergebnisse eisdynamischer Modellierungen lassen darauf schließen, daß im betrachteten Meßgebiet kein basales Schmelzen kommt (P. Huybrechts, pers. Mitt. 1998). Dieses wird durch die sehr gute Übereinstimmung der berechneten Tiefenlage einer Isochrone mit einem internen Horizont des Profils 993136 in Abbildung 4.9 gestützt, da auch die Nye-Altersskala die Abwesenheit basalen Schmelzens voraussetzt.

Erwartungsgemäß sind die Gleichgewichtsgeschwindigkeiten, sie erlauben eine Abschätzung der rezenten Oberflächengeschwindigkeit des Eisschildes, entlang der Eisscheiden mit Werten kleiner 5 m a^{-1} gering. Abbildung 5.2 zeigt einen Ausschnitt der in Abbildung 4.2 präsentierten Gleichgewichtsgeschwindigkeiten in der Umgebung von B32. Aufgrund der ansteigenden Gleichgewichtsgeschwindigkeiten entlang

KAPITEL 5. WAHL EINES OPTIMALEN BOHRPUNKTES IN DML AUS GEOPHYSIKALISCHER SICHT

der Eisscheide südwestlich von B32 ist dieser Bereich nicht für eine tiefe Eiskernbohrung geeignet.

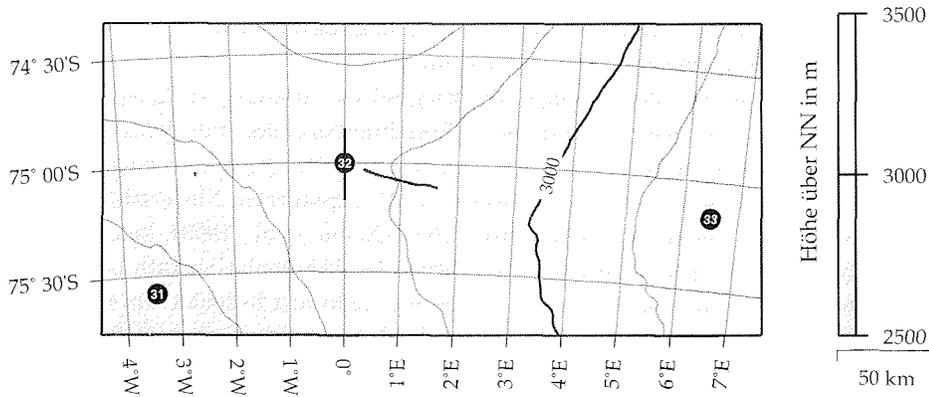


Abbildung 5.1: Topographie nach Bamber und Huybrechts (1996) in der Umgebung von B32, Eisscheiden sind weiß punktiert eingezeichnet, die schwarzen Linien kennzeichnen die Lage der EMR-Profile in Abbildung 5.5 und 5.6, der Isohypsenabstand beträgt 100 m.

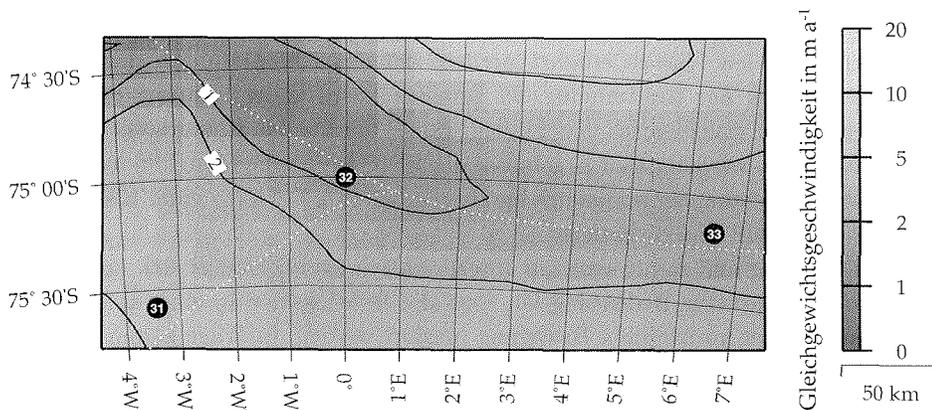


Abbildung 5.2: Gleichgewichtsgeschwindigkeiten in der Umgebung von B32

Neben den Fließgeschwindigkeiten ist auch die Eismächtigkeitsverteilung von großer Bedeutung. Aufgrund der hohen Meßpunktdichte um B32 herum kann ein Eismächtigkeitsdatensatz auf einem $2,5 \text{ km} \times 2,5 \text{ km}$ Raster erzeugt werden. Die höhere Auflösung der in Abbildung 5.3 dargestellten Eismächtigkeitsverteilung gegenüber dem in Abbildung 3.6 gezeigten Datensatz, ist deutlich zu erkennen. Die Eismächtigkeiten variieren östlich von B32 zwischen 2400 m und 2800 m. Westlich des Nullmeridians sind auch größere Schwankungen, wie in Abbildung 5.3 ersichtlich, vorhanden. Somit kann auch nordwestlich von B32 keine gute Bohrlokation ausgewiesen werden. Da die Topographie keine ausgeprägten kleinräumigen Höhenunterschiede aufweist, zeigt das subglaziale Relief in Abbildung 5.4 analog zur Eismächtigkeitsverteilung ebenfalls im westlichen Teil deutlich mehr kleinräumige Variationen als im Osten.

KAPITEL 5. WAHL EINES OPTIMALEN BOHRPUNKTES IN DML AUS GEOPHYSIKALISCHER SICHT

Östlich von B32 bis circa 4° Ost sind die Variationen im Untergrund wie auch in den Eismächtigkeiten von deutlich geringerer Amplitude.

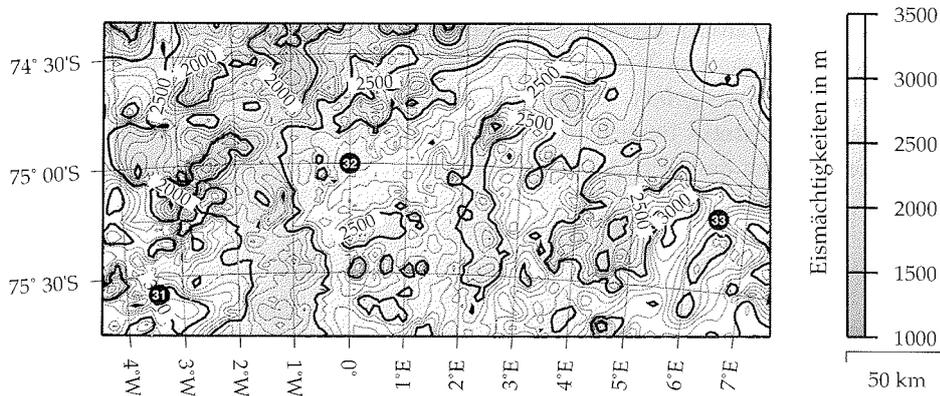


Abbildung 5.3: Eismächtigkeiten in der Umgebung von B32, der Isohypsenabstand beträgt 100 m.

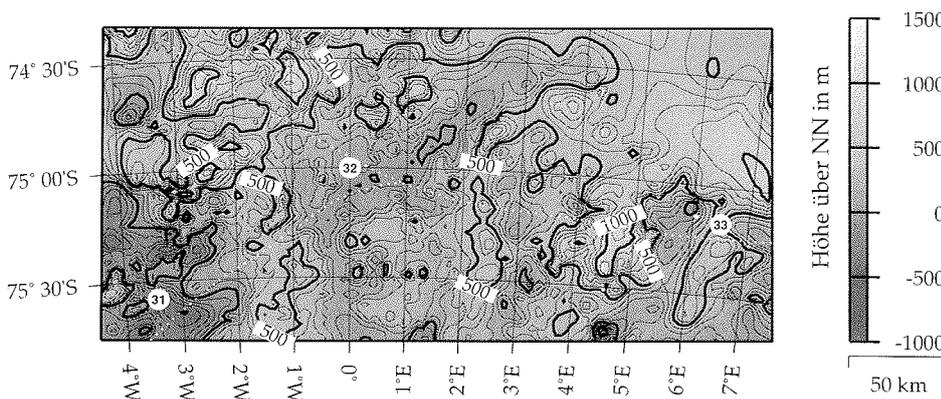


Abbildung 5.4: Subglaziales Relief in der Umgebung von B32, der Isohypsenabstand beträgt 100 m.

Aus der Analyse der Oberflächenneigungen, der Gleichgewichtsgeschwindigkeiten und der Eismächtigkeitsverteilung ist der Abschnitt der Eisscheide zwischen B32 bis etwa 4° Ost am besten für eine Eiskerntiefbohrung geeignet. Zu favorisieren ist eine Lokation in der näheren Umgebung westlich von B32, da die Oberfläche des Eisschildes nach Westen hin einfällt und die Bohrung somit am Ende eines am Untergrund relativ flachen Abschnittes wäre entlang dem das Eis sehr langsam, nur etwa $1 - 2 \text{ m a}^{-1}$, nach Westen fließt.

Sektionen des hochauflösenden 60 ns Pulses der AWI-Aero-EMR-Apparatur aus der Umgebung von B32, wie in Abbildung 5.5 und 5.6 dargestellt, zeigen sehr regelmäßig verlaufende interne Horizonte mit nur sehr geringen Ondulationen. Sie lassen keine Störung der Schichtung des Eises erkennen. Die Lage der dargestellten Profile ist in Abbildung 5.1 ersichtlich.

KAPITEL 5. WAHL EINES OPTIMALEN BOHRPUNKTES IN DML AUS GEOPHYSIKALISCHER SICHT

Mit Hilfe der Nye-Altersskala kann entlang von Eisscheiden eine erste Alters-Tiefenabschätzung durchgeführt werden. Die dazu notwendigen Eingangsdaten wurden aus den hier präsentierten Datensätzen sowie dem von Ühlein (1999) erstellten Akkumulationsratendatensatz extrahiert. In Abbildung 5.7 sind die im Verlaufe dieses Abschnittes in Form von Karten vorgestellten Parameter, ergänzt durch mehrere Isochronen, zusammengefaßt. Dabei wird deutlich, daß der Abschnitt nahe B32 der am besten geeignete Bereich im Meßgebiet für eine Eiskerntiefbohrung ist, der die Anforderungen des EPICA-Programms erfüllt. Die Akkumulationsrate beträgt

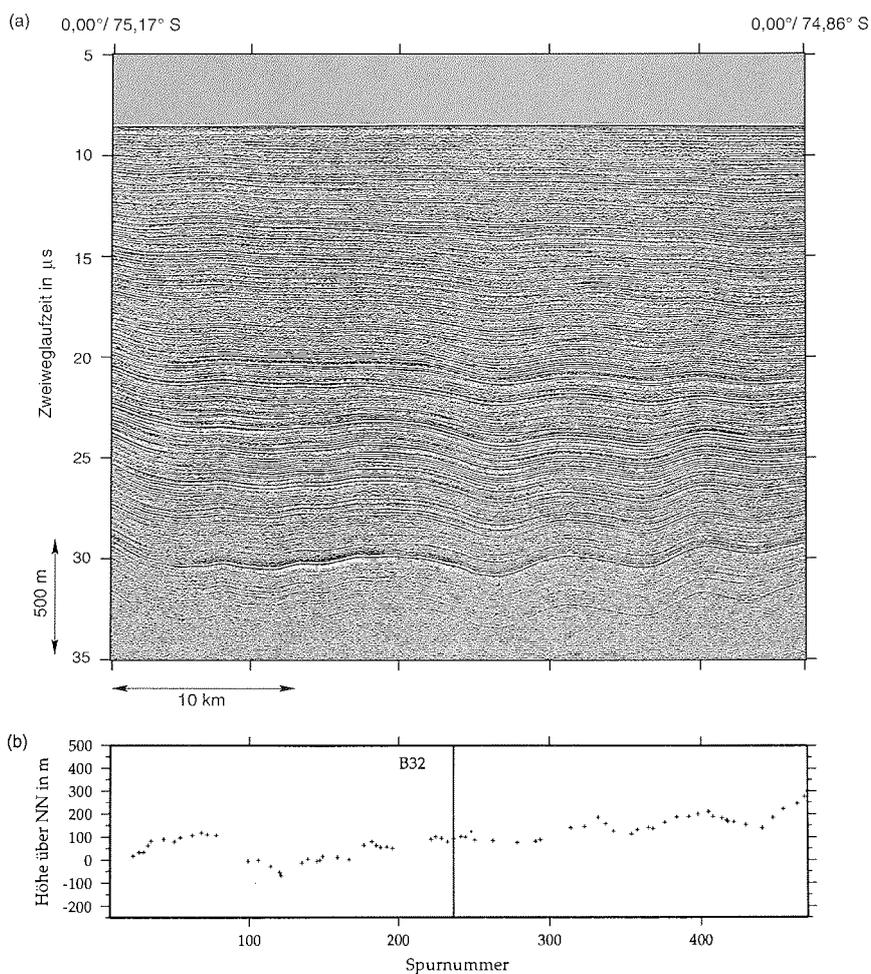


Abbildung 5.5: (a) Süd-Nord verlaufende EMR-Sektion an B32 in 13facher Überhöhung. Für genaue Lage siehe Abb. 5.1. (b) Verlauf des Untergrundes entlang des in (a) abgebildeten Profils mit gleicher Überhöhung.

KAPITEL 5. WAHL EINES OPTIMALEN BOHRPUNKTES IN DML AUS
GEOPHYSIKALISCHER SICHT

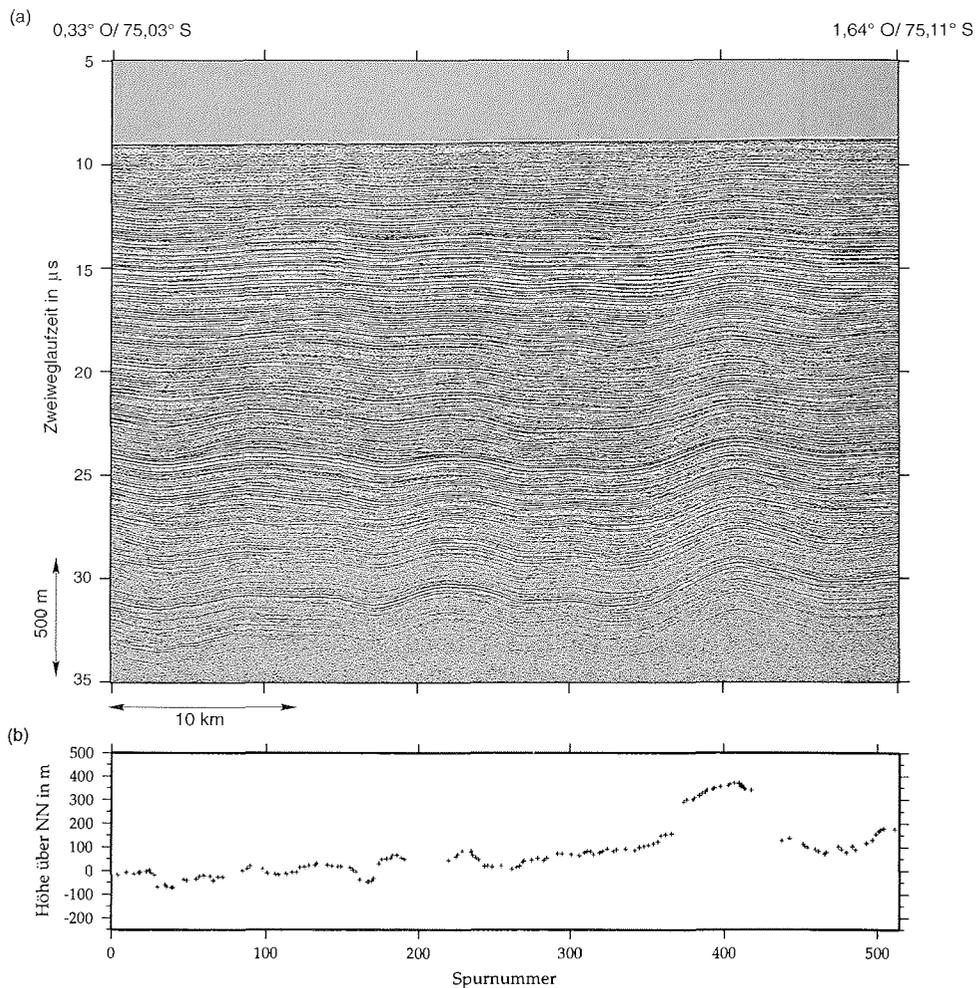


Abbildung 5.6: (a) Sektion östlich von B32 entlang der Eisscheide in 13facher Überhöhung. Für genaue Lage siehe Abb. 5.1. (b) Verlauf des Untergrundes entlang des in (a) abgebildeten Profils mit gleicher Überhöhung.

in der Nähe von B32 circa $0,065 \text{ m Eisäquivalent a}^{-1}$, die Eismächtigkeit 2750 m, die 110000 Jahres Isochrone wird, auf der Basis der hier diskutierten Auswertung, 475 m über dem Untergrund erwartet und die horizontale Bewegungsrate des Eises, abgeleitet aus den Gleichgewichtsgeschwindigkeiten, mit $1,5 \text{ m a}^{-1}$.

KAPITEL 5. WAHL EINES OPTIMALEN BOHRPUNKTES IN DML AUS
GEOPHYSIKALISCHER SICHT

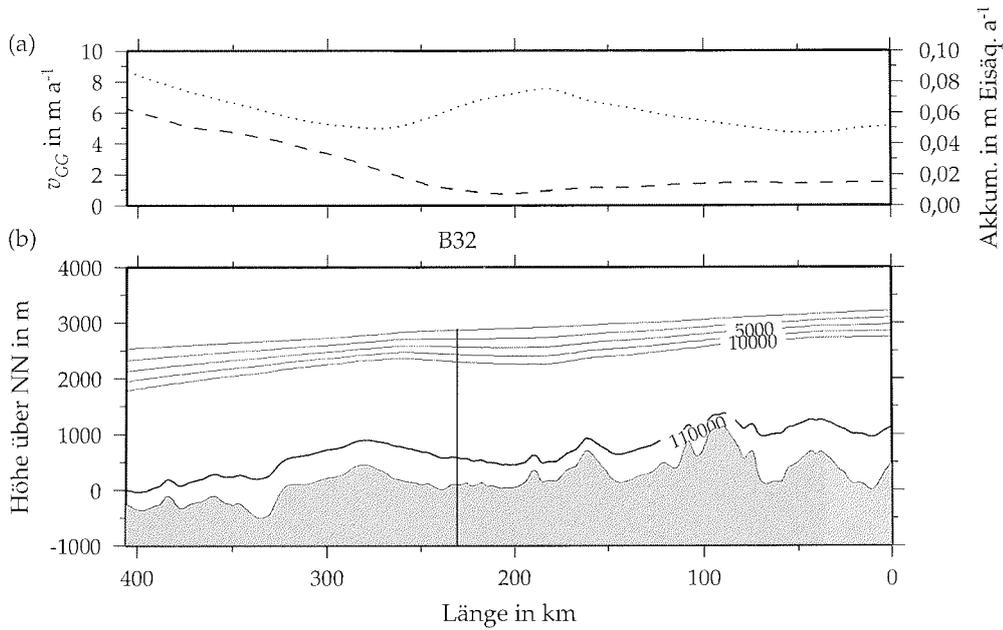


Abbildung 5.7: (a) Akkumulationsraten (punctierte Linie) entlang der nördlichen Eisscheide in Abb. 5.1, extrahiert aus einer Akkumulationsratenkarte von Ühlein (1999) und Gleichgewichtsgeschwindigkeit (gestrichelte Linie). (b) berechnete Isochronen entlang der Eisscheide mit den auf 1 km Punktabstand interpolierten Eismächtigkeiten, Oberflächen- und Untergrundstopographie der Abb. 5.3, 5.1 und 5.4, die Darstellung ist 30fach überhöht. Zur Berechnung der 110 000 Jahres Isochrone wurden die Akkumulationsraten aus (a) um 30 % verringert, um die zeitliche Variation der Akkumulationsraten zu berücksichtigen. Die jüngeren Isochronen wurden mit den Zutragraten aus (a) berechnet.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem „European Project for Ice Coring in Antarctica“ wurde ein Projekt ins Leben gerufen, um Antworten auf paläoklimatische Fragestellungen anhand von Untersuchungen an Eiskernen zu erarbeiten. Dazu sollen zwei lange Eiskerne in der Antarktis gebohrt werden. Einer an Dome Concordia und der zweite an einer noch zu bestimmenden Stelle in Dronning Maud Land, im atlantischen Sektor der Antarktis, siehe auch Abbildung 1.2.

Da das DML bis 1994 nur sporadisch und oft nur entlang der küstennahen Gebiete Ziel geophysikalischer/glaziologischer Forschungsarbeiten war, war das Wissen um viele Parameter unzureichend. Dies gilt besonders für Parameter, die zur Entscheidung wo eine Eiskerntiefbohrung plaziert werden kann notwendig sind. So beschränkte sich der Kenntnisstand der Eismächtigkeitsverteilung, um hier nur einen wichtigen Parameter zu nennen, nur auf einige wenige Werte entlang einer Traverse südlich des 76. Breitengrades und das Wissen um die küstennahen, stellenweise eisfreien, Randgebirge. Die daraus erstellte Karte der Eismächtigkeitsverteilung (Drewry, 1983) ist daher unzureichend und kann nicht die erforderliche Auflösung bieten, wie sie notwendig wäre. Deshalb mußten umfangreiche Eisdickenmessungen im zentralen und westlichen DML im Rahmen der EPICA-Vorerkundung durchgeführt werden, um eine der Problemstellung angemessene Eismächtigkeitskarte erzeugen zu können.

Angesichts der großen, etwa 1 000 000 km² umfassenden Fläche war ein Meßverfahren einzusetzen das es erlaubt, diese Fläche innerhalb von 4-5 Südsommern zu kartieren. Dieses leistet das elektromagnetische Reflexionsverfahren, da es nicht unmittelbar auf die Oberfläche der zu kartierenden Fläche aufgesetzt werden muß und somit auch vom Flugzeug aus betrieben werden kann. Zudem können aus den EMR-Messungen neben der Eismächtigkeit auch Informationen über den inneren Aufbau des Eises abgeleitet werden.

Mit dem mit Skifahrwerk ausgestatteten Polarflugzeug *Polar2* und einer speziell dafür angefertigten EMR-Apparatur war es möglich, während fünf Meßkampagnen zwischen 1994 und 1999 auf insgesamt 89 Flügen, Profile mit einer Gesamtlänge von 91 500 km zu messen. Die Auswertung dieser Daten mündete bereits während der Meßphase in die Erstellung von Karten der Eismächtigkeitsverteilung und des subglazialen Untergrundes (Steinhage et al., 1999). Darüber hinaus wurden sie bereits

in Datensätze für eisdynamische Modellierungen innerhalb (Huybrechts et al., 2000) und außerhalb (Lythe et al., eingereicht; Calov et al., 1998) des AWI integriert. Die in dieser Arbeit für das Meßgebiet berechnete mittlere Eismächtigkeit ist mit 1678 m um 300 m größer als der vorher im Meßgebiet bestimmte Wert. Die Antarktis, inklusive der Schelfeise, hat nach Huybrechts et al. (2000) im Mittel eine Eismächtigkeit von 1903 m. In dem Datensatz, der dafür zu Grunde gelegt wurde, sind schon weite Teile der hier vorgestellten Daten enthalten. Aufgrund der zahlreichen Schelfeise an der Küste DML und der Randgebirge ist der Mittelwert deutlich geringer, als der des ganzen Kontinents.

Die Karten der Eismächtigkeitsverteilung, Abbildung 3.6, sowie des subglazialen Reliefs, Abbildung 3.8, beruhen auf konsistenten Datensätzen. Die Qualität der Datensätze wird durch die Kreuzungspunktanalyse aufgezeigt. An den mehr als 1250 Kreuzungspunkten der AWI-Profile bleibt die maximale Abweichung der Eismächtigkeiten unter 150 m, im Mittel beträgt sie nur 17,7 m. 54 % aller Kreuzungspunkte weichen weniger als 10 m voneinander ab. Da die Kreuzungspunktanalyse mit den geokodierten Eismächtigkeitswerten durchgeführt wurde, integriert sie über alle bis dahin eventuell aufgetretenen Unsicherheiten. Diese können sich zusammensetzen aus Ungenauigkeiten der Apparatur, der Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Einsätze, Ungenauigkeiten der Tiefenfunktion und der Positionsgenauigkeit. Daher kann die Abweichung der Eismächtigkeiten an den Kreuzungspunkten als ein Qualitätsmaßstab für die den Karten zugrunde liegende Datenbasis herangezogen werden. Die Qualität ist demnach sehr gut. Das hohe vertikale Auflösungsvermögen der Apparatur konnte anhand mehrerer Beispielsektionen, siehe zum Beispiel Abbildung 3.13, gezeigt werden. Sie spiegelt sich auch in den dadurch möglich gewordenen Karten der internen Horizonte, Abbildung 3.15, wieder.

Mit der Berechnung der Gleichgewichtsgeschwindigkeiten, basierend auf den neuerstellten Datensätzen und dem von R. Warner zur Verfügung gestellten Programm (Budd und Warner, 1996), konnten erste Anhaltswerte der in DML vorherrschenden Bewegungsraten des Eises bestimmt werden. Das Modell erfordert neben der Eismächtigkeitsverteilung die Kenntnis der Oberflächentopographie und der Akkumulationsverteilung. Im Falle der Oberflächentopographie konnte auf den Datensatz von Bamber und Huybrechts (1996) zurückgegriffen werden. Die berücksichtigte Akkumulationsverteilung beruht auf neuen Daten, die im Rahmen der EPICA-Vorerkundung erarbeitet wurden (Oerter et al., 1999; Oerter et al., 2000; Broeke et al., 1999)(J.-G. Winther, pers. Mitt., 1999, R. Mulvaney, pers. Mitt., 1999) und wurden in einen bestehenden Datensatz (Giovinetto und Bentley, 1985) integriert. Gleichzeitig zeigt das Ergebnis dieser Modellierung, daß die neuen Daten stetig in die bestehenden Eingangsdatensätze integrierbar sind, da an den Rändern keine Unstimmigkeiten zu beobachten sind. Die großen Auslaßgletscher und Eisströme zeichnen sich deutlich in der Geschwindigkeitsverteilung ab und sind auch an den Konfluenzzonen zu erkennen. Entlang der Eischeiden wurden, mit Ausnahme des Stücks von B32 Richtung Südwesten bis etwa 10° West, nur geringe Bewegungsraten mit Geschwindigkeiten unter 2 m a^{-1} errechnet.

Anhand des Profils 993136 und der Nye-Altersskala zur Alterstiefenverteilung kann-

te eine erste grobe Zeittiefenskala entlang der Eisscheide in DML bestimmt werden. Der Vergleich berechneter Isochronen mit internen Horizonten führte zu einer guten Übereinstimmung. Daraus darf gefolgert werden, daß zum einen die zur Berechnung benutzten Datensätze konsistent sind und zum anderen, daß es kein basales Schmelzen entlang der betrachteten Abschnitte gibt. Letzteres haben auch andere eisdynamische Modellierungen ergeben (P. Huybrechts, pers. Mitt., 1998).

Basierend auf den hier vorgestellten Daten und den aus der Literatur bekannten Trajektorien der Niederschläge konnte eine Bohrlokation für eine Eiskerntiefbohrung in DML, die den Erfordernissen der EPICA Zielsetzungen genügt, herausgearbeitet werden. Die besten Voraussetzungen dazu bietet die nähere Umgebung von B32 auf der dortigen Eisscheide. Abbildung 6.1 zeigt eine isometrische Ansicht der Eisoberseite und des subglazialen Reliefs der nähereren Umgebung des vorgeschlagenen Bohrpunktes, gekennzeichnet mit einem schwarzen Kreis in der Abbildung. An dieser Stelle ist eine für das DML relativ hohe Akkumulationsrate von $0,068 \text{ m Eisäquivalent a}^{-1}$ und damit ein hohes zeitliches Auflösungsvermögen der im Eiskern archivierten Klima-Proxy-Parameter zu erwarten. Zum Vergleich, am „alten“ Eiskern von Dome Concordia wurde eine Akkumulationsrate von $0,037 \text{ m Eisäquivalent a}^{-1}$ bestimmt (Jouzel et al., 1989). Bei einer Eismächtigkeit vom 2750 m und der genannten Akkumulationsrate ist die 110 000 Jahre Isochrone an B32 der Nye-Altersskala zufolge 475 m über dem Untergrund anzutreffen. Die Reliefunterschiede in einigen zehner Kilometern Umkreis von B32 sind geringer, so daß sie keinen störenden Einfluß auf die Schichtung des Eises haben sollten. Die Gleichgewichtsgeschwindigkeiten entlang der Eisscheide erreichen östlich von B32 Werte um $1,5 \text{ m a}^{-1}$. Die Bewegungsraten an der Oberfläche sind etwa um 10 % größer. Somit erscheint der Abschnitt der Eisscheide in der Umgebung von B32 als die optimale Lokation im zentralen und westlichen Dronning Maud Land für eine Eiskerntiefbohrung mit dem Ziel einen Eiskern mit möglichst hoher zeitlicher Auflösung zu erhalten, der einen vollständigen glazialen Zyklus, etwa 110 000 Jahre, umfaßt und dessen Eis zu einem hohen Anteil aus Niederschlägen atlantischen Ursprungs stammt.

Der Eiskern der in DML beabsichtigten Eiskerntiefbohrung wird Gegenstand zahlreicher chemischer und physikalischer Messungen sein. Zur Erweiterung des Verständnisses der Ursache und Mechanismen der Reflexion elektromagnetischer Wellen im Eis, ist es wünschenswert, daß an diesem Kern auch DEP-Messungen vorgenommen werden. Bei DEP-Messungen werden hochauflösend Leitfähigkeit und Kapazität eines Eiskerns (Wilhelms et al., 1998) gemessen. Aus letzterer kann die DK des Eises sehr genau bestimmt werden, so daß daraus ein Datensatz gewonnen werden kann, der es erlaubt Radargramme, die bis ins kompakte Eis hineinreichen, zu modellieren. Arbeiten zum Modellieren von Radargrammen im Firnbereich von Eisschilden werden zur Zeit am AWI durchgeführt, so daß die dabei erarbeiteten Kenntnisse zur Modellierung weiterreichender Radargramme genutzt werden könnten. DEP-Messungen werden auch zur Datierung von Firn- und Eiskernen herangezogen (Wilhelms, 2000). Die dabei aufgestellte Stratigraphie kann an EMR-Sektionen eingehängt und somit

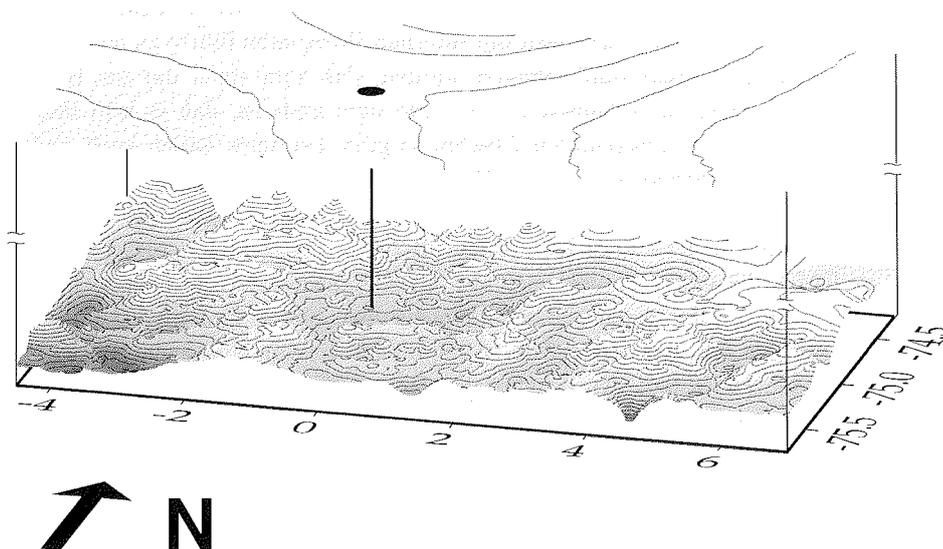


Abbildung 6.1: Isometrische Ansicht von Eistopographie und subglazialen Relief nahe der vorgeschlagenen Bohrlokation. Das Isohypsenintervall beträgt jeweils 100 m, der schwarze Punkt kennzeichnet die vorgeschlagene Bohrlokation, die Grauskalierungen entsprechen denen der Abb. 5.1 und 5.4. Die Eisoberfläche ist zur besseren Einsicht des Untergrundes 4000 m angehoben, die Überhöhung ist 15fach.

die nur punktuell aufgeschlossenen Informationen des Eiskerns in die Fläche getragen werden.

Da sich die Aussagekraft von Bohrungen, beziehungsweise von Bohrkernen deutlich erhöhen lässt, wenn sie miteinander korreliert werden können, sollte eine flugzeuggestützte EMR-Kartierung zwischen der künftigen Bohrlokation in DML und der Tiefbohrung auf Dome Fuji in Erwägung gezogen werden. An Dome Fuji wurde ein 2503 m langer, datierter Eiskern erbohrt (Watanabe et al., 1999). Mit der Anbindung an diesen Eiskern würde durch Verfolgen interner Horizonte in der EMR-Kartierung nicht nur die Korrelation der Bohrungen ermöglicht, sondern es ständen auch datierte Altershorizonte in DML zur Verfügung.

Eventuelle Änderungen der Position der Eisscheide in der Vergangenheit können anhand von sogenannten 'Raymond Bumps' (Reeh, 1988; Raymond, 1983), die sich im Verlauf interner Horizonte in hochauflösenden EMR-Kartierungen widerspiegeln, erfasst werden. Diese entstehen durch das Fließen des Eises in entgegengesetzte Richtungen senkrecht zum Streichen der Eisscheide und führen zu einer Ausdünnung der Schichtmächtigkeit entlang der Eisscheide im Vergleich der weiteren Umgebung. Dieses erlaubt eine von der Oberflächentopographie unabhängige Lagebestimmung der Eisscheide. Dazu sind hochauflösende Messungen auf einem engmaschigen Raster notwendig. Als engmaschig ist ein Raster anzusehen, wenn der Profilabstand deutlich unterhalb der durchschnittlichen regionalen Eismächtigkeit liegt, in diesem

Fall also ein Abstand von weniger als 2,5 km.

Der Fortschritt beim Verständnis der Eisdynamik und des Paläoklimas sowie nicht zuletzt der Rechenleistung moderner Computer und Programme verlangen immer detailliertere Eingangsdatensätze. Eines der Ziele des Projektes BEDMAP ist es, Eismächtigkeitsverteilung und Untergrundrelief der Antarktis auf 5 km x 5 km Raster für Modellberechnungen zu erarbeiten und zur Verfügung zu stellen (Lythe et al., eingereicht). Die Datengrundlage dafür jedoch ist in weiten Teilen des Kontinents, wie aus Abbildung 3.1 ersichtlich, nicht ausreichend dicht. Nur sehr wenige Messungen wurden bislang im Bereich um 90° Ost sowie südlich des westlichen DML durchgeführt. Der letztgenannte Bereich gehört zum Einzugsgebiet Recovery und Support Force Glacier, die beide in das Filchner Schelfeis münden. Eine Kartierung der Einzugsgebiete würde sicherlich zur Klärung der Frage, ob die Massenbilanz der Antarktis ausgeglichen ist oder nicht, beitragen.

Literaturverzeichnis

- Alley, R.B., A.J. Gow, S.J. Johnsen, J. Kipfstuhl, D.A. Meese und T. Thorsteinsson (1998). Comparison of deep ice cores, *Nature* **373**: S. 393–394.
- Bamber, J.L. und P. Huybrechts (1996). Geometric boundary conditions for modelling the velocity field of the Antarctic ice sheet, *Annals of Glaciology* **23**: S. 364–373.
- Beitzel, J.E. (1971). Geophysical exploration in Queen Maud Land, Antarctica, in Crary, A.P. (Hrsgb.), *Antarctic Snow and Ice Studies II*, Bd. 16 von *Antarctic Research Series*, American Geophysical Union, Washington, S. 39–87.
- Blindow, N. (1994). The central part of the Filchner-Ronne Ice Shelf, Antarctica: internal structures revealed by 40 MHz monopulse RES, *Annals of Glaciology* **20**: S. 365–371.
- Bogorodsky, V.V., C.R. Bentley und P.E. Gudmandsen (1985). *Radioglaciology*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- British Antarctic Survey (1998). *Antarctic Digital Database*, 2. Aufl., Scientific committee on Antarctic Research, Cambridge, UK.
- Broeke, M.R. van den, J.-G. Winther, E. Isaksson, J.F. Pinglot, L. Karlöf, T. Eiken und L. Conrads (1999). Climate variables along a traverse line in Dronning Maud Land, East Antarctica, *Journal of Glaciology* **45**(150): S. 295–302.
- Budd, W.F., D. Janssen und I.N. Smith (1984). A three-dimensional time-dependent model of the West Antarctic ice sheet, *Annals of Glaciology* **5**: S. 29–36.
- Budd, W.F. und D.B. Carter (1971). An analysis of the relation between the surface and bedrock profiles of ice caps, *Journal of Glaciology* **10**(59): S. 197–209.
- Budd, W.F. und R.C. Warner (1996). A computer scheme for rapid calculations of balance-flux distributions, *Annals of Glaciology* **23**: S. 21–27.
- Calov, R., A. Savvin, R. Greve, I. Hansen und K. Hutter (1998). Simulation of the Antarctic ice sheet with a threedimensional polythermal ice-sheet model, in support of the EPICA project, *Annals of Glaciology* **27**: S. 201–206.
- Clough, J.W. (1977). Radio-echo sounding: reflections from internal layers in ice sheets, *Journal of Glaciology* **18**(78): S. 3–14.

LITERATURVERZEICHNIS

- Clough, J.W., C.R. Bentley und C.K. Poster (1968). Ice thickness investigations on SPQMLT III, *Antarctic Journal of the United States* 4: S. 96–97.
- Dahl-Jensen, D., N.S. Gundestrup, K. Keller, S.J. Johnsen, S.P. Gogineni, C.T. Allen, T.S. Chuah, H. Miller, S. Kipfstuhl und E.D. Waddington (1997). A search in north Greenland for a new ice-core drill site, *Journal of Glaciology* 43(144): S. 300–306.
- Damm, V., G. Reitmayr, W. Korth, R. Diedrich und J. Perlt (1998). Helicopter-borne ice thickness measurements - application of a newly developed radar system in central Queen Maud Land, Antarctica, *Proceedings of GPR'98, 7th International Conference on Ground Penetrating Radar*.
- Damm, V. und D. Eisenburger (im Druck). Ice thicknesses and subice morphology in central Queen Maud Land deduced by radio echo soundings (RES), *Geologisches Jahrbuch*.
- Dansgaard, W., S.J. Johnsen, H.B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N.S. Gundestrup, C.U. Hammer, C.S. Hvidberg, J.P. Steffensen, A.E. Sveinbjörnsdottir, J. Jouzel und G. Bond (1993). Evidence for general instability from a 250-kyr ice-core record, *Nature* 364: S. 218–220.
- Dansgaard, W. und S.J. Johnson (1969). A flow model and a time scale for the ice core from Camp Century, Greenland, *Journal of Glaciology* 11(53): S. 215–223.
- Dix, C.H. (1955). Seismic velocities from surface measurements, *Geophysics* 20(1): S. 68–86.
- Dome-F Deep Coring Group (1998). Deep ice-core drilling at Dome Fuji and glaciological studies in east Dronning Maud Land, Antarctica, *Annals of Glaciology* 27: S. 333–337.
- Drewry, D.J. (1975). Radio echo sounding map of Antarctica, ($\sim 90^\circ\text{E}$ - 180°), *Polar Record* 17(109): S. 359–374.
- Drewry, D.J. (Hrsgb.) (1983). *Antarctic glaciological and geophysical folio*, Scott Polar Research Institute, Cambridge.
- Eckstaller, A. (1997). Geophysikalische Flugzeugmessungen zwischen Coats Land, Shackleton Range und westlichen Dronning Maud Land. Abschnitt ANT XII/2, in Jokat, W. und H. Oerter (Hrsgb.), *Die Expedition ANTARKTIS-XII mit FS "Polarstern", Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-XII/3*, Bd. 219 von *Berichte zur Polarforschung*, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, S. 154–164.
- Epstein, S., R.P. Sharp und A.J. Gow (1970). Antarctic ice sheet: stable isotope analyses of Byrd Station cores and interhemispheric climatic implications, *Science* 168: S. 1570–1572.

- European Science Foundation (1998). European Project for Ice Coring in Antarctica, <http://www.esf.org/ftp/pdf/Lesc/Epica.pdf> und Prospekt, IREG Strasbourg.
- Garotta, R. und D. Michon (1967). Continuous analysis of the velocity function and the move out corrections, *Geophysical Prospecting* **15**: S. 584–597.
- Giovinetto, M.B., N.M. Waters und C.R. Bentley (1990). Dependence of Antarctic surface mass balance on temperature, elevation, and distance to open ocean, *Journal of Geophysical Research* **95**(D4): S. 3517–3531.
- Giovinetto, M.B. und C.R. Bentley (1985). Surface balance in ice drainage systems of Antarctica, *Antarctic Journal of the United States* **20**: S. 6–13.
- Glen, J.W. und J.G. Paren (1975). The electrical properties of snow and ice, *Journal of Glaciology* **15**(73): S. 15–38.
- Göktas, F. (1999). *Ergebnisse der Untersuchung des grönländischen Inlandeises mit dem elektromagnetischen Reflexionsverfahren in der Umgebung von NGRIP*, Bd. 336 von *Berichte zur Polarforschung*, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung.
- Hamley, T.C., I.M. Smith und N.W. Young (1985). Mass-balance and ice-flow parameters for East Antarctica, *Journal of Glaciology* **31**(109): S. 334–339.
- Harrison, C.H. (1973). Radio echo sounding of horizontal layers in ice, *Journal of Glaciology* **12**(66): S. 383–397.
- Hempel, L. und F. Thyssen (1992(erschienen 1993)). Deep radio echo soundings in the vicinity of GRIP and GISP2 drill sites, Greenland, *Polarforschung* **62**(1): S. 11–16.
- Hempel, L. und H. Miller (1996). Das neue EMR-System für das Polarflugzeug Polar 2, *Terra Nostra* **3/96**: S. 23–24.
- Hippel, A.R. von (Hrsgb.) (1958). *Dielectric Materials and Applications*, 2. Aufl., The Technology Press of M.I.T. Cambridge, Massachusetts, and John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Hodge, S.M., D.L. Wright, J.A. Bradley, R.W. Jacobel, N. Skou und B. Vaughn (1990). Determination of the surface and bed topography in central Greenland, *Journal of Glaciology* **36**(122): S. 17–30.
- Holmlund, P., K. Gjerde, N. Gundestrup, M. Hansson, E. Isaksson, L. Karlöf, M. Nyman, R. Pettersson, C.H. Reijmer, M. Stenberg, M. Thomassen, R. van de Wal, C. van der Veen, F. Wilhelms und J.-G. Winther (2000). Spatial gradients in snow layering and ten metre temperatures at two EPICA-DML pre site survey drill sites, *Annals of Glaciology* **30**: S. 13–19.

LITERATURVERZEICHNIS

- Hoppe, H. und F. Thyssen (1988). Ice thickness and bedrock elevation in Western Neuschwabenland and Berkner Island, Antarctica, *Annals of Glaciology* **11**: S. 42–45.
- Huybrechts, P. (1994). The present evolution of the Greenland ice sheet: an assessment by modelling, *Global and Planetary Change* **9**: S. 39–51.
- Huybrechts, P., D. Steinhage, F. Wilhelms und J. Bamber (2000). Balance velocities and measured properties of the Antarctic ice sheet from a new compilation of gridded data for modeling, *Annals of Glaciology* **30**: S. 52–60.
- Imbrie, J., J.D. Hays, D.G. Martinson, A. McIntyre, A.C. Mix, J.J. Morley, N.G. Pisias, W.L. Prell und N.J. Shackleton (1984). The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record, in Berger, A., J. Imbrie, J. Hays, G. Kukla und B. Sattmann (Hrsgb.), *Milankovitch and Climate, Part 1*, NATO ASI Series, D. Reidel Publishing Company, S. 269–305.
- Isaksson, E. (1994). *Climate Records from Shallow Firn Cores, Dronning Maud Land, Antarctica*, Dissertation, Department of Physical Geography, University of Stockholm.
- Jezek, K. (1980). *Radar investigations of the Ross Ice Shelf, Antarctica*, Dissertation, University of Wisconsin-Madison.
- Johari, G.P. und P.A. Charette (1975). The permittivity and attenuation in polycrystalline and single-crystalline ice Ih at 35 and 60 MHz, *Journal of Glaciology* **40**(71): S. 293–303.
- Jouzel, J., G. Orombelli und C. Lorius (1996). European Project for Ice Coring in Antarctica, *Terra Antarctica* **3**(1): S. 49–54.
- Jouzel, J., G. Raisbeck, J.P. Benoist, F. Yiou, C. Lorius, D. Raynaud, J.R. Petit, N.I. Barkov, Y.S. Korotkevitch und V.M. Kotlyakov (1989). A comparison of deep Antarctic ice cores and their implications for climate between 65,000 and 15,000 years ago, *Quaternary Research* **31**: S. 135–150.
- Jouzel, J., J.R. Petit und D. Raynaud (1990). Palaeoclimatic information from ice cores: the Vostok records, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences* **81**: S. 349–355.
- Karlöf, L., J.-G. Winther, E. Isaksson, J. Kohler, J.F. Pinglot, F. Wilhelms, M. Hansson, P. Holmlund, M. Nyman, R. Pettersson, M. Stenberg, M.P.A. Thomassen, C. van der Veen und R.S.W. van de Wal (2000). A 1500 years record of accumulation at Amundsenisen western Dronning Maud Land, Antarctica, derived from electrical and radioactive measurements on a 120 m ice core, *Journal of Geophysical Research* **105**(D10): S. 12471–12483.
- Kohnen, H. (1981). *Antarktis-Expedition: Deutschlands neuer Vorstoß ins ewige Eis*, Gustav Lübbe Verlag, Bergisch Gladbach.

LITERATURVERZEICHNIS

- Lorius, C., J. Jouzel, C. Ritz, L. Merlivat, N.I. Barkov, Y.S. Korotkevich und V.M. Kotlyakov (1985). A 150,000-year climatic record from Antarctic ice, *Nature* **316**: S. 591–596.
- Lythe, M.B., D.G. Vaughan und BEDMAP Consortium (eingereicht). BEDMAP: a new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica, *Journal of Geophysical Research*.
- Millar, D.H.M. (1982). Acidity levels in ice sheets from radio echo-sounding, *Annals of Glaciology* **3**: S. 199–203.
- Näslund, J.-O. (1997). Airborne radar soundings of ice depth, GPS measurements of ice velocity and studies of landform evolution in central Dronning Maud Land, East Antarctica, in Winther, J.-G. (Hrsgb.), *Report of the Norwegian Antarctic Research Expedition 1996/97*, Bd. 148, NORSK Polarinstitut Oslo, S. 125–136.
- Nixdorf, U., D. Steinhage, U. Meyer, L. Hempel, M. Jenett, P. Wachs und H. Miller (1999). The newly developed airborne RES-system of the AWI as a glaciological tool, *Annals of Glaciology* **29**: S. 231–238.
- Noone, D., Turner J. und R. Mulvaney (1999). Atmospheric signals and characteristics of accumulation in Dronning Maud Land, Antarctica, *Journal of Geophysical Research* **104**(D16): S. 19191–19211.
- Oerter, H., F. Wilhelms, F. Jung-Rothenhäusler, F. Göktas, W. Graf und S. Sommer (2000). Accumulation rates, isotope and major ions contents in Dronning Maud Land as revealed by snow pit studies and shallow firn cores, *Annals of Glaciology* **30**: S. 27–34.
- Oerter, H., W. Graf, F. Wilhelms, A. Minikin und H. Miller (1999). Accumulation studies on Amundsenisen, Dronning Maud Land, by means of tritium, DEP and stable isotope measurements: first results from the 1995/96 and 1996/96 field seasons, *Annals of Glaciology* **29**: S. 1–9.
- Paren, J.G. (1981). Reflection coefficient at a dielectric interface, *Journal of Glaciology* **27**(95): S. 203–204.
- Paterson, W.S.B. (1994). *The physics of glaciers*, 3. Aufl., Elsevier Science Ltd.
- Picciotto, E., G. Crozaz und W. de Breuck (1971). Accumulation on the South Pole-Queen Maud Land Traverse, 1964-1968, in Crary, A.P. (Hrsgb.), *Antarctic snow and ice studies II*, Bd. 16 von *Antarctic Research Series*, American Geophysical Union, Washington DC, S. 257–315.
- Press, W.H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky und W.T. Vetterling (1986). *Numerical Recipes: the art of scientific computing (fortran edition)*, 2. Aufl., Cambridge University Press (USA), Kap. 19 Partial Differential Equations, S. 818–837.

LITERATURVERZEICHNIS

- Raymond, C.F. (1983). Deformation in the vicinity of ice divides, *Journal of Glaciology* **29**(103): S. 357–373.
- Reeh, N. (1988). A flow-line model for calculating the surface profile and the velocity, strain-rate, and stress fields in an ice sheet, *Journal of Glaciology* **34**(116): S. 46–54.
- Robin, G. de Q., S. Evans und J.T. Bailey (1969). Interpretation of radio echo sounding in polar ice sheets, *Philosophical Transactions of the Royal Society London Series A* **265**: S. 437–505.
- Siegert, M.J. (1999). On the origin, nature and uses of Antarctic ice-sheet radio-echo layering, *Progress in Physical Geography* **23**(2): S. 159–179.
- Siegert, M.J., R. Hodgkins und J.A. Dowdeswell (1998). Internal radio-echo layering at Vostok station, Antarctica, as an independent stratigraphic control on the ice-core record, *Annals of Glaciology* **27**: S. 360–364.
- Smith, W.H.F. und P. Wessel (1990). Gridding with continuous splines in tension, *Geophysics* **55**(3): S. 293–305.
- Snyder, J.P. (1987). Map projections - a working manual, *Professional Paper 1395*, United States Geological Survey.
- Stauffer, B., T. Blunier, A. Dällenbach, A. Indermühle, J. Schwander, T.F. Stocker, J. Tschumi, J. Chappellaz, D. Raynaud, C.U. Hammer und H.B. Clausen (1998). Atmospheric CO₂ concentration and millennial-scale climate change during the last glacial period, *Nature* **392**: S. 59–62.
- Steinhage, D., U. Nixdorf, U. Meyer und H. Miller (1999). New maps of the ice thickness and subglacial topography in Dronning Maud Land, Antarctica, determined by means of airborne radio echo sounding, *Annals of Glaciology* **29**: S. 267–272.
- Telford, W.M., L.P. Geldart und R.E. Sheriff (1990). *Applied Geophysics*, 2. Aufl., Cambridge University Press.
- Thomson, J.W. und A.P.R. Cooper (1993). Review: The SCAR Antarctic digital topographic database, *Antarctic Science* **5**(3): S. 239–244.
- Thyssen, F. und K. Grosfeld (1988). Ekström Ice Shelf, Antarctica, *Annals of Glaciology* **11**: S. 180–183.
- Uhlein, S. (1999). *Anwendung verschiedener Interpolationsverfahren im Geografischen Informationssystem (GIS) auf Akkumulationsdaten in Dronning Maud Land (Antarktis)*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg.

- Vaughan, D.G., J.L. Bamber, M. Giovinetto, J. Russell und A.P.R. Cooper (1999). Reassessment of net surface mass balance in Antarctica, *Journal of Climate* **12**: S. 933–946.
- Walden, M.C. und H.F.J. Corr (1997). Review of the British Antarctic Survey EPICA 96/97 Radio Echo Survey Season, in Oerter, H. (Hrsgb.), *Filchner-Ronne-Ice Shelf Programme*, Bd. 11, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, S. 68–70.
- Watanabe, O., Y. Fuji, H. Motoyama, T. Furukawa, H. Shoji, H. Enomoto, T. Kameda, H. Narita, R. Naruse, T. Hondoh, S. Fujita, S. Mae, N. Azuma, S. Kobayashi, M. Nakawo und Y. Ageta (1997). A preliminary study of ice core chronology at Dome Fuji station, Antarctica, *Proceedings of the NIPR Symposium on Polar Meteorology and Glaciology* **11**: S. 9–13.
- Watanabe, O., Y. Fuji, K. Kamiyama, H. Motoyama, T. Fuukawa, M. Igarashi, M. Kohno, S. Kanamori, N. Kanamori, Y. Ageta, M. Nakawo, H. Tanaka, K. Satow, H. Shoji, K. Kawamura, S. Matoba und W. Shimada (1999). Basic analyses of Dome Fuji deep ice core part 2: stable oxygen and hydrogen isotope ratios, major chemical compositions and dust concentration, *Polar Meteorology and Glaciology* **13**: S. 83–89.
- Wilhelms, F. (2000). *Messung dielektrischer Eigenschaften polarer Eiskerne*, Bd. 367 von *Berichte zur Polarforschung*, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung.
- Wilhelms, F., J. Kipfstuhl, H. Miller, K. Heinloth und J. Firestone (1998). Precise dielectric profiling of ice cores: a new device with improved guarding and its theory, *Journal of Glaciology* **44**(146): S. 171–174.

Danksagung

Mein Dank gilt Prof. Dr. H. Miller für die Übertragung der Arbeit sowie seiner Diskussionsbereitschaft und stetem Interesse am Fortschritt der Arbeit.

Prof. Dr. H. Villingen danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferates der Arbeit.

Dank schulde ich Uwe Nixdorf für die Diskussionen und Anregungen im Verlaufe der Dissertation. Seine Unterstützung trug wesentlich zum Gelingen der Arbeit bei.

Zu danken habe ich den Mitgliedern der Arbeitsgruppen Glaziologie und Geophysik für ihre Ratschläge zur Bewältigung der mehr oder weniger alltäglichen Probleme des Alltags im Umgang mit Rechnern, Software und Verwaltungsabläufen.

Uwe Meyer und Alfons Eckstaller gegenüber bin ich für die wissenschaftliche Betreuung der Meßkampagnen zwischen 1994 und 1998 zu Dank verpflichtet. Sie schufen dadurch schon vor Aufnahme der Arbeit eine solide Datengrundlage zur Anfertigung der vorliegenden Arbeit.

Bedanken möchte ich mich bei den vielen Meßtechnikern, Flugzeugmechanikern und Piloten, die mit dazubeigetragen haben, das vorliegenden Rohdatenmaterial zu sammeln.

Dank meinen Eltern und Freunden für ihre Unterstützung, die ich im Laufe der Jahre erfahren habe.

Anhang A

Profil Inlandeis-Schelfeis

Im folgenden ist das in Abbildung 3.11 (Abschnitt 3.2) gezeigte Profil in höherer Auflösung dargestellt. Das 585 km lange Profil ist dazu in 9 einander überlappende Teilstücke zerlegt worden, die Überhöhung ist 13fach. Abbildung A.1 zeigt die Position der Sektion und der einzelnen Abschnitte.

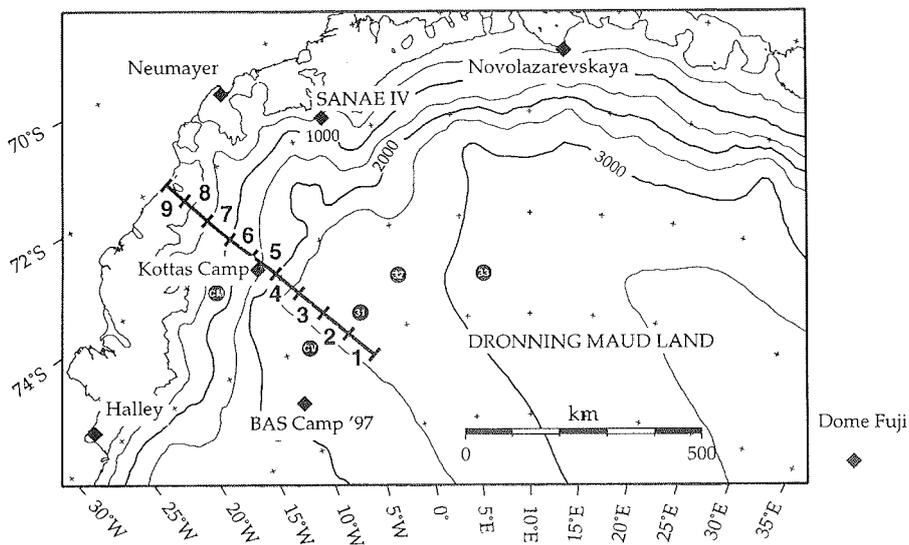


Abbildung A.1: Orientierungskarte zum Profil Inlandeis-Schelfeis, die Nummern entsprechen den in Abbildung A.2 (a)-(i) dargestellten Sektionsabschnitten.

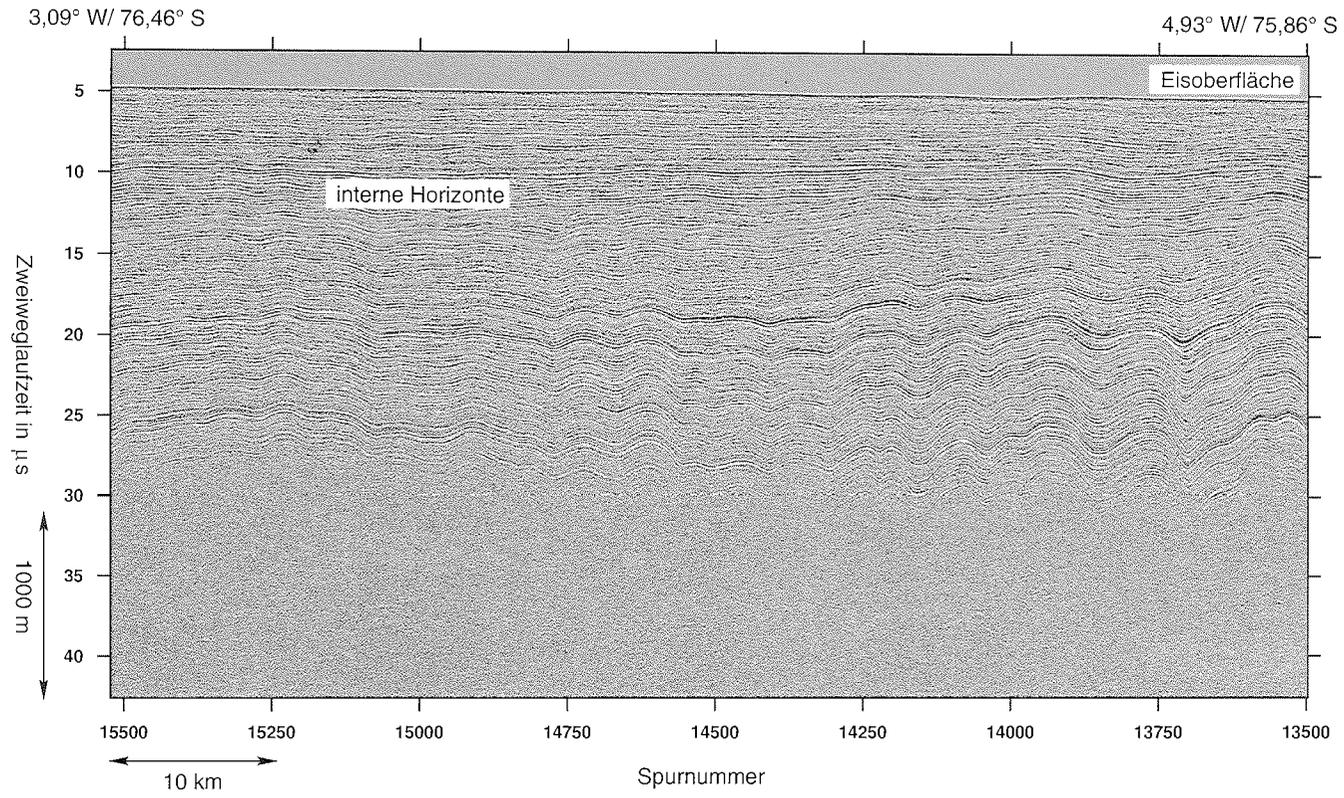


Abbildung A.2: (a) Profil Inlandeis-Schelfeis Abschnitt 1.

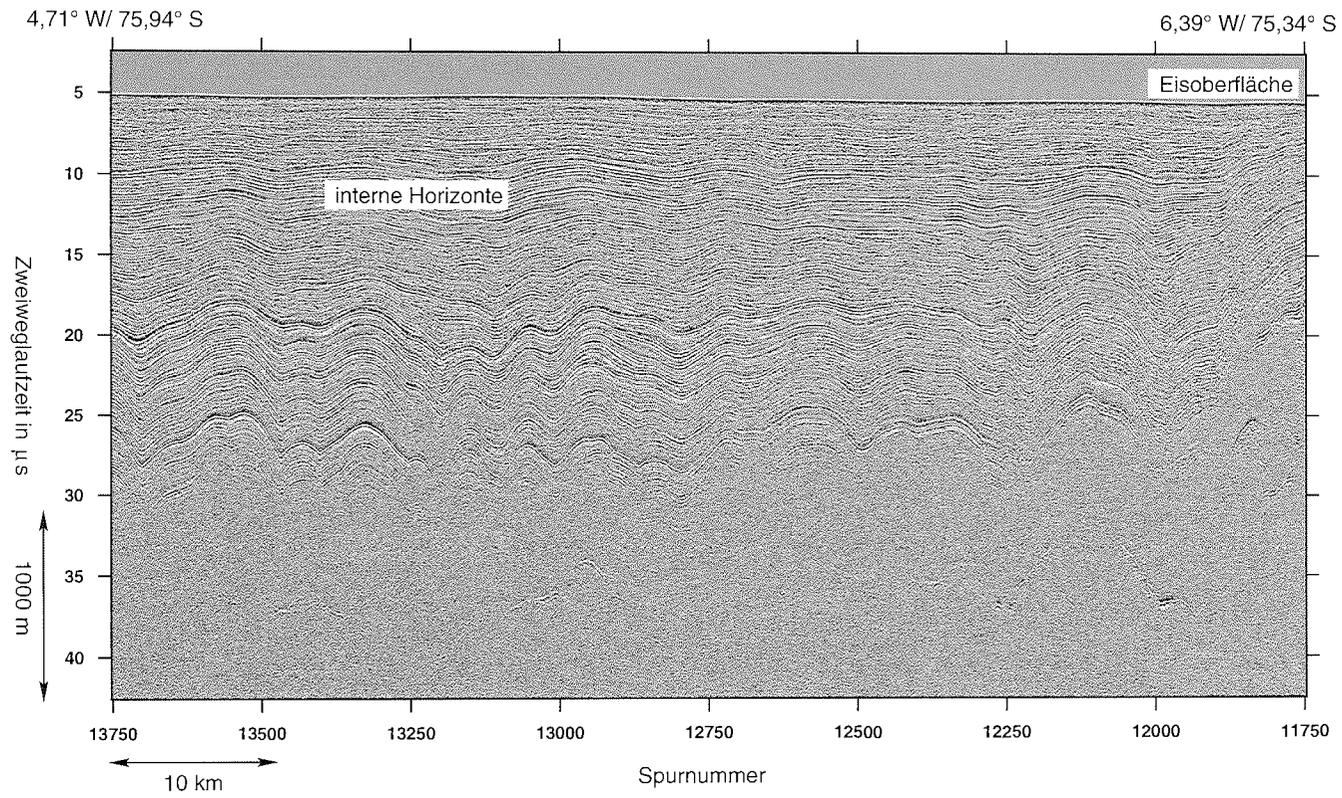


Abbildung A.2: (b) Profil Inlandeis-Schelfeis Abschnitt 2.

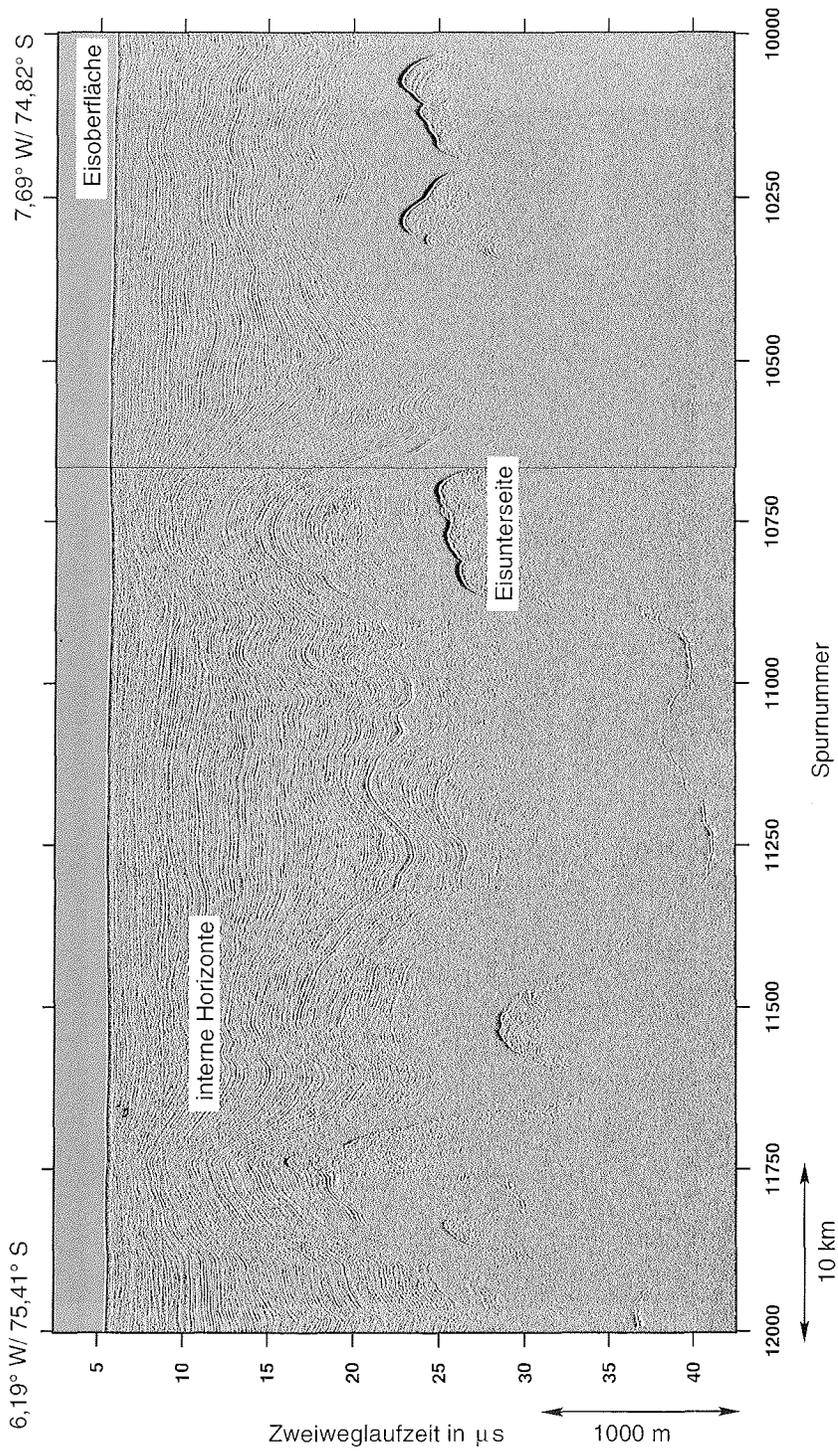


Abbildung A.2: (c) Profil Inlandeis-Schelfeis Abschnitt 3.

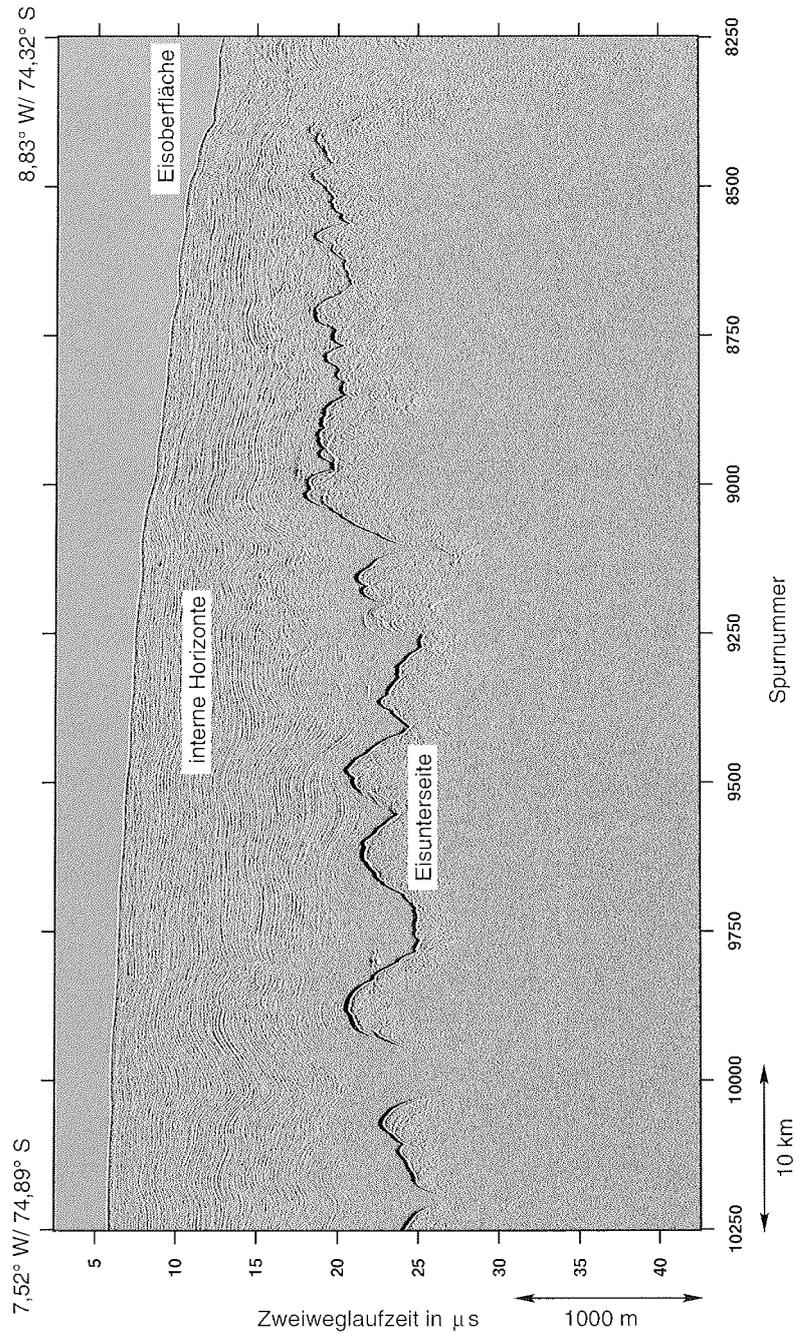


Abbildung A.2: (d) Profil Inlandeis-Schelfeis Abschnitt 4.

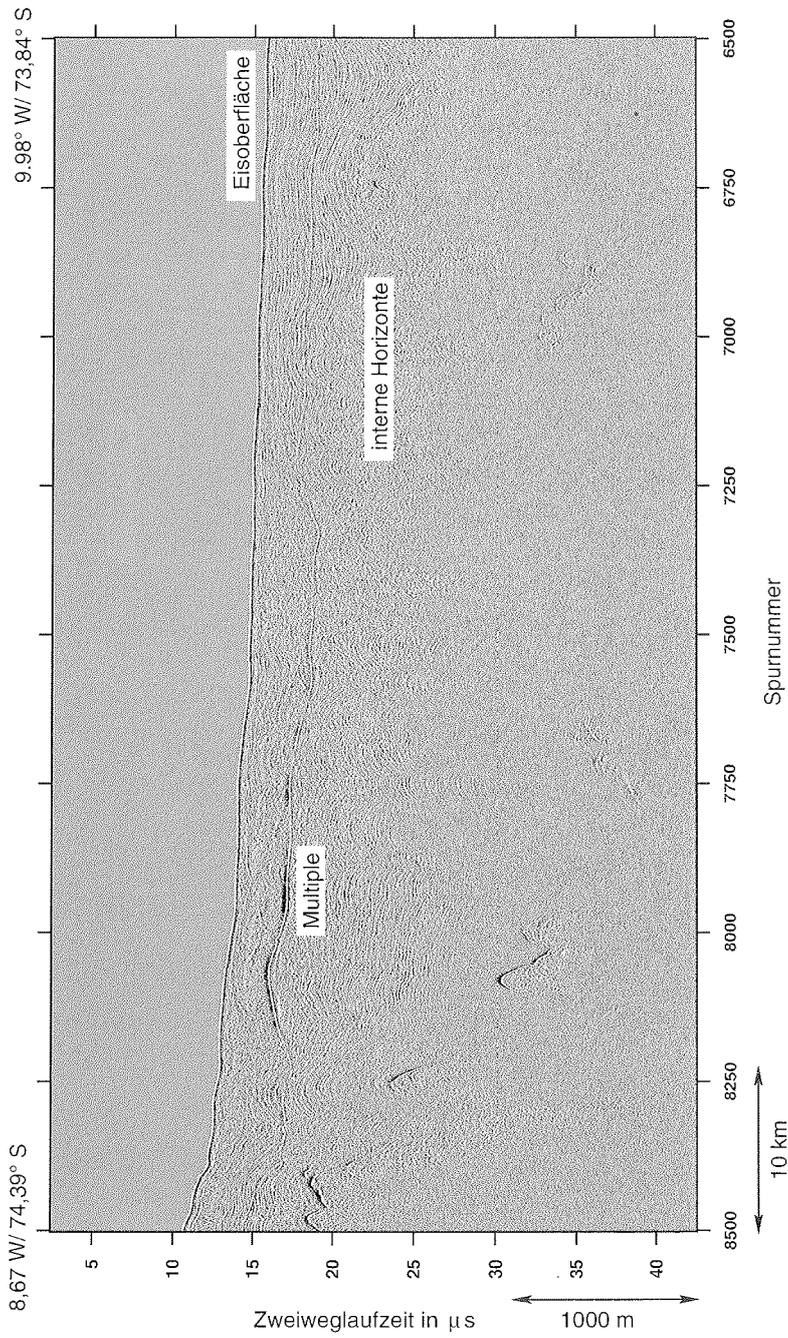


Abbildung A.2: (e) Profil Inlandeis-Schelfeis Abschnitt 5.

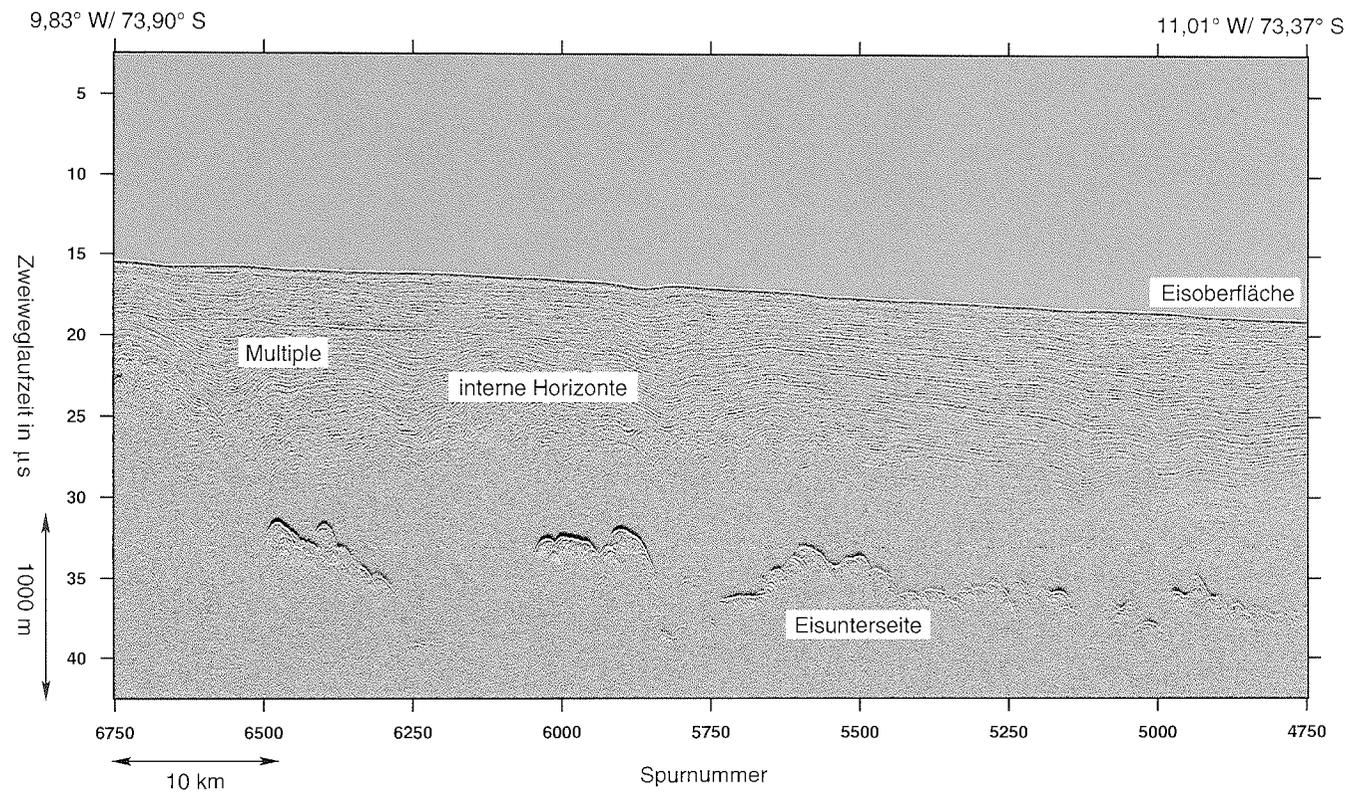


Abbildung A.2: (f) Profil Inlandeis-Schelfeis Abschnitt 6.

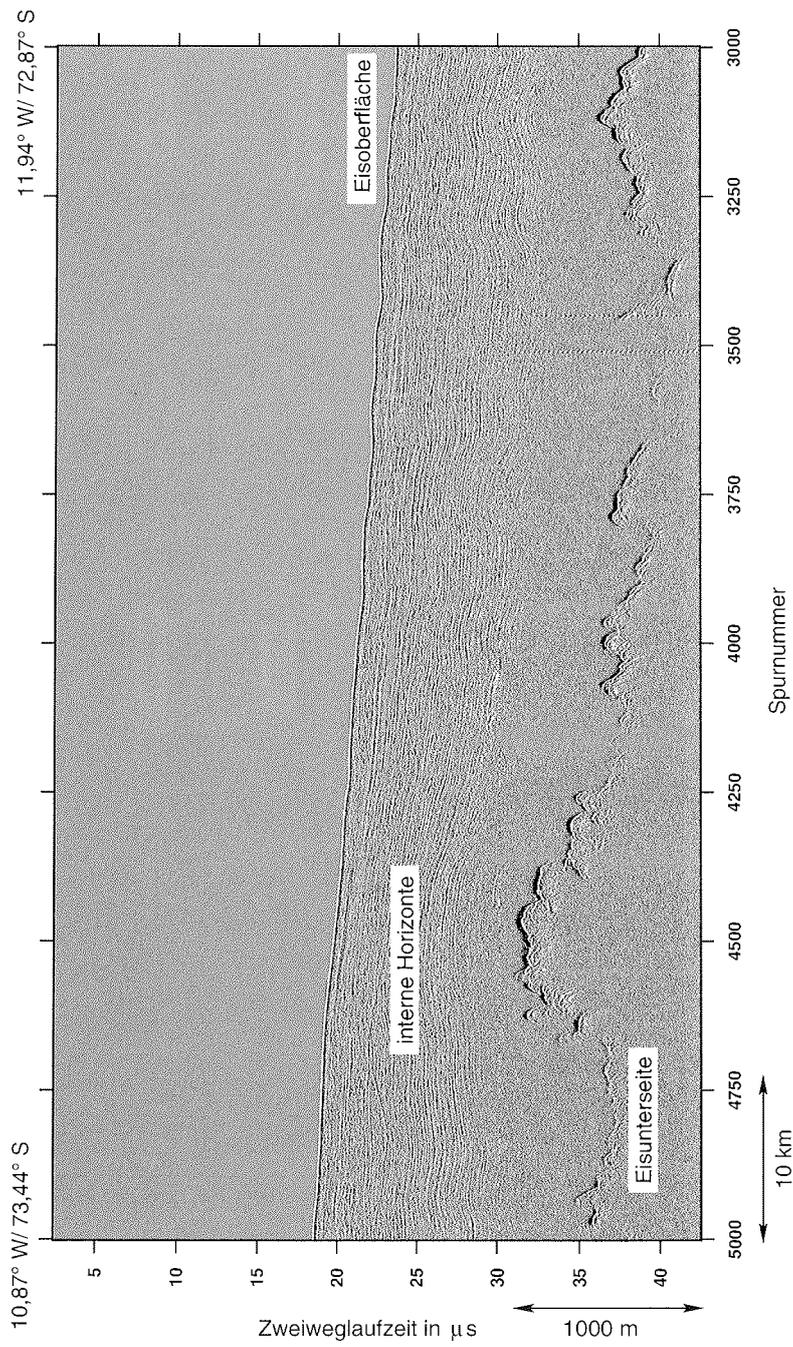


Abbildung A.2: (g) Profil Inlandeis-Schelfeis Abschnitt 7.

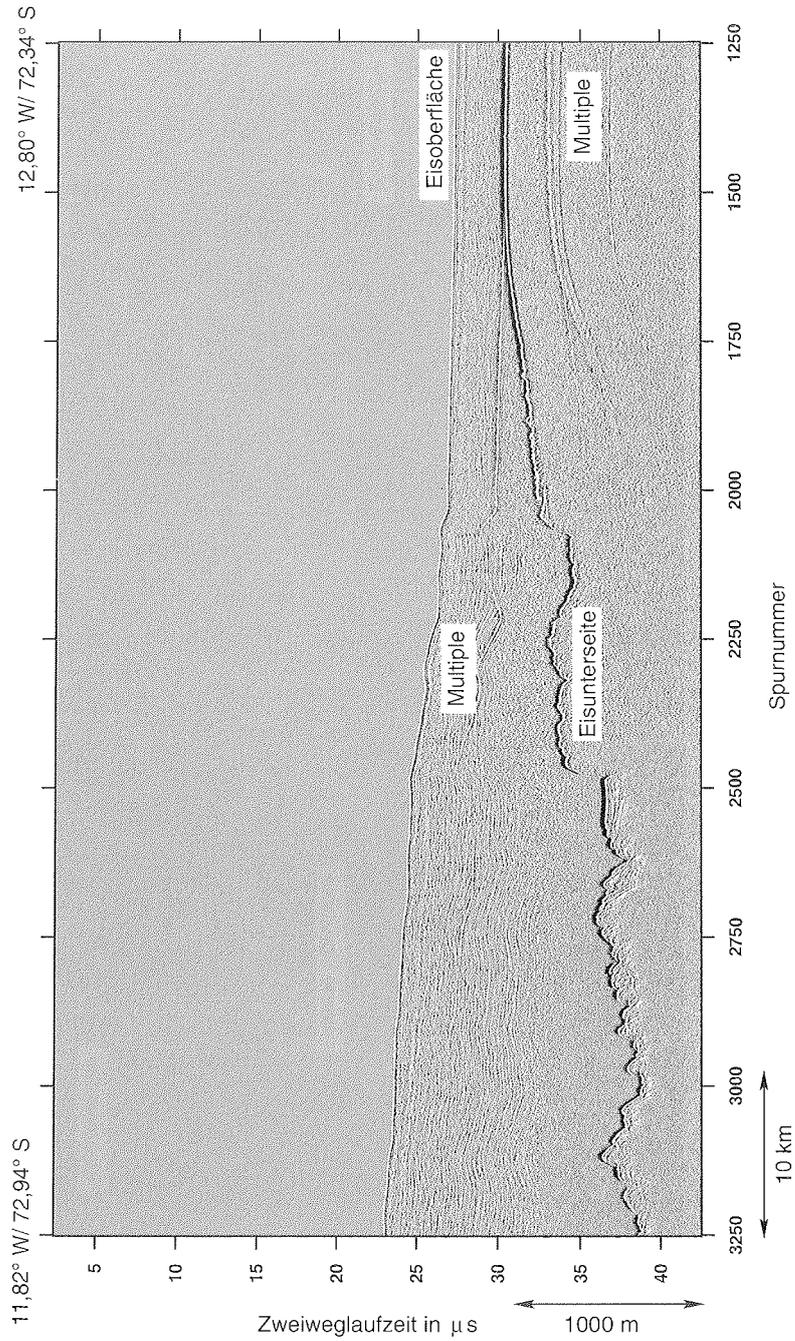


Abbildung A.2: (h) Profil Inlandeis-Schelfeis Abschnitt 8.

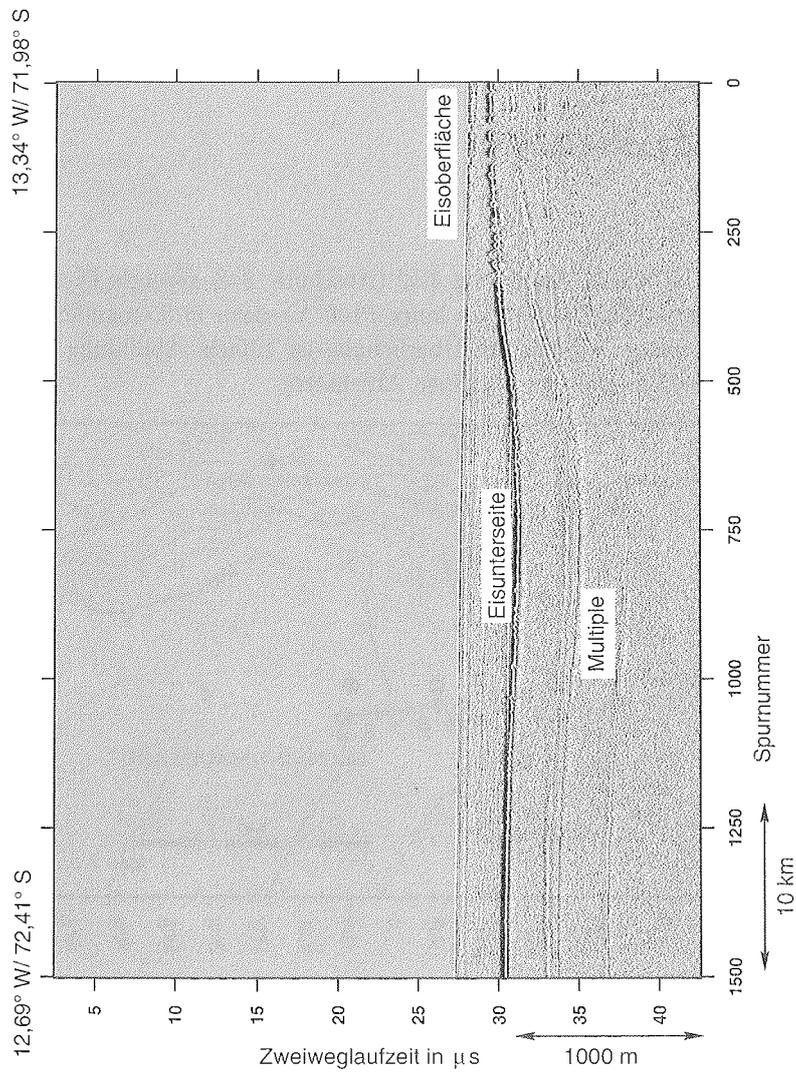


Abbildung A.2: (i) Profil Inlandeis-Schelfeis Abschnitt 9.

Anhang B

Profil Inlandeis

Im folgenden ist das in Abbildung 3.12 (Abschnitt 3.2) gezeigte Profil in höherer Auflösung dargestellt. Das 555 km lange Profil ist dazu in 9 einander überlappende Teilstücke zerlegt worden, die Überhöhung ist 13fach. Abbildung B.1 zeigt die Position der Sektion und der einzelnen Abschnitte.

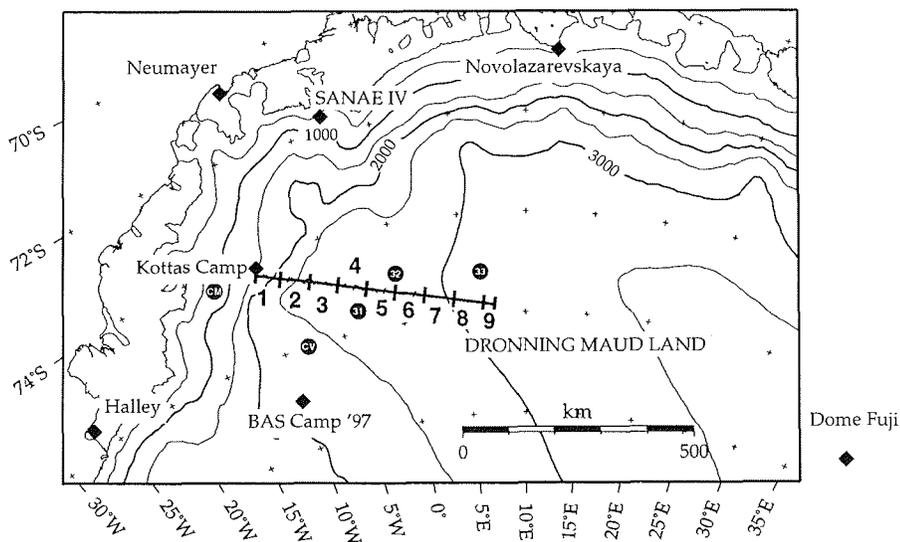


Abbildung B.1: Orientierungskarte zum Profil Inlandeis, die Nummern entsprechen den in Abbildung B.2 (a)-(i) dargestellten Sektionsabschnitten.

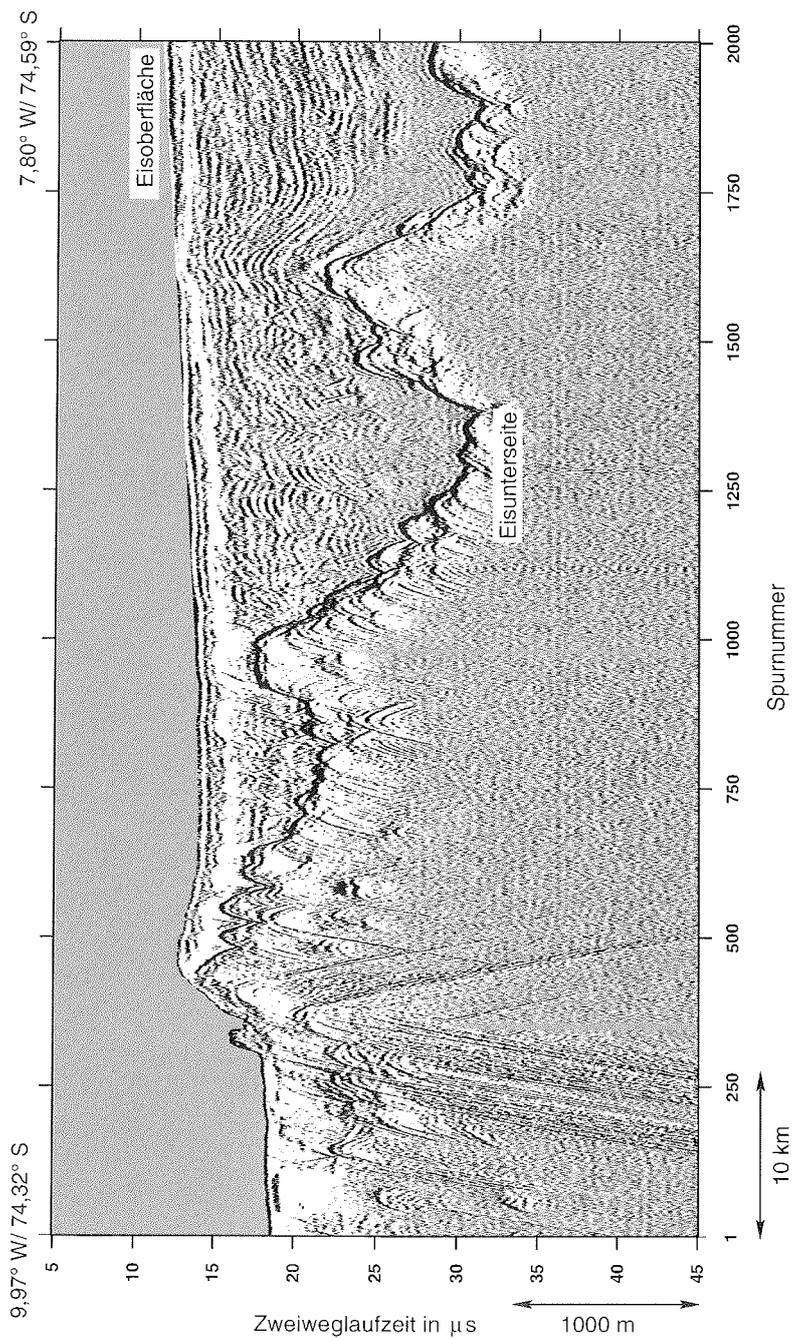


Abbildung B.2: (a) Profil Inlandeis Abschnitt 1

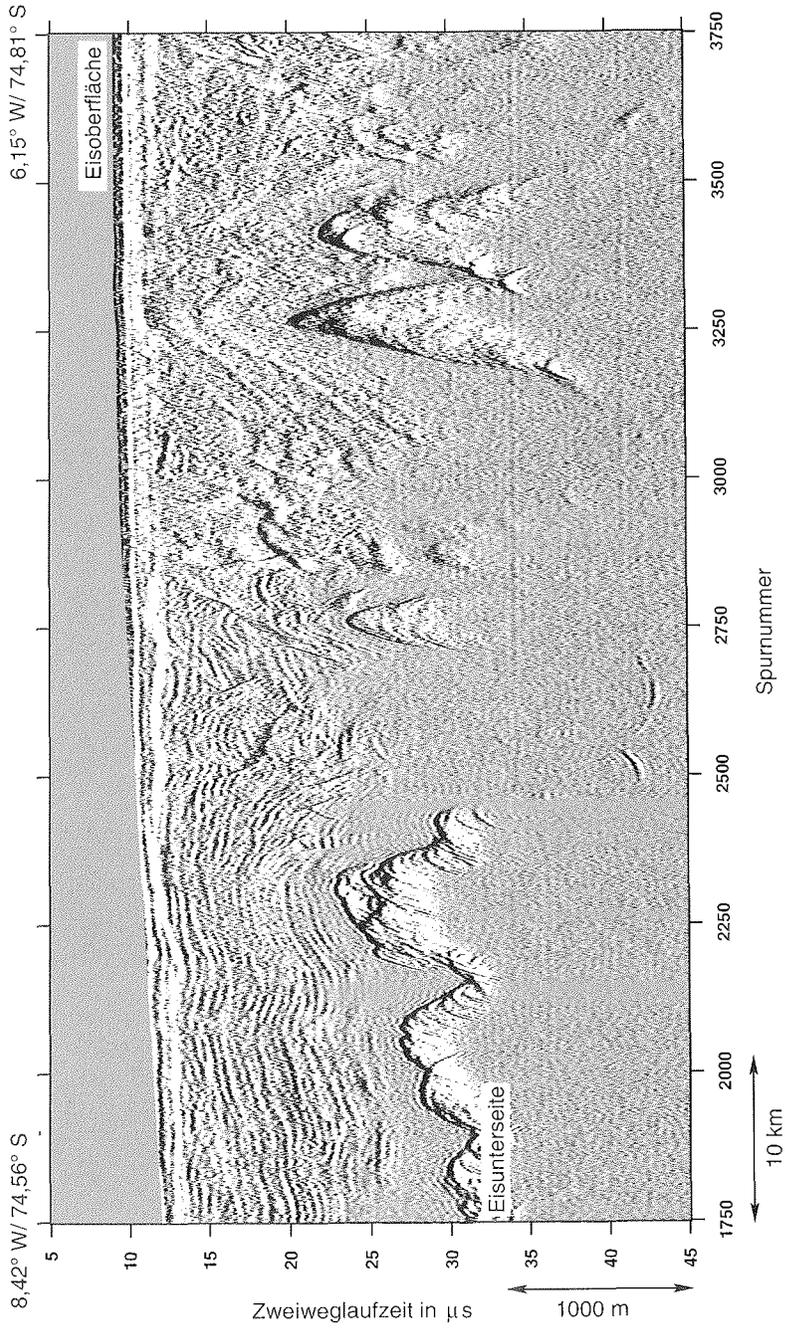


Abbildung B.2: (b) Profil Inlandeis Abschnitt 2

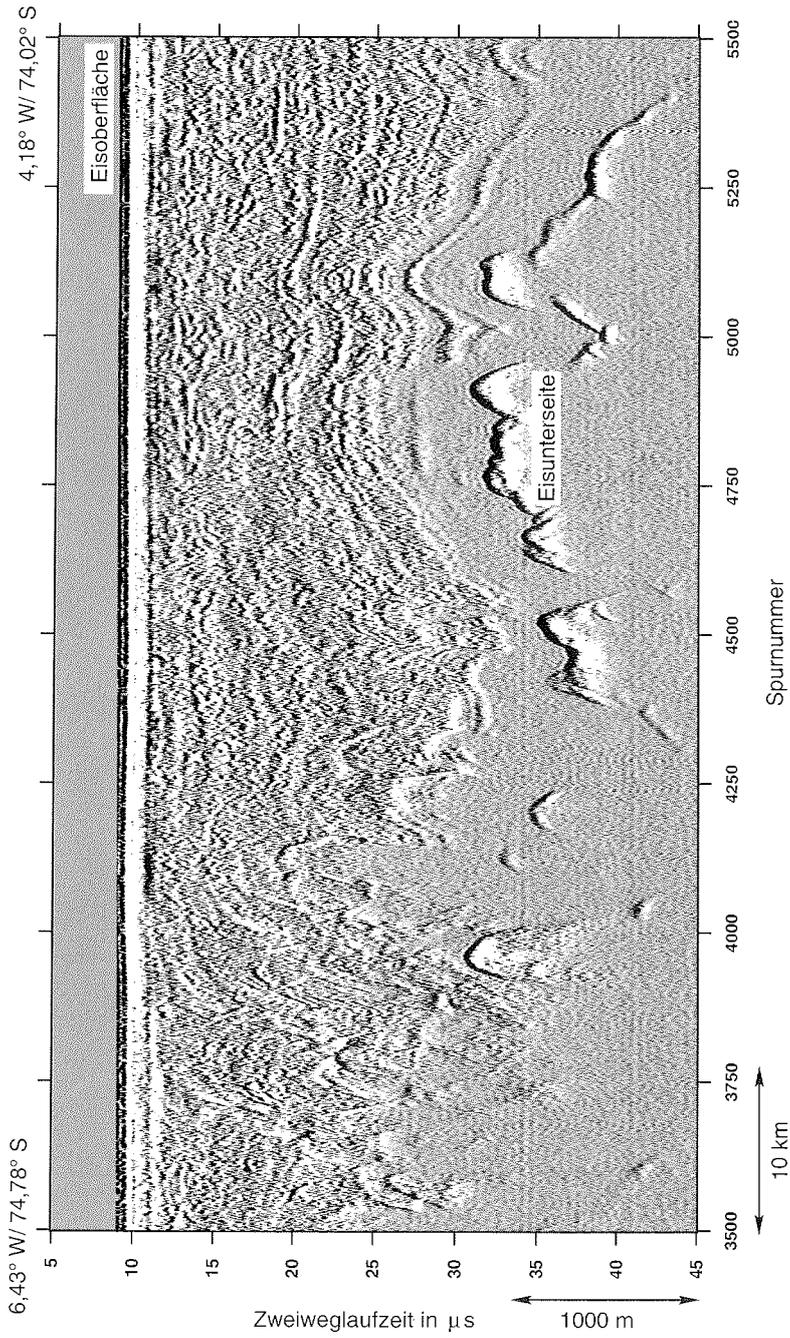


Abbildung B.2: (c) Profil Inlandeis Abschnitt 3

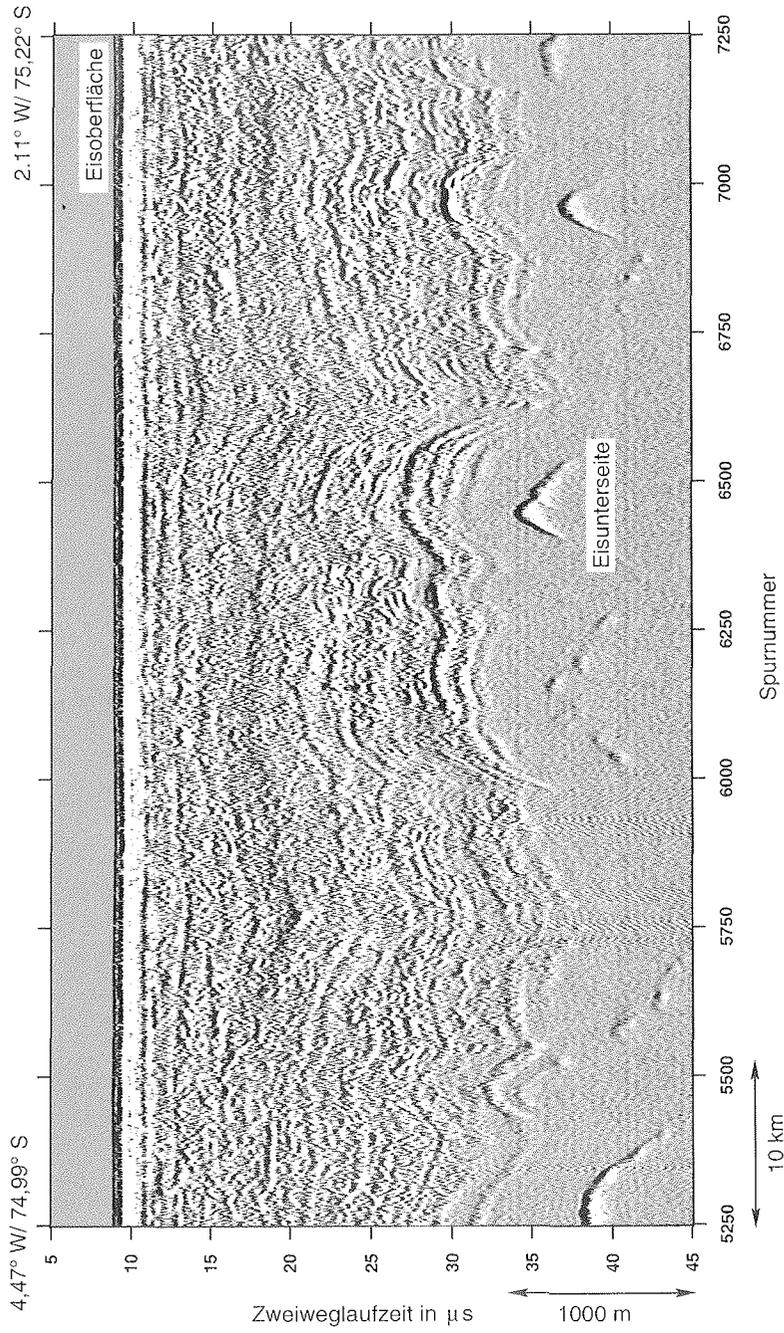


Abbildung B.2: (d) Profil Inlandeis Abschnitt 4

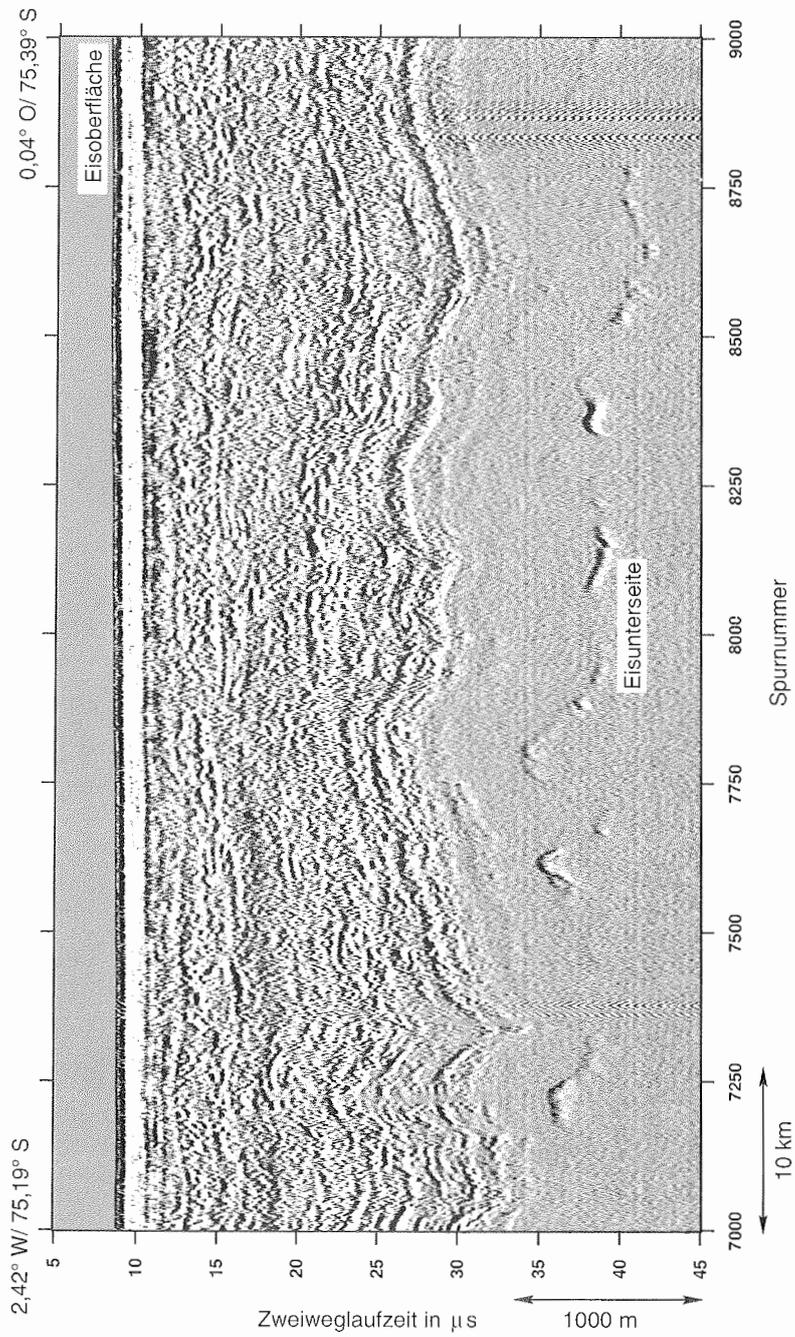


Abbildung B.2: (e) Profil Inlandeis Abschnitt 5

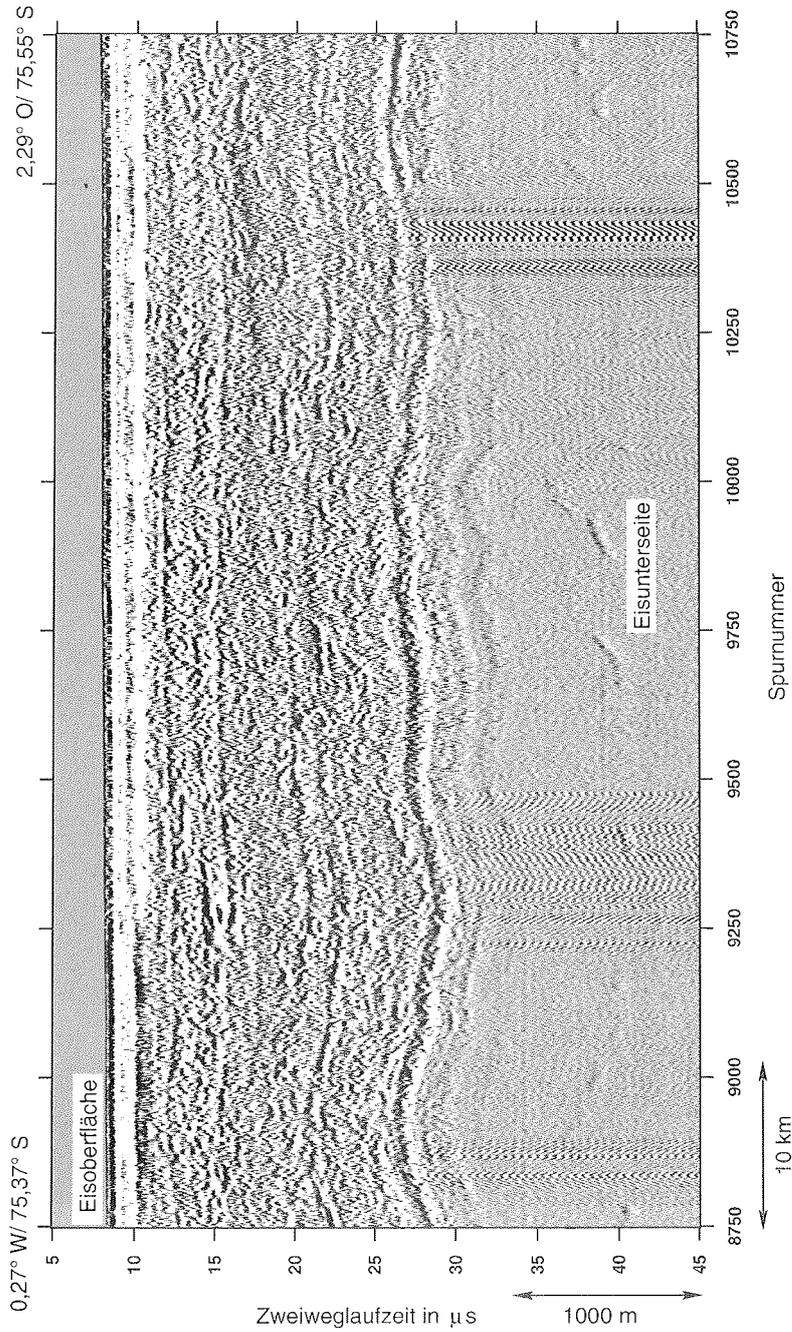


Abbildung B.2: (f) Profil Inlandeis Abschnitt 6

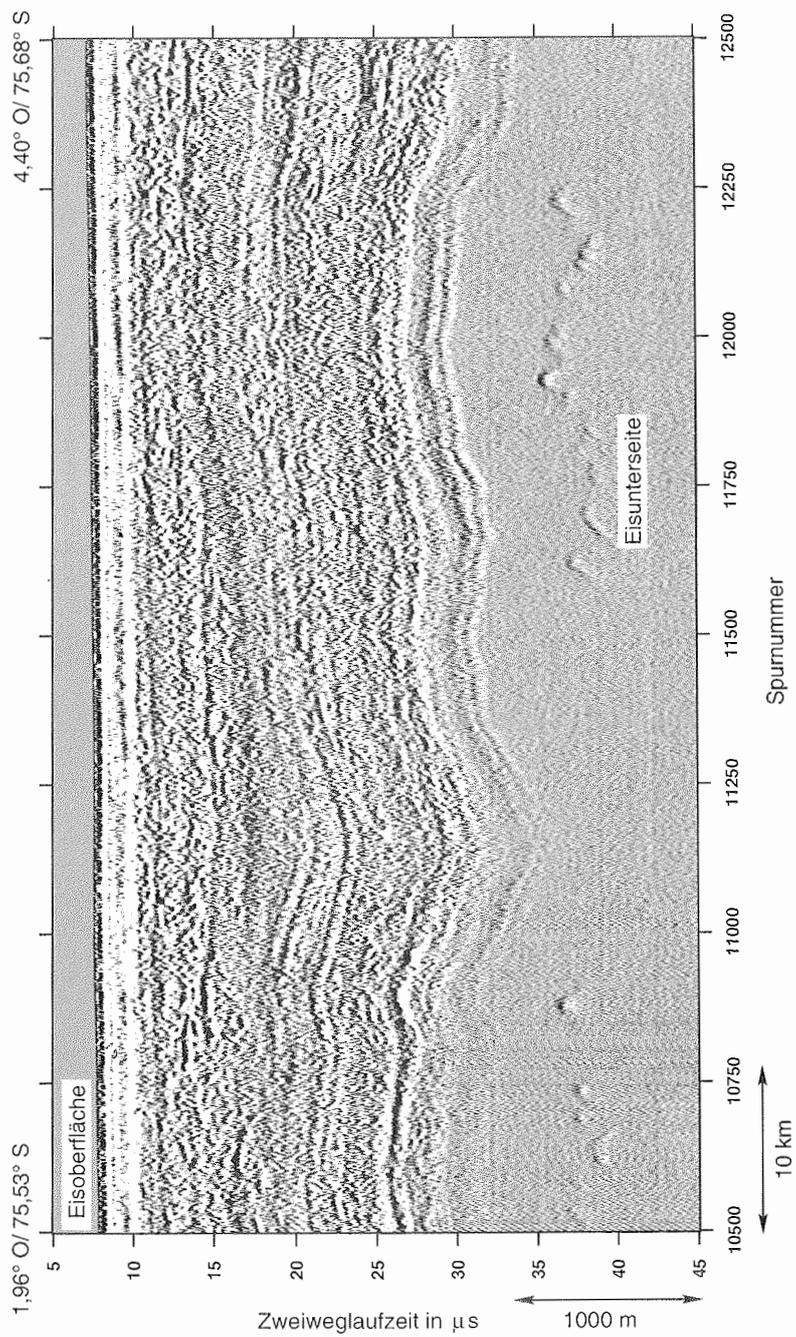


Abbildung B.2: (g) Profil Inlandeis Abschnitt 7

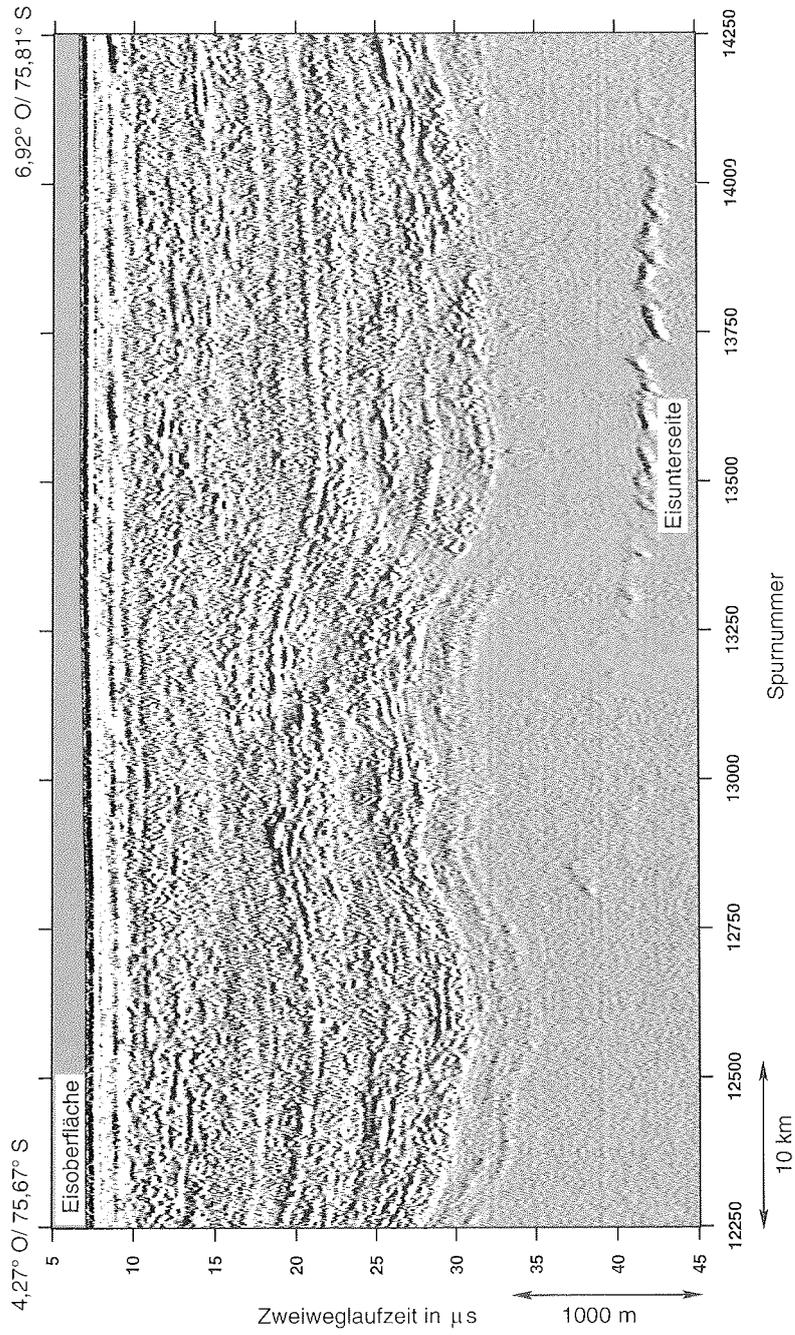


Abbildung B.2: (h) Profil Inlandeis Abschnitt 8

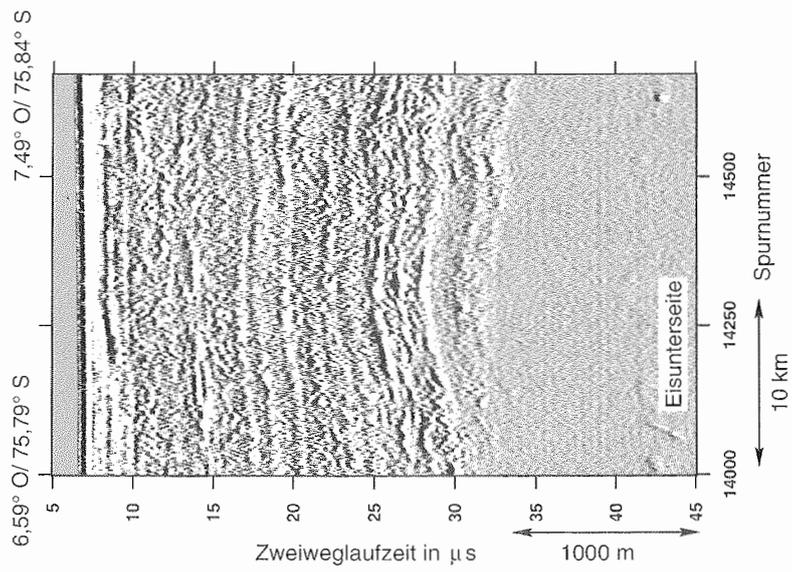


Abbildung B.2: (i) Profil Inlandeis Abschnitt 9

Folgende Hefte der Reihe „Berichte zur Polarforschung“ sind bisher erschienen:

- * **Sonderheft Nr. 1/1981** – „Die Antarktis und ihr Lebensraum“
Eine Einführung für Besucher – Herausgegeben im Auftrag von SCAR
- * **Heft Nr. 1/1982** – „Die Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81“ zusammengestellt von Heinz Kohnen
- * **Heft Nr. 2/1982** – „Deutsche Antarktis-Expedition 1980/81 mit FS ‚Meteor‘ First International BIOMASS Experiment (FIBEX) – Liste der Zooplankton- und Mikronektonnetzfüge zusammengestellt von Norbert Klages
- * **Heft Nr. 3/1982** – „Digitale und analoge Krill-Echolot-Rohdatenerfassung an Bord des Forschungsschiffes ‚Meteor‘“ (im Rahmen von FIBEX 1980/81, Fahrtabschnitt ANT III), von Bodo Morgenstern
- * **Heft Nr. 4/1982** – „Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81“ Liste der Planktonfänge und Lichtstärkemessungen zusammengestellt von Gerd Hubold und H. Eberhard Drescher
- * **Heft Nr. 5/1982** – „Joint Biological Expedition on RRS ‚John Biscoe‘, February 1982“ by G. Hempel and R. B. Heywood
- * **Heft Nr. 6/1982** – „Antarktis-Expedition 1981/82 (Unternehmen ‚Eiswarte‘)“ zusammengestellt von Gode Gravenhorst
- * **Heft Nr. 7/1982** – „Marin-Biologisches Begleitprogramm zur Standorterkundung 1979/80 mit MS ‚Polarsirkel‘ (Pre-Site Survey)“ – Stationslisten der Mikronekton- und Zooplanktonfänge sowie der Bodenfischerei zusammengestellt von R. Schneppenheim
- * **Heft Nr. 8/1983** – „The Post-Fibex Data Interpretation Workshop“ by D. L. Cram and J.-C. Freytag with the collaboration of J. W. Schmidt, M. Mall, R. Kresse, T. Schwinghammer
- * **Heft Nr. 9/1983** – „Distribution of some groups of zooplankton in the inner Weddell Sea in summer 1979/80“ by I. Hempel, G. Hubold, B. Kaczmaruk, R. Keller, R. Weigmann-Haass
- * **Heft Nr. 10/1983** – „Fluor im antarktischen Ökosystem“ – DFG-Symposium November 1982 zusammengestellt von Dieter Adelung
- * **Heft Nr. 11/1983** – „Joint Biological Expedition on RRS ‚John Biscoe‘, February 1982 (II)“
Data of micronekton and zooplankton hauls, by Uwe Piatkowski
- * **Heft Nr. 12/1983** – „Das biologische Programm der ANTARKTIS-I-Expedition 1983 mit FS ‚Polarstern‘“ Stationslisten der Plankton-, Benthos- und Grundschieppnetzfüge und Liste der Probenahme an Robben und Vögeln, von H. E. Drescher, G. Hubold, U. Piatkowski, J. Plötz und J. Voß
- * **Heft Nr. 13/1983** – „Die Antarktis-Expedition von MS ‚Polarbjörn‘ 1982/83“ (Sommerkampagne zur Atka-Bucht und zu den Kraul-Bergen), zusammengestellt von Heinz Kohnen
- * **Sonderheft Nr. 2/1983** – „Die erste Antarktis-Expedition von FS ‚Polarstern‘ (Kapstadt, 20. Januar 1983 – Rio de Janeiro, 25. März 1983)“, Bericht des Fahrtleiters Prof. Dr. Gotthilf Hempel
- * **Sonderheft Nr. 3/1983** – „Sicherheit und Überleben bei Polarexpeditionen“ zusammengestellt von Heinz Kohnen
- * **Heft Nr. 14/1983** – „Die erste Antarktis-Expedition (ANTARKTIS I) von FS ‚Polarstern‘ 1982/83“
herausgegeben von Gotthilf Hempel
- * **Sonderheft Nr. 4/1983** – „On the Biology of Krill *Euphausia superba*“ – Proceedings of the Seminar and Report of the Krill Ecology Group, Bremerhaven 12. - 16. May 1983, edited by S. B. Schnack
- * **Heft Nr. 15/1983** – „German Antarctic Expedition 1980/81 with FRV ‚Walther Herwig‘ and RV ‚Meteor‘“ – First International BIOMASS Experiment (FIBEX) – Data of micronekton and zooplankton hauls by Uwe Piatkowski and Norbert Klages
- * **Sonderheft Nr. 5/1984** – „The observatories of the Georg von Neumayer Station“, by Ernst Augstein
- * **Heft Nr. 16/1984** – „FIBEX cruise zooplankton data“ by U. Piatkowski, I. Hempel and S. Rakusa-Suszczewski
- * **Heft Nr. 17/1984** – „Fahrtbericht (cruise report) der ‚Polarstern‘-Reise ARKTIS I, 1983“
von E. Augstein, G. Hempel und J. Thiede
- * **Heft Nr. 18/1984** – „Die Expedition ANTARKTIS II mit FS ‚Polarstern‘ 1983/84“,
Bericht von den Fahrtabschnitten 1, 2 und 3, herausgegeben von D. Fütterer
- * **Heft Nr. 19/1984** – „Die Expedition ANTARKTIS II mit FS ‚Polarstern‘ 1983/84“,
Bericht vom Fahrtabschnitt 4, Punta Arenas-Kapstadt (Ant-II/4), herausgegeben von H. Kohnen
- * **Heft Nr. 20/1984** – „Die Expedition ARKTIS II des FS ‚Polarstern‘ 1984, mit Beiträgen des FS ‚Valdivia‘ und des Forschungsflugzeuges ‚Falcon 20‘ zum Marginal Ice Zone Experiment 1984 (MIZEX)“
von E. Augstein, G. Hempel, J. Schwarz, J. Thiede und W. Weigel
- * **Heft Nr. 21/1985** – „Euphausiid larvae in plankton from the vicinity of the Antarctic Peninsula, February 1982“ by Sigrid Marschall and Elke Mizdalski
- * **Heft Nr. 22/1985** – „Maps of the geographical distribution of macrozooplankton in the Atlantic sector of the Southern Ocean“ by Uwe Piatkowski
- * **Heft Nr. 23/1985** – „Untersuchungen zur Funktionsmorphologie und Nahrungsaufnahme der Larven des Antarktischen Krillis *Euphausia superba* Dana“ von Hans-Peter Marschall
- * **Heft Nr. 24/1985** – „Untersuchungen zum Periglazial auf der König-Georg-Insel Südshetlandinseln/Antarktika. Deutsche physiogeographische Forschungen in der Antarktis. – Bericht über die Kampagne 1983/84“
von Dietrich Barsch, Wolf-Dieter Blümel, Wolfgang Flügel, Roland Mäusbacher, Gerhard Stäblein, Wolfgang Zick
- * **Heft Nr. 25/1985** – „Die Expedition ANTARKTIS III mit FS ‚Polarstern‘ 1984/1985“ herausgegeben von Gotthilf Hempel.
- * **Heft Nr. 26/1985** – „The Southern Ocean“; A survey of oceanographic and marine meteorological research work by Hellmer et al.
- * **Heft Nr. 27/1986** – „Spätpleistozäne Sedimentationsprozesse am antarktischen Kontinentalhang vor Kapp Norvegia, östliche Weddell-See“ von Hannes Grobe

- Heft Nr. 28/1986 – „Die Expedition ARKTIS III mit ‚Polarstern‘ 1985“ mit Beiträgen der Fahrtteilnehmer“, herausgegeben von Rainer Gersonde
- * Heft Nr. 29/1986 – „5 Jahre Schwerpunktprogramm ‚Antarktisforschung‘ der Deutschen Forschungsgemeinschaft.“ Rückblick und Ausblick. Zusammengestellt von Gotthilf Hempel, Sprecher des Schwerpunktprogramms
- Heft Nr. 30/1986 – “The Meteorological Data of the Georg-von-Neumayer-Station for 1981 and 1982“ by Marianne Gube and Friedrich Obleitner
- * Heft Nr. 31/1986 – „Zur Biologie der Jugendstadien der Notothenioidei (Pisces) an der Antarktischen Halbinsel“ von A. Kellermann
- * Heft Nr. 32/1986 – „Die Expedition ANTARKTIS IV mit FS ‚Polarstern‘ 1985/86“ mit Beiträgen der Fahrtteilnehmer, herausgegeben von Dieter Fütterer
- Heft Nr. 33/1987 – „Die Expedition ANTARKTIS-IV mit FS ‚Polarstern‘ 1985/86 – Bericht zu den Fahrtabschnitten ANT-IV/3-4“ von Dieter Karl Fütterer
- Heft Nr. 34/1987 – „Zoogeographische Untersuchungen und Gemeinschaftsanalysen an antarktischen Makroplankton“ von U. Piatkowski
- Heft Nr. 35/1987 – „Zur Verbreitung des Meso- und Makrozooplanktons in Oberflächenwasser der Weddell See (Antarktis)“ von E. Boysen-Ennen
- Heft Nr. 36/1987 – „Zur Nahrungs- und Bewegungsphysiologie von *Salpa thompsoni* und *Salpa fusiformis*“ von M. Reinke
- Heft Nr. 37/1987 – “The Eastern Weddell Sea Drifting Buoy Data Set of the Winter Weddell Sea Project (WWSP)” 1986 by Heinrich Hoerber und Marianne Gube-Lehnhardt
- Heft Nr. 38/1987 – “The Meteorological Data of the Georg von Neumayer Station for 1983 and 1984“ by M. Gube-Lehnhardt
- Heft Nr. 39/1987 – „Die Winter-Expedition mit FS ‚Polarstern‘ in die Antarktis (ANT V/1-3)“ herausgegeben von Sigrid Schnack-Schiel
- Heft Nr. 40/1987 – “Weather and Synoptic Situation during Winter Weddell Sea Project 1986 (ANT V/2) July 16. - September 10. 1986“ by Werner Rabe
- Heft Nr. 41/1988 – „Zur Verbreitung und Ökologie der Seegurken im Weddellmeer (Antarktis)“ von Julian Gutt
- Heft Nr. 42/1988 – “The zooplankton community in the deep bathyal and abyssal zones of the eastern North Atlantic“ by Werner Beckmann
- * Heft Nr. 43/1988 – “Scientific cruise report of Arctic Expedition ARK IV/3“ Wissenschaftlicher Fahrtbericht der Arktis-Expedition ARK IV/3, compiled by Jörn Thiede
- * Heft Nr. 44/1988 – “Data Report for FV ‚Polarstern‘ Cruise ARK IV/1, 1987 to the Arctic and Polar Fronts“ by Hans-Jürgen Hirche
- Heft Nr. 45/1988 – „Zoogeographie und Gemeinschaftsanalyse des Makrozoobenthos des Weddellmeeres (Antarktis)“ von Joachim Voß
- Heft Nr. 46/1988 – “Meteorological and Oceanographic Data of the Winter-Weddell-Sea Project 1986 (ANT V/3)“ by Eberhard Fahrbach
- Heft Nr. 47/1988 – „Verteilung und Herkunft glazial-mariner Gerölle am Antarktischen Kontinentalrand des östlichen Weddellmeeres“ von Wolfgang Oskierski
- Heft Nr. 48/1988 – „Variationen des Erdmagnetfeldes an der GvN-Station“ von Arnold Brodscholl
- * Heft Nr. 49/1988 – „Zur Bedeutung der Lipide im antarktischen Zooplankton“ von Wilhelm Hagen
- * Heft Nr. 50/1988 – „Die gezeitenbedingte Dynamik des Ekström-Schelfeises, Antarktis“ von Wolfgang Kobarg
- Heft Nr. 51/1988 – „Ökomorphologie nototheniider Fische aus dem Weddellmeer, Antarktis“ von Werner Ekau
- Heft Nr. 52/1988 – „Zusammensetzung der Bodenfauna in der westlichen Fram-Straße“ von Dieter Piepenburg
- * Heft Nr. 53/1988 – „Untersuchungen zur Ökologie des Phytoplanktons im südöstlichen Weddellmeer (Antarktis) im Jan./Febr. 1985“ von Eva-Maria Nöthig
- Heft Nr. 54/1988 – „Die Fischfauna des östlichen und südlichen Weddellmeeres: geographische Verbreitung, Nahrung und tropische Stellung der Fischarten“ von Wiebke Schwarzbach
- Heft Nr. 55/1988 – “Weight and length data of zooplankton in the Weddell Sea in austral spring 1986 (Ant. V/3)“ by Elke Mizdalski
- Heft Nr. 56/1989 – “Scientific cruise report of Arctic expeditions ARK IV/1, 2 & 3“ by G. Krause, J. Meinke und J. Thiede
- Heft Nr. 57/1989 – „Die Expedition ANTARKTIS V mit FS ‚Polarstern‘ 1986/87“ Bericht von den Fahrtabschnitten ANT V/4-5 von H. Miller und H. Oerter
- * Heft Nr. 58/1989 – „Die Expedition ANTARKTIS VI mit FS ‚Polarstern‘ 1987/88“ von D. K. Fütterer
- Heft Nr. 59/1989 – „Die Expedition ARKTIS V/1a, 1b und 2 mit FS ‚Polarstern‘ 1988“ von M. Spindler
- Heft Nr. 60/1989 – „Ein zweidimensionales Modell zur thermohalinen Zirkulation unter dem Schelfeis“ von H. H. Hellmer
- Heft Nr. 61/1989 – „Die Vulkanite im westlichen und mittleren Neuschwabenland, Vestfjella und Ahimannryggen, Antarktika“ von M. Peters
- * Heft Nr. 62/1989 – “The Expedition ANTARKTIS VII/1 and 2 (EPOS I) of RV ‚Polarstern‘ in 1988/89“, by I. Hempel
- Heft Nr. 63/1989 – „Die Eisalgenflora des Weddellmeeres (Antarktis): Artenzusammensetzung und Biomasse sowie Ökophysiologie ausgewählter Arten“ von Annette Bartsch
- Heft Nr. 64/1989 – “Meteorological Data of the G.-v.-Neumayer-Station (Antarctica)“ by L. Helmes
- Heft Nr. 65/1989 – “Expedition Antarktis VII/3 in 1988/89“ by I. Hempel, P. H. Schalk, V. Smetacek
- Heft Nr. 66/1989 – „Geomorphologisch-glaziologische Detailkartierung des arid-hochpolaren Borgmassivet, Neuschwabenland, Antarktika“ von Karsten Brunk

- Heft Nr. 67/1990** – "Identification key and catalogue of larval Antarctic fishes", edited by Adolf Kellermann
- Heft Nr. 68/1990** – "The Expedition Antarktis VII/4 (Epos leg 3) and VII/5 of RV 'Polarstern' in 1989", edited by W. Arntz, W. Ernst, I. Hempel
- Heft Nr. 69/1990** – „Abhängigkeiten elastischer und rheologischer Eigenschaften des Meereises vom Eisgefüge“, von Harald Hellmann
- * **Heft Nr. 70/1990** – „Die beschalteten benthischen Mollusken (Gastropoda und Bivalvia) des Weddellmeeres, Antarktis“, von Stefan Hain
- Heft Nr. 71/1990** – „Sedimentologie und Paläomagnetik an Sedimenten der Maudkuppe (Nordöstliches Weddellmeer)“, von Dieter Cordes
- Heft Nr. 72/1990** – "Distribution and abundance of planktonic copepods (Crustacea) in the Weddell Sea in summer 1980/81", by F. Kurbjewit and S. Ali-Khan
- Heft Nr. 73/1990** – „Zur Frühdiagenese von organischem Kohlenstoff und Opal in Sedimenten des südlichen und östlichen Weddellmeeres“, von M. Schlüter
- Heft Nr. 74/1990** – „Expeditionen ANTARKTIS-VIII/3 und VIII/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1989“ von Rainer Gersonde und Gotthilf Hempel
- Heft Nr. 75/1991** – „Quartäre Sedimentationsprozesse am Kontinentalhang des Süd-Orkey-Plateaus im nordwestlichen Weddellmeer (Antarktis)“, von Sigrun Grünig
- Heft Nr. 76/1991** – „Ergebnisse der faunistischen Arbeiten im Benthal von King George Island (Südschottlandinseln, Antarktis)“, von Martin Rauschert
- Heft Nr. 77/1990** – „Verteilung von Mikroplankton-Organismen nordwestlich der Antarktischen Halbinsel unter dem Einfluß sich ändernder Umweltbedingungen im Herbst“, von Heinz Klöser
- Heft Nr. 78/1991** – „Hochauflösende Magnetostratigraphie spätquartärer Sedimente arktischer Meeresgebiete“, von Norbert R. Nowaczyk
- Heft Nr. 79/1991** – „Ökophysiologische Untersuchungen zur Salinitäts- und Temperaturtoleranz antarktischer Grünalgen unter besonderer Berücksichtigung des β -Dimethylsulfoniumpropionat (DMSP) - Stoffwechsels“, von Ulf Karsten
- Heft Nr. 80/1991** – „Die Expedition ARKTIS VII/1 mit FS ‚Polarstern‘ 1990“, herausgegeben von Jörn Thiede und Gotthilf Hempel
- Heft Nr. 81/1991** – „Paläoglazologie und Paläozeanographie im Spätquartär am Kontinentalrand des südlichen Weddellmeeres, Antarktis“, von Martin Melles
- Heft Nr. 82/1991** – „Quantifizierung von Meereseigenschaften: Automatische Bildanalyse von Dünnschnitten und Parametrisierung von Chlorophyll- und Salzgehaltsverteilungen“, von Hajo Eicken
- Heft Nr. 83/1991** – „Das Fließen von Schelfeisen - numerische Simulationen mit der Methode der finiten Differenzen“, von Jürgen Determann
- Heft Nr. 84/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII/1-2, 1989 mit der Winter Weddell Gyre Study der Forschungsschiffe ‚Polarstern‘ und ‚Akademik Fedorov‘“, von Ernst Augstein, Nikolai Bagriantsev und Hans Werner Schenke
- Heft Nr. 85/1991** – „Zur Entstehung von Unterwassereis und das Wachstum und die Energiebilanz des Meereseises in der Atka Bucht, Antarktis“, von Josef Kipfstuhl
- * **Heft Nr. 86/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS ‚Polarstern‘ 1989/90. Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-VIII/5“, von Heinz Müller und Hans Oerter
- Heft Nr. 87/1991** – "Scientific cruise reports of Arctic expeditions ARK VI/1-4 of RV 'Polarstern' in 1989", edited by G. Krause, J. Meincke & H. J. Schwarz
- Heft Nr. 88/1991** – „Zur Lebensgeschichte dominanter Copepodenarten (*Calanus finmarchicus*, *C. glacialis*, *C. hyperboreus*, *Metridia longa*) in der Framstraße“, von Sabine Diel
- Heft Nr. 89/1991** – „Detaillierte seismische Untersuchungen am östlichen Kontinentalrand des Weddell-Meeres vor Kapp Norvegia, Antarktis“, von Norbert E. Kaul
- Heft Nr. 90/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS ‚Polarstern‘ 1989/90. Bericht von den Fahrtabschnitten ANT-VIII/6-7“, herausgegeben von Dieter Karl Fütterer und Otto Schrems
- Heft Nr. 91/1991** – "Blood physiology and ecological consequences in Weddell Sea fishes (Antarctica)", by Andreas Kunzmann
- Heft Nr. 92/1991** – „Zur sommerlichen Verteilung des Mesozooplanktons im Nansen-Becken, Nordpolarmeer“, von Nicolai Mumm
- Heft Nr. 93/1991** – „Die Expedition ARKTIS VII mit FS ‚Polarstern‘, 1990. Bericht vom Fahrtabschnitt ARK VII/2“, herausgegeben von Günther Krause
- Heft Nr. 94/1991** – „Die Entwicklung des Phytoplanktons im östlichen Weddellmeer (Antarktis) beim Übergang vom Spätwinter zum Frühjahr“, von Renate Scharek
- Heft Nr. 95/1991** – „Radioisotopenstratigraphie, Sedimentologie und Geochemie jungquartärer Sedimente des östlichen Arktischen Ozeans“, von Horst Bohrmann
- Heft Nr. 96/1991** – „Holozäne Sedimentationsentwicklung im Scoresby Sund, Ost-Grönland“, von Peter Marienfeld
- Heft Nr. 97/1991** – „Strukturelle Entwicklung und Abkühlungsgeschichte von Heimfrontfjella (Westliches Dronning Maud Land/Antarktika)“, von Joachim Jacobs
- Heft Nr. 98/1991** – „Zur Besiedlungsgeschichte des antarktischen Schelfes am Beispiel der Isopoda (Crustacea, Malacostraca)“, von Angelika Brandt
- * **Heft Nr. 99/1992** – "The Antarctic ice sheet and environmental change: a three-dimensional modelling study", by Philippe Huybrechts
- * **Heft Nr. 100/1992** – „Die Expeditionen ANTARKTIS IX/1-4 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1990/91“, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Meinhard Schulz-Baldes, Eberhard Fahrbach, Victor Smetacek und Hans-Wolfgang Hubberten

- Heft Nr. 101/1992** – „Wechselbeziehungen zwischen Schwermetallkonzentrationen (Cd, Cu, Pb, Zn) im Meerwasser und in Zooplanktonorganismen (Copepoda) der Arktis und des Atlantiks“, von Christa Pohl
- Heft Nr. 102/1992** – „Physiologie und Ultrastruktur der antarktischen Grünalge *Prasiola crispa* ssp. *antarctica* unter osmotischem Streß und Austrocknung“, von Andreas Jacob
- * **Heft Nr. 103/1992** – „Zur Ökologie der Fische im Weddellmeer“ von Gerd Hubold
- Heft Nr. 104/1992** – „Mehrkanaelige adaptive Filter für die Unterdrückung von multiplen Reflexionen in Verbindung mit der freien Oberfläche in marinen Seismogrammen“, von Andreas Rosenberger
- Heft Nr. 105/1992** – „Radiation and Eddy Flux Experiment 1991 (*REFLEX I*)“, von Jörg Hartmann, Christoph Kottmeier und Christian Wamser
- Heft Nr. 106/1992** – „Ostracoden im Epipelagial vor der Antarktischen Halbinsel – ein Beitrag zur Systematik sowie zur Verbreitung und Populationsstruktur unter Berücksichtigung der Saisonalität“, von Rüdiger Kock
- * **Heft Nr. 107/1992** – „ARCTIC '91: Die Expedition ARK-VIII/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1991“, von Dieter K. Fütterer
- Heft Nr. 108/1992** – „Dehnungsbeben an einer Störungszone im Ekström-Schelfeis nördlich der Georg-von-Neumayer-Station, Antarktis. – Eine Untersuchung mit seismologischen und geodätischen Methoden“, von Uwe Nixdorf
- * **Heft Nr. 109/1992** – „Spätquartäre Sedimentation am Kontinentalrand des südöstlichen Weddellmeeres, Antarktis“, von Michael Weber
- * **Heft Nr. 110/1992** – „Sedimentfazies und Bodenwasserstrom am Kontinentalhang des nordwestlichen Weddellmeeres“, von Isa Brehme
- Heft Nr. 111/1992** – „Die Lebensbedingungen in den Solekanälchen des antarktischen Meereises“, von Jürgen Weissenberger
- Heft Nr. 112/1992** – „Zur Taxonomie von rezenten benthischen Foraminiferen aus dem Nansen Becken, Arktischer Ozean“, von Jutta Wollenburg
- Heft Nr. 113/1992** – „Die Expedition ARKTIS VIII/1 mit FS ‚Polarstern‘ 1991“ herausgegeben von Gerhard Kattner
- * **Heft Nr. 114/1992** – „Die Gründungsphase deutscher Polarforschung, 1865 - 1875“, von Reinhard A. Krause
- Heft Nr. 115/1992** – „Scientific Cruise Report of the 1991 Arctic Expedition ARK VIII/2 of RV ‚Polarstern‘ (EPOS II)“, by Eike Rachor
- Heft Nr. 116/1992** – „The Meteorological Data of the Georg-von-Neumayer-Station (Antarctica) for 1988, 1989, 1990 and 1991“, by Gert König-Langlo
- Heft Nr. 117/1992** – „Petrogenese des metamorphen Grundgebirges der zentralen Heimefrontfjella (westliches Dronning Maud Land / Antarktis)“, von Peter Schulze
- Heft Nr. 118/1993** – „Die mafischen Gänge der Shackleton Range / Antarktika: Petrographie, Geochemie, Isotopengeochemie und Paläomagnetik“, von Rüdiger Hotten
- * **Heft Nr. 119/1993** – „Gefrierschutz bei Fischen der Polarmeere“, von Andreas P. A. Wöhrmann
- * **Heft Nr. 120/1993** – „East Siberian Arctic Region Expedition '92: The Laptev Sea – its Significance for Arctic Sea-Ice Formation and Transpolar Sediment Flux“, by D. Dethleff, D. Nürnberg, E. Reimnitz, M. Saarlo and Y. P. Sacchenko – „Expedition to Novaja Zemlja and Franz Josef Land with RV ‚Dainie Zelentsy‘“, by D. Nürnberg and E. Groth
- * **Heft Nr. 121/1993** – „Die Expedition ANTARKTIS X/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Michael Spindler, Gerhard Dieckmann und David Thomas
- Heft Nr. 122/1993** – „Die Beschreibung der Korngestalt mit Hilfe der Fourier-Analyse: Parametrisierung der morphologischen Eigenschaften von Sedimentpartikeln“, von Michael Diepenbroek
- * **Heft Nr. 123/1993** – „Zerstörungsfreie hochauflösende Dichteuntersuchungen mariner Sedimente“, von Sebastian Gerland
- Heft Nr. 124/1993** – „Umsatz und Verteilung von Lipiden in arktischen marinen Organismen unter besonderer Berücksichtigung unterer trophischer Stufen“, von Martin Graeve
- Heft Nr. 125/1993** – „Ökologie und Respiration ausgewählter arktischer Bodenfischarten“, von Christian F. von Dorrien
- Heft Nr. 126/1993** – „Quantitative Bestimmung von Paläoumweltparametern des Antarktischen Oberflächenwassers im Spätquartier anhand von Transferfunktionen mit Diatomeen“, von Ulrich Zielinski
- * **Heft Nr. 127/1993** – „Sedimenttransport durch das arktische Meereis: Die rezente lithogene und biogene Materialfracht“, von Ingo Wollenburg
- Heft Nr. 128/1993** – „Cruise ANTARKTIS X/3 of RV ‚Polarstern‘: CTD-Report“, von Marek Zwierz
- Heft Nr. 129/1993** – „Reproduktion und Lebenszyklen dominanter Copepodenarten aus dem Weddellmeer, Antarktis“, von Frank Kurbjeweit
- Heft Nr. 130/1993** – „Untersuchungen zu Temperaturregime und Massenhaushalt des Filchner-Ronne-Schelfeises, Antarktis, unter besonderer Berücksichtigung von Anfr- und Abschmelzprozessen“, von Klaus Grosfeld
- Heft Nr. 131/1993** – „Die Expedition ANTARKTIS X/5 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Rainer Gersonde
- Heft Nr. 132/1993** – „Bildung und Abgabe kurzketziger halogenierter Kohlenwasserstoffe durch Makroalgen der Polarregionen“, von Frank Laturmus
- Heft Nr. 133/1994** – „Radiation and Eddy Flux Experiment 1993 (*REFLEX II*)“, by Christoph Kottmeier, Jörg Hartmann, Christian Wamser, Axel Bochart, Christof Lüpkes, Dietmar Freese und Wolfgang Cohrs
- * **Heft Nr. 134/1994** – „The Expedition ARKTIS-IX/1“, edited by Hajo Eicken und Jens Meincke
- Heft Nr. 135/1994** – „Die Expedition ANTARKTIS X/6-8“, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Victor Smetacek, Hein de Baar, Eberhard Fahrbach und Gunter Krause
- Heft Nr. 136/1994** – „Untersuchungen zur Ernährungsökologie von Kaiserpinguinen (*Aptenodytes forsteri*) und Königspinguinen (*Aptenodytes patagonicus*)“, von Klemens Pütz
- * **Heft Nr. 137/1994** – „Die kanozoische Vereisungsgeschichte der Antarktis“, von Werner U. Ehrmann

- Heft Nr. 138/1994** – „Untersuchungen stratosphärischer Aerosole vulkanischen Ursprungs und polarer stratosphärischer Wolken mit einem Mehrwellenlängen-Lidar auf Spitzbergen (79° N, 12° E)“, von Georg Beyerle
- Heft Nr. 139/1994** – „Charakterisierung der Isopodenfauna (Crustacea, Malacostraca) des Scotia-Bogens aus biogeographischer Sicht: Ein multivariater Ansatz“, von Holger Winkler
- Heft Nr. 140/1994** – „Die Expedition ANTARKTIS X/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Peter Lemke
- Heft Nr. 141/1994** – „Satellitenaltimetrie über Eis – Anwendung des GEOSAT-Altimeters über dem Ekströmmisen, Antarktis“, von Clemens Heidland
- Heft Nr. 142/1994** – „The 1993 Northeast Water Expedition. Scientific cruise report of RV ‚Polarstern‘ Arctic cruises ARK IX/2 and 3, USCG ‚Polar Bear‘ cruise NEWP and the NEWLand expedition“, edited by Hans-Jürgen Hirche and Gerhard Kattner
- Heft Nr. 143/1994** – „Detaillierte refraktionsseismische Untersuchungen im inneren Scoresby Sund Ost-Grönland“, von Notker Fechner
- Heft Nr. 144/1994** – „Russian-German Cooperation in the Siberian Shelf Sea: Geo-System Laptev Sea“, edited by Heidemarie Kassens, Hans-Wolfgang Hubberten, Sergey M. Pryamikov and Rüdiger Stein
- * **Heft Nr. 145/1994** – „The 1993 Northeast Water Expedition. Data Report of RV ‚Polarstern‘ Arctic Cruises IX/2 and 3“, edited by Gerhard Kattner and Hans-Jürgen Hirche.
- Heft Nr. 146/1994** – „Radiation Measurements at the German Antarctic Station Neumayer 1982 - 1992“, by Torsten Schmidt and Gerd König-Langlo
- Heft Nr. 147/1994** – „Krustenstrukturen und Verlauf des Kontinentalrandes im Weddell-Meer / Antarktis“, von Christian Hübscher
- * **Heft Nr. 148/1994** – „The expeditions NORILSK/TAYMYR 1993 and BUNGER OASIS 1993/94 of the AWI Research Unit Potsdam“, edited by Martin Melles
- ** **Heft Nr. 149/1994** – „Die Expedition ARCTIC '93. Der Fahrtabschnitt ARK-IX/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1993“, herausgegeben von Dieter K. Fütterer
- Heft Nr. 150/1994** – „Der Energiebedarf der Pygoscelis-Pinguine: eine Synopse“, von Boris M. Culik
- Heft Nr. 151/1994** – „Russian-German Cooperation: The Transdrift I Expedition to the Laptev Sea“, edited by Heidemarie Kassens and Valeriy Y. Karpiy
- Heft Nr. 152/1994** – „Die Expedition ANTARKTIS-X mit FS ‚Polarstern‘ 1992. Bericht von den Fahrtabschnitten / ANT-X / 1a und 2“, herausgegeben von Heinz Miller
- Heft Nr. 153/1994** – „Aminosäuren und Huminstoffe im Stickstoffkreislauf polarer Meere“, von Ulrike Hubberten
- Heft Nr. 154/1994** – „Regional and seasonal variability in the vertical distribution of mesozooplankton in the Greenland Sea“, by Claudio Richter
- Heft Nr. 155/1995** – „Benthos in polaren Gewässern“, herausgegeben von Christian Wiencke und Wolf Arntz
- Heft Nr. 156/1995** – „An adjoint model for the determination of the mean oceanic circulation, air-sea fluxes and mixing coefficients“, by Reiner Schlitzer
- Heft Nr. 157/1995** – „Biochemische Untersuchungen zum Lipidstoffwechsel antarktischer Copepoden“, von Kirsten Fahl
- ** **Heft Nr. 158/1995** – „Die Deutsche Polarforschung seit der Jahrhundertwende und der Einfluß Erich von Drygalskis“, von Cornelia Lüdecke
- * **Heft Nr. 159/1995** – „The distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in the Arctic Ocean: Implications for the freshwater balance of the halocline and the sources of deep and bottom waters“, by Dorothea Bauch
- * **Heft Nr. 160/1995** – „Rekonstruktion der spätquartären Tiefenwasserzirkulation und Produktivität im östlichen Südatlantik anhand von benthischen Foraminiferenvergesellschaftungen“, von Gerhard Schmiedl
- Heft Nr. 161/1995** – „Der Einfluß von Salinität und Lichtintensität auf die Osmolytkonzentrationen, die Zellvolumina und die Wachstumsraten der antarktischen Eisdiatomeen *Chaetoceros sp.* und *Navicula sp.* unter besonderer Berücksichtigung der Aminosäuren Prolin“, von Jürgen Nothnagel
- Heft Nr. 162/1995** – „Meereistransportiertes lithogenes Feinmaterial in spätquartären Tiefseesedimenten des zentralen östlichen Arktischen Ozeans und der Framstraße“, von Thomas Letzig
- Heft Nr. 163/1995** – „Die Expedition ANTARKTIS-XI/2 mit FS ‚Polarstern‘ 1993/94“, herausgegeben von Rainer Gersonde
- Heft Nr. 164/1995** – „Regionale und altersabhängige Variation gesteinsmagnetischer Parameter in marinen Sedimenten der Arktis“, von Thomas Frederichs
- Heft Nr. 165/1995** – „Vorkommen, Verteilung und Umsatz biogener organischer Spurenstoffe: Sterole in antarktischen Gewässern“, von Georg Hanke
- Heft Nr. 166/1995** – „Vergleichende Untersuchungen eines optimierten dynamisch-thermodynamischen Meereismodells mit Beobachtungen im Weddellmeer“, von Holger Fischer
- * **Heft Nr. 167/1995** – „Rekonstruktionen von Paläo-Umweltparametern anhand von stabilen Isotopen und Faunen-Vergesellschaftungen planktischer Foraminiferen im Südatlantik“, von Hans-Stefan Niebler
- Heft Nr. 168/1995** – „Die Expedition ANTARKTIS XII mit FS ‚Polarstern‘ 1993/94. Bericht von den Fahrtabschnitten ANT XII/1 und 2“, herausgegeben von Gerhard Kattner und Dieter Karl Fütterer
- Heft Nr. 169/1995** – „Medizinische Untersuchung zur Circadianrhythmik und zum Verhalten bei Überwinterern auf einer antarktischen Forschungsstation“, von Hans Wortmann
- Heft Nr. 170/1995** – DFG-Kolloquium: Terrestrische Geowissenschaften – Geologie und Geophysik der Antarktis
- Heft Nr. 171/1995** – „Strukturentwicklung und Petrogenese des metamorphen Grundgebirges der nördlichen Heimfrontjella (westliches Dronning Maud Land/Antarktika)“, von Wilfried Bauer
- Heft Nr. 172/1995** – „Die Struktur der Erdkruste im Bereich des Scoresby Sund, Ostgrönland: Ergebnisse refraktionsseismischer und gravimetrischer Untersuchungen“, von Holger Mandler

- Heft Nr. 173/1995** – „Paläozoische Akkretion am paläopazifischen Kontinentalrand der Antarktis in Nordvictorialand – P-T-G-Geschichte und Deformationsmechanismen im Bowers Terrane“, von Stefan Matzer
- Heft Nr. 174/1995** – „The Expedition ARKTIS-X/2 of RV 'Polarstern' in 1994“, edited by Hans-W. Hubberten
- Heft Nr. 175/1995** – „Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR 1994“, edited by Christine Siegert and Gmityr Bolshiyarov
- Heft Nr. 176/1995** – „Russian-German Cooperation: Laptev Sea System“, edited by Heidemarie Kassens, Dieter Piepenburg, Jörn Thiede, Leonid Timokhov, Hans-Wolfgang Hubberten and Sergey M. Priamikov
- Heft Nr. 177/1995** – „Organischer Kohlenstoff in spätquartären Sedimenten des Arktischen Ozeans: Terrigener Eintrag und marine Produktivität“, von Carsten J. Schubert
- Heft Nr. 178/1995** – „Cruise ANTARKTIS XII/4 of RV 'Polarstern' in 1995: CTD-Report“, by Jüri Sildam
- Heft Nr. 179/1995** – „Benthische Foraminiferenfaunen als Wassermassen-, Produktions- und Eisdriftanzeiger im Arktischen Ozean“, von Jutta Wollenburg
- Heft Nr. 180/1995** – „Biogenopal und biogenes Barium als Indikatoren für spätquartäre Produktivitätsänderungen am antarktischen Kontinentalhang, atlantischer Sektor“, von Wolfgang J. Bonn
- Heft Nr. 181/1995** – „Die Expedition ARKTIS X/1 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1994“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach
- Heft Nr. 182/1995** – „Laptev Sea System: Expeditions in 1994“, edited by Heidemarie Kassens
- Heft Nr. 183/1996** – „Interpretation digitaler Parasound Echolotaufzeichnungen im östlichen Arktischen Ozean auf der Grundlage physikalischer Sedimenteigenschaften“, von Uwe Bergmann
- Heft Nr. 184/1996** – „Distribution and dynamics of inorganic nitrogen compounds in the troposphere of continental, coastal, marine and Arctic areas“, by María Dolores Andrés Hernández
- Heft Nr. 185/1996** – „Verbreitung und Lebensweise der Aphroditen und Polynoiden (Polychaeta) im östlichen Weddellmeer und im Lazarevmeer (Antarktis)“, von Michael Stiller
- Heft Nr. 186/1996** – „Reconstruction of Late Quaternary environmental conditions applying the natural radionuclides ^{230}Th , ^{10}Be , ^{231}Pa and ^{238}U : A study of deep-sea sediments from the eastern sector of the Antarctic Circumpolar Current System“, by Martin Frank
- Heft Nr. 187/1996** – „The Meteorological Data of the Neumayer Station (Antarctica) for 1992, 1993 and 1994“, by Gert König-Langlo and Andreas Herber
- Heft Nr. 188/1996** – „Die Expedition ANTARKTIS-XI/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1994“, herausgegeben von Heinz Miller und Hannes Grobe
- Heft Nr. 189/1996** – „Die Expedition ARKTIS-VII/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1990“, herausgegeben von Heinz Miller und Hannes Grobe
- Heft Nr. 190/1996** – „Cruise report of the Joint Chilean-German-Italian Magellan ‚Victor Hensen‘ Campaign in 1994“, edited by Wolf Arntz and Matthias Gorny
- Heft Nr. 191/1996** – „Leitfähigkeits- und Dichtemessung an Eisbohrkernen“, von Frank Wilhelms
- Heft Nr. 192/1996** – „Photosynthese-Charakteristika und Lebensstrategie antarktischer Makroalgen“, von Gabriele Weykam
- Heft Nr. 193/1996** – „Heterogene Reaktionen von N_2O_5 und Hbr und ihr Einfluß auf den Ozonabbau in der polaren Stratosphäre“, von Sabine Seisel
- Heft Nr. 194/1996** – „Ökologie und Populationsdynamik antarktischer Ophiuroiden (Echinodermata)“, von Corinna Dahm
- Heft Nr. 195/1996** – „Die planktische Foraminifere *Neogloboquadrina pachyderma* (Ehrenberg) im Weddellmeer, Antarktis“, von Doris Berberich
- Heft Nr. 196/1996** – „Untersuchungen zum Beitrag chemischer und dynamischer Prozesse zur Variabilität des stratosphärischen Ozons über der Arktis“, von Birgit Hesse
- Heft Nr. 197/1996** – „The Expedition ARKTIS-XI/2 of ‚Polarstern‘ in 1995“, edited by Gunther Krause
- Heft Nr. 198/1996** – „Geodynamik des Westantarktischen Riftsystems basierend auf Apatit-Spaltspuranalysen“, von Frank Lisker
- Heft Nr. 199/1996** – „The 1993 Northeast Water Expedition. Data Report on CTD Measurements of RV ‚Polarstern‘ Cruises ARKTIS IX/2 and 3“, by Gerion Budéus and Wolfgang Schneider
- Heft Nr. 200/1996** – „Stability of the Thermohaline Circulation in analytical and numerical models“, by Gerrit Lohmann
- Heft Nr. 201/1996** – „Trophische Beziehungen zwischen Makroalgen und Herbivoren in der Potter Cove (King George-Insel, Antarktis)“, von Katrin Iken
- Heft Nr. 202/1996** – „Zur Verbreitung und Respiration ökologisch wichtiger Bodentiere in den Gewässern um Svalbard (Arktis)“, von Michael K. Schmid
- Heft Nr. 203/1996** – „Dynamik, Rauigkeit und Alter des Meereises in der Arktis – Numerische Untersuchungen mit einem großskaligen Modell“, von Markus Harder
- Heft Nr. 204/1996** – „Zur Parametrisierung der stabilen atmosphärischen Grenzschicht über einem antarktischen Schelfeis“, von Dörthe Handorf
- Heft Nr. 205/1996** – „Textures and fabrics in the GRIP ice core, in relation to climate history and ice deformation“, by Thorsteinn Thorsteinsson
- Heft Nr. 206/1996** – „Der Ozean als Teil des gekoppelten Klimasystems: Versuch der Rekonstruktion der glazialen Zirkulation mit verschiedenen komplexen Atmosphärenkomponenten“, von Kerstin Fieg
- Heft Nr. 207/1996** – „Lebensstrategien dominanter antarktischer Oithonidae (Cyclopoida, Copepoda) und Oncaeididae (Poecilostomatoida, Copepoda) im Bellingshausenmeer“, von Cornelia Metz
- Heft Nr. 208/1996** – „Atmosphäreinfluß bei der Fernerkundung von Meereis mit passiven Mikrowellenradiometern“, von Christoph Oelke

- Heft Nr. 209/1996** – „Klassifikation von Radarsatellitendaten zur Meereiserkennung mit Hilfe von Line-Scanner-Messungen“, von Axel Bochert
- Heft Nr. 210/1996** – „Die mit ausgewählten Schwämmen (Hexactinellida und Demospongiae) aus dem Weddellmeer, Antarktis, vergesellschaftete Fauna“, von Kathrin Kunzmann
- Heft Nr. 211/1996** – „Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR 1995 and the Expedition KOLYMA 1995“, by Dima Yu. Bolshiyarov and Hans-W. Hubberten
- Heft Nr. 212/1996** – „Surface-sediment composition and sedimentary processes in the central Arctic Ocean and along the Eurasian Continental Margin“, by Ruediger Stein, Gennadij I. Ivanov, Michael A. Levitan and Kirsten Fahl
- Heft Nr. 213/1996** – „Gonadenentwicklung und Eiproduktion dreier *Calanus*-Arten (Copepoda): Freilandbeobachtungen, Histologie und Experimente“, von Barbara Niehoff
- Heft Nr. 214/1996** – „Numerische Modellierung der Übergangszone zwischen Eisschild und Eisschelf“, von Christoph Mayer
- Heft Nr. 215/1996** – „Arbeiten der AWI-Forschungsstelle Potsdam in Antarktika, 1994/95“, herausgegeben von Ulrich Wand
- Heft Nr. 216/1996** – „Rekonstruktion quartärer Klimaänderungen im atlantischen Sektor des Südpolarmeeres anhand von Radiolarien“, von Uta Brathauer
- Heft Nr. 217/1996** – „Adaptive Semi-Lagrange-Finite-Elemente-Methode zur Lösung der Flachwassergleichungen: Implementierung und Parallelisierung“, von Jörn Behrens
- Heft Nr. 218/1997** – „Radiation and Eddy Flux Experiment 1995 (REFLEX III)“, by Jörg Hartmann, Axel Bochert, Dietmar Freese, Christoph Kottmeier, Dagmar Nagel and Andreas Reuter
- Heft Nr. 219/1997** – „Die Expedition ANTARKTIS-XII mit FS ‚Polarstern‘ 1995. Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-XII/3“, herausgegeben von Wilfried Jokat und Hans Oerter
- Heft Nr. 220/1997** – „Ein Beitrag zum Schwerfeld im Bereich des Weddellmeeres, Antarktis. Nutzung von Altimetermessungen des GEOSAT und ERS-1“, von Tilo Schöne
- Heft Nr. 221/1997** – „Die Expeditionen ANTARKTIS-XIII/1-2 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1995/96“, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Mike Lukas und Victor Smetacek
- Heft Nr. 222/1997** – „Tectonic Structures and Glaciomarine Sedimentation in the South-Eastern Weddell Sea from Seismic Reflection Data“, by László Oszkó
- Heft Nr. 223/1997** – „Bestimmung der Meereisdicke mit seismischen und elektromagnetisch-induktiven Verfahren“, von Christian Haas
- Heft Nr. 224/1997** – „Troposphärische Ozonvariationen in Polarregionen“, von Silke Wessel
- Heft Nr. 225/1997** – „Biologische und ökologische Untersuchungen zur kryopelagischen Amphipodenfauna des arktischen Meereises“, von Michael Poltermann
- Heft Nr. 226/1997** – „Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XI/1 of RV ‚Polarstern‘ in 1995“, edited by Eike Rachor
- Heft Nr. 227/1997** – „Der Einfluß kompatibler Substanzen und Kryoprotektoren auf die Enzyme Malatdehydrogenase (MDH) und Glucose-6-phosphat-Dehydrogenase (G6P-DH) aus *Acrosiphonia arctica* (Chlorophyta) der Arktis“, von Katharina Kück
- Heft Nr. 228/1997** – „Die Verbreitung epibenthischer Mollusken im chilenischen Beagle-Kanal“, von Katrin Linse
- Heft Nr. 229/1997** – „Das Mesozooplankton im Laptevmeer und östlichen Nansen-Becken – Verteilung und Gemeinschaftsstruktur im Spätsommer“, von Hinrich Hanssen
- Heft Nr. 230/1997** – „Modell eines adaptierbaren, rechnergestützten, wissenschaftlichen Arbeitsplatzes am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung“, von Lutz-Peter Kurdelski
- Heft Nr. 231/1997** – „Zur Ökologie arktischer und antarktischer Fische: Aktivität, Sinnesleistungen und Verhalten“, von Christopher Zimmermann
- Heft Nr. 232/1997** – „Persistente chlororganische Verbindungen in hochantarktischen Fischen“, von Stephan Zimmermann
- Heft Nr. 233/1997** – „Zur Ökologie des Dimethylsulfoniumpropionat (DMSP)-Gehaltes temperierter und polarer Phytoplanktongemeinschaften im Vergleich mit Laborkulturen der Coccolithophoride *Emiliania huxleyi* und der antarktischen Diatomee *Nitzschia lecontei*“, von Doris Meyerdierks
- Heft Nr. 234/1997** – „Die Expedition ARCTIC '96 des FS ‚Polarstern‘ (ARK XIII) mit der Arctic Climate System Study (ACSYS)“, von Ernst Augstein und den Fahrtteilnehmern
- Heft Nr. 235/1997** – „Polonium-210 und Blei-210 im Südpolarmeere: Natürliche Tracer für biologische und hydrographische Prozesse im Oberflächenwasser des Antarktischen Zirkumpolarstroms und des Weddellmeeres“, von Jana Friedrich
- Heft Nr. 236/1997** – „Determination of atmospheric trace gas amounts and corresponding natural isotopic ratios by means of ground-based FTIR spectroscopy in the high Arctic“, by Arndt Meier
- Heft Nr. 237/1997** – „Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR / SEVERNAYA ZEMLYA 1996“, edited by Martin Melles, Birgit Hagedorn and Dmitri Yu. Bolshiyarov
- Heft Nr. 238/1997** – „Life strategy and ecophysiology of Antarctic macroalgae“, by Iván M. Gómez
- Heft Nr. 239/1997** – „Die Expedition ANTARKTIS XIII/4-5 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1996“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach und Dieter Gerdes
- Heft Nr. 240/1997** – „Untersuchungen zur Chrom-Speziation in Meerwasser, Meereis und Schnee aus ausgewählten Gebieten der Arktis“, von Heide Giese
- Heft Nr. 241/1997** – „Late Quaternary glacial history and paleoceanographic reconstructions along the East Greenland continental margin: Evidence from high-resolution records of stable isotopes and ice-rafted debris“, by Seung-II Nam

- Heft Nr. 242/1997** – "Thermal, hydrological and geochemical dynamics of the active layer at a continuous permafrost site, Taymyr Peninsula, Siberia", by Julia Boike
- Heft Nr. 243/1997** – „Zur Paläoozeanographie hoher Breiten: Stellvertreterdaten aus Foraminiferen“, von Andreas Mackensen
- Heft Nr. 244/1997** – "The Geophysical Observatory at Neumayer Station, Antarctica, Geomagnetic and seismological observations in 1995 and 1996", by Alfons Eckstaller, Thomas Schmidt, Viola Graw, Christian Müller and Johannes Røgenhagen
- Heft Nr. 245/1997** – „Temperaturbedarf und Biogeographie mariner Makroalgen – Anpassung mariner Makroalgen an tiefe Temperaturen“, von Bettina Bischoff-Bäsmann
- Heft Nr. 246/1997** – „Ökologische Untersuchungen zur Fauna des arktischen Meereises“, von Christine Friedrich
- Heft Nr. 247/1997** – „Entstehung und Modifizierung von marinen gelösten organischen Substanzen“, von Berit Kirchoff
- Heft Nr. 248/1997** – "Laptev Sea System: Expeditions in 1995", edited by Heidemarie Kassens
- Heft Nr. 249/1997** – "The Expedition ANTARKTIS XIII/3 (EASIZ I) of RV 'Polarstern' to the eastern Weddell Sea in 1996", edited by Wolf Arntz and Julian Gutt
- Heft Nr. 250/1997** – „Vergleichende Untersuchungen zur Ökologie und Biodiversität des Mega-Epibenthos der Arktis und Antarktis“, von Adreas Starman
- Heft Nr. 251/1997** – „Zeitliche und räumliche Verteilung von Mineralvergesellschaftungen in spätquartären Sedimenten des Arktischen Ozeans und ihre Nützlichkeit als Klimaindikatoren während der Glazial/Interglazial-Wechsel“, von Christoph Vogt
- Heft Nr. 252/1997** – „Solitäre Ascidien in der Potter Cove (King Georg Island, Antarktis). Ihre ökologische Bedeutung und Populationsdynamik“, von Stephan Kühne
- Heft Nr. 253/1997** – "Distribution and role of microprotozoa in the Southern Ocean", by Christine Klaas
- Heft Nr. 254/1997** – „Die spätquartäre Klima- und Umweltgeschichte der Bunger-Oase, Ostantarktis“, von Thomas Kulbe
- Heft Nr. 255/1997** – "Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XIII/2 of RV 'Polarstern' in 1997", edited by Ruediger Stein and Kirsten Fahl
- Heft Nr. 256/1998** – „Das Radionuklid Tritium im Ozean: Meßverfahren und Verteilung von Tritium im Südatlantik und im Weddellmeer“, von Jürgen Soltenuß
- Heft Nr. 257/1998** – „Untersuchungen der Saisonalität von atmosphärischem Dimethylsulfid in der Arktis und Antarktis“, von Christoph Kleefeld
- Heft Nr. 258/1998** – „Bellingshausen- und Amundsenmeer: Entwicklung eines Sedimentationsmodells“, von Frank-Oliver Nitsche
- Heft Nr. 259/1998** – "The Expedition ANTARKTIS-XIV/4 of RV 'Polarstern' in 1997", by Dieter K. Fütterer
- Heft Nr. 260/1998** – „Die Diatomeen der Laptevsee (Arktischer Ozean): Taxonomie und biogeographische Verbreitung“, von Holger Cremer
- Heft Nr. 261/1998** – „Die Krustenstruktur und Sedimentdecke des Eurasischen Beckens, Arktischer Ozean: Resultate aus seismischen und gravimetrischen Untersuchungen“, von Estella Weigelt
- Heft Nr. 262/1998** – "The Expedition ARKTIS-XIII/3 of RV 'Polarstern' in 1997", by Gunther Krause
- Heft Nr. 263/1998** – „Thermo-tektonische Entwicklung von Oates Land und der Shackleton Range (Antarktis) basierend auf Spaltspurenanalysen“, von Thorsten Schäfer
- Heft Nr. 264/1998** – „Messungen der stratosphärischen Spurengase ClO, HCl, O₃, N₂O, H₂O und OH mittels flugzeuggetragener Submillimeterwellen-Radiometrie“, von Joachim Urban
- Heft Nr. 265/1998** – „Untersuchungen zu Massenhaushalt und Dynamik des Ronne Ice Shelves, Antarktis“, von Astrid Lambrecht
- Heft Nr. 266/1998** – "Scientific Cruise Report of the Kara Sea Expedition of RV 'Akademic Boris Petrov' in 1997", edited by Jens Matthiessen and Oleg Stepanets
- Heft Nr. 267/1998** – „Die Expedition ANTARKTIS-XIV mit FS 'Polarstern' 1997. Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-XIV/3“, herausgegeben von Wilfried Jokat und Hans Oerter
- Heft Nr. 268/1998** – „Numerische Modellierung der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Meereis in der arktischen Eisrandzone“, von Gerit Birnbaum
- Heft Nr. 269/1998** – "Katabatic wind and Boundary Layer Front Experiment around Greenland (KABEG '97)", by Günther Heinemann
- Heft Nr. 270/1998** – "Architecture and evolution of the continental crust of East Greenland from integrated geophysical studies", by Vera Schindwein
- Heft Nr. 271/1998** – "Winter Expedition to the Southwestern Kara Sea – Investigations on Formation and Transport of Turbid Sea-Ice", by Dirk Dethleff, Per Loewe, Dominik Weiel, Hartmut Nies, Gesa Kuhlmann, Christian Bahe and Gennady Tarasov
- Heft Nr. 272/1998** – „FTIR-Emissionsspektroskopische Untersuchungen der arktischen Atmosphäre“, von Edo Becker
- Heft Nr. 273/1998** – „Sedimentation und Tektonik im Gebiet des Agulhas Rückens und des Agulhas Plateaus („SETA-RAP“)“, von Gabriele Uenzelmann-Neben
- Heft Nr. 274/1998** – "The Expedition ANTARKTIS XIV/2", by Gerhard Kattner
- Heft Nr. 275/1998** – „Die Auswirkung der ‚NorthEastWater‘-Polynya auf die Sedimentation von NO-Grönland und Untersuchungen zur Paläo-Ozeanographie seit dem Mittelweichsel“, von Hanne Notholt
- Heft Nr. 276/1998** – „Interpretation und Analyse von Potentialfelddaten im Weddellmeer, Antarktis: der Zerfall des Superkontinents Gondwana“, von Michael Studinger

- Heft Nr. 277/1998** – „Koordiniertes Programm Antarktischforschung“. Berichtskolloquium im Rahmen des Koordinierten Programms „Antarktischforschung mit vergleichenden Untersuchungen in arktischen Eisgebieten“, herausgegeben von Hubert Miller
- Heft Nr. 278/1998** – „Messung stratosphärischer Spurengase über Ny-Ålesund, Spitzbergen, mit Hilfe eines bodengebundenen Mikrowellen-Radiometers“, von Uwe Raffalski
- Heft Nr. 279/1998** – „Arctic Paleo-River Discharge (APARD). A New Research Program of the Arctic Ocean Science Board (AOSB)“, edited by Ruediger Stein
- Heft Nr. 280/1998** – „Fernerkundungs- und GIS-Studien in Nordostgrönland“ von Friedrich Jung-Rothenhäusler
- Heft Nr. 281/1998** – „Rekonstruktion der Oberflächenwassermassen der östlichen Laptevsee im Holozän anhand von aquatischen Palynomorphen“, von Martina Kunz-Pirring
- Heft Nr. 282/1998** – „Scavenging of ^{231}Pa and ^{230}Th in the South Atlantic: Implications for the use of the $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ ratio as a paleoproductivity proxy“, by Hans-Jürgen Walter
- Heft Nr. 283/1998** – „Sedimente im arktischen Merreis - Eintrag, Charakterisierung und Quantifizierung“, von Frank Lindemann
- Heft Nr. 284/1998** – „Langzeitanalyse der antarktischen Meereisbedeckung aus passiven Mikrowellendaten“, von Christian H. Thomas
- Heft Nr. 285/1998** – „Mechanismen und Grenzen der Temperaturanpassung beim Pierwurm *Arenicola marina* (L.)“, von Angela Sommer
- Heft Nr. 286/1998** – „Energieumsätze benthischer Filtrierer der Potter Cove (King Georg Island, Antarktis)“, von Jens Kowalke
- Heft Nr. 287/1998** – „Scientific Cooperation in the Russian Arctic: Research from the Barents Sea up to the Laptev Sea“, edited by Eike Rachor
- Heft Nr. 288/1998** – „Alfred Wegener. Kommentiertes Verzeichnis der schriftlichen Dokumente seines Lebens und Wirkens“, von Ulrich Wutzke
- Heft Nr. 289/1998** – „Retrieval of Atmospheric Water Vapor Content in Polar Regions Using Spaceborne Microwave Radiometry“, by Jungang Miao
- Heft Nr. 290/1998** – „Strukturelle Entwicklung und Petrogenese des nördlichen Kristallingürtels der Shackleton Range, Antarktis: Proterozoische und Ross-orogene Krustendynamik am Rand des Ostantarktischen Kratons“, von Axel Brommer
- Heft Nr. 291/1998** – „Dynamik des arktischen Meereises – Validierung verschiedener Rheologieansätze für die Anwendung in Klimamodellen“, von Martin Kreyscher
- Heft Nr. 292/1998** – „Anthropogene organische Spurenstoffe im Arktischen Ozean, Untersuchungen chlorierter Biphenyle und Pestizide in der Laptevsee, technische und methodische Entwicklungen zur Probenahme in der Arktis und zur Spurenstoffanalyse“, von Sven Utschakowski
- Heft Nr. 293/1998** – „Rekonstruktion der spätquartären Klima- und Umweltgeschichte der Schirmacher Oase und des Wohithat Massivs (Ostantarktika)“, von Markus Julius Schwab
- Heft Nr. 294/1998** – „Besiedlungsmuster der benthischen Makrofauna auf dem ostgrönländischen Kontinentalhang“, von Klaus Schnack
- Heft Nr. 295/1998** – „Gehäuseuntersuchungen an planktischen Foraminiferen hoher Breiten: Hinweise auf Umweltveränderungen während der letzten 140.000 Jahre“, von Harald Hommers
- Heft Nr. 296/1998** – „Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XIII/1 of RV 'Polarstern' in 1997“, edited by Michael Spindler, Wilhelm Hagen and Dorothea Stübing
- Heft Nr. 297/1998** – „Radiometrische Messungen im arktischen Ozean – Vergleich von Theorie und Experiment“, von Klaus-Peter Johnsen
- Heft Nr. 298/1998** – „Patterns and Controls of CO₂ Fluxes in Wet Tundra Types of the Taimyr Peninsula, Siberia – the Contribution of Soils and Mosses“, by Martin Sommerkorn
- Heft Nr. 299/1998** – „The Potter Cove coastal ecosystem, Antarctica. Synopsis of research performed within the frame of the Argentinean-German Cooperation at the Dallmann Laboratory and Jubany Station (King George Island, Antarctica, 1991-1997)“, by Christian Wiencke, Gustavo Ferreyra, Wolf Arntz & Carlos Rinaldi
- Heft Nr. 300/1999** – „The Kara Sea Expedition of RV 'Akademik Boris Petrov' 1997: First Results of a Joint Russian-German Pilot Study“, edited by Jens Matthiessen, Oleg V. Stepanets, Ruediger Stein, Dieter K. Fütterer and Eric M. Galimov
- Heft Nr. 301/1999** – „The Expedition ANTARKTIS XV/3 (EASIZ II)“, edited by Wolf E. Arntz and Julian Gutt
- Heft Nr. 302/1999** – „Sterole im herbstlichen Weddellmeer (Antarktis): Großräumige Verteilung, Vorkommen und Umsatz“, von Anneke Mühlebach
- Heft Nr. 303/1999** – „Polare stratosphärische Wolken: Lidar-Beobachtungen, Charakterisierung von Entstehung und Entwicklung“, von Jens Biele
- Heft Nr. 304/1999** – „Spätquartäre Paläoumweltbedingungen am nördlichen Kontinentalrand der Barents- und Kara-See. Eine Multi-Parameter-Analyse“, von Jochen Knies
- Heft Nr. 305/1999** – „Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study (ARTIST)“, by Jörg Hartmann, Frank Albers, Stefania Argenti, Axel Bocher, Ubaldo Bonafé, Wolfgang Cohrs, Alessandro Conidi, Dietmar Freese, Teodoro Georgiadis, Alessandro Ippoliti, Lars Kaleschka, Christof Lüpkes, Uwe Maixner, Giangiuseppe Mastrantonio, Fabrizio Ravegnani, Andreas Reuter, Giuliano Trivellone and Angelo Viola
- Heft Nr. 306/1999** – „German-Russian Cooperation: Biogeographic and biostratigraphic investigations on selected sediment cores from the Eurasian continental margin and marginal seas to analyze the Late Quaternary climatic variability“, edited by Robert R. Spielhagen, Max S. Barash, Gennady I. Ivanov and Jörn Thiede
- Heft Nr. 307/1999** – „Struktur und Kohlenstoffbedarf des Makrobenthos am Kontinentalhang Ostgrönlands“, von Dan Seiler
- Heft Nr. 308/1999** – „ARCTIC '98: The Expedition ARK-XIV/1a of RV 'Polarstern' in 1998“, edited by Wilfried Jokat

- Heft Nr. 309/1999** – „Variabilität der arktischen Ozonschicht: Analyse und Interpretation bodengebundener Millimeterwellenmessungen“, von Björn-Martin Sinnhuber
- Heft Nr. 310/1999** – „Rekonstruktion von Meereisdrift und terrigenem Sedimenteintrag im Spätquartär: Schwermineralassoziationen in Sedimenten des Laptev-See-Kontinentalrandes und des zentralen Arktischen Ozeans“, von Marion Behrends
- Heft Nr. 311/1999** – „Parameterisierung atmosphärischer Grenzschichtprozesse in einem regionalen Klimamodell der Arktis“, von Christoph Abegg
- Heft Nr. 312/1999** – „Solare und terrestrische Strahlungswechselwirkung zwischen arktischen Eisflächen und Wolken“, von Dietmar Freese
- Heft Nr. 313/1999** – „Snow accumulation on Ekströmsisen, Antarctica“, by Elisabeth Schlosser, Hans Oerter and Wolfgang Graf
- Heft Nr. 314/1999** – „Die Expedition ANTARKTIS XV/4 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1998“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach
- Heft Nr. 315/1999** – „Expeditions in Siberia in 1998“, edited by Volker Rachold
- Heft Nr. 316/1999** – „Die postglaziale Sedimentationsgeschichte der Laptevsee: schwermineralogische und sedimentpetrographische Untersuchungen“, von Bernhard Peregovich
- Heft Nr. 317/1999** – „Adaption an niedrige Temperaturen: Lipide in Eisdiatomeen“, von Heidi Lehmal
- Heft Nr. 318/1999** – „Effiziente parallele Lösungsverfahren für elliptische partielle Differentialgleichungen in der numerischen Ozeanmodellierung“, von Natalja Rakowsky
- Heft Nr. 319/1999** – „The Ecology of Arctic Deep-Sea Copepods (Euchaetidae and Aetideidae). Aspects of their Distribution Trophodynamics and Effect on the Carbon Flux“, by Holger Auel
- Heft Nr. 320/1999** – „Modellstudien zur arktischen stratosphärischen Chemie im Vergleich mit Meßdaten“, von Veronika Eyring
- Heft Nr. 321/1999** – „Analyse der optischen Eigenschaften des arktischen Aerosols“, von Dagmar Nagel
- Heft Nr. 322/1999** – „Messungen des arktischen stratosphärischen Ozons: Vergleich der Ozonmessungen in Ny-Ålesund, Spitzbergen, 1997 und 1998“, von Jens Langer
- Heft Nr. 323/1999** – „Untersuchung struktureller Elemente des südöstlichen Weddellmeeres/Antarktis auf der Basis mariner Potentialfelddaten“, von Uwe F. Meyer
- Heft Nr. 324/1999** – „Geochemische Verwitterungstrends eines basaltischen Ausgangsgesteins nach dem spätpleistozänen Gletscherrückzug auf der Taimyrhalbinsel (Zentralsibirien) – Rekonstruktion an einer sedimentären Abfolge des Lama Sees“, von Stefanie K. Harwart
- Heft Nr. 325/1999** – „Untersuchungen zur Hydrologie des arktischen Meereises – Konsequenzen für den kleinskaligen Stofftransport“, von Johannes Freitag
- Heft Nr. 326/1999** – „Die Expedition ANTARKTIS XIV/2 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1998“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach
- Heft Nr. 327/1999** – „Gemeinschaftsanalytische Untersuchungen der Harpacticoidenfauna der Magellanregion, sowie erste similaritätsanalytische Vergleiche mit Assoziationen aus der Antarktis“, von Kai Horst George
- Heft Nr. 328/1999** – „Rekonstruktion der Paläo-Umweltbedingungen am Laptev-See-Kontinentalrand während der beiden letzten Glazial/Interglazial-Zyklen anhand sedimentologischer und mineralogischer Untersuchungen“, von Claudia Müller
- Heft Nr. 329/1999** – „Räumliche und zeitliche Variationen atmosphärischer Spurengase aus bodengebundenen Messungen mit Hilfe eines Michelson Interferometers“, von Justus Notholt
- Heft Nr. 330/1999** – „The 1998 Danish-German Excursion to Disko Island, West Greenland“, edited by Angelika Brandt, Helge A. Thomsen, Henning Heide-Jørgensen, Reinhardt M. Kristensen and Hilke Ruhberg
- Heft Nr. 331/1999** – „Poseidon“ Cruise No. 243 (Reykjavik - Greenland - Reykjavik, 24. August - 11. September 1998): Climate change and the Viking-age fjord environment of the Eastern Settlement, sw Greenland“, by Gerd Hoffmann, Antoon Kuijpers and Jörn Thiede
- Heft Nr. 332/1999** – „Modeling of marine biogeochemical cycles with an emphasis on vertical particle fluxes“, by Regina Usbeck
- Heft Nr. 333/1999** – „Die Tanaidaceenfauna des Beagle-Kanals und ihre Beziehungen zur Fauna des antarktischen Festlandssockels“, von Anja Schmidt
- Heft Nr. 334/1999** – „D-Aminosäuren als Tracer für biogeochemische Prozesse im Fluß-Schelf-Ozean-System der Arktis“, von Hans Peter Fitznar
- Heft Nr. 335/1999** – „Ökophysiologische Ursachen der limitierten Verbreitung reptanter decapoder Krebse in der Antarktis“, von Markus Frederich
- Heft Nr. 336/1999** – „Ergebnisse der Untersuchung des grönländischen Inlandeises mit dem elektromagnetischen Reflexionsverfahren in der Umgebung von NGRIP“, von Fidan Göktas
- Heft Nr. 337/1999** – „Paleozoic and mesozoic tectono-thermal history of central Dronning Maud Land, East Antarctica, – evidence from fission-track thermochronology“, by Stefanie Meier
- Heft Nr. 338/1999** – „Probleme hoher Stoffwechselraten bei Cephalopoden aus verschiedenen geographischen Breiten“, von Susanne Zielinski
- Heft Nr. 339/1999** – „The Expedition ARKTIS XV/1“, edited by Gunther Krause
- Heft Nr. 340/1999** – „Microbial Properties and Habitats of Permafrost Soils on Taimyr Peninsula, Central Siberia“, by Nicolé Schmidt
- Heft Nr. 341/1999** – „Photoacclimation of phytoplankton in different biogeochemical provinces of the Southern Ocean and its significance for estimating primary production“, by Astrid Bracher

- Heft Nr. 342/1999** – "Modern and Late Quaternary Depositional Environment of the St. Anna Trough Area, Northern Kara Sea", edited by Ruediger Stein, Kirsten Fahl, Gennadij I. Ivanov, Michael A. Levitan and Gennady Tarasov
- Heft Nr. 343/1999** – "ESF-IMPACT Workshop/Oceanic impacts: mechanisms and environmental perturbations, 15.-17. April 1999 in Bremerhaven", edited by Rainer Gersonde and Alexander Deutsch
- Heft Nr. 344/1999** – „Die Klimageschichte der hohen nördlichen Breiten seit dem mittleren Miozän: Hinweise aus sedimentologischen-tonmineralogischen Analysen (ODP Leg 151, zentrale Framstraße)“, von Amelie Winkler
- Heft Nr. 345/1999** – „Kurzfristige Klimaschwankungen im Scotiameer und Ergebnisse zur Kalbungsgeschichte der Antarktis während der letzten 200 000 Jahre“, von Annette Hofmann
- Heft Nr. 346/2000** – „Glazialmarine Sedimentationsentwicklung am westantarktischen Kontinentalrand im Amundsen- und Bellingshausenmeer – Hinweise auf Palämweltveränderungen während der quartären Klimazyklen“, von Claus-Dieter Hillenbrand
- Heft Nr. 347/2000** – „Zur Ökologie des Phytoplanktons im arktischen Laptevmeer – ein jahreszeitlicher Vergleich“, von Kirsten Tuschling
- Heft Nr. 348/2000** – „Untersuchungen zum Fettstoffwechsel des Südlichen See-Elefanten (*Mirounga leonina* L.) in der Antarktis“, von Sven Ramdohr
- Heft Nr. 349/2000** – „Licht- und Temperatureinfluß auf den enzymatischen Oxidationsschutz der antarktischen Eisdiatomee *Entomoneis kufferathii* Manguin“, von Raimund Schriek
- Heft Nr. 350/2000** – „Die Expedition ARKTIS XV/3 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1999“, herausgegeben von Ursula Schauer
- Heft Nr. 351/2000** – "Dissolution kinetics of biogenic silica in marine environments", by Dirk Rickert
- Heft Nr. 352/2000** – „Geometrie und Kinematik des tertiären Deckenbaus im West Spitzbergen Falten- und Überschiebungsgürtel, Brøggerhalvøya, Svalbard“, von Kerstin Saalmann
- Heft Nr. 353/2000** – „Zur Ökologie der Benthos-Foraminiferen der Potter Cove (King George Island, Antarktis)“, von Michael Mayer
- Heft Nr. 354/2000** – "Expeditions in Siberia in 1999", edited by Volker Rachold
- Heft Nr. 355/2000** – „Temperaturrekonstruktion im Tropischen Atlantik für das Letzte Glaziale Maximum: CLIMAP neu betrachtet.“, von Carsten Porthun
- Heft Nr. 356/2000** – „Niederfrequente Variabilität großräumiger atmosphärischer Zirkulationsstrukturen in spektralen Modellen niederer Ordnung“, von Antje Weisheimer
- Heft Nr. 357/2000** – "Late Quaternary paleoclimatic reconstructions along the Eurasian continental margin", by Hans Peter Kleiber
- Heft Nr. 358/2000** – "Holocene environmental history of East Greenland - evidence from lake sediments", by Bernd Wagner
- Heft Nr. 359/2000** – "Scientific Cooperation in the Russian Arctic: Ecology of the White Sea with Emphasis on its Deep Basin", edited by Elke Rachor
- Heft Nr. 360/2000** – "Scientific Cruise Report of the Joint Russian-German Kara-Sea Expedition of RV 'Akademik Boris Petrov' in 1999", edited by Ruediger Stein and Oleg Stepanets
- Heft Nr. 361/2000** – "Planktic foraminifer ecology and stable isotope geochemistry in the Arctic Ocean: implications from water column and sediment surface studies for quantitative reconstructions of oceanic parameters", by Renate Volkmann
- Heft Nr. 362/2000** – „Eisbohrkernuntersuchungen zur räumlichen und zeitlichen Variabilität von Temperatur und Niederschlagsrate im Spätholozän in Nordgrönland“, von Matthias Schwager
- Heft Nr. 363/2000** – „Benthische Peracarida (Crustacea, Malacostraca) des arktischen Mellemfjordes, West-Grönland“, von Anne-Nina Lörz
- Heft Nr. 364/2000** – „Die Expedition ANTARKTIS XVI/3-4 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1999“, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Victor Smetacek und Manfred Reinke
- Heft Nr. 365/2000** – "Organic carbon in Late Quaternary sediments: Responses to paleoenvironmental changes in the Laptev and Kara seas (Arctic Ocean)", by Bettina Boucsein
- Heft Nr. 366/2000** – „Flugzeuggestützte Topographie- und Schweremessung: Meßsystem und Anwendung auf die Region Framstraße, Spitsbergen und Nordostgrönland“, von Tobias Boebel
- Heft Nr. 367/2000** – „Messung dielektrischer Eigenschaften polarer Eiskerne“, von Frank Wilhelms
- Heft Nr. 368/2000** – "The Expedition ARKTIS-XV/2 of RV 'Polarstern' in 1999", edited by Wilfried Jokat
- Heft Nr. 369/2000** – „Interpretation seismischer und gravimetrischer Daten des Weddellmeeres, Antarktis“, von Johannes Rogenhagen
- Heft Nr. 370/2000** – „Struktureigenschaften und Nahrungsbedarf der Zoobenthosgemeinschaften im Bereich des Lomonossowrückens im Arktischen Ozean“, von Hendrik Deubel
- Heft Nr. 371/2000** – „Die Rolle der Schneebedeckung für die Kryptogamen-Vegetation in der maritimen Antarktis (Potter-Halbinsel, King George Island)“, von Jana Barbro Winkler
- Heft Nr. 372/2000** – "Biodiversity of the Weddell Sea: macrozoobenthic (demersal fish included) sampled during the expedition ANT XIII/3 (EASIZ I) with RV 'Polarstern'", edited by Julian Gutt, Boris I. Sirenko, Wolf E. Arntz, Igor S. Smirnov, and Claude De Broyer
- Heft Nr. 373/2000** – „Benthische Foraminiferen im Boreas-Becken, Grönlandsee: Verbreitung und paläo-ozeanographische Rekonstruktion für die letzten 450.000 Jahre“, von Sabine Magnus
- Heft Nr. 374/2000** – „Scherwellendoppelbrechungsanalyse von Registrierungen der Stationen des seismologischen Netzwerkes an der Neumayer Station, Antarktis: Seismische Anisotropie und die tektonische Entwicklung des Kontinentalrandes Queen Maud Lands“, von Christian Müller

Heft Nr. 375/2000 – "Effects of enhanced UV-radiation on photosynthesis of Arctic/cold-temperate macroalgae",
by Kai Bischof

Heft Nr. 376/2000 – „Saisonalität und kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols und des bodennahen Ozons in der Antarktis (Neumayer-Station) unter Berücksichtigung der Meereisbedeckung“, von Jörg Hofmann

**Ab dem Heft Nr. 377 erscheint die Reihe unter dem Namen:
„Berichte zur Polar- und Meeresforschung“**

Heft Nr. 377/2000 – „Rekrutierungsmuster ausgewählter Wattfauna nach unterschiedlich strengen Wintern“,
von Matthias Strasser

Heft Nr. 378/2001 – „Der Transport von Wärme, Wasser und Salz in den Arktischen Ozean“, von Boris Cisewski

Heft Nr. 379/2001 – „Analyse hydrographischer Schnitte mit Satellitenaltimetrie“, von Martin Losch

Heft Nr. 380/2001 – „Die Expedition ANTARKTIS XVI/1-2 des Forschungsschiffes POLARSTERN 1998/1999“
herausgegeben von Eberhard Fahrbach

Heft Nr. 381/2001 – „UV-Schutz- und Reparaturmechanismen bei antarktischen Diatomeen und *Phaeocystis antarctica*“, von Lieselotte Riegger

Heft Nr. 382/2001 – "Age determination in polar Crustacea using the autofluorescent pigment lipofuscin",
by Bodil Bluhm

Heft Nr. 383/2001 – „Zeitliche und räumliche Verteilung, Habitatspräferenzen und Populationsdynamik benthischer Copepoda Herpacticoida in der Potter Cove (King George Island, Antarktis)“, von Gritta Veit-Köhler

Heft Nr. 384/2001 – „Beiträge aus geophysikalischen Messungen in Dronning Maud Land, Antarktis, zur Auffindung eines optimalen Bohrpunktes für eine Eiskerntiefbohrung“, von Daniel Steinhage

* vergriffen/out of print.

** nur noch beim Autor/only from the author.