

**Die Lebensbedingungen in den
Solekanälchen des antarktischen Meereises**

**The environmental conditions in the
brine channels of Antarctic sea-ice**

Jürgen Weissenberger

**Ber. Polarforsch. 111 (1992)
ISSN 0176 - 5027**

Jürgen Weissenberger

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
Postfach 120161
Columbusstr.
D-2850 Bremerhaven

Die vorliegende Arbeit ist die inhaltlich unveränderte Fassung einer
Dissertation die 1992 dem Fachbereich Biologie/Chemie der Universität
Bremen vorgelegt wurde.

Danksagung	1
Zusammenfassung	2
Summary	5
1. Einleitung	7
2. Allgemeiner Material und Methodenteil	10
2.1. Das Untersuchungsgebiet.....	10
2.2. Probenentnahme im Freiland.....	11
2.3. Meßmethoden.....	12
2.4. Verwendete Abkürzungen.....	15
2.5. Formeln	15
3. Die Expedition ANT 8/2	18
3.1. Material und Methoden.....	18
3.1.1. Die Eisstationen	18
3.1.2. Trennung von Eis und Sole	18
3.1.3. Kunststoffausgüsse des Porenraumes	20
3.2. Ergebnisse der Expedition ANT 8/2.....	25
3.2.1. Eissituation.....	25
3.2.2. Solegewinn durch die Schleudermethode.....	25
3.2.3. Salinität der ausgeschleuderten Sole.....	26
3.2.4. Die Effizienz des Soleauschleuderns.....	29
3.2.5. Das gesamte Solevolumen und die Gesamt- salinität.....	31
3.2.6. Eistemperaturen	35
3.2.7. Eistextur.....	36
3.2.8. Chlorophyllgehalte	37
3.2.9. Artenbestand der Diatomeen.....	40
3.2.10. Zellzahlen in ausgeschleudeter und einge- schlossener Sole.....	41
3.2.11. Geographische Einordnung der ausge- schleuderten Kerne	42
3.2.12. Die Eisausgüsse.....	44
3.3. Diskussion.....	65
3.3.1. Das Ausschleudern der Eiskerne: Wie genau stimmen die Messungen an der Sole mit den tatsächlich im Eis herrschenden Bedin- gungen überein?	65
3.3.2. Die Kunststoffausgüsse: Welche Sole- kanälchen wurden durch die Kunststoff- ausgüsse dargestellt?	70
3.3.3. Methodenvergleich.....	71
3.3.4. Zusammenfassung.....	75
4. Die Expedition ANT 9/3	77
4.1. Material und Methoden.....	77
4.1.1. Die Eisstationen	77

4.1.2. Probenentnahme im Freiland.....	77
4.1.3. Lichtmessungen.....	78
4.2. Ergebnisse.....	78
4.2.1. Die Eissituation.....	78
4.2.2. Eistemperaturen.....	78
4.2.3. Nährstoffe.....	80
4.2.4. Lichtklima.....	86
5. Zusammenfassende Diskussion zu den Faktoren Temperatur, Solevolumen, Nährstoffe und Licht im Eis.....	96
6. Die Eistankeexperimente.....	108
6.1. Material und Methoden.....	108
6.1.1. Der Eistank.....	108
6.1.2. Durchgeführte Versuche.....	110
6.1.3. Probenentnahme im Eistank.....	111
6.1.4. Diatomeenkulturen.....	112
6.2. Ergebnisse.....	113
6.2.1. Eiswachstumsgeschwindigkeit und Wärmefluß.....	113
6.2.2. Beschreibung des Wellenfeldes.....	114
6.2.3. Die Wasserströmung.....	115
6.2.4. Der Einfluß eines ruhenden Wasserkörpers auf die Anreicherung von Algen bei der Eisbildung.....	116
6.2.5. Der Einfluß von Wellengang auf die Anreicherung der Algen bei der Eisbildung.....	118
6.2.6. Der Einfluß von Strömung auf die Anrei- cherung von Algen bei der Eisbildung.....	124
6.2.7 Vergleich der Versuche.....	128
6.3. Diskussion.....	130
6.3.1. Methodenkritik:.....	130
6.3.2. Diskussion der Ergebnisse.....	131
6.3.3. Zusammenfassung.....	138
7. Literaturverzeichnis.....	139
8. Anhang.....	150

Danksagung

Ich möchte mich für die Hilfe und Initiative einer großen Anzahl von Personen bedanken, die auf verschiedene Weise zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Mein Dank gilt Prof. Dr. G. Hempel, der mir die Arbeit am AWI und die Teilnahme an den Antarktisexpeditionen ermöglichte.

Ich bedanke mich bei Prof. Dr. M. Spindler für die Betreuung der Arbeit, die gute Arbeitsatmosphäre und das Vertrauen, das er mir entgegenbrachte.

Bei Prof. Dr. H. Theede möchte ich mich herzlich dafür bedanken, daß er das Referat der Arbeit übernommen hat.

Bei den Mitinitiatoren der Meereisgruppe Dr. G. S. Dieckmann und Prof. Dr. M. Lange möchte ich mich für die freundschaftliche und fachliche Unterstützung beim Einarbeiten in das Thema Meereis bedanken. Ohne die Diskussionen mit Dr. H. Eicken und Dr. R. Gradinger wären viele meiner Gedanken Stückwerk geblieben oder hätten mich in die falsche Richtung geleitet - vielen Dank für die Hilfe. Vielen Dank auch an K. Beyer, K. Haupt, R. Steinmetz, R. Thomzik und J. Wegner für die allgegenwärtige Hilfe. Die technische Unterstützung der Werkstatt war für mich besonders wertvoll, ich bedanke mich bei R. Böge, E. Dunker, R. Laboda, D. Mante, L. Pollnick, G. Rastedt und R. Sibbers.

Mein Dank gilt auch allen Kollegen aus der Sektion Bio I mit Prof. Dr. Arntz an der Spitze. Besonders die "guten Geister" E. Barwich, M. Puls, C. Dieckmann und C. Willeweit, die das Betriebsklima im angenehmen Bereich hielten, möchte ich erwähnen. Vielen Dank für die Hilfe an U. Bock, C. Dahm, U. Glaucke, M. Gleitz, Dr. C.-P. Günther, S. Günther, S. Großmann, Dr. H. H. Janßen, Dr. R. Knust, Dr. I. Kröncke, A. Kuhn und M. Stürcken-Rodewald.

Der Mannschaft des PFS Polarstern sei ebenfalls für die Unterstützung und Hilfe bei den Expeditionen herzlich gedankt.

Es hat mir Freude bereitet, mit der Hilfe aller Kollegen mehr zustande zu bringen, als ich es alleine je gekonnt hätte.

Zusammenfassung

Die soleerfüllten Hohlräume (Solekanälchen), die bei der Entstehung von Meereis zwischen und innerhalb der Eiskristalle entstehen, dienen einer diversen Gemeinschaft von Organismen als Habitat. Die Bedingungen in diesen Solekanälchen werden durch die Verhältnisse bei der Eisentstehung und den speziellen Materialeigenschaften des Eises kontrolliert. Das Ziel dieser Arbeit war es, die *in-situ* Lebensbedingungen innerhalb der Solekanälchen exakt zu beschreiben.

Während der Winterexpedition ANT 8/2 1989 in das Weddellmeer (Antarktis) wurden dazu speziell angepasste, neue Methoden entwickelt. Durch Zentrifugation von Eiskernabschnitten bei Fundorttemperatur wurde Sole aus dem Eis extrahiert. Die Parameter Solevolumen, Salinität, pH-Wert, Chlorophyll-a-Konzentration und Häufigkeit von Diatomeen wurden sowohl an den ausgeschleuderten Eiskernabschnitten als auch an der Sole gemessen. Durch die Zentrifugation ließen sich ca. 80 % der im Eis enthaltenen Sole gewinnen, ca. 20 % verblieben im Eis. An 34 Kernen aus 17 verschiedenen Eisschollen aus dem nordöstlichen Weddellmeer wurden mit dieser Methode Vertikalprofile der oben genannten Parameter gemessen. Das direkt gemessene Solevolumen schwankte zwischen 5 und 30 % des gesamten Eisvolumens und stimmte mit theoretisch errechenbaren Werten überein. Die Vertikalprofile des Solevolumens verliefen fast gerade mit einer leichten Erhöhung zur Unterseite der Schollen hin. Die Solesalinitäten lagen zwischen 27 und 205 ‰.

In der ausschleuderbaren Sole war ca. 20 % des im Eis vorhandenen Chlorophylls enthalten. Ein Vergleich der Artenzusammensetzung zeigte keinen Unterschied zwischen ausschleuderbarer Sole und ausgeschleudertem Kern. Der Anteil der toten Diatomeenzellen und das Phaeophytin/Chlorophyllverhältnis lag in der eingeschlossenen Sole signifikant höher als in der ausgeschleuderten Sole.

Ausgeschleuderte und anschließend tiefgefrorene Eiskernabschnitte wurden zur Herstellung zeitlich und thermisch stabiler Ausgüsse der Solekanälchen verwendet. Das Eis wurde hierzu bei -12 °C mit einem speziell vorbereiteten Monomer getränkt und anschließend mit UV-Licht ausgehärtet. Nach der Entfernung des Eises durch Gefrier-trocknung konnten von den Ausgüssen rasterelektronenmikroskopi-

sche Präparate angefertigt werden. Die Form der Solekanäle wurde mit einer Auflösung von Zentimetern bis in den Bereich weniger Mikrometer erfaßt.

Es zeigten sich deutliche Unterschiede bei der dreidimensionalen Anordnung und Form der Solekanälchen aus unterschiedlichen Eistexturklassen und bei verschiedenen Eistemperaturen.

Während der Expedition ANT 9/3, die in das südöstliche Weddellmeer führte, wurde die Methode des Soleauschleuderns systematisch angewandt und die gleichen Parameter wie bei der Expedition ANT 8/2 gemessen. Zusätzlich wurden in der Sole von 15 Eiskernen die Konzentrationen von Nitrat, Nitrit, Ammonium, Phosphat und Silikat mit einer vertikalen Auflösung von 10 cm bestimmt. Die Nährstoffe zeigten stark schwankende Vertikalprofile (Nitrit zwischen 0,02 und 2,35 $\mu\text{mol l}^{-1}$, Nitrat zwischen 0,6 und 38,3 $\mu\text{mol l}^{-1}$, Ammonium zwischen 1,6 und 15,9 $\mu\text{mol l}^{-1}$, Phosphat zwischen 0,0 und 18,1 $\mu\text{mol l}^{-1}$ und Silikat zwischen 1,5 und 147,2 $\mu\text{mol l}^{-1}$). Der Vergleich der Nährstoffkonzentrationen und -verhältnisse in ausgeschleuderter Sole und im aufgetauten ausgeschleuderten Kern weist auf Prozesse hin, die eine Veränderung der Nährstoffkonzentrationen beim Auftauen von Eis bewirken.

Auf beiden Expeditionen wurden die Schnee- und Eisdicken, Eistemperaturen, Lichtverhältnisse im Eis sowie eingestrahlte Lichtmengen gemessen. Eistemperaturen niedriger als $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ wurden nur selten gemessen, typisch waren $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es konnte gezeigt werden, daß die Temperaturen im Eis von dem mehrtägigen Mittelwert der Lufttemperatur sowie der Dicke der Schneeauflage abhängig sind.

Die im Eis herrschende relative Lichtmenge zeigte ebenfalls eine starke Abhängigkeit von der Schneeauflage und erreichte an der Unterseite der Eisschollen typische Werte von 1 bis 10 % der eingestrahelten Lichtmenge.

Ein weiterer Teil dieser Arbeit beschäftigte sich mit Mechanismen, die bei der Bildung von Eis zu einer Anreicherung von Organismen im Neueis führen. In einem eigens dazu konstruierten Eistank konnten Eisbildungsprozesse unter Wellen- oder Strömungseinfluß simuliert werden. Es wurden Mischkulturen von antarktischen Diatomeen verwendet. Bei Eisbildung mit simulierten Wellen wurden Anreicherungsfaktoren für Chlorophyll von 2, bei Strömung bis zu 7 gefunden.

Bei Versuchen mit Wellen wurden zwei unterschiedliche Mechanismen erkannt, die die Anreicherung bewirken können. Die Versuche mit Strömung belegten den Einfluß, den Langmuir-Zirkulationen im Pelagial bei der Anreicherung von Organismen spielen können. Die Anreicherung von Algen verlief unselektiv, d.h. im Eis wurden die gleiche Arten in gleichen relativen Häufigkeiten wie im Wasser gefunden.

Summary

Brine channels which are formed in and between ice crystals during sea ice formation are a habitat for a variety of different organism groups. The physical and chemical parameters in the brine channels are governed by freezing processes and other sea ice properties. The aim of this thesis was to determine the physical and chemical in situ environment of sea ice.

Several methods were developed or adapted during the winter expedition 1989 (ANT 8/2) with R/V Polarstern to the Weddell Sea. Brine was extracted from ice core sections using a centrifugation technique at temperatures corresponding to those measured in the field. Volume, salinity, pH, chlorophyll *a* determinations as well as enumeration and classification of diatom species were done on brine and melted ice cores. Vertical profiles of all parameters were measured on 34 cores from 17 different ice floes. Brine volume varied between 5 and 30 % of the total ice volume and corresponded well with theoretical values. The brine volume profiles were uniform, usually showing a slight increase near the bottom of the cores. Brine salinity ranged between 27 and 205 ‰. About 80 % of the brine could be removed from the sea ice by centrifugation, while the remaining 20 % was entrapped in the ice. The centrifuged brine contained about 20% of the total chlorophyll *a* in the sea ice cores. No differences in the species composition were found between centrifuged brine and melted ice cores. Numbers of dead diatom cells and the phaeophytin/chlorophyll ratio in the entrapped brine were higher than in the centrifuged brine.

Centrifuged core sections which were frozen at -12°C and used to make durable casts of the brine channel system. The ice sections were permeated with a watersoluble resin of low viscosity which polymerized under UV radiation at -12°C. After removal of ice by sublimation, the shape of the brine channels was photographed using scanning electron microscopy at a resolution ranging from centimetres to few microns. The three dimensional array of the brine channels varied according to ice type as well as ice temperatures.

During the summer expedition 1991 (ANT 9/3) into the south-eastern Weddell Sea, the centrifuge technique was used to measure

the same parameters as during ANT 8/2. Furthermore, nitrate, nitrite, ammonia, phosphate and silicate analysis were measured in the brine. The nutrient profiles showed strong variations (nitrite between 0,02 and 2,35 $\mu\text{mol l}^{-1}$, nitrate between 0,6 and 38,3 $\mu\text{mol l}^{-1}$, ammonia between 1,6 and 15,9 $\mu\text{mol l}^{-1}$, phosphate between 0,0 and 18,1 $\mu\text{mol l}^{-1}$ and silicate between 1,5 and 147,2 $\mu\text{mol l}^{-1}$). A comparison between the nutrient concentrations in centrifuged and entrapped brine indicated that different results are achieved using the two methods.

Snow and ice thickness, ice temperatures and photosynthetic radiation (PAR) in the ice were measured during both expeditions. Ice temperatures were seldomly below $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Typical values ranged between $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ice temperatures are highly dependent on average air temperatures and snow cover thickness.

Typical values recorded underneath the ice (ice/water interface) were between 1 to 10% of the incoming PAR.

Mechanisms leading to the enrichment of organisms in newly formed sea ice were also investigated. Ice formation processes using wave simulation and currents were studied in a specially designed ice tank. Mixed cultures of Antarctic diatoms were used. Enrichment factors for Chlorophyll a in the sea ice was enriched by a factor of up to 2 under the influence of waves and up to 7 when using currents. Two different enrichment mechanisms were identified during wave action experiments. The experiments under the influence of currents verified the role of Langmuir cells for algal enrichment. There was no evidence of a selective enrichment for different species.

1. Einleitung

Die Meereisbedeckung erreicht zu den Zeiten der maximalen Ausdehnung einen Flächenanteil von 5 % der nördlichen und 8 % der südlichen Erdhalbkugel. In der Arktis schwankt die Eisbedeckung saisonal zwischen 8 und $14 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ (WALSH und JOHNSON 1979), in der Antarktis zwischen 4 und $20 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ (ZWALLY et al. 1983). Obgleich das Meereis als eine vergleichsweise dünne Haut auf Teilen der polaren Ozeane liegt, übt es einen großen Einfluß auf den darunterliegenden Wasserkörper, die Atmosphäre und die Wechselwirkungen zwischen beiden aus. Die Wechselwirkungen beeinflussen nicht nur die polaren Ozeane selbst, sondern auch das weltweite Klimageschehen (OERLEMANN und VEEN 1984). Das beim Gefrieren von Oberflächenwasser entstehende kalte und salzreiche Wasser sinkt als polares Boden- oder Tiefenwasser ab und ist bis über den Äquator hinaus nachweisbar (OERLEMANN und VEEN 1984). Variationen in der Flächenausdehnung der winterlichen Meereisbedeckung des antarktischen Ozeans spiegeln sich in der gebildeten Menge von antarktischen Bodenwasser wieder (QUILTY 1990). Der konduktive und turbulente Wärmetransport sowie die Gasaustauschprozesse zwischen Ozean und Atmosphäre werden durch das Meereis erschwert (ONO 1967, 1968). Die Erhöhung der Albedo über meereisbedeckten Flächen bewirkt, daß ein Großteil der einfallenden Strahlung den Ozean nicht erreicht (MAYKUT 1982). Diese Tatsache führt dazu, daß im Pelagial unter einer fast geschlossenen Eisdecke die Photosynthese stark vermindert ist und sich unter dem Meereis nur geringe Mengen von planktischer Biomasse finden lassen (GIESKES et al. 1987). Andererseits stabilisiert das im Frühjahr tauende Eis aufgrund der Salinitätserniedrigung an der Oberfläche die Wassersäule und setzt gleichzeitig Algen als potentielle Saatpopulation frei. Dadurch können sich ausgeprägte Algenblüten (Eisrandblüten) ausbilden (SCHAREK 1991, GRADINGER und BAUMANN 1991).

Hohe Biomassekonzentrationen im Vergleich zu dem darunterliegenden Wasser lassen sich schon in sehr jungem Neueis nachweisen (CLARKE und ACKLEY 1984, BARTSCH 1989). Diese hohen Konzentrationen können nicht durch Wachstum allein erklärt werden

(BARTSCH 1989), es müssen daher Mechanismen existieren, die zu einer wirkungsvollen Anreicherung von Organismen im Neueis führen können (ACKLEY 1982, ACKLEY et al. 1987, GARRISON et al. 1983, REIMNITZ et al. 1990).

Da das Kristallgitter von Eis den Einbau von Ionen nur in beschränktem Maße zulässt (HARRISON und TILLER 1963), wird beim Gefrieren Sole konzentriert, die sich in Poren und Kanälen innerhalb des Eises sammelt. Grundlegende Daten zu Eisbildungsprozessen finden sich bei ASSUR (1960). Einen umfassenden Überblick geben WEEKS und ACKLEY (1982). Diese soleerfüllten Hohlräume, meist Solekanälchen genannt, werden von einer diversen Gemeinschaft von autotrophen und heterotrophen Organismen besiedelt (einen zusammenfassenden Überblick über Eislebensgemeinschaften und die Geschichte ihrer Entdeckung und Erforschung findet sich bei HORNER 1985).

Die geringen Durchmesser der Solekanälchen, die Härte des Eises sowie Veränderungen im Chemismus der Sole und in den räumlichen Verhältnissen in den Solekanälchen bei geringen Temperaturänderungen erschweren es, direkte Messungen in den Solekanälchen vorzunehmen. In Arbeiten mit biologischen Fragestellungen wurde das Eis bisher meist aufgetaut, um die Organismen und gelöste Stoffe in der Sole einer Analyse zugänglich zu machen (z.B. SPINDLER und DIECKMANN 1986). In glaziologisch ausgerichteten Arbeiten zur Struktur des Eises hingegen wurde das Eis vor einer Untersuchung meistens bis unterhalb des eutektischen Punktes abgekühlt, so daß keine flüssige Phase mehr innerhalb des Eises vorhanden ist (LANGE 1988, LANGE et al. 1988, EICKEN 1991). Beide Vorgehensweisen zerstören und verändern die Solekanälchen und die Sole, die eigentliche Umwelt der Organismen.

Die vorliegende Arbeit hatte im wesentlichen zwei Ziele: es sollten die in den Solekanälchen herrschenden Umweltfaktoren gemessen und in einem Experiment die Anreicherungsmechanismen bei der Neueisbildung untersucht werden. Beide Fragestellungen sollten die *in-situ* Bedingungen möglichst unverfälscht beschreiben. Dazu mußten neue Messverfahren und experimentelle Ansätze entwickelt werden. Bezüglich der in den Solekanälchen herrschenden Umwelt-

faktoren wurden Schwerpunkte auf die Aufklärung der räumlichen Feinstruktur des Habitats und die in der Sole vorhandenen Nährstoffe gelegt.

Die Simulation der Neueisbildung sollte alle in der Natur vorkommenden Randbedingungen berücksichtigen und zu Meereis führen, das nicht wesentlich von natürlichem Meereis verschieden war.

2. Allgemeiner Material und Methodenteil

2.1. Das Untersuchungsgebiet

Die bearbeiteten Eiskerne wurden während zweier Antarktisexpeditionen mit dem Forschungsschiff "Polarstern" in das Weddellmeer gewonnen. Die Expedition ANT 8/2 fand im südlichen Spätwinter-Frühjahr von Anfang September bis Ende Oktober 1989 statt. Die Expedition ANT 9/3 erfolgte im südlichen Sommer und Frühherbst von Januar bis März 1991. Die jeweiligen Fahrtverläufe sind in Abb.1 dargestellt. Angaben über Expeditionsziele und genauer Fahrtverlauf sind den Expeditionsberichten (AUGSTEIN et al. 1991, BATHMANN et al. 1992) zu entnehmen. Detaillierte Stationskarten und Angaben zur Eissituation finden sich in den Kapiteln zu den einzelnen Expeditionen.

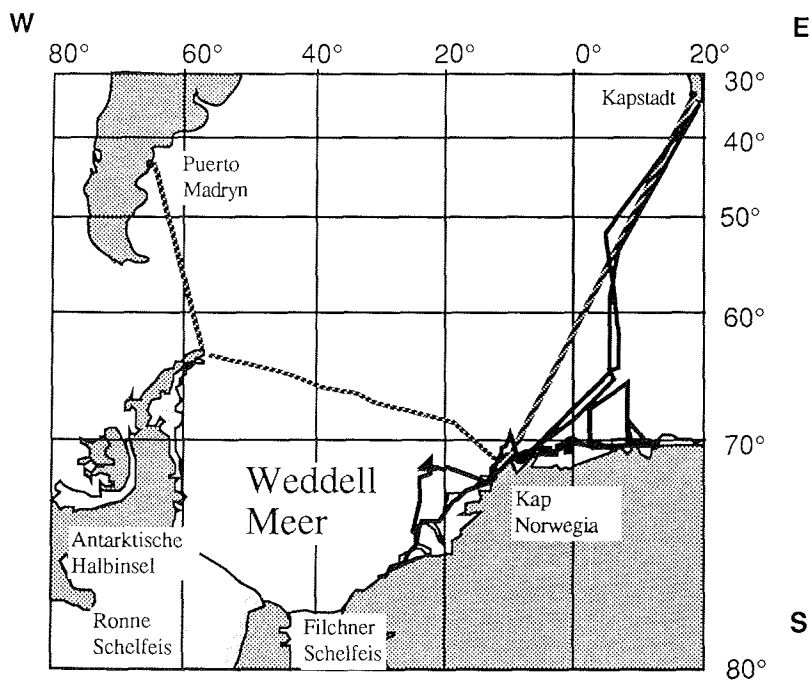


Abb. 1: Die Fahrtrouten der Expeditionen ANT 8/2 (gestrichelte Linie) und ANT 9/3 (durchgezogene Linie) in das Weddellmeer.

2.2. Probenentnahme im Freiland

Mittels modifizierter 3" und 4" CRELL Kernbohrer wurden an allen Eisstationen mehrere Eiskerne so nah wie möglich beieinander erbohrt (ca. 150 mm von Mittelpunkt zu Mittelpunkt der Bohrlöcher). Die Kennzeichnung der Kerne erfolgte mit einem Buchstaben- und Nummerncode. Die ersten vier Zeichen kennzeichneten die Expedition, die nächsten drei Zahlen den julianischen Tag (1 - 365) und die letzten beiden Ziffern die Reihenfolge der an diesem Tag erbohrten Kerne. AN8229603 kennzeichnet demnach den dritten Kern, der am 23. Oktober während der Expedition ANT 8/2 erbohrt wurde.

Tab.1: Liste der an den einzelnen Kernen gemessene Parameter. Die selbst ausgeführten Messungen sind fett hervorgehoben.

Kern	Datenquelle	Gemessene Parameter
.....01	das Bohrloch	Schneeeauflage, PAR (= Photosynthetic Active Radiation)
	der gefrorene Kern	Eisdicke, Eistemperatur, Eistextur
	der aufgetaute Kern	Salinität, Chlorophyllkonzentration, Foraminiferenkonzentration
.....02	die in filtriertem Seewasser (SPINDLER und DIECKMANN1986) aufgetaute Probe.	Metazoenkonzentration, Foraminiferenkonzentration und -größe, Bakterien-, Flagellaten- und Diatomeenkonzentration
.....03	die ausgeschleuderte Sole	Salinität, Volumen, Chlorophyllkonzentration, Nährsalze, pH-Wert, O16/O18 Verhältnis, Diatomeenanzahl und -taxonomie
	der ausgeschleuderte Kern	Hohlraumstruktur
.....04	die ausgeschleuderte Sole	Salinität, Volumen, Chlorophyllkonzentration, Nährsalze, O16/O18 Verhältniss, Diatomeenanzahl und -taxonomie (z.T. zusammen mit der Sole aus Kern03)
	der aufgetaute , ausgeschleuderte Kern	Salinität Volumen, Chlorophyllkonzentration, Nährsalze, Diatomeenanzahl und -taxonomie
.....05	am aufgetauten Kern	Partikulärer organischer Kohlenstoff (POC)
.....06	an ausgeschleuderter Sole und aufgetauten Kernen	Bakterienanzahl und -aktivität.

Am Tag 294 wurden zwei unterschiedlichen Schollen beprobt. In Abweichung von der obigen Regel sind die Kerne, die aus der zweiten Scholle stammten, mit 294II gekennzeichnet. An den einzelnen

Kernen wurden verschiedene Parameter gemessen (Tab. 1). Dieses Standardprogramm wurde an den Stationen den Erfordernissen angepaßt, so daß nicht immer alle Kerne erbohrt und alle Parameter gemessen wurden.

2.3. Meßmethoden

Salinität

Zur Salinitätsbestimmung wurde ein Konduktometer (LF 2000, Firma WTW) eingesetzt. Salinitäten über 100 ‰ wurden nach Verdünnung mit dest. Wasser (1:1) gemessen. Bei der Messung wurde darauf geachtet, daß die Temperatur der zu messenden Lösung nicht mehr als 5 °C von der Temperatur abwich, bei der das Gerät geeicht wurde. Sämtliche Daten wurden geräteintern auf eine einheitliche Referenztemperatur von 20 °C korrigiert (UNESCO 1981). Die Meßgenauigkeit des LF 2000 beträgt $\pm 0,5$ % des Meßwertes.

Temperatur

Die Temperaturen wurden mit elektronischen Thermometern (Testoterm 7000, Firma Testoterm) und Pt 100 Temperatursonden gemessen. Die Meßgenauigkeit beträgt $\pm 0,2$ °C bzw. 0,1 % des Meßwertes. Die *in-situ* Eistemperaturen wurden an Kern 01 gemessen, der dazu unmittelbar nach dem Erbohren in ein isoliertes Rohr verpackt und im Abstand von 5 cm mit 5 mm dicken und 4 cm tiefen Löchern versehen wurde. In diesen Löchern wurde die Temperatur gemessen, wobei bis zur Ablesung des Meßwertes 1 min abgewartet wurde.

pH-Wert

Die pH-Werte wurden mit einem pH-Meter mit interner Temperaturkompensation (pH191, Firma WTW) bestimmt. Geeicht wurde vor und zwischen den Messungen mit pH 7 und pH 9 Standardpufferlösungen.

Licht

Licht im photosynthetisch aktiven Bereich (PAR) zwischen 400 und 700 nm wurde mit Radioquantametern (LIQUOR LI 185B und LIQUOR Datalogger LI 1000) mit 2π - und 4π -Sensoren (LI 193 und LI 193SB) gemessen. Die 2π -Sonde mißt die aus einer Halbkugel einfallende Strahlung, die 4π -Sonde berücksichtigt die aus allen Raumrichtungen einfallende Strahlung. Die verwendeten Sensoren messen den Quantenfluß in der Einheit $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($= 6,02 \cdot 10^{17}$

Photonen $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Während ANT 8/2 wurde die PAR mit der 2π - und 4π -Sonde in 2 m Höhe über der Eisoberfläche gemessen, anschließend mit der 4π -Sonde im Bohrloch ab einer Wassertiefe von 10 m bis zur Oberfläche. Von 10 bis 5 m wurde in 1 m Abständen gemessen, von 5 m bis zur Oberfläche in 25 cm Abständen. Während ANT 9/3 wurden am Data-logger simultan die Meßwerte der 2π - und der 4π -Sonde registriert. Die 2π -Sonde wurde dazu in 20 m Abstand zum Bohrloch senkrecht ausgerichtet installiert. Nach dem Absenken der 4π -Sonde wurde das Bohrloch bis zur ursprünglichen Schneedicke mit Schnee verschlossen. Bezugsebene der Tiefenmaße war die Eisoberkante. Bei den Lichtmessungen wurde darauf geachtet, daß die Schneeoberfläche nur minimal gestört wurde, keine schattenwerfende Gegenstände im Umkreis von 20 m auf dem Eis lagen und ein Mindestabstand von 100 m zum Schiff eingehalten wurde. Besonders bei geringen Lichtstärken ($<1 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) lieferte die Mittelung der Meßwerte über 10 s die besten Ergebnisse, so daß während ANT 9/3 alle Messungen in diesem Modus ausgeführt wurden.

Nährsalze

Die Ammoniumbestimmung erfolgte unmittelbar nach der Probenentnahme an Bord nach der Methode von GRASSHOFF (1976). Der Gehalt an Phosphat, Silikat, Nitrat und Nitrit wurde am Institut mit einem TECHNIKON Autoanalyser nach GRASSHOFF (1976) bestimmt. Die Proben wurden hierzu mit HgCl_2 versetzt (Endkonzentration 0,1 %), und bei 4°C bis zur Messung gelagert. Die Lagerdauer betrug 6 Monate.

Chlorophyll-a

Die Chlorophyll-a-Konzentrationen wurden mittels eines Turner-Design-Fluorometers nach der Methode von EVANS und O'REILLY (1983) bestimmt. Die Eisproben wurden unmittelbar nach dem Auftauen über Whatman GFC Filter filtriert, die Soleproben unmittelbar nach dem Ausschleudern. Die filtrierten Volumina schwankten zwischen 5 und 400 ml. Die Filter wurden einzeln verpackt und tiefgefroren (-18°C) und bis zur Messung nicht länger als 2 Monate gelagert. Extrahiert wurde in Aceton (90 %). Die Filter wurden zusammen mit $0,5 \text{ cm}^3$ Glasperlen in einer Zelmühle homogenisiert.

Eistextur

Die Nomenklatur der Eistextur erfolgte nach einem die Textur und Eisentstehung berücksichtigenden Klassifizierungsschema nach EICKEN (1991), das um die Kategorie des Plättcheneises erweitert wurde (Tab. 2). Vertikal- und Horizontaldickschnitte der Kerne ...01 wurden dazu auf einem Leuchttisch zwischen Polarisationsfiltern betrachtet.

Tab. 2: Texturelle und genetische Klassifikation von Meereisgefügen verändert nach EICKEN (1991).

Texturklasse	Eiskristallmorphologie	Sole-Einschlüsse	Entstehungsmodus
pflasterkörnig	isometrisch; ebene Korngrenzen mit Trielpunkten	intergranular, rundlich	Umkristallisation körnig/säuligen Eises bzw. von Schnee
rundkörnig	isometrisch, konvex; teilw. raue Korngrenzflächen	intergranular, rundlich	Verfestigung von Schwemweis, das aus der Wassersäule aufschwimmt
säulig	vertikal stark, horizontal schwach gelängt	intragranular, lagig	langsames Anwachsen von Eis an bestehende Eisdecke unter ruhigen Wachstumsbedingungen
verzahnt säulig/körnig	einheitliche Form, leicht gelängt, verzahnt	vorwiegend intergranular, Ketten von rundlichen Poren	schnelles Anwachsen an bestehende Eisdecke unter dynamischen Wachstumsbedingungen
vermengt säulig/körnig	Bereiche körnigen und säuligen Eises liegen nebeneinander vor	inter- und intragranular rundlich und lagig	Vermengung säuligen und körnigen Eises bei Deformation, Hohlraumwachstum.
Plättchen	Eisplättchen in einer Matrix aus säuligem oder körnigem Eis	nur in der Elsmatrix, inter- und intragranular	aufschwimmende Eisplättchen lagern sich unter Eisdecken an und frieren fest.

Diatomeentaxonomie und Zellzahlen

Zur Bestimmung von Algenhäufigkeiten und Artenzusammensetzung wurden die Proben mit boraxgepuffertem Formalin versetzt (Endkonzentration 0,5 %). Die Zellzahlen wurden mit einem Umkehrmikroskop (Leitz Labovert) nach der Methode von UTERMÖHL (1958) bestimmt. Es wurde bei 100 bis 630-facher Vergrößerung gezählt, wobei mindestens 400 Zellen berücksichtigt wurden, um den Fehler unter 10 % zu halten (HELCOM 1983). Die sedimentierten Probevolumina betragen 2,5, 5, 20 und 50 ml.

Zur Identifizierung einiger Diatomeen wurden Dauerpräparate nach

HASLE und FRYXELL (1985) in Naphrax hergestellt. Die Bestimmung der Diatomeen erfolgte nach VAN HEURK (1909), HEIDEN und KOLBE (1928), HASLE (1964; 1965 a, b), HUSTEDT (1958), PRIDDLE und FRYXELL (1985) und MANGUIN (1960).

2.4. Verwendete Abkürzungen

V	Volumen
S	Salinität
T	Eistemperatur
Chl	Chlorophyll-a
AK	Aufgetauter, ausgeschleudeter Kern
So	ausgeschleuderte Sole
ESo	eingeschlossene, d.h. nicht ausschleuderbare Sole
Ge	Gesamtparameter, am ungeschleuderten aufgetauten Kern
SGe	Gesamte Sole, die innerhalb eines Kernes vorhanden ist
Eis	reines Eis ohne Porenanteil
(th)	nach einer theoretischen Formel errechneter Wert

Die Abkürzungen wurden auch in Kombination verwendet, so bedeutet z.B. V_{AK} das Volumen des ausgeschleuderten und aufgetauten Kernes. Die angehängten Abkürzungen wurden dabei tiefgestellt.

2.5. Formeln

Das Volumen der im Eis nach dem Ausschleudern verbliebenen Sole wurde nach Formel 1 errechnet.

$$V_{ESo} = \frac{S_{AK} \cdot V_{AK}}{S_{So}} \quad (1)$$

Dabei wurde angenommen, daß die Salinität der ausgeschleuderten Sole gleich der Salinität der eingeschlossenen Sole ist. Alle in der Formel (1) benutzten Parameter wurden an einem Kern gemessen.

In den Fällen, in denen die Gesamtsalinität des Eises nicht durch direkte Messungen vorlag, wurde die Gesamtsalinität aus Salinität und Volumen jeweils der Sole und des ausgeschleuderten Kernes gewonnen.

$$S_{Ge} = \frac{(S_{AK} \cdot V_{AK}) + (S_{So} \cdot V_{So})}{V_{AK} + V_{So}} \quad (2)$$

Das gesamte Solevolumen (V_{SoGe}) innerhalb des Eises ergab sich durch Addition von eingeschlossenem (V_{ESo}) und ausgeschleuderten (V_{So}) Solevolumen.

Bei Kenntnis der Gesamtsalinität und der Eistemperatur läßt sich

das gesamte Solevolumen innerhalb einer Meereisprobe errechnen (FRANKENSTEIN und GARNER 1967; COX and WEEKS 1983). Das theoretische Solevolumen wurde mit den Formeln von FRANKENSTEIN und GARNER (1967) errechnet, die für drei Temperaturbereiche passende Formeln angeben. Die Formeln geben das Solevolumen in relativen Einheiten an, also in einem Dezimalbruch des Gesamtvolumens der Eisprobe (V_{GE}).

$$V_{SoGe(th)} = S_{Ge} \cdot \left(\frac{52,56}{T} - 2,28 \right) \quad \text{für } -0,50^\circ < T < 2,06^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$V_{SoGe(th)} = S_{Ge} \cdot \left(\frac{45,917}{T} + 0,930 \right) \quad \text{für } -2,06^\circ < T < -8,20^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$V_{SoGe(th)} = S_{Ge} \cdot \left(\frac{43,795}{T} + 1,189 \right) \quad \text{für } -8,20^\circ < T < 22,90^\circ\text{C} \quad (5)$$

Das gesamte Eisvolumen V_{EisGe} wurde unter Annahme einer Dichte des reinen Eis von $\varrho = 0,917 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ berechnet:

$$V_{EisGe} = \frac{(V_{AK} - V_{ESo})}{\varrho} \quad (6)$$

Der Luftgehalt des Eises wurde vernachlässigt, so daß sich folgende Beziehung für das gesamte Eisvolumen (V_{Ge}) ergab:

$$V_{Ge} = \frac{(V_{AK} - V_{ESo})}{\varrho} + V_{So} + V_{ESo} \quad (7)$$

Das relative gemessene Solevolumen ergab sich somit als:

$$V_{SoGe} = \frac{V_{So} + V_{ESo}}{V_{Ge}} \quad (8)$$

Die theoretischen Salinitäten in der Sole wurden mit Hilfe der Formeln von ASSUR (1960) errechnet:

$$S_{So} = \frac{1000 T}{T - 54,11} \quad \text{für } T > -8,2^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$S_{So} = \frac{62,4 - 10,31 T}{1,0624 - 0,01031 T} \quad \text{für } -22,9^\circ\text{C} < T < -8,2^\circ\text{C} \quad (10)$$

Um Zusammenhänge zwischen nicht normalverteilten Reihen zu ermitteln, wurde der Spearmannsche Rang-Korrelationskoeffizient (Rho) errechnet (D = Differenz der Rangplätze).

$$\text{Rho} = 1 - \frac{6 \sum D^2}{n(n^2 - 1)} \quad (11)$$

Er schwankt zwischen -1 und +1, und gestattet damit die Beantwortung der Frage, ob eine positive oder negative Korrelation zwischen zwei Datenreihen vorliegt. Die Signifikanzgrenzen von Rho lassen sich aus statistischen Tabellenwerken entnehmen (SACHS 1984).

Einige Daten werden in sogenannten Boxplots graphisch dargestellt. Bei dieser Art der Darstellung ist die Verteilung der Datenreihe zu erkennen. Unterhalb und oberhalb der "Box" liegen die erste bzw. die vierte Quartile der Meßwerte, die Unterteilung der "Box" repräsentiert den Median, die Einschnürung den 95 % Vertrauensbereich des Median.

3. Die Expedition ANT 8/2

3.1. Material und Methoden

3.1.1. Die Eisstationen

Auf zwei Schnitten, die von der Spitze der Antarktischen Halbinsel nach Kap Norwegia durch das Weddellmeer und von Kap Norwegia in Richtung Kapstadt führten, wurden an 27 Eisstationen Kerne gewonnen. Die Lage der Eisstationen ist Abb. 2 zu entnehmen. Die Numerierung der Eisstationen in der Karte erfolgte nach dem gleichen Schema, das auch bei der Numerierung der Eiskerne angewendet wurde, so daß die Herkunft der Eiskerne direkt der Karte entnommen werden kann.

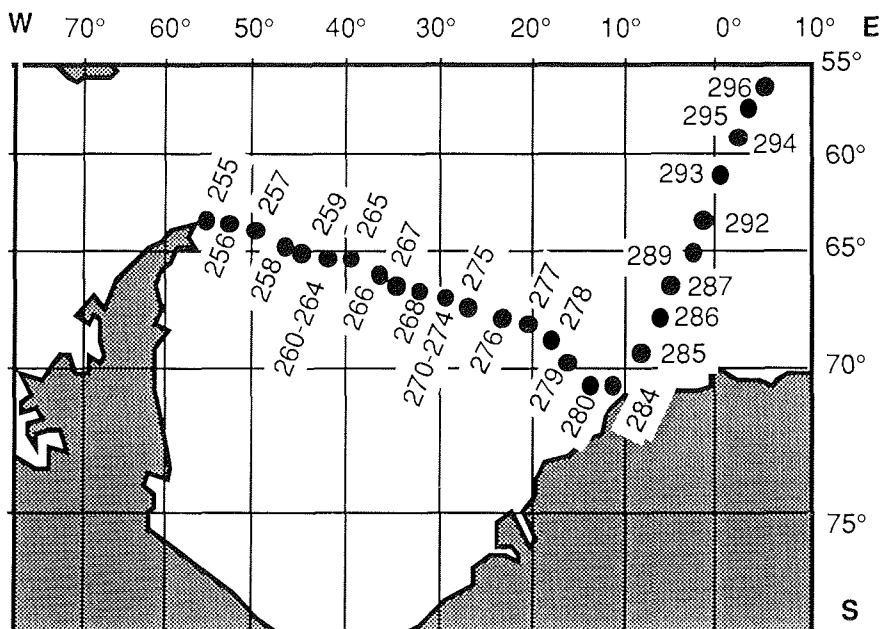


Abb. 2: Eisstationskarte der Expedition ANT 8/2, mit den Nummern, wie sie für die Kennung der Eiskerne verwendet wurden.

3.1.2. Trennung von Eis und Sole

Um Meereis zu erhalten, das sich bei Lagertemperaturen von -20 bis -30° nicht durch Zufrieren der soleerfüllten Kanäle ändert, wurde während ANT 8/2 ein Verfahren entwickelt, das es gestattet, die Sole aus dem Eis zu extrahieren. Zugleich konnte auf diese Weise Sole aus definierten Tiefen einer Eisscholle mit einer vertikalen

Auflösung von wenigen cm gewonnen werden. Die Kerne ...03 und ...04 mit den Nummern 256 bis 267, die westlich von 35 °W gewonnen wurden, dienten zur Entwicklung der Technik des Soleauschleuderns. Dazu wurden die Kerne in Stücke zwischen 2 und 10 cm Länge zersägt und mit Beschleunigungen von 4 bis 16000 m s⁻² für 2 bis 15 min zentrifugiert. Beschleunigungen von mehr als 3900 m s⁻² führten bei allen Eisgrößen und Schleuderzeiten häufig zu einem Zerbrechen der Eiskernabschnitte. Das geschah besonders bei relativ warmen Eis (T = -1,6 bis -2 °C) von der Unterseite der Schollen oder bei ungleichmäßiger Auflage auf der Siebplatte infolge von ungeraden Sägeschnitten. Geringere Beschleunigungen als 1800 m s⁻² führten zu einem ungenügenden Ausfließen von Sole. Ausgeschleuderte Eiskerne wechseln ihr Aussehen durch eine Erhöhung der Reflexion von milchig-glasig zu weiß, weil die Sole in den Kanälen durch Luft ersetzt wird.

Bei Eiskernabschnitten mit einer Länge von mehr als 5 cm trat häufig der Fall ein, daß die oberen Bereiche weiß und trocken waren, während die unteren noch glasig aussahen und sich feucht anfühlten. Eine Schleuderzeit von mehr als 10 min brachte keine Zunahme an ausgeschleudertem Solevolumen. Als Standardverfahren wurde folgendes Verfahren angewendet: Die Eiskerne wurden unmittelbar nach dem Bohren mit einer Handsäge in 3,3 cm lange Einzelstücke zersägt, in Plastikdosen verpackt und in einer isolierten Kiste zum Schiff transportiert. Die Eiskernabschnitte wurden einzeln in eigenentwickelten Zentrifugenbechern (Abb. 3) 10 min bei 1250 U min⁻¹ zentrifugiert (Beckmann CPR[®] Rotor G3.7).

Diese Umdrehungszahl entspricht einer Beschleunigung in der Mitte der Eisproben von 2700 m s⁻². Die Zentrifuge wurde zuvor auf die Temperatur eingestellt, die in der Tiefe der Ursprungseisscholle gemessen wurde. Die Einstellgenauigkeit der Zentrifugentemperatur wird mit ± 1 °C angegeben.

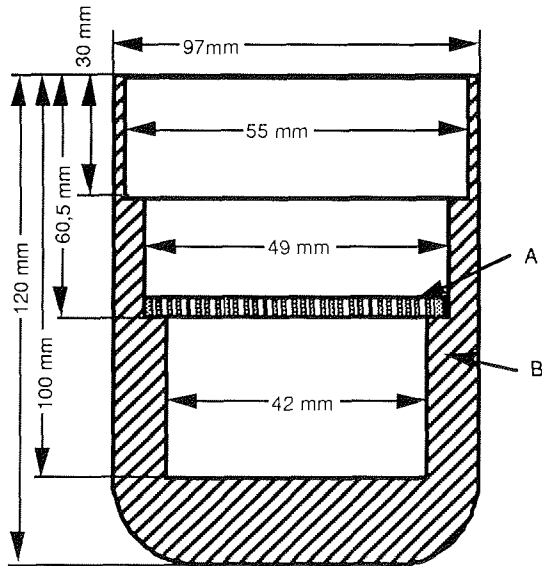


Abb. 3: Zentrifugenbecher zum Ausschleudern von Eiskernabschnitten. A = Siebplatte aus PVC, Porendurchmesser 4 mm, B = rotationssymmetrischer Becher aus PVC.

Daran anschließend wurde nach Entfernung der Siebplatte die Sole, die sich am Boden des Bechers sammelte, in gekühlte (0 °C) Erlenmeyerkolben umgefüllt. An der frischen Sole wurden Salinität, Volumen, pH und Ammoniumkonzentration bestimmt. Zur Bestimmung dieser Parameter wurde die jeweils gewonnene Sole von 3 Einzelstücken (insgesamt 10 cm Eiskern) zur Erreichung eines ausreichenden Probevolumens vereint. Die ausge-

schleuderten Abschnitte eines Kernes wurden einzeln in Plastiktüten verpackt und bei -20 °C bis zur weiteren Verarbeitung gelagert. Die ebenfalls ausgeschleuderten Abschnitte eines weiteren Kernes wurden in den Dosen, in denen sie vor dem Zentrifugieren lagerten, aufgetaut, um Chlorophyllgehalt, Salinität und Artenzusammensetzung der Diatomeen zu bestimmen. Für spätere Analysen wurden die Solen, bzw. die aufgetauten Eisstücke mit boraxgepuffertem Formalin (0,5 % Endkonzentration) fixiert. Ab dem 25.9.89 bzw. ab Kern Nr. 275 wurden die Kerne einheitlich nach dem beschriebenen Schema behandelt, so daß vergleichbare Werte für 34 Kerne aus 17 verschiedenen Eisschollen auf einem Transekt von 35 °W bis 4 °E vorliegen.

3.1.3. Kunststoffausgüsse des Porenraumes

Ein Teil der ausgeschleuderten Eiskernabschnitte wurde zur Entwicklung einer Methode verwendet, die es gestattet, die solefreien Porenräume mit einem flüssigen Kunststoff zu füllen. Nach dem Polymerisieren des Kunststoffs und dem Wegschmelzen des Eises sollten zeitlich und thermisch stabile Abgüsse des Porenraumes zur Verfügung stehen. Zum Ausgießen wurde der Kunststoff 2-Hydroxye-

thyl-methacrylat (MERCK) verwendet. Dieser Kunststoff eignete sich besonders, da er in der Kälte dünnflüssig und zugleich hydrophil war und eine geringe Oberflächenspannung aufwies. Dadurch vermochte er auch in feinste Verästelungen einzudringen. Die Polymerisation erfolgte ohne Wärmezufuhr von außen und unter geringer eigener Wärmeentwicklung, so daß die Strukturen der Eismatrix nicht zerstört wurden. Das Polymer war zudem stabil genug, um nach geeigneter Entfernung des Eises kleinste Strukturen zu erhalten. Das Monomer war in seiner reinen Form bis $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ flüssig. Durch die leichte Wasseraufnahme beim Entstabilisieren sank der Erstarrungspunkt bis unter $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zusätze von Triäthylen-Glykol-Dimethacrylat (MERCK) und Benzoylperoxid (ALDRICH) förderten die dreidimensionale Vernetzung bzw. unterstützten die Polymerisation durch Radikalbildung. Das Kunststoffgemisch härtete durch UV-Licht aus und blieb dabei transparent, so daß auch tiefere Schichten im Inneren des Eises vom UV-Licht erreicht wurden. Um Polymerisation beim Lagern zu vermeiden, ist der handelsübliche Kunststoff mit Hydrochinon (200 ppm) stabilisiert, das vor der weiteren Verarbeitung entfernt werden mußte. 100 Volumenteile Monomer wurden dazu zweimal in 20 Volumenteilen 25 %-iger Natriumchloridlösung, die 5 % Natriumhydroxid enthielt, in einem Schütteltrichter ausgeschüttelt. Danach wurde das Monomer zweimal in je 5 Volumenteilen einer 25 %-igen Natriumchloridlösung ausgeschüttelt. Die Zeit zwischen Ausschütteln und Trennen betrug mindestens 30 min. Dem entstabilisierten Monomer wurden unter ständigem Rühren 0,5 Volumenprozent Triäthylen-Glykol-Dimethacrylat (MERCK) und 1 Gewichtsprozent Benzoylperoxid (ALDRICH) zugegeben. Gerührt wurde bis zur vollständigen Auflösung des Benzoylperoxides. Das erhaltene Kunststoffgemisch wurde vor der weiteren Verwendung auf $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgekühlt. Bei dieser Temperatur konnte es auch einige Tage aufbewahrt werden. Die zum Ausgießen verwendeten Zylinderbecher sind in Abb. 4 dargestellt. Der Bodenkörper (D) wurde auf der Oberfläche und seitlich bis zur O-Ringdichtung mit Silicon-Paste (BAYER Baysilone, mittelviskos) dick bestrichen. Ein aus einem zylindrischen Stück Transparentfolie (PP250 von 3M) geklebter Hohlzylinder (A) wurde über den Bodenkörper geschoben. Die Klebenaht wurde nach dem Schema Abb. 5 ausgeführt.

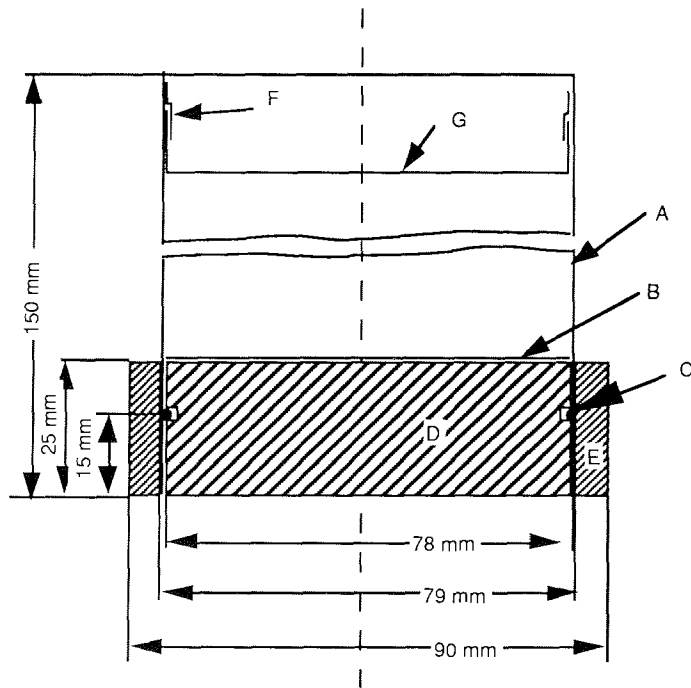


Abb. 4: Querschnittszeichnung des fertig montierten Folienbechers zur Aufnahme der Eiskernabschnitte. Der Eiskernabschnitt ist nicht gezeichnet. A = Hohlzylinder aus Transparentfolie, B = Trennscheibe aus Transparentfolie. C = O-Ringdichtung 2,5 mm -Durchmesser in Nut, D = Bodenkörper aus PVC, E = Ring aus PVC, F = Klebeband, G = Folienstreifen.

Die dünne Transparentfolie war genügend UV durchlässig, um den Polymerisationsprozeß zu starten und ließ sich nach dem Aushärten gut entfernen. Der Folienzylinder mußte straff um den Bodenkörper sitzen, um die Dichtigkeit zu gewährleisten. Der übergeschobene Ring (E) gab mechanische Stabilität. Eine runde Scheibe aus Folie (B) wurde ohne Lufteinschlüsse auf den mit Silikonpaste bestrichenen Bodenkörper gelegt und festgedrückt. Die Dichtigkeit der Becher wurde jeweils vor Verwendung durch Auffüllen mit Wasser bis zur Oberkante getestet.

Sämtliche weiteren Prozesse fanden in einer Gefriertruhe statt, die zu diesem Zweck mit den nötigen Einbauten (Exikator, UV-Lampe etc.) versehen und auf $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgekühlt war. Die zentrifugierten Eiskernabschnitte wurden in die Folienbecher (Abb. 4) gelegt und mit einem ca. 1,5 cm breiten Folienstreifen (G), der mit Klebeband quer über der Probe befestigt war, fixiert.

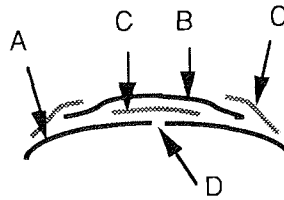


Abb. 5: Klebeschema des Folienzylinders. A = Zylinderwände aus Transparentfolie, B = Folienstreifen, C = dünne, transparente Klebefolie, D = Stoßkante der Zylinderwände

Dieser Streifen hinderte das Eis beim

Füllen der Becher mit Kunststoff am Aufschwimmen. Es wurde soviel Kunststoffgemisch in den Becher gegossen, daß das Eis ca. 5 mm überdeckt war (ca. 60 ml). Danach wurde die Probe in einem Exikator für 10 min einem Unterdruck von 950 hPa ausgesetzt. Dabei kam es vor, daß der Flüssigkeitsspiegel im Becher sank. Fiel er wesentlich unter die Eisoberkante, d.h. mehr als 2 mm, wurde etwas Kunststoff aufgefüllt und die Entlüftung wiederholt. Nachdem die Proben in einer Gefriertruhe zwischen die Leuchtstofflampen (Abb. 6) der Beleuchtungseinrichtung gestellt wurden, erfolgte das Aushärten mit Hilfe von UV-Licht.

Die Vorschaltgeräte der Leuchtstofflampen waren außerhalb der Gefriertruhe untergebracht, um eine zu große Wärmeentwicklung in der Gefriertruhe zu vermeiden. Die dünne Folie (D) über den Leuchtstoffröhren sicherte diesen eine für einen guten Wirkungsgrad wichtige Umgebungstemperatur von $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Verwendet wurden 4 UV emittierende Lampen (TL-K 40W/09N, Fa. Philips).

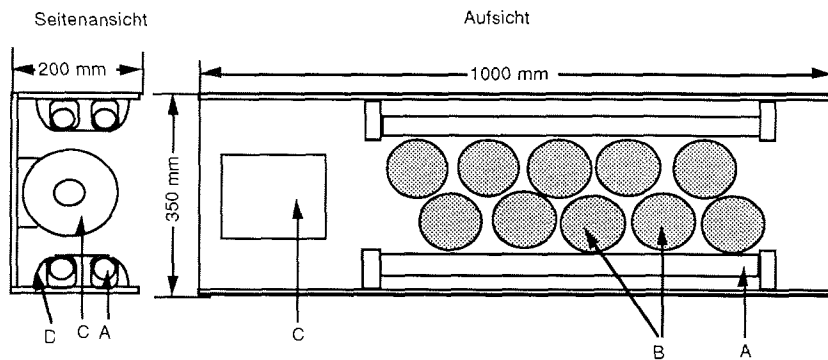


Abb. 6: Auf- und Seitenansicht der UV-Beleuchtungslampe, wie sie zum Aushärten der Eisausgüsse in einer Gefriertruhe verwendet wurde. A = Leuchtstoffröhren, B = Eisproben, in der Seitenansicht nicht gezeichnet, C = Lüfter, D = Folienabdeckung.

Belichtet wurde mindestens 180 h. Die ausgehärteten Proben wurden mit einer feinen Säge in verschieden große Teile zersägt. Ein späteres Zerteilen der Proben war nicht möglich, da die erhaltenen Ausgüsse sehr zerbrechlich sind. Nach dem Zersägen wurde das Eis während 24 h in einer Gefriertrocknungsanlage (LYOVAC GT 2) sublimiert. Einfaches Auftauen war unpraktikabel, da das Polymer dabei durch Wasseraufnahme weich wurde, so daß die feinen Strukturen des Ausgusses nicht selbsttragend waren. Der Kunststoff muß daher trocken von der stützenden Funktion des Eises befreit werden. Die Ausgüsse wurden nach dem Trocknen bei 60 °C für 4 h im Wärmeschrank nachgehärtet. Zum Anfertigen rasterelektronenmikroskopischer Bilder der Ausgüsse wurden kleinere Stücke der Ausgüsse mit doppelseitigem Klebeband (G262 Fa. PLANO) auf REM-Haltern ($d = 2,5$ cm) befestigt, mit Gold bedampft (2 min in einem EDWARDS Bedampfungssystem E306A) und bei Vergrößerungen von 2- bis 1000-fach unter einem Rasterelektronenmikroskop (PHILIPS SEM 515) betrachtet.

(Die gesamte Methode zur Herstellung von Kunststoffausgüssen von porösen und eingefrorenen Materialien ist patentrechtlich geschützt).

3.2. Ergebnisse der Expedition ANT 8/2

3.2.1. Eissituation

Am 11.9.89 erreichte Polarstern bei $61^{\circ}53'S$ in der Nähe der König-Georg-Inseln die Eisgrenze und verließ das Eis wieder am 25.10.89 bei $53^{\circ}44'S$ auf dem Weg nach Kapstadt. Im westlichen Teil des Weddellmeeres überwog älteres Eis, mit einem Bedeckungsgrad von 90 % und einer mittleren Eisdicke von $2,5 \pm 1,0$ m. Ab $35^{\circ}W$ wurden die Eismächtigkeiten geringer und blieben mit ca. $1,0 \pm 0,7$ m während der restlichen Fahrtstrecke konstant. Die Bedeckungsgrade waren selten geringer als 90 %, mitunter waren ausgeprägte Preßeiszonen zu beobachten. Einen genaueren Überblick über die Eissituation gibt AUGSTEIN (1991). An 34 Stationen (Abb. 2) wurden von der AWI-Meereisgruppe schiffsgebundene Meereiserkundungen durchgeführt, die durch Hubschrauberflüge ergänzt wurden.

3.2.2. Solegewinn durch die Schleudermethode

Die aus den Eiskernabschnitten gewonnenen Solemengen schwankten zwischen 5 und 92 ml pro 10 cm eines Eiskerns von 7,6 cm Durchmesser. Dies entspricht 11 bzw. 200 ml Sole pro Liter Meer-eis. Die größten Solemengen wurden aus den Eisstücken mit den höchsten Temperaturen ausgeschleudert, das Minimum stammte aus einem Eisstück mit $-10,5^{\circ}C$ (Abb. 7). Die Datenpunkte unterhalb von $-8^{\circ}C$ stammten alle von Kern AN8228403.

Insgesamt 78 Eiskernabschnitte konnten durch einen Vergleich mit den an den Parallelkernen ...01 ermittelten Eistexturdaten einer bestimmten Eistexturklasse zugeordnet werden. Eiskernabschnitte in denen säuliges und körniges Eis horizontal getrennt, aber noch innerhalb des gleichen Abschnittes vorlagen, wurden der Texturklasse "vermengt" zugeordnet. Aus körnigem Eis konnte im Mittel mehr Sole ausgeschleudert werden als aus vermengtem oder säuligem Eis, doch waren die Unterschiede auf dem 95% Signifikanzniveau nicht signifikant.

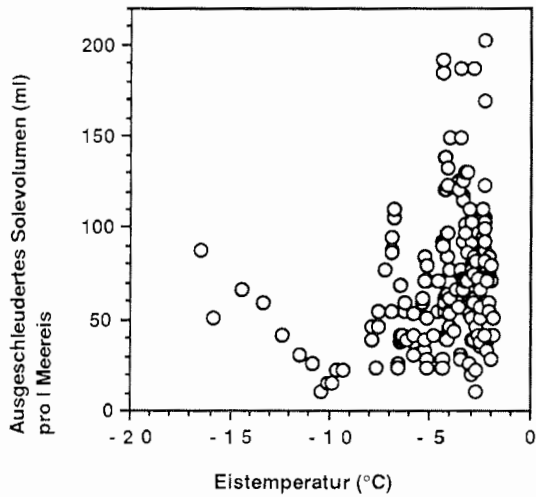


Abb. 7: Das ausgeschleuderte Solevolumen pro Liter Meereis in Abhängigkeit von der Eistemperatur.

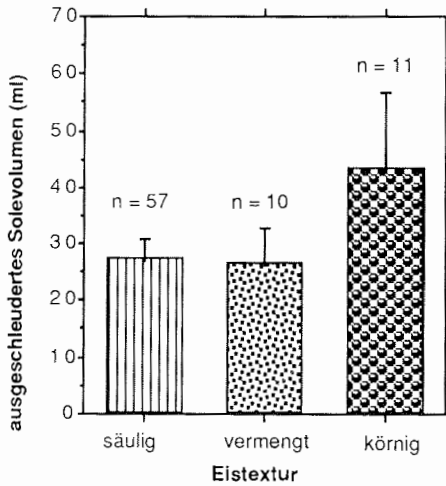


Abb. 8: Das gemittelte ausgeschleuderte Solevolumen pro 10 cm Eiskern in Abhängigkeit von der Eistextur. Die Fehlerbalken entsprechen den 95 % Vertrauensbereichen.

3.2.3. Salinität der ausgeschleuderten Sole

Sole aus einzelnen Eiskernabschnitten, die innerhalb von max. 5 min nach dem Erbohren ausgeschleudert wurden, hatten Salinitäten, die mit einer absoluten Abweichung von $\pm 2 \text{ ‰}$ der errechneten Solesalinität (Formeln 9 und 10) entsprachen. Durch Wärmezufuhr oder Wärmeverlust der Eiskerne bis zum Ausschleudern veränderte sich

die Salinität der Sole. Da bei der gewählten Größe der Kernabschnitte und der Schleuderzeit pro Kernabschnitt ca. 60 cm Kernlänge pro Stunde ausgeschleudert wurden, ergaben sich Lagerzeiten bis zu 4 Stunden bis zum Ausschleudern der letzten Probe. Bei Temperaturen unterhalb von $-8,2\text{ °C}$ entspricht eine Temperaturänderung von 1 °C einer Salinitätsänderung von $7,5\text{ ‰}$, oberhalb von $-8,2\text{ °C}$ einer von 16 ‰ . Die maximal beobachtete Abweichung von 57 ‰ entsprach somit einer Temperaturänderung von rund 8 °C . Gemessene und theoretische Salinität gegeneinander aufgetragen führten zu einer Regressionsgeraden, die anzeigt, daß die gemessenen Salinitäten im Durchschnitt etwas geringer waren als die theoretisch zu erwartenden (Abb. 9). Besonders die aus den obersten Horizonten gewonnene Sole zeigte eine geringere Salinität (Abb. 10).

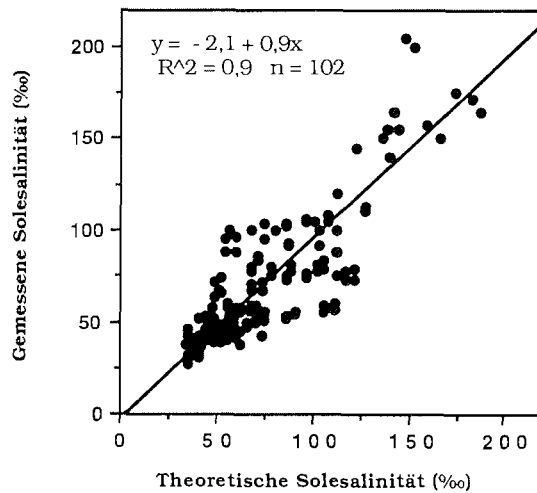


Abb. 9: Theoretische Solesalinität gegen gemessene Solesalinität.

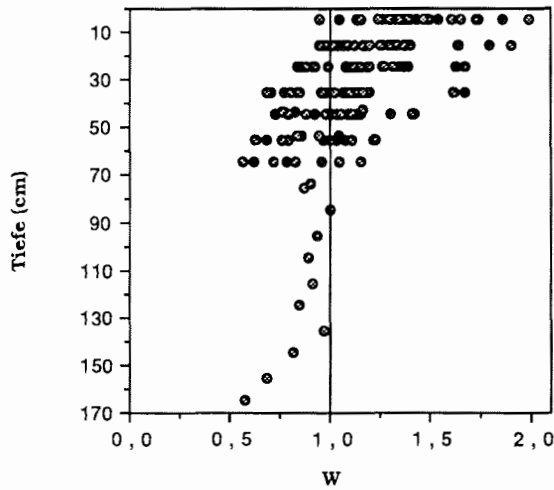


Abb. 10: Das Verhältnis W von theoretischer zu gemessener Solesalinität gegen die mittlere Tiefe, aus der die Proben stammten.

Die Kerne ...04 wurden nach den Kernen ...03 ausgeschleudert. Dadurch ergab sich für die Kerne ...04 eine gegenüber den Kernen ...03 zwischen 40 min und 3 Stunden längere Lagerzeit. Der Einfluß der längeren Lagerzeit wurde mit einem Vergleich der mittleren Solesalinitäten untersucht (Abb. 11). Bei den Kernen 285 und 287 betrug die Abweichung zwischen den Kernpaaren (Kerne ...03 und ...04) absolut maximal 13 ‰. Bei allen anderen Kernen war die Abweichung zwischen den Kernpaaren geringer als absolut 5 ‰. Die Abweichungen der mittleren Solesalinitäten der Kerne ...03 und ...04 zeigte keine Tendenz in die eine oder andere Richtung (Abb. 12). Die mittlere Solesalinität des länger gelagerten Kernes 04 waren sowohl niedriger, als auch höher als die mittleren Salinitäten der Kerne 03.

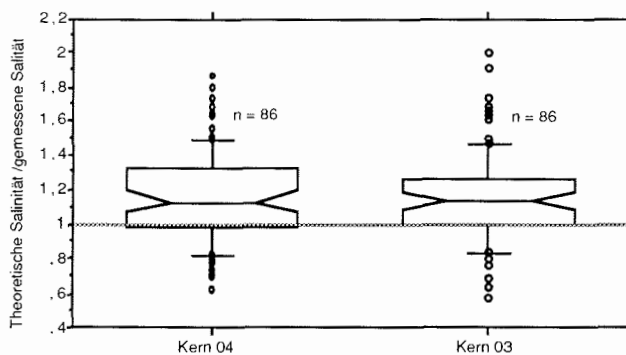


Abb. 11: Boxplot des Verhältnisses von theoretischer zu gemessener Salinität.

Die Verhältnisse von theoretischer Salinität zu gemessener Salinität beider Kerne waren auf dem 95 % Vertrauensniveau nicht verschieden (Abb. 11). Die Mediane lagen mit $1,132 \pm 0,06$ (Kern 04) und $1,136 \pm 0,06$ (Kern 03) nahe beieinander.

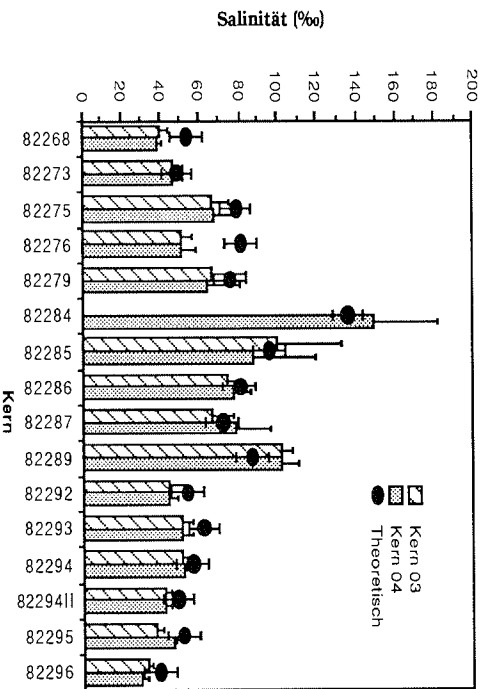


Abb. 12: Vergleich der mittleren Salinitäten der Kerne ...03 und ...04 und die aus den mittleren Ersttemperaturen errechneten theoretischen Salinitäten. Die Fehlerbalken der theoretischen Salinitäten entsprechen der durch die Errechnung aus den Temperaturmessungen erzielbaren Genauigkeit.

3.2.4. Die Effizienz des Soleauschleuderns

Zur Abschätzung der Effizienz der Schleudermethode wurde der Anteil der ausgeschleuderten Sole (V_{So}) in Relation zu dem im Kern vorhandenen Gesamtsolvolumen gesetzt (V_{SoGe}). Es wurden nur die Daten benutzt, die an jeweils demselben Kern gewonnen wurden.

Das Ausschleudern entfernte durchschnittlich 78 % (min. 65 %, max. 90 %) der in einem Kern vorhandenen Sole (Abb. 13).

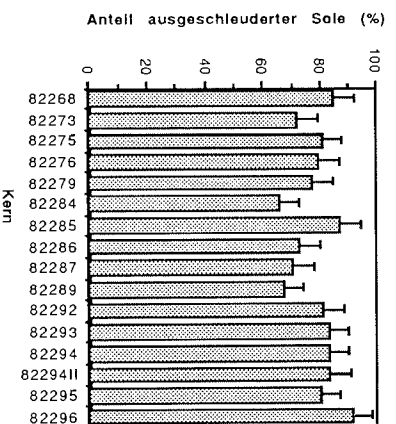


Abb. 13: Mittlerer Anteil der ausgeschleuderten Sole am Gesamtsolvolumen der einzelnen Kerne.

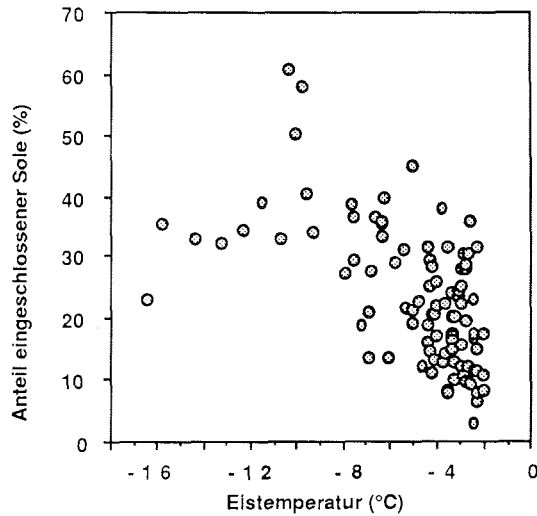


Abb. 14: Anteil des eingeschlossenen Solevolumens in Relation zur Eistemperatur.

Der Anteil eingeschlossener Sole nahm mit abnehmenden Temperaturen zu (Abb. 14), die Korrelation war bei 1 ‰ Irrtumswahrscheinlichkeit signifikant ($r_s = -0,566$, $n = 103$, Spearmannsche Rang-Korrelation). Zwischen dem relativen Anteil der ausgeschleuderten Sole und der Eistextur konnte keine Relation festgestellt werden. Für den geänderten Verlauf der Datenreihe unterhalb von -8°C war kein Zusammenhang mit anderen Parametern festzustellen. Eine statistische Übersicht über die wichtigsten Parameter aller ausgeschleuderten Kernabschnitte gibt Tab. 3.

Tab. 3: Mediane und Extreme der Salinität der ausgeschleuderten Sole (S_{So}), ausgeschleudertem Solevolumen (V_{So}) pro Liter Meereis, eingeschlossenem Solevolumen (E_{So} in % von V_{SoGe}) und Eistemperatur (T_{Eis}), gemittelt aus den Daten von 102 Kernabschnitten ($l = 10$ cm). Für die Abweichungen der Mediane sind die 95% Vertrauensbereiche angegeben.

	T_{Eis} ($^\circ\text{C}$)	V_{So} (ml)	S_{So} (‰)	E_{So} (%)
Median	-3,7	60,1	55,3	22,4
Abweichung \pm	0,6	7,1	8,0	2,2
Maximal	-2,1	203,7	205,0	60,6
Minimal	-16,5	12,6	27,3	6,4

3.2.5. Das gesamte Solevolumen und die Gesamtsalinität

Der Anteil der gemessenen Solevolumina ($V_{S_0} + V_{ES_0}$) am Gesamtvolumen (Formel 7) der ausgeschleuderten Kerne ist in den Abb. 15 a und b dargestellt. Ebenfalls eingezeichnet sind die Anteile der errechneten Solevolumina (Formeln 3, 4, 5). Die Profile der gesamten Solevolumina waren fast gerade bei den Kernen 287, 286 und 289 und mehr oder weniger C-förmig bei den restlichen Kernen. Höchste relative Solevolumina von 30 % wurden an der Unterseite der Kerne 273 und 284 erreicht. Theoretisches und gemessenes Solevolumen waren in der Form der Profile gleich. Das gemessene Solevolumen war meist etwas größer als der theoretische Wert. Die Mittelwerte des errechneten und des gemessenen relativen Solevolumens differierten um absolut 1,6 %, ein Unterschied der auf dem 95 % Vertrauensniveau ($n = 103$) signifikant ist.

Die Gesamtsalinität ging bei beiden Methoden zur Bestimmung des gesamten Solevolumens mit ein, einmal direkt bei den Formeln von FRANKENSTEIN und GARNER (1967) oder indirekt bei der Bestimmung von V_{ES_0} (Formel 1). Die Profile der Gesamtsalinitäten der ausgeschleuderten Kerne zeigten alle einen C-förmigen Verlauf mit relativ hohen Gesamtsalinitäten in den obersten Horizonten, einer Abnahme zu den mittleren Horizonten und einer leichten Zunahme zur Unterseite des Eiskernes. In Abb.16 ist exemplarisch ein Profilverlauf der Gesamtsalinität gezeigt.

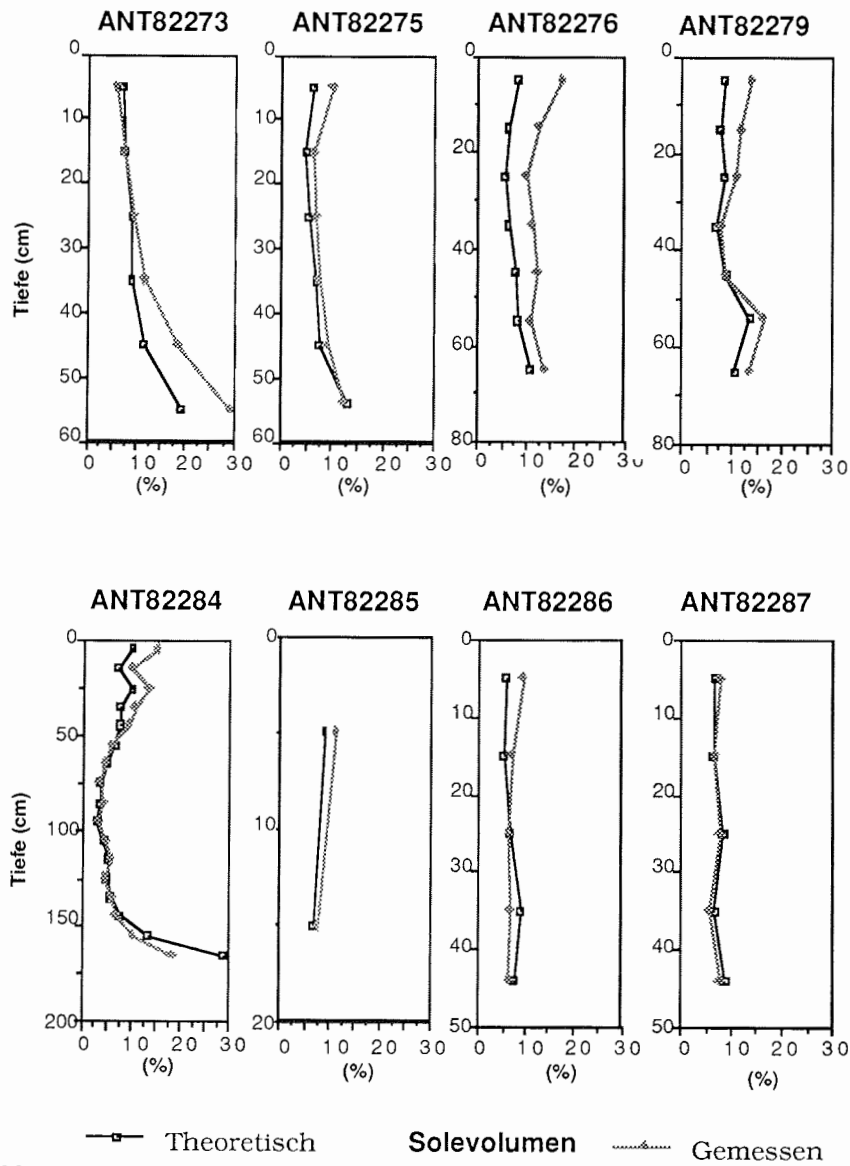


Abb. 15 a: Die errechneten und gemessenen Solevolumina in % vom gesamten Eisvolumen der Kerne273 bis287.

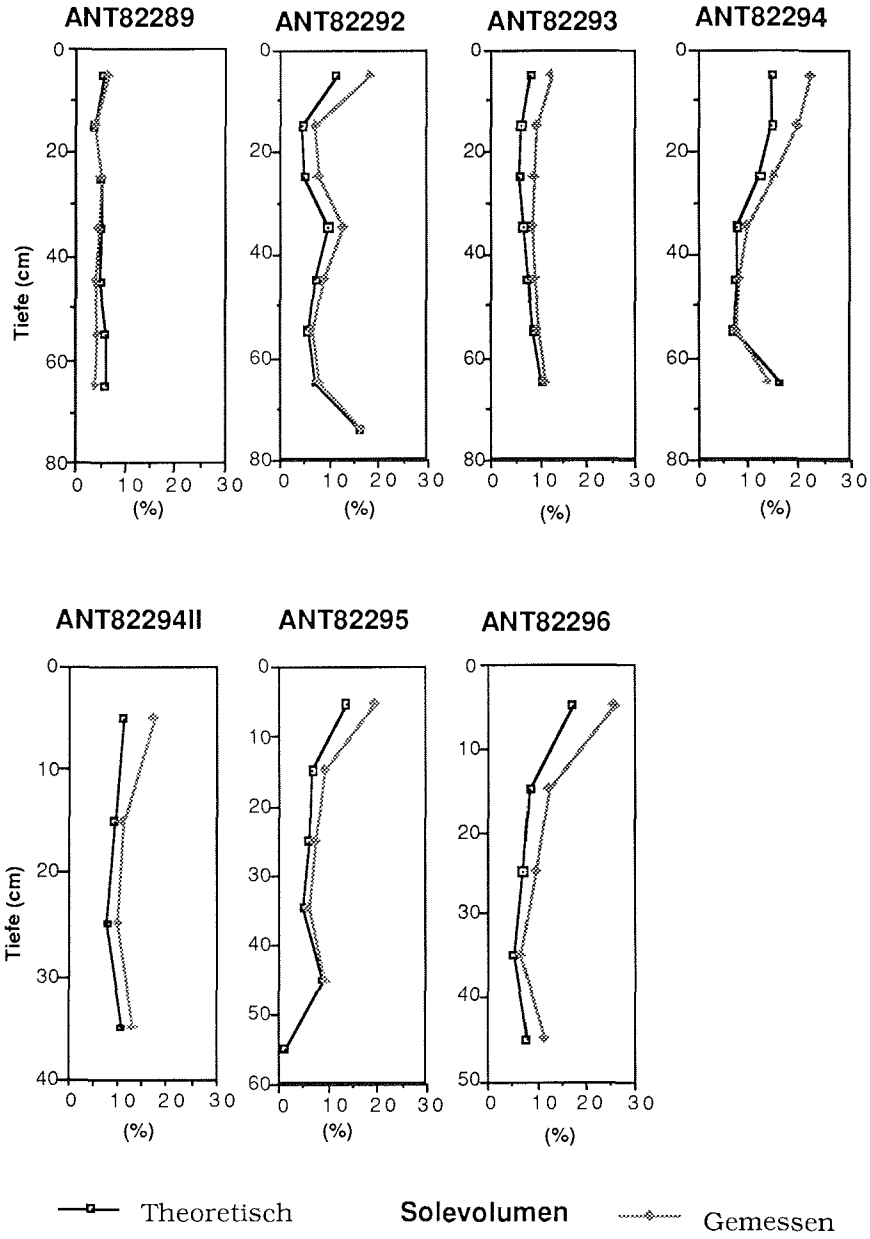


Abb. 15 b: Die errechneten und gemessenen Solevolumina in % vom gesamten Eisvolumen der Kerne 289 bis 296.

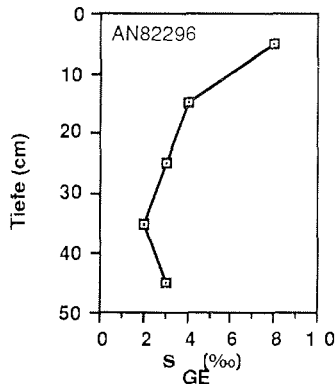


Abb. 16: Gesamtsalinität des Kernes 296 gegen die Tiefe.

Der Soleverlust der Kerne nach der Probenentnahme führte zu einer Unterschätzung der Gesamtsalinitäten in einer Meereisprobe. Da das gesamte Salz des Meereises in der Sole konzentriert ist, macht sich schon der Verlust relativ geringer Solemengen bemerkbar. Für 8 der genauer untersuchten Kerne lagen vergleichbare Daten zur Gesamtsalinität vor, die an den Kernen

...01 ermittelt wurden. Die Kerne ...01 wurden als ca. 1 m lange Stücke nach der Probenentnahme bei -30 °C eingefroren und in diesem Zustand nach Texturmerkmalen zerteilt. An diesen Teilstücken wurde nach dem Auftauen die Salinität gemessen. Eine Gegenüberstellung der errechneten Gesamtsalinität der geschleuderten Kerne ...04 (Formel 2) mit den Gesamtsalinitäten der Kerne ...01 zeigt Tab. 4.

Tab 4: Die gewogenen Mittelwerte der Gesamtsalinitäten der Kerne 01 und 04. n ist die Anzahl der zur Berechnung der Mittelwerte verwendeten Kernsegmente.

Kerne	...01 (‰)	n	...04 (‰)	n
275	$6,19 \pm 0,15$	7	$6,08 \pm 0,12$	6
276	$5,59 \pm 0,21$	9	$6,75 \pm 0,18$	7
279	$7,96 \pm 0,34$	6	$7,76 \pm 0,21$	7
285	$8,39 \pm 0,24$	3	$9,04 \pm 0,41$	2
286	$4,82 \pm 0,44$	4	$5,87 \pm 0,17$	5
287	$4,90 \pm 0,43$	5	$5,89 \pm 0,17$	5
289	$5,66 \pm 0,23$	6	$5,15 \pm 0,14$	7
292	$5,00 \pm 0,34$	7	$4,98 \pm 0,22$	8

Die gänzlich unabhängig voneinander ermittelten Gesamtsalinitäten an den Parallelkernen zeigten keinen tendenziellen Unterschied.

3.2.6. Elstemperaturen

Die ausgeschleuderten Eiskerne zeigten alle den gleichen Temperaturverlauf mit den niedrigsten Temperaturen an der Oberseite der Eisschollen. Die Temperaturen an der Unterseite der Schollen lagen leicht unter dem Gefrierpunkt des Meerwassers.

Ein Temperaturprofil, das exemplarisch für alle Kerne gelten kann, zeigt Abb. 17.

Es wurde versucht, die Temperaturen an der Eis-Schneegrenze (T_{ESch}) und die mittleren Eiskerntemperaturen (T_E) mit den Schneedicken (d_{Sch}) und den Lufttemperaturen (T_L) zu korrelieren (Tab. 5). Verwendet wurde die Spearman-Rang-Korrelation (SACHS 1984).

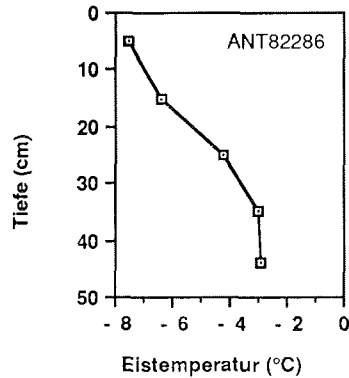


Abb.17: Temperaturprofil des Kerns 286

Tab. 5: Korrelationsmatrix für Lufttemperaturen (T_L), mittlere Eiskerntemperaturen (T_E), Temperaturen an der Eis-Schneegrenze (T_{ESch}) und Schneedicken (d_{Sch}). Es sind die Paarungen mit einem + gekennzeichnet, die signifikant voneinander abhängig waren. Die mit - gekennzeichneten Felder zeigten keine signifikante Abhängigkeit, leere Felder wurden nicht bearbeitet, n ist die Anzahl der Datenpaare, p die Irrtumswahrscheinlichkeit.

	T_{ESch}	T_E	d_{Sch}
T_L	- (n=21 p=0,16)	+ (n=22 p=0,025)	
T_{ESch}		+ (n=26 p=0,0001)	+ (n=26 p=0,001)
T_E			+ (n=27 p=0,0001)

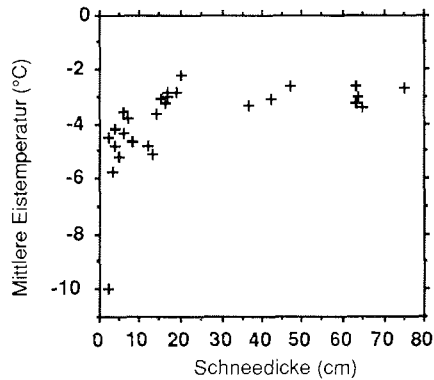


Abb. 18: Die gemittelten Eiskerntemperaturen gegen die Schneedicke

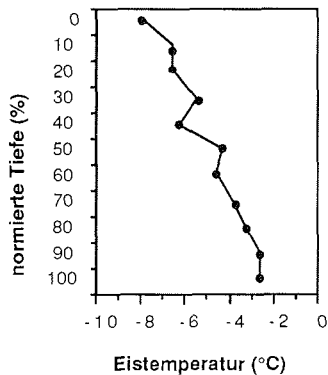


Abb. 19: Die mittleren Eiskerntemperaturen gegen die normierten Tiefen

Die Korrelationen zwischen Eiskerntemperaturen und Lufttemperaturen sind wenig aussagekräftig. Schwankungen der Lufttemperatur machen sich im Eis nur wenig bemerkbar. Die Korrelation zwischen den Schneedicken und den Eistemperaturen waren aufgrund der Korrelationskoeffizienten deutlicher. Eine lineare Korrelationsgerade zwischen Schneedicken bis 80 cm und den mittleren Eistemperaturen zeigt Abb. 18. Die Mächtigkeit der Schneeeauflage hatte direkten Einfluß auf die Höhe der Absoluttemperaturen im Eis.

Die auf eine einheitliche Schollendicke normierten und über 17 Kerne gemittelten Temperaturprofile

(Abb. 19) zeigen den Temperaturanstieg zu den Unterseiten der Schollen. Mit $-2,5 \pm 0,4$ °C (min = $-3,3$ °C max = $-2,0$ °C) lag die mittlere Temperatur an der Unterseite der Schollen deutlich unter der Temperatur des Meerwassers. An keiner der Schollen waren Erscheinungen zu beobachten, die Tauprozesse erkennen ließen. Die unteren Grenzflächen zeigten eine Oberflächenstruktur, die darauf deutete, daß das Eis noch im Wachsen begriffen war (EICKEN pers. Mitteilung).

3.2.7. Eistextur

In 11 Fällen konnten die Eistexturdaten, die stets an den Kernen ...01 gewonnen wurden, auf ausgeschleuderte Kerne übertragen werden. Dies war möglich, da die Kerne in unmittelbarer Nähe zueinander an Stellen erbohrt wurden, an denen keinerlei Überschiebungen

feststellbar waren und die Schollen homogen erschienen. Der Anteil des säulenförmigen Eises betrug bei allen Kernen mit Ausnahme des Kernes 292 mehr als 50 % (Abb. 20). Die untersten Horizonte bestanden aus säuligem Eis, nur die unterste Schicht des Kernes 284 bestand aus angewachsenem Plättcheneis. Der Anteil angewachsenen Eises, d.h säuligen Eises und vermengt säulig-körnigen Eises, betrug insgesamt ca. 75 %.

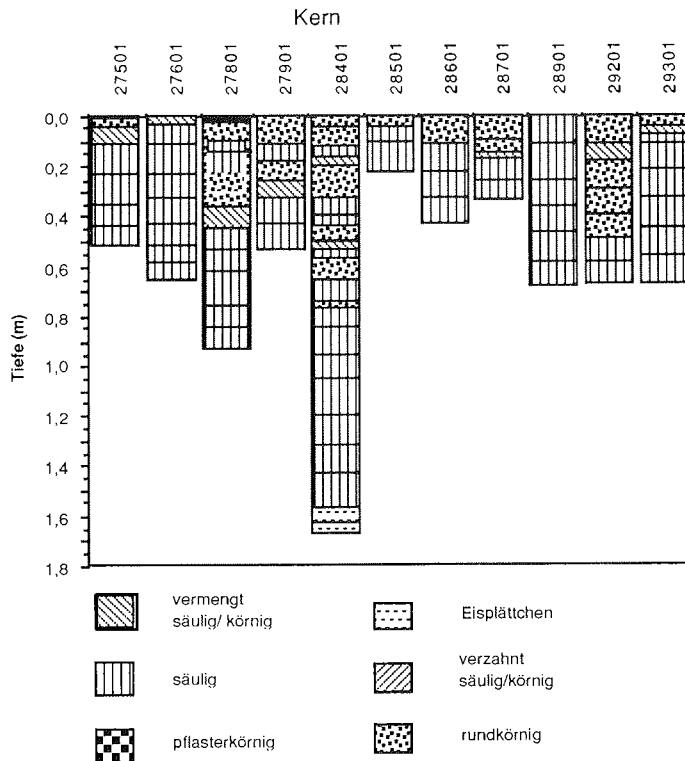


Abb. 20: Eistexturklassen der Kerne 01, die sich mit den Kernen 04 korrelieren lassen.

3.2.8. Chlorophyllgehalte

Die Abbildungen A 2 bis A 4 (Anhang) zeigen die Chlorophyllkonzentrationen in den Kernen. Unterschieden wird zwischen der Sole, der eingeschlossenen Sole und dem gesamten Kern. Direkt gemessen wurden die Konzentrationen in der Sole und am aufgetauten ausgeschleuderten Kern. Die Gesamtchlorophyllkonzentrationen und die Konzentrationen in der eingeschlossenen Sole wurden daraus errechnet. Die Gesamtchlorophyllkonzentrationen der Kernabschnitte lagen zwischen $0,2 \mu\text{g l}^{-1}$ und $30,0 \mu\text{g l}^{-1}$. Stets waren an der Unter-

seite der Schollen die höchsten Chlorophyllkonzentrationen zu finden. Einzig der Kern 273 zeigte ein deutliches internes Maximum.

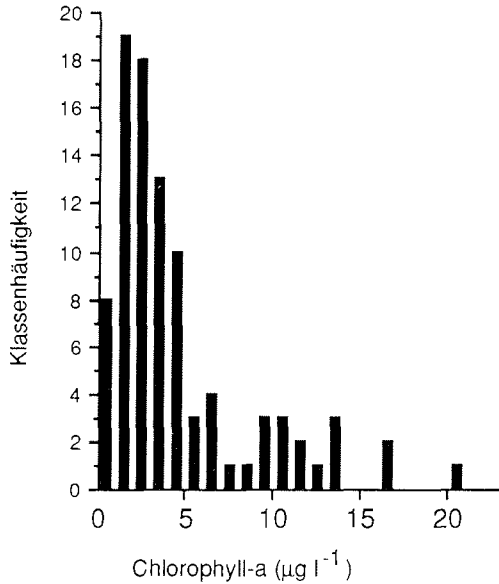


Abb. 21 : Verteilungsfunktion der Chlorophyllkonzentrationen in der ausgeschleuderten Sole (Klassenbreite $1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$).

Die Gesamtheit aller ausgeschleuderten Kernabschnitte zeigte sowohl in der Sole als auch in den ausgeschleuderten Kernen eine stark linksschiefe Verteilung sowohl der Chlorophyllkonzentrationen als auch der Chlorophyllmengen. In Abb. 21 ist exemplarisch die Verteilungsfunktion der Chlorophyllkonzentrationen in der ausgeschleuderten Sole der Kerne ...04 gezeigt. Der Median war daher die geeignete Größe um die

Daten miteinander zu vergleichen (SACHS 1984). Die Chlorophyllkonzentrationen in der ausschleuderbaren Sole lagen im Mittel bei $3,2 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, in der eingeschlossenen Sole bei $30,0 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. Gegenüber dem Mittel des Gesamtchlorophyllgehaltes waren diese Werte 4- bzw. 40-fach höher (Abb. 22).

Auch die Chlorophyllmengen in der eingeschlossenen Sole waren mit $45,41 \text{ mg m}^{-2}$ je 10 cm Eiskernhorizont höher als in der ausgeschleuderbaren Sole mit $18,46 \text{ mg m}^{-2}$. In der eingeschlossenen Sole, die nur 20% der Gesamtsolemenge ausmacht, fanden sich somit ca. 70% der vorhandenen Chlorophyllmenge.

Die Phaeophytin-Chlorophyllverhältnisse in ausschleuderbarer bzw. eingeschlossener Sole, gemittelt aus allen Eiskernabschnitten, waren auf dem 95% Signifikanzniveau verschieden (Abb. 23). Der Phaeophytinanteil der eingeschlossenen Sole lag mit $23,4 \%$ um $7,8 \%$ höher als der Phaeophytinanteil der ausgeschleuderten

Sole. Die Phaeophytin/Chlorophyllverhältnisse zwischen den einzelnen relativen Horizonten waren auf dem 95% Signifikanzniveau nicht verschieden.

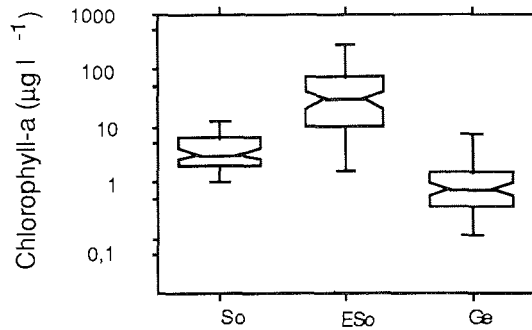


Abb. 22: Boxplot der Chlorophyllkonzentrationen in ausgeschleuderter Sole (So), eingeschlossener Sole (ESo) und im gesamten Kern (Ge); $n = 102$.

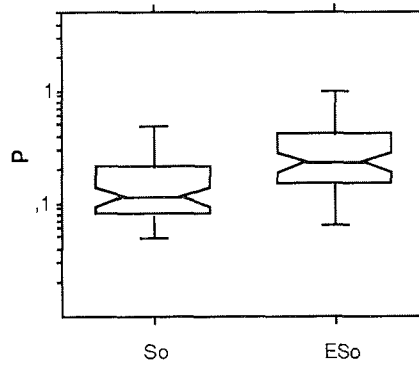


Abb. 23: Das Phaeophytin-Chlorophyll-a Verhältnis (P) in ausschleuderbarer (So) und eingeschlossener Sole (ESo), gemittelt aus Daten von insgesamt 102 Kernabschnitten.

3.2.9. Artenbestand der Diatomeen

Die Artenzusammensetzung des untersten Horizontes (10 cm) der Eiskerne 271-296 ist Tab. 6 zu entnehmen. Die Identifikation erfolgte anhand von Dauerpräparaten in Naphrax. Empfindliche Arten, die bei dieser Präparationsmethode verlorengehen, wurden an Lebendproben identifiziert.

Tab. 6: Artenliste der Diatomeen der untersten 10 cm der Eiskerne 271 bis 296.

Kernnummer:	273	275	276	278	279	284	285	286	287	288	289	292	293	294	294 II	294	295	296
<i>Actinocyclus actinochilus</i>	X																	
<i>Amphiprora kufferathii</i>			X			X	X											
<i>Asteromphalus hyalinus</i>	X	X																
<i>Chaetoceros bulbosum</i>	X	X	X															
<i>Chaetoceros dichæta</i>				X	X					X								
<i>Corethron criophilum</i>		X	X		X													
<i>Coscinodiscus sp.</i>				X	X		X											X
<i>Eucampia antarctica</i>				X														
<i>Navicula criophila</i>			X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
<i>Navicula jejunoides</i>									X									
<i>Nitzschia barkleyi</i>			X	X						X	X							
<i>N. curta</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>N. cylindrus</i>		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
<i>N. kerguelensis</i>		X	X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
<i>N. lineola</i>				X					X									
<i>N. mediumconstricta</i>				X	X													
<i>N. obliquecostata</i>	X	X	X			X			X		X							X
<i>N. rhombica</i>		X			X													X
<i>N. ritscheri</i>	X		X	X	X	X								X	X	X	X	X
<i>N. separanda</i>	X	X		X	X								X					
<i>N. serata</i>				X														X
<i>N. sublinearis</i>			X							x								
<i>N. taenia</i>						X				X								
<i>N. turgiduloides</i>	X	X								X				X	X			X
<i>Porosira pseudodenticulata</i>						X												
<i>Rhizosolenia ssp.</i>				X				X	X									
<i>Thalassiosira maculata</i>										X								
<i>Thalassiothrix spec.</i>	X	X							X									X
<i>Tropidoneis gaussii</i>		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Tropidoneis glacialis</i>			X	X	X		X	X	X									X

Es zeigten sich keine deutlichen Unterschiede bei der Artenzusammensetzung. Dominierende Arten waren *Nitzschia cylindrus*, *N. curta*, *N. kerguelensis*, *Navicula criophila* und *Tropidoneis ssp.*, doch fehlten auch diese in den untersten 10 cm mancher Kerne. Zentrische Diatomeen waren in allen Proben selten.

3.2.10. Zellzahlen in ausgeschleuderter und eingeschlossener Sole

An den Kernen 275 und 276 wurde die Diatomeenkonzentration der einzelnen Horizonte ausgezählt, wobei zwischen ausschleuderbarer und eingeschlossener Sole unterschieden wurde. Zur statistischen Auswertung wurden die Zellkonzentrationen aller Arten aus allen Horizonten zusammengefaßt (Abb. 24).

Die mittleren Konzentrationen (Median) lebender Zellen in der ausgeschleuderten Sole betragen 16 ml^{-1} , in der eingeschlossenen Sole 130 ml^{-1} , die Konzentration toter Zellen 8 bzw. 70 ml^{-1} . Innerhalb der Gruppe der lebenden Zellen waren die Zellkonzentrationen zwischen ausgeschleuderter und eingeschlossener Sole signifikant verschieden, ebenso in der Gruppe der toten Zellen.

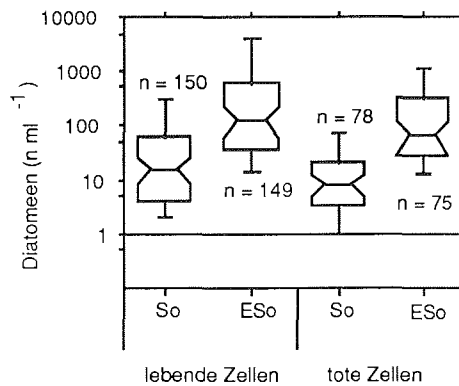
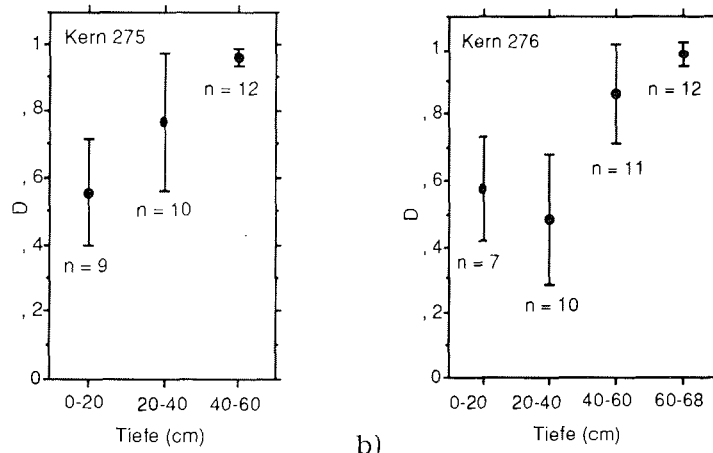


Abb. 24: Boxplots der Zellzahlen von lebenden und toten Diatomeenzellen in ausgeschleuderter (So) und eingeschlossener Sole (ESo), $n = \text{Artenzahl} \times \text{Anzahl der ausgezählten Eiskernabschnitte}$.

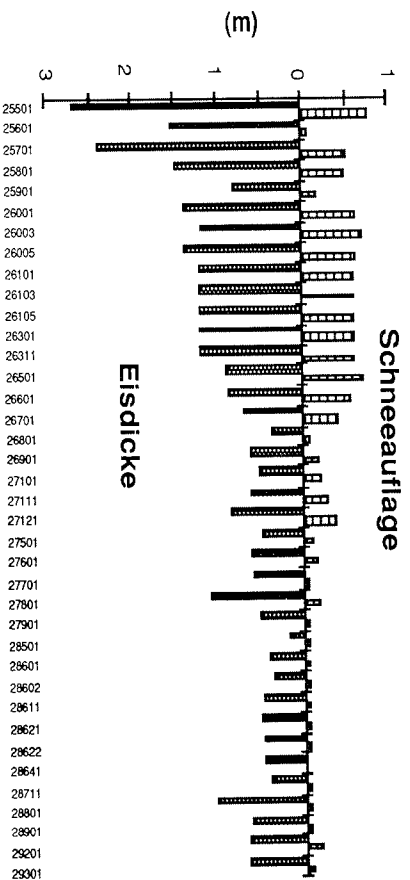
Für die Fälle, in denen sich die gleichen Arten in ausgeschleuderter und eingeschlossener Sole finden ließen, wurde ein Vergleich der Zellzahlen für verschiedene Horizonte durchgeführt. Die Verhältniszahl D, die den relativen Anteil der Zellen in der eingeschlossenen Sole benennt, wurde für die Arten einzeln berechnet und dann gemittelt (Abb. 25). In beiden Kernen nahm der Anteil der Zellen in der eingeschlossenen Sole in den unteren Horizonten zu. Die gleiche Tendenz zeigte sich auch bei toten Zellen, doch erlaubt die geringere Anzahl der Datenpunkte keine gesicherte Aussage.



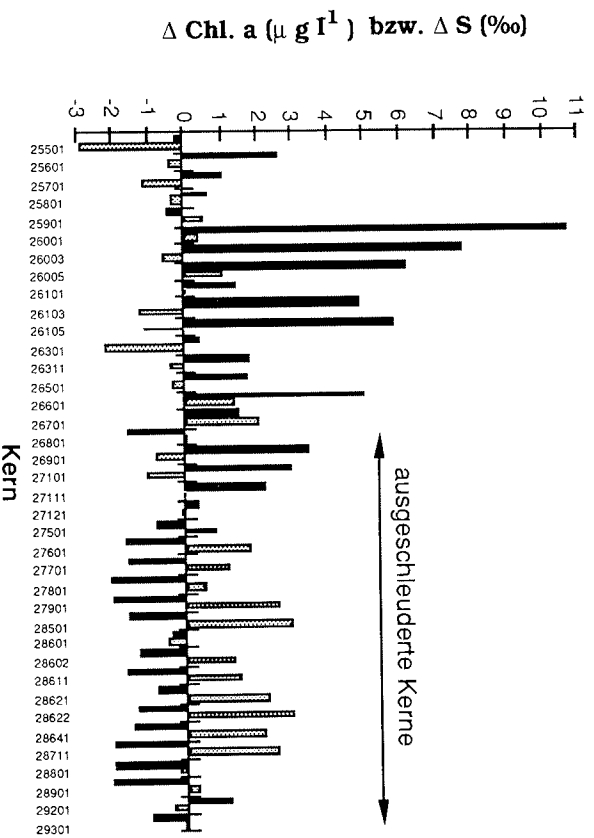
a) b)
 Abb. 25 a, b: Verhältnis D in den Horizonten zweier Schollen. (D = Anteil der Zellen in der eingeschlossenen Sole zur Gesamtsumme der Zellen). Es wurden nur lebende Zellen berücksichtigt. Die Fehlerbalken entsprechen den 95 % Vertrauensbereichen.

3.2.11. Geographische Einordnung der ausgeschleuderten Kerne

Die Eiskerne, an denen die Technik der Solegewinnung durch Ausschleudern zum ersten Male systematisch angewandt wurde, stammten alle aus einem Bereich östlich des 35. Längengrades. Die Eiskerne in diesem Bereich ähnelten sich in den Parametern Eisdicke, Schneeauflage, Chlorophyll- und Salzgehalt und unterschieden sich zu denen des westlicher gelegenen Gebietes. Das Eis des westlichen Weddellmeeres war deutlich dicker als 1 m, mit Schneeauflagen von mehr als 0,5 m (Abb. 26). Die Salzgehalte lagen unter dem Durchschnitt aller Kerne und die Chlorophyllgehalte darüber (Abb. 27). Eis- und Schneedickenmessungen an 4860 Punkten während der gesamten Expedition ergänzten diese Daten (AUGSTEIN et al. 1991). Die mit der Zentrifugationsmethode untersuchten Eiskerne stammten aus relativ jungem Eis, das typisch für das östliche Weddellmeer war, die mittleren Salzgehalte lagen über 5 ‰ (Abb. 27).



Ab
Kern
b. 26: Die Schnee- und Eisdicken entlang der Fahrtroute der Expedition ANT 8/2. Der Kern 284 wurde als Festeiskern nicht in die Grafik mit aufgenommen.



Ab
Kern
b. 27: Abweichungen der Chlorophyll- und Salzgehalte vom Mittelwert aller Kerne von ANT 8/2. Die Mittelwerte (Median) betragen 2,54 µg·l⁻¹ Chlorophyll-a, und 5,43 ‰ Salzgehalt. Der Kern 284 wurde als Festeiskern nicht in die Grafik mit aufgenommen.

3.2.12. Die Eisausgüsse

Neben den Kunststoffausgüssen ausgewählter Kerne der Expedition ANT 8/2 werden im folgenden auch Bilder gezeigt, die die Ausgüsse aus den Kernen der Expedition ANT 9/3 und von experimentell hergestelltem Eis darstellen. Die Bilder sollen die Möglichkeiten der Methode aufzeigen und einen qualitativen Überblick über die Form und Anordnung der Solekanälchen verschiedener Eisgefüge geben.

Tab. 7: Die Tabelle zeigt die Herkunft und wichtige Parameter der Eisproben, aus denen die Ausgüsse für die Bilder hergestellt wurden. Die Bilder 1 - 17 wurden an Ausgüssen aus Freilandkernen, die Bilder 18 - 22 an Ausgüssen von künstlich hergestelltem Meereis gemacht (V = Versuchsnummer, L und B siehe Abb. 44, REM = rasterelektronenmikroskopische Aufnahme, LO = lichteptische Aufnahme).

Bild Nr.:	Herkunft	Tiefe (cm)	Kernlänge (cm)	Tem p. (°C)	S GE (‰)	Kurzlegende
1	ANT 82257	110-120	240	-2,5	4,2	körniges Eis (REM)
2	ANT 82257	110-120	240	-2,5	4,2	körniges Eis mit Korngrenzen (REM)
3	ANT 82278	50-60	95	-5,0	5,1	säuliges Eis (REM)
4	ANT 82278	90-93	95	-2,7	12,0	säuliges Eis (REM)
5	ANT 93020	30-40	230	-1,8	-	säuliges Eis (LO)
6	ANT 82257	70-80	105	-3,2	4,1	säulig-körniges Eis (REM)
7	ANT 93038	60-70	95	-2,0	5,4	säulig-körniges Eis (LO)
8	ANT 93038	60-70	95	-2,0	5,4	säulig-körniges Eis (LO)
9	ANT 93043	10-20	68	-1,4	3,6	säulig-körniges Eis (LO)
10	ANT 93024	-	-	-	-	Plättcheneis, frische Eisprobe (LO)
11	ANT 93024	60-70	180	-1,8	6,3	Plättcheneis, gesamter Ausguss (LO)
12	ANT 93024	60-70	180	-1,8	6,3	Plättcheneis (REM)
13	ANT 93024	60-70	180	-1,8	6,3	feine Soletasche (REM)
14	ANT 82279	40-50	53	-2,7	5,7	feines Solekanälchen (REM)
15	ANT 93024	60-70	180	-1,8	6,3	Korngrenzen (REM)
16	ANT 93020	30-40	230	-1,8	-	Korngrenzen (REM)
17	ANT 82257	110-120	240	-2,5	4,2	Korngrenzen um Soletasche (REM)
18	V10L170B30	3-6	12	-5	11,0	künstliches körniges Eis (LO)
19	V10L170B70	0-3	12	-7	11,0	künstliches körniges Eis (REM)
20	V11L140B30	9-12	12	-3	11,5	künstliches säuliges Eis (LO)
21	V11L140B30	9-12	12	-3	11,5	künstliches säuliges Eis (REM)
22	V11L140B30	9-12	12	-3	11,5	künstliches säuliges Eis (REM)

Aus 25 unterschiedlichen Proben wurden Ausgüsse angefertigt. Es wird eine Auswahl von Bildern vorgestellt, die typisch für ein bestimmtes Eisgefüge waren oder an denen sich besondere Einzelheiten erkennen ließen. Die Beschreibung der Bilder schließt auch Erkenntnisse mit ein, die nicht nur an den gezeigten Bildern selbst, sondern auch an anderen rasterelektronenmikroskopischen Bildern der gleichen Eistexturklasse und an den gesamten Ausgüssen gewonnen wurden. Die Bilder sind so angeordnet, daß sie die ur-

sprüngliche Orientierung des Eises wiedergeben.

Um die Übersichtlichkeit zu erleichtern, ist die Interpretation der abgebildeten Einzelheiten den beschreibenden Teilen direkt nachgestellt.

Körniges Eis

Die Dimensionen der Porenräume des rundkörnigen Eises zeigten keinerlei bevorzugte Ausrichtung (Bild 1). Das knotige Netzwerk der Solekanälchen wies Abstände zwischen den Verzweigungen auf, die nur wenig größer als die Durchmesser der Porenräume selbst waren. Die größten Durchmesser der Solekanäle erreichten kaum 1 mm, die meisten waren kleiner als 0,5 mm. Eine stärkere Vergrößerung (Bild 2) zeigte das häufige Auftreten von Graten und ließ deren Verlauf an den Wänden der Solekanälchen gut erkennen.

Durch Form und Lage der Grate und einen Vergleich mit Daten, die an Schliffbildern von Eisproben gewonnen wurden (WEEKS und ACKLEY 1982), lassen sich diese als Korngrenzen zwischen den einzelnen Eiskristallen interpretieren. Die häufige Beobachtung von Korngrenzen deckten sich mit den theoretischen Erwartungen, wonach die Solekanälchen in körnigem Eis hauptsächlich intergranular auftreten (EICKEN 1991).

Säuliges Eis

Die Ausgüsse des säuligen Eises waren durch die geringe Vernetzung besonders instabil. Auf den elektronenmikroskopischen Bildern ließen sich deutlich Bruchkanten und Deformierungen erkennen (Bild 3 Pfeil), die bei der Handhabung der Präparate entstanden waren. Säuliges Eis zeigte eine deutliche Orientierung in der senkrechten Richtung, die Solekanälchen waren nur wenig verzweigt, die Abstände zwischen den Verzweigungen betragen ein Mehrfaches der Durchmesser der Solekanäle. Grate waren auch bei stärkeren Vergrößerungen auf den Ausgüssen selten zu erkennen. Die Temperaturabhängigkeit der Dicke der Solekanälchen zeigte sich durch den Vergleich der Bilder 3 und 4, die beide aus säuligem Eis derselben Scholle stammten. Bild 4 zeigt die Solekanälchen der untersten 3 cm. Mit einer Temperatur von $-2,7\text{ °C}$ lag die Temperatur der Eisprobe um $2,3\text{ °C}$ höher als die in Bild 3 abgeformte Eisprobe. Die Solekanälchen dieses "warmen", untersten Eises ließen die säulige Ausrichtung noch erkennen, waren aber im Durchmesser so ange-

wachsen, daß sie an vielen Stellen verschmolzen. Im Gegensatz dazu waren beim kälteren Eis die Abstände zwischen den Kanälen deutlich größer als die Durchmesser der Kanäle. Die Betrachtung bei geringeren Vergrößerungen (Bild 5) zeigte die lückige Anordnung der Solekanälchen, bündelweise gehäuft durchzogen sie das Eis in der senkrechten Richtung.

Die Seltenheit von Graten belegt das vorwiegend intragranulare Auftreten der Solekanäle in säuligem Eis. Bei der Entstehung von säuligem Eis können die einzelnen Eiskristalle mehrere cm groß werden. Dabei entstehen Solekanälchen an den Grenzen (intergranular), aber auch innerhalb eines Eiskristalls (intragranular). Vergleiche mit jungem, experimentell gewonnenem, säuligem Eis (Bild 21) zeigen, daß sich die Solekanäle im Lauf der Zeit im Querschnitt abgerundet haben und entsprechend des geringeren Salzgehaltes in wesentlich geringeren Dichten auftreten. Die größeren Durchmesser der Solekanäle an der Unterseite der Schollen können durch Tauprozesse, aber auch durch sehr geringe Wachstumsgeschwindigkeiten an der Schollenunterseite erklärt werden. Langsames Eiswachstum führt zu einem besseren Verdrängen von Sole, so daß sich weniger intrakristalline Solekanälchen ausbilden.

Vermengt säulig/körniges Eis

Eine senkrechte Orientierung der Solekanäle war zu erkennen, die Verzweigungen traten seltener auf als im körnigen Eis. Die Kanäle selbst waren verwunden und verdreht. Grate waren zu erkennen. Zwischen Bereichen mit einer größeren Kanaldichte fehlten Kanäle vollständig. Eine optische Vermessung der Kanaldurchmesser der Probe (Bild 6) ergab einen Mittelwert von 200 μm . Die Gesamtverteilung der Porenräume in dieser Texturklasse ist in Bild 7 zu erkennen, das den gesamten Ausguß eines Kernabschnittes von oben gesehen zeigt. Die Solekanälchen zeigten in manchen Bereichen eine parallele Ausrichtung. Die Detailaufnahme (Bild 8) zeigt das scharfe Aufeinanderstoßen der parallelen Bereiche mit verschiedenen Ausrichtungen (A), die aber auch Gebiete mit eher ungerichteten Orientierungen einschließen (B). Der Längsschnitt durch einen Ausguß (Bild 9) zeigt die schwach senkrechte Orientierung der feinen Kanäle. Der große Solekanal mit mehreren cm Durchmesser, der in der Mitte des Bildes angeschnitten ist, folgt keiner bestimmten Raumrichtung, die Grenze zu den feinen Kanälen ist relativ scharf.

Die Y-förmige Struktur in der linken Bildmitte innerhalb des dicken Solekanals ist ein Riß, der beim Trocknen des Polymers entstand.

Plättcheneis

Während ANT 9/3 wurde im schelfeisnahen Bereich Eis angetroffen, in das Eisplättchen in verschiedenen Tiefen mit eingeschlossen waren. Die Eisplättchen traten darin als kompakte Streifen aus klarem Eis auf, die an den Eiskernen schon mit bloßem Auge zu erkennen waren. Bild 10 zeigt ein frisch abgesägtes Stück eines Eiskernes unmittelbar nach der Probenentnahme. Eingebettet waren die Eisplättchen in eine Matrix aus körnigem Eis. Die Eisplättchen lagen vorwiegend waagrecht (Bild 11) und hatten eine Dicke von ca. 1 mm und eine größte Ausdehnung von ca. 1-2 cm. Im elektronenmikroskopischen Bild sind die Lagen mit einem großen Porenanteil deutlich durch die parallelen Schichten der Eisplättchen voneinander getrennt (Bild 12).

Details

Stärker vergrößerte Detailaufnahmen der Eisausgüsse ließen Strukturen erkennbar werden, die das Auflösungsvermögen der Ausgußmethode belegen. Die kleinsten räumlichen Gebilde, die auf den Ausgüssen zu sehen waren, hatten eine Ausdehnung von wenigen μm . Bild 13 zeigt eine Soletasche, die über einen Verbindungskanal von 10 μm Durchmesser mit einem größeren Solekanälchen verbunden ist. Der blind endende Teil der Soletasche hatte über eine Länge von ca. 30 μm einen Durchmesser, der geringer als 3 μm war. Feinste Gebilde von wenigen μm Durchmesser wurden auf allen Präparaten in unterschiedlicher Häufigkeit beobachtet. Eine der längsten Verbindungsstrecken, die auf einem der Präparate entdeckt wurde, war ca. 1000 μm lang und ca. 10 μm dick. Bild 14 zeigt solch eine dünne Verbindung zwischen den Soletaschen.

Feiner in der Auflösung waren die Strukturen, die an der Oberfläche der Ausgüsse zu sehen waren und sich als lange Grate wie Gebirgskämme dahinzogen. Diese Grate endeten oder begannen, soweit unter dem REM sichtbar, stets an anderen Graten. Die Grate trafen entweder in einem stumpfen Winkel aufeinander (Bild 15) oder spalteten sich unter Einschluß eines spitzen Winkels voneinander ab (Bild 16). Es ließen sich zwei Arten von Graten unterscheiden, solche die deutlich aus ihrer Umgebung hervortraten, wie in Bild 15 zu

sehen, oder solche, die nur als geringe Winkeländerungen in den Oberflächen der Ausgüsse sichtbar waren, wie in Bild 16. Die Basisbreite der schmalsten Grate, die deutlich aus ihrer Umgebung hervortraten, betrug $1\ \mu\text{m}$, ihre Höhe knappe $2\ \mu\text{m}$ (Bild 16). Besonders in körnigem Eis waren viele Grate beider Arten zu erkennen (Bild 17). Auf Bild 17 ist auch eine flache Soletasche sichtbar, die von einem umlaufenden Grat begrenzt wurde.

Wie oben schon erwähnt, lassen sich die beobachteten Grate als Korngrenzen interpretieren. Die Korngrenzen an den Kanten und in der Fläche der Ausgüsse zeigen, daß die interkristallinen Solekanäle mindestens zwischen zwei (Bild 17), aber auch vielen Eiskristallen liegen können (Bild 6).

Die hellen Punkte auf der Oberfläche der Ausgüsse, wie sie auf Bild 14 gut zu sehen sind, zeigten bei der Betrachtung mit stärkeren Vergrößerungen die kubische Form von NaCl Kristallen. Es könnte sich dabei um Salz handeln, das noch in abgeschlossenen Solekanälchen im Eis vorhanden war und das beim Gefriertrocknen ausfiel.

Künstlich hergestelltes körniges Eis

Die Ausgüsse des bei Versuch 10 entstandenen körnigen Eises zeigen im lichtoptischen Bild (Bild 18) dicht beieinander liegende Solekanälchen, die Durchmesser von einigen mm erreichten. Die runden Solekanälchen waren in allen Raumrichtungen miteinander verbunden, die senkrechten Verbindungen schienen etwas vermehrt aufzutreten, doch wurde das nur beim Betrachten größerer Flächen deutlich. Im elektronenmikroskopischen Bild ist das durch den kleineren Ausschnitt nicht zu erkennen (Bild 19). Grate auf den Solekanälchen waren auch hier zu erkennen, es traten abgerundete Solekanälchen ohne Grate (A) und eckige Solekanälchen (B) auf, die von Graten begrenzt werden. Gegenüber dem älteren, natürlichen, körnigem Eis lagen die Solekanälchen dichter beieinander und hatten größere Durchmesser.

Künstlich hergestelltes säuliges Eis

In künstlich hergestelltem säuligem Eis, das zudem noch sehr jung (90 h) war und einen vergleichsweise hohen Salzgehalt aufwies (10 ‰), waren die Solekanälchen als kleine Plättchen oder Lagen ausgebildet, die mit einer Dicke von ca. $200\ \mu\text{m}$ und einer Ausdehnung in der Fläche von einigen mm parallel nebeneinander lagen

(Bild 20). Die Solelagen konnten über feine Brücken miteinander verbunden sein, doch traten auch Bereiche auf, in denen die Solekanälchen etliche mm parallel verliefen, ohne daß auf den Aufnahmen eine Verbindung zu sehen war (Bild 21). Eingestreut waren Bereiche, in denen sich die Abstände der Lagen plötzlich verringerten, wie es im linken Teil von Bild 21 zu sehen ist. In den Bereichen geringerer Lagenabstände waren die Verbindungen häufiger. Die Solelagen waren mehr oder weniger senkrecht im Eis angeordnet, es traten Winkelabweichungen von der Senkrechten von maximal 30° auf. Auf Bild 22 sieht man im linken unteren Bildteil direkt auf die Ebene der Lagen, rechts davon sind andere im Querschnitt getroffen, und von oben schieben sich Lagen schräg ins Bild. Außer der senkrechten Richtung schienen die Lagen keine der Raumrichtungen zu bevorzugen. Die Solelagen waren an manchen Stellen unterbrochen. In der Aufsicht auf die Lageebene im linken Bildteil von Bild 21 ist das gut zu sehen, doch nahmen die Löcher keinen dominierenden Raum in der Gesamtfläche ein. Korngrenzen waren auch bei stärkeren Vergrößerungen nicht zu entdecken.

Die parallel verlaufenden Lagen sind Abformungen der sogenannten "skeletal layer" (MAYKUT 1985). Hier handelt es sich um die Solekanälchen, die im Frühstadium der Eisbildung innerhalb der Eiskristalle entstehen. Sie verlaufen innerhalb eines Eiskristalls parallel zueinander und senkrecht zu den C-Achsen der Eiskristalle. Die Größe der Felder, in denen die Solekanälchen parallel liefen, zeigte die Größe der jeweiligen Eiskristalle, ihre Größe deckt sich auch mit der Größe der Felder, die während der Eisbildung an der Oberfläche des Eistanks beobachtet wurden. Die dabei beobachteten Felder mit unterschiedlicher Textur waren einzelne Eiskristalle, die aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtung der C-Achsen und damit der "skeletal layer" in der Aufsicht optisch unterschieden werden konnten (Abb. 49).



Bild 1: REM-Aufnahme eines Eisausgusses von körnigem Eis (T = -2,5 °C).

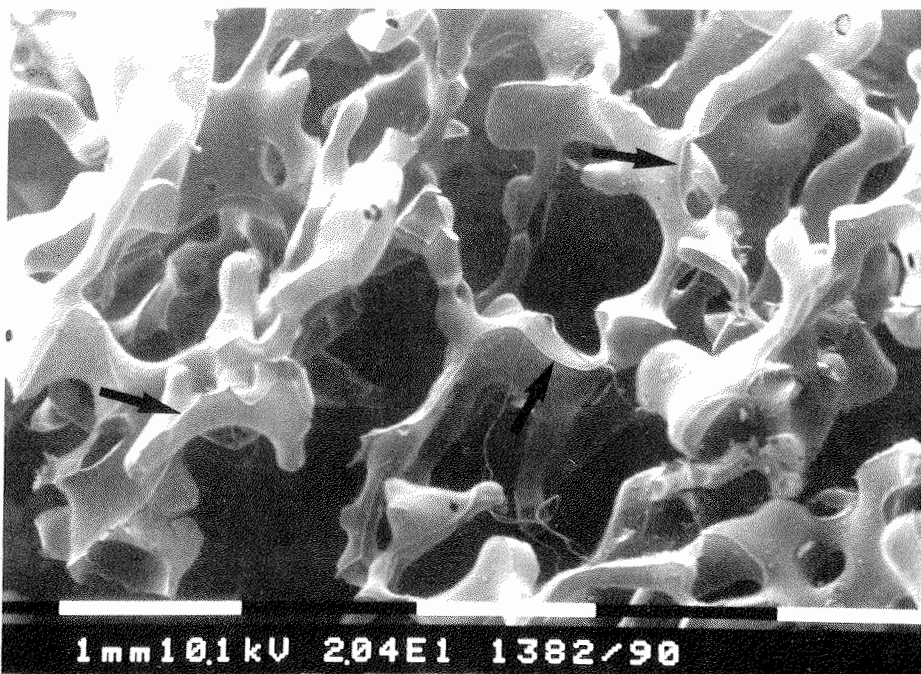


Bild 2: REM-Aufnahme eines Eisausgusses von körnigem Eis mit sichtbarer Abformung der Korngrenzen (Pfeile).



Bild 3: REM-Aufnahme eines Eisausgusses von säuligem Eis ($T = -5\text{ °C}$).



Bild 4: REM-Aufnahme eines Eisausgusses von säuligem Eis ($T = -2,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$).



Bild 5: Lichtoptische Aufnahme eines Eisausgusses von säuligem Eis im Längsschnitt.

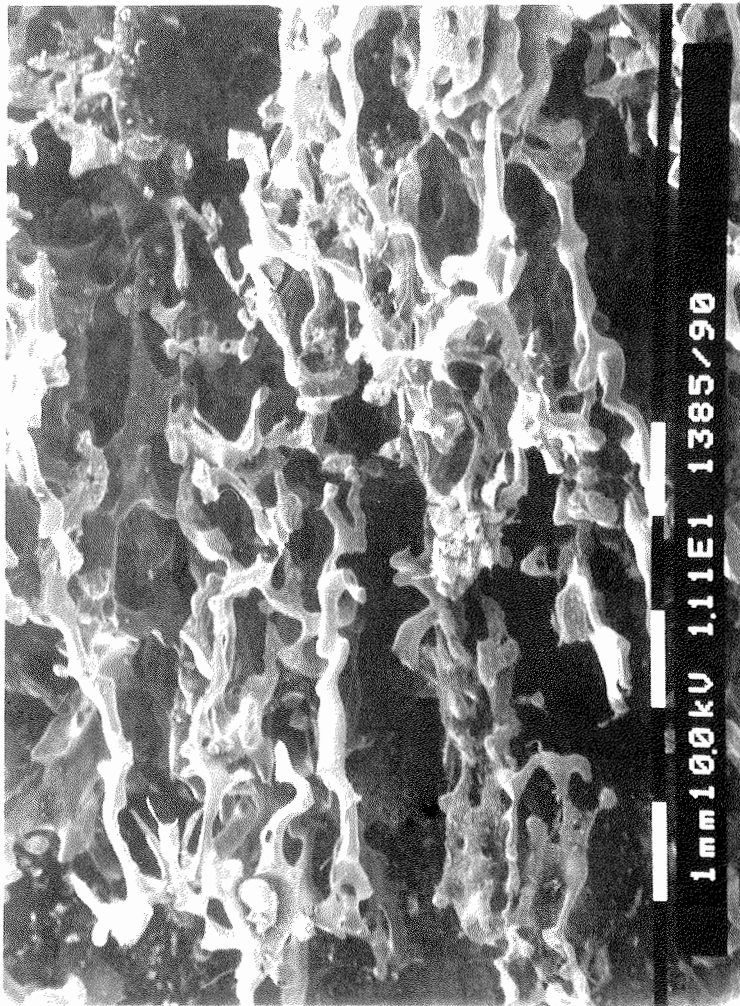


Bild 6: REM-Aufnahme eines Eisausgusses von säulig-körnigem Eis im Längsschnitt.

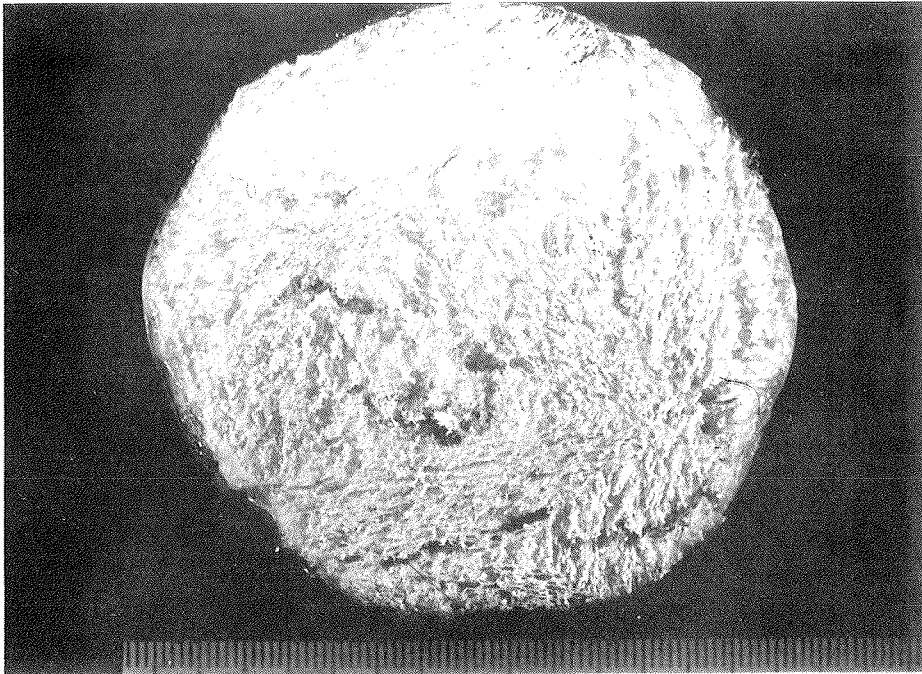


Bild 7: Lichtoptische Aufnahme eines gesamten Eisausgusses von säulig-körnigem Eis im Querschnitt.

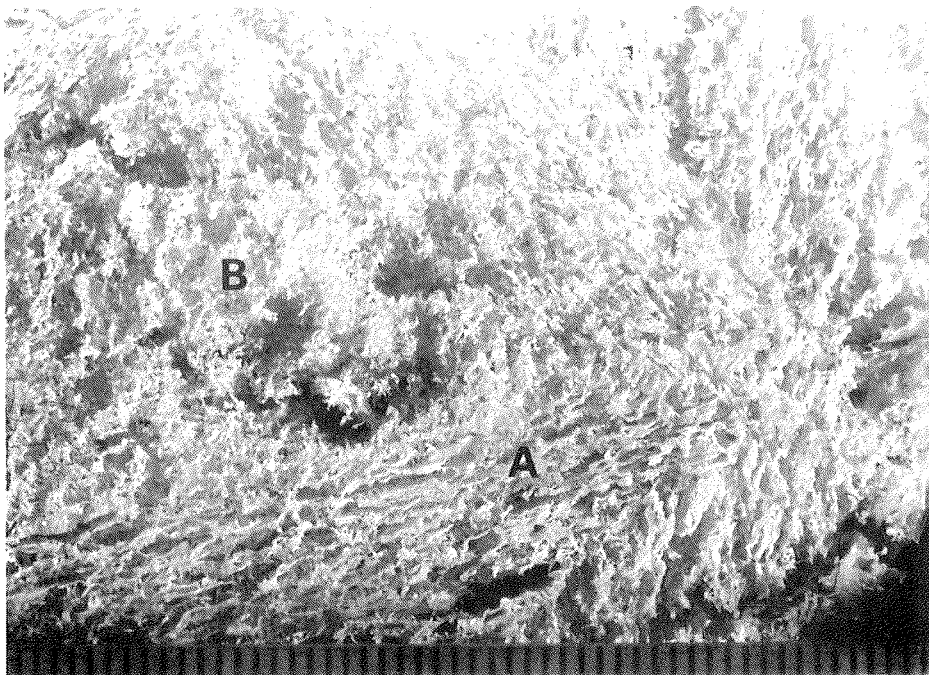


Bild 8: Lichtoptische Aufnahme eines Eisausgusses von säulig-körnigem Eis im Querschnitt. Bereiche mit deutlich paralleler Ausrichtung der Solekanälchen (A) liegen neben Bereiche ohne erkennbare Orientierung (B).

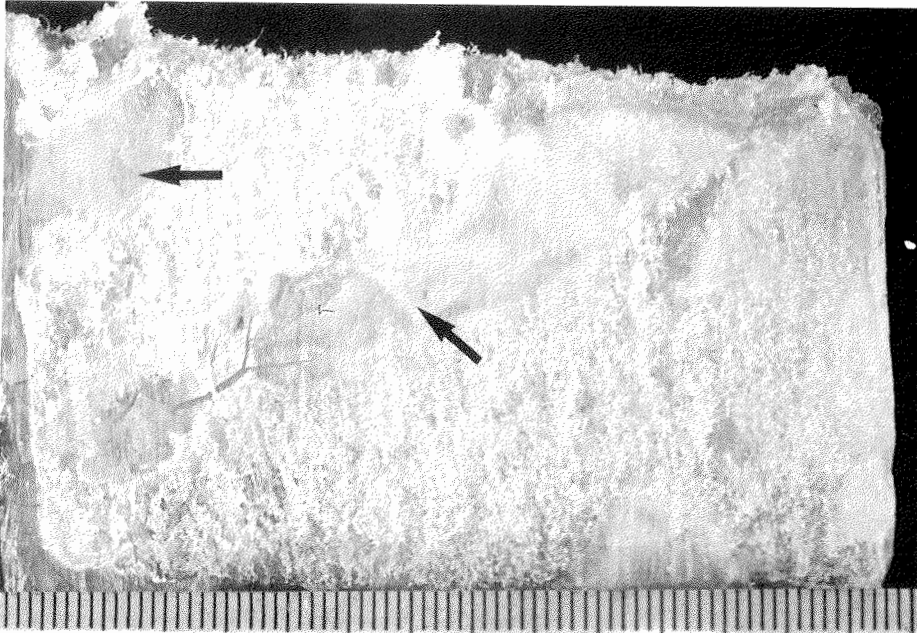


Bild 9: Lichtoptische Aufnahme eines Eisausgusses von säulig-körnigem Eis im Längsschnitt. Es sind Solekanäle mit mehreren mm Durchmesser angeschnitten (Pfeile).

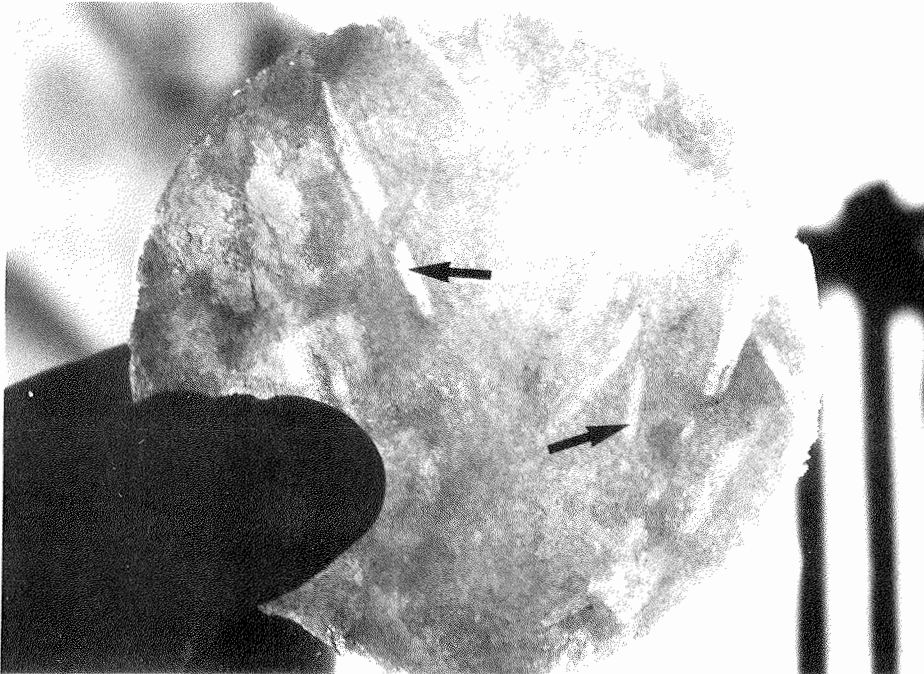


Bild 10: Photographie eines Eiskernabschnittes unmittelbar nach der Probenentnahme, die hellen Streifen sind in säulig-körniges Eis eingestreute Eisplättchen (Pfeile).

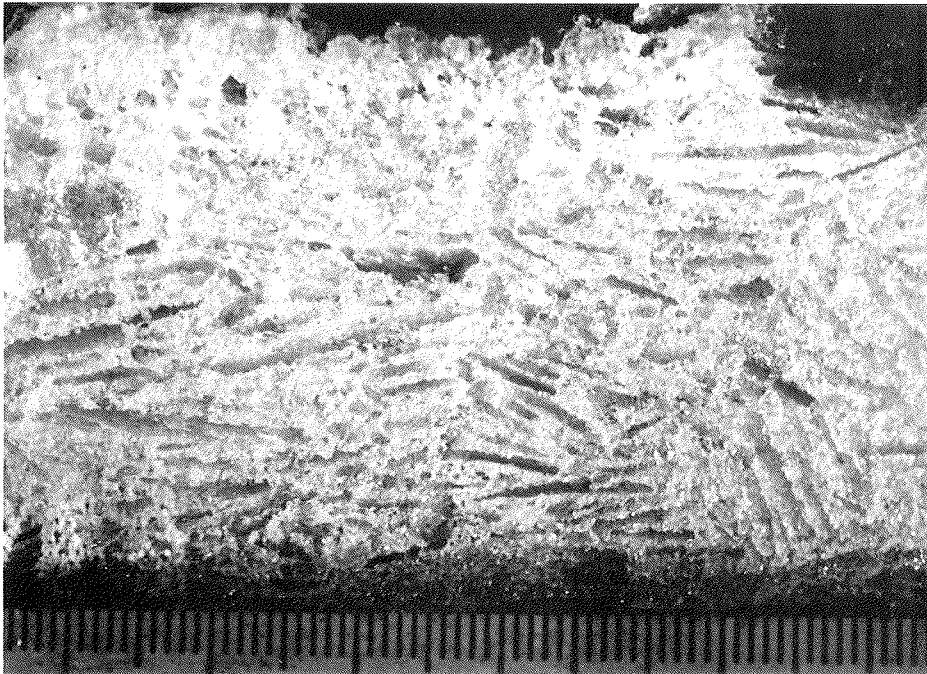


Bild 11: Lichtoptische Aufnahme eines Eisausgusses von Plättcheneis.

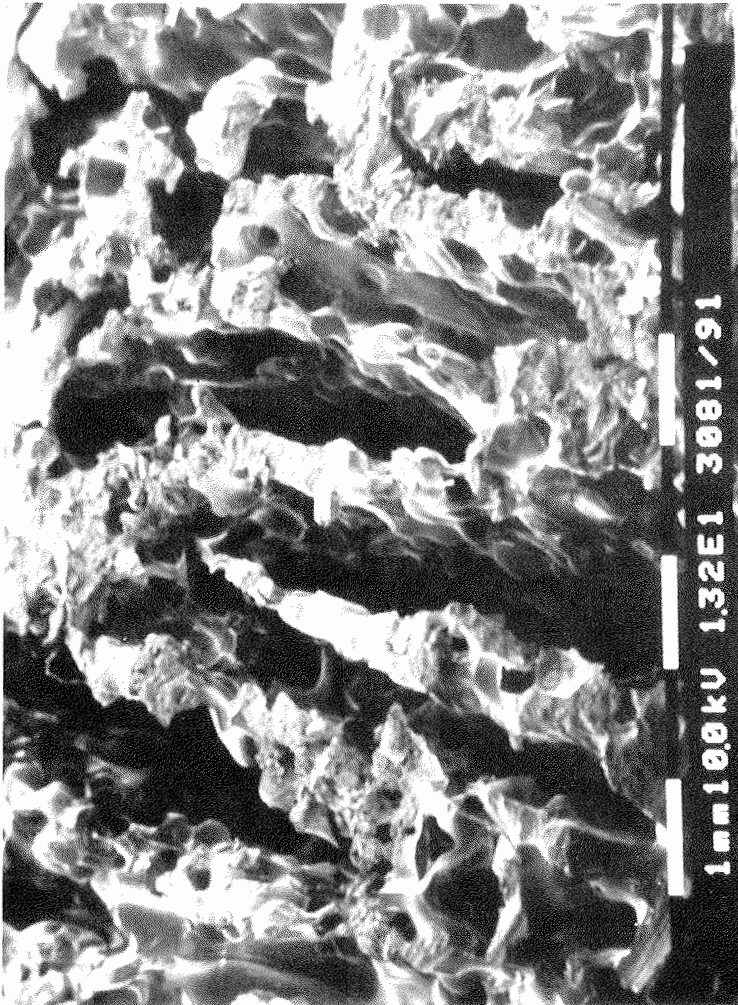


Bild 12: REM-Aufnahme eines Eisausgusses von Plättcheneis.

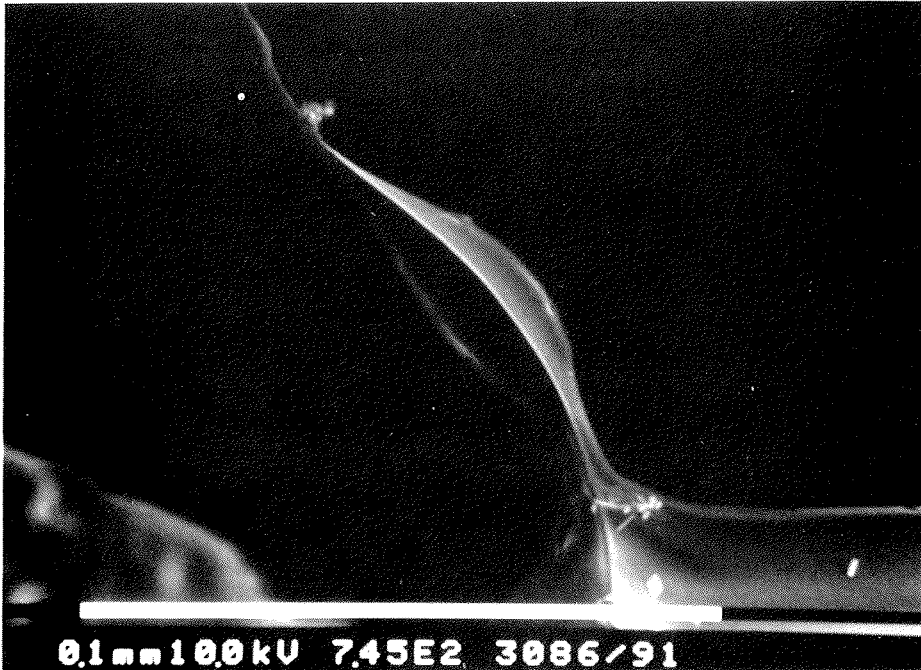


Bild 13: REM-Aufnahme einer blind endenden Soletasche.

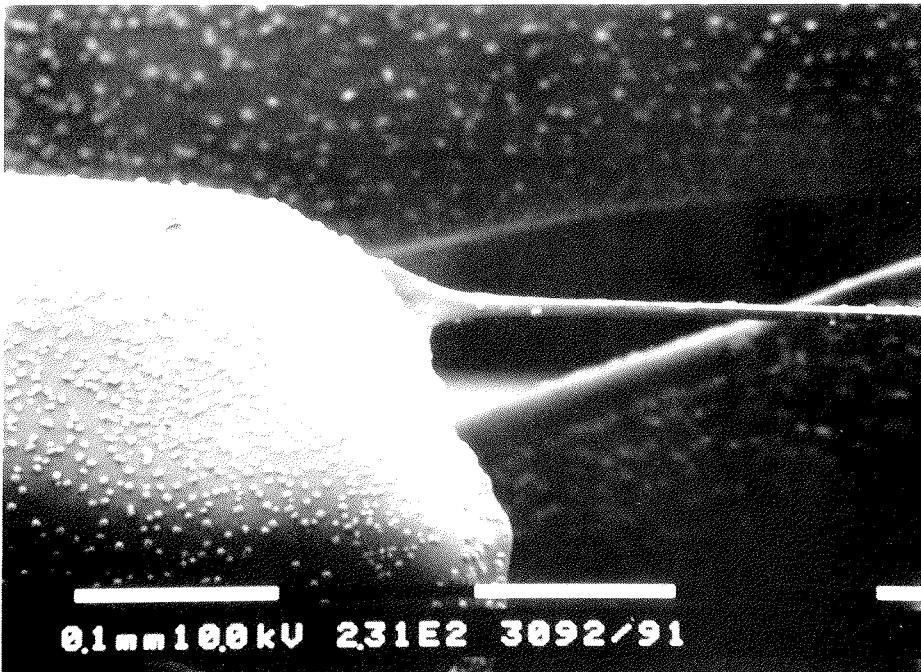


Bild 14: REM-Aufnahme eines feinen Solekanälchens.

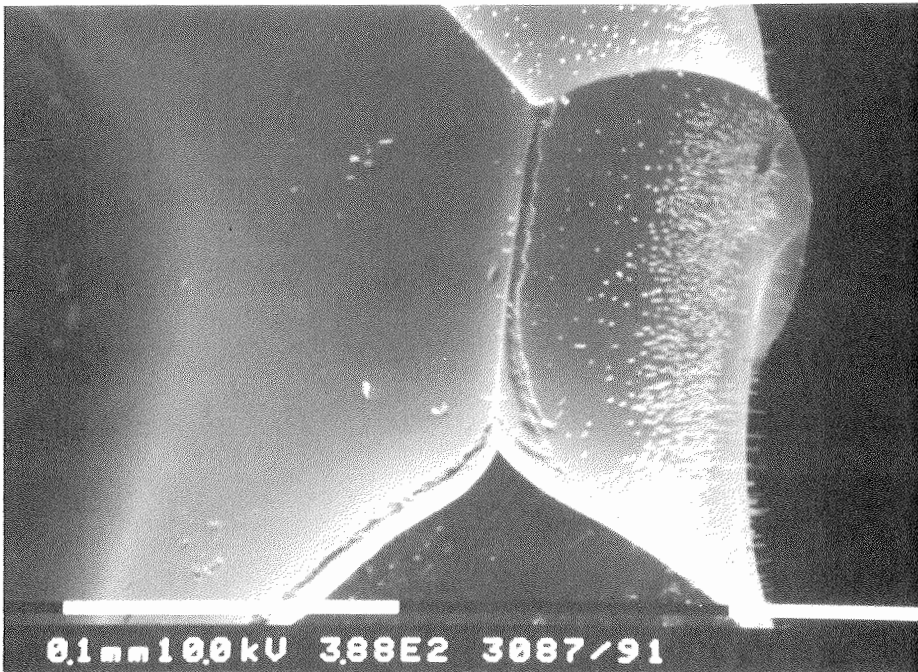


Bild 15: REM-Aufnahme von abgeformten Korngrenzen.

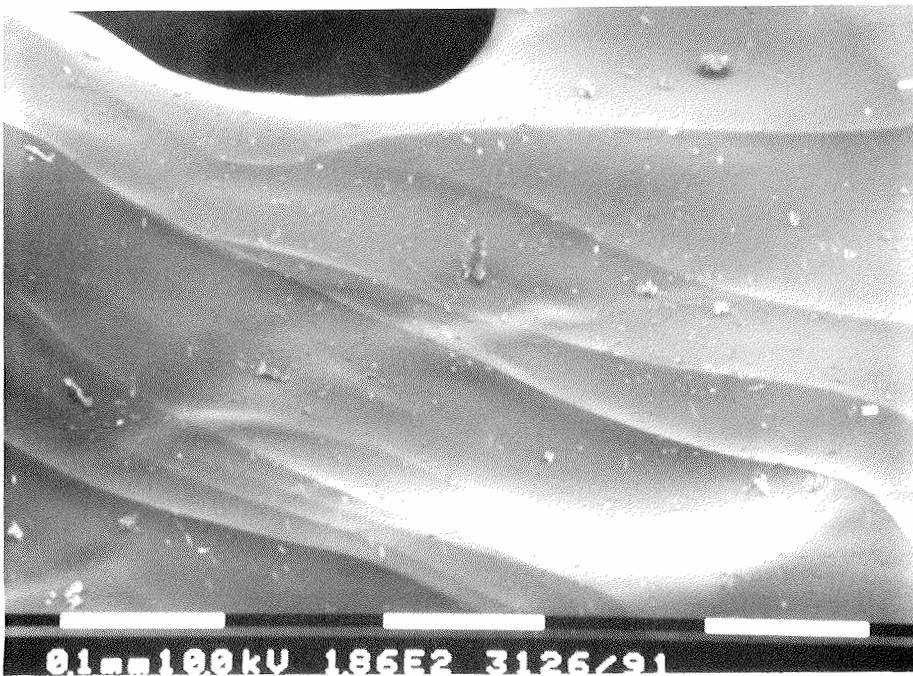


Bild 16: REM-Aufnahme von Korngrenzen an den Seitenwänden eines dicken Solekanals.

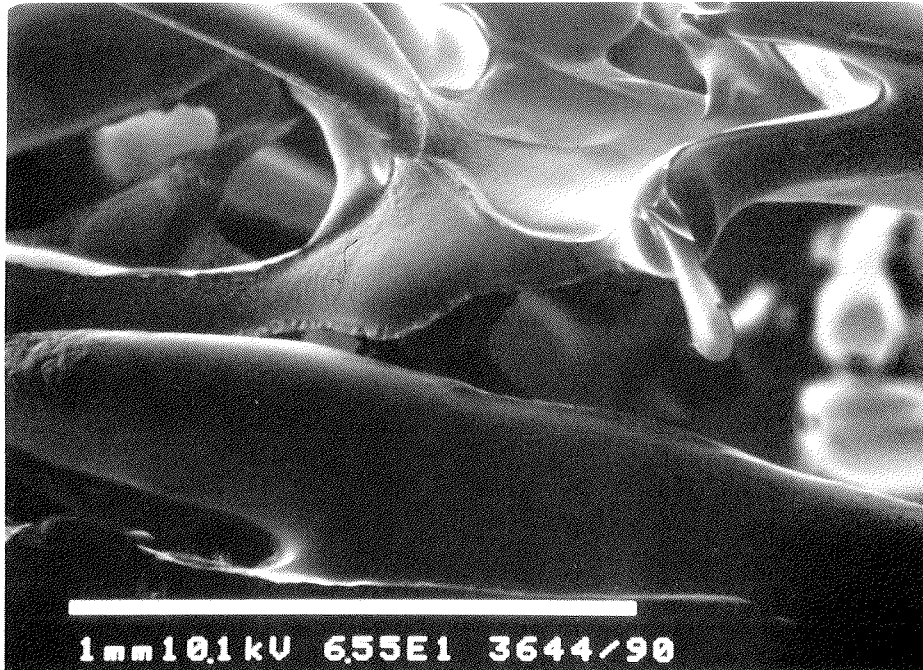


Bild 17: REM-Aufnahme einer Soletasche mit umlaufender Korngrenze.

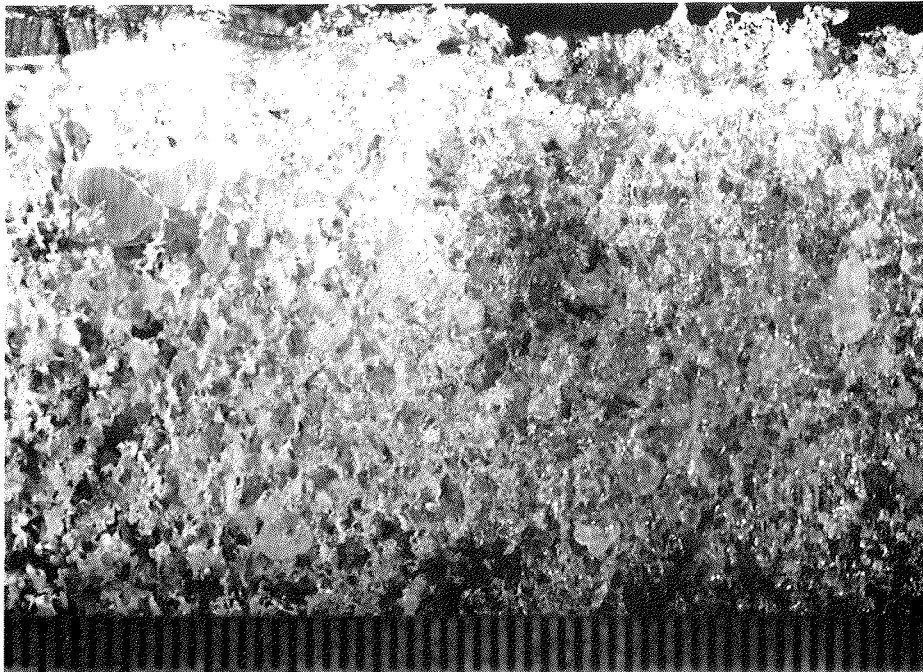


Bild 18: Lichtoptische Aufnahme eines Ausgusses von künstlich hergestelltem, körnigem Eis.

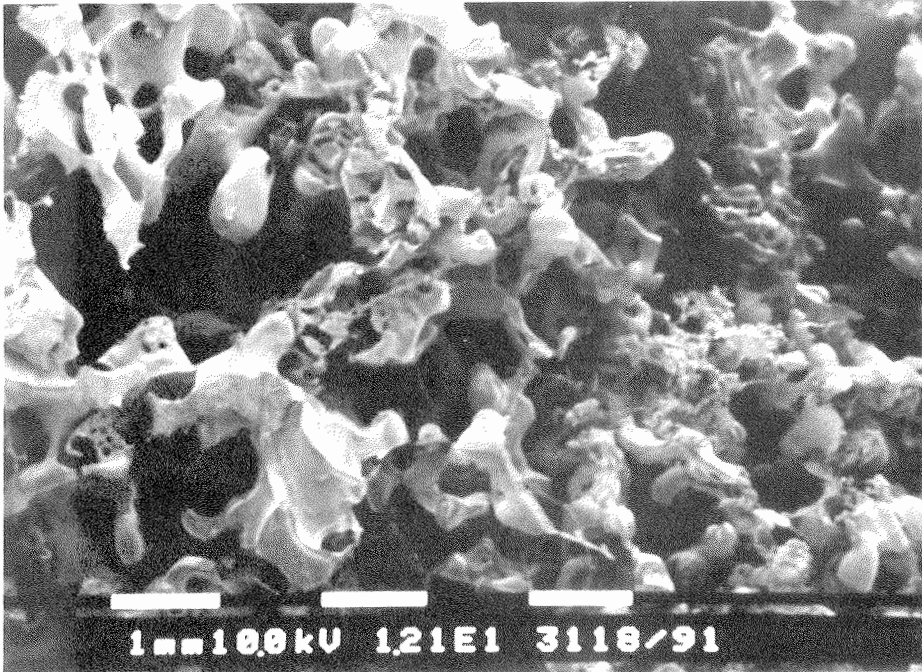


Bild 19: REM-Aufnahme eines Eisausgusses von künstlich hergestelltem, körnigem Eis.

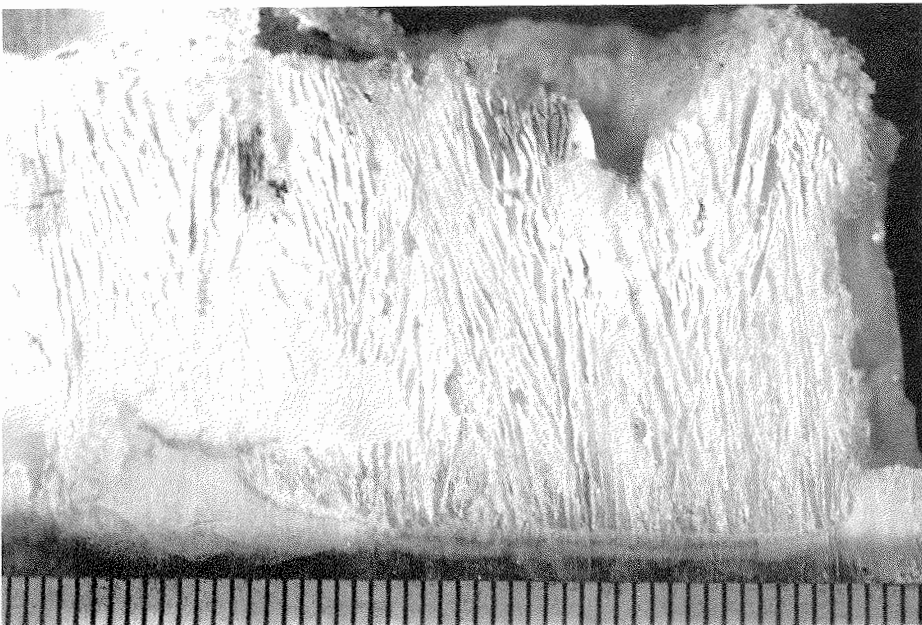


Bild 20: Lichtoptische Aufnahme eines Ausgusses von künstlich hergestelltem, säuligem Eis.

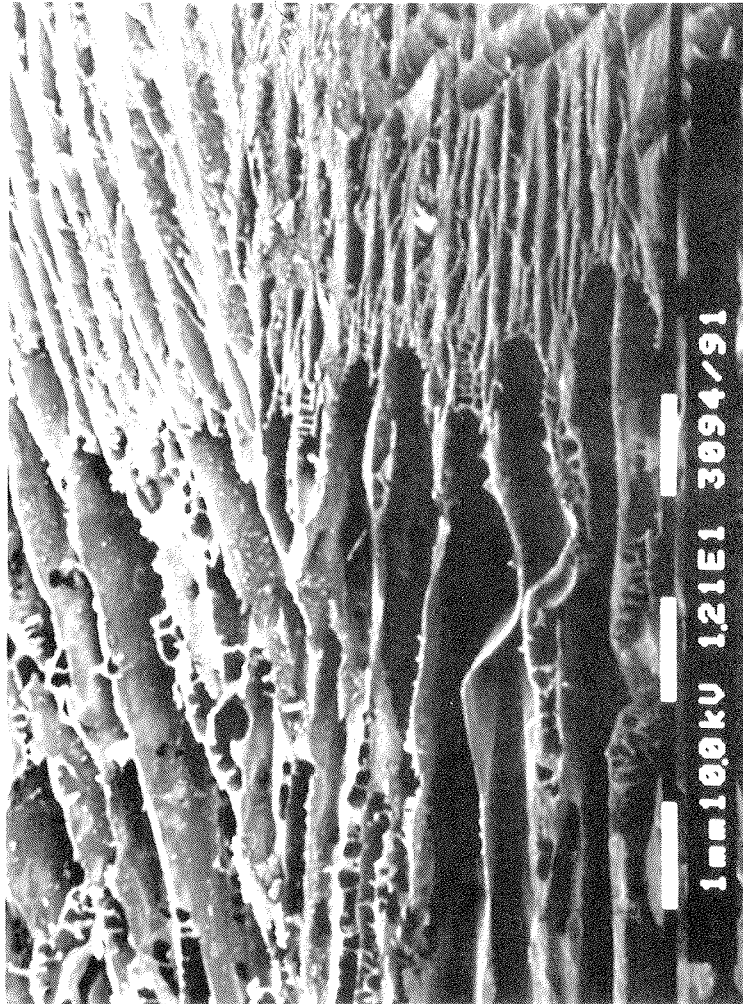


Bild 21: REM-Aufnahme eines Ausgusses von künstlich hergestelltem, säuligem Eis.



Bild 22: REM-Aufnahme eines Ausgusses von künstlich hergestelltem, säuligem Eis.

3.3. Diskussion

Ziel der während der Expedition ANT 8/2 durchgeführten Arbeiten war im wesentlichen die Entwicklung von Methoden, die einen neuen Einblick in die Lebensbedingungen im Meereis ermöglichen sollten. Durch die Methode des Soleauschleuderns und des Ausgießens der Solekanälchen mit Kunststoff war es möglich, Ergebnisse über

- a) die chemischen *in-situ* Bedingungen in der Sole zu erhalten,
- b) auf direktem Wege die Solevolumina innerhalb des Meereises sowie die räumliche Anordnung der Solekanäle zu bestimmen und
- c) Aussagen über den Aufenthalt der Organismen im System der Solekanälchen zu treffen.

Die Leistungsfähigkeit der Methoden an sich und im Vergleich mit bestehenden Methoden wird im ersten Teil der Diskussion behandelt. Es schließt sich die Diskussion der Ergebnisse an, die sich direkt auf die Expedition ANT 8/2 beziehen. Daten der Expedition ANT 8/2, die gut mit denen der Expedition ANT 9/3 verglichen werden können, und aus den Ergebnissen abzuleitende allgemeine Konsequenzen für das Leben im Eis werden im allgemeinen Diskussionsteil behandelt.

3.3.1. Das Ausschleudern der Eiskerne: Wie genau stimmen die Messungen an der Sole mit den tatsächlich im Eis herrschenden Bedingungen überein?

Die zentrale Annahme, um die Effizienz der Methode des Soleauschleuderns abschätzen zu können, war die Gleichverteilung von gelösten, die Salinität bestimmenden Salzen in der ausschleuderbaren und eingeschlossenen Sole ($S_{So} = S_{ESo}$). Nach den Phasengesetzen für Meerwasser (ASSUR 1960, WEEKS UND ACKLEY 1982) ist die Salinität der Sole innerhalb des Eises nur von der Temperatur abhängig (Formeln 9 und 10). Gelöste Stoffe, die im Meerwasser vorkommen (hauptsächlich Na- und Cl-Ionen), werden in das Kristallgitter des Eises nur zu einem sehr geringen Anteil eingebaut. HARRISON und TILLER (1963) bestimmten den molaren Anteil der wichtigsten im Meerwasser vorkommenden Salze, die ins Eis selbst eingebaut werden. Der Quotient aus Konzentrationen im Eis und Konzentrationen in der Sole wird von ihnen kleiner als 10^{-4} angege-

ben. Es ist kein Prozeß bekannt, der diesen Anteil in eingeschlossener und ausgeschleuderter Sole unterschiedlich beeinflussen könnte. Die Salinität in der Sole wird als Maß für die beim Gefrieren ablaufenden Konzentrationsprozesse benutzt (MEESE 1990, DIECKMANN et al. 1991, GARRISON et al. 1990). Auch in diesen Arbeiten wird davon ausgegangen, daß die Salinität der Sole nicht kleinräumig verschieden ist und diesbezüglich zwischen eingeschlossener und ausschleuderbarer Sole kein Unterschied besteht.

Der Begriff "eingeschlossene Sole" ist nicht wörtlich zu nehmen. Er beinhaltet nicht nur die Sole, die in gänzlich abgeschlossenen Soletaschen vorhanden ist, sondern bezeichnet allgemein den Anteil der Sole, der sich nicht durch Zentrifugation aus dem Eis entfernen läßt. Die Summe der Solemengen in verschiedenen Porenräumen setzt sich zusammen aus den Volumina (Abb. 28) in gänzlich abgeschlossenen Soletaschen (A), in Aussackungen, die ein Ausfließen der Sole durch die Zentrifugalkraft aufgrund ihrer Form und Lage verhindern (B, C), in feinen Solekanälchen, in denen die Sole durch Kapillarkräfte haften bleibt (D), an den Wänden haftende Sole (E) und in durchgängigen, aber nicht in Richtung der Zentrifugalkraft offenen Solekanälchen. Ausschleuderbar ist somit die Sole in angeschnittenen, ansonsten geschlossenen Soletaschen (G) sowie in durchgängigen Porenräumen (H). Die Begriffe geschlossene und offene Solekanälchen lassen sich nicht scharf voneinander trennen, sondern sind von den Dimensionen des betrachteten Eisstückes abhängig. Geschlossene Solekanälchen können zu offenen Solekanälchen werden, sobald sie an einer Grenze des Eisstückes liegen (C), oder gar zu offenen durchgängigen Porenräumen, sobald sie von zwei Grenzen berührt werden. Die große innere Oberfläche der Solekanäle und ihr z.T. sehr verwinkelter Lauf, wie er bei Betrachtung der Ausgußpräparate deutlich wurde, lassen den Schluß zu, daß sich viel Sole an den Wänden (E) und in "Sackgassen" (B) aufhielt.

Da die Eistemperatur bei der Errechnung der theoretischen Salinität der Sole und des Solevolumens mit eingeht, ist die Genauigkeit der Temperaturmessung von Interesse. Die Systemgenauigkeit des Temperaturmeßgerätes wurde mit $\pm 0,2$ °C angegeben. Der angenommene geringste Fehler von $\pm 0,2$ °C führt in dem am häufigsten vorkommenden Temperaturbereich

von $-2,2$ bis $-8,2$ °C zu einem Fehler in den theoretischen Salinitäten von ± 4 ‰. Das gleiche Prinzip gilt auch für das aus Gesamtsalinität und Eistemperatur errechnete theoretische Solevolumen (Formeln 3, 4 und 5). Mit den errechneten Werten für Solesalinität und relatives Solevolumen steht damit keine absolut genaue Referenz zur Verfügung, mit der die direkt gemessenen Größen verglichen werden können. Beide Methoden sind auf ähnliche Weise mit Fehlern belastet, so daß Salinitätsunterschiede zwischen errechneten und gemessenen Werten von 8 ‰ noch innerhalb der Meßgenauigkeiten liegen. Durch die Betrachtung aller Datenpunkte und die Annahme, daß die Gerätefehler zufälliger Art sind, lassen sich trotz der Ungenauigkeiten Aussagen über die direkt an der Sole gemessenen Größen Salinität und Volumen treffen. Alle direkt gemessenen Solesalinitäten gegen die dazugehörigen theoretischen Salinitäten aufgetragen (Abb. 9), streuen gleichmäßig um die ideale Gerade mit Nulldurchgang und Steigung 1. Die Regressionsgerade durch alle Datenpunkte belegt ebenfalls die gute Übereinstimmung mit der Idealgeraden.

Daß in den obersten Horizonten stets eine geringere und in den unteren Horizonten eine höhere Salinität als die theoretisch zu erwartende gemessen wurde, läßt sich nicht durch zufällige Fehler erklären. Ursache sind die Bedingungen bei der Lagerung bis zum

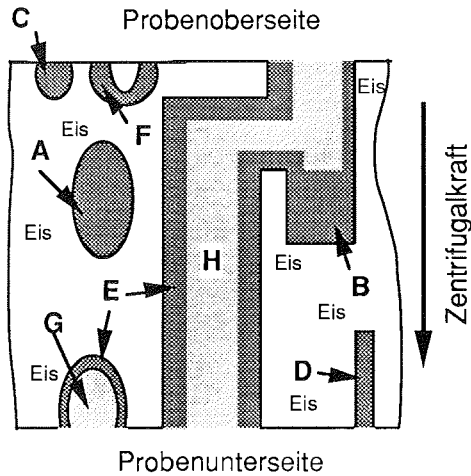


Abb. 28: Schemazeichnung eines Meereisabschnittes mit den verschiedenen Aufenhaltsorten für die Sole. A bis F = "eingeschlossene" Sole, G und H = ausgeschleuderbare Sole (Genauerer im Text)

Ausschleudern. Durch das gemeinschaftliche Lagern in einem wärmeisolierten Behälter herrschte in diesem Behälter nach einer gewissen Zeit eine Temperatur, die in etwa dem Mittelwert aller darin befindlichen Eiskernabschnitten entsprach. Die kalten Eiskernabschnitte von der Oberfläche erwärmten sich, die von der Unterseiten der Schollen kühlten sich ab. Daher sind auch die über einen gesamten Kern gemittelten Solesalinitäten in der Mehrzahl der Fälle nicht signifikant von den theoretisch errechneten mittleren Solesalinitäten verschieden (Abb. 12). Der Vergleich der gemittelten Solesalinitäten der Kerne ...01 und ...04 (Tab. 4) zeigt, daß die Lagerdauer bis zum Zentrifugieren keinen Einfluß auf die Salinitäten in der Sole hatte, daß aber insgesamt eine Erwärmung stattgefunden hatte. Die gleichen Verhältnisse von theoretischer zu gemessener Salinität der beiden Kerne ...03 und ...04 (Abb. 12) sind ein Zeichen dafür, daß die Eiskernabschnitte die meiste Wärme verlieren oder aufnehmen, bis das Innere des Isolierbehälters die mittlere Temperatur angenommen hat, oder der Wärmeaustausch in der Hauptsache außerhalb des Isolierbehälters, also beim Einpacken in den Isolierbehälter, beim Laden der Zentrifuge oder in der Zentrifuge selbst stattfindet. Der intensive Luft- und Wärmeaustausch beim Betrieb der Zentrifuge im Rotorgehäuse spielt dabei eine große Rolle. Da die Temperatur der Kühlzentrifuge am Boden des Rotorbehälters gemessen wird, kann in den Zentrifugenbechern die Temperatur stärker schwanken.

Die gemessenen relativen Solevolumina, die in den oberen Horizonten deutlich über den errechneten liegen, lassen sich ebenfalls als eine Folge der Wärmezufuhr bei der Verarbeitung erklären. Die gleichen Prozesse, die die Salinitäten erniedrigen, führen zwangsläufig zu einer Zunahme der Solevolumina.

Das Ausfließen von Sole bei der Probenentnahme und Lagerung bis zur Zentrifugation (Kerne ...03, ...04) oder beim Tiefgefrieren (Kern ...01) ist in der Quantität schwer abzuschätzen. Aus Solekanälen mit großen Durchmessern wird bei der Probenentnahme die Sole leichter und schneller auslaufen als aus kleinen Solekanälen. Aus diesem Grund wurde bei den Kernen der Expedition ANT 9/3, die in der Mehrzahl der Fälle große, mit dem bloßen Auge erkennbare Solekanäle enthielten, auf eine Bestimmung der relativen Solevolumina verzichtet. Die durchweg kalten und keinerlei Anzeichen von

Tauprozessen aufweisenden Kerne der Expedition ANT 8/2 eigneten sich besser zum Testen der Leistungsfähigkeit der Ausschleudermethode, da das Eis homogener, durch die niederen Temperaturen das relative Solevolumen geringer und die Dimensionen der Solekanäle kleiner waren. Wie Abb. 14 zeigt, steigt der Anteil der ausgeschleuderten Sole mit der Eistemperatur. Im allgemein wärmeren Sommereis wird die relative Menge der ausgeschleuderten Sole insgesamt größer sein. Eine Ausnahme stellt natürlich Eis dar, dessen soleerfüllten Hohlräume durch Auftauprozesse schon so groß sind, daß die Sole auch ohne eine künstliche Erhöhung der Schwerkraft ausfließt.

Die Abschätzung des durch Zentrifugation entfernbaren Soleanteils (Abb. 13) ist wenig mit methodischen Fehlern belastet. Das Volumen der eingeschlossenen Sole wird eher überschätzt, da das Auftauen der ausgeschleuderten Eiskernabschnitte in den gleichen Dosen erfolgte, in denen sie vor dem Zentrifugieren lagerten. Die vor dem Zentrifugieren selbstständig ausgelaufene, hochkonzentrierte Sole befand sich noch in diesen Behältern, so daß sich die Salinität der aufgetauten ausgeschleuderten Eiskernabschnitte erhöhen kann, ohne daß diese Salinität wirklich auf eingeschlossene Sole zurückzuführen wäre. Dieses Verfahren gewährleistete aber eine möglichst genaue Erfassung der Gesamtsalinitäten eines Kernes. Der Vergleich mit den Gesamtsalinitäten der Kerne ...01 (Tab.4) zeigt eine gute Übereinstimmung, obwohl die Gesamtsalinitäten ermittelt wurden, nachdem die Kerne deutlich verschiedene Prozeduren durchlaufen hatten. Da die Kerne ...01 nicht zersägt wurden, wiesen sie insgesamt weniger Oberflächen auf, durch die Sole herausickern konnte und gelangten meist innerhalb von ca. 20 Minuten in den Tiefkühlraum. Die auslaufende und durch das Tiefgefrieren herausgedrückte Sole dieser Kerne schlug sich an der Innenseite der Plastikverpackung nieder und wurde später nicht mehr erfaßt. Die zersägten Eiskerne ...03 und ...04 gelangten innerhalb weniger Minuten in die Plastikdosen, in denen die ausfließende Sole später mit erfaßt wurde. Da die Ergebnisse der beiden Methoden nicht signifikant verschieden war, scheinen die Fehler in ihrer Summe jeweils gleich zu sein.

3.3.2. Die Kunststoffausgüsse: Welche Solekanälchen wurden durch die Kunststoffausgüsse dargestellt?

Mit der Ausgußmethode konnten nur Solekanälchen erfaßt werden, die nach dem Zentrifugieren weitgehend luftgefüllt waren. Das schloß den gesamten Raum ein, der zuvor von der ausgeschleuderten Sole ausgefüllt war und den Raum, der durch auslaufende Sole in der Zeit zwischen Probenentnahme und Zentrifugation entstanden war. Dazu kommt noch der Raum, der schon unter natürlichen Bedingungen gasgefüllt war und der Verbindung an die Oberfläche hatte. Da dieser Anteil aber 1% nicht übersteigt (NAKAWO 1983, EICKEN 1991), wurde er in diesem Zusammenhang vollständig vernachlässigt. Nicht dargestellt wurden die Solekanälchen, die nach dem Ausschleudern noch flüssigkeitsgefüllt waren. Die darin enthaltene Sole erstarrte beim anschließenden Tiefgefrieren der Eiskernabschnitte auf -30 °C Lagertemperatur. Bei diesen Temperaturen ist im Eis praktisch keine flüssige Sole mehr vorhanden. (WEEKS and ACKLEY 1982, EICKEN 1991). Die höher liegenden Verarbeitungstemperaturen beim Ausgießen (-15 bis -18 °C) ließen in beschränktem Maße wieder eine flüssige Phase im Eis zu, die dann auch z.T. mit erfaßt werden konnte. Zunächst aber wurde davon ausgegangen, daß nur der Anteil des Solevolumens, aus dem die Sole durch das Ausschleudern entfernt werden konnte, prinzipiell durch Kunststoff ersetzt werden kann. Wie die Bilder der Ausgüsse zeigen, wurden noch Solekanälchen mit einigen μm Durchmesser vom Monomer durchdrungen. Die feinsten Strukturen an der Oberfläche, die noch abgeformt wurden, waren kleiner als $1\text{ }\mu\text{m}$. Es kann also davon ausgegangen werden, daß das Monomer die Eisoberflächen gut benetzte und in kleinste Räume eindringen konnte. Die Frage, ob alle offenen Solekanälchen mit Monomer getränkt wurde, läßt sich für den schlechtesten Fall abschätzen. Beim Anlegen des Unterdrucks dehnt sich die Luft in den Poren um das 16 fache aus (Unterdruck - 950 hPa, Luftdruck 1013 hPa). Das Produkt von Druck und Volumen ist nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte stets gleich, Temperaturkonstanz wird angenommen. Um den gleichen Faktor wird die Luft bei der Wiederherstellung des normalen Luftdrucks komprimiert, nur kann nun in die Porenräume keine Luft nachströmen, da das Eisstück gänzlich von Monomer umgeben ist. Unter der Annahme, daß vor und während des Entlüftens kein Monomer in Po-

renräume eindringt, und sich beim Belüften der Druck in den Solekanälchen auf den herrschenden Luftdruck einstellt, werden auf diese Weise 84% des zur Verfügung stehenden Porenraumes ausgefüllt. Experimente ohne Entlüften und die Beobachtung der Probe beim Entlüften zeigten aber, daß ein Teil der Solekanälchen auch ohne die Kraft des Luftdruckes mit Monomer gefüllt wird. Die vorgenommene Abschätzung ist daher eher konservativ. Solekanälchen, die noch einen Rest an Sole enthalten, können ebenfalls abgeformt werden, da das Monomer hydrophil und in jedem Verhältnis mit Wasser mischbar ist und schon ab einem Volumenanteil des Monomers von 3 % polymerisierbar ist (ROSENBERG 1960). Allerdings schwinden solche stark wasserhaltigen Anteile bei der anschließenden Trocknung im Wärmeschrank. Ausgüsse aus aufgewärmten und daher wasserhaltigen Eisproben zeigten schwammartige Oberflächen. An den nach dem Standardverfahren hergestellten Ausgüssen konnten keine Oberflächen gefunden werden, die auf einen hohen Wasseranteil bei der Polymerisation schließen ließen. Das mittlere ausschleuderbare Solevolumen von 78 % und die Abschätzung für das Abformen mit 84 % lassen sich kombinieren, so daß das minimale abgeformte Volumen mit 65 % des Gesamtsolevolumens abgeschätzt werden kann. Wird das Volumen eines Körpers um einen bestimmten Prozentsatz unterschätzt, so ergibt sich für die an diesem Körper vorkommenden eindimensionalen Größen lediglich ein um die dritte Wurzel geringerer Fehler. Bei den Ausgüssen kann man daher davon ausgehen, daß sich Längen und Durchmesser der Solekanäle in einem besseren Verhältnis wiedergegeben werden, als sich das bei der reinen Abschätzung des ausgegossenen Volumens abschätzen läßt.

3.3.3. Methodenvergleich

Die Solevolumina innerhalb des Meereises sind durch die Resultate der grundlegenden Arbeit von ASSUR (1960) und ergänzende Arbeiten von FRANKENSTEIN und GARNER (1967) und COX und WEEKS (1983) durch Anwendung der Phasengesetze auf das Mehrphasensystem Meerwasser errechenbar. Durch direkte Messungen mit Hilfe der Kernspinresonanzspektrografie konnten RICHIARDSON und KELLER (1966) die Ergebnisse mittels einer physikalischen Meßmethode überprüfen und bestätigen. Die vorliegende Arbeit mißt das Solevolumen innerhalb des Meereises auf di-

rektem Wege durch einfaches Abmessen der ausgeschleuderten Solevolumina und der Errechnung des Volumens der eingeschlossenen Sole mittels eines Dreisatzes (Formel 1). Die speziellen Verhältnisse des Mehrphasensystems Meereis müssen dabei nicht berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Ausschleudermethode und der rechnerischen Methode führten zu fast identischen Ergebnissen (Abb.15 a, b). Wenn nur die Solevolumina innerhalb des Meereises von Interesse sind, kann die Ausschleudermethode nicht die Methode der Wahl sein. Die genannten Formeln (3, 4, 5) ermöglichen mit geringerem Aufwand eine einfachere und vielfach genauere Bestimmung des Solevolumens.

Drei Methoden wurden bisher in der Literatur beschrieben, um Sole aus dem Meereis zu gewinnen. Es wurde Sole untersucht, die sich in nicht durchgängig gebohrten Löchern (sog. Sacklöcher) in der Eisscholle sammelte (KOTTMEIER und SULLIVAN 1988; BARTSCH 1989, DIECKMANN et al. 1991), oder es wurde mit einer Kanüle Sole aus den Solekanälen gesaugt (GOSSELIN et al. 1990). Es wurde weiterhin Sole untersucht, die aus Eiskernabschnitten nach der Probenentnahme heraussickerte (GARRISON et al. 1990). Die Sole, die sich in den Sacklöchern sammelte, konnte keinem bestimmten Horizont zugeordnet werden, da sowohl Sole von unterhalb durch den hydrostatischen Druck des Meerwassers in das Bohrloch gedrückt wurde, als auch Sole von oben durch die Schwerkraft in das Loch sickerte (eigene Beobachtungen). Die Temperatur der Sole, die sich über einen längeren Zeitraum in einem Sackloch sammelt, paßt sich weitgehend der Lufttemperatur an und die Solesalinität nimmt den zu dieser Temperatur passenden Wert an (eigene Beobachtungen). Durch das Absaugen mit Hilfe einer Kanüle konnte nur Sole aus großen Solekanälen, die von außen zugänglich waren, gewonnen werden.

Die feste Struktur des Meereises und die Feinheit der Solekanäle erschweren eine direkte Analyse der in der Sole enthaltenen Organismen und Stoffe. Deshalb wurden die Eisproben zumeist aufgetaut (HORNER 1985). Das Auftauen der Eisproben erniedrigt die Salinität und verdünnt in gleichem Maße alle ebenfalls im Eis enthaltenen Stoffe. Empfindliche Organismen können dabei platzen (GARRISON und BUCK 1986, BARTSCH 1989) und Inhaltsstoffe in das Wasser abgeben. In Zysten vorhandene Organismen können während des

Tauens schlüpfen und die Organismenzusammensetzung ändern. In dem Zeitraum, der zum Auftauen benötigt wird, kann sich die Zusammensetzung des Wassers ebenfalls durch Stoffwechselprozesse verändern (GARRISON et al. 1990). Wie die Vergleiche zwischen den Konzentrationen in der Sole und dem ausgeschleuderten aufgetauten Kern zeigten (Abb. 34), waren Nitrit, Nitrat und Phosphat im ausgeschleuderten Kern gegenüber der Salinität angereichert. Durch den Einfluß von Organismen kann sich der Gehalt an gelöstem Phosphat in Proben innerhalb einer Stunde signifikant ändern (COLLER und MARVIN 1953 in GRASSHOFF 1976). Der Gehalt an Nitrit und Nitrat kann sich in Proben ebenfalls innerhalb von Stunden signifikant ändern (GRASSHOFF 1976). Die Änderungen des Silikatgehaltes einer gekühlten Probe erfolgen innerhalb von Tagen (GRASSHOFF 1976). Nährstoffmoleküle, die adsorptiv an den Eiswänden haften, würden ebenfalls die Nährstoffkonzentrationen im ausgeschleuderten Kern heraufsetzen. In der Literatur sind darüber keine Angaben zu finden, so daß diese Möglichkeit nicht weiter behandelt wird.

Bei Eisproben, die vollständig aufgetaut wurden, kann daher nicht ohne Fehler anhand der durch die Salinität vorgegebenen Verdünnungskurve auf die Nährstoffkonzentrationen geschlossen werden, die ursprünglich in der Sole herrschten. Die Größe des Fehlers ist schwer zu schätzen, da er von der Zusammensetzung der Organismengemeinschaft, der Biomasse und den Auftaubedingungen abhängig ist. Die kurze Zeit, die bei der Ausschleudermethode zwischen Probenentnahme und Analyse der Soleprobe liegt, vermindert die Einflüsse durch den Stoffwechsel oder die Inhaltsstoffe von Organismen. Es werden Meßwerte gewonnen, die die Zustände in der Sole direkt beschreiben. Die Verminderung oder Verstärkung der Konzentrationen, die sich durch eine Erwärmung bzw. Abkühlung der Probe vor dem Ausschleudern ergeben, lassen sich mit Hilfe einer präzisen Temperaturmessung der *in-situ* Eistemperatur rechnerisch ausgleichen.

Die Zellzahlen und Chlorophyllgehalte der ausgeschleuderten Sole sind für eine Beschreibung der Zustände in der Sole nicht geeignet. Es konnte aufgrund der hier erhaltenen Daten nicht unterschieden werden, ob sich die Organismen in geschlossenen oder offenen Solckanälchen und -taschen aufhielten. Durch einen Solcstrom, wie er beim Ausschleudern entsteht, wurden die Organismen nicht aus

dem Eis geschwemmt. Lebende Algenzellen zeigen Eigenschaften, die sie stärker als tote Zellen im Eis haften lassen.

Bisherige Arbeiten zur Form und räumlichen Anordnung der Solekanälchen benutzten recht unterschiedliche Methoden, die zu meist von rein physikalischen Fragestellungen herrührten. Genaue Untersuchungen zur Bildung von Solekanälen und den darin stattfindenden Soleflüssen stammen von NIEDRAUER und MARTIN (1979) und EIDE und MARTIN (1975). Sie beobachteten das Eiswachstum in einer schmalen (1.6 mm) Plexiglaskammer, die mit Meerwasser gefüllt und von der Wasseroberfläche her gekühlt wurde. Die kleinsten im gebildeten Eis beobachtbaren Solekanäle hatten Durchmesser von 0.1 mm und Längen von 0.4 mm. Aussagen über die dreidimensionale Anordnung der Solekanäle konnte mit dieser Methode nicht gemacht werden, es wurde auch nur künstlich hergestelltes Eis untersucht. An natürlichem Eis untersuchten WAKATSUCHI und SAITO (1985) die Dichte und Größe der Solekanälchen, wobei sie Schnitte durch Eisproben in polarisiertem Licht betrachteten. Zuvor wurden die kubischen Eisproben (30 cm Kantenlänge) für mehrere Stunden auf Netze gelegt, damit die Sole abfließen konnte. Die Qualität dieser Drainage wurde nicht quantifiziert. Die Durchmesser der Solekanäle, die in dieser Arbeit Betrachtung fanden, lagen in der Größenordnung von Millimetern (keine genauen Angaben in der Veröffentlichung). KAWAMURA (1988) untersuchte mit einem Röntgen-Computer-Tomograph künstlich hergestelltes Eis. Die Auflösung und damit der Durchmesser der kleinsten beschriebenen Solekanälchen betrug 0.8 mm, die Probengröße 14 auf 13 cm. Eine spezielle Drainage der Sole fand nicht statt, die Untersuchungstemperatur wurde nicht angegeben, lediglich, daß die Eisproben zusammen mit Trockeneis gelagert wurden. LAKE UND LEWIS (1970) untersuchten natürliche Eisproben bis zu einer Probengröße von 2,2 · 1,8 · 1,6 m. Die Durchmesser der kleinsten beschriebenen Solekanälchen lagen bei ca. 0,4 mm. Eine Drainage der Solekanäle vor der Untersuchung fand nach der Probenentnahme durch schwerkraftbedingtes Ausfließen der Sole statt. Die Gesamtsalinitäten der Eisproben nach der Drainage schwankten zwischen 0,3 und 4,7 ‰.

Die erwähnten Arbeiten vermitteln ein gutes Bild über die Anordnung und Dichte der Solekanälchen und Soletaschen in einem

Skalenbereich, der von wenigen Metern bis hinunter zu mm abdeckt. Die Feinstruktur der Solekanälchen wird mit den erwähnten Methoden nicht erreicht. Eine Auflösung bei der Betrachtung der Solekanälchen in natürlichem Meereis von μm erreichte SINHA (1977), der die Oberflächen von Eisschnitten abformte und unter dem Elektronenmikroskop untersuchte. Die untersuchten Eisproben wurden unmittelbar nach der Probenentnahme auf $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ tiefgefroren. Die Arbeit gibt Aufschluß über die Form der Solekanäle und -taschen bei Temperaturen unterhalb des eutektischen Punktes von NaCl-Lösungen, d.h. sämtliche in den Kanälen enthaltene Sole war erstarrt. Mit dem gleichen Problem haben alle weiteren Methoden zu kämpfen, die Eisproben verwenden, die unmittelbar nach der Probenentnahme tiefgefroren werden. Die Betrachtung von Dünnschnitten solcher Proben im Durchlicht liefert Angaben über die Porosität der Probe, doch kann daraus nicht auf die *in-situ* Porosität geschlossen werden. EICKEN (1991) bemerkt dazu: "Alle Untersuchungen der Meereisporosität bei tiefen Temperaturen widmen sich in erster Linie dem Porenraum, der durch Flüssigkeitsverlust bei der Probenentnahme bzw. beim Abkühlen der Probe nachträglich mit Luft gefüllt worden ist oder bereits vorher gaserfüllt war".

3.3.4. Zusammenfassung

Die beschriebene Methode des Soleausschleuderns eignet sich gut zur Gewinnung von Sole aus definierten Tiefenstufen im Eis, wobei die horizontale Auflösung abhängig ist vom Volumen, das für weitergehende Analysen benötigt wird und zur Bereitstellung einer fast solefreien Eismatrix, die tiefgefroren werden kann, ohne daß sich die Struktur der Solekanäle ändert. Entscheidend für den Erhalt möglichst unverfälschter Sole war die Temperaturkonstanz der Eiskernabschnitte bis zum Ausschleudern. Durch geeignete Maßnahmen wie Verkürzung der Verarbeitungszeit, Einzelverpackung der Eiskernabschnitte oder gar die Aufbewahrung in einer Temperaturbank bis zum Ausschleudern ließe sich die erzielbare Genauigkeit noch steigern. Bezüglich der Zellzahlen und Chlorophyllgehalte eignet sich das Ausschleudern nicht zur Gewinnung einer für das gesamte Solevolumen repräsentativen Probe. Die Eisausgußmethode lieferte einen dreidimensionalen Abguß der soleerfüllten Hohlräume, der zeitlich und thermisch stabil war und

Analysemethoden zuließ, die an den unverarbeiteten Eisproben nicht möglich wären. Die Porosität einer Eisprobe wurde mit einer hohen Auflösung bei gleichzeitiger Erhaltung der dreidimensionalen Anordnung wiedergegeben. Die räumlichen Ausdehnungen der Solekanäle wurden in einem Zustand erfaßt, der den Verhältnissen *in-situ* nahe kommt. Die Auflösung reicht nach unten bis in den μ -Bereich, nach oben sind die Grenzen in der Handhabbarkeit der Eisproben bedingt, im gegebenen Falle lag sie bei einigen Zentimetern.

4. Die Expedition ANT 9/3

4.1. Material und Methoden

4.1.1. Die Eisstationen

Die Eiskerne der Expedition ANT 9/3 stammten aus dem schelfeis-nahen Gebiet im östlichen und südöstlichen Weddelmeer (Stationen 14-33), bzw. von einem Schnitt der zur Polarsternkuppe führte (Stationen 37-42).

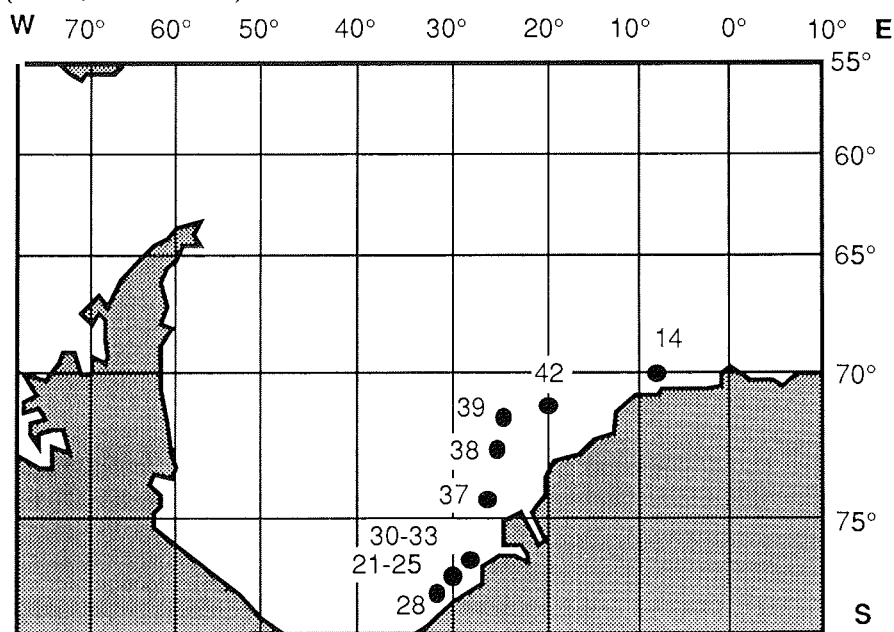


Abb. 29: Eisstationskarte der Expedition ANT 9/3. An den Dauerstationen 21-25 und 30-33 lag das Schiff im Packeis fest, und driftete mit dem Packeis leicht in südwestliche Richtung.

4.1.2. Probenentnahme im Freiland

Die Probenentnahme im Freiland und die anschließenden Messungen, sofern sie im folgenden nicht aufgeführt werden, wurden nach dem gleichen Schema wie es in den Kapiteln 2 und 3.1 beschrieben ist, durchgeführt. Da das Eis sehr warm, großporig und im Auftauen begriffen war, wurden die Eiskerne, die zum Ausschleudern verwendet wurden, in 5 cm lange Abschnitte zerteilt. Vorversuche ergaben, daß der relative Anteil an ausschleuderbarer Sole durch diese Veränderung nicht beeinträchtigt wurde.

4.1.3. Lichtmessungen

Zusätzlich zu den Lichtmessungen im Eis, wurde die eingestrahelte PAR mit der 2π -Sonde an Deck des Schiffes über mehrere Tage hinweg gemessen. Die 2π -Sonde war dazu an einem 1 m langen Mast auf dem Peildeck (ca. 17 m über dem Meeresspiegel) befestigt. Mit einem Datalogger (LIQUOR LI1000) wurden kontinuierlich die über 10 min gemittelten Werte aufgezeichnet.

4.2. Ergebnisse

4.2.1. Die Eissituation

Die Expedition ANT 9/3, die im antarktischen Hochsommer durchgeführt wurde, erreichte am 12.1.91 die Eisgrenze bei 68° S. Nach einer Fahrt durch älteres Packeis wurde die Küstenpolynya erreicht, die eine Fahrt im offenen Wasser oder leichtem Packeis bis 75° S ermöglichte. Danach geriet das Schiff in stark gepreßtes, aus sehr unterschiedlichen Schollen bestehendes Eis, das ein weiteres Fortkommen nicht ermöglichte. Das ursprüngliche Fahrtziel im südwestlichen Weddellmeer wurde daraufhin aufgegeben und ein Ersatzprogramm durchgeführt, das ins fast eisfreie östliche Weddellmeer und die anschließende Lazarevsee führte. Während des 20-tägigen Aufenthaltes im Packeis konnten aus 15 verschiedenen Schollen mit einer mittleren Dicke von $1,6 \pm 0,4$ m Eiskerne gewonnen werden. Das Packeis war sehr heterogen zusammengesetzt, wenige dickere und größere Schollen lagen verstreut in völlig zerschlagenen Schollenbruchstücken ("porridge ice").

4.2.2. Eistemperaturen

Die über 15 Kerne gemittelte Temperaturkurve während der Expedition ANT 9/3 verlief fast gerade, mit -2°C an der Oberfläche und $-1,8^\circ\text{C}$ an der Unterseite der Scholle (Abb. 30). Die an den einzelnen Kernen gemessenen Temperaturkurven verliefen in 6 Fällen gerade (02001; 02301; 02501; 03201; 03202; 03701). In 4 Fällen war die Oberflächentemperatur geringer (02801; 02802; 03001; 03301). An insgesamt 5 Kernen ließen sich in den oberen Horizonten Temperaturen messen, die deutlich oberhalb des Gefrierpunktes von Meerwasser lagen.

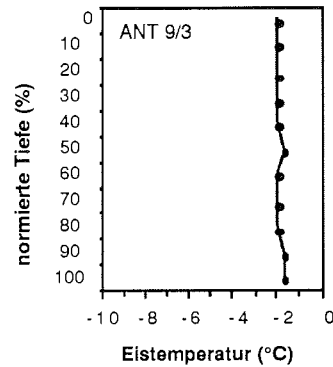


Abb. 30: Die mittleren Eiskerntemperaturen gegen die normierte Tiefe.

In Abb. 31 sind exemplarisch zwei solche Profile gezeigt. Die höchsten Temperaturen wurden entweder direkt an der Oberfläche gemessen (Kern 03901) oder dicht darunter (Kern 03801). Die Temperaturprofile der Kerne 01401, 02101 und 04201 zeigten ebenfalls an oder dicht unter der Oberfläche die höchsten Temperaturen. Bei allen Temperaturprofilen lag die Lufttemperatur deutlich unterhalb der kältesten im Eis gemessenen Temperaturen.

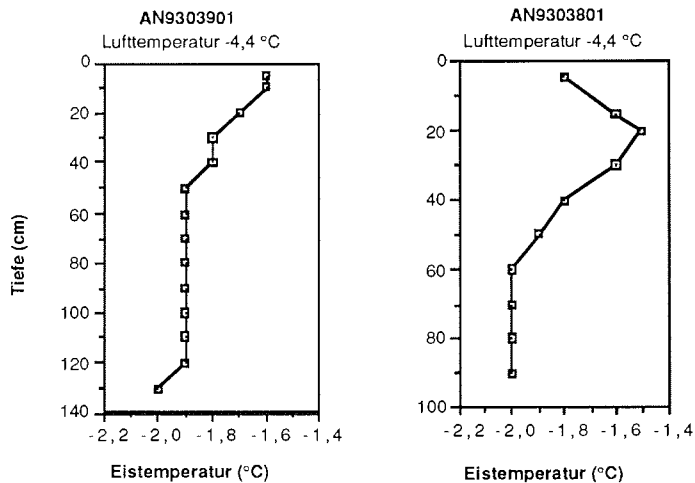


Abb. 31: Eistemperatur gegen die Tiefe zweier Eiskerne mit erhöhten Temperaturen nahe der Oberfläche.

4.2.3. Nährstoffe

Die Nährsalzkonzentrationen in den Solekanälchen der 12 genauer untersuchten Kerne sind den Graphiken im Anhang (Abb. A5 bis A9) zu entnehmen. Durch die verschiedene Skalierungen sind die Graphiken der einzelnen Kerne nicht direkt vergleichbar. Die Nährsalze, pH-Werte und Salinitäten beziehen sich jeweils auf die Sole. Die Chlorophyllkonzentrationen sind Gesamtkonzentrationen der aufgetauten Eiskernabschnitte.

In Abb. 32 und 33, in denen die Chlorophyllkonzentrationen und die auf einen Salzgehalt von 34 ‰ normierten Nährsalzkonzentrationen (gekennzeichnet durch ein n vor dem jeweiligen Nährsalz der Skalenbeschriftung) angegeben sind, wurden für alle Kerne die gleiche Skalierungen verwendet. Die Mittelwerte (Tab. 8) zeigten, daß die Salinitäten der Sole unter der von Meerwasser lagen, ein deutliches Zeichen für Tauprozesse innerhalb des Eises. Nur bei zwei (02803 und 02914) der insgesamt 12 untersuchten Kerne stiegen die Solesalinitäten über 34 ‰ an. Stickstoff lag zu etwa gleichen Teilen als Nitrat und Ammonium vor. Der Nitritanteil betrug weniger als 5 % der Summe aus NO₂ und NO₃.

Tab. 8: Mediane und Bereiche der Nährsalzkonzentrationen, des pH-Wertes und der Salinitäten der Sole aus 12 Kernen, n = Anzahl der Proben, I₈₀ = der Interdezilbereich der 80 % der Messwerte enthält (SACHS 1984).

	Mittlere Konzentration in der Sole	Min.	Max.	I ₈₀	n
	(µmol/l)	(µmol/l)	(µmol/l)	(µmol/l)	
NO ₂	0,2	0,1	3,3	0,1-0,6	143
NO ₃	5,3	0,6	35,8	1,2-20,8	143
NH ₄	5,0	1,6	10,6	2,5-7,5	46
PO ₄	2,0	0,4	11,7	0,7-4,2	143
Si	21,2	1,2	100,0	3,9-51,8	138
pH	8,51	7,02	10,39	7,86-8,98	145
Sal	27,5 ‰	17,4 ‰	41,2 ‰	23,1-37,2 ‰	145

Die Normierung der Nährstoffkonzentrationen in der Sole auf einen Salzgehalt von 34 ‰ schloß momentane Temperatureffekte aus und erlaubten einen Vergleich der Daten der Eiskerne (DIECKMANN et al. 1991). Die normierten Nährsalzprofile von Schollen bis zu einem Meter Dicke (Abb. 33) verliefen meist mehr oder weniger gerade, keiner der Nährstoffe war in einem Horizont besonders konzentriert oder fehlte vollständig. Die Kerne 2105, 4207 sowie 4305 hatten

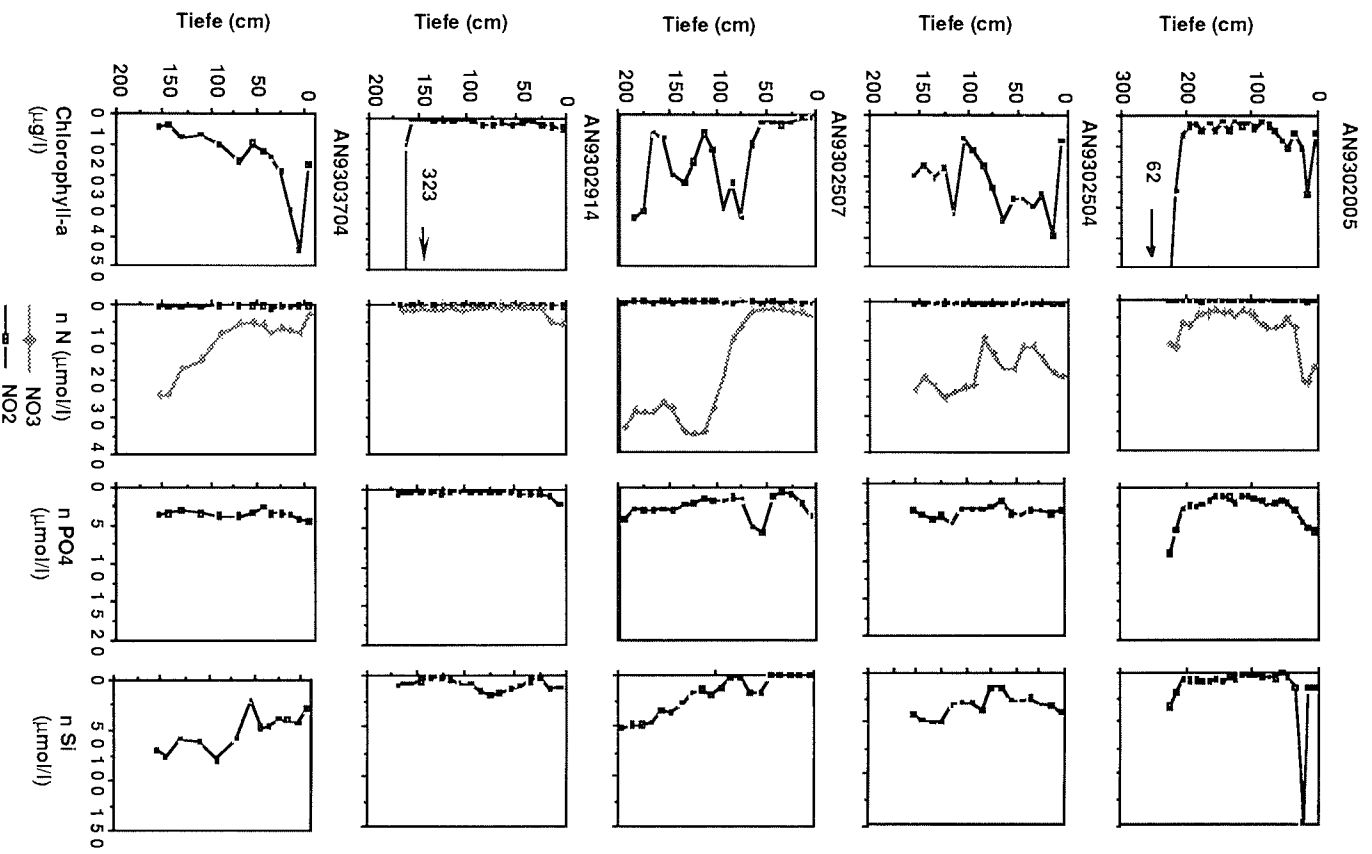


Abb. 32: Die auf 34 ‰ Salzgehalt normierten Nährsalzkonzentrationen in der Sole sowie die Gesamtchlorophyllkonzentration der Kerne mit einer Gesamtlänge größer 1m.

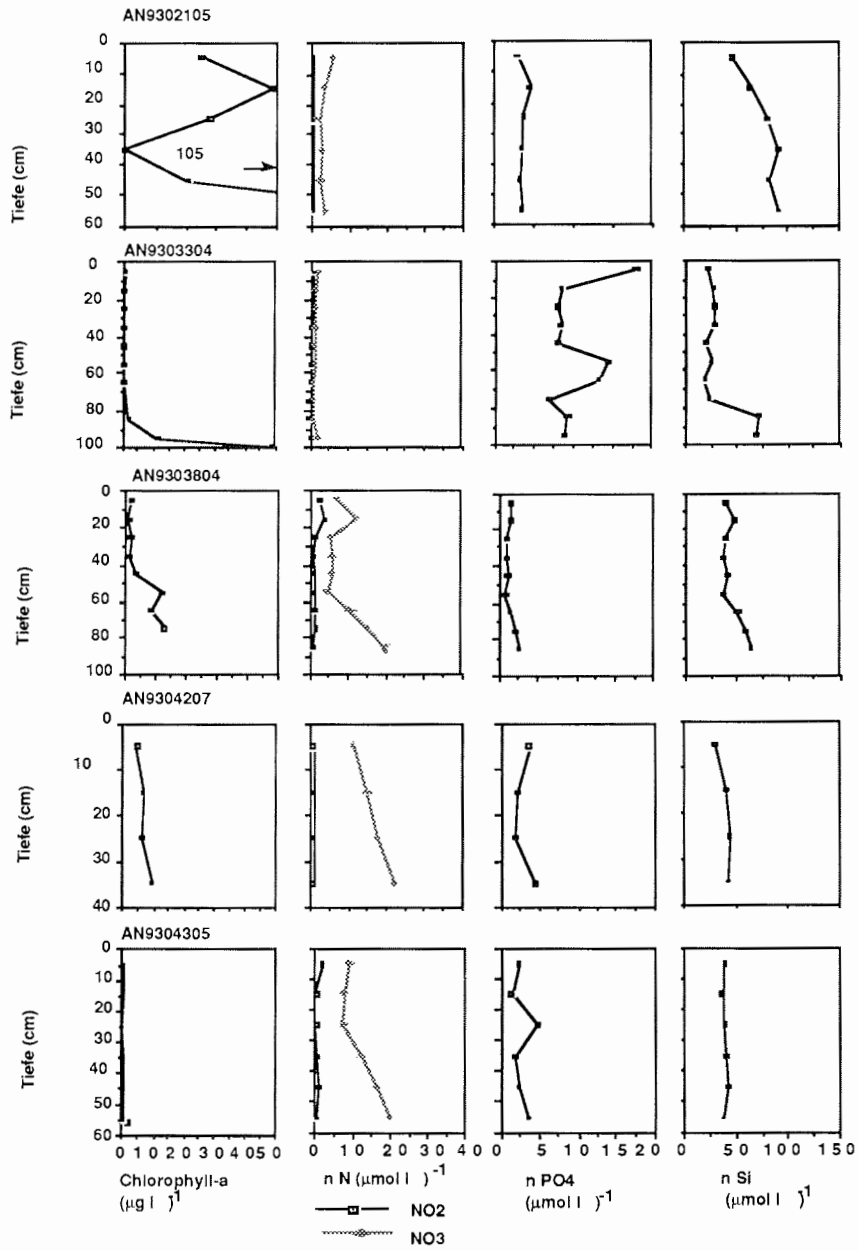


Abb. 33: Die auf 34 ‰ Salzgehalt normierten Nährsalzkonzentrationen in der Sole, sowie die Gesamtchlorophyllgehalte der Kerne mit einer Gesamtlänge kleiner 1 m.

stark schwankende bzw. gleichförmige Chlorophyllkurven mit unterschiedlichen Konzentrationen bei sehr ähnlichen Nährsalzprofilen. In den dickeren Schollen waren die Nährsalzprofile ungleichmäßiger. Im Kern 2914 lagen fast alle Nährsalze in gleichmäßig geringen Konzentrationen vor, während bei den restlichen langen Kernen zu mindest einer der gemessenen Nährstoffe im oberen oder unteren Bereich verstärkt oder mit internen Minima oder Maxima auftrat.

Tab. 9: Mittelwerte und Bereiche der auf 34 ‰ normierten Nährsalzkonzentrationen in der Sole sowie der weiteren direkt an der Sole gemessenen Parameter. Für Nährsalze, pH, Solesalinität und Gesamtchlorophyllgehalt wurde der Median mit den jeweiligen 95% Vertrauensbereichen, für die Gesamtsalinitäten das gewogene Mittel und die Standardabweichung verwendet.

Kern	n NO ₂ ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	n NO ₃ ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	n NH ₄ ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	n PO ₄ ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	n Si ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	pH	S _{So} (‰)	S _{GE} (‰)	Chl _{GE} ($\mu\text{g l}^{-1}$)
2005	0,29 ± 0,03 (0,16-0,46)	6,4 ± 2,4 (2,8-21,8)	9,7 ± 1,3 (5,7-15,9)	2,2 ± 0,8 (1,3-8,7)	6,5 ± 12,9 (1,5-147,2)	8,91 ± 0,2 (8,08-10,39)	24,7 ± 1,2 (17,4-24,5)	--	4,5 ± 5,7 (1,3-62,7)
2105	0,34 ± 0,07 (0,26-0,40)	2,9 ± 1,3 (2,1-5,5)	--	3,5 ± 0,6 (2,9-4,4)	80,7 ± 18,2 (47,0-91,2)	8,58 ± 0,07 (8,54-8,71)	23,3 ± 1,8 (21,7-26,7)	--	28,2 ± 43,0 (20,8-105,7)
2504	0,30 ± 0,03 (0,23-0,43)	19,3 ± 2,6 (9,4-25,3)	--	3,5 ± 0,3 (2,3-5,0)	32 ± 5,5 (14,9-48,7)	7,99 ± 0,07 (7,73-8,19)	26,4 ± 0,6 (24,2-28,3)	6,7 ± 1,0 (4,7-9,0)	22,2 ± 5,0 (7,6-39,3)
2507	0,14 ± 0,02 (0,10-0,33)	23,2 ± 6,5 (2,7-35,2)	--	2,2 ± 0,6 (0,9-5,8)	18,6 ± 9,3 (2,4-32,3)	8,07 ± 0,1 (7,83-8,64)	27,6 ± 0,5 (24,9-28,9)	6,9 ± 1,5 (4,9-10,6)	9,8 ± 5,8 (0,8-33,4)
2803	0,19 ± 0,07 (0,16-0,25)	5,5 ± 4,1 (3,8-9,7)	--	1,3 ± 0,9 (0,8-2,2)	9,8 ± 9,8 (8,2-21,3)	8,92 ± 0,2 (8,73-8,97)	31,9 ± 4,8 (29,8-36,0)	5,5 ± 0,2 (5,4-5,6)	7,3 ± 345 (2,9-440,2)
2914	0,12 ± 0,04 (0,07-0,13)	1,2 ± 0,6 (0,6-5,1)	--	0,45 ± 0,2 (0,4-1,8)	7,5 ± 2,6 (2,1-20,0)	8,81 ± 0,18 (7,44-9,02)	38,5 ± 0,9 (34,4-41,2)	5,0 ± 2,0 (3,0-10,6)	2,1 ± 37,7 (0,6-324,0)
3304	0,22 ± 0,26 (0,11-1,00)	1,2 ± 0,3 (0,9-2,3)	--	8,7 ± 2,6 (7,7-18,1)	24,6 ± 14,2 (17,0-70,1)	9,35 ± 0,14 (8,83-9,51)	23,9 ± 1,0 (20,9-26,2)	4,5 ± 2,3 (2,6-10,4)	0,4 ± 9,9 (0,1-39,0)
3704	0,46 ± 0,13 (0,26-1,06)	7,5 ± 4,4 (2,5-24,3)	--	3,5 ± 0,2 (2,5-4,5)	47,1 ± 11,0 (19,3-80,1)	8,16 ± 1,5 (8,07-8,90)	30,7 ± 1,5 (24,2-32,2)	4,4 ± 2,3 (2,0-10,0)	11,8 ± 6,9 (3,6-44,5)
3804	1,32 ± 0,80 (0,97-4,11)	8,0 ± 4,2 (5,0-20,3)	3,7 ± 1,0 (3,0-7,0)	1,4 ± 0,4 (0,9-2,6)	39,4 ± 7,6 (35,4-62,3)	8,58 ± 0,1 (8,34-8,74)	29,1 ± 1,3 (26,8-31,5)	5,8 ± 0,9 (4,4-6,9)	2,9 ± 4,1 (1,1-12,9)
3905	0,24 ± 0,06 (0,17-0,54)	7,0 ± 5,9 (4,5-38,3)	5,3 ± 0,8 (3,4-8,0)	2,2 ± 0,7 (0,0-4,0)	30,3 ± 10,3 (15,8-76,0)	8,51 ± 0,2 (7,04-8,82)	30,8 ± 1,2 (25,4-33,7)	4,1 ± 1,6 (0,3-6,5)	2,2 ± 2,7 (0,1-17,7)
4207	0,68 ± 0,13 (0,46-0,64)	16,2 ± 7,6 (10,9-22,2)	2,2 ± 0,9 (1,6-2,9)	3,0 ± 1,9 (1,8-4,5)	41,0 ± 9,6 (29,7-42,6)	8,24 ± 0,6 (7,75-8,58)	31,1 ± 3,2 (28,9-33,6)	5,4 ± 0,6 (4,6-6,1)	6,3 ± 3,4 (4,6-9,6)
4305	0,76 ± 0,73 (0,58-2,35)	11,8 ± 5,2 (8,1-20,2)	--	2,4 ± 1,2 (1,5-4,7)	38,0 ± 9,6 (35,5-42,2)	7,79 ± 0,3 (7,02-7,88)	23,1 ± 1,5 (20,4-25,0)	4,8 ± 1,1 (3,6-6,6)	0,2 ± 0,7 (0,1-2,3)

Anhand der normierten Nährstoffkonzentrationen in der Sole ließen sich die Kerne kaum bestimmten Gruppen zuordnen. Die Gesamtlänge der Kerne und die jeweils zugehörigen Profile erlaubten eine gewisse unscharfe Trennung. Die Silikatkonzentrationen sanken nur in den Kernen, die länger als 1 m waren, in einigen Tiefen unter $15 \mu\text{mol l}^{-1}$ bzw. unter die Nachweisgrenze. Die höchsten normierten Silikatkonzentrationen wurden in den Schollen mit einer Gesamtmächtigkeit geringer als 1 m gemessen. Kern 3704, der eine hohe

Silikatkonzentration aufwies, war länger als 1 m, bestand aber aus mehreren übereinandergeschobenen Eisschollen. Die Gesamtkonzentrationen von Nitrit, Nitrat sowie Phosphat unterschieden sich zwischen langen und kurzen Kernen nicht. Die Schwankungen innerhalb der Profile waren bei den Kernen länger als 1 m meist größer. Die kurzen Kerne zeigten eher ausgeglichene Profile. Alle Nährsalze sowie pH-Werte, Gesamtsalinitäten und Chlorophyllgehalte zeigten keine bestimmten Korrelationen untereinander oder zu anderen gemessenen Parametern.

An Kern 4207 wurden die Nährsalze auch an den ausgeschleuderten und anschließend aufgetauten Eiskernabschnitten bestimmt. Silikat war in diesen Proben unterhalb der Nachweisgrenze, die Konzentrationen der anderen Nährsalze (Tab. 10) lagen unterhalb von 10 % der Konzentrationen in der Sole.

Tab. 10: Nährstoffkonzentrationen (nicht normiert) in der ausgeschleuderten Sole und den ausgeschleuderten und aufgetauten Eiskernabschnitten des Kernes 4207.

Tiefe (cm)	NO ₃		NO ₂		Si		PO ₄	
	(μmol l ⁻¹)		(μmol l ⁻¹)		(μmol l ⁻¹)		(μmol l ⁻¹)	
	Sole	Kern	Sole	Kern	Sole	Kern	Sole	Kern
0-10	9,2	0,9	0,5	0,6	25,1	0,0	3,1	0,9
10-20	13,4	1,1	0,6	0,1	36,2	0,0	2,1	0,7
20-30	17,73	1,1	0,5	0,1	42,4	0,0	1,8	0,4
30-40	20,54	0,7	0,6	0,1	38,62	0,0	4,18	0,5

Die Salinität in dem ausgeschleuderten und aufgetauten Kern betrug 2,2% der Salinität in der Sole. Bei einer Gleichverteilung der Nährsalze und des Chlorophylls in Sole und eingeschlossener Sole, müßten sich die jeweiligen Konzentrationen in Sole und ausgeschleudertem Kern im gleichen Verhältnis zueinander verhalten. Vorausgesetzt wird dabei, daß sich die Nährsalze und der Chlorophyllgehalt beim Auftauen nicht ändern und die Salinität in ausgeschleuderter und eingeschlossener Sole dieselbe ist (siehe Diskussion). In Abb. 34 sind die Quotienten aus den Konzentrationen im Kern und in der Sole zur Tiefe aufgetragen. Für Silikat konnte kein Verhältnis angegeben werden, da seine Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze lagen. Nitrit und Nitrat, Phosphat und Chlorophyll folgten nicht der durch die Salinität vorgegebenen Kurve. Die über alle Tiefen gemittelten Quotienten zwischen Konzentration in der Sole und im ausgeschleuderten Kern lagen für

Chlorophyll bei 0,65 für Phosphat bei 0,25 und für Nitrit und Nitrat bei 0,08. So lagen nur die Quotienten für Nitrit + Nitrat innerhalb der gleichen Größenordnung wie die Quotienten der Salinität (0,02).

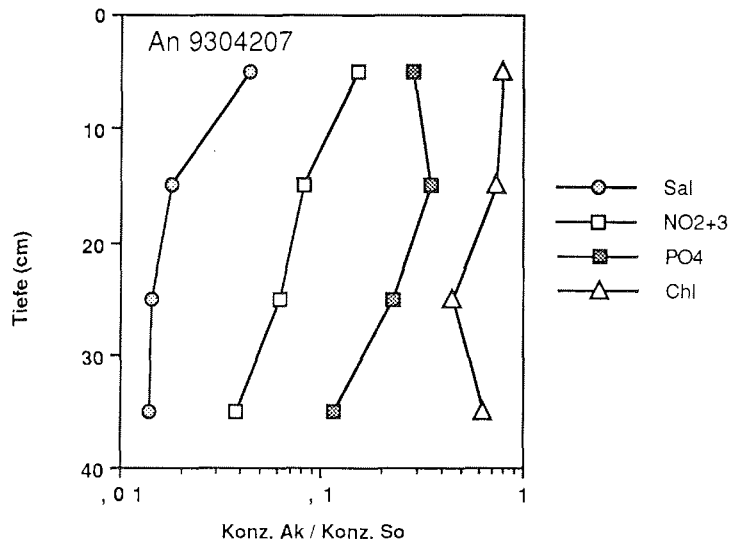


Abb. 34: Nährstoff-, Salinitäts- und Chlorophyllverhältnisse von ausgeschleudertem Kern zu Sole gegen die Tiefe. Silikat lag im ausgeschleuderten Kern unterhalb der Nachweisgrenze.

4.2.4. Lichtklima

Da die Lichtmengen während verschiedener Tageszeiten und Wetterbedingungen gemessen wurden, waren die Absolutwerte wenig aussagekräftig. Daher wurden die Ergebnisse der Lichtmessungen im Eis als relative PAR angegeben. Aus der eingestrahelten Lichtmenge und der an einem Ort im Eis oder Wasser gemessenen Lichtstärke läßt sich durch Division die relative PAR errechnen. Sie gibt an, welcher Anteil der eingestrahelten Lichtmenge an einem bestimmten Ort zur Verfügung steht. Während ANT 9/3 wurde im Gegensatz zu ANT 8/2 simultan zu den Messungen im Eis und der darunterliegenden Wassersäule die eingestrahelte Lichtmenge auf der Oberfläche der Scholle gemessen. Die relative PAR ließ sich für jede Messung direkt errechnen. Es zeigte sich aber, daß die Schwankungen der eingestrahelten Lichtmenge während der ca. 10 min dauernden Messung sehr gering waren. Aus den Lichtmessungen der Expedition ANT 8/2, bei denen stets vor der Messung im Eis und Wasser eine Messung der eingestrahelten Lichtstärke stattfand, wurde daher auch

die relative PAR errechnet.

Die Auswertung von 36 an unterschiedlichen Schollen gemessenen Lichtprofilen der Expedition ANT 8/2 ließ eine Abhängigkeit zwischen der Schneeauflage und dem relativen Anteil an PAR erkennen (Tab. 11). In Tiefen bis 1 m war die relative PAR negativ signifikant mit der Schneeauflage korreliert (Spearmann-Rang-Korrelation). In den darunter liegenden Tiefen bis 1,75 m lag ebenfalls eine negative Korrelation vor, doch erlaubt die geringe Zahl der Meßwerte keine Aussage über deren Signifikanz. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Werte, die unterhalb der Eisunterseite lagen, ergeben sich für sämtliche Tiefenstufen bis zu 2 m signifikante negative Korrelationen zu den Schneeauflagen (Tab. 12).

Tab. 11: Spearmansche Rang-Korrelation zwischen relativer PAR und Schneeauflage, jeweils für die einzelnen Tiefen im Eis, in denen gemessen wurde. Es wurden nur Meßwerte berücksichtigt, die innerhalb der Eisschollen lagen. Die fett gedruckten Korrelationskoeffizienten (Rho) gelten auf dem jeweiligen Vertrauensniveau (p) als signifikant (Sachs 1984). n = Anzahl der Messungen.

Tiefe (cm)	Rho	p	n
25	-0,377	0,0258	36
50	-0,665	0,0002	33
75	-0,617	0,0262	14
100	-0,738	0,0508	8
125	-0,371	0,4062	6
150	-1	0,083	4
175	-1	0,3173	2

Tab. 12: Korrelation zwischen Schneeauflage und relativer PAR je Tiefenstufe unter Berücksichtigung aller gemessenen Werte bis 2 m, auch wenn sie nicht mehr innerhalb des Eises lagen. (Symbole siehe Tabelle 11).

Tiefe (cm)	Rho	p	n
25	-0,377	0,0258	36
50	-0,677	0,0001	36
75	-0,622	0,0008	30
100	-0,744	0,0001	36
125	-0,718	0,0001	30
150	-0,766	0,0001	36
175	-0,661	0,0004	30
200	-0,691	0,0001	36

Die Einteilung der Lichtmeßwerte nach der Höhe der Schneeauflagen in Gruppen zeigte den Einfluß der Schneeauflage deutlicher (Abb. 35). Zusammengefaßt wurden die Meßwerte aus Schollen mit

einer Schneeauflage geringer als 10 cm (Gruppe A, N = 17), zwischen 10 und 50 cm (Gruppe B, N = 14) und mehr als 50 cm (Gruppe C, N = 5). Verwendet wurden alle Meßwerte bis 2 m Tiefe, auch wenn sie nicht mehr innerhalb der Eisscholle gemessen wurden. Die Mittelwerte (Median) auf dem 95 % Signifikanzniveau waren für die Gruppen < 10 cm und > 50 cm signifikant verschieden. Eine Ausnahme bildete nur der oberste Wert bei 25 cm Tiefe. Auf dem 95 % Vertrauensniveau war die Gruppe 10-50 cm zu keiner der beiden anderen Gruppen signifikant verschieden. Die Eisschollen mit mehr als 50 cm Schneeauflage waren deutlich dicker als die der Gruppen A und B (Tab. 13).

Tab. 13: Mittelwerte (Median) und Vertrauensbereiche (t) der Schnee- und Eisdicken der gewählten Gruppen mit A <10 cm, B 10-50 cm und C > 50 cm Schneeauflage, n= Anzahl der Messungen.

Gruppe	Eisdicke (m)	Schneeauflage (m)	t 95% (±)	min (m)	max (m)	n
A	0,48		0,14	0,21	1,7	21
A		0,05	0,008	0,02	0,08	21
B	0,65		0,17	0,4	1,52	14
B		0,18	0,06	0,12	0,47	14
C	1,40		0,51	0,85	2,0	5
C		0,63	0,07	0,62	0,75	5

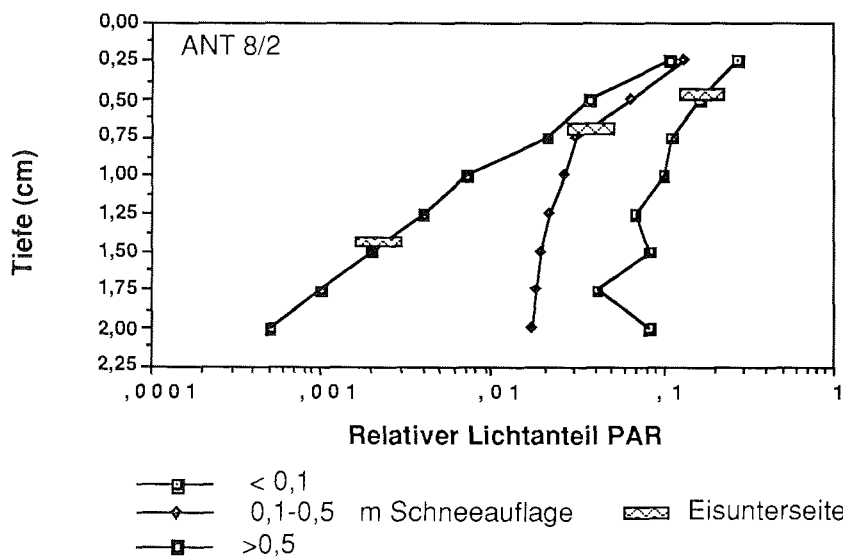


Abb. 35: Die relative PAR innerhalb und unterhalb des Eises in Abhängigkeit von der Schneeauflage. Die Lage der jeweiligen Eisunterseiten ist Tab. 13 entnommen. Es wurden nur Daten von ANT 8/2 verwendet.

Die maximale Schneedicke während der Expedition ANT 9/3 betrug 45 cm, daher wurden die Lichtwerte nur in zwei Gruppen eingeteilt. In der Gruppe mit Schneeauflagen < 10 cm wurden 5 Profile gemessen. Die Eisschollen, aus denen diese Profile stammen, hatten eine mittlere Schneedicke von $0,014 \pm 0,020$ m, bei einer mittleren Eisdicke von $1,72 \pm 0,18$ m. In der Gruppe mit Schneeauflagen von > 10 cm wurden 9 Profile mit mittleren Schneedicken von $0,43 \pm 0,07$ m und Eisdicken von $1,54 \pm 0,38$ m gemessen. Durch das Entfernen einer 40 cm dicken Schneeauflage über einer 1,40 m mächtigen Scholle (AN93029), ließ sich die relative PAR innerhalb des Eises in allen Tiefen um den Faktor 10 steigern (Abb. 36). Die Lichtprofilmessungen an der Scholle AN93023 und 24 führten zu den gleichen Ergebnissen. Die zu einer späteren Tageszeit wiederholten Messungen an der Scholle AN93029 zeigten, daß der Unterschied zwischen schneebedeckter und freigeschaufelter Fläche stark tageszeitabhängig war (Abb. 37). Die eintreffende PAR betrug um 12 Uhr $798 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, um 19 Uhr $530 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. (Zeiten in UTC, Ortszeit \sim UTC + 2 h).

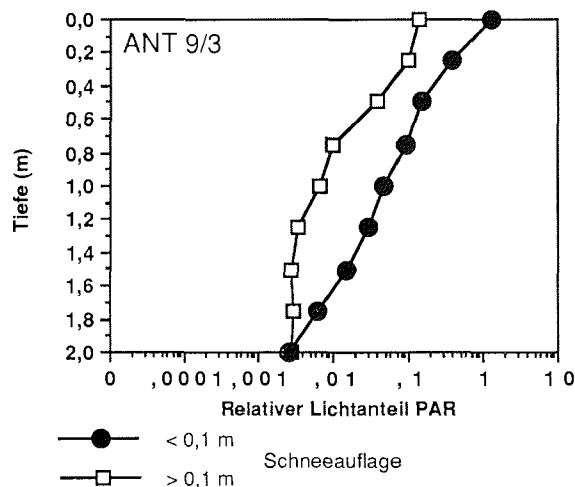


Abb. 36: Die relative PAR innerhalb und unterhalb des Eises in Abhängigkeit von der Schneeauflage. Verwendet wurden nur Daten der Expedition ANT 9/3.

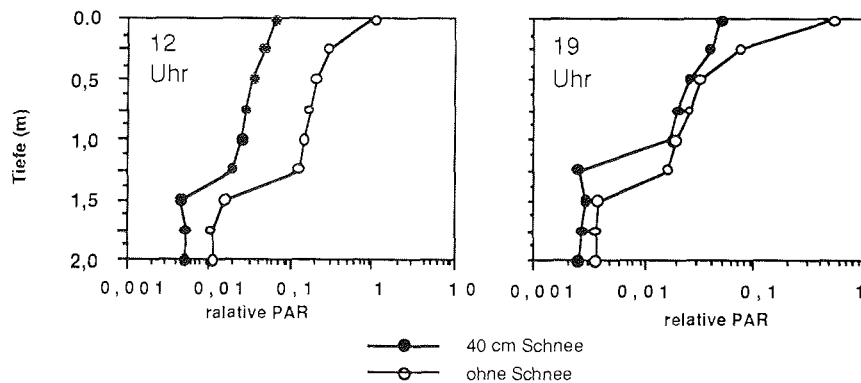


Abb. 37: Die Steigerung der relativen PAR durch Entfernen der Schneeeauflage bei unterschiedlicher Tageszeit (UTC).

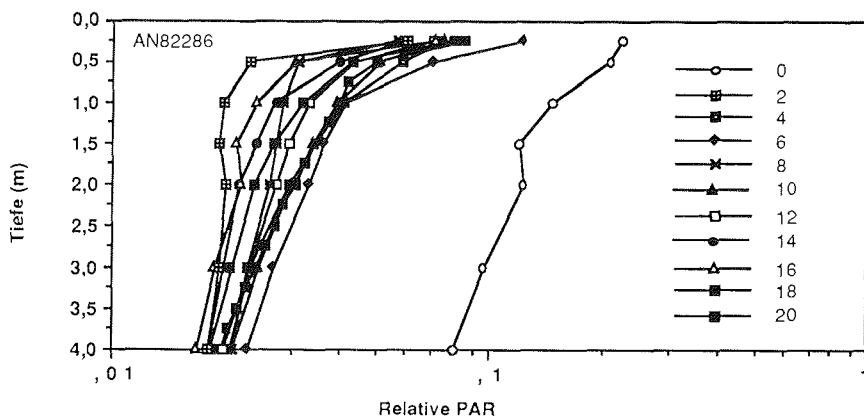


Abb. 38: Lichtprofile innerhalb und unterhalb des Eises in unterschiedlichem Abstand vom Schollenrand. Die Legende gibt den Abstand in Metern an. Die Einstrahlung betrug $2250 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Die seitlich an Schollenrändern eindringende PAR war in den untersuchten Größenordnungen unerheblich. Die Lichtstärken innerhalb des Eises waren schon in zwei Metern Entfernung vom Schollenrand nicht von den Lichtstärken zu unterscheiden, die in größerem Abstand zum Schollenrand gemessen wurden (Abb. 38). Die Eisdicke der untersuchten Scholle schwankte zwischen 40 und 48 cm, die Schneeeauflagen zwischen 2 und 5 cm. Die Lichtprofile und die unterschiedlichen Eisdicken und Schneeeauflagen standen in keinem erkennbaren Verhältnis zueinander.

Das Lichtklima unterhalb einer Scholle war ebenfalls von Eisdicke und Schneebedeckung abhängig. Eine freigeschaufelte Fläche von 25 m^2 in einer ansonsten 40 cm dicken Schneeschicht über einer 1,4

m mächtigen Eisscholle erhöhte noch bis in eine Tiefe von 8 m die relative PAR (Abb. 39). Eine Wake (offenes Wasser zwischen Eisschollen) von ca. 10 m Breite erhöhte die relative PAR noch in einer Tiefe von 25 m um das Doppelte (Abb. 40).

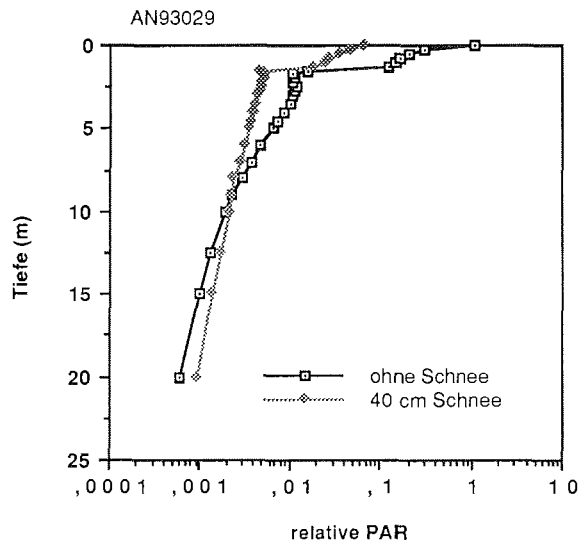


Abb. 39: Relative PAR gegen die Tiefe, vor und nach dem Entfernen des Schnees.

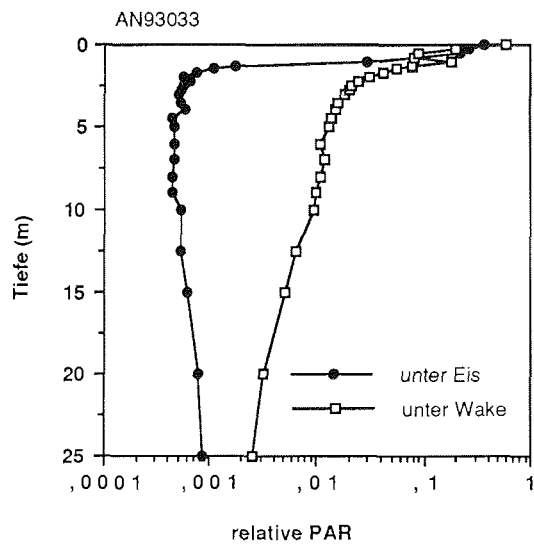


Abb. 40: Relative PAR in Eis und Wasser. Die Messungen unterhalb der Eisscholle erfolgten ca. 50 m vom Schollenrand entfernt, die unterhalb der Wake vom Rand der Scholle aus.

Die während der Expedition ANT 8/2 mit der 2π -Sonde gemessene Einstrahlung erlaubte keine Aussage über die im Laufe eines gesamten Tages einfallende PAR. In Tabelle A1 (Anhang) ist die Einstrahlung, die an den einzelnen Stationen gemessen wurde, zusammen mit den Positionen und Uhrzeiten, aufgelistet. Das arithmetische Mittel über alle Messungen betrug $526 \pm 258 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Die während der Expedition ANT 9/3 über längere Zeiträume aufgezeichnete eingestrahelte PAR ist in Abb. 41 exemplarisch für drei Zeiträume im Januar, Februar und März dargestellt. Im Januar machte sich deutlich der Einfluß der Mitternachtssonne erkennbar. Um 0 Uhr Ortszeit waren noch Einstrahlungswerte von $20 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ meßbar. Die über die 9 Tage (14.- 20. 24. 25). gemittelte Einstrahlung im Januar betrug $427 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Ende Februar war mitternachts keine PAR mehr meßbar. Der starke Rückgang der Tagesmittelwerte vom 20.2 bis 23.2 war auf den Durchzug eines Tiefdruckgebietes zurückzuführen. Die über die 9 Tage (15.-20. 24. 25. 31.) im Februar gemittelte PAR betrug $217 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Die gesamte eingestrahelte PAR nahm im März noch weiter ab, über 7 Tage (1.-5. 14. 15.) gemittelt ergaben sich $171 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

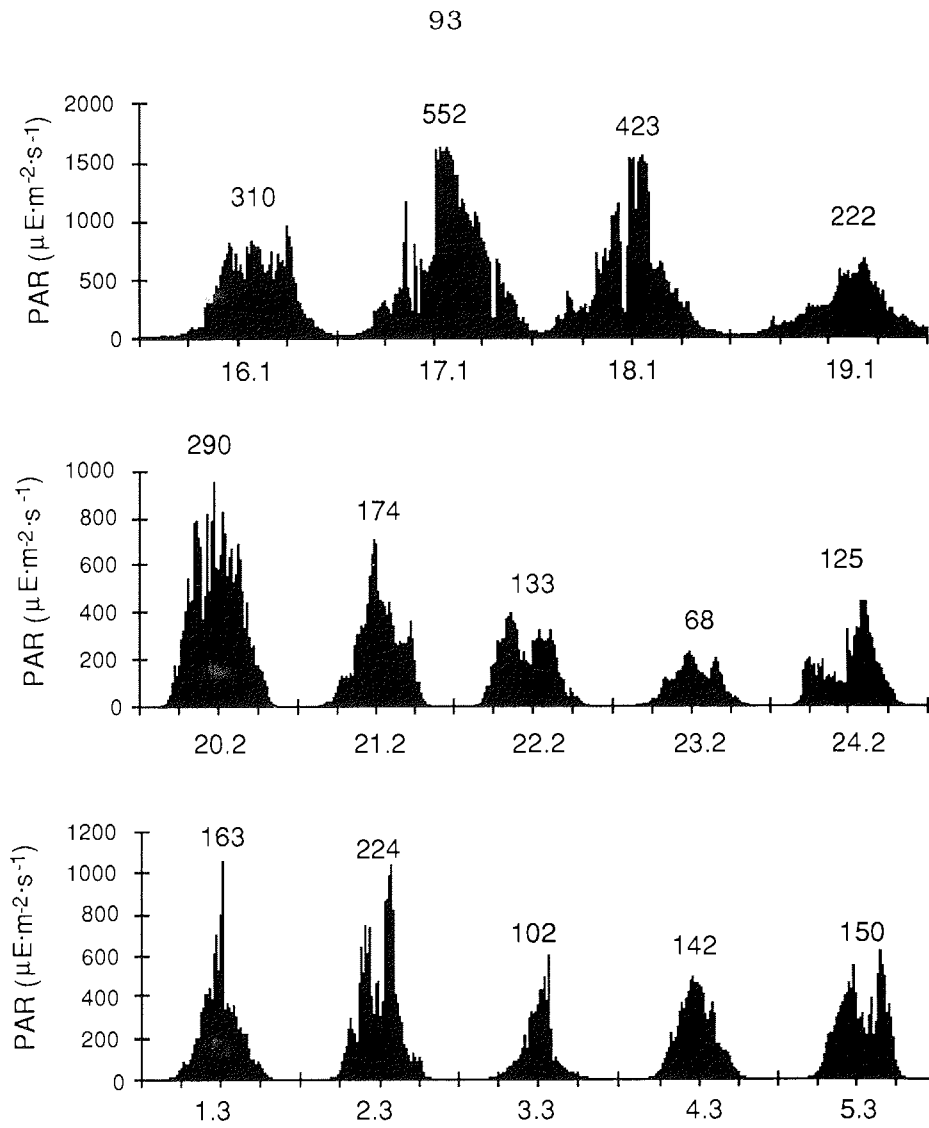


Abb. 41: PAR -Einstrahlung im Tagesverlauf für Tage im Januar, Februar und März. Die Zahlen über den Kurven sind die über 24 h berechneten arithmetischen Mittelwerte in $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Der für Eisalgen geltende Lichtkompensationspunkt von 0,1 % PAR (SULLIVAN et al. 1985) wurde bei allen Messungen an der Unterseite der Schollen noch erreicht. Sinnvoller ist es, die absolute Lichtstärke, bei der Wachstum noch möglich ist mit $1 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (BUNT 1964 b) anzusetzen. Um diesen Wert an der Unterseite der Scholle zu erreichen, muß die eingestrahelte Lichtmenge je nach Eisdicke und Schneeeauflage zwischen 100 und $500 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ betragen. Auch dieser Wert wurde mit einer Ausnahme (AN 82255) an der Unterseite der Schollen noch erreicht. Für wieviele Stunden pro Tag und mit welchen Beträgen dieser Wert überschritten wurde, läßt sich für die Wintersituation (ANT 8/2) nicht zeigen, da die einfallenden PAR nicht kontinuierlich erfaßt wurde. An der Unterseite des im Mittel sehr dicken Eises (1,7 m), das während der Expedition ANT 9/3 angetroffen wurde, betrug die PAR nur bei eingestrahelten Lichtmengen von mehr als $500 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mehr als $1 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Im Januar war das für 12 h der Fall, im Februar für 8 h und im März für 3 h.

Die größten Fehler bei der Lichtmessung innerhalb von Eisschollen ergaben sich dadurch, daß das Bohrloch, in dem gemessen wurde, das Licht auf andere Weise dämpfte, als es im Eis geschieht. Der Effekt, den das Bohrloch bei der Lichtleitung ausübt, ist schwer abzuschätzen. Mit der Annahme daß die Extinktion im Wasser viel geringer als die Extinktion im Eis ist, ist der Meßfehler von der Entfernung zu den beiden Öffnungen des Bohrlochs abhängig.

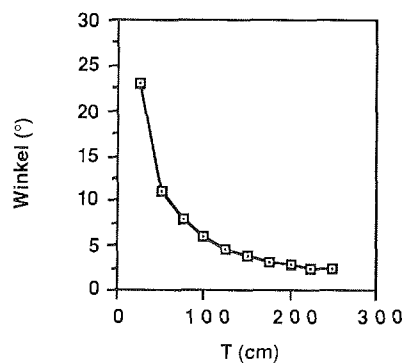


Abb. 42: Der Winkel unter dem die Öffnungen eines Bohrlochs erscheint gegen die Tiefe, T= Entfernung zu den Öffnungen (Durchmesser = 10 cm) eines Bohrlochs.

Der Winkel, unter denen die Öffnungen des Bohrloches von der Lichtsonde gesehen werden, beträgt bei 25 cm Entfernung gut 23° , das entspricht einem für den Lichteinfall relevanten Flächenanteil von rund 6%. Abb. 42 zeigt den Zusammenhang zwischen der Entfernung zu den Enden des Bohrlochs und dem Sichtwinkel von der Messsonde aus. Mit der zunehmenden Tiefe in der Eisscholle wird der Anteil des von

oben störenden Lichtes geringer, dafür wächst der Einfluß der unteren Öffnung. Der Einfluß der unteren Öffnung liegt aber durch die geringere Lichtintensität im freien Wasser unter dem Einfluß der oberen Öffnung. Obwohl bei den Lichtmessungen das Bohrloch wieder mit Schnee abgedeckt wurde, ist die Schneebeschaffenheit gestört, so daß gerade in den oberen Horizonten die Messungen mit großen Fehlern behaftet sind.

5. Zusammenfassende Diskussion zu den Faktoren Temperatur, Solevolumen, Nährstoffe und Licht im Eis

Innerhalb des Meereises beeinflussen die abiotischen Umweltfaktoren Temperatur, Licht, die Verfügbarkeit von Nährstoffen sowie der zur Besiedelung geeignete Raum ebenso wie in anderen Habitaten die Ausbildung spezieller Organismengemeinschaften. Auf den ersten Blick scheint es sich beim Meereis aufgrund der niedrigen Temperaturen und der hohen Salzgehalte um einen extremen Lebensraum zu handeln. Der Kenntnisstand über die in den Solekanälen herrschenden Umweltbedingungen bezüglich einiger der aufgeführten abiotischen Faktoren ist sehr lückenhaft (HORNER 1985). In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, die unter *in-situ* Bedingungen bestehenden abiotische Umweltfaktoren möglichst unverfälscht und exakt zu erfassen.

Temperatur

Der Parameter Temperatur innerhalb des Eises beeinflusst das Leben im Eis auf zweierlei Weise: einerseits müssen poikilotherme Eisorganismen in der Lage sein, bei niedrigen Temperaturen zu leben, zum anderen beeinflusst die Temperatur im Eis auf indirekte Weise andere Umweltfaktoren, wie z.B. die Größe und Form des besiedelbaren Raumes, die Salinität und den Nährstoffgehalt in der Sole (ASSUR 1960, WEEKS und LEE 1962, WEEKS und ACKLEY 1982).

Die Temperatur des Eises wird bestimmt durch die Temperatur des Meerwassers und der Atmosphäre sowie durch den Strahlungshaushalt der Eisdecke selbst (GORDON 1981, MAYKUT 1985). Für das Weddellmeer wird davon ausgegangen, daß ein stetiger Wärmestrom aus dem Ozean in die Atmosphäre erfolgt (GORDON 1981). Im Südfrühjahr führt dies zu einem Abschmelzen der Eisdecke von der Unterseite her. In der Arktis hingegen wird ein Teil des Eises durch absorbierte Strahlung geschmolzen, was sich in der Ausbildung von Schmelzwassertümpeln manifestiert. (ANDERSEN 1989).

Eisorganismen müssen über spezielle, den niederen Temperaturen angepasste Stoffwechselprozesse verfügen. Biochemische Vorgänge laufen bei niederen Temperaturen (Q_{10} -Regel) verlangsamt ab. Die Zellen müssen gegen ein Ausfrieren des in der Zelle vorhandenen Wassers und gegen Wasserverlust durch das hohe osmotische

Potential der Sole geschützt sein. Dies geschieht durch eine intrazelluläre Erhöhung der Zucker- und Enzymkonzentration (JØRGENSEN 1968, SOEDER und STENGEL 1974) oder durch eine verstärkte Produktion von Dimethyl-sulfoniumpropionat (DMSP) (KARSTEN 1991). Der Abbau von DMSP führt über DMS (Dimethylsulfat) zu Sulfat und Methansulfonat. Diese Substanzen beeinflussen als Kondensationskerne die Wolkenbildung und letztlich das Klima (CHARLSON et al. 1987).

Arbeiten über die Produktionsleistung der Eisalgen haben gezeigt, daß Eisorganismen in der Lage sind, unter den natürlichen Bedingungen im Eis ihre Stoffwechselprozesse aufrechtzuerhalten und zu wachsen (BUNT 1963, 1964 a, b, 1968, BUNT und LEE 1970, PALMISANO und SULLIVAN 1985 a, b, SULLIVAN 1985, BARTSCH 1989). Temperaturen von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ werden von Eisalgen noch toleriert. Erst eine einwöchige Hälterung bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ führt zum Tode (BUNT 1971). Trotzdem gelten die Eisalgen nicht als speziell kälteangepaßt (FOGG 1977, PALMISANO und SULLIVAN 1983). Die obligat psychrophile Art *Nitzschia sublinearis* zeigte in Kulturversuchen eine stark temperaturabhängige Assimilationsleistung mit einem Optimum der Assimilation bei $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (BUNT 1968). Als psychrophil werden Arten bezeichnet, die ihr optimales Wachstum bei $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ und darunter haben (MORITA 1975) und deren minimale Wachstumsrate unterhalb von $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt (McCONVILLE 1985). Die Beweglichkeit heterotropher Organismen wird durch tiefe Temperaturen eingeschränkt (Mc CONVILLE 1985, BURCH und MARCHANT 1983). Die Temperatur hat demnach einen großen Einfluß auf die Eislebensgemeinschaften und kann für quantitative Unterschiede in der Biomasse verantwortlich sein (PALMISANO und SULLIVAN 1985 b).

Die indirekten Auswirkungen niedriger Temperaturen sind nur bezüglich der Veränderung der Salinität in der Sole untersucht (BARTSCH 1989), zu den Fragen erhöhter Nährstoffkonzentrationen und des Raumangebotes gibt es keine Untersuchungen.

Die im antarktischen Winter gemessenen Eistemperaturprofile zeigen, daß Temperaturen unterhalb von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ an der Eisoberfläche nur selten vorkommen. Im Eis stellt sich meist ein mehr oder weniger linearer Temperaturgradient von der Oberflächentemperatur zu der Temperatur des Meerwassers (im Winter $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) ein. Ähnliche Werte wurden bereits von WEEKS und ACKLEY (1982), BARTSCH

(1989) und EICKEN und LANGE (1989) gefunden.

Die Korrelation zwischen momentaner Lufttemperatur und mittlerer Eiskerntemperatur zeigte, daß die Lufttemperatur nur über ihren Mittelwert die Eistemperatur beeinflußt. Die negative Beziehung von Schneedicke zu mittlerer Eistemperatur zeigte deutlich die isolierende Wirkung auf das darunterliegende Eis.

Wenn Algenwachstum bis zu einer Temperatur von ca. -10°C möglich ist (BUNT 1964 a), können, die Temperatur als einziger bestimmender Faktor vorausgesetzt, die meisten Eisschollen in ihrer gesamten Dicke besiedelt werden. Ausnahmen bilden die obersten Schichten von Eisschollen mit geringer Schneeauflage. Da die bisher untersuchten Eisalgen ihr autökologisches Wachstumsoptimum bei Temperaturen zeigten, die deutlich über 0°C lagen (BUNT 1968), liegen die günstigsten Temperaturen für Algenwachstum an der Unterseite der Schollen vor.

Die generell hohen Eistemperaturen im Sommer sind die Folge eines geringeren Wärmeverlustes des Ozeans an die Atmosphäre (MAYKUT 1985). Die Temperaturerhöhungen an der Oberfläche oder den oberflächennahen Schichten weisen auf eine Erwärmung durch Absorption von Licht hin. Dies wird durch die Beobachtungen gestützt, daß die oberen Horizonte der Eisschollen vielfach angetaut, d.h. weich und flüssig waren. Hohe Lufttemperaturen können für diese Erwärmung nicht verantwortlich gemacht werden, da sie stets deutlich unter den an der Oberfläche gemessenen Eistemperaturen lagen und die darüber liegende Schneeschicht keine Anzeichen von Tauprozessen zeigte. ANDREAS und ACKLEY (1982) fanden in der Antarktis, daß Tauprozesse an der Oberfläche erst bei Lufttemperaturen oberhalb 0°C auftreten können und daher selten und in geringem Umfang vorkommen können. Nach GORDON (1981) wird vom warmen Tiefenwasser nur 50 % der Energie geliefert, die zum jährlichen Schmelzen der Meereisdecken benötigt wird. Die fehlenden 50 % sollen durch Absorption von kurzwelliger Strahlung in den oberen Wasserschichten (in Spalten oder nahe der Eisgrenze) geliefert werden. Ein Teil dieser Energie kann auch innerhalb des Eises durch Lichtabsorption an Pflanzenpigmenten beigesteuert werden. Über den Betrag der auf diese Weise gewonnenen Energie sind in der Literatur keine Angaben zu finden. Wenn dieser Energiebetrag im Vergleich zu den auf andere Weise absorbierten

Lichtmengen auch gering sein mag, so kann er doch durch die Herabsetzung der Festigkeit des Eises zu einem früheren Zerbrechen der Eisschollen führen. In den dabei entstehenden offenen Wasserflächen kann wiederum ein vielfaches an Licht absorbiert werden (LANGLEBEN 1972). Über diesen Mechanismus einer positiven Rückkopplung könnten die Eisalgen einen großen Einfluß auf das Schmelzen des antarktischen Meereises und somit auf das großräumige Klimageschehen haben.

Das Raumangebot

Die Solekanälchen und -taschen bilden den Lebensraum für die im Eis lebenden Organismen (HORNER 1988). Der Volumenanteil dieses soleerfüllten Hohlraumsystems am gesamten Eisvolumen ist er-rechenbar, sofern Eistemperatur und Gesamtsalinität bekannt sind (FRANKENSTEIN und GARNER 1967, COX und WEEKS 1983). Die mit der räumlichen Anordnung der Solekanälchen beschäftigten Arbeiten berücksichtigten nur selten die tatsächlichen *in-situ* Bedingungen (siehe Kapitel 3.3.3). Durchmesser und Länge sowie Dichte der Solekanälchen beeinflussen Austauschvorgänge durch konvektiven und diffusiven Transport. Von den räumlichen Verteilungsmustern ist die Größe der inneren Oberfläche abhängig und damit die Lebensmöglichkeiten für angeheftete Organismen. Auch die Wandermöglichkeiten der Organismen innerhalb des Eises können durch Form und Anordnungen der Solekanälchen beeinflußt werden.

Das Alter und die bei der Eisbildung herrschenden Bedingungen führen zu unterschiedlichen Eistexturen (WEEKS und ACKLEY 1982). Unlösbar damit verbunden ist die Anordnung der Solekanälchen innerhalb des Eises (EICKEN 1991).

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit betrafen sowohl qualitative als auch quantitative Eigenschaften dieses soleerfüllten Kanalsystems. Die Solevolumina wurden sowohl direkt als auch indirekt bestimmt, wobei auf die methodischen Unterschiede im Kapitel 3.3.1 eingegangen wurde. Die fast geraden oder leicht C-förmigen Profilverläufe der relativen Solevolumina gegen die Eisdicke erklären sich durch das gegenläufige Verhalten von Eistemperatur und Gesamtsalinität. Mehr oder weniger gleichen sich die Einflüsse dieser beiden Größen auf das relative Solevolumen aus. Nach MAYKUT (1985), COX und WEEKS (1988) und EICKEN (1991) sind C-förmige Salinitätsprofile

typisch für einjährige Eisschollen. Da die Temperaturprofile der untersuchten Eisschollen ebenfalls typisch für die Wintersituation waren (siehe Kapitel 3.2.6) können die gefundenen Profile der relativen Solevolumina als beispielhaft für einjähriges Eis unter winterlichen Temperaturbedingungen angesehen werden.

Der Anteil der eingeschlossenen Sole betrug im Mittel ca. 20 % des Gesamtsolevolumens. Der Anteil der wirklich abgeschlossenen, d.h. in Form einer geschlossenen Blase im Eis vorliegenden Sole ist nach den in der Methodendiskussion angestellten Überlegungen als geringer anzunehmen. Im Umkehrschluß bedeutet dies, daß mehr als 80 % der Sole in miteinander verbundenen Solekanälchen zu finden sind. Die Existenz gänzlich geschlossener Soletaschen wird aus physikalischen Überlegungen angezweifelt (UNDRSTEINER 1968, MAYKUT 1985). Durch die geringere Dichte des Eises würde sich bei Eiswachstum innerhalb solch einer Soletasche der Druck erhöhen, bei Schmelzvorgängen vermindern. Da Sole und Eis nur wenig komprimierbar sind, müßte sich die Soletasche über feine Verbindungen einen Druckausgleich schaffen. Eine vollkommen geschlossene Soletasche wäre demnach nur möglich, wenn sich die Eistemperatur nicht ändert, nachdem sich eine vollkommen abgeschlossene Soletasche gebildet hat. Ein komprimierbares Luftpolster innerhalb einer Soletasche könnte eine Druckverminderung bewirken, doch ist nicht bekannt, wie sich die eingeschlossenen Luftvolumina, die nach COX und WEEKS (1983) und EICKEN (1991) 1 % Volumenanteil nicht überschreiten, innerhalb des Meereises verteilen. Die Existenz gänzlich abgeschlossener Soletaschen wird in der Literatur nicht eindeutig gezeigt. Die feinen Kanäle, wie sie z.B. auf Bild 14 in den Ausgußpräparaten beobachtet wurden, könnten dem Druckausgleich von fast abgeschlossenen Soletaschen gedient haben. Die Zunahme des Anteiles an eingeschlossener Sole bei abnehmenden Temperaturen kann einerseits durch das häufigere Auftreten von gänzlich abgeschlossenen Hohlräumen erklärt werden, andererseits auch durch Veränderungen der Geometrie der Solekanäle, die das Ausschleudern erschweren.

Die Form und Anordnung der Solekanäle wurde in den Ausgußpräparaten sichtbar gemacht. Auffallend dabei war, daß in allen Präparaten Solekanäle beobachtet wurden, die geringere Durchmesser hatten, als die bisher in der Literatur erwähnten (siehe

Kapitel 3.3.3).

Die mittleren Dimensionen der Solekanälchen in den ausgegossenen Eisproben (ca. 200 μm) waren um den Faktor 800 kleiner als die Dimensionen der Proben selbst. Auch in säuligem Eis, der Eistexturklasse mit dem geringsten Verzweigungsgrad der Solekanälchen, waren die Solekanälchen innerhalb der Abmessungen der Probe mehrfach mit anderen Solekanälchen vernetzt. Es ist daher sehr wahrscheinlich, daß Solekanälchen, die innerhalb der Abmessungen einer Probe miteinander in Verbindung standen, dies auch bei einer größeren Probe tun würden. So ergeben sich auf dem Niveau kleinster Solekanälchen Verbindungen, die die ganze Eisscholle durchziehen. Eine dendritische Verzweigung der Solekanälchen, wie sie von LAKE und LEWIS (1970) vorgeschlagen wurde, konnte in den betrachteten Dimensionen nicht gezeigt werden.

Wanderungsmöglichkeiten für Organismen und Stoffflüsse durch diffusen und konvektiven Transport können nicht nur über Solekanälchen mit größeren Durchmessern ($> 0,5 \text{ mm}$) erfolgen, wie sie von WAKATSUCHI und SAITO (1985) und LAKE und LEWIS (1970) gefunden wurden, sondern sind auch über die Vielzahl kleiner und kleinster Solekanälchen ($\leq 0,2 \text{ mm}$) möglich. Außer in körnigem Eis, in dem von den Solekanälchen keine Richtung bevorzugt wurde, herrschte in den Proben aus säuligem und gemischt säulig-körnigem Eis die senkrechte Ausrichtung der Solekanäle vor. Ihr Verzweigungsgrad wurde mit abnehmenden Temperaturen geringer. In diesen Eistexturklassen erfolgen daher Stofftransporte und Wanderungen leichter in vertikaler als in horizontaler Richtung.

Die Dimensionen der Solekanälchen und die darin vorkommenden Strömungsgeschwindigkeiten (NIEDRAUER und MARTIN 1979) führen nach den Gesetzen der Hydrodynamik (PRANTL et al. 1984) stets zu laminaren Strömungen. An den Wänden anhaftende Organismen sind daher im Nahbereich auf den diffusiven Transport von Nährstoffmolekülen angewiesen.

Wie die Solekanälchen innerhalb des Eises von den Eisorganismen genutzt werden, konnte mit den vorhandenen Daten ansatzweise gezeigt werden. Autotrophe Organismen ließen sich nicht in dem gleichen Maße wie die Sole aus dem Eis ausschleudern. Daraus folgt nun nicht, daß sie sich hauptsächlich in abgeschlossenen Soletaschen

aufhielten (siehe Kapitel 3.3.1). Wichtig ist, daß sie einer Bewegung der Sole nicht zwangsläufig folgten, sondern innerhalb der betrachteten Probengröße ortsfest waren. Diese Ortsfestigkeit kann, neben dem erwähnten Aufenthalt in vollständig geschlossenen Soletaschen, prinzipiell durch zwei Mechanismen zustandekommen: Die Organismen sind aufgrund ihrer Größe oder der Form von Körperanhängen in den Solekanälen gefangen, oder sie kleben an den Wänden der Solekanälchen fest.

Vergleichbar ist der Eislebensraum mit den Interstitialräumen, wie sie z.B. in Bachsedimenten (SCHWOERBEL 1967) oder im Mesopsammal zu finden sind (GÖTTING et al. 1982). Durch die Transparenz des Eises ist im Vergleich zu anderen Lückensystemlebensräumen nur im Eis auch in tieferen Schichten eine nennenswerte Primärproduktion möglich. Strukturelle Unterschiede ergeben sich durch die Härte des Eises: in den Solekanälchen können nur Organismen leben und sich bewegen, die kleiner als die Solekanälchen sind. In Sandlückensystemen können auch Organismen leben, die sich durch ein Wegdrücken der Körner selbst Raum schaffen. Man findet sowohl im Meereis als auch im Mesopsammal neben Kieselalgen typische Organismen der Meiofauna. Im Mesopsammal jedoch sind die autotrophen Organismen nur in der Oberflächenschicht zu finden.

Ultra- und kleinere Nanoplanktonorganismen werden sich unabhängig von ihrer Körperform ungehindert in den meisten Solekanälchen bewegen können. Eine Beeinflussung durch die Dimensionen der Solekanälchen ist für Vertreter ab der Größenklasse des Mikroplanktons ($> 60 \mu\text{m}$, GÖTTING 1982) denkbar. Lange, schlanke oder plastisch verformbare Formen werden sich leichter in den Solekanälchen bewegen können. Daß im Meereis die pennaten Diatomeen hauptsächlich mit kleinen oder langen schlanken Arten vertreten sind, kann man mit der Form des Lebensraumes erklären. Ebenso sind größere Vertreter der Meiofauna im Eis wie z.B. Ciliaten und Turbellarien (GRADINGER persönl. Mitteilung) zumeist sehr beweglich und können ihre Körpergestalt den Solekanälchen anpassen. Die Möglichkeit, innerhalb des Meereises wandern zu können, ist sowohl für heterotrophe als auch für autotrophe Organismen wichtig. Die meisten Organismen werden bei der Eisbildung in das Eis eingeschlossen. Da ein weiteres Eiswachstum, egal ob durch angewachsenes säuliges Eis oder durch angeschwemmtes körniges Eis, stets

an der Unterseite erfolgt, befänden sich die Organismen bald in den obersten Schichten einer Eisscholle. Da sich die optimalen Umweltbedingungen und damit das Biomassemaximum meist an der Unterseite der Scholle befinden, scheint es denkbar, daß ein Teil der Eisorganismen diesen Bereich aktiv aufsuchen kann.

Inwieweit die Organismen innerhalb des Meereises um den Raum konkurrieren müssen, läßt sich für Algen, auf das gesamte Solevolumen bezogen, abschätzen. Bei Annahme eines $\frac{C}{\text{Chl-a}}$ Verhältnis von 30 (STRICKLAND 1960), und einer Umrechnung von Kohlenstoffgehalt in Zellvolumen nach der Formel von STRATHMANN (1967) ($\log C = 0,758 \log V - 0,422$) ergibt sich bei einer Gesamtchlorophyllkonzentration von $30 \mu\text{g l}^{-1}$ ein Raumbedarf für die Algen von $2,3 \text{ ml l}^{-1}$. Da in den Kernen von ANT 8/2 die Sole mindestens 5 % des Gesamteisvolumens ausmachte, nahmen die Algen ca. 5 % des Gesamtsolevolumens bzw. 0,23 % des gesamten Eisvolumens ein. Bei wesentlich höheren Chlorophyllkonzentrationen (Chl a = $1000 \mu\text{g l}^{-1}$), wie sie z.B. vom McMurdo Sound berichtet werden (SULLIVAN et al. 1985), kann der Raumbedarf der Algen bis zu 10 % des Gesamteisvolumens betragen.

Nährstoffe

Eine Limitation des Algenwachstums durch Mangel an Makronährstoffen im antarktischen Ozean wird im allgemeinen ausgeschlossen (BUNT und LEE 1970, HORNER und ALEXANDER 1972, GRAINGER 1977). Ob Spurenstoffe limitierend wirken, wird z.B. für Eisen diskutiert (MARTIN et al. 1990). Die im Wasser auftretenden Nährstoffkonzentrationen liegen für Silikat zwischen 40 und $90 \mu\text{M l}^{-1}$, für Nitrat zwischen 10 und $20 \mu\text{M l}^{-1}$ und für Phosphat zwischen 1 und $2 \mu\text{M l}^{-1}$ (HOLM-HANSEN et al. 1977). Die Nährstoffkonzentrationen im Meereis gelten ebenfalls als nicht limitierend (McCONVILLE 1985). ALEXANDER et al. (1974) gibt für Silikat und Phosphat die gleiche Nährstoffkonzentrationen, für Nitrat ein bis zweifache höhere und für Ammonium bis zu 10 fach höhere Konzentrationen gegenüber dem Wasser an. Auch GRAINGER (1977) berichtet über hohe Nährstoffkonzentrationen im Eis und stellt auch Unterschiede über die Tiefe der Scholle fest.

Nährstoffe werden über die gleichen Prozesse wie NaCl in der Sole angereichert (LAKE und LEWIS 1970), durch Remineralisation in der Sole freigesetzt (SULLIVAN 1985) oder gelangen durch Aus-

tausch mit dem Wasser in das Eis (MEGURO et al. 1967). Daten über Nährstoffkonzentrationen im Eis wurden zumeist an aufgetauten Proben gewonnen. Die dabei auftretenden Fehler sind in Kapitel 3.3.3 beschrieben. In der vorliegenden Arbeit wurden die Nährstoffkonzentrationen direkt an der Sole bestimmt. Im Vergleich zu den Nährstoffkonzentrationen im Pelagial (NÖTHIG 1988) des Weddellmeeres waren die Mittelwerte der Konzentrationen geringer für Silikat und Nitrat und gleichbleibend für Phosphat (Tab. 14).

Daten über Nährstoffkonzentrationen in der Sole aus antarktischem Meereis sind in der Literatur nur spärlich vorhanden (GARRISON et al. 1990, BARTSCH 1989 und DIECKMANN et al. 1991). Die Proben von BARTSCH (1989) und DIECKMANN et al. (1991) stammten aus dem nordöstlichen Weddellmeer (55 - 70° S, 5° W - 5° E), die von GARRISON et al. (1990) aus dem nordwestlichen Weddellmeer (60 - 62° S, 40 - 50° W). Alle drei Datensätze stammten aus dem Südwinter.

Gegenüber den mittleren Konzentrationen in der Sole aus einjährigem Eis aus den Arbeiten von BARTSCH (1989), DIECKMANN et al. (1991) und GARRISON et al. (1990) war die Silikat-, Phosphat- und Nitratkonzentrationen erniedrigt, die Ammoniumkonzentrationen gleichbleibend bzw. erhöht. Die Konzentrationen in der Sole kalter Winterkerne wird höher sein als die in warmen Sommerkernen (LAKE und LEWIS 1970). Eine Aufnahme oder Freisetzung von Nährstoffen durch Organismen muß dazu nicht erfolgen, beträfe aber alle Nährstoffe in gleichem Maße. Das Verhältnis der Nährstoffe müßte demnach stets gleich bleiben. Relativ zur Phosphatkonzentration sind aber die Konzentrationen von Silikat und Nitrat in den Sommerkernen deutlich erniedrigt, Ammonium dagegen erhöht. Die Ammoniumkonzentrationen deuten auf eine höhere Aktivität heterotropher Organismen in den Sommerkernen hin (BIDIGARE 1983), die deutliche Abnahme von Silikat auf das Wachstum von Kieselalgen.

Erst der Vergleich der normierten Nährstoffkonzentrationen in der Sole mit den Nährstoffkonzentrationen, die man im Wasser erwarten kann (NÖTHIG 1988), ermöglicht eine Antwort auf die Frage, in welchem Maße die Nährstoffe innerhalb des Eises verbraucht wurden. Die Daten aus der Wassersäule (0-200 m) von NÖTHIG (1988) wurden im Südsommer im gleichen Seegebiet erhoben. Im Sommer

Tab. 14: Vergleich der Nährstoffkonzentrationen in den Soleproben mit den Daten von DIECKMANN et al. (1991), BARTSCH (1989) und GARRISON et al. (1990). Zum Vergleich sind Nährstoffkonzentrationen zugefügt, wie sie im Januar und Februar im südöstlichen Weddellmeer gemessen wurden (NÖTHIG 1988).

Autoren:	BARTSCH (1989)	DIECKMANN et al. (1991)	GARRISON et al. (1990)		eigene Daten	Nöthig (1988)
			einjähriges-	zweijähriges Eis		Wasser
Si O ₄ ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	177 (124-226)	151 (64-225)	150	140	21 (1 - 100)	42 - 62
PO ₄ ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	2,8 (2,8-6,8)	2,7 (0,2 - 9,0)	2,3	1,0	2,0 (0,7 - 4,2)	1, 1-1,3
NO ₃ ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	55 (13,4 - 95,5)	34,5 (2,4 - 95,0)	37,0	12,0	5,3 (0,6 - 35,8)	15 - 21
NH ₄ ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	1,9 (0,8 - 2,8)		5,0	4,0	5,0 (3,5 - 7,5)	0,5 - 1,2

sind die Nährstoffkonzentrationen in der Wassersäule durch Algenblüten vermindert, gelten aber nicht als limitierend (SAKSHAUG und HOLM-HANSEN 1984, v. BODUNGEN et al. 1986). Eine Abschätzung mit dieser Datengrundlage ist daher konservativ, da die Nährstoffkonzentrationen im Herbst im gleichen Seegebiet höher sind (DIECKMANN unveröffentlichte Daten). Beim Fehlen jeglicher biologischen Aktivität müßten die normierten Nährstoffkonzentrationen gleich den Konzentrationen im Wasser bei der Eisbildung sein. Das sind sie nicht. Die geringen normierten Nährsalzkonzentrationen in einigen Horizonten der Kerne mit Gesamtlängen oberhalb 1 m aber auch die Schwankungen innerhalb der kürzeren Kerne lassen sich durch biologische Aktivität erklären. Besonders Silikat war in einigen Tiefen unterhalb der Nachweisgrenze, so daß es als aufgebraucht gelten kann.

Lichtangebot

Das Lichtklima in und unter dem Eis ist hinsichtlich Quantität und Qualität gegenüber den Oberflächenwerten verändert. Während offene Wasserflächen ca. 8 % der einfallenden Gesamtstrahlung reflektieren, beträgt die Albedo über schneefreiem, einjährigem Eis ca. 50 - 60 %. Mit einer Schneeeauflage steigt die Albedo auf 80 bis 85 % (THOMAS 1963, GRENFELL und MAYKUT 1977). Im Eis wird in Abhängigkeit von Dicke und Beschaffenheit weitere Strahlung absorbiert. Daher dringt nur ein Bruchteil der einfallenden Strahlung in das Eis und die darunterliegenden Wasserschichten. Das ist ein

Grund dafür, daß unter eisbedeckten Meeresflächen wenig pflanzliche Biomasse zu finden ist (GIESKES et al. 1987). Albedo und Extinktion sind abhängig von der Wellenlänge des Lichtes. Das Eis selbst hat seine maximale Durchlässigkeit bei Wellenlängen von 450 bis 550 nm, die Albedo steigt je nach Art des Eises und Schnees unterhalb 700 nm um das Doppelte bis Sechsfache gegenüber den Werten über 700 nm an (MAYKUT und GRENFELL 1975, GRENFELL und MAYKUT 1977).

Die über das Jahr gemittelten eingestrahltten Lichtmengen von 60°- 90° Breite betragen nur die Hälfte bis ein Viertel des am Äquator einfallenden Lichtes (ANDERSEN 1989). Dafür verantwortlich sind der geringere Einstrahlungswinkel der Sonne und die veränderten Tageslängen. In den polaren Wintern herrscht je nach Breitengrad für Wochen bis Monate totale Dunkelheit. Eisalgen müssen daher mit geringen Lichtstärken im blaugrünen Spektralbereich sowie länger andauernder Dunkelheit leben.

Eisalgen zeigen im Vergleich zu planktischen Algen sehr niedrige Lichtsättigungswerte, die bei ca $20 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ liegen (BEARDALL und MORRIS 1976, MORRIS und CLOVER 1981, GLEITZ und KIRST 1991). Der Kompensationspunkt für die Photosynthese liegt bei einem Lichtquantenstrom von $0,5 - 1 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (BUNT 1964 a). Für planktische Algen wird der Lichtkompensationspunkt bei 1 % der einfallenden Strahlung angesetzt, bei Eisalgen bei 0,1 % (HORNER 1985). Eisalgen gelten daher als extrem schattenadaptiert (BUNT 1964 b). Diese Anpassung an geringe Lichtstärken erreichen die Algen durch eine Erhöhung des Chlorophyll-a Anteils (BUNT 1964 b) und durch eine Verbreiterung oder Verschiebung ihres Absorptionsspektrums durch zusätzliche akzessorische Pigmente (BUNT 1964 c).

Um die Zeit der totalen Dunkelheit zu überdauern, können die Eisalgen nach PALMISANO und SULLIVAN (1982) drei unterschiedliche Strategien benutzen: sie sind fakultativ heterotroph, lagern energiereiche Reservestoffe ein und reduzieren ihren Stoffwechsel, oder sie bilden Ruhestadien in Form von Dauersporen.

Die gewonnenen Daten bestätigen die Messungen von THOMAS (1963) und SULLIVAN et al. (1982) und zeigten, daß Schneeauflage und Eisdicke die im Eis wirksame PAR am stärksten beeinflussen. Zusätzlich konnte gezeigt werden, daß der Einstrahlungswinkel der

Sonne ebenfalls die relativen PAR im und unter dem Eis beeinflusst. Dagegen hatte der Abstand zu den Schollenrändern in der untersuchten Größenordnung keinen Einfluß.

Zunehmende Eisdicken und Schneeeauflagen führen nicht nur zu einer Abnahme des Absolutwertes an PAR. Zusätzlich wird die Zeit, in der die PAR über dem Lichtkompensationspunkt liegt, verkürzt. Die im Eis herrschenden Lichtstärken werden im Herbst durch die geringeren Schneeeauflagen länger ein Wachstum ermöglichen als im Frühjahr mit hohen Schneeeauflagen.

Die tatsächlich in den Solekanälchen herrschenden Lichtstärken können von den hier vorgestellten Werten abweichen, da aufgrund der unterschiedlichen optischen Dichte zwischen Eis und Sole das Licht in den Solekanälchen besser geleitet werden könnte. Auch in Preßeisrücken könnte entlang von Bruchkanten mehr Licht bis in tiefere Eisschichten gelangen. Bei den geringen Lichtstärken im Eis und der extremen Schattenanpassung der Eisalgen könnten diese Effekte großen Einfluß haben.

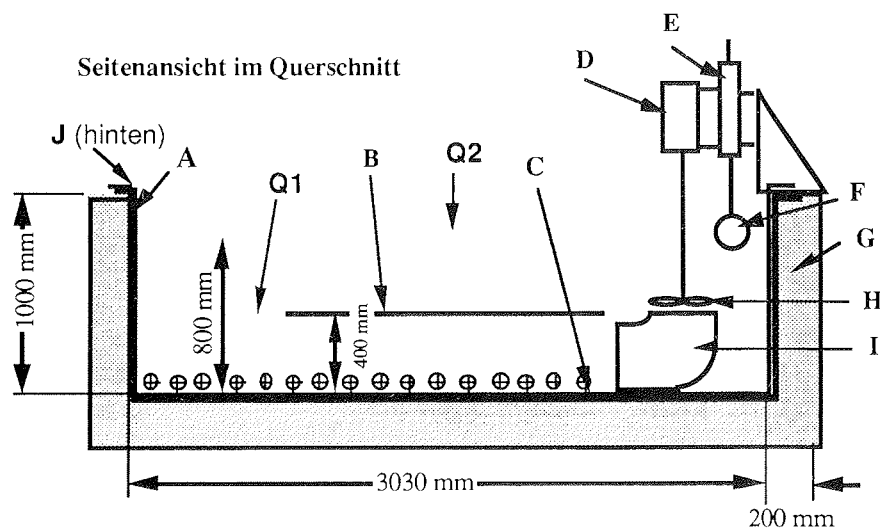
6. Die Eistankexperimente

6.1. Material und Methoden

6.1.1. Der Eistank

Die Anreicherung von Algen in Neueis wurde in einem Versuchstank untersucht. Dieser war so konstruiert, daß Eisbildungsprozesse unter verschiedenen Bedingungen simuliert werden konnten. Die Anordnung des Eistanks und der darin vorgenommenen Einbauten ist in Abb. 43 zu sehen.

Der Behälter selbst bestand aus HPE (Hart-Polyethylen), einem physiologisch unbedenklichen Material (E 300-02 Fa. EMERGO). Vor Inbetriebnahme wurde der Behälter mit verdünnter Salzsäure (5 %) ausgewaschen und mehrere Male mit filtriertem Meerwasser gespült. Boden und Seitenwände wurden mit zwei Lagen Styroporplatten isoliert. Um die Verformung des Behälters durch den Wasserdruck zu verhindern, wurden an den langen Seiten je zwei Balken in 30 und 70 cm Höhe angebracht und über Gewindestangen an den kurzen Seiten angepreßt (in Abb. 43 nicht enthalten). Der Wellengenerator bestand aus einem 80 cm langen Kunststoffrohr als Tauchkörper, das über einen Hydraulikzylinder auf und ab bewegt werden konnte. Der Hydraulikzylinder wurde über ein Dreiwegeventil, eine Regелеlektronik und einen Funktionsgenerator angesteuert (Hydraulikelemente: Fa. HERION). In Versuchen, in denen Wellengang simuliert wurde, erfolgte dies mit einer Erregerfrequenz des Wellengenerators von 0,9 Hz. Amplitude und Position des Tauchkörpers wurden so eingestellt, daß eine maximale Amplitude (ca. 20 cm) der Wellen im Tank zu beobachten war. Der Betriebsdruck der Hydraulik betrug in allen Versuchen 40 bar. Bei diesem Druck war gewährleistet, daß sich die Anlage bei Blockierung durch Eis nicht selbst zerstörte. Der Wellengenerator wurde jeweils 12 h vor Versuchsende abgeschaltet, damit sich der Eisbrei verfestigen konnte und eine differenzierte Probenentnahme möglich war.



- A = Wanne HPE, Breite = 1000 mm
- B = Zwischenplatte Polycarbonat $l=1600$ mm $b=1000$ mm $h=5$ mm
- C = Heizkabel
- D = Rührwerk
- E = Hydraulikzylinder
- F = Wellengenerator GFK Rohr $d = 150$ mm $l = 800$ mm
- G = Isolation aus 20 cm dicken Styroporplatten
- H = Propeller
- I = Rohrwinkel 90° $d = 300$ mm
- J = Nullpunkt des Koordinatensystems zur Lagebeschreibung
- Q1 u. Q2 = Lage der Querschnittsflächen zur Strömungsmessung

Abb. 43: Querschnittszeichnung des Eistankes mit den wichtigsten Einbauten

Die Heizung am Grund des Beckens erfolgte durch zwei je 12 m lange Heizkabel (Dupla 250 W), die über einen Vorschalttrafo und einen Netzspannungssteller mit Strom versorgt wurden. Zum Abtauen zwischen den Versuchen wurde mit 500 W Leistung geheizt. Die Strömung wurde mit einem Rührwerk erzeugt, das zwei über kreuz montierte Zweiblattpropeller (GRAUPNER) antrieb. Im Uhrzeigersinn angetrieben drückten die Propeller das Wasser nach unten in das 90° Rohr hinein. Umdrehungszahl bei allen Versuchen mit Strömung war $200 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$. Die Platte (B) sorgte für eine Trennung der Strömungen.

Über dem Eistank wurden 5 Leuchtstoffröhren mit je 40 W Leistung installiert. Dadurch betrug die Beleuchtungsstärke in der Mitte des Tankes in 40 cm Wassertiefe $40 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Der Eistank mit allen Zusatzeinrichtungen wurde in einem Kühlraum aufgestellt, dessen Raumtemperatur während der Eisbildungsversuche auf $-15\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ eingeregelt wurde. Die Temperaturen in 10 cm Höhe über dem Eis bzw. Wasser betragen zwischen -10 und -12 °C . Während der Auftau- und Ruhephase zwischen den Versuchen betrug die Raumtemperatur 0 °C .

Der Tank wurde mit Nordseewasser gefüllt, das über $0,45\text{ }\mu\text{m}$ Filter (Nuclepore) gefiltert wurde. Das Wasser, das bis einschließlich Versuch 7 verwendet wurde, stammte aus der Norwegischen Rinne, hatte eine Salinität von $33,8\text{ ‰}$ und wurde aus 2-3 m Wassertiefe in 1000 l fassende Polyethylentanks an Bord des Forschungsschiffes "Victor Hensen" gepumpt. Ab Versuch 10 stammte das auf die gleiche Weise gewonnene Wasser aus dem Seegebiet bei der Forschungsplattform Nordsee, das eine Salinität von $34,4\text{ ‰}$ hatte. Nach drei bzw. einem Tag Transportzeit zum Institut wurde das Wasser bei 0 °C in den Polyethylenbehältern gelagert, die auch zum Transport dienten. Bis zur Filtration und Füllung des Eistanks vergingen maximal 4 Wochen. Die Füllhöhe betrug 80 cm, wodurch sich ein gesamtes Wasservolumen von 2400 l ergab.

6.1.2. Durchgeführte Versuche

Insgesamt wurden 13 Versuche durchgeführt (Tab. 15), von denen 5 aufgrund technischer Defekte abgebrochen werden mußten. Die Versuche Nr. 2 und 3, bei denen filtriertes Meerwasser ohne Algenzusatz verwendet wurde, dienten dazu, physikalische Parameter zu erfassen und Erfahrung beim Betrieb der Anlage zu gewinnen. Die Versuche ab Nr. 4 fanden alle mit Algenzusatz statt, wobei verschiedene Chlorophyllkonzentrationen am Beginn des Versuchs eingestellt wurden.

Tabb. 15: Versuchsnummern, Versuchsbedingungen und -ziele der durchgeführten Versuche. Die + oder - Zeichen in der Spalte der Versuchsbedingungen kennzeichnen die An- bzw. Abwesenheit der genannten Bedingung.

Versuch Nr.:	Versuchsbedingungen			Ziel
	Wellen	Strömung	Algen	
2	-	-	-	Messung des Eisdickenwachstums
3	+	-	-	"
4	+	-	+	Anreicherung von Algen
6	+	-	+	"
7	+	-	+	"
10	-	+	+	"
11	-	-	+	"
12	-	+	+	"

6.1.3. Probenentnahme im Eistank

Die Wasserproben wurden mit Bechergläsern von der Oberfläche geschöpft oder mit einem Schlauch nach dem Saugheberprinzip aus verschiedenen Tiefenstufen abgesaugt.

Unverfestigter Eisbrei wurde mit Bechergläsern abgeschöpft. Ab Versuch 10 wurde ein Stechrohr aus Plexiglas verwendet (l=30 cm, d= 8,5 cm). Das Stechrohr wurde durch den Eisbrei gesteckt, oben und unten mit einem Stopfen versehen und herausgezogen. Das Wasser wurde so weit abgelassen, bis die Unterkante des Eisbreis am unteren Stopfen lag. Eisproben aus der verfestigten Eisoberfläche wurden mit einem selbstentwickelten Kernbohrer aus Edelstahl gewonnen, mit dem Kerne von 3 cm Durchmesser gebohrt wurden. Um größere Probevolumina an Eis zu erhalten, wurden mit einer Handstichsäge verschieden große Blöcke aus der Eisoberfläche gesägt. An den Wasserproben sowie an den aufgetauten Eiskernen wurden Salinität, Chlorophyllkonzentrationen und z.T. Zellzahlen von Diatomeen bestimmt. Zur Protokollierung der Lage einer Probe wurde an den Rändern des Eistanks ein Koordinatensystem aufgezeichnet. Mit den Angaben von Länge, Breite und Tiefe konnte so jeder Ort im Tank bezeichnet werden (Abb. 44).

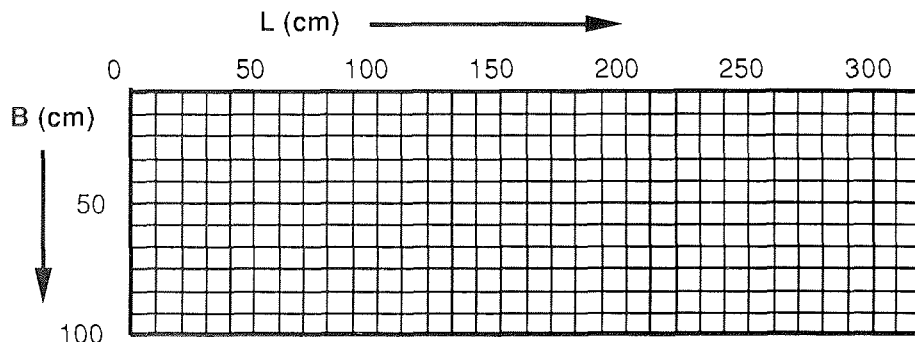


Abb. 44: Das Koordinatensystem an den Rändern des Eistanks in der Aufsicht. Die Lage des Nullpunktes ist aus Abb. 43 (J) ersichtlich

6.1.4. Diatomeenkulturen

Das Material für die im Eistank eingesetzten Algenkulturen stammte von den Expeditionen ANT 8/2 und 9/3. Hierzu wurden aus Wasser- bzw. Eisproben, die in einem großen Volumen Meerwasser nach der Methode von SPINDLER und DIECKMANN (1986) aufgetaut wurden, mit der Methode von PFRINGSHEIM (1954) einzelne Algenzellen isoliert und in mit F/2-Medium (GUILLARD und RYTER 1962) angereichertem Seewasser kultiviert. Diese unialgalen Kulturen sowie Mischkulturen, die mehrere Algenarten und Flagellaten enthielten, wurden am Institut in 250 ml Erlenmeyerkolben bei einer Temperatur von 0 °C und einer Lichtstärke (PAR) von $20 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ kultiviert. In 20 l Nalgeneflaschen wurden vor den Versuchen Mischkulturen angesetzt, die nach 3-4 Wochen in den Tank umgeschüttet wurden. Es wurde 10-30 l der Mischkulturlösung zugegeben. Die Abundanzen der wichtigsten Arten sind in Tab. 16 aufgelistet. Arten, die zu weniger als 5 % vertreten waren, wurden nicht aufgelistet. Neben den genannten Arten kamen nur noch *Chaetoceros dicaeta*, *Nitzschia curta*, *N. kerguelensis* und *Rhizosolenia alata* in den Kulturen vor. Die Flagellaten wurden nicht gezählt und bestimmt.

Tabb. 16: Die Abundanzen der häufigsten Algenarten im Wasser des Eistanks vor der Eisbildung in % , sowie die gesamte Zellkonzentration pro ml.

	V4	V6	V7	V10	V11	V12
<i>Chaetoceros neogracile</i>	5	<1	<1	<1	4	4
<i>Pleurosigma antarctica</i>	<1	<1	<1	<1	2	1
<i>Navicula criophila</i>	4	2	8	5	2	3
<i>Nitzschia cylindrus</i>	<1	8	7	<1	<1	<1
<i>N. lecontei</i>	<1	<1	<1	22	<1	2
<i>N. prolongatoides</i>	44	<1	5	15	6	3
<i>N. subcurvata</i>	38	88	76	56	80	82
<i>Tropidoneis glacialis</i>	6	<1	4	<1	4	3
Zellkonzentrationen	260	190	420	25	280	650

6.2. Ergebnisse

6.2.1. Eiswachstumsgeschwindigkeit und Wärmefluß

Die Eiswachstumsgeschwindigkeit ohne Wellen und Strömung bei einer Raumtemperatur von -15°C zeigte bis zum Versuchsabbruch nach 9 Tagen eine fast lineare Kurve (Abb. 45). Den einzelnen Punkten in Abb. 45 lagen je 21 Messungen zugrunde, nach 216 Stunden wurde an 60 Punkten die Eisdicke ermittelt. Die Standardabweichungen der Eisdickenmessungen waren sehr gering. Es ergaben sich keinerlei signifikante Unterschiede der Eisdicken zwischen randlichen und zentralen Bereichen oder zwischen verschiedenen räumlichen Orientierungen. Nur in der unmittelbaren Nähe von wärmeleitenden Installationen (Propellerwelle und Heizkabel) war das Eis im Umkreis von 4-5 cm etwas dicker (< 2 cm). An den inneren Wänden des Tanks war unterhalb der von der Oberfläche her wachsenden Eisdecke keine Eisbildung zu beobachten. Der Wärmefluß (MAYKUT 1985) aus dem Eistank nahm exponentiell mit der Zeit ab (Abb. 46). Die mittlere Eistemperatur wurde mit -5°C angesetzt und somit ein lineares Temperaturprofil von den ca. -12°C an der Eisoberfläche zu ca. -2°C an der Eisunterseite angenommen. Für die Eissalinität wurde konstant die Salinität des Eises bei Versuchsende von 10 ‰ eingesetzt.

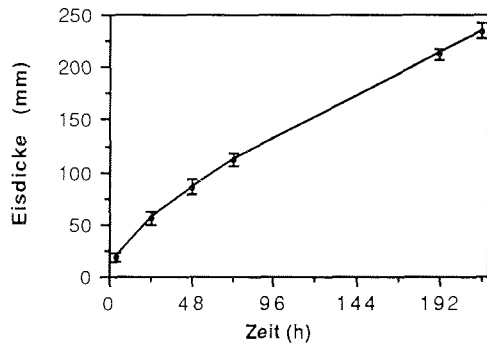


Abb. 45: Eiswachstum über 216 Stunden, Versuch 2.

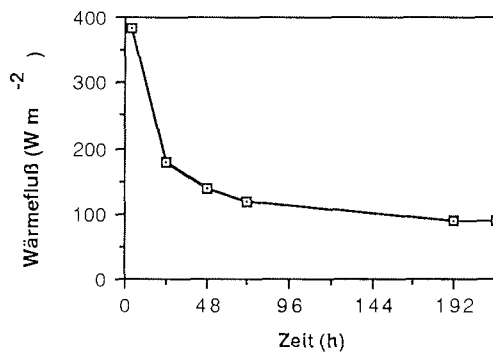


Abb. 46: Wärmefluß über 216 Stunden, Versuch 2.

Mit Wellengang und/oder Strömung waren Eiswachstumsgeschwindigkeit und Wärmefluß nach 200 h um ca. 10 % größer. Die Unterschiede in den Eisdicken waren aber innerhalb der ersten 90 h nicht meßbar, so daß Werte, die am unbewegten Wasserkörper gewonnen wurden, für alle Versuche als Grundlage verwendet werden konnten. Dickenmessungen an Eis, das durch den Einfluß von Wellen und/oder Strömung noch in Bewegung war, waren aufgrund der wenig verfestigten Eisunterseite mit größeren Fehlern behaftet als Dickenmessungen an Eis, das ohne Wellen und Strömung schon bei geringen Eisdicken sehr fest war.

6.2.2. Beschreibung des Wellenfeldes

Bei der verwendeten Erregerfrequenz des Wellengenerators, von 0.9 Hz bildete sich eine stehende Welle mit einer Amplitude von 10-15 cm aus. Der Grundfrequenz von 0,9 Hz waren bei freier

Wasseroberfläche etliche chaotisch laufende Oberschwingungen mit ca. 5 cm Amplitude überlagert. Eine dünne Schicht von Eiskristallen an der Wasseroberfläche, die sich 1-2 h nach dem ersten Auftauchen von Eiskristallen bildete, dämpfte diese Oberschwingungen vollständig ab, so daß sich während des weiteren Versuchs nur noch die Grundschiwingung bemerkbar machte. In den ersten 24 h nach einsetzender Eisbildung betrug die Amplitude der stehenden Welle 10-15 cm, und nahm mit der zunehmenden Dicke des Eises stetig ab. Nach ca. 70 h betrug die Amplitude noch ca. 2 cm. Die Form der Schwingung änderte sich während der Versuchsdauer nicht.

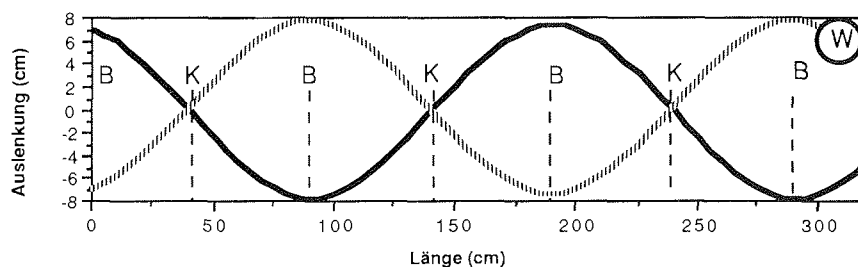


Abb. 47: Schematische Darstellung des Wellenbildes an der Oberfläche des Eistanks. Schwingungsknoten (K) traten bei 40, 145 und 235 cm auf, Schwingungsbäuche (B) bei 0, 95, 179 und 290 cm auf. Die Lage des Wellengenerators ist durch den Kreis (W) angedeutet.

6.2.3. Die Wasserströmung

Bei eingeschaltetem Rührwerk (Abb. 43, D) drückte der Propeller (H) das Wasser in den Rohrwinkel (I). Unter der Platte (B) strömte das Wasser zum Ende des Tanks, quoll auf und strömte über der Platte zum Propeller zurück. Die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten durch die Querschnittsfläche Q_2 sind in Abb. 48 dargestellt. Die Strömungsgeschwindigkeit war in der Oberflächenschicht mit einem Mittelwert von $0,1 \pm 0,01 \text{ m s}^{-1}$ ($n=10$) am größten. Zur Tiefe und mehr noch zu den Rändern hin nahm die Strömungsgeschwindigkeit ab. Die mittlere Geschwindigkeit durch die senkrechte Querschnittsfläche Q_2 betrug $0,06 \pm 0,02 \text{ m s}^{-1}$ ($n = 55$). Umgewälzt wurden somit $0,024 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Durch die waagerechte Querschnittsfläche Q_1 in 40 cm Wassertiefe floß das Wasser im Mittel mit $0,024 \text{ m s}^{-1}$ in vertikaler Richtung aufwärts. An der Position L 10 B 50 wurden Werte bis zu $0,08 \text{ m s}^{-1}$ erreicht.

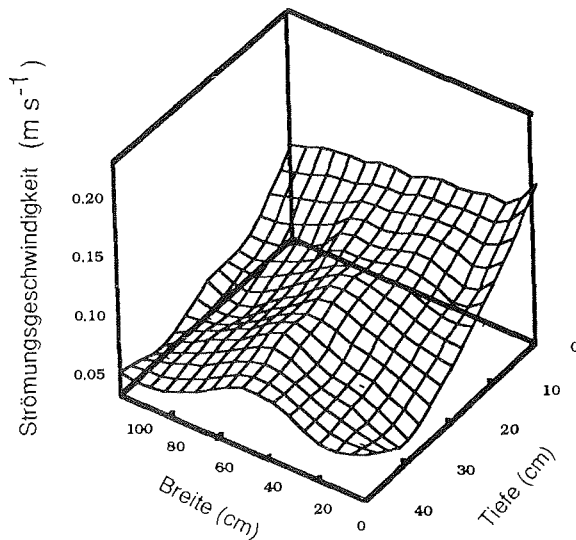


Abb. 48: Strömungsgeschwindigkeit gegen Breite und Tiefe im Eistank am Ort der Querschnittsfläche Q2.

6.2.4. Der Einfluß eines ruhenden Wasserkörpers auf die Anreicherung von Algen bei der Eisbildung.

Mit einem Versuch, bei dem weder Strömung noch Wellen im Eistank simuliert wurden, sollte die Anreicherung von Algen bei der Neueisbildung untersucht werden. Nach der Zugabe der Algenkultur wurde eine Stunde lang Strömung erzeugt, um die Algen gleichmäßig zu verteilen. Zwei Stunden nach dem Abschalten des Propellers und ca. 1 h vor dem Einsetzen der Eisbildung wurden an 16 Stellen die Chlorophyll-a-Konzentration gemessen. Sie betrug im Mittel $2,2 \pm 0,1 \mu\text{g l}^{-1}$. Zwischen den Meßpunkten in der Tiefe und an der Oberfläche war kein signifikanter Unterschied feststellbar. Die ersten Eiskristalle bildeten sich an verschiedenen Stellen im Eistank direkt an der Wasseroberfläche. Innerhalb der Wassersäule wurden zunächst keine Eiskristalle beobachtet. Eine Stunde nachdem die ersten Eiskristalle beobachtet wurden, war die ganze Oberfläche des Eistanks von einer wenige mm dicken Eisschicht bedeckt. An der Eisoberfläche konnten Felder mit einer parallelen Struktur erkannt werden (Abb. 49), die einzelnen Eiskristallen entsprachen (WEEKS und ACKLEY 1982).

Während des 90 h andauernden Versuchs wuchs die Eisschicht an allen Stellen des Eistanks gleichmäßig, wie es schon bei den Versuchen 2 und 3 beobachtet wurde. Nach 90 h wurde eine Eisdicke von $12,5 \pm 1,0$ cm erreicht, der mittlere Salzgehalt des Eises betrug 10 ‰. Die Eisdecke bestand vollständig aus säuligem Eis. Während der gleichen Zeit stieg die Salinität des Freiwassers von 34,3 ‰ auf 36,5 ‰ an. Nach 90 h wurden unter der Eisdecke vereinzelt Ansammlungen von Eisplättchen beobachtet, die zwar unter der Eisdecke schwammen, aber nicht fest mit dieser verbunden waren. Die Plättchen hatten Durchmesser bis zu 2 cm und waren völlig ungeordnet in Klumpen mit 5-6 cm Durchmesser zusammengefroren.

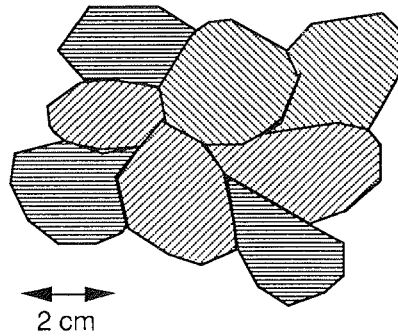


Abb. 49: Schemazeichnung der Eiskristalle mit Lamellenstruktur, wie sie während Versuch 11 auf der sich gerade gebildeten Eisdecke beobachtet werden konnten.

Die gemittelten Chlorophyllkonzentrationen in der gesamten Eisdecke unterschieden sich nach 24, 50 und 90 h nicht signifikant von den Chlorophyllkonzentrationen im darunter liegenden Wasser (Abb. 50). Es konnten keine räumlichen Unterschiede der Chlorophyllkonzentrationen in der Fläche der Eisdecke festgestellt werden.

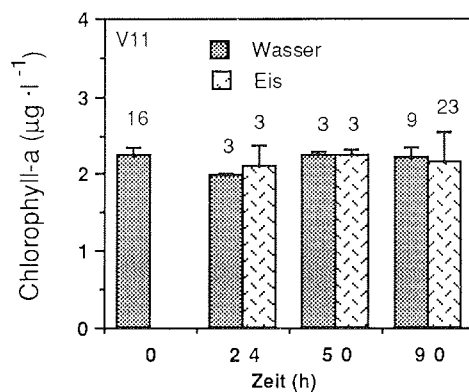


Abb. 50: Die Chlorophyllkonzentrationen in Eis und Wasser gegen die Versuchsdauer (Versuch 11). Die Zahlen über den Säulen geben die Anzahl der genommenen Proben an.

Die Salinität des Eises war in den einzelnen Tiefenstufen etwa gleich (Abb. 51). In der untersten Schicht waren die Schwankungen mit absolut 2,5 ‰ zwischen den einzelnen Stellen im Eistank am größten. Die Chlorophyllkonzentrationen in den einzelnen Tiefen unterschieden sich um bis zu $1,5 \mu\text{g l}^{-1}$ oder 60 % vom Höchstwert voneinander. In den mittleren Horizonten von 3 bis 9 cm wurden bei L 60 und L 120 die höchsten Chlorophyllkonzentrationen gemessen. Bei L 190 stieg die Chlorophyllkonzentration zur Unterseite hin leicht an.

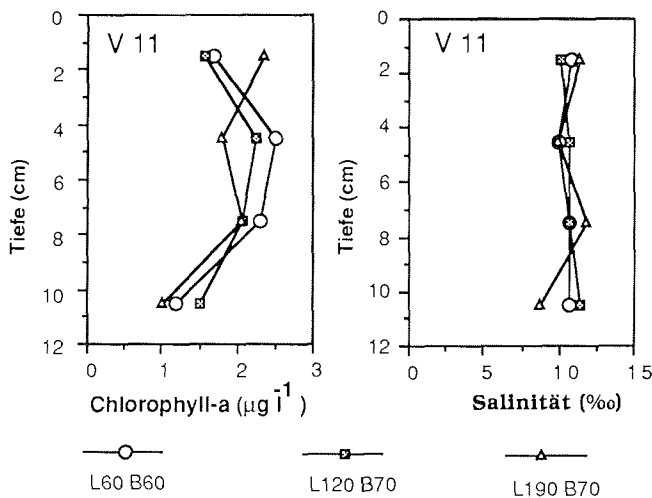


Abb. 51: Salinitäts- und Chlorophyllprofile an drei verschiedenen Stellen nach 90h. Die Probenentnahmestellen sind mit L und B nach dem in Abb. 44 genannten Koordinatensystem gekennzeichnet.

6.2.5. Der Einfluß von Wellengang auf die Anreicherung der Algen bei der Eisbildung

Von den drei Versuchen, in denen im Eistank Wellengang simuliert wurde, werden im folgenden nur die Ergebnisse der Versuche 6 und 7 dargestellt. Versuch 4 diente als Vorversuch und führte zu dem Probenentnahmeschema, wie es bei den Versuchen 6 und 7 angewandt wurde. Nach Zugabe der Algenkulturen wurde bei den Versuchen 6 und 7 die Strömung für ca. 30 min eingeschaltet, um die Algen gut zu durchmischen. Mit eingeschaltetem Wellengenerator und einer Raumtemperatur von $-1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ wurde 24 h abgewartet. Danach wurde die Raumtemperatur auf $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ erniedrigt und die Chlorophyllkonzentrationen vor dem Einsetzen der Eisbildung an 20 Punkten gemessen. Weder an der Oberfläche noch in der Tiefe lie-

ßen sich signifikante Unterschiede in den Chlorophyllkonzentrationen finden. Bei Versuch 6 betrug die Chlorophyllkonzentration zu Versuchsbeginn $1,65 \mu\text{g l}^{-1}$, bei Versuch 7 $3,78 \mu\text{g l}^{-1}$.

Die Eisbildung verlief bei beiden Versuchen gleich, so daß im folgenden die Eisbildung von Versuch 7 geschildert wird. Die Eiskristalle sammelten sich an der dem Wellengenerator abgewandten Seite. In Abb. 52 sind die verschiedenen Stadien der Eisbildung schematisch in der Aufsicht gezeigt. Bereits nach 5-6 h verfestigten sich einzelne Bereiche des breiigen Eises zu kleinen "Pfannkuchen". Diese Verfestigung begann an der Oberfläche. Die ersten erkennbaren Pfannkuchen waren nur wenige mm dick und maßen 1-3 cm im Durchmesser. Einige wenige dieser kleinen Pfannkuchen wuchsen nun sehr schnell innerhalb von 3-4 h zu größeren Einheiten heran. Diese größeren Pfannkuchen bildeten sich zuerst an den Knoten der stehenden Wellen. Noch bevor die einzelnen Pfannkuchen aneinander stießen, wuchsen auf ihnen aufgeworfene Ränder. Diese entstanden dadurch, daß die Kanten der Pfannkuchen durch die Wellenbewegung in den Eisbrei tauchten und Eiskristalle herauschöpften. Nach 20 h war der gesamte Tank von Eisbrei bedeckt, die Pfannkuchen stießen zusammen und rieben aneinander. Die 3 cm dicken Pfannkuchen schwammen auf einer ca. 6 cm dicken Breieisschicht. Nach 30 Stunden hatten sich die Pfannkuchen zu größeren Platten zusammengeschlossen, die kaum dicker als 4 cm waren. Das Bild an der Oberfläche änderte sich im folgenden nicht mehr. Solange der Wellengenerator eingeschaltet blieb, fanden sich bei L größer als 200 cm Eisdicken, die 4-5 cm unter denen bei geringen L lagen. Nach 90 h war der Tank von einer 15 cm dicken Eisschicht bedeckt. Die oberen 12 bis 13 cm bestanden aus körnigem Eis, nur die unteren 2-3 cm, die nach dem Abschalten des Wellengenerators entstanden waren, zeigten eine säulige Eistextur.

Die Chlorophyllkonzentrationen in Eis und Wasser während der Eisbildung und bei Versuchsende sind in Abb. 53 dargestellt. Beide Graphiken zeigen jeweils die über alle Proben gemittelten Werte. Die Chlorophyllkonzentrationen im Wasser verringerten sich mit der Zeit stetig. Nach 90 h war bei Versuch 6 im Wasser weniger als 50 %, bei Versuch 7 noch 70 % der Anfangs-Chlorophyllkonzentration zu messen. In Versuch 6 waren die mittleren Chlorophyllkonzentrationen im Eis nach 8 h am höchsten und nahmen mit der

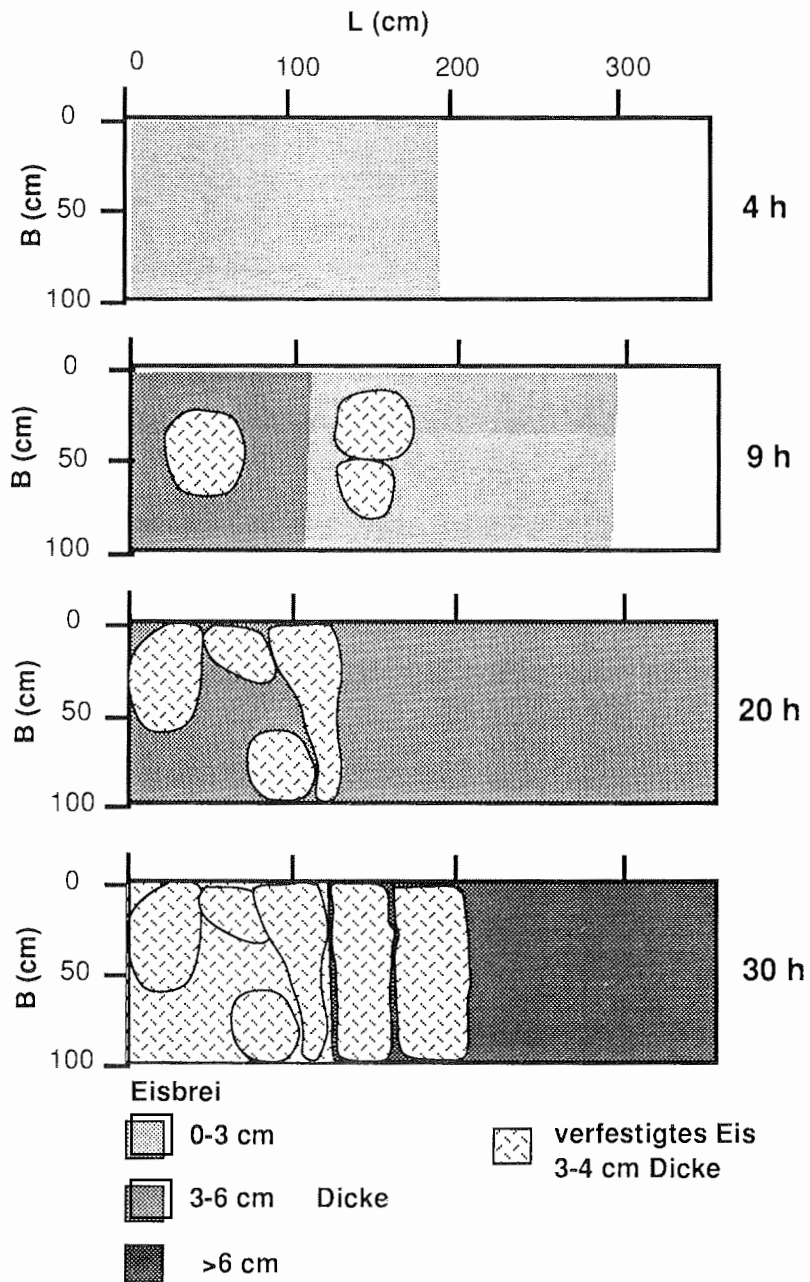


Abb. 52: Die Stadien der Eisbildung in Versuch 7 in der Aufsicht auf die Eisoberfläche zu 4 unterschiedlichen Zeitpunkten.

Zeit deutlich ab. Sie lagen aber stets über den Konzentrationen im Wasser. Die Chlorophyllanreicherung bei Versuch 7 fiel schwächer aus, nach 8 h wurden im Eis geringere Konzentrationen als im

Wasser gemessen. Zu Versuchsende lagen aber auch hier die Chlorophyllkonzentrationen im Eis über denen im Wasser. In beiden Versuchen war die Standardabweichung der Chlorophyllkonzentrationen im Eis größer als die im Wasser.

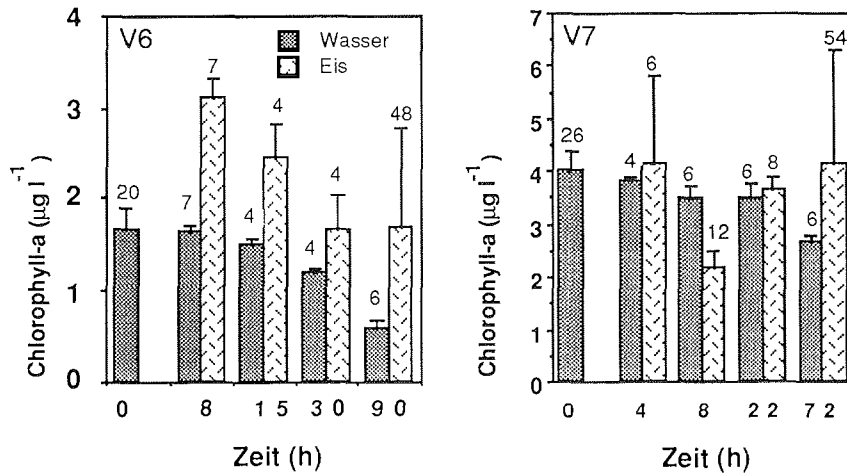


Abb. 53: Chlorophyllkonzentration in Wasser und Eis in Abhängigkeit von der Zeit (Versuch 6 und 7). Die Zahlen über den Säulen geben die Anzahl der Messungen an.

Die starke Streuung der Chlorophyllkonzentrationen in den Eisproben ließ auf eine unterschiedliche räumliche Verteilung des Chlorophylls schließen. Die Abbildungen 54 und 55 zeigen die Chlorophyllkonzentrationen entlang der mittleren Längsachse (B 50 cm L 0-250 cm) des Tankes.

Die Chlorophyllkonzentrationen wiesen deutliche Maxima und Minima auf, die in ihrer Abfolge bei beiden Versuchen gleich, aber in ihrer Position im Eistank leicht gegeneinander verschoben waren. Bei Versuch 6 lagen die Maxima bei den Längen 20, 70, 120 und 150 cm, in Versuch 7 bei 20, 60, 100 und 140 cm. Die Minima fielen in Versuch 6 bei $L \approx 190$ und 220 cm, in Versuch 7 bei $L > 150$ cm unter die Chlorophyllkonzentrationen im Wasser.

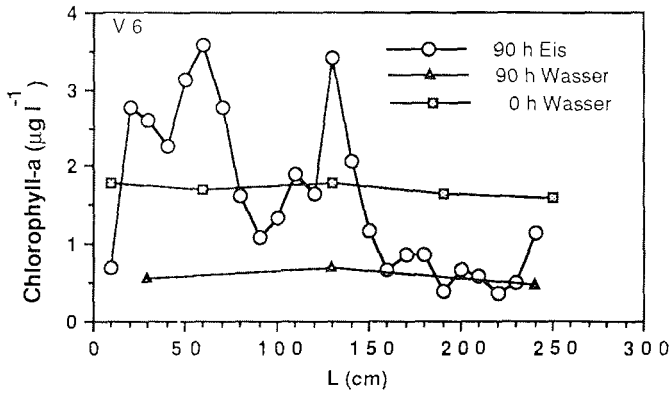


Abb. 54: Die Chlorophyllkonzentrationen im Eis und im Wasser über die Länge des Eistankes bei Versuch 6.

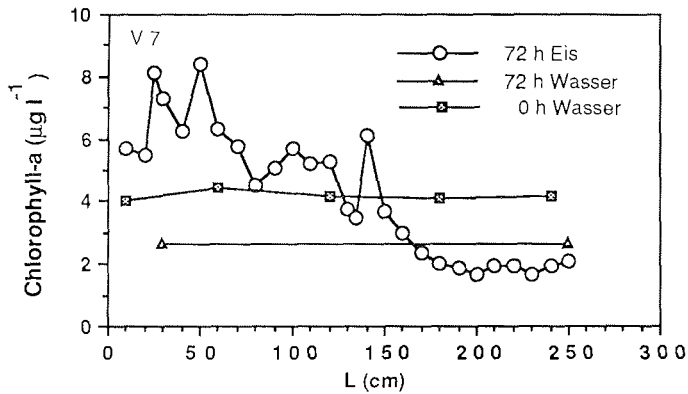


Abb. 55: Die Chlorophyllkonzentrationen im Eis und Wasser über die Länge des Eistankes bei Versuch 7.

In Bereichen, in denen sich das Eis schon früh verfestigte (Pfannkuchen), wurden andere Tiefenprofile der Chlorophyllkonzentrationen gemessen als in Bereichen, die bis zum Abstellen des Wellengenerators unverfestigt blieben (Breieis). In Abb. 56 sind exemplarisch für insgesamt 8 Chlorophyllprofile zwei Profile aus diesen unterschiedlichen Bereichen gezeigt. Die Profile im Breieis zeigten fast konstante Chlorophyllkonzentrationen mit einem leichten Anstieg zur Unterseite des Eises. In den Pfannkuchen war ein Maximum im Horizont 3-6 cm zu beobachten, mit einer starken Abnahme zur Unterseite.

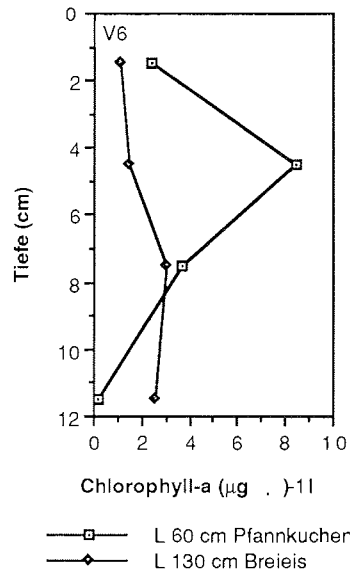


Abb. 56: Chlorophyllkonzentrationen über die Eisdicke an zwei räumlich (Länge 60 und 130) und von der Eisstruktur unterschiedlichen Stellen im Eistank bei Versuch 6, L und B = Positionen im Eistank, siehe Abb. 44.

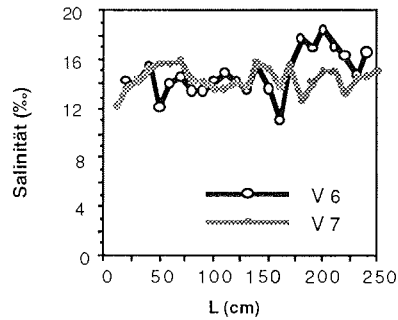


Abb. 57: Gesamtsalinitäten des Eises entlang der Längsachse (L) des Eistanks.

Die Gesamtsalinitäten der einzelnen Proben aus der Eisdecke schwankten zwischen 11 und 19 ‰ (Abb. 57). Zwischen den Mittelwerten beider Versuche war kein signifikanter Unterschied feststellbar. Nur die räumliche Verteilung zeigte in Versuch 6 einen deutlichen Anstieg der Gesamtsalinitäten bei L größer als 160 cm.

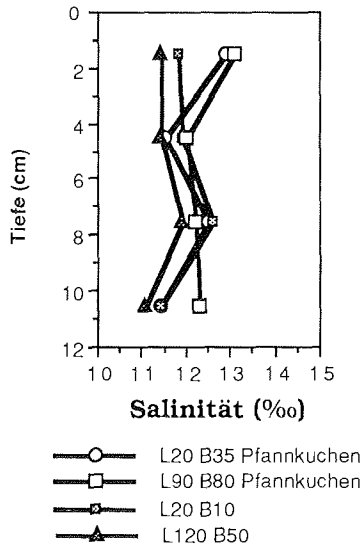


Abb. 58: Gesamtsalinität des Eises an vier räumlich und von der Eisstruktur unterschiedlichen Stellen im Eistank bei Versuch 7. L und B = Positionen im Tank, siehe Abb.44.

Auch die Tiefenprofile der Gesamtsalinitäten (Abb. 58) ließen sich in Abhängigkeit von ihrer Herkunft in zwei Gruppen einteilen. An der Oberfläche unterscheiden sich die Gesamtsalinitäten in Pfannkuchen- und Breieis um absolut 1,5 ‰. In den Tiefenstufen 3-9 cm wurden sehr ähnliche Salinitäten gemessen, darunter betrug die Unterschiede wieder mehr als 1 ‰ absolut. Die Gesamtsalinitätsmessungen des untersten Horizontes sind mit großen Fehlern belastet. Das Eis an der Unterseite war noch wenig verfestigt und wies eine große Porosität auf, wodurch bei der Probenentnahme viel Sole verloren ging.

6.2.6. Der Einfluß von Strömung auf die Anreicherung von Algen bei der Eisbildung.

Die Chlorophyllkonzentrationen einen Tag nach Zugabe der Algenkulturen und ca. 2 h vor dem Auftreten der ersten Eiskristalle betragen $0,18 \mu\text{g l}^{-1}$ (V10) und $6,41 \mu\text{g l}^{-1}$ (V12). Die ersten sichtbaren Eiskristalle mit wenigen mm Durchmesser folgten der Strömung im Tank. Sie wirbelten frei im gesamten Wasserkörper umher und umkreisten die Strömungsteilerplatte. Nach 7-8 h war eine deutliche Häufung von Eiskristallen an der Wasseroberfläche zu beobachten. Im Bereich der aufsteigenden Strömung sammelten sich die meisten Eiskristalle, die dann auf ganzer Breite langsam in Richtung Wellengenerator strömten, sich vor diesem wieder vereinzeln und dann durch die Abwärtsströmung wieder untergemischt wurden. Diese Bewegungen des gesamten Eisbreies in Strömungsrichtung erfolgte schubweise. Nach 24 h war die gesamte Oberfläche von Eiskristallen bedeckt, die untereinander festfrozen und eine feste Decke

bildeten. Unterhalb der oberen zusammengefrorenen 1-2 cm befand sich ein sehr lockerer Eisbrei, der durch die Strömung bewegt wurde. Nach 48 h betrug die Eisdicke bei L 40 13 cm, wovon 6 cm verfestigt waren. Bei L 250 traten 11 cm unverfestigtes Eis auf. Während V 10 blieb die feste Oberfläche weitgehend ortsstabil, bei V 12 wanderte die gesamte Eisdecke nach ca. 50 h in Strömungsrichtung und hinterließ in Bereich L 0- L 90 eine fast freie Wasserfläche, die sich langsam wieder mit Eis bedeckte, das z.T. durch die Strömung nachgeliefert wurde, aber auch direkt am Ort als säuliges Eis wuchs. Nach 90 h war die Eisdicke an allen Stellen auf 12 cm verfestigtes Eis angewachsen, das mit Ausnahme der beschriebenen freigelegten Fläche aus säulig-körnigem Eis bestand. Unter dieser Eisdecke befand sich eine sehr lockere Breieisschicht. Auch im Freiwasser waren noch Eiskristalle zu beobachten, die der Strömung folgend umhertrieben.

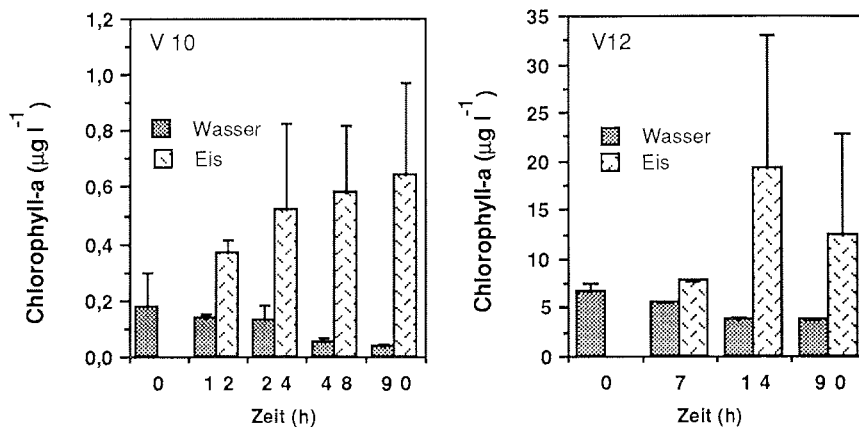


Abb. 59: Chlorophyllkonzentrationen in Wasser und Eis in Abhängigkeit von der Versuchsdauer.

Die Chlorophyllkonzentrationen in Wasser und Eis (Abb. 59) sind gegenläufig. Den stetig abfallenden Konzentrationen im Wasser standen deutliche Anstiege im Eis gegenüber, die sich bei Versuch 10 bis zum Ende nach 90 h fortsetzten. In Versuch 12 nahm die Konzentration zum letzten Meßwert hin ab.

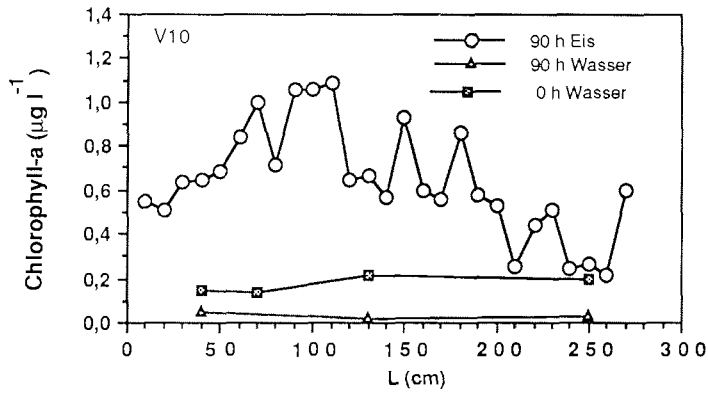


Abb. 60: Chlorophyllkonzentrationen in Eis und Wasser über die Länge des Eistankes, Versuch 10.

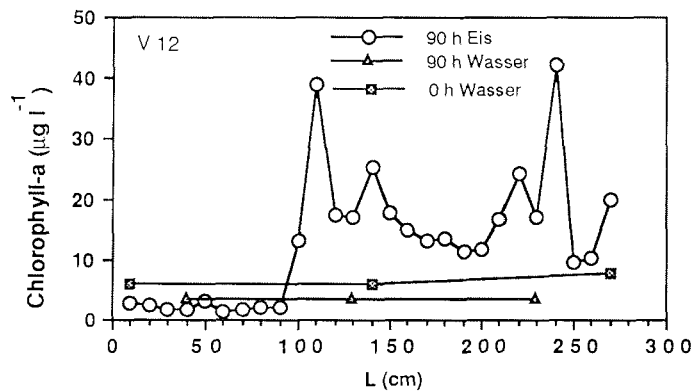


Abb. 61: Chlorophyllkonzentrationen in Eis und Wasser über die Länge des Eistankes, Versuch 12.

Die Chlorophyllverteilungen entlang der Längsachse (Abb. 60 und 61) zeigten geringere Chlorophyllgehalte an den Enden des Tankes und erhöhte Werte im mittleren Bereich. In Versuch 12 waren die Chlorophyllkonzentrationen in der Fläche L 0 - L 90 geringer als im Freiwasser nach 90 h. Diese Fläche unterschied sich farblich vom restlichen Eis, sie schien etwas klarer zu sein und bestand vorwiegend aus säuligem Eis. Der Bereich bis L = 90 mit geringen Chlorophyllkonzentrationen entsprach der zuvor beschriebenen Fläche aus jüngerem Eis.

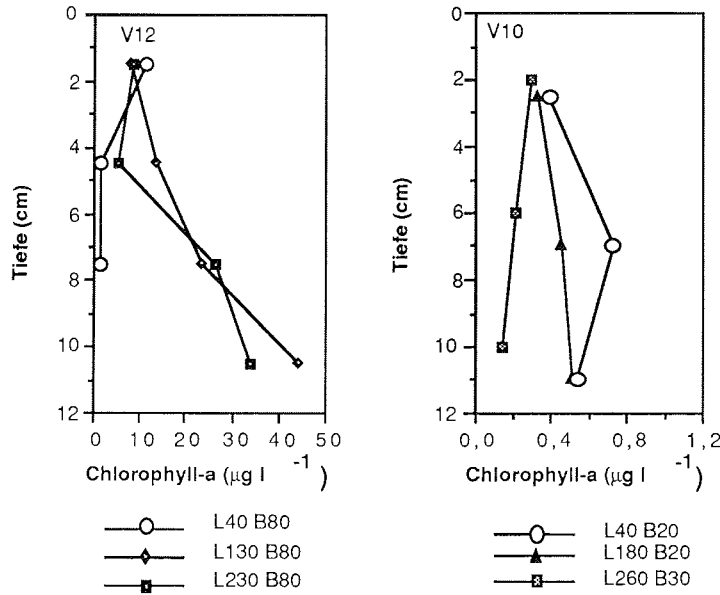


Abb. 62: Chlorophyllkonzentrationen im Eis gegen die Tiefe bei Versuch 10 und 12. L und B = Positionen im Tank, siehe Abb.44.

Bei relativ niedrigen Gesamtchlorophyllkonzentrationen in der Eisdecke nahm die Chlorophyllkonzentration mit der Tiefe ab, bei relativ hohen Gesamtchlorophyllkonzentrationen stieg die Chlorophyllkonzentration mit einer Ausnahme (L 40 B 80) mit der Tiefe an (Abb. 62). Dies zeigte sich in beiden Versuchen bei Chlorophyllkonzentrationen, die sich um das 100-fache unterschieden.

Die Gesamtsalinitäten der Eisdecken betragen 12 ± 1 ‰ in Versuch 10 und 11 ± 1 ‰ in Versuch 12. Die Salinität im Freiwasser stieg in beiden Versuchen auf 38 ‰ an. Die Salinitäten entlang der Längsachse (Abb. 63) waren weitgehend gleich, einzig der Bereich bis L 90 bei Versuch 12 zeigte leicht verringerte Werte. Die Tiefenprofile der Salinitäten an verschiedenen Stellen wiesen keine Unterschiede auf, alle waren von C-förmigem Verlauf (Abb. 64).

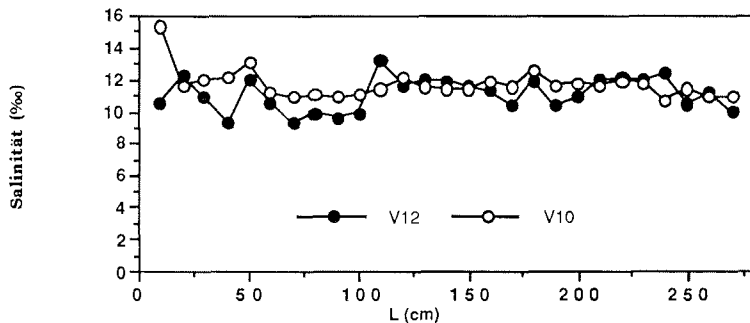


Abb. 63: Salinitäten entlang der Längsachse des Eistankes in der Eisdecke der Versuche 10 und 12.

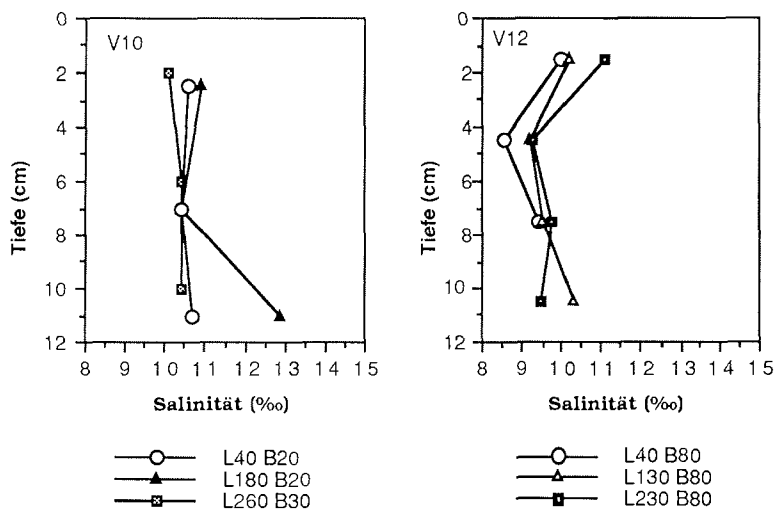


Abb. 64: Salinitäten des Eises über die Tiefe, Versuch 10 und 12. L und B = Positionen im Eistank, siehe Abb. 44.

6.2.7 Vergleich der Versuche

Wie aus der Verteilung der Chlorophyllkonzentrationen entlang der Längsachse des Tanks ersichtlich ist, waren die Mechanismen, die zu einer Anreicherung der Algen führten, nicht an allen Stellen in der gleichen Weise wirksam. Außerdem wurde in den Versuchen mit unterschiedlichen Chlorophyllkonzentrationen gearbeitet. Um die Ergebnisse der einzelnen Versuche miteinander vergleichen zu können, ist es sinnvoll, die Anreicherungsmechanismen zu betrachten und nur Stellen zu berücksichtigen, an denen ein Anreicherungsmechanismus optimal wirkte. Je 10 Meßpunkte aus

dem Eis mit den höchsten Chlorophyllkonzentrationen wurden dazu mit den mittleren Chlorophyllkonzentrationen bei Versuchsbeginn ins Verhältnis gesetzt. Für die Abreicherungsfaktoren im Wasser wurden alle Messungen verwendet (Abb. 65). Die Anreicherungsfaktoren für die Eisdecke der beiden Versuche mit simulierter Strömung lagen über denen der Versuche mit Wellenfeld. Ohne Wellen und ohne Strömung wurde keinerlei Anreicherung beobachtet.

In keinem der Versuche konnte ein Unterschied in der Artenzusammensetzung der Diatomeen in Eis und Wasser gefunden werden, so daß auf eine Darstellung dieser Ergebnisse verzichtet wurde.

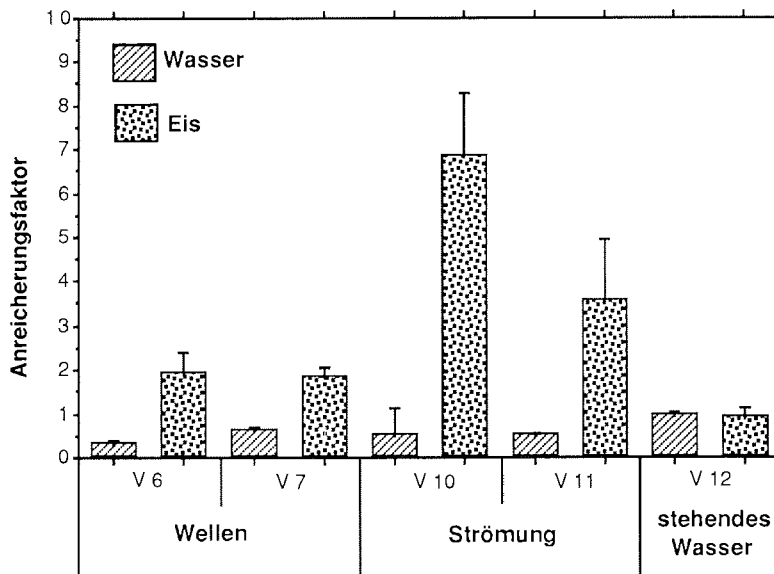


Abb. 65: Die Anreicherungs faktoren für Chlorophyll-a in der Eisdecke in den einzelnen Versuchen.

6.3. Diskussion

6.3.1. Methodenkritik:

Die Nachahmung natürlicher Prozesse kann in einem künstlichen System nur zu einem bestimmten Maße gelingen. Die wichtigsten Einschränkungen beim Eistank sind a) das endliche Volumen und die dadurch bedingte Aufsatzung des gesamten Wasserkörpers bei der Eisbildung, b) die Begrenzungswände und deren Einfluß auf den Wärmetransport, das Wellenbild und die wachsende Eisdecke, c) die Verwendung von Nordseewasser sowie d) der Einsatz von unter Kulturbedingungen gezogenen Algen mit einem eingeschränkten Artenspektrum.

Zu a) Die Aufsatzung des Wassers führt zu einem verschobenen Temperaturgradienten in der sich bildenden Eisdecke. Während unter natürlichen Eisbildungsbedingungen die Wassertemperaturen nahe des Gefrierpunktes von Meerwasser bei $-1,8\text{ °C}$ liegen, können die Wassertemperaturen im Eistank geringere Werte annehmen. Durch die zunehmende Aufsatzung des Wassers bei der Eisbildung sinkt dessen Gefrierpunkt. Auf das Kristallwachstum scheint der steigende Salzgehalt keinen Einfluß zu haben. In Schliffbildern des Eisgefüges konnten Eisproben aus dem Tank nicht von Eis aus der Antarktis unterschieden werden (EICKEN, persönliche Mitteilung). Die Texturklassen säuliges, körniges bzw. säulig-körniges Eis konnten in einer Qualität erzeugt werden, die von Eisproben aus der Antarktis glaziologisch nicht zu unterscheiden war.

Zu b) Die 20 cm dicke Isolierschicht aus Styropor verminderte einen Wärmefluß durch die Wände des Eistankes. Das an allen Stellen der Wasseroberfläche gleichmäßige Eiswachstum zeigte, daß der Wärmefluß über die Wände zu vernachlässigen war.

Tab. 17: Vergleich der gemessenen Eisdicken im Tank und den empirisch für Meereis gefundenen von ANDERSON (1961)

Tage	1	2	3	4
Eisdicke nach ANDERSON (1961) in cm	7	10	13	15
Eisdicke im Tank in cm	6	9	12	13

ANDERSON (1961) nennt eine empirische Formel für das Meereiswachstum in Abhängigkeit der kumulativen Lufttemperatur über dem Eis. Für den Bereich bis zu 48 Tagesgra-

den (Tagesgrade = mittlere Temperatur während eines Tages mal Anzahl der Tage), der für alle durchgeführten Experimente galt,

zeigte die Eiswachstumskurve im Eistank etwas geringere Werte als die nach ANDERSON (1961) errechneten (Tab. 17). Die Differenzen lassen sich durch die im Vergleich zu den Freilandbeobachtungen von ANDERSON (1961) fehlenden Luftbewegungen erklären.

Das Auftreten stehender Wellen im Eistank ist ein Artefakt. In der Natur kommen stehende Wellen in dieser räumlichen und zeitlichen Gleichmäßigkeit nicht vor (DIETRICH et al. 1975). Dieser Punkt wird in der folgenden Diskussion ausführlich diskutiert.

Zu c) Gefiltertes Nordseewasser enthält im Vergleich mit polarem Meerwasser möglicherweise eine unterschiedliche Zahl von Nucleationskernen. Wie die Ergebnisse der glaziologischen Untersuchungen zeigen (EICKEN pers. Mitteilung), bewirkte das keinen meßbaren Einfluß auf die Textur des experimentellen Eises.

Zu d) Dieser Punkt wird in der folgenden Diskussion angesprochen.

6.3.2. Diskussion der Ergebnisse

Wenn die Temperatur in den oberen Schichten des Ozeans durch Wärmeabgabe an die Atmosphäre den Gefrierpunkt erreicht, bilden sich Eiskristalle nahe der Oberfläche. Ohne Wellen und Strömung frieren diese Eiskristalle zu festen zusammenhängenden Flächen zusammen. Wellen und Strömung können das Zusammenfrieren so lange verhindern, bis die unverfestigte Schicht aus Eiskristallen (Breieis) so angewachsen ist, daß die Wellenbewegungen wirksam gedämpft werden (WEEKS und ACKLEY 1982, MAYKUT 1985). Weiteres Eiswachstum erfolgt an der Unterseite von verfestigtem Eis durch An- und Weiterwachsen von Eiskristallen. Auch Breieis, das sich in Spalten und größeren offenen Stellen bildet und anschließend unter eine bestehende Eisdecke getrieben wird, kann zu einer Dickenzunahme führen.

Es ist bekannt, daß Organismen bei der Eisbildung im Neueis gegenüber den Konzentrationen im Freiwasser angereichert werden. Das betrifft sowohl Algen als auch Zooplankton (BUNT und LEE 1970, GARRISON et al. 1983, SPINDLER und DIECKMANN 1986, ACKLEY et al. 1987). In der Literatur werden verschiedene Mechanismen diskutiert, die eine Anreicherung der Organismen bewirken könnten. ACKLEY (1982) erwog die Möglichkeit, daß Organismen im Wasser als Keime für das Eiskristallwachstum dienen könnten und dadurch im Innern der aufsteigenden Eiskristalle zur Wasseroberfläche transportiert werden (nucleation). Im gleichen

Volumen Eis übersteigt die Anzahl der Organismen die Anzahl der Eiskristalle um etliche Zehnerpotenzen. Im Innern von Eiskristallen wurden auf Dünnschnittbildern von Eisproben keine Organismen beobachtet (EICKEN pers. Mitteilung). Dieser Mechanismus trägt daher, wenn überhaupt, nur zu einem geringen Anteil zu der gesamten Organismenanreicherung bei.

Bei einem weiteren Mechanismus, der von ACKLEY (1982) und GARRISON et al. (1983) erwähnt wurde, bleiben Organismen an Eiskristallen, die in der Wassersäule entstehen, haften und werden zusammen mit ihnen nach oben transportiert. REIMNITZ et al. (1990) untersuchten diesen "scavenging" oder "harvesting" genannten Mechanismus auf experimentelle Weise. Eine mit Meerwasser gefüllte Plexiglasröhre wurde so gekühlt, daß im unteren Teil Eiskristalle entstehen konnten. Die aufsteigenden Eiskristalle transportierten Algen, in anderen Versuchen auch Sedimentpartikel mit an die Oberfläche. Die Chlorophyllkonzentrationen in der Breiesschicht an der Oberseite der Röhren waren ca. dreimal höher als in dem darunterliegenden Wasser.

Nach ACKLEY et al. (1987) sowie SHEN und ACKERMANN (1990) wird durch den Druckgradienten, der beim Durchgang von Wellen durch eine Eisschicht entsteht, Meerwasser in das Eis und wieder hinaus gepumpt ("propagating wavefield"). Im Wasser enthaltene Teilchen können dabei im Eis haften bleiben.

Gemeinsam ist allen diesen Theorien, daß die Organismen durch Eiskristalle aus dem Wasser gefischt und zusammen mit dem Eis an der Meeresoberfläche festgehalten werden. In den Eistankversuchen sollte der Anteil der einzelnen Mechanismen am Gesamtprozeß quantifiziert werden, bzw. sollten die Ergebnisse die Natur der einzelnen Mechanismen etwas besser beleuchten.

Bei der Eisentstehung ohne Wellen und Strömung (Versuch 11) konnte zweierlei gezeigt werden. Es fand unter diesen Bedingungen, die zu einem Wachstum von säuligem Eis führten, keine Anreicherung von Organismen innerhalb der Eisdecke statt. Daß die Chlorophyllkonzentrationen innerhalb des Wassers während der Versuchsdauer von 90 h gleich blieben zeigte, daß die Algen in dieser Zeit nicht auf den Boden des Tankes absanken. Diese Tatsache ist bei der Interpretation der Ergebnisse der anderen Versuche wichtig. Innerhalb der wachsenden Eisdecke wurden nur so viele Algen ein-

geschlossen, wie in dem gleichen Wasservolumen auch vorhanden waren. Es war aber auch keine Verminderung der Chlorophyllkonzentrationen feststellbar, die durch einen Verlust von Algen beim Ausfließen von Sole bedingt wäre. Die Gesamtsalinität des Eises verringerte sich auf ein Drittel des Meerwassers, die Chlorophyllkonzentration im Eis blieb aber die Gleiche wie im Wasser, ein Zeichen dafür, daß die Algen im Eis haften blieben. Ob dieses Anhaften aktiv oder passiv geschah, ließ sich mit diesem Versuch nicht entscheiden. Der Durchmesser der Solekanäle, wie er anhand der Ausgußpräparate des Eises erkennbar war, betrug 100 - 200 μm . Die Alge mit der höchsten Abundanz in diesem Versuch, *Nitzschia subcurvata*, hatte eine Länge mittlere Länge von 50 μm und eine Dicke von 6 - 8 μm . Daraus kann man die Vermutung ableiten, daß die Algen nicht einfach im Eis steckenbleiben, sondern an den Wänden der Eiskristalle haften. Das Fehlen einer Anreicherung von Algen in dieser Versuchsanordnung schließt eine Anreicherung von Algen bei der Neubildung von säuligem Eis nicht gänzlich aus. Wenn planktische Organismen zur Zeit der Neueisbildung eine geringere Dichte aufweisen und dadurch an die Meeresoberfläche steigen, könnten sie schließlich in neuem Eis in höheren Konzentrationen vorliegen als zuvor in der Wassersäule. Für dieses Aufsteigen zur Zeit der Eisbildung gibt es in der Literatur keine Hinweise, so daß diese Möglichkeit spekulativ, aber nicht ausgeschlossen ist.

Eine deutliche Anreicherung von Algen konnte nur mit simuliertem Wellengang oder Strömung beobachtet werden und war somit an die Bildung von körnigem oder gemischt säulig-körnigem Eis gebunden. Daß durch eine Wassersäule aufsteigende Eiskristalle in der Lage sind, Algen aber auch anorganisches suspendiertes Material aus dem Wasser aufzunehmen und an die Oberfläche zu transportieren, wurde wiederholt durch Versuche belegt (GARRISON et al. 1989, REIMNITZ et al. 1990). Mit der hier vorgestellten Versuchsanordnung sollten die Eiskristalle, die sich an der Oberfläche bildeten, durch eine abwärts gerichtete Strömung möglichst mehrfach untergemischt werden. Es sollte ein Teil einer Langmuir-Zelle nachgebildet werden, wie sie sich im offenen Ozean unter Windeinfluß bilden (DIETRICH et al. 1975) und in deren Konvergenzzonen sich hohe Chlorophyllanreicherungen messen lassen (eigene unveröffentlichte Daten).

Bis zu welcher Größe sich die Eiskristalle noch in das freie Wasser mischten, konnte nicht direkt gemessen werden. Die beobachteten Eiskristalle hatten Durchmesser von 4-5 mm. Eiskristalle mit Durchmessern kleiner als 1 mm sollen sich durch stehendes Wasser mit Geschwindigkeiten von $3-6 \text{ cm s}^{-1}$ aufwärts bewegen (GARRISON et al. 1989). Die maximale Strömungsgeschwindigkeit in senkrechter Richtung von 8 cm s^{-1} konnte also Eiskristalle dieser Größenordnung in Bewegung halten. Wenn sich auch die Verweildauer der einzelnen Eiskristalle in der Wassersäule nicht bestimmen ließ, so ist doch sicher, daß zumindest die ersten Eiskristalle mehrere Stunden in der Wassersäule umherwirbelten. Die stetige Zunahme der Chlorophyllkonzentrationen im Eis und die Abnahme im Freiwasser (Versuch 10) zeigt, daß die Mechanismen, die eine Anreicherung bewirkten, bis zum Versuchsende wirksam waren. Die Abnahme der Chlorophyllkonzentration im Eis (Abb. 59) in Versuch 12 nach 90 h erklärt sich durch die Verschiebung der gesamten Eisdecke nach 50 h. Die neu gebildete Eisdecke bestand zu einem großen Teil aus säuligem Eis, das direkt am Ort gewachsen war und nur zu einem geringen Teil aus Eiskristallen, die mit der Strömung umhertrieben. Wie die Verteilung der Chlorophyllkonzentrationen entlang der Längsachse zeigte, war in diesem Teil der Eisdecke weniger Chlorophyll zu finden als im Wasser bei Versuchsende. Unterschiede in der Chlorophyllverteilung entlang der Längsachse des Eistanks (Abb. 60 und Abb. 61) kann man, von den oben beschriebenen Ereignissen abgesehen, durch eine unterschiedliche Durchströmung der Breieisschicht erklären. Das Eis bis ca. $L = 120 \text{ cm}$, wurde von aufsteigendem Wasser leichter durchströmt, als das bei größeren L durch die parallel unter dem Eis verlaufende Strömung der Fall war.

Bei niederen Chlorophyllkonzentrationen (Versuch 10) wurden die Algen effektiver angereichert, als das bei höheren Chlorophyllkonzentrationen (Versuch 12) der Fall war. Die Menge an Algen, die von einem bestimmten Eisvolumen durch Anreicherungsmechanismen aufgenommen werden kann, ist möglicherweise begrenzt. Von GARRISON et al. (1989) wurden in Breieis Anreicherungsfaktoren gegenüber dem darunterliegenden Wasser von bis zu 80 gefunden. Die absolute Chlorophyllkonzentration im Eis lag bei $12-13 \mu\text{g l}^{-1}$, und somit in der gleichen Größenordnung wie in Versuch 12 (10-

20 $\mu\text{g l}^{-1}$).

In den Versuchen mit simulierten Wellen wurde ebenfalls eine Anreicherung des Chlorophylls in der Eisdecke beobachtet, doch war sowohl die zeitliche als auch die räumliche Verteilung des Chlorophylls in der Eisdecke von der der anderen Versuchen verschieden. Auf die gesamte Eisdecke bezogen konnte keine oder nur in den ersten Stunden eine Anreicherung des Chlorophylls beobachtet werden. Die Abnahme der Chlorophyllkonzentrationen im Wasser in den gleichen Zeiträumen zeigt, daß die Volumenzunahme des Eises schneller vorstatten ging, als Chlorophyll im Eis angereichert werden konnte. Die Chlorophyllkonzentrationen entlang der Längsachse des Tankes (Abb. 54 u. 55) zeigten deutlich, daß eine Anreicherung nur an wenigen Stellen stattfand. Ein Zusammenhang zwischen den stehenden Wellen und der Chlorophyllverteilung im Eis ist offensichtlich. An den Flanken der stehenden Wellen wurde das Chlorophyll angereichert (Abb. 66), an den Wellenknoten und Wellenbäuchen fand keine oder nur geringe Anreicherung statt.

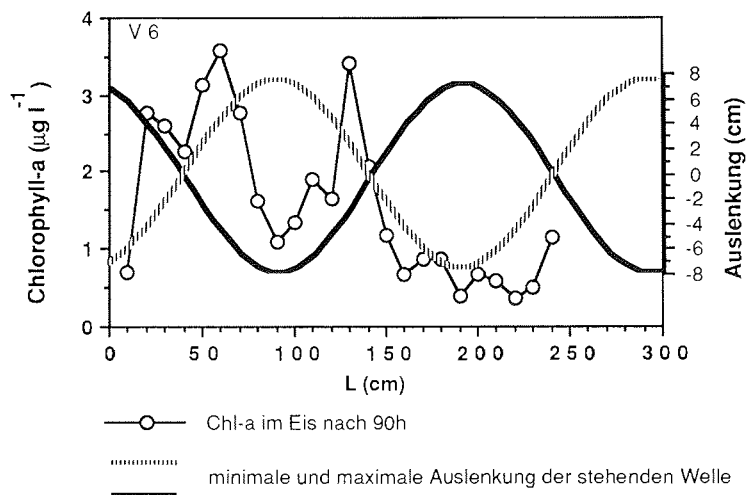


Abb. 66: Die Chlorophyllkonzentrationen im Eis nach 90 h und die Schwingungsform der stehenden Welle zu Versuchsbeginn entlang der Längsachse L des Eistankes.

Geht man davon aus, daß jeder Kontakt zwischen Eiskristall und Alge zu einem gewissen Prozentsatz zu einer Anheftung der Alge an das Eis führt, so bewirken alle Mechanismen, die die Anzahl der Kontakte erhöhen, eine Anreicherung der Algen im Eis. Im vorliegenden Fall kann eine Häufung der Kontakte nur dadurch erfolgen, daß die

Breieisdecke vermehrt von dem darunter liegenden Wasser durchströmt wird. Zwei physikalische Mechanismen können diese Durchmischung bewirken.

Zum einen folgen die Eiskristalle als träge Masse nur leicht verzögert den Bewegungen der Wasserteilchen (Trägheitseffekt T). Bei jedem Beschleunigungsvorgang erfolgt eine Relativbewegung zwischen Eiskristallen und Wasser, der zu einer Durchmischung führt. In der stehenden Welle bewegen sich die Teilchen entlang von Linien, die an den Wellenbäuchen vertikal und an den Wellenknoten horizontal verlaufen. Daraus ergibt sich, daß eine Beschleunigung der Eiskristalle an allen Stellen erfolgt, nur muß an den Knoten die Beschleunigung gegen die Schwerkraft erfolgen. Effekt T wird daher an den Wellenbäuchen am ausgeprägtesten sein.

Zum anderen wird die Wasseroberfläche stetig in ihrer Ausdehnung verändert. Der Eisbrei wird dabei im Wechsel expandiert und komprimiert, wodurch ebenfalls Ein- und Ausstrom von Wasser erreicht wird (Oberflächeneffekt O). Dieser Effekt wird an den Knoten der stehenden Welle am größten. Die Addition beider Effekte führt zu einer Kurve, die an den Stellen maximale Werte erreicht (Abb. 67), an denen auch die höchsten Chlorophyllkonzentrationen gefunden wurden.

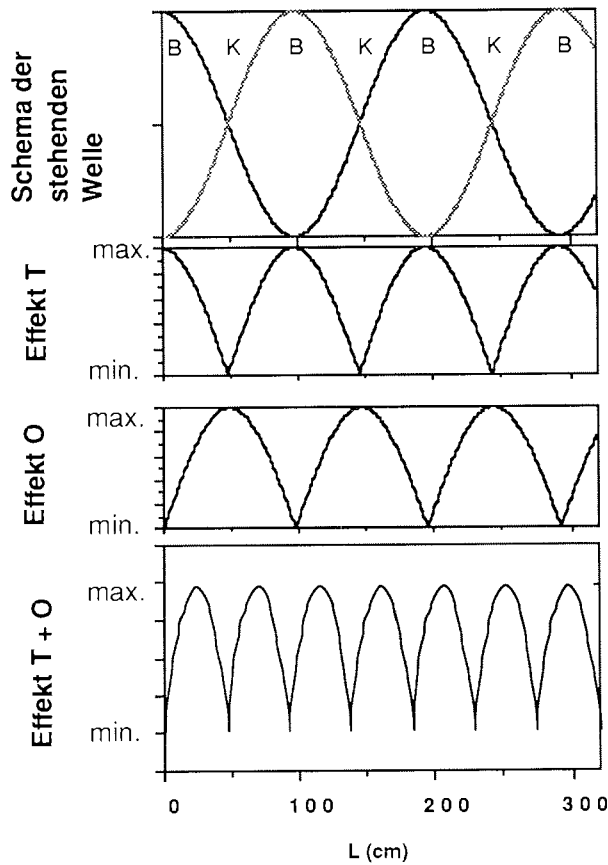


Abb. 67: Die Amplitude der stehenden Welle (B = Wellenbauch, K = Wellenknoten) und die dimensionslose Stärke der im Text beschriebenen Anreicherungseffekte, gegen die Länge L im Eistank. Beschreibung der Effekte T und O siehe Text.

Die stehende Welle wird durch die Gleichung einer Sinusschwingung mit ortsabhängiger Amplitude beschrieben:

$$A(L) = 2 A_{\max} \cos \frac{2\pi}{\vartheta} L$$

mit $A(L)$ = Amplitude der stehenden Welle am Ort L

A_{\max} = maximale Amplitude der stehenden Welle

L = Dimension L im Eistank (cm)

ϑ = Wellenlänge der stehenden Welle (cm)

Die Effekte T und O sind den Absolutwerten der ersten und der zweiten Ableitung nach L dieser Funktion proportional, für die Summe aus beiden Funktionen ergibt sich somit:

$$\Sigma \text{ Effekte A, B} \sim \left| \sin \frac{2\pi}{\partial} L \right| + \left| \cos \frac{2\pi}{\partial} L \right|$$

Diese Funktion beschreibt genau das Muster der Chlorophyllverteilung, wie sie im Eistank bei simulierten Wellen gefunden wurde.

In fortschreitenden Wellen sind die beiden beschriebenden Effekte nicht räumlich sondern zeitlich voneinander getrennt. Sie bewirken dadurch keine räumlichen Unterschiede in den Chlorophyllkonzentrationen.

Die starke Abnahme der Anreicherung von Chlorophyll bei größeren L erklärt sich durch die später und weniger dick ausgebildete Breieisschicht in der Nähe des Wellengenerators.

6.3.3. Zusammenfassung:

Sowohl Wellen als auch Strömung im Eistank führten zu einer Anreicherung von Algen in Neueis. Demnach führt jeder Mechanismus, der die Durchmischung von Wasser und Eis fördert, zu einer Anreicherung der Algen im Eis. Für die Verhältnisse im Freiland ergibt sich, daß sowohl der wellengetriebene, als auch der strömungsgetriebene Anreicherungsmechanismus wirksam werden und die Übergänge fließend sind. Die Langmuir-Zirkulation transportiert Eiskristalle in tiefere Wasserschichten, wobei sie auf ihrem Weg Algen aufsammeln können. Wird die Auftriebskraft der Eiskristalle größer als die Kraft der abwärts gerichteten Strömung, bleiben die Eiskristalle an der Oberfläche. Die oberflächlichen Breieisschichten filtern durch die wellengetriebenen Pumpe Algen aus dem darunterliegenden Wasser. Durch das Zusammenspiel beider Mechanismen, die über verschiedene Entfernungen wirksam werden können, können die Algen aus der oberflächennahen Wasserschicht effektiv im Eis angereichert werden.

7. Literaturverzeichnis

- Ackley, S. F. (1982): Ice scavenging and nucleation: two mechanisms for incorporation of algae into newly-formed sea ice. *EOS*, 63, 54.
- Ackley, S. F., G. Dieckmann und H. Shen (1987): Algal and foram incorporation into new sea ice. *EOS* 68, 1736.
- Alexander, V., R. Horner und R.C. Clasby (1974): Metabolism of Arctic sea ice organisms. *IMS Report R74-4*. Univ. of Alaska, Fairbanks/Alaska, 1-120
- Andersen, O. G. N. (1989): Primary production, chlorophyll, light and nutrients beneath the arctic sea ice. In *The Arctic Sea*, Hermann, Y., Ed., Van Nostrand Reinhold Com., New York, 147-191.
- Anderson, D. L. (1961) Growth rate of sea ice. *J. Glaciol.*, 3, 1170-1172.
- Andreas, E. L. und S. F. Ackley (1982): On the differences in ablation seasons of Arctic and Antarctic sea ice. *J. Atmosph. Sci.*, 39, 440-447.
- Assur, A. (1960): Composition of Sea Ice and its Tensile Strength. *SIPRE Res. Rep 44*, Wilmette, Illinois, 1-49.
- Augstein, E., N. Bagriantsev und H. W. Schenke (1991): Die Expedition Antarktis VIII/1-2, 1989 mit der Winter Weddell Gyre Study der Forschungsschiffe "Polarstern" und "Akademik Fedorof". *Ber. Polarf.* 84, 47-129.
- Bartsch, A. (1989): Die Eisalgenflora des Weddellmeeres (Antarktis): Artenzusammensetzung und Biomasse sowie Ökophysiologie ausgewählter Arten. *Ber. Polarf.* 63, 1-110.
- Bathman, U., M. Schulz-Baldes, E. Fahrbach, V. Smetacek und H.-W. Hubberten, Eds. (1992): Die Expeditionen Antarktis IX/1-4 des Forschungsschiffes "Polarstern" 1999/91. *Ber. Polarf.* 100, 95-258.
- Beardall, J. und I. Morris (1976): The concept of light intensity adaptation in marine Phytoplankton: some experiments with *Phaeodactylum tricornutum*. *Mar. Biol.*, 37, 377-387.

- Bidigare, R. R. (1983): Nitrogen excretion by marine zooplankton. In *Nitrogen in the Marine Environment*, Carpenter, E. und D. Capone, Ed., Chapter 13.
- Bodungen, B. v., V. Smetacek, M. M. Tilzer und B. Zeitschel (1986): Primary production and sedimentation during spring in the Antarctic Peninsula region. *Deep Sea Res.* 33, 177-194.
- Bunt, J. S. (1963): Diatoms of Antarctic sea ice as agents of primary production. *Nature* 14, 197-200.
- Bunt, J. S. (1964 a): Primary productivity under sea ice in Antarctic waters. I. Concentrations and photosynthetic activities of microalgae in the waters of McMurdo Sound, Antarctica. *Antarct. Res. Ser.*, 1, 13-26.
- Bunt, J. S. (1964 b): Primary productivity under sea ice in Antarctic waters. II. Influence of Light and other factors on photosynthetic activities of Antarctic marine microalgae. *Antarct. Res. Ser.* 1, 27-31.
- Bunt, J. S. (1964 c): Analysis of algal pigments by thin layer chromatography. *Nature (London)*, 203, 1261-1264.
- Bunt, J.S. (1968): Some characteristics of microalgae isolated from Antarctic sea ice. In *Biology of the antarctic seas III*. LLANO, G. A. und W. L. SMITT, Ed., *Antarct. Res. Ser.* 11, 1-14.
- Bunt, J. S. (1971): Microbial productivity in polar regions. *Microbes and Biological Productivity*, Twenty-first Symposium of the society for General Microbiology, 333-354.
- Bunt, J. S. und C. C. Lee (1970): Seasonal primary production in Antarctic sea ice at McMurdo Sound in 1967. *J. Mar. Res.*, 28, 304-320.
- Burch, M. D. und H. J. Marchant (1983): Motility and microtubule stability of Antarctic algae at sub-zero temperatures. *Protoplasma*, 115, 240.
- Charlson, R. J., J. E. Lovelock, M. O. Andreae und S. G. Warren (1987): Oceanic phytoplankton, atmospheric sulfur, cloud albedo and climate. *Nature* 326, 655-661.

- Clarke, D. B. und S. F. Ackley (1984): Sea ice structure and biological activity in the Antarctic marginal ice zone. *J. Geophys. Res.*, **89**, 2087-2095.
- Cox, G. F. N und W. F. Weeks (1983): Equations for determining the gas and brine volumes in sea-ice samples. *J. Glaciol.*, **29**, 306-316.
- Cox, G. F. N. und W. F. Weeks (1988): Numerical simulations of the profile properties at undeformed first-year ice during growth season. *J. Geophys. Res.*, **93**, 3581-3585.
- Dieckmann, G. S., M. A. Lange, S. F. Ackley, J. C. Jennings Jr. (1991): The nutrient status of the Weddell Sea during winter: effects of sea ice texture and algae. *Polar Biol.* **11**, 449-456.
- Dietrich, G., K. Kalle, W. Krauss und G. Siedler (1975): *Allgemeine Meereskunde. Eine Einführung in die Ozeanographie.* Verlag Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 1-585.
- Eicken, H. (1991): Quantifizierung von Meereiseigenschaften: Automatische Bildanalyse von Dünnschnitten und Parametrisierung von Chlorophyll- und Salzgehaltsprofilen. *Ber. Polarf.*, **82**, 1-105.
- Eicken, H. und M. A. Lange (1989): Development and properties of sea ice in the coastal regime of the southeastern Weddell Sea. *J. Geophys. Res.*, **94**, 8193-8206.
- Eide, L. und S. Martin (1975): The formation of brine drainage features in young sea ice. *J. Glaciol.*, **14**, 137-154.
- Evans, C. A. und J. E. O'Reilly (1983): A handbook for measurements of chlorophyll a in netplankton and nanoplankton, *National Oceanic and Atmospheric Administration, Highlands, N. J.*, 1-44.
- Fogg, G. E. (1977): Aquatic primary production in the Antarctic. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B*, **279**, 27-38.
- Frankenstein, G. und R. Garner (1967): Equations for determining the brine volume of sea ice from $-0,5^{\circ}$ to $-22,9^{\circ}$ C. *J. Glac.* **6**, 237-239.

- Garrison, D. L., S. F. Ackley und K. R. Buck (1983): A physical mechanism for establishing algal populations in frazil ice. *Nature*, 306, 363-365.
- Garrison, D. L., A. R. Close und E. Reimnitz (1989): Algae concentrated by frazil ice: evidence from laboratory and field measurements. *Antarctic Sci.* 1, 313-316.
- Garrison, D. L., A. R. Close und L. I. Gordon (1990): Nutrient concentrations in Antarctic pack ice during winter. In *Sea ice properties and processes*. Ackley S. F., W. F. Weeks, Eds, Proceedings of the W. F. Weeks Sea Ice Symposium, *CRELL Monograph 90-1*, 5-40.
- Garrison, D. L. und K. R. Buck (1986): Organism losses during ice melting: a serious bias in sea ice community studies. *Polar Biol.* 6, 237-239.
- Gieskes, W. W. C., M. Elbrächter, U. Rabsch, R. Scharek, K. Schaumann, V. Smetacek und C. Veth (1987): Phytoplankton and heterotrophic microorganisms in the water column. In *Die Winter-Expedition mit FS "Polarstern" in die Antarktis (ANT V/1-3)*, Schnack-Schiel, S. Ed., *Ber. Polarf.* 39, 190-196.
- Gleitz, M. und G. O. Kirst (1991): Photosynthesis-irradiance relationships and carbon metabolism of different ice algal assemblages collected from Weddell Sea pack ice during austral spring. *Polar Biol.* 11, 385-392.
- Gordon, A. L. (1981): Seasonality of southern ocean sea ice. *J. Geophys. Res.*, 86, 4193-4197.
- Gosselin, M. L. Legendre, J.-C. Therriault und S. Demers (1990): Light and Nutrient Limitation of Sea-Ice Microalgae (Hudson Bay, Canadian Arctic). *J. Phycol.* 26, 220-232.
- Götting, K.-J. E., F. Kilian und R. Schnetter (1982): *Einführung in die Meeresbiologie*. Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden.
- Gradinger, R. und M. E. M. Baumann (1991): Distribution of phytoplankton communities in relation to the large-scale hydrographical regime in the Fram Strait. *Marine Biology* 111, 311-321.

- Grainger, E. H. (1977): The annual nutrient cycle in sea-ice. *Polar Oceans*, M. J. Dunbar, Ed., The Arctic Institute of North America, Calgary, 285-299.
- Grasshoff, K. (1976): Methods of seawater analysis. Verlag Chemie, Weinheim, 1- 317.
- Grenfell, T. C. und G. A. Maykut (1977): The optical properties of ice and snow in the Arctic Basin. *J. Glaciol.* 18, 445.
- Guillard, R. R. L. und J. H. Ryter (1962): Studies of marine planktonic diatoms. In Werner, D. (Hrsg.): *The biology of Diatoms*. Blackwell Scientific Publications, Oxford London Edinburgh Melbourne, 372-469.
- Harrison, J. D. und W. A. Tiller (1963): Controlled freezing of water. In *Ice and Snow*, Kingery, W. D., Ed., MIT press, Cambridge, 215.
- Hasle, G. R. (1964): Nitzschia and Fragilariopsis species studied in the light and electron microscopes. I. Some marine species of the groups Nitschiella and Lanceolatae. *Skr. Norske Vidensk. Akad. I. Mat. Nat. Kl. N. S.* 16. 1-48.
- Hasle, G. R. (1965 a): Nitzschia and Fragilariopsis species studied in the light and electron microscopes. II. The group Pseudonitzschia. *Skr. Norske Vidensk. Akad. I. Mat. Nat. Kl. N. S.* 18, 1-45.
- Hasle, G. R. (1965 b): Nitzschia and Fragilariopsis species studied in the light and electron microscopes. III. The genus Fragilariopsis. *Skr. Norske Vidensk. Akad. I. Mat. Nat. Kl. N. S.* 21, 1-49.
- Hasle, G. R. und G. A. Fryxell (1985): Diatoms: Cleaning and mounting for light and electron microscopy. *Trans. Amer. Microsc. Soc.* 89. 469-474.
- Heiden, H. und R. W. Kolbe (1928): Die marinen Diatomeen der deutschen Südpolarexpedition 1901-1903. *Dtsch. Süd-Polar-Exped. 1901-1903*, 8, 447-715.
- HELCOM (1983): Guidline for the Baltic monitoring programme for second stage. *Baltic Marine Environm. Prot. Comm.*, Helsinki, 1-249.

- Holm-Hansen, O., S. A. El-Sayed, B. A. Franceschini und R. Cuhel (1977): Primary production and the factors controlling phytoplankton growth in the Antarctic seas. In *Adaptions within Antarctic Ecosystems*, Llano, G. A., Ed., Gulf Publ. Houston, 1977, 11-50.
- Horner, R. (1985): *Sea ice biota*. CRC press, Boca Raton, 1-215.
- Horner, R. (1988): Ice associated Ecosystems. In *Polar Marin Diatoms*, Medlin, L. K. und J. Priddle, Eds., British Antarctic Survey, 9-14.
- Horner, R. und V. Alexander (1972): Algal populations in Arctic sea ice: an investigation of heterotrophy. *Limnol. Oceanogr.*, 12, 454-458.
- Hustedt, F. (1958): Diatomeen aus der Antarktis und dem Südatlantik. *Deutsche antarktische Expedition 1938/39, Band 2*. Geogr.-Kartogr. Anstalt "Mundus", Hamburg, 103-191.
- Jørgensen, E. G. (1968): The adaptation of plankton algae. II. Aspects of the temperature adaptation of *Skeletonema costatum*. *Physiologica Pl.* 21, 423-427.
- Karsten, U. (1991): Ökophysiologische Untersuchungen zur Salinitäts- und Temperaturtoleranz antarktischer Grünalgen unter besonderer Berücksichtigung des β -Dimethylsulfoniupropionat (DMSP) Stoffwechsels. *Ber. Polarforsch.* 79, 1-108.
- Kawamura, T. (1988): Observation of the internal structure of sea ice by X ray computed tomography. *J. Geophys. Res. (C Oceans)*, vol. 93, no, C3, 2343-2350.
- Kottmeier, C., und C. W. Sullivan (1988): Sea ice microbial communities (SIMCO). 9. Effects of temperature and salinity on rates of metabolism and growth of autotrophs and heterotrophs. *Polar Biol.* 8. 293-304.
- Lake, R. A. und E. L. Lewis (1970): Salt rejection by sea ice during growth. *J. Geophys. Res.* 75, 583-597.
- Lange, M. A. (1988): Basic properties of Antarctic sea ice revealed by textural analysis of ice cores. *Ann. Glaciol.*, 10, 95-101.

- Lange, M. A., H. Eicken, K. C. Jezek und U. Vogel (1988): Physikalische Meereisuntersuchungen. *Ber. Polarforsch.*, 59, 67-76
- Langleben, M. P. (1972): The decay of an annual ice cover. *J. Glaciol.*, 11, 337-344.
- Manguin, E. (1960): Les diatomées de la Terre Adélie campagne du "Commandant Chargot" 1949-1950. *Ann. des Sc. nat., Bot.* 12, 223-363.
- Martin, J. H., R. M. Gordon und S. E. Fitzwater (1990): Iron in Antarctic waters. *Nature* 345, 6271, 156-158.
- Maykut, G. A. (1982): Large-scale heat exchange and ice production in the Central Arctic. *J. Geophys. Res.* 87, 7971-7984.
- Maykut, G. A. (1985): The ice environment. In *Sea ice biota*. Horner R. A. Ed., CRC press, Boca Raton, 21-82.
- Maykut, G. A. und T. C. Grenfell (1975): Spectral distribution of light beneath first-year sea ice in the Arctic Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, 20, 554-563.
- McConville, M. J. (1985): Chemical composition and biochemistry of sea ice Microalgae. In *Sea ice biota*. Horner R. A. Ed., CRC press, Boca Raton, 105-146.
- Meese, D. A. (1990): The Chemical and Structural Properties of Sea Ice in the Southern Beaufort Sea. In *Sea ice properties and processes*. Ackley S. F., W. F. Weeks, Eds, Proceedings of the W. F. Weeks Sea Ice Symposium, CRELL Monograph 90-1, 32-35.
- Meguro, H., K. Ito und H. Fukushima (1967): Ice flora (bottom type): a mechanism of primary production in polar seas and the growth of diatoms in sea ice. *Arctic*, 20, 114-133.
- Morita, R. Y. (1975): Psychrophilic bacteria. *Bacteriol. Rev.*, 39, 144-167.
- Morris, I. und H. E. Clover (1981): Physiology of photosynthesis by marine coccoid cyanobacteria - some ecological implications. *Limnol. Oceanogr.*, 26, 957.

- Nakawo, M. (1983): Measurements on air porosity of sea ice. *Ann. Glaciol.*, 4, 204-208.
- Niedrauer, T. M. und S. Martin (1979): An experimental study of brine drainage and convection in young sea ice. *J. Geophys. Res.*, 84, 1176-1186.
- Nöthig, E.-M. (1988): Untersuchungen zur Ökologie des Phytoplanktons im südöstlichen Weddellmeer im Januar/Februar 1985. *Ber. Polarf.*, 53.
- Oerlemans, J. und C. J. van der Veen (1984): *Ice Sheets and Climate*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht Boston Lancaster.
- Ono, N. (1967): Specific heat and heat of fusion of sea ice, in *Physics of snow and ice*, Oura, H., Ed., Hokkaido University, Hokkaido, Japan, 1967, 599.
- Ono, N. (1968): Thermal properties of sea ice IV: thermal constants of sea ice. *Low Temp. Sci.*, A26, 329-349.
- Palmisano, A. C. und C. W. Sullivan (1982): Physiology of ice Diatoms. I. Response of three polar Diatoms to a simulated summer-winter transition. *J. Phycol.*, 18, 489-498.
- Palmisano, A. C. und C. W. Sullivan (1983): Physiology of sea ice diatoms. II. Dark survival of three polar diatoms. *Can. J. Microbiol.*, 29, 157-160.
- Palmisano, A. C., C. W. Sullivan (1985 a): Growth, metabolism, and dark survival in sea ice microalgae. In *Sea Ice Biota*, Horner R. A. Ed., CRC press, Boca Raton, 131-157.
- Palmisano, A. C. und C. W. Sullivan (1985 b): Physiological response of micro-algae in the ice-platelet layer to low-light conditions. In *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs*, Siegfried, W. R., P. R. Condy und R. M. Laws, Eds., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 84-88.
- Pfringsheim, E. G. (1954): *Algenreinkulturen - Ihre Herstellung und Erhaltung*. Fischer-Verlag Jena.
- Prantl, L., K. Oswatitsch und K. Wiegand (1984): *Führer durch die Strömungslehre*. Vieweg Verlag, Braunschweig.

- Priddle, J. und G. A. Fryxell (1985): Handbook of the common plankton diatoms of the southern ocean: Centrales except the genus *Thalassiosira*. *Br. Antarct. Surv., Cambridge*, 1-159.
- Quilty, P. G. (1990): Significance of evidence for changes in the antarctic marine environment over the last 5 millions years, in *Antarctic Ecosystems. Ecological Chances and Conservation*, Kerry, K. R. and G. Hempel, Eds., Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, 3-9.
- Reimnitz, E., E. W. Kempema, W. S. Weber, J. R. Clayton und J. R. Payne (1990): Suspended-Matter Scavenging by Rising Frazil Ice. In *Sea ice properties and processes*. Ackley S. F., W. F. Weeks, Eds, Proceedings of the W. F. Weeks Sea Ice Symposium, *CRELL Monograph 90-1*, 97-100.
- Richardson, C. und E. E. Keller (1966): The brine content of sea ice measured with a nuclear magnetic resonance spectrometer. *J. Glaciol.*, 6, 89-100.
- Rosenberg, M., P. Bartl und J. Lesko (1960): Watersoluble Methacrylate as an Embedding Medium for the Preparation of Ultrathin Sections. *J. Ultrastructure Research*, 4, 298-303.
- Sachs, L. (1984): *Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, 1-552.
- Sakshaug, E. und O. Holm-Hansen (1984): Factors governing pelagic production in polar oceans. In *Marine Phytoplankton and productivity*. Holm-Hansen, O., L. Bolis und R. Gilles, Eds., *Lecture notes on coastal and estuarine studies, Vol 8*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1-18.
- Scharek, R. (1991): Die Entwicklung des Phytoplanktons im östlichen Weddellmeer (Antarktis) beim Übergang vom Spätwinter zum Frühjahr. *Ber. Polarf.* 94, 1-195.
- Schwoerbel, J. (1967): Das hyporheische Interstitial als Grenzbiotop zwischen oberirdischem und subterranem Ökosystem und seine Bedeutung für die Primär-Evolution von Kleinsthöhlenbewohnern. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 33, 1-62.

- Shen, H. T. und N. L. Ackermann (1990): Wave-induced sediment enrichment in coastal ice covers. In *Sea ice properties and processes*. S. F. Ackley und W. F. Weeks, Eds., CRREL Monograph 90-1, 100-102.
- Sinha, H. K. (1977): Technique for studying structure of sea ice. *J. Glaciol.*, 18, 315-323.
- Soeder, C. und E. Stengel (1974): Physico-chemical factors affecting metabolism and growth rate. In *Algal physiology and biochemistry*, Stewart, W. D. P. Ed., Botanical Monographs, Vol 10. Blackwell, Oxford London Edinburgh Melbourne, 714-740.
- Spindler, M. and G. S. Dieckmann (1986): Distribution and abundance of the planktic foraminifer *Neogloboquadrina pachyderma* in sea ice of the Weddell Sea (Antarctica). *Polar Biol.*, 6 185-191.
- Strathmann, R. R. (1967): Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume. *Limnol. Oceanogr.* 12, 411-418.
- Strickland, J. D. H. (1960): Measuring the production of marine phytoplankton. *Fish. Res. Bd. Can. Bull.* 122, 172.
- Sullivan, C. W. (1985): Sea ice bacteria: reciprocal interactions of the organisms and their environment. In *Sea Ice Biota*, Horner R. A. Ed., CRC press, Boca Raton, 159-190.
- Sullivan, C. W., A. C. Palmisano, S. T. Kottmeier, und R. Moe (1982): Development of the sea ice microbial community in McMurdo Sound. *Antarc. J. U. S.* 17, 155-157.
- Sullivan, C. W., A. C. Palmisano, S. T. Kottmeier, und R. Moe (1985): The influence of light on growth and development of the sea-ice microbial community of McMurdo Sound. In *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs*, Siegfried, W. R., P. R. Condy und R. M. Laws, Eds., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 78-83.
- Thomas, C. W. (1963): On the transfer of visible radiation through sea ice and snow. *J. Glaciol.*, 4, 481-484.

- Undrsteiner, N. (1968): Natural desalination and equilibrium salinity profile of perennial sea ice. *J. Geophys. Res.*, **73**, 1251-1257.
- UNESCO (1981): International oceanographic tables. *UNESCO Technical Papers in Marine Science*, **3**, 39.
- Utermöhl, H. (1958): Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Mitt. int. Ver. theor. angew. Limnol.* **9**, 1-38.
- Van Heurk, H. (1909): Diatomées. Resultats du voyage du S.Y. "Belgica" en 1897-9 sous le commandement de A. de Gerlache du Gomery. Rapport Scientifiques: Botaniques. *Exped. Antarct. Belg.* **5**, 1-129.
- Wakatsuchi, W. und T. Saito (1985): On brine drainage channels of young sea ice. *Annals of glaciology*, **6**, 200-202.
- Walsh, J. E. und C. M. Johnson (1979): An analysis of arctic sea ice fluctuations, 1953-1977. *J. Phys. Oceanogr.*, **9**, 580.
- Weeks, W. F. und O. S. Lee (1962): The salinity distribution in young sea ice. *Arctic*, **15**, 92-108.
- Weeks, W. F. und S. F. Ackley (1982): The growth, structure and properties of sea ice, *CRELL Monogr.* **82-1**, Cold Reg. Res. and Eng. Lab., Hanover, N. H., 1-116.
- Zwally, H. J., J. C. Comiso, C. L. Parkinson, W. J. Campbell, F.D. Carsey und P. Gloersen (1983): Antarctic sea ice, 1973-1979: Satellite passive-microwave observations. *NASA SP-459*, Nation. Aeronaut. Space Admin., Whashington.

8. Anhang

Tab. A1: PAR Einstrahlungswerte während der Expedition ANT 8/2.

Station	an82255	an82256	an82256	an82257	an82258	an82259
Datum	12.9.89	13.9.89	13.9.89	14.9.89	15.9.89	16.9.89
UTC	1900	1530	1840	1330	1600	1700
Pos	63° 21' S	63°29' S	63°29' S	63°46' S	64°07' S	64°29' S
	52° 55' W	51°43' W	51°43' W	50°43' W	48°03' W	45°36' W
Eisdicke	2	0,77	0,77	1,5	1,52	0,89
Schneedicke	0,75	0,07	0,07	0,63	0,47	0,17
PAR 2[]	171	718	408	816	490	680
Station	an82261	an82265	an82266	ann82267	an82268	ann82269
Datum	17.9.89	22.9.89	23.9.89	24.9.89	25.9.89	26.9.89
UTC	0700	1600	1530	0840	1550	1345
Pos	64°38 S	65°25 S	65°40 S	65°40 S	66°25' S	66°37 S
	44°16 W	40°19 W	38°46 W	36°32 W	33°59' W	31°29 W
Eisdicke	1,32	1,4	0,85	0,68	0,4	0,42
Schneedicke	0,62	0,65	0,63	0,37	0,37	0,14
PAR 2[]	326	658	374	218	355	816
Station	an82271	an82272	an82275	an82276	an82277	an82278
Datum	28.9.89	29.9.89	2.10.89	3.10.89	4.10.89	5.10.89
UTC	1050	1000	1330	1330	0900	1400
Pos	67°00 S	67°00 S	67°25 S	67°48 S	68°23 S	69°38' S
	28°04 W	24°04 W	23°43 W	21°18 W	18°45 W	15°42' W
Eisdicke	0,65	0,8	0,65	0,6	0,6	1
Schneedicke	0,19	0,19	0,08	0,12	0,06	0,13
PAR 2[]	345	695	829	353	316	445
Station	an82279	an82284	an82285	an822860 1	an82288	an82289
Datum	6.10.89	11.10.89	12.10.89	13.10.89	15.10.89	16.10.89
UTC	1300	0930	2000	1650	1055	1615
Pos	70°21' S	70°30' S	69°29' S	68°59' S	68°09' S	66°203' S
	13°21' W	8°05' W	08°13' W	07°56' W	07°12' W	5°10' W
Eisdicke	0,56	1,7	0,21	0,45	1	0,68
Schneedicke	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,05
PAR 2[]	434	763	434	603	1224	684
Station	an82292	an82293	an82294	an822940 3	an82295	an82296
Datum	19.10.89	20.10.89	21.10.89	21.10.89	22.10.89	31.10.89
UTC	1330	1515	0620	1620	0735	0515
Pos	63°34' S	61°46' S	60°51' S	59°27' S	59°03' S	57 16 S
	2°09' W	0°13' W	00°40' E	01°31' E	02°25' E	04 02 E
Eisdicke	0,65	0,7	0,64	0,4	0,55	0,45
Schneedicke	0,15	0,06	0,16	0,19	0,17	0,2
PAR 2[]	816	592	605	193	489	19

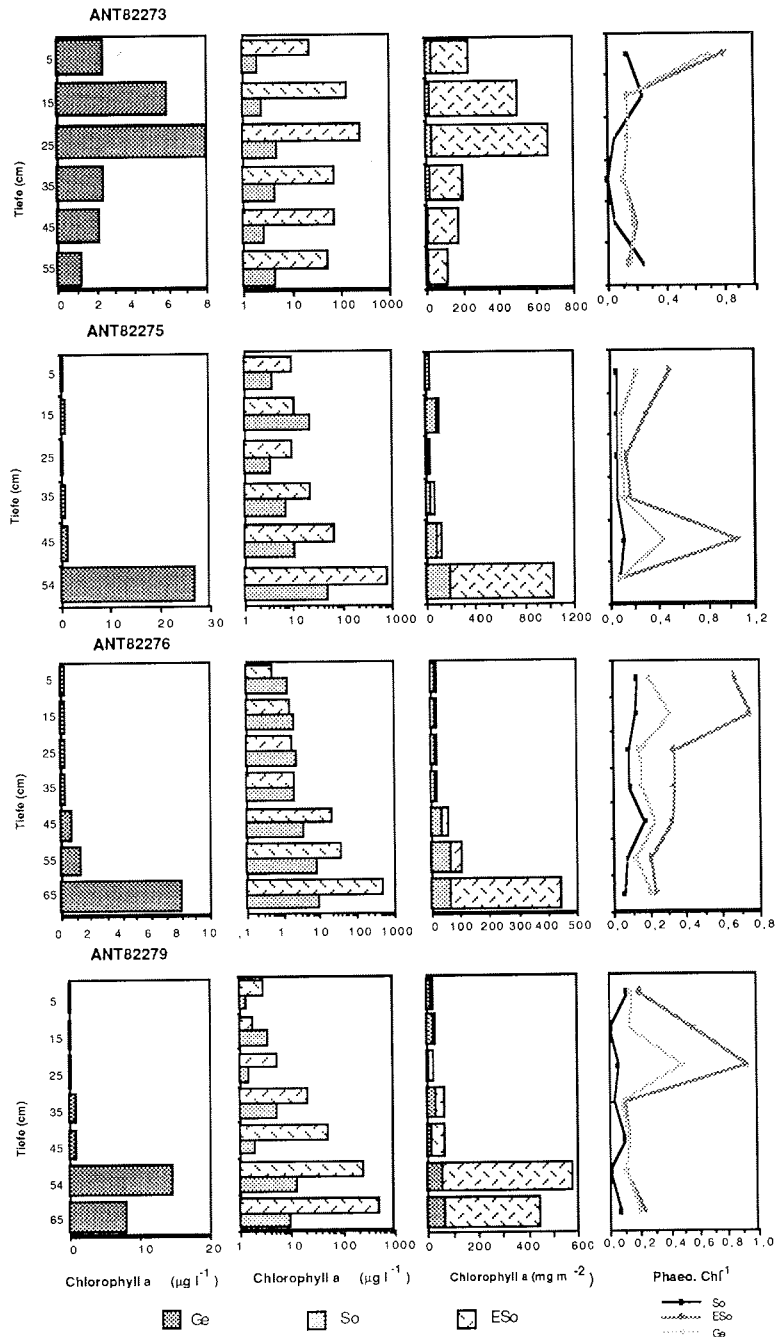


Abb. A1: Die Chlorophyll a Konzentrationen der aufgetauten Kerne (Ge), der Sole (So) und der eingeschlossenen Sole (ESo) gegen die Tiefe (Kerne ANT 82273, 82275, 82276 und 82279).

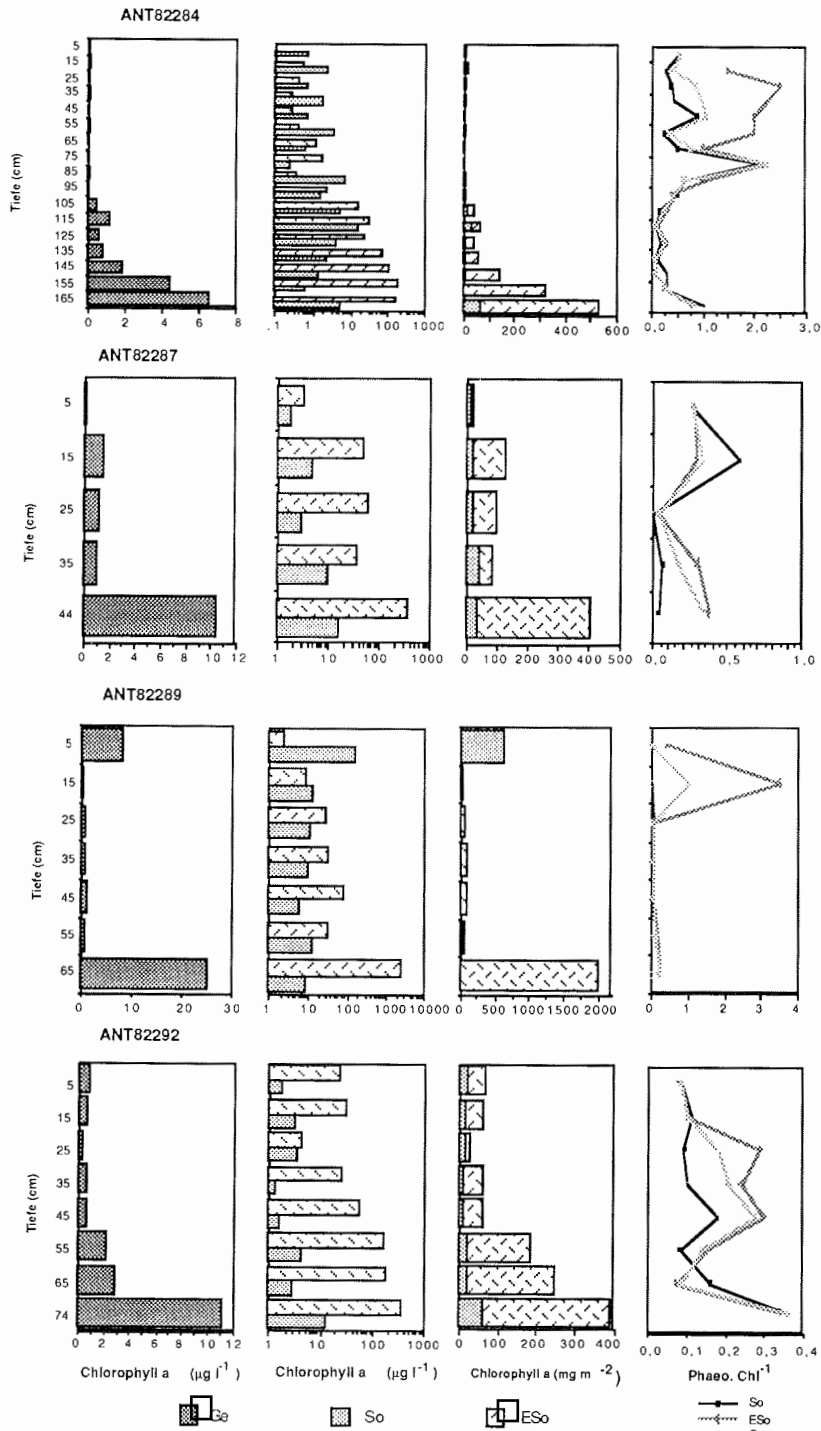


Abb. A2: Die Chlorophyll a Konzentrationen der aufgetauten Kerne (Ge), der Sole (So) und der eingeschlossenen Sole (ESo) gegen die Tiefe (Kerne ANT 82284, 82287, 82289 und 82292).

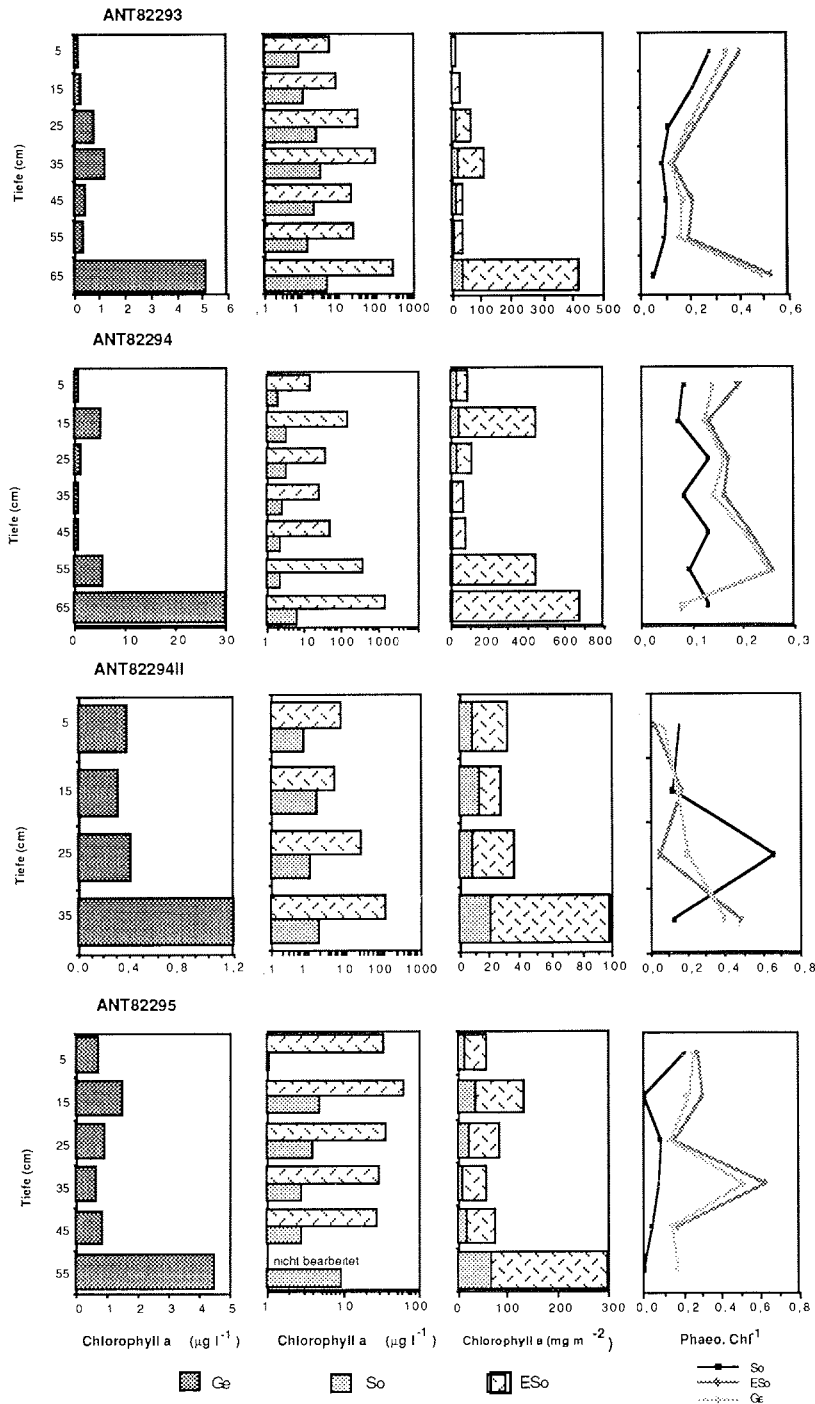


Abb. A3: Die Chlorophyll a Konzentrationen der aufgetauten Kerne (Ge), der Sole (So) und der eingeschlossenen Sole (ESo) gegen die Tiefe (Kerne ANT 82293, 82294, 82294II und 82295).

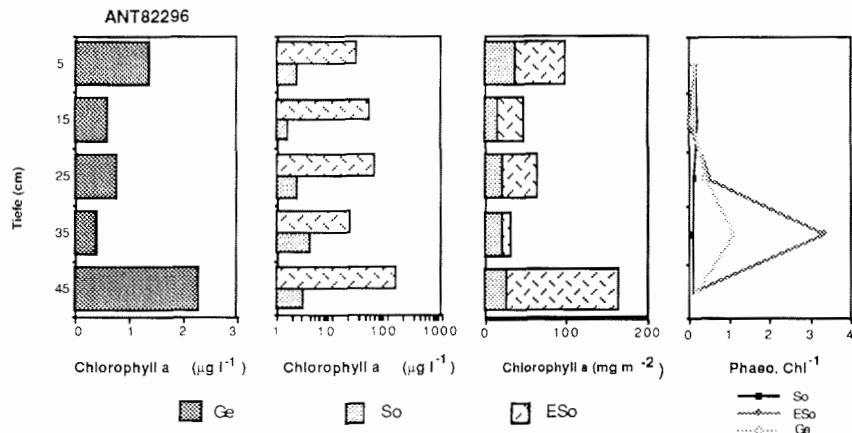


Abb. A4: Die Chlorophyll a Konzentrationen der aufgetauten Kerne (Ge), der Sole (So) und der eingeschlossenen Sole (ESo) gegen die Tiefe (Kern ANT 8296) .

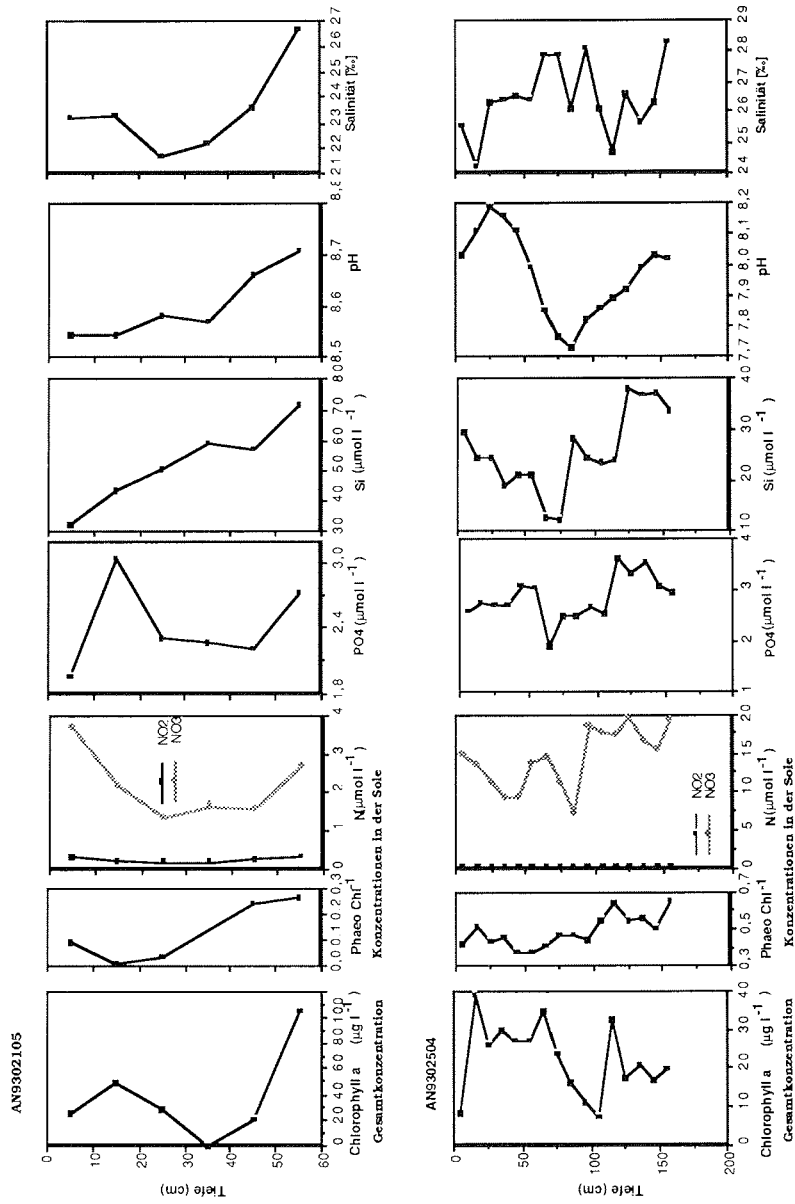


Abb. A5: Die Nährstoffkonzentrationen, pH-Werte und Salinitäten in der ausgeschleuderten Sole, sowie die Gesamtchlorophyllkonzentrationen der Kerne AN 9302105 und AN 9302504.

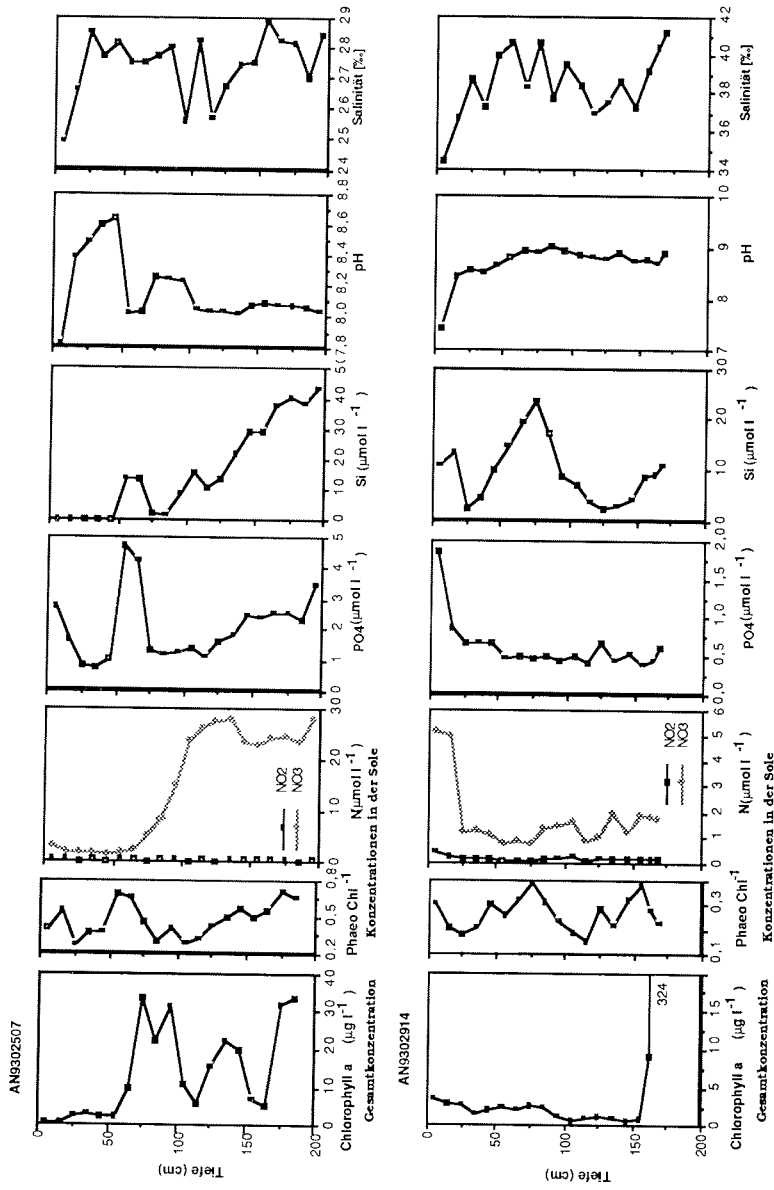


Abb. A6: Die Nährstoffkonzentrationen, pH-Werte und Salinitäten in der ausgeschleuderten Sole, sowie die Gesamtchlorophyllkonzentrationen der Kerne AN 9302507 und AN 9302914.

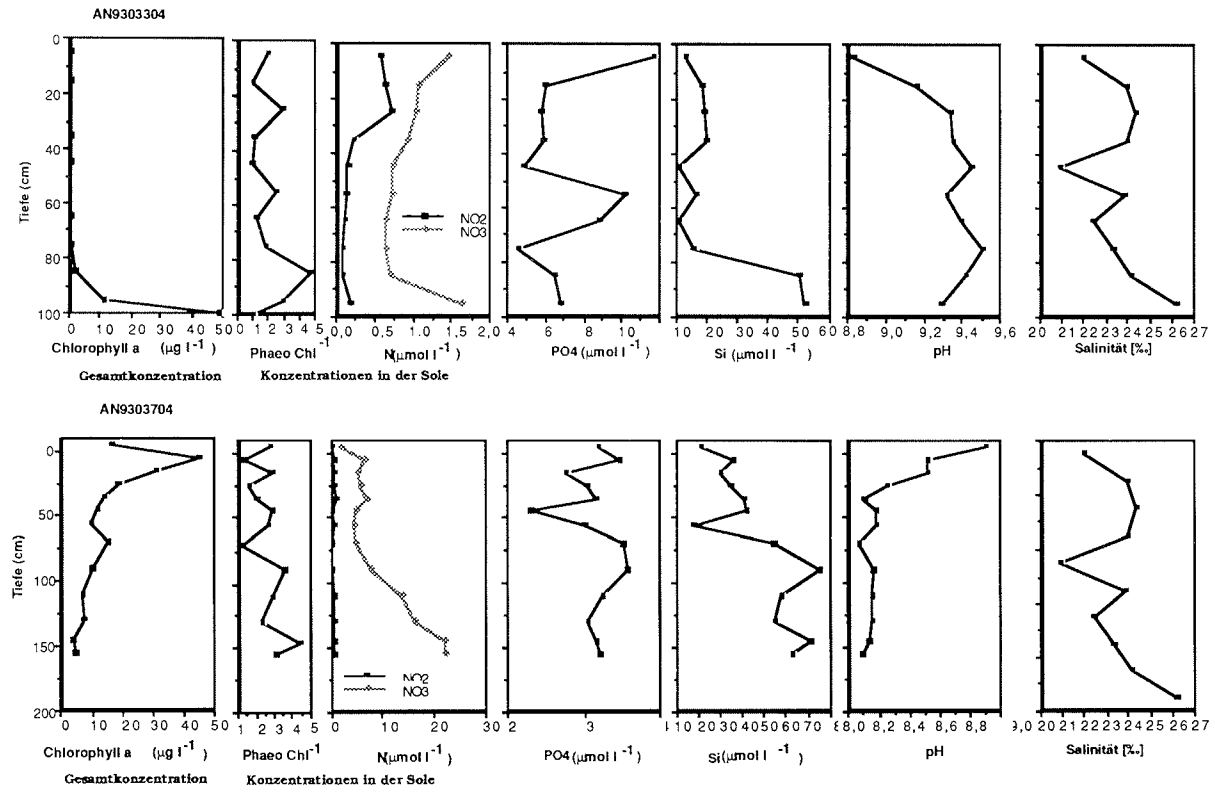


Abb. A7: Die Nährstoffkonzentrationen, pH-Werte und Salinitäten in der ausgeschleuderten Sole, sowie die Gesamtchlorophyllkonzentrationen der Kerne AN 9303304 und AN 9303704.

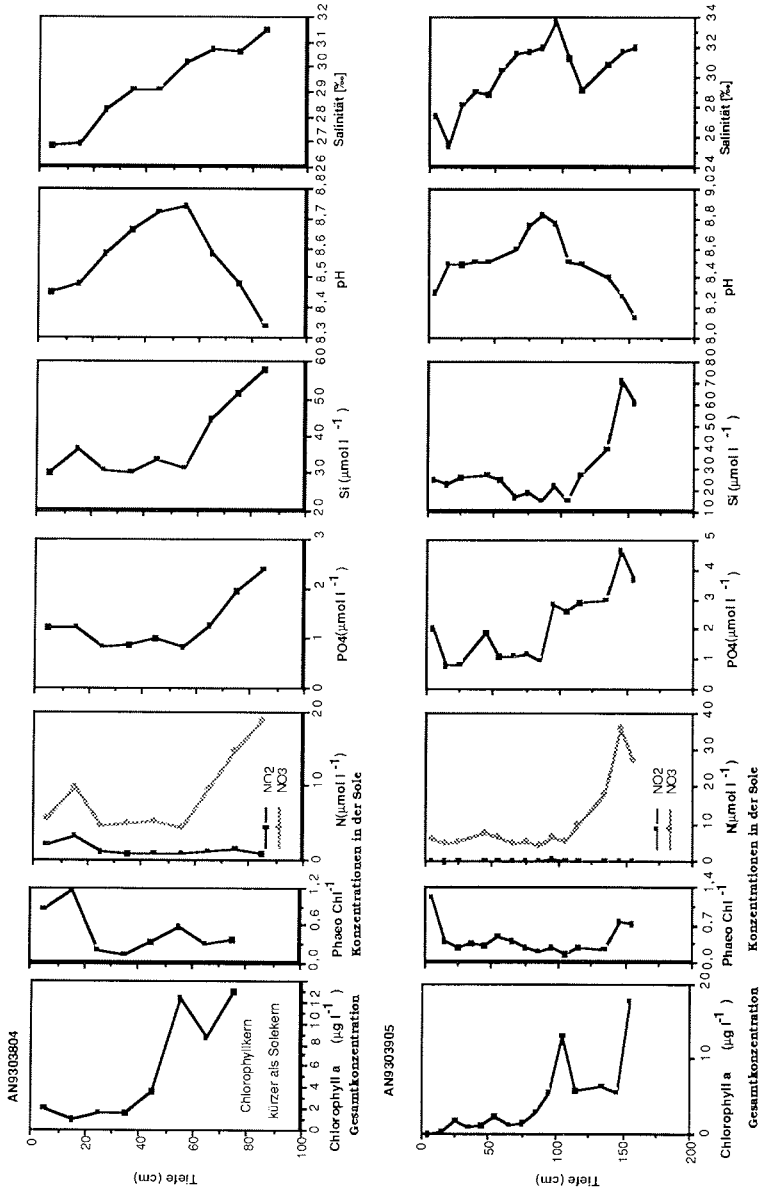


Abb. A8: Die Nährstoffkonzentrationen, pH-Werte und Salinitäten in der ausgeschiederten Sole, sowie die Gesamtchlorophyllkonzentrationen der Kerne AN 9303804 und AN 9303905.

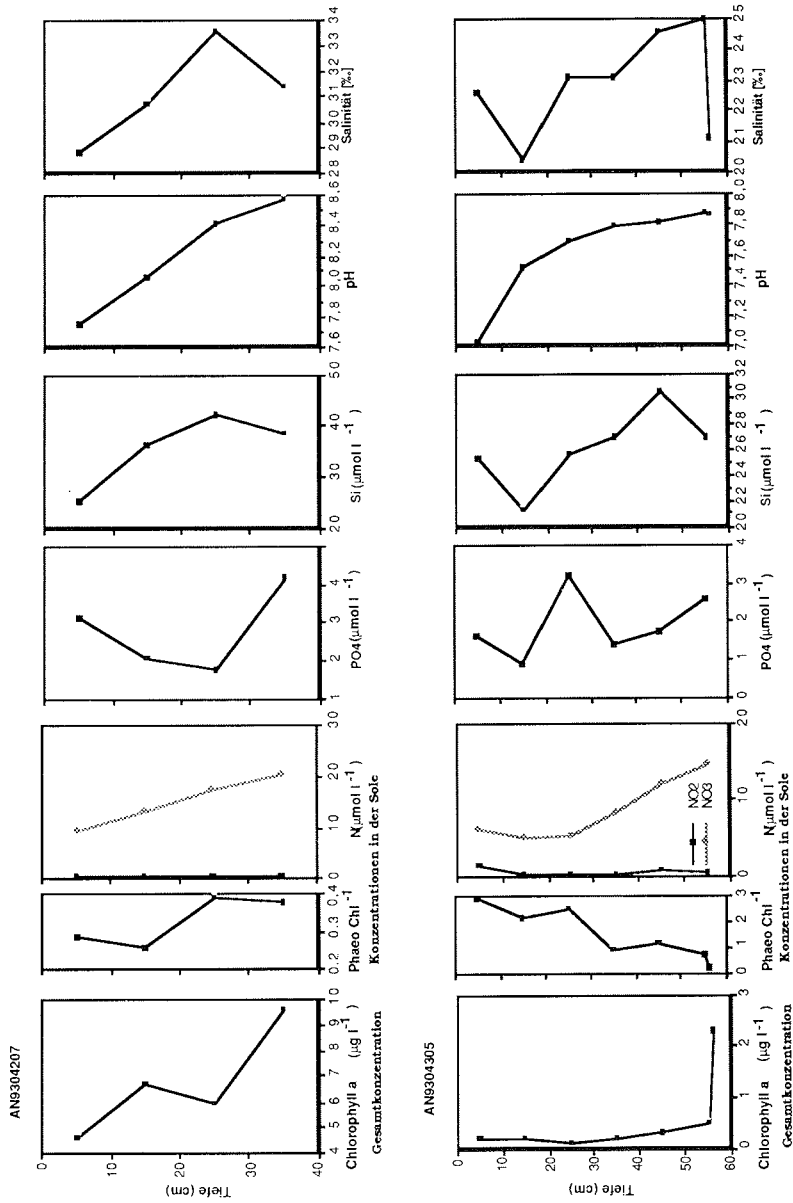


Abb. A9: Die Nährstoffkonzentrationen, pH-Werte und Salinitäten in der ausgeschleuderten Sole, sowie die Gesamtchlorophyllkonzentrationen der Kerne AN 9302105 und AN 9302504.

