

**Ergebnisse der Untersuchung des grönländischen
Inlandeises mit dem elektromagnetischen
Reflexionsverfahren in der Umgebung von NGRIP**

**Results from airborne radio-echosounding of the
Greenland icesheet in the vicinity of NGRIP**

Fidan Göktas

**Ber. Polarforsch. 336 (1999)
ISSN 0176 - 5027**

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

Die vorliegende Arbeit ist die inhaltlich unveränderte Fassung einer Diplomarbeit,
die 1998 dem Fachbereich Geophysik der Ludwig-Maximilians-Universität München
vorgelegt wurde.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Abstract	4
1 Einleitung	6
1.1 Zielsetzung	8
1.2 Das Meßgebiet	9
2 Grundlagen des EMR-Verfahrens	12
2.1 Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Eis	12
2.1.1 Materialkonstanten von Eis	13
2.1.2 Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen	14
2.1.3 Reflexionskoeffizient	15
2.1.4 Eindringtiefe elektromagnetischer Wellen	16
2.2 Das elektromagnetische Reflexionsverfahren	18
2.2.1 Erfassung der Eismächtigkeit und der inneren Struktur	18
2.2.2 Erfassung und Aufbereitung der Daten	20
2.2.3 Auflösungsvermögen der Daten	21
2.3 Vergleich geophysikalischer Methoden zur Eisdickenbestimmung	23
2.3.1 Elektromagnetische Verfahren	23
2.3.2 Seismische Verfahren	23
2.3.3 Gravimetrische Verfahren	24
3 Entstehung, Aufbau und Eigenschaften von Eisschilden	25
3.1 Transformation von Schnee in Eis	26
3.2 Aufbau und innere Struktur von Eisschilden	28
3.3 Änderung der Dichte mit der Tiefe	29
3.4 Änderung der Dielektrizitätskonstanten	30
3.5 Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit	31
4 Eigenschaften von Eis	33
4.1 Der Eiskristall	33

4.1.1	Aufbau des Wassermoleküls	33
4.1.2	Die Kristallstruktur von Eis	34
4.2	Ablagerungen im Eis	36
4.3	Reflexionshorizonte in Radargrammen	38
5	Datenbearbeitung	39
5.1	Grundsätzliche Schritte	39
5.2	Stapelung	40
5.3	Differentiation	42
5.4	Amplitudenregelung	42
5.5	Filterung	43
6	Ergebnisse zur Eismächtigkeit und Topographie	44
6.1	Bestimmung der Eismächtigkeit	44
6.2	Topographie der Eisoberfläche	48
6.3	Topographie des Felsuntergrundes	51
6.4	Fehlerbetrachtung	54
7	Ergebnisse zur inneren Struktur	59
7.1	Erfassung der inneren Struktur	59
7.2	Ausgewählte interessante Gebiete	61
7.3	Bearbeitung der Daten mit der Interpretationssoftware Landmark	63
7.4	Erfassung des Horizonts im Holozän	65
7.5	Erfassung der Interstadialen im letzten Glazial	68
8	Interpretation	71
8.1	Betrachtungen zur Eismächtigkeit und zur Topographie	71
8.2	Betrachtungen zur internen Schichtung	72
8.3	Undulationen der internen Schichtung	74
8.4	Alterszuordnung des Horizonts	75
9	Schlussfolgerung und Ausblick	77
	Literaturverzeichnis	79
	Anhang	83
A.1	Vergrößerte Darstellung der Stapelergebnisse	84
A.2	Vergrößerte Darstellung eines Radargramms	85
B.1	Verzeichnis der EMR-Profile	86
C.1	Ergebnisse der Filterung	92
	Abbildungsverzeichnis	95
	Danksagung	97

Zusammenfassung

Das Elektromagnetische Reflexionsverfahren (EMR) wird seit Jahrzehnten eingesetzt, um die Mächtigkeit von Eisschilden und Gletschern zu bestimmen. Dabei kann das Meßsystem an der Eisoberfläche, z.B. gezogen von einem Motorschlitten, oder auch in der Luft, z.B. befestigt an einem Flugzeug, eingesetzt werden.

Die flugzeuggestützte Variante bietet den Vorteil, große Flächen in kurzer Zeit erfassen zu können. Die in dieser vorliegenden Arbeit bearbeiteten Daten wurden mit einem flugzeuggestützten EMR-System (600-ns- und 60-ns-Puls) in den Flugkampagnen der Jahre 1996 und 1997 in Nordgrönland aufgenommen. Sie umfassen das Gebiet um die neue Eiskerntiefbohrung NGRIP von 72° N bis 76.5° N und von 38° W bis 47° W.

Die Reflexionen am Felsuntergrund waren sowohl mit dem 600-ns-Puls als auch mit dem 60-ns-Puls weitgehend zu erfassen. Entlang jedes Profils wurde die Eismächtigkeit in Abstand von etwa 2,5 km bestimmt, und die Felstopographie abgeleitet, und so, mit hoher Datendichte um NGRIP kartiert.

Die Eismächtigkeit wurde mit gängigen seismischen Interpretationsverfahren bestimmt. Sie beträgt im untersuchten Gebiet zwischen 2900 m und 3100 m über NN \pm 50 m. Die Felstopographie liegt überwiegend zwischen 200 m und 0 m unter NN \pm 50 m. In der näheren Umgebung von NGRIP erreicht die Eismächtigkeit Werte von 3000 m bis 3100 m über NN \pm 50 m und die Felstopographie von 100 m bis 0 m unter NN \pm 50 m. Die Felstopographie in der Umgebung von NGRIP ist damit vergleichsweise eben.

Das Meßsystem konnte nicht nur Reflexionen am Übergang von Eis zu Fels, sondern auch Reflexionshorizonte innerhalb des Eiskörpers gut erfassen, wie z.B. Horizonte im holozänem Eis, als auch Interstadiale während des letzten Glazials. Die Topographie dieser Schichten wurde ebenfalls kartiert. Die dreidimensionale Verarbeitung der Daten mit der seismischen Interpretationssoftware Landmark - SeisWorks3D ermöglichte das Verfolgen der internen Horizonte über längere Distanzen entlang verschiedener Flugprofile.

Mit den Verbindungsflügen von GRIP bis nach NGRIP konnten diese ausgewählten Horizonte verfolgt und die Alter-Tiefen-Zuordnung von GRIP nach NGRIP übertragen werden. Die internen Schichten sind an NGRIP oberflächennaher, also weiter entfernt vom Untergrund, als an GRIP. Aus der Anordnung der Schichten und der Verteilung der Akkumulationsrate zeichnet sich ab, daß sich die räumliche Verteilung der Niederschläge in dem Untersuchungsgebiet in den letzten 100 000 Jahren nicht wesentlich verändert hat.

Abstract

Radio-echosounding (RES) has been used to determine the ice thickness of ice sheets and glaciers for some decades. It can be used as groundbased, i.e. installed on a skidoo, or as airborne instrument, i.e. installed on an airplane. The advantage of the airborne RES is the great area which be covered in a short time.

The data in this work is measured by the airborne RES (600-ns- and 60-ns-pulse) campaigns in 1996 an 1997 in Northern Greenland. It covers the area around the new deep ice core drilling NGRIP from 72° to 76.5° N and from 38° W to 47° W.

The reflection at the bedrock could be detected both with the 600-ns pulse and the 60-ns pulse. The ice thickness could be determined every 2.5 km, and the bedrock topography derived, and accordingly mapped with a rather high data resolution in the vicinity of NGRIP.

The data is interpreted using common seismic software. In the investigated area the ice thickness varies between 2900 m and 3100 m above sea level \pm 50 m. The bedrock topography reaches elevations between 200 m and 0 m below sea level \pm 50 m. In the vicinity of NGRIP the ice is between 3000 m and 3100 m above sea level \pm 50 m thick and the bedrock topography varies between 100 m and 0 m below sea level \pm 50 m. This results in a rather flat bedrock topography around NGRIP.

Not only the bedrock, but also internal layers could be detected very well with this system: as for example layers in holocene ice and interstadials of the last glacial ice age. As the ice thickness between the surface and these layers was recorded, their topography could be mapped as well. Especially the three dimensional processing with

the seismic interpretation tool Landmark - SeisWorks3D enabled to follow internal layers over distances and along different profiles.

For selected layers it was possible to transfer the age-depth-relationship of the GRIP ice core to NGRIP. The internal layers are closer to surface, i.e. further away from the bedrock, at NGRIP than at GRIP. From the structure of the internal layers and the distribution of the accumulation rate it could be seen, that no major changes in the spatial distribution of precipitation occurred in the last 100 000 years.

Kapitel 1

Einleitung

Die Erdoberfläche ist zu rund zehn Prozent mit Eis bedeckt [Paterson, 1994]. In der Antarktis und auf Grönland befinden sich die größten Vorkommen. Mit einer Ausdehnung von über 16 Mio. km² beanspruchen diese beiden Gebiete für sich 97% der gesamten Eisoberfläche [Bogorodsky et al., 1985]. Die polaren Eismassen bilden das größte Süßwasservorkommen der Erde. Das Eis im Inland von Grönland ist anderen klimatischen Bedingungen ausgesetzt als das Eis in den Randgebieten Grönlands. Die großen Eiskörper (Eisschilde) der Antarktis und Grönlands haben bedeutenden Einfluß auf das Weltklima. Die Wirkungsweisen sind allerdings noch unzureichend erforscht.

Bislang stehen folgende Zusammenhänge fest: Schnee- und eisbedeckte Gebiete zeichnen sich durch hohes Rückstrahlungsvermögen (Albedo) aus. Sie leisten damit einen wichtigen Beitrag zur globalen Wärmebilanz. Die Polargebiete haben großen Einfluß auf den Meeresspiegel. Da in den kälteren Perioden mehr Wasser in Form von Eis gebunden ist als in den wärmeren, ist der Meeresspiegel in den Eiszeiten niedriger. Geht eine Eiszeit zu Ende, steigt der Meeresspiegel wieder an. Zudem regt das in die Ozeane abfließende kalte Schmelzwasser die Zirkulation der Meere an [Bogorodsky et al., 1985].

Gleichzeitig bleiben Veränderungen im Weltklima nicht ohne Folgen für die Polargebiete: Niederschlagszyklen verschieben sich, Schneezutrags- und Abschmelzraten variieren. Von dem Verhältnis dieser beiden Raten hängt es ab, ob ein Gletscher wächst oder abnimmt. Neben dem Klima bestimmen auch die geographische Lage, die Fließgeschwindigkeit des Eises, die Temperaturverteilung im Eisschild, die basale Temperatur sowie die Rauigkeit des Untergrundes das Erscheinungsbild eines Eisschildes [Paterson, 1994]. Demnach müssen Eisschilde als das Ergebnis eines komplexen Zusammenspiels unterschiedlichster Faktoren begriffen werden.

Ihre Erforschung ist mit hohem Aufwand verbunden. Zusätzlich machen extreme Witterungsverhältnisse die polaren Gebiete nur schwer zugänglich. Das erfordert spezielle Ausrüstung und Transportmittel. Weil unter diesen Bedingungen kommerzielle elek-

tronische Geräte nur bedingt funktionieren, müssen dafür spezifizierte Instrumente eingesetzt werden. Trotz des hohen Aufwands ist das wissenschaftliche Interesse an der Erforschung der polaren Eisschilde begründet.

In der Atmosphäre finden sich neben dem gasförmigen Wasserdampf, terrestrischem und extraterrestrischem Staub auch Schwefelsäuren aus Vulkanausbrüchen und Spurenstoffe aus dem bio-geochemischen Kreislauf sowie der industriellen Produktion. Sie alle fallen mit dem festen Niederschlag, dem Schnee, aus. Der jährlich fallende Schnee schmilzt bei bestimmten klimatischen Bedingungen nicht. Er wird deponiert, akkumuliert und baut sich so zu einem Gletscher oder zu einem Eisschild auf.

Durch Metamorphose des Schnees zu Firn und weiter zu Eis wird die Zusammensetzung der Atmosphäre zum Zeitpunkt der Bildung von Eis archiviert. Daher ist das die Gasblasen umgebende Eis stets etwas älter als die darin eingeschlossene Luft. Aus den Lufteinschlüssen und den Aerosolen im Eis erschließen sich die chemischen Verhältnisse in der Paläoatmosphäre. Die Temperatur aus dieser Zeit erhält man aus dem Verhältnis der leichten zu den schweren Isotopen des Wasserstoffs oder des Sauerstoffs [Paterson, 1994] im Eis. Der Staubanteil gibt Aufschluß über den Grad der Windaktivität und über die Quellgebiete des Staubs. Liegt ein hoher Staubanteil vor, so deutet dies auf eine höhere Windaktivität in dieser Zeit hin. Die Eisschilde bilden somit ein bedeutendes Klimaarchiv.

In den letzten drei Jahrzehnten haben mehrere Wissenschaftlergruppen Eiskerntiefbohrungen vorgenommen. Von all diesen erfassen aber nur drei Eiskerne sowohl das Holozän, die letzte Glazialperiode Wisconsin (süddt. Würmeiszeit) als auch das letzte Interglazial Eem [Dahl-Jensen et al., 1997]:

Holozän:	von heute bis vor 11 500 Jahren vor heute
Wisconsin:	von 11 500 bis 110 000 Jahre vor heute
Eem:	110 000 bis 135 000 Jahre vor heute.

Diese drei Eiskerne sind Kerne der Tiefbohrprojekte Vostock, Greenland Ice Core Project (GRIP) und Greenland Ice Sheet Project 2 (GISP2). Der Eiskern der Tiefbohrung Vostok, in der Antarktis, ist mit einer Tiefenauflösung von 2m gemessen [Jouzel et al., 1996] worden. Die Kerne der letzten beiden Projekte, die man auf Grönland gebohrt hat, wurden mit einer Tiefenauflösung von cm untersucht. Die Eiskerne von GRIP und GISP2 bieten detaillierte und kontinuierliche Informationen der jüngsten Klimageschichte bis vor 135 000 Jahren [Dahl-Jensen et al., 1997].

Zur Interpretation der glaziologischen und geophysikalischen Meßergebnisse braucht man gute Kenntnisse der eisdynamischen Vorgänge. Wichtige Hilfsmittel hierbei sind numerische Modelle, die beispielsweise die Temperaturverteilung und Bewegung des Eisschildes simulieren. Als Eingangsparameter geht hier unter anderem die Eisdicke

ein [Huybrechts, 1993], die man mit dem Elektromagnetischen Reflexionsverfahren (EMR) bestimmen kann. Die Kenntnis der Schichtung des Eises und der Topographie des Untergrunds ist bei der Suche nach einer geeigneten Bohrlokation sehr hilfreich. So können Bohrungen an Lokationen vermieden werden, an denen ausgeprägte Eistektonik zu beobachten ist.

1.1 Zielsetzung

In den Jahren 1989 bis 1992 haben europäische Wissenschaftler die Tiefbohrung GRIP im Zentralteil, auf dem heute höchsten Punkt (Summit) des grönländischen Eiskörpers abgeteuft. Die Länge des an GRIP gebohrten Kerns beträgt 3029 m [Dansgaard et al., 1993]. Von 1989 bis 1993 führte eine Gruppe amerikanischer Wissenschaftler 28 km westlich davon die Tiefbohrung GISP2 durch. Die Länge des von GISP2 gebohrten Kerns beträgt 3053 m [Grootes et al., 1993].

Die Variation der physikalischen und chemischen Eigenschaften mit der Tiefe an den Kernen beträgt im Holozän (0-1625 m) nur 1% und im Glazial (1625-2790 m) etwa 5% [Alley et al., 1997]. Diese relativ gute Übereinstimmung der gemessenen Parameter in den beiden Kernen hält sich bis zu einer Tiefe von etwa 2700 m. Ab dieser Tiefe gibt es allerdings Diskrepanzen [GRIPMembers, 1993]. Dies erschwert insbesondere die Interpretation des letzten Interglazials, des Eem (2790-2865m). Eine Ursache für diese Unstimmigkeiten könnte in der Eistektonik und damit in einer Umschichtung des Eises zu suchen sein, weil an den Schichten der Eiskerne Faltungstrukturen beobachtet wurden.

Eine dritte von europäischen Wissenschaftlern im Jahr 1997 begonnene Tiefbohrung, North Greenland Ice Core Project (NGRIP), soll nun die durch die Diskrepanzen aufgetretenen Fragen klären. Diese neue Bohrlokation wurde aufgrund von Vorerkundungsflügen, welche 1995 von der NASA und der Universität von Kansas durchgeführt worden sind, über einem Untergrund ausgewählt, der über eine größere Fläche (50 km x 50 km) als eben vermutet wird [Dahl-Jensen et al., 1997]. Das Eem sollte dort aufgrund der niedrigeren Akkumulationsrate von $0,18 \frac{\text{mEisäq.}}{\text{Jahr}}$ in einer geringeren Tiefe und gleichzeitig im größeren Abstand zum Untergrund zu finden sein als an GRIP (Akkumulationsrate: $0,23 \frac{\text{mEisäq.}}{\text{Jahr}}$) [Dahl-Jensen et al., 1997].

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, die durch die vier Vorerkundungsflüge postulierte Ebenheit des Untergrundes nachzuweisen. Denn, ist der Untergrund im Bereich der Bohrlokation NGRIP weitgehend eben, so kann man erwarten, daß die Schichtung im Bereich des Interglazials Eem ungestört ist, und der neue Kern zur Klärung der Diskrepanzen der Ergebnisse zwischen den Kernen GRIP und GISP2 beitragen wird.

Zur Beschreibung des Untergrundes sollen Daten dienen, die mit dem flugzeuggestützten Elektromagnetischen Reflexionsverfahren (EMR) ermittelt wurden. Diese Arbeit erstellt anhand dieser Daten eine Karte der Verteilung der Eismächtigkeit sowie Karten der Topographie der Eisoberfläche und des Untergrundes.

Eine weitere Zielsetzung dieser Arbeit ist die Ausarbeitung und Kartierung ausgewählter interner Eisschichten, die im gesamten Meßgebiet kartiert und ihre Tiefenlagen zwischen den drei Bohrlokationen verfolgt werden. Besonders signifikante Gebiete werden in Kartenausschnitten aufgearbeitet. Durch die Bestimmung der Tiefenlage der ausgewählten Horizonte an den bereits datierten Bohrkernen können diese Reflexionshorizonte identifiziert und ihnen ein Depositionsalter zugeordnet werden [Hempel, 1994].

1.2 Das Meßgebiet

Die Bohrlokation NGRIP liegt 316 km nordnordwestlich von GRIP. Sie befindet sich im Zentralteil des grönländischen Eisschildes, auf der Eisscheide, die von GRIP nach Nordnordwesten verläuft.

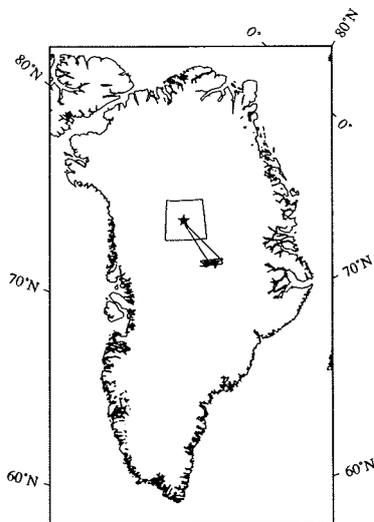


Abbildung 1.1: Übersichtskarte von Grönland mit Kennzeichnung des Meßgebietes.

In dieser Abbildung ist das Meßgebiet eingezeichnet, sowie der Verbindungsflug von zwischen NGRIP nach GISP2 und zurück.

Das Eis an der Oberfläche der Bohrlokation NGRIP fließt entlang der Eisscheide mit der sehr geringen Geschwindigkeit von $1,1 \frac{m}{Jahr}$ nach Nordnordwesten ab [Keller und Nielsen, 1997]. In dem Gebiet in der die Bohrlokation NGRIP liegt, findet an der Oberfläche so gut wie kein Schmelzen statt. Ein solches Gebiet wird Trockenschnee-Zone genannt.

Um eine Alterszuordnung der Reflexionshorizonte im Eis vornehmen zu können, wurden vom Meßgebiet zwei Profile zu den Lokationen der bereits datierten GRIP und GISP2 Eiskerne geflogen. Der Flug von NGRIP nach GRIP verläuft entlang der Eisscheide.

Das Meßgebiet erstreckt sich über 222 km in N-S-Richtung und 210 km in E-W-Richtung. Um etwaige Variationen des Felsuntergrundes zu erfassen, wurde im Jahr 1996 das Meßgebiet mit einem Profilabstand von 10 km in N-S- und in E-W-Richtung abgeflogen. Im darauffolgenden Jahr betrug der Profilabstand der Flüge rund um die Bohrlokation NGRIP etwa 2,5 km.

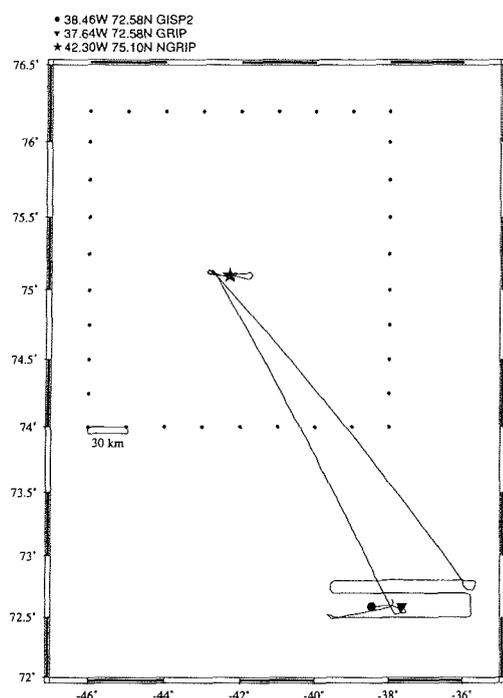


Abbildung 1.2: Übersicht des Meßgebietes mit den Verbindungsflügen nach GRIP und GISP2.

Das Meßgebiet ist durch die schwarzen Punkte eingegrenzt. Das Meßgebiet ist quadratisch ausgelegt, um die Datendichte in gleichmäßigem Abstand zu erhalten. Die Verbindungsflüge nach GRIP und GISP2 dienen als Hilfe bei der Identifizierung der Horizonte.

Es wurde mit insgesamt 16 Meßflügen vermessen. Die erfliegenen Profilkilometer ergeben zusammen eine Länge von nahezu 19000 km, von denen über 13300 km während der Kampagne 1996, die restlichen Kilometer im darauffolgenden Jahr 1997 zurückgelegt wurden.

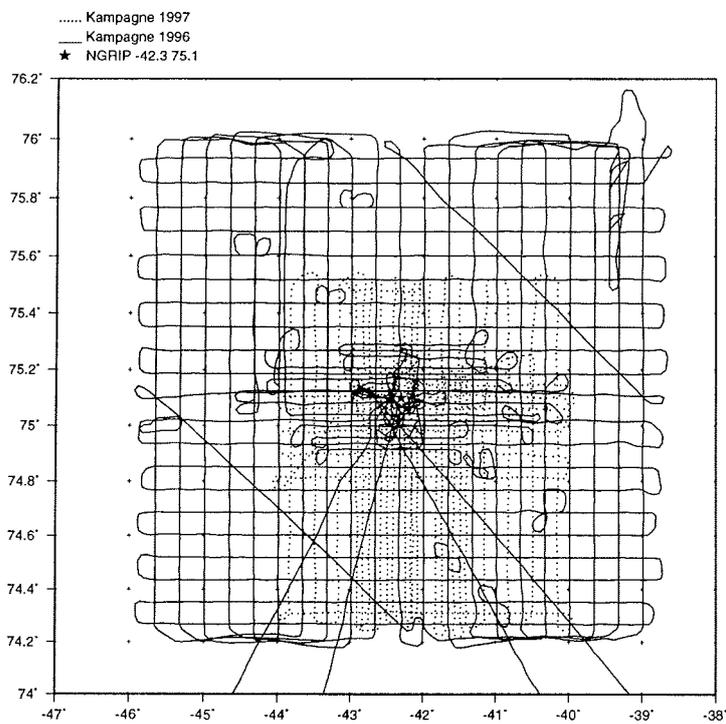


Abbildung 1.3: Verlauf der Fluglinien der Kampagnen 1996 und 1997.
Der Schwerpunkt der absolvierten Flüge liegt um NGRIP, um die nähere Umgebung der Bohrlokation möglichst detailliert zu erfassen.

Kapitel 2

Grundlagen des EMR-Verfahrens

2.1 Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Eis

Die Wechselwirkung elektrischer und magnetischer Wellen mit einem Medium werden vollständig durch die vier Maxwellgleichungen, den beiden Materialgleichungen und durch das Ohm'sche Gesetz beschrieben [Jackson, 1985]. Unter Annahme harmonischer Felder ($\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}$) gelten:

Die Maxwell'schen Gleichungen:

$$\nabla \vec{E} = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \vec{H} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu^* \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = i\omega\mu^* \vec{H} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = i\omega\epsilon^* \vec{E} \quad (2.4)$$

Die Materialgleichungen:

$$\vec{D} = \epsilon^* \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu^* \vec{H} \quad (2.6)$$

Das verallgemeinerte Ohm'sche Gesetz:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

Dabei stellen \vec{E} das elektrische Feld, \vec{B} die magnetische Induktion, \vec{D} die dielektrische Verschiebung, \vec{H} das magnetische Feld, ϵ^* die komplexe Dielektrizitätskonstante, μ^* die komplexe magnetische Permeabilität und ρ die elektrische Ladungsdichte dar. In das verallgemeinerte Ohm'sche Gesetz geht die elektrische Leitfähigkeit σ ein. Die Gleichung (2.1) gibt das Coulomb'sche Gesetz, Gleichung (2.2) die Quellenfreiheit des magnetischen Feldes, Gleichung (2.3) das Faraday'sche Induktionsgesetz und

Gleichung (2.4) das Ampère-Maxwell'sche Gesetz an.

Die Maxwellgleichungen lassen sich mit Rotation¹ der Gleichungen (2.3) und (2.4)

$$\begin{aligned}\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= -i\omega\mu^*(\nabla \times \vec{H}) & \nabla \times (\nabla \times \vec{H}) &= i\omega\mu^*(\nabla \times \vec{E}) \\ -\Delta \vec{E} &= -\omega^2\mu^*\epsilon^*\vec{E} & -\Delta \vec{H} &= -\omega^2\mu^*\epsilon^*\vec{H}\end{aligned}$$

umformen zu Wellengleichungen der Form:

$$\Delta \vec{E} - \omega^2\mu^*\epsilon^*\vec{E} = 0 \quad (2.8)$$

$$\Delta \vec{H} - \omega^2\mu^*\epsilon^*\vec{H} = 0 \quad (2.9)$$

2.1.1 Materialkonstanten von Eis

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in einem Medium wird von dessen magnetischen und dielektrischen Eigenschaften bestimmt, wobei für Eis folgendes gilt [Bogorodsky et al., 1985]:

1. Die magnetischen Eigenschaften:

Die komplexe magnetische Permeabilität ist das Produkt der relativen magnetischen Permeabilität μ_r und der magnetischen Permeabilität im Vakuum μ_0 . Da Eis nicht magnetisch ist, wird die relative magnetische Permeabilität μ_r gleich 1 gesetzt. Somit gilt

$$\mu^* = \mu_r\mu_0 = \mu_0 \quad (2.10)$$

2. Die dielektrischen Eigenschaften:

Setzt man Eis einem elektromagnetischen Feld aus, so findet Polarisation und Leitung statt. Die Dipole richten sich parallel zu dem äußeren Feld aus. Protonensprünge bestimmter Defekte im Eiskristall verursachen Polarisation (siehe Anhang). Ihre Rate ist proportional zu $e^{\frac{t}{\tau}}$. Die charakteristische Relaxationszeit τ hängt ab von der Wahrscheinlichkeit eines Protonensprungs und von der Temperatur. Diese Eigenschaften führen zu der Debye'schen Dispersionsbeziehung:

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' = \epsilon_r\epsilon_0 - i\frac{\sigma}{\omega} \quad (2.11)$$

Das bedeutet, daß die komplexe Dielektrizitätskonstante ϵ^* frequenzabhängig ist. In den Realteil geht die relative Dielektrizitätskonstante des Mediums ϵ_r und die Dielektrizitätskonstante im Vakuum ϵ_0 ein. Der Imaginärteil setzt sich aus der elektrischen Leitfähigkeit σ des Mediums und der Kreisfrequenz ω zusammen. Die elektrische Leitfähigkeit σ , die die Summe der Gleichstromleitfähigkeit

¹ $\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla\nabla\vec{A} - \nabla^2\vec{A}$

und der bei der jeweiligen Frequenz herrschenden Wechselstromleitfähigkeit bildet, ist für die Dämpfung elektromagnetischer Energie im Eis verantwortlich. Die Leitfähigkeit wird üblicherweise durch den Verlustwinkel eingeführt:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r \epsilon_0} \quad (2.12)$$

2.1.2 Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen

Mit dem Ansatz der harmonischen Felder ergibt sich für den Ausbreitungsfaktor k :

$$k^2 = \omega^2 \mu^* \epsilon^* \quad (2.13)$$

Äquivalent ist demnach die Theorie über die Dielektrizitätskonstante oder über die elektrische Leitfähigkeit zu betrachten. Diese Äquivalenz kann auch durch die vierte Maxwell'sche Gleichung 2.4 angegeben werden. Durch Einsetzen der Gleichung (2.7) in (2.4) erhält man:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \epsilon' \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma \vec{E} + \epsilon' \frac{\partial E}{\partial t} = \left(-i \frac{\sigma}{\omega} + \epsilon'\right) \frac{\partial E}{\partial t} = (-i\epsilon'' + \epsilon') i\omega \vec{E}$$

$$\nabla \times \vec{H} = i\omega \epsilon^* \vec{E}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v von elektromagnetischen Wellen in Eis läßt sich sowohl in Abhängigkeit von der Dielektrizitätskonstanten, als auch in Abhängigkeit vom Verlustwinkel herleiten:

$$\text{mit } \frac{k^2}{\omega^2} = \mu^* \epsilon^* = \frac{1}{v^2}$$

$$v = \begin{cases} v = \frac{1}{\sqrt{\mu^* \epsilon^*}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} & \text{mit } \mu^* = \mu_0 \quad \text{und } \mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{c^2} \\ \frac{E(t)}{E(0)} = e^{(\alpha+i\beta)z} = e^{i\vec{k}\vec{r}} e^{i\omega t} & \implies \beta z = \omega t \quad v = \frac{\omega}{\beta} \end{cases}$$

Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit gilt demnach:

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.14)$$

Änderungen der dielektrischen Eigenschaften des Mediums bewirken eine Veränderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit v . Für zunehmende Werte der Dielektrizitätskonstanten nimmt die Geschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen in Eis ab. Mit der Kenntnis des Verlaufs der relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ_r im Eisschild kann der Verlauf der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Eisschild ermittelt werden.

2.1.3 Reflexionskoeffizient

Eine Veränderung der Dielektrizitätskonstanten oder der Leitfähigkeit in den Schichten des Mediums, führt auch zur Änderung des spezifischen Brechungsindex n . Er ist aufgrund der Maxwell'schen Beziehung durch folgende Relation definiert:

$$n = \sqrt{\epsilon_r'} \quad (2.15)$$

Änderungen des spezifischen Brechungsindex n bedingen Reflexion und Brechung der elektromagnetischen Wellen an den Grenzschichten [Hecht, 1989; Hempel, 1994]. Analog zur Optik gelten:

- Die einfallenden, reflektierten und gebrochenen Strahlen liegen alle in einer Einfallsebene.
- Es gilt das Reflexionsgesetz, wonach der Einfallswinkel gleich dem Ausfallwinkel ist: $\theta_e = \theta_r$.
- Es gilt das Snellius'sche Brechungsgesetz: $\frac{\sin \theta_e}{\sin \theta_t} = \frac{n_t}{n_e}$.

Das Amplitudenverhältnis der einfallenden zur reflektierten bzw. gebrochenen Welle (wobei \vec{E} senkrecht zur Einfallsebene ist) wird über die Fresnel'schen Gleichungen angegeben, die den Amplitudenreflexionskoeffizienten r_{\perp} und den Amplitudentransmissionskoeffizienten t_{\perp} beschreiben:

$$r_{\perp} = \frac{E_r}{E_{e\perp}} = \frac{n_e \cos \theta_e - n_t \cos \theta_t}{n_e \cos \theta_e + n_t \cos \theta_t}$$

$$t_{\perp} = \frac{E_t}{E_{e\perp}} = \frac{2n_e \cos \theta_e}{n_e \cos \theta_e + n_t \cos \theta_t}$$

Der Verlust der Energie des Signals in der ersten Fresnel'schen Zone geht maßgeblich in die spätere Ermittlung der Meßgenauigkeit mit ein. Die veränderten dielektrischen Eigenschaften im Eis werden durch den allgemeinen Leistungs-Reflexionskoeffizienten R ausgedrückt [Paren, 1981]:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_2^*} - \sqrt{\epsilon_1^*}}{\sqrt{\epsilon_2^*} + \sqrt{\epsilon_1^*}}$$

An diesem Punkt kann durch weitere Betrachtung des Reflexionskoeffizienten die Frage beantwortet werden, ob die Dielektrizitätskonstante und/oder die Leitfähigkeit variieren. Mit der Annahme: $\epsilon^* = |\epsilon^*|e^{-i\delta}$ ergibt sich die obige Gleichung zu:

$$R = \frac{1}{16} \left(\left[\frac{\Delta \epsilon^*}{\epsilon^*} + \tan \delta \Delta \delta^2 \right]^2 + [\Delta \delta] \right)^2$$

Diese Gleichung wird für Änderungen der Dielektrizitätskonstanten zu

$$R = \left(\frac{\frac{1}{4} \Delta \epsilon'}{\epsilon'} \right)^2 \quad \text{mit } \Delta \epsilon \neq 0 \quad (2.16)$$

und für Änderungen der Leitfähigkeit zu

$$R = \left(\frac{1}{4} \Delta (\tan \delta) \right)^2 \quad \text{mit } \Delta \delta \neq 0 \quad (2.17)$$

Elektromagnetische Wellen werden beim Übergang von einer Schicht zur anderen reflektiert und transmittiert, genau dann wenn sich entweder die Dielektrizitätskonstante oder die Leitfähigkeit ändert.

2.1.4 Eindringtiefe elektromagnetischer Wellen

Zu den charakteristischen Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen zählt ihre Fähigkeit, Energie zu transportieren. Weil jedoch Eis Energie absorbiert, ist das Eindringvermögen der Wellen begrenzt. Es kommt zum Energieverlust. Der totale Energieverlust des Signals auf dem Weg zum Untergrund und zurück setzt sich zusammen aus folgenden Verlusten [Bogorodsky et al., 1985]:

- **Verluste bei Reflexion der Welle an Eisoberseite und Transmission an Eisunterseite** N_R

Bei der Brechung der Welle erfährt die Welle nach dem Fresnel-Huygens'schen Prinzip eine Nahfeldbeugung. Die dabei entstehende Störung in der ersten Fresnel'schen Zone bedeutet einen Verlust der Energie von $\frac{\lambda}{4}$, mit λ gleich Wellenlänge. Daher vergrößert sich der Fehler bei der Bestimmung des Reflexionsansatzes für einen 600 ns-Puls um 12,6 m und für einen 60 ns-Puls um 1,4 m, worauf im Kapitel 6.4 näher eingegangen wird.

- **Absorption** N_A

Energieverlust bedeutet stets eine Abnahme der Strahlungsintensität auf dem zurückgelegten Weg, der Eindringtiefe z : $\frac{dE}{dz} = \ln \frac{E(z)}{E(0)} = \ln \frac{E(0) e^{-\alpha z}}{E(0)} = \alpha z$. Der Energieverlust entsteht durch die Rotation der Defekte im Eiskristall. Für die Absorption der Welle gilt dann:

$$N_A = -10 \log \left(\frac{dE}{dz} \right)^2 = -20 \log(\alpha z) \quad \left[\frac{dB}{m} \right]. \quad (2.18)$$

- **geometrischer Verlust** N_F

Ein Eisschild besteht aus zwei Bereichen, dem Firnkörper und dem Eiskörper. Dabei nimmt die Dichte der Schichten mit der Tiefe kontinuierlich zu. Tritt eine Welle in diese Schichten ein, so wird sie stets zum Lot hin gebrochen.

Das führt zur Fokussierung der elektromagnetischen Welle. Der geometrische Verlust ist proportional zum Maß der Brechung. Wird die Welle stärker gebrochen, so nimmt der geometrische Verlust zu. Der geometrische Verlust ist durch die Radien des ungebrochenen (R) und des gebrochenen (r) Strahlungskegels gegeben durch:

$$N_F = -20 \log\left(\frac{R}{r}\right) \left[\frac{dB}{m}\right]. \quad (2.19)$$

- **sphärische Divergenz** N_D

Die sphärische Divergenz beschreibt den Energieverlust bei zunehmendem Abstand der Kugelwellen von der Quelle. Denn dabei muß die gleiche Energie auf eine immer größere Fläche verteilt werden, wobei für ein einzelnes Flächenelement die Energie abnimmt. Es ergibt sich so für den Verlust:

$$N_D = -20 \log(G\lambda) = -20 \log\left(\frac{\lambda}{A}z\right) \left[\frac{dB}{m}\right]. \quad (2.20)$$

Aufgrund dieses Verlustes muß bei der Bearbeitung eine Amplitudenregelung (AGC) eingesetzt werden.

- **Streuverlust** V_{streu}

Streuverluste treten an Inhomogenitäten im Eisschild oder am Übergang vom Eisschild zum Untergrund auf. Diese können z.B. Eislinnen oder Bereiche mit temperiertem Eis sein. Aufgrund der mittleren Durchschnittstemperatur in Zentralgrönland von -32°C [Gundestrup et al., 1993] können Inhomogenitäten in diesem kalten Eis nur selten vorkommen. Daher werden Streuverluste vernachlässigt.

2.2 Das elektromagnetische Reflexionsverfahren

Eis ist ein Dielektrikum und kann von elektromagnetischen Wellen durchdrungen werden. An Übergängen unterschiedlicher dielektrischer Eigenschaften werden die elektromagnetischen Wellen reflektiert und transmittiert. Diese Eigenschaft wird bei dem elektromagnetischen Reflexionsverfahren genutzt.

2.2.1 Erfassung der Eismächtigkeit und der inneren Struktur

In Abbildung 2.1 ist das Prinzip des elektromagnetischen Reflexionsverfahrens dargestellt. Das Flugzeug fliegt in einem bestimmten Abstand zur Eisoberfläche.

Die abgestrahlte Welle erfährt eine erste Reflexion und Transmission an der Eisoberfläche, die sie bei jeder weiteren sprunghaften Änderungen in den dielektrischen Eigenschaften im Eisschild wieder erfährt, wie z.B. am Übergang Luft-Eis und Eis-Fels, aber auch an internen Schichtgrenzen. Die reflektierte Welle wird registriert.

In Abbildung 2.1 stellen die vier parallelen Pfeile die reflektierten Wellen dar. Es kommt aber auch vor, daß keine reflektierte Welle empfangen wird. Das kann verschiedene Ursachen haben. Nasser Schnee an der Eisoberfläche absorbiert stärker als trockener Schnee. Liegt der Felsuntergrund so tief, bzw. ist das Eis so mächtig, so daß die Energie des Signals nicht ausreicht, um den Felsuntergrund zu erreichen, so kommt dann auch kein Rücksignal. Oder die Amplitude des reflektierten Signals ist mittlerweile so gering, daß es von Rauschen überschattet wird.

Aus der zeitlichen Differenz zwischen dem Auftreffen der Welle auf die Eisoberfläche und der Reflexion an der Unterseite des Eisschildes, an dem Übergang von Eis zu Fels oder Wasser, erhält man die Zwei-Weg-Laufzeit der elektromagnetischen Welle im Eis. Wie in Abschnitt 2.1.2 erwähnt, ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle im Eis mit veränderten dielektrischen Eigenschaften.

Das Alfred-Wegener-Institut (AWI) setzt das Flugzeug POLAR 2 vom Typ DO 228 für Meßflüge ein. Von diesem Flugzeug aus wird das EMR-System betrieben. Das System entstand unter der Federführung des Alfred-Wegener-Instituts in Zusammenarbeit mit dem Arbeitsbereich HF-Technik der TU Hamburg-Harburg, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und der Aerodata Flugmeßtechnik GmbH [Nixdorf et al., 1997].

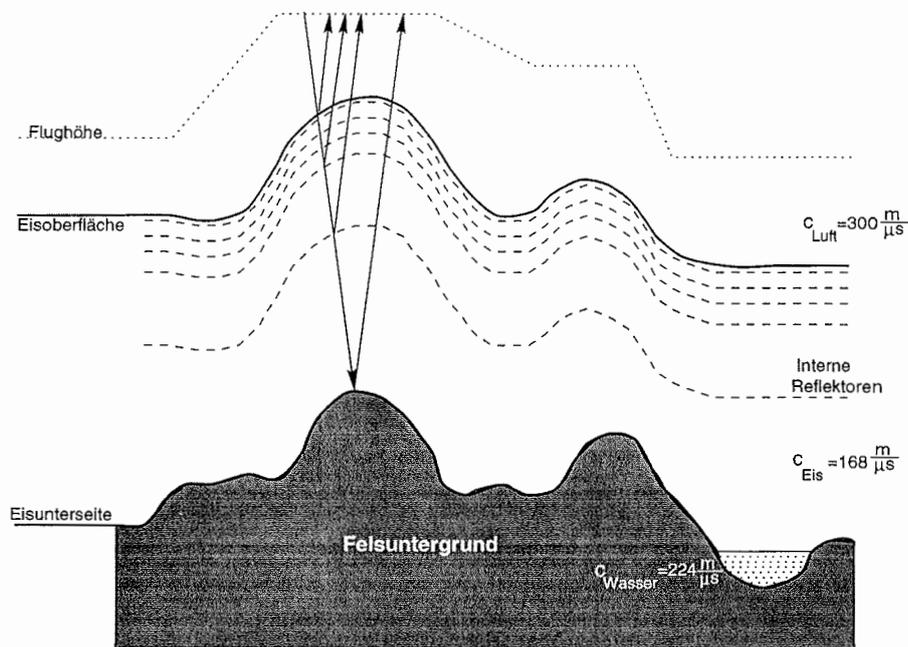


Abbildung 2.1: Das Prinzip des elektromagnetischen Reflexionsverfahrens (EMR). Das Signal wird von den Antennen am Flugzeug abgestrahlt und an Schichten unterschiedlicher dielektrischer Eigenschaften wie z.B. an der Eisoberfläche, Eisunterseite und an internen Schichten, reflektiert. Die reflektierte Welle wird im Flugzeug registriert.

2.2.2 Erfassung und Aufbereitung der Daten

Das Sendesignal wird durch die Sendeeinheit aufbereitet, das Rücksignal durch die Empfängereinheit registriert und das gesamte System wird durch den Zentralen Bordrechner gesteuert. Die Aufzeichnung des reflektierten Signals wird beim Abstrahlen des Sendesignals gestartet.

Die Gliederung des Meßsystem in eine Sendeeinheit, Empfängereinheit und den Zentralen Bordrechner ist in der Abbildung 2.2 als Blockschaltbild dargestellt. Sie stellt die technische Realisierung des EMR-Verfahrens dar.

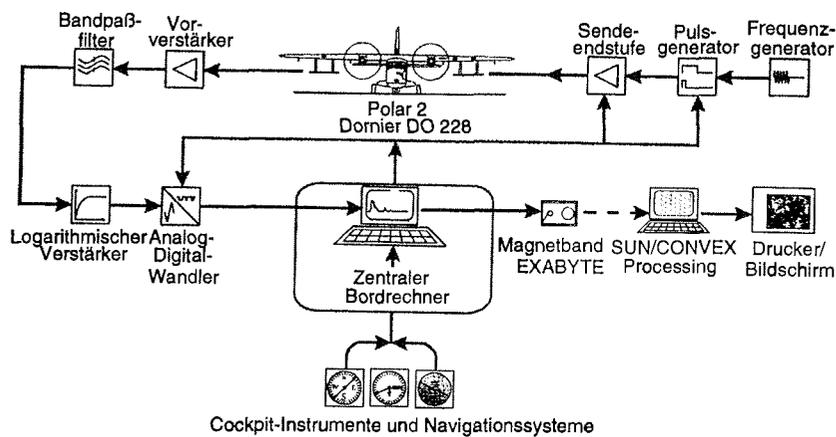


Abbildung 2.2: Blockschaltbild zur Signalbearbeitung.

Die Sendeeinheit, Empfängereinheit und der Zentrale Bordrechner befinden sich im Flugzeug. Ab der Aufzeichnung auf ein Magnetband können die weiteren Schritte auch außerhalb des Flugzeugs stattfinden.

Die Sendeeinheit: Ein Sinusgenerator bereitet das Signal auf. Es erzeugt Wellenzüge, sogenannte wavelets, mit einer Frequenz von 150 MHz. Ein Pulsgenerator erzeugt mit einer Pulswiederholfrequenz von 20 kHz (d.h. alle 50 μ s) alternierend im sogenannten "toggle-mode" einen Puls von der Länge 60 ns oder 600 ns. Die Pulsleistung des erzeugten Pulssignals (engl. burst) wird in der nachfolgenden Sende-Endstufe mit einem Vorverstärker erhöht und an die Antennen unter der linken Tragfläche weitergeleitet. Diese zwei Antennen mit je zwei Dipolen strahlen das Signal ab. Die Wellenlänge des Signals in der Luft beträgt 2 m.

Die Empfängereinheit: Zwei Antennen mit je einem Dipol sind als Empfängerantennen unter der rechten Tragfläche montiert. Das reflektierte, ankommende Signal wird verstärkt. Systeminterne und externe Rauschsignale werden mit einem Bandpaß unterdrückt. Ein logarithmischer Detektor richtet das Signal gleich und nimmt zugleich eine Signalkompression vor, damit es von einem analogen in ein digitales Signal gewandelt werden kann. Der darauffolgende Analog-Digital-Wandler bereitet die Daten zur Aufzeichnung auf.

Der Zentrale Bordrechner: Der Zentrale Bordrechner steuert den Pulsgenerator, die Sendeendstufe, den Analog-Digital-Wandler sowie die Datenaufzeichnung. Neben der Registrierung des Nutzsignals werden unter anderem die Daten der Cockpit- und Navigationsinstrumente, wie Höhe, Lage, Geschwindigkeit, Beschleunigung und GPS Position des Flugzeugs gespeichert. Die Daten werden auf 8 mm Magnetbändern (EXABYTE) aufgezeichnet.

Die Schritte bis hierher erfolgen ausschließlich im Flugzeug. Sind die Daten auf den Magnetbändern aufgezeichnet, kann die weitere Bearbeitung außerhalb des Flugzeuges vorgenommen werden. So kann bereits während der Feldkampagne ein erster Einblick in die Daten genommen werden, um gegebenenfalls Änderungen im System vorzunehmen. Nach Abschluß der Feldkampagne werden die Daten auf den Magnetbändern in bekannte seismische Datenformate konvertiert und mit gängigen Methoden der seismischen Signalverarbeitung weiterbearbeitet.

2.2.3 Auflösungsvermögen der Daten

- **Horizontale Auflösung**

Bei dem oben aufgeführten System wird alle $50 \mu\text{s}$ (also 20 kHz) ein Signal abgestrahlt. Bei einer Geschwindigkeit des Flugzeugs von 130 kts (entspricht $67 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) ergibt das eine horizontale Auflösungsrate von $\frac{67 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{20000 \text{ Hz}} = 0,00335 \text{ m}$. Die Daten werden aber nur alle 50 ms, also mit 20 Hz, aufgezeichnet. Somit sind mittlerweile bereits 1000 Schuß abgestrahlt worden. Systembedingt wird eine gewisse Zeit zur Datenverarbeitung benötigt, so daß derzeit 200 Spuren zu einer Spur gestapelt und die verbleibende Zeit zur Registrierung und zu Rechenoperationen verwendet werden. Die horizontale Auflösung ergibt sich zu:

$$\frac{67 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{20 \text{ Hz}} = 3,35 \text{ m}.$$

Der Abstand zwischen zwei Spuren beträgt also 3,35 m.

- **Vertikale Auflösung**

Für die vertikale Auflösung ergeben sich je nach Pulslänge verschiedene Werte. Eine theoretische vertikale Auflösung errechnet sich in Eis für den 60-ns-Puls von:

$$60ns \cdot \frac{(0,168) \frac{m}{ns}}{2} = 5m.$$

Für den 600-ns-Puls ergibt sich ein Wert von:

$$600ns \cdot \frac{(0,168) \frac{m}{ns}}{2} = 50,4m.$$

Systembedingt ergeben sich jedoch andere Werte für die vertikale Auflösung, da die Abtastrate 13,333 ns beträgt. Es werden also nur alle 13,333 ns Daten erfaßt. Das verändert aber nur die vertikale Auflösung für den 60-ns-Puls, denn dieser überspannt somit 5 Datenwerte, da $\frac{60ns}{13,333ns} = 4,5$ Datenwerte ergeben. Damit errechnet sich für den 60-ns-Puls eine systembedingte vertikale Auflösung von:

$$5 \cdot 13,333ns \cdot \frac{(0,168) \frac{m}{ns}}{2} = 5,6m.$$

Der 600-ns-Puls überspannt 45 Datenwerte, da $\frac{600ns}{13,333ns} = 45,0$ Datenwerte ergeben. Damit errechnet sich für den 600-ns-Puls eine systembedingte vertikale Auflösung von:

$$45 \cdot 13,333ns \cdot \frac{(0,168) \frac{m}{ns}}{2} = 50,4m.$$

2.3 Vergleich geophysikalischer Methoden zur Eisdickenbestimmung

2.3.1 Elektromagnetische Verfahren

Das elektromagnetische Reflexionsverfahren (EMR) wird seit Ende der 50er Jahre zur Untersuchung von Inlandeisen, Schelfeisen und Gletschern eingesetzt. Es findet aber auch in anderen Bereichen Anwendung, wie z.B. in der Ingenieurgeophysik oder in der Archäometrie zur Bestimmung archäologischer Befunde [Goodman, 1994].

Um die Eismächtigkeit von großen Eisschilden zu bestimmen, wird heute standardmäßig das EMR-Verfahren eingesetzt. EMR-Systeme können sowohl am Boden [Hempel und Thyssen, 1992] gezogen, z.B. von einem Skidoo, als auch von einem Flugzeug aus betrieben werden. Der Vorteil eines flugzeuggestützten Systems liegt darin, daß man in kurzer Zeit eine relativ große Fläche überdecken kann.

Mit der Topographie der Eisoberfläche und der Eismächtigkeit läßt sich die Topographie des Untergrundes ableiten. Die Kenntnis der Topographie des Untergrundes und der Verlauf interner Reflexionshorizonte ist bei der Interpretation der Schichtung, z.B. zum Erkennen von Verfaltungen, wichtig.

Aus der Variation der Eismächtigkeit zwischen den Horizonten lassen sich Rückschlüsse auf die Verteilung der Akkumulationsraten ziehen und eventuell die Wanderung einer Eisscheide rekonstruieren. In Massenbilanzrechnungen gehen als Eingangsparameter die Variationen der Eismächtigkeit, Fließgeschwindigkeiten und Verformungsraten ein. Diese Massenbilanzparameter geben bei wiederholter Messung Auskunft über räumliche und zeitliche Variation des Massenflusses.

Im übrigen kann anhand des Reflexionskoeffizienten elektromagnetischer Wellen auf die Beschaffenheit des Untergrundes geschlossen werden. So sind subglaziale Seen in der Antarktis mit Hilfe des EMR-Verfahren erkannt worden [Siegert et al., 1996]. Auf die technischen Details des elektromagnetischen Reflexionsverfahrens wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

2.3.2 Seismische Verfahren

Zur Bestimmung der Eismächtigkeit wurde früher bei größeren Eismächtigkeiten die seismische Reflexionsmethode und bei kleineren die Refraktionsmethode eingesetzt [Miller, 1971; Bogorodsky et al., 1985]. Der Schuß wird in einem Bohrloch abgegeben. Dabei werden akustische Wellen erzeugt, die an Schichten unterschiedlicher akustischer Impedanz reflektiert und refraktiert werden. Der Zeitpunkt des zurückkommenden Signals wird von den Geophonen, die in das Eis gesteckt sind, registriert

und an eine Speichereinheit zur Aufzeichnung weitergegeben. Die Differenz der Zeitpunkte zwischen dem Senden und dem Empfang der zurückkommenden Welle ergibt die Laufzeit der Welle im Eis. Die Eisdicken können mit einer Genauigkeit von $\pm 5\%$ bestimmt werden [Bogorodsky et al., 1985].

Das seismische Verfahren weist bei einem Vergleich mit dem EMR-Verfahren einige Nachteile auf. Es setzt ein Bohrloch voraus, das zu bohren mit einem relativ hohen zeitlichen und logistischen Aufwand verbunden ist. Für den Einsatz von Sprengstoff müssen hohe Sicherheitsvorkehrungen für den Transport getroffen werden, und das Zünden des Sprengstoffs darf nur durch dazu ermächtigte Personen erfolgen. Abgesehen von diesen Nachteilen, ist der Einsatz des Meßsystems in spaltenreichen Regionen auf dem Eisschild nur bedingt möglich.

Im Gegensatz zur Seismik kann das EMR-Verfahren auch von Flugzeugen aus eingesetzt werden. Durch den Einsatz des EMR-Verfahrens, insbesondere der in Flugzeugen eingebauten Systeme, ist die Anwendung des seismischen Reflexions- und Refraktionsverfahrens zurückgegangen und der Meßfortschritt erheblich beschleunigt worden [Bogorodsky et al., 1985]. Seismische Verfahren werden auch heute noch zur Untersuchung der Felskruste unter dem Eis oder Wasser eingesetzt.

2.3.3 Gravimetrische Verfahren

Gravimetrische Verfahren basieren darauf, daß die Dichte des Eises deutlich geringer ist als die von Gestein. Zur Bestimmung der Eismächtigkeit setzt diese Methode voraus, daß ein Bezugspunkt mit bekannter Schwere sowie die Dichte des Gesteins des Felsuntergrundes, geographische Position und topographische Höhe des Messpunktes bekannt sind. Das kann insofern problematisch werden, da keine Gesteinsprobe des Felsuntergrundes zu bekommen ist und die Dichte somit abgeschätzt werden muss. Auch die Topographie des Untergrundes und somit der Eismächtigkeit muss abgeschätzt werden [Bull und Hardy, 1956; Behrendt, 1962].

Änderungen der Felstopographie und der Eismächtigkeit sowie die Unkenntnis der Beschaffenheit des Felsuntergrundes kann dabei leicht zu großen Fehlern führen. Daher werden gravimetrische Verfahren in der Glaziologie meist nur in Verbindung mit seismischen Verfahren eingesetzt, um so die Abschnitte zwischen den seismischen Meßpunkten zu interpolieren [Bentley und Ostenso, 1961].

Kapitel 3

Entstehung, Aufbau und Eigenschaften von Eisschilden

Der Wasserdampf in der Atmosphäre geht bei bestimmten Temperaturen vom gasförmigen in den festen Aggregatzustand über, entweder durch Sublimation, oder die Wassertröpfchen in der Atmosphäre gefrieren und kristallisieren als fester Niederschlag, Schnee, aus. Schnee geht durch verschiedene Prozesse in Firn über. Andere Prozesse der Metamorphose, die jetzt diskutiert werden, wandeln den Firn in Eis um.

Bislang bekannt sind 14 verschiedene Phasen von Wasser, wobei neun der Phasen als Wasser in gefrorenem Zustand, als Eis, vorkommen [Fletcher, 1970] (Abbildung 3.1). Das Wassermolekül bilden ein Sauerstoffatom und zwei Wasserstoffatome. In der Natur findet man Eis stets hexagonal kristallisiert vor. Eis I_h kristallisiert im Kristallsystem $P6_3/mmc$. Dabei bezeichnet P das primitive Kristallgitter; 6_3 die hexagonale Kristallstruktur, m die Spiegelebenen und c eine Gleitebene. Eis kann man also auch als ein monomineralisches Gestein betrachten. Die Dichte des reinen Eises $\rho = 0,92 \frac{g}{cm^3}$ ist zwar geringer als bei den meisten Gesteinen¹, aber es besitzt eine Härte, die in der Größenordnung von Gesteinen liegt.

Da der Schmelzpunkt von Eis bei Atmosphärendruck bei $0^\circ C$ liegt, der von vielen Gesteinen aber bei einigen $100^\circ C$, weist Eis viskose und elastische Eigenschaften auf. Daher ist ein Eisschild stets in Bewegung. In der Glaziologie wird zwischen kaltem Eis und temperiertem Eis unterschieden. Die Temperatur des temperierten Eises entspricht stets dem Druckschmelzpunkt, die des kalten Eises liegt darunter.

Häufig wird jedoch das Eis in den Polargebieten als polares Eis, und Eis von Gletschern, z.B. die der Anden, des Himalaya oder der Alpen, als Gletschereis bezeichnet. Polares Eis und Gletschereis unterscheiden sich nur aufgrund ihrer geographischen Lage. Dar-

¹Die Dichte von Sedimentgesteinen liegt bei $1,92-2,7 \frac{g}{cm^3}$, von magmatischen Gesteinen bei $2,52-3,15 \frac{g}{cm^3}$ und von metamorphen Gesteinen bei $2,60-3,37 \frac{g}{cm^3}$.

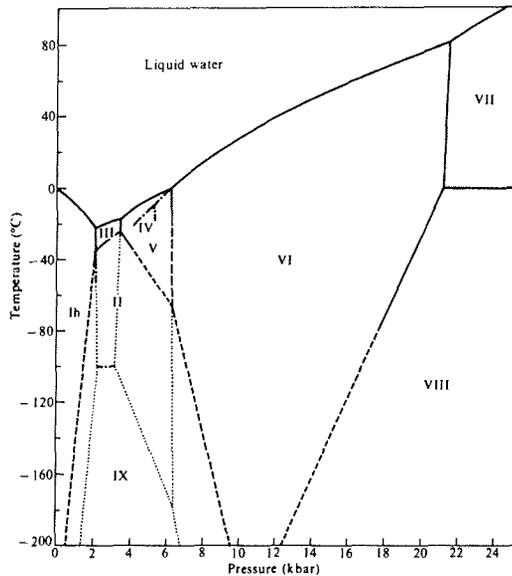


Abbildung 3.1:
Das Phasendiagramm von Eis, entnommen aus Fletcher [1970].
Eis der Phase I_h kristallisiert hexagonal, I_c , VII und VIII kubisch, II rhomboedrisch, III, VI und IX tetragonal und V monoklin. L gibt die flüssige Phase des Wassers an. Die gestrichelten Linien deuten an, daß der Verlauf der Linie hier noch unzureichend bekannt ist. Die gepunkteten Linien geben metastabile Bereiche zweier benachbarter Phasen an.

aus resultieren Unterschiede in ihrem Gehalt von Spurenelementen und Staubanteil, aber nicht in den chemischen und physikalischen Eigenschaften. Im Rahmen dieser Arbeit wird zwischen Eis und reinem Eis unterschieden. Reines Eis hat keine Spurenelemente, Defekte und Ablagerungen und kommt in der Natur sehr selten vor. Das Eis, das hier Gegenstand der Untersuchung ist, ist natürliches Eis, das hexagonal kristallisiert. Mit der Bezeichnung Eis ist im Rahmen dieser Arbeit Eis I_h gemeint.

3.1 Transformation von Schnee in Eis

Die Transformation von Schnee in Eis ist in der Abbildung 3.2 dargestellt. Bei bestimmten Temperaturen in der Atmosphäre sublimiert der Wasserdampf entweder von seinem gasförmigen Aggregatzustand in den festen, d.h. es bildet sich Reif, oder die Wassertröpfchen in der Atmosphäre gefrieren und kristallisieren als fester Niederschlag und fallen als Schnee aus.

Der Neuschnee ist Gravitationskräften ausgesetzt. Sie drücken die neu gefallenen Schneekristalle auf die bereits deponierten Schneeschichten, wobei sie brechen und ihre Form ändern. Außerdem deformiert der Wind die Kristalle, indem er sie transportiert und umlagert.

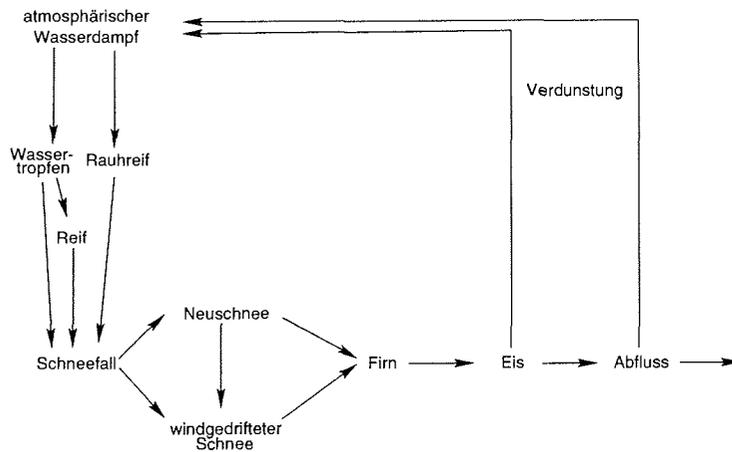


Abbildung 3.2: Kreislauf der festen Phase des Wasserdampfs.

Der atmosphärische Wasserdampf gefriert oder sublimiert in die feste Phase und fällt als Schnee aus. Durch die Schneemetamorphose entsteht Firn. Firn wird durch Rekristallisation und Kriechen zu Eis. Durch Schmelzen und Verdunstung von Eis oder Eisbergkalben wird der Kreislauf geschlossen. Gezeichnet nach Wilhelm [1975].

Die Vorgänge bei der Metamorphose von Schnee in Firn und weiter in Eis werden in vier Prozesse eingeteilt [Paterson, 1994] und wie folgt charakterisiert:

1. **Setzung:** Neu gefallener Schnee an der Oberfläche eines Eisschildes hat eine Dichte von $0,3 \frac{g}{cm^3}$ bis $0,4 \frac{g}{cm^3}$. Der Wind verdichtet den Neuschnee mechanisch, indem er die hexagonalen Kristalle der Schneeflocken bricht. Weitere Verdichtung des Schnees erfolgt durch Setzung. Dabei werden einzelne Moleküle innerhalb des Kristalls verschoben, um auf eine energetisch günstigere Form zu kommen. So findet eine Umordnung durch Oberflächen- und Volumendiffusion statt. Bei $0,4 \frac{g}{cm^3}$ bilden sich erste Firnkörner. Maximal durch Setzung erreichbar ist eine kritische Dichte von $0,55 \frac{g}{cm^3}$.
2. **Rekristallisation:** Weitere Kompaktierung geschieht durch molekulare Diffusion. Bei diesem Vorgang ändern sich Form und Größe der Kristalle. Die Kontaktflächen der Kristalle nehmen zu, es entstehen Firnkörner. Größere Firnkörner wachsen auf Kosten der kleineren. Durch Rekristallisation kann eine Dichte von maximal $0,73 \frac{g}{cm^3}$ erreicht werden.

3. **Kriechen:** Bei der Dichte von $0,73 \frac{g}{cm^3}$ ist die Luft in Räumen zwischen den Körnern eingegrenzt. Der Luftaustausch zwischen den Räumen erfolgt über Kanäle an die Oberfläche. Verformt sich das Eis, kann sich die Dichte weiter erhöhen. Wegen der hexagonalen Kristallstruktur bricht die Verbindung zwischen den einzelnen Schichten bei Druck einfacher auf als innerhalb der Schicht. So beginnt das Eis zu gleiten und deformiert sich. Dabei bilden sich abgeschlossene Luftblasen neben dem Eiskristall. Dieser Mechanismus dominiert, bis das Eis eine Dichte von $0,83 \frac{g}{cm^3}$ erreicht hat.
4. **Kompression:** Bei der Dichte von $0,83 \frac{g}{cm^3}$ bildet sich schließlich Eis. Die luftgefüllten Zwischenräume der Körner sind bei dieser Dichte abgeschlossen. Weiter zunehmen kann die Dichte nur, wenn die Luftblasen in Folge der Kriechbewegungen des Eises komprimiert werden. Dabei wird die in den Luftblasen enthaltene Luft in das Eiskristall eingebaut. Es bilden sich die sogenannten Clathrate. Die maximal erreichbare Dichte durch diesen Prozeß liegt bei $0,917 \frac{g}{cm^3}$. Die Dichte von reinem (defekt- und abgelagerungsfreiem) Eis liegt bei $0,920 \frac{g}{cm^3}$ [Petrenko, 1993a].

3.2 Aufbau und innere Struktur von Eisschilden

Wenn der gefallene Schnee deponiert wird und nicht wegschmilzt, kann sich ein Eisschild bilden. Klimatische Voraussetzungen, die diese Bedingung erfüllen, sind in höheren geographischen Breiten und in den Hochgebirgen der mittleren Breiten erfüllt.

Ein Eisschild läßt sich in verschiedene Zonen einteilen, in denen der neu gefallene Schnee unterschiedlichen Bedingungen ausgesetzt ist (siehe z.B. Paterson [1994]). Das Gebiet, in dem die Messungen dieser Arbeit durchgeführt worden sind, liegt in einer Trockenschnee-Zone. Der jährliche Schneezutrag ist in so großen Gebieten wie Grönland nicht überall gleich. Das führt zu unterschiedlichen Akkumulationsraten, die wiederum die Fließeigenschaften beeinflussen. Die unterschiedliche Auflast führt so zu einer Fließbewegung des Eises und weiter zur Deformation des Eisschildes.

Der schematische Querschnitt durch einen Eisschild in Abbildung 3.3 zeigt, daß der am Summit gefallene Schnee mit zunehmender Dicke des Eiskörpers nach und nach kompaktiert wird und radial abfließt. Der Eisfluß folgt dabei der größten Oberflächenneigung. Dieses Schema gilt aber auch für eine Eisscheide. Von einer Eisscheide fließt das abgelagerte Eis senkrecht zu Potentiallinien (Höhenlinien) dazu ab. Bei einer Eisscheide muß noch die Bewegung des Eises entlang der Eisscheide berücksichtigt werden.

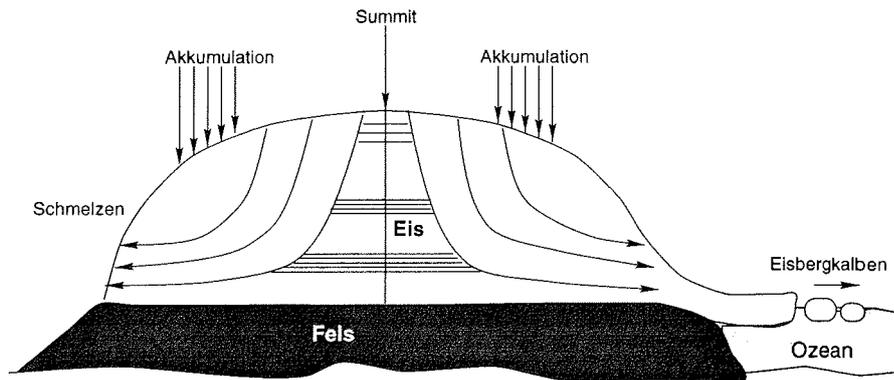


Abbildung 3.3: Modell eines Eisschildes.

Diese Betrachtung gilt sowohl für eine Eisscheide als auch für den Summit. Die Akkumulation (Schneezutrag) wird bei einem Gletscher im stationären Zustand durch Ablation (Eisbergkalben, Schmelzung) ausgeglichen. Ein Eisschild kann nur dann wachsen, wenn die Differenz aus Akkumulation und Ablation größer 1 ist.

Bei der Beschreibung des Meßgebietes in 1.2 wurde erwähnt, daß sich die Bohrlokation NGRIP auf einer Eisscheide befindet. Nach der Abbildung 3.3 fließt das Eis demnach von dieser Eisscheide vorwiegend vertikal ab. Diese Eigenschaft muß vor allem bei der Interpretation der internen Horizonte berücksichtigt werden.

3.3 Änderung der Dichte mit der Tiefe

Schnee und Firn bestehen zum großen Teil aus Luft, die Schneekristalle und Firnkörner enthält. Eis dagegen enthält Luftblasen oder mit in den Kristall eingebaute Luftmoleküle, die sogenannten Chlathrate oder Lufthydrate. Dabei nimmt die Dichte von Schnee zu Firn zu Eis zu.

Die Dichte von Eiskernen wird standardmäßig durch Wägung ermittelt. Seit einigen Jahren haben sich auch noch andere Verfahren bewährt: die Messung der Absorption von γ - oder Röntgenstrahlen. Das γ -Verfahren hat sich bereits in der Materialforschung [Smith und Whiffin, 1952], bei der Dichtebestimmung von Sedimenten [Gerland, 1992] oder von kristallinen Gesteinen [Bücker et al., 1990] bewährt und wurde auch schon oft bei Eis erfolgreich angewandt [Minikin und Kipfstuhl, 1992; Gerland et al., 1994].

Die Dichte-Tiefen-Funktion in der Abbildung 3.5 stammt von Dichtemessungen am

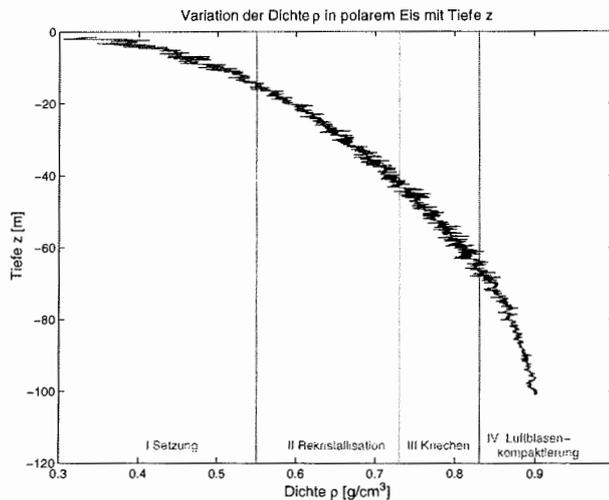


Abbildung 3.4: Dichte-Tiefen-Funktion.

Die Dichte des Eiskerns B16 aufgezeichnet gegen die Tiefe, verdeutlicht die Zunahme der Dichte mit der Tiefe. Der Firn-Eis-Übergang liegt bei ca. 70 m.

Eiskern B16 der Nordgrönland-Traverse [Wilhelms, pers. Mitteilung]. Die Dichte von Schnee bewegt sich zwischen $0,3$ und $0,4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, von Firn zwischen $0,4$ und $0,83 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ und die von Eis läuft von $0,83$ gegen $0,917 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Die Dichte von reinem Eis beträgt $0,920 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Eis erreicht diesen Wert aufgrund der Luft einschüsse meist nicht. Die Dichte nähert sich dem Wert $0,917 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ asymptotisch an.

3.4 Änderung der Dielektrizitätskonstanten

Dichteänderungen in Firn und Eis tragen zur Änderung der Leitfähigkeit und der Dielektrizitätskonstanten ϵ_r bei. Firn ist näherungsweise als Material mit Einschluß von Eiskugeln in Luft und polares Eis als Material mit Einschluß von kugelförmigen Luftblasen zu behandeln. Somit setzt sich die relative Dielektrizitätskonstante von polarem Eis zusammen aus der Dielektrizitätskonstanten des reinen Eises und der Dielektrizitätskonstanten der eingeschlossenen Luft. Looyenga [1965] hat zur Berechnung der relativen Dielektrizitätskonstante ϵ_r eines Gemisches zweier Substanzen ein Modell angegeben. Sein Mischungs-Modell geht von kugelförmigem Einschluß aus, es gilt auch für komplexes ϵ^* und ist sowohl auf Firn als auch auf Eis anwendbar, da die erhaltenen Gleichungen symmetrisch in den Materialkonstanten für die beiden Medien sind. Das Looyenga-Mischungs-Modell gibt für die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r

folgende Relation an:

$$\epsilon_{r'} = [V(\sqrt[3]{\epsilon_{r_2}} - \sqrt[3]{\epsilon_{r_1}}) + \sqrt[3]{\epsilon_{r_1}}]^3. \quad (3.1)$$

Dabei wird für $\epsilon_{r_1'} = \epsilon_{r_{Luft}'} = 1$ und für $\epsilon_{r_2'} = \epsilon_{r_{reines Eis}'} = 3,2$ eingesetzt. Die Dichte von reinem Eis ist $\rho_0 = 0,920 \frac{g}{cm^3}$ und die Dichte ρ gibt die Dichte des umgebenden Eises mit $\rho = \rho_0 V$ an, wobei V der Volumenanteil von Eis ist [Hempel, 1994]. Die Abbildung 3.1 zeigt den Verlauf der nach dem Looyenga-Mischungs-Modell (Gleichung 3.1) berechneten relativen Dielektrizitätskonstanten $\epsilon_{r'}$.

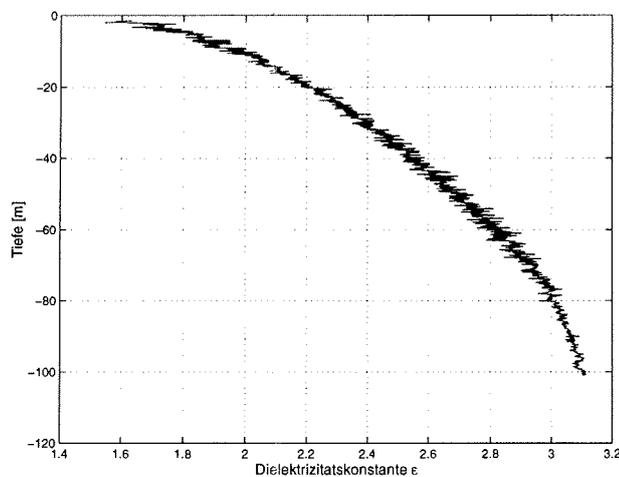


Abbildung 3.5: Verlauf von $\epsilon_{r'}$, berechnet nach dem Looyenga-Mischungs-Modell. Der Verlauf der Dielektrizitätskonstanten zeigt eine Zunahme mit der Tiefe. Der Wert der Dielektrizitätskonstanten in Luft beträgt 1. In Eis nähert sie sich dem Wert von 3.18 an [Hempel, 1994]. Reines Eis weist eine Dielektrizitätskonstante von 3.20 auf [Petrenko, 1993b].

3.5 Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen in Eis errechnet sich unter Berücksichtigung der nach Looyenga [1965] ermittelten Dielektrizitätskonstante $\epsilon_{r'}$ zu:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{r'}}}.$$

Im Gegensatz zur Geschwindigkeit akustischer Wellen im Eis, die ebenfalls von der Dichte des Mediums abhängt, nimmt die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen

32 KAPITEL 3. ENTSTEHUNG, AUFBAU UND EIGENSCHAFTEN VON EISSCHILDEN

mit der Dichte ab. So ist im Schnee ihre Geschwindigkeit höher als im Firn, und in diesem höher als im Eis.

In der Abbildung 3.6 gibt der blaue Graph die Geschwindigkeit ohne Korrektur an. Der violette Graph stellt die korrigierte, nach Looyenga ermittelte Geschwindigkeit dar. Dieser nähert sich mit der Tiefe einem Wert von $168 \frac{m}{\mu s}$ an. Die Geschwindigkeit der Welle in reinem Eis beträgt $167 \frac{m}{\mu s}$ und in Eis $168,1 \frac{m}{\mu s}$ [Hempel, 1994].

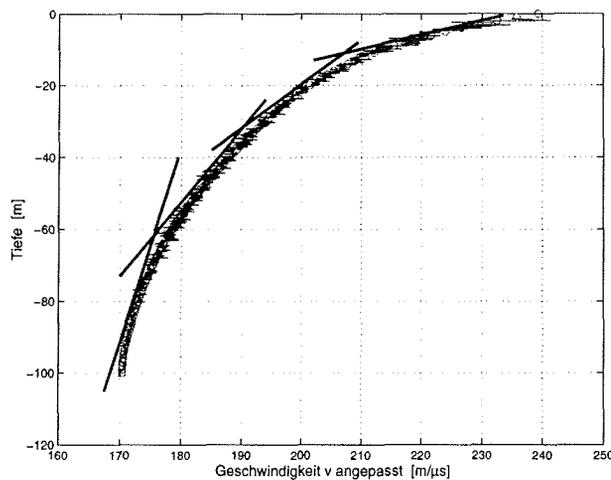


Abbildung 3.6: Geschwindigkeits-Tiefen-Funktion.

Die Geschwindigkeit ist gegen die Tiefe aufgetragen. In den ersten 5 m nimmt die Geschwindigkeit bis auf $220 \frac{m}{\mu s}$ ab. Im Firnbereich, bis in rund 70 m Tiefe, nimmt die Geschwindigkeit bis auf etwa $175 \frac{m}{\mu s}$ ab. Im weiteren Verlauf, im Bereich des Eises, nähert sich die Geschwindigkeit dem Wert von $168 \frac{m}{\mu s}$ an.

In der Praxis wird für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wert für die Geschwindigkeit der Welle in Eis $v = 168,1 \frac{m}{s}$ benützt [Hempel, 1994]. Da die Geschwindigkeit in Firn aber höher ist, ergibt diese Abschätzung zu geringe Firn- bzw. Eismächtigkeiten. Daher wird ein konstanter WKorrekturwert zur Firn- bzw. Eismächtigkeit addiert [Hempel, 1994]:

$$z = \frac{t \cdot v_{Eis}}{2} + \Delta z_{Firn}.$$

Dabei gibt t die Reflexionszeit, v_{Eis} die Geschwindigkeit der Welle in Eis und Δz_{Firn} die Firnkorrektur, die allgemein konstant zu 10 m angesetzt wird [Hodge et al., 1990].

Kapitel 4

Eigenschaften von Eis

4.1 Der Eiskristall

4.1.1 Aufbau des Wassermoleküls

Von Wasserstoff existieren drei Isotope ($^1\text{H}=\text{H}$, $^2\text{H}=\text{D}$, $^3\text{H}=\text{T}$), wovon nur H und D stabil sind. Sauerstoff hat sechs Isotope, davon sind drei stabil: ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O . Die Verhältnisse der Isotope betragen $^1\text{H}:\text{D} = 10^5:15$ und $^{16}\text{O}:\text{O} = 10^4:20$, wobei die anderen Verhältnisse wesentlich geringer ausfallen. Eis besteht hauptsächlich aus der Verbindung H_2^{16}O .

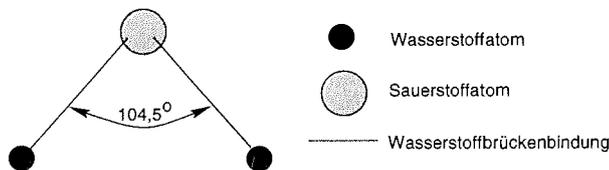


Abbildung 4.1: Das Wassermolekül.

Anordnung der beiden Wasserstoffatome und des Sauerstoffatoms im Wassermolekül H_2^{16}O . Der Winkel von $104,523^\circ$ zwischen den beiden Wasserstoffatomen kommt dem eines regulären Tetraeders von $109,467^\circ$ sehr nahe.

Die folgenden Betrachtungen werden für das Wassermolekül H_2^{16}O angestellt. Der Wasserstoff hat im Orbitalmodell die Elektronenkonfiguration $1s^1$. Der Sauerstoff aus der sechsten Hauptgruppe des Periodensystems hat $1s^2$, $2s^2$ und $2p^4$ Orbitale. Ihm fehlen also $2p$ (p_x und p_y) Elektronen zur vollen Nebenschale. Für das gesamte Wassermolekül ergeben sich also acht Elektronen auf der Valenzschale. Für diese ist es energetisch günstiger, sich zu vier Orbitalen mit je zwei Elektronenpaaren zu hybridisieren (s-p-Hybridisierung). Zwei der Orbitale binden Protonen. Die anderen bleiben als "ungebundene Paare" übrig. Deshalb spreizt sich der Bindungswinkel zwischen den

beiden Wasserstoffatomen, also zwischen den O-H-Bindungen, auf $104,523^\circ$ [Holleman, 1995].

Wie in Abbildung 4.1 zu sehen, ähnelt dieser Winkel dem eines regulären Tetraeders von $109,467^\circ$. Da Sauerstoff erheblich elektronegativer ist als Wasserstoff, werden bei den bindenden Orbitalen die Bindungselektronen näher an den Sauerstoffkern herangezogen. Dadurch nimmt der Sauerstoff eine negative Partiaalladung an. Die Wasserstoffatome werden teilweise entblößt und bekommen eine positive Partiaalladung.

4.1.2 Die Kristallstruktur von Eis

Im Wassermolekül geht das Sauerstoffatom mit den beiden Wasserstoffatomen eine Dipol-Deformations-Wechselwirkung besonderer Art ein: eine Wasserstoffbrückenbindung [Holleman, 1995]. Diese sind in der Abbildung 4.1 als schwarze Verbindungslinien dargestellt. Die Wasserstoffbrückenenergie besteht zum großen Teil aus der Delokalisierungsenergie eines Protons. Das Proton (Wasserstoffatom) hat bevor das Wassermolekül kristallisiert eine bestimmte Energie und befindet sich somit in einem Potentialtopf.

Bei der Bildung eines Eiskristalls steht das Wasserstoffatom zwischen zwei Sauerstoffatomen. Das Proton kann sich aber nicht in der Mitte der Verbindungsachse zwischen den beiden O-Atomen positionieren, da es nun zwei Potentialtöpfe zur Verfügung hat. Zwischen den beiden Positionen kann das Proton, da die Potentialbarriere sehr klein ist, quantenmechanisch tunneln [Vogel, 1995]. In der Abbildung 4.2 sind die beiden möglichen Positionen des Protons auf der Verbindungsachse zwischen den Sauerstoffatomen eingezeichnet.

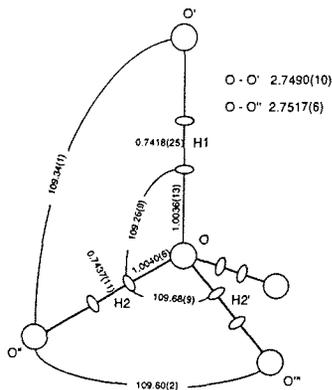


Abbildung 4.2: Das "Halbe Proton" Bild.

Im Eiskristall kann sich das Proton H auf der Verbindungsachse zwischen den O-Atomen eine der Positionen aussuchen. Das "Halbe Proton"-Bild nach Peterson und Levy [1957] ist entnommen aus Petrenko [1993a].

So kann das Proton in einem Eiskristall also zwei bevorzugte Stellen einnehmen, sich aber nie in der Mitte der Verbindungsachse zwischen den O-Atomen aufhalten. Daher muß sich das Proton für eine Vorzugslage, also für eines der beiden Sauerstoffatome entscheiden. Aus diesen Überlegungen haben Bernal und Fowler [1993] (entnommen aus [Petrenko, 1993a]) Bedingungen für eine ideale, defektlose Kristallstruktur von Eis in den "Eisregeln" zusammengefaßt:

1. Jedem Sauerstoff sind zwei Protonen zugeordnet.
2. Jeder Wasserstoffbrückenbindung ist ein Proton zugeordnet.

Bei der Bildung des Eiskristallgitters stellt sich die Frage, weshalb es hexagonal und nicht anders kristallisiert. Denn im Eiskristall bindet der Sauerstoff, da er noch zwei ungebundene Elektronenpaare hat, je ein Wasserstoffatom der beiden benachbarten H_2O Moleküle als Partner einer Nebervalenz über kovalente Bindung an sich [Vogel, 1995]. Dadurch entsteht ein Gitter, das sowohl aus zwei ineinandergestellten, kubisch flächenzentrierten, dichtesten Kugelpackungen, als auch aus zwei ineinandergestellten, hexagonal dichtesten Kugelpackungen zusammengesetzt sein kann.

Die Molekülstruktur, das Wassermolekül hat zwei ungebundene Elektronenpaare, ermöglicht aufgrund des Molekülwinkels ein Kristallisieren in einer tetraedrischen Umgebung, das in der Abbildung 4.2 bereits angedeutet ist. Baut sich der Kristall weiter aus, so entsteht eine hexagonale Kristallstruktur (Abbildung 4.3). Aus dieser Bauweise ergibt sich die c-Achsen-Orientierung der Eismatrix und die dreizählige Symmetrie, die wie eine sechszählige erscheint.

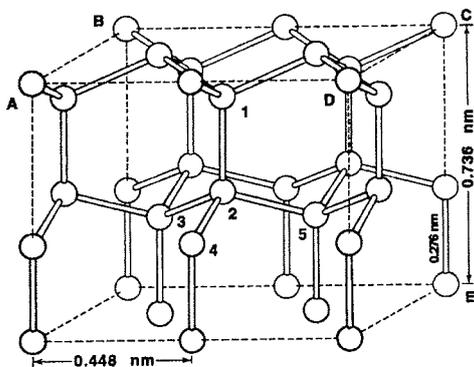


Abbildung 4.3: Die Kristallstruktur von Eis I_h . Die numerierten Sauerstoffatome, die Sauerstoffatome sind als Kreise dargestellt, kennzeichnen die tetraedrische Anordnung der Atome im Kristall. Die mit A, B, C, D gekennzeichneten Atome liegen in einer Ebene.

4.2 Ablagerungen im Eis

Reines monokristallines Eis, das nur aus hexagonal kristallisierten Wassermolekülen besteht, findet sich in der Natur äußerst selten. Der Eiskristall weist meist Defekte auf. Defekte treten auch in anderen Kristallen auf, wie z.B. bei den Halbleitern, die ein Valenzband haben, in denen der Transport von Defektelektronen bzw. Löchern einen Ladungstransport darstellt [Vogel, 1995]. Im Eis gibt es folgende Defekte:

- **Orientierungsdefekte:** Dieser Defekt bildet sich, wenn ein Proton von seiner Normallage auf die zweite Vorzugslage springt. Dadurch wird die erste Eisregel verletzt. Ein Sauerstoffatom ist somit von drei statt zwei Protonen umgeben, so daß es irgendwo im Eiskristall ein anderes O-Atom gibt, dem ein Proton fehlt. Es bilden sich H_3O^+ und OH^- Ionen. Sie können sich immer nur paarweise bilden und besitzen stets eine Ladung.
- **Stellungsdefekte:** Dieser Defekt entsteht durch Molekülrotation im Kristall. Er verletzt die zweite Eisregel. Idealerweise befindet sich auf einer Verbindung zwischen den Sauerstoffatomen immer nur ein Proton. Das heißt, daß immer nur eine Vorzugslage auf dieser Verbindung von einem Proton besetzt ist. Jedoch kommt es vor, daß keine oder beide der Vorzugslagen belegt sind. Die „doppelte“ Belegung nennt man d-Fehler und die „leere“ Belegung l-Fehler. Der d-Defekt trägt ein positives Vorzeichen und der l-Defekt ein negatives. Ein d- und l-Fehler entstehen immer gemeinsam. Ein normales H_2O -Molekül dreht sich um 120° um eine seiner vier Valenzrichtungen, was dem Tunneln eines Protons von einem Orbital des Wassermoleküls zu einem anderen entspricht. Zum Wandern eines Bjerrum-Fehlers genügen eine weitere Drehung der benachbarten Moleküle bzw. weitere Tunneleffekte.
- **Chemische Defekte:** Chemische Defekte sind Einlagerungen, etwa von Salzen. Sie können teilweise in die Kristallstruktur eingebaut werden. Salze haben marinen, bio-geochemischen oder anthropogenen Ursprung.
- **Mikropartikel:** Lagen von Mikropartikeln im Eis werden nicht in das Eiskristall eingebaut. Sie liegen „neben“ dem Kristall. Mineralstaub der kontinentalen Kruste oder Säureablagerungen von Vulkaneruptionen sind als Mikropartikel im Eis vertreten.

Einlagerungen und Ablagerungen im Eis sind für das EMR-Verfahren von großem Interesse. Sie werden wie folgt klassifiziert:

- **biogener Eintrag:** Den biochemischen Eintrag bilden Ammonium (NH_4^+) und Methansulfonsäure (MSA). Der Eintrag von Ammonium stammt aus der bakteriellen NH_3 -Exhalation des Bodens, sowie aus Wald- und Steppenbränden [Legrand und Angelis, 1996]. Das Phytoplankton in den Weltmeeren emittiert Dimethylsulfid (DMR), das teilweise in der Atmosphäre zu SO_2 oxidiert und

über einen anderen Reaktionszweig zu Methansulfonsäure (MSA) umgebildet wird. Während der Algenblüte weist MSA maximale Werte auf [Asman und Drukker, 1988].

- **Mineralstaub:** Der Mineralstaub im Eis von Grönland ist meist Krustenmaterial, das überwiegend aus Carbonaten wie CaCO_3 zusammengesetzt ist. Der Rückgang der Schneebedeckung in mittleren Breiten mit dem Ende des Winters findet sich im Eis als erhöhter Mineralstaubeintrag [Steffensen et al., 1988]. Daher beinhalten Lagen von Eiszeiten im Eis mehr Staub. Der erhöhte Staubanteil der Atmosphäre bedeutet aber weniger Säureablagerungen, z.B. aus Vulkanausbrüchen, im Eisschil; denn Carbonate neutralisieren Säuren.
- **Seesalz:** Die Stärke des Eintrags von Seesalzaerosolen wie NaCl hängt von der Windgeschwindigkeit über den Ozeanen ab. Seesalzaerosole entstehen durch die Dispergierung von Meerwasser durch höhere Windstärken [Steffensen et al., 1988].
- **Mineralsäuren:** Zunehmende Verbrennung fossiler Stoffe (Industrialisierung) und Photooxidation von NO , NO_2 und N_2O , produzieren hauptsächlich die Mineralsäure Nitrat NO_3^- [Neftel et al., 1985]. Die Mineralsäure Sulfat SO_4^{2-} hat verschiedene Quellen. Die antropogene Verbrennung fossiler Brennstoffe stellt einen kontinuierlichen Sulfateintrag [Neftel et al., 1985] dar. Der natürliche Anteil des SO_4^{2-} Eintrags stammt aus Eruptionen von Vulkanen, bei denen Schwefeldioxid freigesetzt wird. Dieser hält sich ein bis zwei Jahre in der Atmosphäre, oxidiert dort und lagert sich im Eis als Schwefelsäure H_2SO_4 ab [Hammer et al., 1980].

Schichten mit sauren Einlagerungen beeinflussen die Leitfähigkeit des Eises [Hammer et al., 1980]. Im grönländischen Eis hat die Schicht mit sauren vulkanischen Ablagerungen von Laki (Island 1783) eine mittlere Säurekonzentration von $14 \mu\text{equiv}[\text{H}^+]/\text{kg}$ [Clausen und Hammer, 1988]. Nach Fujita und Mae [1994] entspricht diese Säurekonzentration einer Molarität von $6,5 \text{ M } [\text{H}_2\text{SO}_4]$. Moore und Fujita [1993] geben für Laki eine molare Leitfähigkeit von $\mu_{\text{Laki}} = 3,66 \frac{\text{S}}{\text{mM}}$ an. Nach Petrenko [1993b] beträgt die Leitfähigkeit von reinem Eis $18 \mu\text{S}/\text{m}$.

Die spezifische Leitfähigkeit σ_∞ von Eis läßt sich aus der Leitfähigkeit von reinem Eis σ_p und einer linear von der Säurekonzentration abhängigen Leitfähigkeit errechnen [Moore und Fujita, 1993]:

$$\sigma_\infty = \sigma_p + \mu [\text{H}_2\text{SO}_4] \quad \left[\frac{\mu\text{S}}{\text{m}} \right] \quad (4.1)$$

Dabei gibt $\Delta\sigma$ die Änderung der Leitfähigkeit, μ die molare Leitfähigkeit und $[\text{H}_2\text{SO}_4]$ den Säuregehalt in Mol an. Für die spezifische Leitfähigkeit σ_∞ von Laki errechnet

sich ein Wert von $41,79 \frac{\mu S}{m}$. Der Änderung der Leitfähigkeit durch den Säurekontrast ergibt sich dadurch zu:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\infty} - \sigma_p = \mu[H_2SO_4] = 23,79 \frac{\mu S}{m}.$$

An abgeteufte Eiskernen kann mit der Methode der ECM-Messung (Electrical Conductivity Method) die Leitfähigkeit bestimmt und eine Alterszuordnung getroffen werden. In oberen Bereichen des Eisschildes dominieren Verdichtungsprozesse und in tieferen Bereichen dominieren Lagen mit hohem Säuregehalt bei Änderung der Dielektrizitätskonstanten bzw. der Leitfähigkeit.

Die Kontraste in der Dielektrizitätskonstanten bzw. der Leitfähigkeit werden als interne Schichten von Eisschilden in Radargrammen abgebildet [Hammer, 1980]. Das resultiert aus dem Zusammenhang der Leitfähigkeit σ und der Dielektrizitätskonstante ϵ , die durch die Maxwell'schen Gleichungen definiert wird.

4.3 Reflexionshorizonte in Radargrammen

Dichteänderungen und Einlagerungen saurer Medien bewirken also Änderungen der Leitfähigkeit bzw. der Dielektrizitätskonstanten. Der Reflexionskoeffizient R , der nach der Gleichung 2.16 bzw. 2.17 von der Dielektrizitätskonstanten bzw. der Leitfähigkeit abhängt, ändert sie sich demnach auch. So werden elektromagnetische Wellen am Grenzübergang zweier verschiedener Dielektrizitätskonstanten reflektiert und transmittiert.

Sprunghafte Änderungen der dielektrischen Eigenschaften sind die Ursache für Reflexionshorizonte in Radargrammen.

Der Felsuntergrund ist größtenteils besser zu erfassen als interne Horizonte. Denn die Reflexion des Felsuntergrundes ist meist stärker ausgeprägt als interne Horizonte. Zu dem reicht es für die Reflexion der internen Schichten nicht aus, eine saure Ablagerung zu haben. Aufgrund der Auflösung ist eine Interferenz der Reflexion eines Schichtpaketes notwendig.

Kapitel 5

Datenbearbeitung

Die im Feld auf Exabyte Bändern aufgezeichneten Daten (siehe Abschnitt 2.2.2) liegen in einem Format vor, das nicht mit gängigen Formaten der Seismik übereinstimmt. Daher werden die Daten zur weiteren Verarbeitung, mit einem am AWI im Laufe der Jahre eigens dafür entwickelten Programm, in ein gängiges Format der Seismik konvertiert. Das AWI verwendet für die Datenverarbeitung das seismische Programmpaket FOCUS/DISCO. Die Radargramme werden, standardmäßig wie in der Seismik üblich, in Graustufen dargestellt. Dabei wird jedem Amplitudenwert ein entsprechender Grauwert zugeordnet.

5.1 Grundsätzliche Schritte

- **Erstellung eines Flugplans:**

Um einen ersten Überblick der erfolgten Profile zu erhalten, werden die Navigationskoordinaten sowie die Start- und Endzeiten der Flüge aus den Felddaten herausgeschrieben und mit der Graphiksoftware Generic Mapping Tools (GMT) dargestellt [EOS Trans. AGU, 72,441, 445-446, 1991] (siehe Abbildung 1.3).

- **Sortieren der Daten nach Pulslänge**

Die Pulslänge alterniert zwischen 60 ns und 600 ns. Das bedeutet, daß die Spuren eines Profils der Felddaten paarweise verschiedene Pulslängen aufweisen. Diese Datensätze müssen zunächst voneinander getrennt werden, um die unterschiedliche Information, der sich aus demn beiden Pulslängen gewinnen läßt, deutlich darstellen zu können. Der 60-ns-Puls kommt nämlich für die interne Schichtung im oberen Bereich des Eisschildes in Frage, wohingegen für die Horizonte in tiefer liegenden Bereichen und für den Übergang von Eis zum Untergrund, der 600-ns-Puls vorteilhafter ist.

Anschließend werden die Daten zur Verbesserung des Verhältnisses von Signal zu Rauschen mit in der Seismik gängigen Schritten weiterbearbeitet.

5.2 Stapelung

Mit zunehmender Eindringtiefe verliert die Welle, aufgrund der Verluste, die im Kapitel 3.1.5 diskutiert wurden, an Energie. Das Verhältnis von Signal zu Rauschen verschlechtert sich. Um Amplituden in großen Eindringtiefen, wie bei Eismächtigkeiten in Zentralgrönland von durchschnittlich 3000 m, noch erfassen zu können, muß das Verhältnis von Signal zu Rauschen verbessert werden. Das wird durch "Stapeln" erreicht. Beim Stapeln werden zwei oder mehr Signale vom selben Reflexionspunkt zu einem aufaddiert, wobei sich dabei kohärente Signale verstärken. Werden sie in Phase aufaddiert so wird das Rauschen unterdrückt [Telford et al., 1996]. Spuren werden zu einer Spur summiert und das Mittel ihrer Amplituden wird als Amplitude dieser Spur dargestellt:

$$\text{Amplitude} \quad \bar{A} = \frac{1}{10} \sum_{n=0}^{10} a_n \quad \text{z.B. bei } n = 10 \text{ Spuren.}$$

Die Abbildung 5.1 vergleicht ungestapelte Daten mit 10- und 30fach gestapelten Daten. In der ungestapelten Sequenz sind, wie z.B. der Horizont, den der unterste Pfeil anzeigt, nur sehr schwach angedeutet. Bei einer Stapelung von 10 Spuren, wird dieser Horizont stärker ausgeprägt und deutlicher sichtbar.

Der Horizont, der durch den oberen Pfeil angegeben wird, zeigt wie sich weiteres Summieren und Mitteln von Spuren auswirkt. In dem Abschnitt der 30fachen Stapelung ist zu erkennen, daß die Information über die innere Schichtung im Eis "zerstapelt" wird. Im Vergleich zu der ungestapelten und der 10fach gestapelten Sequenz kann dieser Horizont in dem 30fach gestapelten Abschnitt nicht weiterverfolgt werden, da er von anderen Horizonten nicht mehr unterschieden werden kann.

Das Zerstackeln des Signals kann auch dazu führen, daß sich scheinbare Reflexionshorizonte bilden. Der mittlere Pfeil z.B. deutet auf einen Bereich der in den ersten beiden Sequenzen keine eindeutigen Horizonte aufweist. Im Gegensatz zur ungestapelten und 10fach gestapelten Sequenz befinden sich in der 30fach gestapelten einige Horizonte. Sie sind scheinbare Horizonte. Im übrigen wird durch das Stapeln zusätzlich eine Datenreduktion erreicht.

In welcher Größenordnung das Signal gestapelt werden sollte, hängt von der Apertur des Systems und auch von der subglazialen Morphologie des Untergrundes ab. Bei einer ausgeprägten Topographie des Untergrundes kann übermäßige Stapelung dazu führen, daß sich Reflexionsamplituden gegenseitig auslöschen. Zur Entscheidung, in welchem Maße gestapelt werden soll, wurden verschiedene Versuche durchgeführt. Hierbei wurde für den 60-ns- und 600-ns-Puls ein ungestapelter Profilabschnitt ausgewählt und 5-, 10-, 15-, 20-, 30-, 40-, und 50fach gestapelt und verglichen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Daten 10fach gestapelt, da sie sich als die beste, sinnvollste und effektivste erwies (siehe Abbildung 5.1). Die horizontale Auflösung der gestapelten Radargramme errechnet sich somit zu 67 m. Bei der Beschreibung des EMR-Verfahrens im Kapitel 2.2.3 wurde gezeigt, daß die horizontale Auflösung der auf den Magnetbändern aufgezeichneten Spuren 3,35 m beträgt. Da nur jede zweite Spur gleiche Pulslänge hat (toggle-mode), verdoppelt sich die horizontale Auflösung zu 6,70 m. Die Daten werden nun 10fach gestapelt. Daraus resultiert die endgültige horizontale Auflösung von 67 m.

Um die feine Strukturierung der internen Reflektoren hervorzuheben, werden nachfolgend weitere Schritte der Signalbearbeitung wie Differentiation, Amplitudenregelung und Filterung durchgeführt.

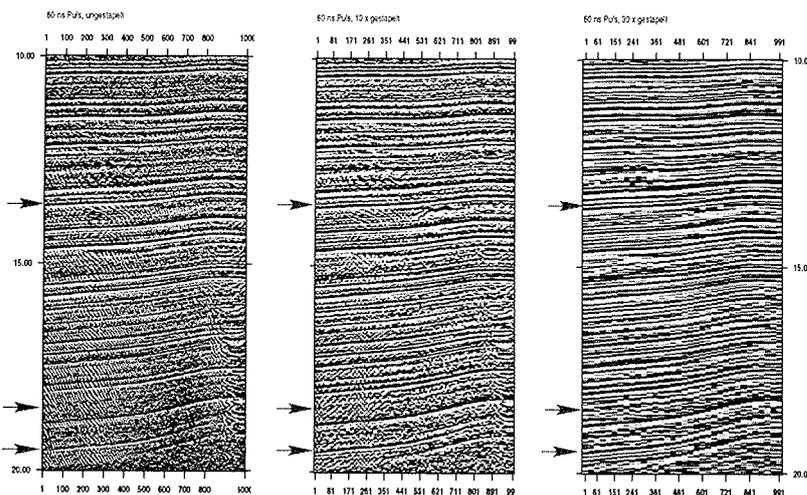


Abbildung 5.1: Ergebnisse der Stapelung.

Ergebnisse der Stapelung im Vergleich: ungestapelte, 10- und 30fach gestapelte Daten. Die Ordinate ist die Zweiweg-Laufzeit und die Abzisse die Anzahl der Spuren. Alle drei Beispiele umfassen dieselbe Strecke. Somit hat die ungestapelte Sequenz 1000, die 10fach gestapelte 100 und die 30fach gestapelte 33 Spuren. Die Pfeile markieren interessante Bereiche, auf die im Text näher eingegangen wird. Diese Abbildung ist im Anhang A.1 größer abgebildet.

5.3 Differentiation

Der Differentiationsfilter bildet numerisch die zeitliche Ableitung des Signals mittels eines zentralen Differenzenquotienten:

$$\dot{A}(t_i) = \frac{A(t_{i+1}) - A(t_{i-1}))}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad \text{mit } A(t_{i+1}) \text{ Amplitude zum Zeitpunkt } t_{i+1}$$

Die Differentiation ist einer Hochpaßfilterung vergleichbar. Dabei werden die Flanken des Signals unterdrückt. Denn die positiven Flanken des Signals stellen die Reflexionseinsätze dar. Der dabei entstehende hochfrequente Störanteil wird durch einen darauffolgend angewandten Tiefpaß gefiltert.

5.4 Amplitudenregelung

Bei der Erklärung von Energieverlusten eines Signals im Eis (Abschnitt 2.1.4) wurde die sphärische Divergenz diskutiert. Dies bedeutet, daß das Signal mit zunehmender Eindringtiefe an Energie verliert, da die Energie mit Abstand im Quadrat zur Energiequelle abnimmt. Daher muß die Energie der Spur auf die gesamte Spurlänge angepaßt werden.

Bei der Amplitudenregelung, automatic gain control (AGC) wird für jede Spur, die Energie auf die mittlere Energie des angegebenen Zeitfensters pro Iteration normiert. Damit werden Ausreißer unterdrückt und die Amplituden einer Spur aneinander angeglichen. Hierzu wird die Spur in einem Zeitfenster abgetastet und der Skalierungsfaktor S für die Amplitudenregelung bestimmt:

$$S = \frac{R}{(1 - G)\Sigma \frac{|\Sigma T|}{\Sigma TN} + (G)\Sigma \frac{|\Sigma T|}{\Sigma N}}$$

Dabei gibt S den Skalierungsfaktor, R den Referenzfaktor, TN die Anzahl der Datenpunkte mit einem Amplitudenwert ungleich Null und N die Anzahl der Datenpunkte mit dem Amplitudenwert gleich Null an. T ist die Anzahl aller Spuren. Der Beitrag des Zeitfensters bei der Berechnung des Skalierungsfaktors wird durch G festgelegt. Der restliche Beitrag zur Berechnung des Skalierungsfaktors erfolgt aus der Betrachtung aller Datenpunkte der Spur. Bereiche mit Datenpunkten der Werte Null werden vernachlässigt. Weist eine Spur zu viele Datenpunkte des Wertes Null auf, so wird auf diese Spur der letzte gute Wert des Skalierungsfaktors zur Glättung der Reflexionseinsätze angewandt.

5.5 Filterung

Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses werden die Daten mit verschiedenen Filtern bearbeitet. Für die Filterversuche wurden verschiedene Filter einzeln und auch kombiniert untersucht. Folgende Filter wurden verwendet:

- **Tiefpaß-Filter:**
Der Tiefpaß überträgt tiefe Frequenzen unverändert und schwächt hohe Frequenzen ab. Mit einem Tiefpaß lassen sich hochfrequente Störsignale herausfiltern. Es wurden zwei Tiefpässe verwendet. Es wurde zuerst ein Tiefpaß eingesetzt, um den Reflexionseinsatz an der Eisoberseite zu erfassen, der Frequenzen oberhalb von 10-15 MHz abschwächt. Der zweite Tiefpaß filtert noch weitere hohe Frequenzen aus und dient so zur besseren Identifizierung der Eisunterseite (3-5MHz).
- **Cohere-Filter:** Der Cohere-Filter ist ein zweidimensionaler Filter. Er ist ein f - k -Filter, der die Signale, aus einer Spur abschwächt, die in jeder Spur vorkommen. Daher wird der Cohere-Filter eingesetzt, um systeminternes Rauschen zu unterdrücken.
- **f-k-Filter:**
Der f - k -Filter ist ein Geschwindigkeitsfilter, ein zwei dimensionaler Filter, der in der Zeitachse kohärente Signale verstärkt. Dadurch werden Reflexionshorizonte hervorgehoben. Dieser Filter wurde bei der Kartierung der internen Horizonte zusätzlich zu den anderen verwendeten Filtern eingesetzt.

Nach mehreren Vergleichen verschiedener Filterkombinationen wurden die Daten zur Bestimmung der Eismächtigkeit mit einem Cohere-Filter, einem Tiefpaß und einem weiteren Tiefpaß bearbeitet. In Abbildung C.3 (siehe Anhang) ist das Ergebnis dieser Filterung dargestellt. Die Eisoberseite (bei $5 \mu s$) und die Eisunterseite (bei $40 \mu s$) sind gut erkennbar. Die horizontalen Linien, die ab $17 \mu s$ auftreten, sind systeminternes Rauschen.

Zur Ermittlung der internen Schichtung wurde noch zusätzlich ein f - k -Filter eingesetzt. Das Resultat ist in Abbildung C.4 dargestellt, man erkennt die interne Schichtung jetzt viel deutlicher. Die Information über den Übergang von Eis zu Fels geht jedoch verloren.

Kapitel 6

Ergebnisse zur Eismächtigkeit und Topographie

6.1 Bestimmung der Eismächtigkeit

Zur Bestimmung der Eismächtigkeit wurde die halbe Zweiweg-Laufzeit mit der Geschwindigkeit der elektromagnetischen Welle im Eis multipliziert und dann zur Korrektur der Firnaufgabe ein konstanter Wert von 10 m zur Eismächtigkeit addiert, da im Firn die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen größer ist als im Eis (siehe Abschnitt 3.5).

Jedem Schußpunkt lassen sich geographische Koordinaten zuordnen. Doch nicht an jedem Schußpunkt konnte die Eismächtigkeit berechnet werden. Dafür kommt in erster Linie folgender Grund in Betracht: Im Eis kommt es zu einem Energieverlust des Signals (siehe dazu Kapitel 2.1.4). Veränderte Bedingungen im Eis und unter dem Eisschild können zum Energieverlust des Signals soweit beitragen, daß die Welle entweder am Untergrund nicht ankommt oder nicht reflektiert wird oder die Reflexion der Eisunterseite in den Daten von Rauschen überschattet ist. Die Datenpunkte, für die die Eismächtigkeit errechnet wurde, sind in Abbildung 6.1 dargestellt, wobei die Eismächtigkeit nur für das Meßgebiet kartiert wurde. Bei den Verbindungsflügen nach GRIP und GISP2 wurde die Eismächtigkeit zwar auch erfaßt, aber durch die geringe Datendichte, die zu Interpolationsfehlern führen kann, nicht abgebildet.

Parallel zu dem Flug entlang der Eisscheide, der von NGRIP nach Südosten verläuft und den Rand des Meßgebiets bei $39,5^\circ$ W kreuzt, wurden zwei Profile geflogen. Der östlich zur Eisscheide parallel verlaufende Flugabschnitt lieferte im Gegensatz zum westlich parallel verlaufenden Profil keine Informationen über den Untergrund. Die Datendichte im westlichen Bereich des Meßgebietes ist wesentlich höher als im östlichen Bereich. Das gilt sowohl für die Meßkampagne 1996 als auch für 1997. Um NGRIP herum ist die Datendichte erfreulich hoch.

Aus diesen Daten wurde die in Abbildung 6.2 dargestellte Karte der Eismächtigkeit mit dem Programm GMT erstellt. Bei der Interpolation der Daten mußte darauf geachtet werden, daß die Dateninformationsdichte in Profilrichtung recht hoch ist, etwa 600 m, aber in die Richtung zum Nachbarprofil der nächste Datenpunkt erst in 10 km Entfernung liegt. Aus diesem Grunde wurde ein Gitter angelegt, das die Flächen zwischen den Datenpunkten mit einem Gitterpunktsabstand von 2,22 km in N-S-Richtung und 2,66 km in E-W-Richtung interpoliert.

In Abbildung 6.2 ist ein Korridor zu sehen, der sich mit einer Eisdicke von mehr als 3000 m durch das Gebiet von Nordnordwest nach Süd durchzieht. Westlich dieses Korridors nimmt die Dicke des Eisschildes gleichmäßig um bis zu 400 m ab und erreicht im westlichen Randgebiet Eisdicken von 2600 m. Östlich von diesem Korridor bleibt die Eisdicke mit 3000 m über eine Strecke von etwa 60 km konstant. Erst östlich des Längengrades von 41° W nimmt die Eismächtigkeit geringfügig ab.

Betrachtet man das Gebiet von Süd nach Nord, so befinden sich die mächtigsten Bereiche im Süden. Dort kommen Eisdicken von über 3200 m vor. Nach Norden hin werden die Eismächtigkeiten geringer.

Auf einer Fläche von etwa 50 km auf 50 km um die Bohrlokation NGRIP bleibt die Eismächtigkeit konstant bei 3000 m. Die für NGRIP postulierte Eismächtigkeit von 3085 m [Dahl-Jensen et al., 1997] wird hier bestätigt. Die Eismächtigkeit liegt in der Umgebung von NGRIP zwischen 3000 und 3100 m.

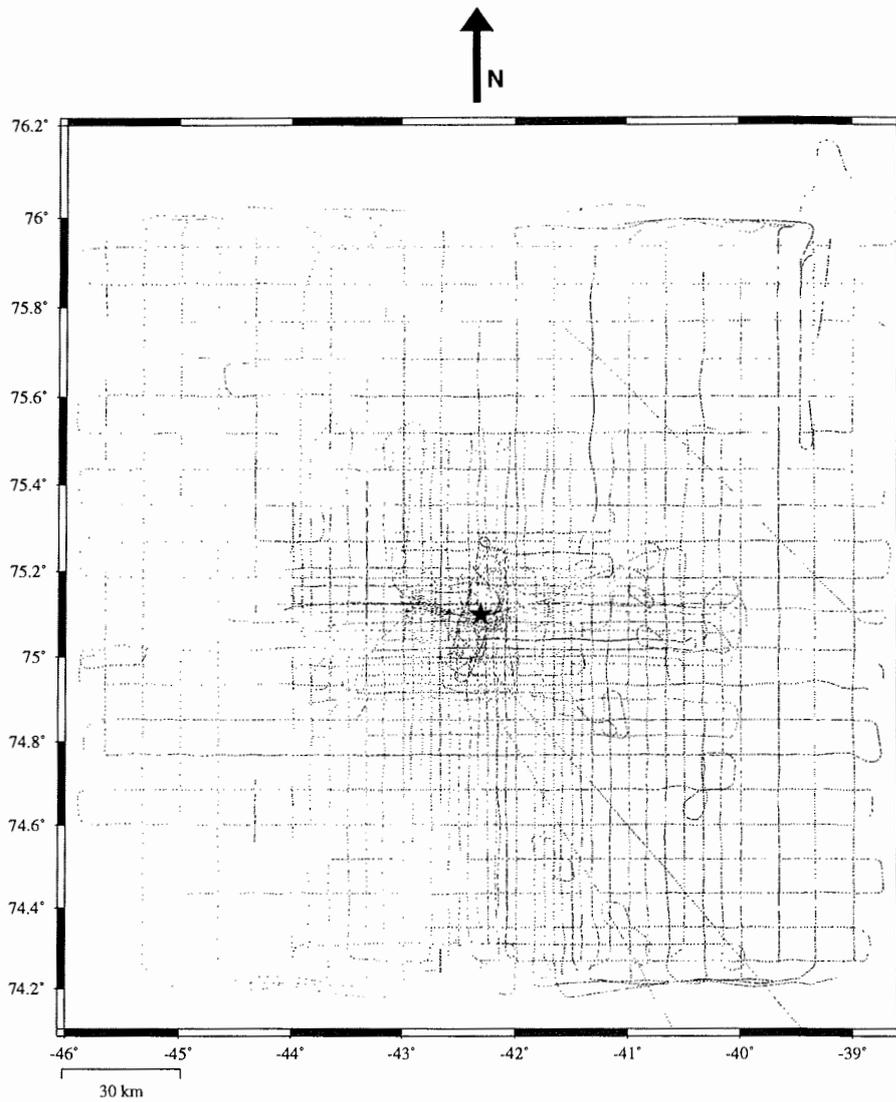


Abbildung 6.1: Übersicht aller Punkte, an denen ein Wert für die Eismächtigkeit ermittelt wurde.

Die Erfassung des Übergangs von Eis zu Fels war im westlichen Bereich des Meßgebietes besser möglich als im östlichen. Besonders schwer war der Untergrund im östlichsten Bereich, zwischen 44° W und 46° W zu bestimmen. Um NGRIP herum ist die Datendichte erfreulich hoch. Der Verlauf der erfolgten Profile ist sehr gut zu erkennen. Die Bohrlokation NGRIP (42,30° W und 75,12° N) ist mit einem schwarzen Stern gekennzeichnet.

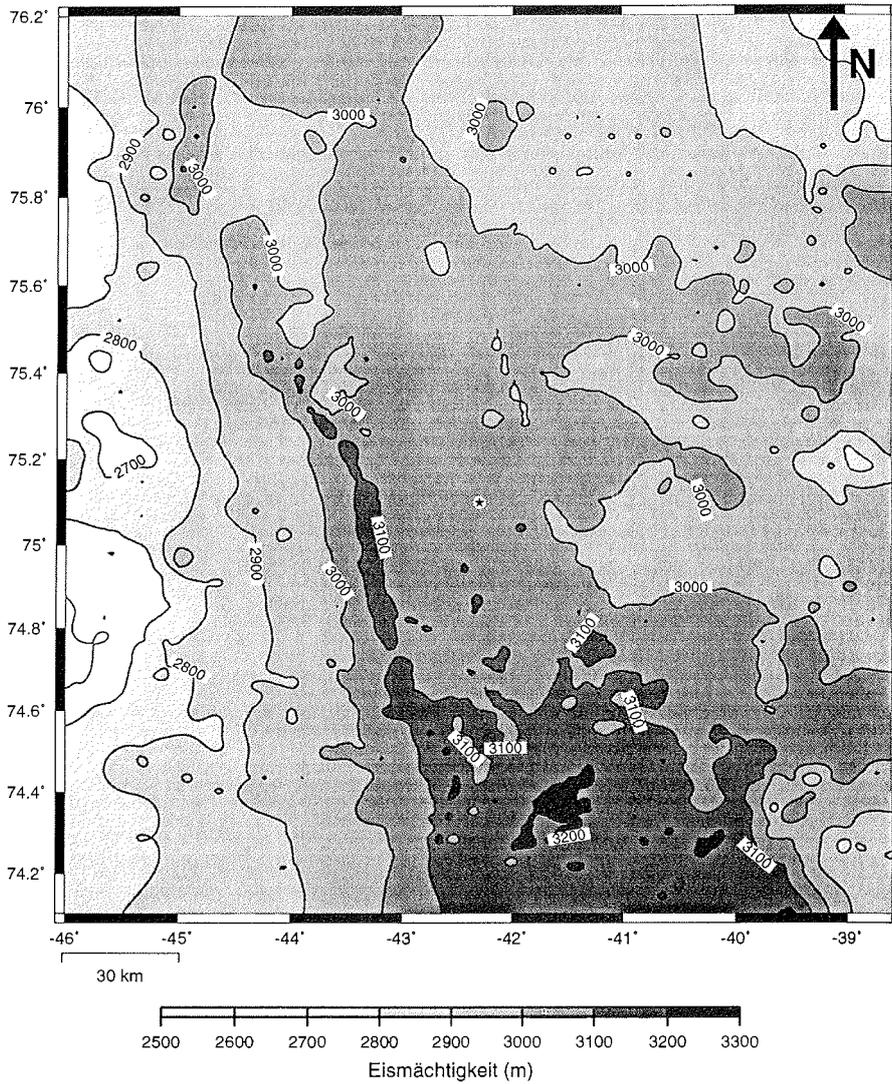


Abbildung 6.2: Karte zur Darstellung der Eismächtigkeit.

Ein Korridor von 3100 m dickem Eis zieht von Süd nach Nordnordwest. Dieser Korridor läuft parallel zur heutigen Eisscheide. Die Karte wurde mit Farbabstufungen und Konturlinien im Abstand von 100 m dargestellt. Die Bohrlokation NGRIP ist mit einem schwarzen Stern auf einem weißen Kreis gekennzeichnet.

6.2 Topographie der Eisoberfläche

Bei dem flugzeuggestützten EMR-Verfahren werden die Werte des barometrischen Höhenmessers und die des Höhenradars vom zentralen Bordrechner aufgezeichnet. Subtrahiert man die Höhenangabe des Radarhöhenmessers von dem des barometrischen Höhenmessers so resultiert daraus die Topographie der Eisoberfläche (siehe Abbildung 6.3).

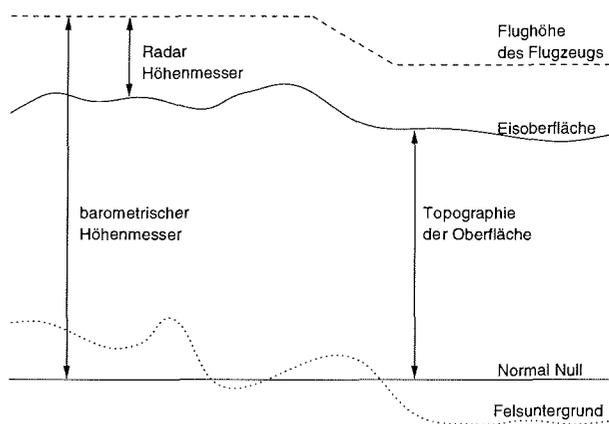


Abbildung 6.3: Skizze zur Bestimmung der Oberflächentopographie.

Der Radarhöhenmesser des Flugzeugs mißt den Abstand zwischen der Höhe in der das Flugzeug (gestrichelte Linie) fliegt und der Eisoberfläche (durchgezogene gebogene Linie). Die gepunktete Linie stellt den Felsuntergrund dar, der natürlich auch unter NN liegen kann. Die durchgezogene gerade Linie kennzeichnet NN. Der barometrische Höhenmesser erfaßt im Idealfall die Distanz zwischen der Flughöhe und NN.

Bei Höhenmessungen mittels barometrischem Höhenmesser und Radarhöhenmesser kann es zu deutlichen Ungenauigkeiten kommen, die in der späteren Datenauswertung zu Fehlern in der Bestimmung der Topographie der Eisoberfläche führen. Gründe sind etwa Schwankungen des Luftdrucks oder Drift der Geräte.

Aus diesem Grund wurde die Möglichkeit genutzt, Daten aus einem am AWI erarbeiteten Geographischen Informationssystem (GIS) von Grönland zu verwenden, in das das Höhenmodell eingearbeitet ist [Jung-Rothenhäusler, 1998].

In Abbildung 6.4 ist die Höhe der Eisoberfläche dargestellt. Die Eisoberfläche in dem Meßgebiet erreicht im Süden eine Höhe von über 3000 m und im Nordnordosten nur 2700 m. Die Eisoberfläche in diesem Gebiet kann aber als flach geneigt angesprochen werden. Denn die Höhe der Eisoberfläche nimmt auf einer Distanz von etwa 200 km nur um 200 m, entsprechend einer Neigung von 0,1 ‰ ab. Das bedeutet auf einer Strecke von 10 km eine Steigung von 1 m.

Nicht nur die Eisscheide, die auf einer Achse von der Bohrlokation GRIP zu NGRIP verläuft, ist in Abbildung 6.4 deutlich zu erkennen, sondern auch die abnehmende Topographie mit zunehmender Entfernung von Summit, dem heutigen höchsten Punkt auf dem Eisschild Grönlands.

Im Vergleich mit der Karte zur Eismächtigkeit fällt auf, daß der Korridor mit der mächtigsten Eismasse parallel zur heutigen Eisscheide verläuft. Unter der heutigen Eisscheide befindet sich weniger Eis als in dem 40 km weiter im Westen verlaufenden Korridor.

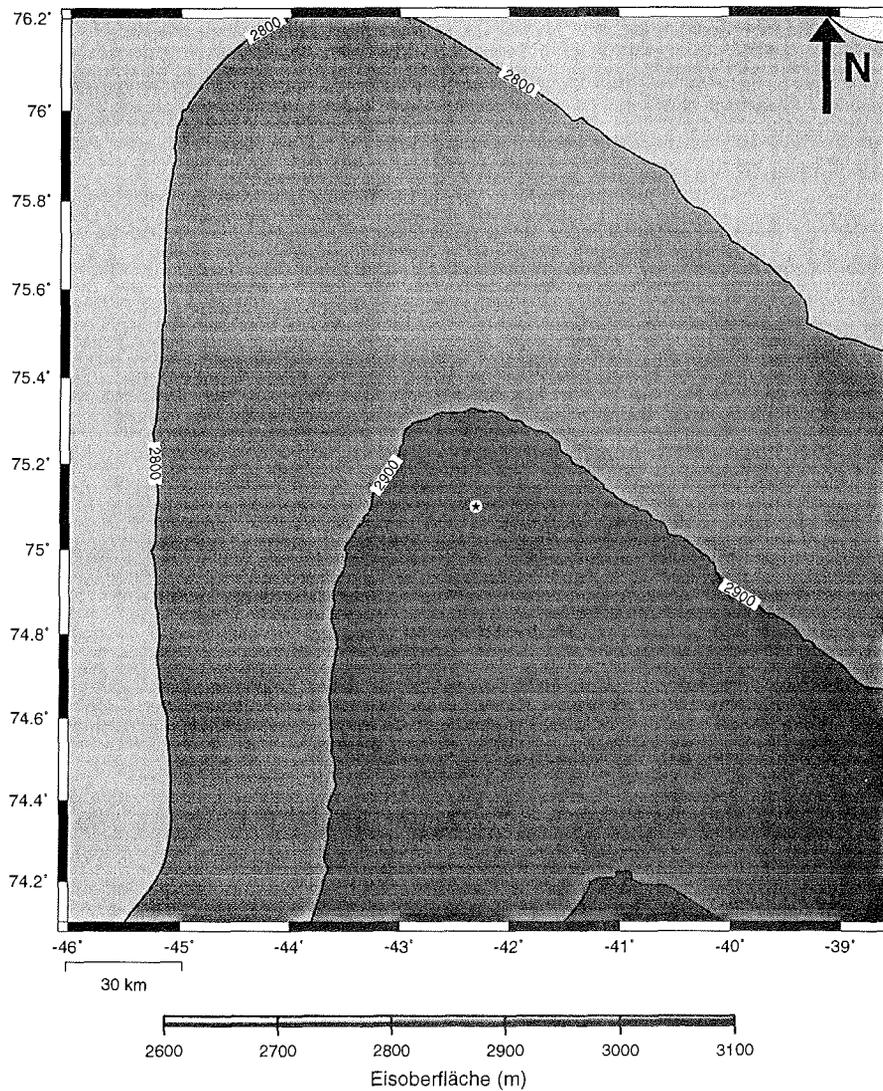


Abbildung 6.4: Karte der Eisoberfläche.

Die Daten zur Eisoberfläche sind entnommen aus Jung-Rothenhäusler [1998]. Auf einer Strecke von etwa 200 km nimmt die Höhe der Eisoberfläche um etwa 200 m ab. Die Oberfläche ist mit einer Neigung von 0,1% sehr eben. Für NGRIP wurde eine Höhe von 2919 m über NN angegeben [Dahl-Jensen et al., 1997]. Die Bohrlokation NGRIP ist mit einem schwarzen Stern auf einem weißen Kreis gekennzeichnet.

6.3 Topographie des Felsuntergrundes

Jedem Meßpunkt, an dem ein Wert für die Eismächtigkeit bestimmt wurde, läßt sich über dessen Koordinatenangaben ein Höhenwert der Eisoberfläche zuordnen.

Die Subtraktion der Eismächtigkeit von der Höhe der Eisoberfläche ergibt die Topographie des Untergrundes, die in Abbildung 6.5 zu sehen ist. Auffällig ist ein etwa 15 km breiter Graben von Nordnordwest nach Süd, der in seiner tiefsten Ausprägung 200 m unter dem Meeresspiegel liegt. Am nördlichen Rand des Meßgebietes deutet sich schienbar der weitere Verlauf des Grabens an. Dies ist jedoch ein Artefakt des Interpolationsalgorithmus, da nördlich von $76,02^\circ$ keine Datenpunkte vorliegen.

Der Vergleich mit der Karte der Eismächtigkeit ergibt eine Übereinstimmung für die Position des Grabens und der Lage des Korridor mit der größten Eisdicke. Der Vergleich der Untergrundtopographie mit der Topographie der Eisoberfläche zeigt einen parallelen Verlauf des Grabens zu der heutigen Eisscheide.

Westlich des Grabens zieht sich ein Hang kontinuierlich von -200 m bis auf 150 m über Meeresspiegel empor. Östlich des Grabens erstreckt sich eine Ebene mit Höhenschwankungen von -150 m bis -100 m unter Meeresspiegel im Süden mit 60 km Breite und mit bis zu 150 km Breite im Norden von NGRIP. Diese Höhendifferenzen entsprechen Steigungen im Norden von 0,33 m auf 1000 m und von 0,83 m auf 1000 m im Süden von NGRIP. Das Gebiet um NGRIP ist also sehr eben - eine vergleichbar flache Landschaft wie diese Ebene, auf der sich die Bohrlokation NGRIP befindetet, ist zum Beispiel die Norddeutsche Tiefebene.

Anders als bei Modellüberlegungen zur Mächtigkeit von Eisschilden (mit ideal horizontalem Untergrund), ist im Untersuchungsgebiet ein Graben in der Nähe der Eisscheide zu finden. Daher ist die größte Eismächtigkeit im Meßgebiet über dem Graben und nicht an der Eisscheide zu finden.

Das Gelände unter der Bohrlokation von NGRIP entspricht den in der Einleitung geforderten Bedingungen. Die dreidimensionale Darstellung des Felsuntergrundes in Abbildung 6.6 zeigt die Ebene östlich des Grabens und den Hang, der sich westlich vom Graben von 300 m unter NN bis zu 300 m über NN erstreckt, deutlich.

Bei der Betrachtung der Karte der Felstopographie fällt eine Erhebung in südwestlicher Richtung, in Richtung der Bohrlokation GRIP, auf. In dieser Richtung steigt das Gelände innerhalb von ca. 45 km von 100 m unter NN auf 200 m über NN an.

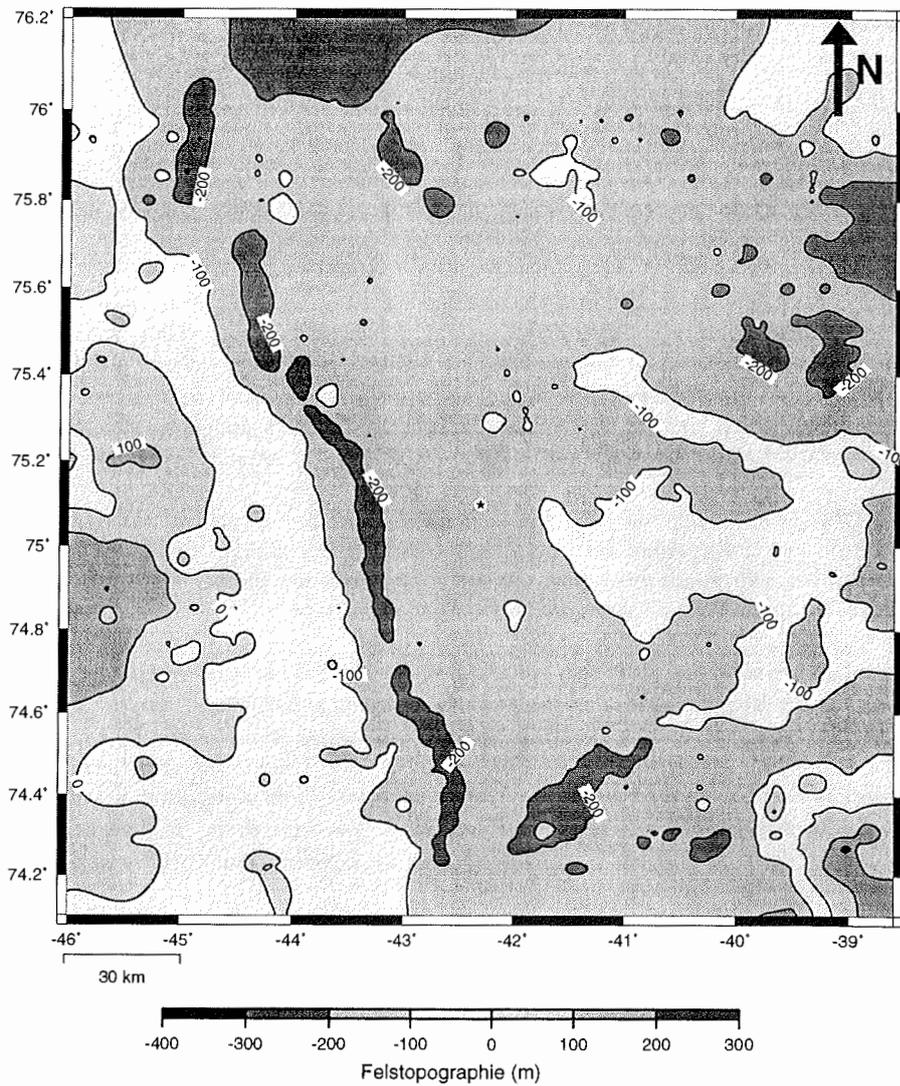


Abbildung 6.5: Karte zur Darstellung der Felstopographie bezogen auf NN.
 Der Korridor der maximalen Eismächtigkeit befindet sich auf dem Graben. Die Bohrlokation
 NGRIP ist mit einem schwarzen Stern auf einem weißen Kreis gekennzeichnet. Die Ebene
 um die Bohrlokation liegt in einer Umgebung von 50 km auf 50 km bei 100 m unter NN.

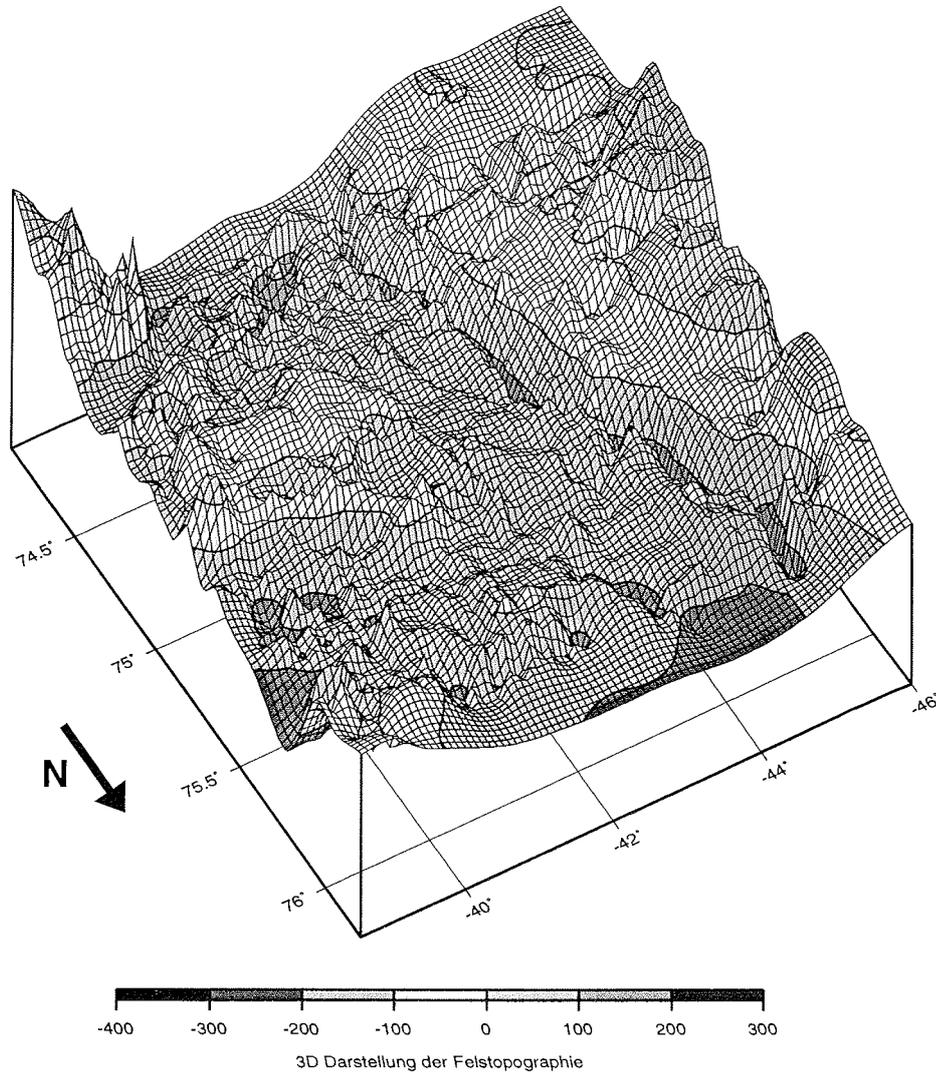


Abbildung 6.6: 3D-Darstellung der Felstopographie.

Es wurde ein Blickwinkel von Nordwest zur Betrachtung ausgewählt, da so der Graben am deutlichsten zu sehen ist. Gut zu erkennen sind durch den Interpolationsalgorithmus entstandenen Artefakte an den Rändern.

6.4 Fehlerbetrachtung

Die Genauigkeit mit der die Eismächtigkeit bestimmt wurde und die Qualität der ermittelten Daten hinsichtlich der Navigationsgenauigkeit, läßt sich mit der Kreuzungspunktanalyse beurteilen. Für die Kreuzungspunktanalyse wird davon ausgegangen, daß die erfaßten Reflexionseinsätze an der Eisoberfläche und an dem Übergang von Fels zu Eis fehlerfrei sind. Das heißt, bei beiden Einsätzen wurde die maximale Amplitude oder die aufsteigende Flanke des Signals erfaßt und der 600-ns-Puls ist nicht gestört.

Beim Festlegen des Einsatzes der Welle an der Eisoberfläche werden 1000 ns der Daten dargestellt. Die Abtastrate beträgt 13,333 ns. Somit entsprechen 1000 ns Darstellung der Daten auf dem Bildschirm der Darstellung von 75 Datenpunkten¹. Die Bestimmung des Einsatzes erfolgt mit einer Genauigkeit von ± 4 Datenpunkten, also $\pm 53,332$ ns. Daraus ergibt sich für die Bestimmung des Einsatzes der Welle an der Eisoberfläche mit der Geschwindigkeit der Welle in Eis von $v = 0,168$ m/ns eine Genauigkeit von: ± 4 Datenpunkte $\cdot 13,333$ ns $\cdot \frac{0,168\text{m/ns}}{2} = \pm 4,5$ m. Der Einsatz der Reflexion an der Eisoberfläche kann auf $x_{top} = 9,0$ m genau angegeben werden.

Beim Festlegen des Einsatzes an dem Übergang von Eis zu Fels werden 2500 ns der Daten dargestellt. Die Darstellung von 2500 ns an Daten auf dem Bildschirm entsprechen der Darstellung von 188 Datenpunkten². Aufgrund der Topographie des Untergrundes erfolgt die Bestimmung des Einsatzes der Welle in den Fels mit einer Genauigkeit von ± 12 Datenpunkten, also $\pm 133,33$ ns. Die Genauigkeit des Einsatzes errechnet sich mit der Geschwindigkeit der Welle in Eis von $v = 0,168$ m/ns demnach zu: ± 12 Datenpunkte $\cdot 13,333$ ns $\cdot \frac{0,168\text{m/ns}}{2} = \pm 13,5$ m. Der Einsatz der Reflexion an dem Übergang von Eis zu Fels kann auf $x_{bot} = 27$ m genau angegeben werden. Somit kann die Lage der Eisunterseite auf $x_{bot} + x_{top} = 36$ m genau angegeben werden.

Die Genauigkeit, mit der die Eismächtigkeit bestimmt wird, beträgt 27m. Es ist jedoch noch eine andere Fehlerquelle zu berücksichtigen. Die Welle erfährt nach dem Fresnel-Huygens-Prinzip eine Fresnel-Beugung (Nahfeldbeugung) [Hecht, 1989]. Die erste Fresnel'sche Zone beträgt bei dem 600-ns-Puls, der eine vertikale Auflösung von 50,4 m hat: $\frac{50,4\text{m}}{4} = 12,6$ m = $x_{fresnel}$.

Insgesamt ergibt sich für die Genauigkeit x bei der Bestimmung der Eismächtigkeit ein Wert von: $x = x_{top} + x_{bot} + x_{fresnel} = 9,0$ m + 27,0 m + 12,6 m = 48,6 m.

¹ $\frac{1000\text{ns}}{13,333\text{ns}} = 75$ Datenpunkte.

² $\frac{2500\text{ns}}{13,333\text{ns}} = 187,5 \approx 188$ Datenpunkte.

Bei der Kreuzungspunktanalyse wurden die Profile auf die Differenz ihrer Eismächtigkeiten an den Kreuzungspunkten untersucht. Bei Differenzen von mehr als 50 m wurde der Kreuzungspunkt auf mögliche Ursachen der Abweichung hin untersucht.

Die Verteilung der Eismächtigkeitsdifferenzen der 1128 Kreuzungspunkte ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Hier wurde für jeden Kreuzungspunkt die Differenz nur einmal eingetragen. An 91 % der Punkten ist die Abweichung zwischen ± 20 m.

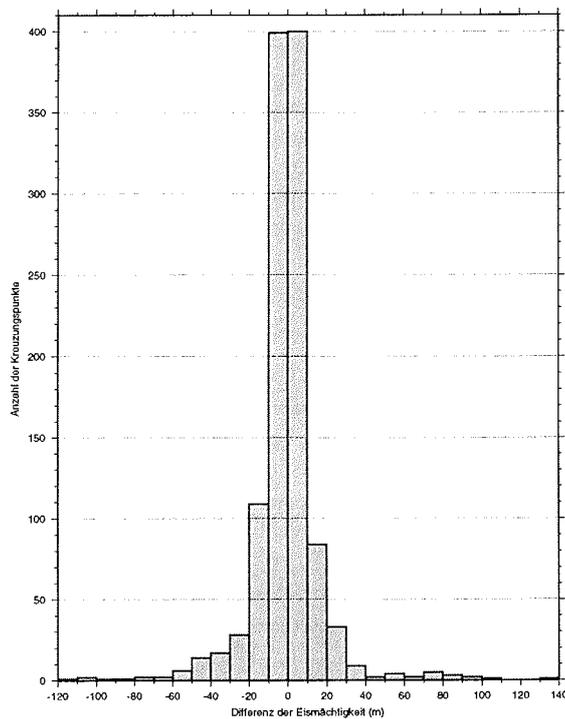


Abbildung 6.7: Histogramm der Abweichungen der Eismächtigkeitswerte.
Das Histogramm zeigt die Verteilung der Anzahl der Kreuzungspunkte gegen Werte der Abweichungen der Eismächtigkeiten. 91% der Eismächtigkeitsdifferenzen liegen dem Betrag nach bei Werten unter 20 m.

Betrachtet man die Intervalle mit Abweichungen größer als die gesetzte Toleranzgrenze von ± 50 m, so ergeben sich insgesamt 28 Einträge (2,5% der Kreuzungspunkte), bei denen diese Toleranzgrenze überschritten wird.

Die Abweichungen lassen sich auf folgende Ursachen zurückführen:

- **Das Flugzeug befindet sich in einem Kurvenflug:**

Fliegt das Flugzeug über einem Kreuzungspunkt eine Schleife, dann befinden sich die Antennen nicht parallel zur Oberfläche. Dadurch verlängert oder verkürzt sich der Weg der elektromagnetischen Welle. Der Wert für die Eismächtigkeit wird größer oder kleiner. Das trifft auf die Kreuzungspunkte, die mit a gekennzeichnet sind, zu.

- **Der Kreuzungspunkt befindet sich über einer Hanglage:**

Navigations- und Pickfehler führen zu dieser Abweichung. Liegt der Kreuzungspunkt über einer Hanglage so wird er mit einem im Streichen verlaufenden Profil und mit einem senkrecht zum Streichen verlaufenden Profil erfaßt. Denn beim Picken wird nicht immer exakt dieselbe Koordinate getroffen. So bekommt man an senkrecht zueinander stehenden Profilen auch bei kleinen Horizontaldifferenzen zwischen den "Picks" schnell große Höhenunterschiede.

Diese Annahme wird durch die Anhäufung der Fehlerpunkte in den Hanglagen westlich des Grabens erhärtet. Das trifft auf die Kreuzungspunkte, die mit h gekennzeichnet sind, zu.

- **Der Kreuzungspunkt befindet sich über einem Extrempunkt:**

Im Gelände mit stark ausgeprägter Topographie, wie z.B. an Hängen oder Erhebungen, wird der Effekt des unterschiedlichen Anflugs verstärkt. Erschwerend kommt hinzu, daß an Stellen mit tiefem Graben der Untergrund bei dem korrespondierenden Querflug stellenweise nicht erfaßt werden konnte. Zwischen den letzten erfaßten Punkten wurde der weitere Verlauf des Untergrundes interpoliert. Das führt ebenfalls zu Fehlern. Dieser Fehlerkomplex trifft auf die Kreuzungspunkte im Bereich des Grabens zu, die mit g gekennzeichnet sind.

In Abbildung 6.8 sind die geographischen Orte, an denen ein Wert für die Eismächtigkeit ermittelt werden konnte als Punkte eingezeichnet. Die 28 Kreuzungspunkte, an denen die Eismächtigkeit um mehr als 50 m abweicht, sind in Abbildung 6.8 durch Pfeile mit den obengenannten Indizes a, h und g gekennzeichnet.

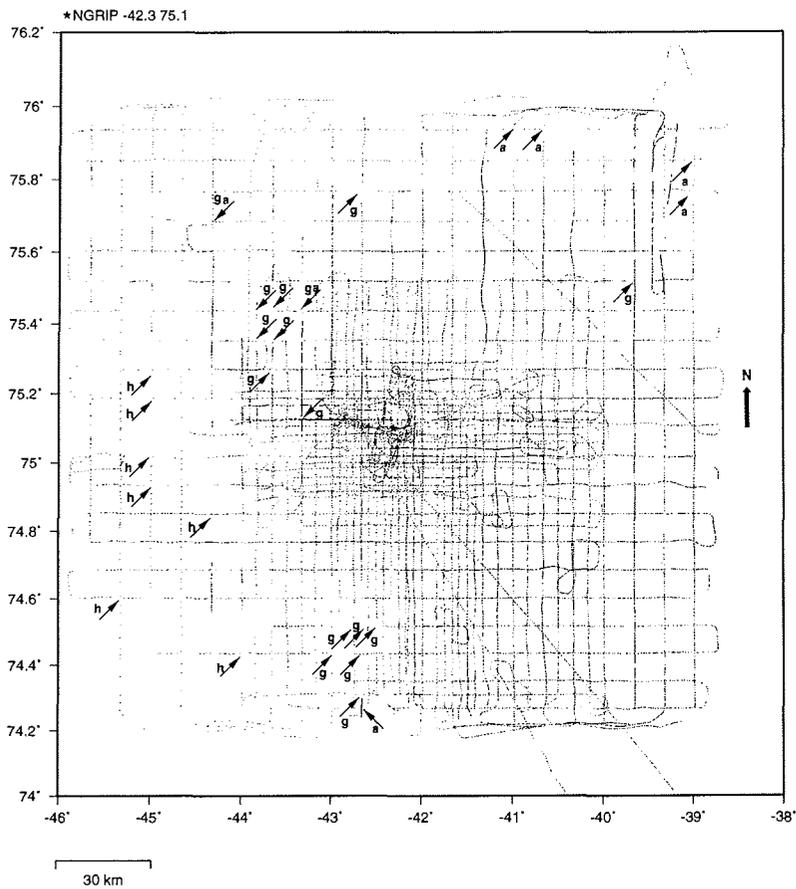


Abbildung 6.8: Übersicht der Kreuzungspunkte.

Für jeden Kreuzungspunkt in dieser Karte wurde ein Eismächtigkeitswert ermittelt. Die Pfeile weisen jeweils auf die Kreuzungspunkte von zwei Profilen hin, an denen die Werte für die Eismächtigkeit um mehr als 50 m voneinander abweichen. Die Indizes a, g und h stehen für Schleifenflug, Graben und Hanglage.

Der Mittelwert der Abweichungen der Eismächtigkeit wurde berechnet, indem für jeden Kreuzungspunkt der Wert der Abweichung, unter Berücksichtigung des Vorzeichens, addiert und die Summe durch die Anzahl der Kreuzungspunkte dividiert wurde. Somit beträgt der Mittelwert der Abweichungen \bar{x} an den Kreuzungspunkten:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = 0,28m.$$

Dabei gibt N die Anzahl der Kreuzungspunkte an. Die Standardabweichung bzw. Streuung s um den Mittelwert der Abweichung ergibt sich mit der folgenden Formel zu:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^j (x_i - \bar{x})^2} = \pm 17,96m.$$

91 % der Kreuzungspunkte liegen in dem Bereich ± 20 m, d.h. etwa innerhalb der Standardabweichung. 97,5% Nur 2,5 % der Kreuzungspunkte weisen Abweichungen der Eismächtigkeiten außerhalb der Toleranzgrenzen von ± 50 m auf. Diese 28 Kreuzungspunkte konnten aufgrund ihrer geographischen Lage und der Fehler in der Navigation erklärt werden. Demnach sind die Karten der Eismächtigkeit und die darauf beruhende Karte der Felstopographie sehr gut bestimmt.

Kapitel 7

Ergebnisse zur inneren Struktur

7.1 Erfassung der inneren Struktur

Das Radargramm in Abbildung 7.1 zeigt einen Profilschnitt zwischen 75.8° und 75.3° nördlicher Breite auf dem Längengrad 39.99° W. Die Eismächtigkeit ist gegen die zurückgelegte Strecke aufgetragen. Dabei ist zu bemerken, daß die Werte der Eismächtigkeit zwischen 0 und 3000 m liegen, die dabei zurückgelegte Strecke jedoch 67 km beträgt, die Höhe also 23fach überhöht dargestellt ist.

Die Horizonte im Bereich oberhalb 0 m entstehen durch direktes Übersprechen der Sendeantenne zur Empfangsantenne. Die Eisoberfläche befindet sich auf der Höhe 0 m und ist durch einen recht deutlichen Einsatz gekennzeichnet.

Die innere Struktur des Eisschildes gliedert sich in zwei Bereiche. Im Radargramm der Abbildung 7.1 ist der Bereich von 0 m bis 1300 m Tiefe durch viele relativ dicht beieinander liegende Reflexionshorizonte ausgezeichnet. Der Bereich von 1300 m bis 3000 m weist deutlich nur 2 Horizonte auf. Bei geübtem Blick sind bei etwa 1400 m und 2100 m weitere Horizonte auszumachen. Der Felsuntergrund setzt bei 3000 m Tiefe ein. Dieser ist hier nicht so deutlich zu erkennen, da in dieser Abbildung ein Radargramm mit 60-ns-Puls und nicht mit 600-ns-Puls dargestellt ist.

Der obere Bereich fällt in den Zeitbereich des jetzigen Interglazials, das Holozän. Der untere Bereich stellt das letzte Glazial, Wisconsin, dar. Diese Zweiteilung ist deshalb so deutlich zu erkennen, da während des Glazials im grönländischen Eisschild weniger saure Lagen abgelagert wurden als im Holozän. Da der Temperaturgradient in Eiszeiten zwischen den polaren und den äquatorialen Breitengraden größer als in wärmeren Zeiten ist, ist die Windaktivität in Glazialzeiten höher als in Warmzeiten. Da in Eiszeiten auch noch mehr Wasser in Form von Eis gebunden ist, und somit der Meeresspiegel in Eiszeiten niedriger ist als in wärmeren, wird durch die höhere Windaktivität mehr terrestrischer Staub in die Atmosphäre eingetragen. Dieser meist

kalkig alkalische Staub, der vorwiegend aus Karbonatverbindungen besteht, neutralisiert die sauren Bestandteile der Atmosphäre. Daher werden im Glazial weniger saure Lagen deponiert als in Interglazialen oder in Interstadialen. Die Reflexionshorizonte im unteren Bereich kennzeichnen daher die Interstadialen im Wisconsin.

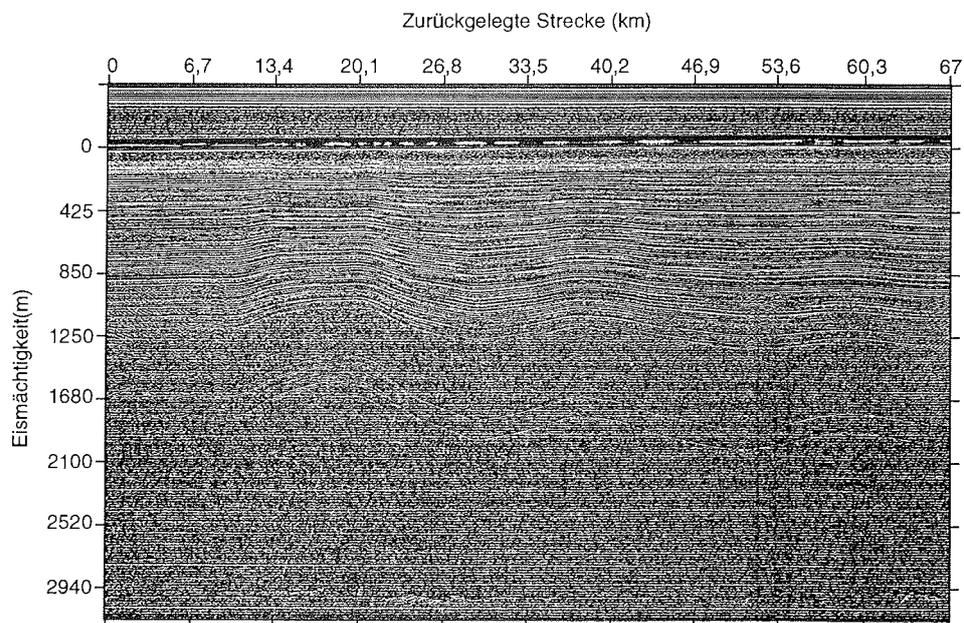


Abbildung 7.1: Darstellung eines Radargramms.

Das Radargramm (60-ns-Puls) zeigt einen Profilabschnitt zwischen 75.8° zu 75.3° nördlicher Breite auf dem Längengrad 39.99° W. Die äquidistanten geraden Horizonte, die sich unterhalb von 1250 m durch das Bild ziehen, entstehen durch systembedingtes Rauschen. Diese Abbildung ist im Anhang A.2 zur genaueren Betrachtung größer abgebildet.

7.2 Ausgewählte interessante Gebiete

Bei der Analyse der Daten ist eine weitere Besonderheit aufgefallen. Die Horizonte der Interstadialen im Wisconsin weisen stellenweise Undulationen auf, die kein Abbild des Untergrundes darstellen und sich auch nicht an der Oberfläche widerspiegeln.

In Abbildung 7.2 ist die Verteilung dieser Undulationen eingezeichnet, sowie auch die Fluglinien der Kampagnen 1996 und 1997. Die Stellen, an denen die Interstadialen deformiert sind, sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet. Diese Undulationen beschränken sich somit auf bestimmte Regionen. Gehäuft haben sich diese Undulationen südöstlich von NGRIP sowie im Nordosten des Meßgebietes.

Dabei fällt auf, daß sich das Auftreten von Undulationen östlich der Eisscheide konzentriert. Westlich, dort wo sich der Hang im Untergrund befindet, sind keine solchen Erscheinungen zu beobachten. Das trifft sowohl auf die Daten der Kampagne 1996 als auch auf die der Kampagne 1997 zu.

Eine flächenhafte Darstellung der Horizonte und somit ihr Verlauf relativ zum Untergrund könnte entschieden zum Verständnis der Problematik beitragen. Die Informationen über den Felsuntergrund stehen zwar nun zur Verfügung, aber mit der bisher verwendeten Interpretationssoftware FOCUS/DISCO ist es nicht möglich, Profile an ihren Kreuzungspunkten zu vergleichen und ihre Abweichung zu justieren. Daher kann ein ausgewählter Horizont durch alle Profile hindurch nicht eindeutig identifiziert werden.

Zur Untersuchung dieser Problematik eignet sich die seismische Interpretationssoftware Landmark SeisWorks3D und SeisWorks2D. Hierzu mußten die Daten in ein anderes Format konvertiert und in Landmark importiert werden, worauf im nächsten Kapitel eingegangen wird.

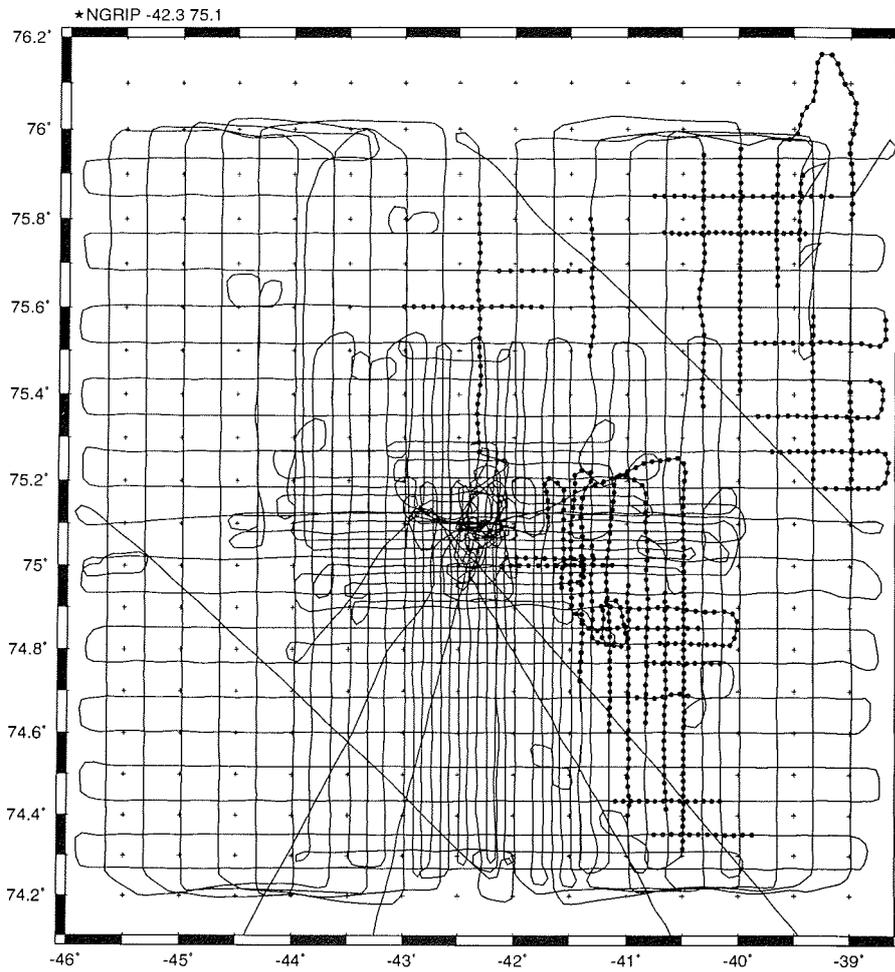


Abbildung 7.2: Verteilung der Undulationen der Interstadialen des Wisconsin.
 Die durchgezogenen Linien sind die Flugprofile, welche in den Meßkampagnen 1996 und 1997 geflogen worden sind. Die schwarzen Punkte kennzeichnen die Positionen, an denen die Interstadialen des Wisconsin Undulationen aufweisen, die nicht aus der Felstopographie ableitbar sind.

7.3 Bearbeitung der Daten mit der Interpretationssoftware Landmark

Für die Diskussion der im vorigen Kapitel erläuterten Problematik bietet sich die SeisWorks3D und SeisWorks2D Interpretationssoftware von Landmark an. Das Paket bietet die Möglichkeit, sich kreuzende Profile nebeneinander darzustellen. Ein ausgezeichneter Horizont in dem kreuzenden Profil kann eindeutig identifiziert und weiter verfolgt werden.

Um die Daten in dieses Softwarepaket importieren zu können, mußten die Daten zuerst vom DISCO-Format in das in der Seismik bekannte SEG-Y-Format transformiert werden. Mit entsprechenden Modulen der Landmark-Interpretationssoftware war dann das Importieren der SEG-Y-Daten in Landmark möglich.

Die Daten wurden teilweise in SeisWorks3D und teilweise in SeisWorks2D geladen, da sie nicht alle in ein 3D Projekt importiert werden konnten. Die N-S- und E-W-Flugabschnitte der Meßkampagne 1996 wurden jeweils als eigene SeisWorks3D Projekte eingerichtet.

Da die beiden Verbindungsflüge, von NGRIP nach GISP2 über GRIP und der Rückflug von GISP2 über GRIP nach NGRIP, als SeisWorks3D-Projekte die Einrichtung von neun 3D-Projekten erfordert hätten, wurden sie als SeisWorks2D-Projekte eingerichtet. Zudem dienen sie nicht zur flächenhaften Darstellung der Horizonte, sondern zur Alterszuordnung der ausgewählten Horizonte.

Dabei erfolgt das Laden der Daten in SeisWorks2D und in SeisWorks3D unterschiedlich. Bei SeisWorks2D sind Informationen über Navigation, Schuß-Spur-Relation und Header-Einträge einzugeben. Zudem muß in SeisWorks2D eine Karte angelegt werden, in die die Navigationsdaten geladen werden, um sie dann später mit den geladenen Daten zu verbinden. Bei SeisWorks3D muß man die Struktur der Daten gut kennen, legt eine Karte mit drei Referenzpunkten an und kommt so mit einer Laderoutine aus. Die Anordnung der anderen Profile wird in Abhängigkeit von der Anzahl der Profile und der Spuren ermittelt.

Das Verfahren der graphischen Darstellung der Flugrouten und die Projektion der Koordinaten erfolgt in beiden Paketen unterschiedlich. Daher ist eine genaue Planung der Datenanordnung vor dem Anlegen der Projekte erforderlich.

Landmark ermöglicht eine Verbindung der verschiedenen SeisWorks3D und SeisWorks2D Projekte miteinander, so daß ein ausgewählter Horizont in allen eingebundenen Projekten verfolgt werden konnte.

In Landmark wurden die Daten des 60-ns-Pulses geladen, um einen ausgewählten Horizont besser verfolgen zu können. Zwar hat der 60-ns-Puls den Nachteil, daß durch dessen geringeren Energieinhalt die Reflexionshorizonte schwächer abgebildet sind, aber bei dem 60-ns-Puls werden 5 m, im Gegensatz zu 50,4 m beim 600-ns-Puls, aufgelöst. So ist eine genauere Verfolgung und Tiefenzuordnung der Horizonte möglich.

Durch Bestimmung der Laufzeitdifferenzen der Wellen zwischen der Eisoberfläche und dem ausgesuchten Horizont, konnte die Tiefenlage der Horizonte, wie vorher bei dem Felsuntergrund, abgeleitet werden. Die ausgewählten Horizonte wurden anschließend nach GMT exportiert, um sie flächenhaft darzustellen. Die Darstellung erfolgte nicht mit den Landmark eigenen Modulen, da die Daten nicht statisch korrigiert geladen worden sind und dann Landmark eine solche Option nicht bietet.

Durch einen Vergleich der flächenhaften Darstellung des Untergrundes mit der der Horizonte können Rückschlüsse auf mögliche Bewegungen, wie z.B. das Wandern einer Eisscheide, der Horizonte gezogen werden.

7.4 Erfassung des Horizonts im Holozän

Für den Übergang vom Holozän zu Wisconsin gibt Dansgaard [1993] an der Bohrlokation GRIP eine Tiefe von 1625 m an. Bei dem Flug von GISP2 über GRIP nach NGRIP liegt der unterste ausgeprägte Reflexionshorizont bei der Zweiweg-Laufzeit von 16,3 μ s. Der Horizont etwas tiefer läßt sich zwischen GRIP und GISP2 nicht durchgehend verfolgen. Daher wurde für die Kartierung der Horizont bei der Zweiweg-Laufzeit von 16,35 μ s ausgewählt, das einer Tiefe von 1384 m \pm 50 m entspricht. Die geographischen Punkte, an denen eine Laufzeit der Welle für diesen Horizont ermittelt werden konnte, sind in Abbildung 7.3 rot eingetragen.

Die daraus resultierende Tiefenlage des Horizontes ist in Abbildung 7.3 dargestellt. Der Gitterpunktabstand für die Interpolation zwischen den Datenpunkten wurde auf 4,4 km in N-S-Richtung und 5,33 km in E-W-Richtung gelegt.

Bei der Betrachtung dieses Horizonts von Süden nach Norden ist die versetzte Höhenabnahme nach Westen hin auffallend. Verfolgt man einen Punkt am südlichen Rand des Meßgebietes nach Norden, so ergibt sich für jeden Punkt eine Zunahme der Höhe um 200 m. Der Horizont entfernt sich nach Norden vom Felsuntergrund, und befindet sich näher der Eisoberfläche. Das entspricht den Erwartungen [Dahl-Jensen et al., 1997]. Denn aufgrund der niedrigeren Akkumulationsrate an NGRIP als an GRIP entfernen sich die Horizonte vom Untergrund, und befinden sich automatisch näher an der Eisoberfläche. Dieses Verhalten wird in der Interpretation näher diskutiert.

Ein weiterer Trend ist von Osten nach Westen auszumachen. Hier sinkt der Horizont kontinuierlich ab, und zwar von über 1800 m auf unter 1200 m über NN. Das Abtauchen ist im Südwesten des Meßgebiets stärker ausgeprägt als weiter im Norden.

Die langgezogenen Spitzen der Isolinien in der nördlichen Hälfte des Gebietes kommen durch nicht vorhandene Datenpunkte aus Ost-West-Profilen zustande. Betrachtet man das Gebiet mit der höchsten Datendichte, so ist von Ost nach West noch ein weiterer Trend offensichtlich. Der Horizont sinkt nicht kontinuierlich ab, sondern weist Undulationen auf. Diese sind in der Abbildung 7.4, mit der Blickrichtung von Südwesten aus, deutlich zu erkennen.

Eine stark ausgeprägte Undulation verläuft von Süden, entlang der Länge von 45° W, nach Norden. Die dabei auftretenden Höhendifferenzen betragen um die 200 m. Von Osten nach Westen treten drei parallel verlaufende Undulationen auf, wobei die Undulation, die entlang der Breite von 75° N verläuft, die stärkste Ausprägung aufweist.

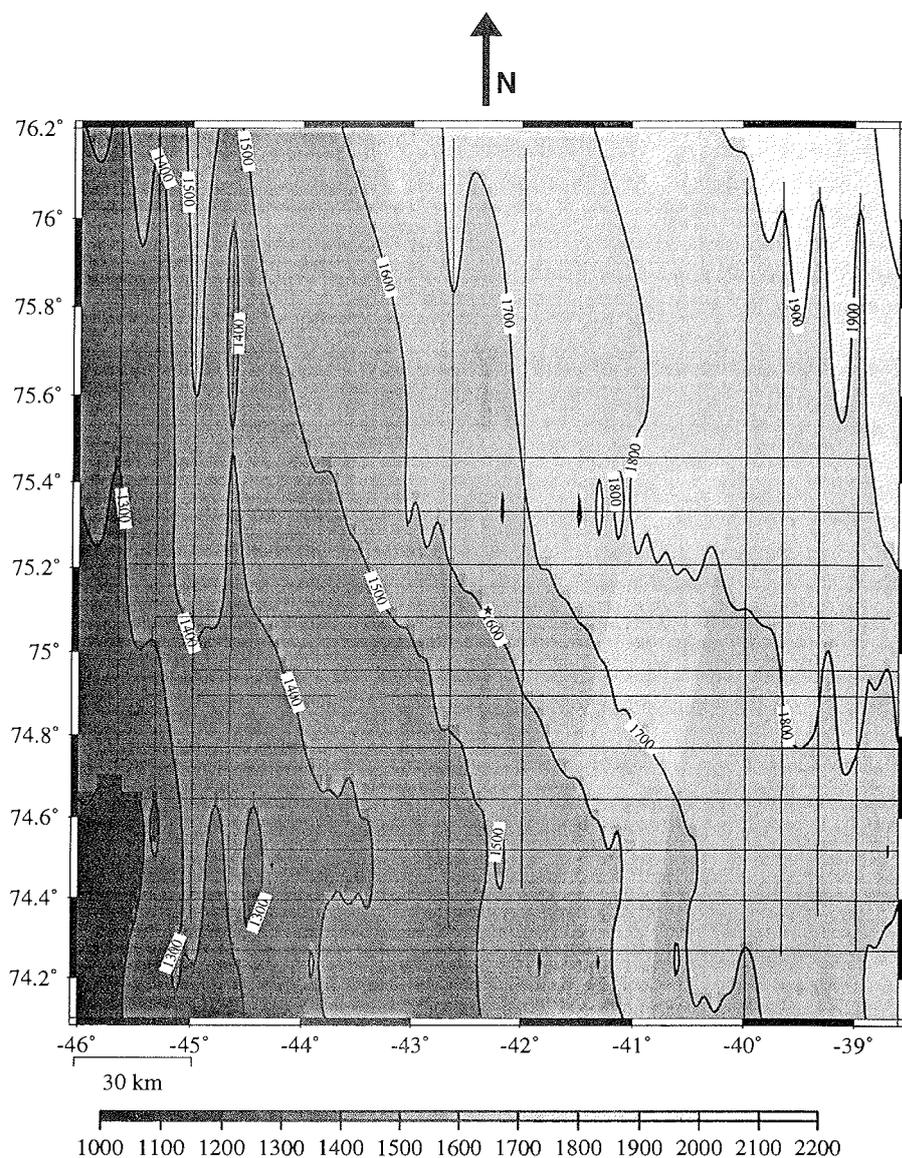


Abbildung 7.3: Zweidimensionale Darstellung der Tiefenlage des letzten durchgehend verfolgbaren Horizontes im Holozän, bezogen auf NN.

Tiefenlage des letzten durchgehend verfolgbaren Horizontes im Holozän. Eine Besonderheit zeichnet sich nach Westen hin ab. Der Horizont sinkt immer tiefer und entfernt sich von der Eisoberfläche. Nach Norden liegt der Horizont näher zur Eisoberfläche als im Süden. Die roten Linien kennzeichnen die Positionen der erfassten Datenpunkte.

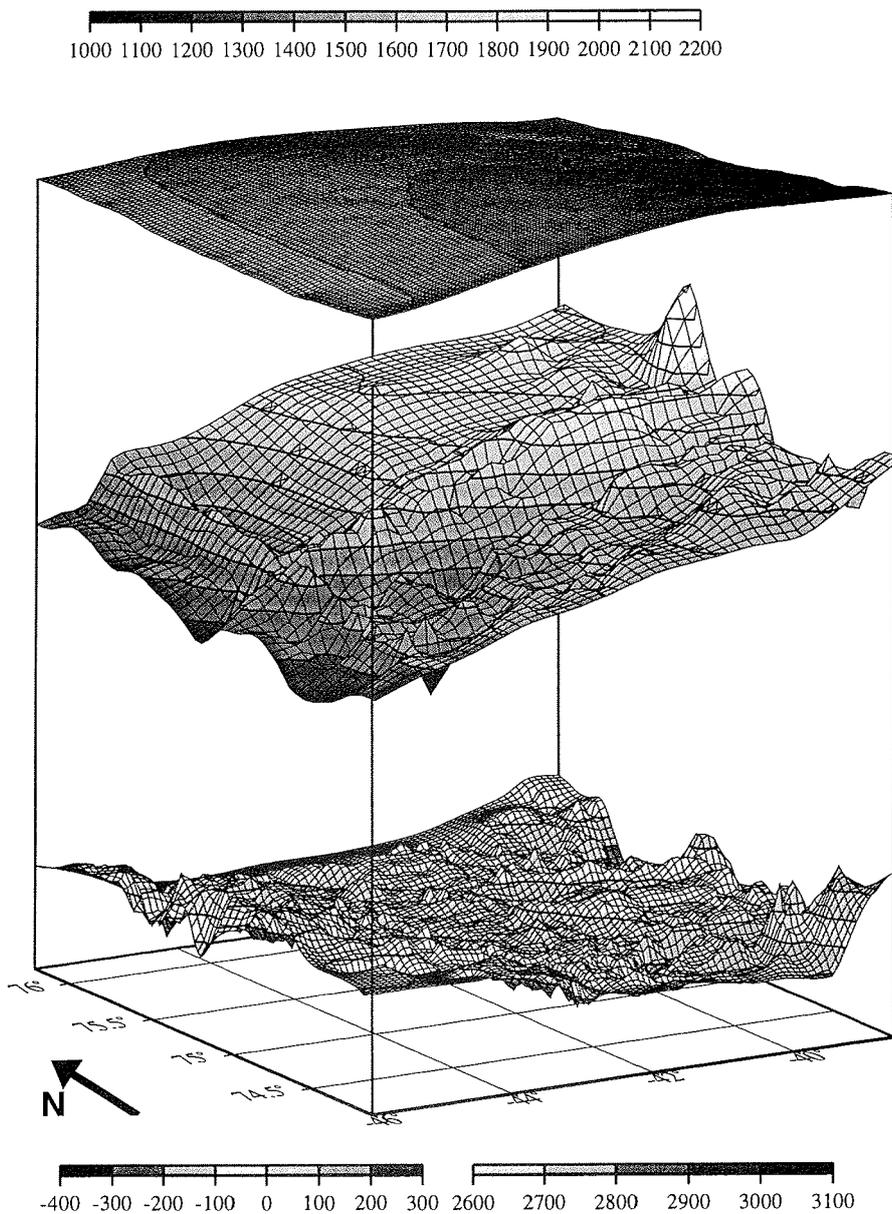


Abbildung 7.4: Dreidimensionale Darstellung der Tiefenlage des letzten durchgehend verfolgbaren Horizontes im Holozän, bezogen auf NN.

Der Horizont sinkt nach Westen hin immer tiefer. Das ist ein entgegengesetzter Verlauf zur Topographie des Felsuntergrundes. Der Gradient der Oberfläche des Horizonts ist deutlich größer als der Gradient der Eisoberfläche. Die Eisoberfläche und der Felsuntergrund wurden ebenfalls dargestellt.

7.5 Erfassung der Interstadialen im letzten Glazial

Im Meßgebiet waren bis zu 5 Isochronen des letzten Glazials, die Wisconsin Interstadialen, zu detektieren. Meist waren es drei. Es wurde der mittlere der drei Horizonte erfaßt und kartiert. Dies gelang, da das Landmarksystem die Möglichkeit bietet, einen Horizont in zwei Profilen gleichzeitig zu verfolgen. Die geographischen Punkte, an denen dies möglich war, wurden in Abbildung 7.5 rot gekennzeichnet.

Denn bei der Erfassung der Interstadialen trat die Schwierigkeit auf, daß erstens der Horizont bei etwa 42° W fast bis zum Untergrund abgesunken und zweitens weiter westlich auch nicht mehr wieder zu finden war. Der Gradient, mit dem der Horizont abtauchte, war in dem Bereich zwischen 41° W bis 42° W am größten. In Abbildung 7.5 ist die Karte zur Tiefenlage der Interstadialen dargestellt.

Dabei fällt auf, daß die Undulationen bei diesem Horizont viel stärker ausgeprägt sind als bei dem im Holozän erfaßten Horizont. Das ist verständlich. Denn, da dieser Horizont näher am Felsuntergrund liegt, ist er stärker der Topographie des Untergrundes ausgesetzt. Die Undulationen im Südwesten des Meßgebiets, das Absinken und wieder Auftauchen und das nochmalige Absinken des Horizontes, sind in der Abbildung 7.6 deutlich zu erkennen.

Von Ost nach West betrachtet taucht der Horizont ab, am ausgeprägtesten nach Südwesten hin. Der Horizont verliert an Höhe von über 800 m auf einer Strecke von etwa 170 km. Er büßt somit genau so viel an Höhe ein, wie der im Holozän erfaßte Horizont. Somit verläuft auch er nicht entsprechend der Topographie des Felsuntergrundes, sondern mit einer erheblich höheren Steigung, ähnlich der Topographie der Eisoberfläche.

Eine weitere Besonderheit zeigt der Verlauf des Horizonts von Süd nach Nord. Der Horizont steigt an, der Abstand vom Horizont zum Untergrund nimmt wie bei dem Horizont im Holozän zu. Die von Süd nach Nord abnehmende Akkumulationsrate ist auch hier die Ursache für dieses Verhalten. Aber im Gebiet zwischen $38,5^{\circ}$ und 40° westlicher Länge nimmt der Horizont zwar von Nord nach Süd an Höhe zu, bleibt aber in der Breite in diesem Bereich auf einer Höhe. Dieses Verhalten ändert sich westlich davon. Hier nimmt die Höhe mit zunehmender südwestlicher Richtung ab.

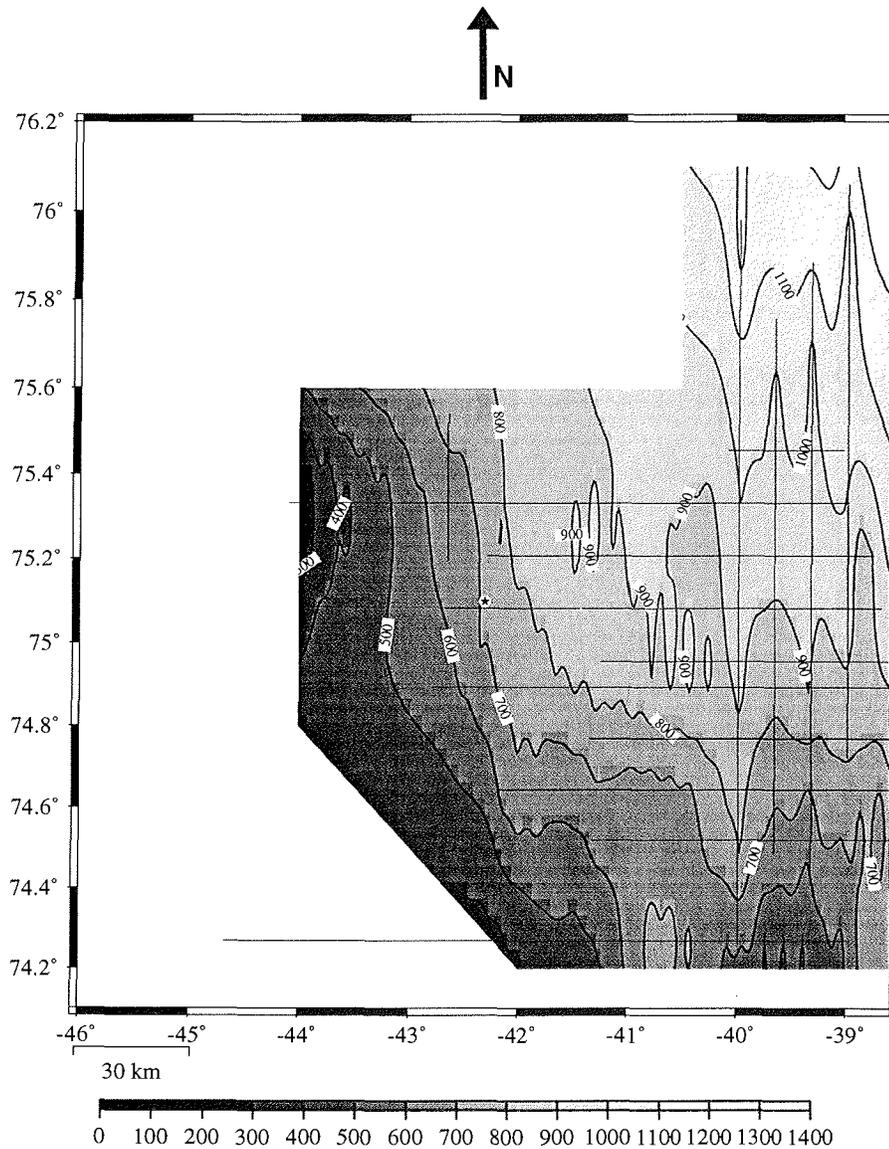


Abbildung 7.5: Zweidimensionale Darstellung der Tiefenlage eines Interstadials des Wisconsin, bezogen auf NN.

Die weißen Bereiche in dieser Abbildung enthalten keine Werte. Da dort keine Laufzeiten für diesen Horizont ermittelt werden konnten. Diese Bereiche werden nicht dargestellt, um Artefakte beim Gridden so gering wie möglich zu halten. An den rot gekennzeichneten Positionen konnte der Reflexionshorizont in den Radargrammen erfaßt werden.

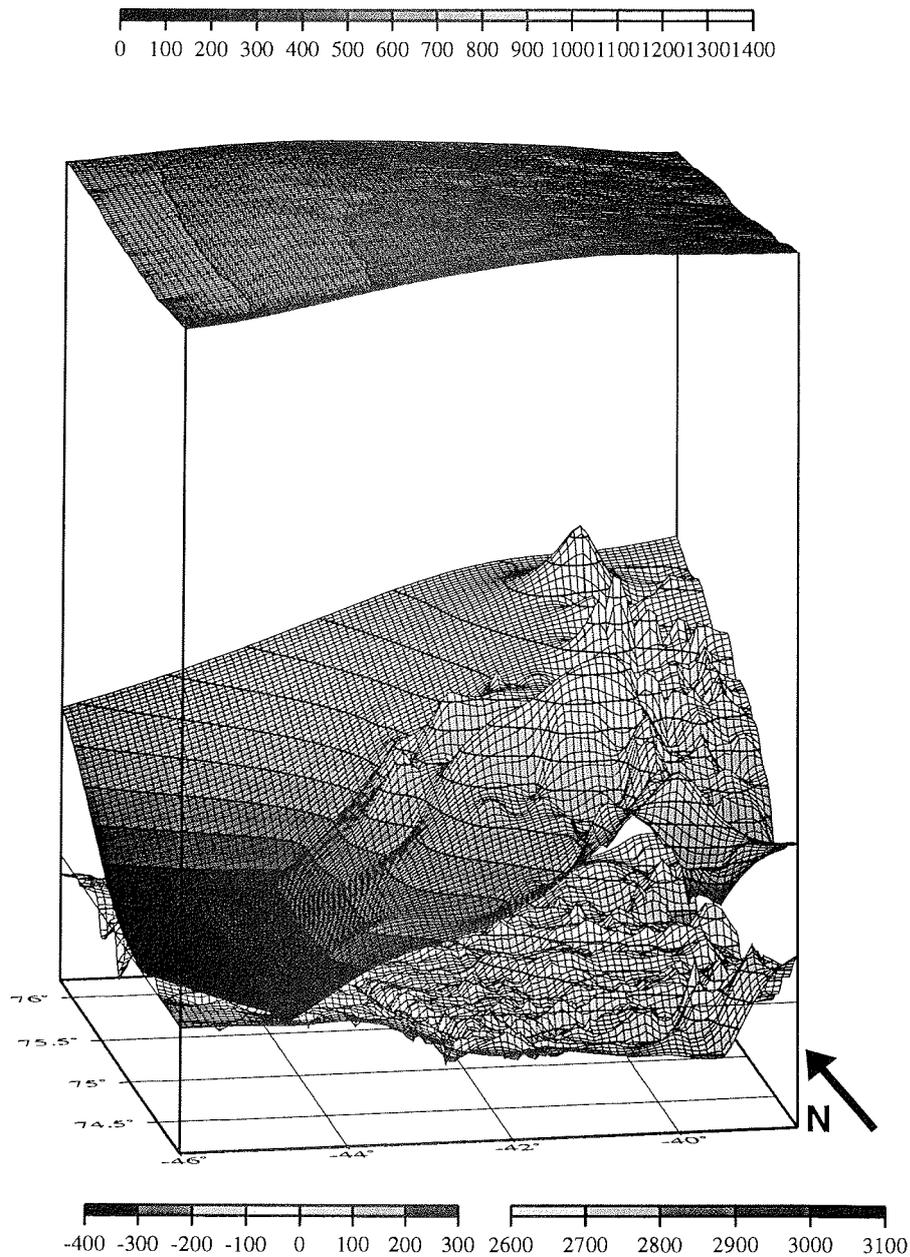


Abbildung 7.6: Dreidimensionale Darstellung der Tiefenlage eines Interstadials des Wisconsin, bezogen auf NN.

Der Blickwinkel ist hier von Süden nach Norden gerichtet. Die Bereiche unter 300 m unter Null kommen durch Interpolationsartefakte zustande. Da das Ausschließen bestimmter Meßbereiche die Grafiksoftware bei einer Drehung der Ansicht um mehr als 180° nicht erlaubt, konnte dieser Bereich nicht ausgeschnitten werden. Ein anderer Blickwinkel ist nicht so günstig, da dann das Abtauchen des Horizonts verdeckt wird.

Kapitel 8

Interpretation

8.1 Betrachtungen zur Eismächtigkeit und zur Topographie

Die Eisoberfläche im Meßgebiet verläuft sehr eben. Modellrechnungen von Höhen der Eisoberfläche in Grönland der letzten 200 000 Jahren zeigen eine stets ähnliche Verteilung der Höhen [Huybrechts, 1994]. Die Gradienten der Oberfläche haben sich nur bei großräumiger Betrachtung verändert. Bei einer Fläche des Meßgebiets von 40 000 km² in Zentralgrönland, kommen keine großen Änderungen vor.

Die Eismächtigkeit ist im westlichen Bereich des Meßgebiets geringer als im östlichen, da sich im Westen ein Hang auf einer Strecke von etwa 75 km um maximal 400 m erhebt, die Eisoberfläche aber weitgehend bei Werten um 2800 m über NN bleibt.

Die größte Eismächtigkeit wird über einem Graben im Eisuntergrund gemessen. Die tiefste Stelle des Grabens liegt bei etwa 200m unter NN. Der Korridor mit Eismächtigkeiten von über 3100 m, und auch der Graben, verlaufen parallel zur heutigen Eisscheide (vgl. Abbildung 6.2 und Abbildung 6.5).

Östlich der Eisscheide liegen die Werte der Felstopographie bei Werten um 100 m unter NN. Am südöstlichen Rand des Meßgebietes erhebt sich auf einer Strecke von etwa 45 km ein Hang von 100 m unter NN auf über 100 m über NN. Weitere Erhebungen wurden auf dem Verbindungsflug von NGRIP nach GRIP festgestellt, der über dieses Gebiet verläuft. Die Eisoberfläche und der Felsuntergrund verlaufen im Meßgebiet relativ eben.

Bei NGRIP beträgt die Eismächtigkeit zwischen 3000 m und 3100 m. Dies ist in sehr guter Übereinstimmung mit der an NGRIP angegebenen Eismächtigkeit von 3085 m [Dahl-Jensen et al., 1997].

Daß sich weite Teile des Untergrunds im Meßgebiet unter NN befinden, deckt sich mit den Angaben aus dem Grönland-GIS. Das Grönland-GIS gibt für dieses Gebiet die niedrigste Topographie für den Untergrund mit 400 m unter NN an. Die niedrigsten in dieser Arbeit bestimmten Werte liegen bei 343 ± 50 m unter NN.

8.2 Betrachtungen zur internen Schichtung

In Kapitel 7 wurde die Tiefenlage des Übergangs Holozän-Pleistozän und die der Wisconsin-Interstadiale gezeigt. Beiden gemeinsam ist, daß ihre Tiefenlage von Südwest nach Nordost abnimmt.

Die Akkumulationsraten im Meßgebiet nehmen von Südwest, das Maximalwerte von 400 mm Wasseräq. Jahr⁻¹ aufweist, nach Nordost, mit Minimalwerten von 150 mm Wasseräq. Jahr⁻¹, ab; eine markante Grenze ist die Eisscheide. Sie stellt offensichtlich eine Wettergrenze zwischen dem warmen Atlantik und dem wesentlich kälteren Nordpolarmeer dar. Im Meßgebiet herrschen Westwinde vor.

Von Süd nach Nord betrachtet, wird die Akkumulationsrate geringer. Dies wird ebenfalls durch die Akkumulationsraten an den Bohrlokalationen NGRIP und GRIP bekräftigt.

Wie von Reeh [1989] beschrieben hängt die Tiefenlage einer Isochrone eines großen Eisschildes im wesentlichen von der Akkumulationsrate ab. In Gebieten mit großer Akkumulationsrate liegen die Horizonte in größerer Tiefe als in Gebieten mit geringerer Akkumulationsrate. Diese Beobachtungen decken sich mit den Ergebnissen aus den vier Vorerkundungsflügen, die 1995 von der NASA und University of Kansas durchgeführt worden sind [Dahl-Jensen et al., 1997]. Die Horizonte liegen an nördlicheren Meßpunkten weiter entfernt vom Untergrund als in südlicheren.

Der Grund für dieses Verhalten liegt an unterschiedlichen Akkumulationsraten im Meßgebiet. Auf dem Grönländischen Eisschild sind die Akkumulationsraten südwestlich des Summits bis zu doppelt so hoch als in den östlichen Gebieten [Jung-Rothenhäusler, 1998; Ohmura und Reeh, 1991]. Das liegt daran, daß sich südwestlich der Eisscheide der relativ warme Atlantik und nordöstlich das wesentlich kältere Nordpolarmeer befindet. Es kommt somit südwestlich der Eisscheide zu mehr Akkumulation. Die Akkumulationsverteilung für Grönland ist in Abbildung 8.1 dargestellt.

Die Beobachtung der Tiefenlage des Horizontes am Übergang von Holozän-Pleistozän und die der Wisconsin Interstadialen lassen darauf schließen, daß die räumliche Verteilung der Niederschläge und damit die Akkumulationsraten von der Deposition dieser Lagen bis Heute regional gleich geblieben sind. Die ohnehin geringe Topographie des Felsuntergrundes hat offensichtlich kaum Einfluß auf die Tiefenlage der Isochronen.

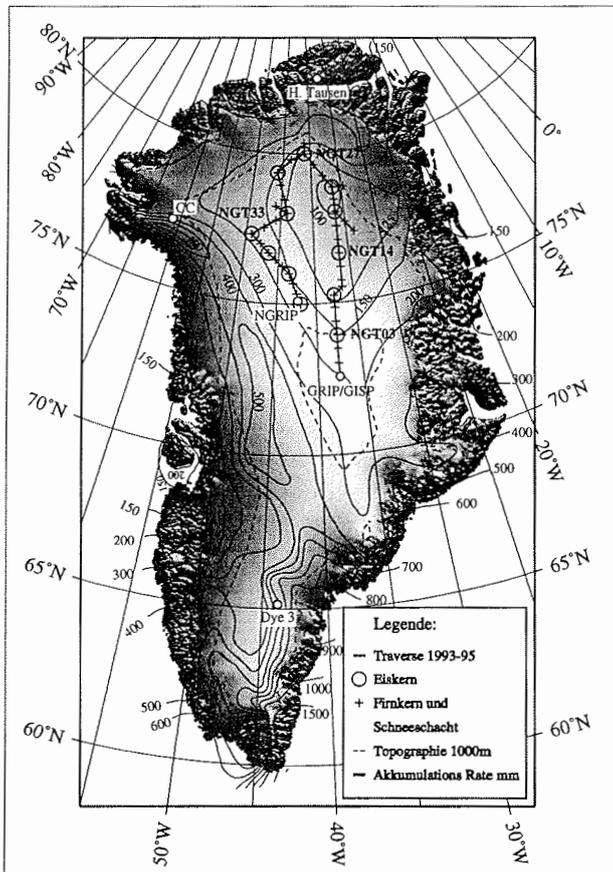


Abbildung 8.1: Übersicht der Verteilung der Akkumulationsraten in Grönland. Diese Verteilung der Akkumulationsraten ist dem Grönland-GIS von Jung-Rothenhäusler [1998] entnommen. Südwestlich der Verbindungslinie zwischen GRIP und NGRIP, also der Eisscheide, steigen die Werte der Akkumulation von 200 bis auf 500 mm Wasseräq. Jahr⁻¹ an. Nordöstlich der Eisscheide fällt sie bis auf Werte von 100 mm Wasseräq. Jahr⁻¹ ab.

8.3 Undulationen der internen Schichtung

Die Undulationen der internen Schichten des Eisschildes sind in tieferen Bereichen stärker ausgeprägt als in oberflächennahen Bereichen.

Die Undulationen der internen Schichten des Eisschildes wurden auch von Dahl-Jensen [1997] beobachtet. Diese Oszillationen werden nicht durch Untergrundundulationen hervorgerufen, da das Felsbett im Bereich der Undulationen weitgehend eben ist. Darüber hinaus werden die Oszillationen in höher gelegenen Schichten kleiner.

Als Ursache für die Oszillationen nennt Dahl-Jensen [1997] einerseits Variationen in der Akkumulationsrate oder Variationen des dynamischen Geschwindigkeitsfeldes entlang der Eisscheide. Wobei sie der zweiten Erklärung den Vorzug gab, da der Einfluß veränderlicher Akkumulationsraten mit der Tiefe abnimmt [Dahl-Jensen et al., 1997].

Für das letzte Glazial werden von heutigen Akkumulationsraten, Eismächtigkeiten und Temperaturen im Eisschild ausgehend, am Übergang von Eis zu Fels, basale Temperaturen angegeben, die 2,5° C höher waren als die heutigen. Basales Schmelzen, Schmelzen des Eises am Übergang von Eis zu Fels, kann im letzten Glazial vorgekommen sein.

Liegt die basale Temperatur nahe dem Druckschmelzpunkt, so sind zwei Prozesse zu beachten. Zum einen bildet sich zwischen dem Eis und dem Untergrund eine Wasserschicht, da das Eis schmilzt (basales Schmelzen). Zum anderen beginnt das Eis auf dem Wasserfilm zu Gleiten (basales Gleiten).

Sowohl Gleiten des Eises am Untergrund als auch basales Schmelzen bewirken eine Veränderung des Verlaufs der darüberliegenden Schichten. Basales Gleiten dünnt die internen Schichten aus und basales Schmelzen bewirkt ein Absinken der Schichten [Dahl-Jensen et al., 1997]. Die Undulationen im Wisconsin können als ein Ergebnis dieser beiden Prozesse verstanden werden.

8.4 Alterszuordnung des Horizonte

• Alterszuordnung des Horizonts im Holozän

Die in Abbildung 8.2 dargestellte Tiefen-Alter-Beziehung für GRIP ist "The Greenland Summit Ice Cores CD-ROM" [1997] entnommen. Bis in Tiefen von etwa 1600 m verläuft die Beziehung zwischen Alter und Tiefe linear.

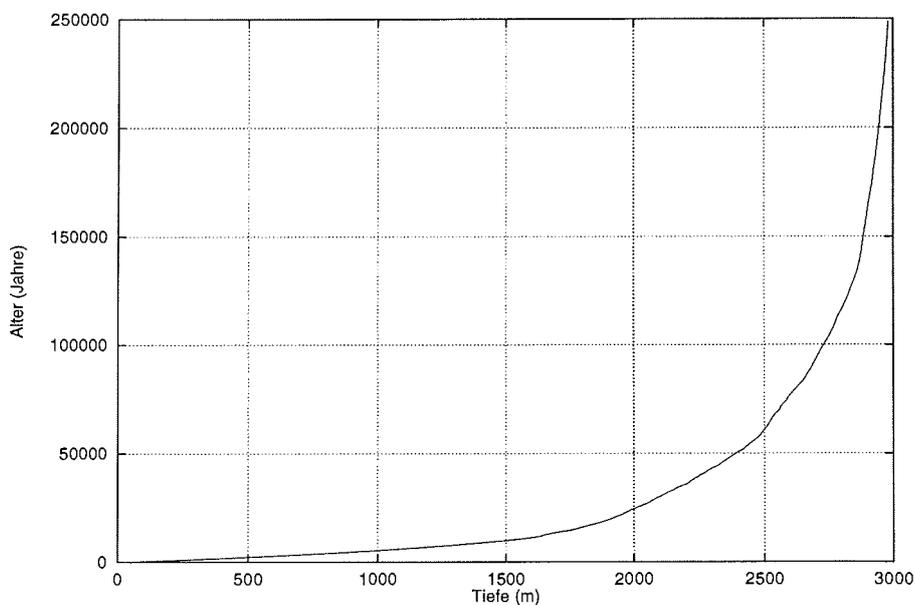


Abbildung 8.2: Alterszuordnung mit der Tiefe im GRIP Eiskern.

Der GRIP Eiskern ist 3029 m lang und reicht 250 000 Jahre zurück. Die Beziehung zwischen Alter und Tiefe verläuft bis in etwa 1600 m Tiefe linear und dann exponentiell.

Wie in Abschnitt 7.4 erwähnt waren noch bei größeren Laufzeiten als $16,3 \mu\text{s}$ teilweise Horizonte sichtbar. Eine durchgehende Verfolgung dieser auf dem Flug von GISP 2 nach GRIP war aber nicht möglich. Deshalb wurde ein Horizont ausgewählt, der im Bereich größerer Laufzeiten des Holozän liegt, und bei der Tiefenlage so gut wie möglich zu verfolgen ist.

Dieser erfaßte Horizont im Holozän, der in Abschnitt 7.4 eingehend beschrieben wurde, wurde von GISP2-GRIP ausgehend kartiert. Dabei trat bei dem Flug zwischen GISP2 und GRIP die Schwierigkeit auf, daß genau an GRIP zwei Kurven geflogen worden sind. Da die Antennen dabei nicht parallel zur Eisoberfläche stehen, muß das

Signal einen längeren Weg zurücklegen. Die Laufzeit wird verfälscht und dies führt zu größeren Abweichungen. Diese Störungen führen zu Abweichungen von $\pm 0,3 \mu\text{s}$ bzw. in der Tiefenlage zu Abweichungen von $\pm 25 \text{ m}$. Die Genauigkeit mit der die Tiefenlage eines Reflexionshorizontes angegeben werden kann beträgt 50 m .

Zur Altersbestimmung dieses Horizonts ist an GRIP die Zweiweg-Laufzeit von $16,35 \mu\text{s}$ bestimmt worden. Dieser Wert wird halbiert und dann mit der Geschwindigkeit der Welle in Eis multipliziert und eine Firnkorrektur nach Hodge [1990] durchgeführt. Daraus ergibt sich für diesen Horizont eine Tiefenzuordnung von $1384 \pm 75 \text{ m}$. Diese Tiefenlage entspricht einem Alter von $8665,6 \pm 749$ Jahren vor heute.

• Alterszuordnung der erfaßten Interstadiale im letzten Glazial

Die Alterszuordnung der erfassten Interstadiale basiert auf den Ergebnissen des GRIP Kerns, da sie sich vom Meßgebiet bis in die Nähe von GRIP verfolgen lassen. Auf den Flugprofilen zwischen GISP2 und GRIP konnten sie nicht verfolgt werden.

Wie in Abschnitt 7.5 beschrieben waren im Meßgebiet meist drei Isochronen der Wisconsin Interstadialen zu detektieren. Es wurde die mittlere der drei Horizonte erfaßt und kartiert. Im Wisconsin werden 7 Interstadiale angegeben [Murawski, 1992]: etwa 30 000 (Denekamp), 40 000 (Hengelo), 50 000 (Moershoofd), 57 000 (Oderade), 64 000 (Brorup) und 68 000 vor heute (Amersfoort). Mit ECM-Messungen konnten im GRIP Eiskern vier Interstadiale, der Jahre 30 000, 40 000, 50 000 und 57 000 Jahre vor heute, gefunden werden. [Wolff et al., 1997]. Hempel [1994] zeigte, daß die mit dem Radarverfahren detektierten Horizonte auch im ECM zu sehen waren.

Da der kartierte Horizont, der mittlere der Wisconsin Interstadialen, über sich teilweise keinen, aber manchmal einen anderen Horizont, jedoch unter sich stets einen, manchmal gar zwei Horizonte aufweisen konnte, wird für diesen angenommen, daß es sich entweder um die Hengelo Interstadiale (40 000 Jahre vor heute) oder um die Moershoofd Interstadiale (50 000 Jahre vor heute) handelt.

Kapitel 9

Schlussfolgerung und Ausblick

Die Bestimmung der Eismächtigkeit konnte im Meßgebiet mit einer recht hohen Datendichte durchgeführt werden. Die Eismächtigkeit erreicht Werte zwischen 2500 m und 3200 m. Die Höhe der Eisoberfläche liegt zwischen 2700 m und 3000 m über NN und die des Felsuntergrundes zwischen 400 m unter NN bis zu 300 m über NN.

Der Felsuntergrund in der Umgebung von NGRIP ist eben. Die Forderung, daß die internen Schichten an NGRIP in geringerer Tiefenlage als an GRIP verlaufen, wird erfüllt. Es ist daher nicht zu erwarten, daß die untersten Eisschichten an NGRIP durch den Untergrund ähnlich deformiert werden wie es für GISP2 oder GRIP vermutet wird. Daher ist die Position der Bohrlokation NGRIP optimal ausgewählt.

Die Tiefenlage isochroner interner Horizonte ist in Gebieten mit höherer Akkumulationsrate größer als in Gebieten mit niedrigerer Akkumulationsrate. Aus der Struktur der Schichtung im Eisschild und der Anordnung der internen Horizonte zum Felsuntergrund zeichnet sich ab, daß die räumliche Verteilung der Niederschläge, so auch die Akkumulationsrate, sich in diesem Gebiet in den letzten 100 000 Jahren nicht wesentlich verändert hat.

Aus diesem Grunde befindet sich die größte Eismächtigkeit über einem Graben westlich der Eisscheide. Aus der regionalen Verteilung der Akkumulationsraten ergibt sich die Tiefenlage der internen Horizonte, die von Südwesten nach Nordosten abnimmt.

Es wurden markante Undulationen im unteren Bereich des Eissschildes, der dem letzten Glazial zugeordnet wird, beobachtet. Diese Undulationen werden nicht durch die Topographie des Felsuntergrundes hervorgerufen, da das Felsbett weitgehend eben ist. Eine mögliche Erklärung für diese Undulationen könnte sein, daß im letzten Glazial basales Schmelzen und basales Gleiten stattgefunden haben.

Für die Bohrung an NGRIP, bei der der Bohrer in der Saison 1997 stecken geblieben ist, kann für die Auswahl einer neuen Bohrlokation empfohlen werden, von der jetzigen Position aus eine Lokation im Nordnordosten zu wählen.

Da die Daten nun im Landmarksystem verfügbar sind, können weitere Horizonte relativ schnell kartiert werden. Das bietet die Möglichkeit, die Veränderungen der Akkumulationsraten für mehrere aufeinander folgende Zeitabschnitte herauszuarbeiten und so zeitlich differenzierte Aussagen zur Variabilität der Akkumulationsraten zu treffen, wie es im Rahmen dieser Arbeit mit ausgewählten isochronen Horizonten möglich gewesen ist und somit einen weiteren Parameter für Modellberechnungen zu bestimmen.

Literaturverzeichnis

- Alley, R. B. et al. (1997). Visual-stratigraphic dating of the GISP2 ice core: Basis, reproducibility, and application, *J. Geophys. Res.* **102**: S. 367–381.
- Asman, W. A. H. und B. Drukker (1988). Modelled historical concentrations and depositions of ammonia and ammonium in Europe, *Atmospheric Environment* **22**: S. 725–735.
- Behrendt, J. C. (1962). Geophysical and Glaciological Studies in the Filchner Ice Shelf Area of Antarctica, *J. Geophys. Res.* **1**: S. 221–234.
- Bentley, C. R. und N. A. Ostenson (1961). Glacial and subglacial topography of West Antarctica, *J. Glaciol.* **3**: S. 882–911.
- Bogorodsky, V. V., C. R. Bentley und P. E. Gudmansen (1985). *Radioglaciology*, Verlag D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Bücker, C., R. Löffel und A. Schult (1990). *Hochauflösende Dichtemessungen an Bohrkernen mittels Absorption von Gamma-Strahlung*, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLFb), Hannover, S. 132–145.
- Bull, C. und J. R. Hardy (1956). The determination of the thickness of a glacier from measurements of the value of gravity, *J. Glaciol.* **2**: S. 755–763.
- Clausen, H. B. und C. U. Hammer (1988). The Laki and Tambora eruptions as revealed in Greenland ice cores from 11 locations, *Ann. Glaciol.* **10**: 16–22.
- 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, *J. Glaciol.* **43**: S. 300–306.
- Dansgaard, W. et al. (1993). Evidence for general instability from a 250-kyr ice-core record, *Nature* **364**: S. 218–220.
- Fletcher, N. H. (1970). *The chemical physics of ice*, Verlag Cambridge University Press, Cambridge, London. S.

- Gerland, S. (1992). *Zerstörungsfreie hochauflösende Dichteuntersuchungen mariner Sedimente*, Dissertation, Universität Bremen.
- Gerland, S., S. Kipfstuhl und A. Minikin (1994). Non-destructive high resolution density measurements of the ice core B15, Bd. 8 von *FRISP Report*, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Columbusstraße, D-27568 Bremerhaven. S. 24-28.
- Goodman, D. (1994). Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology, *Geophysics* **59**: S. 224–232.
- GRIPMembers (1993). Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core, *Nature* **364**: S. 203–207.
- Grootes, P. M., M. Stuiver, J. W. C. White, S. Johnsen und J. Jouzel (1993). Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores, *Nature* **366**: S. 552–554.
- Gundestrup, N. S., D. Dahl-Jensen, S. J. Johnsen und A. Rossi (1993). Bore-hole survey at GRIP 1991, *Cold Regions Science and Technology* **21**: S. 399–402.
- Hammer, C. U. (1980). Acidity of polar ice cores in relation to absolute dating, past volcanism, and radio-echos, *J. Glaciology* **25**: S. 359–372.
- Hammer, C. U., H. B. Clausen und W. Dansgaard (1980). Greenland ice sheet evidence of post-glacial volcanism and its climatic impact, *Nature* **288**: S. 230–233.
- Hecht, E. (1989). *Optik*, 2. Aufl., Verlag Addison-Wesley GmbH, New York.
- Hempel, L. (1994). *Der Zentralteil des grönländischen Inlandeises: Ergebnisse aus hochauflösenden elektromagnetischen Reflexionsmessungen*, Dissertation, Westfälische Wilhelms-Universität Münster.
- Hempel, L. und F. Thyssen (1992). Deep Radio Echo Soundings in the Vicinity of GRIP and GISP2 Drill Sites, Greenland, *Polarforschung* **62**: S.
- 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, *J. Glaciol.* **36**: S. 17–30.
- Holleman, W. (1995). *Lehrbuch der anorganischen Chemie*, 101. Aufl., Verlag Walter de Gruyter & Co, Berlin-New York.
- Huybrechts, P. (1993). Basal temperature conditions of the Greenland ice sheet during the glacial cycles, *Ann. Glaciol.* **23**: S. 226–236.

- Huybrechts, P. (1994). The present evolution of the Greenland ice sheet: an assessment by modelling, *Global and Planetary Change* **9**: S. 39–51.
- Jackson, J. D. (1985). *Klassische Elektrodynamik*, 2. Aufl., Verlag Walter de Gruyter & Co, Berlin-New York.
- Jouzel, J. et al. (1996). Climatic interpretation of the recently extended Vostok ice records, *Climate Dynamics* **12**: S. 513–521.
- Jung-Rothenhäusler, F. (1998). *Fernerkundungs- und GIS-Studien in Nordostgrönland*, Dissertation, Universität Bremen.
- Keller, K. und C. S. Nielsen (1997). Gravity and GPS measurements, *Field Season Report 1997*, N. Gundestrup, Paris, Copenhagen, S. S. 29–30.
- Legrand, M. und M. D. Angelis (1996). Light carboxylic acids in Greenland ice: A record of past forest fires and vegetation emissions from the boreal zone, *J. Geophys. Res.* **101**: S. 4129–4145.
- Miller, H. (1971). *Untersuchungen auf dem Guslar- und Vernagtferner in den Ötztaler Alpen mit der Methode der Refraktions-Seismik und einer Vierpunkt-Methode der Geoelektrik*, Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Minikin, A. und S. Kipfstuhl (1992). Preliminary results of the in situ core processing of the new 320 m ice core from the central Filchner-Ronne Ice Shelf: ECM, AC conductivity and density, Bd. 6 von *FRISP Report*, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Columbusstraße, D-27568 Bremerhaven. S. 54–60.
- Moore, J. C. und S. Fujita (1993). Dielectric Properties of Ice Containing Acid and Salt Impurity at Microwave and Low Frequencies, *J. Geophys. Res.* **98**: S. 9769–9780.
- Murawski, H. (1992). *Geologisches Wörterbuch*, 9. Aufl., Enke Verlag, Stuttgart.
- Neftel, A., J. Beer, H. Oeschger, F. Zürcher und R. C. Finkel. (1985). Sulphate and nitrate concentrations in snow from South Greenland 1895–1978, *Nature* **314**: S. 611–613.
- Nixdorf, U., D. Steinhage und F. Göktas (1997). Airborne radio-echosounding, *Field Season Report 1997*, N. Gundestrup, Paris, Copenhagen, S. S. 30–32.
- Ohmura, A. und N. Reeh (1991). New precipitation and accumulation maps for Greenland, *J. Glaciol.* **37**: S. 40–148.
- Paren, J. G. (1981). Reflection coefficient at a dielectric interface, *J. Glaciol.* **27**: S. 203–204.

- Paterson, W. S. B. (1994). *The Physics of Glaciers*, 3 Aufl., Verlag Pergamon Press, Oxford, England.
- Petrenko, V. F. (1993a). Structure of Ordinary Ice I_h . Part I: Ideal Structure of Ice., *Special Report 93-25*, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Petrenko, V. F. (1993b). Electrical Properties of Ice, *Special report 93-20*, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Siegert, M. J., J. A. Dowdeswell, M. R. Gorman und N. F. McIntyre (1996). An inventory of Antarctic sub-glacial lakes, *Antarctic Science* **3**: S. 281–286.
- Smith, E. und A. Whiffin (1952). Density of concrete slabs using gamma radiation, *The Engineer* **194**: S. 278–281.
- Steffensen, J. P., H. B. Clausen und J. M. Christensen (1988). On the spatial variability of impurity content and stable isotopic composition in recent Summit snow, in Wolff, E. W. und R. C. Bales (Hrsgb.), *Chemical exchange between the atmosphere and polar snow*, Bd. 43 von *NATO ASI I*, Springer Verlag, Berlin, S. S. 607–615.
- Telford, W. M., L. P. Geldart und R. E. Sheriff (1996). *Applied Geophysics*, 2 Aufl., Verlag Cambridge University Press.
- Vogel, H. (1995). *Gerthsen Physik*, 18 Aufl., Springer Verlag, Berlin.
- Wolff, E. W., J. C. Moore, H. B. Clausen und C. U. Hammer (1997). Climatic implications of background acidity and other chemistry derived from electrical studies of the Greenland Ice Core Project ice core, *J. Geophys. Res.* **102**: S. 325–332.

Anhang

A.1 Vergrößerte Darstellung der Stapelergebnisse

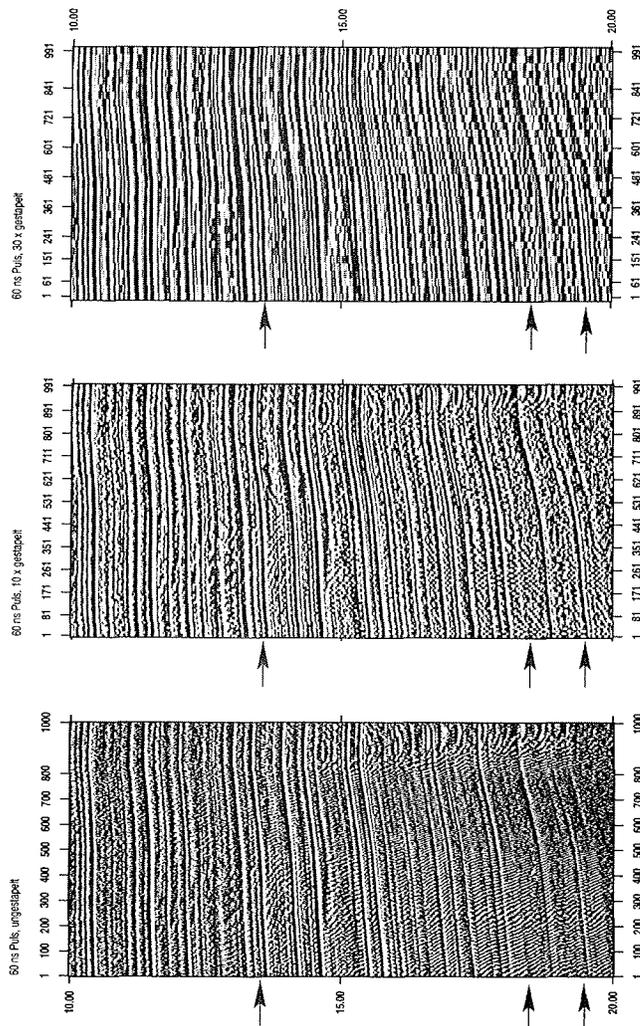


Abbildung A.1: Vergrößerte Darstellung der Stapelergebnisse.

A.2 Vergrößerte Darstellung eines Radargramms

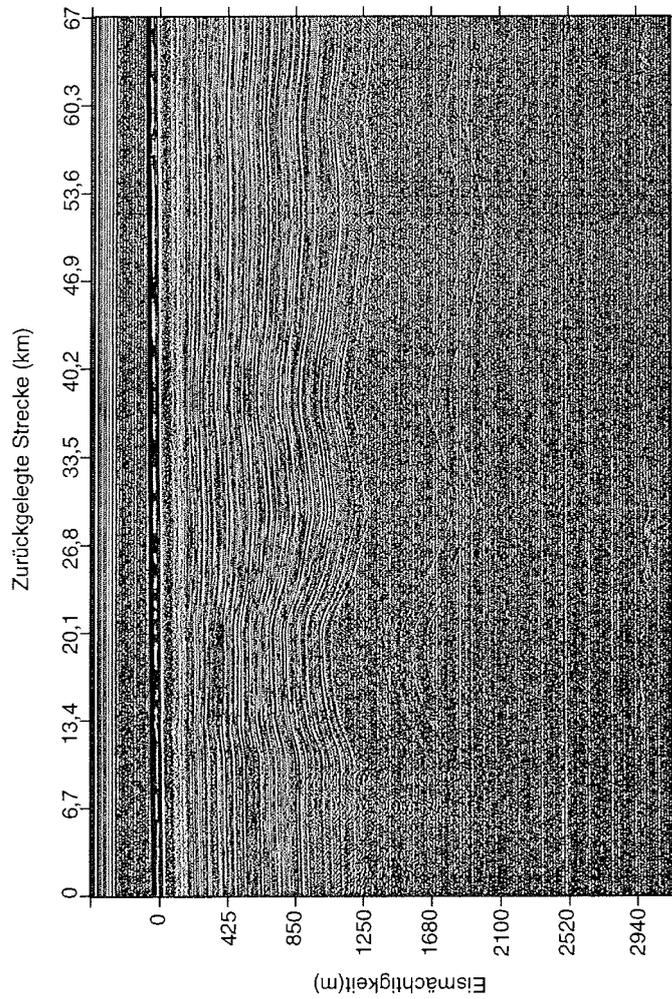


Abbildung A.2: Vergrößerte Darstellung eines Radargramms.

B.1 Verzeichnis der EMR-Profile

Ein Profil wird über sechs Ziffern (xxxxxx), seiner sogenannten Profilnummer, identifiziert. Die ersten beiden Ziffern geben das Jahr in dem das Profil geflogen worden ist an (z.B. 96xxxx). Die dritte Stelle gibt an (z.B. 963xxx), um welchen Puls, 60- oder 600-ns-Puls, es sich handelt. Die letzten drei Ziffern kennzeichnen das Profil (z.B. 963501). Zur Unterscheidung der Pulse, wurde der 60-ns-Puls mit 9x3xxx und der 600-ns-Puls mit 9x2xxx numeriert. In der untenaufgeführten Tabelle ist in der

1. Spalte die Flugnummer
2. Spalte das Datum, an dem der Flug absolviert worden ist
3. Spalte die Wendepunkte in einem Profil
4. Spalte die geographische Länge des Wendepunktes an
5. Spalte die geographische Breite des Wendepunktes an
6. Spalte die Profilnummer des Flugabschnittes aufgelistet.

Wobei das x in der Profilnummer als Ersatzzeichen für die Pulsart eingetragen ist. Z.B. kennzeichnet die Profilnummer 962511 ein Profil mit 600-ns-Puls und 963511 ein Profil mit 60-ns-Puls.

Flugnr.	Datum	Markierung	geogr. Länge	geogr. Breite	Profilnr.
1	04.06.1996	P1	-42.32	75.92	96x511
		P2	-39.03	75.10	96x901
		P3	-45.69	75.09	96x611
		P4	-42.26	74.25	96x551
		P5	-42.32	75.92	Profilende
2	05.06.1996	P1	-42.40	74.95	96x701
		P2	-40.57	75.00	96x506
		P3	-40.65	75.91	96x881
		P4	-38.99	75.91	96x501
		P5	-38.98	74.26	96x882
		P6	-40.61	74.31	96x556
		P7	-40.65	75.02	96x612
		P8	-38.88	75.01	96x807
		P9	-39.00	74.92	96x613
		P10	-45.80	74.93	96x808
		P11	-45.55	75.02	96x662
		P12	-40.58	75.02	96x702
		P13	-40.75	75.04	96x702
		P14	-42.33	75.04	Profilende

Flugnr.	Datum	Markierung	geogr. Länge	geogr. Breite	Profilnr.
3	07.06.1996	P1	-42.29	75.26	96x703
		P2	-41.32	75.21	96x508
		P3	-40.99	75.98	96x883
		P4	-39.44	75.86	96x503
		P5	-39.65	74.25	96x884
		P6	-41.28	74.22	96x558
		P7	-41.32	74.85	96x614
		P8	-38.82	74.85	96x812
		P9	-38.99	74.77	96x615
		P10	-45.69	74.77	96x813
		P11	-45.49	74.85	96x664
		P12	-41.27	74.85	96x958
		P13	-41.32	75.30	96x704
		P14	-42.29	75.30	Profilende
4	08.06.1996	P1	-42.32	75.09	96x705
		P2	-40.32	75.09	96x505
		P3	-40.32	75.94	96x885
		P4	-41.97	75.94	96x510
		P5	-41.97	74.27	96x886
		P6	-40.32	74.27	96x555
		P7	-40.32	74.69	96x666
		P8	-45.65	74.69	96x818
		P9	-45.65	74.60	96x617
		P10	-38.97	74.60	96x819
		P11	-38.97	74.69	96x616
		P12	-40.32	74.69	96x955
		P13	-40.32	75.13	96x706
		P14	-42.32	75.13	Profilende
5	12.06.1996	P14	-42.32	75.09	96x708
		P13	-42.32	75.09	96x517
		P6	-44.32	75.94	96x887
		P5	-44.32	75.94	96x512
		P4	-42.65	75.27	96x888
		P3	-42.65	74.27	96x567
		P7	-44.32	74.60	96x605
		P8	-44.32	75.60	96x824
		P9	-38.97	75.52	96x606
		P10	-38.97	75.52	96x825
		P11	-45.65	75.60	96x655
		P12	-45.65	75.60	96x967
		P2	-44.32	75.13	96x707
		P1	-44.32	75.13	Profilende

Flugnr.	Datum	Markierung	geogr. Länge	geogr. Breite	Profilnr.
6	12.06.1996	P14	-42.32	74.93	96x709
		P13	-43.32	74.93	96x514
		P6	-43.32	75.94	96x889
		P5	-44.97	75.94	96x519
		P4	-44.97	74.27	96x890
		P3	-43.32	74.27	96x564
		P7	-43.32	75.44	96x657
		P8	-45.65	75.44	96x830
		P9	-45.65	75.35	96x608
		P10	-38.97	75.35	96x831
		P11	-38.97	75.44	96x607
		P12	-43.32	75.44	96x964
		P2	-43.32	74.96	96x710
		P1	-42.32	74.96	Profilende
7	13.06.1996	P1	-42.32	75.18	96x711
		P2	-43.97	75.18	96x516
		P3	-43.97	75.94	96x891
		P4	-45.65	75.94	96x521
		P5	-45.65	74.27	96x892
		P6	-43.97	74.27	96x566
		P7	-43.97	75.27	96x659
		P8	-45.65	75.27	96x836
		P9	-45.65	75.19	96x610
		P10	-38.97	75.19	96x837
		P11	-38.97	75.27	96x609
		P12	-43.97	75.27	96x712
		P13	-43.97	75.21	96x712
		P14	-42.32	75.21	Profilende
8	16.06.1996	P1	-42.32	74.93	96x713
		P2	-41.65	74.93	96x509
		P3	-41.65	75.94	96x893
		P4	-39.97	75.94	96x504
		P5	-39.97	74.27	96x894
		P6	-41.65	74.27	96x559
		P7	-41.65	74.52	96x618
		P8	-38.97	74.52	96x839
		P9	-38.97	74.44	96x619
		P10	-45.65	74.44	96x840
		P11	-45.65	74.52	96x668
		P12	-41.65	74.52	96x959
		P13	-41.65	74.96	96x714
		P14	-42.32	74.96	Profilende

Flugnr.	Datum	Markierung	geogr. Länge	geogr. Breite	Profilnr.
9	17.06.1996	P1	-42.32	75.18	96x715
		P2	-40.97	75.18	96x507
		P3	-40.97	75.94	96x895
		P4	-39.32	75.94	96x502
		P5	-39.32	74.27	96x896
		P6	-40.97	74.27	96x557
		P7	-40.97	74.35	96x620
		P8	-38.97	74.35	96x845
		P9	-38.97	74.27	96x621
		P10	-45.65	74.27	96x846
		P11	-45.65	74.35	96x670
		P12	-40.97	74.35	96x957
		P13	-40.97	75.21	96x716
		P14	-43.32	75.21	Profilende
10	20.06.1996	P14	-42.32	75.26	96x717
		P13	-42.97	75.26	96x513
		P6	-42.97	75.94	96x897
		P5	-44.65	75.94	96x518
		P4	-44.65	74.27	96x898
		P3	-42.97	74.27	96x563
		P7	-42.97	75.77	96x603
		P8	-45.65	75.77	96x851
		P9	-45.65	75.67	96x604
		P10	-38.97	75.67	96x852
		P11	-38.97	75.77	96x653
		P12	-42.97	75.77	96x963
		P2	-42.97	75.29	96x718
		P1	-42.32	75.29	Profilende
11	20.06.1996	P14	-42.32	75.00	96x719
		P13	-43.65	75.00	96x515
		P6	-43.65	75.94	96x899
		P5	-45.32	75.94	96x520
		P4	-45.32	74.27	96x900
		P3	-43.65	74.27	96x565
		P7	-43.65	75.94	96x651
		P11	-45.65	75.94	96x856
		P10	-45.65	75.85	96x602
		P9	-38.97	75.85	96x857
		P8	-38.97	75.94	96x601
		P12	-43.65	75.94	96x965
		P2	-43.65	75.05	96x720
		P1	-42.32	75.05	Profilende

Flugnr.	Datum	Markierung	geogr. Länge	geogr. Breite	Profilnr.
61	21.06.1996	P1	-42.58	38.41	96x910
		P2	-52.59	37.64	96x909
		P3	-42.67	75.10	96x908
		P4	-41.70	75.10	Profilende
62	21.06.1996	P1	-42.67	75.10	96x903
		P2	-36.00	72.80	96x904
		P3	-39.33	72.80	96x904
		P4	-39.33	72.70	96x905
		P5	-36.00	72.70	96x905
		P6	-36.00	72.50	96x906
		P7	-39.33	72.50	96x907
		P8	-37.95	72.58	Profilende
13	16.06.1997	P1	-42.89	75.18	97x519
		P2	-42.85	74.24	97x518
		P3	-42.78	72.20	97x517
		P4	-42.57	74.26	97x516
		P5	-42.52	75.20	97x515
		P6	-42.44	74.27	97x514
		P7	-42.22	75.15	97x513
		P8	-42.15	74.29	97x512
14	17.06.1997	P1	-42.15	75.11	97x621
		P2	-40.54	75.25	97x502
		P3	-40.82	74.31	97x503
		P4	-41.11	75.19	97x504
		P5	-41.41	74.27	97x505
		P6	-41.45	75.19	97x506
		P7	-41.58	74.24	97x507
		P8	-41.71	75.17	97x508
		P9	-41.81	74.23	97x509
		P10	-41.95	75.16	97x602
		P11	-39.97	75.06	97x605
		P12	-43.99	75.10	97x603
15	17.06.1997	P1	-42.07	75.18	97x510
		P2	-42.01	74.30	97x609
		P3	-43.84	74.30	97x522
		P4	-43.46	75.51	97x521
		P5	-43.13	74.29	97x520
		P6	-42.80	75.52	97x561
		P7	-42.82	75.14	97x620
		P8	-44.01	74.81	97x608
		P9	-40.12	74.89	97x607
		P10	-43.92	74.97	97x606
		P11	-40.20	75.10	97x604

Flugnr.	Datum	Markierung	geogr. Länge	geogr. Breite	Profilnr.
16	18.06.1997	P1	-42.13	75.13	97x511
		P2	-42.35	74.30	97x610
		P3	-40.14	74.26	97x501
		P4	-40.45	75.52	97x550
		P5	-40.81	75.06	97x551
		P6	-41.11	75.51	97x552
		P7	-41.49	75.08	97x553
		P8	-41.71	75.50	97x554
		P9	-41.89	75.07	97x555
		P10	-42.04	75.50	97x556
		P11	-42.06	75.09	97x557
		P12	-42.38	75.52	97x558
		P13	-42.57	75.08	97x559
		P14	-42.70	75.50	97x560
		P15	-42.88	75.05	97x562
		P16	-43.01	75.48	97x601
		P17	-42.15	75.48	97x570

C.1 Ergebnisse der Filterung

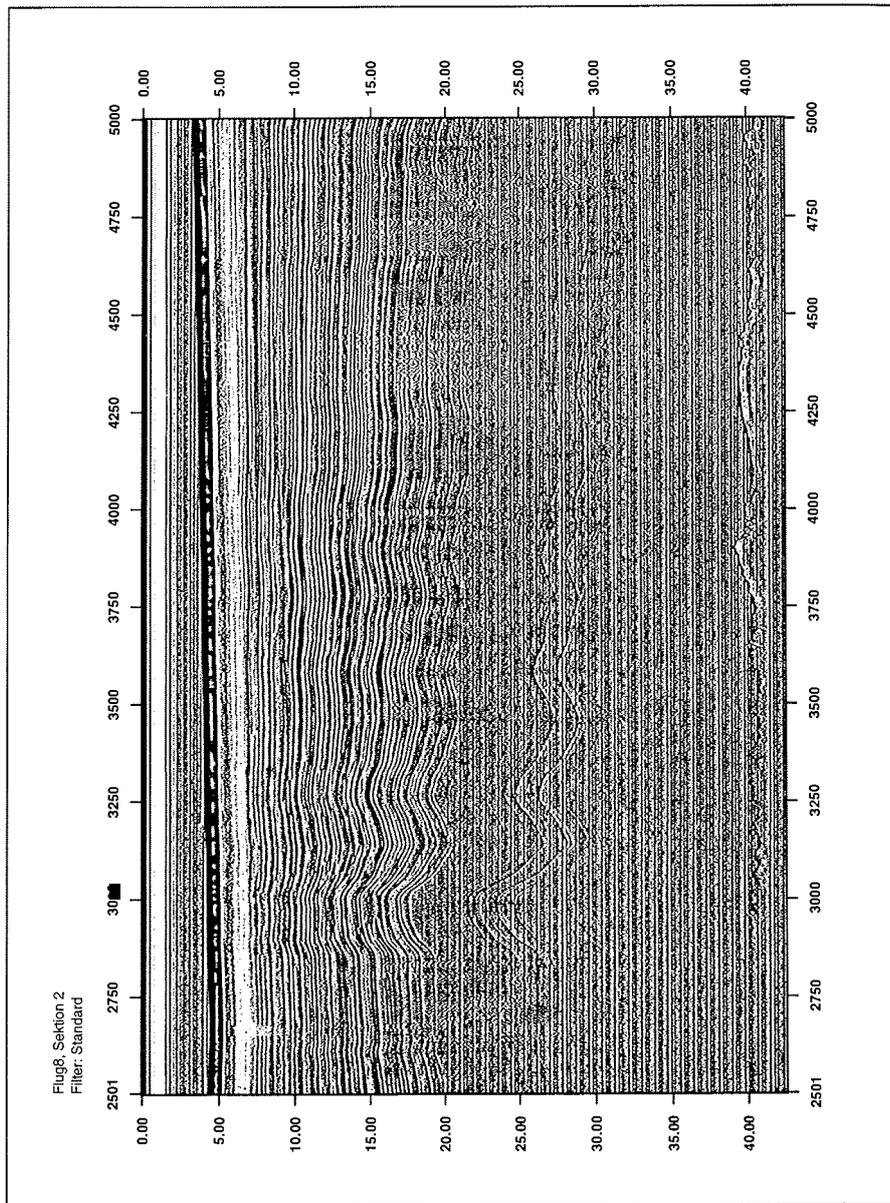


Abbildung C.3: Verwendeter Filter bei der Bestimmung der Eismächtigkeit.

Diese Abbildung zeigt das Ergebnis eines Cohere-, Tiefpaß- und eines zweiten Tiefpaß-Filters. Der Übergang von Eis zu Fels und auch die Eisoberseite sind gut zu erkennen. Die interne Schichtung, vor allem im Zeitbereich zwischen 20 und 35 μ s ist schwer zu verfolgen.

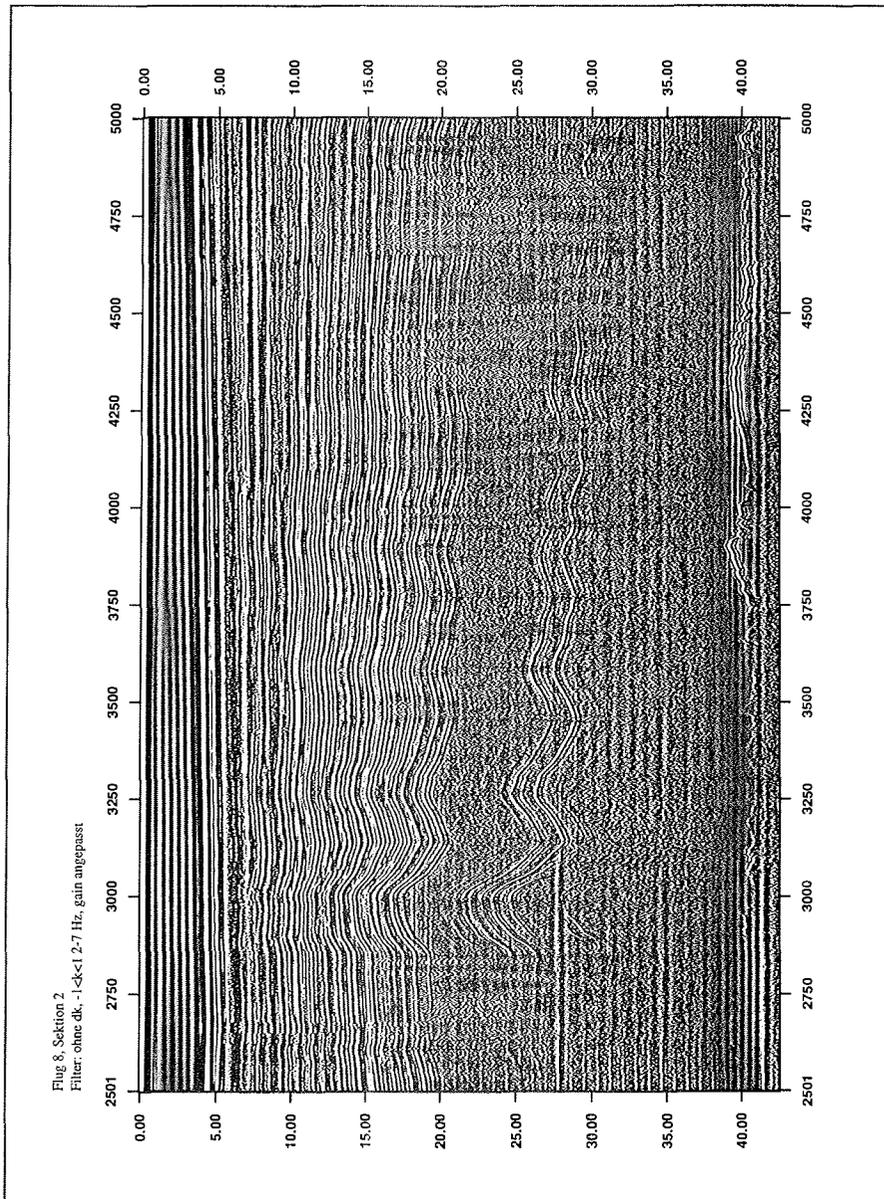


Abbildung C.4: Verwendeter Filter zur Bestimmung der internen Struktur.
 Bei der Auswahl dieses Filters war entscheidend, daß die Horizonte im Eisschild deutlicher zu sehen sind. Ein Vergleich mit Abbildung C.3 zeigt, daß die Horizonte besser, der Untergrund aber schlechter zu sehen ist.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersichtskarte von Grönland mit Kennzeichnung des Meßgebietes. . .	9
1.2	Übersicht des Meßgebietes mit den Verbindungsflügen nach GRIP und GISP2.	10
1.3	Absolvierte Flüge in den Kampagnen 1996 und 1997	11
2.1	Das Prinzip des elektromagnetischen Reflexionsverfahrens (EMR). . .	19
2.2	Blockschaltbild zur Signalbearbeitung.	20
3.1	Phasendiagramm von Eis.	26
3.2	Kreislauf der festen Phase von Wasserdampf.	27
3.3	Modell eines Eisschildes.	29
3.4	Dichte-Tiefen-Funktion.	30
3.5	Verlauf von ϵ_r' , berechnet nach dem Looyenga-Mischungs-Modell. . .	31
3.6	Geschwindigkeits-Tiefen-Funktion.	32
4.1	Das Wassermolekül.	33
4.2	Das "Halbe Proton" Bild	34
4.3	Die Kristallstruktur von Eis I_h	35
5.1	Ergebnisse der Stapelung.	41
6.1	Übersicht aller Punkte, an denen in den Kampagnen 1996 und 1997 ein Wert für die Eismächtigkeit zuverlässig ermittelt wurde.	46
6.2	Karte zur Darstellung der Eismächtigkeit.	47
6.3	Skizze zur Bestimmung der Oberflächentopographie.	48
6.4	Karte der Eisoberfläche.	50
6.5	Karte zur Darstellung der Felstopographie.	52
6.6	3D-Darstellung der Felstopographie.	53
6.7	Histogramm der Abweichungen der Eismächtigkeitswerte.	55
6.8	Übersicht der Kreuzungspunkte.	57
7.1	Darstellung eines Radargramms.	60
7.2	Verteilung der Undulationen der Interstadialen des Wisconsin.	62
7.3	Zweidimensionale Darstellung der Tiefenlage des letzten durchgehend verfolgten Horizontes im Holozän, bezogen auf NN.	66

7.4	Dreidimensionale Darstellung der Tiefenlage des letzten durchgehend verfolgten Horizontes im Holozän, bezogen auf NN.	67
7.5	Zweidimensionale Darstellung der Tiefenlage eines Interstadials des Wisconsin, bezogen auf NN.	69
7.6	Dreidimensionale Darstellung der Tiefenlage eines Interstadials des Wisconsin, bezogen auf NN.	70
8.1	Übersicht der Verteilung der Akkumulationsraten in Grönland.	73
8.2	Alterszuordnung mit der Tiefe im GRIP Eiskern.	75
A.1	Vergrößerte Darstellung der Stapelergebnisse.	84
A.2	Vergrößerte Darstellung eines Radargramms.	85
C.3	Verwendeter Filter bei der Bestimmung der Eismächtigkeit.	93
C.4	Verwendeter Filter zur Bestimmung der internen Struktur.	94

Danksagung

Herrn Prof. Dr. A. Schult und Herrn Prof. Dr. H. Miller danke ich sehr, daß sie es mir ermöglicht haben, diese Diplomarbeit außerhalb der Ludwig-Maximilians-Universität München, am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung anzufertigen und für ihr großes Interesse und die stets interessanten und aufschlußreichen Diskussionen und Anmerkungen, aus denen ich immer neue Impulse für die Arbeit mitgenommen habe.

Für die Betreuung der Diplomarbeit und sein Interesse am Fortgang meiner Arbeit danke ich Dr. Uwe Nixdorf.

Bei der glaziologischen Arbeitsgruppe, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand möchte ich mich sehr bedanken. Insbesondere bei Daniel Steinhage und Frederick Jung-Rothenhäusler, deren Unterstützung wesentlich zum Fortgang der Diplomarbeit beigetragen hat.

Johannes Rogenhagen und Dr. Wilfried Jokat, aus der Arbeitsgruppe marine Geophysik, fanden trotz ihrer vielen Arbeit immer Zeit um mit mir zu diskutieren, obwohl SeisWorks3D auch Ihnen nicht bekannt war. Sie waren mir eine große Hilfe. Ein besonderer Dank gilt auch den für SeisWorks 3D und 2D zuständigen Mitarbeitern des Customer Supports der Landmark Graphics Cooperation in London. Ich danke Ihnen für ihre schnellen Rückmeldungen und für die neuen Freunde, die ich auf diesem Wege gefunden habe.

Gerald Traufetter, Kathrin Sander, Hans Oerter, Wilfried Jokat, Johannes Rogenhagen und Frederick Jung-Rothenhäusler danke ich sehr für die zahllosen Gespräche, Kritiken, Zuspruch, Korrekturen und daß sie in dieser Zeit für mich da waren.

Von Herzen danke ich meinem Bruder Folkan Göktas für die Zeit, die wir zusammen verbringen konnten. Er war mein bester Freund und meine Familie.

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 Köhnen
- **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, Fahrabschnitt 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 ‚Polarstern‘ (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 Probennahme 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 Köhnen
- **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 Köhnen
- **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. Köhnen
- **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 Krills *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. 27/1988 – „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. Zusammenge stellt 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 Hürche
 - 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 trophische 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 Fahrabschnitten 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 Ahlmannryggen, 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 beschalten 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. Kurbjeweit 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. 76/1990** – „Ergebnisse der faunistischen Arbeiten im Benthal von King George Island
(Südschottlandinseln, Antarktis)“, von Martin Rauschert
 - Heft Nr. 77/1990** – „Verteilung von Mikropflanz-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 -Dimethylsulfonylumpionat
(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** – „Paläoglazialogie und Paläozoographie im Spätquartär am Kontinentalrand des
südlichen Weddellmeeres, Antarktis“, von Martin Melles
 - Heft Nr. 82/1991** – „Quantifizierung von Meeresseigenschaften: Automatische Bildanalyse von
Dünnschnitten und Parametrisierung von Chlorophyll- und Salzgehaltsverteilungen“, von Hajo Eicken
 - Heft Nr. 83/1991** – „Das Fließen von Schelfeis - 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 Untenwassereis und das Wachstum und die Energiebilanz
des Meereises in der Atka Bucht, Antarktis“, von Josef Kipfstuhl
 - Heft Nr. 86/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS ‚Polarstern‘ 1989/90. Bericht vom
Fahrabschnitt ANT-VIII/5“, von Heinz Miller 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-Meereres vor Kapp Norvegia, Antarktis“, von Norbert E. Kaul
- Heft Nr. 90/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS ‚Polarstern‘ 1989/90. Bericht von den Fahrabschnitten 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, Nordpolarmeere“, von Nicolai Mumm
- Heft Nr. 93/1991** – „Die Expedition ARKTIS VII mit FS ‚Polarstern‘, 1990. Bericht vom Fahrabschnitt ARK VII/2“, herausgegeben von Gunther 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 crista 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 norwestlichen 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 Racher
- 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 Heimfrontfjella (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 Bodentischarten“, von Christian F. von Dorrrien.
- 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 Lithologie 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 Anfrrier- 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 kurzzeitiger halogener Kohlenwasserstoffe durch Makroalgen der Polarregionen“, von Frank Laturnus
- Heft Nr. 133/1994** – „Radiation and Eddy Flux Experiment 1993 (REFLEX II)“, by Christoph Kottmeier, Jörg Hartmann, Christian Wamsøer, Axel Bocherl, Christof Lüpkes, Dietmar Freese and Wolfgang Cohrs
- **Heft Nr. 134/1994** – „The Expedition ARKTIS-IX/1“, edited by Hajo Eicken and Jens Meincke
- Heft Nr. 135/1994** – „Die Expeditionen 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 kälteozoische 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 Ekströmisen, 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 Seas: 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-See / 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. Karpuy.
- 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 $\delta^{18}O$ 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 Schmiedt.
- 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 Aminosäure 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 Heimfrontfjella (westliches Dronning Maud Land/Antarktika)“, von Wilfried Bauer.
- Heft Nr. 172/1995** – „Die Struktur der Erdkruste im Bereich des Scoresby Sund, Ostgrönland: Ergebnisse refraktionseismischer und gravimetrischer Untersuchungen“, von Holger Mandler.
- Heft Nr. 173/1995** – „Paläozoische Akkretion am paläopazifischen Kontinentalrand der Antarktis in Nordvictorialand – P-T-D-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 Gmriy 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 Müller und Hannes Grobe.
- Heft Nr. 189/1996** – „Die Expedition ARKTIS-VII/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1990“, herausgegeben von Heinz Müller 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 *Neoglobobulimina 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 Heese.
- 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-Spaltsperuanalysen“, 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 Oncaecidae (Poecilostomatoida, Copepoda) im Bellingshausenmeer“, von Cornelia Metz.
- Heft Nr. 208/1996** – „Atmosphäreninfluß 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** – „Gonadenerwicklung 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 Oszko.

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 Pottermann.

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 arcta* (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 Gemeinschaftsstrukturen 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 Fahrerteilnehmern.

Heft Nr. 235/1997 – „Polonium-210 und Blei-210 im Südpolarmeer: 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-Il 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 Rogenhagen.

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 Kirchhoff.

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 Starmans.

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 George 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 Bunge-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 Sültenfuß.
- 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 Spalturanalysen“, von Thorsten Schäfer.
- Heft Nr. 264/1998** – „Messungen der stratosphärischen Spurengase ClO, HCl, O₃, N₂O, H₂O und OH mittels flugzeugtragener 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 Katner.
- 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 Antarktisforschung“. Berichtskolloquium im Rahmen des Koordinierten Programms „Antarktisforschung 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 Programme 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-Pirrung.
- Heft Nr. 282/1998** – "Scavenging of ²³¹Pa and ²³⁰Th in the South Atlantic: Implications for the use of the ²³¹Pa/²³⁰Th ratio as a paleoproductivity proxy", by Hans-Jürgen Walter.
- Heft Nr. 283/1998** – „Sedimente im arktischen Meereis - 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 George 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 Jügang 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 Wohlthat 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 (Kind 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 Argentini, Axel Bochert, Ubaldo Bonafé, Wolfgang Cohrs, Alessandro Conidi, Dietmar Freese, Teodoro Georgiadis, Alessandro Ippoliti, Lars Kaleschke, Christof Lüpkes, Uwe Maixner, Gianguseppe 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 Ekströmisen, 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-Alesund, 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 Göktaş.

* vergiffen/out of print.

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